DOI:10.15928/j.1674-3075.202311090321

2022年夏季汉江中下游水华生消驱动因子及其贡献率量化研究

查悉妮[1,2],辛小康[1,2],付 婷[1,2],李 建[1,2],白凤朋[1,2],林 枭[1,2],舒 鹏[3]

(1.长江水资源保护科学研究所,湖北 武汉 430051;
2.长江水利委员会湖库水源地面源污染生态调控重点实验室,湖北 武汉 430051;
3.武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:为探究2022年夏季长江流域"汛期反枯"极端水文条件下汉江中下游首次出现的蓝藻水华成因,选取叶绿素浓度为水华表征指标,考虑各环境因子间的多重共线性关系,采用偏最小二乘回归(PLSR)量化了不同环境因子对汉江中下游仙桃、宗关断面蓝藻水华生消的贡献率。结果表明:(1)仙桃断面叶绿素a浓度与水温、pH、溶解氧和总磷均呈显著正相关关系,与氮磷比呈显著负相关关系;宗关断面叶绿素a浓度与水温、pH、溶解氧均呈显著正相关关系,与日均水位、水位日变幅、流量、总磷和氨氮均呈显著负相关关系;(2)溶解氧、pH和水温对水华生消的贡献程度较高,对仙桃断面的贡献率分别为15.18%、13.68%和14.50%,对宗关断面的贡献率分别为18.06%、15.93%和15.65%;(3)基于偏最小二乘路径模型(PLS-PM)的环境因子解析显示,气象因子是2022年夏季汉江中下游蓝藻水华暴发的诱导因子,水华"萌发"时段可能与汉江中下游涝旱急转时段重叠。建议后续研究结合准确的中长期气象预报信息,在涝旱急转时段优化汉江中下游水华防控调度的下泄流量与下泄时机,提高水华防控效果。

关键词:蓝藻水华;环境因子;量化归因;贡献率;汉江中下游

中图分类号:X171.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2024)01-0143-09

自1992年春季汉江首次发现水华以来,至今已累计发生了10余次较大规模水华事件,优势藻种为硅藻。已有研究表明,汉江中下游水华大多发生在春季(1–3月),影响范围主要在钟祥至河口江段(李建等,2020)。近年来,汉江中下游水华持续时间不断延长,影响范围不断上溯,2018年汉江春季水华超过30 d,范围上溯至皇庄附近,覆盖整个兴隆库区。随着气候变化、梯级水库运行以及城镇入河污染物排放增加,汉江中下游水华暴发风险日益突出,严重威胁流域水环境安全、水生态安全和城镇供水安全(李建等,2022)。

河流水华暴发与多种环境因子有关,目前普遍认为引起河流浮游藻类大量繁殖并暴发水华的环境因子主要包括营养盐、气象、水动力条件(Huisman et al,2018;田晶等,2022)。自然水体中浮游植物的生长受有机质和营养盐等生源因素的限制,较高的营养盐浓度是河流水华暴发的物质基础(Hilton et al, 2006)。大量研究表明,氮、磷、硅浓度可以影响河流中浮游藻类的优势藻种,营养物的积累促进了浮游藻类的生长和繁殖,但营养物质超过一定含量时将成为物质基础而不再有限制作用(Jon & Gary,2000; Mhamdi et al,2007;Bowes et al,2012; Chislock et al, 2014; Yan et al,2017;辛小康等,2019)。在气候变化大背景下,气象条件是河流水华发生的重要增益条件之一。近年来汉江下游气温显著升高,干暖气候特征为河流水华暴发提供了适宜的条件,且2008年以后水华发生季节时间有明显前移趋势(夏瑞等,2020)。当汉江下游气温高于同期3℃且持续5 d以上时,水华暴发的概率大为增加(Xin et al,2020)。水动力条件是影响河流水华生消重要且敏感的驱动因素,通常河流中浮游藻类生物量与流量成反比(Filardo & Dunstan, 2011; Mosley et al, 2012; Klaus et al, 2015);增大流量和流速可以增加水流对藻类表面的剪切应力,缩短浮游藻类在河段中的传输和滞留时间,抑制藻类生长,使其无法大量聚集,从而抑制水华暴发(Anggara Kasih & Kitada, 2004)。

2022年夏季长江流域出现罕见干旱,汉江中下游来水严重偏枯,干流首次发生蓝藻水华。由于蓝

收稿日期:2023-11-09

基金项目:国家重点研发项目(2021YFC3200304);湖北省面上基金项目(2022CFB374)。

作者简介:查悉妮,1994年生,女,博士,工程师,主要从事生态水文研究。E-mail:zhaxini228@163.com

通信作者:辛小康,1985年生,男,博士,高级工程师,主要从事水资源保护研究。E-mail:xin.xiaokang@163.com

藻水华能产生各种天然毒素，是对人类健康危害最为严重的藻类之一，被称为“生态癌症”。本次监测到的蓝藻以平裂藻属（*Merismopedia*）、假鱼腥藻属（*Pseudanabaena*）和颤藻属（*Oscillatoria*）为主；平裂藻毒性未见报道，假鱼腥藻、颤藻均有毒性。已有学者分析了2022年夏季汉江中下游蓝藻水华成因（陈峰等,2023），但此前的研究尚未解析不同环境因子对水华生消的贡献程度。本研究通过梳理2022年夏季汉江中下游水华生消及各环境因子的动态变化，量化环境因子对水华生消影响的贡献率，旨在为汉江中下游水华防控提供科学依据和决策支撑。

1　材料与方法

1.1　区域概况

汉江是长江的最大支流，汉江干流丹江口以上河段为上游，平均比降0.06%以上，长度925 km，占干流总长59%，流域面积9.52万km²，约占全流域总面积的60%；丹江口至皇庄河段为中游，平均比降约0.02%，长度270 km，占干流总长的17%，流域面积4.68万km²；皇庄以下河段为下游，河床比降小，平均为0.01%，长度382 km，占干流总长的24%，流域面积1.70万km²。本研究选取汉江中下游，区域水系及站点分布如图1所示。

1.2　数据来源

为解析不同环境因子对2022年夏季汉江中下游水华的影响，本研究收集的数据包括气象、水文水动力及水质/理化数据（表1）。其中，老河口、钟祥及天河站降雨量、气温和风速等气象数据来源于中国气象局国家气象信息。仙桃站水位、流量等水文水动力数据来源于湖北省水文水资源中心。仙桃和宗关断面水质/理化数据来源于国家地表水水质自动监测实时数据发布系统和长江水资源保护科学研究所。

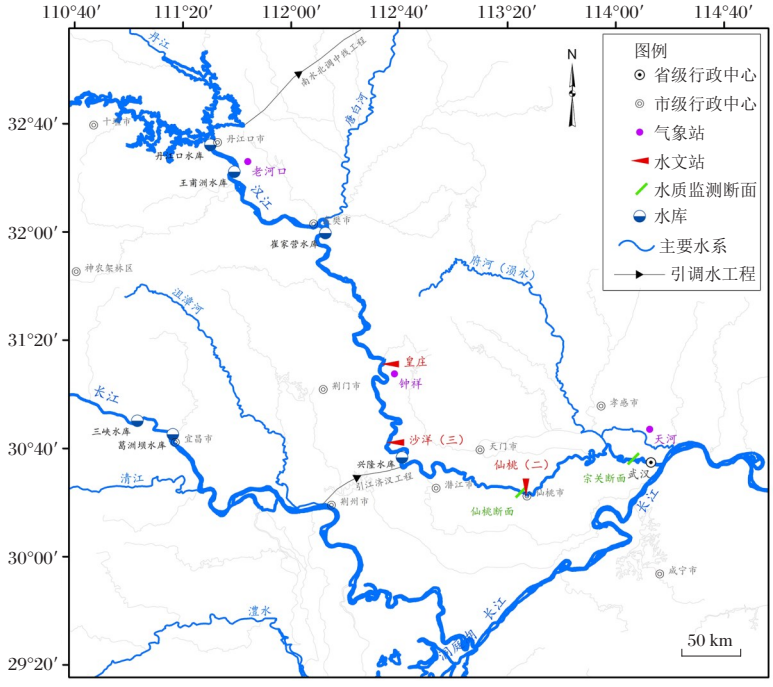


图1　汉江中下游水系及站点分布

Fig.1　Schematic diagram of the water system and location of the monitoring stations in the middle and lower reaches of Hanjiang River

1.3　研究方法

偏最小二乘回归（Partial least regression,PLSR）是集主成分分析（Principal Component Analysis,PCA）、典型相关分析（Canonical Correlation Analysis,CCA）和多元线性回归优点的监督学习算法，适用于处理数据间的多重共线性问题。PLSR通过构建主成分减少自变量之间的冗余，同时最大化自变量和因变量之间的协方差，可用于分析不同自变量对因变量的贡献程度（侯美亭等,2015）。本研究选取叶绿素a浓度作为水华表征指标（因变量），降雨量、气温、流量等14个环境因子作为自变量（表1），拟采用PLSR方法量化不同环境因子对2022年夏季汉江下游水华生消的贡献程度。PLSR计算公式见文献（王惠文,1999; Wold et al,2001）。以下仅介绍基于PLSR模型计算环境因子贡献程度的思路。

表1　研究数据集

Tab.1　Data used in this study

序号	因子类别	名称	单位
1	气象因子	降雨量	mm
2		气温	℃
3		风速	m/s
4	水文水动力因子	水位	m
5		水位日变幅	m
6		流量	m^3/s
7	水质/理化因子	水温	℃
8		pH	无量纲
9		浊度	NTU
10		溶解氧	mg/L
11		总磷	mg/L
12		总氮	mg/L
13		氮磷比	无量纲
14		氨氮	mg/L
15		叶绿素a	mg/L

1.3.1　数据收集与预处理　收集叶绿素a浓度和同期环境因子监测数据,对数据进行预处理,包括缺失值填补、异常值处理、标准化等,对数据标准化有助于减小不同环境因子之间的尺度差异对模型有效性的影响。

1.3.2　计算主成分　计算叶绿素a浓度与环境因子之间的协方差矩阵,通过对协方差矩阵进行奇异值分解(SVD),得到叶绿素a浓度与环境因子的奇异值和奇异向量;可选择前k个奇异向量作为主成分,其中k是选取的主成分数量。

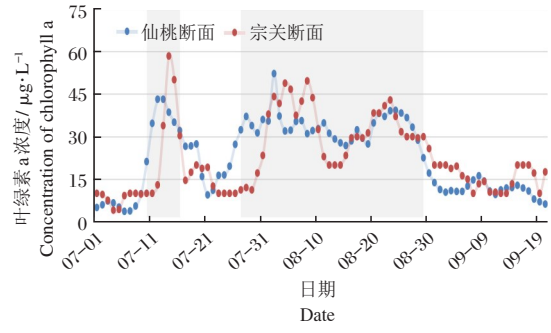
1.3.3　计算PLSR回归系数　基于选取的主成分数量(k),将所有环境因子变换成包括k个主成分的矩阵,并通过多元线性回归方法计算得到叶绿素a浓度与环境因子的回归系数矩阵B。

1.3.4　计算相对贡献率　PLSR回归系数矩阵B表示环境因子对叶绿素a浓度变化的影响强度和方向,矩阵B中元素的绝对值表示每个环境因子对叶绿素a浓度变化的绝对贡献。通过将每个环境因子的绝对贡献除以所有环境因子的绝对贡献之和,得到每个环境因子对叶绿素a浓度变化的相对贡献率,即$\left(\left|B_i\right| / \sum\left|B_i\right|\right)$。其中,$\left|B_i\right|$表示第$i$个环境因子的绝对贡献,$\sum\left|B_i\right|$表示所有环境因子的绝对贡献之和。

2　结果与分析

2.1　叶绿素a及环境因子变化

2.1.1　水华生消过程　2022年7–9月仙桃断面和宗关断面叶绿素a浓度逐日变化过程见图2。由图2可见,若以叶绿素a浓度达到30 μg/L作为水华发生阈值,仙桃至宗关断面于7月中下旬至8月下旬分别发生了2次明显的水华过程。



阴影代表该时段发生水华

图2　2022年夏季汉江中下游叶绿素a浓度逐日变化过程

The shaded area represents the occurrence of algae blooms during this period

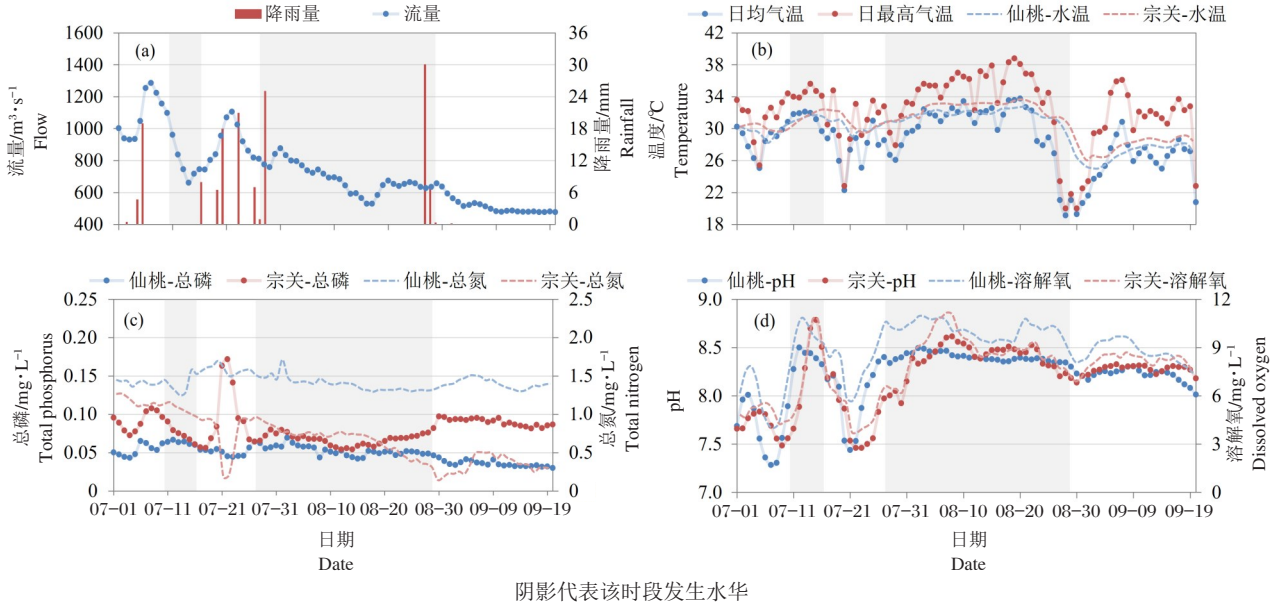
Fig.2　Daily variation of chlorophyll-a concentration in the middle and lower Hanjiang River in the summer of 2022

7月中旬,仙桃断面叶绿素a浓度于7月11日上升至30 μg/L以上,7月12日达到峰值43 μg/L,7月21日明显降低。宗关断面水华暴发时间比仙桃断面滞后2 d,叶绿素a浓度于13日升至30 μg/L以上,7月14日达到峰值58 μg/L。

7月27日至8月31日,仙桃断面叶绿素a浓度于7月27日升至30 μg/L以上,8月2日达到峰值52 μg/L,8月31日明显降低。宗关断面本次水华暴发时间比仙桃断面滞后5 d,叶绿素a浓度于8月1日升至30 μg/L以上,8月1–9日保持在45 μg/L左右,8月11–15日经历了短时下降后,于16日又反弹至30 μg/L以上,8月31日明显降低。

对比上述2次水华特征可知,7月中旬水华过程发生速率较快,持续时间较短,仙桃断面和宗关断面水华持续时间分别约为6 d和4 d。7月下旬至8月下旬水华持续时间较长,仙桃断面和宗关断面水华持续时间均超过30 d。

2.1.2　环境因子变化　2022年夏季汉江中下游水华发生期间,各环境因子变化过程如图3所示。7月上中旬(7月6–15日),汉江流域持续高温无雨,仙桃断面流量从1 286 m^3/s减小至660 m^3/s,水温、pH和溶解氧均呈现显著上升趋势,总磷、总氮浓度总体平稳,此期间仙桃断面和宗关断面叶绿素a浓度明显上升。7月16–28日,汉江流域发生中等强度的降雨过程,气温有所下降。7月21日,受兴隆水库出库流量增加(图4)和引江济汉工程调水叠加影响,仙桃断面流量



阴影代表该时段发生水华

图 3　2022 年夏季汉江中下游各环境因子逐日变化过程

The shaded area represents the occurrence of algae blooms during this period

Fig.3　Daily variation of environmental factors in the middle and lower Hanjiang River in the summer of 2022

显著增加，达到 1 100 m³/s；与此同时，仙桃断面和宗关断面水温、pH 值和溶解氧均有所下降，叶绿素 a 浓度随之明显降低。

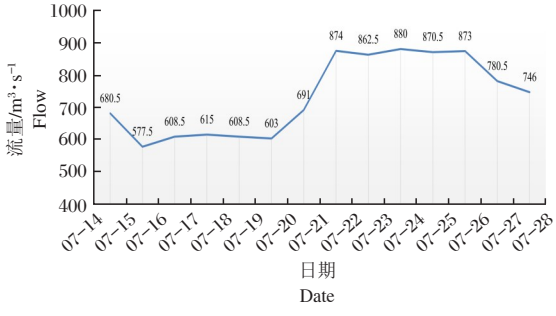


图 4　2022 年兴隆水库出库流量过程

Fig.4　Outflow of Xinglong reservoir during the investigation period

7 月 29 日至 8 月 26 日，汉江流域经历了长达近 30 d 的高温无雨天气，仙桃断面流量持续下降，气温连续多日保持在 35℃以上，水温连续多日保持在 30℃以上，水体 pH 值在 8.0~8.6，溶解氧在 6~12 mg/L；在此期间，仙桃和宗关断面叶绿素 a 浓度均保持高位。8 月 30 日左右，气温骤降，并发生了一次中等强度降雨过程，仙桃和宗关断面叶绿素 a 浓度随之明显降低。

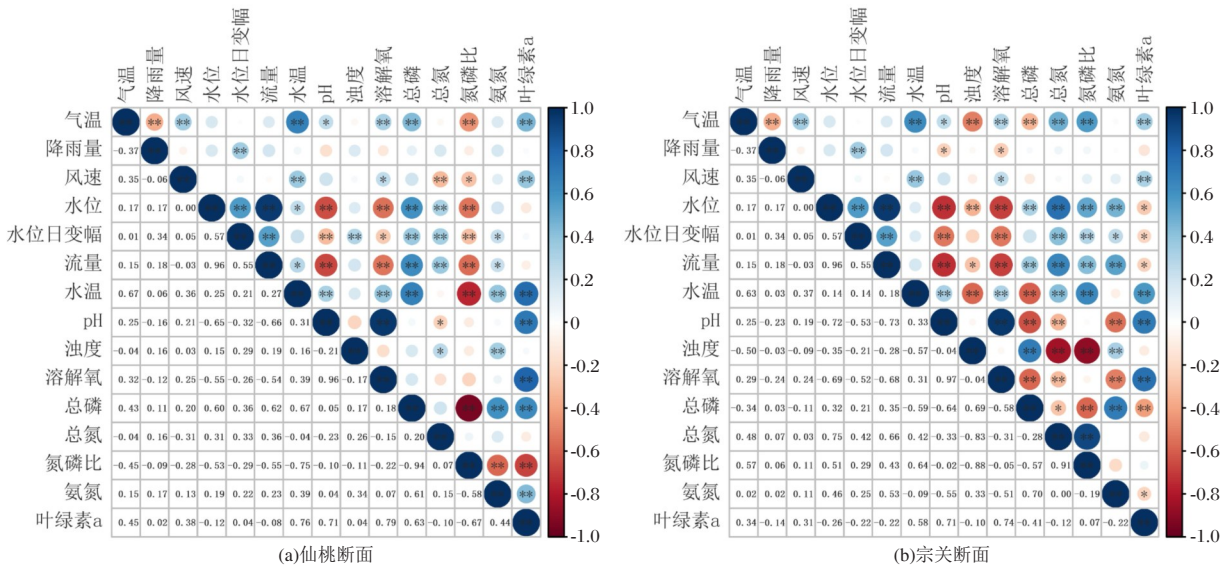
以上结果表明，2 次水华暴发时间均发生在汉江中下游涝旱急转阶段，即在前期发生中高强度降雨，出现河道流量增加，紧接着出现持续高温少雨极端天气的过渡阶段，气象条件可能是 2022 年夏季汉江中下游 2 次水华暴发的诱导因子。

2.2　叶绿素 a 浓度与环境因子的相关性

为探究各环境因子对 2022 年夏季汉江中下游水华生消的影响，本研究分别计算了仙桃断面和宗关断面叶绿素 a 浓度与各环境因子相关系数并绘制了相关矩阵图（图 5）。可见仙桃断面叶绿素 a 浓度与水温、pH 值、溶解氧和总磷均呈极显著正相关关系（$P \leqslant 0.01$），相关系数分别达到 0.76、0.71、0.79 和 0.63；与氮磷比呈显著负相关关系，相关系数为-0.67。宗关断面叶绿素 a 浓度与水温、pH 值、溶解氧呈显著正相关关系，相关系数分别为 0.58、0.71 和 0.74。与日均水位、水位日变幅、流量、总磷和氨氮均表现出较显著的负相关关系。由此可见，水温、pH 值和溶解氧可能是影响夏季汉江中下游水华生消的主要因素。

2.3　环境因子对水华的贡献度

为进一步量化不同环境因子对 2022 年夏季汉江中下游水华生消的贡献度，本研究采用 PLSR 建立环境因子与叶绿素 a 之间的复杂多元关系，解析不同环境因子对叶绿素 a 浓度变化的贡献度。针对环境因子间高度相关或多重共线性问题，PLSR 将根据环境因子与叶绿素 a 浓度的协方差矩阵对高维环境因子进行降维，仅保留少数几个主成分，并根据选取的主成分数量建立环境因子与叶绿素 a 浓度之间的多元线性回归关系。图 6 展示了仙桃断面和宗关断面 PLSR 主成分对叶绿素 a 浓度变化的解释率。可见仙桃断面 PLSR 第一主成分对叶绿素 a 浓度变化的解释率为 88.5%，第二主成分解释率为 3.2%，前 2 个主



右上角**代表显著性水平 $P\leqslant0.01$,*代表显著性水平 $P\leqslant0.05$;左下角数值为相关系数

图5　叶绿素a与环境因子相关矩阵

** in the upper right triangle of the matrix represents the extreme significance level $P\leqslant0.01$,
* represents significance level $P\leqslant0.05$; the values in the lower left triangle of the matrix are correlation coefficients

Fig.5　Matrix diagram of the correlation between chlorophyll-a and environmental factors

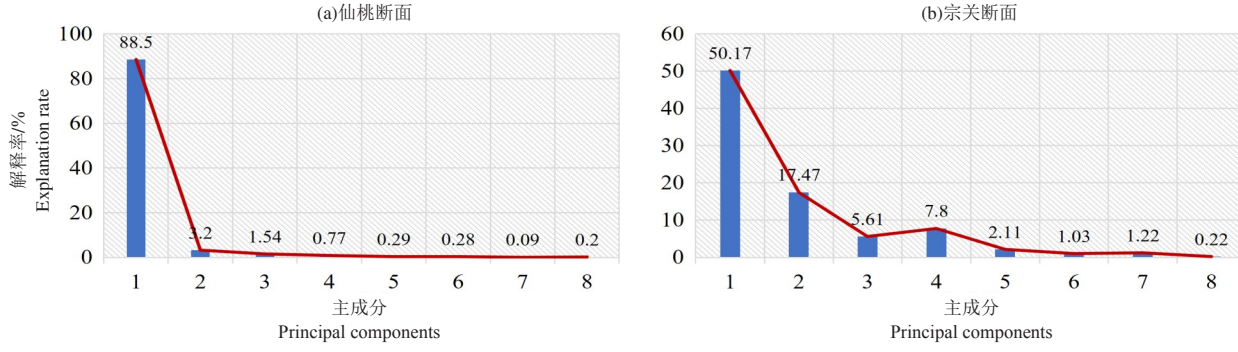


图6　PLSR主成分对叶绿素a浓度变化的解释率

Fig.6　Explanation rate of each PLSR principal component on changes in chlorophyll-a concentration

成分累积贡献率达到91.7%。宗关断面PLSR第一主成分对叶绿素a浓度变化的解释率为50.17%,第二、三、四、五主成分解释率分别为17.47%、5.61%、7.8%和2.11%,前5个主成分累积贡献率为83.16%。本研究分别选取仙桃断面和宗关断面前2个和前5个PLSR主成分进行建模。结果表明,仙桃和宗关断面PLSR主成分对水华生消的解释程度都比较高,但仙桃断面PLSR第一主成分对水华生消的解释率相对更高,这可能是由于仙桃断面不同环境因子在研究时段内一致性较好,且与叶绿素a浓度变化的相关性更强。

分析结果显示(图7),对仙桃断面水华生消贡献度较高的环境因子依次为:溶解氧(15.18%)>水温(14.50%)>pH(13.68%)>氮磷比(12.80%)>总磷(11.93%);对宗关断面水华生消贡献度较高的依次为:溶解氧(18.06%)>pH(15.93%)>水温(15.65%);表明降雨量、气温和流量等因素对仙桃和宗关断面水华生消的贡献度较小。出现该结果的原因,可能是PLSR等类似统计方法是基于自变量与因变量之间的一致性进行统计分析所致,而降雨量、气温和流量等因子对水华生消的影响具有间接性、滞后性和非持续性。

2.4　叶绿素a浓度与水体理化指标

2022年夏季仙桃和宗关断面叶绿素a浓度与水体理化指标(溶解氧、pH及水温)的散点分布见图8。

若以叶绿素a浓度达到30 μg/L作为水华发生的阈值,汉江中下游发生水华期间,仙桃断面溶解氧含量为9~11 mg/L,pH值为8.3~8.5,水温为31~33℃;

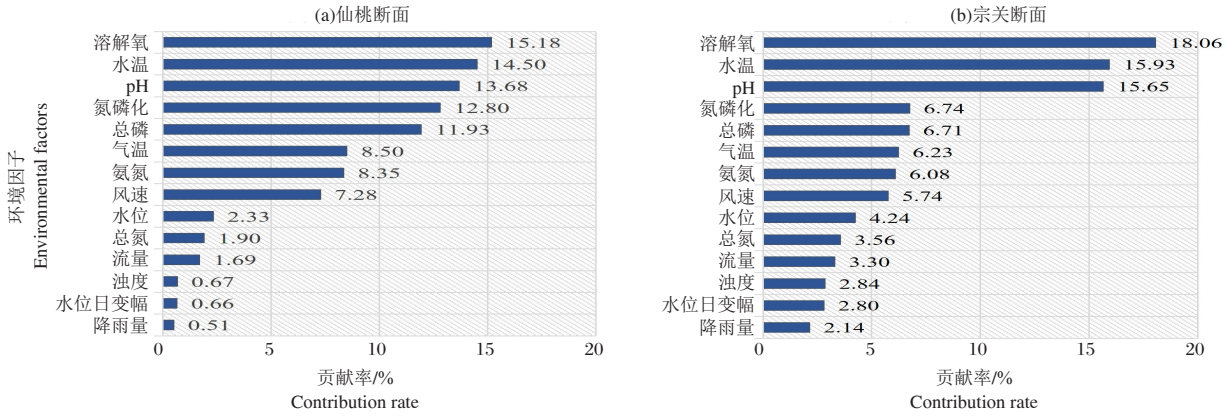


图 7 不同环境因子对仙桃和宗关断面叶绿素 a 浓度变化的贡献率

Fig.7 Contribution rate of various environmental factors to changes in chlorophyll-a concentration in the Xiantao and Zongguan sections of Hanjiang River

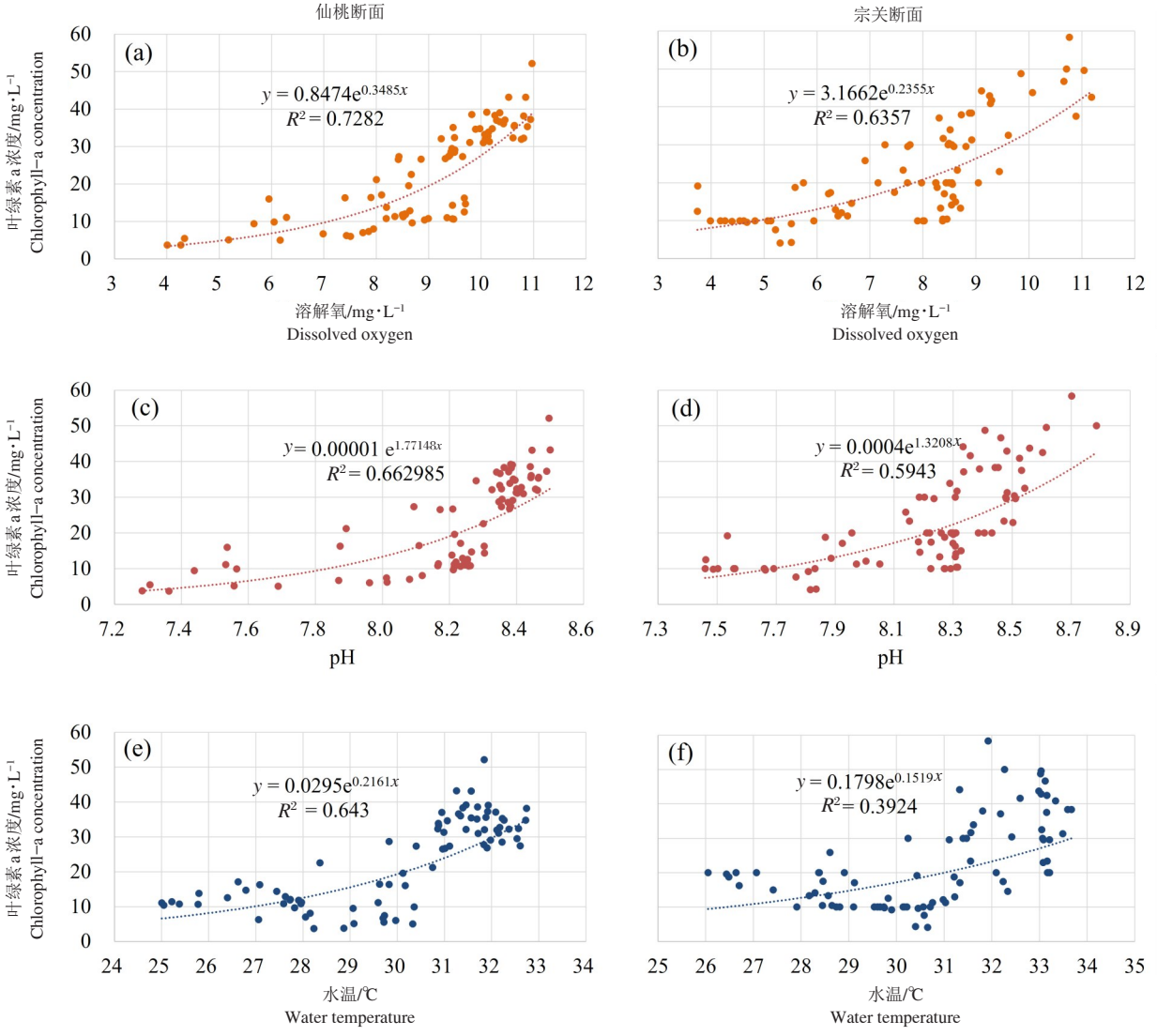


图 8 2022 年夏季仙桃断面(左)和宗关断面(右)叶绿素 a 浓度与水体理化指标的关系

Fig.8 Scatter plots showing the relationship of chlorophyll-a concentration and water physical and chemical indicators in the Xiantao section (left) and Zongguan section (right) in the summer of 20222

宗关断面溶解氧为8~11 mg/L,pH值为8.3~8.8,水温为31~34℃。该结果与现有研究结果较为一致,不同藻类适宜生长的温度范围不同。一般来说,蓝藻喜高温,其适宜生长温度普遍高于硅藻,硅藻生长的最佳气温为16~30℃,而蓝藻的光合作用和生长速率在25℃以上显著增加(陈峰等,2023)。

3　讨论

3.1　水体理化指标与藻类生长的相互影响

有研究认为,水温、溶解氧、pH值等水体理化指标与藻类生长之间存在着复杂的相互影响关系(李建等,2020);适宜的水温通常有助于加速藻类的代谢过程(包括光合作用和呼吸作用),进而促进藻类的生长速率增加(Sellers & Bukaveckas,2003)。在藻类的生长过程中,溶解氧的供应至关重要,其直接影响藻类的光合作用、呼吸作用以及氧化还原过程。在光合作用的过程中,藻类通过光合色素吸收光能,将光能转化为电子能,并利用电子能驱动ATP合成和CO_2固定,该过程需要耗费大量溶解氧。激发的电子被传递到光系统中,其中包括光系统I(PS I)和光系统II(PS II);这些光系统包括蛋白质复合物,其通过链条传递电子。在此过程中,水分子被分解,释放氧气,从而使光合水层溶解氧增加(卢大远等,2000)。pH对藻类的光合作用效率产生直接影响,在适宜的pH条件下,藻类光合色素的活性和结构可能发生变化,大大提高藻类对光的吸收和光合作用效率;同时,光合作用加强也使得藻类大量吸收CO_2,使水层中CO_2浓度降低,引起pH值上升。

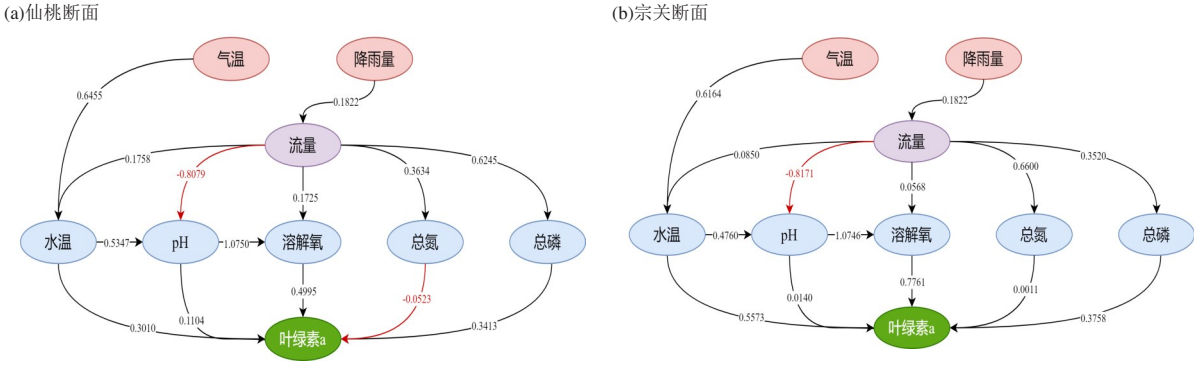
3.2　结合中长期气象预报的水华防控建议

通过分析环境因子贡献率可知,溶解氧、pH值、水温等水体理化指标对2022年夏季汉江中下游水体中叶绿素a浓度变化的贡献度较高。为了进一步研究气象因子(降雨量、气温)和水文水动力因子(流量)对叶绿素a浓度变化的间接影响,本研究采用偏最小二乘路径模型(Partial Least Squares Path Modeling,PLS-PM)解析了气象因子、水文水动力因子、水质/理化因子对叶绿素a浓度变化的影响路径(图9)。单向路径线段上的数值代表PLS-PM模型中的路径系数,可反映各因子的影响强度。

以仙桃断面为例,气温通过影响水温而间接影响叶绿素a浓度变化,气温对水温的影响强度达到0.6455,而水温对叶绿素a浓度的影响可分为直接影响和间接影响。一方面,水温对叶绿素a浓度变化的直接影响强度达到0.3010;另一方面,水温通过影响pH、溶解氧而间接影响叶绿素a浓度变化,其中水温对pH的影响强度达到0.5347。降雨量则是通过影响河道流量而间接影响水中的营养盐输移和水体理化特征变化。流量对pH的影响强度为-0.8079,说明河道流量减小有助于水体pH值升高,流量对总氮、总磷的影响强度分别为0.3634和0.6245。

综上,气象因子是2022年夏季汉江中下游蓝藻水华暴发的诱导因子。高温无雨的极端天气导致水温和pH上升,加速了藻类的代谢反应速率;同时,河道流量减小,延长了有机物和营养盐的传输和滞留时间,为藻类生长提供了稳定的营养条件。

水华防控方面目前仍以上游水库增加下泄流量稀释为主。有研究认为,实施河流水华防控的最佳时机是水华即将暴发的萌芽阶段,该阶段实施流量调控的效果最佳,但目前面向汉江中下游水华防控需求的流量调控时机仍不明确(李建等,2020)。从2022年



单向路径线段数值代表PLS-PM模型中的路径系数,反映各因子的影响强度

图9　环境因子对叶绿素a浓度变化的影响路径

The numerical value on the one-way path segment represents the path coefficient in the PLS-PM model, reflecting the influence intensity of each factor

Fig.9　Impact paths of various environmental factors on changes in the concentration of chlorophyll-a

汉江中下游2次水华暴发的过程来看，夏季水华“萌芽”时段与汉江中下游涝旱急转时段重叠。因此，若能结合准确的中长期气象预报信息，在涝旱急转时段实时优化汉江中下游水华防控调度的下泄流量与下泄时机，将大大提高水华防控的效率和效果。针对汉江中下游夏季水华防控，下一步应加强涝旱急转时期水华生态调度流量阈值以及调度方式等研究。

参考文献

陈峰,王文静,何涛,等,2023. 2022年夏季汉江中下游水华成因及对策分析[J/OL]. 人民长江, [2023-07-25]https://kns.cnki.net/kcms2/detail/42.1202.TV.20230725.1252.002.html.

侯美亭,胡伟,乔海龙,等,2015. 偏最小二乘(PLS)回归方法在中国东部植被变化归因研究中的应用[J]. 自然资源学报, 30(3):409-422.

李建,尹炜,贾海燕,等,2020. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. 水生态学杂志, 41(5):136-144.

李建,尹炜,贾海燕,等,2022. 汉江中下游水华防控生态调度研究[J]. 湖泊科学, 34(3):740-751.

卢大远,刘培刚,范天俞,等,2022. 汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. 环境科学研究, 13(2):28-31.

田晶,郭生练,王俊,等,2022. 汉江中下游干流水华关键环境因子识别及阈值分析[J]. 水资源保护, 38(5):196-203.

王惠文,1999. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社.

夏瑞,张远,王璐,等,2020. 汉江下游河流型水华暴发的多影响因素特征识别[J]. 环境科学研究, 33(4):911-920.

辛小康,王英才,胡圣,等,2019. 汉江下游硅藻水华成因分析[J]. 水电能源科学, 37(3):25-28.

Anggara Kasih G A, Kitada T, 2004. Numerical simulation of water quality response to nutrient loading and sediment resuspension in Mikawa Bay, central Japan: quantitative evaluation of the effects of nutrient-reduction measures on algal blooms[J]. Hydrological Processes, 18(16):3037-3059.

Bowes M, Gozzard E, Johnson A, et al, 2012. Spatial and temporal changes in chlorophyll-a concentrations in the River Thames basin, UK: are phosphorus concentrations beginning to limit phytoplankton biomass?[J]. Science of the Total Environment, 426:45-55.

Chislock M F, Sharp K L, Wilson A E, 2014. *Cylindrospermopsis raciborskii* dominates under very low and high nitrogen-to-phosphorus ratios[J]. Water Research, 49:207-214.

Filardo M J, Dunstan W N, 2011. Hydrodynamic control of phytoplankton in low salinity waters of the James River Estuary, USA[J]. Estuary, Coast and Shelf Science, 21: 653-667.

Hilton J, O´Hare M, Bowes M J, et al, 2006. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers[J]. Science of the Total Environment, 365(1):66-83.

Huisman J, Codd G A, Paerl H W, et al, 2018. Cyanobacterial blooms[J]. Nature Reviews Microbiology, 16(8):471-483.

Jon O, Gary C, 2000. Major chemistry of sediments from the Darling River and its tributaries: implications for sediment and phosphorus sources[J]. Hydrological Processes, 14(7):1-17.

Klaus J, Wetzel C E, Martínez-Carreras N, et al, 2015. A tracer to bridge the scales: on the value of diatoms for tracing fast flow path connectivity from headwaters to mesoscale catchments[J]. Hydrological Processes, 29(25): 5275-5289.

Mhamdi B A, Azzouzi A, Mhamdi M A, et al, 2007. Dynamics of the relative nitrogen and phosphorus concentrations in a reservoir situated in a semi-arid zone (Sahela, Morocco)[J]. Water Resources Management, 21:983-995.

Mosley L M, Zammit B, Leyden E, et al, 2012. The Impact of Extreme Low Flows on the Water Quality of the Lower Murray River and Lakes (South Australia)[J]. Water Resources Management, 26:3923-3946.

Sellers T, Bukaveckas P A, 2003. Phytoplankton production in a large, regulated river: A modeling and mass balance assessment[J]. Limnology and Oceanography, 48(4): 1476-1487.

Wold S, Sjostrom M, Eriksson L, 2001. PLS-regression: A basic tool of chemometrics[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 58(2):109-130.

Xin X K, Zhang H, Lei P, et al, 2020. Algal blooms in the middle and lower Han River: Characteristics, early warning and prevention[J]. Science of the Total Environment, 706: 135293.

Yan H, Wang G, Wu D, et al, 2017. Water Bloom Precursor Analysis Based on Two Direction S-Rough Set[J]. Water Resources Management, 31:1435-1456.

（责任编辑 万月华）

Summer Driving Factors and Their Quantitative Contribution to Algae Bloom Occurrence and Demise in the Middle and Lower Hanjiang River in 2022

ZHA Xi-ni[1,2], XIN Xiao-kang[1,2], FU Ting[1,2], LI Jian[1,2], BAI Feng-peng[1,2], LIN Xiao[1,2], SHU Peng[3]

(1. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, P. R. China;
2. Key Laboratory of Ecological Regulation of Non-point Source Pollution in Lake and Reservoir Water Sources, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430051, P. R. China;
3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Under the extreme hydrological conditions of high temperature and drought in the Yangtze River basin in the summer of 2022, cyanobacteria blooms occurred for the first time in the middle and lower reaches of Hanjiang River. In this study, we identified the driving factors of algae blooms and quantified the contribution of each driving factor in the Xiantao and Zongguan sections in the Hanjiang River, aiming to provide scientific evidence and decision support for the prevention and control of algae blooms. The concentration of chlorophyll-a was selected as the indicator of algae blooms in this study, and partial least squares regression (PLSR) was used due to the multicollinearity relationship between environmental factors. Results show that: (1) The concentration of chlorophyll-a in the Xiantao section presented a significantly positive correlation with water temperature, pH, dissolved oxygen (DO) and total phosphorus (TP), and a significantly negative correlation with the ratio of nitrogen to phosphorus. The concentration of chlorophyll-a in the Zongguan section presented a significantly positive correlation with water temperature, pH and the DO, and a significantly negative correlation with the daily average water level, daily water level fluctuation, flow, TP and ammonia nitrogen. (2) The DO, pH and water temperature contributed most to the occurrence and demise of algae blooms, with respective contribution rates of 15.18%, 13.68%, 14.50% in the Xiantao section, and 18.06%, 15.93%, 15.65% in the Zongguan section. (3) The impact paths of various environmental factors on changes in chlorophyll-a concentration were analyzed based on Partial Least Squares Path Modeling (PLS-PM), and the results indicate that meteorological factors induced the outbreak of cyanobacteria blooms in the middle and lower reaches of the Hanjiang River in summer of 2022, and that the formation (germination) period of summer algae blooms may overlap with "abrupt flood-drought transition" periods. Therefore, to effectively prevent and control algae blooms in the middle and lower reaches of Hanjiang River, we recommend regulating the discharge and time of water flow in combination with accurate medium and long term weather forecast information during "abrupt flood and drought transition" periods. This study has the potential to significantly enhance the efficiency and effectiveness of algae bloom prevention and control.

Key words: algae bloom; environmental factors; quantitative attribution; contribution rates; middle and lower reaches of the Hanjiang River