

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 张小玲,夏祥鳌,车慧正,汤洁,唐宜西,孟伟,董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 姚波,周凌晔,刘钊,张根,夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,栾天,马千里,王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 段卿,安俊琳,王红磊,缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM_{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较 程玉婷,王格慧,孙涛,成春雷,孟静静,任艳芹,李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM₁₀ 中主要水溶性离子的影响 王芳,陈强,张文煜,郭勇涛,赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 梁宗敏,杜睿,杜鹏瑞,王亚玲,李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 李璇,王雪松,刘中,吴梁,翁燕波,胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 王海林,王俊慧,祝春蕾,聂磊,郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO₂ 实验研究 夏芝香,项群扬,周旭萍,方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 孙鹏程,李晓璐,成钢,陆勇,吴昌敏,罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 邢建伟,钱薇微,绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 王明珠,张运林,施坤,高贇,刘刚,蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 殷燕,吴志旭,刘明亮,何剑波,虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 韩晓霞,朱广伟,许海,Steven W. Wilhelm,秦伯强,李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征:以军山湖为例 刘霞,钱奎梅,谭国良,邢久生,李梅,陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中²¹⁰Pb_{ex}和营养盐垂向分布特征及相关性分析 王小雷,杨浩,顾祝军,张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 姜烈,何江涛,姜永海,刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,王巍,蒋新跃,刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 王红宇,刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 孙德帅,郑强强,张晓东,方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd²⁺ 的影响 王建涛,孟昭福,杨亚提,杨淑英,李彬,马麟莉,许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 唐伟,郭悦,吴景贵,黄兆琴,代静玉 (2604)

TiO₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 李明洁,喻泽斌,陈颖,王莉,刘晴,刘钰鑫,何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用 朱江鹏,梅婷,彭云,葛思怡,李时银,王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 马楠,田耀金,杨广平,谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 王梦月,马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 刘佳,沈志强,周岳溪,曹蓉,李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 青亮,黄锦琼,余小巍,张素坤,杨艳艳,任明忠,温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 卫丹,万梅,刘锐,王根荣,张讯达,文晓刚,赵远,陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 李晓玲,彭永臻,柴同志,朱建平,王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 郭雪,毕春娟,陈振楼,王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 江敏,Le Huy Tuan,梅卫平,阮慧慧,吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 谢婷,张淑娟,杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,李绘,陈文文,张莉,胡婷,石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 张鸿,赵亮,何龙,柴之芳,沈金灿,杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 李磊,任景玲,刘素美,蒋增杰,杜金洲,方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例 王幼奇,白一茹,王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 李楚娴,孙荣国,王定勇,赵铮,张金洋,马明,张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评估 何秀婷,王奇,聂湘平,杨永涛,程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 张春荣,吴正龙,姚春卉,高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究 伯鑫,王刚,温柔,赵春丽,吴铁,李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 王辉,谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,窦静,李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 陈喆,铁柏清,雷鸣,刘孝利,叶长城,罗梅梅,毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 潘莹,胡正华,吴杨周,孙银银,盛露,陈书涛,肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 贾曼莉,郭宏,李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 王宁,彭胜,陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 牟姝君,李秀芬,任月萍,王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 赵晨阳,魏源送,葛振,钟佳,才兴,张媛丽,李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH₃、N₂O 和 NO 排放特征研究 丁钢强,韩圣慧,袁玉玲,罗琳,王立刚,李虎,李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 黄友福,许心雅,范良鑫,方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 王东梅,刘丹,刘庆梅,陶丽霞,刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 马兰,毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 赵志瑞,侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476,2556,2713,2770)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析

殷燕¹, 吴志旭², 刘明亮¹, 何剑波¹, 虞左明^{1*}

(1. 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014; 2. 淳安县环境保护监测站, 淳安 311700)

摘要: 基于 2011~2012 年 1~12 月千岛湖 6 个站点的溶解氧浓度实时监测数据, 分析了千岛湖溶解氧的垂直分布以及时空分布特征, 并探讨了影响水体溶解氧动态分布特征的影响因子。结果表明, 溶解氧分布特征有明显的垂向差异以及季节差异。冬季, 平均溶解氧值较高, 除大坝前站点, 其余各站点溶解氧无显著垂向差异; 夏季, 溶解氧垂向差异显著大于春秋两季。水深较深的小金山、三潭岛和大坝前站点其夏季溶解氧最大值出现在真光层, 分别达到 11.59、12.52 和 10.96 mg·L⁻¹。千岛湖表层溶解氧最大值出现在春季, 而最小值出现在秋季。相关性分析结果表明, 溶解氧与水温、pH、叶绿素 a 浓度的相关性存在季节性差异。夏季, 水温与溶解氧存在极其显著的线性相关, 温度热力分层是影响溶解氧在夏季垂直分布的关键因素。春夏季, pH、叶绿素 a 浓度与溶解氧的相关系数较高, 主要与浮游植物光合作用有关。

关键词: 千岛湖; 溶解氧; 垂直分布; 时间分布; 空间分布; 环境因子

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2539-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.015

Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors

YIN Yan¹, WU Zhi-xu², LIU Ming-liang¹, HE Jian-bo¹, YU Zuo-ming¹

(1. Hangzhou Institute of Environmental Science, Hangzhou 310014, China; 2. Chun'an Environmental Monitoring Station, Chun'an 311700, China)

Abstract: Based on monthly *in situ* data collected at six sampling sites in Qiandaohu Lake between 2011 and 2012, the dynamic distributions of dissolved oxygen (DO) were analyzed and the relationships between DO and the environmental factors were investigated. The results showed that there were obviously vertical and temporal variations in the distributions of DO. In winter, the average values of DO were generally higher than those in other seasons, but no significant vertical distribution variation was found except Dabaqian. However, the vertical differences of DO in summer were larger than those in spring and autumn. Moreover, the maximum values of DO found in euphotic zone at the sites of Xiaojinshan, Santandao, Dabaqian in summer were 11.59, 12.52, 10.96 mg·L⁻¹, respectively. The maximum DO at surface layer was found in spring while the minimum value appeared in autumn. Seasonal differences in relationships between dissolved oxygen and water temperature, pH, and Chla concentration were discussed. In summer, highly significant linear correlation between DO and water temperature was found indicating that the temperature thermal stratification was the key factor to influence the vertical distribution of DO. The relative higher correlation coefficients between DO and pH, Chla concentration in spring and summer were due to the phytoplankton photosynthesis.

Key words: Lake Qiandaohu; dissolved oxygen; vertical distributions; temporal variations; spatial variations; environmental factors

溶解氧(dissolved oxygen, DO)是衡量河流、水库等水体环境质量的重要指标之一,对于维持健康的水生生态系统有着重要的意义^[1-3]。国内外相关文献表明水体中 DO 与水温、浮游生物、pH、悬浮物浓度等多种因素相互制约^[4-10]。因此,研究水体 DO 含量及其分布情况对水质保护与富营养化治理意义重大^[11, 12]。

国内关于 DO 的研究大多集中在长江、河口以及近海域区域^[8, 9, 13, 14],针对水库的研究也多集中于单一点位的分析^[11]。千岛湖是我国大型人工深水湖泊之一,也是长三角战略饮用水源地。关于千岛湖 DO 的监测研究已有一些报道^[15-17],但得到的也只是特定水深的溶解氧浓度,系统性针对千岛湖 DO 时空分布规律的研究并不是很多,并且对其环

境影响因素等也知之甚少。因此,本研究通过对 2011~2012 年千岛湖 6 个站点溶解氧动态分布特征进行研究,着重探讨其垂直变化规律以及与水温、叶绿素 a 浓度、pH 之间的相关关系,以期能更全面地掌握千岛湖 DO 变化规律及其对生物地球化学循环的动态影响,为水库环境管理与水体利用提供科学依据。

收稿日期: 2013-10-23; 修订日期: 2014-01-23

基金项目: 杭州市科技局重大项目(20122513A01); 杭州市环境保护科研计划项目(2010006); 浙江省自然科学基金项目(Y5110314); 杭州市科技发展计划项目(20120433B02)

作者简介: 殷燕(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为水环境与水生生态, E-mail: yinyan19870829@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yzm0571@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区域

千岛湖位于浙江省西北部(118°34'~119°15'E, 29°22'~29°50'N), 地处钱塘江上游与安徽省交界处, 是新安江大坝建成蓄水后形成的大型深水水库, 流域属于亚热带季风气候, 温暖湿润, 雨量充沛; 水库正常水位在 106~107 m, 岸线总长度 1 406 km, 共有大小入库支流 30 余条, 而作为主要入库径流的新安江占入库地表径流总量的 60%; 水库多年平均入库水量为 94.10 亿 m³, 多年平均出库

水量为 91.07 亿 m³, 水面蒸发量约 5.30 亿 m³; 平均水深约 31 m^[18].

1.2 采样点设置及参数测定

由于千岛湖为山谷型水库, 呈现分枝状态, 依据此生态特征, 本研究共设置了 6 个采样点(图 1): 街口和小金山(西北区)、航头岛(东北区)、茅头尖(西南区)、大坝前(东南区)、三潭岛(湖心区). 采样时间为 2011 年 1 月~2012 年 12 月的月初, 茅头尖与航头岛采样频率为隔月采样(其中航头岛从 2011 年 5 月开始采样), 其他站点采样频率为每月一次.

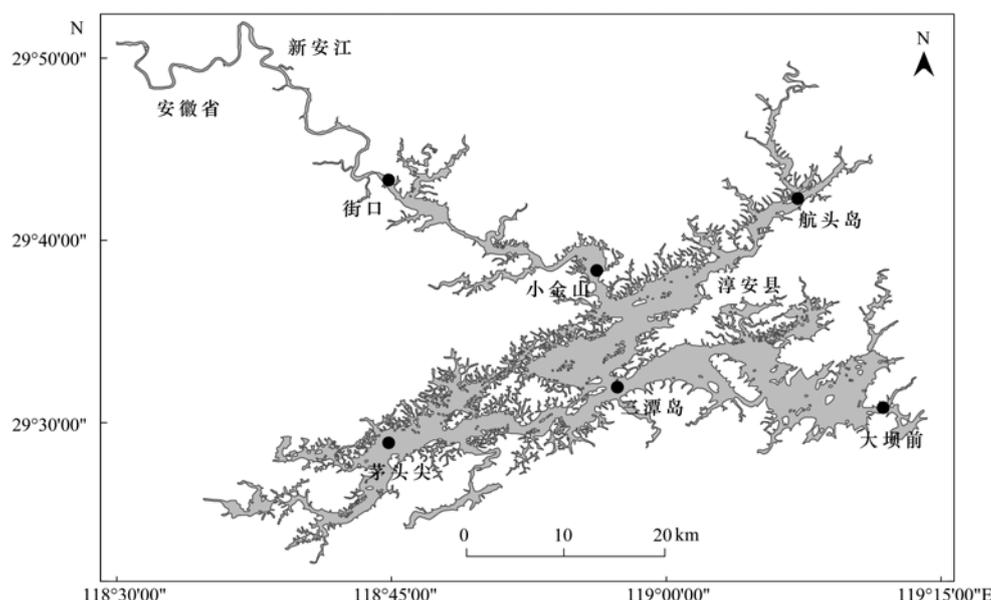


图 1 千岛湖采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Lake Qiandaohu

1.3 仪器及参数测定

采用加拿大 RBR 公司的 XRX-620 型快速多参数水质剖面仪进行测定, 主要得到 DO、水温、叶绿素 a(Chla) 浓度及 pH 数据. 采样过程中, 首先利用美国中西公司 PON1-Ponoldepth-DDS 型便携式超声波水深仪进行水深测定, 之后将 XRX-620 仪器固定在船只的自动绞车上, 以 10 cm·s⁻¹ 的速度匀速放入水中, 仪器每隔 2 s 记录一个数据, 并且自动存储于自带的存储器中. 与传统采样把原水带回实验室分析测定相比, XRX-620 型快速多参数水质剖面仪具有采样速度快, 实时记录数据, 有助于了解不同季节各指标的垂向分层规律等优点.

1.4 数据处理

使用 Arcgis 9.3 软件绘制千岛湖采样点示意图, 使用美国 GOLDEN 软件公司的 Surfer 8.0 绘制等值线图, 统计回归分析等采用 SPSS16.0 统计软

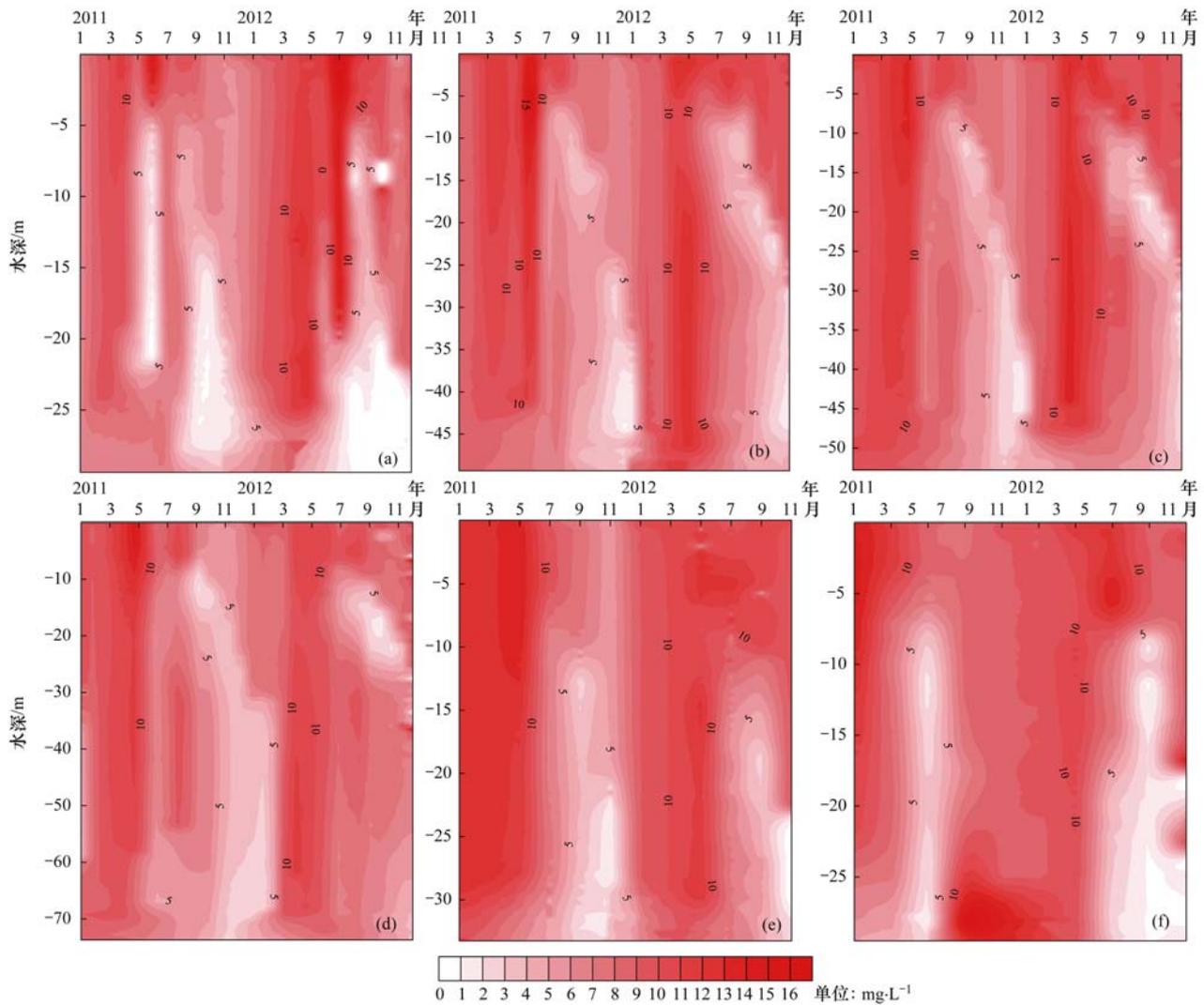
件. 显著性水平设置为: ①极其显著性相关, $P < 0.01$; ②显著性相关, $0.01 < P < 0.05$; ③无显著性相关, $P > 0.05$.

2 结果与讨论

2.1 DO 垂直分布特征

从千岛湖 2011~2012 年 DO 的垂向分布来看, 各站点呈现出明显的季节性差异(图 2). 总体来看, 夏秋季表底层 DO 差大于冬春季节, 尤其在夏季存在显著的突变层, 即“氧跃层”. 从图 2 可以看出, “氧跃层”的形成具有显著的空间差异.

对于水深较深的小金山、三潭岛和大坝前, 其 DO 的垂直分布呈现出相似的规律, 春末夏初之时(5~6 月), DO 开始呈现出显著的突变层. 为了更好地说明这 3 个站点氧跃层的季节差异, 选取了 2012 年 2 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)以及 11 月



(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别代表街口、小金山、三潭岛、大坝前、茅头尖和航头岛站点

图2 2011~2012年千岛湖6个站点溶解氧的垂直分布规律

Fig. 2 Vertical variations of DO in six sampling sites in Lake Qiandaohu during 2011 to 2012

(秋季)小金山、三潭岛和大坝前的实时监测数据进行更深入的分析. 从图3可以看出冬季,小金山和三潭岛DO无分层,两者平均DO值为 $(8.92 \pm 0.20) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(8.68 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而大坝前在水深26~32 m处有明显的溶氧突变层,DO从 $7.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $3.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,32 m以下水层DO趋于稳定,均值为 $[(2.79 \pm 0.24) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$. 这与薛俊增等^[19]2004~2005年在千岛湖监测所得到的冬季大坝DO无显著分层的结果有所不同,2004~2005年冬季大坝前表底层DO差值仅为 $0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而在2012年大坝前表底层DO差为 $5.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 春季,小金山、三潭岛及大坝前这3个站点开始出现氧跃层,在水深10 m附近出现极小值,分别为 9.39 、 8.80 、 $8.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但之后DO呈现

出缓慢增长的趋势. 3个站点在垂直分布上的平均DO值($>10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)比其他各季节高,而水体表底层无显著的DO差. 至夏季,太阳辐射不断增强,真光层内浮游植物大量繁殖,增氧作用超过耗氧作用,夏季DO的最大值出现在真光层,曾春芬等^[11]在天目湖也发现溶解氧最大值发生在水表层下、中层上的位置. 从图3中可以看出,夏季DO从最表层逐渐开始增大至次表层时形成了单高峰趋势(5~7 m),小金山、三潭岛和大坝前最大值分别达到 11.59 、 12.52 、 $10.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 当水深大于真光层后,如果混合层深度很大,即使真光层浮游植物光合作用很强,可能都很难抵消浮游植物群落在混合层的呼吸作用^[20],由此水体氧气不断被消耗,形成显著的氧跃层,从图3中可以看出大致位于水深7~15 m处.

而在图 2(b)、2(c)中可以看出,小金山、三潭岛的氧跃层变化存在显著的年际差异,2011 年 2 个站点氧跃层出现的下降梯度在 3~8 m 之间. 然而 3 个站点 DO 降低到极小值后随着水深的增加又缓慢的不断增高,直至水深 30 m 附近处 DO 维持稳定呈现出随水深的变化略微呈下降的趋势,表底层 DO 差在 2~3 mg·L⁻¹. 秋季,小金山、三潭岛和大坝前在

水深 0~20 m 处平均 DO 为(9.06 ± 0.41)、(9.14 ± 0.25)和(7.30 ± 0.10) mg·L⁻¹,但 DO 随之出现突变层,随水深增加降至 1 mg·L⁻¹,表底层 DO 差在 4~7 mg·L⁻¹. 秋季,湖上层产生的有机物部分会沉降到湖下层,分解的过程中逐渐降低了下层水体 DO 的含量,而这一过程在深水湖泊的湖下层比较显著^[20].

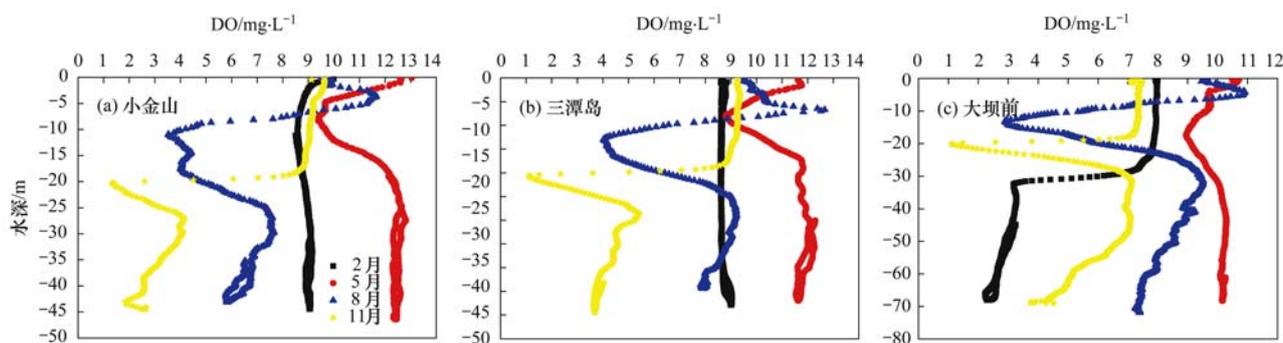


图 3 2012 年小金山、三潭岛及大坝前不同季节溶解氧的垂直分布变化

Fig. 3 Vertical variations of DO in Xiaojinshan, Santandao, Dabaqian in different seasons in 2012

街口、茅头尖以及航头岛分别位于千岛湖的西北、西南以及东北区域,其水深较浅,DO 在冬季以及初春无显著垂直分层[图 2(a)、2(e)、2(f)],而在夏季出现明显的氧跃层,以 2012 年 7 月为例,茅头尖 DO 随着水深的增加快速升高,至水深 5 m 左右达到最大值 12.5 mg·L⁻¹,之后又快速下降,在水深 14 m 左右降至最小值 5.14 mg·L⁻¹,航头岛站点的变化趋势与其相同,而街口站点的 DO 没有随水深先增加的过程,从表层开始一直维持在高水平 14~15 mg·L⁻¹,直至水深 15 m 处 DO 发生突变,形成窄小的氧跃层.

2.2 DO 时空分布特征

根据 DO 的垂直分布特征,本文把水深分为如下层次:表层、10 m、20 m、40 m,并分析探讨设定水深 DO 的时空分布特征. 从图 4 中可以看出,大部分站点表层 DO 最大值出现在春季,如 2011 年街口、小金山、三潭岛以及大坝前 DO 最大值分别为 13.87、14.84、12.97、14.91 mg·L⁻¹,2012 年小金山、三潭岛及大坝前 DO 最大值分别为 12.82、13.04、10.91 mg·L⁻¹. 表层溶解氧最小值大部分出现在秋季. 在上文中也讨论过春季是浮游植物开始大量繁殖的季节,尤其在表层适宜的光照条件和温度使得浮游植物进行光合作用释放大量的氧气,一部分逸散至大气中,而另一部分则溶解于水体,致使表层水体 DO 在春季时达到最高,而次高值大部分出现在夏季. 这与曾春芳等^[11]在天目湖监测得到

夏季 DO 最低的结果所不同. 从年际变化来看,除小金山站点,各站点表层 DO 的年平均值得 2012 年高于 2011 年,尤其街口站点,2012 年表层 DO 年平均值为 10.27 mg·L⁻¹,是 2011 年表层 DO 年平均值的 1.17 倍.

分析水深 10 m 处的 DO 可得出以下规律:2011 年千岛湖水体 10 m 处平均 DO 值春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季,而 2012 年则为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季. 由此可得出在水深 10 m 处 DO 最小值出现在夏季,最大值出现在春季. 从年际变化来看,与表层 DO 变化规律相同. 从图 4 中也能看出,冬季,水深 20 m 处 DO 值较大,2011 年各站点平均 DO 值为 10.09 mg·L⁻¹,而夏季 DO 值仅为 5.81 mg·L⁻¹. 在上文中也讨论过千岛湖 DO 在冬季无显著垂向差异,而夏季温跃层显著,而且在表层藻类的大量繁殖,使得上下层水体交换受阻,由此夏季水体在中层 DO 较低. 街口、茅头尖及航头岛由于水深较浅,故而不讨论水深在 40 m 处的 DO 变化. 从图 4(b)、4(c)、4(d)中可以看出,水深 40 m 处的 DO 值在夏季比 20 m 处 DO 值高,也可能是由于下层水体温度偏低,而使得水体溶解氧升高的缘故.

2.3 溶解氧与环境因子之间相关性

根据溶解氧垂向分布特征,本研究选择不同季节[冬季(2 月)、春季(5 月)、夏季(8 月)、秋季(11 月)]表层至水深 20 m 处的 DO 与水温、pH、Chla 浓度进行相关性分析. 由于航头岛和茅头尖站

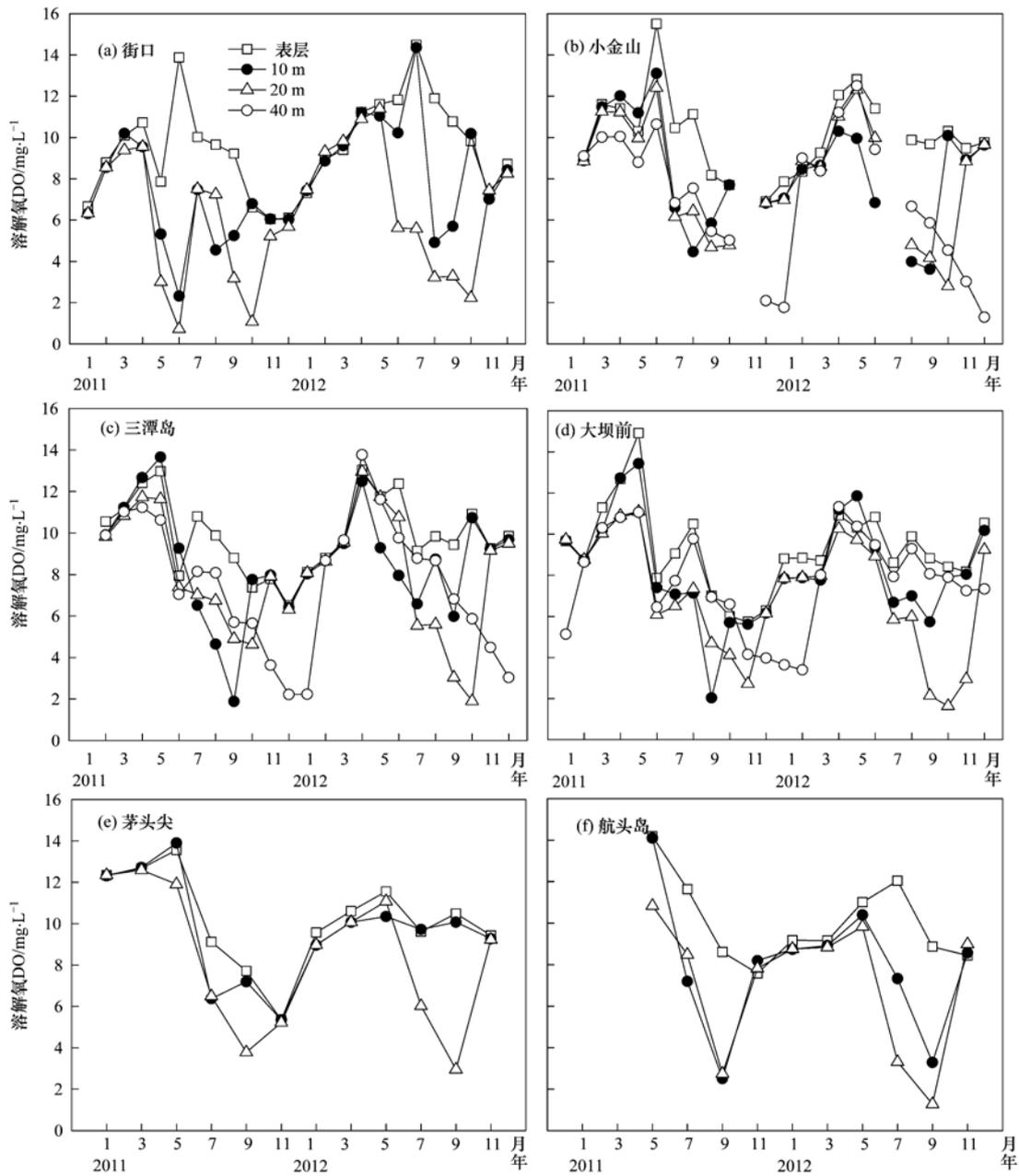


图 4 2011 ~ 2012 年千岛湖 6 个站点溶解氧在表层、10 m、20 m 和 40 m 处的年际变化

Fig. 4 Temporal and spatial variations of dissolved oxygen at water surface, 10 m, 20 m and 40 m at six sites during 2011 to 2012 in Lake Qiandaohu

点为隔月采样, 缺失 2 月和 8 月数据, 由此本研究选择了涵盖千岛湖上游至下游水域 4 个站点包括街口、小金山、三潭岛及大坝前数据进行分析, 结果见表 1. 从中可知, 夏季 DO 与水温存在显著性相关, 但各站点相关系数有显著差异. 水深较浅的街口站点, 2011、2012 年相关系数分别为 0.52、0.56 ($P < 0.0001$), 而对于水深较深的其余 3 个站点, DO 与水温的相关系数范围为 0.85 ~ 0.93 ($P < 0.0001$). 温跃层是湖面温水层和湖底静水层的过渡带, 对于湖泊和水库的生态环境有着重要的影

响^[21,22], 而千岛湖是典型的季节性温跃层^[23]. 夏季温跃层显著, 温跃层与氧跃层出现在同一个水深位置, 由此可说明在夏季, 温度热力分层是影响 DO 的关键因素. 这一推断与曾春芬等^[11]在天目湖研究所得结果相同. Yin 等^[6]在珠江口也发现 DO 与水温在夏季呈现显著正相关, 而在冬季只有少数站点呈现显著相关. 冬季水温低, 藻类生长缓慢, 水温无显著垂向差异, DO 的变化受水温影响较小. 图 5 所示为千岛湖 2011 年大坝前、街口站点夏季 DO 与水温的线性回归. 而对于春秋两季而言, DO 与水温的相

关关系存在显著年际差异,从表 1 中可以看出,2011 年相关系数显著高于 2012 年.

表 1 不同年份不同季节 DO 与水温、pH、Chla 浓度的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between DO and water temperature, pH, Chla concentration in different years and different seasons

站点	季节	年份	水温		pH		Chla	
			<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
街口	春季(5月)	2011	0.89	<0.000 1	0.83	<0.000 1	0.86	<0.000 1
		2012	0.15	0.16	0.07	0.498	0.04	0.720
	夏季(8月)	2011	0.52	<0.000 1	0.72	<0.000 1	0.78	<0.000 1
		2012	0.56	<0.000 1	0.91	<0.000 1	0.80	<0.000 1
	秋季(11月)	2011	0.70	<0.000 1	0.69	<0.000 1	0.45	<0.000 1
		2012	-0.44	<0.001	-0.50	<0.001	0.16	0.124
	冬季(2月)	2011	0.33	<0.001	-0.97	<0.000 1	0.15	0.209
		2012	-0.81	<0.000 1	-0.94	<0.000 1	0.12	0.195
小金山	春季(5月)	2011	0.92	<0.000 1	0.83	<0.000 1	0.97	<0.000 1
		2012	0.34	<0.001	0.57	<0.000 1	0.79	<0.000 1
	夏季(8月)	2011	0.86	<0.000 1	0.82	<0.000 1	0.89	<0.000 1
		2012	0.91	<0.000 1	0.93	<0.000 1	0.64	<0.000 1
	秋季(11月)	2011	nd	nd	nd	nd	nd	nd
		2012	0.89	<0.000 1	0.68	<0.000 1	-0.02	0.894
	冬季(2月)	2011	-0.61	<0.000 1	0.88	<0.000 1	0.17	0.118
		2012	0.79	<0.000 1	0.79	<0.000 1	-0.52	<0.000 1
三潭岛	春季(5月)	2011	0.85	<0.000 1	0.81	<0.000 1	0.78	<0.000 1
		2012	-0.33	<0.01	0.37	<0.000 1	-0.06	0.595
	夏季(8月)	2011	0.91	<0.000 1	0.92	<0.000 1	0.79	<0.000 1
		2012	0.85	<0.000 1	0.93	<0.000 1	0.37	<0.000 1
	秋季(11月)	2011	0.86	<0.000 1	0.79	<0.000 1	0.84	<0.000 1
		2012	0.54	<0.000 1	0.75	<0.000 1	-0.12	0.263
	冬季(2月)	2011	-0.71	<0.000 1	0.79	<0.000 1	0.05	0.677
		2012	0.41	<0.000 1	0.77	<0.000 1	-0.33	<0.01
大坝前	春季(5月)	2011	0.92	<0.000 1	0.98	<0.000 1	0.81	<0.000 1
		2012	0.96	<0.000 1	0.94	<0.000 1	0.80	<0.000 1
	夏季(8月)	2011	0.93	<0.000 1	0.94	<0.000 1	0.84	<0.000 1
		2012	0.88	<0.000 1	0.95	<0.000 1	0.84	<0.000 1
	秋季(11月)	2011	0.97	<0.000 1	0.27	<0.01	0.74	<0.000 1
		2012	0.72	<0.000 1	0.65	<0.000 1	-0.10	0.327
	冬季(2月)	2011	0.42	<0.000 1	0.01	0.93	-0.06	0.608
		2012	0.81	<0.000 1	0.92	<0.000 1	-0.37	<0.000 1

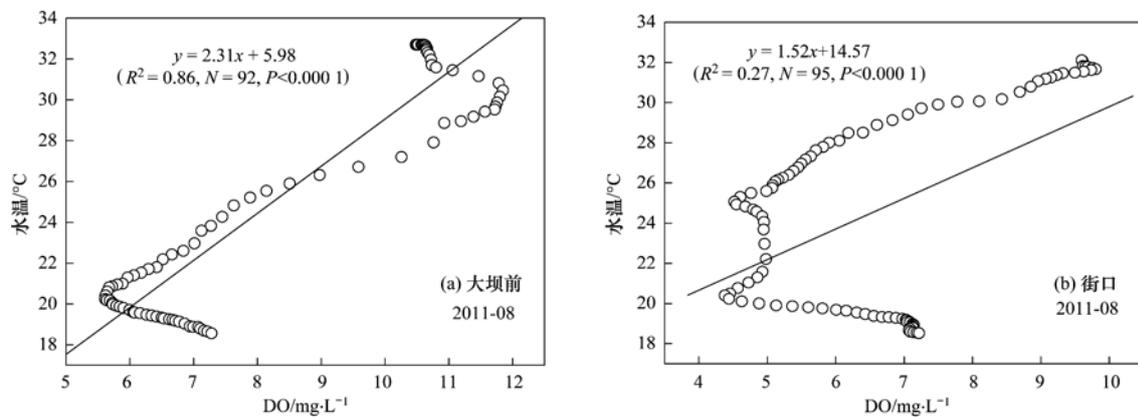


图 5 2011 年夏季大坝前、街口 DO 与水温线性关系

Fig. 5 Linear relationships between DO and water temperature in Dabaqian and Jiekou in summer of 2011

除 2012 年街口外,其余站点在不同年份的春夏季节,DO 与 pH 值呈显著性相关. 春夏季是水体浮游植物大量繁殖的季节,藻类进行光合作用,释放氧气的同时吸收二氧化碳,结果使得水中碳酸氢根大量积累,致使 pH 值升高. 有很多文献证实 pH 值与水中 DO 呈现显著线性相关^[24, 25],pH 对 DO 的影响

是通过生化过程体现的^[26]. 而从图 6 中也能直观看出,春夏季,DO 与 pH 值呈现出显著的线性相关关系. 反观秋冬季节,DO 与 pH 之间的相关性弱于春夏季节,有些站点两者的相关性几乎为零,如 2011 年冬季大坝前站点两者之间相关系数仅为 0.01.

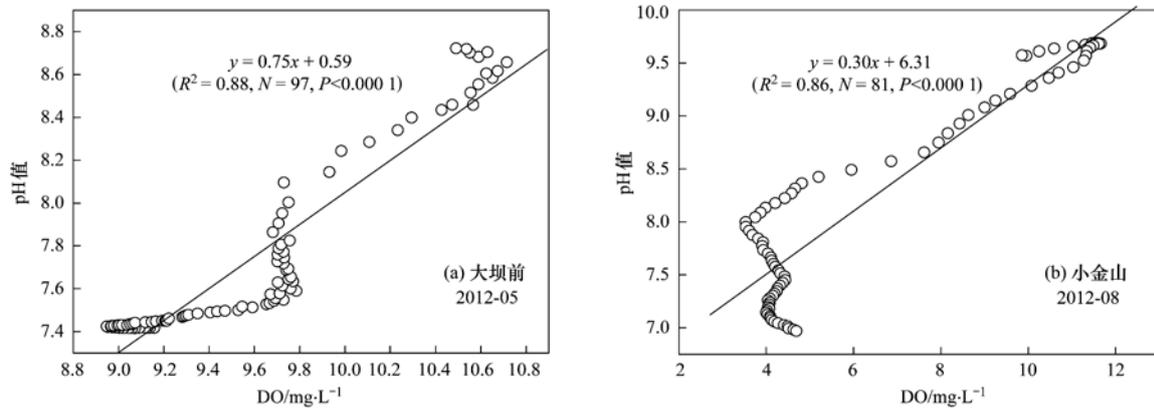


图 6 2012 年春季大坝前站点、夏季小金山站点 DO 与 pH 值线性关系

Fig. 6 Linear relationships between DO and pH in spring of Dabaqian and in summer of Jiekou in 2012

从表 1 中可以看出,冬季,千岛湖各站点 DO 与 Chla 浓度之间无相关关系,春夏季大多站点两者相关性显著. 例如对 2011 年春夏季 DO 与 Chla 浓度进行回归分析发现,两者在不同站点不同季节呈现出不同的回归关系,结果如表 2 所示. 位于千岛湖上游的街口站点以及位于下游的大坝站点,DO 与 Chla 浓度呈现二次抛物线相关关系,罗冬莲^[26]认为这是产氧和耗氧矛盾运动的必然结果. 然而小金山与三潭岛站点,DO 与 Chla 浓度呈现线性相关. 总

体上来看,春夏季,水体中 DO 含量的变化与浮游植物光合作用有关.

通过对 DO 与水温、pH、Chla 浓度相关性分析发现,水体 DO 含量变化是受多种因素共同影响. 首先,水温能直接影响水体 DO 含量,氧跃层的形成受到温跃层显著的影响;其次,浮游植物在春夏季节大量繁殖,在水体真光层光合作用强烈,同时导致此层溶解氧含量增大,而消耗二氧化碳的同时又使得水体中 pH 值升高.

表 2 2011 年春夏季千岛湖 4 个站点 DO(x) 与 Chla 浓度(y) 的回归分析

Table 2 Regression analysis between DO(x) and Chla concentration(y) for four sampling sites in spring and summer of 2011

站点	5 月			8 月		
	回归方程	R^2	P	回归方程	R^2	P
街口	$y = 0.25x^2 - 2.75x + 7.73$	0.77	<0.0001	$y = 0.12x^2 - 1.45x + 4.57$	0.90	<0.0001
小金山	$y = 1.01x - 9.21$	0.94	<0.0001	$y = 0.90x - 4.42$	0.79	<0.0001
三潭岛	$y = 0.57x - 0.86$	0.63	<0.0001	$y = 0.47x - 1.99$	0.57	<0.0001
大坝前	$y = 0.45x^2 - 11.11x + 68.93$	0.83	<0.0001	$y = 0.16x^2 - 2.29x + 8.52$	0.85	<0.0001

3 结论

(1) 千岛湖 DO 垂直分布存在显著的季节性差异. 夏秋季表底层 DO 差大于冬春季节,而在夏季,“氧跃层”的形成具有极其显著的空间差异. 除街口站点外,其余各站点夏季 DO 极大值出现在真光层. 冬季,除大坝前站点,DO 无显著垂向差异.

(2) 水体表层溶解氧最大值出现在春季,而最小值出现在秋季.

(3) 夏季,温度热力分层是影响 DO 的关键因素,DO 与水温在不同站点呈现出显著性线性相关. 春夏季,pH、Chla 浓度与 DO 的相关系数较高,主要与浮游植物光合作用有关.

参考文献:

- [1] Quinn N T W, Jacobs K, Chen K W, et al. Elements of decision support system for real-time management of dissolved oxygen in the San Joaquin River deep water ship channel [J]. Environmental Modelling and Software, 2005, 20 (12): 1495-1504.

- [2] Kannel P R, Lee S, Lee Y S, *et al.* Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **132**(1-3): 93-110.
- [3] Ay M, Kisi O. Modeling of dissolved oxygen concentration using different neural network techniques in foundation creek, El Paso County, Colorado [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, **138**(6): 654-662.
- [4] Kuroyanagi A, da Rocha R E, Bijma J, *et al.* Effect of dissolved oxygen concentration on planktonic foraminifera through laboratory culture experiments and implications for oceanic anoxic events [J]. *Marine Micropaleontology*, 2013, **101**(1): 28-32.
- [5] Xu J, Yin K, Lee J H W, *et al.* Long-term and seasonal changes in nutrients, phytoplankton biomass, and dissolved oxygen in deep bay, Hong Kong [J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, **33**(2): 399-416.
- [6] Yin K, Lin Z F, Ke Z Y. Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, **24**(16): 1935-1948.
- [7] Yamada Y, Mito Y, Igeta A, *et al.* Dissolved oxygen concentration in river sediment of the Lake Biwa tributaries, Japan [J]. *Limnology*, 2012, **13**(1): 149-154.
- [8] 张莹莹, 张经, 吴莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1649-1654.
- [9] 陈东, 张丽旭, 刘汉奇, 等. 长江口海域春夏季溶解氧分布特征及其相关因素分析[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(增刊1): 49-53.
- [10] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河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.
- [11] 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.
- [12] Han H G, Qiao J F, Chen Q L. Model predictive control of dissolved oxygen concentration based on a self-organizing RBF neural network [J]. *Control Engineering Practice*, 2012, **20**(4): 465-476.
- [13] 刘洋, 鲍献文, 吴德星. 南海溶解氧垂直结构的季节变化分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, **41**(Z1): 25-32.
- [14] 宋国栋, 石晓勇, 祝陈坚. 春季黄海溶解氧的平面分布特征及主要影响因素初探[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(6): 534-536.
- [15] 方志发, 谢家才. 千岛湖水溶解氧含量与水深影响的探讨[J]. *环境污染与防治*, 1999, **21**(增刊): 65-66.
- [16] 罗献宝, 文军, 骆东奇, 等. 千岛湖水质变化特征与趋势分析[J]. *中国生态农业学报*, 2006, **14**(4): 208-212.
- [17] 余员龙, 任丽萍, 刘其根, 等. 2007-2008年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(5): 684-692.
- [18] 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.
- [19] 薛俊增, 蔡桢, 姚建良, 等. 千岛湖水温垂直分布的季节演变对透明湍昼夜垂直迁移的影响[J]. *科技导报*, 2011, **29**(29): 65-71.
- [20] Kalf J. 湖沼学——内陆水生态系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. 144-153, 229-241.
- [21] Minns C K, Moore J E, Doka S E, *et al.* Temporal trends and spatial patterns in the temperature and oxygen regimes in the Bay of Quinte, Lake Ontario, 1972-2008 [J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2011, **14**(1): 9-20.
- [22] Hickman A E, Moore C M, Sharples J, *et al.* Primary production and nitrate uptake within the seasonal thermocline of a stratified shelf sea [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, **463**: 39-57.
- [23] 蒋国荣, 郝少东, 杜涛, 等. 南海北部温跃层逐月变化特征分析[J]. *海洋预报*, 2011, **28**(3): 40-45.
- [24] Bini L M, Thomaz S M, Carvalho P. Limnological effects of *Egeria najas* Planchon (Hydrocharitaceae) in the arms of Itaipu Reservoir (Brazil, Paraguay) [J]. *Limnology*, 2010, **11**(1): 39-47.
- [25] 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): 1681-1686.
- [26] 罗冬莲. 深沪湾溶解氧的分布及其与浮游植物悬浮物的相关性研究[J]. *海洋通报*, 2002, **21**(1): 31-36.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-tuan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin	(2834)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行