ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第4期
2017年4月15日

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 PM_{10} 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 NH_4^+、NO_3^-、SO_4^{2-} 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,常淼(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)
过渡金属掺杂对镧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,李淼,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-C_3N_4 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 CH_4 厌氧去除特性 …… 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)
应用铅锶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)
畜禽粪便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,丁咸庆,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 N_2O 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)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响 …… 杨雨洽,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 …… 迟荪琳,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汞的影响 …… 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)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征

王琳杰[1],余辉[1*],牛勇[1],牛远[1],张有林[2],刘倩[1], 吉正元[3]
(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地,北京 100012; 2. 玉溪市抚仙湖生态环境保护工程管理中心,玉溪 653199; 3. 玉溪市环境监测站,玉溪 653100)

摘要: 为探究高原深水湖泊抚仙湖夏季热分层时期水温水质空间特征及昼间变化规律,于 2014 年 7 月在抚仙湖南部、中部及北部各选取一个代表点位,开展了各点分层采样及北部点位昼间连续分层采样调查观测. 结果表明:①抚仙湖夏季水温分布具有明显的深水湖泊成层期温度分布特征,表面至水深 15 m 为变温层,水温变幅 25.51 ~ 22.81℃, 15 ~ 40 m 为温跃层,水温变幅 22.81 ~ 14.72℃, 40 m 以下为等温层,水温变幅 14.72 ~ 13.70℃. 湖体表层与湖底层的最大温差为 11.8℃,与温带湖泊同期相比温差较小,而湖底等温层水温为 14℃左右,较温带湖泊为高,体现了抚仙湖高原深水湖泊自身的水温成层特征. ②水温成层决定了湖体的化学成层与生态成层特征:pH、溶解氧(DO)及电导率均呈现出与水温分布相同的分层结构,值得关注的是湖底层 DO 浓度低至 2 ~ 3 mg·L^{-1},作为贫营养湖泊,抚仙湖底层开始出现溶解氧偏低的现象昭示着其可能面临潜在的生态风险;总磷(TP)及总氮(TN)由于温跃层的阻隔,等温层呈现一定程度的营养盐累积效应;叶绿素 a 与高锰酸盐指数也均与水温分层存在对应的响应关系,在湖体上层出现最大值. ③抚仙湖热分层时期,水温分层存在昼间变化,中午光照辐射增强导致温跃层下潜,强度变大,厚度变窄,显著影响变温层和温跃层的 pH、DO、电导率及叶绿素 a 等动态分布,TP、TN 及高锰酸盐指数的昼间变化规律不显著.

关键词:抚仙湖;深水湖泊;水温成层;温跃层;垂向分布
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)04-1384-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201607165

Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer

WANG Lin-jie[1], YU Hui[1*], NIU Yong[1], NIU Yuan[1], ZHANG You-lin[2], LIU Qian[1], JI Zheng-yuan[3]
(1. Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Fuxian Lake Administration of Yuxi Municipality, Yuxi 653199, China; 3. Environmental Monitoring Station of Yuxi, Yuxi 653100, China)

Abstract: In order to explore the distribution characteristics and change rule in daytime of the water temperature and water quality of the deep plateau lake Fuxian Lake during the thermal stratification period in summer, a typical point location was selected respectively in the south, middle and north of Fuxian Lake in July 2014 to carry out investigation and observation after stratified sampling at each point location and continuous stratified sampling of the point location in the north during daytime. The result showed that ①The distribution of water temperature of Fuxian Lake in summer had the temperature distribution characteristics of deep lake during stratification period. The segment from the surface to a depth of 15 meters was epilimnion with a range of 25.51-22.81℃. The segment from the depth of 15m to 40m was thermocline with a range of 22.81-14.72℃. The segment below 40m was hypolimnion with a range of 14.72-13.70℃. The max temperature difference between the surface and the lakebed was 11.8℃, which was smaller than that of lakes in temperate zone during the same period. The temperature of the lakebed was about 14℃ which was higher than that of the lakes in temperate zone, which reflected the characteristics of water temperature stratification of the deep plateau lake Fuxian Lake; ② The water temperature stratification determined the characteristics of chemical stratification and the ecological stratification: the pH, DO and conductivity presented the same layered structure as the distribution of water temperature. What is noteworthy was that the DO concentration of the lakebed was as low as 2-3 mg·L^{-1}. As an oligotrophic lake, the DO became lower and lower at the lakebed of Fuxian Lake, which indicated that it possibly faced ecological risks. Due to the separation of thermocline, the nutritive salt accumulative effect appeared in the hypolimnion. Chlorophyll a and permanganate index had a corresponding response relation with the water temperature stratification and showed the max value at the upper layer of the lake. ③ During the thermal stratification period, the water temperature stratification of Fuxian Lake had a change during daytime. The increased thermal radiation in the noon caused the thermocline to dive, the strength to increase and the depth to narrow, which significantly influenced the dynamic distribution of pH, DO, conductivity and chlorophyll a of the epilimnion and the thermocline. The change rule of TP, TN and permanganate index during the daytime was not significant.

Key words: Fuxian Lake; deep lake; water temperature stratification; thermocline; vertical distribution

收稿日期: 2016-07-25; **修订日期**: 2016-11-17
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-001);深水贫营养湖泊抚仙湖水环境特征研究项目
作者简介: 王琳杰(1989 ~),女,硕士,工程师,主要研究方向为湖泊生态修复,E-mail:linjierr@163.com
* 通信作者,E-mail:yuhui@creas.org.cn

受到季节变化而产生水温分层，这是深水型湖泊较于浅水型湖泊的一个重要特征. 在高温季节，深水湖泊上层湖体由于受到较强的来自大气及太阳辐射的物质和能量交换，致使湖体上下层产生温差. 温差导致了水密度的不同，进而导致垂向剖面水温结构自上而下形成变温层、温跃层和等温层[1]，呈现出季节性分层现象. 温跃层的静力稳定度较大，可阻碍上下层水体物质的混合交换，加之水的所有理化特性几乎都与水温有关[2]，因此水温分层对水体的 pH、溶解氧、营养盐及浮游植物的垂向分布会产生重大影响[3~5].

抚仙湖位于云南省东部，跨澄江、江川、华宁三县，属珠江流域南盘江水系，水资源蕴藏丰富，湖泊储水量位于全国的第 3 位，占全国淡水湖泊蓄水量的 9.16%[6,7]，最大水深 157.3 m，平均水深 87 m，是我国最大的深水型淡水湖泊，同时也是著名的高原深水断陷型湖泊. 抚仙湖湖体容量大，生态价值显著，对地区乃至全国的经济、社会发展起着重要的支撑作用，开展针对以抚仙湖为代表的相关研究对于加深对高原深水湖泊的认识具有重要的意义. 玉溪市监测站对抚仙湖水质的例行监测已持续进行了 30 多年，监测结果显示抚仙湖目前水质仍维持在Ⅰ类，但遗憾的是，例行监测获取的结果反映的大多只是表层区域(0 ~ 15 m)的水质情况，对于湖泊水体垂向分层的研究则较少涉及.

为了掌握抚仙湖夏季热分层期间水温分层的特征、水体理化性质与水温分层的响应关系，以及水温和水质分层的昼间变化特征，项目组于 2014 年 7 月在抚仙湖南部、中部以及北部各设置一个点位进行水体分层采样调查，并于昼间在北部采样点开展了连续 9 h 的分层调查监测. 本研究在此调查基础上，以抚仙湖夏季热分层时期水体各理化参数成层与水温成层之间的关系为研究内容，探讨水温水质空间特征及其昼间变化规律，揭示抚仙湖夏季热分层时期的水环境特征，以期为保护抚仙湖水生态安全提供科学依据，并为暖温带高原深水湖泊的进一步研究提供科学参考.

1　材料与方法

1.1　调查内容

2014 年 7 月底在抚仙湖开展了垂向水体分层采样调查. 根据抚仙湖的基本形状，选择的 3 个点位分别是抚仙湖的南部 S 点(位置：东经 102.851 33°，北纬24.409 93°)、中部 M 点(位置：东经102.885 03°，北纬24.494 51°)以及北部 N 点(位置：东经102.857 68°，北纬24.561 90°)，采样点位示意如图 1 所示. 在 S、M 和 N 点分别进行一次垂向水体分层采样，并定点北部的 N 点，开展昼间 9 h 的连续分层采样观测，于 08:00、11:00、14:00 和 17:00每间隔 3 h 进行一次垂向水体分层采样，共连续采集 4 次，采样现场情况见表 1. 使用 5 L 容量的 Schindler 采水器采集水样，由于变温层和温跃层水温变化较大，而深水层水温变化较小，所以从表层开始到 50 m 的位置每间隔 5 m 采集一个水样，50 m 以下每间隔 10 m 采集一个水样，分层采样示意图如图 2 所示(以 S 点为例). S、M 及 N 点的水深分别为 77、107 和 135 m，3 个点位每次采样采集样品数分别为 13、16 和 18 个. 其中水温、pH、溶解氧(DO)及电导率等指标在现场测定，总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a 及高锰酸盐指数等进行实验室分析.

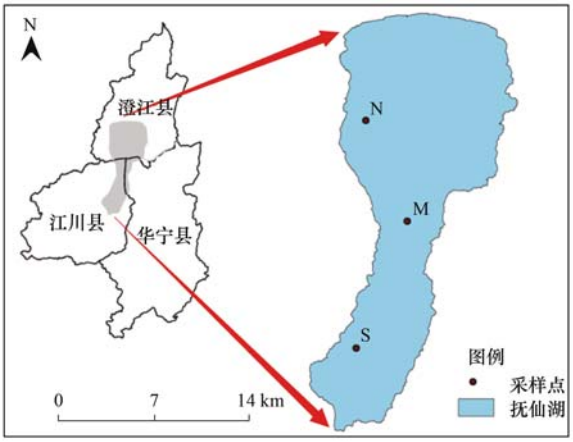

图 1　抚仙湖采样点位示意

Fig. 1　Sampling sites in the Fuxian Lake

表 1　采样现场情况

Table 1　Sampling sites condition

采样点	日期(年-月-日)	时间	气温/℃	风向,风速/m·s^{-1}	采样区域水深/m	天气
S	2014-07-30	14:52 ~ 16:28	27.1	东北风,1.2	77	晴
M	2014-07-30	17:18 ~ 18:33	25.6	东南风,1.5	107	晴
N	2014-07-31	08:00 ~ 09:10	21.8	东南风,1.8	135	晴
N-2	2014-07-31	11:00 ~ 12:11	23.6	东南风,2.8	135	晴
N-3	2014-07-31	14:00 ~ 15:10	27.2	东南风,2.5	135	晴
N-4	2014-07-31	17:00 ~ 18:04	27.4	东南风,0.5	135	晴

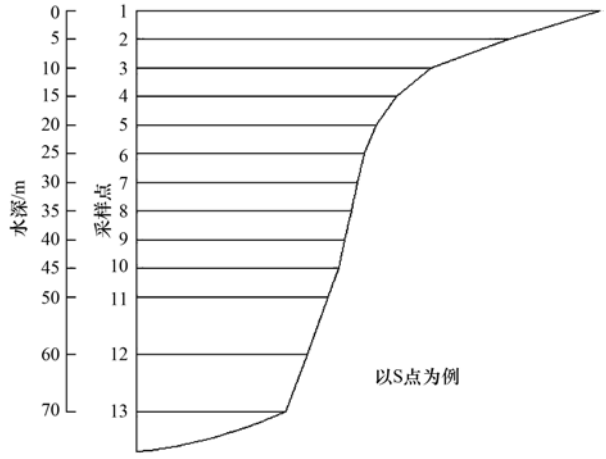

图 2 分层采样示意

Fig. 2 Hierarchical sampling

1.2 理化参数分析方法

采用加拿大 RBR 公司生产的 XRX-620 快速多参数水质剖面仪现场测定水体不同水深处的水温、pH、溶解氧(DO)和电导率,总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a 及高锰酸盐指数等指标的测定参考文献[8]中的分析方法.

1.3 数据处理

以 Microsoft Excel 2013 进行数据处理,以 Origin 9.0 和 MATLAB 进行绘图,采用 SPSS 17.0 进行 Pearson 相关性分析.

1.4 质量控制

样品化学指标均按照标准方法的规定进行样品现场处理后送至实验室分析,并按照文献[9]进行质量控制,表 2 为检测指标数据质量控制表.

表 2 检测指标数据质量控制/%

Table 2 Data quality control of the detection indicators/%

指标名称	相对偏差	加标回收	误差
总氮	≤10	90 ~ 110	≤ ± 10
总磷	≤25	85 ~ 115	≤ ± 15
高锰酸盐指数	≤25	无	无

2 结果与讨论

2.1 抚仙湖夏季水体成层空间特征及分析

2.1.1 水温空间特征

湖泊受气象因子季节变化影响而产生季节性温度分层,是深水湖泊最重要的环境特征之一. 2014 年夏季监测到抚仙湖 S、M 及 N 点均存在明显的水温分层现象(图 3),0 ~ 15 m 水深处是变温层,该层水体受到风力扰动,水温均在 22℃以上且垂直分布较均匀,表层最高水温达到 25.51℃;按照温度铅直梯度≥0.20℃·m^{-1}为温跃层的定义[10]可知水深 15 ~ 40 m 之间为温跃层,厚度约为 25 m,平均强度为 0.33℃·m^{-1}; 40 m 以下水体受外界影响较小,水温逐渐趋于平稳并恒定至 14℃左右,为等温层. 温带高原湖泊的特点使得抚仙湖底层水温常年恒定在 14℃左右,高于琵琶湖和千岛湖底层 10℃左右的水温,较高的温度会增强有机质的分解并使得上层水体沉降下来的固形物及浮游植物残体在深水层的氧化矿化程度加大,耗氧增多[11],与温带湖泊相比,抚仙湖的这一特点将增加其沉积物内源释放的风险,加速湖体的富营养化进程,因此抚仙湖的地域特征决定了其必须更为严苛地控制外源负荷的输入与沉积.

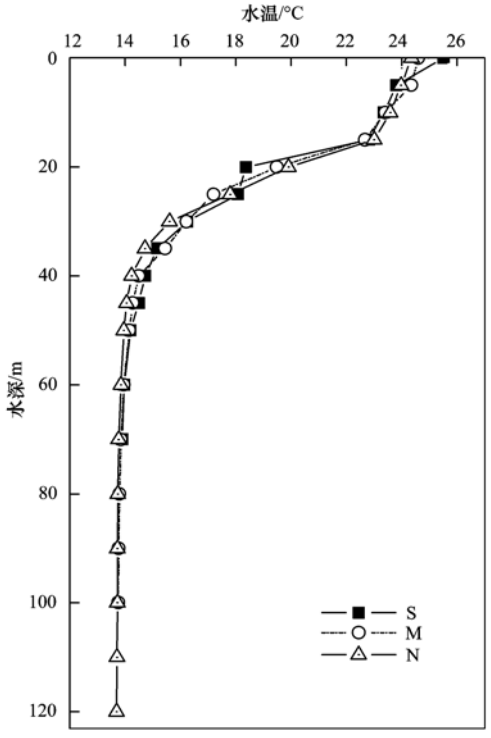

图 3 抚仙湖水体温度分层示意

Fig. 3 Water temperature hierarchical representation of the FuxianLake

2.1.2 水体理化因子空间特征

抚仙湖秉承了云南高原湖泊 pH 偏高的特征性问题[12],S、M、N 这 3 个点位表层水体的 pH 均在 8.5 以上,整个湖体的 pH 不低于 8.2(图 4);水深 0 ~ 20 m 范围内,pH 随水深增加逐渐降低,20 m 以下基本保持稳定. DO“上高下低”分层特征明显,S、M 点在水深 10 m 左右处 DO 出现极大值,N 点 DO 整体上要高于 S 和 M 点. 变温层水体的电导率基本恒定,在温跃层急剧下降,并在等温层保持稳定.

总磷(TP)质量浓度由上至下呈现“先减后增”的趋势,表层 TP 在0.008 0 mg·L^{-1}左右,5 ~ 50 m 水

深之间 TP 有明显下降，最低达到0.001 4 mg·L^{-1}，在距离湖底 20 m 左右的范围内快速升高. 总氮(TN)质量浓度从表面至湖底呈现波动上升趋势，其中 N 点 TN 相较 S、M 点高，且波动幅度较大，并在 10 m 水深处出现极大值. 3 个点位的叶绿素 a 质量浓度均在 15 m 水深处出现极大值，并在温跃层随着水深逐渐降低，到 40 m 左右水深处达到最小值. 10 m 左右水深处的高锰酸盐指数达到最大，之后在 30 m 左右水深处降至极小值，整体上 N 点高锰酸盐指数最高，M 点次之，S 点最低.

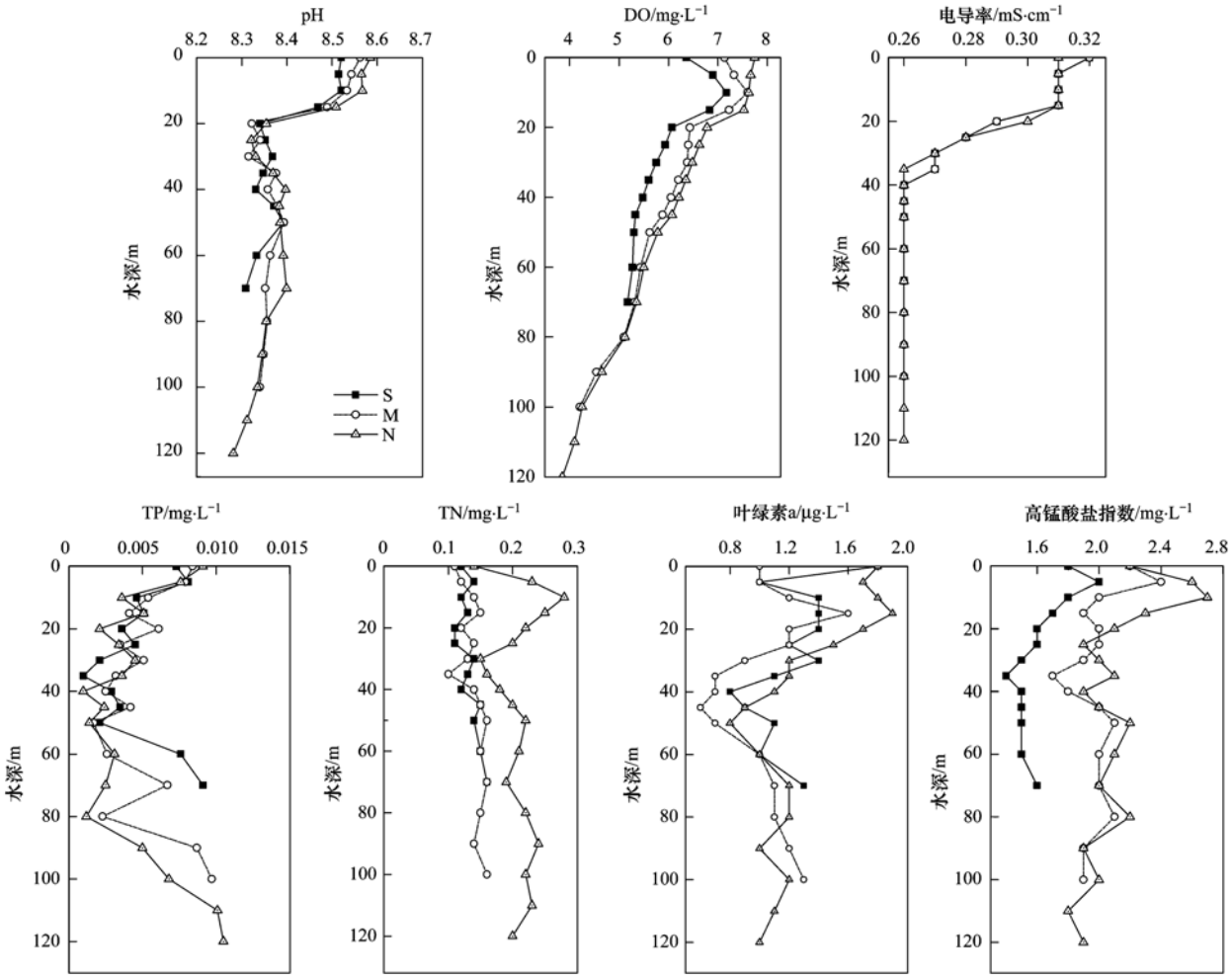

图 4　主要理化指标的垂直分布

Fig. 4　Vertical distribution of main physico-chemical variables

2.1.3　抚仙湖夏季各参数的垂直结构分析

抚仙湖夏季热分层时期，pH 和 DO 呈现出与水温分层近似相同的层次结构和分层现象，响应速度基本达到同步，可见温跃层的存在导致 pH 和 DO 发生了跃变，高原深水湖泊阳宗海也有类似的趋势[13]. 湖体上层光照及水温条件适宜藻类生长，光合作用大量消耗水中的 CO_2 导致该层水体 pH、DO 含量较高，10m 左右水深处由于光合作用远大于呼吸作用导致 DO 蓄积达到极大值；温跃层的存在，阻碍了上下水体氧分子扩散，且 PAR(光合成有效辐射)强度急剧减弱，呼吸作用大于光合作用，DO 出现明显的下降，同样，蓄积的 CO_2 向上层水体的传输受到水体分层的抑制而出现 pH 跃变；等温层由于水深、光照及温度的限制，藻类光合作用较弱难以复氧补充，加之底部水体和底泥因各种化学、生物的作用而耗氧，导致底部水体 DO 降低[14,15]，在缺氧或厌氧条件下，底泥中的有机物分解产生的酸性中间产物导致 pH 下降. 抚仙湖底部 DO 质量浓度为 3 mg·L^{-1} 左右，相比平原深水湖泊千岛湖 5 mg·L^{-1}和琵琶湖 6 mg·L^{-1}的浓度较低，这是由抚仙湖高原湖泊特点决定的：①抚仙湖等温层水温常年恒定在 14℃左右，使得底层的氧化矿化程度较高，消耗了水中的 DO；②抚仙湖在非成层期是不完全循环的，湖体在非成层期垂直水体不能充分扰动混合，致使底层水体溶解氧不能得到完整的补充；③抚仙湖所处的高原环境特点使得冬季降雨较少，造成

沿湖岸贯入湖底的冬季冷却河水不足,导致湖底 DO 不能有效补充. 在深水湖泊中,如果湖泊底层 DO 急剧下降至厌氧条件的话,将会使沉积物氮、磷快速大量释放,从而影响水体水质,引发富营养化发生风险[16~19]. 淡水中 DO 的溶解度主要取决于水温[20],而风力搅动会对上层水体 DO 的水平分布差异造成较大影响,由于抚仙湖 3 个点位水温差别较小,因此水温对 DO 的影响可忽略,在夏季东南季风作用下,从 S 点到 M 点再到 N 点的吹程不断增大,风浪扰动复氧程度增加,导致抚仙湖上层水体相同水深的 DO 从 S、M、N 点不断增大.

抚仙湖 TN 质量浓度从表层至湖底呈现"上低下高"的特征,可能原因一是由于上层水体与空气相通且极易发生波动,有充足的光照和氧气,藻类可以通过光合作用,把水中的 NH_4^+、NO_3^-、NO_2^- 等无机离子所含有的 N 元素缔合到碳骨架上,形成藻类细胞,从而消耗大量的氮营养物质[21~24];二是由于温跃层的阻隔影响了等温层的营养盐与上层的交换,进而导致湖底 TN 较高. N 点 TN 相比 S、M 点高,且在 10 m 水深处出现极大值,可能由于北部入湖河流较多,汇入了大量的氮营养盐,在水深 10 m 左右形成蓄积,同时抚仙湖的自然环境也有利于污染物向北部扩散. 抚仙湖 TP 对水温分层的响应遵循一般研究规律:即温跃层形成后,变温层和温跃层的 TP 质量浓度逐渐降低,而等温层 TP 反而累积升高[25,26]. 抚仙湖水体中磷的浓度较低,则沉积物表现出"源"的特征,向水体中释放磷[27],同时湖底的缺氧及碱性环境也有利于磷的释放[28,29]. 抚仙湖水体叶绿素 a 与水温分层也存在响应关系,但相对 pH 和 DO 的响应有迟效性;抚仙湖上层叶绿素 a 含量较高,是由于上层水体水温及光照强度较为适宜,有利于藻类的生长;3 个点位的叶绿素 a 均在 15m 水深处(变温层和温跃层的交界处)出现极大值,这与阳宗海[13]、千岛湖[21]以及泸沽湖[30]等深水湖泊规律一致,也与上面讨论的 DO 及 pH 在该层出现极值规律类似,由于水体表层强光照条件下藻类生长受到抑制,为了能在更适宜的光照条件下大量繁殖,部分藻类下移至次表层而导致峰值的出现[31,32];叶绿素 a 在 40 m 水深处出现极小值,可能由于该层是温跃层的底部,相较于温跃层其他水层藻类生长情况最差,为了能获得更适宜的生长条件,藻类有一部分上移,又由于热分层结构限制了温跃层与等温层水体的上下交换,等温层的藻类很难进入到温跃层,导致该处叶绿素 a 出现极小值.

电导率与水温分层有近似的变化,其变化趋势表明夏季抚仙湖水体的离子浓度从湖体表面至温跃层底部是逐渐降低的,且在温跃层有一个较大跃变. 高锰酸盐指数反映水体中还原性物质和有机物的含量水平[33],N 点高锰酸盐指数最高,可能与北部入湖河流较多,注入大量污染物有关,同时受夏季东南季风的影响,促使更多污染物积累在湖区北部.

2.1.4 各参数对水温分层的响应分析

根据水体特点进行分组分析:变温层和温跃层数据为一组,等温层数据为一组. 采用 SPSS 软件对水温与水体理化指标进行相关性分析,结果表明(表 3):抚仙湖变温层和温跃层的水温与水深呈极显著负相关($P < 0.01$),表明抚仙湖夏季水体变温层和温跃层随着水深的增加,有效光辐射减小,水温下降迅速;水温与 pH、DO、电导率、TP、叶绿素 a 和高锰酸盐指数呈极显著正相关($P < 0.01$),反映了由于温跃层的存在,使得光不能穿透温跃层而导致了 PAR 强度快速衰减,控制了浮游植物的光合作用及生长,抑制上下层水体的物质交换,影响了营养盐的相对位置[34~36]. 如表 4,抚仙湖等温层的水温与水深、叶绿素 a 呈极显著负相关($P < 0.01$),与 DO 呈极显著正相关($P < 0.01$),与pH呈显著正

表 3 变温层和温跃层的 Pearson 相关分析[1)]

Table 3 Pearson correlation analysis of epilimnion and thermocline

	水深	水温	pH	DO	电导	TP	TN	叶绿素 a	高锰酸盐指数
水深	1								
水温	−0.976**	1							
pH	−0.841**	0.882**	1						
DO	−0.932**	0.943**	0.877**	1					
电导	−0.961**	0.987**	0.834**	0.925**	1				
TP	−0.813**	0.768**	0.675**	0.758**	0.707**	1			
TN	−0.108	0.176	0.238	0.331	0.179	−0.143	1		
叶绿素 a	−0.557**	0.576**	0.459*	0.627**	0.597**	0.216	0.657**	1	
高锰酸盐指数	−0.550**	0.549**	0.608*	0.720**	0.510**	0.497**	0.652**	0.456*	1

1) * 表示在 0.05 水平显著相关; * * 表示在 0.01 水平极显著相关,下同

表 4　等温层的 Pearson 相关分析

Table 4　Pearson correlation analysis of hypolimnion

	水深	水温	pH	DO	电导	TP	TN	叶绿素 a	高锰酸盐指数
水深	1								
水温	−0.809 **	1							
pH	−0.775 **	0.508 *	1						
DO	−0.922 **	0.573 **	0.848 **	1					
电导	−0.486 *	0.234	0.554 *	0.500 *	1				
TP	0.710 **	−0.429	−0.844 **	−0.808 **	−0.394	1			
TN	0.388	−0.518 *	−0.157	−0.156	−0.138	−0.012	1		
叶绿素 a	0.576 **	−0.633 **	−0.421	−0.542 *	0.044	0.432	0.041	1	
高锰酸盐指数	0.077	−0.388	0.277	0.260	0.011	−0.387	0.418	−0.186	1

相关($P<0.05$)，与 TN 呈显著负相关($P<0.05$)．可见抚仙湖在夏季热分层时期，等温层水体的理化指标与变温层、温跃层水体的理化指标随水温变化不尽相同，可见水体分层限制了上下水层间的物质交换，造成了水体的物理、化学、生物分层，引起了不同的水环境响应．

2.2　抚仙湖夏季水体成层的昼间动态分析

为了探究抚仙湖夏季热分层时期水体不同深度的水温及水质昼间变化规律，在北部 N 点进行了连续 9 h 的调查监测．

2.2.1　水温分层随时间的昼间变化规律

抚仙湖水温分层存在昼间变化，上午随着光照辐射的增强，变温层和温跃层的水温逐渐升高(图 5)，10:00 ~ 12:00 出现较宽温度带，11:00 达到最宽，表层最高温度达到 25.36℃．等温层由于水的热导率小且相对静止，水温随昼间时间变化较小．所以夏季昼间光照辐射的增强导致抚仙湖湖体上层水温升高，温跃层下潜，强度变大，厚度变窄．

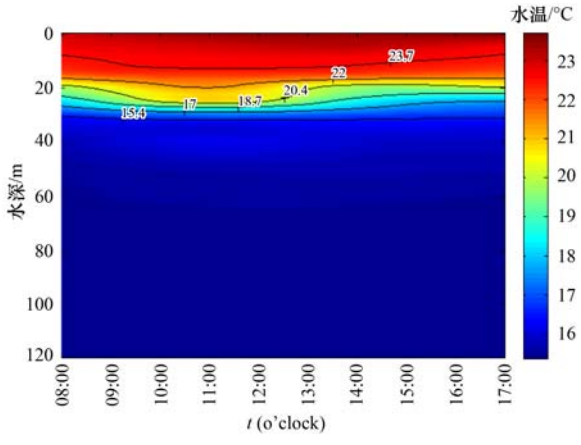

图 5　N 点垂向水温时间特征

Fig. 5　N-point characteristic graph of vertical temperature with time

2.2.2　水体理化因子随时间的昼间变化规律

N 点变温层和温跃层 pH、DO 及叶绿素 a 均在 11:00 ~ 17:00 之间显著升高(图 6)，这与该时间段 PAR 强度增强有关，光照强度增加导致藻类生长旺盛，光合作用造成 CO_2 大量消耗及 DO 大量产生，致使水体 pH、DO 及叶绿素 a 升高．N 点 TP 分层现象显著，但昼间变化不大，水深 100 m 以下有蓄积，表层水体 TP 在 12:00 ~ 16:00 有小幅度减小．TN 没有呈现出规律性的昼间变化，但从整体上看下午各层的 TN 质量浓度要高于上午．表层水体电导率从 11:00 开始逐渐升高，14:00 达到最高，垂向其他深度在昼间变化较小．由于北部入湖河流所带来的污染物处于动态平衡中，所以高锰酸盐指数在昼间并未发现显著的变化规律．

3　结论

(1)抚仙湖夏季水体水温分布具有明显的深水湖泊成层期温度分布特征，表面至水深 15 m 为变温层，水温变幅 25.51 ~ 22.81℃，15 ~ 40 m 为温跃层，水温变幅 22.81 ~ 14.72℃，40 m 以下为等温层，水温变幅 14.72 ~ 13.70℃．湖体表层与湖底层的最大温差为 11.8℃，与温带湖泊同期相比温差较小，而湖底等温层水温为 14℃左右，较温带湖泊为高，体现了抚仙湖高原深水湖泊自身的水温成层特征．

(2)抚仙湖夏季热分层结构明显限制了各个水层间的物质交换，决定了湖体的化学成层与生态成层特征：pH、DO 及电导率均呈现出与水温分布相同的分层结构，值得注意的是湖底层 DO 浓度低至 2 ~ 3 $mg\cdot L^{-1}$，作为贫营养湖泊，抚仙湖底层开始出现溶解氧偏低的现象昭示着其可能面临潜在的生态风险；TP 及 TN 由于温跃层的隔断，深水层呈现一定程度的营养盐累积效应；叶绿素 a 与高锰酸盐指数也均与水温分层存在对应的响应关系，在湖体上层出现最大值．

(3)抚仙湖夏季热分层时期，水温分层存在昼

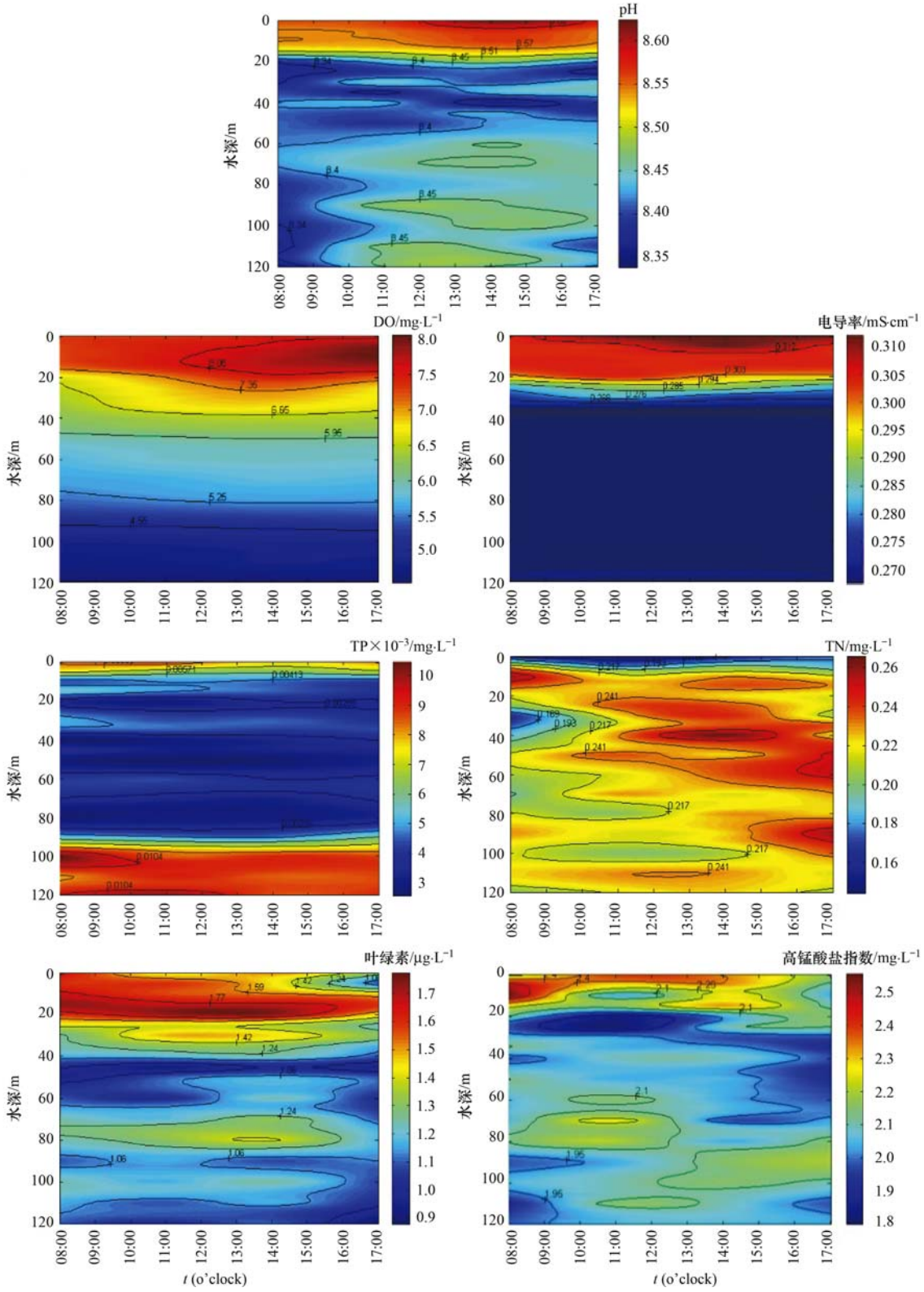

图 6 N 点主要理化指标时间特征

Fig. 6 N-point characteristic graph of main physico-chemical variables with time

间变化,中午光照辐射增强导致温跃层下潜,强度变大,厚度变窄,显著影响变温层和温跃层的 pH、DO、电导率及叶绿素 a 等动态分布,由于北部入湖河流所带来的污染物处于动态平衡中,在昼间变化不大,因此 TP、TN 及高锰酸盐指数的变化规律不显著. 等温层由于水体相对静止,光照影响小,相应

的理化指标日变异也较小.

参考文献：

[1] Chapman P J, Kay P, Mitchell G, *et al*. Surface water quality [A]. In: Holden J (Ed.). Water Resources: An Integrated Approach. London, United Kingdom: Routledge, 2014. 79-122.

[2] 王雅慧, 李兰, 卞俊杰. 水库水温模拟研究综述[J]. 三峡环境与生态, 2012, **34**(3): 29-36.
Wang Y H, Li L, Bian J J. Review on reservoir water temperature simulation [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2012, **34**(3): 29-36.

[3] Yu H, Tsuno H, Hidaka T, *et al*. Chemical and thermal stratification in lakes [J]. Limnology, 2010, **11** (3): 251-257.

[4] Becker V, Caputo L, Ordóñez J, *et al*. Driving factors of the phytoplankton functional groups in a deep Mediterranean reservoir [J]. Water Research, 2010, **44**(11): 3345-3354.

[5] Ryabov A B, Rudolf L, Blasius B. Vertical distribution and composition of phytoplankton under the influence of an upper mixed layer[J]. Journal of Theoretical Biology, 2010, **263**(1): 120-133.

[6] 王建云, 普发贵. 抚仙湖垂向水质状况及特征研究[J]. 玉溪师范学院学报, 2003, **19**(S): 53-58.
Wang J Y, Pu F G. A study on the vertical water quality and the water characteristics in Fuxian Lake [J]. Journal of Yuxi Teachers College, 2003, **19**(S): 53-58.

[7] 付朝晖. 抚仙湖水温跃层研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015, (1): 9-12.

[8] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[9] 章亚麟. 环境水质监测质量保证手册[M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2003.

[10] 王银珠, 濮培民. 抚仙湖水温跃层的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 1982, (4): 1-9.

[11] 何江, 孙英, 吕昌伟, 等. 岱海表层沉积物中内源磷的释放[J]. 生态学报, 2010, **30**(2): 389-398.
He J, Sun Y, Lv C W, *et al*. Research on phosphorus release from the surface sediments in the Daihai Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(2): 389-398.

[12] 莫美仙, 张世涛, 叶许春, 等. 云南高原湖泊滇池和星云湖pH值特征及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报. 2007, **26**(S): 269-273.
Mo M X, Zhang S T, Ye X C, *et al*. pH Characters and influencing factors in Dianchi and Xingyun Lakes of Yunnan plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26** (S): 269-273.

[13] 袁琳娜, 杨常亮, 李晓铭, 等. 高原深水湖泊水温日成层对溶解氧、酸碱度、总磷浓度和藻类密度的影响: 以云南阳宗海为例[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 161-168.
Yuan L N, Yang C L, Li X M, *et al*. Effect of daily thermal stratification on dissolved oxygen, pH, total phosphorus concentration, phytoplankton and algae density of a deep plateau lake: a case study of Lake Yangzonghai, Yunnan Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(1): 161-168.

[14] Bortone G. Sediment treatment-a general introduction [J]. Sustainable Management of Sediment Resources, 2007, **2**: 1-10.

[15] Fernandez R L, Bonansea M, Cosavella A, *et al*. Effects of bubbling operations on a thermally stratified reservoir: implications for water quality amelioration [J]. Water Science and Technology, 2012, **66**(12): 2722-2730.

[16] 步青云. 浅水湖泊溶解氧变化对沉积物磷、氮的影响[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2006.

[17] 高丽, 杨浩, 周健民. 环境条件变化对滇池沉积物磷释放的影响[J]. 土壤, 2005, **37**(2): 216-219.
Gao L, Yang H, Zhou J M. Phosphorus release from sediments in Dianchi Lake under different environmental conditions [J]. Soils, 2005, **37**(2): 216-219.

[18] 王雪蕾, 王金生, 王宁. 四平市二龙湖底泥磷释放研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, **6**(9): 47-50.
Wang X L, Wang J S, Wang N. Experimental study on phosphate release from sediments of Erlong Lake[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, **6** (9): 47-50.

[19] 徐清, 刘晓端, 刘浏, 等. 密云水库沉积物中磷释放的环境影响因子实验[J]. 岩矿测试, 2005, **24**(1): 19-22.
Xu Q, Liu X R, Liu L, *et al*. Study on environmental factors controlling the release of phosphorus in Miyun reservoir sediments [J]. Rock and Mineral Analysis, 2005, **24**(1): 19-22.

[20] Kalff J. Limnology: inland water ecosystems [M]. New Jersey, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002. 155, 162, 229, 258.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 韩仕群, 张振华, 严少华. 国内外利用藻类技术处理废水、净化水体研究现状[J]. 农业环境与发展, 2000, (1): 13-16.
Han S Q, Zhang Z H, Yan S H. Present situation and developmental trend of wastewater treatment and eutrophication waters purification with alga technology [J]. Agro-Environment and Development, 2000, (1): 13-16.

[24] Xu Y F, Yang J, Ou M M, *et al*. Study of *Microcystis aeruginosa* inhibition by electrochemical method [J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **36**(3): 215-220.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 吴宗义. 湖泊内源磷释放及形态转化的影响理化因素[J]. 化学工程与装备, 2009, (4): 134-135.

[28] 袁文权, 张锡辉, 张丽萍. 不同供氧方式对水库底泥氮磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 28-34.
Yuan W Q, Zhang X H, Zhang L P. Effects of different oxygenation treatments on the release of nitrogen and phosphorus from reservoir sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, **16**(1): 28-34.

[29] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al*. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China[J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 2251-2259.

[30] 赵雪枫. 泸沽湖温度分层季节变化及其环境效应[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
Zhao X F. Seasonal variations of thermal stratification and its environmental effects in Lake Lugu[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.

[31] Stramski D, Sciandra A, Claustre H. Effects of temperature, nitrogen, and light limitation on the optical properties of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana*[J]. Limnology and Oceanography, 2002, **47**(2): 392-403.

[32] 殷燕, 张运林, 王明珠, 等. 光照强度对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和斜生栅藻(*Scenedesmus obliqnus*)生长及吸收特性的影响[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 755-764.
Yin Y, Zhang Y L, Wang M Z, *et al*. Effects of different irradiation intensity on the growth and absorption properties of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliqnus*[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(5): 755-764.

[33] 张垒, 李秋华, 黄国佳, 等. 亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 438-447.
Zhang L, Li Q H, Huang G J, *et al*. Seasonal stratification and eutrophication characteristics of a deep reservoir, Longtan reservoir in subtropical area of China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 438-447.

[34] Bouman H A, Ulloa O, Scanlan D J, *et al*. Oceanographic basis of the global surface distribution of *Prochlorococcus ecotypes*[J]. Science, 2006, **312**(5775): 918-921.

[35] Huisman J, Sharples J, Stroom J M, *et al*. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species[J]. Ecology, 2004, **85**(11): 2960-2970.

[36] Salmaso N. Effects of climatic fluctuations and vertical mixing on the interannual trophic variability of Lake Garda, Italy[J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(2): 553-565.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 4

Apr. 15, 2017

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City ····· XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, *et al.* (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, *et al.* (1289)

Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan ····· WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1340)

Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals ····· LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, *et al.* (1348)

Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project ····· XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1393)

Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohe River Through High-throughput Sequencing ····· WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, *et al.* (1403)

Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay ····· DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, *et al.* (1414)

Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface ····· JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, *et al.* (1423)

Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland ····· DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1460)

Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate ····· LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, *et al.* (1467)

Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO_3^{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-bai, LAN Hua-chun, *et al.* (1483)

Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water ····· FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, *et al.* (1490)

Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes ····· ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, *et al.* (1497)

Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes ····· ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, *et al.* (1506)

Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater ····· LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, *et al.* (1513)

Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment ····· YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, *et al.* (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, *et al.* (1536)

Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor ····· CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, *et al.* (1544)

Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills ····· HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, *et al.* (1551)

Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(Ⅲ) Reduction in Aged Refuse ····· WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1576)

Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong ····· GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, *et al.* (1587)

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jianghan Plain ····· WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, *et al.* (1597)

Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil ····· CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, *et al.* (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, *et al.* (1613)

Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil ····· ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, *et al.* (1622)

N_2O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism ····· WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, *et al.* (1633)

Non-CO_2 Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes ····· LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, *et al.* (1640)

Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil ····· YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, *et al.* (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, *et al.* (1654)

Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism ····· PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, *et al.* (1667)

Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedings ····· LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1697)

Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing ····· YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, *et al.* (1704)

Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Dopped Graphene Anode ····· HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, *et al.* (1717)

Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States ····· RONG Yue (1726)