

2012—2018年巢湖水质变化趋势分析和蓝藻防控建议*

张 民, 史小丽**, 阳 振, 陈开宁

(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)

摘 要: 巢湖自 1990s 中期至 2012 年间水质明显改善, 但是近年来水质改善效果变缓, 2018 年蓝藻水华面积显著增加, 为有效评估巢湖水体环境的变化, 通过对 2012—2018 年巢湖 17 个点位的逐月调查数据分析阐述了近年来巢湖水质和藻情的变化特征, 并在流域空间尺度上分析了巢湖流域水污染治理的进展和不足, 为后续治理方向的调整和确定提供支撑. 2012—2018 年湖区调查数据显示: 巢湖湖体总磷和总氮浓度显著升高, 铵态氮浓度显著下降, 水华蓝藻总量显著升高. 在空间上, 各污染指标水平呈现由西向东呈逐渐降低的趋势, 但是各指标在不同湖区随时间的变化趋势差异明显, 西部湖区的总磷、总氮和水华蓝藻指标近年来略有下降或持平, 中部和东部湖区则显著升高, 所以巢湖湖体总氮和总磷浓度的升高主要源于中、东部湖区的升高, 这也是这两个湖区水华蓝藻变动的主要驱动因素. 主要入湖河口数据显示: 西部 4 条主要入湖污染河流(南淝河、十五里河、塘西河和派河)水质明显改善, 但仍处于较高污染水平, 中东部入湖河流(兆河、双桥河和柘皋河)总磷浓度明显升高, 是中东部湖区水体营养盐升高的主要原因. 中东部河流入湖污染的增加加剧了该区域湖体的富营养化水平, 尤其是总磷浓度明显提升, 导致中东部湖区夏季水华蓝藻的优势种从鱼腥藻种类演替为微囊藻种类. 夏季微囊藻的大量繁殖, 使得 2018 年巢湖中东部湖区部分月份水华面积异常增高. 因此, 巢湖流域的治理应该在持续强化流域西部合肥市污染治理的同时, 增加对流域中部和东部治理的关注和投入.

关键词: 巢湖; 水质; 蓝藻水华; 污染防治

The variation of water quality from 2012 to 2018 in Lake Chaohu and the mitigating strategy on cyanobacterial blooms*

ZHANG Min, SHI Xiaoli**, YANG Zhen & CHEN Kaining

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

Abstract: The water quality of Lake Chaohu has improved significantly from the mid-1990s to 2012. But in recent years, water quality improvement has slowed down. In particular, cyanobacterial blooms area increased significantly in 2018. In order to evaluate the variation of water environment, we analysed the change characteristics of water quality and cyanobacterial blooms situation in Lake Chaohu using the investigation data covering 17 sites from 2012 to 2018. We also elaborated the progress and shortcomings of water pollution control in Lake Chaohu in the spatial scale of the basin, which will provide support to the modification and confirmation of pollution control policy. Our results showed that the mean values of total phosphorus concentration, total nitrogen concentration and bloom-forming cyanobacterial biomass (chlorophyll-*a* and phycocyanin concentration) increased significantly from 2012 to 2018, and the ammonium nitrogen concentration decreased significantly during this period. In spatial, the eutrophication presented slight decreasing trend in the western region, but it significantly increased in the central and eastern regions, especially for the total phosphorus concentration. Even though, the eutrophication level in the western region was still higher than those in the central and eastern regions. The relief of eutrophication was mainly attributed to the decrease in lake-inlet pollution from Nanfei River, Shi-wuli-Tangxi River, and Paihe River. The increasing lake-inlet phosphorus pollution from Zhaohe River (in the central region), Shuangqiao River and Zhegao River (in the eastern region) directly contributed to the worsening trend of water quality in the two

* 2019-04-19 收稿; 2019-07-10 收修改稿.

国家自然科学基金项目(31870447, 31570457)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07603-005)联合资助.

** 通信作者; E-mail: xlshi@niglas.ac.cn.

regions. In addition, with the increasing of total phosphorus level in the eastern region, the dominant bloom-forming cyanobacterial species in the region had shifted from *Dolichospermum* to *Microcystis* in summer, which might be one of the reasons why cyanobacterial blooms area in Lake Chaohu increased abnormally in 2018. Therefore, the pollution control of Lake Chaohu Basin should continue to strengthen the control in the western part of the basin, while increasing the attention and investment in the central and eastern part of the basin.

Keywords: Lake Chaohu; water quality; cyanobacterial blooms; pollution control

巢湖为我国五大淡水湖之一,位于安徽省中部,是我国水污染防治的重点水体.面积约 787.4 km²,流域面积 9258.0 km²,年内水位变幅大,透明度低,湖滨带水生植被分布较少^[1].巢湖入湖河流约 33 条,其中主要出入湖河流有 9 条,包括南淝河、十五里河、派河、杭埠河、柘皋河、双桥河、兆河、白石天河、裕溪河;随着流域内人口的增加,工农业生产的迅速发展,城镇大量工业废水、生活污水排放入湖,导致湖水的营养盐和有机质增加^[2],湖泊富营养化进程加快^[3].巢湖的近 30 年的富营养化可分为 3 个阶段:1984—1994 年是巢湖水质的主要恶化阶段;1995—2007 年是巢湖的水质逐步改善阶段;2008—2013 年,巢湖的污染物浓度维持在较高水平波动^[4].巢湖的富营养化在空间分布上主要表现为由西向东逐步降低的趋势^[5],这是湖泊外源污染负荷主要来源于流域西北部所致^[6].巢湖的蓝藻水华与污染的空间分布相似,也主要分布于西部湖区^[4,7].

随着近年来巢湖治理力度的逐步加大,特别是“十二五”以来巢湖水专项系列课题在巢湖流域西部落地,地方政府深入整治南淝河、十五里河、派河 3 条西部主要入湖污染河流,巢湖的水体污染得到部分改善,污染的空间格局出现了一系列变化,但是蓝藻水华并没有得到有效控制,甚至出现部分时段的较大面积水华事件.因此,为有效评估“十二五”以来巢湖水体环境的总体变化,本文通过对 2012—2018 年巢湖 17 个点位的逐月监测和数据分析,阐述了近年来巢湖水质和藻情的变化特征,并在流域空间尺度上分析了巢湖流域水污染治理的进展和不足,以为后续治理方向的调整提供支撑.

1 研究方法

1.1 野外调查

野外调查于 2012—2018 年进行,每月中旬采样一次,共 17 个采样点位,具体位置见图 1.其中点位 3、5、6 代表东部湖区,点位 7、9、10 代表中部湖区,点位 12、13 代表西部湖区,点位 2 代表双桥河河口,点位 4 代表柘皋河河口,点位 8 代表兆河河口,点位 11 代表杭埠河河口,点位 14 代表南淝河河口,点位 15 代表塘西河河口,点位 16 代表派河河口,点位 17 代表十五里河河口.采样现场利用 Yellow Spring Instruments (YSI 6600, USA) 在原位测定环境因子,包括水温、溶解氧 (DO)、pH、浊度、氧化还原电位和电导率.

1.2 室内分析

水样带回实验室后,每个水样用 GF/C 玻璃纤维滤膜过滤 200 ml,滤液参照标准方法用于测定溶解性营养盐铵态氮 (NH₄⁺-N)^[8].GF/C 滤膜用于测定叶绿素 *a* (Chl. *a*, 表征总藻含量) 和藻蓝素 (PC, 表征蓝藻含量),叶绿素 *a* 采用丙酮提取法测定,藻蓝素采用 Tris-HCl 提取法测定^[9].另外,不经过滤水样利用过硫酸盐氧化法测定总氮 (TN)、总磷 (TP) 和高锰酸盐指数 (COD_{Mn})^[8].

1.3 数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理,R 软件平台^[10]的 ggplot2、mgcv 等程序包和 ArcGIS 9.3 进行相关分析和制图^[11-12].各变量变化趋势的显著性通过广义加性混合模型 (GAMM) 和线性回归模型检验确定,其中线性回归模型显著性通过 *P* 值确定,*P*<0.05 为显著变化,GAMM 模型方法则是通过对模型拟合曲线进行求导,利用各时间点导数与零的显著性差异来确认显著性,因此该方法的显著性具有时间的分段性,本研究将两种方法均具有显著性的趋势认定为显著性变化.

2 结果

2.1 湖体总体水质变化

2012—2018 年间巢湖水体总磷、总氮、叶绿素 *a* 和藻蓝素浓度均呈现显著升高的趋势.其中总磷浓度由

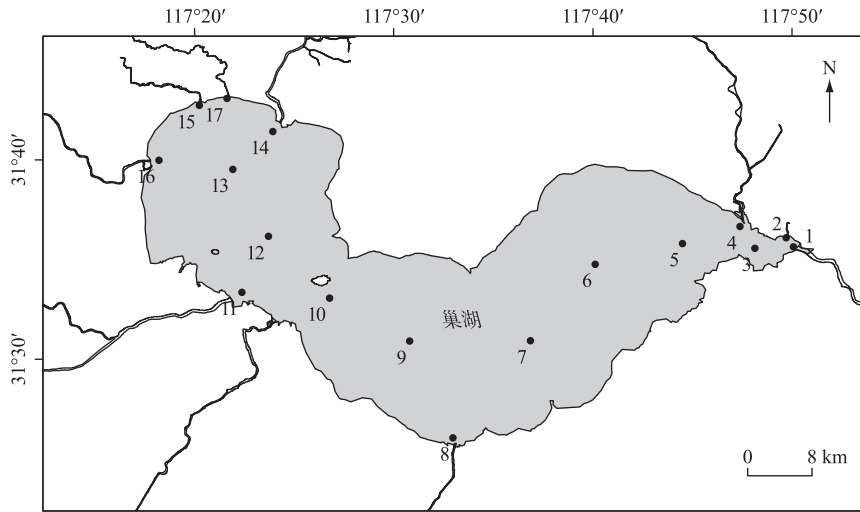


图 1 巢湖采样点位分布

Fig.1 Distribution of Lake Chaohu showing the location of the sampling sites

2012 年的 0.107 mg/L 升高至 2018 年的 0.125 mg/L, 较 2012 年升高了 16.6%; 总氮浓度由 2012 年的 2.127 mg/L 升高至 2018 年的 2.170 mg/L, 较 2012 年升高了 2.0%; 叶绿素 *a* 浓度由 2012 年的 20.45 $\mu\text{g/L}$ 升高至 2018 年的 37.10 $\mu\text{g/L}$, 较 2012 年升高了 81.4%; 藻蓝素浓度由 2012 年的 25.66 $\mu\text{g/L}$ 升高至 2018 年的 82.09 $\mu\text{g/L}$, 较 2012 年升高了 220%。铵态氮浓度呈现明显的下降趋势, 由 2012 年的 0.427 mg/L 降低至 2018 年的 0.352 mg/L, 较 2012 年下降了 17.4%。高锰酸盐指数没有显著变化(图 2)。

2.2 各湖区水质和藻情变化

2012—2018 年间, 西部湖区总磷、总氮、高锰酸盐指数和铵态氮 4 个指标中, 高锰酸盐指数和铵态氮浓度下降趋势显著, 总磷和总氮浓度均值在 2018 年低于 2012 年, 但下降趋势并不显著(图 3), 各指标下降幅度分别为 13.1%、14.4%、6.3% 和 33.8%, 至 2018 年平均浓度分别为 0.160 (V 类)、3.091 (劣 V 类)、5.194 (III 类) 和 0.689 mg/L (III 类)。

中部湖区总磷和总氮浓度呈现明显的升高趋势, 升高幅度为 31.5% 和 22.8%, 高锰酸盐指数没有明显的变化趋势, 铵态氮浓度呈现明显的下降趋势(图 3), 下降 15.8%, 4 个指标至 2018 年平均浓度分别为 0.118 (V 类)、2.024 (劣 V 类)、4.784 (III 类) 和 0.217 mg/L (II 类)。

东部湖区总磷、总氮和高锰酸盐指数呈现明显的升高趋势, 升高幅度分别为 73.7%、15.8% 和 9.0%, 铵态氮浓度呈现明显的下降趋势, 但是 2018 年明显反弹, 较 2012 年增加 22.8%(图 3), 4 个指标至 2018 年平均浓度分别为 0.094 (IV 类)、1.436 (IV 类)、4.406 (III 类) 和 0.201 mg/L (II 类)。

3 个湖区中, 西部和中部湖区水华蓝藻没有显著的增加趋势, 但是 2018 年明显高于前几年, 其中西部湖区叶绿素 *a* 和藻蓝素浓度较 2012 年分别增加 52% 和 125%, 中部湖区增加 64.4% 和 219%; 而东部湖区叶绿素 *a* 和藻蓝素浓度均呈现显著的增加趋势, 增加幅度分别为 159% 和 404%(图 4)。

2.3 水华蓝藻组成及分布的演变

根据卫星遥感影像数据, 2012—2018 年巢湖蓝藻水华的面积并没有显著的变化趋势(图 5), 但是 2018 年 9 月份, 巢湖, 尤其是中东部巢湖出现较大面积蓝藻水华, 面积约为 440 km^2 , 同期叶绿素 *a* 和藻蓝素浓度也明显偏高(图 4)。巢湖的水华蓝藻主要以微囊藻 (*Microcystis*) 和鱼腥藻 (*Dolichospermum*) 为优势种类, 两种藻在季节上和空间上相互演替, 通常夏季东部巢湖以鱼腥藻为优势种类, 但生物量相对较低。2018 年巢湖这种演替模式被打破, 夏季东部湖区优势蓝藻被微囊藻所取代(图 6), 微囊藻的大量繁殖、上浮集聚增加了该湖区蓝藻水华的面积和持续时间。

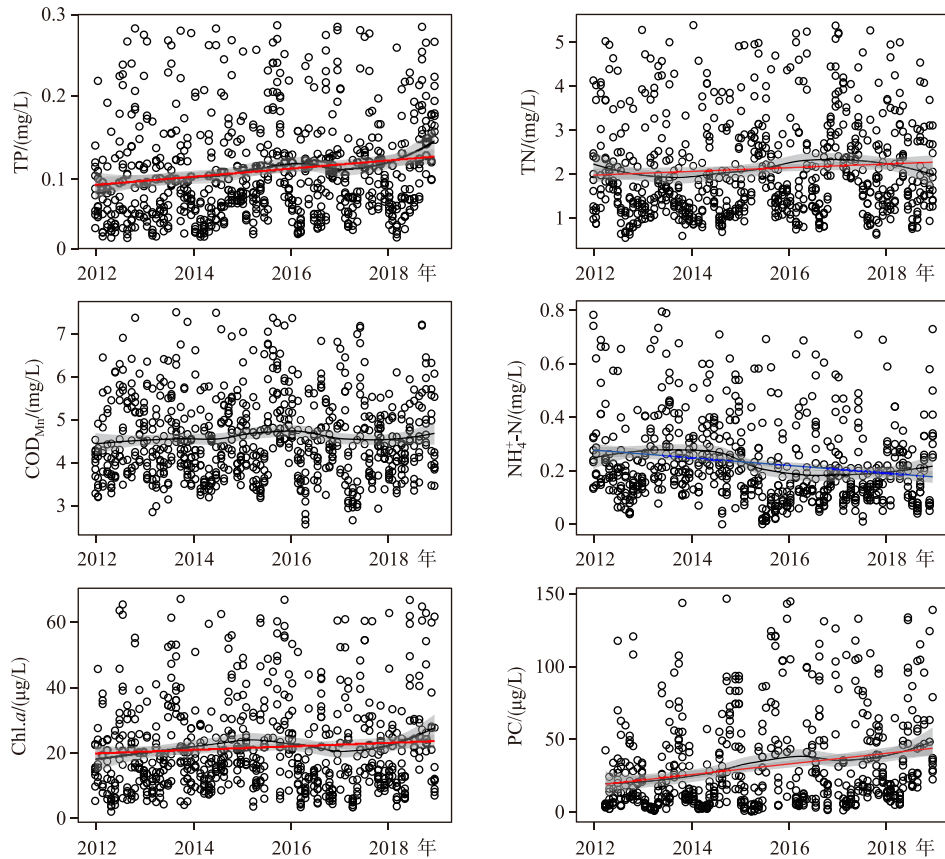


图2 2012—2018年巢湖水体总磷、总氮、高锰酸盐指数、铵态氮、叶绿素 a 和藻蓝素浓度变化趋势
(黑色实线为LOESS回归线,灰色区域为95%置信区间,
红色实线表示线性回归显著升高,蓝色实线表示线性回归显著下降)

Fig.2 The variation trend of total phosphorus, total nitrogen, COD_{Mn}, NH₄⁺-N, chlorophyll- a and phycocyanin concentrations from 2012 to 2018 in Lake Chaohu (The black lines are the locally weighted scatterplot smoothing (LOESS) regression fitted to the response curve. The gray areas are the approximate 95% confidence intervals on the fitted function. The red lines indicate significant increasing trends with the linear regression. The blue lines indicate significant decreasing trends with the linear regression)

2.4 入湖河流水质变化

根据巢湖主要入湖污染河流河口的监测数据,可以发现:西部3条主要入湖污染河流(南淝河、十五里河—塘西河和派河)的总磷、总氮和铵态氮浓度均呈现显著的下降趋势,下降幅度均超过30%(图7)。但是中部湖区的兆河、东部湖区的双桥河和柘皋河总磷浓度显著增加,升高幅度分别为49.2%、76.6%和47.5%。杭埠河作为巢湖最大的入湖水量来源,虽然在2018年部分月份出现水质下降情况,但是其总体上水质下降趋势并不明显,因此对全湖水质变化的影响有限(图8)。

3 讨论

3.1 巢湖水质和藻情的变化

2012—2018年巢湖总体总氮和总磷浓度显著升高,其中总磷浓度升高幅度较大,总氮浓度升高有限。铵态氮浓度下降显著,铵态氮主要来源于人和动物的排泄物,生活污水中平均含氮量每人每年可达2.5~

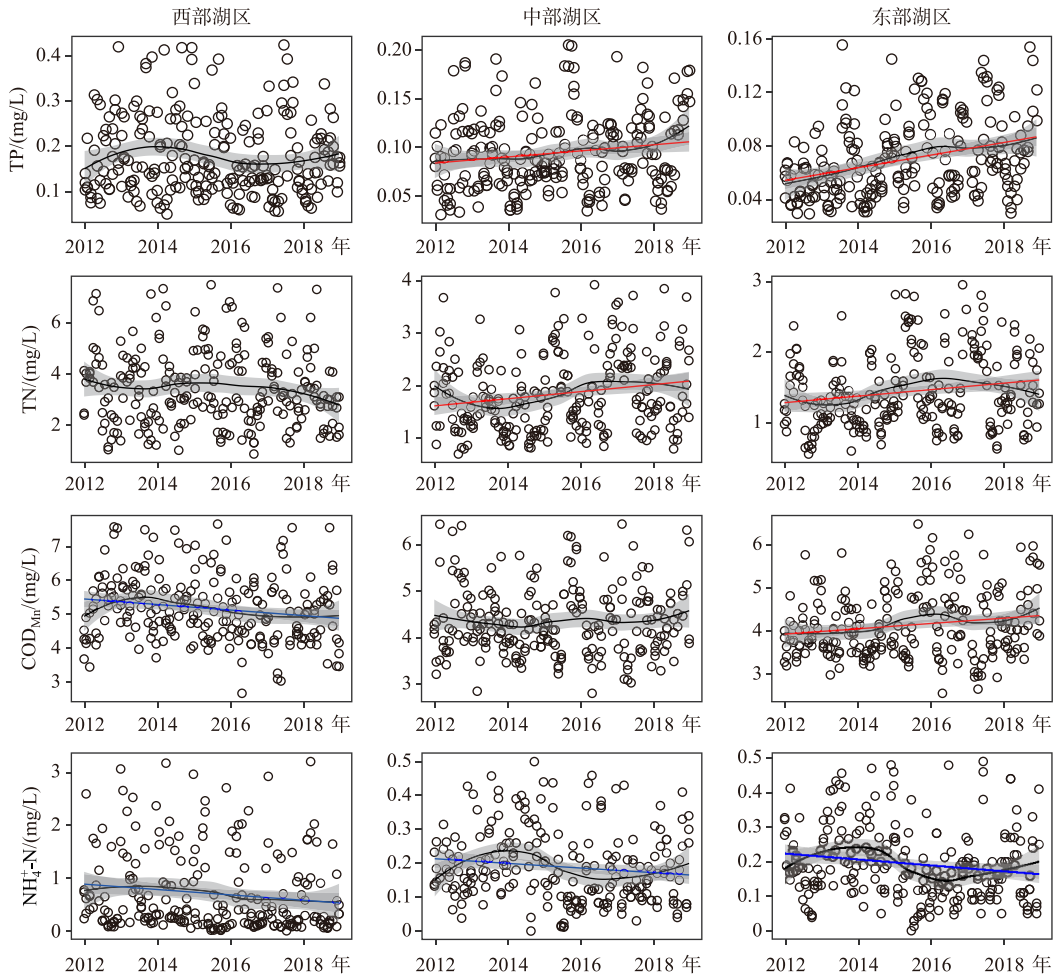


图 3 2012—2018 年巢湖不同湖区水体总磷、总氮、高锰酸盐指数和铵态氮浓度变化趋势
(黑色实线为 LOESS 回归线,灰色区域为 95% 置信区间,
红色实线表示线性回归显著升高,蓝色实线表示线性回归显著下降)

Fig.3 The variation trend of total phosphorus, total nitrogen, COD_{Mn} and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from 2012 to 2018 in Lake Chaohu (The black lines are the locally weighted scatterplot smoothing (LOESS) regression fitted to the response curve. The gray areas are the approximate 95% confidence intervals on the fitted function. The red lines indicate significant increasing trends with the linear regression. The blue lines indicate significant decreasing trends with the linear regression)

4.5 kg, 雨水径流以及农用化肥的流失也是氮的重要来源,因此铵态氮的下降表明巢湖流域近年来对于这几方面的污染控制取得了明显的效果。近年来,随着巢湖流域内污水管网接管率的提升、城镇生活污水处理设施的完善以及畜禽养殖的管控,使得生活污水和畜禽养殖废水的直排状况得到有效的控制,这可能是流域内各条河流及各湖区铵态氮浓度下降的最直接原因。叶绿素 a 和藻蓝素浓度升高显著,而且其升高幅度明显高于总氮和总磷浓度的升高幅度,这有悖于通常认为的藻类生物量与营养盐水平线性相关的观点,其可能是适宜的气象条件与营养盐增加的叠加作用^[13],也可能是藻类组成变化后的物种补偿效应或者空间补偿效应的结果^[14]。

巢湖的富营养化在空间分布上表现为由西向东逐步降低的趋势^[4-5],2012—2018 年的调查数据显示巢

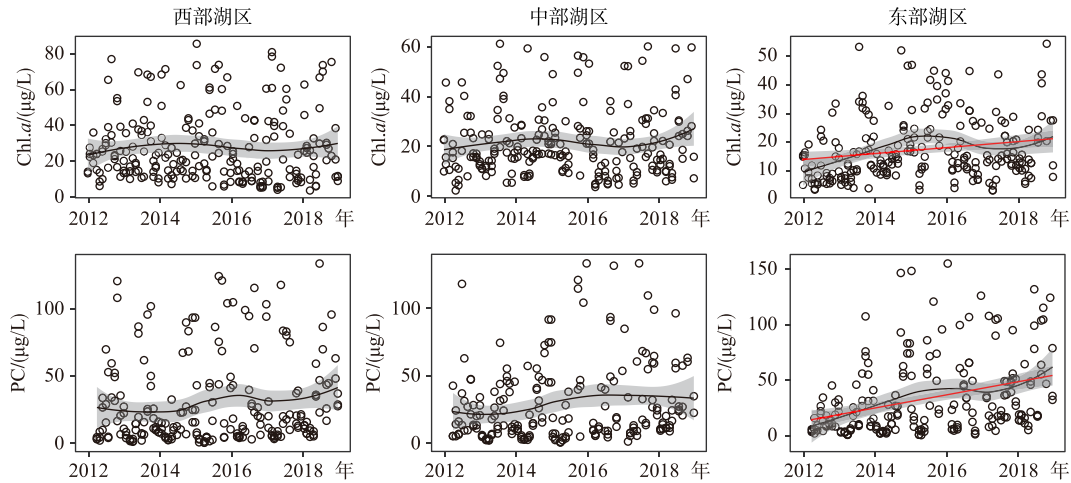


图4 2012—2018年巢湖不同湖区水体中叶绿素 a 和藻蓝素浓度变化趋势
(黑色实线为LOESS回归线,灰色区域为95%置信区间,红色实线表示线性回归显著升高)

Fig.4 The variation trend of chlorophyll- a and phycocyanin concentrations from 2012 to 2018 in Lake Chaohu
(The black lines are the locally weighted scatterplot smoothing (LOESS) regression fitted to the response curve.

The gray areas are the approximate 95% confidence intervals on the fitted function.

The red lines indicate significant increasing trends with the linear regression)

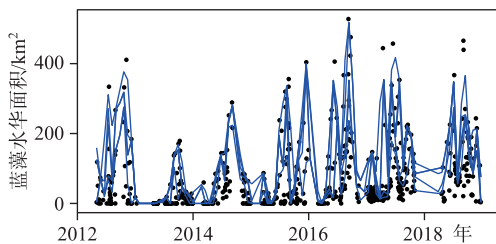


图5 2012—2018年巢湖蓝藻水华面积变化趋势(蓝色为分位回归线)

Fig.5 The variation of the cyanobacterial bloom area from 2012 to 2018

(The blue lines are the quantile regression lines)

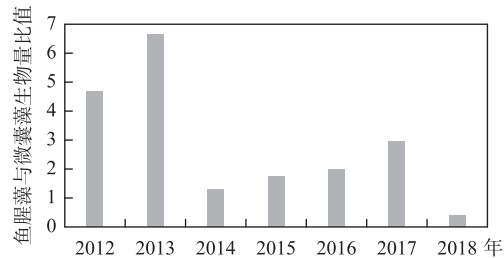


图6 2012—2018年7—9月巢湖东部湖区鱼腥藻与微囊藻生物量的比例

Fig.6 The biomass ratio of *Dolichospermum* to *Microcystis* from July to September in 2012–2018, in east region of Lake Chaohu

湖富营养化的这种空间分布模式正在发生改变,虽然其仍然呈现由西向东逐渐降低的趋势,但是这种趋势已经明显变缓.即西部湖区的营养盐水平下降趋势或变化不显著,而中东部营养盐水平显著增加,使得巢湖湖体富营养化的空间差异缩小.中东部湖区营养盐水平的升高也导致巢湖整体营养盐水平呈现升高的趋势,尤其是总磷浓度,2018年较2012年升高了16%.中东部湖区总磷浓度的升高与南部兆河、东部双桥河和柘皋河总磷浓度的升高具有一致性,可见这三条河入湖总磷负荷升高,是导致中东部湖区营养盐水平升高的最直接因素,也是导致巢湖营养盐水平呈现升高趋势的主要原因.

巢湖的优势水华蓝藻为鱼腥藻和微囊藻^[15],而总磷浓度是影响两种藻时空分布的主要驱动因素之一^[16].微囊藻和鱼腥藻在季节上和空间上相互演替,通常鱼腥藻在4—6月份开始大量生长,呈全湖分布,微囊藻在6—10月在西部巢湖占据优势,西部的鱼腥藻消失,但在东部巢湖鱼腥藻依然占据优势,但生物量相

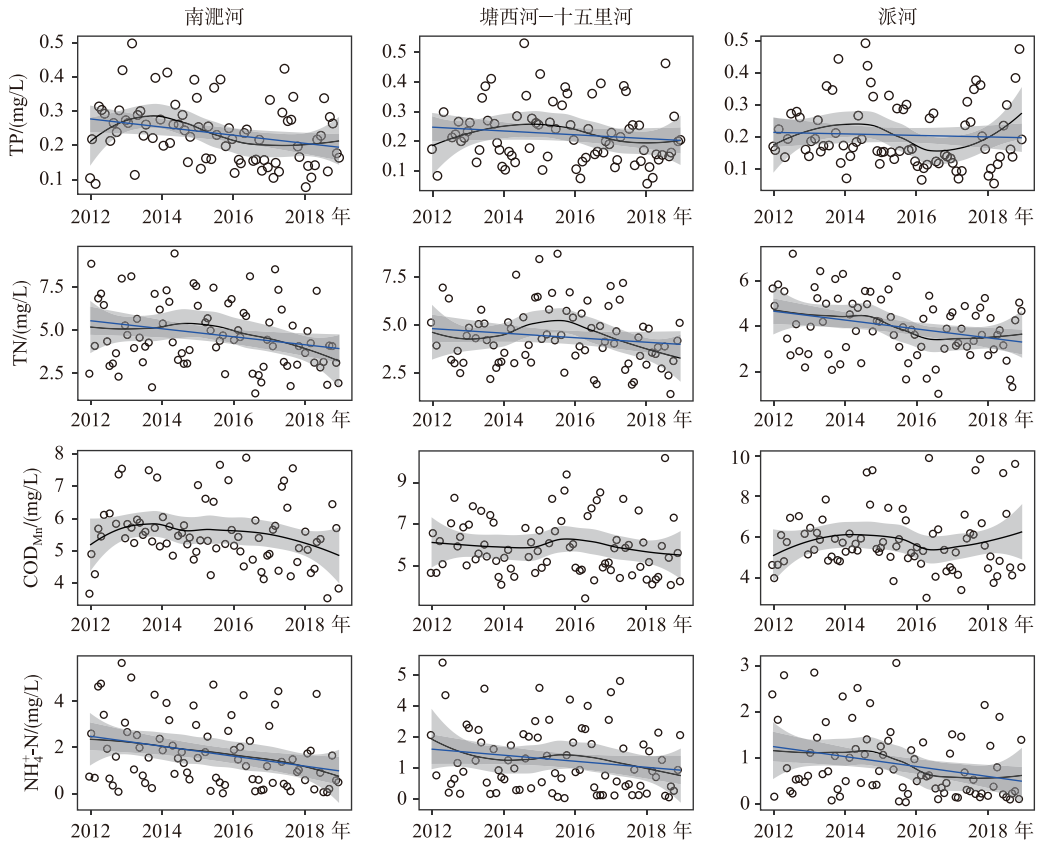


图 7 2012—2018 年南淝河、十五里河—塘西河和派河水质变化趋势

(黑色实线为 LOESS 回归线,灰色区域为 95%置信区间,蓝色实线表示线性回归显著下降)

Fig.7 The variation trend of water quality from 2012 to 2018 in Nanfei River, Shiwuli-Tangxi River and Paihe River (The black lines are the locally weighted scatterplot smoothing (LOESS) regression fitted to the response curve.

The gray areas are the approximate 95% confidence intervals on the fitted function.

The blue lines indicate significant decreasing trends with the linear regression)

对较低,10月—次年1月,东部巢湖的鱼腥藻生物量大量增加,并逐步扩张至西部巢湖,至2—3月,温度较低,两种藻生物量均较低^[16]。2015年以前,巢湖中东部水华呈现缓慢增加的趋势^[17-18],夏季巢湖东部主要以鱼腥藻为优势水华蓝藻,虽然部分时间也能发现微囊藻水华的出现,但是通常持续时间较短。由于鱼腥藻相对喜欢偏低的温度,因此受夏季高温影响,鱼腥藻的生物量并不高。但是2018年夏季巢湖中东部,由于总磷浓度的升高,促进了优势蓝藻的演替,原来的优势种类鱼腥藻被微囊藻替代,相对于鱼腥藻,微囊藻更喜欢高温^[19],在高磷、高温环境的共同作用下,微囊藻快速繁殖。另外,相对于鱼腥藻,微囊藻具有更强的上浮能力,因此大量繁殖的微囊藻更容易上浮集聚,形成表面可见的蓝藻水华,并在风的作用下水平迁移扩散,是造成2018年巢湖蓝藻水华异常的重要原因。

综上所述,巢湖2012—2018年水质和藻情的变化是相互联动的,虽然西部巢湖的入湖河流和湖体营养盐水平有所下降,但是距离控制蓝藻水华发生的营养盐阈值仍有较大差距,因此其蓝藻水华强度并未减弱;而中西部巢湖,由于入湖河流污染的增加,导致湖体内营养盐水平增加,以及连锁的优势水华蓝藻种类转变,进一步增加了蓝藻水华的强度。可见巢湖近年来水质的转变有导致水华蓝藻强度增加、呈全湖分布的趋势,增加了巢湖蓝藻水华治理的难度,同时微囊藻的增加,提升了东部湖区的藻毒素水平^[20-21],增加了巢湖

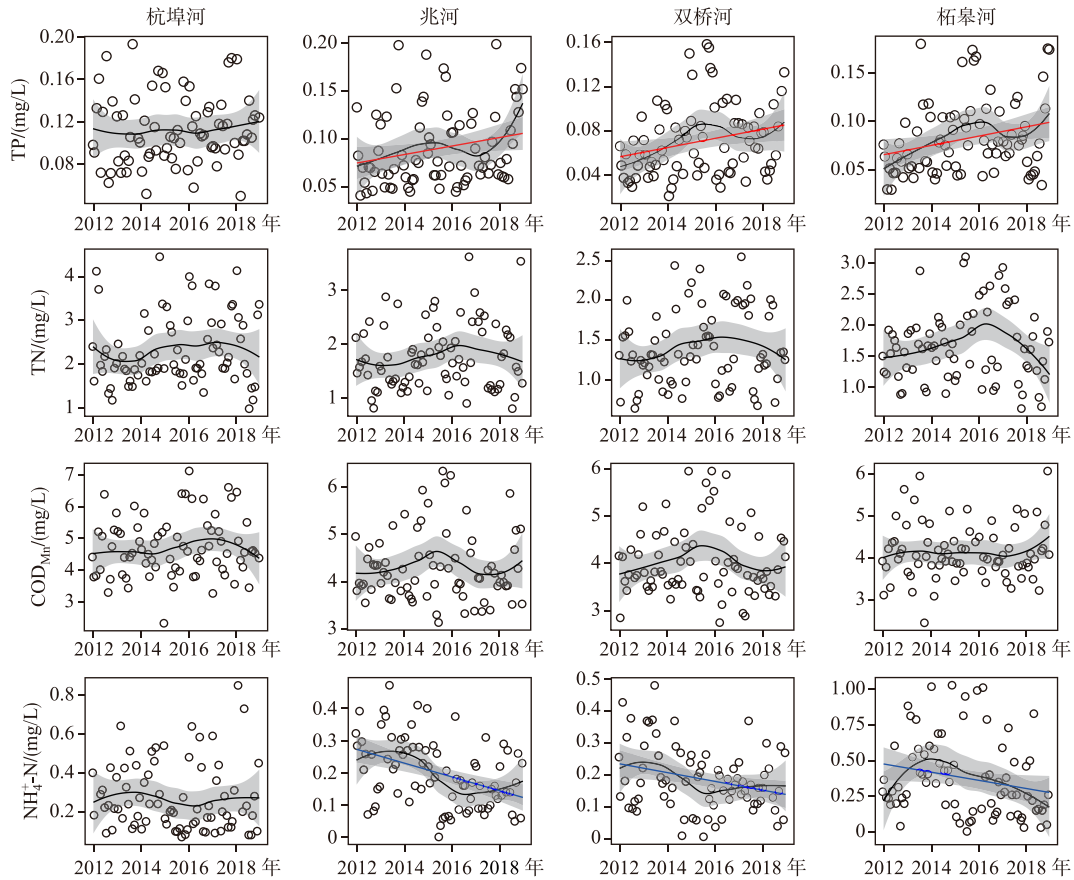


图 8 2012—2018 年杭埠河、兆河、双桥河和柘皋河水水质变化趋势

(黑色实线为 LOESS 回归线, 灰色区域为 95% 置信区间, 红色实线表示线性回归显著升高, 蓝色实线表示线性回归显著下降)

Fig.8 The variation trend of water quality from 2012 to 2018 in Hangbu River, Zhaohe River, Shuangqiao River and Zhegao River (The black lines are the locally weighted scatterplot smoothing (LOESS) regression fitted to the response curve. The gray areas are the approximate 95% confidence intervals on the fitted function.

The red lines indicate significant increasing trends with the linear regression. The blue lines indicate significant decreasing trends with the linear regression)

市饮用水安全的风险。

3.2 巢湖流域污染治理和蓝藻水华防控建议

1) 统筹全流域污染源头治理工作, 在强化西部入河污染治理的同时, 加大南部和东部入河污染治理的力度。

巢湖西部 3 条主要入湖污染河流——南淝河、十五里河—塘西河和派河的治理成效显著, 但是距离治理目标仍有较大差距, 对西部湖区水质提升的拉动作用仍显不足, 无法满足控制西部湖区蓝藻水华的需求, 因此必须进一步强化这 3 条河小流域内的截污、治污工作。同时针对南部兆河、东部双桥河和柘皋河污染物浓度升高的趋势, 必须加大对这 3 条河流域内的污染治理工作力度。针对杭埠河应该增加其清水产流功能的保育工作, 同时强化舒城县的污染治理工作。具体治理工作应以规范排水行为为出发点, 着重解决城市地下污水管网问题, 切实杜绝污水散排; 加快城镇污水处理厂的建设和提标改造, 加大运行监管力度, 有效提高污水处理厂的处理能力和处理效率; 严格控制养殖污染, 加快推进农业面源污染治理; 全面排查上游清水来

源河流,如杭埠河、丰乐河、白石天河和兆河等的污染来源,切实做好源头控制和流域保育工作。

2) 持续做好河道与湖体生态修复工作。

入湖河流是污染物进入巢湖的主要通道,因此要以小流域为单元,推进河道及河道周边湿地的修复工作,在推进黑臭河道治理的同时增加梯级湿地建设,因地制宜地利用自然条件,构建湿地网络,有效削减入河和入湖污染物总量。选择对农村搬迁和农业生产影响较小的圩区开展退圩还湖,构建圩区湿地。在市域范围内建设雨水蓄积型湿地。沿环城公园水系分段建设景观游憩型湿地。在农村地区建设河塘湿地、农田湿地和沟渠强化湿地,最大限度削减、滞留、消除村庄生活污水,进一步提高对农村的氮磷拦截能力。

扩大湖滨湿地建设,优化巢湖水位,促进春季水生植被萌发,实施净水渔业,调控巢湖食物网,加快推进湖体生态系统修复,提升湖泊生态系统净化能力与环境容量。在滨湖岸带建设生态隔离带,从而有效防止污水直接面对巢湖,亦可作为污水处理场中水净化的最后载体。通过岸带缓冲区建设,利用疏浚底泥和人工介质吹填,构建具有水陆交错特性的基底环境,种植芦苇以及具有一定抗风浪能力的浮叶植物,利用水生植物的吸附净化能力去除水体中的污染物,有效防止污水直接面对巢湖,同时提高湖体自净能力。

3) 开展蓝藻水华监控、预测预警和应急处置能力建设。

巢湖蓝藻水华的发生在未来相当长一段时间内将是一种常态化状态,特别是东部巢湖优势蓝藻种类的转变,将进一步增加巢湖蓝藻水华的风险,不仅影响西部巢湖的景观娱乐用水,而且威胁东部巢湖的饮用水安全。因此,加强巢湖蓝藻水华监控能力建设,是把握巢湖蓝藻水华动态,实施蓝藻预测预警和应急处置的基础,监控能力的建设主要包括遥感、自动监测站和人工巡测等几个方面,其中建立常规的人工巡测制度是重中之重。目前巢湖的蓝藻水华预测预警,仅仅只是临时性、或者以监测为主的粗放型工作,难以实现对巢湖蓝藻发生发展的预知,更难以指导巢湖蓝藻等生态灾害的应急处置,因此,巢湖应建立水华蓝藻预测预警工作团队,实现预测预警的常规业务化运行,同时配备蓝藻应急处置工作团队,实现预测预警和应急处置的联合作业。蓝藻水华应急防控应建立涵盖蓝藻应急打捞、应急处置、资源化利用的蓝藻水华防控体系。针对巢湖蓝藻水华重点防控区和敏感区,配置蓝藻智能拦挡导流、湖滨区高效除藻除臭装置、藻水分离与脱水干化及资源化设备及装置。

4 结论

1) 2012—2018 年巢湖全湖平均总磷和总氮浓度显著升高,铵态氮浓度显著下降,水华蓝藻总量显著升高。

2) 2012—2018 年巢湖西部湖区总磷和总氮浓度略有下降或持平,中部和东部湖区总磷浓度显著升高,西部 3 条主要入湖污染河流(南淝河、十五里河和塘西河、派河)水质明显改善,但仍处于较高污染水平,中东部入湖河流(兆河、双桥河和柘皋河)总磷浓度明显升高,是中东部湖区水体营养盐升高的主要污染来源。

3) 2018 年巢湖东部湖区以微囊藻为优势水华蓝藻种类,取代了以往的优势蓝藻水华种类鱼腥藻,是 2018 年巢湖中东部湖区部分月份水华面积异常增高期间的主要种类。

4) 巢湖流域污染的治理要统筹协调全流域工作,在强化西部治理工作的同时,加大南部和东部的治理力度,避免西部湖区营养盐水平尚未达到有效控制蓝藻水华的程度时候,中东部湖区恶化变为蓝藻水华频发的另一个区域。

致谢:中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊一流域数据集成与模拟中心提供部分相关遥感影像数据,在此表示感谢。

5 参考文献

- [1] Wang SM, Dou HS eds. China lakes. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [2] Yang L, Lei K, Meng W *et al.* Temporal and spatial changes in nutrients and chlorophyll- α in a shallow lake, Lake Chaohu, China: An 11-year investigation. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(6): 1117-1123.
- [3] Xie P ed. Reading about the histories of cyanobacteria, eutrophication and geological evolution in Lake Chaohu. Beijing: Science Press, 2009. [谢平. 翻阅巢湖的历史——蓝藻、富营养化及地质演化. 北京: 科学出版社, 2009.]

- [4] Zhang M, Kong FX. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984–2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 791-798 DOI: 10.18307/2015.0505. [张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013年). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.]
- [5] Wang SH, Jiang X, Jin XC. Spatial-temporal variations of aquatic environmental factors and their influences to algal blooming in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 873-880. DOI: 10.18307/2015.0505. [王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖水环境因子的时空变化及对水华发生的影响. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 873-880.]
- [6] Shang GP, Shang JC. Spatial and temporal variations of eutrophication in western Chaohu Lake, China. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2007, **130**(1/2/3): 99-109.
- [7] Li K, Xiao P. Temporal and spatial distribution of chlorophyll a concentration and its relationships with TN, TP concentrations in Lake Chaohu. *Journal of Biology*, 2011, **28**(1): 53-56. [李堃, 肖莆. 巢湖叶绿素 a 浓度的时空分布及其与氮、磷浓度关系. 生物学杂志, 2011, **28**(1): 53-56.]
- [8] Jin XC, Tu QY eds. Standard for investigation of lake eutrophication. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [9] Yan R, Kong FX, Han XB. Analysis of the recruitment of the winter survival algae on the sediments of Lake Taihu by fluorometry. *J Lake Sci*, 2004, **16**(2): 163-168. DOI: 10.18307/2004.0210. [阎荣, 孔繁翔, 韩小波. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 163-168.]
- [10] Team RC. "R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2012," ed, 2014.
- [11] Wickham H. GGPlot2: elegant graphics for data analysis. Springer Science & Business Media, 2009.
- [12] Wood S. The MGCV Package. <http://www.r-project.org>, 2007.
- [13] Rigosi A, Carey CC, Ibelings BW *et al.* The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(1): 99-114.
- [14] Zhang M, Shi X, Yang Z *et al.* Long-term dynamics and drivers of phytoplankton biomass in eutrophic Lake Taihu. *Science of The Total Environment*, 2018, **645**: 876-886.
- [15] Jiang YJ, He W, Liu WX *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 2014, **40**: 58-67.
- [16] Zhang M, Zhang Y, Yang Z *et al.* Spatial and seasonal shifts in bloom-forming cyanobacteria in Lake Chaohu: Patterns and driving factors. *Phycological Research*, 2016, **64**(1): 44-55.
- [17] Zhang Y, Ma R, Zhang M *et al.* Fourteen-year record (2000–2013) of the spatial and temporal dynamics of floating algae blooms in Lake Chaohu, observed from time series of MODIS images. *Remote Sensing*, 2015, **7**(8): 10523-10542.
- [18] Tang XX, Shen M, Duan HT. Temporal and spatial distribution of algal blooms in Lake Chaohu, 2000–2015. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 276-284. DOI: 10.18307/2017.0203. [唐晓先, 沈明, 段洪涛. 巢湖蓝藻水华时空分布(2000—2015年). 湖泊科学, 2017, **29**(2): 276-284.]
- [19] Reynolds CS ed. Ecology of phytoplankton (Ecology, Biodiversity and Conservation). Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [20] Krüger T, Wiegand C, Kun L *et al.* More and more toxins around - analysis of cyanobacterial strains isolated from Lake Chao (Anhui Province, China). *Toxicon*, 2010, **56**(8): 1520-1524.
- [21] Yu L, Kong F, Zhang M *et al.* The dynamics of *Microcystis* genotypes and microcystin production and associations with environmental factors during blooms in Lake Chaohu, China. *Toxins*, 2014, **6**(12): 3238-3257.