环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.5
第41卷 第5期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第5期
2020年5月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第5期 2020年5月
Vol.41, No.5 May, 2020

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征

杨凡[1], 纪道斌[1*], 王丽婧[2*], 李虹[2], 李莹杰[2]
(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 中国环境科学研究院长江经济带生态环境研究中心, 北京 100012)

摘要: 采用2018年9月对三峡水库典型一级支流——香溪河和神农溪回水区水质监测数据,分析和对比了香溪河和神农溪的溶解氧和叶绿素 a 等指标垂向分布特征,讨论了影响其垂向分布的环境因子. 结果表明,香溪河与神农溪的溶解氧含量在表层 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 水体分层现象明显,且随水深增加而递减. 其表层水体的溶解氧饱和度 S_{DO} 分别为 139.20% 和 107.78%,已经达到过度饱和状态(S_{DO} > 100%);中层与底层水体溶解氧浓度较稳定,无分层现象. 香溪河和神农溪回水区水体中叶绿素 a 垂向分布与溶解氧分布的规律一致,表层水体中叶绿素 a 浓度整体上表现为中度富营养化($5\ \mu g \cdot L^{-1} < Chl\text{-}a < 20\ \mu g \cdot L^{-1}$). Pearson 相关性分析显示,香溪河与神农溪水体中的溶解氧与水温、浮游植物垂向分布之间存在显著相关性,水温分层以及浮游植物的生命活动是影响溶解氧垂向分布的关键因素. 叶绿素 a 与水温和 pH 呈现出显著的正相关性,与浊度表现为显著负相关性,表明浮游植物垂向分布主要受光照强度沿水深衰减和水温分层现象的影响.

关键词:三峡水库; 蓄水期; 香溪河; 神农溪; 溶解氧; 叶绿素 a; 垂向分布
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)05-2107-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201909026

Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir

YANG Fan[1], JI Dao-bin[1*], WANG Li-jing[2*], LI Hong[2], LI Ying-jie[2]
(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Eco-Environment Research Center of Yangtze River Economic Belt, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Bejing 100012, China)

Abstract: The water quality of the backwater areas in the Xiangxi River and Shennong River, which are typical tributaries of the Three Gorges Reservoir, was monitored in September 2018. The vertical distribution characteristics of dissolved oxygen, chlorophyll a, and other indicators in the two rivers were analyzed and compared, and the environmental factors affecting their vertical distribution were discussed. The results showed that the dissolved oxygen concentration 0-10 m and 0-12 m from the surface of the Xiangxi River and Shennong River, respectively, showed significant stratification and decreased with increasing water depth. The dissolved oxygen saturation of surface water was 139.20% and 107.78%, respectively, reaching a state of supersaturation (S_{DO} > 100%). The dissolved oxygen concentration in the middle and bottom water was more stable without stratification. The vertical distribution characteristics of chlorophyll a were consistent with those of dissolved oxygen in the Xiangxi River and Shennong River, and the chlorophyll a concentration in the surface water showed moderate eutrophication ($5\ \mu g \cdot L^{-1} < Chl\text{-}a < 20\ \mu g \cdot L^{-1}$). According to Pearson correlation analysis, the vertical distribution of dissolved oxygen in the Xiangxi River and Shennong River was significantly correlated with that of water temperature and phytoplankton. The stratification of water temperature and the life activities of phytoplankton were the key factors affecting the vertical distribution of dissolved oxygen. Chlorophyll a was positively correlated with water temperature and pH, and negatively correlated with turbidity, indicating that the vertical distribution of phytoplankton was mainly affected by the attenuation of light intensity along the water depth and the stratification of water temperature.

Key words: Three Gorges Reservoir; impoundment period; Xiangxi River; Shennong River; dissolved oxygen; chlorophyll a; vertical distribution

溶解氧是反映水体污染程度的重要指标,同时也是维系水生生物存活和水生态环境平衡的重要因素[1~5]. 当水体处于缺氧状态或者水体中溶解氧过度饱和都会对水生态系统产生不利影响,一般清洁的地表水水体中溶解氧含量趋近饱和,而当水体受到污染后则会使溶解氧含量大幅度降低,水质恶化[6,7]. 同时,浮游植物进行光合作用时会释放氧气,使得水体中溶解氧含量增加,而当浮游植物进行呼吸作用时,则会消耗水体中的溶解氧,使水体中溶解氧含量降低. 一些研究发现,大型浅水湖泊水体中溶解氧含量垂向分布主要受到水温分层和浮游植物的影响,垂向分层并不稳定[8]. 也有研究表明水体

收稿日期: 2019-09-03; **修订日期**: 2019-12-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(51779128, 51879099);国家自然科学基金重大项目(91647207);国家自然科学基金青年科学基金项目(51709096);国家重点研发计划项目(2016YFC0402204, 2016YFC0401702)
作者简介: 杨凡(1995 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为水环境生态修复,E-mail: 915246310@qq.com
* 通信作者,E-mail: 394816707@qq.com; wanglj@craes.org.cn

中溶解氧的含量与水体分层、温度、悬浮物和 pH 等指标有重要关系[9,10]. 浮游植物是水生态系统中的重要生产者,对水生态系统内的能量转换和物质输移过程起着关键作用[11~14]浮游植物是水生态系统内的关键组成部分,其空间分布特征将会直接影响到水生态系统的稳定性. 浮游植物受水生态系统内各种理化因子的影响,具有特殊的空间变化特征[15~17],而叶绿素 a 浓度与浮游植物的生物量之间有着紧密联系,叶绿素 a 是生物指标和水体理化因子综合作用表现,利用叶绿素 a 浓度来表征水生态系统中浮游植物的生长状态及分布特征[18,19]. 因此研究河流生态系统中溶解氧与叶绿素 a 浓度的空间分布特征及其与环境因子之间的联系具有重要意义.

三峡水库自从 2003 年成库以来,在发挥巨大的防洪、发电和通航等效益的同时,也使得长江三峡段水文水动力条件发生剧变[20,21],三峡水库蓄水前,三峡库区内支流表现为典型的河流型流态,而在三峡水库开始蓄水运行后,库区水位升高,水流流速变缓,水环境与水生态在时空尺度上发生了显著变化[22]. 库湾回水区由原先的河流型生态系统特征逐渐转变为特殊的“河库型”生态系统特征[23],水体扩散能力减弱,水体滞留时间延长,水生生境产生变化从而引起生物群落结构发生变化,水体中适应静水环境的水生生物物种增多,以香溪河和神农溪等为代表的典型支流频繁出现严重水华[24~26]. 目前针对三峡库区支流库湾的研究主要聚焦于支流营养盐、浮游植物迁移和水动力特性等[27~29],在年内水库调度运行过程中, 9~10 月为三峡水库汛后蓄水水位的变动期,同时也是库区支流的水动力条件从典型的河流型急流水体转变成类似湖泊型缓流水体的过渡期,支流回水区水环境特征尤为特殊,而对这一特殊时期不同支流回水区溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征的研究及其影响因子的研究相对较少. 鉴于此,本文基于三峡水库汛后蓄水期对库区典型支流——香溪河和神农溪的水质监测资料,分析两条河流水体中溶解氧和叶绿素 a 的垂向分布规律,并且探讨水体中溶解氧和叶绿素 a 与理化因子之间的联系,揭示三峡水库汛后蓄水期时库区内不同支流的溶解氧与叶绿素 a 垂向特殊分布的驱动因素及其与各种理化因子变化的响应特性,找到三峡库区内不同支流之间的相同规律,以期为我国河道型水库科学管理和支流水环境保护提供决策参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

香溪河位于湖北省西部地区,发源于神农架,是流经湖北省兴山县与秭归县的最大河流. 是三峡水库湖北库区一级支流,河流全长 97.3 km,河口距离三峡大坝 34.5 km,流域面积为3 183 km^2,河道顺直狭长,呈现出河道型环境特征. 神农溪位于湖北省西部,发源于神农架林区,是三峡库区巴东段的一级支流,河流全长 60.6 km,河口距离三峡大坝 69.9 km,流域面积为1 047 km^2,河道呈葫芦连接状,呈现为过渡型环境特征.

1.2 样点布设

于 2018 年 9 月对香溪河和神农溪的回水区段进行水质监测. 从香溪河库湾的河口位置向库湾回水末端依次布设 5 个监测点,依次为 XX01、XX02、XX03、XX04 和 XX05,神农溪从河口至库湾回水末端依次布设 5 个监测点,依次为 SN01、SN02、SN03、SN04 和 SN05. 具体位置如图 1 所示.

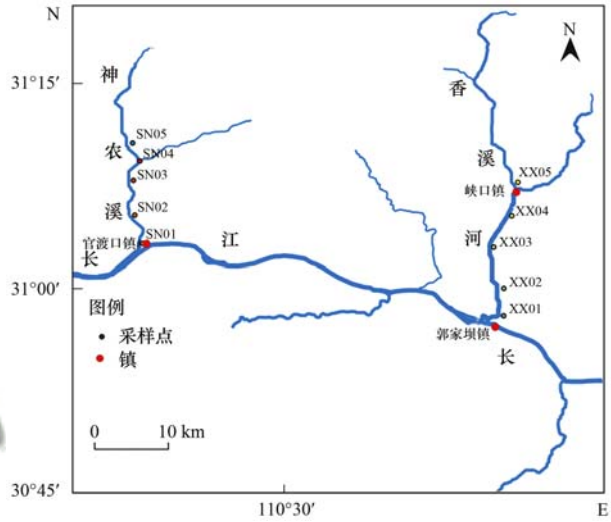

图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites

1.3 监测指标

监测指标包括溶解氧(DO)、pH 值(pH)、水温(WT)、浊度(turbidity)、水深(depth)、叶绿素 a 浓度(Chl-a)、透明度(SD)、水下光合有效辐射(PAR)、总氮(TN)和总磷(TP).

1.4 实验分析

溶解氧(DO)、pH 值(pH)、水温(WT)、浊度(turbidity)、水深(depth)和叶绿素 a 浓度(Chl-a)由 YSI-EXO 多参数水质分析仪(美国)从各监测点的表层至底层均匀地进行测定. 总氮(TN)和总磷(TP)于现场使用 2.5 L 有机玻璃采水器采集水样,将水样保存于 350 mL 的聚乙烯水样瓶中,然后将水样放入冰箱低温保存带回实验室. 总氮(TN)采用过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,总磷(TP)采用碱性过硫酸钾消解-钼锑抗显色分光光度法测定[30]. 水下光合有效辐射(PAR)使用 International

Light 4100 光照计(美国)现场测定,透明度(SD)使用塞氏盘在现场测定.

1.5　数据分析

淡水中溶解氧饱和度 S_{DO} 是湖库水体中重要的环境指标,计算公式为[31]:

$$S_{DO} = (c_{DO}/c_T) \times 100\% \quad (1)$$

式中,S_{DO} 为溶解氧饱和度(%);c_{DO} 为实测溶解氧质量浓度($mg \cdot L^{-1}$);c_T 为观测温度下的饱和溶解氧质量浓度($mg \cdot L^{-1}$),计算公式为[32]:

$$c_T = 477.8/(T + 32.36) \quad (2)$$

式中,T 为实测水温(℃). 采用 Excel 进行处理分析数据, ArcGIS10.3 绘制研究区域的监测断面图, Origin9.0 绘制各指标垂向分布图,相关性分析采用 SPSS25.0 进行分析. 针对三峡水库支流水体,参考目前已有研究成果,采取与表层温差≤0.5℃所对应的水深(m)为作为混合层深度[33],采用 1% 表面光强所对应的水深(m)作为真光层深度[34].

2　结果与分析

2.1　溶解氧垂向分布特征

香溪河与神农溪支流回水区水体中不同水深的溶解氧含量如表 1 所示,表层水体定义为水面下 0.5 m 处水体,中层水体指 1/2 水深处水体,底层水体指河底以上 0.5 m 处水体[30].

表 1　三峡库区典型支流溶解氧浓度/$mg \cdot L^{-1}$

Table 1　Concentration of dissolved oxygen in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area/$mg \cdot L^{-1}$

河流	水体	DO 变化范围	DO 平均值
香溪河	表层	7.95 ~ 16.19	12.28
	中层	4.93 ~ 9.56	7.29
	底层	5.82 ~ 8.34	7.40
神农溪	表层	7.88 ~ 10.60	8.83
	中层	7.16 ~ 8.21	7.61
	底层	7.02 ~ 8.11	7.68

由表 1 可以看出,香溪河和神农溪的表层水体中溶解氧浓度均大于中层水体和底层水体中溶解氧的浓度. 两条河流回水区流域各监测点溶解氧垂向分布如图 2 所示. 可以看出水体中溶解氧含量在不同水深有着较大的差异,其中表层水体溶解氧分层现象较明显. 香溪河的各监测点垂向上的分布规律基本一致,且溶解氧含量最大值均出现在水下 1 m 深度的位置. 在水下 0 ~ 10 m 内溶解氧浓度变化较大,垂向上有较大差异,在水下 0 ~ 1 m 内溶解氧浓度逐渐随水深逐渐增加,而在 1 ~ 10 m 内随着水深的不断增加,各个监测点垂向上溶解氧浓度呈现一个急剧降低的趋势. 在 10 m 之后溶解氧含量波动较小,在 10 m 至 15 m 内随着水深的增加,溶解氧含量略有减小, 15 m 之后随着水深的增加,溶解氧含量又稍有增加. 神农溪各监测点垂向上溶解氧最大值均出现在水下 1 m 的位置处,且溶解氧在 0 ~ 12 m 水层内溶解氧分层现象严重,这与霍静[35]在蓄水期对神农溪研究所发现的现象一致, 12 m 之后随着水层深度的增加,神农溪各监测点溶解氧浓度垂向上浓度变化稳定,分层现象消失.

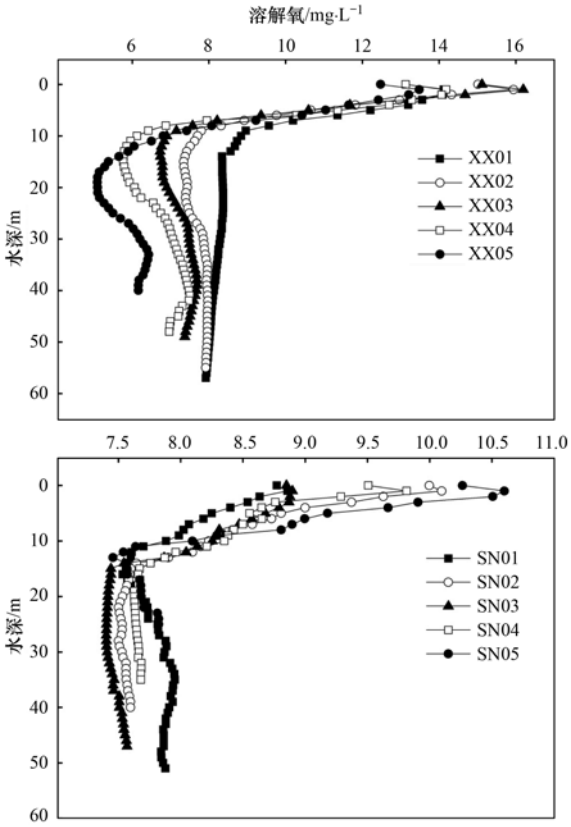

图 2　三峡库区典型支流溶解氧浓度垂向分布

Fig. 2　Vertical distribution of dissolved oxygen concentration in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area

2.2　理化因子垂向分布特征

如图 3 所示, 2018 年 9 月香溪河与神农溪回水区水体中存在显著的水温分层现象,各监测点垂向上水温呈现出一个逐渐降低的分布趋势,香溪河与神农溪回水区各监测点分别在 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 的水层内水温递减,此水层深度为“温跃层”,在水深达到“温跃层”后水温稳定,分层现象消失,这两条河流各监测点的温度变化范围分别为 25.07 ~ 29.46℃和 22.85 ~ 28.63℃,表明水温不是藻类生长的限制因子,表、底温差变化范围分别为 2.86 ~ 4.28℃和 4.63 ~ 5.78℃.

香溪河与神农溪回水区各监测点的 pH 分别在 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 的水深范围内沿呈现出个急剧减小的变化趋势,这两条河流 pH 值的变化范围分别为 7.81 ~ 9.01 和 7.91 ~ 8.52,均表现为弱

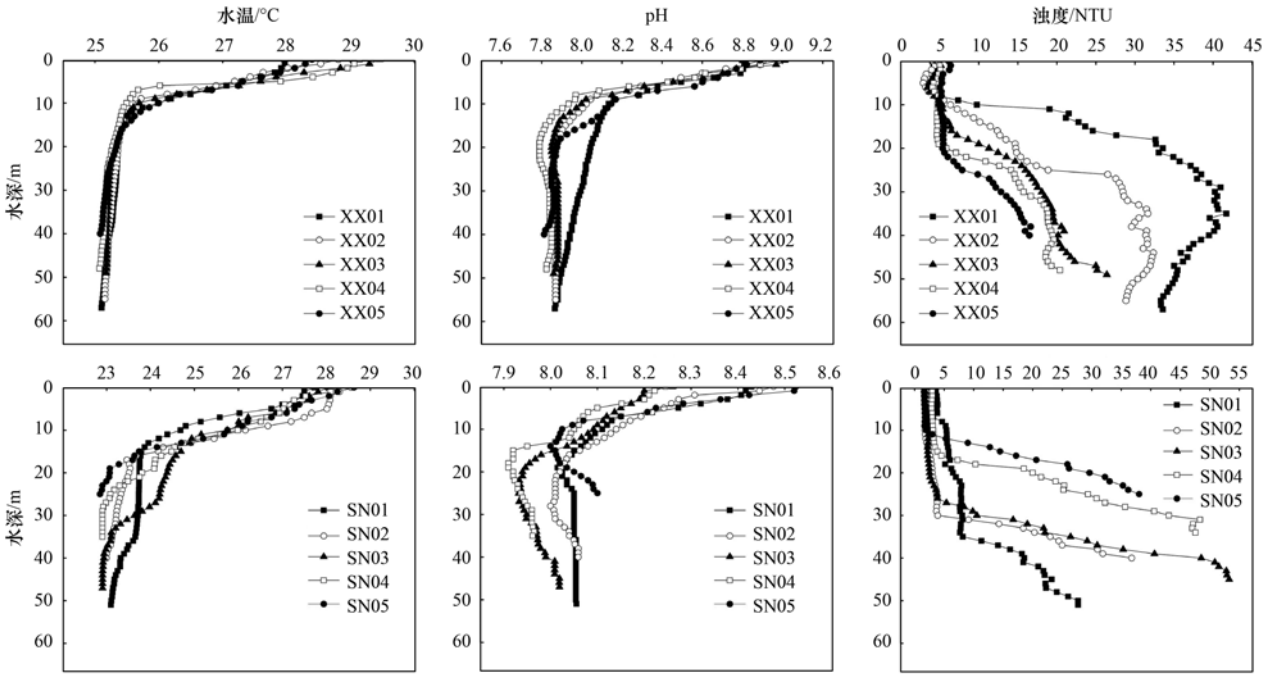

图 3 三峡库区典型支流理化因子垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of physical and chemical factors in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area

碱性,这与刘德富[36]等在长江支流多年的监测结果一致. 而通过图 3 可知香溪河与神农溪回水区各监测点的水体浊度表现出与水温和 pH 不同的垂向分布规律,这两条河流在表层 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 内浊度较低,垂向上无明显变化,变化范围分别为 4.1 ~ 5.4NTU 和 1.6 ~ 5.4NTU,随着水深的逐渐增加,各个监测点的浊度呈现出一个急剧升高的变化趋势.

2.3 Chl-a 垂向分布特征

香溪河与神农溪的各监测点叶绿素 a(Chl-a)浓度垂向分布特征如图 4 所示,香溪河与神农溪两条河流叶绿素 a 浓度垂向上分别在 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 内有明显的分层现象,且各监测点均在水下 1m 深位置处出现最大值,各监测点表层水体中叶绿素 a 浓度平均值变化范围分别为 7.03 ~ 9.37 $\mu g \cdot L^{-1}$和 3.95 ~ 8.06 $\mu g \cdot L^{-1}$,均随着水深的增加而急剧减小的垂向分布. 香溪河与神农溪水深分别在水下 10 m 和 12 m 后叶绿素 a 浓度较低,且分层现象消失;根据美国"河口营养状况评价"(NEEA-ASSETS)对河流富营养化状态进行了划分[37];Chl-a $>60\ \mu g \cdot L^{-1}$表示过度富营养化;$20\ \mu g \cdot L^{-1} <$ Chl-a $<60\ \mu g \cdot L^{-1}$表示高度富营养化;$5\ \mu g \cdot L^{-1} <$ Chl-a $< 20\ \mu g \cdot L^{-1}$表示中度富营养化;Chl-a $<5\ \mu g \cdot L^{-1}$表示低度富营养化,香溪河与神农溪表层水体中叶绿素 a 浓度整体平均值分别为 8.05 $\mu g \cdot L^{-1}$ 和 5.26 $\mu g \cdot L^{-1}$,根据此标准可知香溪河与神农溪的表层水体表现为中度富营养化.

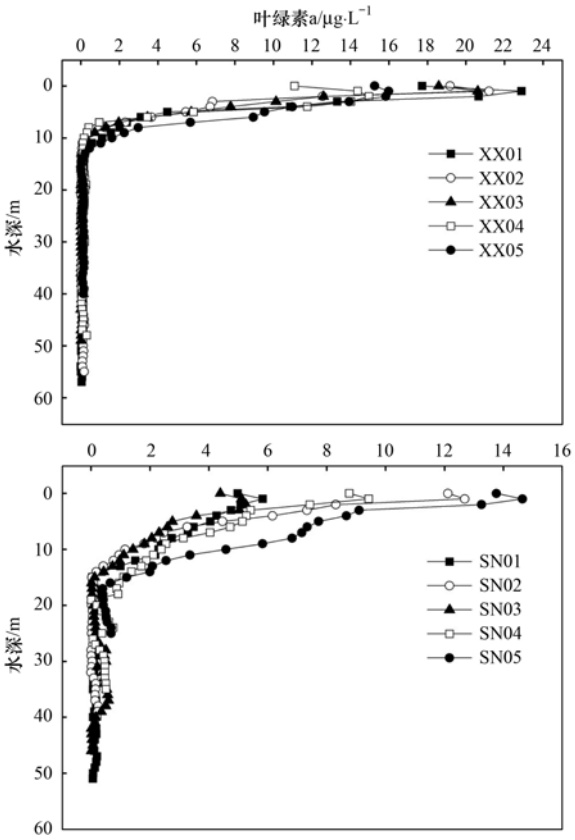

图 4 三峡库区各支流叶绿素 a 垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of chlorophyll a in tributaries of the Three Gorges Reservoir area

2.4 理化因子相关性分析

香溪河与神农溪库湾溶解氧和叶绿素 a 浓度垂向分布与各种理化因子的相关性分析如表 2 所示. 香溪河与神农溪叶绿素 a 浓度均与溶解氧(DO)、温度

(WT)和 pH 呈现出极显著正相关性而与浊度为极显著负相关性. 可以看出库区支流库湾叶绿素 a 的垂向分布与较多理化因子之间存在紧密联系,这与牛远等[38]在抚仙湖进行研究所得出叶绿素 a 浓度与 pH 和温度表现出极显著正相关性的结论一致. 而这两条支流库湾回水区水体中溶解氧均与 pH 呈极显著正相关性,与浊度表现为显著负相关性,这与劳其斌[39]等在湖光岩玛珥湖进行研究得出的结论一致.

表 2　三峡库区各支流溶解氧和叶绿素 a 与环境因子的相关性[1)]

Table 2　Correlation of dissolved oxygen and chlorophyll a with environmental factors in tributaries of the Three Gorges Reservoir area

河流		溶解氧	温度	pH	浊度
香溪河	Chl-a	0.889 **	0.927 **	0.931 **	-0.413 **
	溶解氧	1	0.890 **	0.917 **	-0.153 *
神农溪	Chl-a	0.820 **	0.864 **	0.833 **	-0.432 **
	溶解氧	1	0.911 **	0.928 **	-0.601 **

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关; * * 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关

3　讨论

3.1　溶解氧垂向分布成因分析

大量研究资料表明,三峡水库在 2003 年蓄水运行之后,干流水体水位升高,水体的流速减缓[22, 40],库区内支流水体滞留时间延长[41], 使得支流上游输入的营养物质在支流库湾滞留,造成水体富营养化状态,水华频频暴发[42],水华生命活动使得水体中溶解氧含量发生变化[43]. 水库表层水体中溶解氧的来源主要有两个方面;浮游植物进行光合作用释放氧气和空气中的氧气溶解于水体,而水库深层水体中的溶解氧主要是通过水库中水层的垂向对流交换所获得[44]. 如图 2 所示,三峡库区蓄水时段,香溪河与神农溪库湾回水区内的各个监测点溶解氧垂向上均存在明显的分层现象,且分别在表层水体 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 内溶解氧浓度较高,最大值均出现在水下 1 m 的位置处.

香溪河与神农溪库湾回水区内不同水层溶解氧饱和度如表 3 所示. 可以看出两条典型支流表层水体中的溶解氧均已经达到过度饱和状态(S_{DO} > 100%),溶解氧含量过高,可能会对鱼类及其他水生生物的生命活动产生危害[45, 46].

表 3　三峡库区典型支流溶解氧饱和度分布

Table 3　Distribution of dissolved oxygen saturation in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area

河流	水体	c_{DO}	c_T	S_{DO}/%
香溪河	表层	11.06	7.95	139.20
	中层	6.81	8.21	82.80
	底层	7.30	8.24	88.60
神农溪	表层	8.67	8.04	107.78
	中层	7.55	8.41	89.77
	底层	7.67	8.63	88.84

香溪河与神农溪库湾回水区内溶解氧分别在 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 水层内存在明显的分层现象,且这两条河流各监测点垂向上最大值均出现在水下 1 m深的位置处. 通过 Pearson 相关性分析如表 2 所示,发现香溪河与神农溪库湾回水区内溶解氧与叶绿素 a 呈现显著的正相关性,相关系数分别为 0.889 和 0.820(P < 0.01),且通过计算溶解氧饱和度 S_{DO}发现,香溪河与神农溪库湾表层水体中溶解氧饱和度均达到过度饱和状态(S_{DO} > 100%). 浮游植物的生物量会对水体中的溶解氧含量产生直接的影响[43]. 杨正健[41]在三峡库区浮游植物分布特征的研究中发现浮游植物处于真光层时,浮游植物的光合作用大于呼吸作用释放氧气. 并且通过图 2 与图 4 发现两条河流溶解氧与叶绿素 a 在垂向上最大值均出现在水下 1 m 的位置处,可知香溪河与神农溪库湾回水区表层水体中的溶解氧主要来源于浮游植物的光合作用释放氧气溶解于表层水体造成,表层水体溶解氧浓度较高.

有资料表明,水体中的初级生产力主要是存在于表层水体中,太阳辐射在水体中主要受到水分子、悬浮颗粒和可溶性有机物等物质的散射和吸收而呈现出一个指数衰减的变化[47]. 由 Pearson 相关性发现香溪河和神农溪库湾溶解氧浓度与浊度存在显著的负相关性,相关系数分别为 -0.153(P < 0.05)和 -0.601(P < 0.01). 由图 3 可知香溪河与神农溪库湾各监测点浊度沿水深增加,使得太阳辐射在水体中的传播受到阻碍,浮游植物生物量也随之明显减少[38], 限制了水体中浮游植物的生长和初级生产力,浮游植物光合作用沿水深而逐渐减小,因而造成溶解氧含量沿水深逐渐减小.

香溪河与神农溪库湾水体中溶解氧浓度分别在 10 m 和 12 m 分层现象消失,图 3 可知,香溪河与神农溪库湾水体中水温存在明显的分层现象,且发现这两条河流的氧跃层、温跃层都出现在同一个水深的位置,表明温度热力分层也是影响这两条河流因素溶解氧垂向分布的另一个关键因素. 水温分层同时决定了垂向的水动力交换,由于温跃层的形成会

使得水体的垂向交换过程受阻,致使中底层的溶解氧无法接受表层水体中溶解氧的补给,使得香溪河与神农溪库湾中底层溶解氧浓度处于一个较低且稳定的状态. 香溪河与神农溪库湾溶解氧与 pH 之间垂向分布也呈显性正相关关系,相关系数分别为 0.917 和 0.928($P<0.01$)这与何剑波[48]在千岛湖的研究发现一致,pH 也是造成溶解氧产生变化的重要因素. 水体本身具有氧化还原性质[49],氧化还原过程为[50]:$4H^+ + O_2$(气) $+ 4e \rightleftharpoons 2H_2O$(液). pH 值减小,表示水体中 H^+ 浓度增加,从而促进该氧化还原反应向正反应方向发生,O_2 与 H^+ 反应生成水,使得水体中溶解氧浓度降低.

3.2 叶绿素 a 垂向分布成因

由图 4 可知,在三峡水库蓄水期,香溪河与神农溪回水区各监测点叶绿素 a 浓度分别在 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 的水层内分层现象严重,叶绿素 a 浓度沿水深增加而逐渐减小,这与刘德富[36]在香溪河的研究发现一致,且各监测点的最大值均出现在水下 1 m 左右的位置处. 在两条河流的中底层水体中叶绿素 a 浓度较低且无分层现象. 通过现场观测得出香溪河与神农溪各监测点的真光层深度平均值分别为 10.88 m 和 12.68 m,混合层深度分别为 2.6 m 与 2.2 m. 由临界层理论[51]可知,发现这两条河流表层水体中的混合层深度均小于真光层深度,表明表层水体中浮游植物光照充足,且两条河流表层水体营养充足(香溪河总氮平均值 1.43 $mg \cdot L^{-1}$,总磷平均值 0.05 $mg \cdot L^{-1}$;神农溪总氮平均值 1.73 $mg \cdot L^{-1}$,总磷平均值 0.03 $mg \cdot L^{-1}$)满足香溪河与神农溪表层水体内浮游植物旺盛生长的物质条件,叶绿素 a 浓度较大,但各监测点叶绿素 a 浓度垂向最大值出现在水下 1m 的深度可能是由于库湾表面水体光照强度较大,超过了浮游植物生长的适宜范围,出现了光抑制现象[52],香溪河与神农溪各监测点表层水体的叶绿素 a 主要受光照强度的影响,随着水深的增加,水体中浮游植物所接受到的光照强度逐渐减小,为进行光合作用,大量浮游植物迁移至水体表层聚集,从而使得叶绿素 a 浓度沿水深逐渐降低[14, 47, 53, 54],由图 3 可知,香溪河与神农溪库湾各监测点浊度分别在 10 m 和 12 m 后浊度突变递增也阻碍了光照的垂向传播,抑制藻类的生长,使得香溪河与神农溪各监测点叶绿素 a 浓度在 10 m 和 12 m 水深后浓度较低. 另外通过图 3 可以可看出,香溪河与神农溪库湾回水区水温存在明显的分层现象,阻碍了水体的垂向交换,使得香溪河与神农溪库湾的中层与底层叶绿素 a 浓度稳定地处于一个较低的浓度. Pearson 相关分析结果表明 (表 2),三峡水库蓄水期,香溪河与神农溪库湾回水区叶绿素 a 浓度与 pH 呈显性相关,相关系数分别为 0.931 和 0.833($P<0.01$). 水中游离的 CO_2、H_2CO_3、HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 构成了一个可逆的二氧化碳-碳酸盐体系[55]:CO_2(气) $+ H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+ \rightleftharpoons CO_3^{2-} + 2H^+$,受浮游植物光合作用的影响,随着浮游植物数量的增多,光合作用所消耗的 CO_2 量就会增多,这就导致了水体中 H^+ 浓度降低,一般情况下水体中 CO_2 浓度较低,藻类光合作用时主要利用 HCO_3^-,在藻类植物体内的羧化酶作用下,将 HCO_3^- 转化为 CO_2 进行光合作用,同时置换出大量 OH^-,也使得水体中 pH 值升高. 随着水深的增加,浮游植物的数量减少,光合作用减弱,pH 沿水深呈下降趋势,与水体中叶绿素 a 浓度呈显著的正线性相关.

4 结论

(1)三峡水库汛后蓄水期,香溪河与神农溪库湾回水区水体中溶解氧、水温、pH 和叶绿素 a 均呈现出明显的分层现象,分层深度分别为 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m,之后随着水深的增加,各项指标趋于稳定,分层现象消失.

(2)三峡水库汛后蓄水期,香溪河与神农溪库湾回水区各监测点表层水体中溶解氧含量已经达到过度饱和状态($S_{DO}>100\%$),会对表层水生生物产生危害,且两条河流各监测点垂向上溶解氧最大值均出现水下 1 m 深的位置处. 香溪河的各监测点溶解氧与 pH 和叶绿素 a 之间呈现出显著的正相关性,溶解氧的垂向分布主要受浮游植物的垂向分布和水温分层的影响.

(3)三峡水库汛后蓄水期,香溪河与神农溪库湾回水区叶绿素 a 浓度与溶解氧、温度和 pH 之间相关性显著. 各监测点垂向上叶绿素 a 浓度最大值均出现在水下 1 m 深的位置处,在 1 m 后沿水深叶绿素 a 浓度逐渐降低,香溪河与神农溪表层水体中叶绿素 a 浓度整体上已经达到中度富营养化状态. 香溪河与神农溪分别在水深 10 m 和 12 m 之后各监测点由于受光照强度衰减、水体浊度突变剧增和水温分层的影响,使得库区支流的中层和底层水体中叶绿素 a 浓度较低.

参考文献:

[1] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2539-2546.
Yin Y, Wu Z X, Liu M L, *et al*. Dynamic distributions of dissolved oxygen in lake Qiandaohu and its environmental influence factors[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2539-2546.

[2] 朱旭旭，高爱国，王世永，等. 泉州湾春、夏季表层溶解氧分布特征及其影响因素分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版)，2017，**56**(4)：531-539.
Zhu X X，Gao A G，Wang S Y，*et al*. Distribution of dissolved oxygen in the surface water and its influencial factors in Quanzhou Bay during spring and summer[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science)，2017，**56**(4)：531-539.

[3] He B Y，Dai M H，Zhai W D，*et al*. Hypoxia in the upper reaches of the Pearl River Estuary and its maintenance mechanisms：a synthesis based on multiple year observations during 2000-2008[J]. Marine Chemistry，2014，**167**：13-24.

[4] 杜彦良，彭文启，刘畅. 分层湖库溶解氧时空特性研究进展[J]. 水利学报，2019，**50**(8)：990-998.
Du Y L，Peng W Q，Liu C. A review of dissolved oxygen variation and distribution in the stratified lakes or reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2019，**50**(8)：990-998.

[5] 俞焰，刘德富，杨正健，等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. 环境科学，2017，**38**(4)：1393-1402.
Yu Y，Liu D F，Yang Z J，*et al*. Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in Thousand-Island lake and their influencing factors [J]. Environmental Science，2017，**38**(4)：1393-1402.

[6] 赵其彪，孙军，李丹，等. 东海低氧区及邻近水域浮游植物的季节变化[J]. 生态学报，2015，**35**(7)：2366-2379.
Zhao Q B，Sun J，Li D，*et al*. Seasonal changes of the phytoplankton along hypoxia area and adjacent waters in the East China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica，2015，**35**(7)：2366-2379.

[7] Cantin A，Beisner B E，Gunn J M，*et al*. Effects of thermocline deepening on lake plankton communities[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences，2011，**68**(2)：260-270.

[8] 欧阳潇然，赵巧华，魏瀛珠. 基于 FVCOM 的太湖梅梁湾夏季水温、溶解氧模拟及其影响机制初探[J]. 湖泊科学，2013，**25**(4)：478-488.
Ouyang X R，Zhao Q H，Wei Y Z. A preliminary exploration of dissolved oxygen based on FVCOM in Meiliang Bay，Lake Taihu and its influence mechanism[J]. Journal of Lake Sciences，2013，**25**(4)：478-488.

[9] 胡鹏，杨庆，杨泽凡，等. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J]. 水利学报，2019，**50**(6)：679-686.
Hu P，Yang Q，Yang Z F，*et al*. Experimental study on dissolved oxygen content in water and its physical influence factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2019，**50**(6)：679-686.

[10] 庄晓珊，桓清柳，彭莹，等. 深圳东部近岸海域溶解氧的时空分布特征[J]. 热带海洋学报，2018，**37**(5)：98-105.
Zhuang X S，Huan Q L，Peng Y，*et al*. Spatial and temporal distribution of dissolved oxygen in the coastal waters of eastern Shenzhen[J]. Journal of Tropical Oceanography，2018，**37**(5)：98-105.

[11] 田时弥，杨扬，乔永民，等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学，2015，**27**(1)：31-37.
Tian S M，Yang Y，Qiao Y M，*et al*. Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang River，Pearl River basin [J]. Journal of Lake Sciences，2015，**27**(1)：31-37.

[12] Kazamia E，Helliwell K E，Purton S，*et al*. How mutualisms arise in phytoplankton communities：Building eco-evolutionary principles for aquatic microbes[J]. Ecology Letters，2016，**19**(7)：810-822.

[13] 笪文怡，朱广伟，吴志旭，等. 2002-2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. 湖泊科学，2019，**31**(5)：1320-1333.
Da W Y，Zhu G W，Wu Z X，*et al*. Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences，2019，**31**(5)：1320-1333.

[14] 黄立成，周远洋，周起超，等. 云南程海浮游植物初级生产力的时空变化及其影响因子[J]. 湖泊科学，2019，**31**(5)：1424-1436.
Huang L C，Zhou Y Y，Zhou Q C，*et al*. Temporal-spatial variation in phytoplankton primary production and its influencing factors in Lake Chenghai on the Yunnan Plateau，China[J]. Journal of Lake Sciences，2019，**31**(5)：1424-1436.

[15] 江源，彭秋志，廖剑宇，等. 浮游藻类与河流生境关系研究进展与展望[J]. 资源科学，2013，**35**(3)：461-472.
Jiang Y，Peng Q Z，Liao J Y，*et al*. Advances and prospects for research into phytoplankton and river habitats[J]. Resources Science，2013，**35**(3)：461-472.

[16] Hutchins M G，Johnson A C，Deflandre-Vlandas A，*et al*. Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms：reducing nutrient pollution or riparian shading? [J]. Science of the Total Environment，2010，**408**(21)：5065-5077.

[17] Beaver J R，Kirsch J E，Tausz C E，*et al*. Long-term trends in seasonal plankton dynamics in Lake Mead (Nevada-Arizona，USA) and implications for climate change[J]. Hydrobiologia，2018，**822**(1)：85-109.

[18] 余茂蕾，洪国喜，朱广伟，等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响[J]. 环境科学，2019，**40**(8)：3519-3529.
Yu M L，Hong G X，Zhu G W，*et al*. Wind field influences on the spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu，China[J]. Environmental Science，2019，**40**(8)：3519-3529.

[19] 吴奇丽，张坤，陈欢，等. 华阳河湖群叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布[J]. 水生态学杂志，2019，**40**(2)：66-72.
Wu Q L，Zhang K，Chen H，*et al*. Seasonal and spatial variation of chlorophyll-a concentration in the Huayanghe Lake Group[J]. Journal of Hydroecology，2019，**40**(2)：66-72.

[20] 王丽平，郑丙辉，张佳磊，等. 三峡水库蓄水后对支流大宁河富营养化特征及水动力的影响[J]. 湖泊科学，2012，**24**(2)：232-237.
Wang L P，Zheng B H，Zhang J L，*et al*. Effects on euthrophication and hydrodynamics of Daning River after impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences，2012，**24**(2)：232-237.

[21] 纪道斌，刘德富，杨正健，等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2010，**40**(1)：101-112.
Ji D B，Liu D F，Yang Z J，*et al*. Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. Scientia Sinica：Physica，Mechanica & Astronomica，2010，**40**(1)：101-112.

[22] 邹家祥，翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护，2016，**32**(5)：136-140.
Zou J X，Zhai H J. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures[J]. Water Resources Protection，2016，**32**(5)：136-140.

[23] 黄玥，黄志霖，肖文发，等. 三峡水库蓄水运行后入出库断面水质评价与预测[J]. 环境污染与防治，2019，**41**(2)：211-215，239.

Huang Y, Huang Z L, Xiao W F, *et al*. Water quality evaluation and prediction of the reservoir inflow and outflow after the Three Gorges Project operation [J]. Environmental Pollution and Control, 2019, **41**(2): 211-215, 239.

[24] 张庆文, 宋林旭, 纪道斌, 等. 香溪河库湾水质特征与非回水区水华响应关系[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 3018-3026.
Zhang Q W, Song L X, Ji D B, *et al*. Relationship between water quality of Xiangxi River Reservoir and the algal blooms in non-return area in the Three Gorges Reservoir Area[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(7): 3018-3026.

[25] 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 等. 春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1113-1121.
Li X, Song L X, Ji D B, *et al*. Characteristics of nitrogen release at the sediment-water interface in the typical tributaries of the Three Gorges Reservoir during the sensitive period in spring[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1113-1121.

[26] 袁轶君, 毕永红, 胡征宇. 三峡水库主要支流碱性磷酸酶活性的比较[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1012-1022.
Yuan Y J, Bi Y H, Hu Z Y. Comparative study on alkaline phosphatase activity of main tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(4): 1012-1022.

[27] 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 等. 蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2135-2144.
Su Q Q, Liu D F, Ji D B, *et al*. Nutrient distribution characteristics of the sediment-water system in the Xiangxi River during the impoundment of TGR[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2135-2144.

[28] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4169-4178.
Liu X Y, Song L X, Ji D B, *et al*. Distribution characteristics and release fluxes of phosphorus forms in Xiangxi Bay sediments in the Three Gorges Reservoir before and after impoundment[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4169-4178.

[29] 黄佳维, 纪道斌, 宋林旭, 等. 三峡水库夏季不同支流倒灌特性及其影响分析[J]. 水力发电学报, 2019, **38**(4): 63-74.
Huang J W, Ji D B, Song L X, *et al*. Characteristics and effects of different density flows in tributaries of Three Gorges reservoir in summer[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, **38**(4): 63-74.

[30] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 525-644.

[31] 沈忱, 吕平毓, 王义成, 等. 水库蓄水后长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流溶解氧时空分布[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, **55**(1): 39-45.
Shen C, Lv P Y, Wang Y C, *et al*. Spatial and temporal distribution of dissolved oxygen in the main stream of the national nature reserve for rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze river after reservoir impounding [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2015, **55**(1): 39-45.

[32] 张朝能. 水体中饱和溶解氧的求算方法探讨[J]. 环境科学研究, 1999, **12**(2): 54-55.
Zhang C N. Study on calculation method of saturation values of dissolved oxygen in water [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, **12**(2): 54-55.

[33] Monterey C I, Dewitt L M. Seasonal variability of global mixed layer depth from WORD 98 temperature and salinity profiles [M]. Pacific Grove, California: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000.

[34] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (2nd ed.)[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[35] 霍静, 崔玉洁, 宋林旭, 等. 三峡水库神农溪库湾水体季节性分层特性[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(4): 1166-1174.
Huo J, Cui Y J, Song L X, *et al*. Seasonal stratification of waters in the Shennong Stream of the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(4): 1166-1174.

[36] 刘德富, 黄钰铃,纪道斌, 等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[37] Bricker S B, Ferreira J G, Simas T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status [J]. Ecological Modelling, 2003, **169**(1): 39-60.

[38] 牛远, 孔祥虹, 余辉, 等. 抚仙湖夏季热分层时期浮游植物空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(7): 1865-1871.
Niu Y, Kong X H, Yu H, *et al*. Spatial distribution of phytoplankton community during summer stratification in Lake Fuxian[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, **35**(7): 1865-1871.

[39] 劳其斌, 卞培旺, 曾珍, 等. 湖光岩玛珥湖溶解氧的时空分布特征及其影响因素[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, **37**(4): 714-723.
Lao Q B, Bian P W, Zeng Z, *et al*. Spatial-temporal distributions of dissolved oxygen and its affecting factors in Huguangyan Maar Lake[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, **37**(4): 714-723.

[40] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.
Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al*. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(3): 443-454.

[41] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生消机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.

[42] 陈昭明, 王伟, 赵迎, 等. 三峡水库支流水体富营养化现状及防治策略[J]. 环境工程, 2019, **37**(4): 32-37.
Chen Z M, Wang W, Zhao Y, *et al*. Water eutrophication status and control strategy of tributaries in the Three Gorges Reservoir region[J]. Environmental Engineering, 2019, **37**(4): 32-37.

[43] 曲茉莉. 浅析黑龙江境内松花江干流溶解氧变化趋势及环境影响因子的相关性[J]. 环境科学与管理, 2011, **36**(12): 67-69, 116.
Qu M L. Analysis on variation tendencies of dissolved oxygen in Songhua River mainstream and corelation of environmental impact factors[J]. Environmental Science and Management, 2011, **36**(12): 67-69, 116.

[44] 崔彦萍, 王保栋, 陈求稳. 三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和溶解氧变化及其成因[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6309-6316.
Cui Y P, Wang B D, Chen Q W. The spatial-temporal dynamics of chlorophyll a and DO in the Yangtze estuary after normal impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(21): 6309-6316.

[45] 柴小平, 魏娜, 母清林, 等. 浙江近岸海域春季表层溶解氧饱和度分布及影响因素[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(5): 140-144.
Chai X P, Wei N, Mu Q L, *et al*. Distribution and main influencing factors of the surface dissolved oxygen saturation of Zhejiang offshore in spring [J]. Environmental Monitoring in

China, 2015, **31**(5): 140-144.

[46] 解磊. 青岛浮山前分层小水库溶解氧时空变化特征[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.

[47] 卢蓓. 湖泊沉水植物适应水体光衰减的初步研究[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2017.

[48] 何剑波. 千岛湖水温、溶解氧及叶绿素 a 垂向特征研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.

[49] 孙学诗, 胡治洲, 刘明, 等. 秋季东海水体 Eh、pH 分布特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2019, **38**(2): 211-220.
Sun X S, Hu Z Z, Liu M, *et al*. Distributions and influence factors of Eh and pH in the East China Sea in autumn[J]. Marine Environmental Science, 2019, **38**(2): 211-220.

[50] 黄岁樑, 臧常娟, 杜胜蓝, 等. pH、溶解氧、叶绿素 a 之间相关性研究Ⅱ: 非养殖水体[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(8): 1681-1688.
Huang S L, Zang C J, Du S L, *et al*. Study on the relationships among pH, dissolved oxygen and chlorophyll a Ⅱ: non-aquaculture water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(8): 1681-1688.

[51] Harris G P. Photosynthesis, productivity and growth: the physiological ecology of phytoplankton[M]. Schweizerbart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1978.

[52] 吴守璇. 光辐射对太湖浮游植物初级生产力的影响研究[D]. 广州: 暨南大学, 2005.

[53] 梅佳欣. 辐射日变化对浮游植物生长及初级生产的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.

[54] 周远洋. 程海真光层深度与浮游植物初级生产力的时空特征解析[D]. 昆明: 云南大学, 2017.

[55] Yao G R, Gao Q Z, Wang Z G, *et al*. Dynamics of CO_2 partial pressure and CO_2 outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China[J]. Science of the Total Environment, 2007, **376**(1-3): 255-266.

HUANJING K0EXUE Vol. 41 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2020

CONTENTS