

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.019

南方某水库底层溶解氧分布特征及低氧成因分析

陈仲晗¹, 徐海升², 刘翔³, 刘威⁴, 邓培雁¹

(1. 华南师范大学化学与环境学院, 广东 广州 510631; 2. 深圳市铁岗·石岩水库管理处, 广东 深圳 518034;
3. 四川师范大学生命科学学院, 四川 成都 610068; 4. 珠江水资源保护科学研究所, 广东 广州 510611)

摘要:以南方某水库为例,通过2013年4月至2014年3月的监测数据研究底层溶解氧(bottom dissolved oxygen, BDO)和底层水温(bottom temperature, BT)、pH值、电导率、浊度(TU)、TP、TN、COD、总有机碳(TOC)、Chl-a间的关系,以阐明该水库BDO的时空分布特征及低氧成因。结果表明,BDO春、夏季浓度低,秋、冬季(枯水期)浓度较高,进水口附近的DO浓度普遍高于库中、库心;低氧现象主要发生在夏季(5—8月);水越深、水温越低,BDO下降趋势显著($P<0.05$);浊度、TOC与BDO为正相关关系。BDO与叶绿素a呈现显著正相关,在底层浮游植物中,蓝藻门占绝对优势,BDO浓度与蓝藻的垂直迁移有关。表明水库BDO在时间上的变化趋势受温度的影响,而空间上的变化受到水动力的影响,低氧现象的发生受到水体垂直密度分层的影响。

关键词:底层溶解氧;低氧现象;水体分层;浮游植物

中图分类号:X832 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)01-0108-07

Distribution characteristics of bottom dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in reservoir in southern China

CHEN Zhonghan¹, XU Haisheng², LIU Xiang³, LIU Wei⁴, DENG Peiyan¹

(1. School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;
2. Shenzhen Tiegang-Shiyan Reservoir Administrative Office, Shenzhen 518034, China;
3. College of Life Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China;
4. Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Taking a reservoir in Guangdong Province as a case study, the relationship between contents of bottom dissolved oxygen (BDO) and bottom temperature (BT), pH, conductivity, turbidity, total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chemistry oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), chlorophyll-a in water were analyzed according to the monitoring data from April 2013 to March 2014, to state the spatial-temporal distribution characteristics of bottom dissolved oxygen and the mechanism of hypoxia. The results indicated that, BDO concentrations are lower in spring and summer, while higher in autumn and winter (dry seasons). BDO concentrations are higher in the water intake and lower in the middle of reservoir. Hypoxia mainly happens in summer (from May to August). The correlation analysis showed that the relationship between the contents of BDO ($P<0.05$) and the contents of BT, turbidity, TOC and chlorophyll a was positive, which was negative with the contents of the water depth. The positive correlation between the contents of BDO and chlorophyll a and that dominate species are cyanobacteria indicated that the vertical migration of cyanobacteria is one of the key factors affecting BDO. Therefore, the temporal change of the contents of BDO was affected by BT; the spatial change of the contents of BDO was affected by hydrodynamic force; hypoxia might be affected by the thermal stratification.

Key words: bottom dissolved oxygen; hypoxia; thermal stratification; phytoplankton

基金项目:公益性行业科研专项(201301047)

作者简介:陈仲晗(1992—),女,硕士研究生,研究方向为环境生态。E-mail: han_cz1992@163.com

通信作者:邓培雁,教授。E-mail: dpy213@126.com

溶解氧 DO 是维持水生生物生存、分解部分污染物及保持水环境动态平衡的重要环境因子。过低的溶解氧不仅影响水生生物的生长和分布,还会通过氧化还原电位影响无机盐、有毒痕量金属的溶解度^[1]。影响水中溶解氧的因素有多种,物理方面有水气交换、水动力、温度等;化学方面有有机物合成、化学物质的氧化还原反应等;生物方面有生物的生长、繁殖和新陈代谢等^[2]。因此,研究水体溶解氧与环境因子的相关性以及低氧($\rho(\text{DO}) < 3 \text{ mg/L}$)^[3]现象的成因,对水质保护与治理有重要意义。

低纬度地区几乎所有的湖泊(水库)的湖下层,无论其营养盐如何,都会发生低氧或厌氧的现象,这是由于其相对较高的水温和生物体呼吸速率^[4],并且由于人类活动的影响,低氧现象将有所加剧^[5]。但国内外对低氧现象的研究主要集中在近岸海域、河口等,这是由于河口水动力学复杂,河口水质可以在短时间内发生剧烈的波动,近岸海域、河口是低氧现象的高发区^[5]。普遍认为,河口低氧的成因主要是高营养水体侵入,导致水体富营养化,从而发生河口底层缺氧现象^[6]。李宏亮等^[7]研究长江口水体溶解氧变化规律,认为缺氧存在明显的季节特征,且高营养盐的长江冲淡水 and 低溶解氧的上升流的入侵以及强烈的水体层化是河口底层低氧现象频发的原因。杨丽娜等^[8]分析大辽河近入海河段水体的溶解氧特征和主要影响因子,认为溶解氧浓度主要与营养盐和有机污染物相关,推断径流营养盐的输入和有机污染物的排放和夏季水体分层是形成低氧区的主要原因。然而,Shea 等^[9]认为 Western Long Island Sound(WLIS)的底层低氧与密度分层有关,与点源、非点源的营养盐含量无关。Rowe^[10]认为 Mississippi River Delta 季节性缺氧与水柱中垂直方向的物理和生物过程有关。湖泊(水库)低氧现象的有关研究较少^[11]。水库的水动力受人为因素影响,表现出强烈的不稳定性,尤其在丰水期和枯水期。入库水流一般富含营养盐、无机颗粒和有机颗粒,更容易发生低氧现象^[12]。因此,对水库溶解氧分布规律的探究以及低氧成因的分析显得尤为重要。基于此,笔者以亚热带某供水水库底层水体为研究对象,探讨溶解氧的分布规律以及溶解氧低值区的成因。

1 材料和方法

1.1 采样地点及频率

该水库位于广东省境内,地理位置在北纬 $22^{\circ}40' - 22^{\circ}42'$ 和东经 $113^{\circ}54' - 113^{\circ}55'$ 之间,流域集水面积 44.77 km^2 。水库处于亚热带海洋性季风气候,年平均气温为 22.4°C ,年均降水量 1933.3 mm ,

降水主要集中在 4—9 月^[13]。

根据该水库水质及水文分布特征,从进水口至取水口处共设 8 个采样点,包括上级水库引水入口(S1、S2),S3、S4,库心(S5),S6,北线引水入口(S7、S8),见图 1。本研究于 2013 年 4 月至 2014 年 3 月进行,样品采集每月 1 次,共采集 12 次。

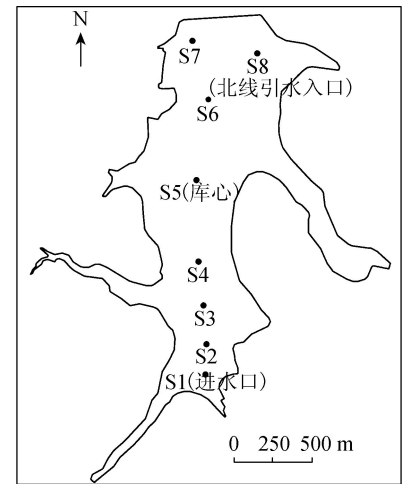


图 1 采样点分布

1.2 水质参数测定与分析

现场采用 YSI 多参数水质监测仪测定底层水温(bottom temperature, BT)、底层溶解氧(bottom dissolved oxygen, BDO)、pH 值、电导率(Conductivity, Cond.)、浊度(turbidity),通过实验室测得 TP、TN、 COD_{Mn} 、TOC、Chl-a 等因子值。测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[14]。

按常规浮游生物调查方法进行样品采集与观察,定量样品用 5L 采水器在底层采集水样 1L,现场加鲁格氏固定液至浓度 1%,经 48h 静置沉淀后浓缩至 20mL,用 0.1mL 浮游植物计数框在光学显微镜 OlympusBX-61 下进行浮游藻类定量计数,根据相关文献^[15-16]对所有定性定量样品鉴定到属。

1.3 数据分析

采用 SPSS19.0 中的 Pearson 进行相关性分析,采用 Origin8.0、Excel 作图,采用 surfer8 制作等值线图。

2 结果分析

2.1 底层溶解氧的时空分布特征

2.1.1 时间分布特征

2013 年 4 月至 2014 年 3 月该水库 8 个采样点的底层溶解氧质量浓度分布见图 2。由图 2 可以看出,5 月份底层溶解氧质量浓度显著降低,且保持较低水平至 8 月;9 月份底层溶解氧质量浓度回升,10 月份底层溶解氧质量浓度再次降低,但未出现显著的低氧现象;11 月份底层溶解氧质量浓度再次回

升,而后 12 月、1 月、2 月质量浓度有所波动,但均维持在较高水平,3 月份质量浓度开始下降。春季和夏季底层溶解氧质量浓度相对低($\rho(\text{DO}) < 3 \text{ mg/L}$),甚至出现厌氧情况(5 号采样点);秋季、冬季底层溶解氧质量浓度情况较好。

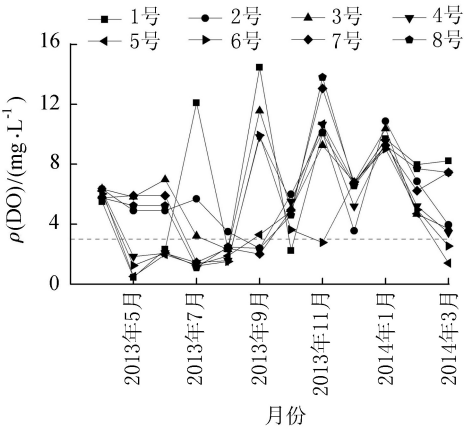


图2 底层溶解氧的时间分布

2.1.2 空间分布特征

图3为2013年4至2014年3月的底层溶解氧的等值线分布图。由图3可知,底层溶解氧多呈块状分布,其质量浓度呈南北高、中间低的趋势,南、北引水口底层溶解氧质量浓度变化幅度较大,而库中、库心变化幅度较小。

2.2 底层溶解氧与环境理化因子的相关性分析

在亚热带季风气候区,低溶解氧现象一般形成于春末夏初,在仲夏时达到高峰,在夏末秋初时结束,具有明显的季节特征^[17]。本实验中,低溶解氧现象也存在明显的季节波动特征,在春末、夏季存在持续性低氧现象。因此,选取5—8月($T > 25^{\circ}\text{C}$)的底层溶解氧质量浓度及其环境理化因子进行相关性分析,以找出与低氧现象有显著关联的环境因子。本次研究结果见表1。从表1可以看出,春、夏季底层溶解氧质量浓度与水温、水深、浊度、TOC及叶绿素a显著相关,与pH、 COD_{Mn} 、TN、TP不具有显著相关性($P < 0.05$)。

表1 该水库春、夏季底层溶解氧与环境理化因子的相关关系

	底层 DO	底层温度	水深	pH	浊度	TOC	COD_{Mn}	TN	TP	Chl-a
底层 DO	1									
底层温度	0.480 **	1								
水深	-0.658 **	-0.793 **	1							
pH	0.115	0.314	-0.374 *	1						
浊度	0.607 **	0.112	0.005	0.002	1					
TOC	0.401 *	0.273	-0.394 *	0.231	0.082	1				
COD_{Mn}	0.069	0.151	-0.306	0.234	-0.028	0.512 **	1			
TN	-0.229	-0.369 *	0.097	0.076	-0.193	-0.022	0.354	1		
TP	0.255	0.406 *	-0.401 *	0.281	0.239	0.470 **	0.321	0.202	1	
Chl-a	0.506 **	0.140	-0.479 **	0.172	0.305	0.210	0.070	0.110	0.203	1

注: ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$ 。

2.3 底层浮游植物的群落结构

选取低氧频发的5月、6月、7月、8月($T > 25^{\circ}\text{C}$)的1号、3号、5号采样点底层浮游植物样品进行分类计数。底层浮游植物物种组成见图4。由图4可知,蓝藻门占绝对优势,约占总生物量的84%。除蓝藻门外,水体中还监测到硅藻门(约占总丰度的9.6%)、绿藻门(约占总丰度的5.6%)、隐藻门(约占总丰度的1.3%)以及少量的甲藻门和裸藻门。其中,鞘丝藻属(*Lyngbya sp.*)、平列藻(*Merismopedia sp.*)、伪鱼腥藻(*Pseudoanabaena sp.*)为优势种。

3 讨论

3.1 底层溶解氧空间分布的影响因素

本实验表明,水库底层溶解氧在时间上主要受温度的影响。曾春芬等^[18]通过对天目湖的研究发现冬季溶解氧最高,而夏季溶解氧最低,甚至出现低氧状况。Lee等^[19]通过研究1995—2005年的Long Island Sound(New York)的底层溶解氧的监测数据发现,底层溶解氧具有季节波动的特性,最大值均出现在冬末(2—3月),而最小值均出现在夏季(7—9月)。Cicchetti等^[20]监测Narragansett Bay(Rhode Island, USA)的底层溶解氧发现,7—9月所有的站点均发生低氧现象,而10月之后没有站点出现低氧现象,底层溶解氧具有季节波动的特性。本实验结果也证明了这一特点,74%的低氧现象($\rho(\text{DO}) < 3.0 \mu\text{g/L}$)出现在5—8月($T > 25^{\circ}\text{C}$)。

本实验表明,水库底层溶解氧在空间上主要受水动力学的影响。Rabouille等^[21]通过对比研究长江、Mississippi River、珠江和Ehone River入海口附近的溶解氧,发现底层溶解氧浓度与水深和水力滞留时间相关,Mississippi River的水力滞留时间长,夏季缺氧现象频发,而长江东部入海口处的水力滞留时间短,其底层水的缺氧现象发生的频率相对较低,在较浅的珠江河口和Ehone River中极深的Gulf of Lion在雨季也鲜有缺氧现象发生。本实验中,南

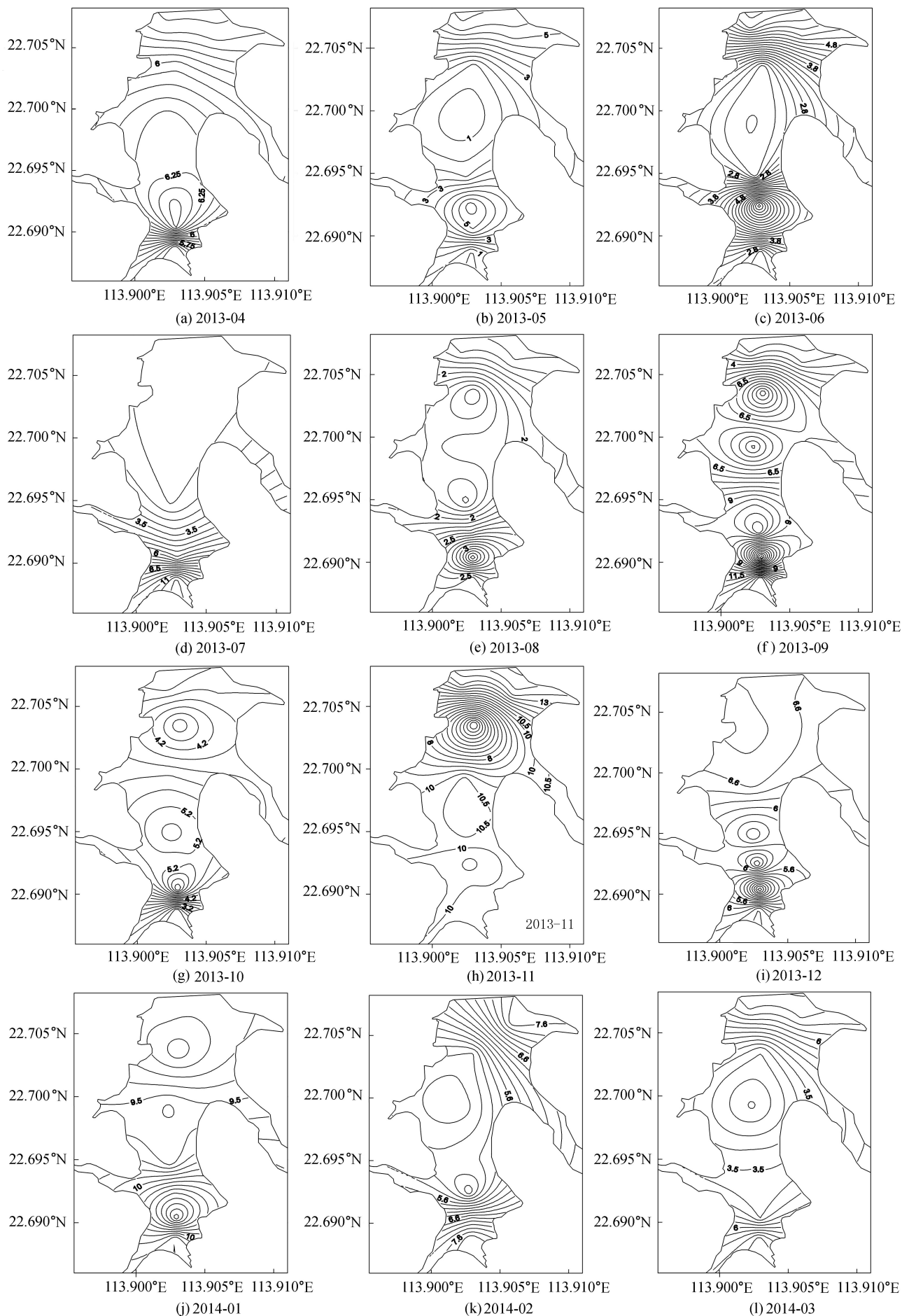


图3 BDO 的等值线分布(单位:mg/L)

部进水口和北线引水口的底层溶解氧质量浓度普遍高于库中、库心,且底层溶解氧质量浓度的最低值常出现在库心。这是由于在水库的入水口附近水深较浅,是水库中流速最快、水力滞留时间最短的区域^[12]。此外,在水库丰水期,站点之间的变化幅度较大,这也是水动力过程的变化所导致的。

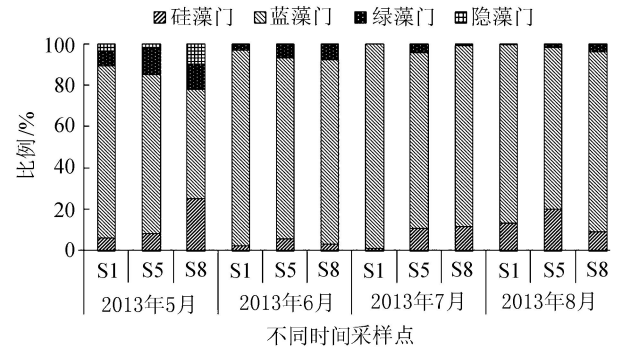


图4 不同时间采样点底层藻类比例的变化情况

3.2 底层缺氧现象的成因

本实验表明,水体垂直分层是夏季低氧频发的主要原因。很多研究表明,水体层化是缺氧形成的外部物理条件^[22-24]。水库是否分层主要取决于气候和换水率^[1]。在热带或亚热带地区的湖泊、水库中,当上层水体温度明显高于下层水体时,由于水体的热能传输不均匀,冷、热水体密度的差异会导致水体的物理分层和化学性质的差异,同时表现为水体溶解氧的剧烈变化^[25]。在水力滞留时间小于10 d的水库,因水流过急而不能形成分层^[26]。本次研究的水库也具备了水体分层的条件:该水库位于亚热带海洋性季风气候区,水温常年在15℃以上,水力滞留时间平均约为17.17 d,最大滞留时间为28 d,最小滞留时间为11 d^[27]。

本次实验中,底层溶解氧质量浓度与底层水温的正相关关系、与水深的负相关关系,证明了水体层化与底层溶解氧质量浓度有关。在较深的低凹处,容易发生分层现象,从而导致水温的进一步下降;伴随着分层现象的发生,上层水与底层水的氧气交换受到阻碍,加剧了低氧现象^[28]。实验结果表明,在低氧现象频发的5—8月也均出现不同程度的分层现象。其中,水深最深的5、6号采样点均出现分层情况,且低氧现象($\rho(\text{DO}) < 3 \text{ mg/L}$)共发生8次,占总低氧次数的40%。

此外,底层溶解氧质量浓度与浊度、TOC的正相关关系也与水体垂直分层有关。浊度反映了悬浮颗粒物的特征,底层悬浮颗粒来自于引水水体颗粒物的沉降和沉积颗粒的再悬浮^[29]。由于水体分层,底层水体的搅动力会减小。底层水体的稳定,有利于颗粒物的沉降,减弱底泥的再悬浮,从而使得低浊

度和低氧同时发生^[30]。因此底层溶解氧与TOC同时受分层的影响,呈正相关关系。TOC主要包含颗粒有机碳和溶解有机碳,其中颗粒有机碳浓度与浊度类似。溶解性有机碳主要来源于外源输入。尽管该水库作为梯级水库群的第3级浅水水库,在春、夏季(丰水期)上级水库会有大量水注入,但是由于分层现象的存在,这些低温、高密度的水入库后随即下沉到达温跃层或底层同密度的水层,然后这股水作为侵入流继续水平流动,其所携带的溶解性有机物不会影响底层水^[1]。侵入流所携带的有机碳大多停留在温跃层中,内源有机碳多沉积于底泥中。本次研究也发现,温跃层中TOC的含量的确普遍高于底层,温跃层分解TOC越多,则底层TOC越少,同时温跃层溶解氧消耗,底层溶解氧质量浓度也就越低。按此理论预测,在之后9—10月,水体分层被打破,底层溶解氧得到补给,但底层水的搅动也应该会造成沉积物中有机物的释放,分解消耗氧气,使得底层的溶解氧再一次下降。这在本实验中也得到验证,底层溶解氧质量浓度在9月上升之后,在10月又显著下降(图2)。

3.3 底层溶解氧与浮游植物的关系

溶解氧是水体Chl-a质量浓度变化的被动因子^[31]。一般认为,在真光层以下水体中,浮游植物以呼吸作用为主,光合作用减弱,从而使得水体溶解氧水平降低。万修全等^[32]分析夏季莱州湾的水质指标发现,叶绿素质量浓度的高值区对应溶解氧质量浓度的低值区。但杨丽娜等^[8]认为大辽河口的底层溶解氧质量浓度与Chl-a几乎无相关性,即浮游植物的初级生产过程不是导致底层溶解氧质量浓度变化的主要因素。本实验中,分析低氧频发的5—8月份Chl-a质量浓度和底层溶解氧质量浓度的关系,Chl-a质量浓度与底层溶解氧质量浓度呈显著正相关关系,这与浮游植物的垂直迁移以及底泥叶绿素、营养盐的释放有关。该水库低氧情况下,蓝藻作为优势种存在于底层低氧环境中,这是由于蓝藻在黑暗、低氧环境中有生存优势:蓝藻可以以发酵的形式,分解、利用光合作用时积累在细胞体内的糖原作为能量来源,从而维持其生命活动并生长良好^[33]。蓝藻门中的这3个优势藻类(鞘丝藻属、平列藻、伪鱼腥藻)均属于无鞭毛、无假空泡,这些藻上浮性弱,难停留在水体上部。那么,底层藻类密度高可能是由于上层藻类密度太大,藻类迁移至下层以获得更好的生存环境。吴志旭等^[34]和林佳等^[35]分别研究福建山仔水库和新安江水库的分层现象与浮游植物的关系,均认为水温分层决定了浮游植物的垂直分布。那么,底层溶解氧质量浓度与底层

Chl-a 质量浓度的正相关关系,可能是由于溶解氧和 Chl-a 共同受分层现象的影响,但两者之间并没有直接的关联性。关于藻类的垂直迁移对溶解氧的影响还有待进一步研究。

3 结 论

a. 该水库底层溶解氧质量浓度在空间上呈现南北高、中间低的分布格局;在时间上呈现春、夏季高于秋、冬季的分布趋势。溶解氧受到温度、生物活动、营养盐等多种因素的影响。

b. 春末、夏季(5—8 月, $T>25^{\circ}\text{C}$),在水库底层出现大面积的低氧区。通过探讨底层溶解氧与温度、水深、pH、浊度、TOC、高锰酸盐指数以及营养盐的相关关系,发现溶解氧质量浓度与水温、水深、浊度、TOC 的相关性较显著,因此判断上水体的垂直分层作用造成了底层溶解氧质量浓度的降低。

c. 底层 Chl-a 质量浓度与底层溶解氧质量浓度呈显著正相关。该水库中,蓝藻门为优势种,蓝藻的生理以及迁移机制与溶解氧质量浓度之间的关系值得进一步研究。

参考文献:

[1] KALFF J. Limnology: inland water ecosystems[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, Inc. ,2002: 201-245.

[2] 谢群,张瑜斌,孙省利,等. 流沙湾溶解氧的分布特征及其相关因素的探讨[J]. 环境科学与技术,2009,32(9): 39-44. (XIE Qun, ZHANG Yubin, SUN Shengli, et al. Distribution characteristics of dissolved oxygen and correlating factors analysis in Liusha Bay [J]. Environmental Sience & Technology, 2009, 32 (9): 39-44. (in Chinese))

[3] DAUER D M, RODI A J, RANASINGHE J A. Effects of low dissolved oxygen events on the macrobenthos of the lower Chesapeake Bay[J]. Estuaries, 1992, 15(3): 384-391.

[4] THORNTON J A. A review of some unique aspects of the limnology of shallow Southern African man-made lakes [J]. GeoJournal, 1987, 14(3): 339-352.

[5] DIAZ R J, ROSENBERG R. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna[J]. Oceanography and Marine Biology, 1995(33): 245-303.

[6] National Research Council. Clean coastal waters: understanding and reducing the effects of nutrient pollution [M]. Washington D C: National Academies Press, 2000: 113-162.

[7] 李宏亮,陈建芳,卢勇,等. 长江口水体溶解氧的季节变化及底层低氧成因分析[J]. 海洋学研究, 2011, 29

(3): 78-87. (LI Hongliang, CHEN Jianfang, LU Yong, et al. Seasonal variation of DO and formation mechanism of botton water hypoxia of Changjiang River Estuary [J]. Journal of Marine Science, 2011, 29 (3): 78-87. (in Chinese))

[8] 杨丽娜,李正炎,张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 51-57. (YANG Lina, LI Zhengyan, Zhang Xueqing. Distrubution characteristics of dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in the upper esturine zone of Daliao River[J]. Environmental Science, 2011, 32 (1): 51-57. (in Chinese))

[9] SHEA O, BROSNAN M T. Trends in indicators of eutrophication in Western Long Island Sound and the Hudson-Raritan Estuary [J]. Estuaries, 2000, 23 (6): 877-901.

[10] ROWE G T. Seasonal hypoxia in the bottom water off the Mississippi River Delta [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(2): 281-290.

[11] ZHU G W, ZHANG F, ZHANG Y, et al. Hypoxia and its environmental influences in large, shallow, and eutrophic Lake Taihu, China [J]. International Association of Theoretical and Applied Limnology, 2008(30): 361-365.

[12] 林秋奇,韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报, 2001, 21(6): 1034-1040. (LIN Qiuqi, HAN Boping. Reservoir limnology and its application in water quality management: An overview [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 1034-1040. (in Chinese))

[13] 钟保磷,张小丽,梁碧玲. 近 50 年深圳气候特点[J]. 广东气象, 2002 (增刊 1): 11-14. (ZHONG Baolin, ZHANG Xiaoli, LIANG Biling. Climate characteristics in Shenzhen during 1953—2000[J]. Guangdong Meteorology, 2002(Sup1): 11-14. (in Chinese))

[14] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[15] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[16] 浙江省主要常见淡水藻类图集(饮用水源)编委会. 浙江省主要常见淡水藻类图集(饮用水源) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.

[17] ZHOU Feng, XUAN Jiliang, NI Xiaobo, et al. A preliminary study of variations of the Changjiang diluted water between August of 1999 and 2006 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(6): 1-11.

[18] 曾春芬,黄文钰,王伟霞,等. 天目湖溶解氧分布特征及环境影响因子[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4): 445-451. (ZENG Chunfen, HUANG Wenyu, WANG Weixia, et al. Distrubution and its influence factors of dissolved oxygen in Tianmuhu Lake [J]. Resources and Environmen in Yangtze Basin, 2010, 19(4): 445-451. (in

- Chinese))
- [19] LEE Y J, LWIZA K M M. Characteristics of bottom dissolved oxygen in Long Island Sound, New York[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 76(2): 187-200.
 - [20] CICCETTI G, LATIMER J S, REGO S A, et al. Relationships between near-bottom dissolved oxygen and sediment profile camera measures[J]. Journal of Marine Systems, 2006, 62(3/4): 124-141.
 - [21] RABOUILLE C, CONLEY D J, DAI M H, et al. Comparison of hypoxia among four river-dominated ocean margins: The Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhône rivers[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(12): 1527-1537.
 - [22] RABALAIS N N, DIAZ R J, LEVIN LA, et al. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia[J]. Biogeosciences, 2010, 7(2): 585-619.
 - [23] OBENOUR D R, MICHALAK A M, ZHOU Y T, et al. Quantifying the impacts of stratification and nutrient loading on hypoxia in the Northern Gulf of Mexico[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46: 5489-5496.
 - [24] LEE Y G, KANG J H, KI S J, et al. Factors dominating stratification cycle and seasonal water quality variation in a Korean estuarine reservoir[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2010, 12(5): 1072-1081.
 - [25] 周菁, 余正, 刘开国, 等. 典型亚热带热分层水库秋季细菌群落垂直分布[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6205-6213. (ZHOU Jing, YU Zheng, LIU Kaiguo, et al. Bacterial community and its relation to environmental variables in a subtropical stratified reservoir for drinking water supply in autumn[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6205-6213. (in Chinese))
 - [26] STRASKRABA M, TUNDISI J G, DUNCAN A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management[J]. Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management, 1993(77): 213-288.
 - [27] 彭溢, 谢林伸. 深圳市石岩水库富营养化主控因素分析及潜在风险预测[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(4): 141-146. (PENG Yi, XIE Linshen. Analysis of the main controlling eutrophication factors and prediction of potential risk of Shiyao Reservoir, Shenzhen[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(4): 141-146. (in Chinese))
 - [28] BEARDSLEY R, LIMEBURNER R, YU H, et al. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 57-76.
 - [29] 黄以琛, 李炎, 邵浩, 等. 北部湾夏季海表温度、叶绿素和浊度的分布特征及调控因素[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2008, 47(6): 856-863. (HUANG Yichen, LI Yan, SHAO Hao, et al. Seasonal variation of sea surface temperature, Chlorophyll-a and Turbidity in Beibu Gulf, MODIS imagery study[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2008, 47(6): 856-863. (in Chinese))
 - [30] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2574-2581. (DONG Chunying, YU Zuoming, WU Zhixu, et al. Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2574-2581. (in Chinese))
 - [31] 周贝贝, 王国祥, 徐瑶, 等. 南京秦淮河叶绿素 a 空间分布及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 267-272. (ZHOU Beibei, WANG Guoxiang, XU Yao, et al. Spatial distribution of chlorophyll-a and its relationship with environmental factors in Qinhuai River, Nanjing[J]. Journal of Lake Science, 2012, 24(2): 267-272. (in Chinese))
 - [32] 万修全, 吴德星, 鲍献文, 等. 2000 年夏季莱州湾主要观测要素的分布特征[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2004, 34(1): 7-12. (WAN Xiuquan, WU Dexing, BAO Xianwen, et al. Distribution features of main observational elements in Laizhou Bay in the summertime of 2000[J]. Journal of Ocean University of China: Natural Science, 2004, 34(1): 7-12. (in Chinese))
 - [33] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595. (KONG Fanxiang, GAO Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 589-595. (in Chinese))
 - [34] 吴志旭, 刘明亮, 兰佳, 等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 460-465. (WU Zhixu, LIU Mingliang, LAN Jia, et al. Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. Journal of Lake Science, 2012, 24(3): 460-465. (in Chinese))
 - [35] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库: 福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 244-250. (LIN Jia, SU Yuping, ZHONG Houzhang, et al. Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir (Fujian) during summer stratification[J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(2): 244-250. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-02-25 编辑: 彭桃英)