

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)

近3年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)

太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)

青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)

北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)

人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)

春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)

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 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)

长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)

苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)

工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评估 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评估 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)

UV协同ClO₂去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)

氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)

负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)

磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)

TiO₂@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)

MnO₂/CFP复合电极的制备及电吸附Pb²⁺特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)

吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO₂催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)

掺铁TiO₂纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)

天然矿物负载Fe/Co催化H₂O₂氧化降解阳离子红3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)

臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)

低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)

O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)

地表臭氧浓度升高对旱作农田N₂O排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)

土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)

水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)

植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)

垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)

1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)

CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)

锯齿新米虾对Cu²⁺和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)

同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)

热水环境中Na⁺活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)

区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)

《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

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

张垒¹, 李秋华^{1*}, 黄国佳¹, 欧腾¹, 李钥¹, 吴迪¹, 周黔兰², 高廷进³

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州省环境监测中心站, 贵阳 550002; 3. 遵义市环境保护局, 遵义 563000)

摘要: 为揭示亚热带大型深水水库——龙滩水库水体季节性分层和富营养化特征, 于2012年11月(枯水期), 2013年4月(平水期)和7月(丰水期)对其环境因子及富营养化指标进行研究。结果表明: ①龙滩水库分层结构呈不完全混合型湖泊特征, 枯水期为单温跃层结构, 表层至60 m为混合层, 60~80 m为温跃层, 80 m以后为永滞层。平水期和丰水期为双温跃层结构, 表层到10 m为混合层, 10~20 m为温跃层, 20~40 m为混合层, 40~60 m为次温跃层, 60 m以后为混合层。②水温分层主导其它环境因子的分层结构, 分层结构限制了水体上下对流, 尤其永滞层的存在减少了内源污染的危害。③水库枯水期综合营养指数(TLI)在23.4~32.8之间, 平水期在27.1~38.6之间, 丰水期在26.0~45.1之间, 均呈贫营养到中营养状态, 其中总氮营养状态指数 TSI_c(TN)在60.3~72.5之间, 呈富营养到重度富营养状态, 氮磷比为107:1, 呈磷限制型。

关键词: 季节性; 分层特征; 富营养化; 深水水库; 龙滩水库

中图分类号: X142; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0438-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.010

Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China

ZHANG Lei¹, LI Qiu-hua^{1*}, HUANG Guo-jia¹, OU Teng¹, LI Yue¹, WU Di¹, ZHOU Qian-lan², GAO Ting-jin³

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Environmental Monitoring of Guizhou Province, Guiyang 550002, China; 3. Environmental Protection Administration of Zunyi City, Zunyi 563000, China)

Abstract: In order to reveal the seasonal stratification and eutrophication characteristics of the subtropical large deep reservoir--Longtan Reservoir, the spatial and temporal distribution of environmental factors and eutrophic index were investigated during November (dry period) 2012, April (level period) and July (wet period) 2013. The results suggested that: ①The stratification structure of Longtan Reservoir was meromictic lake, it had a single thermocline structure in the dry season, the surface layer to the 60 m was a mixolimnion, 60-80 m was a thermocline, deeper more than 80 m was a monimolimnion. It had a double thermocline structure in flow period and wet period, the surface to 10 m was a mixed layer, 10-20 m was a thermocline, 20-40 m was a mixed layer, 40-60 m was a thermocline, deeper more than 60 m was a mixed layer. ②The thermal stratification dominated the structure of other environmental factors, the stratification structure limited the water convection, especially the monimolimnion reduced the harm of the endogenous pollution. ③The trophic level index (TLI) was 23.4-32.8 in the dry period, 27.1-38.6 in the flow period and 26.0-45.1 in the wet period, which were all Mesotropher. The trophic state index of total nitrogen was 60.3-72.5, which was eutropher to hyper eutropher, N:P was 107:1, which was phosphorus limited.

Key words: seasonal; stratification; eutrophication; deep reservoir; Longtan Reservoir

水库是通过筑坝形成的介于天然河流和湖泊的半人工半自然水体^[1], 大型深水水库水动力减弱, 水体滞留时间延长^[2], 容易产生类似天然湖泊的水体分层现象^[3,4], 垂直断面内水温、溶解氧、pH、电导率、叶绿素 a 浓度、氮磷浓度等环境因子呈现分层变化特征^[5,6], 其中以对水温分层为主体的热分层效应研究较多, 分层结构能限制水体上下混合, 从而减少污染物的扩散^[7], 分层结构的改变导致水体混合, 易引起突发性水质恶化事件, 同时分层结构变化影响浮游植物生长, 从而诱发水华^[8,9]. 水体温

度、溶解氧、pH 影响水生生物的生存空间, 对水产养殖意义重大. 底层溶解氧、pH 降低促进底泥中氮磷、硫化氢等污染物质的释放^[10]. 分层结构的发生和变化通过影响水生生物、水化学过程和地球化

收稿日期: 2014-06-30; 修订日期: 2014-09-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB426506); 贵州省科技厅项目(黔科合人才团队(2013)4024, 黔科合区域合[2013]7005号); 贵州省教育厅项目(黔教合 KY 字[2013]113)

作者简介: 张垒(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学, E-mail: zhanglei89n@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qiuhua2002@126.com

学循环从而影响水库的水环境性质^[11]。水库的低温下泄水会对下游河道鱼类生长及农作物灌溉产生不利影响,目前分层取水措施较为适用^[12]。因此水库分层效应与水质管理、供水、灌溉、水产养殖等相关产业息息相关。

龙滩水库是典型的亚热带大型深水水库,为年调节型,水体滞留时间长,泥沙淤积程度高,库区水体营养盐含量相对较高,目前尚无对龙滩水库富营养状况的系统研究,但上游万峰湖水库(天生桥一级水电站)呈中营养状态,且总氮污染负荷较高^[13]。此前对龙滩水库水环境研究涉及到浮游动物、浮游植物和鱼类等方面^[14~17],尚无对其水体分层特征及富营养化状况的研究报告。通过对龙滩水库的调查,揭示其季节性水体分层特征及富营养化状况,以为深水水库的分层特征和水质管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点及采样时间

龙滩水库是一座兼具发电、防洪、养殖、灌溉、航运等多功能的大型水利枢纽工程,水库位于云贵高原东南部,广西和贵州省的交界处珠江水系干流红水河上,坝址位于广西天峨县境内,下距天峨县城 15 km。龙滩水库为干流型水库,地处喀斯特山区,呈现深水特征,2006 年下闸蓄水,流域面积 98 500 km²,回水长度为 120 km,蓄水位为 375 m,库容 273 亿 m³,平均宽 1.7 km,最大水深为 173.5 m,平均水深为 92.7 m,装机容量为 540 万 kW,其装机容量和库容在国内仅次于长江三峡水库。

由于龙滩水库库区狭长,河流区、过渡区及湖泊区之间划分不明显,因此自上而下选取 4 个采样断面(图 1):小马厂(X, N25° 05' 06.70", E106° 34' 11.70");红水河镇(H, N25° 09' 50.65", E106° 38' 31.66");双江口(S, N25° 15' 08.78", E106° 55'

34.61");大坝(D, N25° 03' 16.85", E107° 01' 49.67")。样品及数据采集分别于 2012 年 11 月(枯水期),2013 年 4 月(平水期)和 7 月(丰水期)进行。

1.2 数据采集

垂直断面内从表层 0.5 m、5 m、10 m 以下每隔 10~20 m 分层采样,现场测定:用美国 YSI 公司的 6600V2 水质参数仪测定水温(water temperature, t)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、pH、浊度(turbidity, T_n)、电导率(electric conductivity, EC),用塞氏盘测透明度(secchi disk depth, SD)。叶绿素 a(chlorophyll a, Chl-a)采用改良的反复冻融、丙酮浸提测定^[18]。总氮(total nitrogen, TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总磷(total phosphorus, TP)采用钼酸铵分光光度法,高锰酸盐指数(permanaganate index)采用高锰酸钾酸性滴定法测定。

1.3 数据处理

富营养化评价方法采用综合营养指数法(trophic level index, TLI), $TLI = \sum W_j \cdot TLI(j)$ ^[19],营养状态指数法(trophic state index, TSIc)^[20],评价指标包括总氮、总磷、叶绿素 a 和高锰酸盐指数等。利用 SPSS 19.0 进行系统聚类分析,使用 Origin 9.0 绘制垂直断面内环境因子变化趋势图。

2 结果与分析

2.1 水温垂直分层与季节动态

水库温度分层结构及季节变化状况是其主要的湖沼学特征之一,影响其生物群落结构和水生生态系统生产力。枯水期垂直断面内水体混合度较高,表层到 60 m 水温相对稳定,为混合层,在 21.4~22.7℃ 之间,60 m 水深出现平面型温跃层,60~80 m 为温跃层,由 21℃ 降低至 16℃ 左右,温度梯度为 0.27℃·m⁻¹,湖下层为 80~100 m,该层内温度变幅较小,呈永滞层特征。平水期呈现整体分层现象,表层和底层温差增大,各采样点分层特征不同,其中大坝采样点 10~30 m、红水河镇 5~20 m 为温跃层,温度梯度分别为 0.15℃·m⁻¹和 0.27℃·m⁻¹;小马厂、双江口无明显温跃层,温度梯度分别为 0.09℃·m⁻¹和 0.14℃·m⁻¹。丰水期水温较高,表层水温在 28.0~30.9℃ 之间,垂直断面内呈现双温跃层特征,5 m 以内混合度较高,温差在 1℃ 以内,5~20 m 为温跃层,温度梯度为 0.15℃·m⁻¹,20~40 m 水层水温相对稳定,温差约为 0.6℃,40~60 m 为温跃层,温度梯度为 0.18℃·m⁻¹,60 m 以后温度维持在 24℃ 左右(图 2)。

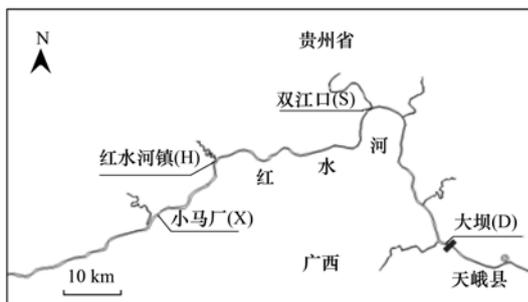


图 1 龙滩水库采样点位置示意

Fig. 1 Topographical map and sampling site in Longtan Reservoir

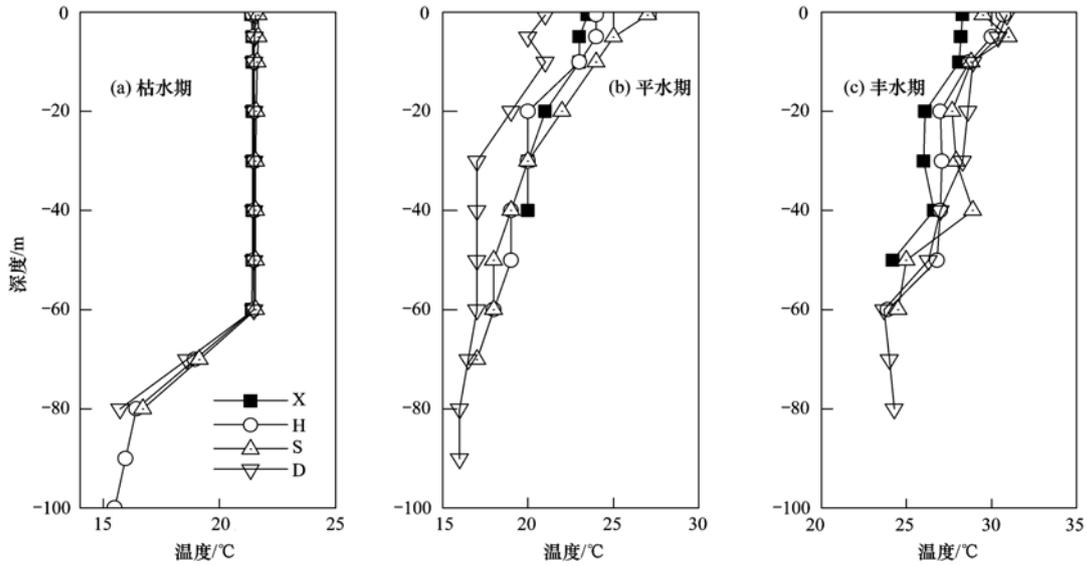


图 2 水温时空特征

Fig. 2 Spatial and temporal distribution characteristics of water temperature

2.2 溶解氧垂直分层与季节动态

水体溶解氧含量与大气中氧气在水体中的溶解度、植物光合作用放氧和生物呼吸作用耗氧相关,其能较好地反映水生生态系统新陈代谢情况. 研究期间,枯水期湖上层溶解氧浓度差值在 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内,溶解氧浓度温跃层发生跃变,差值在 $3.28 \sim 6.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,底层降至 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 溶解氧浓度在平水期和丰水期随水深增加而降低,与叶绿素 a 浓度及温度变化趋势相一致(图 3),尤其丰水期表层至 20 m 水层,最能体现浮游植物对溶解氧浓度贡献作用.

2.3 电导率垂直分层与季节动态

电导率体现水体溶解质含量,枯水期电导率分层与热分层相一致,表层电导率在 $367 \sim 379 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,表层到 60 m 水层内差值在 $1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之内,电导率从平面型温跃层开始明显升高,出现盐跃层,永滞层电导率趋于稳定(图 4). 平水期表层电导率在 $349 \sim 359 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,随深度增加电导率升高,其中表层到 20 m 变化幅度较为明显. 丰水期受降水补给影响,表层电导率较低,在 $275 \sim 311 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,表层到 20 m 电导率随深度增加而升高,20 ~ 40 m 除双江口外各采样点电导率

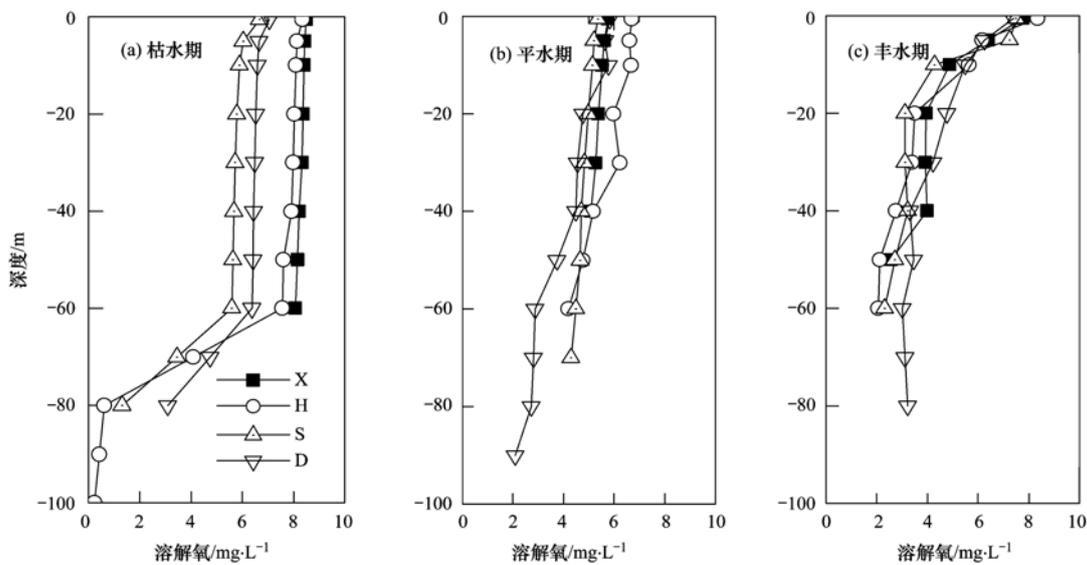


图 3 溶解氧时空特征

Fig. 3 Spatial and temporal distribution characteristics of dissolved oxygen

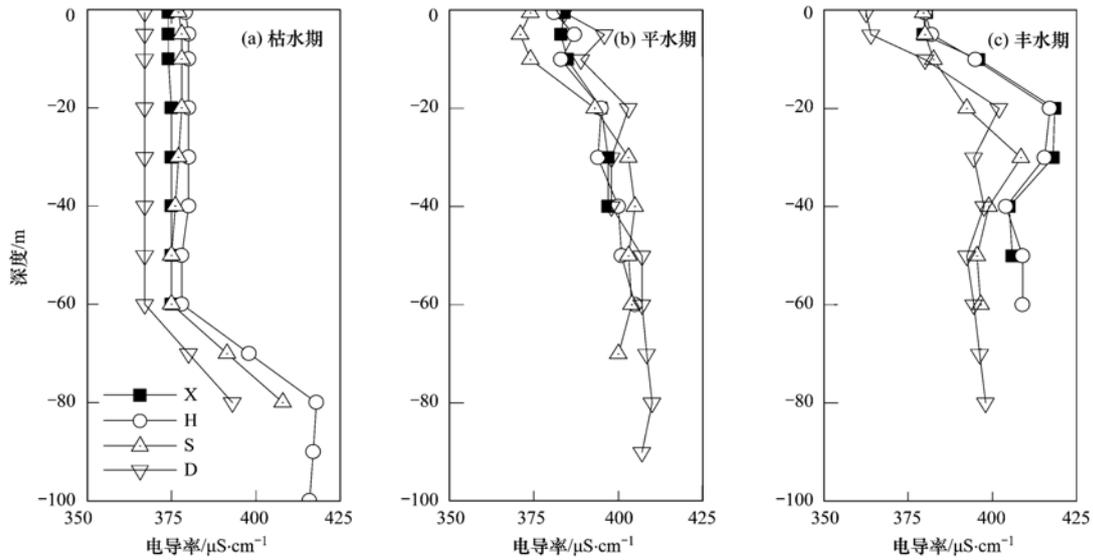


图 4 电导率时空特征

Fig. 4 Spatial and temporal distribution characteristics of conductivity

均小幅降低,40 m 以后电导率小幅升高.

2.4 pH 垂直分层与季节动态

pH 是水质评价的重要指标,表示水体酸碱度.龙滩水库地处云贵高原喀斯特地区,水体中丰富的 HCO_3^- 水解产生 OH^- 使水体 pH 呈微碱性.枯水期水体 pH 在 7.79 ~ 8.06 之间,表层到底层无明显差异,未体现分层特征.平水期表层 pH 在 8.02 ~ 8.33 之间,pH 随水深的增加而降低,底层最低为 7.55.丰水期表层 pH 在 8.04 ~ 8.23 之间,20 m 和 40 m 出现两个变化拐点,表层到 20 m 呈降低趋势,20 ~ 40 m 小幅升高,40 m 后随水深增加逐渐降低(图 5).

2.5 浊度垂直分层与季节动态

浊度反映水中悬浮物对光线透过时所发生的阻碍程度.枯水期表层到 80 m 浊度均在 0.5 FTU 以内,只有红水河镇采样点底层 80 ~ 100 m 浊度随深度增加而升高.平水期和丰水期浊度时空变化特征相似,表层到 30 m 随深度增加而降低,30 ~ 90 m 随深度的增加而升高,丰水期浊度高于枯水期和平水期,其中平水期和丰水期表层浊度范围分别在 1.1 ~ 1.7 FTU 和 1.3 ~ 3.6 FTU(图 6).

2.6 叶绿素 a 垂直分层与季节动态

叶绿素 a 浓度反映浮游植物的生产力水平,也是水体富营养化评价的重要指标.枯水期叶绿素 a

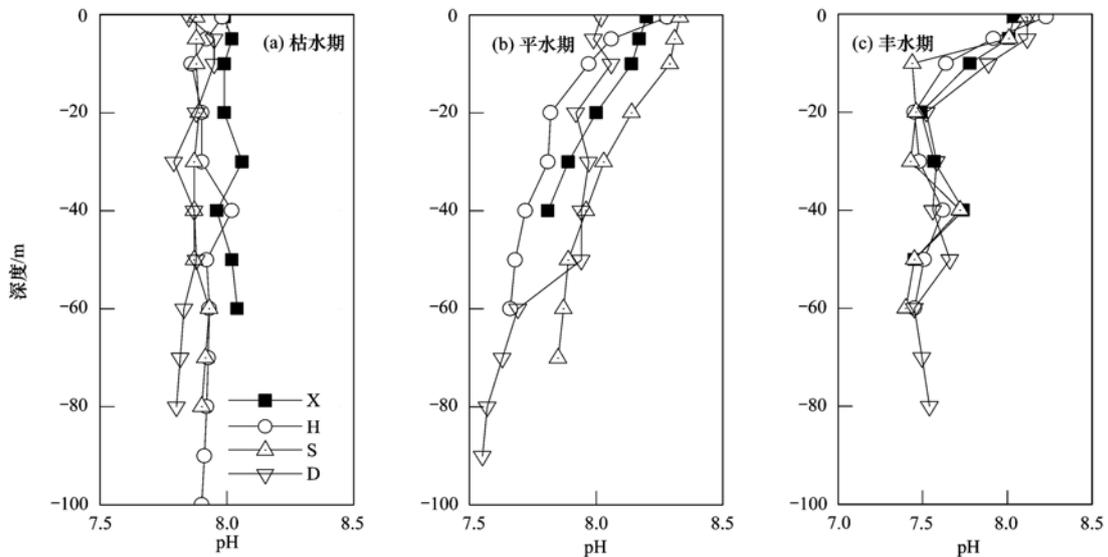


图 5 pH 值时空特征

Fig. 5 Spatial and temporal distribution characteristics of pH

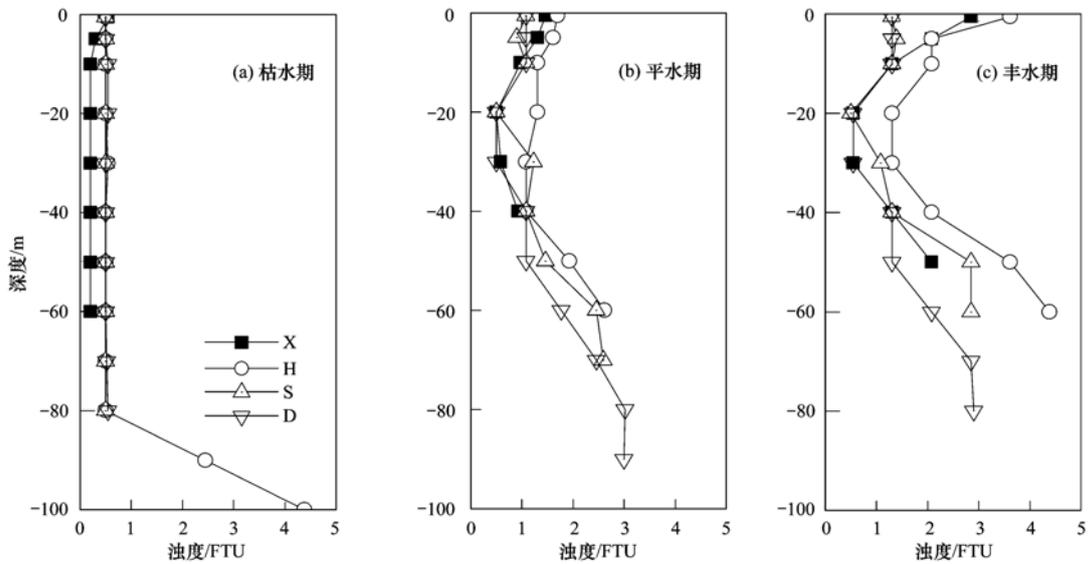


图 6 浊度时空特征

Fig. 6 Spatial and temporal distribution characteristics of turbidity

浓度较低,在 $1.1 \sim 2.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,叶绿素 a 的营养状态指数 TSIc(Chl-a) 最高为 35.0,呈中营养状态. 平水期表层到 20 m 水层叶绿素 a 浓度相对较高,在 $2.2 \sim 5.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,TSIc(Chl-a) 最高为 44.0,呈中营养状态,20 m 之后叶绿素 a 浓度随水深增加逐渐降低,底层 90 m 最低降至 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 丰水期表层叶绿素 a 浓度最高达到 $10.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,TSIc(Chl-a) 为 52.2,呈轻度富营养化状态,20 m 水深依旧为变化拐点,相比平水期上下水层间浓度差异增大,红水河镇采样点叶绿素 a 浓度最高(图 7).

2.7 透明度季节动态

透明度是水体富营养化评价的重要指标,反映浮游植物密度及悬浮颗粒的对光透射程度的影响. 枯水期透明度最高,在 7.3 ~ 9.0 m 之间,以大坝采样点透明度最高,双江口采样点最低. 平水期透明度在 2.0 ~ 2.9 m 之间,以大坝和小马厂采样点较高,双江口采样点最低. 丰水期透明度在 1.1 ~ 2.8 m 之间,以大坝采样点最高,小马厂和红水河镇采样点最低(图 8).

2.8 总磷垂直分层与季节动态

磷是引起水体富营养化的主要营养元素之一,

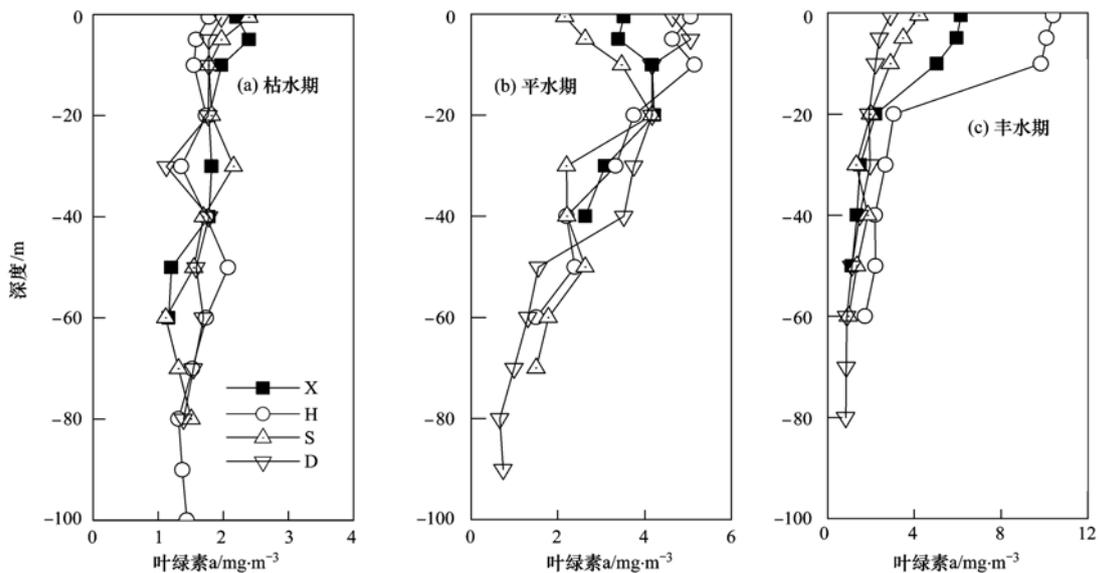


图 7 叶绿素 a 时空特征

Fig. 7 Spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll a

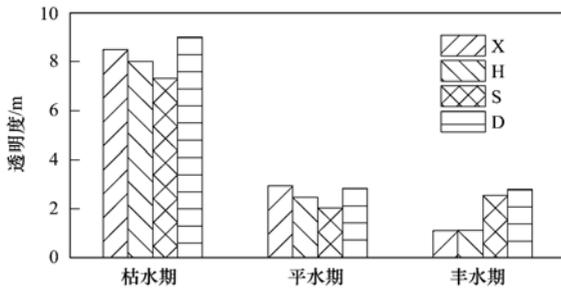


图8 透明度时空特征

Fig. 8 Spatial and temporal distribution characteristics of secchi disk depth

磷的富营养化效应及循环机制是研究者普遍关心的问题. 龙滩水库水体总磷浓度在 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内, $\text{TSIc}(\text{TP})$ 最高为 37.2, 呈中营养状态. 枯水期除小马厂采样点外, 总磷浓度随深度变化无明显差异; 平水期各采样点总磷浓度随深度的增加略有升高, 丰水期大坝采样点总磷浓度较为稳定, 其它采样点浓度波动变化(图9). 一般沉积物间隙水中磷浓度较高, 从而进入上覆水, 使底层磷浓度升高, 而龙滩水库湖下层总磷浓度未出现较大浓度的跃升, 同时采集的底泥柱长度在 30 cm 以内, 因此, 短时间内形成的沉积物未对底层总磷浓度产生较大影响. 此

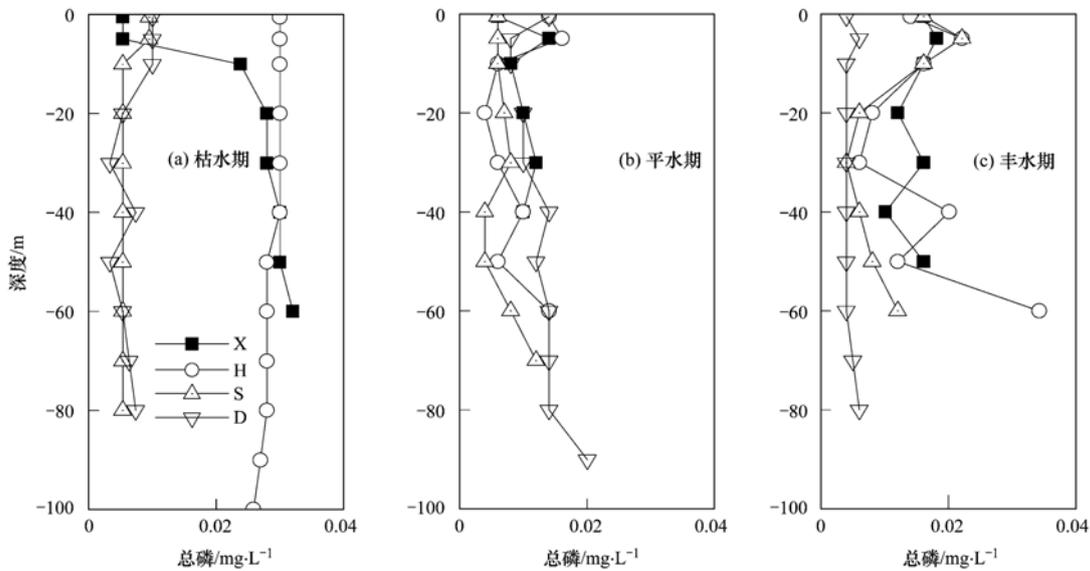


图9 总磷时空特征

Fig. 9 Spatial and temporal distribution characteristics of total phosphorus

外, 龙滩水库水体氮磷比(摩尔比)为 107:1, 远高于 Redfield 氮磷比, 呈明显的磷限制特征.

2.9 总氮垂直分层与季节动态

氮是引起水体富营养化的主要营养元素之一. 枯水期和平水期总氮浓度在垂直断面内无明显变化, 其中枯水期总氮浓度在 $2.48 \sim 2.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 相应 $\text{TSIc}(\text{TN})$ 在 69.3 ~ 72.5 之间, 呈富营养-重度富营养状态. 平水期在 $1.89 \sim 2.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, $\text{TSIc}(\text{TN})$ 在 64.2 ~ 67.1 之间, 呈富营养状态. 丰水期总氮浓度在 $1.53 \sim 3.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, $\text{TSIc}(\text{TN})$ 在 60.3 ~ 70.3 之间, 也呈富营养-重度富营养状态, 其中表层总氮浓度较低, 在 $1.53 \sim 2.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 湖上层总氮浓度随深度的增加而升高, 20 m 水层为变化拐点, 之后随水深的增加而降低(图10).

2.10 高锰酸盐指数垂直分层与季节动态

高锰酸盐指数是水体富营养化评价的主要指标

之一, 反映水体中还原性物质和有机物的含量水平. 龙滩水库高锰酸盐指数在 $4.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内, TSIc (高锰酸盐指数) 最高为 35.2, 呈贫-中营养状态, 其中枯水期高锰酸盐指数在 $1.0 \sim 1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平水期在 $0.7 \sim 2.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 丰水期在 $1.0 \sim 3.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 高锰酸盐指数随水深变化特征不明显, 未出现显著的分层特征(图11). 受网箱养鱼的影响, 丰水期红水河镇采样点湖上层高锰酸盐指数较高并且随着水深的增加而降低.

2.11 综合营养指数垂直分层与季节动态

综合营养指数法(TLI)是水体富营养化评价较为简便和适用的方法, 龙滩水库枯水期 TLI 在 26.7 ~ 37.7 之间, 平水期在 26.8 ~ 39.6 之间, 丰水期在 23.5 ~ 45.9 之间(图12), 3 个水期富营养化状况均呈贫营养到中营养状态. 枯水期综合营养指数低于平水期和丰水期, 枯水期和平水期综合营养指数随

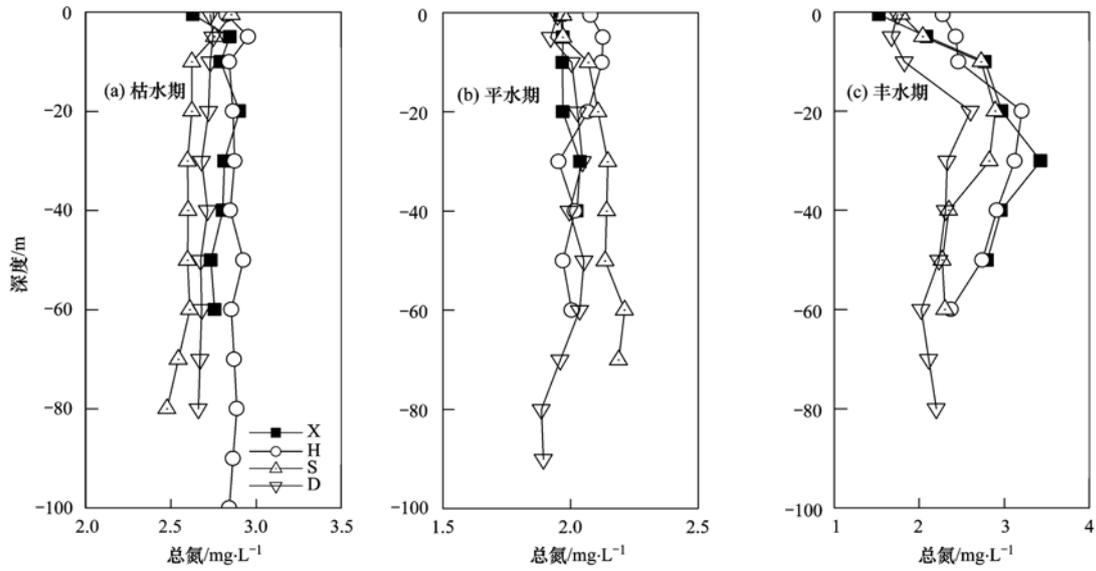


图 10 总氮时空特征

Fig. 10 Spatial and temporal distribution characteristics of total nitrogen

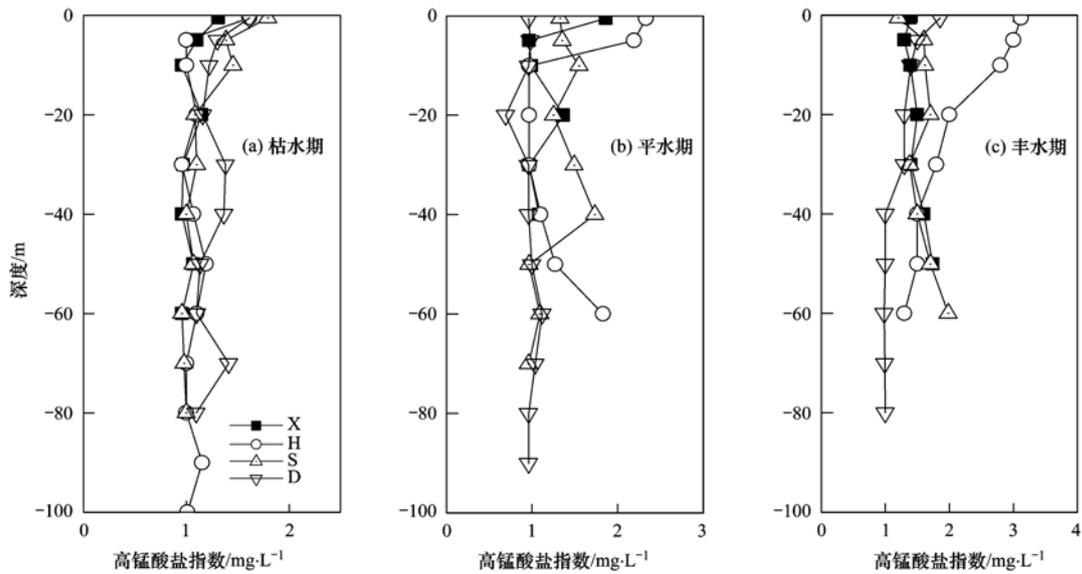


图 11 高锰酸盐指数时空特征

Fig. 11 Spatial and temporal distribution characteristics of permanganate index

水深增加无明显变化,丰水期表层到 30 m,综合营养指数随深度的增加而降低,30 m 以后,随深度的增加而小幅升高.红水河镇采样点在各时期综合营养指数均较高,大坝采样点相对较低.

3 聚类分析

对龙滩水库不同水期和水层按水温、电导率、pH、溶解氧、叶绿素 a 浓度、总磷、总氮、高锰酸盐指数、透明度等环境因子运用“欧式 Euclidean 距离”进行系统聚类分析(图 13).根据聚类分析结果,枯水期可分为 3 层:上层为 0.5 ~ 60 m,中层为

60 ~ 80 m,下层为 80 ~ 100 m.上层对应湖上层,水体混合程度较高;中层对应湖中层,也就是温跃层,该层水温、电导率、溶解氧呈现明显梯度变化;底层对应湖下层,水体再次混合,各环境因子趋于稳定.平水期可分为 4 层:表层 0.5 ~ 5 m 水温、叶绿素 a 浓度、透明度变化显著;次表层 5 ~ 20 m,水温、叶绿素 a、pH 等出现较弱的变化拐点;中层 20 ~ 50 m 各环境因子变化幅度变缓,水体趋于混合;底层 50 ~ 90 m 各环境因子趋于稳定,混合度升高.丰水期也分为 4 层,分层结构与平水期类似:表层 0.5 ~ 5 m 以叶绿素 a 浓度、电导率、pH、溶解氧变

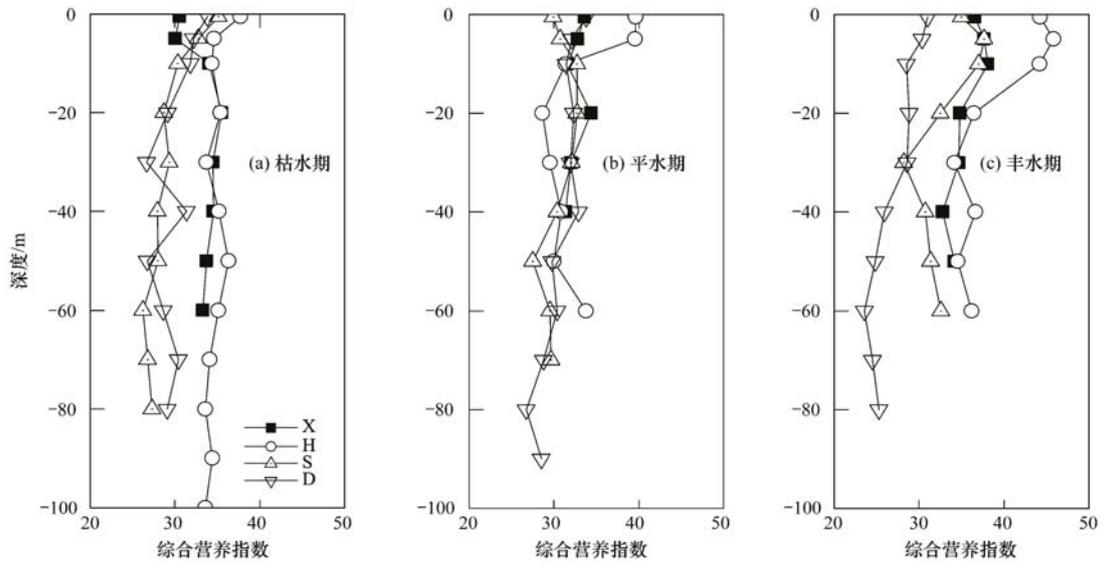


图 12 综合营养指数时空特征

Fig. 12 Spatial and temporal distribution characteristics of TLI

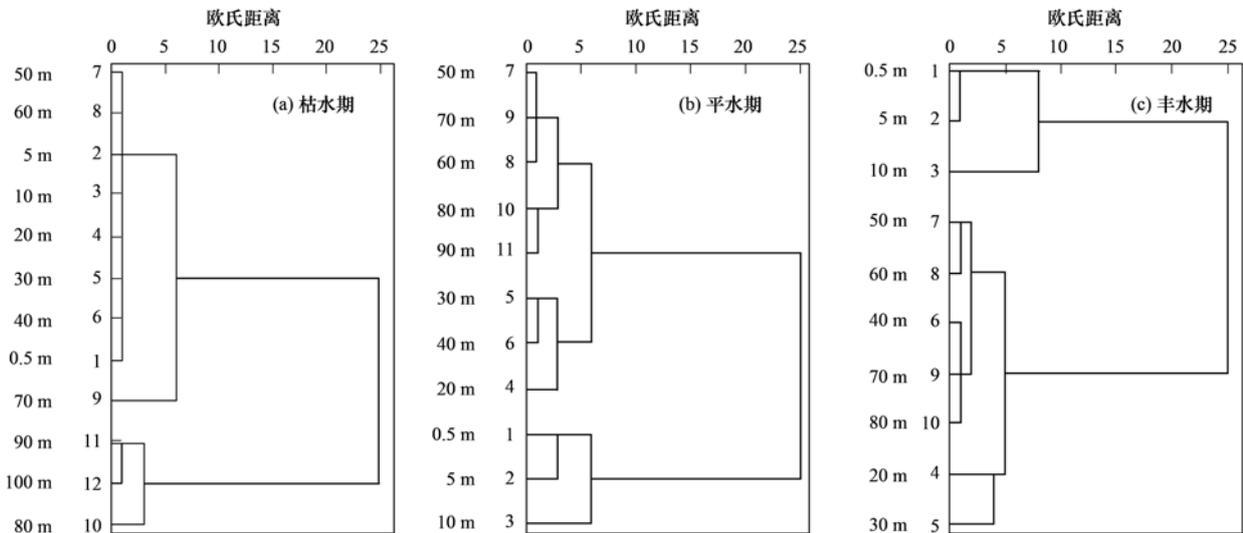


图 13 欧式 Euclidean 距离聚类分析树状图

Fig. 13 Euclidean distance clustering analysis tree

化较为显著；次表层 5~20 m, 为水温、pH、电导率变化拐点, 中层 20~40 m 各环境因子无明显变化, 水体混合度较高；下层 40~80 m 各环境因子趋于稳定。从 3 个水期分层特征来看, 枯-水期分层结构单一, 平水期和丰水期分层较复杂；湖上层和湖中层 3 个水期内既有混合状态也有分层状态, 而湖下层 80 m 以后水层相对独立于中层和上层, 形成较为稳定的永滞层。

4 讨论

深水水库分层现象的发生、变化直接控制水库的水环境性质^[11], 通过对龙滩水库环境因子的季节

性分层研究表明, 水库在各水期均出现分层现象, 呈不完全混合型湖泊特征；运用水温分层类型的判别方法 $a = \text{入库年径流量} / \text{总库容}$ ^[21], 龙滩水库 $a = 517 \text{ 亿 m}^3 / 273 \text{ 亿 m}^3 = 1.89$, $a < 10$, 水温分布呈稳定分层型, 该结果与实际调查及聚类分析结论相符合。

龙滩水库水体分层特征表现为枯水期湖上层(混合层)各环境因子呈均匀分布, 水层混合程度较高。相对于相邻的丰水期, 枯水期表层水温降低, 受风力扰动及密度流的作用, 水体趋于混合, 一般在秋季形成逆转(水体翻转), 呈现等温状态^[22], 而龙滩水库温度和电导率在平面型温跃层深度出现跃变,

较大的温度梯度和密度梯度抵抗混合作用的扰动力从而形成温跃层(盐跃层),湖下层(永滞层),各项环境因子变化趋缓,呈现相对独立且稳定的混合状态. 枯水期温跃层限制垂向水层间氧的交换,使永滞层呈厌氧、缺氧环境^[23],从而引起磷、硫化氢等污染物的释放,温跃层对质量和热传输都是障碍,从而使污染物限制在永滞层内,减少内源污染物的扩散. 平水期气温回升,表层水温升高,湖上层混合状态逐渐被分层状态取代,受太阳辐射强度的影响水温随深度增加而逐渐降低,表层到 30 m 水温梯度最大,随着深度的增加,水温及其它环境因子变幅减小. 相比枯水期而言,平水期湖上层和湖中层分割不明显,而湖下层与枯水期特征类似,都趋向于永滞层特征. 一般平水期大坝泄水以迎接汛期,同时承接上游水库泄水,换水周期加快,而龙滩水库受回水距离长达 120 km 的影响,换水主要以层流为主,未对水库垂直分层结构产生较大破坏. 丰水期双温跃层特征与上游万峰湖水库夏季热分层特征相同^[13,24],湖上层温跃层主要受气温、太阳辐射及风力扰动影响,湖中层热传导及扰动作用减弱并再次出现温跃层,湖下层保持和其它水期一致的稳定特征.

水温是水库的重要环境因子,决定水体物理、化学性质,进而影响其它水质指标和水质过程^[25]. 从各环境因子变化规律来看,垂直断面内水温与溶解氧变化趋势保持高度一致,与电导率变化趋势相对应,湖上层范围内水温与叶绿素 a 浓度、pH 变化趋势相近,在富营养化水平较低的情况下,富营养化状态未表现出与分层结构直接的相关关系,而是通过以温度为主导的分层结构影响叶绿素 a、总磷、总氮等环境因子从而影响富营养化的分层,体现了水温分层在环境因子分层中的主导地位.

龙滩水库丰水期富营养化水平最高,枯水期最低,富营养化水平的时间差异主要受叶绿素 a 浓度、透明度等因素的影响;垂直断面内富营养化水平的空间差异主要受叶绿素 a 浓度、高锰酸盐指数等因素的影响;水平空间上,红水河镇采样点受网箱养殖、航运码头等人为活动影响,富营养化水平高于其它采样点,经过水库河流区和过渡区悬浮物的沉降和浮游植物对营养盐的吸收^[1],大坝采样点富营养化水平低于上游采样点.

一般新建水库在前几年里会出现营养水平上涌的现象,随后营养水平下降并呈现较长时间相对稳定的生物群落和生产力^[26],研究期间水库富营养化

水平呈贫营养到中营养状态,水质状况总体较为乐观. 一般湖库内源污染对水质影响较大^[27],底层水体氮、磷等营养盐浓度较高^[28],受建库时间短,沉积物积累较少的影响,水库底层总磷、总氮浓度未出现升高现象,季节性的水体对流不会引起总氮、总磷浓度的骤变,而且温跃层稳定的分层结构将内源污染物限制在永滞层以内,从而抑制水质恶化. 然而受上游富营养化水平较高的万峰湖水库的影响,可以预见未来龙滩水库富营养化水平会逐年加重.

5 结论

(1) 龙滩水库分层结构呈不完全混合型湖泊特征,垂直水温分布属稳定分层型,枯水期、平水期、丰水期均出现水温分层现象,其中枯水期单温跃层,平水期和丰水期双温跃层,80 m 至底层为永滞层.

(2) 叶绿素 a 浓度、电导率、pH、溶解氧等环境因子的分层特征均与水温分层相对应,体现深水热分层效应的主导性.

(3) 龙滩水库富营养化水平呈贫营养到中营养状态,但总氮污染负荷较高,呈磷限制型.

参考文献:

- [1] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
- [2] Topping D J, Rubin D M, Vierra Jr L E. Colorado River sediment transport: 1. Natural sediment supply limitation and the influence of Glen Canyon Dam [J]. Water Resources Research, 2000, 36(2): 515-542.
- [3] 任华堂, 陈永灿, 刘昭伟. 大型水库水温分层数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2007, 22(6): 667-675.
- [4] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 384-396.
- [5] Burt W V. Verification of water temperature forecasts for deep, stratified reservoirs [J]. Water Resources Research, 1974, 10(1): 93-97.
- [6] Echevarría F, Rodríguez J. The size structure of plankton during a deep bloom in a stratified reservoir [J]. Hydrobiologia, 1994, 284(2): 113-124.
- [7] Elçi Ş. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality [J]. Limnology, 2008, 9(2): 135-142.
- [8] 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.
- [9] 田泽斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2083-2089.
- [10] 范成新. 涪湖沉积物理化特征及磷释放模拟[J]. 湖泊科学, 1995, 7(4): 341-349.

- [11] 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.
- [12] 刘建康, 曹文宣. 长江流域的鱼类资源及其保护对策[J]. 长江流域资源与环境, 1992, **1**(1): 17-23.
- [13] 李秋华, 商立海, 高廷进, 等. 喀斯特高原深水水库——万峰湖富营养化特征分析[J]. 生态科学, 2013, **32**(2): 194-199.
- [14] 简东, 黄道明, 常秀岭, 等. 红水河干流梯级运行后底栖动物的演替[J]. 水生态学杂志, 2010, **3**(6): 12-18.
- [15] 方艳红, 常秀玲, 黄道明, 等. 龙滩红水河龙滩水库浮游动物群落结构特征[J]. 水生态学杂志, 2011, **32**(5): 50-54.
- [16] 王崇, 憨雪莹, 黄道明, 等. 红水河龙滩水库浮游植物的群落结构特征[J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(6): 34-40.
- [17] 王崇, 谢山, 王进国, 等. 红水河龙滩水库鱼类资源调查[J]. 水生态学杂志, 2014, **35**(2): 39-48.
- [18] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J]. 生态科学, 2005, **24**(1): 9-11.
- [19] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 275-280.
- [20] 李祚泳, 张辉军. 我国若干湖泊水库的营养状态指数 TSIC 及其与各参数的关系[J]. 环境科学学报, 1993, **13**(4): 391-397.
- [21] 叶守泽, 夏军, 郭生练, 等. 水库水环境模拟预测与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 103-134.
- [22] 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.
- [23] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征[J]. 水利学报, 2013, **44**(4): 406-415.
- [24] 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.
- [25] 甘衍军, 李兰, 武见, 等. 基于 EFDC 的二滩水库水温模拟及水温分层影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(4): 476-484.
- [26] 韩博平, 石秋池, 陈文祥, 等. 中国水库生态学与水质管理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 525-547.
- [27] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.
- [28] Gallerano F, Ricci R, Viotti P. Analysis of the eutrophication trend in a deep lake [J]. Ecological Modelling, 1993, **66**(3-4): 157-179.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行