

## 2015—2016年环太湖河道进出湖总磷负荷量计算及太湖总磷波动分析\*

翟淑华<sup>1</sup>, 周 娅<sup>1\*\*</sup>, 程媛华<sup>1</sup>, 蔡 杰<sup>1</sup>, 胡燕雯<sup>2</sup>

(1: 太湖流域水资源保护局, 上海 200434)

(2: 香港理工大学, 香港 999077)

**摘要:** 太湖流域水环境综合治理力度空前, 太湖总磷浓度却于 2015、2016 年重回升势, 蓝藻大面积暴发情况也未得到有效遏制. 本文从 2015 和 2016 年环太湖河道的进出太湖水量、总磷负荷量计算入手, 结合雨情、水情、太湖调蓄以及人为影响等各方面因素, 分别开展水量和总磷负荷质量的平衡分析. 在此基础上, 结合 2010—2017 年环太湖河流多年平均进出太湖总磷负荷量对比, 分析太湖总磷的外源、内源变化趋势及来源, 探讨 2015 和 2016 年太湖总磷升高的原因及控制重点方向. 结果表明, 2015 和 2016 年为太湖流域丰水年, 尤其是 2016 年发生特大洪水, 太湖年内最高水位达 4.87 m, 仅次于 1999 年的 4.97 m 的历史最高水位. 2015 和 2016 年大量外源总磷负荷进入太湖, 其中环太湖河道带入的总磷负荷量占年度太湖总磷负荷总量的 66.8% 和 74.2%, 成为进入太湖的总磷负荷的主要外源; 加之, 2015 年太湖水生植物收割造成当年沉水植物面积较上年同期下降 88.7%, 水生植物骤减导致对磷的吸收转化能力下降, 滞留在湖体中的总磷负荷量占年度太湖总磷负荷总量的 21.5% 和 27.5%, 成为影响太湖水体总磷浓度的重要内源. 太湖总磷浓度升高又为太湖蓝藻暴发进一步提供了营养盐基础, 亟需强化太湖总磷源头的控制、减少总磷入湖总量.

**关键词:** 太湖; 总磷; 负荷量; 质量平衡

## Calculation of total phosphorus loads from rivers around Lake Taihu and analysis of total phosphorus fluctuation in the lake in 2015–2016\*

ZHAI Shuhua<sup>1</sup>, ZHOU Ya<sup>1\*\*</sup>, CHENG Yuanhua<sup>1</sup>, CAI Jie<sup>1</sup> & HU Yanwen<sup>2</sup>

(1: *Taihu Basin Water Resources Protection Bureau, Shanghai 200434, P.R.China*)

(2: *Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, P.R.China*)

**Abstract:** Government has strengthened the comprehensive management and restoration of the water environment in Taihu Basin. Despite the great efforts, the total phosphorus concentration in Lake Taihu rebounded in 2015–2016. Occurrence of cyanobacterial blooms has not been effectively inhibited. Thus, this essay is going to examine the reasons behind and figure out the key direction in controlling the total phosphorus in Lake Taihu. The water quantity balance analysis and the total phosphorus mass balance analysis will be carried out through the calculation of the total phosphorous fluxes and the water flows between Lake Taihu and the surrounding rivers. Affecting factors, including rainfall, lake storage regulation and human factors, will also be considered. Based on the analysis, we will investigate the sources of total phosphorus change in Lake Taihu as well as the reasons of variations. The results showed that Taihu Basin had abundant rainfall in 2015–2016, especially in 2016, there was a severe basin flooding. The maximum water level of Lake Taihu reached 4.87 m, only 0.1 m lower than that of the historical record in 1999. Enormous total phosphorus load flowed from the surrounding rivers to Lake Taihu, which became the main external source of Lake Taihu's total phosphorus load. The load from rivers occupied 66.8% and 74.2% of the annual total phosphorus load in Lake Taihu in 2015 and 2016, respectively. On the other hand, for internal source, the massive reduction of submerged plants played an important role in affecting the total phosphorus concentration in Lake Taihu. The area of submerged aquatic plants in Lake Taihu decreased by 88.7% in 2015.

\* 2019-04-28 收稿; 2019-08-26 收修改稿.

江苏省重点研发计划项目 (BE2018737) 资助.

\*\* 通信作者; E-mail: zhouya@tba.gov.cn.

The large-scale harvest of aquatic plants hindered the phosphorus absorption and transformation capacity of the lake. In 2015 and 2016, the total phosphorus load retained in Lake Taihu accounted for 21.5% and 27.5% of the total phosphorus load. The increase in total phosphorus concentration in Lake Taihu provided a strong foundation for cyanobacterial blooms. It is urgent to lower the amount of total phosphorus into Lake Taihu and tighten the control of the total phosphorus sources.

**Keywords:** Lake Taihu; total phosphorus; load; mass balance

2007年太湖蓝藻暴发引发无锡供水危机后,太湖流域水环境综合治理的力度进一步加大,连续十一年实现太湖“确保饮用水安全、确保太湖水体不发生大面积水质黑臭”的目标。太湖氨氮浓度和总氮(TN)浓度明显下降,但总磷(TP)浓度于2015—2016年重回升势,相应2017年太湖出现历史上最大面积的蓝藻水华,太湖蓝藻暴发势头未得到有效控制,富营养化形势依然严峻<sup>[1-5]</sup>。太湖TP浓度波动上升和蓝藻大面积暴发的原因,再次成为政府各级部门和社会关注的焦点,但尚未达成统一认识。Qin等<sup>[2]</sup>的研究认为近年来TP浓度波动上升的原因是多方面的,是污水排放标准较低、面源控制力度不足、内源措施不够经济有效、气候变化等多因素共同作用的结果。张民等<sup>[3]</sup>认为,对蓝藻水华生物量的相关驱动因素中,营养盐(TP或氮磷比)可单独解释蓝藻生物量变化的29%。朱广伟等<sup>[4]</sup>重点对太湖北部湖区开展了研究,认为藻类生物体含有的营养盐是水体营养盐的重要组成部分,水华堆积之后的耗氧效应大大加快了底泥磷的释放,造成夏季水体磷浓度升高,同时近年来北部湖区叶绿素a浓度的波动很大程度上受水文气象因子的影响。王华等<sup>[5]</sup>基于2010—2017年的监测数据及其相关性分析,认为太湖2014—2017年TP浓度总体呈上升趋势,尤其是2016年为8年间最高值,并从长系列趋势分析的角度分析了入湖河流污染负荷量、水生植被和蓝藻变化与TP浓度的关系,但并未对2015—2016年大洪水条件对TP的影响进行深入分析。

太湖流域2015—2016年发生流域性大洪水,特别是2016年太湖最高水位达4.87 m,仅低于1999年的4.97 m的历史最高水位0.10 m,太湖TP浓度在高水位条件下不降反升。朱伟等<sup>[6]</sup>认为,太湖梅梁湖等北部湖湾2015—2017年TP浓度相较于2012—2014年提高了20%~25%左右,为蓝藻水华形成提供了丰富的物质基础,并认为TP浓度波动的主要原因为:大洪水携带大量营养盐进入太湖,由于磷大多数以颗粒态存在,洪水消退后仍沉积在湖泊中,并在适宜条件下释放进入水体。但该研究仅通过2015—2016年入湖TP负荷总量偏大进行推断,详细论证主要针对北部湖湾。因此,有必要进一步对2015—2016年进出全太湖的TP来源开展更为全面、深入的定量计算和详细论证。研究表明,环太湖河流是影响太湖水环境的重要因素,其进出太湖的水量、水质和污染负荷量一直以来得到广泛关注,有对长系列数据的变化趋势分析<sup>[7]</sup>,也有对个别年份的深入探讨<sup>[8-10]</sup>,但针对流域性大洪水条件下环太湖河道进出太湖的污染负荷量计算分析及其对太湖TP变化影响,以太湖水质量和质量平衡为基础开展太湖TP来源与影响分析的研究还未见报道。

经过太湖流域水环境综合治理,入湖河道TP浓度呈改善趋势,但太湖TP浓度却于2015—2016年出现较为明显的上升。因此,鉴于2015—2016年水文条件的特殊性,不仅要考虑水质浓度的变化,还需要综合考虑TP入湖负荷量的变化。本文从2015—2016年环太湖河道的进出太湖水量、TP负荷量计算入手,结合雨情、水情、太湖调蓄以及人为影响等各方面因素,分别开展出入太湖的水量和TP负荷质量的平衡分析。在此基础上,开展太湖TP的外源、内源变化趋势及来源分析,探讨2015—2016年太湖TP浓度升高的原因,提出有关今后太湖控磷措施的重点方向。

## 1 方法与计算

自1998年起,太湖流域水资源保护局连续每年组织开展环太湖河道进出太湖的污染负荷量计算。为保持数据的连续性,本文采用的水量资料为整编后的环太湖水文巡测资料,水质资料为流域机构监测的环湖河流及水功能区水质监测资料。计算望亭(立交)站入湖污染负荷时,采用“引江济太”每日监测的水质数据;计算其他河流污染负荷时,采用当月环湖河流水质数据;计算出湖污染负荷时,采用太湖沿岸区相应监测点的水质数据。计算采用的环太湖水文巡测段、水质监测站点分布及对应关系详见图1。

### 1.1 太湖水量平衡要素与计算方法

1.1.1 水量平衡计算方法 采用翟淑华等<sup>[11]</sup>的方法,基于2015—2016年环太湖河道进出湖水量计算,结合

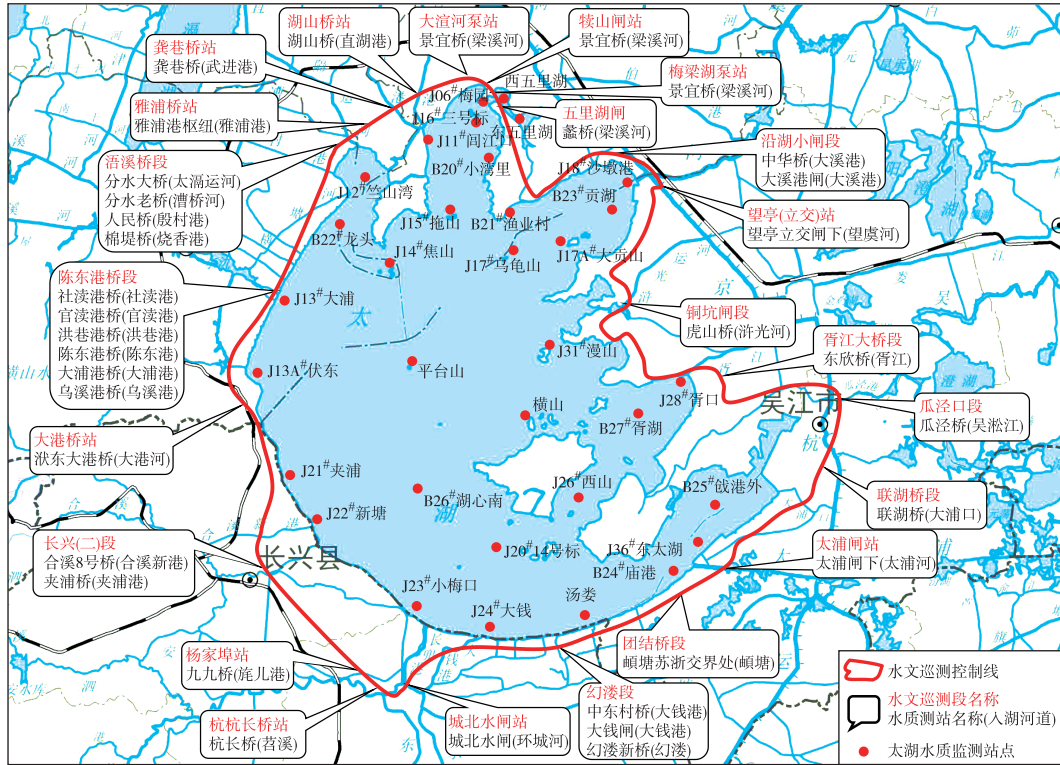


图 1 环太湖水文巡测段、水质监测站点分布及对应关系示意图

Fig.1 Sketch of the hydrological survey sections and water quality monitoring stations and their corresponding relationship

降雨量、蒸发量、太湖调蓄水量、取用水量等要素,开展进出太湖的水量平衡计算分析,公式为:

$$W_1 - W_0 + P - E - W_c + D - \Delta V = \Delta E_1 \quad (1)$$

式中,  $W_1$ 、 $W_0$  为环太湖河流进、出湖水量,根据环太湖水文巡测整编资料成果统计;  $P$  为湖面降水量,即太湖年降雨量与太湖平均水位下对应的水面面积的乘积;  $E$  为湖面蒸发量,即太湖年蒸发量与太湖平均水位下对应的水面面积的乘积;  $D$  为陆地产水入湖量,即环太湖水文巡测线范围内的陆地区域的产水入湖量;  $W_c$  为取水户直接取水量;  $\Delta V$  为太湖蓄变量,太湖年末与年初蓄水量的差值;  $\Delta E_1$  为水量平衡计算的绝对误差。

水量平衡计算的相对误差  $\Delta E_2$  的计算公式为:

$$\Delta E_2 = 2\Delta E_1 / (W_1 + W_0 + P + E + W_c + D + |\Delta V|) \quad (2)$$

1.1.2 水量平衡要素计算 1) 环太湖河道进出湖水量计算. 根据实测水量整编数据计算得到,2015、2016 年环太湖河道入湖水量分别为 119.08 亿和 159.85 亿  $m^3$ , 出湖水量分别为 118.47 亿和 167.27 亿  $m^3$ 。

2) 降雨量、蒸发量计算. 2015 年太湖全年平均水位 3.42 m, 对应的太湖水面面积为 2338.6  $km^2$ , 太湖湖面降水量 1523.3 mm, 折算为入湖量 35.62 亿  $m^3$ , 湖面蒸发量为 914.1 mm, 折算为出湖量 20.74 亿  $m^3$ ; 2016 年太湖全年平均水位 3.58 m, 对应的太湖水面面积为 2351  $km^2$ , 太湖湖面降水量 1861.1 mm, 折算为入湖量 43.75 亿  $m^3$ , 湖面蒸发量为 1061.8 mm, 折算为出湖量 24.96 亿  $m^3$ 。

3) 太湖调蓄水量计算. 2015 年太湖年初水位为 3.18 m, 年末水位为 3.50 m, 根据太湖水位-库容关系得到太湖蓄水量年初为 49.00 亿  $m^3$ , 年末为 56.52 亿  $m^3$ , 蓄变量为 7.52 亿  $m^3$ 。2016 年太湖年初水位为 3.41 m, 年末水位为 3.28 m, 根据太湖水位-库容关系得到太湖蓄水量年初为 54.37 亿  $m^3$ , 年末为 51.28 亿  $m^3$ , 蓄变量为 -3.09 亿  $m^3$ 。

4)其他水量要素计算. 根据太湖流域管理局发布的水资源公报,2015年直接从太湖取水水量约为10.02亿 $m^3$ ,2016年直接从太湖取水水量约为10.86亿 $m^3$ . 经估算,环太湖巡测线所围面积为3128.0 $km^2$ ,扣除农业灌溉耗水量后,2015年陆地产水入湖量大致为1.82亿 $m^3$ ,2016年陆地产水入湖量大致为1.89亿 $m^3$ .

1.1.3 水量平衡计算结果 计算结果见表1,可见水量平衡误差在规范要求的误差范围内.

表1 2015—2016年太湖水量平衡(单位:亿 $m^3$ )

Tab.1 Water quantity balance of Lake Taihu in the year of 2015–2016 (Unit:  $10^8 m^3$ )

时间	入项			出项			蓄变量 $\Delta V$	绝对误差 $\Delta E_1$	相对误差 $\Delta E_2 / \%$
	环湖河流 入湖量	湖面 降雨量	陆地产水 入湖量	环湖河流 出湖量	湖面 蒸发量	取水户直接 取水量			
2015年	119.08	35.62	1.82	118.47	20.74	10.02	7.52	-0.23	0.15
2016年	159.85	43.75	1.89	167.27	24.96	10.86	-3.09	-0.69	-0.33

## 1.2 太湖总磷质量平衡计算

1.2.1 质量平衡计算方法 采用翟淑华等<sup>[11]</sup>的方法,基于2015—2016年环太湖河道进出湖TP负荷量计算,结合大气干湿沉降、取水、水生生物收获、太湖年初和年末存量等要素,开展进出太湖的TP质量平衡计算分析,公式为:

$$W_{河入} + W_{降雨} + W_{降尘} + W_{污染源} + W_{年初} = W_{河出} + W_{取水} + W_{收获} + W_{年末} + W_{滞留量} \quad (3)$$

式中, $W_{河入}$ 为通过河流直接进入太湖的量, $W_{降雨}$ 、 $W_{降尘}$ 为通过降雨、降尘直接进入太湖的量, $W_{污染源}$ 为巡测线内各污染源进入太湖的量; $W_{年初}$ 为年初太湖水体中存量; $W_{河出}$ 为通过河流直接出太湖的量; $W_{取水}$ 为通过水厂取水带出太湖的量; $W_{收获}$ 为通过水生生物收获带出太湖的量,包括蓝藻打捞、水草收割、鱼类捕获等; $W_{年末}$ 为年末太湖水体中存量; $W_{滞留量}$ 为太湖扣除水体存量变化以后滞留在湖体中的量.

太湖地区污染源排放的污染负荷量主要通过环太湖河道进入太湖,暂未考虑巡测线内污染源直接放入湖量.太湖物料平衡计算公式简化后得到滞留的污染负荷量为:

$$W_{滞留量} = (W_{河入} + W_{降雨} + W_{降尘}) - (W_{河出} + W_{取水} + W_{收获}) - (W_{年末} - W_{年初}) \quad (4)$$

质量平衡计算得到的平衡差主要为滞留量及资料统计带来的误差,当假设统计误差为零时,则平衡差即认为是当年度太湖滞留量.

1.2.2 质量平衡要素计算 1)环太湖河道出入湖TP负荷量计算.环太湖水文巡测段水量资料有每天一次的连续监测数据,而环太湖水质监测资料多为每月一次.针对水量水质监测频次不匹配的问题,时段通量的估算主要有两种方法:第1种是将每月一次水质监测的当天负荷量作为当月的平均负荷量,适用于污染物质受流量影响较小的情况;第2种是将每月一次的水质数据作为当月的平均水质浓度,适用于污染物质受流量影响较大的情况<sup>[12]</sup>.根据环太湖河道进出太湖的逐日流量统计,河流的日流量变化较大,水量影响明显大于水质的影响,故选用第2种方法进行环太湖出入湖污染负荷量的计算.采用与水量巡测段相匹配的河流水质资料,计算得到2015和2016年通过环太湖河流带入TP的负荷量分别为2209和2594t,带出分别为643和906t,通过河流净流入湖的TP负荷量为1565和1688t.

2)大气干湿沉降入湖量估算.研究表明,氮、磷大气干湿沉降是太湖营养盐输入的重要来源之一<sup>[13-17]</sup>.本文综合考虑监测时间、点位、频次和方法,在各研究结果中选取适宜的沉降率参数,其中,湿沉降率采用太湖流域管理局《太湖大气干湿沉降监测试验分析单元工程成果报告》中的数据,干沉降率采用刘涛等<sup>[16]</sup>的研究结果.结合流域降水情况,计算得到2015年太湖TP湿沉降量和干沉降量分别为182和562t,2016年太湖TP湿沉降量和干沉降量分别为222和390t.

3)其他途径出湖量估算.水厂直接取水带出的TP量根据当年的取水量和原水水质浓度估算,2015和2016年分别为65和65t. $W_{收获}$ 分为 $W_{蓝藻}$ 、 $W_{水草}$ 和 $W_{鱼类}$ ,分别为蓝藻打捞、水草收割及鱼类捕捞带出量.蓝藻打捞带出的TP量根据江苏省水资源公报中的蓝藻打捞量和太湖健康状况报告中蓝藻的氮磷含量估算,2015和2016年分别为164和160t.水草收割带出的TP量根据江苏省水资源公报中的水草打捞量和王强等<sup>[18]</sup>所测水草中氮磷含量估算,2015和2016年分别为933和714t.渔业统计资料显示,太湖鱼类捕捞产量

总体呈不断增长趋势<sup>[19]</sup>. 鱼类捕捞带出 TP 量根据江苏省太湖渔业管理委员会统计的鱼类捕捞量和太湖污染物自净能力与适宜换水周期研究项目所测鱼体中氮磷含量估算, 2015 和 2016 年分别为 183 和 226 t.

4) 太湖水体年初和年末存量计算. 根据太湖年初、年末蓄水量和年初、年末水质进行计算, 其中蓄水量按照年初、年末水位条件下的水位-库容曲线插值计算. 计算得到 2015 年年初存量为 353 t, 年末存量为 607 t; 2016 年年初存量为 288 t, 年末存量为 462 t.

1.2.3 质量平衡计算结果 依据上述方法的数据, 开展 2015—2016 年太湖 TP 质量平衡计算, 计算结果见表 2, 2015 和 2016 年太湖 TP 的滞留量分别为 711 和 961 t.

表 2 2015—2016 年进出太湖的总磷负荷量  
Tab.2 Total phosphorous flux in and out of Lake Taihu in 2015–2016

项目	总磷负荷量/t		项目	总磷负荷量/t	
	2015 年	2016 年		2015 年	2016 年
$W_{\text{年初}}$	353	288	$W_{\text{年末}}$	607	462
入湖 $W_{\text{河入}}$	2209	2594	出湖 $W_{\text{河出}}$	643	906
$W_{\text{降雨}}$	182	222	$W_{\text{取水}}$	65	65
$W_{\text{降尘}}$	562	390	$W_{\text{收获}}$	1280	1100
小计	2953	3206	小计	1988	2071
			$W_{\text{滞留量}}$	711	961
合计	3306	3494	合计	3306	3494

## 2 分析与讨论

### 2.1 2015—2016 年太湖总磷来源分析

一般情况下, 输入湖泊系统的磷大多来自河流, 这部分磷主要是人类活动产生的污水带来的, 其他输入途径还有来自大气的干湿沉降. 进入水体的 TP 在经过河流带出、取水带出、水生生物收获带出后, 剩余的 TP 滞留于湖体, 一部分造成水体 TP 存量的变化, 另一部分滞留于底泥中或水生生物体内. 2015 和 2016 年太湖各途径进出湖 TP 负荷量分布见图 2.

2015 年, 太湖水体年初存量为 353 t, 外源输入量为 2953 t, 合计总负荷量为 3306 t; 经各途径带出 1988 t 后, 剩余 TP 量为 1318 t, 其中 607 t 为水体中年末存量, 其余 711 t 即为滞留量. 在各带入途径中, 通过河道带入的 TP 量为 2209 t, 占总负荷量的 66.8%; 通过大气干、湿沉降带入的 TP 量分别为 562 和 182 t, 占比分别为 17.0% 和 5.5%. 在各带出途径中, 通过河道带出的 TP 量为 643 t, 占总负荷量的 19.4%; 通过打捞蓝藻、水草和鱼类等水生生物带出的 TP 量为 1280 t, 占比 38.7%; 通过取水带出的 TP 量为 65 t, 占比 2.0%. 相应计算得出, 太湖水体中增加的 TP 为 254 t, 而滞留于底泥和被水生生物吸收转化的量则达到 711 t, 占总负荷量的 21.5% (图 2a).

2016 年, 太湖水体年初存量为 288 t, 外源输入量为 3206 t, 合计总负荷量为 3494 t; 经各途径带出 2071 t 后, 剩余 TP 量为 1423 t, 其中 462 t 为水体中年末存量, 其余 961 t 即为滞留量. 在各带入途径中, 通过河道带入的 TP 量为 2594 t, 占总负荷量的 74.2%; 通过大气干、湿沉降带入的 TP 量分别为 390 和 222 t, 占比分别为 11.2% 和 6.4%. 在各带出途径中, 通过河道带出的 TP 量为 906 t, 占总负荷量的 25.9%; 通过打捞蓝藻、水草和鱼类等水生生物带出的 TP 量为 1100 t, 占比 31.5%; 通过取水带出的 TP 量为 65 t, 占比 1.9%. 相应计算得出, 太湖水体中增加的 TP 为 174 t, 而滞留于底泥和被水生生物吸收转化的量则达到 961 t, 占总负荷量的 27.5% (图 2b).

综合上述分析认为, 影响太湖 TP 浓度变化的主要因素包括: 1) 环太湖河道是 TP 进入太湖最主要的途径, 尤其是 2016 年的特大洪水, 大量营养盐通过河道带入太湖, 占比 74.2%; 2) 水生生物收获对太湖水生态环境具有重要影响, 2015 年受太湖水草大面积收割及太湖持续高水位的影响, 水生生物带出 TP 量占比为 38.7%, 可能导致水生生物对磷的吸收利用减少. 3) 逐年累积的内源污染是太湖 TP 浓度升高的又一重要原

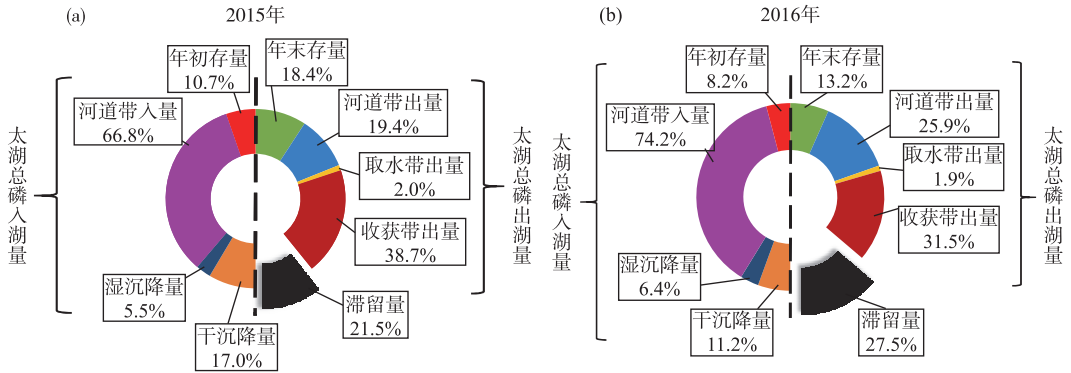


图 2 2015 年 (a) 和 2016 年 (b) 各途径进出太湖的总磷负荷量分布

Fig.2 Distribution of total phosphorus flux in and out of Lake Taihu in different ways in 2015 (a) and 2016 (b)

因,底泥中的滞留量和生物中吸收转化的 TP 量占比为 21.5%~27.5%,远超水体中 TP 存量的变化,而这部分磷在适宜条件下很容易再次释放到水体中.与王华等<sup>[5]</sup>从定性角度推断上述因素为太湖 TP 波动的初步原因不同,TP 质量平衡分析对大洪水条件下各因素对太湖 TP 存量的贡献率进行了定量.下文将重点研究 2015—2016 年环太湖河道、水生植物及底泥变化情况,尤其是通过与多年平均的比较开展深入细化分析.

### 2.2 环太湖河道进出太湖总磷负荷量变化的影响

将 2015 和 2016 年 TP 净入湖量与多年平均值(2010—2017 年)相比较,结果见图 3.与多年平均值相比,2015 年净入湖量差别不大.从环太湖河道所在行政区分析,常州略偏少,宜兴和长兴略偏多,苏州出湖偏多;2016 年除常州、无锡净入湖量与多年平均值基本持平以外,其余地区均大幅偏多,其中宜兴比多年平均偏多 233.2 t,湖州为多年平均值的 7 倍,长兴为多年平均值的 2.7 倍.从空间分布上,2015 和 2016 年 TP 的入湖负荷量以宜兴地区入湖河道带入为最多,所占比重分别约为 65%和 60%.

从具体环太湖河道分析,环太湖水文巡测段的入湖、出湖及净入湖 TP 负荷见表 3.结合图 1 可以看出,太湖西北部陈东港桥段和浯溪桥段的入湖 TP 负荷量最大,2015 和 2016 年两者负荷量之和分别占所有河道入湖量的 77%和 71%;而望虞河由于受到太湖高水位的影响,则由引水入湖为主改为排泄太湖洪水为主,两年均为净出湖.

环太湖河道 TP 负荷量年内变化则与流域水情密切相关.2015 和 2016 年太湖流域年降水量分别位列 1951 年以来第 3 位和第 1 位.时间分布上,2015 年在 6 月出现明显的峰值,远高于其他月份;2016 年最高值同样出现在 6 月,但 9—10 月降雨也异常偏多,太湖流域发生秋汛.相应于雨情,环太湖河道出入太湖的水量也呈现大进大出的格局,2015 年入湖 119.1 亿 m<sup>3</sup>,出湖 118.5 亿 m<sup>3</sup>;2016 年入湖 159.9 亿 m<sup>3</sup>,出湖 167.3 亿 m<sup>3</sup>.时间分布上,2015 年入湖水量主要集中在 6 月和 7 月,两月的水量约占全年入湖总水量的 35%;2016 年入湖水量最大值同样出现在 6 月和 7 月,两月的水量约占全年入湖总水量的 33%.相应地,环太湖河道入湖 TP 量也呈现类似的规律,与流域降雨量的变化呈现明显的正相关关系(图 4).2015 年入湖 TP 量主要集中在 6 月和 7 月,两月的入湖量约占全年入湖总量的 37%;2016 年入湖 TP 量最大值同样出现在 6 月和 7 月,两月的入湖量约占全年入湖总量的 32%.

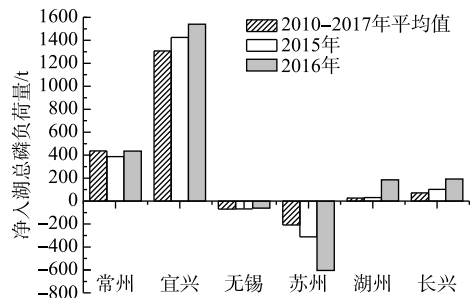


图 3 2015 和 2016 年环太湖河道净入湖总磷负荷量与多年平均值(2010—2017 年)的比较

Fig.3 Comparison of the net input of total phosphorus to Lake Taihu from 2015 to 2016 and the annual average from 2010 to 2017

表 3 2015 和 2016 年环太湖河道出入湖总磷负荷量分布

Tab.3 Percentage of total phosphorus flux in and out of Lake Taihu in 2015 and 2016

地区	站、段名	2015 年		2016 年		
		入湖	出湖	入湖	出湖	
长兴 湖州	长兴(二)段	4.7%	0.1%	7.5%	0.4%	
	杨家埠	4.1%	0.1%	6.4%	0.3%	
	杭长桥	2.5%	9.1%	4.9%	6.5%	
	城北水闸	0.3%	2.7%	0.2%	2.1%	
苏州	幻溇段	1.2%	10.9%	1.5%	7.8%	
	团结桥段	0.0%	2.4%	0.1%	1.7%	
	太浦闸	0.0%	24.1%	0.0%	32.2%	
	联湖桥段	0.0%	4.3%	0.0%	4.0%	
	瓜泾口段	0.1%	12.9%	0.1%	11.1%	
	胥江大桥段	0.1%	1.7%	0.2%	1.4%	
	铜坑闸段	1.3%	0.6%	0.9%	0.2%	
	望亭(立交)	2.3%	16.1%	0.6%	21.4%	
	无锡	沿湖小闸段	0.1%	0.5%	0.0%	0.3%
		五里湖闸	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%
梅梁湖泵站		0.0%	6.6%	0.0%	3.8%	
犊山闸		0.2%	0.6%	0.1%	0.5%	
大渲河泵站		0.0%	6.6%	0.0%	5.2%	
常州	湖山桥	0.6%	0.0%	0.8%	0.0%	
	龚巷桥	2.8%	0.0%	3.0%	0.0%	
	雅浦桥	2.1%	0.0%	2.2%	0.0%	
	浔溪桥段(分水桥)	12.7%	0.0%	11.6%	0.1%	
宜兴	浔溪桥段(除分水桥外)	21.2%	0.0%	15.5%	0.1%	
	陈东港桥段	43.5%	0.7%	44.1%	0.9%	
	大港桥站	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	
	合计	100%	100%	100%	100%	

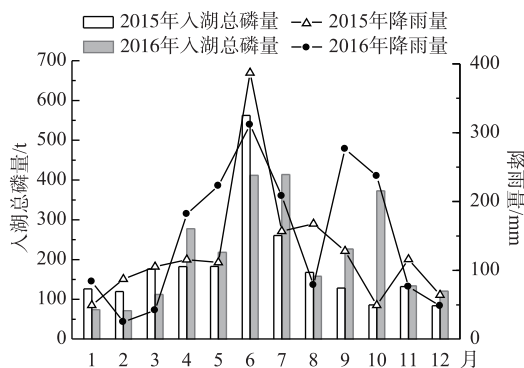


图 4 2015 和 2016 年环太湖河道入湖总磷量及流域降雨量的年内变化

Fig.4 Variation of total phosphorus flux from rivers into Lake Taihu and rainfall of the basin in 2015 and 2016

### 2.3 太湖沉水植物覆盖度变化的影响

针对太湖沉水植物覆盖度变化,分春、夏、秋 3 季连续 6 年,采用遥感方法结合现场调查进行反演计算<sup>[20]</sup>,开展了太湖沉水植物覆盖度调查研究,鉴于资料的连续性和太湖水体黑臭出现的时间最早为 5 月,故采用 5 月数据进行趋势分析. 2012—2016 年太湖沉水植物 5 月平均分布面积与太湖 TP 浓度的关系见图 5.

2014 年之前太湖东部湖区水草(沉水植物)分布广泛,生长情况良好,沉水植物的根茎叶能吸收底泥和水体中的氮、磷营养物质,促进水体悬浮物质沉淀,抑制沉积物再悬浮,有利于水质的改善;多数沉水植物叶片长至水面,能够有效抑制并阻拦蓝藻的生长和漂移. 2012—2014 年太湖水生植物面积维持在 250~350 km<sup>2</sup>,沉水植物面积维持在 200~300 km<sup>2</sup>左右. 但因大规模打捞水草的过度收割作业以及连续高水位的不利影响,2015 年 5 月太湖沉水植物面

积骤减为 27.65 km<sup>2</sup>, 较 2014 年 5 月的 244.31 km<sup>2</sup> 大幅减少, 降幅达到 88.7%。2016 年 5 月面积略有上升, 为 47.33 km<sup>2</sup>, 但仍比 2014 年同期少 80.6%。相对于分布面积的变化, 太湖沉水植物年均单位面积生物量变化幅度相对较小, 2012—2016 年年际变化幅度为 7%~31%。

通常, 湖泊水体中的生物有效磷很低, 但沉积物间隙水的磷酸盐浓度是上覆水的 9~600 倍, 有根大型水生植物体内 85% 的磷是从沉积物间隙水中获得的<sup>[21]</sup>。张来甲等<sup>[22]</sup> 研究发现, 苦草腐解使 3 月水体 TP 总量较之前增长了 144.40%, 而底泥中增长了 19.99%, 可见植物腐解对水体的影响远大于底泥。当沉水植物腐烂后, 植物体内的磷主要释放到水体中, 而不是底泥中, 因此, 适时开展对水生生物的收割是十分必要的, 但同时保持湖泊中适量的沉水植物对于减少磷含量起着重要作用。

而 2015 年大量收割太湖湖体中生长的沉水植物, 湖体中的沉水植物分布面积和总生物量急剧减少, 虽然有效带出了 TP, 但湖中沉水植物的减少相应减少了水生生物对磷的利用转化, 也增加了底泥向上覆水释放磷的几率。

#### 2.4 底泥对太湖水体磷的影响

除水体中 TP 存量变化以外, 滞留的 TP 一部分被水生生物吸收转化, 另一部分则沉降至底泥中。底泥对水体磷的贡献取决于 3 方面, 即底泥中磷的含量、底泥受扰动的程度以及蓝藻的泵吸作用。

2015 年太湖沉水植物大幅下降, 使得可被水生生物吸收转化的 TP 量相应减少, 从而间接地增加了底泥中的 TP 存量。研究表明, 水生植物生长密集区底泥中 TN、TP、总有机碳含量均显著低于水生植物零星生长区<sup>[23]</sup>。2015—2017 年太湖底泥 TP 质量比约为 650 mg/kg, 较 1980s 增加了约 2.5 倍, 西部湖区的底泥 TP 质量比更是达到 1020 mg/kg, 是 1980s 的 5 倍<sup>[24]</sup>。不断累积在底泥中的磷是太湖水体 TP 的重要内源。

2015 和 2016 年的大洪水和骤减的水生植物共同增强了底泥的受扰动程度, 加剧了底泥中的磷向水体的迁移释放。在对底泥开展的静态释放和动态释放试验中发现, 扰动可促使底泥发生大量释放, 而风浪扰动是浅水湖泊沉积物悬浮和营养盐释放的主要驱动力之一, 半天的强风浪扰动可导致水体营养盐浓度增加近 1 倍。理论上, 在大洪水条件下, 底泥中高浓度的 TP 受到强风浪扰动, 更容易释放到水体中。

依据遥感方法开展的太湖蓝藻覆盖面积数据, 2015 和 2016 年太湖蓝藻暴发面积最大分别为 1091.4 和 936.4 km<sup>2</sup>。已有研究成果表明<sup>[25]</sup>, 蓝藻的快速生长导致其从底泥中泵取大量的磷, 使得水体中颗粒磷的含量增加, 水体与沉积物之间的磷平衡被打破, 大量磷由沉积物进入水体, 太湖中的磷含量与蓝藻生长形成不断放大的正向反馈。2015 和 2016 年太湖蓝藻暴发与 TP 浓度的升高也进一步说明其正向反馈作用。

### 3 结论和建议

1) 外源输入 TP 负荷仍然是太湖水体中 TP 的主要来源。2015—2016 年流域为丰水年, 尤其在 2016 年发生特大洪水的情况下, 虽然环湖河道入湖水质是近年来最好的一年, 但由于总水量远超常年, 环湖河道进入太湖的 TP 负荷量仍为近年来的第 2 高值, 达 2594 t, 占太湖 TP 负荷总量的 74.2%。而通过环湖河道带入太湖的磷, 绝大部分难以再通过河流带出, 只能通过人工收获带出、沉降、生物吸收转化等途径得以消减。因此, 对于累积效应明显的磷来说, 河道输入 TP 负荷量是太湖 TP 浓度升高的主要外源。

2) 太湖沉水植物骤减导致湖体对磷的吸收转化能力下降。2015 和 2016 年水生生物带出 TP 负荷量为 1280 和 1100 t, 占比分别为 38.7% 和 31.5%, 虽然带出了大量的磷负荷, 但水生植物的减少一方面使水生植物吸收转化磷的能力急剧下降, 另一方面也增加了底泥向上覆水释放的几率。不合理的过度收割水草, 以及

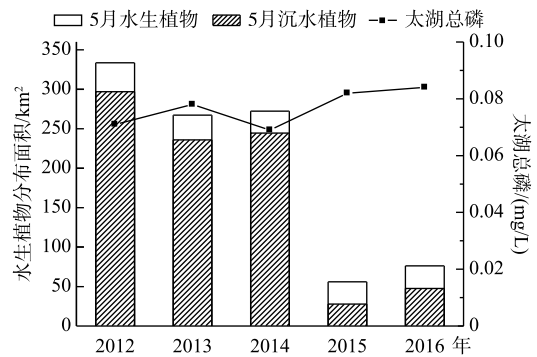


图 5 太湖水生植物分布面积(5月)与太湖总磷浓度的关系

Fig.5 Correlation of the total phosphorus concentration and the area (in May) with macrophytes in Lake Taihu



太湖持续高水位对水草生长的不利影响,成为太湖 TP 浓度升高的重要影响因素。

3) 滞留在底泥中的 TP 在适宜条件下可进入水体,成为太湖水体中 TP 潜在的内部来源。2015 和 2016 年,大量外源负荷进入太湖造成的 TP 滞留量达 711 和 961 t,分别占总负荷的 21.5% 和 27.5%,大洪水条件下加剧了底泥的受扰动程度,同时蓝藻的快速生长与底泥中滞留的磷形成不断放大的正向反馈,成为太湖 TP 浓度升高的又一重要影响因素。

4) 2015—2016 年太湖 TP 浓度升高,虽然体现了大洪水对湖泊生态系统的巨大冲击,增加了 TP 外源的人湖以及内源的扰动释放,但气象条件无法人为控制,对太湖 TP 浓度的控制主要还是要控源截污,从源头减少 TP 输入。在今后的太湖水环境综合治理中,应进一步针对太湖 TP 的来源采取内外兼控的控磷措施,强化对环太湖河流 TP 来源的排摸及控制、深化对底泥的影响及创新处置措施研究、科学合理开展水生生物收割,修复以沉水植被为主的太湖自然生态系统。

#### 4 参考文献

- [ 1 ] Zhu W, Chen HM, Wang RC *et al.* Analysis on the reasons for the large bloom area of Lake Taihu in 2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 621-632. DOI: 10.18307/2019.0302. [朱伟, 陈怀民, 王若辰等. 2017 年太湖水华面积偏大的原因分析. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 621-632.]
- [ 2 ] Qin BQ, Paerl HW, Brookes JD *et al.* Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts. *Science Bulletin*, 2019, **64**: 354-356. DOI: 10.1016/j.scib.2019.02.008.
- [ 3 ] Zhang M, Yang Z, Shi XL. Expansion and drivers of cyanobacterial blooms in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 336-344. DOI: 10.18307/2019.0203. [张民, 阳振, 史小丽. 太湖蓝藻水华的扩张与驱动因素. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 336-344.]
- [ 4 ] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI: 10.18307/2018.0201. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 2005—2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.]
- [ 5 ] Wang H, Chen HX, Xu ZA *et al.* Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 919-929. DOI: 10.18307/2019.0421. [王华, 陈华鑫, 徐兆安等. 2010—2017 年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 919-929.]
- [ 6 ] Zhu W, Tan YQ, Wang RC *et al.* The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010-2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 296-305. DOI: 10.18307/2018.0202. [朱伟, 谈永琴, 王若辰等. 太湖典型区 2010—2017 年间水质变化趋势及异常分析. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 296-305.]
- [ 7 ] Ma Q, Liu JJ, Gao MY. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998-2007. *J Lake Sci*, 2010, **22**(1): 29-34. DOI: 10.18307/2010.0104. [马倩, 刘俊杰, 高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998—2007 年). 湖泊科学, 2010, **22**(1): 29-34.]
- [ 8 ] Zheng Y, Wang XJ, Jiang YC. Analysis on water quality of rivers around Tai Lake and estimation of total pollutant load into Tai Lake. *Geography and Territorial Research*, 2001, **17**(1): 40-44. [郑一, 王学军, 江耀慈. 环太湖河道水质分析与入湖污染物负荷量估算. 地理学与国土研究, 2001, **17**(1): 40-44.]
- [ 9 ] Luo J, Pang Y, Lin Y *et al.* Study on flux of pollutants discharged into Taihu Lake through main inflow river channels. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2005, **33**(2): 131-135. DOI: 1000-1980 (2005)02-0131-05. [罗缙, 逢勇, 林颖等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, **33**(2): 131-135.]
- [ 10 ] Yan SW, Yu H, Zhang LL *et al.* Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 855-862. DOI: 10.18307/2011.0605. [燕姝雯, 余辉, 张璐璐等. 2009 年环太湖入出湖河流水量及污染负荷通量. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.]
- [ 11 ] Zhai SH, Han T, Chen F. Self-purification capacity of nitrogen and phosphorus of Lake Taihu on the basis of mass balance. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 185-190. DOI: 10.18307/2014.0203. [翟淑华, 韩涛, 陈方. 基于质量平衡的太湖氮、磷自净能力计算. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 185-190.]
- [ 12 ] Fu G. Analysis of the estimation methods for the river pollutant fluxes ( I ): Comparison and analysis of the estimation methods of period fluxes. *Research of Environmental Sciences*, 2003, **16**(1): 1-4. [富国. 河流污染物通量估算方法分

- 析(1):时段通量估算方法比较分析. 环境科学研究, 2003, **16**(1): 1-4.]
- [13] Yang LY, Qin BQ, Hu WP *et al.* The atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, **38**(2): 104-110. [杨龙元, 秦伯强, 胡维平等. 太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究. 海洋与湖泊, 2007, **38**(2): 104-110.]
- [14] Zhai SJ, Yang LY, Hu WP. Atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during optimal algal growth period in northern Lake Taihu. *Environmental Pollution Control*, 2009, **31**(4): 5-10. [翟水晶, 杨龙元, 胡维平. 太湖北部藻类生长旺盛期大气氮、磷沉降特征. 环境污染与防治, 2009, **31**(4): 5-10.]
- [15] Yin H. Atmospheric deposition of nutrient salts in eutrophic freshwater lakes [Dissertation]. Shanghai: Fudan University, 2011. [尹昊. 富营养化淡水湖营养盐的大气沉降[学位论文]. 上海: 复旦大学, 2011.]
- [16] Liu T, Yang LY, Hu ZX *et al.* Spatial-temporal features of atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus to the Lake Taihu. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, **24**(6): 20-24, 42. DOI: 1006-2009(2012)06-0020-05. [刘涛, 杨柳燕, 胡志新等. 太湖氮磷大气干湿沉降时空特征. 环境监测管理与技术, 2012, **24**(6): 20-24, 42.]
- [17] Liu L. Study on atmospheric sedimentation flux in Taihu Lake of Jiangsu province. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, **36**(5): 175-176, 179. [刘丽. 江苏省太湖流域大气沉降负荷量研究. 中国资源综合利用, 2018, **36**(5): 175-176, 179.]
- [18] Wang Q, Lu SY, Huang GZ *et al.* Nitrogen and phosphate contents in *Zizania caduciflora* and *A. philoxeroides* (Mart.) Griseb and water qualities of 14 rivers around Taihu Lake, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(6): 1189-1194. [王强, 卢少勇, 黄国忠等. 14条环太湖河流水质与茭草、水花生氮磷含量. 农业环境科学学报. 2012, **31**(6): 1189-1194.]
- [19] Gu XH, Zeng QF, Mao ZG *et al.* Water environment change over the period 2007-2016 and the strategy of fisher improve the water quality of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 305-318. DOI: 10.18307/2019.0201. [谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚等. 太湖2007—2016十年水环境演变及“以渔改水”策略探讨. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 305-318.]
- [20] Gao YN, Gao JF, Wang J *et al.* Estimating the biomass of unevenly distributed aquatic vegetation in a lake using the normalized water-adjusted vegetation index and scale transformation method. *Science of the Total Environment*, 2017, **601/602**: 998-1007. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.163.
- [21] Li XP *et al* eds. *Limnology*. Beijing: Science Press, 2013: 130-147. [李小平等编著. 湖泊学. 北京: 科学出版社, 2013: 130-147.]
- [22] Zhang LJ, Ye C, Li CH *et al.* The effect of submerged macrophytes decomposition on water quality. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(2): 145-151. DOI: 10.13198/j.res.2013.02.34.zhanglj.001. [张来甲, 叶春, 李春华等. 沉水植物腐解对水体水质的影响. 环境科学研究, 2013, **26**(2): 145-151.]
- [23] Xiang SL, Zhu MY, Zhu GW *et al.* Pollution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment of the eastern bays of Lake Taihu with aquatic macrophytes. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, **32**(6): 1083-1088. [向速林, 朱梦圆, 朱广伟等. 太湖东部湖湾水生植物生长区底泥氮磷污染特征. 沉积学报, 2014, **32**(6): 1083-1088.]
- [24] Ling H, Wu D, Tan DH *et al.* Causes and countermeasures of total phosphorus rise in Taihu Lake during recent years. *Environmental Science and Technology*, 2018, **31**(6): 54-59. [凌虹, 巫丹, 谭东炬等. 近年太湖总磷升高成因及对策建议. 环境科技, 2018, **31**(6): 54-59.]
- [25] Yang LY, Yang XY, Ren LM *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 18-27. DOI: 10.18307/2019.0102. [杨柳燕, 杨欣研, 丽曼等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 18-27.]