DOI:10.15928/j.1674-3075.202006120171

三峡库区神农溪不同时期溶解氧与叶绿素a垂向分布特征

田 盼[1,2],宋林旭[1,2],纪道斌[1,2],李亚莉[1,2],杨 凡[1,2],郭亚丽[3,4]

(1. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002;
2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北 宜昌 443002;
3. 上海勘探设计研究院有限公司,上海 200335;
4. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心,上海 200335)

摘要:为探究三峡库区支流水环境的垂向分布特征及其影响因素,采用2018年2月(高水位期)和7月(汛期)对三峡水库典型一级支流——神农溪回水区水质监测数据,分析和对比了神农溪不同时期的溶解氧和叶绿素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,神农溪高水位期与汛期的溶解氧含量在0~12 m和0~6 m水体分层现象明显,其表层水体的溶解氧饱和度(S_{DO})分别为104.04%和171.96%,已经达到过度饱和状态(S_{DO}>100%);中层水体溶解氧浓度存在分层现象,底层水体溶解氧浓度较稳定,无分层现象。高水位期与汛期的叶绿素a含量在0~10 m水体分层现象明显,表层水体的叶绿素a浓度整体上表现为中度富营养化(5 μg/L<Chl-a<20 μg/L)。Pearson分析表明,神农溪高水位期与汛期水体中的溶解氧与水温、浮游植物、pH值垂向分布之间存在显著相关性,说明影响溶解氧垂向分布的部分可能因素是水温分层和浮游植物的生命活动。叶绿素a与水温和pH存在显著正相关性,与电导率和浊度存在显著负相关性,表明水温分层、水体电导率和光强对浮游植物在垂向上的分布影响较大。

关键词:三峡库区;神农溪;溶解氧;叶绿素a;分布特征
中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)02-0001-08

溶解氧作为反映污染水体严重程度的重要指标,是保证水生生物生存和水生态环境平衡的重要因素(张莹莹等,2007;He et al,2014);同时,浮游植物通过光合作用释放氧气会增加水体溶解氧,呼吸作用消耗水体中的溶解氧含量,而水中较低的溶解氧会抑制浮游植物的生长(俞焰等,2017)。有研究显示,浮游植物、水温分层和季节的影响是太湖溶解氧垂向分布的主要原因(欧阳潇然等,2013);而三峡水库中浮游植物的光合作用是影响水体表层溶解氧的主要因素(崔彦萍等,2014);此外,水中溶解氧的含量与水体分层、温度、浊度、电导率和pH等指标也有重要关系(罗琳等,2005;张庆文等,2019)。浮游植物作为水生态系统的生产者,对系统内的能量流动和物质输移有关键作用,其空间分布特征将影响水生态系统的稳定性(田时弥等,2015)。温度、光照、水动力和营养盐等因子,均能影响浮游植物的生长与分布,有显著的空间分布特性(Hutchins et al,2010; Beaver et al,2018)。水库存在着不同程度的水体分层,这种分层对水体理化指标的垂向分布起着控制作用,影响着水环境质量的变化(王雨春等,2005;赵林林等,2011;董春颖等,2013)。分层现象使水体垂向上有不同的水环境特征,对水库中水环境产生影响。因此,研究河流中溶解氧和叶绿素a浓度垂向上的空间分布特征及两者的关联,探究其与环境因子的相关性具有十分重要的意义。

神农溪作为南水北调"引江补汉"工程的源头,其水环境状况的好坏有着重要的社会效益,关乎周边居民用水安全与汉江中下游水生态环境(徐慧等,2017)。三峡库区从2003年开始蓄水以来,产生了巨大的经济和社会效益,同时改变了三峡段的水文水动力,使原来的河流生态系统转变成了水库型生态系统,对库区的生态和环境等带来不利影响(Wang,2002;纪道斌等,2010;黄玥等,2019)。干流倒灌、流速变缓、支流水体滞留以及复杂的分层现象等水文因素,加重了支流富营养化,导致神农溪等典型一级支流水华暴发频繁,影响了库区水质安全(吉小盼等,2010;Ma et al,2016;邹曦等,2017;Zou et al,

收稿日期:2020-06-12 **修回日期:**2021-11-02
基金项目:国家自然科学基金重大计划项目(91647207);国家自然科学基金面上项目(51909135,51879099,51779128);中国长江三峡集团有限公司科研项目-长江中游地区村镇污水处理模式研究(202003082)。
作者简介:田盼,1992年生,男,硕士研究生,研究方向为生态水利。E-mail:734180939@qq.com
通信作者:宋林旭,1980年生,女,博士,副教授,主要从事生态水利教研工作。E-mail:280825327@qq.com

2017)。目前,针对神农溪的水生态研究,主要关注其营养盐的分布特征 (李欣等,2017)及特定时期的水质指标(吕林鹏等,2018);鲜见有关神农溪溶解氧与叶绿素 a 不同季节垂向分布特征及其与环境因子关系研究。本文基于三峡水库神农溪不同水期的水质监测资料,分析了溶解氧和叶绿素 a 的垂向分层特征和分布规律,并探讨其与环境因子的关联性及其响应特点,旨在进一步明晰神农溪的溶解氧和浮游植物垂向含量变化,为水环境保护和水生态修复提供参考。

1　材料与方法

1.1　区域概况

神农溪流域位于鄂西,源自神农架,是三峡库区巴东段典型的一级支流,从河口到三峡大坝距离 69.9 km,河流全长 60.6 km,流域总面积 1 047 km²,河道呈葫芦连接状,呈现出过渡型环境特征。

1.2　样点布设

于 2018 年 2 月(高水位期)和 7 月(汛期)对神农溪的回水区段进行水质监测。从神农溪河口至库湾回水末端依次布设 6 个监测点,命名为 SN1~SN6。具体位置如图 1 所示。

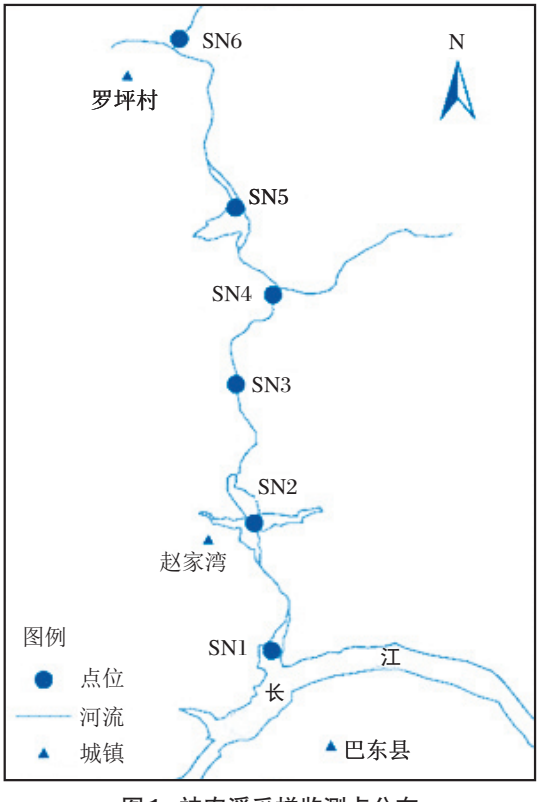

图 1　神农溪采样监测点分布

Fig.1　Location of the sampling and monitoring points in Shennong River

1.3　指标测定

监测指标包括溶解氧(DO)、叶绿素(Chl-a)、水温(WT)、pH 值(pH)、电导率(EC)、浊度(Turb)、水深(Depth)、总氮(TN)、总磷(TP)、光合有效辐射(PAR)等。DO、Chl-a、EC、Turb、WT、pH、Depth 由 YSI-EXO 多参数水质分析仪(美国)从各监测点的表层至底层每隔 1 m 进行监测(0.5 m 水深监测一次)。TN、TP 用 2.5 L 采水器采集表层水样,放入 350 mL 水样瓶,带回实验室当天测定。PAR 用 International Light 4100 光照计(美国)测定。

1.4　数据分析

溶解氧饱和度(S_{DO})计算公式(沈忱等,2015)如下:

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

式中:S_{DO} 为溶解氧饱和度(%),c_{DO} 为实测溶解氧质量浓度(mg/L),c_T 为观测温度下的饱和溶解氧质量浓度(mg/L),计算公式(杨凡等,2019)如下:

$$c_T=477.8/(T+32.36) \quad ②$$

式中:T 为实测水温(℃)。

变异系数(CV)是衡量序列观测值离散程度的一个统计量(李传华等,2016),计算公式如下:

$$CV=\sigma/\mu \quad ③$$

式中:CV 为变异系数,σ 为标准差,μ 为算术平均值。

真光层深度取 1% 表面光强对应的水深(Reinart et al,2001),混合层深度则选取与表面水温相差 0.5℃对应的水深 (Monterey & Dewitt,2000)。通过 Excel 对数据进行处理分析,ArcGIS10.6 制作研究区域监测断面图,Origin9.0 制作各指标的垂向分布图,SPSS24.0 进行相关性分析。

2　结果与分析

2.1　溶解氧垂向分布特征

三峡库区神农溪回水区水体在不同水层的溶解氧浓度见表 1。表层水体取水面下 0.5 m 处水体,中层水体取 1/2 水深处水体,底层则取河底上 0.5 m 处水体 (国家环境保护总局,2002)。

表 1　神农溪不同时期溶解氧浓度

Tab.1　Dissolved oxygen concentration at different water levels in Shennong River

水期	水体	范围/mg·L⁻¹	均值±标准差	变异系数/%
高水位期	表层	9.57~12.67	10.95±1.08	10
	中层	8.86~9.60	9.28±0.25	3
	底层	8.62~9.76	9.07±0.39	4
汛期	表层	6.75~16.18	13.36±3.21	24
	中层	5.33~6.85	5.78±0.54	9
	底层	5.11~7.69	6.29±0.89	14

由表1可知,神农溪高水位期和汛期表层水体的溶解氧浓度均大于中层和底层,汛期的表层水体溶解氧浓度大于高水位期,而中层和底层小于高水位期;根据变异系数可知,溶解氧变异程度表层>底层>中层,且汛期各层的溶解氧变异程度均要大于高水位期。

两个时期监测点的溶解氧垂向分布见图2。高水位期(图2-a)和汛期(图2-b)表层水体的溶解氧饱和度(S_{DO})分别为104.04%和171.96%,已经达到过度饱和状态(S_{DO}>100%)。水体中溶解氧的浓度随水深变化,最大值均出现在0~3 m深度,且总体上高水位期和汛期的水体溶解氧浓度变化规律一致。高水位期和汛期各监测点的水体溶解氧分层节点不同。高水位期水体溶解氧浓度在0~12 m的分层现象明显,浓度变化剧烈,12~15 m分层趋势有所减弱,中层水体垂向分布稳定,无明显分层,而部分监测点的底层水体溶解氧浓度有所增加。汛期水体溶解氧浓度在0~6 m的分层现象明显,浓度变化剧烈,水深6~10 m的分层趋势变弱,中层水体垂向分布稳定,部分监测点的底层水体溶解氧浓度有所增加。整体上溶解氧浓度随着水深的增加而减少。

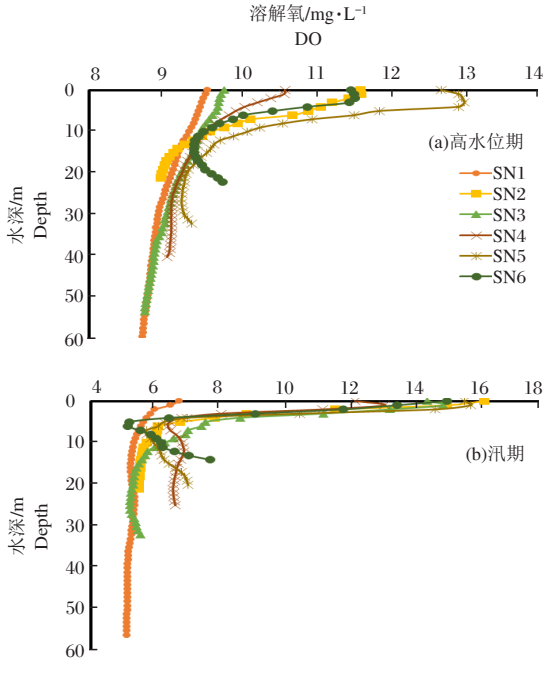

图2　神农溪不同时期溶解氧浓度的垂向分布

Fig.2　Vertical distribution of dissolved oxygen concentration in Shennong River during the high water period [winter dry season] (a) and low water period [summer flood season] (b)

2.2　理化因子垂向分布特征

神农溪回水区在高水位期和汛期有明显的水温分层现象,均表现为表层水温最高,总体上水温随着水深的增加而降低,分布规律基本一致(图3-a,b)。高水位期,各监测点温度为11.5~13.6℃,SN1和SN3在水深30 m后处于稳定状态,期间有小幅衰减,其余监测点存在明显的温跃层;汛期各监测点温度为22.5~31.0℃,SN1和SN2在水深10 m后处于稳定状态,0~10 m存在明显的温跃层,水体表底温差分别为0.21~2.48℃和1.59~8.51℃。

神农溪回水区在高水位期和汛期的pH值分别在7.85~8.85和7.58~8.75,表现为弱碱性(图3-c,d)。高水位期水深0~12 m的pH值分层现象明显,水深大于12 m,分层现象消失;汛期水深0~6 m的pH值分层现象明显,水深大于6 m,分层现象稳定。总体上垂向分布规律一致。

神农溪回水区高水位期和汛期的电导率如图3-e,f。监测点SN1整体上无分层现象,其余各监测点位呈现先增大,在不同水深节点开始减小的趋势,有明显的分层现象,分别为0.34~0.45 μS/cm和0.30~0.35 μS/cm,高水位期的电导率大于汛期。

高水位期和汛期的水体浊度分别为0~4 NTU和0~150 NTU,在水深分别为10 m和6 m处各点增加(图3-g,h)。总体上汛期浊度远远大于冬季,浊度表层较低,随着深度的增加而增高。

2.3　叶绿素a垂向分布特征

神农溪回水区水体在高水位期和汛期的叶绿素a浓度垂向分布见图4。可见高水位期和汛期的叶绿素a浓度垂向变化规律一致。表层水体叶绿素a的平均浓度分别为11.4 μg/L和8.7 μg/L。水深0~10 m的叶绿素a分层显现明显,1~5 m水深包含了各监测点叶绿素a浓度的最大值;水深超过10 m,各监测点叶绿素a浓度趋于稳定,分层现象消失,且浓度大小差异为0~2.5 μg/L。根据河口营养状况评价对神农溪回水区的富营养化等级进行划分(Bricker et al,2003),神农溪回水区水质处于中度富营养化状态(5 μg/L<Chl-a<20 μg/L)。

2.4　理化因子相关性

神农溪高水位期和汛期溶解氧与叶绿素a浓度垂向分布及环境因子之间的相关性见表2。在高水位期和汛期,叶绿素a与溶解氧、水温、pH值均呈显著正相关性,与电导率、浊度呈显著负相关性;溶解氧与水温和pH值呈显著正相关性,与电导率、浊度呈显著负相关性。可以看出,神农溪回水区诸多因子与叶绿素a的垂向分布相关。

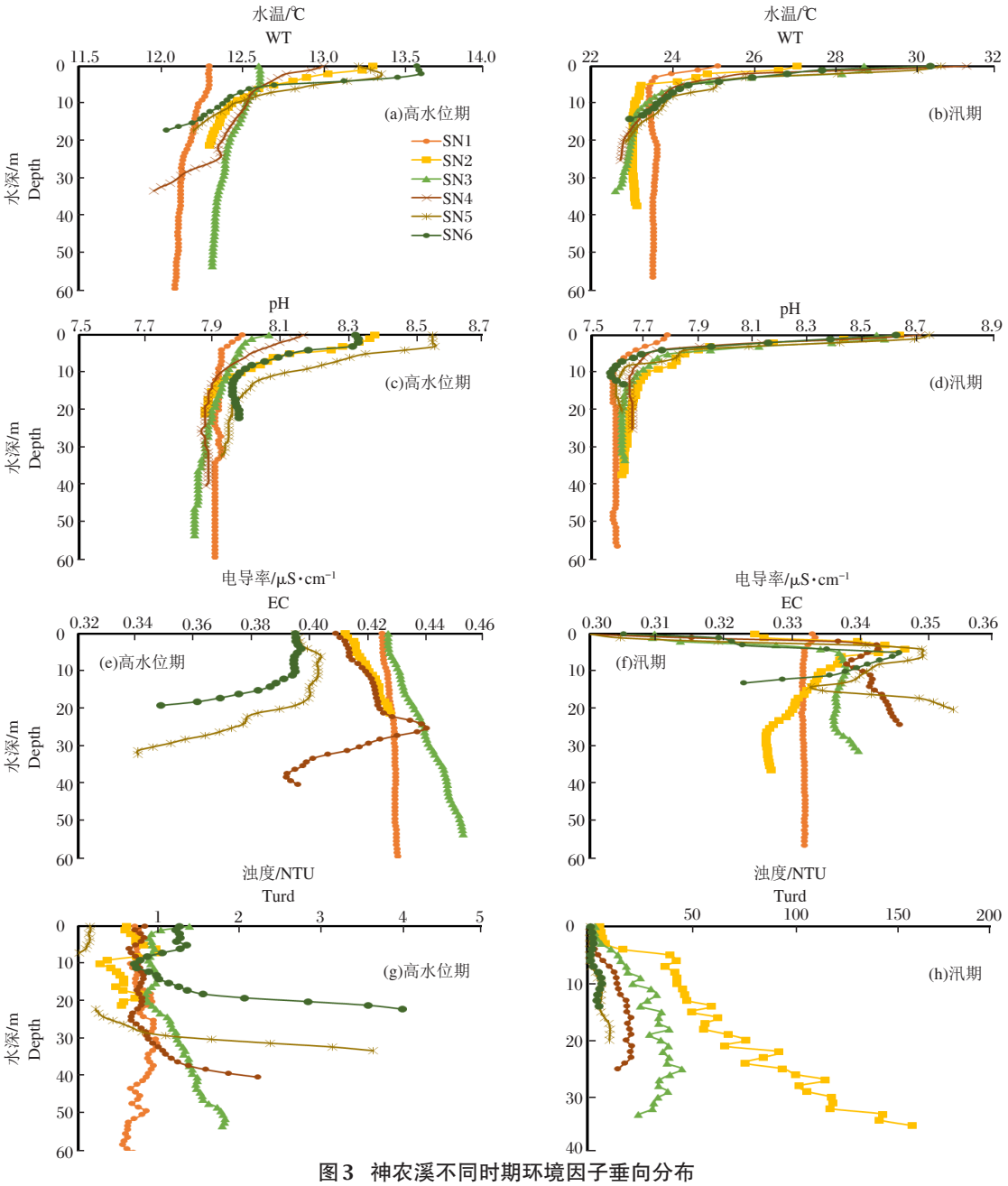

图 3 神农溪不同时期环境因子垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of environmental factor values in Shennong River during the high water period [winter dry season] (a, c, e, g) and low water period [summer flood season] (b, d, f, h)

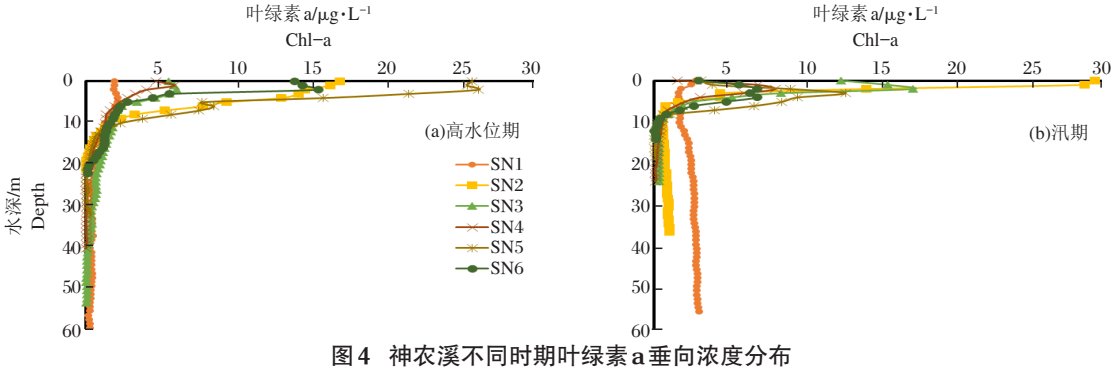

图 4 神农溪不同时期叶绿素 a 垂向浓度分布

Fig.4 Vertical distribution of chlorophyll-a concentrations Shennong River during the high water period [winter dry season] (a) and low water period [summer flood season] (b)

表2　神农溪不同时期溶解氧、叶绿素a与环境因子的相关性

Tab.2　Correlation between dissolved oxygen, chlorophyll a and environmental factors at different periods in Shennong River

水期	指标	溶解氧	水温	pH	电导率	浊度
高水位期	叶绿素	0.910**	0.725**	0.924**	-0.165**	-0.217**
	溶解氧	1	0.722**	0.963**	-0.359**	-0.242**
汛期	叶绿素	0.668**	0.599**	0.658**	-0.287**	-0.284**
	溶解氧	1	0.885**	0.961**	-0.495**	-0.417**

注：**表示在0.01水平显著相关。

Note: ** indicates significant correlation at the level of 0.01.

3　讨论

3.1　溶解氧垂向分布成因

研究表明，空气中的氧气溶解和浮游植物的光合作用是河流湖库中表层水体溶解氧的主要来源，而水体的垂直对流扩散是深水区溶解氧的主要来源(张朝能，1999；崔彦萍等，2014)。神农溪高水位期和汛期各监测点溶解氧分别在0~12 m和0~6 m水深的垂向分布上有显著分层现象，最大值均出现在0~3 m深度(图2)。整体上随着水深的增加，水体溶解氧浓度减少。表层水体的溶解氧饱和度分别为104.04%和171.96%，已经达到过度饱和状态(S_{DO}>100%)。柴小平等(2015)认为水体溶解氧浓度过高，对鱼类等水生生物会有不利影响。

浮游植物生物量对水体溶解氧有直接影响(游亮等，2007；曲茉莉，2011)。叶绿素a浓度在3~5 m处开始衰减，而浮游植物在死后被微生物分解，往往会消耗大量氧气。神农溪高水位期和汛期水体内真光层平均深度分别为9.30 m和9.70 m，而叶绿素a的浓度最大值出现在水深1~5 m，溶解氧最大值出现在水深0~3 m。当浮游植物处于真光层时，其光合作用大于呼吸作用，即释放氧气；当浮游植物在真光层之下，其光合作用小于呼吸作用，消耗氧气(杨正健，2014)；表明神农溪回水区在高水位期和汛期表层水体溶解氧主要来源于浮游植物的光合作用，也说明了表层水体溶解氧浓度较高的原因。

神农溪回水区高水位期和汛期的溶解氧浓度与水温和pH也呈显著正相关(表2)。与水温的相关系数分别为0.722和0.885(P<0.01)；与pH的相关系数分别为0.963和0.961(P<0.01)。水深12~30 m，监测点SN5、SN6水温温跃梯度减小(俞焰等，2017；杨凡等，2019)，造成好氧生物的生物量减少，溶解氧消耗减少，故水体溶解氧有增加的情况。温跃层的形成会阻碍水体垂向的水动力交换，从而阻碍表层水体溶解氧向底层的传输(邱华北等，2011)，且水体自身有氧化还原等性质(王庆安等，2001)，消耗或产生H^+(O_2+4H^++4e↔2H_2O)(黄岁樑等，2011)，使pH增加或减少；当pH降低，表明水体氧化还原反应正向进行，消耗H^+和O_2生成水，所以溶解氧也降低，造成溶解氧整体上沿水深减小。

电导率反映水中电解质的含量，其大小主要由溶解在水体中的离子种类、浓度等决定(姜伟等，2017)。表2显示，高水位期和汛期的溶解氧浓度与电导率呈显著负相关性，相关系数分别为−0.359和−0.495(P<0.01)；电导率在整体上是先随水深增大，然后减小，对溶解氧浓度变化具有指示意义。高水位期和汛期的溶解氧浓度与浊度呈显著负相关性，相关系数为−0.242和−0.417(P<0.01)。路蓓(2017)研究发现，光强辐射受到悬浮颗粒和可溶性有机物的影响，会有一个指数衰减的变化。神农溪高水位期和汛期水体浊度随水深而有所增加，可能阻碍了光强辐射的传播，故溶解氧浓度随浮游植物光合作用沿水深的减小而降低。

3.2　叶绿素垂向分布成因

神农溪高水位期和汛期水体内真光层平均深度分别为9.30 m和9.70 m，混合深度分别为6.25 m和6.50 m，可见两个时期的混合层深度均小于真光层深度，说明表层水体中有充足的光照。测得两时期的TN和TP的平均值分别为1.80、0.05 mg/L和2.99、0.05 mg/L，故表层水体有足够的营养(TN>0.2 mg/L、TP>0.02 mg/L是水体富营养化发生浓度)(胡中意和欧阳娴，2006)，满足神农溪表层水体中浮游植物生长繁盛的条件，可能是表层叶绿素a浓度较大，造成表层水体的叶绿素a浓度整体上表现为中度富营养化的原因之一。水深0~10 m的叶绿素a分层明显，而各监测点其浓度的最大值出现在水深1~5 m，可能是由于光抑制现象的发生(吴守璇，2005)。水温降低会弱化浮游植物体内酶的活性，从而减弱其光合作用，同时降低浮游植物的生物量(Eppley,1972；杨东方等，2006)；水温分层也会阻碍水体垂向的水动力交换，阻碍表层水体物质向底层传输，从而抑制中层和底层水体的叶绿素a浓度。受浮游植物光合作用的影响，水体中浮游植物增多，大量消耗CO_2，使H^+减少，又有HCO^-_3等物质的转换，生成OH^-，pH增高，故表层水体pH较大，但水深增加，浮游植物减少，光合作用减弱，所以pH值随水深增加而降低；另外，随着水深的增加，中层至底层缺少光照，浮游植物进行光合作用效率减弱，故叶绿素a也较低。高水位期和

汛期浊度在0~10 m和0~6 m沿水深增加，减弱了光照传播，从而抑制浮游植物的生长。叶绿素a与电导率呈显著负相关性，相关系数分别为−0.165和−0.287（P<0.01），所以水体中电导率会影响到浮游植物的生长和富集。

4 结论

（1）神农溪回水区水体在高水位期和汛期的溶解氧、pH分层现象明显，分层深度分别为0~12 m和0~6 m，其中表层水体的溶解氧饱和度分别为104.04%和171.96%，已达到过度饱和状态。

（2）叶绿素a分层现象明显，深度为0~10 m，表层水体的叶绿素a浓度整体上表现为中度富营养化。水温垂向分布存在明显的温跃层；电导率和浊度垂向分布规律有较大差异。

（3）神农溪回水区水体在高水位期与汛期溶解氧垂向上主要受浮游植物和水温分层影响；而叶绿素a主要受到水温分层、浊度、溶解氧的影响。

参考文献

柴小平,魏娜,母清林,等,2015. 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, 31(5):140−144.

崔彦萍,王保栋,陈求稳,2014. 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, 34(21):6309−6316.

董春颖,虞左明,吴志旭,等,2013. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 34(7):2574−2581.

国家环境保护总局,2002. 水和废水监测分析方法[M].4版. 北京:中国环境科学出版社:525−644.

胡中意,欧阳娴,2006. 富营养化水体中的氮磷及其去除研究[J]. 中国市政工程, (3):39−41,93.

黄岁樑,藏常娟,杜胜蓝,等,2011. pH、溶解氧、叶绿素a之间相关性研究Ⅰ:养殖水体[J]. 环境工程学报,5(6):1201−1208.

黄玥,黄志霖,肖文发,等,2019. 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,41(2):211−215,239.

吉小盼,刘德富,黄钰铃,等,2010. 三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J]. 环境工程学报, 4(12):2687−2693.

纪道斌,刘德富,杨正健,等,2010. 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,40(1):101−112.

姜伟,周川,纪道斌,等,2017. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. 环境科学, 38(6):2326−2335

李传华,赵军,师银芳,等,2016. 基于变异系数的植被NPP人为影响定量研究—以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 36(13):4034−4044.

李欣,宋林旭,纪道斌,等,2017. 三峡水库蓄水过程中神农溪库湾营养盐的动态分布[J]. 中国农村水利水电, (3):103−111.

路蓓,2017. 湖泊沉水植物适应水体光衰减的初步研究[D]. 北京:中国科学院大学.

罗琳,李适宇,厉红梅,2005. 夏季珠江口水域溶解氧的特征及影响因素[J]. 中山大学学报(自然科学版), 44(6):118−122.

吕林鹏,纪道斌,龙良红,等,2018. 汛末蓄水期神农溪库湾倒灌异重流特性及其对水华的影响[J]. 水生态学杂志, 39(1):9−15.

欧阳潇然,赵巧华,魏瀛珠,2013. 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, 25(4):478−488.

邱华北,商立海,李秋华,等,2011. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. 生态学杂志, 30(5):1039−1044.

曲茉莉,2011. 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, 36(12):67−69,116.

沈忱,吕平毓,王义成,等,2015. 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), 55(1):39−45.

田时弥,杨扬,乔永民,等,2015. 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, 27(1):31−37.

王庆安,黄时达,孙铁珩,2001. 多藻浅水体中pH值和溶解氧协同周期性变化初探[J]. 四川环境, (2):4−7,29.

王雨春,朱俊,马梅,等,2005. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化[J]. 湖泊科学, 17(1):54−60.

吴守璇,2005. 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.

徐慧,龙良红,纪道斌,等,2017. 三峡水库神农溪2014年春季浮游藻类演替成因分析[J]. 微生物学报, 57(3):375−387.

杨东方,高振会,王培刚,等,2006. 营养盐Si和水温影响浮游植物的机制[J]. 海洋环境科学,25(1):1−6.

杨凡,纪道斌,王丽婧,等,2019. 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[J]. 环境科学,41(5):2107−2115.

杨正健,2014. 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.

游亮,崔莉凤,刘载文,等,2007. 藻类生长过程中DO、pH与叶绿素相关性分析[J]. 环境科学与技术, 30(9):42−44,117.

俞焰,刘德富,杨正健,等,2017. 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, 38(4):1393−1402.

张朝能,1999. 水体中饱和溶解氧的求算方法探讨[J]. 环境科学研究,12(2):57-58.

张庆文,宋林旭,纪道斌,等,2019. 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, 39(7):3018-3026.

张莹莹,张经,吴莹,等,2007. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学,28(8):1649-1654.

赵林林,朱广伟,陈元芳,等,2011. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素[J]. 水科学进展, 22(6):844-850.

邹曦,潘晓洁,郑志伟,等,2017. 三峡水库小江回水区叶绿素a与环境因子的时空变化[J]. 水生态学杂志, 38(4):48-56.

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

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

Eppley R W, 1972. Temperture and phytoplankton growth in the sea[J]. Fishery Bulletin, 70(4):1063-1085.

He B Y, Dai M H, Zhai W D, et al, 2014. 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,167:13-24.

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

Ma J H, Hu M M, Zhu X, 2016. Present situation and control of outbreaks of algal blooms in the Three Gorges Reservoir[J]. Meteorological & Environmental Research, 7 (6): 33-37.

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

Reinart A, Arst H, Erm A, et al, 2001. Optical and biological properties of Lake Ulemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: light climate in Lake Ulemiste[J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 6 (1):75-84.

Wang J Z, 2002. Three Gorges Project:the largest water conservancy project in the world[J]. Public Administration & Development, 22 (5):369-375.

Zou X, Pan X J, Zheng Z W, et al, 2017. Temporal-spatial variation of chlorophyll a and environmental factors in the Xiaojiang River Backwater of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 38(4):48-56.

（责任编辑　万月华）

Vertical Distributions of Dissolved Oxygen and Chlorophyll-a in Shennong River Above Three Gorges Reservoir at Low and High Water Levels

TIAN Pan[1,2], SONG Lin-xu[1,2], JI Dao-bin[1,2], LI Ya-li[1,2], YANG Fan[1,2], GUO Ya-li[3,4]

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, P.R. China;
2. Engineering Research Center of the Ministry of Ecological Environment and Education in the Three Gorges Reservoir Area , Yichang 443002, P.R. China;
3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, P.R. China;
4. YANGTZE Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Shanghai 200335, P.R. China)

Abstract: To provide a reference to support environmental protection and ecological restoration, we investigated the vertical distribution and environmental driving factors for dissolved oxygen (DO) and chlorophyll-a (Chl-a) in the Shennong River backwater of Three Gorges Reservoir (TGR) at different water levels. The study was based on 2018 water quality monitoring data for the Shennong River backwater collected in February (winter dry season, high water level in TGR) and July (summer flood season, low water level in TGR). A total of 6 monitoring sites were set, from the Shennong River cove (SN1) to the end of the backwater (SN6), and depth profiles of water environmental factors were obtained by taking measurements at 1 m intervals from surface to bottom. Temperature depth profiles show that the Shennong River backwater was thermally stratified, weakly in the winter and strongly in the summer. DO in the surface water was high in the photic zone, particularly in the summer, and then rapidly declined with depth as decomposition outpaced photosynthesis. This zone of highly variable DO extends from 0-12 m in winter and 0-6 m in summer. In the surface water (epilimnion), the DO saturation (SDO) was above 100% (supersaturated), averaging 104.04% in winter and 171.96% in summer. The DO of the middle layer (mesolimnion) decreased with depth, and then was lower and more uniform in the bottom layer (hypolimnion). As expected, the vertical distributions of Chl-a at both high water (winter) and low water (summer) levels were similar to DO and the Chl-a concentration was consistently very low below 10 m. The average concentrations of Chl-a in the surface water were 11.4 μg/L and 8.7 μg/L, respectively, indicating moderate eutrophication (5 μg/L<Chl-a<20 μg/L). Pearson correlation analysis showed a significant correlation between the vertical distributions of DO and water temperature (WT), Chl-a and pH at both water levels. This indicates that the factors primarily affecting the vertical distribution of DO were WT (i.e., thermal stratification) and phytoplankton production and decomposition. Phytoplankton production consumes CO_2 (increasing pH) and releases O_2 in the photic zone, while phytoplankton decomposition consumes O_2 and releases CO_2 (decreasing pH) below the photic zone. Chl-a correlated positively with WT and pH, and negatively with electrical conductivity (EC) and turbidity (Turb), indicating that WT, EC and light intensity primarily affect the vertical distribution of phytoplankton.

Key words: Three Gorges Reservoir area; Shennong River; dissolved oxygen; chlorophyll-a; distribution characteristics