



不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响——以巢湖流域为例

冯雪娇, 林晨, 熊俊峰, 陈曦, 吴紫静, 马荣华

引用本文:

冯雪娇, 林晨, 熊俊峰, 陈曦, 吴紫静, 马荣华. 不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响——以巢湖流域为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 64–75.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0838>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于等标污染负荷强度的海南省农村面源污染特征研究

丘丽清, 吴根义, 李想, 余磊, 符致钦

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 55–63 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0697>

巢湖地区农村生活污水产排污调研方法及实证

何源, 吕锡武, 郑向群, 张丹丹, 吴晓斐, 黄治平

农业资源与环境学报. 2022, 39(2): 319–325 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0131>

苏州市农业面源污染源强解析与评价

姜滢, 王子博, 尤悦文, 徐培杰, 陈重军

农业资源与环境学报. 2015(4): 363–369 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0012>

四川凯江流域农村非点源污染特征分析

张鹏远, 苟楚璇, 巫杨, 张德, 李飞, 牟子申

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 398–404 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0307>

29种水生植物对农村生活污水净化能力研究

张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 陈明利, 柳俊

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 392–402 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0235>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

冯雪娇, 林晨, 熊俊峰, 等. 不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响——以巢湖流域为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 64-75.

FENG X J, LIN C, XIONG J F, et al. Effects of nonpoint source pollution from different sources on lake nitrogen and phosphorus: A case study of Chaohu Lake basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 64-75.



开放科学 OSID

# 不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响 ——以巢湖流域为例

冯雪娇<sup>1,2</sup>, 林晨<sup>1\*</sup>, 熊俊峰<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1,3</sup>, 吴紫静<sup>1,4</sup>, 马荣华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院流域地理学重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春师范大学地理科学学院, 长春 130032; 4. 南京工业大学测绘科学与技术学院, 南京 211816)

**摘要:** 为明确非点源污染中不同污染源对湖泊氮磷的影响, 基于冗余分析方法, 综合考虑了巢湖流域非点源污染中种植地、畜禽养殖、水产养殖、农村生活污水排放和大气沉降五大来源, 探讨了非点源污染多来源对湖泊氮磷浓度的影响, 同时, 在平水期和丰水期两个季节分析不同来源的影响差异。结果表明: 平水期非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响略高于丰水期, 平水期解释率可达到 80.5%, 丰水期为 71.6%, 且不同来源的影响在平水期和丰水期具有一定的差异。影响差异最明显的污染源是大气沉降和农村生活污水排放, 其中, 大气沉降在丰水期的解释率可高达 46.4%, 而在平水期仅为 6.3%, 农村生活污水排放的解释率恰好相反, 但两者总和在平水期和丰水期均超过 50%。种植地、畜禽养殖、水产养殖产生的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响作用相当, 三者解释率都在 10%~20% 之间, 且在平水期和丰水期变化相对较小。研究表明, 大气沉降和农村生活污水排放对湖泊氮磷浓度的影响受季节因素影响较大, 而农业种植、畜禽养殖和水产养殖作为农业生产的三种主要形式, 其对湖泊氮磷浓度的影响应得到同等程度的重视。

**关键词:** 非点源污染; 多来源; 总氮; 总磷; 冗余分析; 巢湖流域

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)01-0064-12

doi: 10.13254/j.jare.2021.0838

## Effects of nonpoint source pollution from different sources on lake nitrogen and phosphorus: A case study of Chaohu Lake basin

FENG Xuejiao<sup>1,2</sup>, LIN Chen<sup>1\*</sup>, XIONG Junfeng<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1,3</sup>, WU Zijing<sup>1,4</sup>, MA Ronghua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Geographical Sciences, Changchun Normal University, Changchun 130032, China; 4. School of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** This study aimed to clarify the impact of different sources of nonpoint source (NPS) pollution on lake nitrogen and phosphorus. This study was based on a redundancy analysis method that comprehensively considered the five major sources of nonpoint source pollution in the Chaohu Lake basin including planting land, livestock and poultry breeding, aquaculture, rural domestic sewage discharge, and atmospheric deposition. The effects of NPS pollution from multiple sources on lake nitrogen and phosphorus were discussed. Additionally, the impact of different sources was analyzed on the two seasons of the normal and wet water periods. The results showed that the influence

收稿日期: 2021-12-01 录用日期: 2022-02-18

作者简介: 冯雪娇 (1998—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向为流域面源污染对湖泊水环境的影响。E-mail: fengjoye1010@163.com

\*通信作者: 林晨 E-mail: clin@niglas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD1100105); 中国科学院战略性 A 类先导科技专项 (XDA23020202)

**Project supported:** The National Key R&D Program of China (2018YFD1100105); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23020202)

of nonpoint source pollution on lake nitrogen and phosphorus in the normal period was slightly higher than that in the wet period, and the interpretation rate of nonpoint source pollution in the normal period could reach 80.5%, whereas that in the wet period was 71.6%. Different sources of non-point source pollution showed certain variations during different rainfall periods. The pollution sources with the most obvious difference in their contribution rates were atmospheric deposition and rural domestic sewage discharge, of which the interpretation rate of atmospheric deposition could reach 46.4% in the wet season and only 6.3% in the normal season. The contribution rate of rural domestic sewage discharge showed the opposite trend. However, the total amounts of the two sources exceeded 50% in both the normal and wet seasons. The effects of nonpoint source pollution from planting land, livestock and poultry breeding as well as aquaculture on lake nitrogen and phosphorus were similar; the interpretation rates of the three factors were between 10% and 20% and the change was relatively small between normal and wet water periods. This study has shown that the impact of atmospheric deposition and discharge of rural domestic sewage on the concentrations of nitrogen and phosphorus in lakes is greatly affected by seasonal factors. Agricultural planting, livestock and poultry breeding, and aquaculture, as the three main forms of agricultural production, should be equally prioritized because of their influence on changes in nitrogen and phosphorus concentrations in lakes.

**Keywords:** non-point source pollution; multi-source; total nitrogen; total phosphorus; redundancy analysis; Chaohu Lake basin

随着社会经济不断发展,地表水环境污染问题日益突出<sup>[1]</sup>。大量营养物质(特别是氮、磷等)进入水体中,造成水体富营养化。这一过程主要分为点源污染和非点源污染两种形式,其中非点源(Non-point source, NPS)污染通常伴随地表径流产生,因其具有来源广泛、过程复杂、随机性强等特点而较难防控<sup>[2]</sup>,因此成为了现阶段水体污染的重点研究内容之一。国外较早开始了对非点源污染的研究,据统计,美国湖泊NPS污染占比达到了总污染量的65%左右<sup>[3]</sup>;欧洲湖泊水污染中,由农业生产引起的非点源氮排放占总污染量的60%,磷占污染总负荷的24%~71%<sup>[4-5]</sup>。由此可见,非点源污染是湖泊水体污染研究的重中之重,而我国非点源污染研究起步较晚<sup>[6]</sup>。随着社会发展,人类活动所带来的非点源污染对湖泊水污染的影响也越来越显著,因此探究非点源污染与湖泊水环境之间的关系对于湖泊水环境的治理以及流域内人类活动的合理规划与发展具有重要意义。

现阶段,已有不少学者针对非点源污染与湖泊水环境之间的关系进行了研究。从研究内容来看:①影响湖泊水体污染的非点源众多,诸多研究重点关注土地利用变化<sup>[7-10]</sup>,如Cheruiyot等<sup>[7]</sup>估算了东非维多利亚湖不同土地利用类型的总氮、总磷负荷量,结果表明农用地所产生的污染物占比最高,是湖泊非点源污染的最主要来源;Zhang等<sup>[9]</sup>对北京密云水库非点源污染进行了评价,结果表明农业园地的增加导致氮磷的潜在污染负荷在一定程度上有所增长;②部分研究对几种不同的来源进行了综合考虑与分析<sup>[11-13]</sup>,如Kong等<sup>[11]</sup>对巢湖流域非点源污染中肥料流失、大气沉降、土壤侵蚀等来源进行了总氮、总磷负荷量估算,得到了非点源污染多年平均养分负荷贡献率(总氮平均为

85%,总磷平均为77%)。

综上,通过估算污染物负荷量来评价非点源污染对湖泊水环境的影响研究已经比较成熟,但尚存在如下问题:①多数研究对污染源的考虑较为单一。随着社会经济的不断转型与发展,流域内传统的耕作、养殖等农业生产形式以及生活方式不断改变,造成了非点源污染的变化,使得影响湖泊水环境的污染源更加多样化。因此针对污染源的单一研究会使得结果存在不确定性,从而限制对湖泊水环境的针对性管控和治理;②部分研究考虑了不同污染源对湖泊水环境的影响,但研究中缺乏与湖泊水质实测数据的联系。在流域尺度上,以非点源形式产生的污染物最终将汇入附近的水体,各种水质参数的变化是对非点源污染的直接响应<sup>[14]</sup>。因此,通过建立流域非点源污染所产生的污染物与湖泊水质之间的联系来定量揭示不同污染源对湖泊水质的贡献率,能够更好地明确流域非点源污染对湖泊水体富营养化的影响。

针对上述关键问题,如何在湖泊水质实测数据支撑下,综合考虑不同非点源污染来源对湖泊水质指标浓度的直接影响,是本研究要解决的关键问题。巢湖作为我国五大淡水湖泊之一,其水质状况与周边地区用水安全息息相关。近年来,流域内种植业、养殖业的不断发展促进了经济增长,但也加重了非点源污染,同时流域内农村人口聚集,人类活动排放的部分生活污水以及废气等也会以不同形式进入湖泊中,使得巢湖水体呈现不同程度的富营养化状态<sup>[15]</sup>,而这种富营养化状态主要是由氮磷营养物质过量引起的<sup>[16]</sup>。因此本研究以巢湖流域为研究区,在巢湖氮磷实测数据的支撑下,基于冗余分析方法对非点源污染中的种植地、畜禽养殖、水产养殖、农村生活污水排放和大气

沉降五大重要来源进行综合考虑,明确平水期和丰水期流域内不同NPS污染源对湖泊水体氮磷浓度的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

巢湖(117°16'54"~117°51'46"E,31°25'28"~31°43'28"N)位于安徽省中部(图1),长江北岸,湖泊面积约为783 km<sup>2</sup>。近年来,巢湖水体呈现出严重的富营养化状态,虽然得到了相关部门的重视与治理,但2018年巢湖水质整体仍处于较差水平,部分湖体水质达到了V类甚至劣V类<sup>[7]</sup>。

巢湖流域(116°23'59"~118°22'05"E,30°52'25"~32°07'53"N)面积约为13 500 km<sup>2</sup>,包含了六大入湖水系和一条出湖水系(表1)。本研究在湖泊水系分布基础上,参考国家地球系统科学数据共享服务平台中湖泊-流域科学数据中心提供的湖泊二级流域数据,将巢湖流域再分为7个子流域,分别为杭埠河流域、派河流域、南淝河流域、炯炆河流域、柘皋河流域、白石天河流域以及裕溪河流域(表1)。

流域内土地利用以耕地为主(图1),耕地面积占比可达流域总面积的60%。因水热条件良好,巢湖流域成为了我国农业生产最集中的区域之一<sup>[18]</sup>,农业生产以种植业为主,主要粮食作物为水稻,同时兼顾养殖业的发展。流域内拥有近960万人口,其中农村人口占比超过60%。流域内频繁的农业活动和农村生活产生的过量氮、磷等营养物质造成了严重的非点源污染,污染物伴随着地表径流进入巢湖,使得湖体呈现不同的富营养化状态。

### 1.2 不同季节湖泊TN、TP数据差别化获取

本研究所采用数据均以2017年为基础。2017年是我国“十三五”规划开局的第一个完整年,在“十三五”规划中,安徽省作为农业大省提出了大力发展现代化农业、改善生态环境的发展目标<sup>[19]</sup>,因而2017年是流域内农业经济发展的一个重要转折点,因此选择该年数据具有一定代表性。同时,依据流域内多个气象站点的月平均降水量数据,选定降水丰沛的8月作为丰水期,降水相对适中的3月作为平水期。

湖泊水质指标众多,其中总氮(Total Nitrogen, TN)、总磷(Total Phosphorus, TP)流失是非点源污染

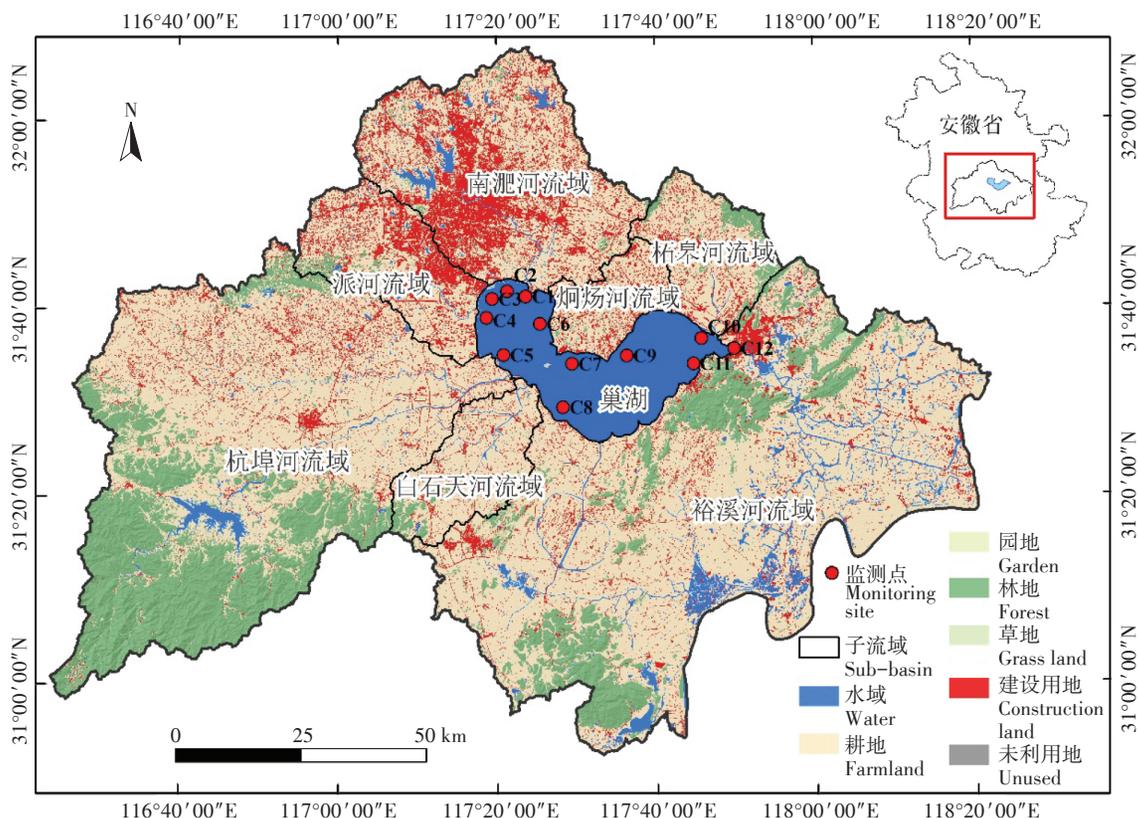


图1 研究区概况及监测点位分布图

Figure 1 Overview of the study area and distribution of the monitoring sites

表1 巢湖流域子流域基本信息

Table 1 Basic information of sub-basin in Chaohu Lake basin

子流域名称 Sub-basin	监测点 Monitoring site	面积 Area/km <sup>2</sup>	主要水系 Crossing river	水系流向 Flowing direction
杭埠河流域	C5	5 900.22	杭埠河	入湖水系,流入巢湖
派河流域	C3、C4	964.43	派河	入湖水系,流入巢湖
南淝河流域	C1、C2	2 340.22	南淝河	入湖水系,流入巢湖
炯炆河流域	C6、C7、C9	474.65	炯炆河	入湖水系,流入巢湖
柘皋河流域	C10	759.62	柘皋河	入湖水系,流入巢湖
白石天河流域	C8	739.88	白石天河	入湖水系,流入巢湖
裕溪河流域	C11、C12	7 041.18	裕溪河	出湖水系,从巢湖流出,流入长江

引起湖泊水体富营养化的重要原因<sup>[16]</sup>,因此本研究选取了巢湖2017年平水期和丰水期TN、TP浓度作为水质监测指标数据。该数据来源于巢湖管理局,巢湖管理局自2008年开始以月为单位对巢湖水质进行定期监测,这为本研究提供了基础数据支撑。

为保证研究结果的合理性,本研究选用离岸距离相近的环湖12个监测点的TN、TP数据(图1)进行分析,各监测点所属子流域信息见表1。监测点共包含12处,分别为南淝河入湖区(C1)、十五里河入湖区(C2)、塘西河入湖区(C3)、派河入湖区(C4)、新河入湖区(C5)、湖滨(C6)、忠庙(C7)、兆河入湖区(C8)、黄麓(C9)、中焊乡(C10)、巢湖船厂(C11)以及巢湖坝口(C12)。

### 1.3 考虑农业生产与农村生活影响的NPS污染源分类

巢湖流域是我国农业生产最集中的区域之一。得益于良好的水热条件,流域内种植业、养殖业发展迅猛,农产品产量丰厚,促进了区域经济不断增长,但同时农业生产过程中使用的过量肥料、饵料以及畜禽、水产等产生的排泄物不断向水体排放,是造成巢湖水体氮磷浓度变化的重要原因。因此,本研究结合流域内主要的农业生产方式,同时参考现有相关研究对巢湖流域非点源污染的探讨经验<sup>[11,13,20]</sup>,将流域内非点源污染的来源分为以下5类。

#### (1) 种植地

种植地种类繁多,通过现有研究可知,在土地利用中对非点源污染贡献最大的种植地类型是受农业活动影响较大的耕地和园地两类<sup>[7,9-10]</sup>。因此,种植地主要提取农用地中的耕地(水田、旱地)、园地两大类,数据从流域土地利用数据中获取,具体信息见表2。

#### (2) 畜禽养殖

畜禽养殖种类主要包括牛、羊、猪、家禽4类,由

于各类畜禽排污量不同,因此需要进行标准转化。参考各畜禽氮磷污染物排放量,以猪作为标准进行换算,最终计算各行政单元内畜禽养殖排污总量<sup>[21]</sup>。

$$L_i = l_i \times \frac{1}{2} \left( \frac{N_i}{N_p} + \frac{P_i}{P_p} \right) \quad (1)$$

式中: $i$ 为畜禽养殖种类; $L_i$ 为*i*类畜禽换算为猪的数量,头; $l_i$ 为*i*类畜禽本身数量,头或羽; $N_p$ 、 $P_p$ 为猪每年排泄的氮、磷量,t; $N_i$ 、 $P_i$ 为*i*类畜禽每年排放的氮、磷量,t。

#### (3) 水产养殖

水产养殖是农业生产的重要方式之一,特别是长江中下游地区拥有良好的水源条件,为水产养殖业的发展提供了基本前提。但养殖过程中剩余的饵料、代谢产物等会对养殖水体以及周围水体造成污染。水产养殖数据可从统计年鉴中直接获取。

#### (4) 农村生活污水排放

农村生活污水排放量主要由农村人口数量决定,计算公式:

$$Q = P \times N \quad (2)$$

式中: $Q$ 为生活污水年排放总量,t; $P$ 为农村生活污水排放系数,t·人<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>; $N$ 为农村人口数,人。农村生活污水排放系数参考相关研究<sup>[22]</sup>。

#### (5) 大气沉降

农业种植中施用的氮磷等化肥,一部分会挥发到大气中,同时秸秆等作物燃烧以及工业生产产生中也会产生相关废气,这些污染物再以大气沉降的形式返还地面。大气沉降主要分为大气干沉降和湿沉降两种形式。通用计算公式:

$$W = F \times S \quad (3)$$

式中: $W$ 为大气干、湿沉降年输入的氮(磷)总量,t; $F$ 为相应的大气沉降通量,t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; $S$ 为流域面积,km<sup>2</sup>。

以县级行政区为最小计算单元,在子流域范围内

表2 NPS 污染源数据来源及说明

Table 2 Data source and description of NPS pollution source

数据名称 Data name	单位 Unit	空间尺度 Spatial scale	数据来源与描述 Data sources and description
土地利用数据 (种植地)	km <sup>2</sup>	30 m空间分辨率	土地利用数据来源于国家地球系统科学数据共享服务平台中湖泊-流域科学数据中心。参考国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),综合研究区的实际情况,将土地利用分为7个一级类:耕地、园地、林地、建设用地、草地、未利用地和水域。该数据每5年生成一次,且两年内土地利用数据并不会产生较大改变,因此本研究使用2015年的土地利用数据
畜禽养殖量数据	头	30 m空间分辨率	畜禽养殖数据来源于安徽省统计年鉴中各县(市)畜牧业生产情况;将出栏牛、出栏羊、出栏活家禽数量按照氮磷排放量换算成出栏猪的数量
水产养殖量数据	t	30 m空间分辨率	水产养殖数据来源于安徽省统计年鉴中各县(市)渔业生产情况以及各市水产品产量
农村人口数量数据	人	30 m空间分辨率	农村人口数量来源于安徽省统计年鉴中各县(市)农村基本情况
大气沉降数据	t	30 m空间分辨率	大气沉降通量参考研究区已有的相关研究 <sup>[23]</sup>

对上述5种污染源进行计算,依据面积权重法对上述5种污染源计算结果进行空间化处理,生成流域不同污染源的空间分布图。

以上5大污染源计算所需数据基本信息及相关说明如表2所示,均以2017年数据为基础。

#### 1.4 基于冗余分析方法的污染源对湖泊TN、TP的影响分析

冗余分析(RDA, Redundancy Analysis)方法可以通过回归分析结合主成分分析的梯度排序来评价一组变量引起另一组变量变异的贡献程度<sup>[24]</sup>,也能给出各因子引起另一组变量变异的单独解释率<sup>[25]</sup>。但需注意的是,在RDA分析中,计算得到的解释率为污染源对TN和TP变化的复合解释率,而非对TN、TP单独的解释率。与常用的非点源氮磷负荷模拟模型相比,RDA分析仅需提供污染源数据以及氮磷浓度数据即可评价非点源污染对湖泊氮磷浓度变化的影响,不用单独计算TN、TP的负荷量,简化了数据准备与处理工作。

RDA分析主要分析操作在软件Canoco 5中进行。在进行分析之前,首先要对TN、TP数据进行去趋势分析(DCA, Detrended Correspondence Analysis),当所有轴长均小于4时,才可进行RDA分析。在平水期和丰水期的DCA分析中,所有排序轴中的最长梯度值为0.35(小于4),因此可进行RDA分析;其次要对污染源变量进行筛选,考虑其多重共线性问题,不符合要求的变量会被自动删除。

在应用Canoco 5进行RDA分析时,将TN、TP浓度作为物种数据输入,将上述5种污染源数据作为环境因子输入,Canoco 5软件自动对不同量纲的数据进行标准化处理,避免了各污染源因量纲不同而导致的

结果差异,在排序方法中选择RDA即可实现定量化显示流域内非点源污染对巢湖氮磷浓度影响的总体解释率以及不同污染源之间的影响差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 流域NPS不同污染源的空间分布

由图2可知,各种污染源空间分布差异性明显。总体上,面积越大的子流域其污染源数量越多,如面积最大的裕溪河流域内种植地面积、水产养殖数量、农村生活污水排放量以及氮磷大气沉降总量皆占子流域首位,畜禽养殖数量最多的流域是面积排名第二的杭埠河流域,而面积最小的炯炆河流域,仅为裕溪河流域面积的1/15,该流域内各污染源数量相对较少(图2)。但在面积相差较小的子流域内,不同来源特征也有所不同。各污染源的具体分布情况:

(1)流域内种植地面积约为8 400 km<sup>2</sup>,在流域土地利用中占比超过40%。其中,裕溪河流域种植地面积最高,达到了3 600 km<sup>2</sup>,而种植地面积最小的炯炆河流域仅为240 km<sup>2</sup>,二者相差达到14倍。种植地面积排序为裕溪河流域>杭埠河流域>南淝河流域>白石天河流域>派河流域>柘皋河流域>炯炆河流域(图2a)。

(2)流域内牛、羊、猪以及活家禽经过当量换算后,共有约1.2×10<sup>7</sup>头。在子流域内,畜禽养殖量最多的为杭埠河流域,养殖量约为4.7×10<sup>6</sup>头,占总畜禽量的38%,而养殖量最小的炯炆河流域有2.7×10<sup>5</sup>头,仅占杭埠河流域畜禽养殖量的1/17。总畜禽养殖量排序为杭埠河流域>裕溪河流域>南淝河流域>派河流域>白石天河流域>柘皋河流域>炯炆河流域(图2b)。

(3)流域内水产养殖总量约为2.5×10<sup>5</sup> t,在子流

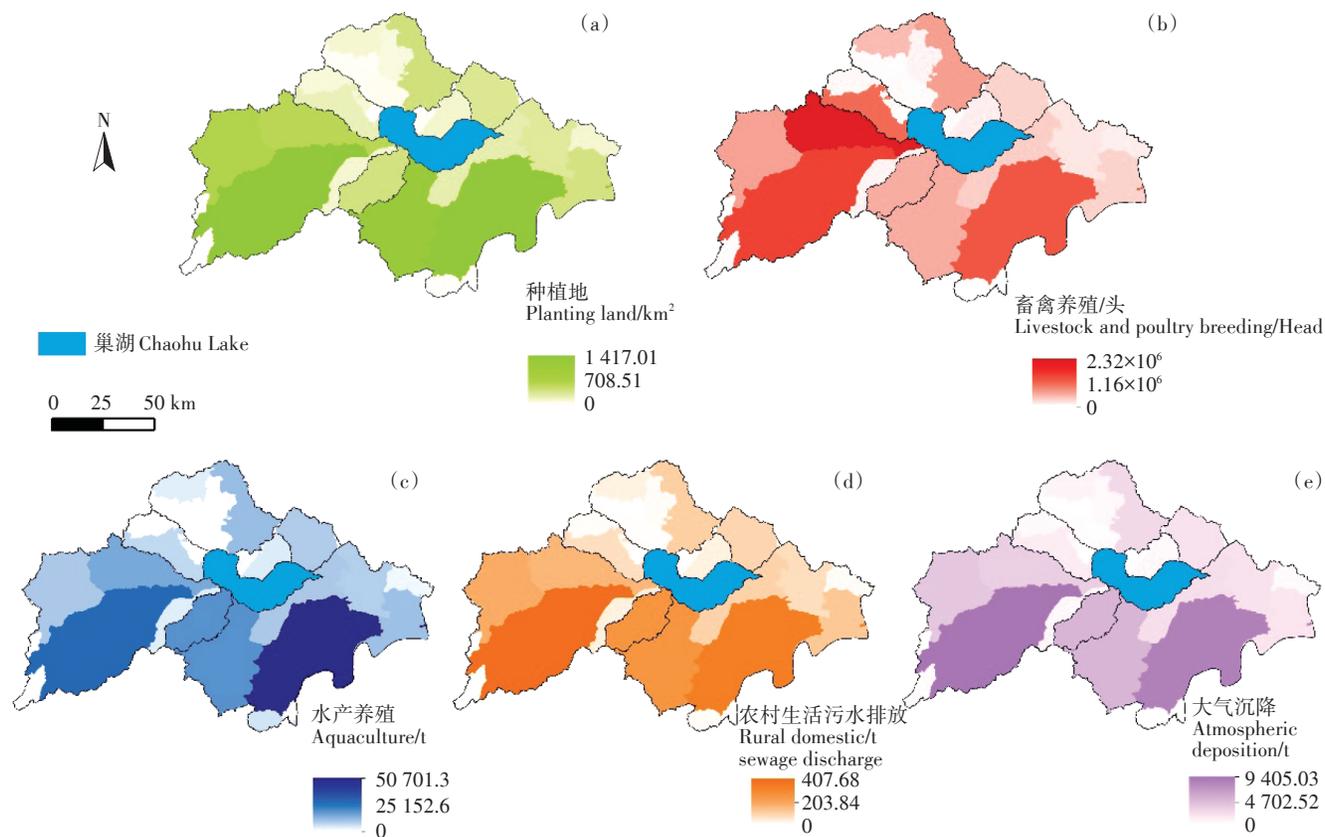


图2 巢湖流域不同污染源的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of different pollution sources in Chaohu Lake basin

域内,裕溪河流域养殖量最高,为 $1.1 \times 10^5$  t,是养殖量最低的烱汤河流域的18倍。总水产养殖量排序为裕溪河流域>杭埠河流域>白石天河流域>南淝河流域>柘皋河流域>派河流域>烱汤河流域(图2c)。

(4)农村生活污水排放量主要受农村人口数量的影响。流域内农村生活污水总排放量约为 $2.7 \times 10^7$  t,各子流域农村生活污水排放量排序为裕溪河流域>杭埠河流域>白石天河流域>南淝河流域>派河流域>柘皋河流域>烱汤河流域(图2d)。

(5)流域内大气TN沉降量约为 $6.25 \times 10^4$  t,TP沉降量约为 $1.56 \times 10^3$  t。受大气沉降计算方法的影响,子流域内沉降量与子流域面积呈正比。各子流域大气TN和TP沉降总量排序为裕溪河流域>杭埠河流域>白石天河流域>南淝河流域>派河流域>柘皋河流域>烱汤河流域(图2e)。

## 2.2 流域TN、TP浓度时空分异

巢湖2017年平水期(3月)和丰水期(8月)TN、TP浓度变化如图3所示。

从时间上看,TN、TP浓度变化存在一定差异性。TN浓度变化较为稳定,各监测站3月TN浓度均高于

8月,且3月各监测站TN浓度均超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)<sup>[26]</sup>规定的三类水标准( $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),8月除南淝河流域和派河流域监测站点水质超过三类水标准外,其余子流域均可达标。大部分监测站TP浓度表现为8月高于3月,但C10(中焊乡)和C12(巢湖坝口)相反,3月TP浓度略高于8月。各监测站8月TP浓度均超过了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)<sup>[26]</sup>规定的三类水标准( $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),而3月也仅有C8(兆河入湖区)和C9(黄麓)的TP浓度低于三类水的标准。

从空间上看,TN、TP均呈现出较为明显的空间化特征,整体上呈现出巢湖流域东部水质状况优于西部的状态。TN、TP浓度在空间上差异可总结为:C1(南淝河入湖区)、C2(十五里河入湖区)、C3(塘西河入湖区)>C4(派河入湖区)、C6(湖滨)>C5(新河入湖区)>C7(忠庙)、C8(兆河入湖区)、C9(黄麓)>C10(中焊乡)、C11(巢湖船厂)、C12(巢湖坝口)。

## 2.3 NPS对巢湖TN、TP影响的多来源分析

RDA排序如图4所示,虚线箭头表示数量型环境因子,即5种污染源;实线箭头表示物种因子,即TN、

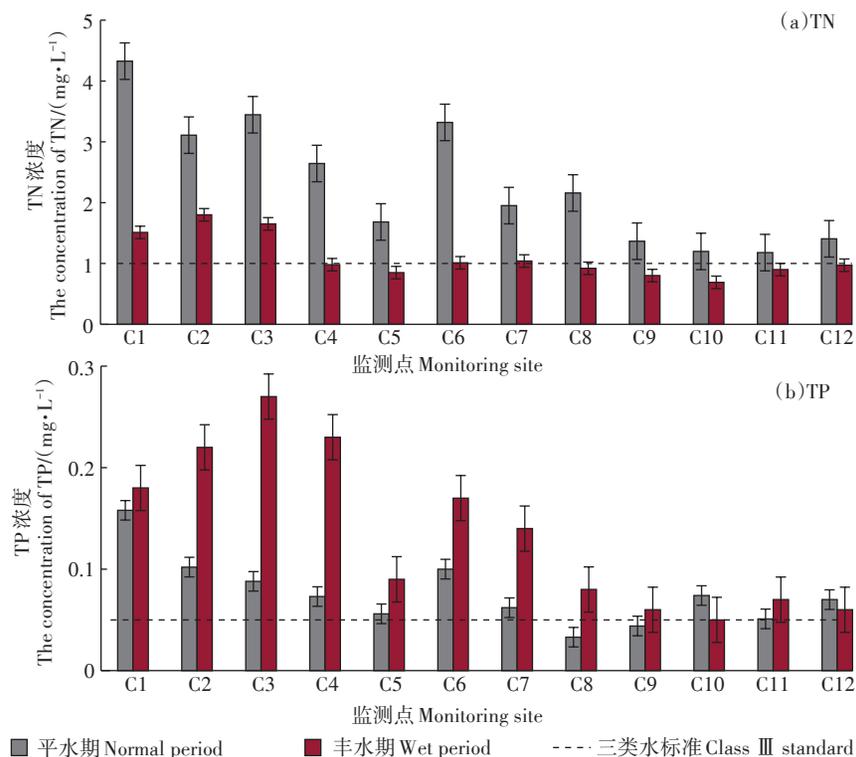
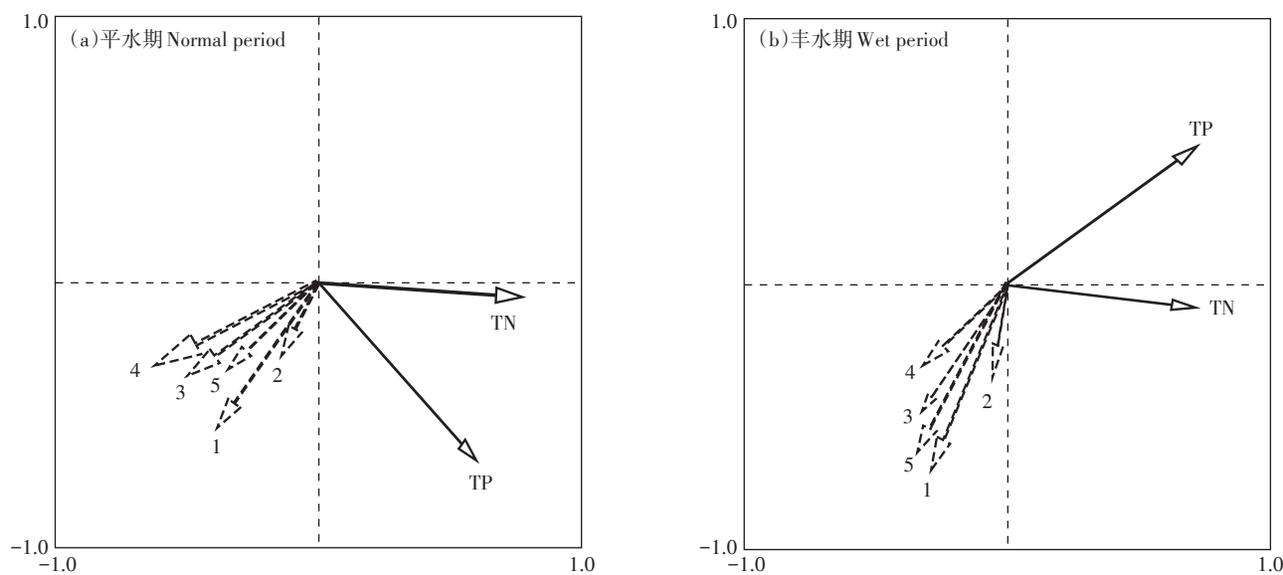


图3 平水期和丰水期各监测站TN、TP浓度变化

Figure 3 Variation of TN and TP concentration of each monitoring site in normal period and wet period



1. 种植地 Planting land; 2. 畜禽养殖 Livestock and poultry breeding; 3. 水产养殖 Aquaculture; 4. 农村生活污水排放 Rural domestic sewage discharge; 5. 大气沉降 Atmospheric deposition

图4 污染源与TN、TP的RDA结果排序图

Figure 4 Redundancy analysis(RDA) ranking of TN and TP from NPS sources

TP浓度,其中物种变量的箭头连线长度可反映环境因子对物种变量的影响程度。从图4可以看出,平水期TN、TP的箭头长度均稍长于丰水期,即平水期非点源污染对巢湖氮磷浓度的整体影响要高于丰水期,

而在平水期和丰水期,非点源污染对巢湖氮磷浓度的总体影响差异以及各个污染源的影响差异可量化为解释率大小的差异。

RDA分析结果中,不同污染源对湖泊氮磷浓度

影响差异的解释率分为两部分,一是5类污染源在平水期和丰水期对氮磷浓度影响的总体解释率;二是5类污染源分别对氮磷浓度变化的解释率大小。具体结果表现如下:

(1)平水期(3月)流域非点源污染对巢湖TN、TP变化的影响程度略高于丰水期(8月)。5种来源的非点源污染对巢湖氮磷浓度变化的总体解释率如表3所示。RDA分析结果中,各轴解释率为累积解释率,从表3可知,第一轴的解释率远高于其他几轴,因此非点源污染对TN、TP的解释率主要取决于第一轴。其中,3月非点源污染对TN、TP的总体解释率为80.5%,高于8月的71.6%。

(2)由大气沉降和农村生活污水排放引起的非点源污染对巢湖TN、TP变化的影响在平水期和丰水期表现出明显差异(表4)。其中平水期(3月)农村生活污水排放对TN、TP的解释率达到43.8%,而大气沉降仅为6.3%;丰水期(8月)大气沉降解释率达到46.4%,而农村生活污水排放量的解释率下降到7.0%。无论在平水期还是丰水期,二者总和都超过了总解释率的50%,但两种污染源在平水期和丰水期的解释率表现出如此大的差异,需要在后续研究中进行深入分析。

(3)种植地、畜禽养殖以及水产养殖3种污染源对TN、TP的影响程度相差不大,解释率均在10%~20%范围内(表4)。三者解释率在平水期和丰水期略有差异,但差异不大。其中,平水期水产养殖的影响程度相对更高一些,其次是畜禽养殖,种植地影响最低;

丰水期畜禽养殖的影响程度最高,其次是种植地,水产养殖影响最低。虽然3种污染源单独的影响不高,但作为农业生产的3种主要形式,三者解释率之和接近总体解释率的50%。因此,三者都是非点源污染治理与防控过程中不可忽略的重要污染源。

### 3 讨论

本研究在以往研究的基础上,结合研究区的实际情况,在丰水期和平水期两个季节较为全面地考虑了非点源污染的五大重要来源对湖泊氮磷浓度的影响,即种植地、畜禽养殖、水产养殖、农村生活污水排放和大气沉降。

与现有研究相比,本研究再次印证了平水期NPS污染源对湖泊氮磷浓度的影响要高于丰水期,但同时,本研究还进一步发现了不同污染源对湖泊水质影响在季节变化上也存在较大差异。此外,与现有研究相比,本研究发现种植地对湖泊氮磷浓度的影响在一定程度上被高估,而农业养殖(特别是水产养殖)的影响却被以往研究所忽视。

#### 3.1 NPS对湖泊氮磷浓度的影响研究应考虑季节性差异

首先,本研究结果再次印证了在平水期非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响要高于丰水期<sup>[27-28]</sup>。在本研究结果中,平水期(3月)的非点源污染对水质TN、TP的总体解释率为80.5%,稍高于丰水期(8月)的71.6%。造成这种结果的原因可能有两点:①植被的

表3 非点源污染对TN、TP的总体解释率

Table 3 The overall interpretation of water quality by NPS pollution

时间 Time	累积解释率 Cumulative interpretation rate/%				P值 P value	
	第一轴 Axis I	第二轴 Axis II	第三轴 Axis III	第四轴 Axis IV	第一典范轴 First canonical axis	所有典范轴 All canonical axes
平水期(3月)	80.5	85.1	85.2	87.9	0.044*	0.042*
丰水期(8月)	71.6	76.9	78.3	80.8	0.086	0.074

注:\*表示在0.05水平上具有显著性( $P < 0.05$ )。下同。

Note:\* indicates significance at the 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same below.

表4 各污染源对TN、TP变化的解释率

Table 4 Interpretation rate of each NPS source to TN and TP changes

时间 Time	项目 Item	种植地 Planting land	畜禽养殖 Livestock and poultry breeding	水产养殖 Aquaculture	农村生活污水排放 Rural domestic sewage discharge	大气沉降 Atmospheric deposition
平水期(3月)	解释率/%	13.4	17.7	18.8	43.8	6.3
	P值	0.306	0.040*	0.130	0.028*	0.698
丰水期(8月)	解释率/%	13.6	20.0	13.0	7.0	46.4
	P值	0.314	0.144	0.404	0.616	0.034*

截留与缓冲作用。丰水期植被生长旺盛,植被覆盖率显著高于平水期,氮磷等污染物在汇入湖泊的过程中部分被植被吸附与截留,导致流域尺度上输出的氮磷等污染物在输移过程中被削减,从而影响了非点源污染对湖泊氮磷浓度的贡献;②流量原因。丰水期流量大,雨水对输入到湖泊的氮磷等污染物起到了稀释作用,使得污染物浓度降低,从而导致非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响降低。

其次,本研究进一步发现,并非所有污染源都会表现出明显的季节性差异,针对本研究而言,种植地、畜禽养殖和水产养殖这3种污染源的季节差异相对较小,而大气沉降和农村生活污水排放对氮磷浓度的影响在季节上却表现出明显差异性。

从本研究结果来看,由大气沉降带来的非点源污染对湖泊水体污染的影响是不可忽略的,特别是丰水期,其解释率在40%以上。在流域尺度上,由大气沉降带来的TN、TP总负荷可达湖泊总输入量的一半左右<sup>[29]</sup>。因此,在考虑造成水体污染的非点源污染来源时大气沉降也是十分重要的一项。大气沉降分为干沉降和湿沉降两种形式,其中大部分以湿沉降的形式伴随着降水直接落入湖泊或是形成地表径流后汇入湖泊<sup>[30]</sup>,因此受季节性影响较大,在丰水期会给水体造成更加严重的污染,同时在2017年,流域内产业结构不够优化,工矿企业数量繁多,据《安徽统计年鉴》显示,2017年流域所在地级市存在大中型工业企业超700家,且存在一批重污染企业<sup>[31]</sup>,工业产生的部分废气以及燃烧产生的部分污染物等也会以大气沉降的形式返回地面,伴随地表径流汇入湖体,这也是造成丰水期大气沉降解释率在40%以上的原因之一。

丰水期大气湿沉降作用强烈也是导致农村生活污水排放解释率在平水期和丰水期差异较大的重要原因。巢湖流域人口密集,农村人口占比超过60%,且流域内气候条件适宜,农村人居生活方式较为固

定,农村生活污水排放量虽然随季节变化具有一定的差异<sup>[28]</sup>,但在大气沉降的对比下,季节差异可忽略不计。因此,随着丰水期的到来,大气沉降所带来的氮磷污染物对巢湖水体污染影响显著提高时,农村生活污水排放对水体污染的影响程度相对下降。

因此,在进行非点源污染对湖泊氮磷浓度影响的研究时,考虑季节性差异是十分必要的,应在厘清不同季节不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度影响的机理以及作用程度后,有针对性地提出湖泊水体富营养化的防控与治理建议。

### 3.2 种植地对湖泊氮磷浓度的影响在一定程度上被高估

现有研究普遍认为,以农产品种植为主的用地类型,特别是耕地所产生的非点源污染对流域内水体的污染影响重大,其中TN、TP负荷占入湖总量的40%以上<sup>[32]</sup>。但本研究发现种植地对湖泊氮磷浓度的影响存在被高估的可能性。在本研究中,种植地对巢湖TN、TP浓度变化的解释率仅占13%,且在平水期和丰水期没有表现出明显的差异。

造成这一现象的原因可以从以下两方面进行考虑:一方面是在巢湖流域内,种植地主要包含水田、旱地和园地3种类型,其中水田面积在各子流域的平均占比超过95%(表5)。而为了控制灌溉和排水过程水田一般设有沟渠系统,因此可将其视为一个微型水生生态系统,在该系统内植物吸收、矿化作用以及其他复杂的水生过程会对耕作中产生的氮磷污染物进行拦截<sup>[33]</sup>,缓冲了这些污染物向湖泊水体中的迁移;另一方面,以土地利用为切入点的非点源污染研究,在进行土地利用信息提取与分类时,一般不考虑畜禽养殖用地和水产养殖用地,这两种用地类型具有面积较小、分布较散等特点,常因分布在农田周围而被归为耕地一类,这也是造成现有研究结果中耕地所产生的氮磷负荷较高的原因之一。而本研究将畜禽养殖、水产养殖作为单独污染源,与以水田为主的种植用地

表5 巢湖流域种植地类型及面积统计

Table 5 Statistics of planting land type and area in Chaohu Lake basin

类别 Category	杭埠河流域 Hangbu River basin	派河流域 Paihe River basin	南淝河流域 Nanfei River basin	炯炀河流域 Jiongyang River basin	柘皋河流域 Zhegao River basin	白石天河流域 Baishitian River basin	裕溪河流域 Yuxi River basin
水田/km <sup>2</sup>	2 358.79	350.04	962.40	243.96	372.98	429.95	3 350.06
旱地/km <sup>2</sup>	22.51	37.07	3.12	0	6.88	4.57	245.83
园地/km <sup>2</sup>	7.34	24.74	5.36	0	0	3.17	6.82
总计/km <sup>2</sup>	2 388.64	411.85	970.88	243.96	379.86	437.69	3 602.71
水田占比/%	98.75	84.99	99.13	100.00	98.19	98.23	92.99

进行并列分析,发现三者作用相当,解释率之和近50%。因此,种植地、畜禽养殖和水产养殖都是非点源污染防治中不可忽略的重要因素。

但值得注意的是,大量种植地分布在裕溪河流域(图5),其中水田、旱地面积占子流域首位,而裕溪河流域内分布着巢湖流域唯一一条出湖水系裕溪河,因此,裕溪河流域内的污染物会有部分伴随着裕溪河汇入长江,因而流域内种植地对巢湖氮磷浓度的实际贡献可能更低。因此,后续研究应该将污染源的贡献按出湖水系和入湖水系进行分区探讨。

### 3.3 水产养殖的影响应当被重视

畜禽养殖和水产养殖是农业养殖的两种主要方式。以往研究对养殖带来的非点源污染对湖泊水质的影响关注较少,尤其是水产养殖。我国在2000年前后开始对畜禽养殖污染进行研究,并出台了相关政策进行控制<sup>[34-35]</sup>,而相比之下,水产养殖对环境造成的污染并未得到充分重视。巢湖流域以湖泊水体为主导的生态系统,为水产养殖提供了最基本和丰富的生存环境,特别是“十二五”规划后,养殖坑塘的面积以及水产养殖的数量均逐年增长,因此必须考虑其排放的污染物对巢湖水体氮磷浓度的影响。

本研究结果显示,水产养殖对TN、TP的影响程度在平水期和丰水期略有差异,在平水期解释率为18.8%,而丰水期降为13.0%,与种植地的影响相当,甚至在平水期解释率还略高于种植地。水产养殖对巢湖氮磷浓度变化的影响体现在数值上虽然不高,但近年来养殖坑塘的面积以及水产养殖的数量在逐年增长,其产生的氮磷污染物也会相应增加。水产养殖

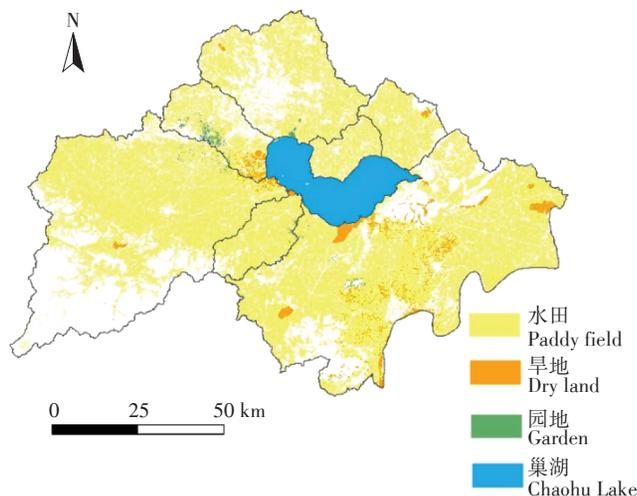


图5 巢湖流域种植地分布

Figure 5 Distribution of planting land in Chaohu Lake basin

业的发展与湖泊水环境变化是相互依赖的,良好的湖泊水质是水产养殖业发展的基本前提与保障,而水产养殖的量与度又同时影响着湖泊水质的变化趋势。因此,在巢湖流域内考虑非点源污染对湖泊水环境的影响时,水产养殖这一重要来源不应被忽略,制定高效合理的养殖政策将促进实现流域内湖泊水环境保护和水产养殖业发展的双赢。

### 3.4 不足与展望

本研究以巢湖流域为例,探究了非点源污染中不同的污染源对湖泊氮磷浓度的影响,目前鲜有研究从非点源污染的多来源角度出发,探究不同的污染来源对湖泊氮磷浓度的影响差异,本研究首次尝试将非点源污染中的五大来源进行综合考虑及差异分析。因此,研究中存在一定不确定性,需要在未来研究中进一步改进。第一,本研究考虑了不同污染源对TN和TP浓度变化的复合影响,但污染源对TN和TP的影响机制和规律可能存在差异,后续研究中值得进一步深入分析;第二,在空间上,未来研究需要对流域内入湖水系和出湖水系进行区别化考虑;第三,在时间上,未来可以考虑进行长时间范围的研究与分析,进一步确定不同的污染源对湖泊水环境的影响程度与差异。

## 4 结论

本研究以巢湖流域为例,基于冗余分析方法,在平水期和丰水期两个季节分别解析了5种重要的农业非点源污染源对巢湖氮磷浓度的影响,揭示了非点源污染的多来源对富营养化湖泊水体氮磷浓度影响的差异,得到如下结论:

(1)整体上,平水期非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响高于丰水期,但不同污染源受季节影响的差异不同。种植地、畜禽养殖和水产养殖这3种污染源受季节因素影响不明显,但大气沉降和农村生活污水排放对湖泊氮磷浓度的影响在平水期和丰水期表现出较大差异。

(2)现有研究中种植地对湖泊氮磷浓度的影响在一定程度上被高估。一是因为现有研究大多将畜禽养殖用地和水产养殖用地与耕地划分为一类进行研究;二是因为湖泊流域水网分布密集,种植地大多以水田为主,而水田对氮磷污染物的输移具有缓冲作用。

(3)水产养殖对湖泊氮磷浓度的影响需要被重视,特别是在在以湖泊水体为主导的生态系统内,水产

养殖业依靠天然的优势在不断发展的同时,也对湖泊水环境产生了威胁。

致谢:感谢国家科技资源共享服务平台-国家地球系统科学数据中心湖泊-流域分中心(<http://lake.geodata.cn>)提供数据支持。

#### 参考文献:

- [1] WANG J, DA L, SONG K, et al. Temporal variations of surface water quality in urban, suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2):387-393.
- [2] 郑一, 王学军. 非点源污染研究的进展与展望[J]. *水科学进展*, 2002, 13(1):105-110. ZHENG Y, WANG X J. Advances and prospects for nonpoint source pollution studies[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(1):105-110.
- [3] 蒋茂贵, 方芳, 望志方. MCR技术在农业面源污染防治中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2001(S1):4-5. JIANG M G, FANG F, WANG Z F. Application of MCR technology in the prevention and control of agricultural non-point source pollution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001(S1):4-5.
- [4] BOERS P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands: causes and remedies[J]. *Water Sciences and Technology*, 1996, 33(4/5):183-189.
- [5] GRIZZETTI B, BOURAOUI F, GRANLUND K, et al. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 169(1):25-38.
- [6] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. *环境科学*, 1998, 19(5):88-92, 97. HE C S, FU B J, CHEN L D. Non-point source pollution control and management[J]. *Environmental Science*, 1998, 19(5):88-92, 97.
- [7] CHERUIYOT C K, MUHANDIKI V S. Estimation of nutrient export coefficients in Lake Victoria basin[J]. *Journal of Water and Environment Technology*, 2014, 12(3):231-244.
- [8] WU J, LU J. Landscape patterns regulate non-point source nutrient pollution in an agricultural watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669:377-388.
- [9] ZHANG P, LIU Y, PAN Y, et al. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3/4):588-595.
- [10] 李博炎, 张饮江, 彭群洲, 等. 土地利用/覆被变化对太湖贡湖湾水质影响的研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(2):243-250. LI B Y, ZHANG Y J, PENG Q Z, et al. Impacts of land use/cover on the water quality of Gonghu Bay in Taihu Lake[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(2):243-250.
- [11] KONG X, DONG L, HE W, et al. Estimation of the long-term nutrient budget and thresholds of regime shift for a large shallow lake in China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52:231-244.
- [12] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3):375-383. HAO F H, YANG S T, CHENG H G, et al. A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3):375-383.
- [13] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5):1511-1519. WANG X L, WANG X X, ZHU L, et al. Spatial analysis on diffuse pollution and algal bloom characteristic with remote sensing in Chao Lake basin[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(5):1511-1519.
- [14] 高超, 朱建国, 窦贻俭. 农业非点源污染对太湖水质的影响: 发展态势与研究重点[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(3):260-263. GAO C, ZHU J G, DOU Y J. Contribution of agricultural non-point source pollution to water quality deterioration in Tai Lake watershed: Recent trends and research priorities[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(3):260-263.
- [15] LI Y, FANXIANG K, MIN Z, et al. The dynamics of microcystis genotypes and microcystin production and associations with environmental factors during blooms in Lake Chaohu, China[J]. *Toxins*, 2014, 6(12):3238-3257.
- [16] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(3):193-202. QIN B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3):193-202.
- [17] 张民, 史小丽, 阳振, 等. 2012—2018年巢湖水质变化趋势分析和蓝藻防控建议[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1):11-20. ZHANG M, SHI X L, YANG Z, et al. The variation of water quality from 2012 to 2018 in Lake Chaohu and the mitigating strategy on cyanobacteria blooms[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1):11-20.
- [18] WU H, YANG T, LIU X, et al. Towards an integrated nutrient management in crop species to improve nitrogen and phosphorus use efficiencies of Chaohu watershed[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272:122765.
- [19] 安徽省人民政府. 安徽省国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. (2016-05-03)[2021-12-01]. <https://www.ah.gov.cn/public/1681/7929311.html>. The People's Government of Anhui Province. The thirteenth Five-Year Plan of Anhui Province[EB/OL]. (2016-05-03)[2021-12-01]. <https://www.ah.gov.cn/public/1681/7929311.html>.
- [20] 陈健, 刘云慧, 宇振荣. 不同土地利用情景下巢湖杭埠-丰乐河流域非点源污染研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4):86-90. CHEN J, LIU Y H, YU Z R. Non-pollution of the Hangbu-Fengle River basin in Chaohu under different land use scenarios[J]. *Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2011, 39(4):86-90.
- [21] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5):1-11. YANG F, YANG S Q, ZHU Y Q, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5):1-11.
- [22] 孙兴旺. 巢湖流域农村生活污染源产排污特征与规律研究[D]. 合

- 肥:安徽农业大学,2010:29-31. SUN X W. Study on characteristics of polluted fountainhead of rural life in Chao Lake basin[D]. Hefei:Anhui Agricultural University, 2010:29-31.
- [23] 魏东霞,李璇,赵禹恒,等.合肥科学岛大气氮磷沉降及对巢湖影响的分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(9):1259-1266. WEI D X, LI X, ZHAO Y H, et al. Analyses of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition at Hefei science island and its impact on Chaohu Lake[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2018, 41(9):1259-1266.
- [24] WEHRDEN H V, HANSPACH J, BRUELHEIDE H, et al. Pluralism and diversity: Trends in the use and application of ordination methods 1990-2007[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(4):695-705.
- [25] 赖江山.生态学多元数据排序分析软件Canoco 5介绍[J].生物多样性,2013,21(6):765-768. LAI J S. Canoco 5: A new version of an ecological multivariate data ordination program[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(6):765-768.
- [26] 国家环境保护总局.地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002. National Environmental Protection Agency. Environmental quality standards for surface water: GB 3838-2002[S]. Beijing: China Environmental Press, 2002.
- [27] 郭玉静,王妍,刘云根,等.普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J].生态学报,2018,38(5):1711-1721. GUO Y J, WANG Y, LIU Y G, et al. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5):1711-1721.
- [28] 吕乐婷,高晓琴,刘琦,等.东江流域景观格局对氮、磷输出的影响[J].生态学报,2021,41(5):1758-1765. LÜ L T, GAO X Q, LIU Q, et al. Influence of landscape pattern on nitrogen and phosphorus output in the Dongjiang River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5):1758-1765.
- [29] 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[J].海洋与湖沼,2007(2):104-110. YANG L Y, QIN B Q, HU W P, et al. The atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007(2):104-110.
- [30] 邓欧平,孙嗣昉,吕军.基于ArcSWAT模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析[J].环境科学,2013,34(4):1284-1290. DENG O P, SUN S Y, LÜ J. Nitrogen non-point source pollution identification based on ArcSWAT in Changle River[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4):1284-1290.
- [31] 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)[J].湖泊科学,2015,27(5):791-798. ZHANG M, KONG F X. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013) [J]. *Journal of Lake Sciences*. 2015, 27(5):791-798.
- [32] HUA L, LI W, ZHAI L, et al. An innovative approach to identifying agricultural pollution sources and loads by using nutrient export coefficients in watershed modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571:322-331.
- [33] LI S, LIU H, ZHANG L, et al. Potential nutrient removal function of naturally existed ditches and ponds in paddy regions: Prospect of enhancing water quality by irrigation and drainage management[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718:137418.
- [34] 高定,陈同斌,刘斌,等.我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J].地理研究,2006,25(2):311-319. GAO D, CHEN T B, LIU B, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2):311-319.
- [35] 徐伟朴,陈同斌,刘俊良,等.规模化畜禽养殖对环境的污染及防治策略[J].环境科学,2004,25(S1):105-108. XU W P, CHEN T B, LIU J L, et al. Environmental pollution, comprehensive prevention and control tactics of the scale and intensify poultry farming[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(S1):105-108.