

局部降温对输水渠道水华抑制的影响分析

张雅卓¹, 宋芷萱¹, 姚焯^{1,2}, 闫琳琳¹, 徐楚涵¹

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 天津理工大学 海洋能源与智能建设研究院, 天津 300384)

摘要: 南水北调中线工程自通水以来, 发挥着巨大的社会和经济效益, 已成为京津地区的主力水源。中线工程输水的水质理化指标相对稳定, 但局部渠段存在藻类异常增殖现象, 有水华爆发的风险。针对出现的藻类异常增殖问题, 在通冷风这一改变局部气象条件的工程措施基础上, 建立了澎河—沙河渡槽段平面二维水动力和水质模型, 研究了通风位置、通风温度和通风时长等因素对输水渠道水温和藻类的影响。研究表明: 水温和叶绿素 *a* 浓度均与通风位置、通风温度和通风时长有关, 通风温度越低、通风时长越长, 平均水温和叶绿素 *a* 浓度下降幅度越大, 平均水温最高可下降约 2 °C, 叶绿素 *a* 浓度最大可降低约 54.5%, 且仅上游和全渠段通风均可有效降低水温和抑制藻类生长, 仅下游通风对水温和藻类的影响较小。因此, 采取局部降温的方式可以起到一定的降低叶绿素 *a* 浓度的作用, 综合考虑藻类抑制效果和工程成本, 在水华易爆发渠段的上游通冷风是行之有效的工程措施。

关键词: 输水渠道水华; 局部降温; 通冷风; 叶绿素 *a*; 水温; 数值模拟; 南水北调中线工程

中图分类号: TV672⁺.2; X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2024)02-0130-09

Influence of local cooling on bloom suppression in water diversion channels

ZHANG Yazhuo¹, SONG Zhixuan¹, YAO Ye^{1,2}, YAN Linlin¹, XU Chuhan¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2. Institute of Marine Energy and Intelligent Construction, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: The middle route of South-to-North Water Diversion Project has been the main source of water supply for Beijing and Tianjin since its opening to the outside world, bringing massive social and economic benefits to the society. At present, the physical and chemical indices of water quality are relatively stable in the middle route project, with occasional abnormal algal proliferation in some channel sections, which may lead to algal blooms if left unattended. To address this problem, the engineering measure of local cooling ventilation, which changed the local meteorological conditions was adopted, and a two-dimensional hydrodynamic and water quality model was developed for the Penghe - Shahe aqueduct, and the effects of different ventilation locations, ventilation temperature and ventilation duration on water temperature and algae growth in water diversion channels were studied. The results show that both water temperature and chlorophyll *a* concentration are related to ventilation position, ventilation temperature and ventilation duration. The lower the ventilation temperature, the longer the ventilation duration, the greater the decline of the water temperature and chlorophyll *a* concentration, the water temperature can be reduced by about 2 °C, and the concentration of chlorophyll *a* can be reduced by about 54.5% at most, both upstream only ventilation and whole channel section ventilation can lower the water temperature and inhibit the growth of algae, but downstream only ventilation has little effect on water temperature and algae growth. Therefore, local cooling can reduce the concentration of chlorophyll *a* to some extent, considering the algal inhibition effect and engineering cost, the engineering measure of local cooling ventilation in the upstream is recommended for the algal bloom-prone channel sections.

收稿日期: 2023-04-04; 修回日期: 2023-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4200701); 国家自然科学基金项目(52079087); 河北省自然科学基金创新研究群体项目(E2020402074)

作者简介: 张雅卓(1979—), 女, 天津人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事水生态研究。

通讯作者: 姚焯(1987—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态水文学研究。

Key words: bloom in water diversion channel; local cooling; ventilation; chlorophyll a; water temperature; numerical simulation; The middle route of the South-to-North Water Diversion Project

1 研究背景

调水工程在解决水资源时空分布不均、缓解区域性严重缺水等方面发挥了极其重要的作用^[1]。南水北调中线工程作为我国最大的长距离调水工程,自2014年12月正式通水运行以来,累计输水量逾 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$,已使沿线超 $8\,500 \times 10^4$ 人口受益,发挥了巨大的社会、经济和生态效益^[2-3]。但由于其输水距离长、供水范围广,明渠段与外界全面接触^[4],在运行过程中极易受到不确定性因素的影响^[5],而且渠道常水位运行,水深较浅,水下光照强度较为充足,为藻类等低等水生生物提供了稳定且适宜生长的环境,从而可能会影响供水安全^[6-7]。2015年以来,南水北调中线工程每年春、夏两季均有局部渠道藻类异常增殖的现象,藻类异常增殖可能会加剧水体中水华的爆发,藻类死亡后的残体消解还会释放出营养物质和有机物,造成水体的富营养化^[8-10]。因此,藻类生长的监测和防控对于保障南水北调中线工程水质和沿线供水地区的人民生命财产安全以及促进经济发展具有重大意义。

充足的营养盐、适宜的气候条件和适当的水动力状态是藻类生长繁殖的三大因素^[11]。学者们开展了大量研究,试图通过改变藻类繁殖所需的营养盐^[12-14]和水动力^[15-20]这两个条件来抑制藻类生长,具体可分为物理方法、化学方法和生物方法,其中包括曝气破坏水体分层、稀释水体降低营养浓度、机械除藻、避光、药剂杀藻、藻类病原菌和水生植物抑制藻类等措施^[21],目前已经研发科学防治水华的设备有扬水曝气装置^[22]、超声波除藻设备^[23-24]等。尚力阳等^[25]设计的第二代输水干渠智能化拦藻设备已经正式在实际工程中应用,并在改善南水北调工程输送水体质量方面发挥了重要效用。对于滇池、太湖、富春江库区、汉江等的大量研究显示^[26-32],气候条件变化、气温变暖、风速降低等是影响藻类水华爆发的重要原因。练继建等^[33]研发了一种长距离输水渠道抑藻装置,在渠道上方架设太阳能板发电并以此带动风机,对水体进行通风来调节局部气候条件改变水温,进而抑制藻类生长,但如何避免气候变化对水体藻类水华爆发产生的负面影响仍亟待研究。

近年来,以风、光能源利用为主的分布式发电项目发展迅速,加之我国基建和制造业的技术引领,通过在输水渠道沿线的局部建设通风工程来改善水环

境成为可能,进而研究该工程措施对渠道水温的影响以及对藻类产生的抑制效果。为达到降低成本、抑制藻类增殖的目的,需分析通风位置、时长、温度等对藻类增殖的影响规律,以明确这一工程措施的合理布设方式。相比于传统的物模试验、原型观测等研究手段,数值模拟具有准确、快速和便于大尺度预测的优点。本文选取南水北调中线工程沙河—沙河渡槽段作为研究对象,构建平面二维水温水质数值模型,模拟分析不同的通风位置、通风温度和通风时长条件对输水渠道水温、叶绿素a浓度的影响规律,从而提出抑制藻类增殖的最佳施工况,为缓解我国南水北调中线工程藻类异常增殖提供理论和技术支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

南水北调中线工程沙河—沙河渡槽段全长约11.9 km,研究区域的地理范围如图1所示。



图1 研究区域示意图

研究区段位于河南省平顶山市鲁山县,上游自鲁山县薛寨村北始,下游至鲁山坡东侧三街村西止,跨越沙河、大浪河、将相河等3条河流,年平均气温约 $14.7 \text{ }^\circ\text{C}$,年风速为 $1.7 \sim 2.4 \text{ m/s}$,年降水量约 $1\,000 \text{ mm}$,无霜期209 d。根据气象统计数据,该区域8月份平均气温在 $24 \sim 33 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,平均水温在 $26 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。该区段包含多种水工构筑物,如节制闸、分水口、倒虹吸等,涉及的建筑物类型包括长度为 $9\,050 \text{ m}$ 的渡槽和 $2\,888.1 \text{ m}$ 的渠道,设计流量

150 m³/s,设计水位6.7 m。本次选取的渠段位于沙河渡槽附近,属于南水北调中线工程藻类增殖区,该渠段的藻类数据相对较齐全,沙河渡槽区域是藻类增殖敏感点,包含一个藻类监测点(沙河渡槽进口),且在距该渠段不远处还有另一个藻类监测点(鲁山坡落地槽)。根据南水北调中线工程澎河—沙河段2018年实测水文数据资料,选取夏季最容易爆发水华的7—8月作为模拟时段,模拟时长为46 d;根据实测资料设置上游澎河的气候、水位、流量、

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: t 为时间, s ; x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; η 为水位, m ; $h = \eta + d$ 为总水深, m ; d 为静止水深, m ; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的速度分量, m/s ; f 为哥氏力系数, $kg \cdot m/s^2$; $f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度, rad/s , φ 为纬度, ($^\circ$); g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_0 为纯水的密度, kg/m^3 ; p_a 为气压, kPa ; S 为源项; u_s 、 v_s 分别为源项 x 、 y 方向水流速度, m/s ; τ_{sx} 、 τ_{bx} 、 τ_{sy} 、 τ_{by} 为有效剪切应力分量, N/m^2 ; s_{xx} 、 s_{yy} 、 s_{xy} 分别为辐射应力分量, m^2/s^2 ; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为黏滞应力分量, m^2/s^2 。

水温和水质模块的数学描述是由一系列通用的微分方程组成,数学描述主要包括变量、常量、作用力、辅助变量、过程和衍生结果等6种类型。水温和水质模型均遵循下列状态变量控制方程。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + S_c + P_c \quad (4)$$

式中: D_x 、 D_y 、 D_z 分别为对应 x 、 y 、 z 方向的扩散系数, m^2/s ; c 为状态变量浓度, mg/L ; u 、 v 、 w 分别为对应 x 、 y 、 z 方向的流速, m/s ; $u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z}$ 为对流项;

$D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$ 为扩散项; S_c 为源汇项; P_c 为过程项,当描述水温时由模型自带的热交换模块计算得出。

2.3 参数率定

模型对于气候条件和藻类生长相关参数较为敏感,以南水北调中线工程澎河—沙河段2018年7—

水温和水质状况,依据下游沙河边界实测数据进行率定。

2.2 模型原理

建立平面二维水动力水质耦合模型进行模拟分析,采用三角型网格结构方式对渠道地形进行网格化划分,共划分1406个网格。模型基于二维非恒定浅水方程组,如方程式(1)~(3)所示。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{h}u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}v}{\partial y} = hS \quad (1)$$

8月的实测数据资料为率定的代表时段数据,主要率定的参数取值见表1。

表1 率定参数设置表

参数	取值
藻类生长速率/ $mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$	0.4
藻类呼吸速率/ $mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$	0.04
藻类沉降速率/ $m \cdot d^{-1}$	0.4
藻类死亡速率/ $mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$	0.175
藻类生长光饱和强度/ $W \cdot m^{-2}$	120
碳氧生产与消耗比例/ $mg \cdot mg^{-1}$	4.5
消光系数/ m^{-1}	1
透射比	0.7
传热系数/ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	0.0015
浮游植物一阶死亡率/ $mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$	0.01
依赖温度的绿藻生长速率/ $mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$	1.2
最大叶绿素产量系数	1.8

采取将实测值与模拟预测得到的数值进行对比评估的方法,判断模型的率定结果是否具有足够的准确性和精确度。参考数值分析研究中常用的多种评估判定方式,本研究采用统计误差中的绝对平均误差(mean average error, MAE)和均方根误差(root mean squared error, RMSE)对模型的率定结果进行检验,计算方法见公式(5)、(6)。

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |Q_o^t - Q_m^t|}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_o^t - Q_m^t)^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中: Q_o 为实测值; Q_m 为模拟值; n 为个数。

模拟的水位、水温、水质数据与南水北调中线工程的实测数据对比见图 2, 各指标统计误差平均值见表 2。从实测数据和模拟数据的趋势以及表 2 中

绝对平均误差 MAE 和均方根误差 $RMSE$ 的值均可以直观地看出, 模拟值与实测值较为吻合, 模拟结果误差较小, 因此可认为该模型对研究渠段的模拟效果较好, 其精度可以满足研究要求。

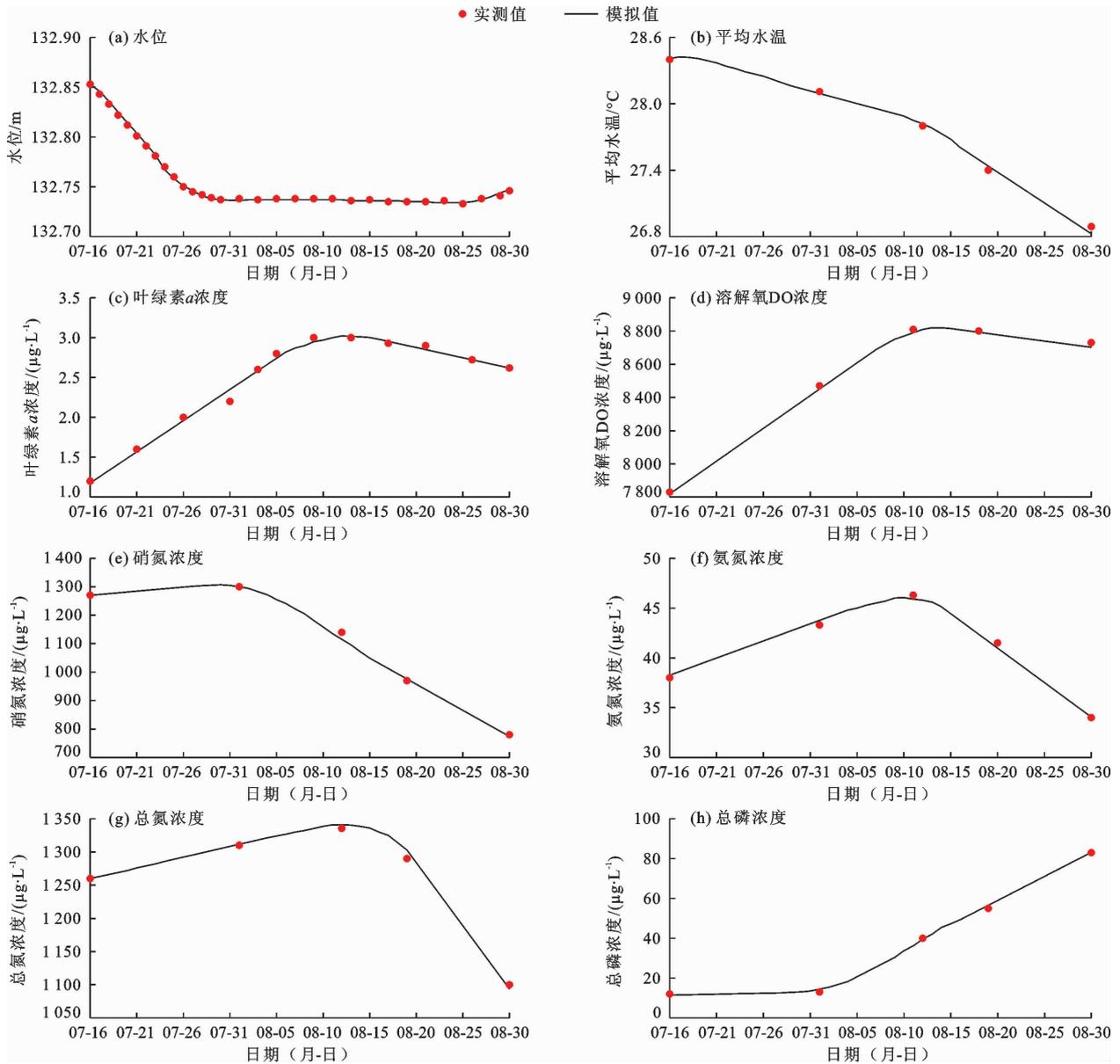


图 2 水位、水温及水质各指标率定结果

表 2 各指标模拟值的统计误差平均值

评价参数	水位/ m	水温/ °C	叶绿素 a/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	DO/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	硝氮/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	总氮/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	总磷/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
MAE	0.003	0.009	0.038	0.009	0.003	0.000 1	0.002	0.000 3
RMSE	0.003	0.016	0.057	0.015	0.006	0.000 2	0.004	0.000 5

3 结果与分析

3.1 情景设定

模型中, 将渠道上方区域沿程以 100 m 为间隔

划分为 110 个方格, 在每个方格内设定通风温度, 以实现渠道段的通风模拟。依据所划分的网格设置渠道段不同位置的气温和风速, 从而模拟不同工况下局部通风对渠道的影响规律。为便于研究不同位置通

风的影响,将通风风速统一按照原来的1.5倍设置,由于渠段相对较窄且狭长,风速对水动力状态的影响可忽略不计。通过系列情景设定,模拟分析通冷风前后,不同通风位置、通风温度和通风时长等影响因素对输水渠道水温和叶绿素 *a* 浓度的影响规律。为了更好地对比不同通风条件对研究区域的影响,设定虚拟工况可以展示一场完整的水华生消全过程。模拟时长为2018年7月16日至8月30日,共46 d,水温、营养盐浓度、上下游流量边界均参照率定工况设置。

由于渠段长度较短,因此在设计工况时仅将渠道划分为长度相等的两段分别作为上游和下游的通风实施区域(图3)。

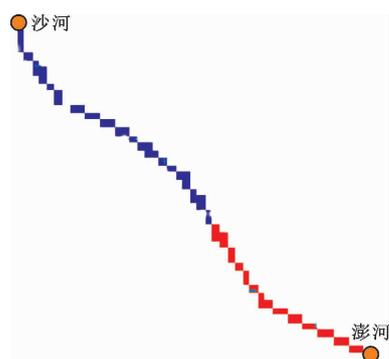
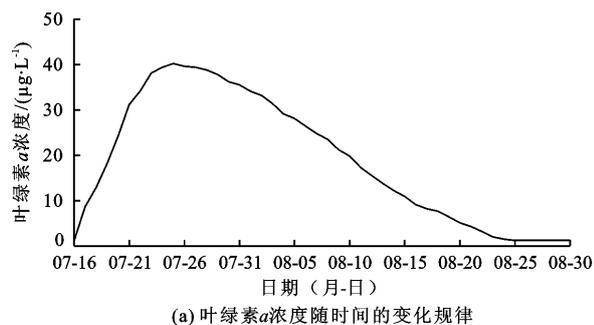


图3 通风区域示意图

图中红色区域为上游通风区域,蓝色区域为下游通风区域。工况设置按照通风位置分为仅上游通风、仅下游通风和全渠段通风3组;通风时长设定为10、20和30 d;根据研究区域气候条件,选择5℃为通风温度梯度,设置3种通风温度(15、10、5℃)。将不同通风位置、通风时长和通风温度组合,形成共计27种工况(表3)。例如工况A₁表示仅上游通风、通风温度15℃、通风时长10 d的模拟条件;B₁表示仅下游通风、通风温度15℃、通风时长10 d的



(a) 叶绿素a浓度随时间的变化规律

模拟条件;C₁表示全渠段通风、通风温度15℃、通风时长10 d的模拟条件。图4为渠道主要监测点位示意图。

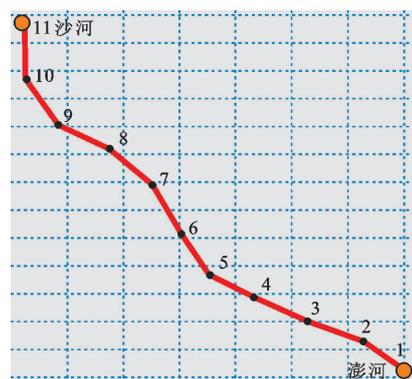


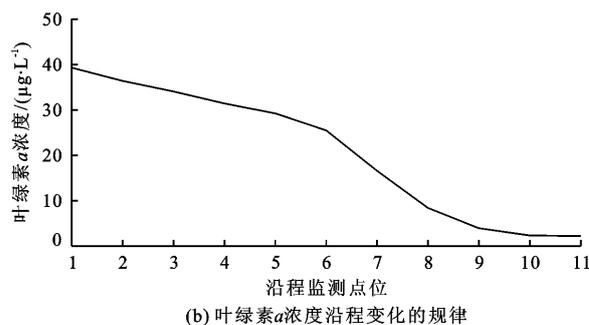
图4 澎河-沙河渠段的数据监测点位示意图

表3 工况组合参数表

通风位置	通风时长/d	通风温度/℃		
		15	10	5
空白对照	0			
仅上游通风	10	A ₁	A ₂	A ₃
	20	A ₄	A ₅	A ₆
	30	A ₇	A ₈	A ₉
仅下游通风	10	B ₁	B ₂	B ₃
	20	B ₄	B ₅	B ₆
	30	B ₇	B ₈	B ₉
全渠段通风	10	C ₁	C ₂	C ₃
	20	C ₄	C ₅	C ₆
	30	C ₇	C ₈	C ₉

3.2 局部通冷风对输水渠道水温和叶绿素 *a* 影响的模拟分析

3.2.1 虚拟工况模拟结果 设定空白工况条件,模拟了一场完整的水华生消过程,结果见图5、6。



(b) 叶绿素a浓度沿程变化的规律

图5 虚拟工况下渠道叶绿素 *a* 浓度的时空变化

由图5(a)可以看出,在计算时段内,叶绿素 *a* 浓度从初始接近零点到较快达到藻类生长峰值 40

μg/L,再到藻类逐渐衰亡趋近于零,模型完整模拟了一场藻类生消全过程变化;由图5(b)可以看出,

在空间上,叶绿素 *a* 浓度沿渠段自上游至下游逐渐由 40 $\mu\text{g/L}$ 下降至 3 $\mu\text{g/L}$,模型模拟了该渠段对应流速、水温条件下的藻类实际沿程变化的生长趋势。由图 6 可以看出,未通风工况条件下,模拟时段内渠道平均水温略有上升,在 28 ~ 29 $^{\circ}\text{C}$ 之间。基于以上虚拟工况设定模型参数,采用单一变量原则,逐一改变通风位置、通风温度和通风时长来开展系列模拟计算,对比分析不同工况下渠道平均水温和叶绿素 *a* 浓度随时间的变化规律。

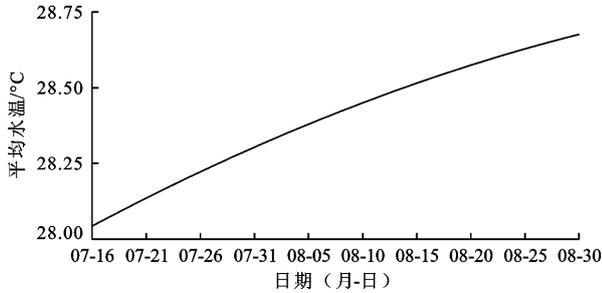


图 6 虚拟工况下渠道平均水温的变化

3.2.2 通风位置的影响 选取工况 A_1 、 B_1 、 C_1 和空白对照工况,即固定通风温度 15 $^{\circ}\text{C}$ 、通风时长 10 d 的条件,不同通风位置下整个渠段平均水温和叶绿素 *a* 浓度随时间变化过程对比见图 7、8。

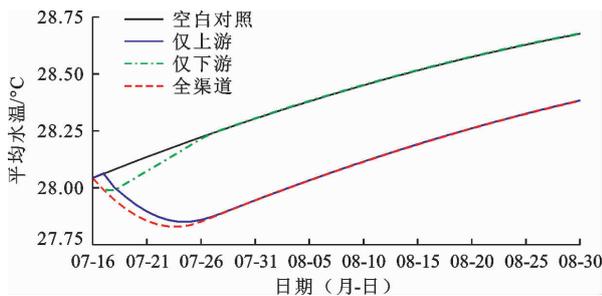


图 7 不同通风位置下渠道平均水温随时间的变化

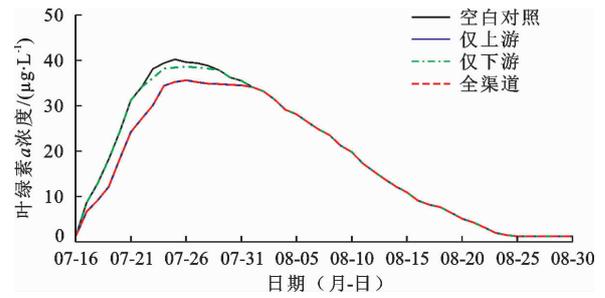


图 8 不同通风位置下渠道叶绿素 *a* 浓度随时间的变化

由图 7 可以看出,仅上游通风组和全渠道通风组这 2 种工况下的水温变化基本一致,均在通风时段内出现了明显的下降趋势,且下降幅度较大,仅上游通风组比全渠道通风组的平均水温下降滞后 1 ~ 2 d;而仅下游通风组的平均水温只有极小幅度的短暂下降,随即迅速升高;结束通风后,3 组的升温速率均与空白对照组保持一致,以 0.015 $^{\circ}\text{C/d}$ 的速率持续回温,仅下游通风组的平均水温与对照组相同,而仅上游通风组和全渠道通风组的平均水温均低于对照组。由图 8 可以看出,仅上游通风和全渠道通风 2 种工况下的叶绿素 *a* 浓度变化过程完全一致。而与仅下游通风组相比,仅上游通风组的叶绿素 *a* 浓度最大值下降了 21.8 $\mu\text{g/L}$,下降幅度约为 54.5% (工况 A_9)。通风结束后 3 组在藻类衰亡过程中叶绿素 *a* 浓度趋于一致。

3.2.3 通风温度的影响 通风 20 和 30 d 条件下的水温变化与通风 10 d 的变化保持一致。以通风 10 d 为例,选取工况 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 C_2 、 C_3 和空白对照工况,对比分析不同通风温度下整个渠段平均水温和叶绿素 *a* 浓度的变化过程,详见图 9、10。

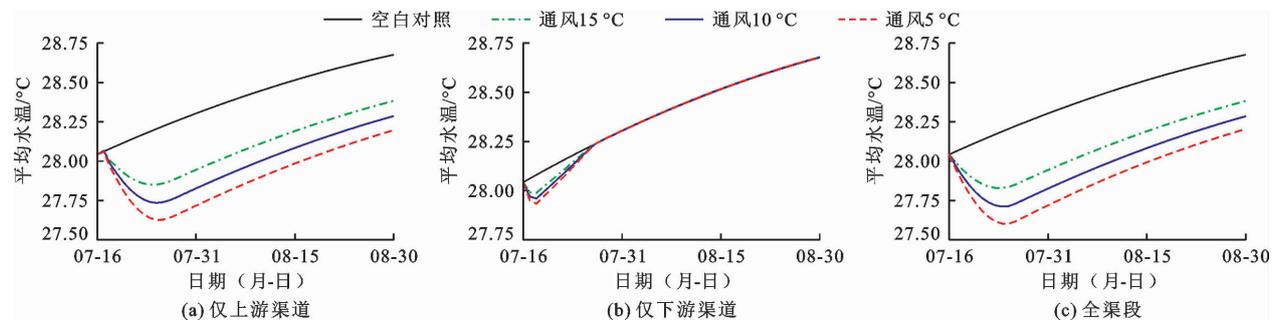


图 9 不同通风温度下渠道平均水温随时间的变化

由图 9 可以看出,不同通风温度下,仅上游和全渠道通风 2 组水温变化情况保持一致。其平均水温在通风温度为 15、10、5 $^{\circ}\text{C}$ 的工况下,分别以 0.050、0.062 和 0.076 $^{\circ}\text{C/d}$ 的速率下降,在第 10 d 时达到

最低温度,但仅上游通风组依然比全渠道通风组的平均水温开始下降时间滞后约 2 d;仅下游通风组的水温变化对比不太明显,其平均水温在 3 种通风温度 (15、10、5 $^{\circ}\text{C}$) 下均为短暂下降后,又分别以

0.028、0.031 和 0.034 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 的速率在结束通风前上升至未通风状况下的温度值。由图 10 可以看出,不同通风温度下,仅上游和全渠段通风 2 组的叶绿素 a 最高浓度分别比未通风组降低了 4.4、7.2 和 9.1 $\mu\text{g}/\text{L}$;仅在下游渠道通风组的叶绿素 a 最高浓度比

未通风状况分别降低了 1.4、2.8 和 5.4 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

3.2.4 通风时长的影响 以通风温度 15 $^{\circ}\text{C}$ 为例,选取工况 A₁、A₄、A₇、B₁、B₄、B₇、C₁、C₄、C₇ 和空白对照工况,对比分析不同通风时长下渠段平均水温和叶绿素 a 浓度的变化过程,见图 11、12。

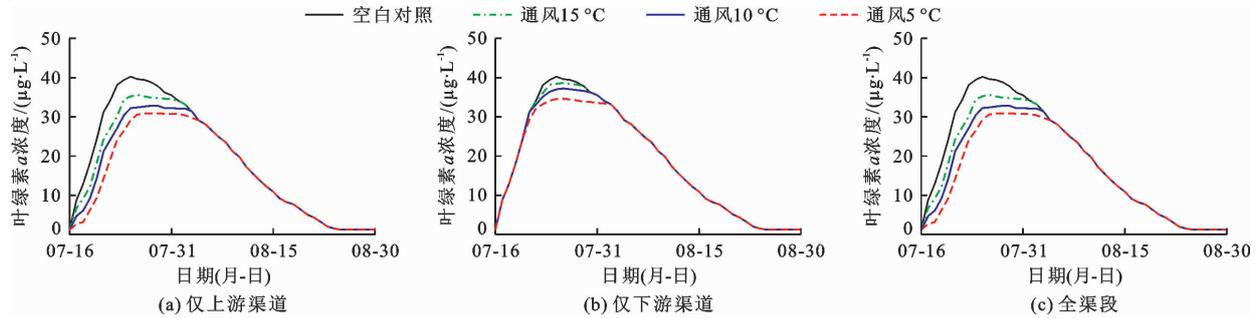


图 10 不同通风温度下渠道叶绿素 a 浓度随时间的变化

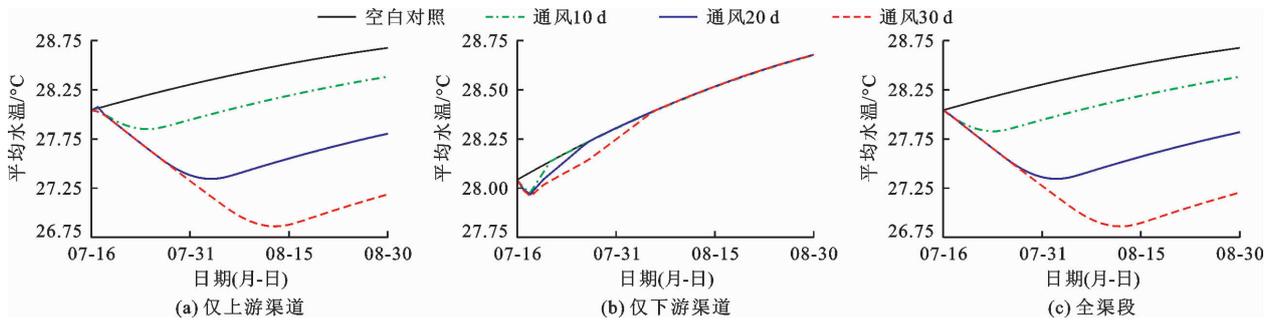


图 11 不同通风时长下渠道平均水温随时间的变化

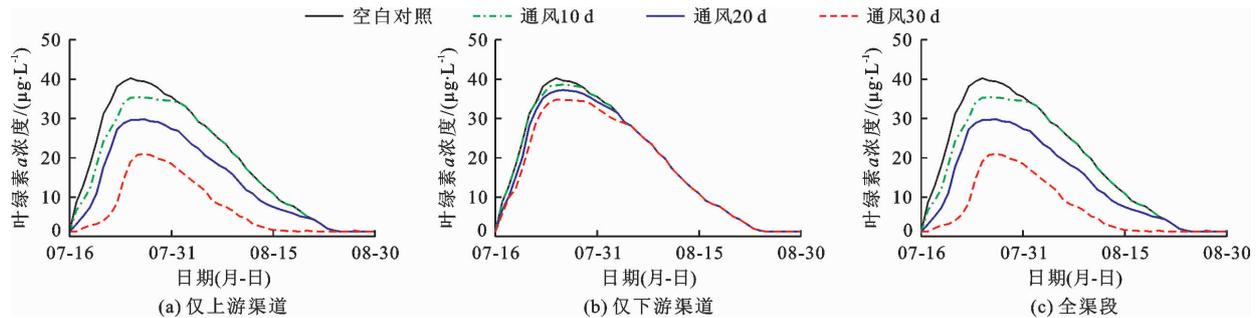


图 12 不同通风时长下渠道叶绿素 a 浓度随时间的变化

由图 11 可以看出,不同通风时长下,仅上游通风和全渠段通风 2 组变化情况依然保持一致,其平均水温均以约 0.050 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 的速率持续下降,并分别在 10、20 和 30 d 时达到最低温度;仅下游通风组在 3 种不同的通风时长(10、20 和 30 d)条件下的平均水温只有小幅度下降,约在 3 d 左右达到最低温度,后分别以 0.028、0.023 和 0.021 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 的速率在结束通风前回温,直至与未通风状况下的温度值保持一致。由图 12 可以看出,不同通风时长下,仅上游和全渠段通风 2 组的叶绿素 a 浓度变化情况依然相同,最高浓度分别比未通风组降低了 4.4、10.2 和

11.9 $\mu\text{g}/\text{L}$;仅下游通风组的叶绿素 a 最高浓度分别比未通风组降低了 1.4、2.8 和 3.4 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

4 讨论

本研究以南水北调中线工程澎河到沙河渡槽段作为研究对象,全长 11.9 km。构建平面二维数值模型,采用夏季的实测数据对模型进行率定,并从通风位置、通风温度、通风时长等 3 个方面设置不同工况模拟研究渠段水动力和水质过程,模拟数据结果详见表 4。

由表 4 可以看出,藻类的生长与温度^[34-36]、光

照^[37]、营养因子(氮磷、CO₂)^[38-39]、pH^[40]、水动力条件^[19,41-42]等因素有关,水体温度变化与气温和太阳辐射度有关,因此春季至秋季 10~30℃的水温有利于藻类生长^[43],此时渠道内水体更容易发生水华和富营养化现象。

表 4 不同工况下模拟数据结果

工况	通风位置	通风温度/℃	通风时长/d	最低温度/℃	峰值时间/d	叶绿素 <i>a</i> 浓度峰值/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
空白对照		28		28.00		40.0
A ₁		15	10	27.80	10	35.6
A ₂		10	10	27.60	10	32.8
A ₃		5	10	27.50	10	30.9
A ₄		15	20	27.20	20	29.8
A ₅	仅上游	10	20	26.80	20	27.1
A ₆	通风	5	20	26.50	20	23.3
A ₇		15	30	26.90	30	28.1
A ₈		10	30	26.40	30	21.0
A ₉		5	30	26.00	30	18.2
B ₁		15	10	27.97	3	38.6
B ₂		10	10	27.95	3	37.2
B ₃		5	10	27.93	3	34.6
B ₄		15	20	27.96	3	37.2
B ₅	仅下游	10	20	27.94	3	36.3
B ₆	通风	5	20	27.92	3	33.5
B ₇		15	30	27.95	3	36.6
B ₈		10	30	27.93	3	34.8
B ₉		5	30	27.92	3	32.7
C ₁		15	10	27.80	10	35.6
C ₂		10	10	27.60	10	32.8
C ₃		5	10	27.50	10	30.9
C ₄		15	20	27.20	20	29.8
C ₅	全渠段	10	20	26.80	20	27.1
C ₆	通风	5	20	26.50	20	23.3
C ₇		15	30	26.90	30	28.1
C ₈		10	30	26.40	30	21.0
C ₉		5	30	26.00	30	18.2

在水华易爆发的夏季,通过控制局部气候条件比如通冷风的方式能够直接影响渠段水温,从而抑制藻类的生长繁殖,使得叶绿素 *a* 浓度降低。不同的通风位置、通风温度、通风时长所产生的影响均不

同。当通风位置和通风时长一定时,通风温度决定着水温下降速率,通风温度越低,水温下降速率和水体降温幅度越大,叶绿素 *a* 浓度降幅也越大。当通风位置和通风温度一定时,通风时长则决定着水温持续下降的时间,通风时长越长,水温下降的幅度越大,叶绿素 *a* 浓度也随之下降更多。停止通风后,不同工况的水温回温速率均约等于未通风时的水温上升速率。由模拟结果对比可知,抑制水华效果最佳的运行工况为仅上游通风、通风温度 5℃、通风时长 30 d 的条件(工况 A₉),此时水温下降幅度最大,降低了约 2℃,叶绿素 *a* 浓度下降幅度也最大,峰值浓度降低了约 54.5%。

在当前全球气候变暖的背景下,人类活动带来的污染和极端天气引起的水文气象条件变化均会对南水北调中线干渠水质安全和运行带来一定的威胁^[44],在传统的物理和生物控藻措施之外,本研究充分证实了局部气候条件的改变对渠道水华爆发具有抑制效果,可为类似的长距离输水明渠工程的水质保障提供借鉴。

5 结 论

(1)局部通冷风能够直接影响渠段水温,不同的通风位置对水温和叶绿素 *a* 浓度的变化产生的影响也不同。仅对上游通冷风和全渠段整体通冷风均可使全渠段水温下降,而且降温效果几乎相同,水温最高下降约 2℃;仅对下游通冷风对渠道水温的影响不大,只是在通风时间内,水温短暂降低且下降幅度较小。而且仅上游通风和全渠段通风 2 种工况下的叶绿素 *a* 浓度变化过程完全一致,与未通风组相比,其叶绿素 *a* 浓度最大值可下降 21.8 $\mu\text{g}/\text{L}$,降幅约为 54.5%。

(2)水温下降和叶绿素 *a* 浓度降低与通风温度和通风时长呈正相关关系,通风温度越低(或通风时长越长),水温下降速率也越快,下降幅度也越大,同时叶绿素 *a* 浓度也随之下降越多,抑制藻类效果越好。通风温度每下降约 5℃,平均水温下降速率加快 20% 左右,叶绿素 *a* 浓度的下降幅度可增加 2~3 $\mu\text{g}/\text{L}$;随着通风时长的增加,水温下降速率不变但下降幅度变大,且通风时长每增加 10 d,叶绿素 *a* 浓度的下降幅度最大可增加 7 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

(3)对于水华易爆发渠道,采取局部通冷风降温的工程措施可以起到降低叶绿素 *a* 浓度的作用。同时,考虑到藻类抑制效果和工程成本,仅在水华易爆发渠道上游采取通冷风的措施是抑制藻类生长性

价比最高且有效的措施,该措施为未来科学调控长距离输水明渠工程藻类异常增殖现象提供了较为可行的方法。

参考文献:

- [1] 高媛媛,姚建文,陈桂芳,等. 我国调水工程的现状与展望[J]. 中国水利,2018(4):49-51.
- [2] ZHANG Chunmei, ZHU Feixia, WANG Yuanzhu, et al. Assembly processes of eukaryotic plankton communities in the world's largest drinking water diversion project[J]. Science of the Total Environment, 2023, 884: 163665.
- [3] ZHAO Zhenyu, ZUO Jian, ZILLANTE G. Transformation of water resource management: a case study of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 136-145.
- [4] LIU Linghua, PENG Wenqi, WU Leixiang, et al. Water quality assessment of Danjiangkou Reservoir and its tributaries in China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 112: 012008.
- [5] 黄绳,农翕智,梁建奎,等. 南水北调中线工程运行的环境问题及风险分析[J]. 人民长江,2019,50(8):46-51.
- [6] 石文波,陶益,张锡辉. 水环境中硅藻水华预警和控制技术研究[J]. 水利水电技术,2015,46(2):60-63+69.
- [7] 张海涵,王娜,宗容容,等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展[J]. 环境科学研究,2022,35(1):181-190.
- [8] 林明利. 南水北调中线原水风险及供水安全应对建议[J]. 给水排水,2017,53(3):9-14.
- [9] 刘雪梅,章光新. 气候变化对湖泊蓝藻水华的影响研究综述[J]. 水科学进展,2022,33(2):316-326.
- [10] DOU Ming, ZHAO Peipei, WANG Yanyan. Impacts of the middle route of South to North Water Transfer Project on water environment in China[J]. Current Science, 2017, 112(4): 688-689.
- [11] 张骁栋,崔丽娟,王金枝,等. 氮磷比对固氮和非固氮蓝藻种间关系的影响[J]. 水利水电技术,2017,48(9):29-34+83.
- [12] 朱广伟,秦伯强,张运林,等. 2005—2017年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素[J]. 湖泊科学,2018,30(2):279-295.
- [13] 覃鸿,刘学,黄菊梅,等. 南湖富营养化与气象影响因子的关系研究[J]. 气象科技进展,2020,10(3):123-127.
- [14] 杭鑫,徐敏,谢小萍,等. 富营养化状态下太湖蓝藻水华气象条件影响的评估[J]. 科学技术与工程,2019,19(7):294-301.
- [15] 练继建,王旭,刘婵玉,等. 长距离明渠输水工程突发水污染事件的应急调控[J]. 天津大学学报,2013,46(1):44-50.
- [16] 黎佛林,蔡德所,文宏展,等. 不同水动力条件下的河流硅藻群落分布机理研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):205-209.
- [17] 吴晓辉,李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展[J]. 生态环境学报,2010,19(7):1732-1738.
- [18] 龙天渝,蒙国湖,吴磊,等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长影响的数值模拟[J]. 环境科学,2010,31(7):1498-1503.
- [19] YU Qian, LIU Zhaowei, CHEN Yongcan, et al. Modelling the impact of hydrodynamic turbulence on the competition between *Microcystis* and *Chlorella* for light[J]. Ecological Modelling, 2018, 370: 50-58.
- [20] KOMORITA T, KOBARI T, KUME G, et al. Spring phytoplankton blooms in the northern Satsunan region, Japan, stimulated by the intrusion of Kuroshio Branch water[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2021, 259: 107472.
- [21] 谈毅奇,吴文胜,张良,等. 藻类水华控制技术及应用[J]. 当代水产,2021,46(8):66-67+69.
- [22] 翟振起,黄廷林,陈凡. 扬水曝气技术在调水型水库水质改善中的应用[J]. 中国给水排水,2022,38(8):31-37.
- [23] KONG Yuan, ZHANG Zhi, PENG Yazhou. Multi-objective optimization of ultrasonic algae removal technology by using response surface method and non-dominated sorting genetic algorithm - II[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 230: 113151.
- [24] 陆贻超,王国祥,李仁辉. 超声波和改性粘土集成技术在去除蓝藻水华上的应用[J]. 湖泊科学,2010,22(3):421-429.
- [25] 尚力阳,范素香,张智勇,等. 输水干渠智能化拦藻设备设计及应用[J]. 华电技术,2020,42(6):22-24+42.
- [26] 李洪利,王坚红,程军,等. 太湖叶绿素 a 年际变化的主要驱动因子及未来气候的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(5):1332-1341.
- [27] EDWARDS K F, KLAUSMEIER C A, LITCHMAN E. Evidence for a three-way trade-off between nitrogen and phosphorus competitive abilities and cell size in phytoplankton[J]. Ecology, 2011, 92(11): 2085-2095.
- [28] 黄群芳,国超旋,李娜,等. 富春江库区高温热浪变化特征及对藻类水华潜在影响研究[J]. 环境科学研究,2022,35(2):530-539.
- [29] 鲁韦坤,余凌翔,欧晓昆,等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系[J]. 湖泊科学,2017,29(3):534-545.
- [30] 夏瑞,张远,王璐,等. 汉江下游河流型水华爆发的多影响要素特征识别[J]. 环境科学研究,2020,33(4):911-920.

(下转第148页)

- 学,2023,41(5):67-70+80.
- [20] BREIMAN L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [21] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69: 46-61.
- [22] DAI Bo, GU Chongshi, ZHAO Erfeng, et al. Statistical model optimized random forest regression model for concrete dam deformation monitoring [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(6): e2170.
- [23] 李汪繁,丁先,方晶剑. 基于GWO-RF的凝汽器真空预测方法[J]. *动力工程学报*,2023,43(4):436-442.
- [24] 陈永政. 灰狼优化算法在城市需水预测模型中的应用[J]. *人民黄河*,2023,45(2):97-100+126.
- [25] 单正,王元龙,白若忱,等. 基于灰狼优化算法的燃气轮机自抗扰控制参数整定研究[J]. *热能动力工程*, 2023,38(4):1-6.
- [26] 刘再涛,王震,贺建军,等. 基于灰狼算法优化的多隐层径向神经网络铅锌烧结返粉料水分预测[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2023,54(2):754-764.
- [27] 许凯,雷学文,孟庆山. 渗流反演分析在某水电工程中的应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*,2011,44(1):37-39+43.
- [28] LI Yanlong, YIN Qiaogang, ZHANG Ye, et al. Prediction of long-term maximum settlement deformation of concrete face rockfill dams using hybrid support vector regression optimized with HHO algorithm [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2023, 13(2-3): 371-386.
- [29] 张巍,肖明. 地下工程渗流断层数值模拟的隐式复合材料单元法研究[J]. *岩土工程学报*,2005,27(10):1203-1206.
- [30] 李炎隆,李守义,丁占峰,等. 基于正交试验法的邓肯-张E-B模型参数敏感性分析研究[J]. *水利学报*, 2013,44(7):873-879.
- [31] HAUPT R L, HAUPT S E. *Practical genetic algorithms* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- [32] MIRJALILI S, DONG Jinsong, LEWIS A, et al. *Nature-inspired optimizers* [M]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2020.
- [33] 孙超伟,柴军瑞,许增光,等. 金川水电站地下厂房裂隙围岩渗控效应数值模拟与评价[J]. *岩土工程学报*, 2016,38(5):786-797.
- [34] XU Zengguang, LIU Yang, HUANG Jian, et al. Performance assessment of the complex seepage control system at the Lu Dila Hydropower Station in China [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(3): 05019001.

(上接第138页)

- [31] PAERL H W, HUISMAN J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, 1(1): 27-37.
- [32] 秦伯强,杨桂军,马健荣,等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制[J]. *科学通报*,2016,61(7):759-770.
- [33] 练继建,王海军,熊浩. 一种长距离输水渠道消冰、抑藻的装置:202020335394.7[P]. 2021-01-05.
- [34] 杨忠勇,钱门亮,纪道斌,等. 香溪河初冬降温过程中垂向混合结构特征分析[J]. *中国环境科学*,2021,41(6):2862-2870.
- [35] 李衍庆,黄廷林,张海涵,等. 水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价[J]. *环境科学*,2020,41(5):2158-2165.
- [36] ZHANG Yuyang, YU Shuangen, WANG Wenlei, et al. Temperature sensitivity of marine macroalgae for aquaculture in China [J]. *Aquaculture*, 2023, 567: 739262.
- [37] 沈英嘉,陈德辉. 不同光照周期对铜绿微囊藻和绿色微囊藻生长的影响[J]. *湖泊科学*,2004(3):285-288.
- [38] 刘鑫,王超,王沛芳,等. 营养盐比例对硅藻水华优势种小环藻生长和生理的影响[J]. *环境科学研究*,2021,34(5):1196-1204.
- [39] YANG Yuangen, HE Zhenli, LIN Youjian, et al. Temporal and spatial variations of nutrients in the Ten Mile Creek of South Florida, USA and effects on phytoplankton biomass [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2008, 10(4): 508-516.
- [40] 刘春光,金相灿,孙凌,等. pH值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J]. *农业环境科学学报*,2005(2):294-298.
- [41] 王文超,徐绍峰,徐梦瑶,等. 水体扰动对铜绿微囊藻生长和酶活性的影响[J]. *军事医学*,2019,43(6):448-453.
- [42] SONG Yang, ZHANG Linglei, LI Jia, et al. Mechanism of the influence of hydrodynamics on *Microcystis aeruginosa*, a dominant bloom species in reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 230-239.
- [43] 于汇洋,徐志嫻,龙怡静,等. 再生水补水的景观水体优势藻种水华爆发阈值条件的确定[J]. *水资源与水工程学报*,2021,32(6):102-108.
- [44] 蒋聘凤,童思陈,黄国鲜,等. 气候变化和人类活动对河流营养盐通量过程影响研究综述[J]. *水资源与水工程学报*,2023,34(4):23-34+44.