

巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013年)*

张 民, 孔繁翔

(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: 通过文献调研, 分析巢湖富营养化的历程及其与合肥市社会、经济与人口发展的关系, 同时利用遥感解译和野外调查监测方法分析 2012 和 2013 年巢湖主要富营养化指标及蓝藻水华的空间分布特征, 并进一步探讨各个阶段湖泊治理措施对巢湖富营养化过程的影响。研究发现: 近 30 年间, 1984—1994 年是巢湖水质的主要恶化阶段, 在 1990s 中期巢湖的富营养化达到了近 30 年的峰值, 这主要是经济快速发展、污染治理投入有限所致; 1995—2007 年, 巢湖的水质逐步改善, 恢复到 1980s 中期略高的水平, 这得益于“九五”和“十五”期间的大量投入, 对污、废水进行处理, 限制了污染物直接入湖; 但是 2008 年以来, 巢湖的水质改善效果并不明显, 富营养化维持在较高水平波动, 这可能是由于合肥市经济快速发展背景下, 原有的污、废水处理入湖的减排方式已经不能进一步有效削减巢湖的污染负荷。巢湖富营养化在空间分布上呈现西高东低的渐变趋势, 这主要是由西部主要入湖河流污染所致。通过对比 2012 和 2013 年的空间分布数据发现, 2013 年主要入湖污染河流河口水质相对 2012 年均有所好转, 其中十五里河河口的好转比南淝河河口明显。综合长期及全湖富营养化水平的变化分析, 现阶段巢湖富营养化的治理亟需改变经济发展模式, 调整产业结构, 实施污水废水尾水提标改造、畜禽养殖污染控制和面源污染控制等控源工程, 以进一步降低巢湖的富营养化程度。

关键词: 巢湖; 富营养化; 时空分布; 湖泊治理

The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu(1984—2013)

ZHANG Min & KONG Fanxiang

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

Abstract: In the present study, we analyzed the eutrophication process in Lake Chaohu and its correlation with socioeconomic and population development in Hefei city. We also investigated the spatial and temporal distribution characteristics of total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, permanganate index and cyanobacterial blooms in 2012 and 2013 in Lake Chaohu. The results showed that the water quality of Lake Chaohu started to deteriorate in 1984, and down to the worst in 1994 due to the increasing pollution and lacking of capital investment. During the period of 1995—2007, the water quality was getting better because of the limitation of direct waste water and sewage draining into the lake. After year 2008, the water quality did not show significant improvement and maintained a high level of eutrophication. In terms of spatial distributions, eutrophication in Lake Chaohu presented obviously different patterns: eutrophication level gradually degrades from the west to the east, which attributes to the source of pollution from the primary three rivers (Nanfei River, Shiwuli River and Pai River) in the west. The results from investigation also showed that the pollution from these rivers was less in 2013 than that in 2012, and the reduction in Shiwuli River was more apparent than that in Nanfei River. However, the reduction of pollution in the whole lake was not significant. Our findings suggest that in order to further reduce pollution, it is necessary to change economic development pattern and industrial structures and execute targeted pollution source control.

Keywords: Lake Chaohu; eutrophication; spatial and temporal distributions; lake management

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103002)、国家自然科学基金项目(31200353, 31470520)和中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略发展规划项目(NIGLAS2012135010)联合资助。2014-09-04 收稿; 2015-01-06 收修修改稿。张民(1978~), 男, 副研究员; E-mail: mzhang@niglas.ac.cn.

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,集水面积 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;近 30 年来,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、生活污水排入湖,导致湖水的营养盐和有机质浓度增加,湖泊富营养化进程加快^[2].根据 2012 年合肥市环境统计年报,湖泊污染物主要来源于农业面源污染和城市生活污水,占 80% 以上.2012 年,巢湖全湖平均水质类别为Ⅳ类,轻度污染,呈轻度富营养状态.其中,东半湖水水质类别为Ⅳ类,轻度污染,呈轻度富营养状态;西半湖水水质类别为Ⅴ类,中度污染,呈中度富营养状态^[3].富营养化导致巢湖水体中蓝藻占全年总藻类生物量的 50% 左右^[4],大面积蓝藻水华频繁暴发,并在西部湖区堆积,已经严重影响了巢湖对合肥市的饮用水供给,同时由于蓝藻水华的漂移,也威胁到了巢湖市的饮用水安全.巢湖水质恶化已经成为制约地方经济发展的重要因素,对旅游经济、供水安全、渔业资源等均造成很大的影响.

本文通过对历史数据的收集,回顾巢湖的富营养化历程,并通过 2012 和 2013 年逐月野外调查和遥感影像的解译,分析巢湖富营养化和蓝藻水华的空间分布特征,并解释导致该分布格局的可能原因.

1 研究方法

1.1 历史数据获取

通过文献调研的方法获取巢湖 1984—2003 年过去 30 年的富营养化数据,主要包括总氮(TN)和总磷(TP)浓度的变化特征,其中 1984 年数据来源于文献[5],1987 和 1988 年数据来源于文献[6],1994—2003 年的数据来源于文献[7],2000—2007 年的数据为文献[8]中东西湖区数据的平均值,2001—2012 年的数据来源于文献[9],同时通过安徽省统计年鉴,获取了合肥市 2000—2013 年的社会、经济和人口数据.

1.2 蓝藻水华的遥感解译

采用 2012 年(41 幅)和 2013 年(29 幅)MODIS 遥感影像数据(来源于美国航空航天局(NASA)戈达德航天飞行中心网站),通过藻类像元生长算法(APA)解译蓝藻水华盖度^[10].该算法基于漂浮藻类指数(FAI)解译方法,将蓝藻水华盖度的解译精细至亚像元水平,显著提高了蓝藻水华盖度的解译精度.

1.3 野外调查

野外调查于 2012 和 2013 年进行,每月中旬采样 1 次,共 17 个采样点(图 1).在采样现场利用多参数水质分析仪(YSI 6600, Yellow Spring Instruments, USA)原位测定水体的温度、溶解氧(DO)、pH、浊度、氧化还原电位和电导率等理化指标.水样带回实验室后用 GF/C 玻璃纤维滤膜过滤 200 ml,滤液参照标准方法^[11]测定铵态氮(NH₄⁺-N)浓度. GF/C 滤膜用于测定叶绿素 a 浓度(Chl. a, 表征总藻浓度)和藻蓝素浓度(表征蓝藻浓度),Chl. a 浓度采用丙酮提取法测定,藻蓝素浓度采用 Tris-HCl 提取法测定^[12].另外,不经过滤的水样利用过硫酸盐氧化法测定 TN、TP 浓度和高锰酸盐指数(COD_{Mn})^[11].

1.4 数据分析

本文利用 Microsoft Excel 2010、Origin 8.0 for Windows 和 ArcGIS 9.3 软件进行数据整理、统计分析和制图.

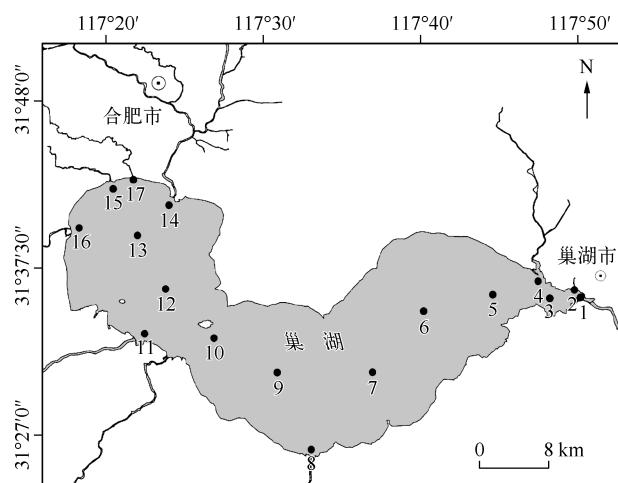


图 1 巢湖采样点位分布

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in Lake Chaohu

2 结果

2.1 巢湖富营养化历程

从巢湖过去 30 年(1984—2013 年)的年均 TN 和 TP 浓度变化可以看出:在 1980s,巢湖的 TN 浓度基本维持在 2 mg/L 以下,TP 浓度在 0.15 mg/L 以下,而在 1990s 中期,巢湖的氮、磷浓度达到近 30 年的峰值,其中 TN 浓度接近 6 mg/L,TP 浓度超过 0.41 mg/L. 随后巢湖的氮、磷浓度逐步下降,到 2013 年,TN 浓度约为 2.5 mg/L,TP 浓度约为 0.15 mg/L,基本恢复到了 1980s 中后期的水平(图 2).

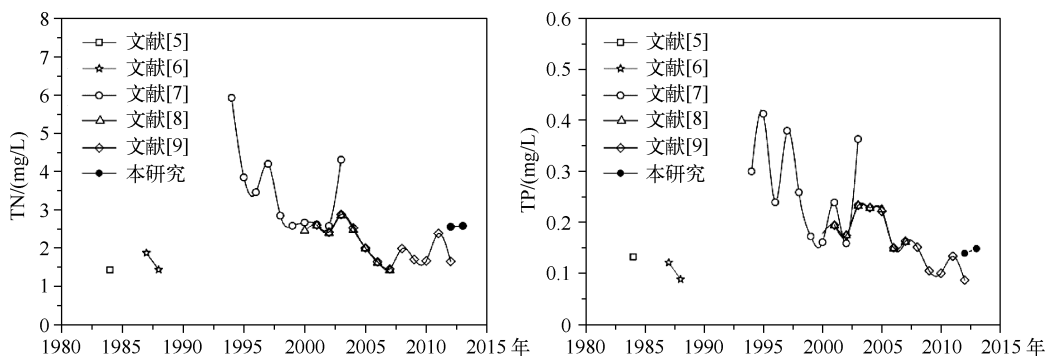


图 2 1984—2013 年巢湖 TN 和 TP 平均浓度的年际变化

Fig. 2 The inter-annual variations of mean TN and TP concentrations in Lake Chaohu during 1984—2013

从巢湖流域主要城市合肥的社会、经济发展可以看出,2000—2012 年间,合肥的 GDP 从 2000 年的约 370 亿元猛增到 2012 年的超过 4164 亿元,而人口则从 2000 年的 438 万人增加至 2010 年的 495 万人,2011 年并入巢湖市部分区域后,人口达到 710 万人(图 3).

2.2 2012 和 2013 年巢湖营养盐的空间分布

通过对 2012 和 2013 年巢湖主要富营养化指标 TN、TP、 NH_4^+ -N 浓度和 COD_{Mn} 的调查分析发现,巢湖的各富营养化指标均呈现西高东低的趋势,其中 TN、TP 和 NH_4^+ -N 浓度的分布更为集中,主要集中于西部南淝河、十五里河和派河入湖河口区域,而 COD_{Mn} 虽然也呈现这种趋势,但是其集中程度较弱,分布相对分散. 比较 2012 和 2013 年的分布差异可以发

现,2013 年各营养盐的最高值相比 2012 年都有所下降,同时最高浓度出现的点位也有所差异,2012 年各营养盐的最高值均出现在十五里河和塘西河河口区域,而 2013 年各营养盐的最高值则出现在南淝河河口区域(图 4).

2.3 2012 和 2013 年巢湖蓝藻水华的空间分布

巢湖卫星遥感影像解译结果显示,巢湖的蓝藻水华主要分布于西部区域,尤其是西北部沿岸及河口区域,东北部沿岸区域也有小面积分布,其中 2012 年的蓝藻水华盖度明显高于 2013 年(图 5),通过 2 年的水华面积统计也可以发现,2012 年蓝藻水华的面积大于 2013 年,2012 年遥感影像记录的蓝藻水华平均面积为 104.8 km^2 ,最大面积出现在 6 月 8 日,为 579 km^2 ;2013 年遥感影像记录的蓝藻水华平均面积为 63.4 km^2 ,最大面积出现在 10 月 9 日,为 175 km^2 .

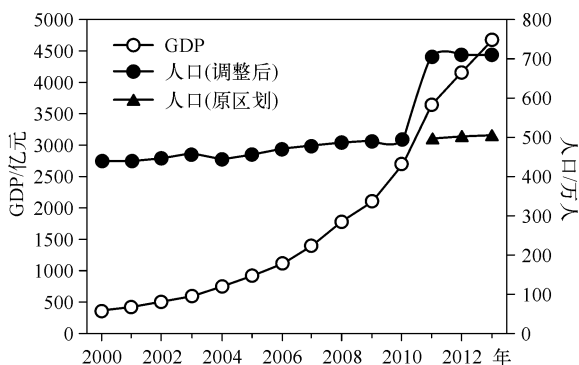


图 3 2000—2012 年合肥市 GDP 和人口的变化

Fig. 3 The inter-annual variations of GDP and population in Hefei city during 2000—2012

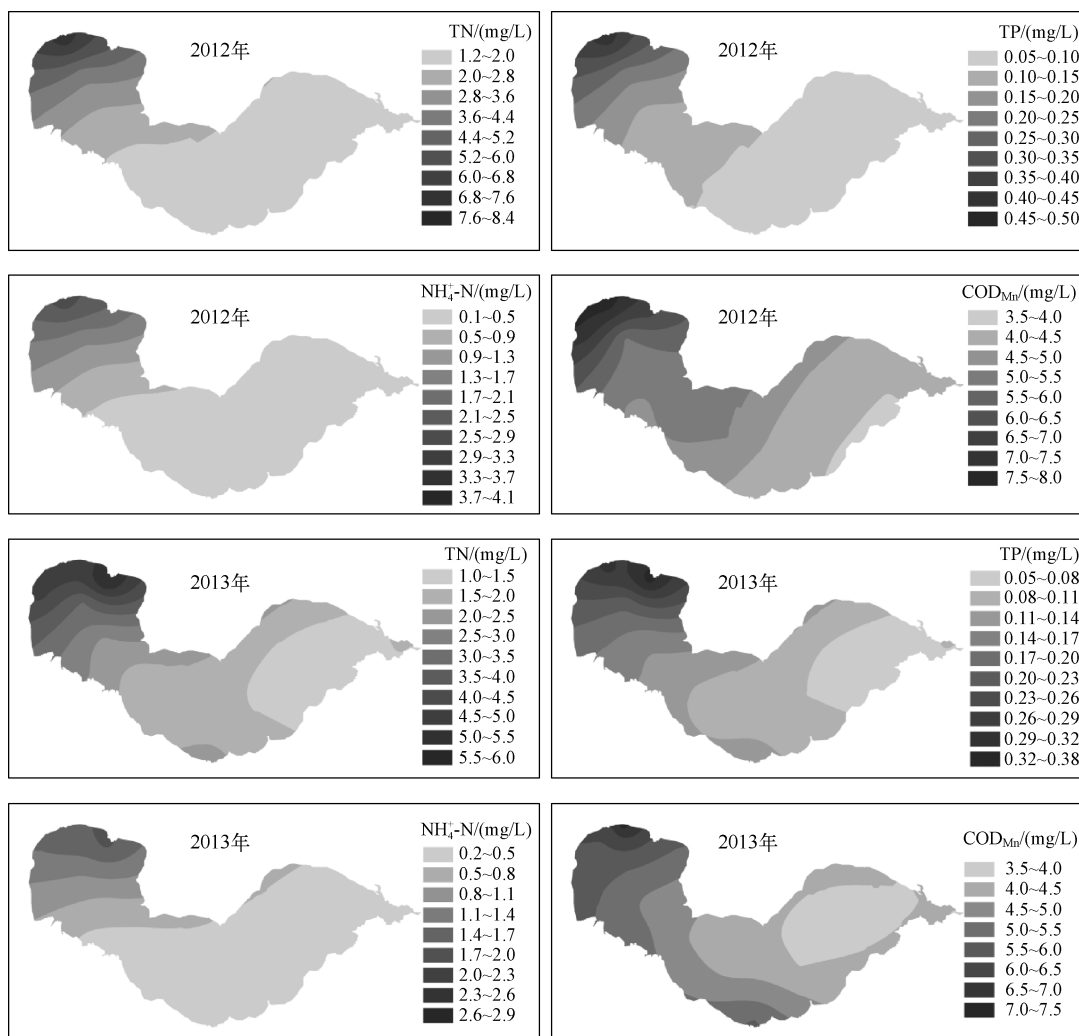


图4 2012 和 2013 年巢湖 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和 COD_{Mn} 的空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations and COD_{Mn} in Lake Chaohu in 2012 and 2013

2012 和 2013 年巢湖的 Chl. a 和藻蓝素浓度均呈现西高东低的渐变趋势,其中 2012 年 Chl. a 浓度在西北部沿岸区域最高,而 2013 年则主要是西部沿岸区域最高;2012 年巢湖的藻蓝素浓度空间分布较 2013 年更不均匀,各点位间分布差异显著,尤其是靠近南淝河、十五里河和塘西河河口附近沿岸区域水华蓝藻浓度异常偏高(图 6)。

3 讨论

3.1 巢湖的富营养化历程

巢湖原属于过流性湖泊,经唯一出口裕溪河与长江相连,汛期时长江倒灌入湖,正常情况下,巢湖通过裕溪河流入长江,形成巢湖与长江自然状态下的水量交换。1962 年在裕溪河上建成巢湖闸,切断了巢湖与长江的天然联系,使巢湖和裕溪河成为人工高度调控的水系。由于人工闸坝的影响,加上流域城市化和工农业生产活动步伐加快,从 1970s 开始,巢湖出现蓝藻水华污染现象,湖泊水质开始下降;到 1980s,湖泊的污染扩展到全湖;1990s 时,全湖已经处于重富营养化状态,湖泊水质超过了国家规定的 V 类水质标准。近年来由于

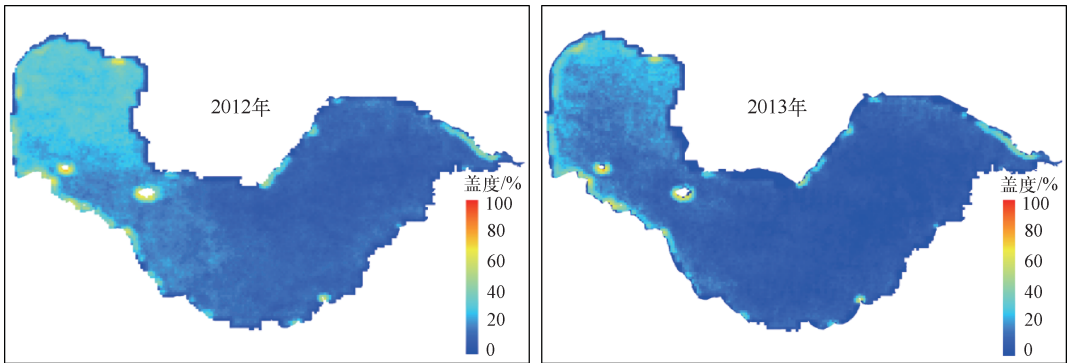


图 5 2012 和 2013 年巢湖蓝藻水华盖度
Fig.5 The coverage of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu in 2012 and 2013

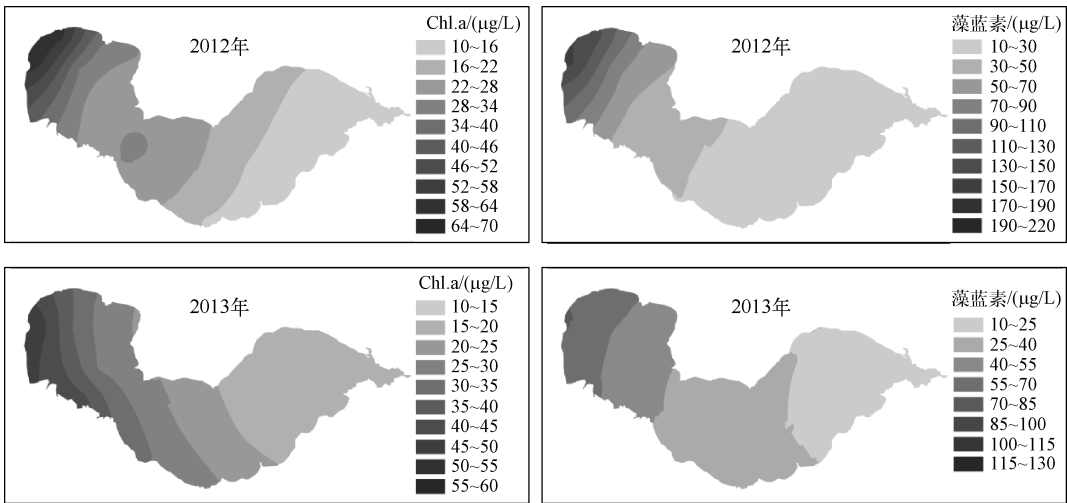


图 6 2012 和 2013 年巢湖 Chl. a 与藻蓝素浓度的空间分布
Fig.6 The spatial distribution of chlorophyll-a and phycocyanin concentrations in Lake Chaohu in 2012 and 2013

国家大力开展“三河三湖”的治理,巢湖的富营养化趋势得到了明显的遏制,并且富营养化水平有所下降,但是其营养水平仍处于高位,足以支持蓝藻水华的发生.

巢湖的污染已经严重制约了该区域的经济的发展,影响到区域人民的生产和生活. 为了控制巢湖的富营养化污染,改善巢湖水质,安徽省在制定环境保护“八五”计划和安徽省碧水蓝天工程计划(1991—1995 年)时都把巢湖的富营养化防治作为重点内容. 但是根据本文收集的数据可以发现,巢湖的水质在此时间段并没有任何改善,反而逐步恶化,到 1994 和 1995 年时达到了恶化的峰值. 这主要是由于“八五”期间,安徽省对环境污染防治的投入较少,巢湖流域的大多数项目未能按计划实施. 到了“九五”期间(1996—2000 年),根据《巢湖流域“九五”水污染防治计划》,在亚洲开发银行和国家开发银行的资助下,污染防治的投资得到保障,众多重点污染企业建设了污水处理设施,基本实现了污水达标排放,水质得到明显改善. “十五”期间,国务院批复的巢湖流域水污染防治“十五”规划共 49 个项目,进一步对企业废水和生活污水进行处理和入湖限制. “十一五”计划中国家再次把巢湖列为重要整治湖泊,并投入大量资金进行生态恢复与供水安全保障工作,有效控制了蓝藻水华对饮用水安全的威胁^[13].

巢湖流域面积约 $1.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括安徽省合肥市(合肥市辖 4 区、巢湖市 1 市以及庐江、肥东、肥西、长丰 4 县)、马鞍山市(含山县、和县)、芜湖市(鸠江区、无为县)、六安市(金安区、舒城县)、安庆市岳西县,

共5市、16县(市、区)。其中合肥市是巢湖污染的主要来源。通过对合肥市的社会发展分析发现,过去10多年间,合肥市的经济、人口持续快速增长。2000—2003年,合肥市的GDP增长率在10%~13%之间,2004年后其增长率基本保持在15%以上,甚至超过18%。而在此期间巢湖水体的氮、磷浓度呈现分段式的变化趋势,2000—2007年间,氮、磷浓度持续下降,这可能是由于“九五”和“十五”的持续投入使得巢湖的水质得到明显改善。但是2008年以后,巢湖的污染削减工作进入了平台期,水质改善效果并不明显,表明在合肥市经济快速发展的背景下,虽不断增加污染治理的投资,但原有的控制企业废水和生活污水直接入湖的治理方案已经无法满足进一步削减巢湖污染负荷的目的。

湖泊流域内的污染物排放量与污染治理投入是一对平衡体,两者必须保持相对的平衡才能确保湖泊环境的健康,不同流域在保持环境健康过程中选择的模式不同。如欧洲的部分湖泊选择了相对较低的经济增长速度、较少的污染物排放量和较少的治理投入,这样其排放量与治理投入保持在较低的水平就可以保证湖泊环境的健康。而日本的部分湖泊选择了经济高速发展、较大的污染物排放量和治理高投入的模式,这样其排放量与治理投入保持在较高水平。但是随着这个水平的升高,这一对平衡体保持平衡的难度会迅速增加,湖泊治理所需要的投入也会成倍增加。从巢湖富营养化的发展历程看,1980s到1990s中期,其处于社会经济快速发展但基本无治理状态,所以湖泊水质快速恶化;从1990s中期到2007年左右,经济依然保持快速增长,但是逐步加大了治理投入,开始恢复平衡,所以湖泊的环境状况开始改善;但是2008年以来,经济增长速度不减,虽然投入也在加大,但是此时的排放量与治理投入的水平已经很高,现有的投入或者单纯的投入已经无法满足环境逐步恢复的目标,所以湖泊的富营养化保持在较高水平波动。如果合肥市的经济发展不做调整,湖泊治理投入的增长速度和治理方向保持现状,可以预见巢湖的富营养化水平将再一次加重。因此,目前巢湖流域亟需转变发展模式,调整产业结构,实施更为有针对性的湖泊治理措施,以进一步降低巢湖的富营养化程度。

3.2 巢湖富营养化的空间格局

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^[14],这是湖泊外源污染负荷主要来源于流域西北部所致^[15]。通过2012和2013年的调查对比发现,巢湖富营养化的总体空间格局并无显著改变,但是主要入湖污染河流河口的污染物浓度均有所下降。同时,南淝河和十五里河两条主要入湖污染河流河口的污染物浓度也发生了变化,2012年巢湖的营养盐峰值主要出现在十五里河河口,而2013年则出现在南淝河河口。通过两年的对比分析发现,2013年的巢湖污染较2012年有所下降,这可能是“十二五”期间巢湖水污染治理工作的效果体现,但是仅利用两年的监测数据仍难以给出明确结论,而且南淝河和十五里河流域面积、水量等相对较大,污染结构复杂,其污染控制工程取得的效果仍需要更长时间尺度的监测予以确定。

巢湖的蓝藻水华主要分布于西部湖区,并向东逐步减少,这与利用Chl. a、藻蓝素浓度以及藻类生物量表征的结果相一致,这种分布模式同以往的研究结果相吻合^[16]。巢湖西部湖区水华蓝藻的大面积分布与巢湖西部湖区的营养水平密切相关。近年来,巢湖西部水域接纳了来自南淝河、十五里河、派河和塘西河等河流大量的生活污水、工业废水以及农业面源污染,同时该区域环境背景磷浓度受磷矿影响明显偏高,所以西半湖氮、磷浓度快速升高,构成了蓝藻水华发生的重要物质基础。另外,巢湖属于闸控型湖泊,湖水交换周期约为170 d,湖水滞留时间过长导致水体稳定度增加,为水华蓝藻的生长提供了良好的水力条件。

本文通过2012和2013年的调查发现,2013年的蓝藻水华盖度明显低于2012年,但这并不意味着巢湖的蓝藻水华问题得到了有效的控制。通过藻类色素以及藻类生物量的比较分析可以发现,2013年的蓝藻总量相较于2012年并没有显著降低,蓝藻水华盖度的差异主要源于水华蓝藻空间分布的差异。首先,在垂直分布上,2012年西部湖区水华蓝藻更趋于分布在水体表面。根据该区域风速分析可以发现,2012年的主导风向上风速均低于3.6 m/s,该风速条件是水华蓝藻上浮形成水华的最佳状态^[17-18],而2013年,主导风向上约有10%的风速超过3.6 m/s,这将导致水华蓝藻被风生流带入深层水体。在水平分布上,2013年全湖的蓝藻分布均匀度明显高于2012年,相较于2012年,2013年巢湖东部区域分担了更多的蓝藻压力,这削弱了2013年蓝藻水华的盖度。

3.3 巢湖的综合治理策略

巢湖的污染主要来自于巢湖西部的合肥市。结合巢湖河流入湖水量分析,巢湖西部的杭埠河以55%的

入湖水量输入了 20%~30% 的污染物;而南淝河、十五里河和派河以不足 20% 的入湖水量,输入了 60% 以上的污染物,是巢湖主要的污染来源。根据 2012 年《合肥市环境统计年报》,合肥市 80% 以上的入湖污染物均来源于城镇生活污水和农业面源污染。因此,在分析合肥市污染普查数据的基础上,提出了以下巢湖的综合治理策略。

巢湖流域的保护、治理和发展是巢湖生态文明建设的核心内容,而巢湖的综合治理是巢湖流域的保护、治理和发展的重点。巢湖的综合治理策略应体现在以下几个方面:(1) 通过转变发展方式和调整产业结构,推动传统产业转型升级,促进现代服务业快速发展,实现污染物的结构减排,缓解经济发展与资源利用、环境保护的矛盾。(2) 从巢湖流域初步发展地区社会经济的实际出发,着眼于污染物迁移转化的全过程,本着“源头控制、过程削减、末端强化”的原则,大力开展控源工作,削减入湖污染负荷。(3) 在流域上游,通过政策引导与管理,对流域内的优质资源进行保护,同时,通过水土流失治理、生态林建设等工作,保障清水产流。(4) 充分结合流域水资源配置和防洪工程,完善并扩大巢湖对江水循环通道,增加江湖交换水量,促进巢湖与长江、周边河网水体的有序流动,缩短换水周期。

湖泊治理的一切前提是控源,污染得到有效控制并削减,才能促进生态系统向健康状态转变。巢湖目前的污染状况是湖体富营养化程度高,流域入湖污染虽然得到有效遏制,但每年依然有大量污染负荷入湖。因此,当前巢湖治理的首要工作就是控源。巢湖的入湖污染负荷主要来源于西部几条入湖污染河流,如杭埠河、南淝河、十五里河和派河。杭埠河在 4 条河流中对巢湖污染物的贡献最大,但是由于其水量更大,所以其入湖污染的浓度并不高,未超过蓝藻水华发生水质阈值,对巢湖蓝藻水华发生及生态系统健康的影响有限,因此,在此低浓度条件下,希望进一步通过控源降低入湖污染物浓度的投入将会非常大。而且杭埠河流域面积大,污染主要来源于农业面源,同时有少量畜禽养殖和个别城镇生活污水,此种污染结构下控源措施的可选择性和经济性都受到限制。南淝河、十五里河和派河水量少,污染物浓度高,且污染来源相对集中,主要为合肥市生活污水尾水。因此,现阶段巢湖的控源工作应该主要集中于南淝河、十五里河和派河。

根据南淝河、十五里河和派河子流域的污染结构,目前针对性的措施主要有以下几方面:(1) 通过优化合肥市产业结构,提升高科技产业在国民经济中的比重,逐步淘汰或迁离一批重污染企业,如合肥市马钢钢铁有限责任公司;(2) 完善合肥市污水管网覆盖率,消除未经处理厂处理直接排河排污口;改进工艺,提升污水处理厂尾水出水标准;(3) 推进 3 条河流域内的农村分散型点源污水处理进程,构建小流域综合整治长效机制,并逐步产业化;(4) 加强对流域内农业种植规模、种类、施肥等的引导,部分区域实施退田还湖,削减入河、湖的农业面源污染。

4 结论

1) 巢湖近 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 年是巢湖水质的逐步改善阶段;2008 年以来,巢湖的富营养化维持在较高水平波动。

2) 在空间分布上,巢湖的富营养化呈现西高东低的渐变趋势,2013 年主要入湖污染河流河口水质相对 2012 年均有所好转,其中十五里河河口的好转比南淝河河口明显。

3) 现阶段巢湖富营养化的治理亟需改变经济发展模式,调整产业结构,实施污水尾水提标改造、畜禽养殖污染控制和面源污染控制等控源工程,以进一步削减巢湖的入湖污染负荷。

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的张玉超副研究员在卫星影像解译工作中的帮助。

5 参考文献

- [1] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志. 北京:科学出版社,1998.
- [2] 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,2006.
- [3] 安徽省环境保护厅. 2012 年安徽省环境状况公报,2013.
- [4] Deng DG, Xie P, Zhou Q *et al.* Studies on temporal and spatial variations of phytoplankton in Lake Chaohu. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, **49**(4): 409-418.
- [5] 蒙仁宪,刘贞秋. 以浮游植物评价巢湖水质污染及富营养化. 水生生物学报,1988,**12**(1):13-26.
- [6] 屠清瑛,顾丁锡,徐卓然等. 巢湖富营养化的研究. 合肥:中国科学技术大学出版社,1990.

- [7] 张海燕,李 菁. 巢湖水体富营养化成因分析及对策研究. 疾病控制杂志, 2005, **9**(3): 271-272.
- [8] 王振祥,朱晓东,孟 平. 巢湖富营养化年度尺度变化分析及对策. 环境监测, 2009, **416**: 33-36.
- [9] 刘 允,孙宗光. 2001—2012 年全国水环境质量趋势分析. 环境化学, 2014, **33**(2): 286-291.
- [10] Zhang YC, Ma RH, Duan HT *et al.* A novel algorithm to estimate algal bloom coverage to subpixel resolution in Lake Taihu. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2327076.
- [11] 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.
- [12] 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): 163-167. DOI 10.18307/2004.0210.
- [13] 殷福才,张之源. 巢湖富营养化研究进展. 湖泊科学, 2003, **15**(4): 377-384. DOI 10.18307/2003.0413.
- [14] 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. DOI 10.18307/2011.0608.
- [15] Shang GP, Shang JC. Spatial and temporal variations of eutrophication in western Chaohu Lake, China. *Environment Monitor and Assessment*, 2007, **130**: 99-109.
- [16] 李 堃,肖 蕾. 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.
- [17] 孔繁翔,高 光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [18] Zhang M, Kong FX, Wu XD *et al.* Different photochemical responses of phytoplankters from the large shallow Taihu Lake of subtropical China in relation to light and mixing. *Hydrobiologia*, 2008, **603**: 267-278.