

## 持久性有机污染物在中国湖泊生物中分布与富集的研究进展\*

刘东红<sup>1,2</sup>, 陶玉强<sup>1\*\*</sup>, 周文佐<sup>2\*\*</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:** 持久性有机污染物 (POPs) 在环境中分布广泛且持久存在并具有高生物富集性, 通常具有致癌、致畸、致突变等危害。湖泊是 POPs 的主要环境归宿之一, 湖泊中的 POPs 可被水生生物富集并通过食物网传递, 对生态系统及人体健康构成极大的危害。中国是 POPs 生产及使用大国, 也是世界上湖泊较多的国家之一。湖泊生物尤其是水产品是中国人的重要组成部分, 因此 POPs 在中国湖泊生物体中的富集对当地的生态系统和人体健康存在很大的潜在危害。本文通过收集、分析 1997 年—2017 年 7 月公开发表的中国湖泊生物体 POPs 数据, 发现中国湖泊生物中 POPs 富集研究主要集中在东部平原湖区, 青藏高原及云贵高原湖区有少量研究; 不同 POPs 在不同湖区湖泊生物中富集的含量存在较大差异, DDTs 和 HCHs 在各湖区生物中普遍检出且存在明显差异, 东部平原湖区生物体内多氯联苯、多溴联苯醚含量高于其他湖区生物体内含量, 其他 POPs 在湖泊生物体内的富集研究相对较少且主要集中在东部湖泊。中国湖泊生物中 DDTs、HCHs、多环芳烃、多氯联苯、多溴联苯醚、多氯苯并二噁英和多氯苯并呋喃、全氟化合物、全氟辛酸、有机锡及六溴环十二烷脂肪归一化后的平均含量分别为  $454.56 \pm 653.40$ 、 $153.57 \pm 435.99$ 、 $2849.49 \pm 3092.52$ 、 $118.40 \pm 20.28$ 、 $18.40 \pm 20.28$ 、 $17.43 \pm 19.43$ 、 $147.17 \pm 192.93$ 、 $1542.18 \pm 1347.64$ 、 $11380.75 \pm 5316.75$  和  $2.19 \pm 1.92$  ng/g。POPs 在中国湖泊生物体内的含量水平与生物所处营养级、脂肪含量和年龄呈正相关, 但并非完全一致, 还受到生活习性、生物物种与结构、生存环境及生物量等多种因素的影响; 生物不同组织对 POPs 的富集能力有较大差异, 内脏器官对 POPs 的富集能力明显高于肌肉组织。

**关键词:** 持久性有机污染物; 生物富集; 湖泊; 中国; 食物网; 生态风险

## Distribution and accumulation of persistent organic pollutants in aquatic organisms of Chinese lakes

LIU Donghong<sup>1,2</sup>, TAO Yuqiang<sup>1\*\*</sup> & ZHOU Wenzuo<sup>2\*\*</sup>

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China*)

**Abstract:** Persistent organic pollutants (POPs) are usually carcinogenic, teratogenic, and mutagenic. They are widely and persistently present in the environment, and have high bioaccumulation ability by organisms. Lake is one of the main environmental sinks for POPs. POPs in lakes can be accumulated by aquatic organisms and transported through the food webs, which pose great risks to ecosystem and human health. China has the large usage and production of POPs, which also has large amount of lakes. Lake organisms, especially aquatic products, are important parts of the Chinese diet, thereby the enrichment of POPs in Chinese lakes and organisms poses great risks to the local ecosystems and human health. We collected and analyzed large amount of published data on POPs in organisms of Chinese lakes until July 2017. We found that previous studies on bioaccumulation of POPs in Chinese lakes mainly focused in the eastern plain lake area. There were only a few studies in the Qinghai-Tibet Plateau and Yunnan-Guizhou Plateau Lake area. The concentrations of different POPs varied greatly in different lake organisms. DDTs were widely detected with little

\* 国家自然科学基金项目 (41471400)、江苏省杰出青年基金项目 (BK20170049)、中国科学院青年创新促进会项目、国家科技基础性工作专项 (2014FY110400, 2015FY110900-03) 和中国科学院南京地理与湖泊研究所交叉团队项目 (NIGLAS2016TD01) 联合资助。2017-11-07 收稿; 2017-12-29 收修改稿。刘东红 (1991~), 女, 硕士; E-mail: 1064384121@qq.com.

\*\* 通信作者; E-mail: yqtao@niglas.ac.cn; zhouwz@swu.edu.cn.

difference in concentrations in organisms in the studied lakes. The concentrations of HCHs, PCBs; and PBDEs in organisms in the eastern lake area were significantly higher than those in other lake areas. Only a few studies focused on bioaccumulation of other POPs by organisms in lakes, and were mainly in the lakes in the eastern plain. The concentrations of DDTs, HCHs, PAHs, PCBs, PBDEs, PCDD/Fs, PFOSs, PFOAs, Organotins and PHBCDs were  $454.56 \pm 653.40$ ,  $153.57 \pm 435.99$ ,  $2849.49 \pm 3092.52$ ,  $159.22 \pm 272.36$ ,  $18.40 \pm 20.28$ ,  $17.43 \pm 19.43$ ,  $147.17 \pm 192.93$ ,  $1542.18 \pm 1347.64$  and  $2.19 \pm 1.92$  ng/g in organisms of Chinese lakes based on the lipid content. Bioaccumulation of POPs in lake organisms is generally positively related to the trophic level, lipid content and age of organisms, but it is not always true. It is also impacted by factors such as living habits, biological species and composition, living environment and biomass. Bioaccumulation of POPs was also different in different tissues. Bioaccumulation of POPs was higher in liver, gallbladder, heart and head than that in muscle tissues.

**Keywords:** Persistent organic pollutants (POPs); bioaccumulation; lakes; China; food web; ecological risk

持久性有机污染物(POPs)是指人工合成或人类活动产生的能持久存在于环境中、可被生物富集并通过食物链(网)累积、对生态系统及人体健康造成有害影响的化学物质. POPs 来源广泛,在环境各介质中普遍存在<sup>[1]</sup>,多数具有致癌、致畸和致突变等危害,因此其在环境中的赋存及环境行为等受到高度关注. POPs 进入环境后,可以通过直接排放、空气干湿沉降及地表径流等方式进入水环境. 因其具有亲脂性,水环境中的 POPs 极易被生物富集,并不断累积,还可通过食物链(网)传递,最终可进入人体,对生态系统和人体健康构成潜在危害<sup>[1-2]</sup>.

湖泊是地表水体的重要组成部分,在供水、调蓄洪水、渔业、旅游和维护生态系统多样性及物质循环等方面发挥了重要作用<sup>[3]</sup>,此外湖泊还是 POPs 等有毒有害物质的重要蓄积库及二次污染源<sup>[4-5]</sup>. 中国是 POPs 生产及使用大国<sup>[6]</sup>,也是世界上湖泊较多的国家之一<sup>[3]</sup>. 湖泊生物尤其是水产品是中国人饮食中的重要组成部分,因此 POPs 在中国湖泊生物体中的富集对当地的生态系统和人体健康存在很大的潜在风险.

自 1990s 以来,较多学者陆续研究了 POPs 在中国淡水湖泊水生生物体内的富集状况及其特征,但以往研究多集中在少数湖泊及少数 POPs<sup>[7-32]</sup>,缺少大区域的监测和综合研究,阻碍了对中国湖泊生物中 POPs 分布状况及富集特征等的全面深入认识. 为全面了解 POPs 在中国湖泊生物中的分布现状及特征,本文收集了截止到 2017 年 7 月中国湖泊生物体有机氯农药(OCPs)、多环芳烃(PAHs)、多溴联苯醚(PBDEs)、多氯联苯(PCBs)、多氯苯并二噁英(PCDDs)、多氯苯并呋喃(PCDFs)、全氟化合物(PFCs)、六溴环十二烷(PHBCDs)和有机锡等 POPs 的大量公开发表数据,分析了这些 POPs 在中国湖泊生物中的分布现状和富集特征,试图为中国湖泊 POPs 生态风险评估提供数据及理论支撑.

## 1 材料与方法

通过中国期刊网、维普、万方、Web of Science、Google Scholar 等学术搜索引擎收集了截止到 2017 年 7 月的有机氯农药、多环芳烃、多氯联苯、多溴联苯醚等 POPs 在中国湖泊生物体内分布状况及富集特征的近 80 篇公开发表文献,涉及到的各湖泊分布如图 1 所示. 统计了各类 POPs 在湖泊生物体及部分组织内的含量水平及相关的含水率、脂肪含量等数据,分析了 POPs 在中国不同湖泊生物体内的分布状况及规律. 由于所研究生物类别差异较大,各研究结果有的基于脂重含量,有的基于湿重含量,还有的基于干重含量,以往较多研究表明脂肪是 POPs 在生物体中的重要蓄积库,为便于比较不同湖泊生物 POPs 的分布状况,本文按照公式(1)<sup>[9]</sup>和(2)<sup>[33]</sup>将收集到的数据统一换算为脂重含量(lw):

$$\text{POPs 湿重含量} = \text{POPs 干重含量} \times (100 - \text{含水率})\% \quad (1)$$

$$\text{POPs 脂重含量} = \text{POPs 湿重含量} / \text{脂肪含量} \quad (2)$$

原文献中未写明生物含水率、脂肪含量的,以其他参考文献中相同或相似生物的对应该平均值代替. 因缺少相关脂肪含量、含水率及生物组织质量等数据,各生物组织中的 POPs 含量用原文献中的湿重含量或干重含量表示,未按照脂肪含量换算.

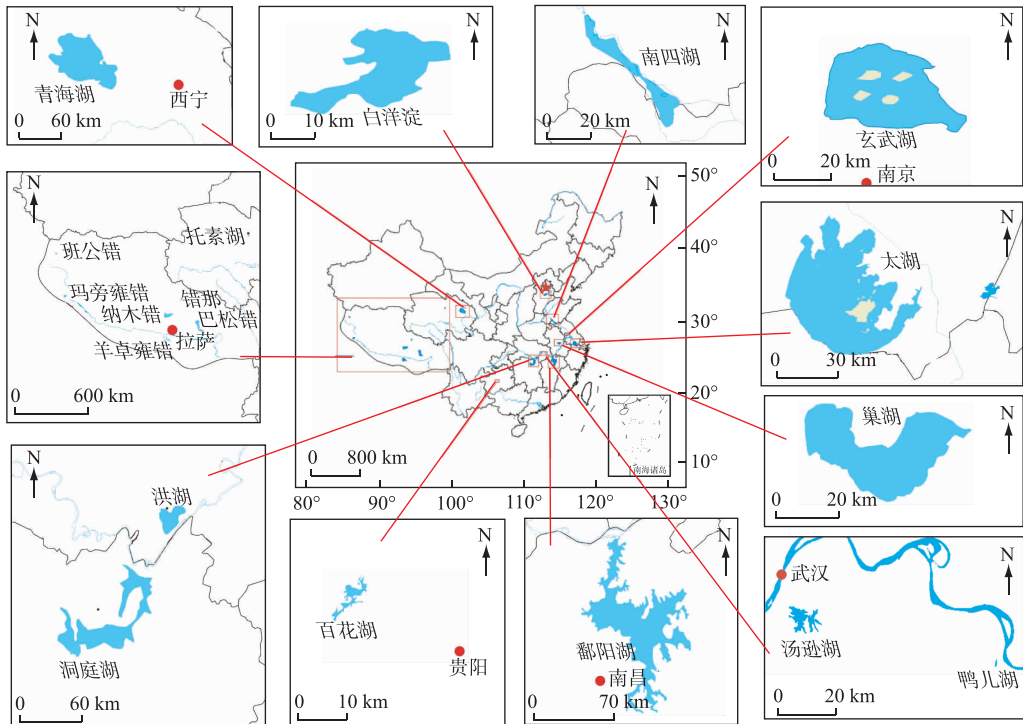


图 1 本综述中相关湖泊的分布位置

Fig.1 Location of the studied lakes for this review

## 2 POPs 在中国湖泊生物中的分布

### 2.1 OCPs 在中国湖泊生物中的分布

自 1990s 来不少学者对中国湖泊生物中 OCPs 分布状况进行了研究,发现 OCPs 在我国湖泊环境中广泛存在且在湖泊生物体内普遍检出<sup>[7-14,25-32,34-48]</sup>,其中 DDTs 和 HCHs 是研究最多的两类 OCPs. 各湖泊水生生物 DDTs 和 HCHs 的分布状况如图 2 所示. 中国湖泊生物中  $\Sigma$ DDTs 含量范围为 11.98~4826.00 ng/g(lw), 平均值为  $454.56 \pm 653.40$  ng/g(lw) ( $n = 105$ ). 空间分布上,青藏高原湖区生物中  $\Sigma$ DDTs 平均含量为  $416.52 \pm 186.07$  ng/g(lw), 东部平原湖区生物中平均含量为  $401.61 \pm 305.96$  ng/g(lw), 云贵高原湖区生物中平均含量为  $213.97 \pm 300.58$  ng/g(lw). 各湖泊生物体内  $\Sigma$ DDTs 平均含量存在较大差异,高低顺序为:洪湖>巢湖>巴松错>羊卓雍错>班公错>玛旁雍错>太湖>措那>青海湖>淀山湖>其他湖泊. 其中洪湖生物体内  $\Sigma$ DDTs 平均含量最高,为  $867.98 \pm 434.20$  ng/g(lw); 其次为巢湖、巴松错、羊卓雍、班公错、太湖、措那、青海湖和淀山湖,生物体内  $\Sigma$ DDTs 平均含量在 300.00~800.00 ng/g(lw) 之间,其余湖泊生物体内 DDTs 含量较低 ( $141.91 \pm 65.84$  ng/g(lw)). 中国湖泊生物体内  $\Sigma$ HCHs 含量范围为 0.50~3405.67 ng/g(lw), 平均值为  $153.57 \pm 435.99$  ng/g(lw) ( $n = 114$ ). 空间分布上,云贵高原湖区生物体内  $\Sigma$ HCHs 平均含量为  $147.02 \pm 80.31$  ng/g(lw), 东部平原湖区平均含量为  $105.53 \pm 75.08$  ng/g(lw), 青藏高原湖区生物体内  $\Sigma$ HCHs 平均含量为  $22.90 \pm 8.52$  ng/g(lw), 各湖区生物体内  $\Sigma$ HCHs 平均含量差异明显,尤其是青藏高原湖区生物体内含量明显低于其他湖区.  $\Sigma$ HCHs 在中国各湖泊生物中的含量分布存在较大差异,高低顺序为:白洋淀>鸭儿湖>百花湖>太湖>巢湖>其他,白洋淀生物体内  $\Sigma$ HCHs 平均含量为  $243.50 \pm 15.22$  ng/g(lw), 显著高于其他湖泊生物体内的平均含量;鸭儿湖、百花湖、太湖和巢湖生物体内  $\Sigma$ HCHs 平均含量依次为  $158.59 \pm 45.68$ ,  $117.99 \pm 454.38$  和  $109.49 \pm 82.18$  ng/g(lw); 其余湖泊生物体内  $\Sigma$ HCHs 平均含量为 12.81~79.15 ng/g(lw). 青藏高原地区湖泊生物体内  $\Sigma$ DDTs 含量高于

东部湖区,其原因主要为:DDTs 是该地区最主要的 OCPs,虽然青藏高原地区人烟稀少,当地农药使用较少,但其 OCPs 主要是由印度半岛大气长距离传送<sup>[52-55]</sup>及孟加拉湾海洋暖流带入<sup>[56]</sup>,且由于当地居民饮食习惯等原因湖泊中鱼类生长周期较长,一般在 10 a 左右<sup>[46]</sup>. 东部地区尽管农业发达,但湖泊渔业发达,且多为经济型鱼类,生长周期短<sup>[42]</sup>,OCPs 在湖泊生物体中的富集时间较短,因此低于青藏高原湖泊生物体内含量.

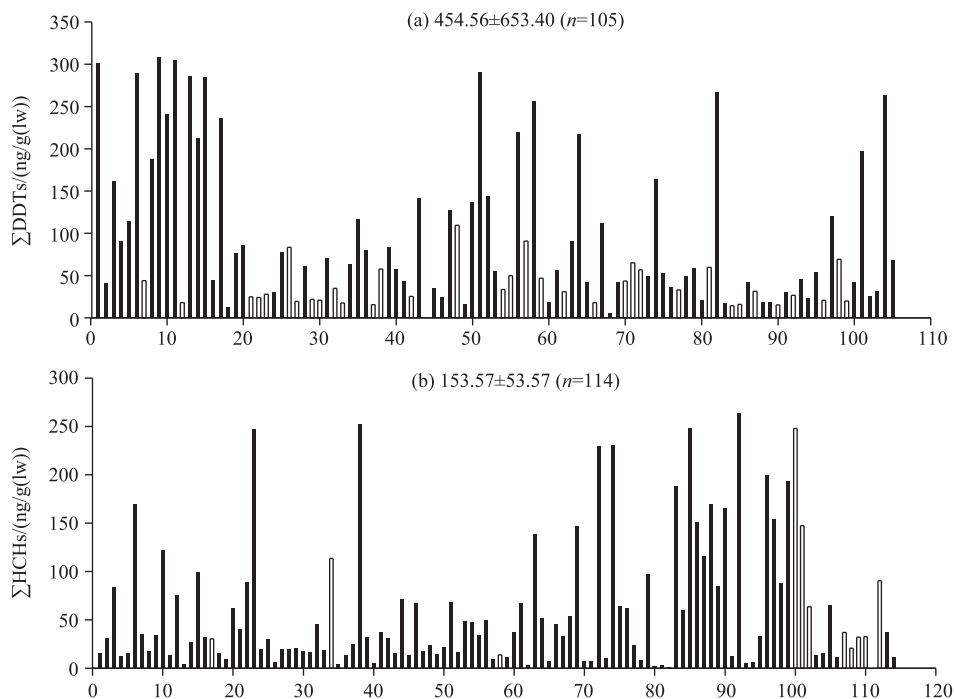


图 2 中国湖泊生物  $\Sigma$ DDTs 含量(a)和  $\Sigma$ HCHs 含量(b)  
(黑色柱代表实际含量;图 a 中白色柱代表实际含量的 1/10,横坐标序号见附表 1;  
图 b 中白色柱代表实际含量的 1/30,横坐标序号见附表 2)

Fig.2 Concentrations of  $\Sigma$ DDTs (a) and  $\Sigma$ HCHs (b) in organisms of Chinese lakes

史双昕等 2006 年 4—9 月在太湖和洞庭湖设置 15 个样点采集野生青虾(wild shrimps)并对其肌肉组织中 OCPs 含量进行检测发现:太湖青虾肌肉中 HCB 和  $\Sigma$ DDTs 平均含量分别为 8.49 和 41.28 ng/g(lw),洞庭湖青虾 HCB 和  $\Sigma$ DDTs 平均含量为 40.51 和 55.38 ng/g(lw);洞庭湖青虾肌肉中 OCPs 含量略高于太湖,两湖青虾肌肉中 OCPs 含量在枯水期多数高于丰水期<sup>[14]</sup>. 边学森等 2003—2004 年期间分析了太湖五里湖、湖州、常州雪堰和宜兴大浦 4 个采样点生物中的 DDTs 和 HCHs 含量,结果表明:2003 年背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)中  $\Sigma$ DDTs 含量范围为 72.26~174.23 ng/g,2004 年为 27.99~177.07 ng/g(lw),与 2003 年相比没有明显改变. 空间分布上,2004 年太湖各湖区蚌中  $\Sigma$ DDTs 含量为五里湖>湖州>常州雪堰>宜兴大浦,宜兴大浦生物体  $\Sigma$ DDTs 含量显著低于其他各点;2003 年生物体  $\Sigma$ HCHs 含量为 30.21~79.65 ng/g,2004 年为 5.80~81.87 ng/g(lw),2004 年含量较 2003 年有所降低. 空间分布上,2004 年太湖各湖区蚌中  $\Sigma$ HCHs 含量为宜兴大浦>湖州>常州雪堰>无锡五里湖. 与国内外相关结果相比,太湖贝类的  $\Sigma$ DDTs 和  $\Sigma$ HCHs 含量处于中高水<sup>[29,31]</sup>平,但总含量未超过国内外相关的食品安全限量标准,残留量远低于“无公害食品水产品中有毒有害物质限量”(2 mg/kg(ww),NY 5073—2001)和美国食品与药品管理局(FDA)规定的鱼类最大残留限量(5 mg/kg(lw)). 姜珊于 2015 年 6 月测定了巢湖主要湖口铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)中 OCPs 含量,其范围为 236.67~325.83 ng/g(lw),平均值为 265.83±38.89 ng/g(lw),其中  $\Sigma$ HCHs 和  $\Sigma$ DDTs 的平均值分别为 77.29±15.21 和 125.46±39.12 ng/g(lw),是主要的有机氯农药;与其他地区相比,巢湖铜锈环棱螺体内

$\Sigma$ OCPs 含量处于中等污染水平,但未超过相关标准的最大残留限量标准值<sup>[36]</sup>. Yang 等 2005 年 8 月在纳木错和羊卓雍错分别采集了鱼样,测定得到纳木错鱼体内 HCB、 $\Sigma$ HCHs 和  $\Sigma$ DDTs 含量分别为 123.55、100.39 和 888.03 ng/g(lw),羊卓雍错鱼体内 HCB、 $\Sigma$ HCHs 和  $\Sigma$ DDTs 含量分别为 52.47、98.77 和 172.84 ng/g(lw),纳木错鱼体内 OCPs 含量明显高于羊卓雍错鱼体内含量<sup>[47]</sup>;Yang 等又在 2006 和 2007 年 8 月分别在青海湖、措那、纳木错、羊卓雍错、托素湖、巴松错、玛旁雍错和班公错采集鱼样并测定了 HCB、HCHs 和 DDTs 含量,8 个湖泊的鱼体内 HCB、 $\Sigma$ HCHs 和  $\Sigma$ DDTs 平均含量分别为 22.47~140.54、59.63~232.95 和 247.93~2739.24 ng/g(lw),玛旁雍错的鱼体内 OCPs 含量最高,托素湖最低<sup>[48]</sup>(图 3). 纳木错鱼体内 HCB、 $\Sigma$ HCHs 和  $\Sigma$ DDTs 含量为 0.14、0.73 和 3.74 ng/g(ww),与 2005 年相比<sup>[47]</sup>,纳木错鱼体 OCPs 含量有明显降低,羊卓雍错变化不大.

## 2.2 PAHs 在中国湖泊生物中的分布

中国湖泊生物中 16 种优先控制的 PAHs 总含量范围为 289.00~17877.26 ng/g(lw),平均值为 2849.4±3092.52 ng/g(lw)(n=45)(图 4). PAHs 在中国湖泊生物体内分布研究主要集中在东部地区. 不同湖泊生物体内  $\Sigma$ PAHs 含量差异不显著,各湖泊生物中  $\Sigma$ PAHs 含量依次为:鄱阳湖(4529.46±1735.83 ng/g(lw))>巢湖(4192.79±1735.83 ng/g(lw))>南四湖(3065.77±837.65 ng/g(lw))>白洋淀(2460.73±1497.02 ng/g(lw))>太湖(2352.59±3601.75 ng/g(lw))(图 5a)<sup>[10,23,49-51,57-58]</sup>.

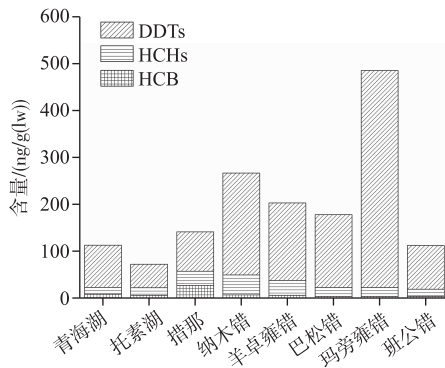


图 3 青藏高原湖泊群  $\Sigma$ DDTs、 $\Sigma$ HCHs 和  $\Sigma$ HCB 含量分布(修改自文献[48])

Fig.3 Concentrations of  $\Sigma$ DDTs,  $\Sigma$ HCHs, and  $\Sigma$ HCB in lakes of Tibetan Plateau

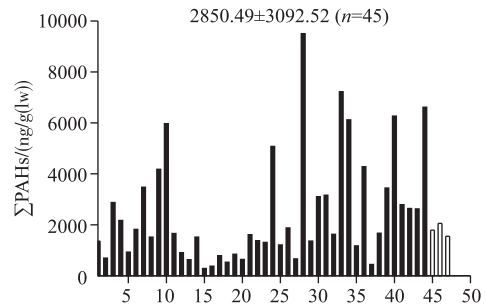


图 4 中国湖泊生物中的  $\Sigma$ PAHs 含量(黑色柱代表实际含量;最后 3 个白色柱自左向右分别代表原含量的 1/10、1/100 及 1/10000;横坐标序号见附表 3)

Fig.4 Concentrations of  $\Sigma$ PAHs in organisms of Chinese lakes

Wang 等 2009 年采集并研究了太湖 24 种鱼类体内 16 种优先控制的 PAHs 的分布状况及特征,发现太湖鱼体内  $\Sigma$ PAHs 平均含量为 289.00~9500.00 ng/g(lw),其中乔丁鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)体内  $\Sigma$ PAHs 平均含量最低,鲢鱼(*Silurus asotus*)体内平均含量最高. 鱼体内 PAHs 主要由由低分子量的三环 PAHs,如菲、芴、荧蒹和芘等组成,占  $\Sigma$ PAHs 的 63.0%,其中菲是主要的同系物,占  $\Sigma$ PAHs 的 45.8%. 其还从营养级角度分析了食用太湖不同营养级鱼类给人体健康带来的风险,认为鱼体内 PAHs 含量会随着鱼体所在营养级的增加而增加,与低营养级鱼类相比,高营养级鱼体的污染含量更高. 与其他研究相比,太湖 24 种鱼类  $\Sigma$ PAHs 含量处于中等污染水平,其中鲫鱼(*Carassius auratus*) $\Sigma$ PAHs 含量为 931.00 ng/g(lw),低于 Ke 等测定同一水域中鲫鱼的  $\Sigma$ PAHs 含量 2258.62 ng/g(lw)<sup>[10-11]</sup>. 秦宁等 2009 年 11 月在巢湖采集了团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)、银鱼(*Hemisalanx prognathus* Regan)、鳊鱼(*Aristichthys nobilis*)、鲤鱼(*Cyprinus carpio*)和翘嘴鲌(*Culter alburnus* Basilewsky)等 9 种主要水产品,并对样品肌肉中的 PAHs 进行了检测,发现  $\Sigma$ PAHs 平均含量为 4189.56±2082.96 ng/g(lw), $\Sigma$ PAHs 在各生物内的含量分别为:螺(7221.41 ng/g(lw))>翘嘴鲌(6101.21 ng/g(lw))>鲤鱼(5968.84 ng/g(lw))>鲫鱼(3473.56 ng/g(lw))>团头鲂(2870.16 ng/g(lw))>银鱼(5079.09 ng/g(lw))>秀丽白虾(1626.45 ng/g(lw))>鳊鱼(1175.73 ng/g(lw)),产品中仍然以低环 PAHs

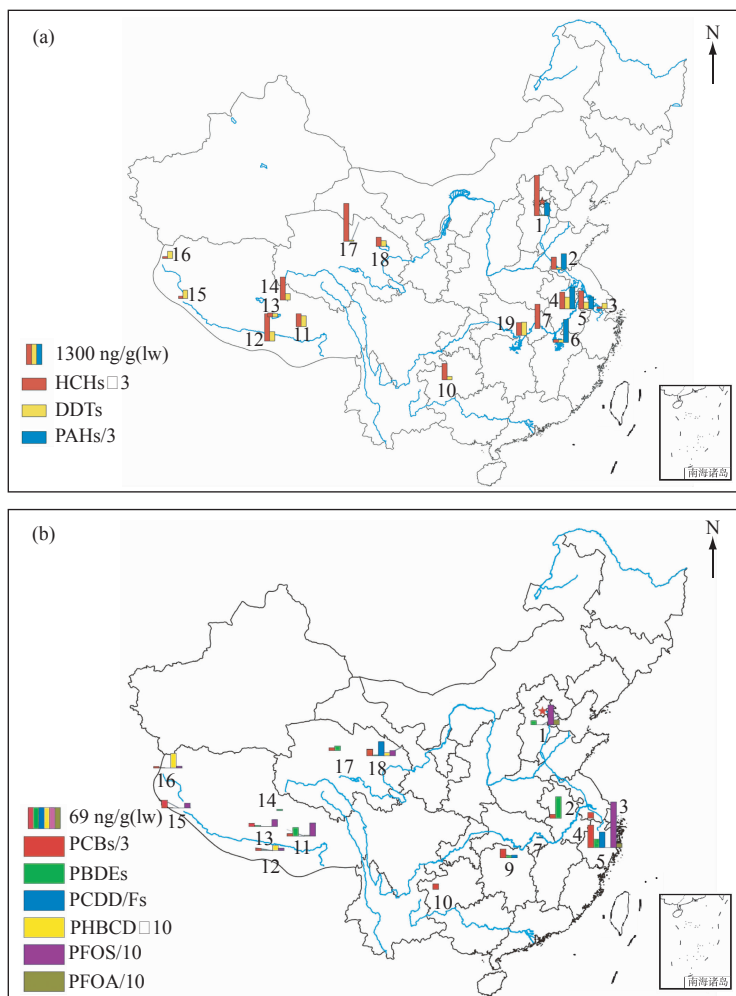


图5 中国湖泊生物  $\Sigma$ HCHs、 $\Sigma$ DDTs 和  $\Sigma$ PAHs 含量分布(a); 中国湖泊生物中  $\Sigma$ PCBs、 $\Sigma$ PBDEs、 $\Sigma$ PCDD/Fs、 $\Sigma$ PHBCDs、 $\Sigma$ PFOSs 和  $\Sigma$ PFOAs 含量分布(b) (1.白洋淀<sup>[33,37-40,50-51,66,75]</sup>; 2.南四湖<sup>[43-44,71]</sup>; 3.淀山湖<sup>[45]</sup>; 4.巢湖<sup>[34-36,49,59]</sup>; 5.太湖<sup>[8-18,20-24,26-32,58,61,72-74,82]</sup>; 6.鄱阳湖<sup>[41-42,70]</sup>; 7.鸭儿湖<sup>[67,79]</sup>; 8.汤逊湖<sup>[80]</sup>; 9.洞庭湖<sup>[14,19,65,69,76-77,83]</sup>; 10.百花湖<sup>[25]</sup>; 11.巴松错<sup>[47-48,62-63,68]</sup>; 12.羊卓雍错<sup>[47-48,62-63,68]</sup>; 13.纳木错<sup>[47-48,62-63,68,81]</sup>; 14.措那<sup>[47-48,62-63]</sup>; 15.玛旁雍错<sup>[47-48,62-63,68]</sup>; 16.班公错<sup>[47-48,62-63,68]</sup>; 17.托素湖<sup>[47-48,62-63]</sup>; 18.青海湖<sup>[47-48,62-63,68,78]</sup>; 19.洪湖<sup>[46]</sup>)

Fig.5 Concentrations of  $\Sigma$ HCHs,  $\Sigma$ DDTs and  $\Sigma$ PAHs in organisms of Chinese lakes(a); concentrations of  $\Sigma$ PCBs,  $\Sigma$ PBDEs,  $\Sigma$ PCDD/Fs,  $\Sigma$ PHBCDs,  $\Sigma$ PFOSs and  $\Sigma$ PFOAs in organisms of Chinese lakes(b)

为主,占  $\Sigma$ PAHs 总量的 40.1% ~ 89.1%,其中螺体内中、高环比重分别占 26.0% 和 33.9%,明显高于其他生物<sup>[50]</sup>. Tao 等测定了 2013 年 12 月—2015 年 2 月南京玄武湖藻类中 10 种 PAHs 总含量范围为 129.63 ~ 26060.56  $\mu\text{g/g(lw)}$ ,平均值为  $5289.81 \pm 1317.04 \mu\text{g/g(lw)}$  ( $n=34$ ),同时期玄武湖浮游动物(枝角类和桡足类)中 10 种 PAHs 总含量范围为 788.30 ~ 275237.39  $\mu\text{g/g(lw)}$ ,平均值为  $25679.55 \pm 9036.59 \mu\text{g/g(lw)}$  ( $n=34$ ),发现年尺度下温度是驱动玄武湖藻类生物量的主要因素,藻中各多环芳烃对数含量与藻类对数生物量呈显著的负相关关系<sup>[57]</sup>,此外,还测定出 2015—2016 年春、夏和冬季太湖藻类中 16 种 PAHs 含量分别为  $549.86 \pm 94.08 \mu\text{g/g}$  ( $n=23$ )、 $60.61 \pm 10.91 \mu\text{g/g}$  ( $n=20$ ) 及  $83.10 \pm 12.25 \mu\text{g/g}$  ( $n=14$ ),春季藻类中多环芳烃含量



最高,夏季最低.藻中各多环芳烃对数含量与藻类对数生物量呈显著的负相关关系,表明多环芳烃在藻中的富集受生物稀释和生物泵效应影响<sup>[58]</sup>.

### 2.3 PCBs 和 PBDEs 在中国湖泊生物中的分布

中国湖泊生物体内  $\Sigma$ PCBs 含量范围为 n.d.~1977.04 ng/g(lw),平均值为  $159.22\pm 272.36$  ng/g(lw) ( $n=100$ ) (图 6a),低于国家食品安全标准食品中污染物限制 0.5 mg/kg(ww). 目前  $\Sigma$ PCBs 在中国湖泊生物体内分布的研究主要集中在东部地区湖泊<sup>[15-19,44-45,59,73]</sup>,青藏高原地区及云贵高原地区湖泊有少量研究<sup>[25,48,62]</sup>. 空间上,东部平原湖区生物体  $\Sigma$ PCBs 平均含量最高,为  $92.16\pm 61.22$  ng/g(lw),其次为云贵高原湖区,平均含量为  $22.63\pm 16.10$  ng/g(lw),青藏高原湖区平均含量最低,为  $14.25\pm 11.72$  ng/g(lw) (图 5b).  $\Sigma$ PCBs 在各湖泊生物体内的平均含量为:太湖>洞庭湖>淀山湖>青海湖>玛旁雍错>百花湖>纳木错>其他,各湖泊生物体内平均含量分别为  $203.62\pm 323.10$ 、 $78.73\pm 62.56$ 、 $53.15\pm 46.96$ 、 $35.17\pm 16.26$ 、 $27.75\pm 11.58$ 、 $22.63\pm 16.10$  和  $21.03\pm 8.69$  ng/g(lw),其余湖泊生物体内  $\Sigma$ PCBs 含量较低且各湖间差异较小,平均含量在 10 ng/g(lw) 以下.  $\Sigma$ PBDEs 含量范围为 0.31~110.00 ng/g(lw),平均值为  $18.40\pm 20.28$  ng/g(lw) ( $n=87$ ) (图 6b). 空间分布上,各湖区生物体内  $\Sigma$ PCBs 平均含量差异显著,东部平原湖区生物体内  $\Sigma$ PCBs 平均含量为  $27.66\pm 22.82$  ng/g(lw),显著高于青藏高原湖区生物体内平均含量  $6.65\pm 8.22$  ng/g(lw) (图 5b). 各湖泊生物体内  $\Sigma$ PBDEs 平均含量为:巢湖>巴松错>太湖>克鲁克>白洋淀>其他. 巢湖生物体内  $\Sigma$ PBDEs 平均含量最高,为  $65.46\pm 13.09$  ng/g(lw),显著高于巴松错生物体内含量  $25.77\pm 13.96$  ng/g(lw),其次为太湖、托素湖和白洋淀,其平均含量分别为  $25.41\pm 22.14$ 、 $13.80$  和  $12.84\pm 17.31$  ng/g(lw),其余湖泊生物体内含量处于较低水平,均低于 10 ng/g(lw). 分析其原因可能主要与当地污染物使用情况及周围环境有关,东部地区使用含有这两类污染物的产品较多,排放量大<sup>[60]</sup>;而青藏高原地区湖泊生物体内含量较高是由于大气长距离传输<sup>[54]</sup>及在生物体内富集时间较长所致.

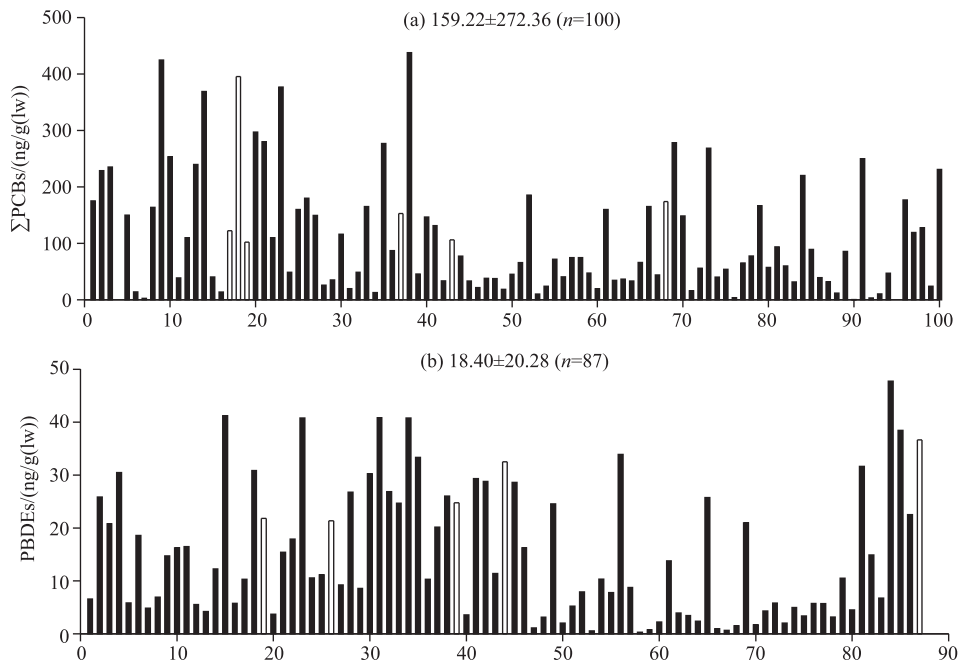


图 6 中国湖泊生物体内  $\Sigma$ PCBs (a) 和  $\Sigma$ PBDEs (b) 含量 (黑色柱代表实际含量;图 a 中空白柱代表实际含量的 1/5,横坐标序号见附表 4;图 b 中空白柱代表实际含量的 1/3,横坐标序号见附表 5)

Fig.6 Concentrations of  $\Sigma$ PCBs (a) and  $\Sigma$ PBDEs (b) in organisms of Chinese lakes

张少欢和 Yu 等 2009 年 9 月在太湖采集了草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*)、鲫鱼、鲢鱼、斜方鲮 (*Acheilognathus rhombeus*) 等 24 种鱼类, 发现鱼体内  $\Sigma$ PBDEs 和  $\Sigma$ PCBs 的总含量范围分别为 8.59~74.28 和 10.30~165.20 ng/g(lw); 对于不同食性的鱼类而言, 肉食性鱼类体内  $\Sigma$ PBDEs 和  $\Sigma$ PCBs 的平均含量均最高, 草食性鱼类  $\Sigma$ PBDEs 含量最低, 杂食性鱼类  $\Sigma$ PCBs 含量最低<sup>[15,61]</sup>. 张东平等 2010 年测定了太湖刀鲚 (*Coilia macrognathos* Bleeker)、红鳍原鲃 (*Cultrichthys erythropterus*)、似刺鲃 (*Paracanthobrama guichenoti* Bleeker) 和太湖新银鱼 (*Neosalanx taihuensis*) 中的 PCBs, 各鱼体  $\Sigma$ PCBs 含量分别为 13.74、33.27、66.11 和 19.62 ng/g(lw), 除太湖新银鱼外, 其余鱼体内  $\Sigma$ PCBs 含量与前一年相比均有所下降<sup>[74]</sup>. 魏玲霞等 2011 年 4 月在淀山湖采集 8 种生物并测定其体内的 PCBs 含量, 发现: 在铜锈环棱螺体内未检出 PCBs, 乌鳢 (*Ophiocephalus argus* Cantor) 体内  $\Sigma$ PCBs 含量最高, 为 148.54 ng/g(lw), 各生物体内  $\Sigma$ PCBs 含量为: 乌鳢 (148.54 ng/g(lw)) > 鲫鱼 (118.29 ng/g(lw)) > 麦穗鱼 (*Pseudorasbora parva*) (54.14 ng/g(lw)) > 大鳍鲮 (45.33 ng/g(lw)) > 泥鳅 (40.18 ng/g(lw)) > 河川沙塘鳢 (*Odontobutis potamophila*) (16.03 ng/g(lw)) > 日本沼虾 (2.7 ng/g(lw)) > 铜锈环棱螺 (n.d.)<sup>[45]</sup>. Su 等 2009—2012 年连续 4 年在太湖采集并分析了鲤鱼、黄鲢鱼及虾对 PBDEs 的富集状况, 发现鲢鱼和虾体内  $\Sigma$ PBDEs 含量年际变化较大, 鲤鱼体内  $\Sigma$ PBDEs 含量年际变化较小, 2012 年生物体内  $\Sigma$ PBDEs 含量较前 2 年有明显升高<sup>[18]</sup>, 其中鲤鱼体内  $\Sigma$ PBDEs 含量与 Yu 等<sup>[74]</sup> 的研究较符合. Yang 等 2007—2008 年测定了青藏高原 8 个湖泊鱼体内的 PCBs 和 PBDEs 含量, 发现 PCBs 在青藏高原 8 个湖泊鱼体内均有不同程度的富集且具有明显差异, 其中青海湖鱼体内  $\Sigma$ PCBs 含量最高, 为  $36.06 \pm 15.00$  ng/g(lw), 班公错鱼体内  $\Sigma$ PCBs 含量最低, 为  $2.50 \pm 1.98$  ng/g(lw)<sup>[62]</sup>; 除巴松错生物中  $\Sigma$ PBDEs 含量 ( $25.77 \pm 13.96$  ng/g(lw)) 显著高于其他湖泊以外, 其他 7 个青藏高原湖泊鱼体内  $\Sigma$ PBDEs 含量差异较小, 平均含量为  $3.92 \pm 1.22$  ng/g(lw)<sup>[63]</sup> (图 5b).

#### 2.4 其他 POPs 在中国湖泊生物中的分布

除上述 OCPs、PCBs、PAHs 等几种常见污染物外, PCDD/Fs、PFCs、PHBCDs、有机锡 (Organotin) 等污染物在中国湖泊生物体中的富集也有少量研究. 如王璞等 2006 年研究了青海湖鲤鱼 (*Gymnocypris przewalskii*) 体内 PCDD/Fs 含量, 其范围为 5.71~7.05 pg/g(lw), 平均值为  $6.25 \pm 0.59$  pg/g(lw)<sup>[64]</sup>; 胡余明 2013 年测定了洞庭湖鱼体内 PCDD/Fs 含量, 其范围为 43.41~1488.07 pg/g(lw), 平均值为  $225 \pm 8.30$  pg/g(lw)<sup>[65]</sup>, 明显高于青海鱼类体内 PCDD/Fs 的含量<sup>[64]</sup>. Zhen 等 2010 年 10 月在白洋淀采集槐叶萍 (*Salvinia natans*)、鲤鱼、蟹等动植物样品并测定其体内 16 种 PFCs (13 种全氟羧酸类化合物 (PFCA) 及 3 种聚合硫酸硅铝铁化合物 (PFSA)), 发现这些生物中  $\Sigma$ PFCs 含量范围为 726.50~1353.08 ng/g(lw), 虾中含量最高, 槐叶萍中含量最低; 高氟化合物 (PFOSs) 和全氟辛酸 (PFOAs) 是最主要的 PFCs 组成部分, 含量范围为 335.00~860.35 和 103.50~207.39 ng/g(lw), 分别占 PFCs 总含量的 40% 和 20%<sup>[66]</sup>; Fang 等 2012 年 5 月在太湖采集了浮游动植物、虾、鲢鱼等十几种生物样品并测定了其体内 PFOAs、PFOSs 和 PFASs 含量, 其范围分别为 4.19~641.43 ng/g(lw) (平均值为  $130.73 \pm 158.78$  ng/g(lw))、78.89~2642.86 ng/g(lw) (平均值为  $1382.70 \pm 1174.52$  ng/g(lw)) 和 432.79~4376.66 ng/g(lw) (平均值为  $1997.63 \pm 1340.11$  ng/g(lw))<sup>[24]</sup>, 其中  $\Sigma$ PFOAs 和  $\Sigma$ PFOSs 含量高于 Zhen 等<sup>[66]</sup> 测定的白洋淀生物体中的含量. Yang 等 2004 年在太湖湖州、雪雁、三山岛、大浦和五里湖采集了背角无齿蚌并测定了其体内有机锡含量, 发现太湖背角无齿蚌体内总有机锡含量范围为 1753.09~20901.23 ng/g(lw), 空间分布上, 各采样点含量为: 大浦 ( $17757.58 \pm 657.00$  ng/g(lw)) > 雪雁 ( $14469.14 \pm 8111.11$  ng/g(lw)) > 三山岛 ( $9654.32 \pm 4691.36$  ng/g(lw)) > 五里湖 ( $3641.98 \pm 518.52$  ng/g(lw)), 其中大浦生物体内含量显著高于其他各点<sup>[21]</sup>. Zhu 等在 2007—2011 年采集了青藏高原湖泊中的生物并测定了其体内的 PHBCDs, 发现这些湖泊生物体内的  $\Sigma$ PHBCDs 含量范围为 0.24~5.94 ng/g(lw), 平均值为  $2.19 \pm 1.92$  ng/g(lw), 各湖泊生物体中  $\Sigma$ PHBCDs 含量为: 巴松错 ( $2.19 \pm 0.40$  ng/g(lw)) > 羊卓雍错 ( $1.62 \pm 2.28$  ng/g(lw)) > 班公错 ( $0.93 \pm 1.29$  ng/g(lw)) > 青海湖 ( $0.74 \pm 1.05$  ng/g(lw))<sup>[68]</sup>.

### 3 中国湖泊 POPs 生物富集特征

了解 POPs 在食物链上的积累和传递机制是掌控其风险评估的关键. POPs 的生物积累与传递是由其具有高亲脂性、高生物惰性性质决定的. POPs 在中国湖泊生物体内的富集与生物所处营养级、脂肪含量、年



龄、生存环境、生活习性、食物链长度及结构、生物物种及生物量等诸多因素有关。

### 3.1 POPs 含量与脂肪含量及生物所处营养级的关系

很多学者研究表明 POPs 在生物体内的含量与生物脂肪含量及生物所处营养级呈正相关。如 Zhao 等 2006 年在太湖采集了河蚬 (*Corbicula fluminea*) 和铜锈环棱螺并测定其体内 OCPs 含量,发现铜锈环棱螺体内 OCPs 含量显著低于河蚬体内的含量,进一步将生物体内 OCPs 含量与脂肪含量进行相关分析,发现 OCPs 在生物体内的含量与脂肪含量存在正相关关系(图 7a)<sup>[32]</sup>。崔庆兰 2009 年测定了太湖河蚌、田螺、虾、鲤鱼、刀鲚、秋刀鱼、昂刺鱼等 7 种水生生物体内的 OCPs 和 PCBs 含量,发现各生物体内 OCPs 和 PCBs 含量与其所在营养级高低顺序基本一致(图 7b)<sup>[9]</sup>,即 POPs 含量随营养级的升高而增大,但并不完全一致,可能受鱼龄、生存环境、脂肪含量等因素的影响,是多种因素综合作用的结果<sup>[9]</sup>。

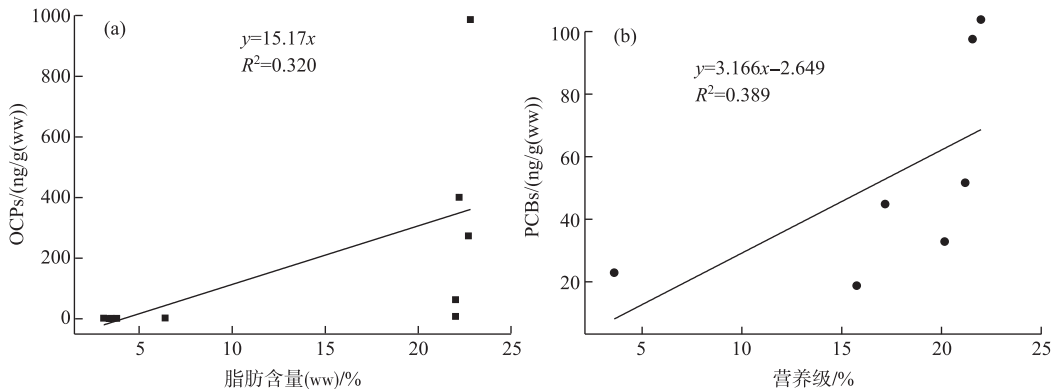


图 7 生物体内 POPs 含量与脂肪含量(a)和营养级(b)的相关性(修改自文献[32]和[9])

Fig.7 Correlation between the concentrations of OCPs in organisms and lipid content (a), and trophic level (b)

### 3.2 POPs 含量与生物所处环境的关系

湖泊生物体内 POPs 分布含量受到生物生存环境的影响。Wang 等于 2009 年 9 月在太湖采集了 24 种草食性、杂食性及肉食性鱼类,ΣOCPs 含量为:草食性鱼类(462.33±326.47 ng/g(lw))>肉食性鱼类(391.19±187.67 ng/g(lw))>杂食性鱼类(386.80±169.42 ng/g(lw)),分析其原因:草食性鱼类虽然脂肪含量低,但因草食性鱼类尤其是淡水鱼类养殖区附近一般有农田,更易受到 OCPs 的污染;另外,草食性鱼类主要以水草和植物性饲料为食,这些饲料中可能有较高的 OCPs 残留;此外,由于草食性鱼类习惯生活在中下水层,而 OCPs 易累积在沉积物中,这也可能导致草食性鱼类 OCPs 含量较高<sup>[10-11]</sup>。苏秋克等发现洪湖生物体内 OCPs 含量为:鲫鱼>鳊鱼>螃蟹>莲藕(*Nelumbo nucifera Gaertn*)>菱角(*Trapa bispinosa Roxb*);动物体内 OCPs 含量高于植物中的含量,生活在湖水底层的鲫鱼体内 OCPs 含量高于生活在湖水表层的鳊鱼体内含量,生长在沉积物中的莲藕的 OCPs 含量高于生活在水中的菱角含量。这些研究说明水生生物体内 OCPs 含量与生存环境等因素有关<sup>[46]</sup>。

### 3.3 POPs 含量与食物链等级及长度的关系

中国湖泊生物体内 POPs 含量基本随着食物链等级的升高而逐渐增大,但也不完全一致。窦薇等分析了 HCBs 和 DDTs 在白洋淀水生食物链中的富集,结果表明:白洋淀水体和底泥中 HCBs 和 DDTs 含量很低,而生物体内 HCBs 和 DDTs 含量很高;水生植物、浮游生物、底栖无脊动物、当年生鲫鱼和 2 年乌鳢的 BHC 和 DDT 生物富集因子分别为 63.00、100.00、126.00、57.00 和 369.00 及 63.00、210.00、379.00、194.00 和 1244.00,表明白洋淀 POPs 生物富集因子随食物网营养级的升高而逐级增大<sup>[37]</sup>。Zhang 等 2011 年测定了南四湖水、表层沉积物、水生植物(菹草、莲等)和水生动物(青虾、鲫鱼等)的 OCPs 含量,发现水生动物中 ΣOCPs 含量显著高于植物体内含量,营养级最高的乌鳢体内 ΣOCPs 含量最高,表明 POPs 在南四湖食物网中存在生物累积效应<sup>[43-44]</sup>。Tao 等发现 2013—2015 年玄武湖浮游动物体内 10 种 PAHs 总含量远高于藻体内含量,表明在玄武湖发生了 PAHs 从藻类向浮游动物的生物放大<sup>[76]</sup>,但与玄武湖不同,Tao 等发现 2015—2016 年春、夏

及冬季太湖藻类中 16 种 PAHs 总含量高于浮游动物中的含量,表明在太湖未发生 PAHs 从藻类向浮游动物的生物放大. 其主要原因为:(1)太湖藻类以蓝藻为主,蓝藻不是浮游动物理想的饵料,且蓝藻易团聚,能分泌藻毒素,可抵制浮游动物的捕食;(2)浮游动物并非直接食用蓝藻,PAHs 通过溶解有机质或生物残渣—细菌—浮游动物的途径传递<sup>[77]</sup>. 导致这些差异的主要原因是湖泊间藻类及浮游动物的物种差异<sup>[57-58]</sup>.

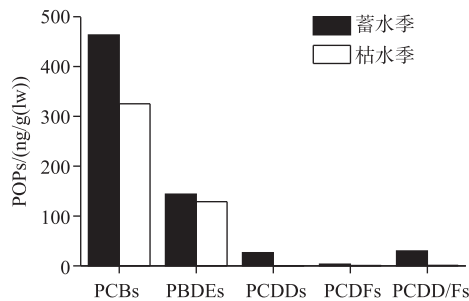


图 8 不同季节洞庭湖生物体内主要 POPs 含量比较(修改自文献[65])

Fig.8 Comparison of concentrations of POPs in Lake Dongting in different seasons

### 3.4 POPs 含量与季节的关系

多数 POPs 在中国湖泊生物体内的富集与还与季节有关. 如胡余明<sup>[65]</sup>2013 年在洞庭湖蓄水季和枯水季分别采集了 13 种鱼类用于 PCBs、PBDEs、PCDDs 及 PCDFs 的分析,发现洞庭湖鱼体内大部分 POPs 含量受季节影响,蓄水季和枯水季鱼体  $\Sigma$ PCDDs 含量范围分别为 4.27~184.80 和 0.11~0.62 pg/g(ww),  $\Sigma$ PCDFs 含量范围分别为 0.30~13.57 和 0.16~2.77 pg/g(ww),  $\Sigma$ PCBs 含量范围分别为 53.40~2396.10 和 40.10~1386.00 pg/g(ww);蓄水季和枯水季鱼体  $\Sigma$ PBDEs 含量范围分别为 21.30~488.00 和 19.60~419.60 pg/g(ww). 各类 POPs 含量平均值见图 8,表明 POPs 在该湖鱼体内的富集受季节影响较大.

### 4 POPs 在中国湖泊生物不同部位的富集特征

秦宁等 2007 年测定了小白洋淀 3 种主要挺水植物(荷花、蒲草和芦苇)各组织中的 PAHs,发现各植物体  $\Sigma$ PAHs 含量平均范围为 82.50~448.60 ng/g(dw),3 种挺水植物各组织(荷叶、荷茎、蒲叶、蒲茎、蒲根、苇叶和苇根)平均含量分别为 448.60、129.30、292.60、166.80、82.50、141.50 和 90.00 ng/g(dw),在同一植物中叶中的  $\Sigma$ PAHs 含量最高,茎中次之,根中最低<sup>[50]</sup>. 而 Fang 等 2004—2005 年测定了洞庭湖芦笋、荻草和芦苇根、茎和叶中的 PCDD/Fs,发现同种植物不同组织中根中含量最高,茎中含量最低<sup>[19]</sup>. 湖泊水生植物中 POPs 来源、植物生长环境等的不同是导致此差异的主要原因<sup>[9,43]</sup>.

Xu 等 2007 年以小白洋淀的草鱼、鳊鱼、鲫鱼和白鲢为研究对象,测定了各鱼类不同部位中的 PAHs,发现在所选取的鱼体中,脑组织中 PAHs 含量都显著高于其他部位,更易于 PAHs 的富集<sup>[51]</sup>(图 9a). Fang 等 2004 年测定了洞庭湖鲤鱼、鲢鱼和鳊鱼的肝脏及鱼鳃组织中的 PCDD/Fs,发现鲤鱼鱼鳃中  $\Sigma$ PCDD/Fs 含量最高,为 664.00 pg/g(lw),鳊鱼肝脏中  $\Sigma$ PCDD/Fs 含量最低,为 16.20 pg/g(lw),同一鱼体内,鱼鳃中  $\Sigma$ PCDD/Fs 含量要远高于肝脏中的含量<sup>[77]</sup>. 徐彪 2013 年采集了巢湖的鲢鱼、青鱼(black carp)、鲫鱼、乌鳢和鳊鱼,发现巢湖鱼体 OCPs 含量呈肉食性鳊鱼>植食性鲢鱼>肉食性乌鳢>杂食性青鱼>杂食性鲫鱼的特点;同一鱼类的不同组织间,消化系统中的肠道 OCPs 含量最高,其次为物质代谢系统中的肝脏,肌肉组织中的 OCPs 含量最低;肠道中 OCPs 含量显著高于鳃中的含量,其认为摄食是鱼类富集 OCPs 的主要途径<sup>[35]</sup>. Yang 等 1998—2004 年测定了洞庭湖湖口长江江豚不同组织(鱼脂、肝、肾、胃、肠、脑)中的 PCBs、PBDEs 和 PCDD/Fs,发现各组织中  $\Sigma$ PCBs 含量范围为 100.00~734.30 ng/g(lw), $\Sigma$ PBDEs 含量为 8.32~34.04 ng/g(lw), $\Sigma$ PCDD/Fs 含量范围为 146.86~891.20 pg/g(lw),内脏对 POPs 的富集能力明显高于其他部位<sup>[69]</sup>(图 9b). Zhao 等 2011 年 8 月在鄱阳湖北部采集了鳊鱼和白鲢,检测了其胆汁、鱼鳞、心脏、肌肉、鳃、鱼皮、鱼泡、肝脏和肾脏中的 PAHs,发现鳊鱼和白鲢各组织中  $\Sigma$ PAHs 含量分别为 105.00~513.00 和 53.90~431.00 ng/g(ww), $\Sigma$ PAHs 最高含量均出现在各鱼类的胆汁中, $\Sigma$ PAHs 最低含量分别出现在鳊鱼的鱼鳃和白鲢的肌肉中<sup>[70]</sup>. Zhang 等 2010 年 9 月测定了太湖白鲢、鳊鱼、鲤鱼、翘嘴鲌 4 种鱼不同组织(背部、腹部和尾巴)中的 PCBs 和 PBDEs 含量,发现鱼体内  $\Sigma$ PCBs 和  $\Sigma$ PBDEs 含量分别为 160.60~2128.50 和 92.10~1221.10 ng/g(ww),其中  $\Sigma$ PCBs 和  $\Sigma$ PBDEs 最高含量都出现在翘嘴鲌的腹部, $\Sigma$ PCBs 和  $\Sigma$ PBDEs 最低含量分别出现在鲤鱼尾巴和鳊鱼的背部组织. 就 PCBs 和 PBDEs 在同一鱼类不同组织中的富集而言,4 种鱼类背部肌肉中的  $\Sigma$ PCBs 和  $\Sigma$ PBDEs 含量较低,且差别均不大,表明背部肌肉对 POPs 富集能力较弱,但腹部和尾巴对 POPs 富集能力较强,尤其是腹部,这可能与腹部脂肪含量较高有关<sup>[74]</sup>.

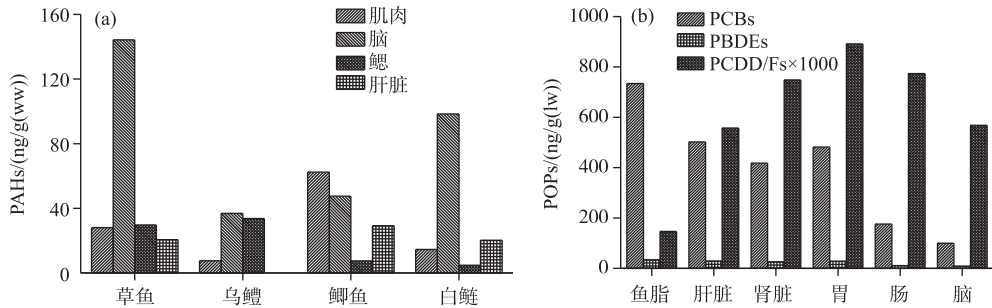


图9 白洋淀不同鱼类、组织中 PAHs 含量分布(a)和洞庭湖长江豚不同组织中 POPs 含量分布(b) (修改自文献[51]和[69])

Fig.9 Concentrations of  $\Sigma$ PAHs in different fish and fish tissues collected from Lake Baiyangdian (a) and concentrations of PDPs in different tissues of Yangtze finless porpoises in Lake Dongting (b)

## 5 结论

通过收集整理截止到 2017 年 7 月中国湖泊生物体 POPs 的大量数据,发现:空间上,POPs 在中国湖泊生物体中的研究主要集中在东部平原湖泊区(87.5%),青藏高原湖区和云贵高原湖泊区有少量研究(12.5%),其余湖区基本没有研究;不同 POPs 在不同湖区生物中富集含量差异较大,DDTs 和 HCHs 含量在不同湖区差异相对较小,PCBs 和 PBDEs 在东部平原湖区生物中的含量明显高于青藏高原和云贵高原湖泊生物中的含量;中国湖泊生物受到了不同程度的 POPs 污染,中国湖泊生物中 DDTs、HCHs、PAHs、PCBs、PBDEs、PCDD/Fs、PFOSs、PFOAs、Organotins 和 PHBCDs 脂肪归一化后的平均含量分别为  $454.56 \pm 653.40$  ng/g ( $n = 105$ )、 $153.57 \pm 435.99$  ng/g ( $n = 114$ )、 $2849.49 \pm 3092.52$  ng/g ( $n = 45$ )、 $118.40 \pm 20.28$  ng/g ( $n = 100$ )、 $18.40 \pm 20.28$  ng/g ( $n = 87$ )、 $17.43 \pm 19.43$  ng/g ( $n = 28$ )、 $147.17 \pm 192.93$  ng/g ( $n = 11$ )、 $1542.18 \pm 1347.64$  ng/g ( $n = 11$ )、 $11380.75 \pm 5316.75$  ( $n = 5$ ) ng/g 和  $2.19 \pm 1.92$  ng/g ( $n = 6$ ); POPs 在中国湖泊生物体内的富集与生物所处营养级、脂肪含量、年龄和食物链长度呈正相关,但并非完全一致,还受到生存环境、生活习性、生物结构、生物量等诸多因素的影响;不同生物组织或器官对 POPs 的富集能力存在较大差异,受不同器官功能、生物生活习性、不同组织或器官脂肪含量等因素的影响,同一生物不同器官内 POPs 含量差异较大,内脏器官中含量显著高于肌肉中含量,对 POPs 具有更强的富集能力。

中国是 POPs 生产及使用大国. 湖泊生物尤其是水产品是中国人饮食中的重要组成部分,因此 POPs 在中国湖泊生物体中的富集对当地生态系统安全和人体健康构成很大危害,虽然已有不少学者对中国部分湖泊 POPs 生物富集状况进行了研究,但以往研究多集中在一些较大湖泊或经济较发达地区湖泊,缺乏对中国湖泊 POPs 生物富集的系统研究与比较,此综述有助于增加对中国湖泊生物 POPs 污染现状及其污染机制的认识. 同时,中国学者对 POPs 在湖泊生物中分布状况和富集特征的研究大多是在短时间内的采样测定,缺乏对整个流域长时间的连续监测,但这对于 POPs 在生物中的分布状况监测和富集特征等的研究是十分重要的。

## 6 附录

附表 1~5 见电子版(DOI: 10.18307/2018.0301).

## 7 参考文献

- [ 1 ] Zhang K, Zhang BZ, Li SM *et al.* Regional dynamics of persistent organic pollutants (POPs) in the Pearl River delta, China: Implications and perspectives. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2301-2309.
- [ 2 ] Yu G, Zhou LC, Huang J *et al.* Focus on POPs concerns for life safety-persistent organic pollutants and 《Stockholm Con-

- vention Performance》. *Environmental Protection*, 2010, **23**: 12-15. [余刚, 周隆超, 黄俊等. 关注 POPs 关注生命安全—持久性有机污染物和《斯德哥尔摩公约》履约. 环境保护, 2010, **23**: 12-15.]
- [ 3 ] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al.* Lake status, major problem major protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. DOI:10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [ 4 ] Cao QM, Wang H, Zhang LM *et al.* Contamination of persistent organic pollutants (POPs) and its progress in treatment technology in China. *Journal of Agriculture*, 2006, (3): 361-365. [曹启民, 王华, 张黎明等. 中国持久性有机污染物污染现状及治理技术进展. 中国农学通报, 2006, (3): 361-365.]
- [ 5 ] Zhang HM. Sorption-desorption characteristics research of phenanthrene on sediments of lake [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. [张洪梅. 湖泊沉积物中多环芳烃非吸附解吸特征研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2014.]
- [ 6 ] Yuan XY, Yang YY, Li QX *et al.* Present situation and distribution characteristics of persistent organic pollutants in freshwater in China. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(11): 2072-2081. [员晓燕, 杨玉义, 李庆孝等. 中国淡水环境中典型持久性有机污染物(POPs)的污染现状与分布特征. 环境化学, 2013, **32**(11): 2072-2081.]
- [ 7 ] Zhao ZH, Zhang L, Wu JL *et al.* Residual levels, tissue distribution and risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in edible fishes from Taihu Lake, China. *Environ Monit Assess*, 2013, **185**: 9265-9277.
- [ 8 ] Zhao X, Zhang YL, Li SY. Ecological risk of DDT accumulation conomic fishes in Taihu Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(2): 295-299. [赵肖, 张娅兰, 李适宇. 滴滴涕对太湖经济鱼类危害的生态风险. 生态学杂志, 2008, **27**(2): 295-299.]
- [ 9 ] Cui QL. Distribution and preliminary health risk assessment of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in aquatic biotas on different trophic level from Taihu Lake in China [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2011. [崔庆兰. 太湖不营养级水生生物体中多氯联苯和有机氯农药的分布特征及其健康风险初探[学位论文]. 南京: 南京大学, 2011.]
- [ 10 ] Wang DQ. Polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in fish from Taihu Lake; Their level, distribution and human health risk assessment [Dissertation]. Shanghai: Shanghai University, 2013. [王德庆. 太湖鱼体中 PAHs 和 OCPs 的暴露水平、分布特征和人体健康风险评估[学位论文]. 上海: 上海大学, 2013.]
- [ 11 ] Wang DQ, Yu YX, Zhang XY *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in fish from Taihu Lake; Their levels, sources, and biomagnifications. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **82**: 63-70.
- [ 12 ] Wang DQ, Yu YX, Zhang XY *et al.* Organochlorine pesticides in fish from Taihu Lake, China, and associated human health risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **98**(12): 383-389.
- [ 13 ] Xu Y, Zhou YZ, Chen X *et al.* Chemical characterization and risk assessment of organochlorine pesticides in sediments and biota from Meiliang bay of Taihu Lake. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2015, **45**(2): 328-335. [许妍, 周亚子, 陈曦等. 太湖梅梁湾沉积物和水生生物中有机氯农药分布特征及风险评估. 东南大学学报, 2015, **45**(2): 328-335.]
- [ 14 ] Shi SX, Lu WY, Shao DD *et al.* Determination of organochlorine pesticides in wild shrimps muscle tissue in Lake Taihu and Lake Dongting by gas chromatography/mass spectrometry. *J Lake Sci*, 2009, **21**(5): 631-636. DOI: 10.18307/2009.0504. [史双昕, 卢婉云, 邵丁丁等. 太湖、洞庭湖野生青虾肌肉中有机氯农药的气相色谱-质谱法测定. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 631-636.]
- [ 15 ] Zhang SH. Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in fish from Taihu Lake, China; Their level, biomagnification, and human health risk assessment [Dissertation]. Shanghai: Shanghai University, 2013. [张少欢. 太湖鱼体中 PBDEs 和 PCBs 的暴露水平、生物放大及健康风险评估[学位论文]. 上海: 上海大学, 2013.]
- [ 16 ] Zhang DP, Zhang SH, Yu YX *et al.* Polyunsaturated fatty acids in fish from Taihu Lake and the associated risk of ingesting polychlorinated biphenyls. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(5): 324-331. [张东平, 张少欢, 余应新等. 太湖鱼中多不饱和脂肪酸及其与多氯联苯共摄入益害分析. 科学通报, 2012, **57**(5): 324-331.]
- [ 17 ] Zhang DP. Fatty acids, polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in fish from Taihu Lake; Their levels, distribution and benefit-risk assessment [Dissertation]. Shanghai: Shanghai University, 2012. [张东平. 太湖鱼体中脂肪酸和 PCBs 和 PBDEs 的暴露水平—分布特征和益害分析[学位论文]. 上海: 上海大学, 2012.]
- [ 18 ] Su GY, David S, Yu YJ *et al.* Occurrence of additive brominated flame retardants in aquatic organisms from Taihu Lake

- and Yangtze River in eastern China, 2009-2012. *Chemosphere*, 2014, **114**: 340-346.
- [19] Fang LP, Zheng MH, Zhang B *et al.* Profiles of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in fish livers and gills from Dongting Lake, China. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2007, **79**: 45-48.
- [20] Yin G, Zhou YH, Strid A. Spatial distribution and bioaccumulation of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in snails (*Bellamya aeruginosa*) and sediments from Taihu Lake area, China. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2017, **24**(8): 7740-7751.
- [21] Yang J, Harino H, Liu HB. Monitoring the organotin contamination in the Taihu Lake of China by bivalve mussel *Anodonta woodiana*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **81**(2): 164-168.
- [22] Wang Y, Qiu YL, Li L *et al.* Contamination of persistent organic pollutants (POPs) and relevant management in China. *Environ Int*, 2005, **31**(6): 813-821.
- [23] Su HL, Wu FC, Guo JY *et al.* Distribution characteristics and risk assessments of PAHs in fish from Lake Taihu, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, **21**(7): 1753-1765.
- [24] Fang SH, Chen XW, Zhao SY *et al.* Trophic magnification and isomer fractionation of perfluoroalkyl substances in the food web of Taihu Lake, China. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(4): 2173-2182.
- [25] Luo J, Liu C, Hu JW *et al.* Occurrence of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in six fish species from Baihua Lake, China. *Advanced Materials Research*, 2011, **347-353**: 2073-2077.
- [26] Bian X. HCH and DDT residues in bivalves *Anodonta woodiana* from the Taihu Lake, China. *Arch Environ Contam Toxicol*, **56**(1): 67-76.
- [27] Feng K, Yu BY, Ge DM *et al.* Organo-chlorine pesticide (DDT and HCH) residues in the Taihu Lake region and its movement in soil-water system I. Field survey of DDT and HCH residues in ecosystem of the region. *Chemosphere*, 2003, **50**(6): 683-687.
- [28] Nakataa H, Hirakawaa Y, Masahiro K *et al.* Concentrations and compositions of organochlorine contaminants in sediments, soils, crustaceans, fishes and birds collected from Lake Taihu, Hangzhou Bay and Shanghai City region, China. *Environmental Pollution*, 2005, **133**(3): 415-429.
- [29] Bian XS, Liu HB, Gan JL *et al.* DDT and HCH residues in *Anodonta woodiana* in Wuli Lake of the Taihu Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, **23**(2): 52-56. [边学森, 刘洪波, 甘居利等. 太湖五里湖背角无齿蚌体内滴滴涕和六六六的残留. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(2): 52-56.]
- [30] Li TY, Huang SB, Sun F *et al.* Bioaccumulation of HCHs and DDTs in Asiatic clam (*Corbicula fluminea*) exposed to sediments from Meiliang Bay, Taihu Lake. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, **8**(2): 1009-1016. [李天云, 黄圣彪, 孙凡等. 河蚬对太湖梅梁湾沉积物中 HCHs 和 DDTs 的生物富集. 环境科学学报, 2008, **8**(2): 1009-1016.]
- [31] Bian XS. Bioaccumulation and DDT and PCB residues in *Anodonta woodiana* from selected areas of the Taihu Lake. [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. [边学森. 太湖不同水域背角无齿蚌中有机农药和多氯联苯的积累和分布研究[学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2007.]
- [32] Zhao ZH, Zhang L, Wu JL *et al.* Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides in surface sediments and benthic organisms from Taihu Lake, China. *Chemosphere*, 2009, **77**(9): 1191-1198.
- [33] Hu GC, Li XM, Peng XW *et al.* Bioaccumulation and toxicity assessment of polychlorinated biphenyls in freshwater fish from Baiyangdian Lake, north China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(4): 667-672. [胡国成, 李雪梅, 彭晓武等. 白洋淀鱼类体内多氯联苯积累特征及其毒性评价. 农业环境科学学报, 2014, **31**(4): 667-672.]
- [34] Liu WX, Wang Y, He W *et al.* Aquatic biota as potential biological indicators of the contamination, bioaccumulation and health risks caused by organochlorine pesticides in a large, shallow Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 2016, **6**: 335-345.
- [35] Xu B. Concentration and distribution features of OCPs in fishes of Chaohu Lake [Dissertation]. Hefei: Anhui University, 2016. [徐彪. 巢湖鱼体内有机氯农药富集其分布特征研究[学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2016.]
- [36] Jiang S. Residue characteristics and risk assessment organochlorine pesticides in water, sediment and *Bellamya aeruginosa* from main estuaries of Chaohu Lake [Dissertation]. Hefei: Anhui University, 2016. [姜珊. 巢湖主要湖口水体、沉积物和铜锈环棱螺中有机氯农药的残留特征与风险评价[学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2016.]
- [37] Dou W, Zhao ZX. A study on bioaccumulation and biomagnification of BHC and DDT in Baiyangdian Lake foodweb. *Chi-*

- nese Journal of Environmental Science, 1997, **18**(9): 41-43. [ 窆薇, 赵忠宪. 白洋淀水生食物链 BHC、DDT 生物浓缩分析. 环境科学学报, 1997, **18**(9): 41-43.]
- [38] Dou W, Zhao ZX. Contamination of DDT and BHC in water, sediments and fish (*Carassius auratus*) muscle from Baiyangdian Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(3): 308-312. [ 窆薇, 赵忠宪. 白洋淀水体, 底泥及鲫鱼体内 DDT, BHC 污染状况研究. 环境科学学报, 1998, **18**(3): 308-312.]
- [39] Hu GC, Dai JY, Mai BX *et al.* Concentrations and accumulation features of organochlorine pesticides in the Baiyangdian Lake freshwater food web of north China. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2010, **58**: 700-710.
- [40] Hu GC, Xu ZC, Xu MQ *et al.* Distribution characteristic of organochlorine pesticides and polybrominated diphenyl ethers in tissues of grass carps from Baiyangdian Lake, north China. Harbin: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2011: 57-59. [ 胡国成, 许振成, 许木启等. 白洋淀草鱼组织中有有机氯农药和多溴联苯醚分布特征. 哈尔滨: 持久性有机污染物论坛暨第六届持久性有机污染物全国学术研讨会文集, 2011: 57-59.]
- [41] Zhao ZH, Wang YY, Zhang L *et al.* Bioaccumulation and tissue distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in freshwater fishes: A case study performed in Poyang Lake, China's largest lake. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, **21**(14): 8740-8749.
- [42] Sun F, Huang Y, Liu ZG *et al.* Analysis of OCP residues in fish and mussels from Kangshan and Hukou areas of Poyang Lake. *Research of Environmental Sciences*, **23**(4): 467-472. [ 孙芳, 黄云, 刘志刚等. 鄱阳湖康山和湖口水域鱼、贝类体内有机氯农药残留现状. 环境科学研究, **23**(4): 467-472.]
- [43] Zhang GZ, Pan ZK, Bai AY *et al.* Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides (OCPs) in food web of Nansi Lake, China. *Environ Monit Assess*, 2014, **186**: 2039-2051.
- [44] Zhang GZ. Distribution and bioaccumulation of two types of persistent organic pollutants and heavy metals in food web of Nansi Lake, China [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2014. [ 张桂斋. 两类持久性有机污染物和重金属在南四湖食物链中的分布和生物积累[学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.]
- [45] Wei LX, Zhou YH, Wang Y *et al.* Concentrations and bioaccumulation characteristics of organochlorines in aquatic organisms from Dianshan Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(1): 128-133. [ 魏玲霞, 周轶慧, 王莹等. 淀山湖水生生物中有有机氯化合物的浓度与富集特征. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(1): 128-133.]
- [46] Su QK, Qi SH, Wu CX *et al.* Organism productions accumulating model of organochlorine pesticides in water and sediments from Honghu Lake, Hubei Province, China. *Geological Science and Technology Information*, 2007, **26**(4): 85-90. [ 苏秋克, 祁士华, 吴辰熙等. 洪湖特色水产品对湖水及沉积物中有有机氯农药的积累模式. 地质科技情报, 2007, **26**(4): 85-90.]
- [47] Yang RQ, Yao TD, Xu BQ *et al.* Accumulation features of organochlorine pesticides and heavy metals in fish from high mountain lakes and Lhasa River in the Tibetan Plateau. *Environment International*, 2007, **33**: 151-156.
- [48] Yang RQ, Wang YW, Li A *et al.* Organochlorine pesticides and PCBs in fish from lakes of the Tibetan Plateau and the implications. *Environmental Pollution*, 2010, **158**: 2310-2316.
- [49] Qin N, He W, Wang Y *et al.* Residues and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and aquatic products from Lake Chaohu. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 230-238. [ 秦宁, 何伟, 王雁等. 巢湖水体和水产品中多环芳烃的含量与健康风险. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 230-238.]
- [50] Qin N, Zhu Y, Wu WJ *et al.* The distributions, composition and their determining factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in emergent macrophytes in small Baiyangdian Lake. *J Lake Sci*, 2010, **22**(1): 49-56. DOI: 10.18307/2010.0107. [ 秦宁, 朱樱, 吴文靖等. 多环芳烃在小白洋淀挺水植物中的分布、组成及其影响因素. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 49-56.]
- [51] Xu FL, Wu WJ, Wang JJ *et al.* Residual levels and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in freshwater fishes from Lake Small Baiyangdian, northern China. *Ecological Modelling*, 2011, **222**: 275-286.
- [52] Long JP, Qin DH. Biogeochemistry of trace organics in snow ice. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1995, (3): 67-68. [ 龙江平, 秦大河. 雪冰中微量有机物的生物地球化学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 1995, (3): 67-68.]
- [53] Kang S, Mayewski PA, Qin D *et al.* Glaciochemical records from a Mt. Everest ice core: Relationship to atmospheric circulation over Asia. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(21): 3351-3361.
- [54] Li J, Zhu T, Wang F *et al.* Observation of organochlorine pesticides in the air of the Mt. Everest region. *Ecotoxicology and*



- Environmental Safety*, 2006, **63**(1): 33-41.
- [55] Cheng H, Zhang G, Jiang JX *et al.* Organochlorine pesticides, polybrominated biphenyl ethers and lead isotopes during the spring time at the Waliguan baseline observatory, northwest China; Implication for long-range atmospheric transport. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(22): 4734-4747.
- [56] Zhang WL, Zhang G, Qi SH *et al.* A preliminary study of organochlorine pesticides in water and sediments from two Tibetan lakes. *Geochimica*, 2003, **32**(4): 363-367. [张伟玲, 张干, 祁士华等. 西藏错鄂湖和羊卓雍湖水体及沉积物中有机氯农药的初步研究. *地球化学*, 2003, **32**(4): 363-367.]
- [57] Tao YQ, Yu J, Yao SC *et al.* Precipitation and temperature drive seasonal variation in bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the planktonic food webs of a subtropical shallow eutrophic lake in China. *Total Environment*, 2017, **583**: 447-457.
- [58] Tao YQ, Yu J, Yao SC *et al.* Indirect influence of eutrophication on air - water exchange fluxes, sinking fluxes, and occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Water Research*, 2017, **122**: 512-525.
- [59] Zhang PQ. The research of exposure level of tetrabromobisphenol A and polybrominated diphenyl ethers in the Chaohu Lake fish [Dissertation]. Harbin: Northrastr Forestry University, 2011. [张普青. 巢湖鱼体内四溴双酚A与多溴二苯醚暴露水平的研究[学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.]
- [60] Liu ZT. Environmental behavior characteristics and research progress of persistent organic pollutants. *Research of Environmental Sciences*, 2005, (3): 93-102. [刘征涛. 持久性有机污染物的主要特征和研究进展. *环境科学研究*, 2005, (3): 93-102.]
- [61] Yu YX, Zhang SH, Huang NB *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in freshwater fish from Taihu Lake, China: Their levels and the factors that influence biomagnifications. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **319**(3): 542-549.
- [62] Yang RQ, Wang YW, Li A *et al.* Organochlorine pesticides and PCBs in fish from lakes of the Tibetan Plateau and the implications. *Environmental Pollution*, 2010, **158**: 2310-2316.
- [63] Yang RQ, Jing CY, Zhang QH *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and mercury in fish from lakes of the Tibetan Plateau. *Chemosphere*, 2011, **83**: 862-867.
- [64] Wang P, Wang YW, Li YM *et al.* PCBs and PCDD/Fs in scale-less (*Gymnocypris przewalskii*) from the Qinghai Lake. *Environmental Chemistry*, 2006, **25**(6): 669-673. [王璞, 王亚璘, 李英明等. 青海湖湟鱼 (*Gymnocypris przewalskii*) 中 PCBs 和 PCDD/Fs 的分析. *环境化学*, 2006, **25**(6): 669-673.]
- [65] Hu YM. Study on analysis and evaluation of POPs in fish from Dongting Lake [Dissertation]. Changsha: Hunan Normal University, 2014. [胡余明. 洞庭湖鱼组织中持久性有机污染物的分析评估研究[学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.]
- [66] Zhou Z, Shi YL, Li WH *et al.* Perfluorinated compounds in surface water and organisms from Baiyangdian Lake in north China; Source profiles, bioaccumulation and potential risk. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2012, **89**: 519-524.
- [67] Wu WZ, Xua Y, Schramm KW *et al.* Persistence of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/F) in Ya-er Lake area, China. *Environment International*, 2001, **26**: 323-326.
- [68] Zhu NL, Fu JJ, Gao Y *et al.* Hexabromocyclododecane in alpine fish from the Tibetan Plateau, China. *Environ Pollut*, 2013, **181**: 7-13.
- [69] Yang FX, Zhang QH, Xu Y *et al.* Preliminary hazard assessment of polychlorinated biphenyls, polybrominated diphenyl ethers, and polychlorinated dibenzofurans to Yangtze finless porpoise in Dongting Lake, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(4): 991-996.
- [70] Zhao ZH, Zhang L, Cai YJ *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) residues in several tissues of edible fishes from the largest freshwater lake in China, Poyang Lake, and associated human health risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **104**: 323-331.
- [71] Zhang GZ, Zhao KP, Wang XM *et al.* Distribution and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the food web of Nansi lake, China. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, **187**(4): 1-12.
- [72] Zhang QH, Jiang GB. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans and polychlorinated biphenyls in sediments and aquatic organisms from the Taihu Lake, China. *Chemosphere*, 2005, **61**: 314-322.
- [73] Bian XS, Liu HB, Gan JL *et al.* Residues of PCBs in *Anodonta woodiana* from the Taihu lake, China. *Journal of Agro-En-*

- Environment Science*, 2008, **27**(2): 767-772. [边学森, 刘洪波, 甘居利等. 太湖背角无齿蚌中多氯联苯的残留. 农业环境科学学报, 2008, **27**(2): 767-772.]
- [74] Zhang DP, Zhang XY, Yu YX *et al.* Tissue-specific distribution of fatty acids, polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in fish from Taihu Lake, China and the benefit-risk assessment of their co-ingestion. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, **50**: 2837-2844.
- [75] Hu GC, Dai JY, Xu ZC *et al.* Bioaccumulation behavior of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the freshwater food chain of Baiyangdian Lake, north China. *Environment International*, 2010, **36**: 309-315.
- [76] Gao LR, Zhang Q, Zhang B *et al.* Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in water and six fish species from Dongting Lake, China. *Chemosphere*, 2014, **114**: 150-157.
- [77] Fang LP, Zheng MH, Xiao K *et al.* Environmental research in China: Tissue-dependent distribution and bioaccumulation of polychlorinated-*p*-dioxins and dibenzofurans in vegetation samples collected from Dongting Lake, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(1): 49-56.
- [78] Shi YL, Pan YY, Yang RQ *et al.* Occurrence of perfluorinated compounds in fish from Qinghai-Tibetan Plateau. *Environment International*, 2010, **36**: 46-50.
- [79] Xu Y, Wu WZ, Zang YH *et al.* Dynamics and long-term of residual hexachlorocyclohexane (HCH) in various types of environment in Ya-er Lake area, China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, (4): 337-345. [徐盈, 吴文忠, 张银华等. 鸭儿湖地区六氯环己烷的残留动态与长期归宿. 水生生物学报, 1999, (4): 337-345.]
- [80] Zhou Z, Liang Y, Shi YL. Occurrence and transport of perfluoroalkyl acids (PFAAs), including short-chain PFAAs in Tangxun Lake, China. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9249-9257.
- [81] Ren J, Wang XP, Wang CF *et al.* Biomagnification of persistent organic pollutants along a high-altitude aquatic food chain in the Tibetan Plateau: Processes and mechanisms. *Environmental Pollution*, 2017, **2**(20): 636-643.
- [82] Pang YP, Huang NB, Li JL *et al.* Primary study of the levels of PBDEs, PCBs, OCPs, and PAHs in fish and shellfish in Taihu Lake, China. International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering, 2008: 164-168.
- [83] Fang LP, Zheng MH, Zhang B *et al.* Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in eggs of eight avian species from Dongting Lake, China. *Chemosphere*, 2007, **69**(3): 411-421.

附表 1 图 2a 中 DDTs 数据对应湖泊、生物物种及参考文献  
Appendix 1 The related lakes, species, and references for the data of DDTs in Fig.2a

编号	湖泊	鱼类	文献
1	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[10]
2	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[12]
3	太湖	斑白鱼 <i>Anabarilius</i>	[13]
4	太湖	背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	[31]
5	太湖	背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	[31]
6	太湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[10]
7	鄱阳湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[13]
8	太湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[22]
9	太湖	达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	[10]
10	太湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[10]
11	淀山湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[45]
12	太湖	太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	[10]
13	巢湖	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	[14]
14	太湖	刀鲚 <i>Coilia macrognathos</i> Bleeker	[10]
15	太湖	刀鲚 <i>Coilia macrognathos</i> Bleeker	[9]
16	羊卓雍错	高原裸鲤 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[48]
17	太湖	蚌 Unionidae	[9]
18	鄱阳湖	蚌 Unionidae	[42]
19	淀山湖	河川沙塘鳢 <i>Odontobutis potamophila</i>	[45]
20	太湖	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	[30]
21	太湖	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	[10]
22	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[10]
23	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[12]
24	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[12]
25	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[10]
26	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[9]
27	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[10]
28	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[12]
29	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[10]
30	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[13]
31	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[12]
32	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[10]
33	淀山湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[45]
34	鄱阳湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[22]
35	南四湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[24]
36	托素湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[48]
37	太湖	鲫鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[10]
38	太湖	鲫鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[9]
39	太湖	鲫鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[13]
40	太湖	鲫鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[12]
41	巢湖	鲫鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[14]
42	鄱阳湖	鲫鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[42]
43	南四湖	鲫鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[24]
44	巢湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[15]
45	巴松错	红目鲫 <i>Racoma biddulphi</i> Gunther	[48]

编号	湖泊	鱼类	文献
46	班公错	红目鲫 <i>Racoma tibetanus</i>	[48]
47	太湖	螺蛳 <i>Margarya melanioides</i>	[13]
48	纳木错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[48]
49	羊卓雍错	高原裸鲤 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[48]
50	玛旁雍错	高原裸鲤 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[49]
51	淀山湖	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	[45]
52	太湖	蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i> Basilewsky	[10]
53	淀山湖	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	[45]
54	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[10]
55	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[9]
56	鄱阳湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[42]
57	太湖	乔丁鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[10]
58	太湖	翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[12]
59	巢湖	翘嘴红鲃 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	[34]
60	青海湖	湟鱼 <i>Gymnocypris przewalskii</i>	[48]
61	太湖	秋刀鱼 <i>Cololabis saira</i> Brevoort	[9]
62	淀山湖	日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	[45]
63	太湖	似刺鳊鮡 <i>Paracanthobrama guichenoti</i> Bleeker	[10]
64	太湖	似鱊 <i>Toxabramis swinhonis</i>	[10]
65	太湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[9]
66	巢湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[34]
67	太湖	白鲦 <i>Hemiculter leucisculus</i>	[10]
68	太湖	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	[31]
69	淀山湖	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	[31]
70	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[10]
71	巢湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[34]
72	淀山湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[45]
73	鄱阳湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[42]
74	南四湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[44]
75	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[12]
76	太湖	虾 Shrimp	[9]
77	太湖	虾 Shrimp	[10]
78	巢湖	虾 Shrimp	[34]
79	南四湖	虾 Shrimp	[44]
80	措那	小头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[48]
81	纳木错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[48]
82	太湖	银鱼 <i>Hemihalax prognathus</i> Regan	[12]
83	太湖	长春鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	[10]
84	太湖	短尾下目 Brachyura	[10]
85	太湖	银鱼 <i>Hemihalax prognathus</i> Regan	[10]
86	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[12]
87	巢湖	鳊鱼 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[34]
88	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[10]
89	太湖	鱼 Fish	[27]
90	太湖	鱼 Fish	[27]
91	太湖	武昌鱼 <i>Egalobrama amblycephala</i>	[10]
92	太湖	武昌鱼 <i>Egalobrama amblycephala</i>	[12]

续表

编号	湖泊	鱼类	文献
93	太湖	针鱼 <i>Tylosurus melanotus</i>	[10]
94	白洋淀	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[40]
95	太湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[10]
96	太湖	虾 Shrimp	[22]
97	太湖	银鱼 <i>Hemisanx prognathus</i> Regan	[10]
98	百花湖	鲢鱼 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[25]
99	百花湖	鲫鱼 <i>Carassiu sauratus</i>	[25]
100	百花湖	偏嘴突吻鱼 <i>Varicorhinus</i>	[25]
101	百花湖	小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyatis</i>	[25]
102	百花湖	白鲈 <i>Hemiculter leucisculus</i>	[25]
103	洪湖	菱 <i>Trapa bispinosa</i> Roxb	[46]
104	洪湖	莲 <i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn	[46]
105	洪湖	短尾下目 <i>Brachyura</i>	[46]

附表 2 图 2b 中 HCHs 数据对应湖泊、生物物种及参考文献

Appendix 2 The related lakes, species, and references for the HCHs data in Fig.2b

编号	湖泊	鱼类	文献
1	太湖	鱼 Fish	[28]
2	太湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[10]
3	太湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[30]
4	鄱阳湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[41]
5	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[10]
6	巢湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[34]
7	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[10]
8	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[9]
9	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[10]
10	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[31]
11	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[9]
12	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[12]
13	淀山湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[45]
14	鄱阳湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[41]
15	南四湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[44]
16	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[10]
17	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[9]
18	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[82]
19	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[9]
20	巢湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[34]
21	鄱阳湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[41]
22	南四湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[44]
23	纳木错	小头高原鱼 <i>Gymocypris microcephalus</i>	[48]
24	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[10]
25	太湖	斑白鱼 <i>Anabarilius</i>	[29]
26	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[9]
27	太湖	白鲈 <i>Hemiculter leucisculus</i>	[10]
28	太湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[10]

编号	湖泊	鱼类	文献
29	淀山湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[45]
30	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[10]
31	太湖	乔丁鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[10]
32	太湖	针鱼 <i>Tylosurus melanotus</i>	[10]
33	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[10]
34	太湖	翘嘴红鲌 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	[9]
35	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[9]
36	太湖	似鲮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	[10]
37	太湖	刀鲚 <i>Coilia macrognathos</i> Bleeker	[10]
38	太湖	刀鲚 <i>Coilia macrognathos</i> Bleeker	[9]
39	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[10]
40	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[9]
41	巢湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[34]
42	太湖	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	[10]
43	太湖	太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	[10]
44	巢湖	银鱼 <i>Hemisanlx prognathus</i> Regan	[34]
45	太湖	银鱼 <i>Hemisanlx prognathus</i> Regan	[10]
46	太湖	银鱼 <i>Hemisanlx prognathus</i> Regan	[12]
47	太湖	蒙古鲌 <i>Culter mongolicus</i> Basilewsky	[10]
48	太湖	达氏鲌 <i>Culter dabryi</i>	[10]
49	太湖	似刺鳊鲌 <i>Paracanthobrama guichenoti</i> Bleeker	[10]
50	太湖	鲶鱼 <i>Silurus asotus</i>	[10]
51	太湖	鲶鱼 <i>Silurus asotus</i>	[12]
52	鄱阳湖	鲶鱼 <i>Silurus asotus</i>	[41]
53	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[10]
54	太湖	蚌 <i>Unionidae</i>	[9]
55	太湖	背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	[78]
56	太湖	背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	[7]
57	鄱阳湖	蚌 <i>Unionidae</i>	[21]
58	太湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[9]
59	太湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[32]
60	太湖	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	[8]
61	巢湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[34]
62	淀山湖	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	[45]
63	太湖	虾 <i>Shrimp</i>	[9]
64	太湖	虾 <i>Shrimp</i>	[12]
65	巢湖	虾 <i>Shrimp</i>	[24]
66	淀山湖	日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	[45]
67	南四湖	虾 <i>Shrimp</i>	[44]
68	太湖	秋刀鱼 <i>Cololabis saira</i> Brevoort	[9]
69	太湖	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	[8]
70	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[9]
71	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[9]
72	巢湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[34]
73	太湖	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[9]
74	巢湖	翘嘴红鲌 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	[34]
75	太湖	短尾下目 <i>Brachyura</i>	[12]



续表

编号	湖泊	鱼类	文献
76	太湖	鱼 Fish	[13]
77	淀山湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[45]
78	鄱阳湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[42]
79	南四湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[24]
80	淀山湖	河川沙塘鳢 <i>Odontobutis potamophila</i>	[45]
81	淀山湖	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	[45]
82	淀山湖	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	[45]
83	羊卓雍错	高原裸鲤 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[48]
84	青海湖	湟鱼 <i>Gymnocypris przewalskii</i>	[48]
85	托素湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[48]
86	措那	小丫头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[48]
87	纳木错	小丫头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[48]
88	羊卓雍错	高原裸鲤 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[48]
89	巴松错	红目鲫 <i>Racoma biddulphi</i> Gunther	[48]
90	玛旁雍错	高原裸鲤 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[48]
91	班公错	娃娃鱼 <i>Racoma tibetanus</i>	[48]
92	白洋淀	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[45]
93	太湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[9]
94	太湖	虾 Shrimp	[32]
95	太湖	银鱼 <i>Hemisalanx prognathus</i> Regan	[32]
96	鸭儿湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[67]
97	鸭儿湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[67]
98	鸭儿湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[67]
99	鸭儿湖	水丝蚓 <i>Limnodrilus</i>	[67]
100	鸭儿湖	水稻 Paddy	[67]
101	鸭儿湖	小麦 Wheat	[67]
102	鸭儿湖	雍菜 Water spinach	[67]
103	鸭儿湖	莴苣菜 Lettuce	[67]
104	百花湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[25]
105	百花湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[25]
106	百花湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[25]
107	百花湖	偏嘴突吻鱼 <i>Varicorhinus</i>	[25]
108	百花湖	小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyatis</i>	[25]
109	百花湖	白鲈鱼 <i>Hemiculter leucisculus</i>	[25]
110	洪湖	菱 <i>Trapa bispinosa</i> Roxb	[46]
111	洪湖	莲 <i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn	[46]
112	洪湖	短尾下目 Brachyura	[46]
113	洪湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[46]
114	洪湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[46]

附表3 图4中 PAHs 数据对应湖泊、生物物种及参考文献

Appendix 3 The related lakes, species, and references for the PAHs data in Fig.4

编号	湖泊	鱼类	文献
1	太湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[10]
2	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[10]

编号	湖泊	鱼类	文献
3	巢湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[30]
4	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[10]
5	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[10]
6	南四湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[24]
7	巢湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[49]
8	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[10]
9	南四湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[24]
10	巢湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[49]
11	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[10]
12	太湖	白鲢鱼 <i>Hemiculter leucisculus</i>	[10]
13	太湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[10]
14	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[10]
15	太湖	乔丁鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[10]
16	太湖	针鱼 <i>Tylosurus melanotus</i>	[10]
17	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[10]
18	太湖	似鱮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	[10]
19	太湖	似刺鳊鲂 <i>Paracanthobrama guichenoti</i> Bleeker	[10]
20	太湖	长春鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	[10]
21	太湖	似鱮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	[10]
22	太湖	太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	[10]
23	太湖	银鱼 <i>Hemisanx prognathus</i> Regan	[10]
24	巢湖	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	[49]
25	太湖	蒙古鲃 <i>Culter mongolicus</i> Basilewsky	[10]
26	太湖	达氏鲃 <i>Culter dabryi</i>	[10]
27	太湖	翘嘴红鲃 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	[10]
28	太湖	鲶鱼 <i>Silurus asotus</i>	[10]
29	太湖	似鱮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	[11]
30	南四湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[44]
31	南四湖	虾 Shrimp	[44]
32	巢湖	虾 Shrimp	[49]
33	巢湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[49]
34	巢湖	翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[49]
35	巢湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[49]
36	白洋淀	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[51]
37	白洋淀	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[51]
38	白洋淀	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[51]
39	白洋淀	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[51]
40	鄱阳湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[70]
41	鄱阳湖	银鲤 Silver carp	[70]
42	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[23]
43	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[82]
44	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[82]
45	太湖	翘嘴鲃 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[83]
46	太湖	浮游生物 Plankton	[58]
47	玄武湖	浮游生物 Plankton	[57]

附表 4 图 6a 中 PCBs 数据对应湖泊、生物物种及参考文献  
 Appendix 4 The related lakes, species, and references for the PCBs data in Fig.6a

编号	湖泊	鱼类	文献
1	太湖	蚌 Unionidae	[9]
2	太湖	背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana</i>	[31]
3	太湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[9]
4	淀山湖	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	[45]
5	太湖	虾 Shrimp	[9]
6	太湖	虾 Shrimp	[9]
7	淀山湖	虾 Shrimp	[45]
8	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[17]
9	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[9]
10	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[17]
11	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[38]
12	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[9]
13	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[43]
14	太湖	长颌鲢 <i>Coilia macrognathos</i> Bleeker	[9]
15	太湖	长颌鲢 <i>Coilia macrognathos</i> Bleeker	[38]
16	太湖	长颌鲢 <i>Coilia macrognathos</i> Bleeker	[41]
17	太湖	刀鲚 <i>Cololabis saira</i> Brevoort	[9]
18	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[9]
19	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[41]
20	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[43]
21	太湖	短尾下目 <i>Brachyura</i>	[9]
22	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[9]
23	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[41]
24	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[38]
25	太湖	秋刀鱼 <i>Cololabis saira</i> Brevoort	[9]
26	太湖	鲶鱼 <i>Silurus asotus</i>	[9]
27	青海湖	小头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[29]
28	托素湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[29]
29	措那	小头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[29]
30	纳木错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris microcephalus</i>	[29]
31	羊卓雍错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[29]
32	巴松错	红目鲫 <i>Racoma biddulphi</i> Gunther	[29]
33	玛旁雍错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris waddelli</i>	[29]
34	班公错	娃娃鱼 <i>Racoma tibetanus</i>	[29]
35	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[41]
36	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[38]
37	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[41]
38	太湖	银鲤 Silver carp	[41]
39	太湖	银鲤 Silver carp	[17]
40	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[41]
41	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[41]
42	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[17]
43	太湖	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	[41]
44	太湖	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	[17]
45	太湖	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	[41]
46	太湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[17]
47	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[17]

编号	湖泊	鱼类	文献
48	太湖	白鲢鱼 <i>Hemiculter leucisculus</i>	[17]
49	太湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[17]
50	淀山湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[45]
51	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[17]
52	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[31]
53	太湖	乔丁鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[17]
54	太湖	针鱼 <i>Tylosurus melanotus</i>	[17]
55	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[17]
56	太湖	似鱮 <i>Toxabramis swinhonis</i>	[17]
57	太湖	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[17]
58	太湖	太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	[17]
59	太湖	银鱼 <i>Hemisanx prognathus</i> Regan	[17]
60	太湖	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	[74]
61	太湖	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	[9]
62	太湖	翘嘴鲌 <i>Culter mongolicus</i> Basilewsky	[17]
63	太湖	达氏鲌 <i>Culter dabryi</i>	[17]
64	太湖	翘嘴红鲌 <i>Paracanthobrama guichenoti</i> Bleeker	[17]
65	太湖	翘嘴红鲌 <i>Paracanthobrama guichenoti</i> Bleeker	[74]
66	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[17]
67	太湖	长春鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	[17]
68	太湖	黄鳊 <i>Monopterus albus</i>	[74]
69	太湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[74]
70	淀山湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[45]
71	淀山湖	河川沙塘鳢 <i>Odontobutis potamophila</i>	[45]
72	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[74]
73	太湖	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	[74]
74	淀山湖	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	[45]
75	淀山湖	麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	[45]
76	洞庭湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[49]
77	洞庭湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[49]
78	洞庭湖	鱼 Fish	[49]
79	洞庭湖	黄鳊 <i>Monopterus albus</i>	[49]
80	洞庭湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[49]
81	洞庭湖	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	[49]
82	洞庭湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[49]
83	洞庭湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[49]
84	洞庭湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[49]
85	洞庭湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[49]
86	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[74]
87	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[74]
88	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[74]
89	太湖	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[74]
90	洞庭湖	长江江豚 <i>Neophocaena phocaenoides asiaeorientalis</i>	[50]
91	太湖	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	[21]
92	太湖	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[62]
93	太湖	虾 Shrimp	[63]
94	太湖	大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	[64]
95	百花湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[25]

续表

编号	湖泊	鱼类	文献
96	百花湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[25]
97	百花湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[25]
98	百花湖	偏嘴突吻鱼 <i>Varicorhinus</i>	[25]
99	百花湖	小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyatis</i>	[25]
100	百花湖	白鲦 <i>Hemiculter leucisculus</i>	[25]

附表 5 图 6b 中 PBDEs 数据对应湖泊、生物物种及参考文献  
Appendix 5 The related lakes, species, and references for the PBDEs data in Fig.6b

编号	湖泊	鱼类	文献
1	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[74]
2	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[15]
3	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[74]
4	太湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[15]
5	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[74]
6	太湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[15]
7	白洋淀	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[52]
8	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[74]
9	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[15]
10	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[15]
11	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[18]
12	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[18]
13	白洋淀	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[52]
14	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[39]
15	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[15]
16	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[52]
17	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[74]
18	太湖	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[15]
19	白洋淀	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[74]
20	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[74]
21	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[15]
22	太湖	翘嘴红鲌 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	[15]
23	太湖	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[15]
24	太湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[15]
25	白洋淀	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[52]
26	太湖	乔丁鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[15]
27	太湖	大鳍鱮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	[15]
28	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[15]
29	太湖	乔丁鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	[16]
30	太湖	针鱼 <i>Tylosurus melanotus</i>	[15]
31	太湖	似鳊 <i>Toxabramis swinhonis</i>	[15]
32	太湖	长春鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	[15]
33	太湖	红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	[15]
34	太湖	太湖新银鱼 <i>Neosalanx taihuensis</i>	[15]
35	太湖	银鱼 <i>Hemisanx prognathus</i> Regan	[15]
36	太湖	蒙古鲌 <i>Culter mongolicus</i> Basilewsky	[15]
37	太湖	达氏鲌 <i>Culter dabryi</i>	[15]
38	太湖	似刺鳊鮡 <i>Paracanthobrama guichenoti</i> Bleeker	[15]

编号	湖泊	鱼类	文献
39	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[15]
40	白洋淀	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[52]
41	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[18]
42	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[18]
43	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[18]
44	太湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[18]
45	太湖	花鱼骨 <i>Hemibarbus maculatus</i> Bleeker	[18]
46	太湖	虾 Shrimp	[18]
47	太湖	虾 Shrimp	[18]
48	太湖	虾 Shrimp	[18]
49	太湖	虾 Shrimp	[18]
50	白洋淀	虾 Shrimp	[75]
51	白洋淀	短尾下目 <i>Brachyura</i>	[75]
52	白洋淀	克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	[75]
53	白洋淀	蚌 <i>Unionidae</i>	[75]
54	白洋淀	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[75]
55	白洋淀	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[75]
56	白洋淀	黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	[75]
57	白洋淀	泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	[75]
58	白洋淀	甲鱼 <i>Amyda sinensis</i>	[75]
59	白洋淀	鸭 Duck	[75]
60	青海湖	湟鱼 <i>Gymnocypris przewalskii</i>	[52]
61	托素湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[52]
62	措那	小头高原鱼 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[52]
63	纳木错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[52]
64	羊卓雍错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[52]
65	巴松错	红目鲫 <i>Racoma biddulphi</i> Gunther	[52]
66	玛旁雍错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[52]
67	班公错	小头高原鱼 <i>Gymnocypris waddellii</i>	[52]
68	洞庭湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[69]
69	洞庭湖	黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	[69]
70	洞庭湖	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	[69]
71	洞庭湖	鲢鱼 <i>Silurus asotus</i>	[69]
72	洞庭湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[69]
73	洞庭湖	鲫鱼 <i>Carassius auratus</i>	[69]
74	洞庭湖	鱼 Fish	[69]
75	洞庭湖	鱼 Fish	[69]
76	洞庭湖	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>	[69]
77	洞庭湖	鱼 Fish	[69]
78	洞庭湖	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[69]
79	洞庭湖	乌鳢 <i>Ophiocephalus argus</i> Cantor	[69]
80	洞庭湖	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	[69]
81	太湖	白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	[17]
82	太湖	鳊鱼 <i>Aristichthys nobilis</i>	[17]
83	太湖	鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	[17]
84	太湖	翘嘴鲌 <i>Culter alburnus</i> Basilewsky	[17]
85	白洋淀	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	[75]
86	洞庭湖	长江江豚 <i>Neophocaena phocaenoides asiaorientalis</i>	[69]
87	太湖	铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	[21]