

2007 年以来太湖总磷污染负荷质量平衡计算与分析^{*}

毛新伟¹, 代倩子², 吴浩云^{3**}, 徐 枫², 李 涛²

(1: 太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海 200434)

(2: 太湖流域水文水资源监测中心, 无锡 214024)

(3: 水利部太湖流域管理局, 上海 200434)

摘 要: 磷是太湖富营养化的关键性指标, 为了解太湖总磷内、外源变化趋势及特征, 从总磷污染负荷动态平衡角度分析太湖总磷主要来源与总磷浓度高位波动的原因, 本研究基于 2007 年以来长时序水量水质监测资料和调查数据, 开展了太湖进出各途径的总磷负荷质量平衡估算及分析。结果表明, 2007—2020 年入湖河道输入总磷负荷为 1835~2799 t, 占太湖总磷负荷的 55%~73%, 是外源输入最主要的途径; 大气干湿沉降输入 353~1380 t, 占太湖总磷负荷量的 12%~38%, 是太湖总磷外源输入的第二大途径; 太湖水体中总磷负荷量约占 8%~15%。出湖河道输出总磷负荷量为 516~906 t, 占太湖总磷负荷量的 13%~30%; 水生动植物捕捞总磷负荷量为 115~312 t, 占太湖总磷负荷量的 4%~12%, 水厂输出占 2%~3% 左右; 约 41%~74% 的总磷负荷量滞留于太湖湖体中, 成为影响太湖总磷浓度的重要内源。同时, 太湖地区气温升高、太湖水体流动速度加快一定程度上又加速了内源污染释放, 使其成为总磷改善的限制性因素。

关键词: 太湖; 总磷; 污染负荷; 质量平衡; 影响分析

Calculation and analysis of total phosphorus pollution load based on mass balance in Lake Taihu since 2007^{*}

Mao Xinwei¹, Dai Qianzi², Wu Haoyun^{3**}, Xu Feng² & Li Tao²

(1: *Bureau of Hydrology (Information Center) of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, P.R.China*)

(2: *Monitoring Bureau of Hydrology and Water Resources, Taihu Basin Authority, Wuxi 214024, P.R.China*)

(3: *Taihu Basin Authority of Ministry of Resources, Shanghai 200434, P.R.China*)

Abstract: Phosphorus is the main indicator of eutrophication in Lake Taihu. In order to understand the trends and characteristics of the internal and external total phosphorus (TP) load in Lake Taihu, the main sources of TP in the lake and the reasons for the high fluctuation of TP concentration were analysed from the dynamic equilibrium of TP pollution load. The mass balance of TP load in different ways into and out of the lake was estimated and analysed based on a long series of water quality monitoring data. The results showed that the input TP load of rivers was about 1835–2799 t during 2007–2020 as the main source, accounting for 55%–73% of the TP load in Lake Taihu. The TP load transported by dry and wet deposition was 353–1380t, which accounted for about 12%–38% and was the second largest input pathway of TP load in Lake Taihu. Meanwhile, 8%–15% of the TP load was retained in the water of Lake Taihu. However, the TP discharged from the outlet river was about 516–906 t, accounting for about 13%–30% of the TP load in Lake Taihu; the TP removal by harvesting aquatic animals and plants was 115–312 t, accounting for 4%–12% of the TP load in Lake Taihu; and the percentage of TP output by drinking water extraction was about 2%–3%. Therefore, about 41%–74% of the TP load remained in the lake, which is an important endogenous factor influencing the epilimnetic TP concentration in Lake Taihu. In addition, the increase in temperature and water flow velocity in Lake Taihu had both accelerated the release of TP from sediment into water, resulting in sediment being one of the limiting factors for TP control.

Keywords: Lake Taihu; total phosphorus; pollution load; mass balance; impact analysis

^{*} 2022-05-07 收稿; 2023-01-17 收修改稿。

^{**} 通信作者; E-mail: hywu@tba.gov.cn。

磷是湖泊富营养化的重要营养元素^[1-4],是营养状态评价的控制性指标^[5]。2007 年太湖蓝藻暴发引发无锡供水危机后,太湖流域综合治理各项措施逐步落地^[6],太湖及主要入湖河道水质呈改善趋势^[7],但太湖总磷仍处于高位波动^[8],驱动太湖蓝藻生物量扩张^[2],湖体富营养状况未得到根本扭转^[9]。外源输入的总磷负荷是太湖总磷的主要来源^[10],入湖总磷负荷逐年持续累积,远超水体自净能力^[6,11],是太湖总磷居高不下的主要原因。太湖地处长江中下游,区域地理磷本底高^[12],同时太湖作为大型浅水湖泊,磷内源供给通量大、速度快、效率高^[13],也对太湖总磷浓度具有不可忽视的影响^[14]。

近年来,在当前全球气候普遍变暖,内源污染和外源污染仍未得到有效遏制等多重因素综合影响下,太湖蓝藻密度和水华强度总体呈上升趋势,防控形势较为严峻。氮磷等营养物质的输入不断累积是导致湖泊水体富营养化的主要原因,湖泊富营养化引起了藻类和水生生物的过度繁殖,继而可能引发水质严重恶化和藻类水华等水生态水环境灾害^[15]。科学探讨太湖总磷浓度处于高位波动的原因,对管理者科学施策、净化太湖水质、抑制蓝藻水华的发生、改善太湖水体生态环境和保障安全供水具有重要意义。本研究应用 2007 年以来太湖水质监测资料和调查数据,并基于太湖总磷污染负荷质量平衡估算和滞留量分析、占比动态变化等,对影响太湖总磷输入输出等各要素进行量化研究,期望从总磷污染负荷动态平衡角度分析太湖总磷主要来源与总磷浓度高位波动的原因,为太湖水环境的治理和保护工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文采用的太湖及环太湖河流相关水质数据为太湖流域水文水资源监测中心 2007 年以来每月一次的长时序监测资料,其中总磷测定参照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989),太湖和 22 条主要入湖河道监测站点分布见图 1。环湖巡测段水量数据来自太湖流域管理局组织的江苏、浙江水文部

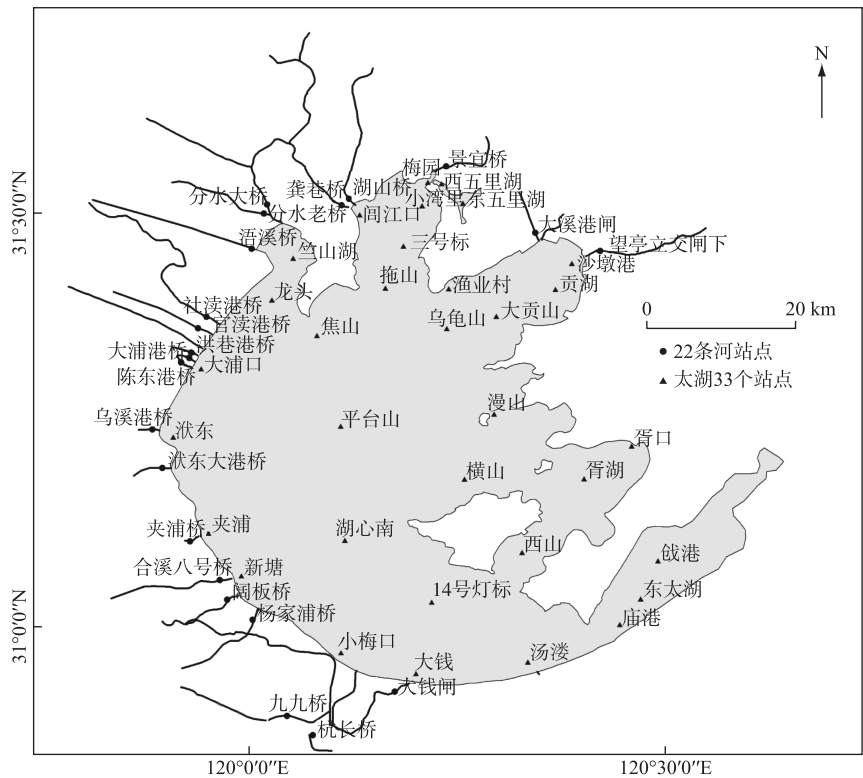


图 1 太湖和入湖河流监测站点分布

Fig.1 Distribution of monitoring stations in Lake Taihu and the rivers entering the lake

门开展的环太湖水文巡测资料整编成果;蓝藻和水草打捞量、水厂取水量数据摘自历年《江苏省水资源公报》,鱼类捕捞量数据来自江苏省太湖渔业管理委员会。其它数据摘自文献并在文中逐一标注说明。

1.2 方法

1.2.1 质量平衡计算 影响太湖总磷污染负荷质量平衡计算的因子众多,转化机理复杂。近年来,关于太湖磷污染负荷的研究较多,朱广伟等^[8]基于 2005—2018 年长时序监测资料,重点关注水体中不同形态磷赋存量的季度变化,估算出太湖水体总磷赋存量;王华等^[6]和吴浩云等^[16]分别分析了 2010—2017、1980—2020 年入湖河道输入、输出磷污染负荷,但并未考虑干湿沉降输入和水生动植物捕捞等输出影响;翟淑华等^[10]依据太湖总磷质量平衡,考虑出入湖各要素,计算了 2015—2016 年大水年太湖总磷的滞留量约分别占当年磷总负荷的 21.5% 和 27.5%,但分析数据系列有限,结论有一定的局限性。

本研究参考翟淑华等^[17]的方法,对太湖总磷污染负荷主要影响因子进行分析,基于太湖水量平衡,建立质量平衡计算公式对太湖总磷污染负荷质量平衡进行估算分析。入湖污染负荷估算中,因太湖现已全面取缔入湖排污口,入湖河道和大气干湿沉降是太湖主要污染负荷来源,同时受监测条件、资料所限,其它方式出入湖总磷负荷暂不纳入估算;出湖污染负荷中,综合考虑了出湖河道、水厂取水、生物收获带出量等因子。

水量平衡计算公式为:

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

式中, W_1 、 W_0 分别为依据逐年环太湖水文巡测整编资料统计的入湖、出湖水量, P 为湖面降水量,以环太湖周边五站(西山、大浦口、夹浦、望亭立交、小梅口)平均降水量计算太湖湖面降雨深,以年太湖平均水位计算太湖水面面积,相乘得出; D 为陆地产水入湖量, ΔV 为太湖蓄变量, W_c 为取水户直接取水量; E 为湖面蒸发量。

质量平衡计算公式为:

$$W_{\text{入湖}} + W_{\text{干湿沉降}} + W_{\text{年初}} = W_{\text{滞留量}} + W_{\text{出湖}} + W_{\text{取水}} + W_{\text{水生生物捕捞}} + W_{\text{年末}} \quad (2)$$

因此,

$$W_{\text{滞留量}} = W_{\text{入湖}} + W_{\text{干湿沉降}} + W_{\text{年初}} - (W_{\text{取水}} + W_{\text{水生生物捕捞}} + W_{\text{出湖}} + W_{\text{年末}}) \quad (3)$$

式中, $W_{\text{入湖}}$ 和 $W_{\text{出湖}}$ 分别为环太湖河道带入和带出太湖的磷负荷; $W_{\text{干湿沉降}}$ 为通过干沉降和湿沉降带入太湖的磷负荷; $W_{\text{年初}}$ 和 $W_{\text{年末}}$ 分别为年初和年末太湖水体中磷存量; $W_{\text{取水}}$ 为通过水厂取水带出磷负荷; $W_{\text{水生生物捕捞}}$ 为通过捕捞带出磷负荷,包括蓝藻、水草打捞和鱼类捕捞等; $W_{\text{滞留量}}$ 为太湖总磷负荷滞留量,主要为滞留于底泥和被水生生物吸收转化的总磷负荷量。

1.2.2 总磷质量平衡各要素计算

1) 水质浓度:水质浓度根据太湖 33 个监测站点代表的水面面积加权平均计算得出,监测站点代表面积按照泰森多边形法确定。入湖河流平均浓度为《太湖流域管理条例》中明确的 22 条主要入湖河道监测站点的数学平均浓度。

2) 出入湖污染负荷:环太湖出入湖水量资料是以水文巡测段或单站为最小单元进行整编,为了计算匹配,出入湖污染负荷以水文巡测段或单站为单元进行计算统计。月度环太湖出入湖磷污染负荷计算采用水质监测断面的水质浓度与其巡测段或单站月平均流量乘积计算得出,年度出入湖磷负荷总量为所有巡测段(站)年度磷负荷相加的和。

3) 干湿沉降入湖污染负荷:杨龙元等^[18]、刘涛等^[15]、翟淑华等^[10]、许志波等^[19]分别研究了 2002 年 7 月—2003 年 6 月、2011 年、2015—2016 年和 2018 年的太湖总磷干湿沉降成果,依据这些研究成果中的太湖干、湿沉降率并结合太湖水雨情分别估算其相近年份的 2007—2010、2012—2014、2017、2019—2020 年总磷干湿沉降负荷,估算公式为:

$$Q = Q_d + Q_w = F_d \times d \times S + F_w \times S \quad (4)$$

其中,

$$F_w = k_w \times C \times R \quad (5)$$

式中, Q 为沉降量(kg); Q_d 、 Q_w 分别为干、湿沉降量(kg); F_d 、 F_w 为干、湿沉降率(kg/km²); d 为一年干沉降天数(d), S 为太湖水面面积(km²); k_w 为换算系数,为 1 L·kg/(mg·mm·km²·365 d), C 为降雨总磷质量浓度(mg/L), R 为全年太湖湖面降水量(mm)。

4) 水生生物捕捞磷负荷:水生生物捕捞输出磷负荷为捕捞量与总磷含量的乘积。其中,打捞的蓝藻藻水含藻率约为0.5%,蓝藻体内总磷含量约为0.68%,蓝藻总磷含量为蓝藻藻水的0.0034%;根据相关研究,大型水生植物体中总磷含量约为0.044%(湿重)^[20-22];鱼类体内总磷含量约为0.31%^[23]。

5) 取水输出磷负荷:水厂直接取水带出的磷负荷量按照当年的取水量和原水水质浓度估算。水厂取水水质采用与水厂取水口位置邻近的沙墩港、渔业村、贡湖、胥口、漫山和庙港6个监测点浓度的算术平均值。

6) 年初原有量和年末残留量:太湖水体中污染负荷年初原有量和年末残留量分别考虑太湖蓄水量、分区水面积和分区水质,其中蓄水量和分区水面积按照年初年末水位条件下水位—库容曲线和水位—面积曲线计算,计算公式为:

$$W = Q \times \sum_{i=1}^9 \frac{S_i}{S} \times C_i \quad (6)$$

式中, W 为年初(年末)太湖水体中原有(残留)量; Q 为年初(年末)太湖蓄水量; S_i 为太湖分区水面积, S 为太湖水面积; C_i 为太湖第*i*分区年初(年末)总磷浓度。考虑到监测数据连续性影响,为保证系列成果衔接,年初原有量与上年度年末残留量均计为此两项的均值。

2 结果

2.1 太湖总磷污染负荷各项影响因子输入输出量估算

2.1.1 环湖河道出入湖总磷污染负荷 2007年以来入湖河道入湖总磷污染负荷量为1835~2799 t,未见明显下降趋势,其中以2010年最高,2016和2011年其次,近4年基本维持在2000 t左右。出湖总磷污染负荷量为516~906 t,其中以2016年最高,其次是2020年。净入湖总磷污染负荷量为1090~2115 t,以2010年最高,之后有所下降,2019年最低,近4年基本维持在1200 t左右(图2)。

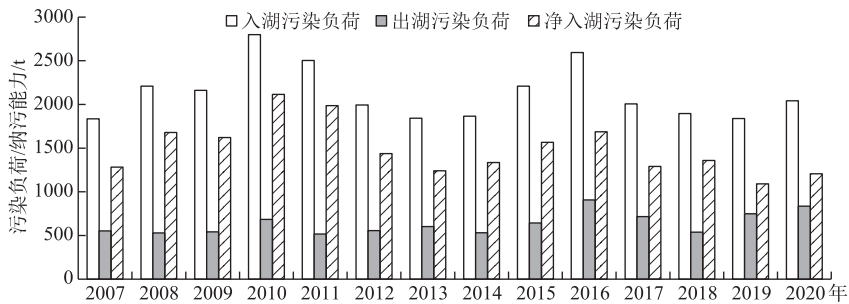


图2 2007—2020年出入太湖总磷污染负荷量年际变化

Fig.2 Changes in the annual average pollution load of TP in inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2007–2020

2007年以来,22条主要入湖河道总磷平均浓度由0.190 mg/L下降到2020年的0.128 mg/L(图3),但输入总磷污染负荷却未见明显下降趋势,总磷入湖污染负荷增加与入湖水量增加有关^[16]。从长时序水文资料看,2007年后太湖流域处于相对丰水期,季海萍等^[24]对太湖流域年降水量变化采用Mann-Kendall趋势检验法分析,发现2008—2017年较1986—2007年系列平均降水量多150 mm,增加了13%。2007—2020年环太湖年均入湖水量约为114.0亿m³,较1986—2006年均值增加了33.0亿m³,增幅近41%。

2.1.2 大气干湿沉降输入 以往分析表明,太湖外源输入总磷负荷除环太湖河道的径流输入外,大气干湿沉降也是太湖磷等营养盐输入的重要途径^[25]。工业生产中化工染料的大量使用、农业化学肥料的大量施用和畜牧业的快速发展均向大气中排放了大量的氮、磷污染物,这些污染物可通过干沉降(空气尘粒)和湿沉降(雨、雪、雾等)的方式进入太湖,增加太湖污染物总量^[15,19]。根据估算结果,2007—2017年,太湖干湿沉降总磷污染负荷量呈先上升后下降的变化趋势,均值约为935 t,并以干沉降为主^[15-19],其中干沉降总磷污染负荷量均值为660 t,湿沉降均值为275 t。2018年6月,国务院实施“打赢蓝天保卫战三年行动计划”,推动产

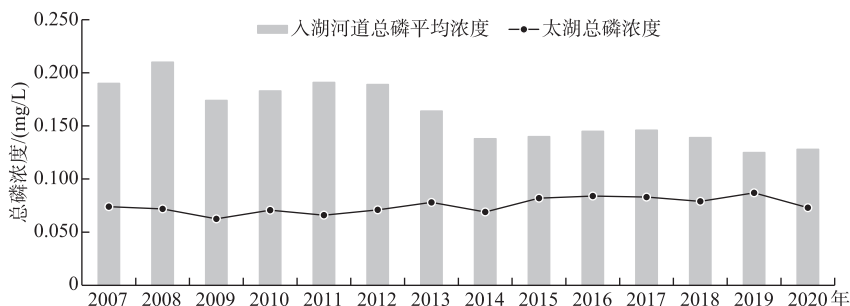


图3 2007—2020年太湖和入湖河道总磷平均浓度年际变化

Fig.3 Concentration of TP in Lake Taihu and inflow rivers, 2007–2020

业、能源等重点领域结构优化,大气污染物排放总量大幅减少,在一定程度上有效降低了入太湖干湿沉降负荷,2018年起太湖干湿沉降总磷污染负荷量大幅下降,2018—2020年干湿沉降总磷污染负荷量在300~350 t之间,其中干沉降均值为135 t,湿沉降均值为200 t(附表I)。

2020年6—7月,太湖流域水文水资源监测中心曾对太湖湖面降水进行5次抽样监测,结果显示仅1次总磷浓度超过0.01 mg/L的检出限,为0.012 mg/L,浓度远低于同期太湖总磷浓度(0.068~0.077 mg/L)。若以0.012 mg/L作为当年降雨总磷浓度的参考,结合当年水雨情估算湿沉降总磷负荷输入量仅约为42.9 t;本文研究时因缺乏系统、完善的干沉降量资料和湿沉降总磷浓度资料,大气干湿沉降负荷量结果为估算值,下一步有待开展深入专题研究。

2.1.3 水生动植物的捕捞输出 水生动植物均能吸收转化水中的氮、磷污染物,水草打捞、藻类打捞和鱼类捕捞等能够将氮、磷等带出水体,是湖泊水体总磷污染物总量的主要影响因素之一。

2007年无锡市供水危机以来,为应对蓝藻暴发,无锡市、苏州市和常州市均开展了蓝藻打捞工作,蓝藻藻水打捞量持续上升。2012年以前,太湖蓝藻打捞量在100万t以下,蓝藻打捞带出总磷污染负荷量约6.8~33.0 t;2012年起,太湖蓝藻打捞量维持在120万t以上,2015年起,上升至150万t以上,近3年均超过170万t,每年通过蓝藻打捞从太湖带出总磷污染负荷量超过57.8 t^[26]。

大型水生植物可以通过根系吸收沉积物中的生物有机磷,同时能够抑制底泥再悬浮,有效减少沉积物间隙水中的磷向上覆水的扩散量,还可通过茎叶拦截、吸附水中的颗粒物来吸附水中的可溶性磷^[27]。但其死亡腐烂会造成氮、磷等营养物质的再次释放,污染水质。2012年起,江苏省对贡湖、东太湖等部分湖区实施区域水草打捞。近年,太湖水草打捞量总体呈先上升后下降的趋势,以2014年最高,当年水草打捞量(湿重)为20万t,估算从太湖带出总磷污染负荷量为88 t;2016年后,为养护太湖水草,环湖各地市逐年减少了收割打捞量,2017—2020年均打捞量约为6万~7万t,带出总磷污染负荷量约为30 t。

2007—2014年太湖捕捞量参考谷孝鸿等的报道^[28],之后采用江苏省太湖渔业管理委员会的统计数据。2007—2019年,太湖鱼类捕捞量在3.5万~7.2万t左右,总体呈上升趋势;鱼类捕捞带出太湖的总磷负荷量约为108~226 t,均值为169 t。2020年江苏省农业厅发布太湖“十年禁捕”通告,当年10月1日起全面停止捕捞作业,估算2020年捕捞量为5.4万t,带出总磷量约为167.4 t。

2007—2020年水生动植物捕捞量及其带出太湖的总磷污染负荷量详见附表II。太湖水生动植物捕捞带出总磷量呈阶段性上升趋势,其中2007—2011年由100 t逐渐上升至200 t左右;水草打捞开始后,2012年起增加至200 t以上;2015年起均超过了300 t,并以2016年为最高,之后水草打捞减少、鱼类禁捕后有所降低。

2.1.4 取水输出 2007年以来,太湖各水厂取水量有所上升,取水总磷平均浓度总体呈下降趋势。水厂取水输出总磷污染负荷均值为60 t左右,年际间呈现不同的变化,近5年均值在65 t左右。2007年以来,太湖水厂输出总磷污染负荷量详见附表III。

2.1.5 太湖水体总磷负荷年初原有量和年末残留量估算 由2007—2020年太湖水体中总磷污染负荷量变化

(附表Ⅳ)可见,近年太湖水体中总磷污染负荷约为 300~500 t,年内水体中总磷污染负荷量变化有增有减,除 2020 年年末较年初减少 168 t 外,其余年份基本在 150 t 之内变化。太湖水体中总磷污染负荷量除与水体中总磷浓度有关外,也受太湖蓄水量直接影响。

2.2 太湖总磷污染负荷质量平衡计算结果

近年太湖总磷污染负荷输入量约为 2155~3771 t,均值为 2889 t;输出量基本在 741~1309 t 之间,均值为 940 t;总磷输入量远大于输出量,多出的总磷污染负荷量一部分为太湖水体中总磷存量变化,其余为滞留于底泥中或水生生物体内的总磷负荷量^[10],质量平衡计算结果详见表 1。其中,由于干湿沉降量缺少系列实测数据,部分年份采用文献数据结合水情相近年份进行估算,对质量平衡计算结果精度有一定影响;因未查询到相关数据,根据历年数据对 2012 年水草打捞量和 2020 年生物收获量进行了估算,估算值与真实值有一定误差,但水草打捞和鱼类捕捞均在出湖污染负荷总量中占比较小,对当年质量平衡计算结果的影响有限。

根据以上计算结果,2007—2020 年太湖总磷年负荷滞留量为 1080~3036 t,年均值为 1959 t,表明目前太湖底泥仍是磷“汇”,对总磷的吸附和沉积作用要远远大于释放。总磷滞留量约占太湖总磷污染负荷量的 41%~74%,总体呈先上升后下降的变化趋势,以 2011 年最高,2012 年之后基本以 2000 t 以下

为主,2018 年开始年负荷滞留量明显减少,连年处于最低的水平。滞留于太湖中的磷主要吸附于底泥中或被水生生物吸收,大量总磷负荷逐年累积,成为影响太湖水体总磷浓度的重要内源,这也是近年来太湖入湖河流总磷浓度持续改善,但太湖总磷浓度持续高位波动的主要原因之一。

3 分析与讨论

3.1 太湖输入、输出总磷负荷分析

以环湖河道入湖总磷污染负荷量、干湿沉降入湖量和年初水体原有量合计估算太湖总磷污染负荷量。2007 年以来,太湖总磷污染负荷量总体呈先上升后下降的变化趋势(图 4a),以 2011 年最高(4119 t),2017 年以后基本维持在 2600~3000 t。入太湖河道输入总磷污染负荷仍是太湖总磷的最主要来源,其占比达到 55%~73%,2018 年起基本维持在 70%左右。干湿沉降输入是太湖总磷污染负荷输入的第二大来源,其输入总磷负荷占 12%~38%,2018 年起基本维持在 12%左右。年初太湖水体中原有总磷负荷量占 8%~15%,2015 年之后基本维持在 11%~15%之间。

太湖各途径输出总磷污染负荷量分布(图 4b)显示,水厂取水输出总磷污染负荷量仅占太湖负荷量的 2%~3%左右;水生动植物捕捞约占 4%~12%,近年基本维持在 10%左右,2020 年有所下降;环湖河道出湖带出总磷污染负荷是太湖总磷输出的主要途径,其占比总体呈上升趋势,2015 年起基本维持在 13%~30%之间,以 2020 年最高为 29.8%;年末水体残留量基本以 8%~15%为主,以 2020 年最低(8.6%)。滞留在底泥中和被吸收、利用分解的总磷污染负荷量约占太湖总磷负荷量的 41%~74%,总体呈先升后下降的趋势,2012 年之后逐步降低,2015 年起维持在 41%~55%左右。

3.2 滞留污染负荷对总磷浓度变化的影响

《太湖流域水环境综合治理总体方案》中明确太湖总磷的纳污能力为 514 t/a,近年太湖总磷净输入污染负荷均值为 1959 t,约为太湖总磷纳污能力的 3.81 倍,大量总磷污染负荷以太湖底泥的形式存在于湖体

表 1 2007—2020 年太湖总磷负荷质量平衡

Tab.1 Mass balance of TP load in Lake Taihu, 2007–2020

时间	总磷负荷 输入量/t	总磷负荷 输出量/t	水体总磷存 量变化/t	总磷负荷 滞留量/t
2007 年	2567	741	-106	1932
2008 年	2933	744	20	2169
2009 年	2912	754	174	1984
2010 年	3496	908	-130	2718
2011 年	3771	746	-11	3036
2012 年	3303	846	77	2380
2013 年	2574	931	-150	1793
2014 年	3193	866	102	2225
2015 年	2953	1022	110	1821
2016 年	3206	1309	-71	1969
2017 年	2754	1109	-7	1652
2018 年	2229	909	68	1253
2019 年	2155	1130	-55	1080
2020 年	2395	1146	-168	1417

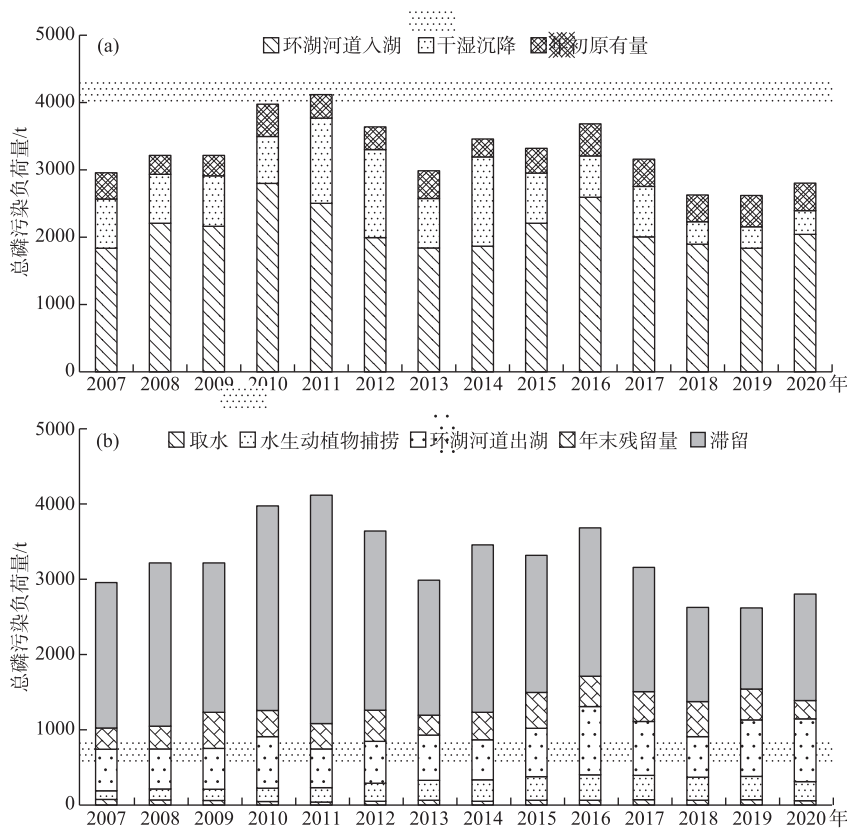


图4 2007—2020年各途径进(a)、出(b)太湖的总磷负荷量分布

Fig.4 Distribution of TP load in (a) and out (b) of Lake Taihu from different ways, 2007–2020

中^[10]。太湖流域管理局2013年和2018年的太湖底泥调查表明,太湖底泥中总磷含量明显上升,全湖平均由2003年的598.1 mg/kg上升为674.8 mg/kg^[29],沉积的磷在一定条件下会逐步释放,成为影响水质的主导因子^[30]。底泥是磷元素累积和再生的重要场所,沉积在底泥中的磷易于泛起再悬浮,通过各种复杂的过程再次释放到上覆水中,造成水体中总磷浓度的升高^[31]。据逢勇等报道^[32],每年太湖内源年均进入水体的净底泥量为19.03万t,总磷约275.5 t。

已有大量研究表明,底泥中磷的释放主要与水体中的溶解氧、水温、pH和扰动有关,溶解氧浓度的降低、水温的升高、pH值的上升以及湖流速度的加大都有利于底泥中磷的释放^[29-30,33-35]。2007年后,太湖溶解氧浓度年均值基本在9.0~10.0 mg/L之间波动,pH年均值在8.11~8.52之间波动,均无明显的趋势性变化。吴凡等的研究表明,近年来太湖地区的气温有明显升高趋势,增幅超过了0.2℃/10 a^[36-37],太湖流域水文水资源监测中心对太湖水温监测资料也表明,2007—2013年太湖平均水温较2014—2020年上升了0.9℃(图5a),而冬春季(12月—次年4月)太湖平均水温上升了2.0℃(图5b)。一方面,太湖水温升高促进底泥中磷的交换,有利于底泥中磷的释放;另一方面,水温是影响太湖蓝藻水华发生的主要气象因子之一,尤其是冬春季水温偏高,有利于蓝藻越冬、复苏。蓝藻生长的“泵吸作用”以及水华堆积之后的“耗氧效应”,会加快底泥磷的释放,底泥中释放的磷除了满足藻类生产需求外,还能通过生物富集,使水体中总磷浓度升高^[38]。

太湖作为浅水型湖泊,不同于深水湖泊靠浓度梯度释放营养物质^[39],风浪等动力扰动引起沉积物再悬浮对浅水湖泊内源释放影响较大。水流流速加大也会增加水体扰动,使沉积在底泥中的磷易于扩散到上覆水中,提高水体中的总磷浓度。2007年以来,太湖流域处于相对丰水期,加之“引江济太”工程的实施,促进

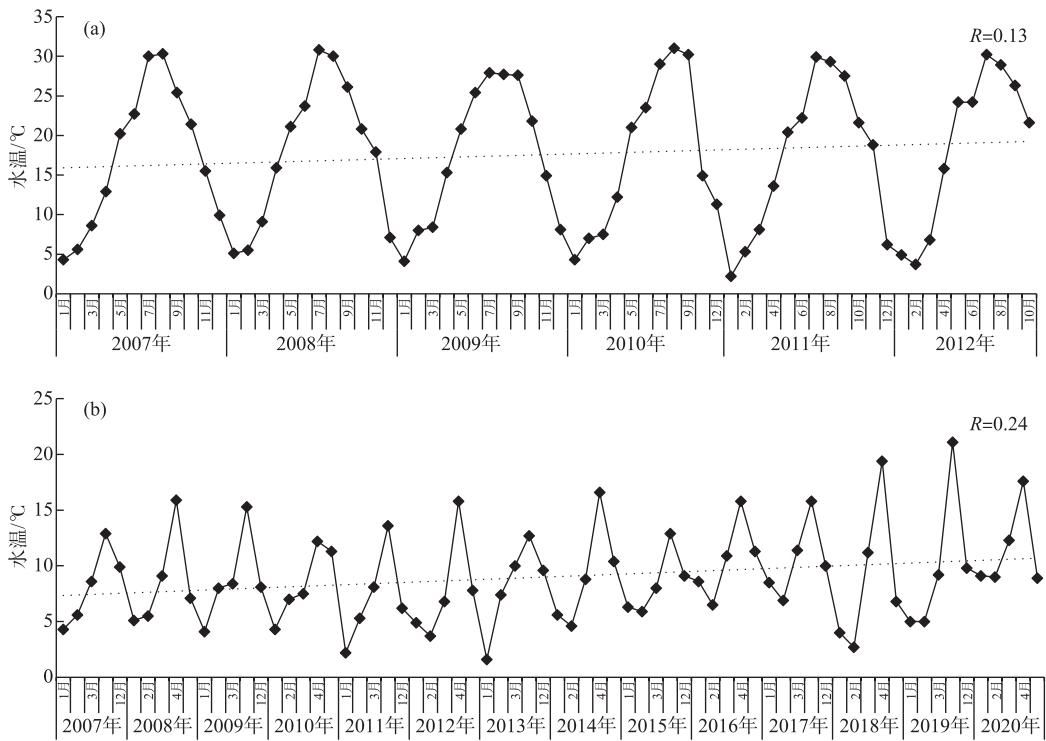


图 5 2007—2020 年太湖全年(a)及冬春季(b)水温变化

Fig.5 Variation of annual(a) and winter-spring (b) water temperature in Lake Taihu, 2007–2020

了太湖水体的循环,环太湖出入湖水量均呈上升趋势^[40],太湖换水周期明显缩短,太湖及其周边水体的流动速度加快,一定程度上促进了底泥间隙水中的营养物质的加速释放,同时水动力作用使脱离底泥的颗粒在数量上大过絮凝沉淀的颗粒,可导致总磷浓度升高。

4 结论

2007 年以来太湖总磷污染负荷的年均输入量为 2889 t,年均输出量为 940 t,近年来年输入量已有明显下降,但远大于输出量的状况仍在持续;年均约有 1959 t 的总磷滞留在湖体的底泥中或水生生物体内,约为太湖总磷纳污能力的 3.81 倍,是影响太湖水体总磷浓度的重要内源。2007 年以来,总磷输入污染负荷年间总体为先升后降,2018 年后基本维持在 2200 t 左右。入湖河道总磷污染负荷是太湖总磷最主要的输入来源,占太湖总磷负荷的 55%~73%,仍未见明显下降趋势;湖面干湿沉降也是太湖总磷输入的主要来源之一。2007 年以来,太湖总磷出湖污染负荷年均值约为 940 t,总体呈上升趋势,仅占太湖总磷输入污染负荷的 1/3 左右。出湖河道带出总磷污染负荷是太湖总磷输出最主要的途径,占太湖总磷负荷量的 13%~30%;年间间通过水草和蓝藻打捞、鱼类捕捞、水厂取水等带出的总磷负荷量较为稳定,也是太湖总磷污染负荷输出的重要途径。近年来,太湖地区气温升高、太湖水体流动速度加快一定程度上促进了底泥中总磷的释放,对太湖水体中总磷浓度升高有一定的影响。

5 附录

附表 I ~IV 见电子版 (DOI: 10.18307/2023.0520)。

6 参考文献

[1] Carpenter SR. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*

- of America, 2008, **105**(32): 11039-11040. DOI: 10.1073/pnas.0806112105.
- [2] 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.]
- [3] Dolman AM, Wiedner C. Predicting phytoplankton biomass and estimating critical N:P ratios with piecewise models that conform to Liebig's law of the minimum. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(4): 686-697. DOI: 10.1111/fwb.12518.
- [4] Chu SP. The influence of the mineral composition of the medium on the growth of planktonic algae: Part I. methods and culture media. *The Journal of Ecology*, 1942, **30**(2): 284. DOI: 10.2307/2256574.
- [5] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- [6] 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.]
- [7] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 935-943. DOI: 10.18307/2016.0502. [戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985-2015年). 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.]
- [8] Zhu GW, Zou W, Guo CX *et al.* Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005-2018: Implications for future phosphorus reduction target management. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 21-35. DOI: 10.18307/2020.0103. [朱广伟, 邹伟, 国超旋等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005-2018年)及其对未来磷控制目标管理的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 21-35.]
- [9] Zhu GW, Shi K, Li W *et al.* Seasonal forecast method of cyanobacterial bloom intensity in eutrophic Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1421-1431. DOI: 10.18307/2020.0504. [朱广伟, 施坤, 李未等. 太湖蓝藻水华的年度情势预测方法探讨. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1421-1431.]
- [10] Zhai SH, Zhou Y, Cheng YH *et al.* Calculation of total phosphorus loads from rivers around Lake Taihu and analysis of total phosphorus fluctuation in the lake in 2015-2016. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 48-57. DOI: 10.18307/2020.0105. [翟淑华, 周娅, 程媛华等. 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. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 48-57.]
- [11] Schindler DW. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(1part2): 356-363. DOI: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356.
- [12] Qin BQ, Zhu GW. The nutrient forms, cycling and exchange flux in the sediment and overlying water system in lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River. *Science in China: Series D*, 2006, **49**(1): 1-13. DOI: 10.1007/s11430-006-8101-0.
- [13] Zhu GW, Xu H, Zhu MY *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1510-1524. DOI: 10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1510-1524.]
- [14] Di ZZ, Zhang H, Shan BQ. Status of internal nutrient loads and their effects on overlying water quality in Taihu Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3872-3882. DOI: 10.13671/j.hjkb.2015.0087. [狄贞珍, 张洪, 单保庆. 太湖内源营养盐负荷状况及其对上覆水水质的影响. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 3872-3882.]
- [15] 刘涛, 杨柳燕, 胡志新等. 太湖氮磷大气干湿沉降时空特征. 环境监测管理和技术, 2012, **24**(6): 20-24, 42.
- [16] Wu HY, Jia GH, Xu B *et al.* Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980-2020. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 974-991. DOI: 10.18307/2021.0402. [吴浩云, 贾更华, 徐彬等. 1980年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 974-991.]
- [17] 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.]
- [18] 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. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 104-110.]
- [19] 许志波, 杨仪, 卞莉等. 太湖大气氮、磷干湿沉降特征. 环境监控与预警, 2019, **11**(4): 37-42.
- [20] Qin BQ, Xu PZ, Wu QL *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14. DOI: 10.1007/s10750-006-0521-5.
- [21] Wu Q, Chen K, Gao G. Effects on aquatic environment of large-scale inling for aquaculture. *Journal of Aquaculture*, 1995, **19**: 343-349.
- [22] 夏成星. 中国东部内陆水域水生植物生态化学计量学研究. 武汉: 武汉大学出版社, 2018.
- [23] Xu H, McCarthy MJ, Paerl HW *et al.* Contributions of external nutrient loading and internal cycling to cyanobacterial bloom dynamics in Lake Taihu, China: Implications for nutrient management. *Limnology and Oceanography*, 2021, **66**(4): 1492-1509. DOI: 10.1002/lno.11700.
- [24] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.

- 18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986—2017年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]
- [25] 高爱环, 李红缨, 郭海福. 水体富营养化的成因、危害及防治措施. 肇庆学院学报, 2005, **26**(5): 41-44.
- [26] 朱喜, 胡云海. 河湖污染与蓝藻爆发治理技术. 郑州: 黄河水利出版社, 2021.
- [27] Wang YP, Zhu GW, Hong DL *et al.* Environmental characteristics of sediment-water interface of phytoplankton and macrophyte dominated zones in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2013, **25**(2): 199-208. DOI: 10.18307/2013.0204. [王永平, 朱广伟, 洪大林等. 太湖草/藻型湖区沉积物-水界面环境特征差异. 湖泊科学, 2013, **25**(2): 199-208.]
- [28] Gu XH, Zeng QF, Mao ZG *et al.* Water environment change over the period 2007–2016 and the strategy of fishery 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.]
- [29] Mao XW, Wu HY, Xu F. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(4): 100-104. [毛新伟, 仵荟颖, 徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析. 水资源保护, 2020, **36**(4): 100-104.]
- [30] Han SS, Wen YM. Phosphorus release and affecting factors in the sediments of eutrophic water. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(2): 98-101. [韩沙沙, 温琰茂. 富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素. 生态学杂志, 2004, **23**(2): 98-101.]
- [31] Ren WP, Li XX, Zhang WS. Research progress in phosphorus forms in sediments and environmental factors that influence phosphorus releasing. *Environmental Pollution & Control*, 2012, **34**(9): 53-60, 66. [任万平, 李晓秀, 张汪寿. 沉积物中磷形态及影响其释放的环境因素研究进展. 环境污染与防治, 2012, **34**(9): 53-60, 66.]
- [32] Pang Y, Yan RR, Yu ZB *et al.* Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu affected by wind. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2456-2464. DOI: 10.13227/j.hjcx.2008.09.034. [逢勇, 颜润润, 余钟波等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究. 环境科学, 2008, **29**(9): 2456-2464.]
- [33] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素. 环境科学与管理, 2008, **33**(6): 43-46.
- [34] Zhang Z, Liu YL, Duan XJ. Research on remarkable affecting factors of phosphorus releasing from sediment in Shuanglong Lake. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2006, **15**(2): 16-19. [张智, 刘亚丽, 段秀举. 湖泊底泥磷释放影响因素显著性试验分析. 植物资源与环境学报, 2006, **15**(2): 16-19.]
- [35] Gao YX, Zhang YM, Zhang YC. Effects of flow velocity on the release of contaminants from Taihu Lake sediment. *Environmental Engineering*, 2014, **32**(8): 10-14. DOI: 10.13205/j.hjgc.201408003. [高月香, 张毅敏, 张永春. 流速对太湖底泥污染物释放的影响. 环境工程, 2014, **32**(8): 10-14.]
- [36] 吴凡, 潘梦婷, 孔雨等. 1958—2017年太湖流域气温及降水变化研究. 江苏林业科技, 2019, **46**(2): 38-42.
- [37] Liu ZF, Wang YC, Yao ZJ *et al.* Trend and periodicity of precipitation, air temperature and runoff in the Taihu Lake basin. *Journal of Natural Resources*, 2011, **26**(9): 1575-1584. [刘兆飞, 王翊晨, 姚治君等. 太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析. 自然资源学报, 2011, **26**(9): 1575-1584.]
- [38] 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.]
- [39] Reddy KR, Fisher MM, Ivanoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25**(2): 363-371. DOI: 10.2134/jeq1996.00472425002500020022x.
- [40] 汪院生, 柳子豪, 展永兴等. 环太湖出入湖水量变化探析. 江苏水利, 2022, (4): 14-17, 56.

附表 I 2007—2020 年太湖干湿沉降总磷污染负荷估算量

Appendix Tab.I The amount of TP load transported by dry and wet deposition in Lake Taihu, 2007-2020

时间	干沉降总磷负 荷量/t	湿沉降总磷负 荷量/t	合计/t	时间	干沉降总磷负 荷量/t	湿沉降总磷负 荷量/t	合计/t
2007 年	507	225	732	2014 年	914	413	1327
2008 年	479	245	724	2015 年	562	182	744
2009 年	491	259	750	2016 年	390	222	612
2010 年	470	227	697	2017 年	623	125	748
2011 年	950	318	1268	2018 年	129	204	333
2012 年	874	436	1310	2019 年	145	172	317
2013 年	1009	371	1380	2020 年	130	223	353

附表 II 2007—2020 年太湖水生动植物捕捞量及总磷负荷输出量

Appendix Tab.II The catch and output TP load of aquatic animals and plants in Lake Taihu, 2007-2020

时间	蓝藻打捞的藻水 量/（万 t）	蓝藻打捞所含总 磷负荷量/t	水草打捞量 /（万 t）	打捞水草所含总磷 负荷量/t	鱼类捕捞量 /（万 t）	鱼类捕捞所含 总磷负荷量/t	水生物捕捞带 出总磷负荷量/t
2007 年	20	6.8	0	0	3.5	108.5	115.3
2008 年	60	20.4	0	0	4.1	127.1	147.5
2009 年	60	20.4	0	0	4.2	130.2	150.6
2010 年	67	22.8	0	0	5.0	155.0	177.8
2011 年	97	33.0	0	0	5.0	155.0	188.0
2012 年	124	42.2	10*1	44.0	5.0	155.0	241.2
2013 年	145	49.3	14	61.6	5.0	155.0	265.9
2014 年	120	40.8	20	88.0	5.1	158.1	286.9
2015 年	164	55.8	17	74.8	5.9	182.9	313.5
2016 年	160	54.4	13	57.2	7.3	226.3	337.9
2017 年	237	80.6	7	30.8	6.8	210.8	322.2
2018 年	186	63.2	7.2	31.7	6.8	210.8	305.7
2019 年	170	57.8	7.1	31.2	7.2	223.2	312.2
2020 年	170	57.8	6.3	27.7	5.4*2	167.4	252.9

“*1”表示未查询到相关数据，为估算结果；

“*2”表示 2020 年 9 月 1 日太湖开捕，10 月 1 日起禁捕，9 月是太湖鱼类的高峰捕捞期，受禁捕影响，9 月渔民连续作业，鱼类捕捞量按 2019 年的四分之三估算。

附表 III 2007—2020 年太湖各水厂输出总磷污染负荷量

Appendix Tab.III The output TP load of water works in Lake Taihu, 2007-2020

时间	水厂取水总磷 平均浓度 / (mg/L)	取水量 /(万 t)	输出总磷负荷量 /t	时间	水厂取水总磷平 均浓度/ (mg/L)	取水量 /(万 t)	输出总磷负荷量 /t
2007 年	0.080	92500	74.0	2014 年	0.051	96800	49.4
2008 年	0.080	84875	67.9	2015 年	0.065	100200	65.1
2009 年	0.068	89660	61.0	2016 年	0.060	107700	64.6
2010 年	0.051	90403.2	46.1	2017 年	0.061	116700	71.2
2011 年	0.043	96667	41.6	2018 年	0.054	120800	65.2
2012 年	0.051	96300	49.1	2019 年	0.057	122800	70.0
2013 年	0.063	100500	63.3	2020 年	0.048	119800	57.5

附表 IV 2007—2020 年太湖水体中总磷污染负荷量变化

Appendix Tab.IV The variation of TP load into Lake Taihu water body, 2007-2020

时间	年初原有量/t	年末残留量/t	时间	年初原有量/t	年末残留量/t
2007 年	390	284	2014 年	264	366
2008 年	284	304	2015 年	366	476
2009 年	304	478	2016 年	476	405
2010 年	478	348	2017 年	405	398
2011 年	348	337	2018 年	398	465
2012 年	337	414	2019 年	465	410
2013 年	414	264	2020 年	410	242