

基于遥感影像的多方法评估氮元素对太湖水华影响

吴梓隽¹, 孙亚辉²

(1.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 氮元素与太湖水华暴发有强相关性,是太湖水华暴发的重要因子. 论文基于多源数据深入探讨了氮元素对太湖蓝藻水华暴发的影响机制. 结果显示,氮元素通过营养盐释放和循环利用推动水华暴发,与蓝藻生长之间构成正反馈. 高水温下,蓝藻生长与反硝化过程对硝态氮的竞争,削弱了反硝化微生物的脱氮效果,导致太湖水华持续化. 相关性分析表明,不同形态氮与叶绿素 a 之间存在显著相关. 论文从多层次、多角度解析氮元素与太湖水华暴发的关联机制,研究结果可为水体生态修复和水环境管理决策提供科学依据.

[关键词] 氮,蓝藻水华,太湖,藻蓝素,遥感影像,机器学习模型,水环境治理

[中图分类号] X524 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2024)01-0072-08

Study on the Influence of Nitrogen on Water Blooms in Taihu Lake by Using Multiple Methods Based on Remote Sensing Images

Wu Zijun¹, Sun Yahui²

(1.School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Nitrogen has a strong correlation with the outbreak of water blooms in Taihu Lake, and it is an important triggering factor. Based on multi-source data, the mechanism by which nitrogen impacts cyanobacteria blooms in Taihu Lake is discussed. The results prove that nitrogen promotes the bloom outbreak through nutrient release and recycling, forming a positive feedback with the growth of cyanobacteria. At high water temperature, the competition between cyanobacteria growth and denitrification process for nitrate nitrogen weakens the denitrifying effect of denitrifying microorganisms, resulting in the continuous bloom of Taihu Lake. Correlation analysis demonstrates significant correlations between different nitrogen forms and chlorophyll a concentrations. In addition, ammonium nitrogen and total phosphorus are the main factors to explain the change of algae growth, and their driving effects are increasing. Machine learning model results further support that nitrogen and phosphorus have become surplus states. Therefore, reducing exogenous nitrogen input and enhancing denitrification can effectively inhibit the proliferation of cyanobacteria, which is of great significance for controlling eutrophication in Taihu Lake. The correlation mechanism between nitrogen and water bloom outbreak in Taihu Lake is analyzed from multiple levels and perspectives in this paper, aiming to provide scientific basis for water ecological restoration and water environment management decisions.

Key words: Nitrogen, Cyanobacteria bloom, Taihu Lake, phycocyanin, remote sensing image, machine learning model, water environment management

水华是由淡水水体中藻类的大量繁殖而引发的一种自然生态现象,表现特征为水体表面有藻类聚集或水体中有藻类颗粒悬浮^[1]. 蓝藻水华藻类死亡后的分解过程会消耗大量氧气,造成水体溶解氧浓度迅速降低,使水体发黑发臭形成湖泛^[2-3],水中鱼类因缺氧而大量死亡. 近年来,太湖蓝藻水华呈现出由最初的夏季集中暴发向春季扩张的趋势^[4],湖泊里大量的氮元素尚未被细菌反硝化脱除就被藻类吸收利用,致使蓝藻水华暴发态势更为严重,而减少的脱氮量又会促使蓝藻水华态势进一步恶化. 李昌杰等^[5]指出,2017 年 4 月太湖春季温度提前升高,5 月中旬时水温达到 25 ℃ 左右,导致大规模的蓝藻水华从春季一

收稿日期:2023-12-13.

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202310319015Z).

通讯作者:孙亚辉,副教授,研究方向:高效微藻光生物反应器研发、微藻 CO₂ 减排. E-mail:sunyahui@njnu.edu.cn

直持续到初秋季节。

太湖水华的形成主要受气象、水动力条件、水体营养盐浓度、水生态系统结构转变、蓝藻生理特征、不同季节优势藻属的演替等因素的影响^[6-7],其中氮、磷等营养盐过量输入是引起湖泊水体富营养化的重要原因之一。Xu 等^[8]通过现场取样和原位营养盐添加试验测定蓝藻水华生物量变化,发现夏、秋季蓝藻水华发生时氮是主要限制因子,磷是次要限制因子。此外,细菌反硝化脱氮作用和蓝藻的生长繁殖会竞争硝态氮,在气候变暖背景下蓝藻水华提前暴发,氮被细菌反硝化脱除前被藻类大量吸收利用^[5],对蓝藻水华暴发产生巨大影响。因此,氮的可利用性是控制蓝藻水华的主要因素之一。

本文基于遥感影像,利用多种方法对 2000 年以来太湖水华相关研究文献及 2000—2020 年代表年份的多源数据进行分析处理,结合相关性验证,对氮元素影响太湖水华的作用机制进行探索,并综合国内外氮元素与相关环境因子对水华影响的研究结果,对太湖水华暴发原因进行探讨,以期水体生态修复和水环境管理决策提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

太湖位于长江三角洲的南缘,横跨江苏和浙江两省,是中国第三大淡水湖。水域面积约 2 400 km²,湖岸线全长约 393 km,北部有梅梁湖、竺山湖、贡湖 3 个主要海湾,平均水深仅 1.9 m。当地气候温和湿润,属亚热带季风气候,年平均气温 16~18 ℃。

近几十年来,人类活动的过度干扰加速了太湖富营养化的进程,同时全球气候变化日益显著,夏秋季节经常有大范围的蓝藻水华暴发,易导致湖泛的发生。张虎军等^[9]的研究表明,2012—2020 年间,太湖蓝藻水华发生规模以无明显水华和轻度水华为主,但在 2017、2019、2020 年分别出现了 4 次、3 次、3 次中度水华,可见太湖水华形势较为严峻。

图 1 所示为 1996—2020 年间太湖湖区总氮年均值浓度变化趋势。由图 1 可知,20 世纪后期以来太湖湖区年均总氮浓度呈先增加后降低的趋势,且自 2000 年后持续下降,其背后存在较为复杂的作用机制,是入湖总氮、沉积物排放氮与气象因子、藻类竞争生长等多重要素耦合作用的结果,探究其变化原因对太湖水华预测、预警、防治具有重要意义。

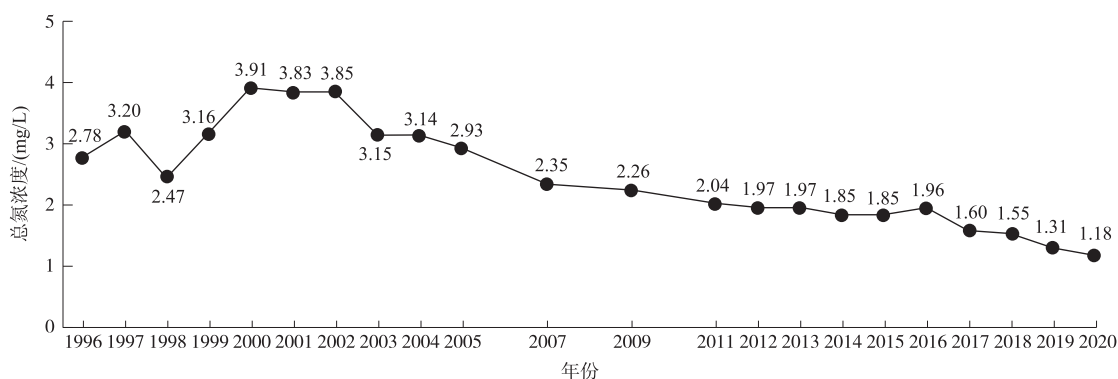


图 1 1996—2020 年间太湖湖区总氮年均值浓度变化趋势

Fig. 1 Variation trend of total nitrogen concentration in Taihu Lake area from 1996 to 2020

1.2 数据来源及处理

本文相关分析数据来源于《太湖健康报告状况》^[10](2007—2018)、2017—2021 年太湖湖泊生态系统研究站的太湖氮磷浓度和藻类生物量数据、2012—2020 年太湖浮标站自动监测数据^[9]、江苏省无锡环境监测中心对太湖国控点位开展的每月例行自动监测数据^[11](监测项目包括总磷、总氮、高锰酸盐指数和生化需氧量)。太湖藻华覆盖度数据来自中国科学院南京地理与湖泊研究所^[12-13],藻华与藻蓝素反演数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心^[14-15](<http://www.geodata.cn>)。本研究选取具有代表性的年份数据进行讨论。

1.3 研究方法

本文通过收集太湖地区的遥感影像数据,获取时间序列的藻华覆盖数据和氮元素浓度数据,探究自

2000 年以来太湖藻华覆盖的变化趋势,并运用统计学方法得到其间的相关性系数,以量化二者之间的关联程度,研究太湖水域藻华覆盖变化与氮元素之间的潜在关系,有助于揭示氮元素在藻华形成和演变过程中的潜在作用。

为深入探讨氮元素对藻华的具体影响机制,构建了 XGB-SHAP 模型. SHAP (SHapley Additive exPlanations) 是一种解释性机器学习算法. SHAP 值源自合作博弈论中的 Shapley 值,用于分配合作参与者对于整体收益的贡献^[16]. 在机器学习中,SHAP 值用于计算每个特征对于模型输出的贡献度,以便得到每个特征对于预测结果的重要性^[17]. 本文中 SHAP 值提供了一种全局性和局部性的解释,既可以用于分析单个预测的贡献,又可以用于了解整体模型的特征重要性^[18-19]. XGBoost(eXtreme Gradient Boosting) 是一种梯度提升算法,用于解决分类和回归问题. XGB-SHAP 模型通过结合 XGBoost 和 SHAP,将 SHAP 解释性方法应用于 XGBoost 模型,提供了更详细的模型解释,使用户能够理解每个特征对于模型预测的影响. 在 XGB-SHAP 模型中,首先使用 XGBoost 算法训练模型. 然后,使用 SHAP 库计算每个特征的 SHAP 值,这些值表示每个特征对于单个样本预测的贡献^[20]. 通过 XGB-SHAP 模型,分析氮元素在不同时间点对藻华覆盖的影响程度,并解释每个特征(包括氮元素浓度)对模型输出的贡献度. 这有助于对氮元素影响机制的深刻理解,进而指导相关水质管理和生态环境保护工作。

本文从多层次、多角度研究氮元素变化对太湖藻华的影响规律,充分理解太湖蓝藻问题的内在机制,旨在为相关领域的决策者制定科学的水环境治理对策提供参考依据。

2 结果与讨论

2.1 太湖水华的时间变化趋势

本文利用遥感影像反演结果统计得到不同时间太湖蓝藻的像元分布,如图 2 所示. 从图 2 可以看出,藻华在夏季和秋末冬初有明显的高值聚集现象,这与气温和水体稳定等因素有关. 通过对比水华发生季节可知,夏、秋两季是蓝藻高爆发的季节. 此外,夏季到秋季是藻华持续暴发的时段,这主要是由利于蓝藻

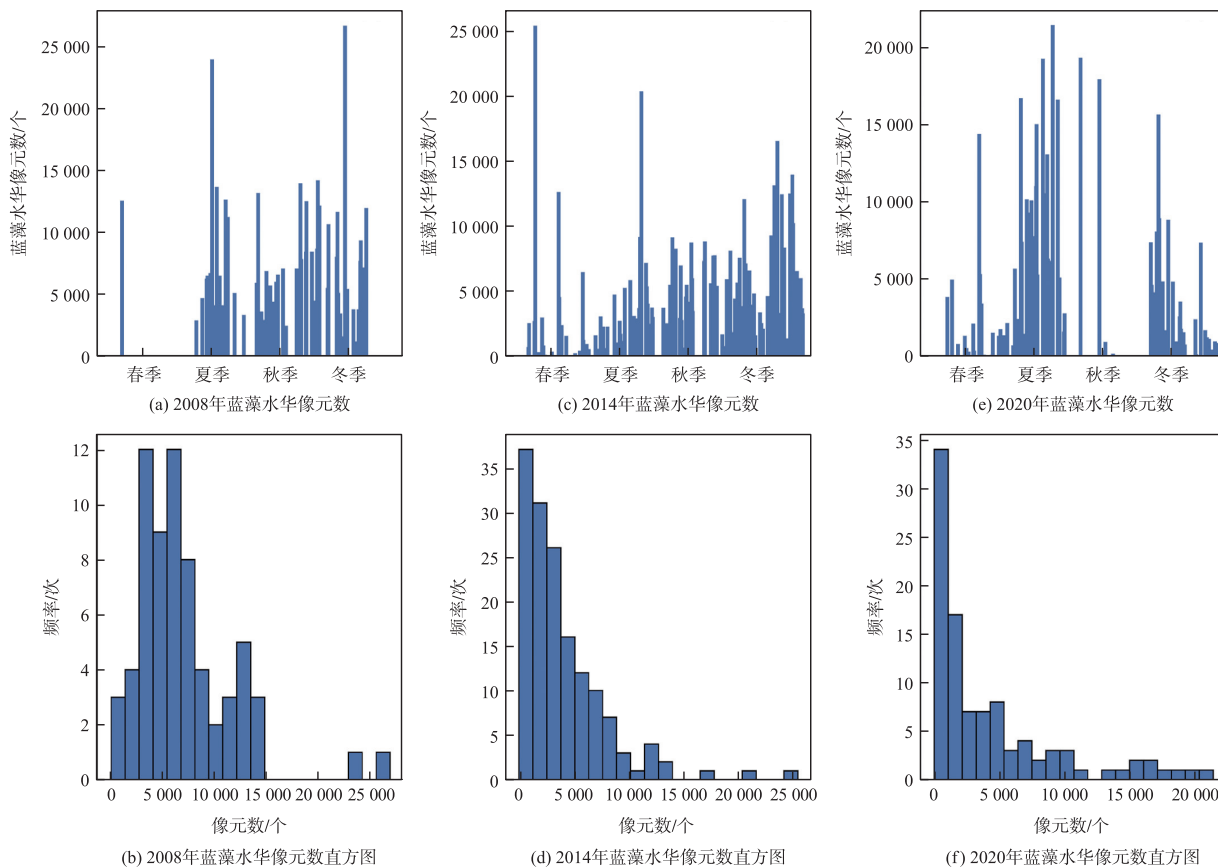


图 2 代表性年份季节变化的藻华值及其直方图分布

Fig. 2 Algal bloom value and histogram distribution of seasonal variation in representative years

大量生长的条件(如高温、强光照等)所导致. 季节性差异可能反映了太湖水体环境和气象因素的季节性变化,包括温度、光照、水流、营养盐等. 定义像元数统计大于 15 000 的藻华暴发为大面积藻华事件,通过图 2 可以发现,2008—2020 年间太湖以低密度藻华为主的暴发次数最多;在 2008—2014 年间,高浓度藻华污染较为少见,但在 2020 年出现明显的高值频数异常,严重聚集大面积藻华的事件频发,这与张虎军等^[9]的研究结论相匹配,这一现象可能与太湖湖区营养盐的输入含量变化等因素有关.

2.2 氮元素与藻华的相关性分析

Wilhelm 等^[21]通过对太湖南北向的大面积观测研究发现,太湖水体中的总氮浓度与蓝藻生物量有着强烈的相关性. 杨柳燕等^[22]的研究表明,太湖不同形态氮浓度呈现出显著的季节变化,硝态氮和铵态氮浓度从春季开始显著降低,直到夏、秋季节一直处于全年较低值,这正是蓝藻生长繁殖并大面积暴发形成水华的时期. Xu 等^[8]通过现场取样和原位营养盐添加测定蓝藻水华生物量变化,得出春、冬季浮游植物的生长主要受到磷限制,而夏、秋季蓝藻水华发生时氮是主要限制因子,磷是次要限制因子. 为了探究不同形态氮源对太湖水华爆发的影响,本文以叶绿素 a(Chl-a)的含量表征太湖蓝藻水华暴发的程度,对太湖的铵态氮、硝态氮、溶解性总氮、总氮与 Chl-a 含量进行皮尔逊相关性分析,并运用双尾检验,结果如表 1 所示.

表 1 显示,总氮、铵态氮、硝态氮、溶解性总氮均与 Chl-a 呈现显著相关性,且铵态氮、硝态氮、溶解性总氮与 Chl-a 的相关度分别为-0.101、-0.327、-0.302,均呈现显著负相关,Chl-a 与总氮之间呈现相关度为 0.380 的显著正相关. 可知,太湖中氮元素浓度与蓝藻的生物量有强烈的相关性.

氮元素与蓝藻水华的关系不是单纯的线性相关, Scheffer 等^[23]的研究指出,在一定浓度以下,氮浓度升高促进了蓝藻水华的生长,但是超过某临界值后,氮浓度的增加可能抑制了蓝藻水华的生长.

如图 3 所示,通过对 2000—2005 年的采样点数据进行相关性分析可知,总氮与 Chl-a 之间的相关性为-0.32,铵态氮与 Chl-a 的相关性为-0.37,在这个时期,总氮和铵态氮对蓝藻水华的发展具有一定的抑制作用,二者在湖泊内的绝对含量可能超过了临界值,从而抑制了蓝藻水华的生长,这与图 1 中氮元素在 2000 年左右的含量增高的结论相符. 同时期内,水体温度是影响 Chl-a 的关键因子,除氮元素外还有其他环境因素(如磷、温度、光照等)可能对水体生态系统产生影响,进而影响 Chl-a 的含量与藻华生长,同时也可能存在多因子间的耦合作用进而影响上述相关性的结果^[24].

如图 4 所示,通过对 2019 年和 2020 年采样点的数据进行分析可知,太湖水样中不同形态氮元素和 Chl-a 的相关性呈现出较为复杂的结果. 硝态氮与 Chl-a 之间存在负相关关系($r=-0.19$),高浓度硝态氮可能会抑制 Chl-a 的生成. 铵态氮则与 Chl-a 呈现微弱正相关关系($r=0.12$),表明一定量的铵态氮有利于藻类 Chl-a 的积累. 溶解性总氮($r=0.042$)和总氮($r=0.079$)与 Chl-a 几乎无关联,表明单一营养元素的限制作用被削弱,太湖富营养化可能受复合因子影响较大.

通过长时间跨度内相关性参数的比较可知,2000 年左右与 2019—2020 年实测数据中总氮与 Chl-a 相关性由负相关转为正相关,氮元素的抑制作用下降. 太湖的营养盐水平虽然在一定程度上限制了蓝藻的生长和蓝藻水华的强度,但仍足以维持蓝藻水华的持续发生;当营养盐水平超过蓝藻水华发生的阈值,营养盐将不再成为限制蓝藻水华发生的因素^[25]. 这表明在当前条件下,营养盐水平已足够维持水华的持续发生,太湖蓝藻水华的发生受到物候学因素的影响更为显著. 而这一转变型的发现可以支持建立更科学准确的太湖水华机制模型,为模型预测与治理决策提供动态保障.

表 1 不同形态氮与叶绿素 a 的相关性分析
Table 1 Correlation analysis of different forms of nitrogen and Chlorophyll a

氮形态	铵态氮	硝态氮	溶解性总氮	总氮
相关系数	-0.101 **	-0.327 **	-0.302 **	0.380 **

注:“**”表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著.

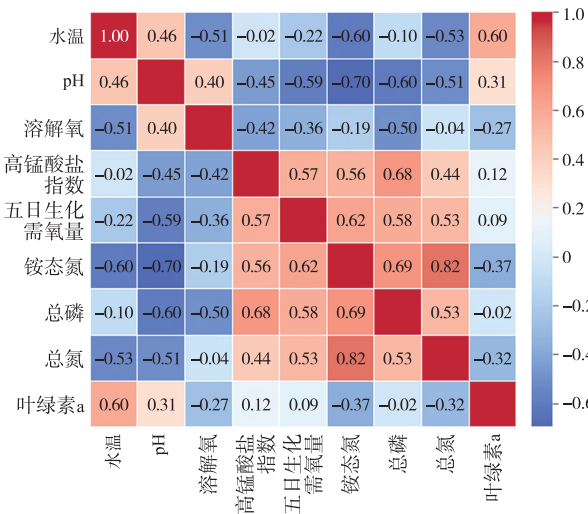


图 3 2000—2005 年采样点实测数据间的相关性
Fig. 3 Correlation between measured data at sampling points from 2000 to 2005

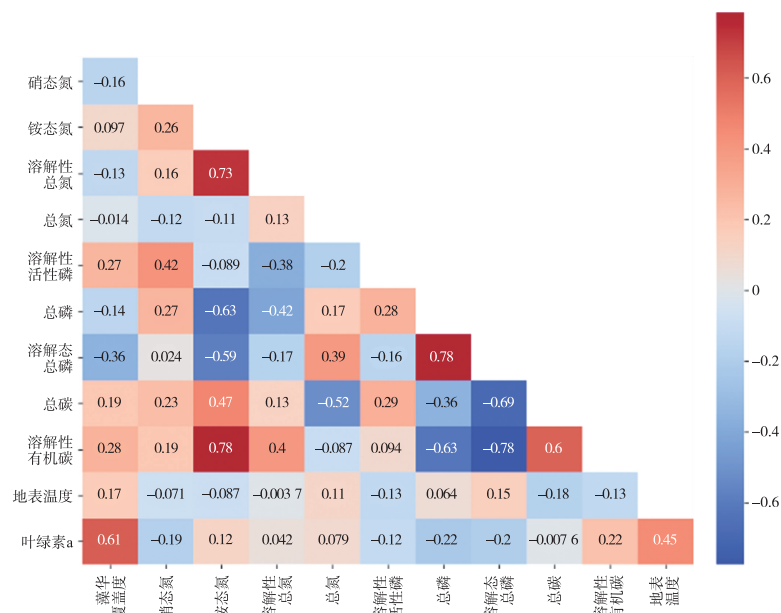


图 4 2019—2020 年采样点实测数据间的相关性

Fig. 4 Correlation between the measured data of the sampling points in 2019 and 2020

2.3 基于机器学习的贡献度解释与建模

本文基于 2000—2005 年以及 2019—2020 年的采样点数据,选取水温(W_TEMP)、溶解氧(DO)、总氮(N_TOTAL)、铵态氮(NH₄_N)、总磷(P_TOTAL)、平均湖面风速(AVG Windspeed)、总降水(SUM rain)、pH、铵态氮、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD)等指标^[26-27],构建了机器学习模型以解释不同因素对于太湖藻华的驱动作用,如图 5 所示. 通过所构建的 XGB-SHAP 贡献度解释模型发现,水温、溶解氧、pH 值对 Chl-a 的变化规律具有较高的解释度,这表明物理化学环境条件对藻类生长的影响起到重要作用. 从营养盐角度看,总氮与铵态氮对 Chl-a 的解释贡献率也较高,说明氮元素仍是太湖富营养化及藻华的关键控制因子之一.

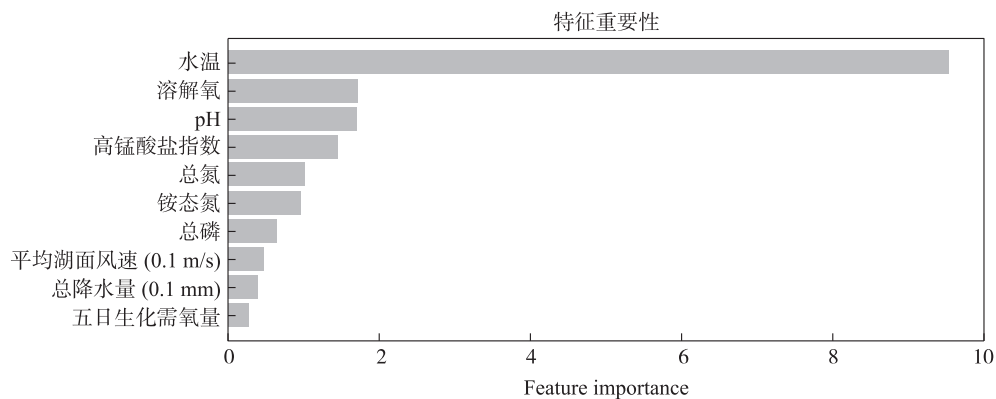


图 5 2000—2005 年模型中不同特征的贡献度

Fig. 5 The contribution degree of different features in the 2000–2005 model

如图 6 所示,模型结果显示不同浓度范围的总氮均对 Chl-a 水平有显著贡献,低总氮水平时的影响尤为显著,突显了藻类对氮浓度变化的更高敏感性,尤其是在氮稀缺的情境下. 低铵态氮浓度对 Chl-a 贡献率较大,这表明在铵态氮相对短缺时,藻类生长对其变化更为敏感,而当铵态氮充足时,其贡献度在 0 附近,其他因子转为限制因素.

从图 7 对 2019—2020 年数据模型分析可知,营养盐对 Chl-a 解释的贡献率仍然较高,其中铵态氮最高,总磷其次. 相比而言,溶解性总氮(TDN)、总氮和溶解态总磷(TDP)的解释力较弱. 由图 8 的特征依赖关系中,总磷对 Chl-a 贡献随浓度变化而转变,低浓度时主要为负贡献,高浓度时为正贡献,可能与总磷从限制性营养元素转变为过剩状态有关^[28]. 总氮对 Chl-a 的 SHAP 值贡献度波动区间为-5 至 5 之间,主要

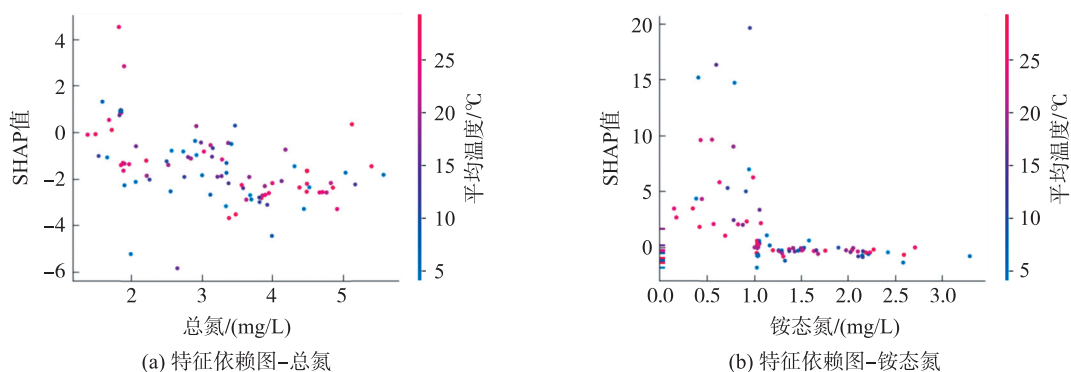


图 6 2000—2005 年铵态氮与总氮对于 Chl-a 贡献度的特征依赖图

Fig. 6 Feature dependent graph of contribution of ammonium nitrogen and total nitrogen to chlorophyll a from 2000 to 2005

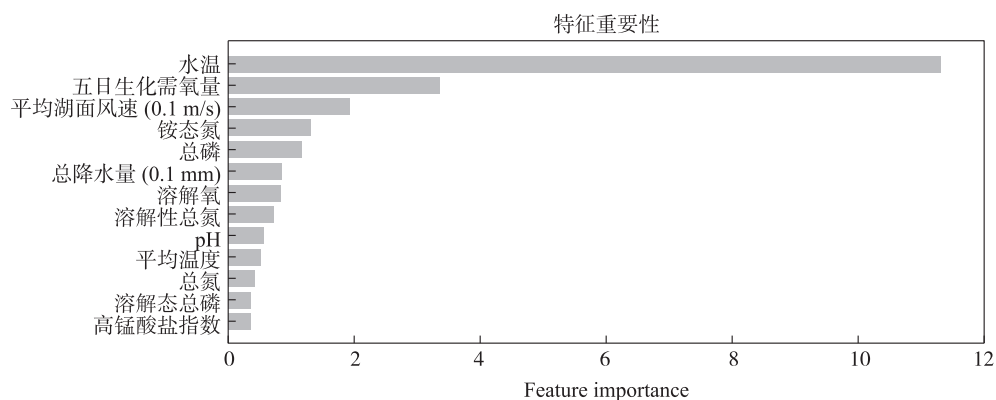


图 7 2019—2020 年模型中不同特征的贡献度

Fig. 7 The contribution degree of different features in the 2019–2020 model

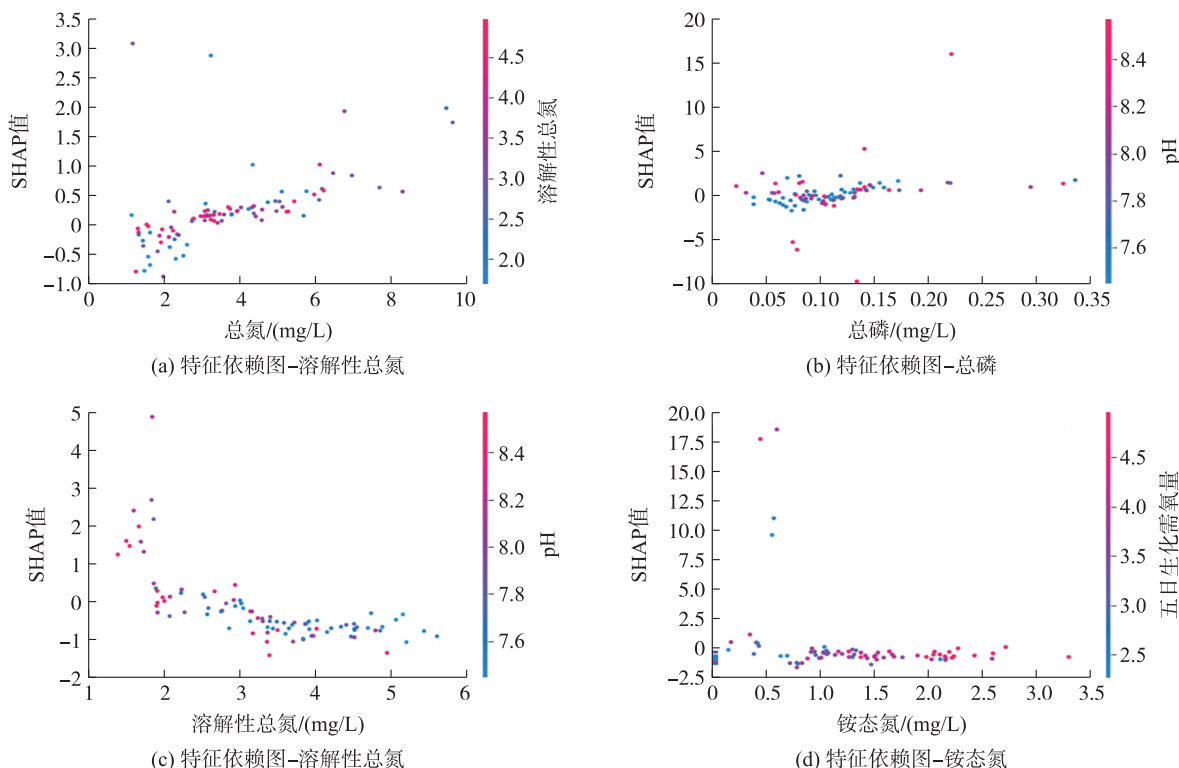


图 8 2019—2020 年模型中总氮等因素对于 Chl-a 贡献度的特征依赖图

Fig. 8 Feature dependent graph of contribution of total nitrogen and other factors to chlorophyll a in the 2019–2020 model

集中分布在接近0的狭窄区域内,不同浓度总氮对Chl-a的贡献度较为一致,不同浓度贡献变化小。TDN贡献度与浓度增加对应先增后降,由正转负,临界值效应明显。铵态氮不同浓度贡献变化小,主要体现负贡献,处于过剩抑制区域。

通过对2000—2005年和2019—2020年两个时段太湖水体监测数据集的对比分析可以看出,氮磷元素在驱动藻类生长和水华过程中作用机制存在显著演变。具体来说,近20年期间氮磷对解释叶绿素a变化的贡献率整体显著提升,特别是铵态氮上升最快,成为主控变量之一。这表明氮磷元素已由过去的限制性营养盐转变为当前的过剩驱动因子^[27]。

从降解机理上来看,由于蓝藻的生长繁殖和细菌反硝化过程对氮的共同需求,会使两者产生相互的影响^[5]。水体在到达蓝藻可以大量生长繁殖的温度之前,所含的氮元素会被反硝化作用不断脱除^[21]。随着水体温度的升高,蓝藻开始复苏并大量生长繁殖^[29],与反硝化作用产生竞争,共同利用湖泊中的氮。和反硝化作用的结果不同的是,蓝藻吸收的氮并没有脱离湖泊,而是以藻体有机氮的形式短暂储存在湖泊内^[30],蓝藻死亡降解后氮又会以有机氮和铵态氮的形式重新回到水体中^[31]。简言之,高水温时反硝化脱氮作用和蓝藻的生长繁殖会竞争硝态氮,被蓝藻争夺的氮元素由于暂时储存和循环利用^[32],造成太湖持续性水华。而在气候变暖背景下蓝藻水华提前爆发,氮被反硝化脱除前被大量吸收利用^[5],大大削弱了反硝化脱氮对湖泊中氮元素的利用,加剧太湖蓝藻水华形势^[32]。上述过程解释了氮元素如何从限制因子转变为促进因子,模型结果验证了这一转型,特征依赖关系的演变进一步支持这一转型。两个时期氮磷从负相关区移至正相关区,由抑制转为持续促进藻类生长,氮磷之间的拮抗关系已转变为协同同步增加的同增关系,共同推动更高级别的藻华暴发。二者互为支撑,共同阐明氮元素在当下太湖水系统中的过剩和驱动作用,上述差异是太湖营养状态和内生机制变迁的量化证据。

2.4 氮视角下太湖蓝藻水华的治理对策

降低水体中氮浓度是控制水体富营养化的关键所在,其中包括控制太湖外源氮污染输入、加强湖内氮污染的去除两方面^[24,33]。减少氮污染输入是目前最直接、最有效且最易操作的控制方法,可通过源头控制实现治理。主要的污染控制包括制定并实施更严格的土地政策、控制化肥的使用、在流域尺度上添加土壤改良剂^[34-35],实现农业面源污染控制;严格控制城市工业、城市生活中各类有形与隐形的污染排放;文旅服务相关行业加强行动者环境保护宣传,通过建立界碑、拉警戒带等方式最大程度避免游客无意识对环境造成污染等。强化湖内氮污染的去除也很关键,对于水华暴发较为严重的区域,使用其他物理化学方法强化湖泊内氮、磷营养盐的去除,建立良性循环的湖泊水生态系统^[21];对于水华暴发相对缓和的区域,则采用生态调控的方法改变湖泊水生态系统结构来抑制蓝藻生长^[33]。此外还应当重视反硝化脱氮作用,通过培育水生植物、搭建生态浮床等手段提高反硝化效率^[5],在蓝藻水华暴发前尽可能减小湖泊内氮的浓度。

3 结论

(1)高水温时反硝化脱氮作用和蓝藻的生长繁殖会竞争硝态氮,被蓝藻争夺的氮元素由于暂时储存和循环利用的机理,造成了太湖持续性水华。氮元素与蓝藻细胞生长之间存在一定的循环强化机制。

(2)2017—2021年太湖氮磷浓度和藻类生物量数据验证表明,Chl-a与铵态氮、硝态氮、溶解性总氮间呈现显著相关性。太湖中总氮浓度与蓝藻的生物量有着强烈的相关性,夏、秋季蓝藻水华发生时,氮是主要限制因子。

(3)构建机器学习模型解释了不同因素对于太湖藻华的驱动,结果表明氮元素是驱动太湖藻华的关键因子,该模型可为太湖水质管理和藻华防控提供科学依据。

(4)近二十年来太湖富营养化程度加剧,氮元素已由过去的限制性营养盐转变为当前的过剩驱动因子,氮元素的限制作用下降。机器学习模型的分析结果有助于识别这种关联。

[参考文献](References)

- [1] 生态环境部. 水华遥感与地面监测评价技术规范(试行):HJ 1098-2020[S]. 北京:中国环境出版集团,2020.
- [2] 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[J]. 湖泊科学,2009,21(3):314-328.

- [3] 商兆堂,任健,秦铭荣,等. 气候变化与太湖蓝藻暴发的关系[J]. 生态学杂志,2010,29(1):55-61.
- [4] SHI K,ZHANG Y L,ZHANG Y B,et al. Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data[J]. Environmental Science & Technology:ES&T,2019,53(5):2324-2331.
- [5] 李昌杰,许海,詹旭,等. 反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响[J]. 环境科学,2023,44(9):4977-4984.
- [6] BROOKS B W,LAZORCHAK J M,HOWARD M D A,et al. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems? [J]. Environmental Toxicology and Chemistry,2016,35(1):6-13.
- [7] PAERL H W,OTTEN T G. Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls[J]. Microbial Ecology: An International Journal,2013,65(4):995-1010.
- [8] XU H,PAERL H W,QIN B Q,et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. Limnology and Oceanography,2010,55(1):420-432.
- [9] 张虎军,宋挺,朱冰川,等. 太湖蓝藻水华暴发程度年度预测[J]. 中国环境监测,2022,38(1):157-164.
- [10] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告[N/OL]. [2019-12-05]. https://www.tba.gov.cn/slbthlyglj/thjkzkgb/content/slth1_09f7d6b21629439f9891c7fd70ad49d8.html.
- [11] 江苏省生态环境厅. 太湖流域国控重点污染源自动监控月报(第1期)[EB/OL]. [2023-03-04]. https://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2022/3/4/art_83585_10365210.html.
- [12] DUAN H T,MA R H,HU C M. Evaluation of remote sensing algorithms of cyanobacteria pigments retrievals during spring bloom formation in several lakes of East China[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal,2012,126:126-135.
- [13] DUAN H T,MA R H,ZHANG Y Z,et al. A new three-band algorithm for estimating chlorophyll-concentrations in turbid inland lakes[J]. Environmental Research Letters,2010,5(4):044009.
- [14] QI L,HU C M,DUAN H T,et al. A novel MERIS algorithm to derive cyanobacterial phycocyanin pigment concentrations in a eutrophic lake: Theoretical basis and practical considerations[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal,2014,154:298-317.
- [15] ZHANG Y C,MA R H,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[J]. Remote Sensing,2015,7(8):10523-10542.
- [16] LUNDBERG S M,LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach,USA:NIPS,2017.
- [17] 王子恒,李鹏,陈静. 基于特征选择和模糊类支持度的模糊分类关联规则挖掘算法[J]. 软件,2023,44(8):15-22.
- [18] LUNDBERG S M,ERION G,CHEN H,et al. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees[J]. Nature Machine Intelligence,2020,2(1):56-67.
- [19] LANDECKER W,THOMURE M D,BETTENCOURT L M A,et al. Interpreting individual classifications of hierarchical networks[C]//2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining(CIDM). Singapore:IEEE,2013.
- [20] 王一旭. 流域水环境分区分类管控体系研究——以太湖流域浙江片区为例[D]. 杭州:浙江大学,2021.
- [21] WILHELM S W,FARNSLEY S E,LECLEIR G R,et al. The relationships between nutrients,cyanobacterial toxins and the microbial community in Taihu(Lake Tai),China[J]. Harmful Algae,2011,10(2):207-215.
- [22] 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[J]. 湖泊科学,2019,31(1):18-27.
- [23] SCHEFFER M,HOSPER S H,MEIJER M L,et al. Alternative equilibria in shallow lakes[J]. Trends in Ecology & Evolution,1993,8(8):275-279.
- [24] BONILLA S,AGUILERA A,AUBRIOT L,et al. Nutrients and not temperature are the key drivers for cyanobacterial biomass in the Americas[J]. Harmful Algae,2023,121:102367.
- [25] 张民,阳振,史小丽. 太湖蓝藻水华的扩张与驱动因素[J]. 湖泊科学,2019,31(2):336-344.
- [26] CAO H Y,HAN L,LI L Z. A deep learning method for cyanobacterial harmful algae blooms prediction in Taihu Lake,China[J]. Harmful Algae,2022,113:102189.
- [27] XIAO X,PENG Y Z,ZHANG W,et al. Current status and prospects of algal bloom early warning technologies:A review[J]. Journal of Environmental Management,2024,349:119510.
- [28] YIN H B,YIN P,YANG Z. Seasonal sediment phosphorus release across sediment-water interface and its potential role in supporting algal blooms in a large shallow eutrophic Lake(Lake Taihu,China)[J]. Science of The Total Environment,2023,896:165252.

- 2022,38(10):1426-1434.
- [17] 宋龙,李惠,倪梁红,等. 基于 BOPPPS 教学模式在生药学课程的设计和实现[J]. 时珍国医国药,2022,33(12):3032-3033.
- [18] 吕军城,王清华,王素珍,等. 医学统计学课程优化及 BOPPPS 教改实践初探[J]. 中国卫生统计,2022,39(2):296-298.
- [19] 邓朝晖. 如何提高学生对专业课的兴趣[J]. 中国科教创新导刊,2007(8):22.
- [20] 习近平. 为全面依法治国培养更多优秀人才[N]. 人民日报,2017-05-05(2).
- [21] 刘清生. 新时代高校教师“课程思政”能力的理性审视[J]. 江苏高教,2018(12):91-93.
- [22] 郑少华,肖春明. 高等教育翻转课堂模式“本土化”的反思[J]. 创新创业理论与实践,2021,4(10):22-24.

[责任编辑:严海琳]

(上接第 79 页)

- [29] 吴晓东,孔繁翔,张晓峰,等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究[J]. 环境科学,2008,29(5):1313-1318.
- [30] BAULCH H M, STANLEY E H, BERNHARDT E S. Can algal uptake stop NO_3^- pollution? [J]. Nature, 2011, 472:86-89.
- [31] 朱梦圆,朱广伟,王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学,2011,32(2):409-415.
- [32] 林伟,李玉中,李昱佳,等. 氮循环过程的微生物驱动机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(6):1146-1155.
- [33] 韩菲尔,赵中华,李大鹏,等. 利用稳定同位素(^{15}N)示踪技术研究浮游藻类氮素吸收速率特征[J]. 海洋与湖沼, 2019,50(4):811-821.
- [34] 李安定. 海河干流水华暴发特征及对 DOM 和重金属生物有效性的影响[D]. 北京:北京科技大学,2021.
- [35] SINGH Y P, ARORA S, MISHRA V K, et al. Plant and soil responses to the combined application of organic amendments and inorganic fertilizers in degraded sodic soils of indo-gangetic plains[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019,50(19/20/21/22):2640-2654.

[责任编辑:严海琳]