

1980 年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析*

吴浩云¹, 贾更华^{1**}, 徐彬², 邵嫣婷¹, 赵晓晴¹

(1: 水利部太湖流域管理局, 上海 200434)

(2: 太湖流域水环境监测中心, 无锡 214131)

摘要: 磷是湖泊生态系统物质和能量循环的重要组成部分, 是湖泊富营养化防治的重要控制性指标。为分析太湖富营养化与人类活动的关系, 掌握总磷(TP)的时空变化规律及驱动因子, 本文收集整理了 1980—2020 年太湖 TP 浓度数据并分析了 TP 的时序、时空和年内变化特征。结果表明, 1980s 经济社会快速发展之初, 伴随着工业和三产用水量激增, 废污水排放量和入湖负荷大增, 1985—1995 年太湖 TP 浓度急剧升高。随着治理与保护措施的实施, 到 1995 年达到峰值后逐步走低, 2009 年后进入了窄幅波动期。从空间上看, 不同时段 TP 浓度分布格局较好地反映了入湖污染物的输入分布。通过分时段对比分析可能影响太湖 TP 浓度变化的驱动因子, 分别讨论了经济社会发展、用水量、废污水排放量、入湖水量、入湖河流 TP 浓度、入湖 TP 负荷、蓝藻水华、水温、高等水生植物、底泥释放、太湖换水周期变化等。结果表明, 近 10 年来入湖 TP 负荷增加, 蓝藻水华强度加大, 水温升高, 高等水生植物面积减少, 这些因素会导致太湖 TP 浓度上升。2008—2019 年净入湖 TP 负荷比 1998—2007 年增加了 33.9%, 而近 10 年太湖换水周期缩短了 17.7%, 在一定程度上抵消了影响太湖 TP 浓度升高的驱动因子的不利影响, 太湖 TP 浓度不升反降。为此建议在新一轮太湖治理中积极开展控源截污、节水减排、水资源调控、高等水生植被恢复、重点污染湖区清淤疏浚等针对性措施以期获得更好的太湖 TP 浓度控制效果。

关键词: 太湖; 富营养化; 总磷; 蓝藻; 水生态

Analysis of variation and driving factors of total phosphorus in Lake Taihu, 1980–2020*

Wu Haoyun¹, Jia Genghua^{1**}, Xu Bin², Shao Yanting¹ & Zhao Xiaqing¹

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

(2: Taihu Basin Hydrology & Water Resources Monitoring Center, Wuxi 214131, P.R.China)

Abstract: As an important component of the material and energy cycle of lake ecosystem, phosphorus is commonly used as an important control index of lake eutrophication. To probe into the relationship between eutrophication and human activities in Lake Taihu, and to grasp the spatiotemporal variation of total phosphorus (TP) concentration and its driving factors, this paper collected the data of TP concentration in Lake Taihu (1980–2020) from Taihu Basin Authority, and analyzed its spatiotemporal and annual variations characters. The results show that at the beginning of rapid economic and social development in the 1980s, wastewater discharge and the load into Lake Taihu increased accordingly with the rapid development of consumption of industrial and tertiary production. As a result, the TP concentration of Lake Taihu grew sharply from 1985 to 1995, reached a peak in 1995, then declined gradually with the incessant implementation of control and protection measures, and finally entered narrow fluctuation after 2009. The spatial distribution of TP concentration in different periods reflected pollutants inputs into Lake Taihu. The driving factors that may affect TP variations in Lake Taihu in 1980–2020 were further discussed, i.e. the impacts of wastewater discharge and water yields for economic and social development, TP concentrations within inflow rivers, external TP load, cyanobacteria bloom, water temperature, the changes of macrophytes area, sediment release, residence time etc. The results indicated that the increases of TP load, cyanobacterial blooms and water temperature, and the shrinkage of macrophyte area are the main factors causing TP concentration increase in Lake Taihu in recent 10 years. Statistics revealed that during 2008–2019, the net TP load of Lake Taihu increased by 33.9% as compared with that of 1998–2007. Moreover, the residence time of whole Lake Taihu shortened by 17.7% in

* 2021-03-26 收稿; 2021-05-12 收修稿稿。

国家重点研发计划项目(2018YFC0407900)资助。

** 通信作者; E-mail: jiagh@tba.gov.cn.

the past 10 years, which probably counteracted the adverse effects affecting the TP concentration increase in Lake Taihu. Therefore, targeted measures such as source control and pollution intermission, water resource saving and emission reduction, water resources regulation, ecological restoration and dredging of contaminated area should be actively carried out in the near future governance in order to achieve better TP concentration control effect in Lake Taihu.

Keywords: Lake Taihu; eutrophication; total phosphorus; cyanobacterial blooms; water ecology

太湖治理历史悠久,古代和近代的治理大多以避水害、兴水利,改善航运、灌溉等为主^[1]。新中国成立后至1987年,太湖治理以围湖造地、农田灌溉、圩区建设等为主,主要是对分散的、区域条块分割的小范围水域进行治理^[2-3]。1987年国家计委批复《太湖流域综合治理总体规划方案》开始了以流域为单元的综合治理^[4],随后30多年太湖流域人口、土地利用状况、产业结构和布局发生了巨大的变化^[5-7]。

湖泊营养状态的变化综合反映经济社会发展程度、治理与保护之间的相互关系,不同的发展阶段其驱动因子各不相同^[8-13]。2007年太湖蓝藻暴发等原因导致无锡市供水水源污染^[14],严重影响了当地近百万群众的正常生活。党中央、国务院对太湖治理工作高度重视,2008年启动实施太湖流域水环境综合治理^[15],经过13年的太湖综合治理和系统治理,太湖流域水环境状况显著改善,太湖以及入湖河道水质明显好转^[16-17]。然而当前太湖富营养化问题仍然突出,作为太湖富营养化的重要控制性指标——总磷(TP)浓度仍长期在高位波动,成为制约太湖水环境进一步改善的主要因素^[18-20]。为寻求科学精准的治理方法路径,需要对可能影响太湖TP浓度变化的主要驱动因子进行系统分析,以找出能够通过人工干预进行治理的有效措施。为此,本文采用40多年(1980—2020年)太湖TP浓度监测资料,分析其时空变化过程,并对驱动因子进行分析讨论,揭示经济社会发展、用水结构变化和自然因素耦合作用下太湖TP浓度变化特征和响应关系,为太湖流域水环境治理精准施策提供技术支撑。

1 数据来源和方法

1.1 数据来源

本文所采用的数据主要为水利部太湖流域管理局(以下简称“太湖局”)组织开展的太湖水资源、水环境、水生态监测数据。

1.1.1 水环境监测数据 太湖局于1997年起对太湖流域水环境开展系统的监测,主要包括22条主要入太湖河道水质、水量同步监测,太湖水质和蓝藻监测,太湖蓝藻水华卫星遥感监测,太湖高等水生植物人工和卫星遥感调查,太湖生物多样性调查,太湖水源地水质监测等,20多年来共累积和形成了太湖及环太湖河流水质、水生态监测数据276万余组,为研究入湖河流水质演变、入湖污染物总量的演变奠定了坚实的基础。1997年太湖布设7个水质监测点,后经过多次站点补充完善,到2006年监测站点扩充至33个并沿用至今(图1)。监测频次1997年为两月一次,1998年开始为每月一次。2000年开始同步开展太湖藻类监测。水质监测采用国家标准方法,藻类监测采用行业规范人工镜检方法,均先后通过实验室国家级计量认证,采样及检测过程符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《水环境监测规范》(SL 219—2013)。高等水生植物的监测2012年前为人工监测,2012年后采用人工监测与卫星遥感解译结合。

本文所采用的1985—1996年的数据主要来自太湖局组织开展的专题研究成果,部分摘自公开文献的数据已在文中逐一标明出处。

1.1.2 水资源监测数据 本文所采用的环太湖出入湖水量数据来自太湖局组织江苏、浙江水文部门共同开展的环太湖水文巡测资料整编成果,其它水资源监测统计数据来自太湖局组织编制的年度《太湖流域水资源公报》^[21]和《太湖流域水资源调查评价报告》^[22]。

1.2 数据处理

1997年以前太湖TP浓度总体均值空间上采用各站点的算术平均值,时间上采用1—12月算术平均值作为年度均值;1997年之后太湖TP浓度总体均值空间上为站点构建泰森多边形后的面积加权平均值。入湖河流TP平均浓度均为水量加权平均值。环太湖进出湖污染负荷量计算基于环太湖进出湖水量资料、水质资料,考虑统一巡测段内入湖河流进出水量、水质的不同加权计算,以便于构建长系列资料进行历史变化规律的分析。

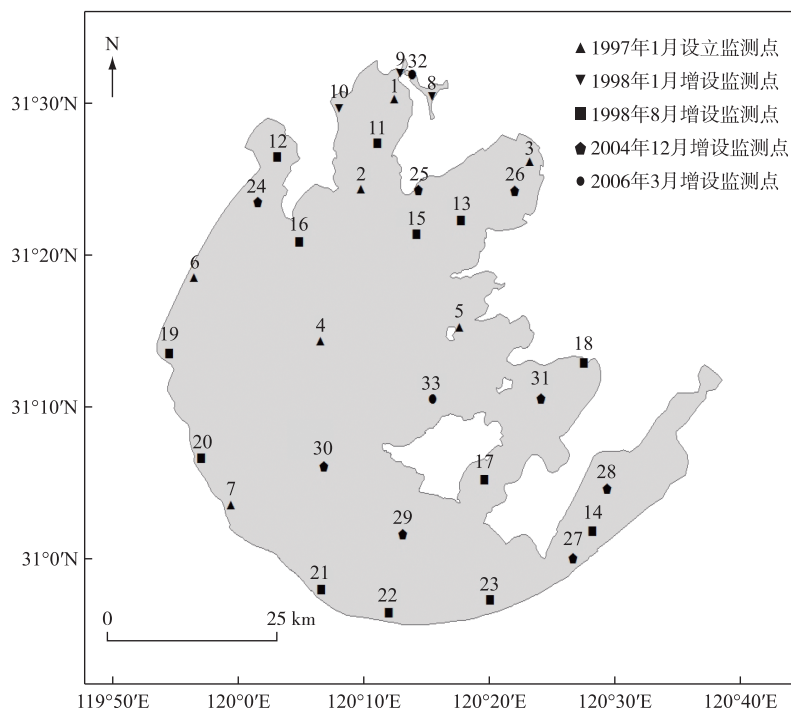


图 1 不同时期太湖监测站点布设

Fig.1 The layout of in monitoring stations in Lake Taihu in different periods

1.3 分析方法

在 GIS 软件中以克里金法进行内插求得太湖 TP 浓度分布,以分析太湖 TP 浓度时空变化趋势. 采用对比分析、聚类分析、数理统计分析等方法对太湖 TP 浓度与各驱动因子之间的响应关系进行分析.

2 结果与分析

2.1 太湖 TP 浓度时序变化特征

1980s 中期太湖 TP 浓度持续快速升高,1995 年达到峰值 0.133 mg/L,比 1987 年升高了 358.6%^[23-25],这段时期简称为“TP 急剧上升期”. 之后太湖 TP 浓度呈快速下降趋势,到 2009 年 TP 浓度下降到 1995 年至今最低值,为 0.062 mg/L,与 1995 年相比下降了 53.4%^[26-28],这段时期简称为“TP 快速下降期”. 2009 年之后太湖 TP 浓度出现了起伏波动,到 2019 年为 0.087 mg/L,比 2009 年升高 40.3%^[29-30],随后 2020 年出现好转,TP 浓度为 0.073 mg/L,较 2019 年下降 19.2%,这段时期简称为“TP 窄幅波动期”(图 2).

2.2 太湖 TP 浓度时空变化特征

根据太湖各监测点年均 TP 浓度值采用克里金插值绘制不同年份太湖 TP 浓度空间分布的等值线图(图 3). 1987 年太湖 TP 浓度普遍较低,整体趋势为“北高南低”,浓度较高的区域为五里湖、梅梁湖以及部分东部湖区,浓度最低的区域为湖心区,东部湖区 TP 浓度高是因为该部分湖区有大量的围湖农场^[31-32]. 到 1995 年太湖除东部湖区以外,其他湖区 TP 浓度均为劣 V 类水平. 2000—2005 年太湖整体 TP 浓度有所下降,基本形成了“西北高、东部低”空间分布格局,梅梁湖、竺山湖、西北沿岸、西南沿岸等太湖主要入流湖区 TP 浓度明显高于其他湖区^[26]. 这段时期梅梁湖内因有武进港、直湖港、梁溪河等入湖河流,特别是梁溪河将无锡市城市面源污水排入太湖,梅梁湖成了太湖水质最差的湖区^[33]. 2007 年无锡市供水危机之后,在不危及防洪安全的情况下梅梁湖沿岸门口常年大部分关闭,设计装机 50 m³/s 的梅梁湖泵站常年从太湖抽水,经梁溪河或五里湖排入江南运河. 切断主要外源直接输入后,梅梁湖水质有所好转^[34]. 2015—2020 年太湖 TP 浓度

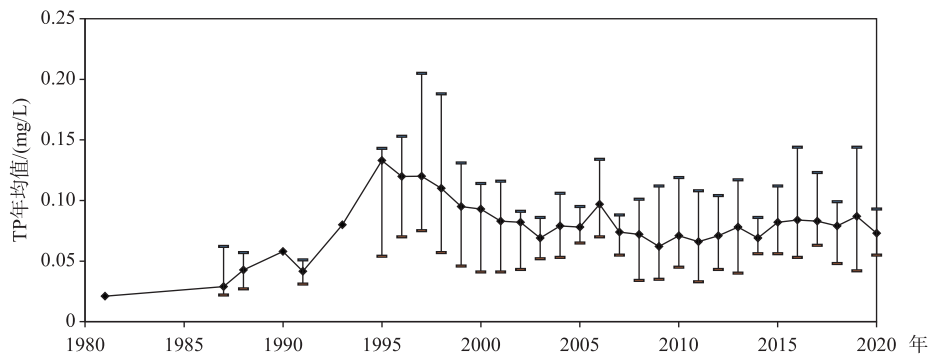


图 2 1980—2020 年太湖 TP 浓度年际变化趋势

Fig.2 Changes of the annual average TP concentration of Lake Taihu from 1980 to 2020

呈现的是“西北高东南低”的格局^[30,35]. 前人研究表明 75% 的入湖 TP 负荷来自湖西地区,从竺山湖、西北沿岸进入太湖;15% 的入湖 TP 负荷来自浙西地区,从西南沿岸河流进入太湖^[29-30]. 1987—2007 年湖西区入湖水量占比 56%,浙西区入湖水量占比 23%,1995、2000、2005 年的太湖 TP 空间格局与来水情况相吻合. 2008—2020 年由于水文情势变化,湖西区入湖水量占比升高至 66%,浙西区入湖水量占比减小至 21%,浙江苕溪在枯水期表现为出湖状态^[36],因此 2010、2015、2020 年太湖 TP 浓度时空变化格局为从 TP 浓度高的竺山湖和西北沿岸区域逐渐向东南扩散.

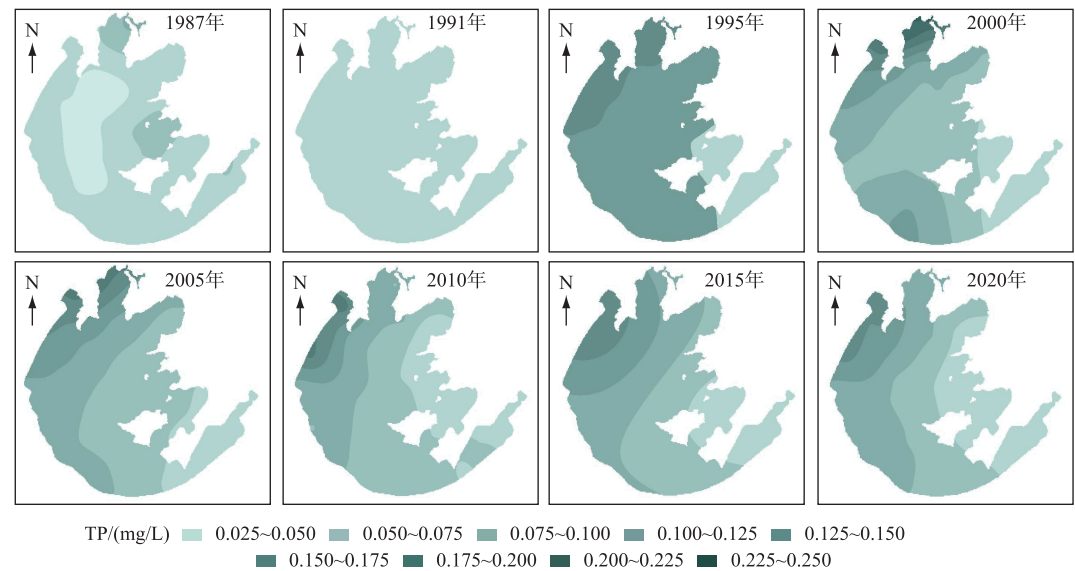


图 3 太湖 TP 浓度时空变化

Fig.3 Temporal and spatial changes of TP concentration in Lake Taihu

2.3 太湖 TP 浓度年内变化特征

根据太湖近 20 年逐月 TP 浓度统计出 2001—2010 年和 2011—2020 年每个月的多年平均浓度,以及 20 年的最大、最小值,绘制太湖逐月多年 TP 平均浓度变化趋势图(图 4a). 由此可知,9 月份 TP 浓度变幅最大,达 0.096 mg/L,其次为 1 月、2 月、6 月、8 月. 分别统计 2001—2010 年与 2011—2020 年 2 个时段每月太湖 TP 浓度可知,7 月份在 2 个时段中 TP 浓度均最低且几乎相等,分别为 0.060 和 0.061 mg/L. 以 TP 浓度最低的 7 月为界,2001—2010 年 1—6 月平均 TP 浓度为 0.077 mg/L,8—12 月平均 TP 浓度为 0.076 mg/L,上半年略

高于下半年. 与 2001—2010 年相比, 2011—2020 年太湖逐月 TP 浓度发生较大变化, 1—6 月平均为 0.072 mg/L, 8—12 月平均为 0.087 mg/L, 下半年明显高于上半年. 结果表明, 近十年来太湖 TP 浓度上半年下降了 6.9%, 而下半年上升了 14.5%.

选取太湖 6、12、19 号 3 个监测点作为西部湖区典型代表, 选取 14、17、18、23 号 4 个监测点作为东部湖区典型代表, 取其算术平均值作为区域代表值, 分析对比 2 个区域的 TP 浓度变化差异. 由图 4b 和 4c 可知, 西部湖区与全湖的 TP 浓度年内变化规律相似, 东部湖区则相对独立, 与全湖 TP 浓度年内变化没有相似性.

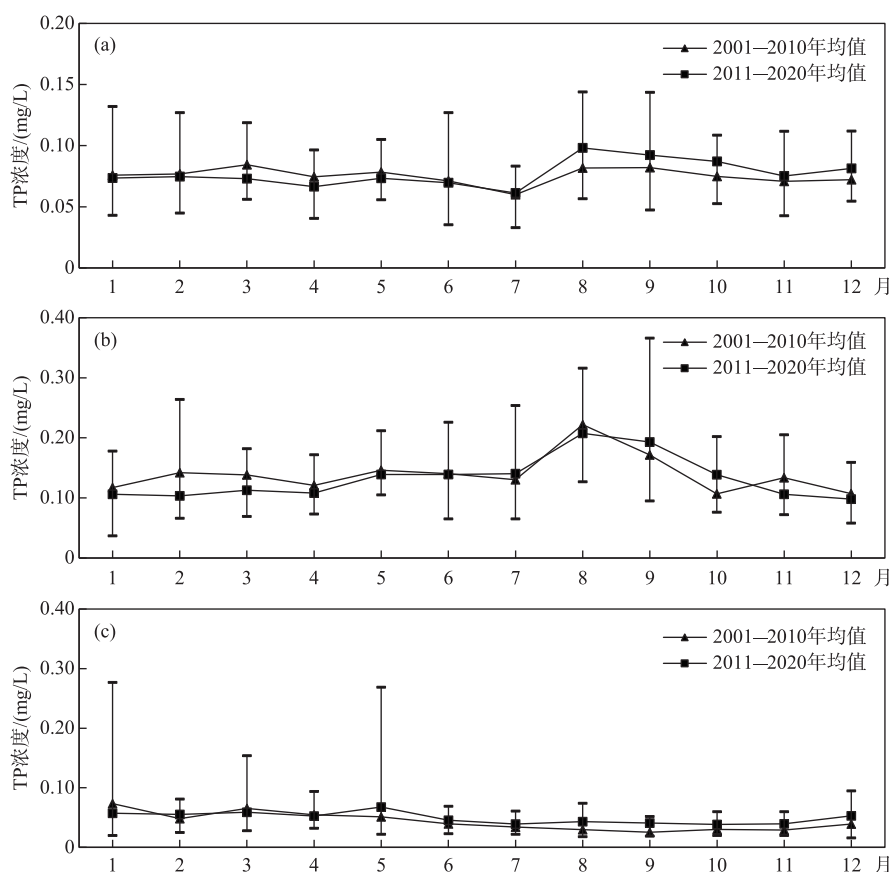


图 4 2001—2020 年太湖全湖(a)、西部湖区(b)和东部湖区(c)TP 浓度逐月变化
Fig.4 The changes of monthly TP concentration in whole(a), west part(b) and east part(c) of Lake Taihu from 2001 to 2020

3 太湖总磷变化的驱动因子以及湖泊的响应

太湖 TP 浓度变化反映的是经济社会发展状况、污染物的总排放量、治理与保护之间的平衡关系, 具体到特定的年份, 则会受到水文气象、水生态状况等因素影响^[26-28, 30, 35-37].

3.1 经济社会发展、用水量、废污水排放量对太湖 TP 浓度的影响

本研究分析了 1980—2019 年太湖流域人均 GDP 与工业用水量和 2000—2019 年太湖流域人均 GDP 与废污水排放量的关系(图 5, 图 6), 二者趋势线均呈倒 U 型, 较好地契合了环境库兹涅茨曲线(EKC)的特点, 即在经济发展初期阶段经济增长、人均收入的提高会导致环境质量的下降, 然而一旦经济发展超越了某一临界值点, 随着技术进步和产业结构优化, 人均收入的进一步提高反而会降低环境污染、改善环境质量^[38]. 1980—2007 年太湖流域人均 GDP 从 0.15 万元增长到 5.8 万元, 工业用水量从 82.7 亿 m³增加到 233.0

亿 m^3 , 2000—2007 年太湖流域人均 GDP 从 2.7 万元增长到 5.8 万元, 废污水排放量从 50.1 亿 m^3 增加到 63.0 亿 m^3 , 2007 年之后工业用水量和废污水排放量都不再随人均 GDP 的增加而增加, 这与 2007 年发生的无锡供水危机后, 太湖流域开始开展较大规模的水环境综合治理有关^[15]。

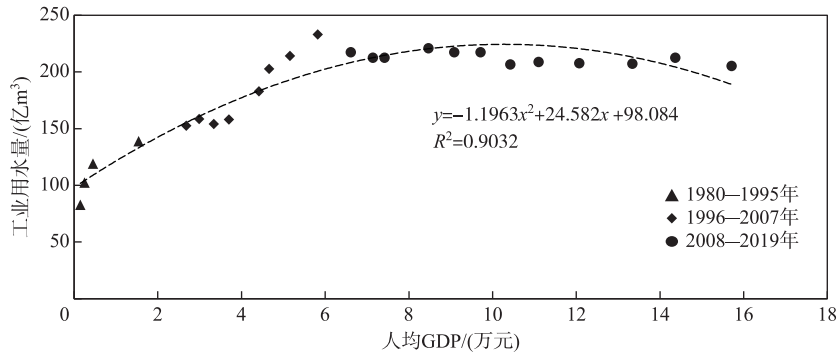


图 5 1980—2019 年太湖流域年人均 GDP 与工业用水量的关系

Fig.5 The relationship between annual GDP per capita and industrial water consumption in Lake Taihu Basin from 1980 to 2019

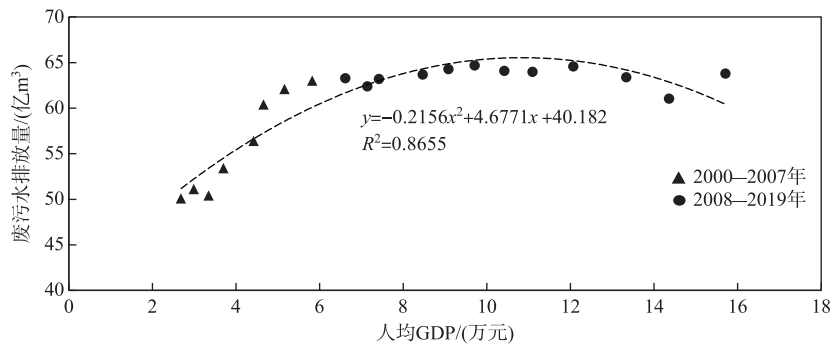


图 6 2000—2019 年太湖流域年人均 GDP 与废污水排放量的关系

Fig.6 The relationship between annual GDP per capita and sewage discharge in Lake Taihu Basin from 2000 to 2019

从太湖流域用水结构来看(图 7), 1980—2007 年工业用水占比不断增加, 从 35.3% 增至 62.5%, 2007 年后基本维持在 60% 左右; 与之相对的, 1980—2007 年农业用水大幅下降, 从 59.5% 减至 25.3%, 2007 年后小幅减少^[22]; 1980—2019 年随着流域人口密度的增加, 生活用水占比基本保持小幅平稳上涨, 平均每年增长 0.3%。据监测分析, 水体中的磷主要来源为生活污水、工业废水、化肥、有机磷农药及洗涤剂^[8, 23-24]。生活污水中的含磷量与人口规模和生活质量、公众环保意识等相关^[39], 工业废水的含磷量与产业结构和规模相关^[40-41], 来自农药化肥的磷与耕作方式和农业产量相关^[42-43]。1985—1995 年, 随着经济社会高速发展, 流域用水总量和排放量也快速增加^[42], 与此同时太湖水质急剧恶化, TP 浓度快速升高^[44]。2001—2006 年太湖 TP 浓度变化趋势基本与工业用水占比变化保持一致, 2007 年后随着治理力度加大, 工业废水处理率提升、产业结构优化, 尽管工业用水占比基本不变, 太湖 TP 浓度仍较 2006 年大幅下降, 2007—2019 年太湖 TP 浓度窄幅波动, 略有上升, 年均涨幅约 1.46%, 这可能与持续增加的生活用水占比有关。

最严格的水资源管理制度实施以来, 太湖流域总用水量和用水效率得到了很好的控制^[21]。2000 年太湖流域废污水排放量是 50.1 亿 t, 到 2019 年增长到 63.8 亿 t, 增幅 27.3%。与此同时, 万元 GDP 用水量则从 2000 年的 297.1 m^3 下降到了 2019 年 35.0 m^3 , 降幅 88.2%。由此表明, 加强水资源管理、提高水资源安全集约

利用对流域减排发挥了重要作用. 太湖流域多年平均本地水资源量约为 175 亿 m^3 , 这部分水资源量主要来自降水^[22]. 经典型年监测, 太湖流域雨水中的 TP 浓度约为 0.023 mg/L ^[7,18]. 这部分相对清洁的水资源, 经过地面的产流、汇流, 最后到河流、湖泊. 假设太湖流域废污水的接管率已经达到 100% (根据太湖局组织开展流域水环境综合治理效果评估, 测算太湖流域城镇生活污水实际接管率约为 78%), 且全部处理到一级 A 排放, 即污水处理厂排出的 63.8 亿 t 尾水 TP 浓度为 0.50 mg/L , 在此条件下计算可得, 雨水和污水处理厂尾水混合后的 TP 浓度已经达到 0.150 mg/L . 再加上农业、城市面源随雨水的输入, 导致近 10 年主要入太湖河道的 TP 平均浓度是 0.187 mg/L , 明显高于 2008 年国务院批复《太湖流域水环境综合治理总体方案》中的 $0.12 \sim 0.13 \text{ mg/L}$. 因此要降低河网 TP 浓度, 除了治理面源以外, 需继续加大节水减排减少废污水的排放量, 并适当提高污水处理排放标准.

综上所述, 太湖 TP 浓度的变化与经济社会发展的水平和质量、生产生活方式和公众意识息息相关, 推动技术进步和产业结构优化、提高节水意识和水平、适当提高污水处理排放标准是降低 TP 浓度的关键^[45].

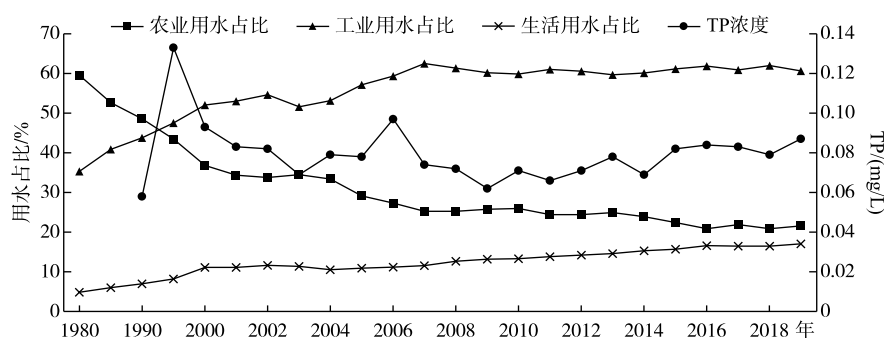


图 7 1980—2019 年太湖流域用水结构与太湖 TP 浓度的关系

Fig.7 The relationship between water-using structure in Lake Taihu Basin and TP concentration in Lake Taihu from 1980 to 2019

3.2 入湖水量、入湖河流 TP 浓度、入湖负荷对太湖 TP 浓度的影响

国务院于 1997 年批准了“太湖水污染防治‘九五’计划和 2010 年规划”, 并于 1998 年底开展“太湖流域污染源达标排放行动”(简称“零点行动”), 主要内容为太湖流域日排工业废水 100 t 以上的重点排污企业需在 1999 年 1 月 1 日零点以前达标排放^[44]. “零点行动”在一定程度上削减了外源营养盐负荷, 对遏制水环境恶化起到了一定作用, 是太湖流域水环境综合治理的新起点. 如图 8 所示 1998—2001 年太湖 TP 负荷呈现下降趋势. 其中 1999 年发生流域性特大洪水, 降雨中心在流域南部, 全年入湖水量 108.2 亿 m^3 (表 1), 洪水年份入湖河流的 TP 浓度相对较低^[40], 1999 年环太湖入湖河流的平均浓度是此后 20 多年的最低值, 为 0.142 mg/L . 2002—2004 年流域偏旱, 沿江引水加大, 入湖水量分别为 103.3 亿、106.3 亿、81.4 亿 m^3 . 随后 2005—2006 年流域连续两年的枯水年, 平均入湖水量仅为 76.5 亿 m^3 , 2006 年太湖 TP 浓度显著升高, 达 0.097 mg/L , 当年入太湖河流平均 TP 浓度也达到了近 20 多年的次高值 0.232 mg/L . 2006 年太湖除了 TP 以外的其他水质指标也是这段时期中最差的, 这为 2007 年蓝藻大面积暴发带来隐患. 前人研究^[46-47] 同样证明在此期间太湖的水环境问题远没有解决, 导致入湖 TP 负荷有所增加, 太湖 TP 浓度呈波动状态.

2008 年国务院批复《太湖流域水环境综合治理总体方案》之后, 太湖治理的力度加大, 根据中国国际咨询公司 2012 年初完成的太湖流域水环境综合治理中期评估报告, 4 年间累计完成污染源治理、生态修复、河网整治、节水减排等 11 类项目 1117.3 亿元投资, 到 2011 年底太湖流域已经完成工业点源治理项目 98 个, 占总数的 85.5%, 完成城镇污水处理项目 472 个, 占总数的 81.4%, 关停并转移落后产能企业 5500 余家. 在这期间全流域基本实现了城镇污水处理厂从一级 B 到一级 A 排放标准的提标, 污水处理厂尾水排放中的含磷量基本减半. 因此太湖 TP 浓度连续 6 年在较低的水平波动, 2007—2012 年太湖 TP 浓度平均值为 0.069 mg/L , 且之后入湖 TP 浓度快速下降, 表明太湖流域水环境综合治理是卓有成效的. 但值得注意的是, 2007—2012 年入湖河道的

平均 TP 浓度是有系统性监测数据以来(1998—2020 年)的最高值,年均值为 0.213 mg/L,且入湖 TP 负荷年均值也是最高的,为 2301.7 t/a,由此可见即便某段时间入湖负荷强度大,但生态系统仍然具有一定的稳定性和弹性,也说明太湖营养盐来源及浓度波动规律复杂,有待深入研究^[45].

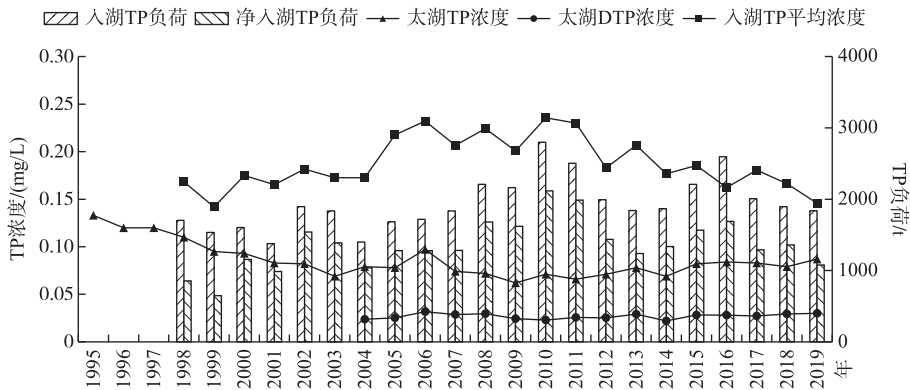


图 8 太湖、入湖河流 TP 浓度和入湖 TP 负荷的关系

Fig.8 The relationship among the TP concentration of Lake Taihu and the rivers entering the lake and the TP load entering the lake

从入湖水量看(表 1),2008 年开始太湖流域入湖水量大幅度增加,2008—2020 年太湖年均入湖水量 114.6 亿 m³较 1985—2007 年太湖年均入湖水量 79.8 亿 m³增加 43.6%。入湖水量的增加一方面是由于流域降水量增加导致^[35],一般情况洪水年份入湖河流的 TP 浓度会低一些,但不绝对,还得看降雨中心。例如 1999 年降雨中心在杭嘉湖地区,浙西区来水水质好,入湖 TP 浓度较低,入湖 TP 负荷也较小。2016 年降雨中心在湖西区,入湖 TP 浓度较高,入湖 TP 负荷则比较大^[48]。另一方面前人研究表明,2000 年前后沿江各闸经过改扩建,引排能力逐渐增强^[35]。这段时间由于入湖水量增加,入湖河道 TP 浓度呈下降趋势,但入湖 TP 负荷没有呈现下降趋势,1998—2007 年太湖年入湖 TP 负荷均值为 1658.3 t,净入湖 TP 负荷均值为 1144.7 t,而 2008—2019 年太湖年入湖 TP 负荷均值为 2159.8 t,净入湖 TP 负荷均值为 1533.0 t,两个时段相比,后者入湖 TP 负荷均值增加了 30.2%、净入湖 TP 负荷均值增加了 33.9%。

表 1 1999—2020 年入太湖水量

Tab.1 The amount of water inflow into Lake Taihu from 1999 to 2020

年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
入湖水量/(亿 m ³)	108.2	91.6	83.3	104.3	106.4	81.4	79.1	73.8	88.9	98.5	107.7
年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
入湖水量/(亿 m ³)	118.8	108.8	109.0	89.0	105.6	119.1	159.9	111.1	114.1	126.1	122.6

综上,入湖水量、入湖河流 TP 浓度、入湖负荷对太湖 TP 浓度的影响是直接的,这三者的空间分布与太湖 TP 空间分布格局基本一致^[30],入湖水量、入湖河流 TP 浓度的变化最终通过入湖 TP 负荷的变化反映到太湖 TP 浓度的波动上,但这种变化存在滞后性,响应程度也不是绝对的。

3.3 蓝藻水华、水温对太湖 TP 浓度的影响

太湖蓝藻水华从 1980s 在太湖五里湖、梅梁湖等水域出现,直到 2010 年之前蓝藻水华仍然主要出现在竺山湖、梅梁湖、西北沿岸和小部分湖心区,暴发时段一般情况出现在夏季^[9-11]。2010 年后,特别是 2015 年后,蓝藻水华在时间、空间、生物量上均出现了“扩张”,从时间上看,太湖出现蓝藻水华的时段从原先的 5—9 月,逐渐延长到几乎全年都有,有些年份 12 月、2 月等冬季时段也出现过超过 500 km²的蓝藻水华的现象。从空间上看,蓝藻几乎蔓延到全太湖所有湖区。从强度上看,2010 年太湖年均蓝藻密度比 2007 年增加

26.8%, 2015 年比 2010 年增加 181.0%, 2020 年又比 2015 年增加 120.6%。蓝藻生长可增加底泥磷的释放和有机磷的转化, 加快湖体磷循环, 增加水体 TP 浓度^[37,49]。从图 9 可以看出, 2010—2020 年太湖 TP 浓度与蓝藻密度具有较好的相关性, 两者相关系数高达 0.72。用入湖 TP 负荷从 2200 t 到 1800 t 之间的 2015、2017、2019 年 3 年的太湖逐月 TP 浓度与蓝藻密度做相关分析, 相关系数为 0.43 (图 10)。蓝藻密度与 TP 浓度的监测数据较好地佐证了蓝藻水华强度加大可能会导致 TP 浓度升高。

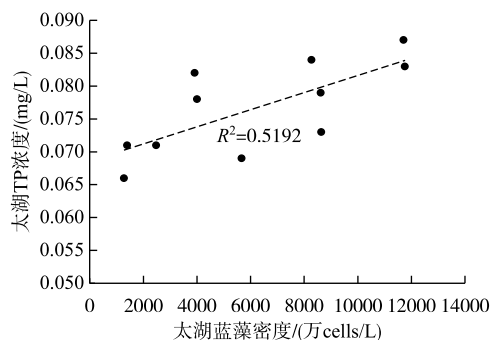


图 9 2010—2020 年太湖
TP 浓度与蓝藻密度的关系

Fig.9 The relationship between TP concentration and cyanobacterial density in Lake Taihu from 2010 to 2020

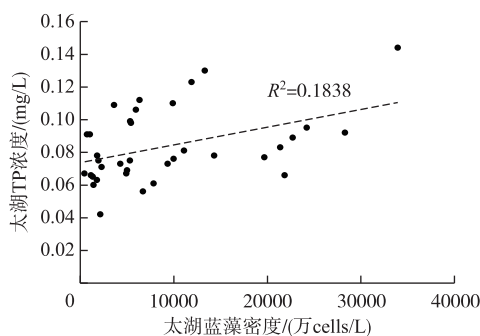


图 10 2015、2017 和 2019 年太湖逐月 TP
浓度与蓝藻密度的关系

Fig.10 The relationship between monthly TP concentration and cyanobacterial density in Lake Taihu in 2015, 2017 and 2019

2015 年以来国内外大量湖泊均出现蓝藻大面积高强度增长的现象^[49], 引起了学者广泛关注, 研究表明气象条件如风速、光照、气温的变化是导致蓝藻水华面积和强度增加的重要原因^[9,50], 气象条件变化又会进一步引起水温变化, 进而影响蓝藻水华的发生。朱广伟等^[51]研究发现太湖蓝藻水华强度指标与冬季及初春日均水温和冬、春季有效积温呈显著正相关, 2007 年和 2017 年太湖蓝藻水华大暴发, 都经历了冬季及早春的水温异常偏高过程。太湖贡湖自动监测站的数据表明, 2006—2010 年冬季 1 月份的平均温度是 7.63℃, 而 2016—2020 年冬季 1 月份的平均温度是 9.52℃, 后者升高了 1.89℃。虽然水温与 TP 的响应关系目前还不明晰, 徐升宝等^[52]研究发现沉积物中磷释放速率随水温升高而升高, 叶羽婷等^[53]研究发现水温与太湖梅梁湾、湖心区、河口区综合营养状态指数均存在极显著相关且具有区位差异, 但与 TP 浓度的相关性则不显著, 但本研究证明了太湖蓝藻密度与太湖 TP 浓度的相关性, 暖冬有利蓝藻生长, 而蓝藻水华的增加则间接导致水体 TP 浓度的升高。选取 2001—2010 和 2011—2020 年两个时段太湖逐月水温进行分析, 结果表明 1—6 月两个时段水温相差不大, 近十年平均升高 0.075℃, 7 月较为特殊, 水温降低 1.34℃, 8—12 月的水温则明显升高, 近十年平均升高 1.13℃ (图 11)。与水温差异相似的是, 2011—2020 年太湖 8—12 月的月均 TP 浓度也明显升高, 较 2001—2010 年升高 14.5%。

综上, 太湖 TP 浓度和水温的升高均有利于蓝藻水华的发生, 而蓝藻水华的形成又可增加底泥磷释放和有机磷的转化, 加快湖体磷循环, 增加水体 TP 浓度。

3.4 高等水生植物对太湖 TP 浓度的影响

根据《太湖生态环境图集》^[54], 1987 年太湖周边沿岸和东山、西山等主要岛屿沿岸全线均有芦苇或苦草群落覆盖, 东太湖全湖覆盖茭草、芦苇、苦草、轮叶黑藻等, 到 1997 年太湖高等水生植物覆盖面积进一步扩大, 竺山湖、西部沿岸的芦苇群面积减小, 而贡湖、东部沿岸、胥湖、东茭嘴以南沿岸等区域增加了较大面积的马来眼子菜 (图 12)。2012 年以来太湖内芦苇等挺水植物分布范围和面积并未发生明显的起伏变化, 每年 5 月份的均值为 30.4 km²。沉水植物的覆盖面积从 2015 年开始发生断崖式下降, 从 2012—2014 年 5 月份覆盖面积均值 258.9 km² 到 2015 年的 27.7 km² (图 13)。通过几年时间的涵养, 太湖高等水生植物覆盖面积有所上升^[55], 到 2020 年 5 月监测表明, 太湖有沉水植物覆盖面积 94.9 km², 挺水植物分布面积 33.0 km²。

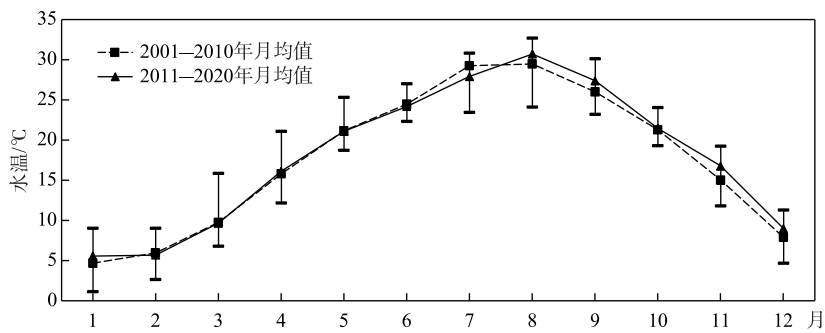


图 11 2001—2020 年太湖水温变化情况

Fig.11 The changes of water temperature of Lake Taihu from 2001 to 2020

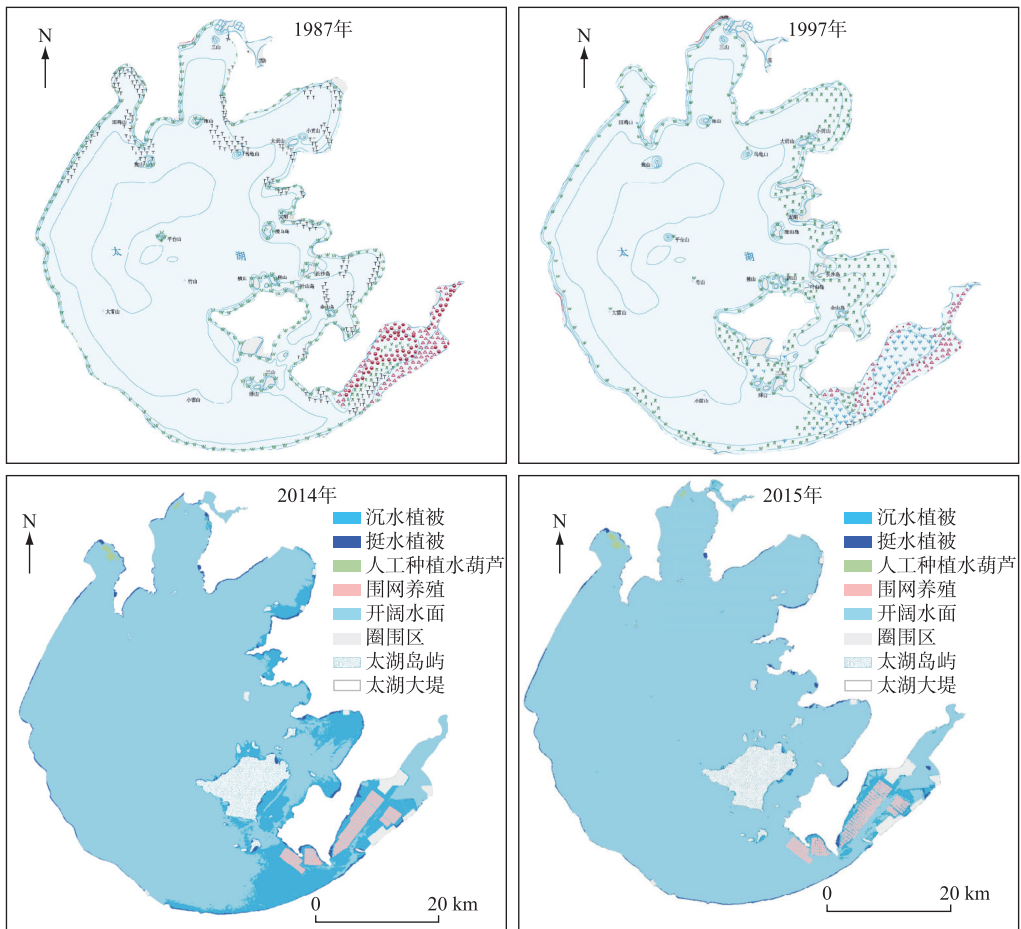


图 12 不同年份太湖高等水生植物覆盖面积示意

Fig.12 Macrophytes area in Lake Taihu in different years

郑莺^[56]研究表明,沉水植物和挺水植物对水体中磷的吸收富集能力较强。吴功果等^[57]分析了 1977—2009 年洱海水生植物与浮游植物的历史变化,发现洱海从贫—中营养到富营养化初期,沉水植物种类减少,水生植物分布面积缩小,浮游植物数量大量增加,表明高等水生植物与藻类存在竞争关系,具有抑制蓝藻生

长、减少底泥营养盐释放,避免风浪导致底泥再悬浮等作用^[58-59]. 2015 年与 2014 年相比,东茭嘴以西的南部沿岸沉水植物大面积减少. 随着阻隔西太湖和东太湖的天然屏障消亡,2016 年开始东太湖蓝藻密度从原先的年均小于 1500 万 cells/L,逐步上升到最大年均超过 3500 万 cells/L(图 14). 与此同时,东太湖 TP 浓度也在 2015 年后有所上升,而东太湖蓝藻密度升高和 TP 浓度升高存在一定相关性和同步性. 分析东太湖 TP 浓度和蓝藻密度的变化,对分析太湖草型湖区的水生态环境变化具有重要意义. 图 14 所示 2007—2020 年东太湖 TP 浓度的变化过程,2007—2014 年东太湖 TP 浓度呈现波动状态,多年均值为 0.041 mg/L,2015—2020 年多年均值为 0.050 mg/L,两个时段相比,后者升高了 22%. 2015 年后东太湖蓝藻密度上升的幅度则更大,相同两时段蓝藻密度升高了 3.36 倍. 图 15 用 2014—2018 年东太湖逐月的 TP 浓度与蓝藻密度进行相关分析,两者相关系数为 0.572,说明两者存在较好的相关性. 以上分析说明,东太湖蓝藻密度与 TP 浓度的变化很大程度上受东部湖区沉水植物的分布和面积影响.

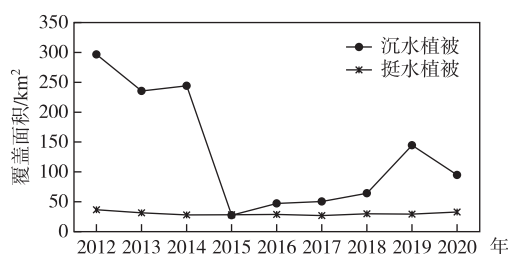


图 13 2012—2020 年 5 月份
遥感太湖高等水生植物覆盖面积

Fig.13 Remote sensing of
macrophytes area in Lake Taihu
in May from 2012 to 2020

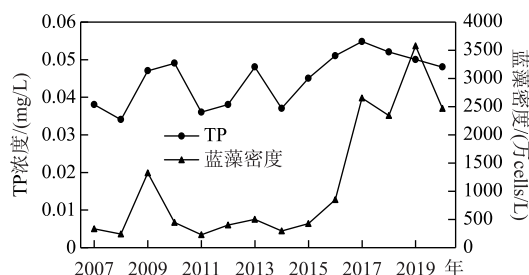


图 14 2007—2020 年东太湖
TP 浓度和蓝藻密度关系

Fig.14 The relationship between TP
concentration and cyanobacterial density
from 2007 to 2020 in East Lake Taihu

沉水植物主要分布在东部湖区,太湖 TP 的主要来源在西北湖区,图 16 分析了太湖 TP 主要来源湖区竺山湖与东太湖 TP 浓度的关系,表明东太湖 TP 浓度与竺山湖 TP 浓度没有直接关联,就 TP 而言东太湖是一个相对独立的系统,东太湖的 TP 浓度基本上不受入湖负荷变化的影响. 前文所述太湖 TP 浓度年内变化规律是冬春季低、夏秋季高,而水草则是冬春季少、夏秋季多,水草多的时段,太湖 TP 浓度反而高,这说明水草在太湖 TP 的变化中不是决定性的控制因子,但水草对其所覆盖的东部草型湖区的水质改善作用明显.

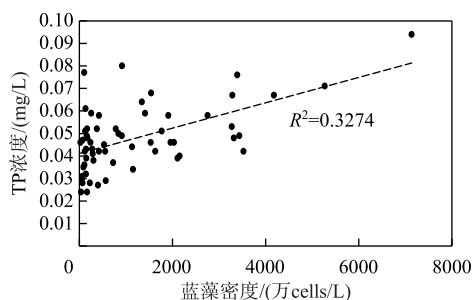


图 15 2014—2018 年东太湖逐月
TP 浓度和蓝藻密度关系

Fig.15 The relationship between monthly TP
concentration and cyanobacterial density
in East Lake Taihu from 2014 to 2018

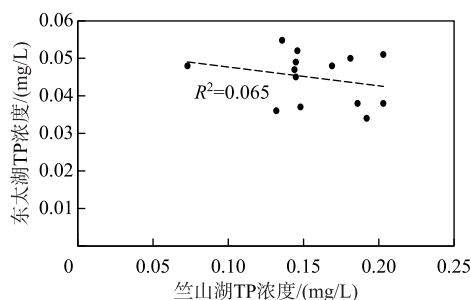


图 16 2007—2020 年竺山湖与
东太湖 TP 浓度的关系

Fig.16 The relationship between TP
concentration of Zhushan Lake and
East Lake Taihu from 2007 to 2020

3.5 底泥释放对太湖 TP 浓度的影响

湖泊是流域物质的汇集地,流域内生产生活排放的磷伴随着泥沙以水为载体在湖泊中聚集,2001—2020 年平均入湖 TP 负荷是 1984.6 t,随水流出湖的 TP 通量是 583.8 t,剩余 1400.8 t TP 则沉积于太湖. 在太湖中沉积的 TP 有小部分被水生动植物利用,大部分则沉积在底泥中. 胡开明等^[35]研究了太湖底泥沉积物释放规律,提出底泥沉积物再悬浮通量与风速之间的定量关系. 2002—2006 年太湖局组织开展的太湖底泥静态和动态释放试验,在底泥表层污染较严重的湖区和主要出入湖口,选定 7 个底泥释放试验采样点(图 17),静态试验进行了 5、15 和 25℃ 水温下溶解性总磷(DTP)、TP 浓度的释放情况观测,动态试验则在静态的基础上增加了风的模拟. 结果表明,水温、风浪对太湖底泥磷的释放总体是正向影响,即风浪增加和温度的升高都可使得太湖底泥磷释放强度加大^[60].

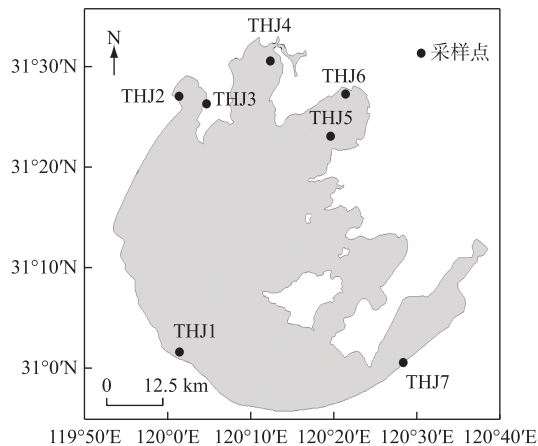


图 17 太湖底泥释放试验采样点

Fig.17 Sampling sites of sediment release test in Lake Taihu

太湖局于 2018—2019 年组织完成太湖污染底泥勘察研究,查明了太湖底泥分布、淤积和污染情况,太湖底泥以淤泥为主,全湖平均淤积厚度为 0.54 m,系近现代之前所形成,物理化学性质较为稳定,对太湖水质影响不大. 太湖浮泥和流泥主要分布在 0~30 cm 浅层底泥中,具有较强的流动性,且孔隙较大,其所含的污染物质与水体接触交换较为频繁,是太湖底泥内源释放的主要来源. 经勘测,太湖浮泥和流泥在全湖均有分布,总淤积量 38743 万 m^3 ,平均淤积厚度 17 cm ^[61]. 受外源输入、湖流以及蓝藻聚集等因素影响,太湖浮泥和流泥更易于在竺山湖、梅梁湖、西部沿岸区及南部沿岸区淤积^[61-62]. 底泥释放形成的内源对太湖 TP 浓度的影响究竟有多大,朱广伟等^[18]提出了太湖底泥静态条件下磷释放量. 综合各方研究的成果可以判断太湖底泥既是太湖 TP 的“汇”,同时也是“源”. 现阶段是以“汇”为主还是“源”为主,关键看太湖 TP 的通量和水体 TP 浓度的变化. 太湖在常水位下的蓄水量约 45 亿 m^3 ,近 20 年太湖 TP 的平均浓度为 0.077 mg/L ,也就是说太湖水体中的 TP 负荷仅为 350 t. 近 20 年太湖年均入湖 TP 通量远大于出湖的通量,沉积于太湖底泥的 TP 负荷是太湖水体 TP 负荷的 4 倍左右,由此可见,目前状态下太湖底泥对 TP 的吸附和沉积作用要远大于释放作用. 综上,太湖部分湖区底泥在特定气象条件下释放 TP 成为内源,但大部分湖区、多数时段太湖底泥仍然表现为 TP 的“汇”而非“源”.

3.6 太湖换水周期变化对太湖 TP 浓度的影响

一般情况下,太湖水环境容量是指水体能达到目标功能且能保持良好健康的生态系统的条件下,所能接纳的污染物总量^[63]. 就湖泊富营养化防治而言换水周期短比长好,对污染物的降解而言水体滞留时间对 TP、 COD_{Mn} 的影响比较小,而对氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)的降解则滞留时间长更为有利,因此要讨论太湖换水周期长好还是短好,需要关注的是什么样的换水周期更有利于太湖水环境容量的提升^[64].

前人研究表明,水体的水环境容量由稀释容量、迁移容量、自净容量三部分组成^[65],太湖水环境容量与

水文、水动力、污染源等因素有关. 其中, 与水环境容量正相关的因子有水量、水体流动的距离、平均流速, 与水环境容量负相关的因子有水体中污染物背景值. 就同一水体而言流动距离不变, 流速越大水环境容量越大, 而流速越大, 迁移时间越短, 也就是换水周期越短水环境容量越大. 若是换水周期缩短到一定程度, 湖泊直接变成了河流, 这种状态下, 水体的迁移容量增加、自净容量下降. 但就太湖而言, 这种极端情况不会出现. 从长系列看, 1985—2020 年太湖平均换水周期 179 d, 2016 年最短, 为 119 d, 1994 年最长, 为 252 d.

从图 18 可见, 太湖换水周期和太湖水质无直接对应关系, 换水周期长水质较差的年份很多, 反之亦然. 综合前文分析, 太湖 TP 浓度的年际变化与入湖污染负荷、太湖高等水生植物分布面积、水温、蓝藻水华强度等有关, 虽然针对特定的年份太湖 TP 浓度变化存在一定偶然性, 但总体上入湖污染负荷、水温、蓝藻水华强度对太湖 TP 浓度的影响是正向的, 高等水生植物分布面积对太湖 TP 浓度的影响是反向的, 即入湖污染负荷大、水温升高、蓝藻水华强度增强, 太湖 TP 浓度升高, 高等水生植物分布面积扩大, 太湖 TP 浓度则会降低. 表 2 可见, 2010—2019 年的平均换水周期 164.3 d, 要比 2000—2009 年的平均换水周期 199.6 d 缩短了 35.3 d, 减少 17.7%; 与此同期, 太湖 TP 浓度的正向因子入湖 TP 负荷增加了 21.6%、蓝藻密度增加了 900%、12—2 月冬季平均水温升高了 8.9%, 反向因子春季高等水生植物面积在 2015 年之前基本稳定在 270 km² 左右, 2015—2020 年均值为 101 km², 近十年大幅减少; 而 2010—2019 年太湖 TP 平均浓度是 0.077 mg/L, 2000—2009 年太湖 TP 平均浓度是 0.079 mg/L, 近十年反而下降了 2.5%. 在入湖 TP 负荷增加、蓝藻密度大幅增加、平均水温升高、高等水生植物面积减少等诸多不利因素的影响下, 太湖 TP 浓度不升反降, 表明适当缩短换水周期对太湖 TP 浓度的下降是有利的^[66].

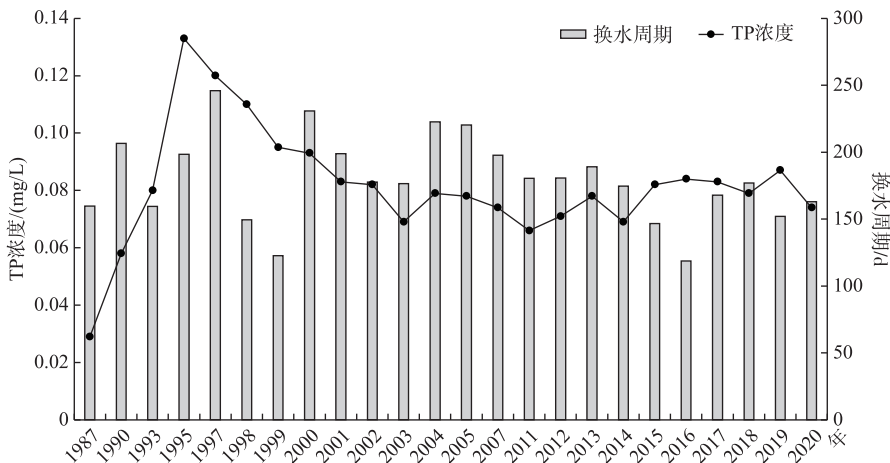


图 18 太湖换水周期和太湖 TP 浓度关系

Fig.18 The relationship between TP concentration and hydraulic retention time of Lake Taihu

表 2 2000—2009 和 2010—2019 年太湖 TP 浓度相关因子的变化

Tab.2 Changes in related factors of TP concentration in Lake Taihu during 2000—2009 and 2010—2019

时段	太湖 TP 浓度/ (mg/L)	入湖 TP 负荷/ t	净入湖 TP 负荷/ t	蓝藻密度/ (万 cells/L)	12—2 月 平均水温/℃	太湖换水 周期/d
2000—2009 年	0.079	1771.6	1324.7	591	6.07	199.6
2010—2019 年	0.077	2154.6	1509.6	5913	6.61	164.3
变幅/%	-2.5	21.6	14.0	900	8.9	-17.7

4 结论

1) 伴随太湖流域 40 年来经济社会快速发展, 太湖水环境实现了从失控到遏制, 从退化到修复的转变.

从时间上看,1985—1995年太湖TP急剧升高,到1995年达到峰值后快速下降,2009年后进入了窄幅波动期。从空间上看,1987年太湖TP浓度全湖普遍较低,五里湖、梅梁湖、东部沿岸区和东太湖部分区域浓度较高,1995—2005年基本形成“西北高东部低”的TP浓度分布格局,其中梅梁湖TP最高。2010年后,太湖治理已见成效,梅梁湖水质好转,太湖TP浓度形成“西北高东南低”的格局。太湖TP浓度的空间格局变化较好的反映了入湖污染物输入分布变化。

2)驱动太湖TP变化的因子很多,机理复杂。入湖水量、入湖河流TP浓度的变化最终通过入湖TP负荷的变化反映到太湖TP浓度的年际波动。太湖TP浓度的波动与太湖蓝藻水华存在较好的响应关系,TP浓度高有利于蓝藻水华的形成,蓝藻水华的发生又会增加TP浓度。高等水生植被可以吸收水体中的磷,并抑制底泥再悬浮降低内源磷的释放,高等水生植物覆盖面积对东太湖TP的影响至关重要。底泥污染状况、风浪、水温、蓝藻水华等可能影响底泥磷释放,太湖部分湖区底泥在特定气象条件下释放TP成为内源,但现阶段太湖底泥对TP的吸附和沉积作用要远大于释放。用近20年的数据对比分析表明,太湖换水周期缩短了35.3 d,在入湖TP负荷增加、蓝藻密度大幅增加、冬季平均水温升高、高等水生植物面积减少等诸多不利因素的影响下,太湖TP浓度不升反降。综合太湖TP空间分布和诸多影响因子的分析讨论,太湖流域水环境综合治理13年太湖TP未见明显改善的主要原因是该13年入湖TP负荷没有减少,反而增加了30.2%。

3)在新一轮太湖治理应针对太湖TP人工能干预的影响因子采取有效的治理措施,积极开展控源截污、节水减排、水资源调控、高等水生植被恢复、重点污染湖区清淤疏浚等针对性措施。

5 参考文献

- [1] Wu HY, Lu ZH. The review and thinking of water management practice. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(3): 1-14.[吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, **52**(3): 1-14.]
- [2] Yuan W, Yang K, Tang M *et al.* Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network. *Geographical Research*, 2005, **24**(5): 717-724.[袁雯, 杨凯, 唐敏等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响. 地理研究, 2005, **24**(5): 717-724.]
- [3] Gao JF, Han CL. Polders in Lake Taihu region and its effects on floods. *J Lake Sci*, 1999, **11**(2): 105-109. DOI:10.18307/1999.0203.[高俊峰, 韩昌来. 太湖地区的圩及其对洪涝的影响. 湖泊科学, 1999, **11**(2): 105-109.]
- [4] Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources ed. General plan for comprehensive treatment of the Lake Taihu Basin. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 1987.[水利部太湖流域管理局. 太湖流域综合治理总体规划方案. 上海: 水利部太湖流域管理局, 1987.]
- [5] Li HP, Yang GS, Jin Y. Simulation of hydrological response of land use change in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2007, **19**(5): 537-543. DOI:10.18307/2007.0507.[李恒鹏, 杨桂山, 金洋. 太湖流域土地利用变化的水文响应模拟. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 537-543.]
- [6] Zhang GF, Feng XL, Yue QT eds. Study on the changes of population and ecological environment and its social impact in Lake Taihu Basin(1851-2005). Fudan: Fudan University Press, 2014.[张根福, 冯贤亮, 岳钦韬. 太湖流域人口与生态环境的变迁及社会影响研究(1851-2005). 复旦: 复旦大学出版社, 2014.]
- [7] Wei YD, Leung CK. Development zones, foreign investment, and global city formation in Shanghai. *Growth and Change*, 2005, **36**(1): 16-40. DOI:10.1111/j.1468-2257.2005.00265.x.
- [8] Li WC. Internal approaches to the restoration of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 1996, **8**(4): 289-296. DOI:10.18307/1996.0401.[李文朝. 太湖湖体综合治理对策的探讨. 湖泊科学, 1996, **8**(4): 289-296.]
- [9] Zhu GW. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2008, **20**(1): 21-26. DOI:10.18307/2008.0103.[朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 21-26.]
- [10] Kong FX, Ma RH, Gao JF *et al.* The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 314-328. DOI:10.18307/2009.0302.[孔繁翔, 马荣华, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 314-328.]
- [11] Li W, Qin BQ. Multiple temporal scale analysis of main driving factors of eutrophication in Meiliang Bay, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2012, **24**(6): 865-874. DOI:10.18307/2012.0609.[李未, 秦伯强. 太湖梅梁湾富营养化主要驱动因子的

- 多时间尺度分析. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 865-874.]
- [12] 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, 杨欣妍, 任丽曼等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 18-27.]
- [13] Zhu GW, Qin BQ, Xu H *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, 秦伯强, 许海等. 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] Ye JC. Strengthen comprehensive management of Taihu basin to serve coordinated economic and social development. *Journal of China Water Resources*, 2007, (24): 69-71[叶建春. 加强流域综合管理服务经济社会协调发展. 中国水利, 2007, (24): 69-71.]
- [15] 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.]
- [16] 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.]
- [17] Yang Z, Zhang M, Shi X *et al.* Nutrient reduction magnifies the impact of extreme weather on cyanobacterial bloom formation in large shallow Lake Taihu (China). *Water Research*, 2016, **103**: 302-310.
- [18] 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.]
- [19] 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**(6): 354-356. DOI:10.1016/j.scib.2019.02.008.
- [20] Wu TF, Qin BQ, Brookes JD *et al.* Spatial distribution of sediment nitrogen and phosphorus in Lake Taihu from a hydrodynamics-induced transport perspective. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 1554-1565. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.09.145.
- [21] Taihu Basin Authority, MWR ed. Water Resources Bulletin of Taihu Basinn from 1999 to 2019. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 2019.[水利部太湖流域管理局. 1999-2019年太湖流域水资源公报. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2019.]
- [22] Taihu Basin Authority, MWR ed. Water resources investigation and evaluation report of Lake Taihu basin. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 2019.[水利部太湖流域管理局. 太湖流域水资源调查评价报告. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2019.]
- [23] Cai QM, Gao XY, Chen YW *et al.* Dynamic variations of water quality in Taihu lake and multivariate analysis of its influential factors. *J Lake Sci*, 1995, **7**(2): 97-106. DOI:10.18307/1995.0201.[蔡启铭, 高锡芸, 陈宇炜等. 太湖水质的动态变化及影响因子的多元分析. 湖泊科学, 1995, **7**(2): 97-106.]
- [24] Zhu M. Variational trend and protection steps of water quality in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 1996, **8**(2): 133-138. DOI:10.18307/1996.0207.[诸敏. 太湖水质变化趋势及其保护对策. 湖泊科学, 1996, **8**(2): 133-138.]
- [25] Fan CX. Historical evolution of water ecological setting in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 1996, **8**(4): 297-304. DOI:10.18307/1996.0402.[范成新. 太湖水体生态环境历史演变. 湖泊科学, 1996, **8**(4): 297-304.]
- [26] 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.]
- [27] Zhai SH, Zhang HJ. Water quantity and waste load variation of rivers around Lake Taihu from 2000 to 2002. *J Lake Sci*, 2006, **18**(3): 225-230. DOI:10.18307/2006.0305.[翟淑华, 张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000-2002年). 湖泊科学, 2006, **18**(3): 225-230.]
- [28] Zhang XQ, Chen QW. Spatial-temporal characteristic of water quality in Lake Taihu and its relationship with algal bloom. *J*

- Lake Sci*, 2011, **23**(3): 339-347. DOI:10.18307/2011.0305.[张晓晴, 陈求稳. 太湖水质时空特性及其与蓝藻水华的关系. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 339-347.]
- [29] Bian B, Xia MF, Wang ZL *et al.* Total amount control of main water pollutants in seriously polluted area of Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 327-333. DOI:10.18307/2012.0301.[边博, 夏明芳, 王志良等. 太湖流域重污染区主要水污染物总量控制. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 327-333.]
- [30] Lv W, Yang H, Yang JY *et al.* Relationship between water quality in Lake Taihu and pollutant fluxes of the rivers surrounding Lake Taihu in Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1454-1462. DOI:10.18307/2020.0517.[吕文, 杨惠, 杨金艳等. 环太湖江苏段入湖河道污染物通量与湖区水质的响应关系. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1454-1462.]
- [31] Wu YY, Zhang GF. Water environment changes of Taihu basin since the 1950s and its driving factors. *Economic Geography*, 2014, **34**(11): 151-157.[吴月芽, 张根福. 1950 年代以来太湖流域水环境变迁与驱动因素. 经济地理, 2014, **34**(11): 151-157.]
- [32] Yang YB, Jiang N, Yin LQ *et al.* RS-based dynamic monitoring of lake area and enclosure culture in east Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2005, **17**(2): 133-138. DOI:10.18307/2005.0207.[杨英宝, 江南, 殷立琼等. 东太湖湖泊面积及网围养殖动态变化的遥感监测. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 133-138.]
- [33] Shi YD. Research of Lake Taihu's (MeiLiang lake's) influence by ZhiHugang water conservancy—MeiLiang lake water quality influence by Zhihugang river, Wujingang river, Liangxi river pollution[Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2005.[石亚东. 直湖港水利工程对太湖(梅梁湖)影响研究——直湖港、武进港、梁溪河排污对梅梁湖水质的影响[学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.]
- [34] Yuan P, Zhu X. Current situation of MeiLiang Lake management and its continuing management ideas. *Water Resources Development Research*, 2014, **14**(6): 44-48.[袁萍, 朱喜. 梅梁湖治理现状及继续治理思路. 水利发展研究, 2014, **14**(6): 44-48.]
- [35] Hu KM, Li B, Wang S *et al.* Spatial distribution characteristics of water quality pollution in the Lake Taihu basin, Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 200-206. DOI:10.18307/2014.0205.[胡开明, 李冰, 王水等. 太湖流域(江苏省)水质污染空间特征. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 200-206.]
- [36] 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.]
- [37] Pang Y, Yan RR, Li YP *et al.* Contribution of combined action of exogenous source and internalload on water nutrient in Lake Taihu. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, (9): 1051-1059.[逢勇, 颜润润, 李一平等. 内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究. 水利学报, 2008, (9): 1051-1059.]
- [38] Grossman GM, Krueger AB. Environmental impacts of a north american free trade agreement. *CEPR Discussion Papers*, 1992, **8**(2): 223-250.
- [39] Li RG, Xia YL, Wu AZ *et al.* Pollutants sources and their discharging amount in Lake Taihu area of Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2000, **12**(2): 147-153. DOI:10.18307/2000.0208.[李荣刚, 夏源陵, 吴安之等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量. 湖泊科学, 2000, **12**(2): 147-153.]
- [40] Xie HB, Yan NL, Yu XG. The impact of regional difference of industrialization on water quality in Taihu basin: A case study on Wuxi and Huzhou. *J Lake Sci*, 2004, **16**(4): 349-355. DOI:10.18307/2004.0410.[谢红彬, 燕乃玲, 虞孝感. 工业化过程的差异对太湖流域水环境质量的影响——以无锡市和湖州市为例. 湖泊科学, 2004, **16**(4): 349-355.]
- [41] Yuan F, Song ZN. Spatial distribution of industrial firms in Taihu Basin since China's Reform and Opening-up. *J Lake Sci*, 2012, **24**(1): 27-33. DOI:10.18307/2012.0104.[袁丰, 宋正娜. 改革开放以来太湖流域工业企业布局演变. 湖泊科学, 2012, **24**(1): 27-33.]
- [42] Xie HB, Chen W. Impacts of change of industrial structure on the water environment in Taihu basin: A case study of Suzhou-Wuxi-Changzhou district. *J Lake Sci*, 2002, **14**(1): 53-59. DOI:10.18307/2002.0108.[谢红彬, 陈雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变的影响分析——以苏锡常地区为例. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 53-59.]
- [43] Gao B, Yan XY, Jiang XS *et al.* Research progress in estimation of agricultural sources pollution of the Lake Taihu region. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 822-828. DOI:10.18307/2014.0602.[高波, 颜晓元, 姜小三等. 太湖地区农业源污染核算研究进展. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 822-828.]

- [44] Zhang W, Wang XJ, Jiang YC *et al.* Effect of emission control on water quality of the Lake Taihu. *Rural Eco-Environment*, 2001, **17**(1): 44-47.[张巍, 王学军, 江耀慈等. 太湖零点行动前后水质状况对比分析. 农村生态环境, 2001, **17**(1): 44-47.]
- [45] Chen W, Liu W, Sun W. The integrated development of Taihu Basin and the Yangtze River Delta region: Status, challenges and strategies. *J Lake Sci*, 2021, **33**(2): 327-335. DOI:10.18307/2021.0201.[陈雯, 刘伟, 孙伟. 太湖与长三角区域一体化发展: 地位、挑战与对策. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 327-335.]
- [46] Huang WY, Yang GS, Xu PZ. Environmental effects of “zero” actions in Taihu basin. *J Lake Sci*, 2002, **14**(1): 67-71. DOI:10.18307/2002.0110.[黄文钰, 杨桂山, 许朋柱. 太湖流域“零点”行动的环境效果分析. 湖泊科学, 2002, **14**(1): 67-71.]
- [47] Guan JQ, Huang XJ, Liu HM *et al.* The regional currencified cost of aquatic environmental change of Taihu basin and analysis on environmental policy implementation in Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2003, **15**(3): 275-279. DOI:10.18307/2003.0313.[关劲峤, 黄贤金, 刘红明等. 太湖流域水环境变化的货币化成本及环境治理政策实施效果分析——以江苏省为例. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 275-279.]
- [48] 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.]
- [49] Zhu X, Hu YH eds. Pollution of rivers and lakes and control technology of cyanobacteria outbreak. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2021.[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.]
- [50] Zhang M, Yang Z, Shi XL. Expansion and driving factors of cyanobacteria 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.]
- [51] 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.]
- [52] Xu SB, Gu XH, Cai CF *et al.* Effect on the release of nitrogen and phosphorus from sediment of the east Taihu by dissolved oxygen, water temperature and currents. *Journal of Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2011, **39**(9): 5175-5177, 5366. [徐升宝, 谷孝鸿, 蔡春芳等. 溶氧, 水温和水流对东太湖沉积物中氮磷释放的影响. 安徽农业科学, 2011, **39**(9): 5175-5177, 5366.]
- [53] Ye YT, Tong YF, Liu MS *et al.* Comparison of water quality in different areas in Lake Taihu and its change rule with water temperature. *Journal of Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, **47**(23): 93-98.[叶羽婷, 佟一帆, 刘茂松. 太湖不同湖区水质状况及其随水温变化的比较. 安徽农业科学, 2019, **47**(23): 93-98.]
- [54] Taihu Basin Authority, MWR ed. Ecological environment atlas of Lake Taihu. Beijing: Science Press, 2000.[水利部太湖流域管理局. 太湖生态环境地图集. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [55] Taihu Basin Authority, MWR ed. Health status report of Lake Taihu from 2007 to 2019. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 2019.[水利部太湖流域管理局. 2007—2019 年太湖健康状况报告. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2019.]
- [56] Zheng Y. Function of advanced aquatic plants in treatment of eutrophic water. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(32): 104-106.[郑莺. 高等水生植物在富营养化水体治理中的作用. 安徽农业科学, 2015, **43**(32): 104-106.]
- [57] Wu GG, Ni LY, Cao T *et al.* Historical changes and influencing factors of aquatic plants and phytoplankton in Erhai Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 912-918.[吴功果, 倪乐意, 曹特等. 洱海水生植物与浮游植物的历史变化及影响因素. 水生生物学报, 2013, **37**(5): 912-918.]
- [58] Xian QM, Chen HD, Zou HX *et al.* Allelopathic effects of four submerged macrophytes on *Microcystis aeruginosa*. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 75-80. DOI:10.18307/2005.0112.[鲜啟鸣, 陈海东, 邹惠仙等. 四种沉水植物的克藻效应. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 75-80.]
- [59] Liu YC, Yu JL, Chen L *et al.* Changes of submerged macrophyte community structure and water quality in the process of ecosystem restoration of a shallow eutrophic lake. *Ecological Science*, 2008, **27**(5): 376-379.[刘玉超, 于谨磊, 陈亮等. 浅水富营养化湖泊生态修复过程中大型沉水植物群落结构变化以及对水质影响. 生态科学, 2008, **27**(5): 376-379.]

- [60] Taihu Basin Authority, MWR ed. Report on dredging of lake bottom mud in Lake Taihu. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 2006.[水利部太湖流域管理局. 湖底泥疏浚研究报告. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2006.]
- [61] China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd. Sampling test results report of Lake Taihu underwater topographic survey and contaminated sediment survey project. Tianjin: China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd, 2019.[中水北方勘测设计研究有限责任公司. 太湖水下地形测量及污染底泥勘察项目取样化验成果报告. 天津: 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 2019.]
- [62] Water Conservancy Development Reseach Center of Taihu Basin Authority, MWR. Analysis report on the contaminated sediment and ecological dredging range of Lake Taihu. Shanghai: Water Conservancy Development Reseach Center of Taihu Basin Authority, 2020[太湖流域管理局水利发展研究中心. 太湖污染底泥及生态清淤范围分析报告. 上海: 水利部太湖流域管理局水利发展研究中心, 2020.]
- [63] Taihu Basin Authority, MWR ed. Study on self-purification capacity and suitable water exchange cycle of Lake Taihu. Shanghai: Taihu Basin Authority, MWR, 2012.[水利部太湖流域管理局. 太湖自净能力和适宜换水周期研究. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2012.]
- [64] Zhang YL, Hong JH, Xia Q *et al.* Research and prospect of water environmental capacity in China. *Journal of Environment Science Research*, 1988, (1): 73-81.[张永良, 洪继华, 夏青等. 我国水环境容量研究与展望. 环境科学研究, 1988, (1): 73-81.]
- [65] Wang XM, Zhai SH, Zhang HJ *et al.* Analysis of suitable water exchange cycle in Taihu Lake based on water quality improvement objective. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 9-21. DOI:10.18307/2017.0102.[王洗民, 翟淑华, 张红举等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 9-21.]
- [66] Dong F, Liu XB, Peng WQ *et al.* Review and prospect of water environmental capacity calculation methods for surface water. *Journal of Advances in Water Science*, 2014, **25**(3): 451-463.[董飞, 刘晓波, 彭文启等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望. 水科学进展, 2014, **25**(3): 451-463.]