

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 许稳,金鑫,罗少辉,冯兆忠,张霖,潘月鹏,刘学军(1279)

兰州春夏季 PM₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析 马丽,余晔,王博,赵素平,李刚(1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 王璐,刘子锐,温天雪,苗红妍,王跃思(1298)

2015年北京城区大气 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 及前体气体的污染特征 丁萌萌,周健楠,刘保献,王焱,张博韬,石爱军,杨懂艳,常森(1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 齐丽,任玥,刘爱民,黄业茹,赵震,王江,李泓(1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 胡亚东,马安周,吕鹏翼,张扬,庄国强(1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 李笑语,吴琳,邹超,张意,毛洪钧,荆博宇(1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 李曦峰,孙宇琦,王仲鹏,牟宗刚,崔兆杰(1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 徐华山,赵磊,孙昊苏,任玉芬,丁涛,常帅,王海东,李森,果钊(1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 杨兵,何丙辉,王德宝(1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 李琳琳,张依章,唐常源,郑磊,孟伟,卢少勇,敦宇(1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩,吉正元(1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 俞焰,刘德富,杨正健,张佳磊,徐雅倩,刘晋高,严广寒(1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 王靖淇,王书平,张远,林佳宁,高欣,臧小苗,赵茜(1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 戴文芳,郭永豪,郁维娜,熊金波(1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,金漫彤,李非里(1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 丁洋,黄焕芳,李绘,罗杰,郑煌,孙焰,杨丹,张原,祁士华(1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 边博,周燕,张琴(1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 朱广伟,李静,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军,张运林,秦伯强(1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 杨海燕,王灿,鄢忠森,李冬平,赵焱,瞿芳术,梁恒,徐叶琴,李圭白(1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 李青松,李学艳,姚宁波,骆靖宇,李国新,陈国元,高乃云(1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 韩慧丽,王宏杰,董文艺(1477)

g-C₃N₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 李莉莉,陈翠柏,兰华春,刘菲,安晓强(1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 范艺,王哲,赵连勤,吴德意(1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 郑吉,周振超,陈芳,陈涛,魏媛媛,韩玥,陈红(1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 张秋亚,马晓妍,王晓昌,游猛(1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 吕文洲,张树林,乔宇祥,刘英(1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 杨波,丁凤友,徐辉,李方,田晴,马春燕(1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 南亚萍,周国标,袁林江(1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 付昆明,周厚田,苏雪莹,王会芳(1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 曹雁,王桐屿,秦玉洁,韩彬,任君怡(1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 何正坤,宋博宇,朱南文,董军(1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH₄ 厌氧去除特性 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,苏光明,王晓明(1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 何梦媛,董同喜,茹淑华,苏德纯(1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 葛蔚,程琪琪,柴超,曾路生,吴娟,陈清华,朱祥伟,马东(1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 王建伟,张彩香,潘真真,廖小平,刘媛,吕幽,汤蜜(1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 蔡观,胡亚军,王婷婷,袁红朝,王久荣,李巧云,葛体达,吴金水(1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 陈珊,丁成庆,祝贞科,王娟,彭佩钦,葛体达,吴金水(1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 张阳阳,胡学玉,邹娟,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(1622)

淹水水稻土消耗 N₂O 能力及机制 王玲,邢肖毅,秦红灵,刘毅,魏文学(1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 李惠娟,彭党聪,刘文博,姚倩,卓杨(1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 杨雨滢,易建婷,张成,陈宏,木志坚(1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 迟苏琳,徐卫红,熊仕娟,王卫中,秦余丽,赵婉伊,张春来,李彦华,李桃,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 彭琴,李哲,梁东丽,王梦柯,郭璐(1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,黄永春,蒋航(1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 金彩霞,司晓薇,王万峰,王春峰,王子英,张琴文,王婉(1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 孙松,李楚娴,张成,王永敏,王定勇(1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 何明靖,李琦,王登祥,赵佳渊,杨婷(1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 黄力华,李秀芬,任月萍,王新华(1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 容跃(1726)

《环境科学》征稿简则(1505) 《环境科学》征订启事(1682) 信息(1339, 1459, 1612)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素

俞焰¹, 刘德富^{2,3}, 杨正健^{2,3*}, 张佳磊^{2,3}, 徐雅倩², 刘晋高², 严广寒¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430068; 3. 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 根据 2015 年 9 月对千岛湖坝前湖区 5 个监测点的监测数据, 分析了千岛湖溶解氧、水温、pH、浊度、电导率和浮游植物等指标垂向分布特征, 并讨论了水体中溶解氧特殊分层与浮游植物垂向分布的影响因素。结果表明: ①溶解氧垂向分布呈现“表层高, 底层低”模式, 波动范围在 $1.95 \sim 8.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均浓度为 $5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。低氧区出现在 12 ~ 20 m 水深, 最小值在 17 m 为 $1.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。0 ~ 12 m 内维持在较高水平, 垂向差异较小, 12 ~ 20 m 内出现突变骤减, 甚至出现缺氧状态 ($< 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 在 20 ~ 38 m 内溶解氧恢复正常水平, 38 m 以下因水深增大浓度减小。pH 垂向分布与溶解氧分布完全一致, 突变区域出现在同一水深。②浮游植物垂向上生物量差异明显, S1、S2、S3 三断面浮游植物生物量呈现中层 > 表层 > 底层, S4、S5 两断面浮游植物生物量底层 > 表层 > 中层, 浮游植物在 20 ~ 30 m 区域内生长最好。③相关性分析发现溶解氧与水温在温跃层内相关性显著, 水体垂向层化作用等物理过程以及浮游生物的活动直接或间接决定了千岛湖湖区低氧区的范围与程度。浮游植物与溶解氧、pH 显著负相关性, 浮游植物在表层主要受水体掺混与溶解氧分层的影响, 在底层主要受光照强度的影响。

关键词: 千岛湖; 溶解氧; 浮游植物; 垂向分布; 理化因子

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1393-10 DOI: 10.13227/j.hjxk.201606085

Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors

YU Yan¹, LIU De-fu^{2,3}, YANG Zheng-jian^{2,3*}, ZHANG Jia-lei^{2,3}, XU Ya-qian², LIU Jin-gao², YAN Guang-han¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Civil and Environmental Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, Wuhan 430068, China)

Abstract: According to the data collected from the five monitoring sites in front of the dam in Thousand-island Lake in September 2015, the vertical distribution characteristics of dissolved oxygen (DO), water temperature, pH, turbidity, conductivity and phytoplankton were analyzed. The influencing factors of special stratification of DO and vertical distribution of phytoplankton were also discussed. The results showed that: ① The vertical distribution of DO presented “the surface is higher than the underlying” mode. DO ranged from $1.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $8.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the average concentration was $5.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Low-oxygen zones appeared between 12 m and 20 m and the minimum concentration was $1.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at 17 m. The concentration of DO maintained at a high level between 0 m and 12 m and the vertical variance was small. Sudden drop of DO occurred between 12 m and 20 m and there was an anoxic zone ($< 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). The concentration of DO returned to normal level between 20 m and 38 m. Then it reduced under 38m as the water depth increased. The vertical distribution of pH showed the same trend with that of DO and their sudden change regions appeared in the same zone. ② Vertical phytoplankton biomass displayed significant difference. The phytoplankton biomass of S1, S2 and S3 presented: mid-layer > surface > bottom. But S4, S5 presented: bottom > surface > mid-layer. In addition, the depth between 20 m and 30 m was the best for the growth of phytoplankton. ③ The correlation analysis showed that DO and water temperature in the thermocline were significantly correlative. The range and degree of low-oxygen zones in Thousand-island Lake was determined by physical processes like thermal stratification of water and direct or indirect effects of the plankton. Phytoplankton and DO, pH showed significant negative correlation. The phytoplankton was mainly influenced by turbulent mixing and DO stratification in the surface layer while it was mainly influenced by light intensity at the bottom.

Key words: Thousand-island Lake; dissolved oxygen; phytoplankton; vertical distribution; physical and chemical factors

溶解氧是表征水体污染程度的重要指标^[1-3], 是维系良好的湖泊水质和健康的最重要条件之一, 缺氧

收稿日期: 2016-06-14; 修订日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(91647207); 国家自然科学基金项目(51509086)

作者简介: 俞焰(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文学, E-mail: 719162536@qq.com

* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

以及厌氧条件会对湖泊生态系统产生许多不利影响^[4]。一般清洁水体溶解氧趋于饱和,当水体受到污染,则溶解氧浓度会大幅降低^[5]。但同时,浮游植物的光合作用会消耗二氧化碳,释放氧气,使水体中溶解氧增加;若水中溶解氧较低亦会抑制浮游植物的生长^[6]。有研究发现,大型浅水湖泊太湖溶解氧垂向分布主要受浮游植物、水温层化以及季节影响,垂向分层不稳定^[7]。深水水库三峡库区其溶解氧表层主要来自浮游植物的光合作用,底层则主要受水动力条件影响^[8],呈现表层溶解氧区域饱和,底层出现缺氧状态。有研究表明水体中溶解氧与温度、水体分层、pH、悬浮物、高锰酸盐指数等有重要关系^[6,9-12]。而千岛湖属于大型人工深水湖泊,研究其溶解氧与浮游植物分布对水库环境保护具有重要意义。

千岛湖为1959年新安江水电站大坝建成蓄水后所形成的特大山谷型水库,为长三角地区重要水源地,水质常年为Ⅱ类水体^[13]。近年来,随着经济不断发展,千岛湖局部区域暴发大面积的季节性蓝藻水华^[14,15],引起社会广泛关注。目前,国内对溶解氧与浮游植物的研究大部分集中于三峡库区、浅水湖泊或近海河口区域^[16-18]。针对千岛湖已有的研究较多关注的是某一特定水深的分布规律。对溶解氧与浮游植物垂向分布规律探讨不多,以及其环境影响因子研究也甚少。因此本文主要研究千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分布特征,着重探讨引起溶解氧垂向分布与低氧区形成的原因,通过掌握造成溶解氧与浮游植物特殊分布的原因,以期为后期千岛湖水环境管理与水资源利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

千岛湖(又名新安江水库),位于浙江省西部与安徽省南部交界的淳安县境内(29°22'~29°50'N, 118°34'~119°15'E),1959年新安江水电站大坝建成蓄水后所形成的特大山谷型水库,大坝以上控制流域面积为10442 km²,其中60%位于安徽省境内,40%位于浙江省境内,平均水深34 m,年平均气温17℃^[19]。如图1所示于2015年9月,在千岛湖大坝前湖泊区(29°29'8"N~29°29'18"N,119°12'46"E~119°8'29"E)间隔4 km左右设置1个采样点,总计5各采样点,分别为S1(XAJ01)、S2(XAJ02)、S3(XAJ03)、S4(XAJ04)、S5(XAJ05)。

1.2 监测指标

水温(WT)、pH值(pH)、浊度(turbidity)、溶

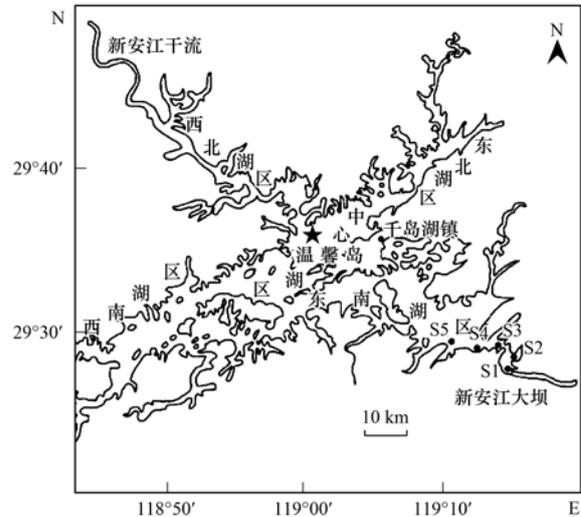


图1 千岛湖地形图及采样点分布示意

Fig. 1 Topographic map of Thousand-island Lake and distribution of sampling points

解氧(DO)、电导率(conductivity)、水深(depth)、透明度(SD)、叶绿素a浓度(Chl-a)、水下光合有效辐射(PAR)、水下消光系数(K_{sd})、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3--}\text{P}$)、可溶性硅酸盐(D-Si)、碱度、总硬度(Mg^{2+} 、 Ca^{2+})、高锰酸盐指数等。

1.3 实验分析

于各监测点表层、中层、底层处(S1、S2、S3这3个监测点表层0.5 m,中层30 m,底层55 m),用5 L柱状采水器分别采集水样;理化项目分析48 h内在实验室完成,根据文献[20]测定。水温、pH、浊度、溶解氧、电导率、水深等参数由YSI-EXO便携式/在线多参数水质监测仪(美国)现场测定,水下光强用International Light 4100光照计(美国)测定;透明度用赛氏盘法现场直接测定。浮游植物定量样品,各层取1 L水样,现场用鲁哥氏剂固定,带回实验室沉淀浓缩至50 mL,用显微镜分类计数;浮游植物物种鉴定和计数等参考文献[21]。

1.4 数据分析

数据采用Excel分析,显著性差异采用SPSS 17.0进行分析。混合层深度(m)取与表层水温温差 $\Delta T=0.5^\circ\text{C}$ 时所对应的水深^[22],采用1%表面光强所对应的深度(m)作为真光层深度^[23,24]。

2 结果与分析

2.1 溶解氧垂向分布分布特征

千岛湖湖泊区溶解氧在不同水深浓度差异较大,呈现明显分层现象(图2);表层溶解氧>底层>

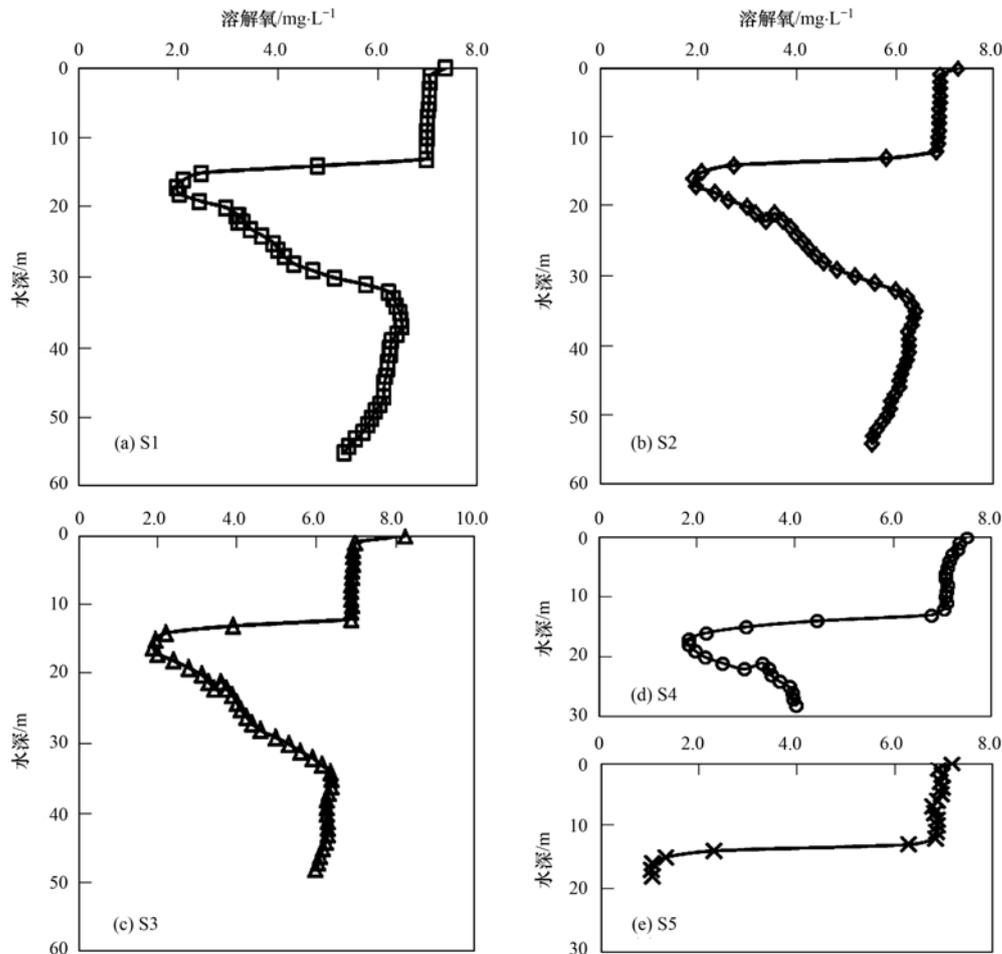


图2 千岛湖湖泊区溶解氧垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of dissolved oxygen in Thousand-island Lake

中层. S3 点表层溶解氧略大于其他断面, 为 $8.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 其他各点表层 DO 为 $(7.37 \pm 0.1) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 垂向上各监测点分布规律一致, 0 ~ 12 m 内溶解氧浓度较高且垂向上无明显差异. 12 m 之后出现明显溶解氧突变减小, 变化深度达 43 m, 最大梯度为 $0.53 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$. 14 ~ 25 m 水深呈现缺氧状态 (DO 浓度小于 $4.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [25]), 最小值出现在 17 m 处, 溶解氧为 $1.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 至 17 m 开始溶解氧突变开始递增, 平均递增梯度为 $0.21 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$. 在 40 m 水深处出现第 3 次突变, 溶解氧重新沿水深呈现递减.

2.2 水体理化因子分布特征

2015 年千岛湖坝前湖泊区水温与 pH 存在显著分层现象 (图 3). 水温、pH 在湖泊区各监测点垂向分布均呈现“上高下低”现象 [图 3(a) 和 3(b)]. 水温在表层 0 ~ 12 m 水深无明显变化, 该层水体垂向完全掺混, 属于混合层水体 (亦为同温层). 12 m 之后出现突变, 水温开始沿水深方向出现递减; 表、底

温差为 14.3°C , 温度梯度为 $0.55^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$, 水体出现深度达 28 m 的“温跃层”. 40 m 水深之后水温重新稳定, 水分层消失. 湖泊区水体表层呈现微碱性 [图 3(b)], 中层呈弱酸性, 底层则为中性. pH 沿水深方向出现明显分层, 0 ~ 12 m 受水体掺混影响, 该层水体内 pH 值无明显差异. 12 m 处出现突变减小, 最小值在 20 m 处, 为 pH 6.70, 20 m 之后开始回升. 各监测点浊度存在空间差异 [图 3(c)], 坝前区浊度小于其他区域, S4 点浊度最大. S1、S2、S3 三点在垂向上沿水深呈现先减小后增大趋势, 在 pH 减小区域浊度变小, 在 pH 增大区域内浊度增加, 浊度最大相差 10 NTU; S4、S5 垂向变化较小. 湖泊区各测点电导率垂向分布如图 3(d), 各监测点表层差异较小, 为 $(117 \pm 2.5) \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; 坝前区域稍大于其他断面. 电导率垂向上存在明显差异; S1 ~ S3 分布规律相似, 表层小于底层, 最大 S1 表底相差 $15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 电导率在 0 ~ 12 m 内无明显变化; 在 12 m 之后出现突变呈现沿水深递减, 最小值出现在 24

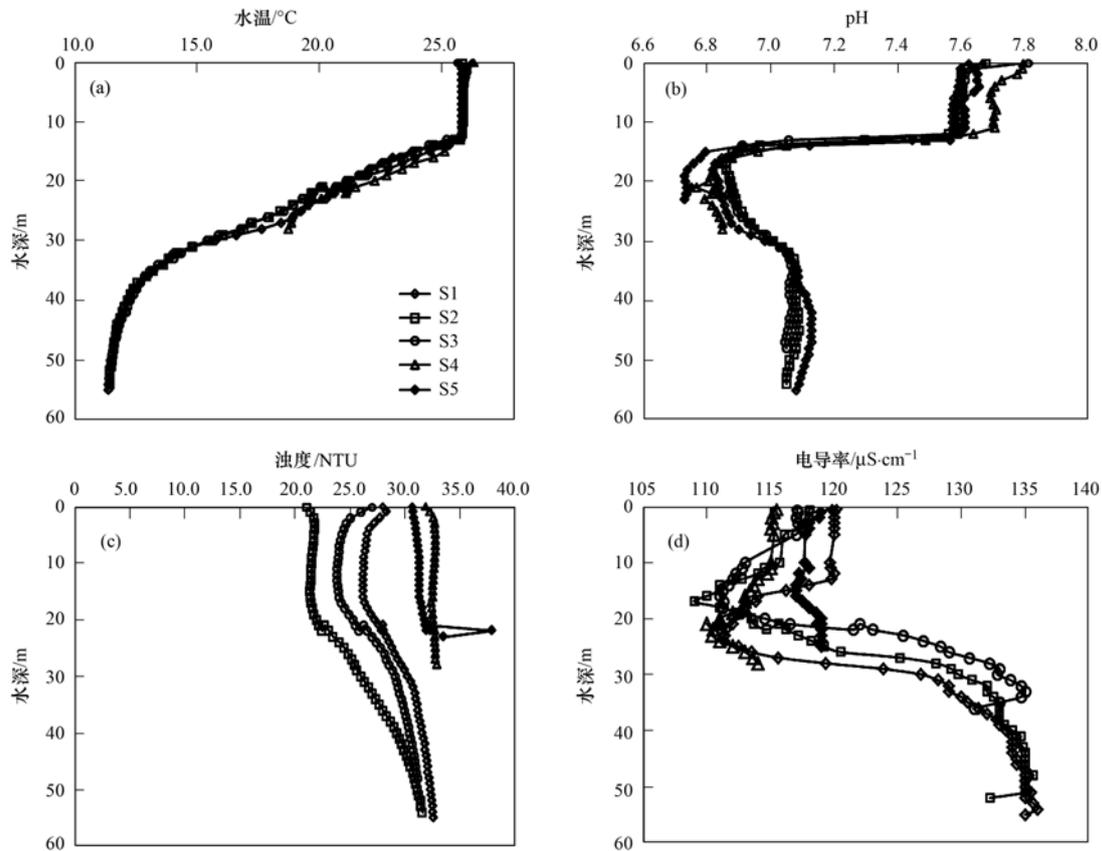


图3 千岛湖湖泊区理化因子垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of physical and chemical factors in Thousand-island Lake

m 为 $111.30 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; 24 m 之后开始沿水深逐渐增加. S4 与 S5 断面电导率垂向变化稍小, 在 0 ~ 12 m 内无明显变化. S4 断面在 12 m 之后至底层沿水深逐渐递减, S5 断面在 12 ~ 20 m 出现先减小后增大的变化, 最终表底无差异.

2.3 叶绿素 a 与浮游植物密度垂向分布

湖泊区各点浮游植物总密度与叶绿素 a 垂向分布如图 4, 水柱内浮游植物表、中、底平均密度分别为 156.10×10^4 、 262.30×10^4 、 $161.90 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$, 密度范围在 $72.50 \times 10^4 \sim 377.30 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. 水柱内浮游植物分层明显, S1、S2、S3 这 3 个点[图 4(a)、4(b)和 4(c)]呈现中层区域密度 > 表层区域 > 底层区域, S4、S5[图 4(d)和 4(e)]则是底层 > 表层 > 中层; 可以发现浮游植物密度最大区域均在 20 ~ 30 m 水深位置. 各点水柱内叶绿素 a 分布完全受浮游植物密度影响, 垂向分布与总密度规律一致.

2.4 浮游植物群落垂向分布

千岛湖湖泊区共鉴定出 5 门 34 属. 各藻门所占比例在不同监测断面垂向分布上差异较小, 以硅藻门(Bacillariophyceae)为主[如图 5(a)]; 总计检

测出 13 属, 在表、中、底各层所占比重为 56%. 绿藻门(Chlorophyta) 13 属次之, 约占总数的 30%; 蓝藻门(Cyanophyta) 6 属, 约占总数的 10%; 裸藻(Euglena)与隐藻(Cryptophyta)合计占 4% 左右. 监测区水柱内不同水深藻属生物量无明显差异[图 5(b)], 主要优势藻属有卵形藻(*Cocconeis*)、脆杆藻(*Fragilaria*)、色球藻(*Chroococcus*)、直链藻(*Melosira*)、小环藻(*Cyclotella*)、衣藻(*Chlamydomonas*), 占总数的 70% ~ 80%. 表层脆杆藻(*Fragilaria*)、卵形藻(*Cocconeis*)生物量小于中、底层, 衣藻(*Chlamydomonas*)、小环藻(*Cyclotella*)则大于中、底层, 而色球藻(*Chroococcus*)、直链藻(*Melosira*)在水柱内各层分布较均匀. 温度可能是影响不同藻种在不同水深分布的重要因素^[26], 表层水温在 25°C 左右, 适宜以小环藻、衣藻为主的绿藻生长^[27]. 硅藻适宜在 13 ~ 25°C 水温中生长^[28], 因此脆杆藻, 卵形藻在中层水深偏冷环境中生长较好^[29].

2.5 各理化因子相关性分析

千岛湖湖泊区浮游植物垂向分布与各理化因子相关性分析如表 1. 浮游植物生物量与 DO、pH 呈

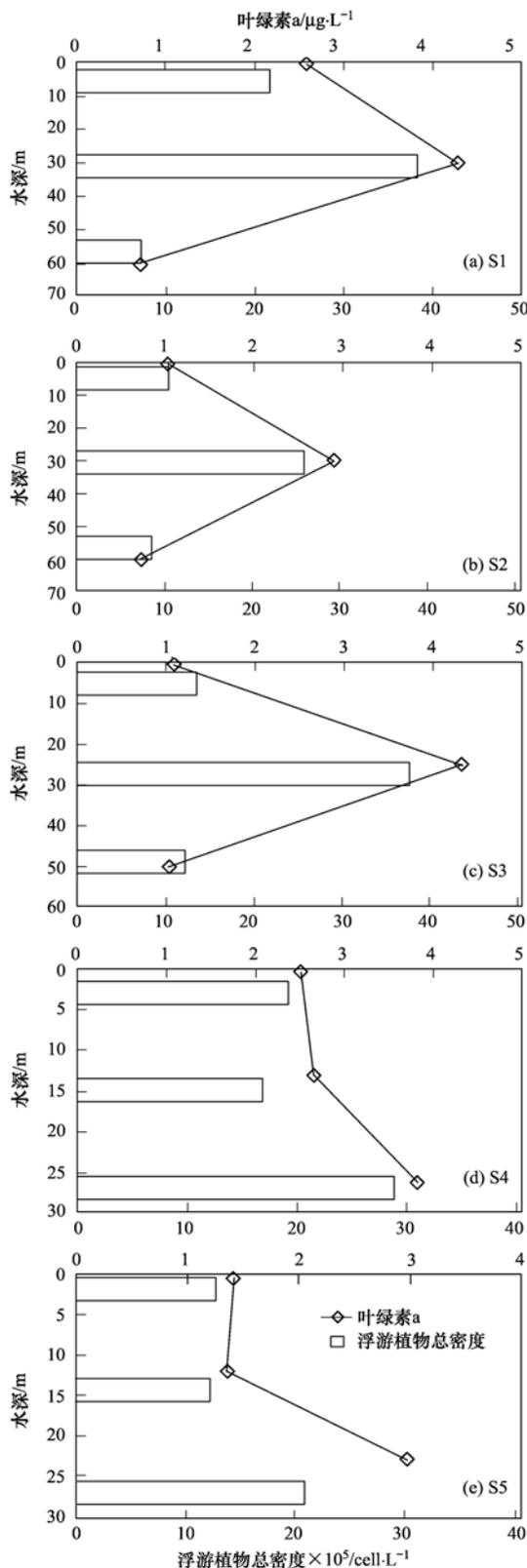


图4 千岛湖湖泊区浮游植物总密度及叶绿素 a 垂向分布
Fig. 4 Vertical distribution of phytoplankton density and chlorophyll a in Thousand-island Lake

负相关, 相关系数分别为 0.554、0.515 ($P < 0.001$)。由于湖泊区各监测点混合层很大, 浮游植

物在 0~20 m 内光合作用无法抵消呼吸作用, 致使水体溶解氧降低; 呼吸作用释放大量 CO_2 使得水体 pH 减小。在 20~38 m 内浮游生物数量减小, 水体中的溶解氧与 pH 逐渐恢复到正常水平。38 m 之后溶解氧与 pH 主要受水深影响而减小。水温是影响藻类生长的重要因素之一^[30,31], 但湖泊区水柱内以硅藻为主要优势藻种, 垂向水温在 12~25°C, 非常适宜硅藻的生长, 因此水柱内水温对藻类生物量在垂向分布无明显影响, 相关性也不明显。浮游植物生物量与浊度相关关系也不显著。

3 讨论

3.1 千岛湖湖泊区低氧成因分析

湖库中表层水体溶解氧主要来源于空气中氧气的溶解及浮游植物的光合作用, 而深水区的溶解氧主要是通过水体的垂直对流扩散获得。千岛湖湖泊区内溶解氧垂向存在明显分层现象, 表层 0~12 m 内溶解氧含量趋于饱和; 该区域水体属于同温层 (即混合层) 内, 水体掺混完全, 各物质与浮游生物均匀分布。水体中溶解氧浓度较高, 其主要来源于空气中的氧气溶解及浮游植物光合作用。溶解氧在 12 m 之后出现突变减小, 形成将近 14 m 的低氧分层区。在 20~38 m 水深区域内水温温跃梯度减小, 且该区域内浮游动物等好氧生物生物量减小, 溶解氧消耗量减小, 水体溶解氧浓度逐渐增加至正常状态。38 m 之后溶解氧因水深增加而自然下降。在 12~20 m 区域内衰减明显, 主要原因如下。

(1) 千岛湖湖泊区溶解氧与水温在温跃层内存在显著相关关系, 相关性系数为 0.647 ($P < 0.001$); 水温突变形成的热力分层, 是引起溶解氧突变减小的主要物理因子^[32~35]。在淡水中不同温度对应的溶解氧浓度计算公式为^[36]:

$$c(\text{DO}) = 477.8 / (T + 32.26) \quad (1)$$

式中, $c(\text{DO})$ 表示溶解氧浓度; T 表示水温。如图 6 理论模型所示, 在无水温分层影响下, 理论溶解氧变化应沿垂向上逐渐递增趋势。而千岛湖湖泊区 12~20 m 水深区域水温出现突变巨减, 温跃深度超过 30 m, 平均温跃梯度为 $0.46 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 。高梯度的水温分层阻碍了上下水团交换, 表层溶解氧无法向下层输移, 造成区域内溶解氧不断减小。这与杨丽娜^[37] 对大辽河溶解氧的研究规律完全吻合。Foley 等^[38] 对英国某湖泊研究与 Yin 等^[39] 对珠江口研究均表明温度分层是底层缺氧的主导因素。同时千岛湖湖泊区内高锰酸盐指数平均值为 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其耗氧

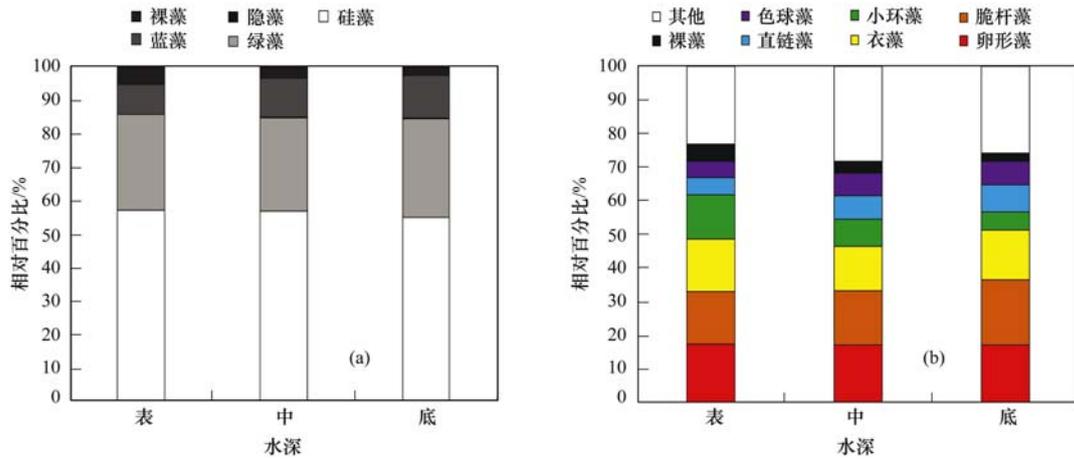


图5 千岛湖湖泊区浮游植物群落垂直向分布及主要优势藻属

Fig. 5 Vertical distribution of phytoplankton community and the main dominant algae in Thousand-island Lake

表1 浮游植物生物量与溶解氧、水温、pH、浊度、叶绿素 a 的相关关系¹⁾

Table 1 Correlation of phytoplankton biomass with dissolved oxygen, temperature, pH, turbidity and chlorophyll a

	叶绿素 a	浮游植物生物量	溶解氧	水温	pH	浊度
叶绿素 a	1					
浮游植物生物量	0.964 **	1				
溶解氧	-0.639 *	-0.554 *	1			
水温	0.313	0.307	0.647 **	1		
pH	-0.502	-0.515 *	0.859 **	0.556 *	1	
浊度	0.55	-0.104	-0.312	-0.432	-0.211	1

1) * 为双侧检验在 0.05 水平上显著相关, ** 为双侧检验在 0.01 水平上显著相关

作用主要发生在氧化分解. 12 ~ 20 m 水深区域水温的突变造成区域内富集的还原性物质及营养盐无法向上迁移, 这些物质在分解过程中耗氧远超过复氧, 区域内水体会逐渐发展为缺氧状态^[33, 34]. Boehrer 等^[40] 对世界不同类型湖泊进行分析时发现: “温跃层” 出现时水体产生密度差, 有机物质与无机物质均会在对应密度的水深积累, 这些物质被分解时需要消耗大量的氧. 王雨春等^[41] 对百花湖水研究发现水体分层限制上下水团在垂直交替过程中耗氧和复氧机制不平衡会引起水体缺氧.

(2) 千岛湖湖泊区水柱内溶解氧与浮游植物密度相关性系数为 0.554 ($P < 0.05$), 呈现负相关关系. 浮游植物生物量直接影响水体中溶解氧的含量^[42]. 杨正健^[43] 对三峡库区浮游植物的研究中发现浮游植物在真光层内光合作用大于呼吸作用, 真光层深度以下时呼吸作用大于光合作用, 浮游植物光合作用难以抵消其呼吸作用^[44], 浮游植物生物量增长受限制. 千岛湖湖泊区内真光层平均深度为 13.5 m, 12 ~ 20 m 水深内 Chl-a 平均质量浓度由 2.47 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 减小至 1.08 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浮游植物生物量衰减明显, 该区域水体中营养充分但光照不足, 限制

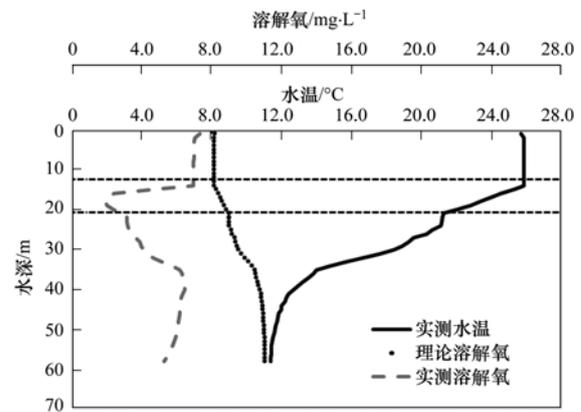


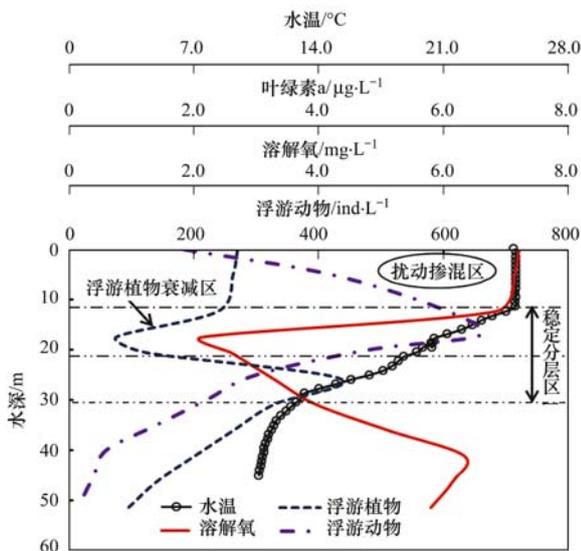
图6 理论溶解氧垂直分布与实际分布对比

Fig. 6 Theoretical vertical distribution and actual distribution of dissolved oxygen

了水体的浮游植物生长和初级生产力^[35], 从而浮游植物呼吸作用强于光合作用, 消耗大量 O_2 , 释放出 CO_2 . 同时从图 7 中可以发现 12 ~ 20 m 内浮游植物生物量衰减明显, 死亡后的浮游植物在被微生物分解过程中同样需要消耗大量氧气.

(3) 浮游动物垂直分布规律也是引起溶解氧剧变的一个重要因素. Boehrer 等^[40] 研究发现浮游生物在温跃层为了寻找充足的营养物质而迁移到对应

的梯度营养区. 如图 7, 千岛湖湖泊区浮游动物为获得充足食物在 12 ~ 20 m 内浮游动物大量栖息, 浮游动物只进行呼吸作用, 消耗大量溶解氧; 同时捕食大量的浮游植物, 致使浮游植物生物量减小, 光合作用产氧也减少. 杨丽丽^[45]对千岛湖浮游动物研究发现夏季浮游动物分布对溶解氧浓度有重要影响. 千岛湖湖泊区白天浮游动物主要分布于 10 ~ 21 m (97.87%)^[46, 47], 生物量高达为 720 个·L⁻¹^[48]. 高密度的浮游动物聚集会消耗水体中大量的氧气, 致使监测区水柱内 12 ~ 20 m 水深处溶解氧剧减.



浮游动物数据文献^[45], 浮游植物垂向分布特征选用 Chl-a 为代表

图 7 千岛湖湖泊区溶解氧与相关因子垂向分布模型

Fig. 7 Vertical distribution model diagram of DO and related factors in Thousand-island Lake

综合分析千岛湖湖泊区溶解氧垂向浓度波动范围在 1.95 ~ 8.25 mg·L⁻¹ 之间, 平均浓度为 5.10 mg·L⁻¹. 低氧区出现在 12 ~ 20 m 水深, 最小值在 17 m 为 1.95 mg·L⁻¹. 通过分析各环境因子可知, 如图 7 所示, 溶解氧垂向变化主要受物理、化学和生物等共同控制, 因此可以从水温分层、有机污染物和浮游生物活动等方面综合探讨低氧的形成. 表层溶解氧浓度高, 主要来自浮游植物光合作用与空气复氧. 12 ~ 20 m 因溶解氧巨减形成低氧区, 分析各监测点 (S1 ~ S5) pH 与溶解氧发现, 其分布规律在完全一致可知 [图 2 与图 3 (b)], pH 的剧变也是引起溶解氧剧变的一个重要因素. 水体一般本身具有氧化-还原性质^[42, 49], 其氧化-还原过程为: O_2 (气) + $4H^+$ + $4e \rightleftharpoons 2H_2O$ (液)^[50]. pH 值降低, 说明 H^+ 的活动增大促进水的氧化还原反应向正反应

方向进行, 则 H^+ 与 O_2 反应生成水, 使溶解氧降低. 监测发现低氧区高锰酸盐指数较高, 表明有机物在分解过程中消耗的大量氧气是造成区域内溶解氧衰减过快的重要因素. 除此之外低氧区内溶解氧与水温呈现显著正相关关系. 该结果表明溶解氧受水温分层影响明显, 水温分层决定了垂向水动力交换条件, 水温降低会导致温、密跃层的形成, 致使上下层水体垂向交换受限制, 溶解氧无法由上次输移至下层水体, 低氧区水体溶解氧被不断消耗的同时得不到新的补充. 低氧区内溶解氧与浮游植物生物量呈现显著相关, 该结果表明浮游植物生物量的减少, 水体光合作用产氧减弱. 区域内浮游植物呼吸作用大于光合作用, 其自身生存需要消耗氧气的同时死亡后残骸的分解过程同样需要消耗大量溶解氧. 根据“双峰效应”的滞后性, 表层浮游植物充足, 浮游动物随之繁盛并随着表层水体掺混至水温分层区聚集, 在稳定分层区消耗大量溶解氧, 造成低氧区溶解氧进一步衰减. 综上所述, 水体垂向层化作用等物理过程以及浮游生物的活动直接或间接决定了千岛湖湖泊区低氧区的范围与程度.

3.2 浮游植物垂向分布规律分析

千岛湖夏季 S1 ~ S3 监测点水柱内浮游植物总生物量呈现中层 > 表层 > 底层; S4 ~ S5 点底层 > 表层 > 中层. 0 ~ 12 m 浮游植物在混合层深度内, 表层水体虽然营养 (总氮平均 1.41 mg·L⁻¹; 总磷平均 0.03 mg·L⁻¹) 与光照均充足, 但是水柱内混合层深度达到 11.5 m, 混合层内水体垂向紊动, 各物质垂向交换频繁, 浮游植物无法稳定停留在某一水深内进行光合作用, 减弱了其有效光合作用强度, 致使净初级生产力较小^[51]; 从而抑制了浮游植物的生长. 在 12 ~ 20 m 区域水温分层开始出现, 水温突变巨减影响了浮游植物体内酶的活性^[31]; 浮游植物光合作用减弱, 从而导致不适宜此低温的暖水性浮游植物生物量^[52]在温跃层内剧减 (图 7). 在温跃层内热力分层一方面对浮游植物垂向分布形成屏蔽作用, 阻碍了其垂向迁移; 另一方面造成营养物质垂向交换减弱, 形成区域内光照充足而营养物质匮乏的情况^[35], 浮游植物生物量会因缺少营养物质而大量死亡. 同时浮游植物生物量还受到溶解氧的限制影响, Chapman 等^[53]指出当水体中溶解氧低于 4 mg·L⁻¹ 时会对浮游生物生长产生抑制作用. 12 ~ 20 m 内溶解氧突变减小, 浮游植物在区域内处于缺氧状态而无法正常工作. 浮游动物在 12 m 水深生物量达到最大也是影响浮游植物在 12 ~ 20 m 内减少

的重要因素,浮游动物在该水深内大量捕食,造成溶解氧迅速衰减的同时浮游植物生物量减少明显。

浮游植物生物量最大出现在 20~30 m 区域内(S1~S3 断面中层,S4~S5 底层),主要因为该水深内浮游动物生物量减少,浮游植物被捕食量减少;同时,该区域水体稳定,浮游植物可以稳定接受光照,光合作用效率增加;因此水体中浮游植物生物量明显增加。新安江水电站取水口位于水下 25 m 左右(正常高水位 108 m,取水口高程 73 m^[54]),大坝取水时水体横向交换作用加强,较远区域表层部分浮游植物被带入该水深区内(藻类具有悬浮生长及随流输移的特性^[55])。电导率[图 3(d)]在 20~30 m 区域出现突变,也证明了该区域水体(20~30 m 水深水体)存在横向水体交换。S1、S2、S3 各点底层生物量较小,主要因在深水区,底部缺少光照,浮游植物进行光合作用效率微弱,因此生物量较小。

4 结论

(1) 千岛湖湖泊区水温、溶解氧、pH 呈现明显分层状态,在 0~12 m 各指标无明显变化,12 m 之后出现温跃层。水柱内水温呈现“表层高底层低”状态,表底温差达为 14.3℃。千岛湖湖泊区溶解氧垂向波动范围在 1.95~8.25 mg·L⁻¹ 之间,平均浓度为 5.1 mg·L⁻¹。低氧区出现在 12~20 m 水深,最小值在 17 m 为 1.95 mg·L⁻¹。溶解氧与 pH 垂向分布规律一致,在温跃层变化较大,出现明显的突变减小。水体垂向层化作用等物理过程以及浮游生物的活动直接或间接决定了千岛湖湖泊区低氧区的范围与程度。pH 垂向分布主要受浮游植物在不同水深光合作用与呼吸作用强弱的影响。

(2) 湖泊区内浮游植物共鉴定出 5 门 34 属,硅藻门(Bacillariophyceae)为主要优势藻种。通过分析发现浮游植物生物量与溶解氧、pH 相关性显著。浮游植物垂向上生物量差异明显,S1、S2、S3 这 3 个点浮游植物生物量呈现中层>表层>底层,S4、S5 两点浮游植物生物量底层>表层>中层,水柱内浮游植物在 20~30 m 区域生物量最高。表层主要因水体垂向掺混,在混合层内生长受限制,以及在中层受浮游动物捕食与水体缺氧的影响;在 30 m 以后主要受光限制影响。

参考文献:

- [1] 王成善,胡修棉,李祥辉. 古海洋溶解氧与缺氧和富氧问题研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, **19**(3): 39-47.
Wang C S, Hu X M, Li X H. Dissolved oxygen in palaeo-ocean: anoxic events and high-oxic problems[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, **19**(3): 39-47.
- [2] Neal C, House W A, Jarvie H P, et al. The water quality of the River Dun and the Kennet and Avon Canal[J]. Journal of Hydrology, 2006, **330**(1-2): 155-170.
- [3] Engle V D, Summers J K, Macauley J M. Dissolved oxygen conditions in northern Gulf of Mexico estuaries[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1999, **57**(1): 1-20.
- [4] 张运林. 气候变暖对湖泊热力及溶解氧分层影响研究进展[J]. 水科学进展, 2015, **26**(1): 130-139.
Zhang Y L. Effect of climate warming on lake thermal and dissolved oxygen stratifications: a review[J]. Advances in Water Science, 2015, **26**(1): 130-139.
- [5] 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**(S1): 65-66.
- [6] 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.
Zhang Y Y, Zhang J, Wu Y, et al. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze Estuary[J]. Environmental Science, 2007, **28**(8): 1649-1654.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张运林,陈伟民,杨顶田,等. 天目湖 2001~2002 年环境调查及富营养化评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(1): 99-103.
Zhang Y L, Chen W M, Yang D T, et al. Main physical and chemical factors in Tianmuhu lake, with evaluation of eutrophication from 2001 to 2002 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, **14**(1): 99-103.
- [10] 邹建军,杨刚,刘季花,等. 长江口邻近海域九月溶解氧的分布特征[J]. 海洋科学进展, 2008, **26**(1): 65-73.
Zou J J, Yang G, Liu J H, et al. Distribution characteristics of dissolved oxygen in the sea area adjacent to the changjiang river estuary in september[J]. Advances in Marine Science, 2008, **26**(1): 65-73.
- [11] 李艳云,王作敏. 大辽河口和辽东湾海域水质溶解氧与 COD、无机氮、磷及初级生产力的关系[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(3): 70-72.
Li Y Y, Wang Z M. The relation among dissolution oxygen(DO) to COD, inorganic nitrogen, reactive phosphate and primary Yield-power in the Liaodong gulf and seaport of daliiaohe[J]. Environmental Monitoring in China, 2006, **22**(3): 70-72.
- [12] 黄震,余静. 长江芜湖段水体中溶解氧现状及其影响因素[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2005, **28**(3): 348-351.
Huang Z, Yu J. The dissolved oxygen in water and influencing

- factors in the section of Changjiang of Wuhu [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2005, **28**(3): 348-351.
- [13] 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.
- Luo X B, Wen J, Luo D Q, *et al.* Changing characteristic and trend analysis of water quality of Qiandao Lake [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, **14**(4): 208-212.
- [14] 余员龙. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布格局及其与主要环境因子的关系[D]. 上海: 上海海洋大学, 2010.
- Yu Y L. Spatial and temporal distribution of the phytoplankton community of lake Qiandao and its relationship with the main environmental factors [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2010.
- [15] 韩晓霞, 朱广伟, 吴志旭, 等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 836-845.
- Han X X, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Spatial-temporal variations of water quality parameters in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) and the water protection strategy [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 836-845.
- [16] 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**(S1): 49-53.
- Chen D, Zhang L X, Liu H Q, *et al.* Distribution characteristics and correlating factors analysis of dissolved oxygen in spring and summer in the Yangtze Estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, **27**(S1): 49-53.
- [17] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [18] 朱梦娟. 梁子湖浮游植物群落结构及其与水环境理化因子的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Zhu M J. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Liangzihu lake [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [19] 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 Z X, Liu M L, Lan J, *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 Sciences*, 2012, **24**(3): 460-465.
- [20] 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, 2002.
- [21] 胡鸿, 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.
- [22] Monterey G 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.
- [23] 李媛, 刘德富, 孔松, 等. 三峡水库蓄泄水过程对香溪河库湾水华影响的对比分析[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(8): 1882-1893.
- Li Y, Liu D F, Kong S, *et al.* Comparative analysis of the impact of discharging and impounding process of Three Gorges Reservoir on the algal bloom in the Xiangxi Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(8): 1882-1893.
- [24] Reinart A, Arst H, Erm A, *et al.* Optical and biological properties of Lake ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: light climate in Lake ülemiste [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2001, **6**(1): 75-84.
- [25] 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 C Y, Yu Z M, Wu Z X, *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of lake Qiandao [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2574-2581.
- [26] 盛海燕, 虞左明, 韩轶才, 等. 亚热带大型河流型水库——富春江水库浮游植物群落及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(2): 235-243.
- Sheng H Y, Yu Z M, Han Y C, *et al.* Phytoplankton community and its relationship with environmental factors of a large riverine reservoir, Fuchunjiang Reservoir in subtropical China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(2): 235-243.
- [27] 曾艳艺, 黄翔鸽. 温度、光照对小环藻生长和叶绿素 a 含量的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2007, **27**(6): 36-40.
- Zeng Y Y, Huang X H. Effects of temperature and illumination on growth and Chlorophyll-a of *cyclotella* sp [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2007, **27**(6): 36-40.
- [28] 代玲玲. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- Dai L L. Study on eutrophication algal characters and environmental factors effect of three Gorge Reservoir [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [29] 石英, 童国榜, 王苏民, 等. 云南鹤庆盆地晚第四纪硅藻植物群与环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, **18**(4): 79-86.
- Shi Y, Tong G B, Wang S M, *et al.* Late quaternary diatom community and environment changes in Heqing basin, Yunnan Province [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, **18**(4): 79-86.
- [30] Raven J A, Geider R J. Temperature and algal growth [J]. *New Phytologist*, 1988, **110**(4): 441-461.
- [31] Eppley R W. Temperature and phytoplankton growth in the sea [J]. *Fishery Bulletin*, 1972, **70**(4): 1063-1085.
- [32] 夏品华, 李秋华, 林陶, 等. 贵州高原百花湖水库湖沼学变量特征及环境效应[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(8): 1660-1669.
- Xia P H, Li Q H, Lin T, *et al.* Limnological characteristics and environmental effects of the Baihua Reservoir in GuiZhou plateau, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1660-1669.
- [33] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1477-1485.
- Xia P H, Lin T, Li C X, *et al.* Features of the water column stratification and the response of water quality of Hongfeng Reservoir in Guizhou, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, **31**(9): 1477-1485.

- [34] 邱华北, 商立海, 李秋华, 等. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 1039-1044.
Qiu H B, Shang L H, Li Q H, *et al.* Impacts of seasonal thermal stratification on the water environment of Wanfeng lake [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(5): 1039-1044.
- [35] 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.
He J B. Vertical characteristics of water temperature, dissolved oxygen and Chlorophyll a in Qiandaohu lake [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [36] 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 waters [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, **12**(2): 54-55.
- [37] 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 L N, Li Z Y, Zhang X Q. Distribution characteristics of dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in the upper estuarine zone of the Daliaohe River [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 51-57.
- [38] Foley B, Jones I D, Maberly S C, *et al.* Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication [J]. Freshwater Biology, 2012, **57**(2): 278-289.
- [39] Yin K D, 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.
- [40] Boehrer B, Schultze M. Stratification of lakes [J]. Reviews of Geophysics, 2008, **46**(2): RG2005.
- [41] 王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 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, 2005, **17**(1): 54-60.
Wang Y C, Zhu J, Ma M, *et al.* Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a Canyon · Reser · voir, Southwestern China [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, **17**(1): 54-60.
- [42] 游亮, 崔莉凤, 刘载文, 等. 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, 2007, **30**(9): 42-44.
You L, Cui L F, Liu Z W, *et al.* Correlation analysis of parameters in algal growth [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **30**(9): 42-44.
- [43] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流华生消机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
Yang Z J. The mechanisms of algal blooms and its operation method through water level fluctuation under the situation of the bidirectional density currents in tributaries of the Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [44] Kalf J. 湖沼学-内陆水生态系统[M]. 古滨河, 刘正文, 李宽意, 译. 北京: 高等教育出版社, 2011.
Kalf J. Limnology-Inland water ecosystems [M]. Gu B H, Liu Z W, Li K Y, Trans. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [45] 杨丽丽. 千岛湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
Yang L L. Zooplankton community structure and its relation to environment factors in Qiandao Lake [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [46] 朱爱娇, 姚建良, 薛俊增. 千岛湖蚤状溞垂直分布格局及其季节与昼夜变化[J]. 海洋湖沼通报, 2007, (4): 120-128.
Zhu A J, Yao J L, Xue J Z. The variation of the seasonal and diel vertical distribution of daphnia pulex in lake Qiandao [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, (4): 120-128.
- [47] 王先云, 王丽卿, 盖建军, 等. 千岛湖浮游甲壳动物垂直分布与昼夜垂直移动[J]. 动物学杂志, 2010, **45**(5): 95-104.
Wang X Y, Wang L Q, Gai J J, *et al.* Vertical distribution and diel vertical migration of planktonic crustaceans in Qiandao Lake [J]. Chinese Journal of Zoology, 2010, **45**(5): 95-104.
- [48] 李共国, 虞左明. 浙江千岛湖浮游动物群落多样性研究[J]. 生物多样性, 2001, **9**(2): 115-121.
Li G G, Yu Z M. A study on the diversity of a zooplankton community in Lake Qiandaohu, Zhejiang [J]. Biodiversity Science, 2001, **9**(2): 115-121.
- [49] 王庆安, 黄时达, 孙铁珩. 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, 2001, **20**(2): 4-7, 29.
Wang Q A, Huang S D, Sun T H. Study on the coordinate periodic change and the relativity between pH and DO in Shallow Water with algae [J]. Environment of Sichuan, 2001, **20**(2): 4-7, 29.
- [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 I: 养殖水体[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(6): 1201-1208.
Huang S L, Zang C J, Du S L, *et al.* Study on the relationships among pH, dissolved oxygen and chlorophyll a I: aquaculture water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(6): 1201-1208.
- [51] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3049-3056.
Chen Y, Yang Z J, Huang Y L, *et al.* Research on the influence of mixing layer depth on algal growth [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- [52] 杨东方, 高振会, 王培刚, 等. 营养盐 Si 和水温影响浮游植物的机制[J]. 海洋环境科学, 2006, **25**(1): 1-6.
Yang D F, Gao Z H, Wang P G, *et al.* Mechanism of effect of nutrient silicon and water temperature on phytoplankton [J]. Marine Environmental Science, 2006, **25**(1): 1-6.
- [53] Chapman D V. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring [M]. 2nd ed. Melbourne Madras: Chapman & Hall, 1996.
- [54] 王瑞巧, 陆宝宏, 王春燕, 等. 新安江水库冬季水温分布结构及规律初探[A]. 见: 第五届中国水论坛论文集[C]. 南京: 中国水利学会, 中国自然资源学会, 2007. 377-382.
- [55] 田泽斌, 刘德富, 姚绪姣, 等. 水温分层对香溪水库湾浮游植物功能群季节演替的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(5): 700-707.
Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton function grouping in Xiangxi Bay [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(5): 700-707.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohé River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₂ ⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)