

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.026

汉江中下游干流水华关键环境因子识别及阈值分析

田晶¹, 郭生练¹, 王 俊¹, 张德兵², 罗春艳²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 基于汉江中下游干流春季水华发生前后的水文、水质和水生态监测数据, 采用 Pearson 相关性检验、分位数回归、随机森林模型方法, 筛选出与藻密度相关性较大的重要环境因子, 模拟预测了叶绿素 a 质量浓度, 并分析了可调控的环境因子阈值。结果表明: 叶绿素 a 质量浓度分别与气温、流量因子呈显著的正相关和负相关关系, 藻类暴发与气温和流量因子为非线性响应关系; 基于水华防控的水质因子阈值为叶绿素 a 质量浓度高于 76.47 $\mu\text{g/L}$, 气温因子阈值为 7 d 滑动积温超过 56.02 $^{\circ}\text{C}$, 流量因子阈值为最小 7 d 平均流量低于 780 m^3/s 。

关键词: 水华; 关键环境因子; 阈值分析; 汉江中下游

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)05-0196-08

Identification and threshold analysis of key factors of algal bloom in middle and lower reaches of the Hanjiang River // TIAN Jing¹, GUO Shenglian¹, WANG Jun¹, ZHANG Debing², LUO Chunyan² (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the hydrological, water quality and water ecological monitoring data before and after the spring algal bloom in the middle and lower reaches of the Hanjiang River, the important environmental factors that have a large correlation with algae density are screened out by using Pearson correlation test, quantile regression and random forest model. The mass concentration of chlorophyll-a is simulated and predicted, and the controllable threshold of environmental factors is analyzed. The results show that the chlorophyll-a mass concentration is significantly positively and negatively correlated with air temperature and flow factors respectively, and the algae outbreak is non-linear with air temperature and flow factors. The threshold of water quality factor based on algal bloom prevention and control is that the mass concentration of chlorophyll-a is higher than 76.47 $\mu\text{g/L}$, the 7d sliding accumulated temperature is higher than 56.02 $^{\circ}\text{C}$, and the minimum 7d average discharge is less than 780 m^3/s .

Key words: algal bloom; key environmental factors; threshold analysis; middle and lower reaches of the Hanjiang River

水华指淡水水体中藻类大量繁殖的一种自然生态现象, 是水体富营养化的一种特征。与出现在湖泊、水库等静水生态系统中的蓝藻、绿藻水华相比, 河流水华并不常见, 但却具有影响范围广、暴发成因复杂、控制难度大等特点^[1-2]。汉江中下游近年来水华暴发频次增加, 引起广泛关注。自 1992 年汉江中下游首次暴发硅藻水华以来, 水华的发生频次持续上升, 持续时间也有所延长, 以往发生的河段多为兴隆以下河段, 并有向支流蔓延

的趋势^[3], 兴隆低水头闸坝型水库建成后, 2018 年在兴隆库区也出现了水华现象。水华发生时水体呈棕褐色, 散发腥味, 对汉江中下游生产生活产生一定的影响^[4]。因此, 探究影响汉江水华发生的关键因子, 精准防控水华的暴发, 是目前迫切需要解决的问题。

以往的研究认为, 汉江水华的发生是水文、气象和营养盐条件多方面综合的结果^[5]。国内学者围绕汉江水华已开展了大量的研究工作, 谢平

基金项目: 国家自然科学基金地区联合基金(U20A20317)

作者简介: 田晶(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jingtian@whu.edu.cn

通信作者: 郭生练(1957—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: slguo@whu.edu.cn

等^[6]指出制约汉江水华发生的关键因子是流量和流速等水文因子,并非氮、磷等水质因子和水温等气象因子;吴兴华等^[7]基于2015—2016年汉江硅藻水华的监测数据,得出水华发生的成因是适宜的气候条件、较高的硅氮比和低流量;王俊等^[8]基于2018年汉江水华的应急监测数据,提出了严控污染输入、优化水量调度方案、完善管理机制等治理对策。总体来看,研究者基于不同时段、不同断面的监测数据得到的汉江水华的研究结论不尽相同。当前,汉江中下游水华的预警和防治仍面临着一些难点和挑战^[2,9]:①汉江中下游河段目前还未建立常规的水华监测体系,应急监测期间的资料长度较短且受到水量调度的影响,汉江水华的暴发成因,特别是预警研究尚未取得突破性进展;②在气候变化和人类活动(如大型水利工程)的影响下,汉江中下游的环境因素复杂多变,以往研究多针对河流水文情势变化对浮游植物生长的单项研究,变化环境影响下的河流水华暴发与预测尚未取得好的效果;③某些重要环境因子一旦超过阈值,藻类在浮游植物群落的占比可能发生剧烈变化。因此,有必要探索汉江硅藻暴发的重要环境因子阈值,为治理汉江富营养化提供技术支撑。

本文基于汉江中下游干流硅藻水华发生前后的水文、水质和水生态监测数据,采用 Pearson 相关性检验、分位数回归和随机森林模型方法分析水华发生的关键环境因子及阈值,以期对汉江中下游生态调度提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区域为汉江中下游皇庄至宗关水厂江段,以仙桃站为基本分析断面。2021年1月18日,仙桃断面疑似发生水华,长江委水文局启动应急响应,于1月19日至2月2日开展应急监测和调度,分别在汉江中下游的皇庄、沙洋、兴隆坝上、泽口、仙桃和宗关水厂6个汉江干流控制断面开展跟踪取样监测,断面位置如图1所示。

1.2 数据来源

采用的水华监测数据均来自长江委水文局《汉江“水华”连续应急监测调查报告》及历史水文资料。皇庄、沙洋、兴隆坝上、泽口、仙桃和宗关水厂6个汉江干流控制断面涉及的关键要素包括环境指标(气象、水质和水文因子)和浮游植物(藻密度、叶绿素a质量浓度),其中,气象数据来自国家气象信息中心中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),其余数据均来自长江委水文局。



图1 汉江中下游干流采样断面分布

Fig.1 Sampling section distribution in middle and lower reaches of the Hanjiang River

2 研究方法

2.1 分位数回归

浮游植物的生长周期短,在环境因子变化较为剧烈时,其生物量会出现剧烈的时空变化,数据具有较强的时空异质性,不能很好地满足传统最小二乘法中正态、等方差以及无自相关性等假设条件^[10-11]。而分位数回归方法适用的条件较为广泛,可以很好地处理数据中的方差异质性和异常值^[12-13]。该方法由 Koenker 等^[14]提出,可以根据响应变量的条件分位数对预测变量进行回归,进而得到所有响应变量分位水平上的回归模型。假设 Y 是一个连续型随机变量, $F_Y(y)$ 是其分布函数,一个特定的 y 值的发生概率为 τ ,那么第 τ 分位数就是指发生概率为 τ 时的 y 值,即:

$$y_{\tau} = F_Y^{-1}(\tau) \quad (1)$$

如果 $p(Y < y_p) \leq p$ 以及 $p(Y > y_p) \leq 1 - p$,那么 y_p 被称为随机变量 Y 的第 p 分位数。与普通最小二乘法把预测变量的期望平均值作为响应变量的函数不同,分位数回归可模拟一个或更多响应变量的分位数^[15],分位数回归的特征可以度量预测变量对响应变量分布中心的影响,还可以度量预测变量对响应变量整体分布的影响。

2.2 随机森林模型

由于河流水华的成因复杂,各影响因子之间的相互作用机制尚不明确^[9],因此大多数研究是基于黑箱模型^[16-18],采用数理统计方法或智能算法。在智能算法中,随机森林模型是一个包含多个决策树的分类器,并且其输出的类别是由个别树输出的类别的众数而定^[19]。随机森林模型可以产生高准确度的分类器,在决定类别时可以评估变数的重要性,

并且学习过程快速^[20]。

选取偏差系数作为叶绿素 a 的拟合优度指标。偏差系数是对实际值与模型模拟值之间离差的一种度量,其计算公式为

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \tag{2}$$

式中: B 为偏差系数; y_i 为因变量的实际值; y'_i 为因变量的模拟值。

3 结果与分析

3.1 监测结果

3.1.1 藻密度

2021 年水华监测期间,汉江干流不同监测断面的藻密度如图 2 所示(1 月 30 日无监测数据)。由图 2 可知,从皇庄到宗关水厂断面,不同监测断面之间具有显著的空间差异性,其中宗关水厂的藻密度最大,仙桃断面次之,皇庄断面最小,表明汉江中下游的藻密度呈沿程增加的趋势。随着时间的推移,藻密度持续下降,1 月 24 日各断面间的藻密度差异最大。

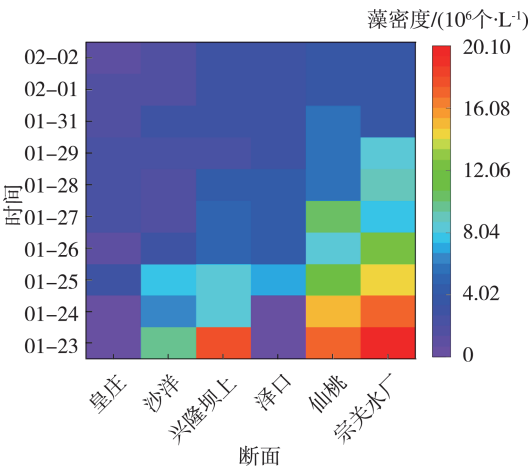


图2 2021 年不同监测断面不同时间的藻密度
Fig.2 Algae density at different monitoring sections and different time in 2021

根据 DB 44/T 2261—2020《水华程度分级与监测技术规程》,各个断面在不同时间的水华等级如表 1 所示。由此可见,1 月 23 日水华程度最为严重,所有监测断面的水华等级均达到Ⅲ级轻度水华的标准;1 月 24 日后,皇庄、沙洋和兴隆坝上断面的水华等级均降到Ⅱ级及以下;仙桃和宗关水厂断面分别在 1 月 28 日和 1 月 27 日后保持Ⅱ级,无明显水华。

3.1.2 理化指标

2021 年汉江中下游干流水华发生期间,各监测

表 1 各监测断面的水华程度分级
Table 1 Algal bloom degree classification of each monitoring section

时间	水华程度等级					
	皇庄	沙洋	兴隆坝上	泽口	仙桃	宗关水厂
1 月 23 日		Ⅲ	Ⅲ		I	Ⅲ
1 月 24 日		Ⅱ	Ⅱ		Ⅲ	Ⅲ
1 月 25 日	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
1 月 26 日	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
1 月 27 日	Ⅱ	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ
1 月 28 日	Ⅱ	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
1 月 29 日	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
1 月 31 日	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
2 月 1 日	I	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
2 月 2 日	I	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ

断面的理化指标均值和最大值如表 2 所示。可见,干流透明度均值基本呈递减趋势,在皇庄断面最高,为 90.25 cm,宗关水厂断面最低,为 43.60 cm。水温的最大值在沙洋断面,达到 12.7℃,水温均值在仙桃断面最低,为 9.08℃,在沙洋断面最高,为 10.77℃。溶解氧的质量浓度均值和最大值均在兴隆水库坝上断面最高,仙桃断面均值为 12.65 mg/L,皇庄断面均值最低,为 11.35 mg/L,这是由于当水体中充满高密度的藻类细胞时,光合放氧会导致水中的溶解氧质量浓度过高^[7]。pH 均值范围为 8.18~8.61,呈现沿程递增趋势,在宗关水厂断面达到最大值。叶绿素 a 质量浓度均值也呈沿程递增趋势,在宗关水厂断面最高,为 70.02 μg/L,皇庄断面最低,为 23.10 μg/L。高锰酸盐指数的质量浓度为 2.67~4.20 mg/L。所有断面的总磷质量浓度均超过 0.03 mg/L,总氮质量浓度均值在 1.5 mg/L 左右,可见汉江下游河段较高的氮磷质量浓度为水华的发生提供了充足的营养盐条件。

3.2 Pearson 相关性

以 Pearson 相关性系数进行双侧检验,分别分析藻密度与监测的气象、水质、水文因子的相关性。由于藻密度仅在水华发生后进行监测,无法体现水华的生消过程,因此选取叶绿素 a 来表征浮游植物的生物量。由于仙桃断面水华暴发的频率较高且该断面设置了自动监测站,因此重点对该站进行分析。图 3 为仙桃站叶绿素 a 质量浓度与藻密度的相关关系,可见,叶绿素 a 质量浓度与藻密度呈显著线性正相关($R^2=0.797$),因此可以用叶绿素 a 质量浓度来表征浮游植物的生物量。基于水华程度分级标准,当藻密度小于 1×10^7 个/L 时无明显水华,该藻密度值为水华的临界值。因此依据藻密度和叶绿素 a 质量浓度的拟合公式,叶绿素 a 质量浓度的临界值为 76.47 μg/L,可以作为水华发生的一项判别标准。

表 2 水华发生期间各监测断面的理化指标均值和最大值

Table 2 Mean and maximum values of physical and chemical indexes during occurrence of algal bloom in monitoring sections

断面	类型	透明度/ cm	水温/ ℃	pH 值	溶解氧质 量浓度/ (mg·L ⁻¹)	叶绿素 a 质量浓度/ (μg·L ⁻¹)	高锰酸盐指 数质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	总磷质 量浓度/ (mg·L ⁻¹)	总氮质 量浓度/ (mg·L ⁻¹)	藻密度/ (10 ⁶ 个·L ⁻¹)
皇庄	均值	90.25	10.46	8.18	11.35	23.10	3.67	0.03	1.63	1.87
	最大值	105.00	12.00	8.59	12.42	35.17	5.70	0.03	1.92	3.23
沙洋	均值	86.80	10.77	8.47	11.82	40.11	4.20	0.03	1.55	3.97
	最大值	118.00	12.70	8.85	13.27	62.04	6.90	0.03	1.72	10.01
兴隆坝上	均值	71.50	9.96	8.58	12.78	54.87	3.03	0.03	1.46	6.03
	最大值	86.00	10.70	9.03	14.70	111.00	3.40	0.03	1.60	18.03
泽口	均值	78.88	9.41	8.46	11.84	36.89	2.80	0.03	1.49	4.00
	最大值	90.00	11.00	8.99	12.21	68.55	3.00	0.04	1.61	7.20
仙桃	均值	55.90	9.08	8.59	12.65	61.94	2.67	0.04	1.45	8.70
	最大值	75.00	10.50	8.96	13.78	103.50	3.40	0.04	1.53	17.11
宗关水厂	均值	43.60	9.94	8.61	11.97	70.02	2.67	0.04	1.40	10.07
	最大值	65.00	11.00	9.01	13.00	124.00	3.20	0.05	1.48	20.05

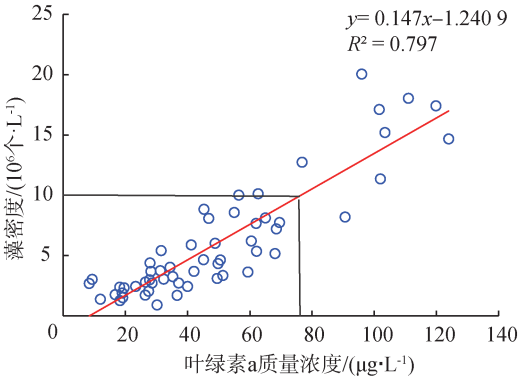


图 3 仙桃站叶绿素 a 质量浓度与藻类密度的相关关系

Fig.3 Correlation between chlorophyll-a mass concentration and algal density at Xiantao station

采用仙桃站 2021 年 1 月 1 日至 31 日的数据,分别判断叶绿素 a 与气象、水文、水质因子的相关性。气象因子与叶绿素 a 的 Pearson 相关性分析结果表明,叶绿素 a 与平均气温在 0.01 的显著性水平上呈正相关关系($R^2 = 0.639$),与平均风速的相关关系($R^2 = -0.104$)和日照时数的相关关系($R^2 = -0.279$)均不显著。

叶绿素 a 与水位和流量均呈显著负相关关系, R^2 分别为 -0.723 和 -0.592 ,与以往的研究结果一致,即汉江水华的发生与枯水期低流量有关^[7]。图 4 为叶绿素 a 质量浓度与流量的关系,1 月 20 日前,流量呈下降趋势且整体偏低,此时叶绿素 a 的质量浓度逐渐上升并在 20 日达到最大值,之后叶绿素 a 质量浓度持续下降。这是由于在本次汉江水华发生后,自 1 月 19 日开始兴隆水库按“冲蓄结合”方式进行应急调度。兴隆枢纽以上河段的水华影响通过丹江口、王甫洲等梯级水库的应急调度解决,1 月 24 日开始丹江口水库日均下泄流量由 $620\text{ m}^3/\text{s}$ 加大至 $800\text{ m}^3/\text{s}$,并持续 6 d。兴隆枢纽以下汉江河段

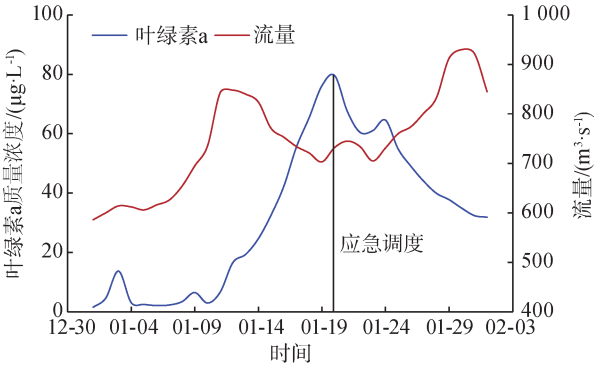


图 4 仙桃站叶绿素 a 质量浓度与流量的关系

Fig.4 Relationship between discharge and chlorophyll-a mass concentration at Xiantao station

的水华影响在维持兴隆水库出入库平衡的基础上,通过引江济汉工程应急调度解决。

叶绿素 a 与水质理化指标的 Pearson 相关性检验表明,叶绿素 a 与水温、pH 和溶解氧均有显著的正相关性($P < 0.01$),相关性系数分别为 0.388、0.526 和 0.407。表 3 为 1 月 21 日汉江中下游断面总氮、总磷质量浓度变化情况,可以看出:①支流氮、磷营养盐水平明显高于干流,表明支流汇入带来的营养盐负荷可能对汉江干流水质造成一定影响;②干流断面的总氮、总磷质量浓度虽与非水华期无明显差异,但总氮、总磷的质量浓度较高,总氮质量浓度普遍超过 1.3 mg/L ,总磷质量浓度普遍超过 0.03 mg/L ,说明此次汉江的硅藻水华是多种环境因子综合作用的结果,即适宜的气象和水文条件加上较高的营养盐所致。

3.3 分位数回归结果

水华发生会影响水体的 pH 值和溶解氧质量浓度,藻密度增加后,水中 CO_2 被利用而减少,导致 pH 值上升,同时导致溶解氧增加。因此,pH 值和溶解

氧因子作为水华发生后的结果,不适宜用来分析其对藻类的影响。图 5 为仙桃站气温和流量的参数估计结果随着叶绿素 a 丰度分位数的变化,包括分位数回归斜率及其 95% 的置信区间,普通最小二乘法得出的斜率及其 95% 的置信区间。由图 5 可见,气

表 3 1 月 21 日汉江中下游断面总氮、总磷质量浓度变化
Table 3 Changes of total nitrogen and total phosphorus mass concentrations in middle and lower reaches of the Hanjiang River on January 21th

汉江	断面	总磷质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
干流	皇庄	0.04	1.57
	沙洋	0.04	1.49
	兴隆坝上	0.04	1.44
	泽口	0.04	1.35
	仙桃	0.04	1.27
	宗关水厂	0.05	1.40
支流	马集河	0.05	1.66
	竹皮河	0.16	4.93
	浏河	0.14	2.13
	南湖泵站	0.14	12.20
	丁坝	0.05	1.79
	岔河口	0.06	3.61

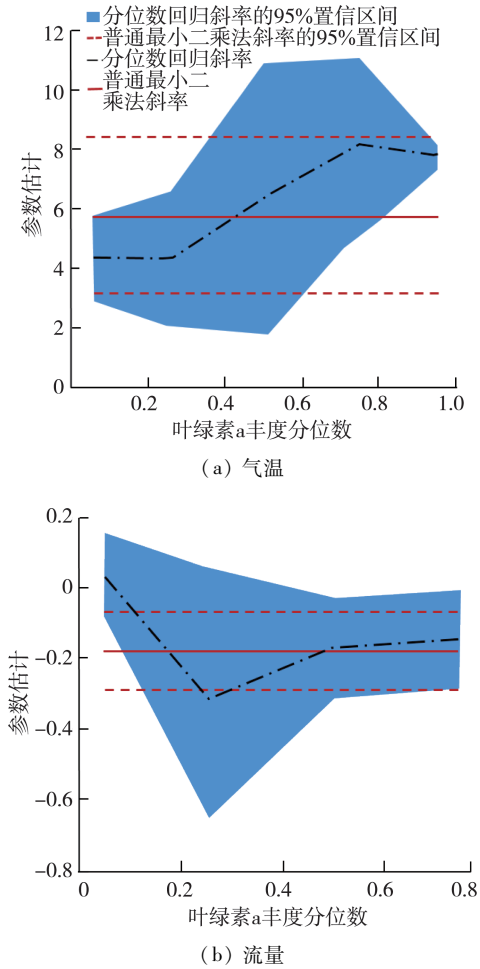


图 5 叶绿素 a 丰度分位数回归结果

Fig. 5 Quantile regression results of chlorophyll-a abundance

温在叶绿素 a 的所有丰度上均具有显著的正斜率;流量在叶绿素 a 的所有丰度上均具有显著的负斜率,各个因素对叶绿素 a 的影响作用都是非线性的。以流量因子为例对结果进行说明,最小二乘法得到的斜率始终在 -0.2 附近,表明是一种均值回归;而分位数回归结果(图 6(b))表明,在 0.05 、 0.25 、 0.50 、 0.75 丰度分位数下,直线斜率分别为 0.03 、 -0.3 、 -0.18 和 -0.16 ,可见在不同的叶绿素 a 分布条件下,流量对叶绿素 a 的影响不同(图 6)。

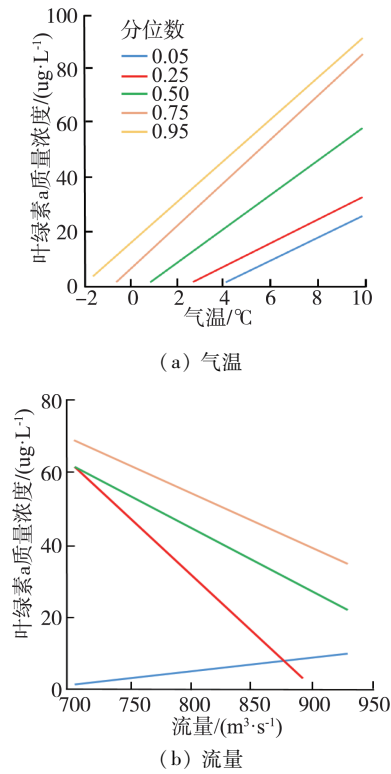


图 6 不同分位数下叶绿素 a 质量浓度的预测线
Fig. 6 Prediction lines of chlorophyll-a mass concentration under different quantiles

3.4 随机森林模型模拟结果

基于实测气温和流量数据,通过随机森林模型预测叶绿素 a 质量浓度,图 7 为叶绿素 a 质量浓度的实测值与模拟值对比。由图 7 可见,模拟值的相对误差为 -3.13% ,说明随机森林结果具有可信度。从影响因子的重要性来看,流量和气温因子对叶绿素 a 质量浓度影响的重要程度分别为 55.8% 和 44.2% 。

3.5 基于水华防控的环境阈值分析

确定水华开始出现临界藻密度作为临界预警时刻。识别临界藻密度对应的水质、气象和水文因子,作为控制水华的环境因子阈值。

前文分析可知,气温是显著影响叶绿素 a 含量的因子之一。为了探究气温的阈值,统计 2021 年 1 月 3 d、5 d、7 d、9 d、11 d 滑动积温,分别计算其与叶

绿素 a 质量浓度的相关关系,结果见图 8(a),发现叶绿素 a 质量浓度与 7 d 滑动积温的相关性最大, R^2 达到 0.909。拟合叶绿素 a 质量浓度与 7 d 滑动积温得到方程如图 8(b)所示,7 d 滑动积温的阈值为 56.02 $^{\circ}\text{C}$,即当 7 d 滑动积温超过 56.02 $^{\circ}\text{C}$ 时,将是汉江中下游硅藻水华暴发的危险时间。

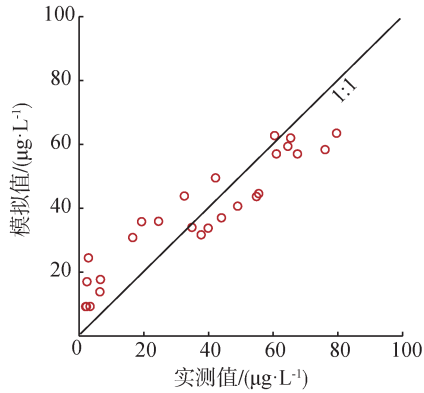
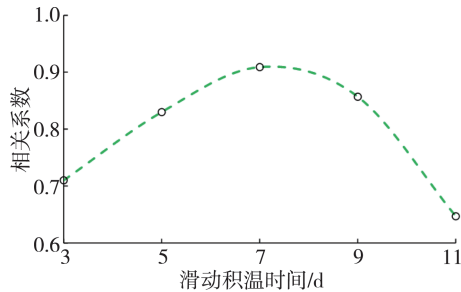
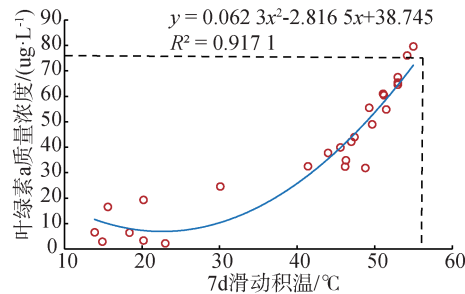


图 7 叶绿素 a 质量浓度的实测值与模拟值对比
Fig. 7 Comparison between measured and simulated values of chlorophyll-a



(a) 叶绿素 a 质量浓度与滑动积温的相关关系

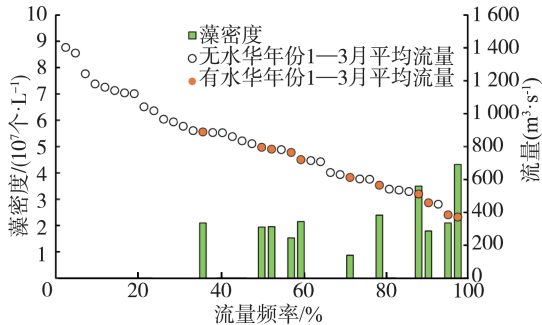


(b) 叶绿素 a 质量浓度与 7 d 滑动积温的拟合关系

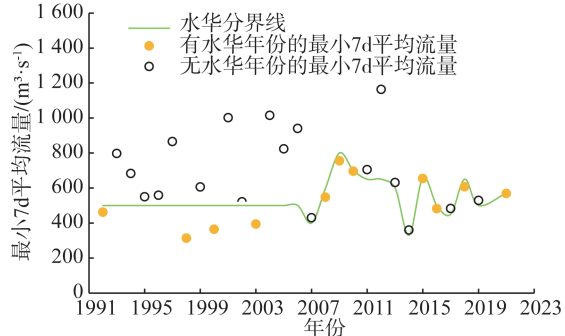
图 8 仙桃站气温阈值分析结果
Fig. 8 Analysis results of temperature threshold at Xiantao station

图 9(a) 为仙桃站 1992—2021 年 1—3 月的平均流量过程与所有水华发生期间的藻密度关系。可见,大多数的水华事件发生在平水年和枯水年,并且对应 1—3 月的平均流量频率均大于 37%。图 9(b) 为历年 1—3 月的最小 7 d 平均流量,2008 年以前最小 7 d 平均流量低于 550 m^3/s 的年份都发生了水华,但 2008 年后发生水华的最小 7 d 平均流量有了明显上升。有水华年份的最小 7 d 平均流量明显低

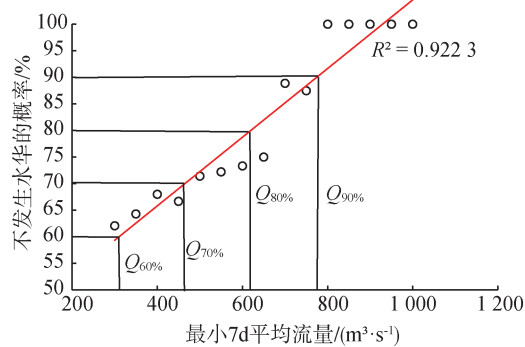
于无水华年份,当最小 7 d 平均流量高于 800 m^3/s 时,从未发生过藻类水华,当其高于 700 m^3/s 时,有时会发生水华(2009 年)。仙桃站 1992—2021 年 1—3 月的最小 7 d 平均流量的范围为 364 ~ 1164 m^3/s 。以 50 m^3/s 为步长,统计在不同流量区间内发生水华的次数,据此得到不同流量下发生水华的概率,见图 9(c)。可见,流量与不发生水华概率的拟合相关性较好, R^2 达到 0.922 3。通过拟合关系推求得到了不同最小 7 d 平均流量下不发生水华的概率,基于 1992—2021 年的样本数据,仙桃站在 60%、70%、80%、90% 不发生水华的概率下,对应的最小 7 d 平均流量应分别高于 310 m^3/s 、470 m^3/s 、610 m^3/s 、780 m^3/s 。



(a) 历年 1—3 月平均流量与藻密度关系



(b) 历年最小 7 d 平均流量



(c) 最小 7 d 流量下不发生水华的概率

图 9 仙桃站流量阈值分析结果
Fig. 9 Analysis results of discharge threshold at Xiantao station

4 结 论

a. 叶绿素 a 质量浓度分别与气温、流量因子有

显著的正相关性和负相关性,但各个因子对叶绿素 a 质量浓度的影响都是非线性的。

b. 基于筛选出的环境因子,叶绿素 a 质量浓度模拟值与实测值的相对误差值为 -3.13% , 具有较好的拟合优度。流量和气温因子对叶绿素 a 影响的重要程度分别为 55.8% 和 44.2% 。

c. 基于仙桃站水华防控的环境阈值分析表明,硅藻水华暴发的水质、气温和流量临界预警时刻为:叶绿素 a 质量浓度高于 $76.47 \mu\text{g/L}$, 7d 滑动积温超过 56.02°C , 最小 7 d 平均流量低于 $780 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

参考文献:

- [1] SUNDARESHWAR P V, UPADHAYAY S, ABESSA M, et al. *Didymosphenia geminata*: algal blooms in oligotrophic streams and rivers [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): L10405.
- [2] 李建, 尹炜, 贾海燕, 等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(5): 136-144. (LI Jian, YIN Wei, JIA Haiyan, et al. Research progress on diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River: review and advances [J]. *Journal of Hydro-ecology*, 2020, 41(5): 136-144. (in Chinese))
- [3] 吴卫菊, 陈晓飞. 汉江中下游冬春季硅藻水华成因研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(9): 55-60. (WU Weiju, CHEN Xiaofei. Study on the formation of diatom blooms in the middle and lower reaches of the Hanjiang River during winter and spring [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(9): 55-60. (in Chinese))
- [4] 殷大聪, 尹正杰, 杨春花, 等. 控制汉江中下游春季硅藻水华的关键水文阈值及调度策略[J]. *中国水利*, 2017(9): 31-34. (YIN Dacong, YIN Zhengjie, YANG Chunhua, et al. Key hydrological thresholds related to algae bloom in middle and lower reaches of Hanjiang River and studies on mitigation measures [J]. *China Water Resources*, 2017(9): 31-34. (in Chinese))
- [5] 梁开学, 王晓燕, 张德兵, 等. 汉江中下游硅藻水华形成条件及其防治对策[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(12): 113-116. (LIANG Kaixue, WANG Xiaoyan, ZHANG Debing, et al. Ecological conditions of diatom water bloom formulation in the middle and lower reach of the Hanjiang River and strategy for water bloom control [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(12): 113-116. (in Chinese))
- [6] 谢平, 夏军, 窦明, 等. 南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究(I): 汉江水华发生的关键因子分析[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 418-423. (XIE Ping, XIA Jun, DOU Ming, et al. Research into the effects of the middle route of south-to-north water transfer project on water bloom in the middle-down stream of Hanjiang River and the countermeasures Part I: an analysis of the key factors generating water bloom in Hanjiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 418-423. (in Chinese))
- [7] 吴兴华, 殷大聪, 李翀, 等. 2015—2016 年汉江中下游硅藻水华发生成因分析[J]. *水生态学杂志*, 2017, 38(6): 19-26. (WU Xinghua, YIN Dacong, LI Chong, et al. Analysis of factors influencing diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River [J]. *Journal of Hydro-ecology*, 2017, 38(6): 19-26. (in Chinese))
- [8] 王俊, 汪金成, 徐剑秋, 等. 2018 年汉江中下游水华成因分析与治理对策[J]. *人民长江*, 2018, 49(17): 11-15. (WANG Jun, WANG Jincheng, XU Jianqiu, et al. Causes analysis of algae bloom in middle and lower reaches of Hanjiang River in 2018 and its countermeasures [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(17): 11-15. (in Chinese))
- [9] 张远, 夏瑞, 张孟衡, 等. 水利工程背景下河流水华暴发成因分析及模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(8): 1163-1173. (ZHANG Yuan, XIA Rui, ZHANG Mengheng, et al. Research progress on cause analysis and modeling of river algal blooms under background of mega water projects [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(8): 1163-1173. (in Chinese))
- [10] DOLMAN A M, RUCKER J, PICK F R, et al. Cyanobacteria and cyanotoxins: the influence of nitrogen versus phosphorus [J]. *Plos One*, 2012, 7(6): e38757.
- [11] 刘凌, 朱良珍, 叶键, 等. 张福河浮游植物群落结构及生态位特征[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 7-12. (LIU Ling, ZHU Liangzhen, YE Jian, et al. Community structure and niche characteristics of phytoplankton in Zhangfu River [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 7-12. (in Chinese))
- [12] CADE B S, NOON B R. A gentle introduction to quantile regression for ecologists [J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2003, 1(8): 412-420.
- [13] 陈小华. 富营养化初期湖泊(洱海)的环境演变及营养物质基准/标准研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [14] KOENKER R, BASSETT G. Regression quantiles [J]. *Econometrica*, 1978, 46(1): 33-50.
- [15] RAO K, ZHANG X, YI X J, et al. Interactive effects of environmental factors on phytoplankton communities and benthic nutrient interactions in a shallow lake and adjoining rivers in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 69: 1661-1672.
- [16] 李蓓, 李勇涛, 蔡梅. 基于数据挖掘的太湖蓝藻生长水环境关键因子研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 506-513. (LI Bei, LI Yongtao, CAI Mei. Research on key factors of water environment for cyanobacteria growth in Taihu Lake based on data mining

[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):506-513. (in Chinese))

[17] 李港,陈诚,何欣霞,等. 湖泊藻类动态模型数据同化模式的改进[J]. 水资源保护, 2021,37(4):156-165. (LI Gang, CHEN Cheng, HE Xinxia, et al. Modify of data assimilation model for lake algae dynamic model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4):156-165. (in Chinese))

[18] 吴娟,朱跃龙,金松,等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(6):542-551. (WU Juan, ZHU Yuelong, JIN Song, et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake

[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):542-551. (in Chinese))

[19] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(3):32-38. (FANG Kuangnan, WU Jianbin, ZHU Jianping, et al. A review of technologies on random forests [J]. Statistics Information Forum, 2011, 26(3):32-38. (in Chinese))

[20] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(4):1190-1197. (LI Xinhai. Using random forest for classification and regression [J]. Journal of Applied Entomology, 2013, 50(4):1190-1197. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-30 编辑:王芳)

(上接第 195 页)

[17] 矫桂丽,刘洪林,孙秀玲,等. 基于 SWAT 模型的尼山水库流域面源污染特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(3):470-474. (JIAO Guili, LIU Honglin, SUN Xiuling, et al. Analysis of non-point source pollution characteristics of Nishan Reservoir based on SWAT model [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(3):470-474. (in Chinese))

[18] 荣易,秦成新,杜鹏飞,等. 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析[J]. 环境科学, 42(6):2769-2777. (RONG Yi, QIN Chengxin, DU Pengfei, et al. Characteristic analysis of SWAT model parameter values based on assessment of model research quality [J]. Environmental Science, 2021, 42(6):2769-2777. (in Chinese))

[19] MANSI Parikh, FALGUNI Parekh. Hydrological modelling of Deo River Sub-Basin using SWAT model and performance evaluation using SWAT-CUP [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2019, 8(12):2890-2896.

[20] 林若兰,卓文珊,高延康,等. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(6):131-136. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, GAO Yankang, et al. Assessment of ecohydrological regulation service in the Beijiang River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):131-136. (in Chinese))

[21] 郭英壮,王晓燕,周丽丽,等. 控制流域氮流失的最佳管理措施配置及效率评估[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2):860-871. (GUO Yingzhuang, WANG Xiaoyan,

ZHOU Lili, et al. Configuration and efficiency evaluation of the best management practices to control nitrogen loss in the watershed [J]. China Environmental Science, 2021, 41(2):860-871. (in Chinese))

[22] 傅博. 江门市四堡水库非点源污染与健康评价研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2020.

[23] 王媛,楚春礼,刘夏,等. 率水流域非点源污染分析及施肥措施模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4):6-13. (WANG Yuan, CHU Chunli, LIU Xia, et al. Non-point source pollution analysis and fertilizer management simulation in Shuaishui Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(4):6-13. (in Chinese))

[24] 黄康. 基于 SWAT 模型的丹江流域面源污染最佳管理措施研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2020.

[25] 李哲. 哈尔滨市水环境管控单元的划分及非点源污染应对策略 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.

[26] 丁洋. 基于 SWAT 模型的奶水河流域非点源污染最佳管理措施研究 [D]. 济南:济南大学, 2019.

(收稿日期:2021-07-07 编辑:俞云利)

