

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与磷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应

李磊^{1,2}, 李秋华^{1*}, 焦树林², 李钊¹, 肖晶¹, 邓龙¹, 孙荣国³, 高永春⁴, 骆兰⁴

(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. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 3. 贵州师范大学化学与材料学院, 贵阳 550001; 4. 贵州省水文水资源局, 贵阳 550002)

摘要: 为了解贵州高原小型水库的浮游植物功能群分布、富营养化状况以及浮游植物功能群如何响应富营养化特征, 于2014年7月25日至9月27日对小关水库浮游植物与水样进行每周一次的采样分析。结果表明, 浮游植物可分为22个功能群, S1、D、J、B、G、MP、L₀、SN、X1、Y、X_{ph}、F、T、W1为水库常见功能群, 其中S1、D、J为优势功能群。优势功能类群周动态变化为: S1→S1→S1→S1→S1→S1→S1→J/D/S1→S1→S1/D。功能群S1表现出绝对的优势地位, 其丰度于第5周与第7周出现两次峰值, 然而在第8周采样中丰度急速下降, 其后又有所回升, 但与两次峰值相比已经由10⁸ cells·L⁻¹下降至10⁷ cells·L⁻¹, 人工放闸导致的短期剧烈冲刷作用是主要原因。通过浮游植物功能群、藻类生物学评价以及综合营养指数三者综合评价发现, 小关水库正处于中度富营养-富营养化状态。经RDA分析得出, 透明度为影响浮游植物功能群分布的主要因子之一, 营养盐不再成为限制因子。研究结果表明, 功能群能够对富营养化特征做出良好响应: 优势功能群S1、J常共生于浑浊的富营养化水体中, 功能群D适应生境为浅的浑浊水体, 对营养耗尽敏感, G、X1、W1、F等常见功能群也都适于富营养化水体中生长。

关键词: 浮游植物功能群; RDA分析; 富营养化; 响应; 小关水库

中图分类号: X171; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4436-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.12.015

Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir

LI Lei^{1,2}, LI Qiu-hua^{1*}, JIAO Shu-lin², LI Yue¹, XIAO Jing¹, DENG Long¹, SUN Rong-guo³, GAO Yong-chun⁴, LUO Lan⁴

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. School of Chemistry and Material Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 4. Hydrology and Water Resources Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to explore the distribution characteristics of phytoplankton functional groups, eutrophication characteristics and response of phytoplankton functional groups to eutrophication in Xiaoguan Reservoir, phytoplankton and water samples were taken once a week from 25th July 2014 to 27th September 2014. The results showed that there were 22 phytoplankton functional groups, groups S1, D, J, B, G, MP, L₀, SN, X1, Y, X_{ph}, F, T and W1 were comparatively common functional groups, wherein, S1, D and J were the dominant functional groups. Weekly dynamics of phytoplankton functional groups were: S1→S1→S1→S1→S1→S1→S1→J/D/S1→S1→S1/D. group S1 dominated over other groups, the cell abundance of S1 appeared two peaks at week 5 and week 7 respectively, but there was a slump at week 8, and rose again at last, compared to two peaks before, the cell abundance had dropped from 10⁸ cells·L⁻¹ to 10⁷ cells·L⁻¹. Water flush caused by discharge gate opening artificially was the main reason. Based on the three methods of eutrophication evaluation, the water was in moderately eutrophic and eutrophic states in Xiaoguan Reservoir in the summer of 2014. Multivariate analysis (RDA) indicated transparency was the main factor affecting the distribution of phytoplankton functional groups, and nutrients were no longer the limiting factor. The study suggested that phytoplankton functional groups could make a good response to eutrophication; groups S1 and J adapted to the turbid eutrophic water bodies, D adapted to shallow turbid waters and was sensitive to nutrient depletion. Also, common functional groups like G, X1, W1, F etc. mostly adapted to eutrophic water bodies.

Key words: phytoplankton functional groups; redundancy analysis(RDA); eutrophication; response; Xiaoguan Reservoir

水库、湖泊水体富营养化逐年加剧, 目前已成为水环境保护突出的问题^[1], 浮游植物作为水生态系统生产过程中的最初和基础环节, 其群落的变化可以反映水体的营养状况和生态环境质量的变化^[2], 传统浮游藻类鉴定根据物种同源性特点将其归入不同的类群, 很少体现环境生态特征^[3], 具有一定局限性。Reynolds等^[4]于2002年提出相对完整的浮游藻类功

能群理论, 后经 Padisák等^[5]补充完善迄今共鉴定并

收稿日期: 2015-04-08; 修订日期: 2015-07-17

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[2014]7001); 贵州省教育厅项目(黔教合 KY 字(2013)113); 贵州省水利厅项目(KT201401)

作者简介: 李磊(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学, E-mail: penglilei89@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qiuhua2002@126.com

描述了 39 种浮游藻类功能群。目前功能群在浮游植物生态学中已成为国内外研究的热点问题^[6-12]。然而运用功能群对小型水库进行浮游植物群落结构分析与富营养化评价的研究还比较少,小型水体更易受外界物理因子及人为活动干扰,功能群能否正确评价这类水体的富营养化特征并做出响应?这类水体出现富营养化后浮游植物功能群分布与环境因子关系有何特殊性?本研究将一一进行分析探讨。本研究基于对小关水库夏季水质理化参数以及浮游植物的研究近况,结合功能群分类特征对其浮游植物进行功能群划分,分析在富营养化、水动力等条件下浮游植物功能群的分布特征及其影响因子以及功能群对富营养化特征的响应问题,并采用藻类生物学评价法、营养状态指数法以及浮游植物功能群生境指示法对小关水库富营养化进行综合评价,以期为贵州高原水库浮游植物研究及水资源管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 水库概况及采样点设置

小关水库地处贵阳市云岩区,属亚热带湿润型季风气候,年均气温 15.3℃,是一座集水面积约 29.5 km²,总库容达到 2.31 × 10⁶ m³ 的小型浅水水库。其功能是防洪以及向黔灵湖与南明河提供环境用水,自 2004 年以来,政府已投入上千万资金通过清淤、对水库水面进行日常保洁、投放鱼类、设置人工植物浮岛等进行水生态治理,以改善小关水库的水环境状况,然而收效甚微,近年来富营养化仍然严重,已出现多次水华,其生态状况令人担忧。

于 2014 年 7 月 25 日至 9 月 27 日进行 1 周 1 次、为期 10 周的采样,根据小关水库水域特点将采样点设在水库大坝 (E106°41'26.52", N26°37'34.27") 和上游 (E106°41'30.17", N26°37'56.71") (图 1)。

1.2 样品采集与分析

浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网于水平及垂直方向“∞”字形缓慢拖网,浮游植物定量样品于水下 0.5 m 处取 1.5 L 水样,带回实验室用 3% ~ 5% 福尔马林固定,于实验室进行镜检,藻种鉴定与分类方法参考文献 [13]。水温 (WT)、电导率 (EC)、溶解氧 (DO) 以及 pH 用 YSI 多参数水质检测仪现场测定,通过赛氏盘 (Secchi Disk) 对透明度 (SD) 进行测定,按照 GB 3838-2002《地表水环境质量标准方法》测定总磷 (TP)、总氮 (TN)、氨氮 (NH₄⁺-N)、硝氮 (NO₃⁻-N)、亚硝氮 (NO₂⁻-N) 与正磷酸盐 (PO₄³⁻-P) 等指标。用 0.45 μm 的醋酸纤维

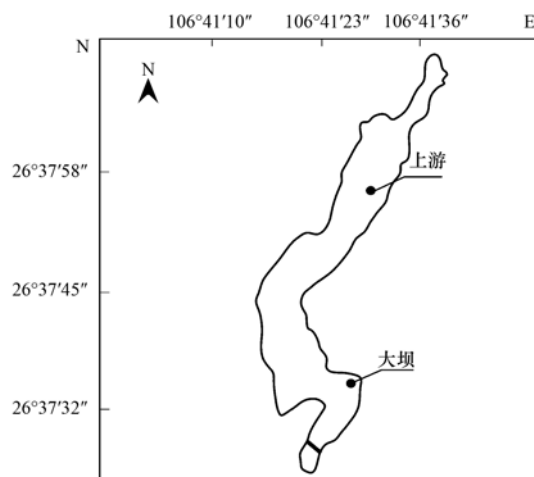


图 1 小关水库样点设置示意

Fig. 1 Sampling sites in Xiaoguan Reservoir

滤膜对叶绿素 a (Chla) 进行抽滤,水样为 500 mL,反复冻融浸提,运用丙酮萃取方法测定^[14]。

1.3 数据分析方法

1.3.1 单因素方差分析

对采样点大坝与上游的综合营养指数、环境因子进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 于 SPSS 19.0 软件下完成。

1.3.2 藻类生物学法

根据湖泊营养类型评价的藻类生物学指标与标准^[15],藻类丰度 (D) > 10⁸ cells·L⁻¹ 时为重度富营养状态, 80×10^6 cells·L⁻¹ < $D \leq 10^8$ cells·L⁻¹ 时为富营养状态, 40×10^6 cells·L⁻¹ < $D \leq 80 \times 10^6$ cells·L⁻¹ 时为中度富营养, 10×10^6 cells·L⁻¹ < $D \leq 40 \times 10^6$ cells·L⁻¹ 时为中营养状态, $D \leq 10^6$ cells·L⁻¹ 为贫营养状态。Chla 浓度 < 25 μg·L⁻¹ 时为中营养, Chla 浓度 < 50 μg·L⁻¹ 时为中富营养状态, Chla 浓度 < 500 μg·L⁻¹ 时为富营养状态。

1.3.3 综合营养状态指数

采用综合营养状态指数法评价水体营养状态,其公式为:

$$TSI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \times TSI(j)$$

式中, $TSI(\sum)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TSI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数; m 为评价参数的个数。

1.3.4 数据处理

采用 SPSS 计算综合营养指数 TLI 值并进行单因素方差分析。小关水库的浮游植物物种数据与环境因子的 RDA 分析在 Canoco 4.5 软件包上运行,通

过浮游植物常见功能群丰度指标来反映浮游植物种类与环境因子之间的关系,为获得数据正态分布,将物种数据以及环境因子(pH除外)数据进行lg($x+1$)转换. 其他图表均由 Excel 绘制.

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构及功能群划分

调查中,共鉴定出浮游植物 78 种(包括变种、变型),隶属于 7 个门. 其中绿藻门 43 种,蓝藻门 16 种;硅藻门 11 种;裸藻门 3 种;甲藻门 2 种;隐藻门 1 种;金藻门 2 种. 其中绿藻门最多,占总数的 55.1%;其次为蓝藻门和硅藻门,分别占 20.5%、14.1%,其他几门相对较少. 此外,蓝藻占总丰度的 15.4%~98.2%,均值为 84.6%,绿藻占总丰度的 1.89%~65.5%,均值为 9.91%,硅藻占总丰度的 0.87%~38.1%,均值为 9.76%(图 2). 可知小关水库夏季浮游植物群落结构为蓝-绿-硅藻型. 参考 Reynold 等提出的功能群分类方法^[4,5],结合水库的水质及生态状况,划分出 A、B、D、E、F、G、H1、J、L_M、L_O、M、MP、P、S1、SN、T、W1、W2、X1、X3、X_{ph}、Y 共计 22 个功能群. 频率分析发现,功能

群 S1、D、J、B、G、MP、L_O、SN、X1、Y、X_{ph}、F、T、W1 在水体中出现频率达到 50% 以上,为这次调查中的常见功能群,W2、E、LM 出现频率在 30%~50% 之间,只在适宜条件下出现,而 P、A、H1、X3、M 出现几率较低. 如果某个功能类群在至少 1 个采样点的相对丰度比例>10%,则达到优势地位,称之为优势功能群,分别为 S1、D 与 J 这 3 个功能群. 根据浮游植物功能群对物质和能量供给变化划分其 C-R-S 生长策略,C 型在物质和能量均充分的条件下占优,R 型对能量限制的情况下具有耐受性,S 型在物质限制下占优. 各优势功能群的代表性藻种(属)及其 C-R-S 生长策略见表 1.

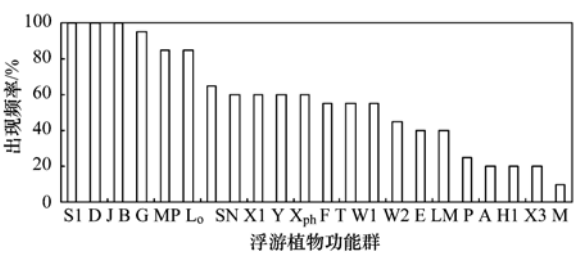


图 2 小关水库浮游植物功能群频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of phytoplankton functional groups in Xiaoguan Reservoir

表 1 浮游植物常见功能群的代表性藻种及其 C-R-S 生长策略

Table 1 Phytoplankton functional groups and their growth strategies

常见功能群	代表性藻种	生长策略
S1	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. 湖丝藻属 <i>Limnothrix</i> sp.	R
J	栅藻属 <i>Scenedesmus</i> sp. 盘星藻属 <i>Pediastrum</i> sp. 集星藻属 <i>Actinastrum hantzschii</i> sp. 空星藻属 <i>Coelastrum sphaericum</i> sp.	CR
D	针杆藻属 <i>Synedra</i> sp.	R
B	小环藻属 <i>Cyclotella</i> sp.	CR
G	四鞭藻属 <i>Carteria</i> sp. 空球藻属 <i>Eudorina elegans</i> sp.	CS
MP	颤藻属 <i>Oscillatoria</i> sp. 舟形藻属 <i>Navicula</i> sp. 曲壳藻属 <i>Achnanthes</i> sp.	CR
L _O	甲藻属 <i>Pyrrophyta</i> sp. 色球藻属 <i>Chroococcus</i> sp.	S
SN	拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp.	R
X1	小球藻属 <i>Chlorella</i> sp. 纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i> sp. 弓形藻属 <i>Schroederia</i> sp.	C
Y	隐藻属 <i>Cryptophyta</i> sp.	CRS
X _{ph}	透镜壳衣藻 <i>Phacotus lenticularis</i>	C
F	卵囊藻属 <i>Oocystis</i> sp. 蹄形藻属 <i>Kirchneriella</i> sp.	CS
T	转板藻属 <i>Mougeotia</i> sp. 并联藻属 <i>Quadrigula</i> sp.	R
W1	裸藻 <i>Euglenophyta</i> sp.	R/CS

2.2 浮游植物优势功能群的动态变化

大坝功能类群动态变化主表现为 S1→S1→S1→S1→S1→S1→J/D/S1→S1→S1/D, 上游功能类群动态变化主要过程为 S1→S1→S1→S1→S1→S1→S1→J/D/S1→S1→S1(图 3~4), 两者变化趋势大体相同. 从相对丰度上看, 优势功能群 S1、J、D 占总丰度的 84.3% 以上. 其中蓝藻门的功能群 S1

(以湖泊假鱼腥藻为主) 占绝对优势,除了于第 8 周仅为 15.0% 之外,其余时期均在 74.4% 以上,最高值达到 91.1%,而绿藻门的功能群 J 仅在第 8 周占绝对优势,相对丰度为 65.1%,硅藻门的功能群 D 也在第 8 周占优,相对丰度为 13.9%,此外于第 10 周的大坝再次占据优势,达到 14.2%. 调查期间(图 5),绝对优势功能群 S1 丰度表现出一定的规律

性. 采样点大坝与上游变化趋势基本保持一致, 均从第1周至第4周缓慢增长, 于第5周出现第一次峰值, 第6周有所下降, 第7周出现第二次峰值, 并于第二次峰值之后的第8周滑入最低谷(此时正值

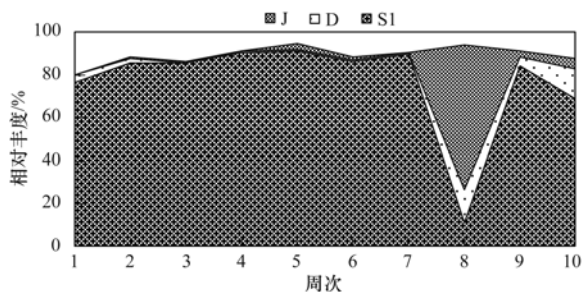


图3 大坝浮游植物优势功能群周变化
Fig. 3 Weekly dynamics of dominant phytoplankton functional groups in the Dam site

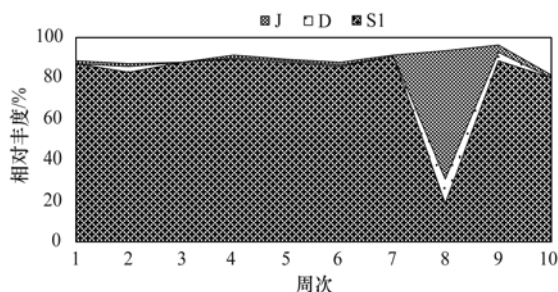


图4 上游浮游植物优势功能群周变化
Fig. 4 Weekly dynamics of dominant phytoplankton functional groups in the upstream site

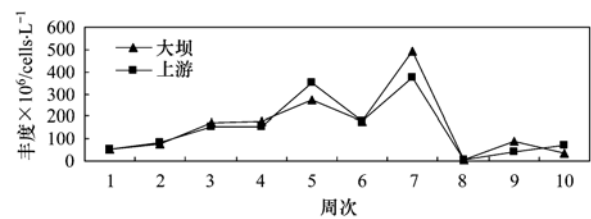


图5 功能群 SI 周变化
Fig. 5 Weekly dynamics of SI in Xiaoguan Reservoir

秋初), 稍后又有所增长, 但丰度上与两次峰值相比已从 $10^8\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $10^7\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.3 理化因子及综合营养指数

小关水库的理化因子见表2, 对大坝与上游的环境因子进行单因素方差分析, 结果均显示 $P > 0.05$, 即差异不显著, 表明小关水库水体交换能力较强. 采样期间, TN、TP 营养盐平均值分别为 $1.785\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $0.078\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远高于国际上一般标准的水体富营养化发生的质量浓度. 此外, 溶解性氮、磷值均表现出较大的变化趋势. 由于采样时间为夏季, WT 较高, 其均值达到 24.83°C , 其变化范围相对较小. SD 在 $0.500\sim0.950\text{ m}$ 范围内变化, 总体表现较低. Chla 表现出较高的质量浓度, 最高值达到 $135.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其变化波动较明显. DO 最低值、最高值相差 $7.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 波动幅度也较大. 此外, EC 也有较大的波动, 而 pH 值变化幅度较小.

表2 小关水库水质理化指标

Table 2 Physico-chemical parameters of water quality in Xiaoguan Reservoir

理化因子	大坝		上游	
	范围	平均值	范围	平均值
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.060 ~ 2.920	1.680	1.190 ~ 3.270	1.890
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.019 ~ 0.120	0.072	0.027 ~ 0.116	0.084
NO_3^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.021 ~ 1.458	0.573	0.056 ~ 1.347	0.653
NO_2^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.011 ~ 0.355	0.138	0.010 ~ 0.328	0.150
NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.020 ~ 0.792	0.311	0.013 ~ 0.886	0.318
PO_4^{3-} -P/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.002 ~ 0.016	0.007	0.003 ~ 0.014	0.009
WT/ $^\circ\text{C}$	22.80 ~ 27.50	24.73	22.40 ~ 27.70	24.93
EC/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	0.310 ~ 0.436	0.402	0.331 ~ 0.447	0.406
SD/m	0.600 ~ 0.950	0.732	0.500 ~ 0.800	0.615
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.960 ~ 11.14	7.403	6.440 ~ 12.80	7.917
pH	7.880 ~ 8.840	8.562	8.190 ~ 9.090	8.755
Chla/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	44.25 ~ 125.7	87.10	45.29 ~ 135.3	93.91

采用 Chla、TP、TN、SD 作为水体综合营养状态评价指标. 通过小关水库各个理化指标参数可得到各指标的营养状态指数, 然后通过综合营养状态指数对水库的水质进行富营养化评价. 利用 SPSS 19.0 对采样点大坝与上游的综合营养指数进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 得 $F = 2.23, P >$

0.05 , 即差异不显著, 因此对两采样点的综合营养指数取平均值, 不再分开讨论分析. 根据中国环境监测总站有关湖泊(水库)营养状态分级规定, $50 < \text{TLI}(\sum) \leq 60$ 为轻度富营养, $60 < \text{TLI}(\sum) \leq 70$ 为中度富营养, 小关水库综合营养状态指数基本处于中度富营养状态(见图6).

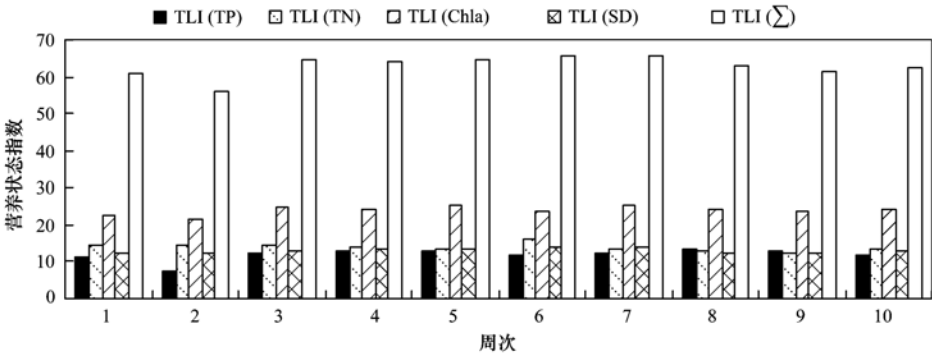


图6 小关水库综合营养指数周变化

Fig. 6 Weekly dynamics of the comprehensive trophic state index (TLI) in Xiaoguan Reservoir

2.4 浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析

对物种数据进行除趋势对应分析 (DCA) 选择排序模型,运用 Canoco 4.5 软件分析得出:最大梯度长是 0.704,故对数据进行冗余分析 (RDA). 对物种数据进行筛选,选择 14 个常见功能群用于排序. 环境因子包括 TP、TN、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P、WT、DO、pH、EC、N/P、SD、Chla 共 11 个,采用蒙特卡拟合方法对物种数据及环境因子进行显著性检验. 通过筛选,仅有 SD、Chla 两个具有显著解释性的环境变量,与物种变量进行 RDA 分析 (图 7). 结果显示:第 1 轴的特征值达到 0.696,说明第 1 轴能解释绝大部分的浮游植物分布. 环境因子 SD、Chla 与轴 1 的相关系数分别为 -0.804、0.727,与浮游植物分布关系密切. Chla 与功能群 S1、J、SN 等大部分功能群呈正相关,表明浮游植物丰度与 Chla 呈正相关,其中 S1、SN、T、F、W1、 L_0 对 Chla 贡献较大,然而除功能群 D 之外,透明度与功能群 S1、J、SN 等大部分功能群呈负相关.

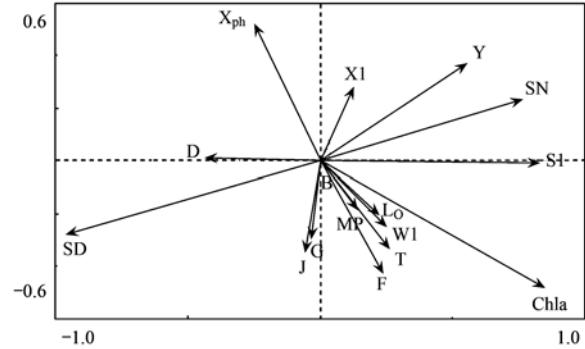


图7 浮游植物功能群丰度与环境因子的 RDA 分析

Fig. 7 Redundancy analysis of phytoplankton functional groups related to environmental factors

3 讨论

3.1 小关水库富营养化综合特征

湖泊富营养化评价主要有特征法、参数法、藻类生物学法、营养状态指数法、灰色系统法及应用模糊数学等系列方法,对湖泊富营养化进行单一的方法评价往往不够客观,缺乏说服力,因此本研究中主要采用藻类生物学评价中的丰度指标、叶绿素指标,营养状态指数法以及浮游植物功能群几种方法对小关水库富营养化进行综合评价. 在 10 次采样中,浮游植物丰度变化范围在 $2.59 \times 10^7 \sim 5.10 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,其中 5 次为极富营养状态,4 次为中富营养状态,一次为中营养状态; Chla 浓度最低值为 $44.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值为 $128.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,9 次处于富营养状态,1 次处于中富营养状态,富营养状态占绝大多数; 综合营养状态指数在 55.76 ~ 65.81 间变动,9 次为中度富营养,一次为轻度富营养,表明对大多数处于中度富营养状态; 优势功能群 S1、J 常生长于浑浊的富营养化水体,D 在浑浊的,含有营养盐的水体中生长良好并对营养盐缺乏敏感. 功能群 B 生长于中营养水体,G 生长于富营养水体,MP 适合生长于浑浊的浅水水体, L_0 于各种营养等级水体均能生长,SN 生长于混合水体,X1、W1 均适合于高富营养水体生长,功能群 Y 于静止水体生长良好, X_{ph} 生长于含钙高,碱性的小型水体,对低营养敏感,F 生长于中到富营养水体,T 生长于混合水体,对营养缺乏敏感^[5]. 以上常见功能群基本于富营养化水体生长良好,且大都属于 C、R 与 C/R 型策略功能群,在理想的物质和能量供给条件下能在竞争中获胜而取代其他藻种,因此由功能群可以判定小关水库处于富营养化状态,这与叶绿素指标评

价以及综合营养状态指数法评价结果基本一致。由于该水库假鱼腥藻在丰度上占据绝对优势,然而作为小型丝状藻种,假鱼腥藻的细胞体积远低于大多数藻类,在生物量上不占优势,因此以藻类丰度作为判定水体富营养化的标准在本研究中并不适用,容易出现评价结果偏大,不能够真实反映水体水质情况的问题,可以滤选掉。通过对藻类生物学叶绿素指标、营养状态指数以及浮游植物功能群这3种方法的综合评价,得出小关水库处于中度富营养-富营养化状态。值得一提的是,营养盐、丰度、叶绿素各项指标均已超过水体发生水华的最低阈值,然而该水库并未发生水华,这可能与降雨、水体混合以及假鱼腥藻为该水库绝对优势种相关,当然这需要更多的数据分析加以明确。

3.2 浮游植物功能群对水库富营养化特征的响应

水生生态系统中浮游植物种类和数量与水体环境之间存在着紧密关系^[16]。小关水库作为一座小型浅水水库,且处于富营养化状态,浮游植物功能群与环境因子的关系具有其独特性。RDA 分析表示SD 是浮游植物优势功能群分布主要影响因子。虽然 RDA 分析中,WT 与浮游植物分布相关性不显著,但由于本次调查时间在夏季,WT 较高,适合蓝藻和绿藻生长,而蓝、绿藻又为本次调查的优势藻种,因此 WT 也是影响浮游植物种类组成和数量的一个主要因素。Chla 是浮游植物重要的组成成分之一,与浮游植物的种类、丰度以及生物量密切相关,是反映水质的综合评价指标,一般而言,浮游植物丰度越高,Chla 质量浓度越高,所以本研究中 Chla 与功能群丰度呈显著正相关不能说明其是影响浮游植物分布的主要影响因子,故影响浮游植物优势功能群分布的主要因子为 WT 与 SD。虽然该水库常见功能群大都适于富营养水体生长,但未分析出氮、磷营养盐与浮游植物功能群分布呈显著相关关系,可见富营养化的小关水库中,较高的氮磷营养盐不再成为浮游植物功能群分布的限制因子,这与文献^[17]的研究结果一致。

S1 功能类群适应生境为浑浊的混合水体环境^[5],且于中富营养水体中生长良好^[10],主要的代表种类是湖泊假鱼腥藻。国内外水体研究中以 S1 类为优势功能群的现象普遍存在^[18~22]。近年来贵州高原有关假鱼腥藻优势种的报道也越来越多,如贵阳市内的红枫湖水库、百花湖以及黔东南的三板溪水库^[10, 23, 24]。最近有研究表明假鱼腥藻成为优势种的水体不容易发生蓝藻水华^[21, 22]。本研究中功

能群 S1 在丰度上占据绝对优势,这可能是因为夏季气温较高,适于假鱼腥藻等蓝藻生长,且多强对流暴雨天气,大量外源物质对库区营养盐进行补充,同时造成水体浊度升高,透明度降低,进而光限制增强,而 S1 作为典型的 R 型策略功能群,对能量输入(光照辐射)具有较高的耐受性^[25],此外该水库属于浅水水体,水体上下层水温差异较小,不易产生分层,同时易受风力,降雨等物理因子干扰,使得水体混合良好,十分适合 S1 生长,成为绝对优势功能群。然而功能群 S1 在最后几周的秋季采样中其丰度与优势度均有所下降,第 8 周采样优势度已跌破至 15.0%,且在镜检中,大量假鱼腥藻处于分解状态。与前几周相比,这次水库水位明显下降,据此推测在此期间小关水库工作人员为了给下游的黔灵湖与南明河补充水源,进行了一次大规模的开闸放水,强烈的冲刷作用导致了假鱼腥藻的大量死亡。功能群 J 适应生境为浅的、混合的高富营养水体^[5]。该水库中功能群 J 的主要代表种类是栅藻,盘星藻与空星藻。虽然仅于第 8 周采样中占据绝对优势,但其包含的种类最多,达到 13 种,占有总类数的 16.7%,且出现频率达到 100%,为第二优势功能群。其在该水库广泛存在可能是因为流域内的云岩区雅关村、偏坡村,高新区的大关村境内,存在许多养猪大户、豆腐作坊,这些场所产生的猪粪、废水未经过处理排进库区,带入大量有机质,造成水体高度富营养化,十分利于其生长。此外, J 作为 CR 型策略功能群,在理想的物质和能量供给条件下能在竞争中获胜而取代其他藻种直至达到顶级状态,并且对能量输入(光照辐射)具有较高的耐受性^[25]。Romo 等发现^[26], S1 与 J 常共生于浑浊的富营养化水体中,这在本研究中得到了验证。D 功能群耐受冲击,对营养耗尽敏感,适应生境为浅的浑浊水体^[5],主要优势种为硅藻门的针杆藻。作为 R 型策略功能群,对能量输入(光照辐射)具有较高的耐受性^[25],其本身在夏季就具有其优越性,此外,小关水库下游为黔灵湖及南明河,为满足市民生活、旅游、休闲等需求,库区需要不时进行开闸放水,造成水力滞留时间短,从而利于耐冲刷的功能群 D 占据优势,而这种优势在大坝采样点更为明显。值得一提的是,此次采样中在贵州高原鉴定出了一种能指示喀斯特水库多钙且碱度高的功能群 X_{ph} , 代表性藻种为透镜壳衣藻。其生境为小型碱性湖泊,钙含量丰富且光照充足^[5],调查中,出现频率达到 60%。作为典型的高原喀斯特小型水库,小关水库也具有

含钙高,呈碱性的特点,然而该水库夏季浊度高,透明度低,这也一定程度上影响了光照强度,限制了 X_{ph} 的生长。

从小关水库优势功能群的出现及其演变上看,整体上变化不大。从第1周到第7周两采样点均以S1为绝对优势功能群,第8周起开始出现大的变化,功能群J/D/S1共同占据优势地位,其后又回到以S1为绝对优势功能群的局面。采样期间,均以功能群S1(第8周除外)为绝对优势功能群,而导致优势功能群于第8周出现大的变化则主要是因为这次大规模的开闸放水,水力冲刷作用变强,对冲刷敏感的功能群S1大量死亡,而这却为适宜浅水水体的功能群J以及耐冲刷的功能群P提供了条件。据Padisák等学者研究表明^[5],功能群J适宜于低梯度变化的河流,这是否也能说明功能群J对冲刷也具有一定的耐受性,这在文中得到了一定的论证。总体来说,功能群S1、J以及D的适宜生境均为浑浊或混合的富营养性水体,小关水库在夏季恰好具备了这样的生境条件。小关水库夏季处于中度富营养-富营养化状态,而该时期降水丰富且多暴雨,小型水体更易受降雨等物理因子影响,上游带来的小量洪水也足以使库区水体变得浑浊。因此,功能群可以对浅水水体的富营养化特征以及水动力条件做出有效响应。

4 结论

(1)小关水库共检出22个功能类群,分别为:A、B、D、E、F、G、H1、J、 L_M 、 L_O 、M、MP、P、S1、SN、T、W1、W2、X1、X3、 X_{ph} 、Y。其中功能群S1、D、J、B、G、MP、 L_O 、SN、X1、Y、 X_{ph} 、F、T、W1为水库常见功能群,S1、J、D为优势功能群。其生长策略主要表现为C/R/CR型。

(2)经浮游植物功能群、藻类生物学以及综合营养指数综合评价得出小关水库处于中度富营养-富营养化状态,运用浮游植物功能群对小型水库进行富营养化评价同样适用。

(3)该水库营养盐含量丰富,不再成为影响浮游植物功能群分布的限制因子,反而是透明度、水温成为影响浮游植物功能群分布的关键因子。

(4)浮游植物功能群可以对浅水水体的富营养化特征做出有效响应。

参考文献:

[1] Zhu W, Wan L, Zhao L F. Effect of nutrient level on phytoplankton community structure in different water bodies[J].

Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(1): 32-39.

- [2] Liu C Q, Liu L S, Shen H T. Seasonal variations of phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Lake Baiyangdian, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1622-1631.
- [3] 董静,李艳晖,李根保,等. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因子[J]. 水生生物学报, 2013, 37(5): 836-843.
- [4] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(5): 417-428.
- [5] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. Hydrobiologia, 2009, 621(1): 1-19.
- [6] Becker V, Huszar V L M, Crossetti L O. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir[J]. Hydrobiologia, 2009, 628(1): 137-151.
- [7] Abonyi A, Leitão M, Lançon A M, et al. Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France)[J]. Hydrobiologia, 2012, 698(1): 233-249.
- [8] Demir A N, Fakioğlu Ö, Dural B. Phytoplankton functional groups provide a quality assessment method by the Q assemblage index in Lake Mogan (Turkey)[J]. Turkish Journal of Botany, 2014, 38(1): 169-179.
- [9] Stević F, Mihaljević M, Špoljarić D. Changes of phytoplankton functional groups in a floodplain lake associated with hydrological perturbations[J]. Hydrobiologia, 2013, 709(1): 143-158.
- [10] 卢金锁,胡亚潘. 深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2611-2617.
- [11] 黄国佳,李秋华,陈椽,等. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 1-14.
- [12] 胡韧,蓝于倩,肖利娟,等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法与应用[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 11-23.
- [13] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] Lin S J, He L J, Huang P S, et al. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton[J]. Ecologic Science, 2005, 24(1): 9-11.
- [15] 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.
- [16] Götzenberger L, de Bello F, Bräthen K A, et al. Ecological assembly rules in plant communities—approaches, patterns and prospects[J]. Biological Reviews, 2012, 87(1): 111-127.
- [17] 方丽娟,刘德富,杨正健等. 三峡水库香溪河库湾夏季浮游植物演替规律及其原因[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 234-240.
- [18] Soyulu E N, Gönülol A. Functional classification and composition

- of phytoplankton in Liman Lake[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2010, **10**(1): 53-60.
- [19] Borics G, Tóthmérész B, Lukács B A, *et al.* Functional groups of phytoplankton shaping diversity of shallow lake ecosystems [J]. Hydrobiologia, 2012, **698**(1): 251-262.
- [20] 张婷, 李林, 宋立荣. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化[J]. 生态学报, 2009, **29**(6): 2971-2979.
- [21] Tian C, Lu X T, Pei H Y, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in Dongping Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(3): 2627-2645.
- [22] Lu X T, Tian C, Pei H Y, *et al.* Environmental factors influencing cyanobacteria community structure in Dongping Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(11): 2196-2206.
- [23] 黄志敏, 陈椽, 刘之威, 等. 贵州百花湖夏季浮游植物昼夜垂直分布特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(19): 5389-5397.
- [24] 黄国佳, 李秋华, 陈椽, 等. 贵州高原三板溪水库浮游植物功能群时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 418-428.
- [25] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [26] Romo S, Villena M J. Phytoplankton strategies and diversity under different nutrient levels and planktivorous fish densities in a shallow Mediterranean lake [J]. Journal of Plankton Research, 2005, **27**(12): 1273-1286.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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