

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征

杨毓^{1,2}, 卢金锁^{1,2*}, 张颖^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室培育基地, 西安 710055)

摘要: 以藻类形态功能组 (morphologically-based functional groups, MBFG) 藻种在光学显微镜下的形态特征为基础, 对具有相同形态特征的藻种进行分组, 形成了面向藻类集群形态属性的功能组别。为了解藻类形态功能组在研究深水型水库藻类变化规律中的应用及藻类演替特征, 于 2011 年 8 月至 2013 年 7 月对西安市金盆水库进行采样分析, 采用形态功能组分类方法对金盆水库中检测出的藻类进行了分类, 结合冗余分析探讨了藻类形态功能组演替及其与环境因子间的相互关系。结果表明, 黑河金盆水库中的藻类可以分为 5 个形态功能组别: II、IV、V、VI、VII; 水库中春夏季多种藻类形态功能组共存, 秋冬季藻类形态功能组结构较为单一; 在沿水深的纵向演替过程中, 各形态功能组的生物密度随水深的增加而减少; 在影响形态功能组演替的各个环境因子中, 温度对水库表层藻类形态功能组 IV 和 VI 影响较大; 表层以下各研究水层, TN 的质量浓度为藻类形态功能组 VI 的显著影响因素。

关键词: 金盆水库; 藻类形态功能组; 藻类功能组演替; 环境因子; 相关关系

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0121-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201603096

Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir

YANG Yu^{1,2}, LU Jin-suo^{1,2*}, ZHANG Ying^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of West Building Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Morphologically-based functional groups (MBFG) is the basis for a simple way of distinguishing the phytoplankton to cluster species according to their similar morphological traits observed by optical microscope. In order to understand the application of morphologically-based functional groups (MBFG) in the research on phytoplankton community structure and variation of deep-water reservoir, as well as the succession characteristics of algae, the Jinpen Reservoir was studied from August 2011 to July 2013. Using morphologically-based functional groups (MBFG), the phytoplankton communities found in the reservoir were classified to functional groups, and the relations between the morphologically-based functional groups succession and environment cases were explored with redundancy analysis (RDA) method. The results suggested that five morphologically-based functional groups were found in the reservoir, namely II, IV, V, VI, VII; The succession of reservoir algal functional groups had seasonal characteristics, a variety of Morphologically-based functional groups coexisted in spring and summer, while reservoir algal functional groups were relatively simple in autumn and winter; meanwhile, the density of each morphologically-based functional group decreased with the increase of water depth among the environmental factors, morphologically-based functional groups IV and VI were respectively affected by temperature; the other water layers of the reservoir morphologically-based functional groups VI was significantly affected by TN content.

Key words: Jinpen Reservoir; morphologically-based functional groups (MBFG); functional groups succession; environmental factors; related relationship

浮游植物作为水域环境中的主要初级生产者 and 食物链的基础环节, 在物质循环和能量转化过程中起着重要作用, 相比于其他水生植物, 浮游植物生长周期短, 对环境变化较为敏感, 其群落组成和种群变化能够直接快速地反映水环境的变化^[1], 同时环境条件的改变也直接或间接地影响到浮游植物的群落结构^[2]。在浮游植物群落生态学研究, 有传统的基于系统发生论的群落分类方法, 将浮游植物分为蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、金藻门、隐藻门、裸藻门和黄藻门, 以研究浮游植物的演替特征^[3, 4]; 国内外已有许多学者采用较为简便的藻类

功能分组 (phytoplankton functional classification) 的方法来研究一些湖泊和水库的营养状态和浮游植物群落动态^[5~8]。

藻类功能分组 (phytoplankton functional classification) 是国外研究富营养化方面的重要成果和研究热点^[9~14]之一。它以藻种生理生长特征及其环境

收稿日期: 2016-03-12; 修订日期: 2016-08-19

基金项目: 陕西省青年科技新星项目 (2012KJXX-32); 国家自然科学基金项目 (51008242)

作者简介: 杨毓 (1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为水源保护及净水处理, E-mail: yangyu8608@mail@163.com

* 通信作者, E-mail: lujinsuo@163.com

适应性机制为基础,对具有相同适应性特征、易于在相同生境条件下共存的藻种进行归类分组,形成面向藻类集群(phytoplankton assemblages)生态属性的功能群组别^[15],更直接地将藻类生境特征与藻类群落生态过程相互结合^[15],简化了传统生物分类系统的复杂性^[16],为更合理地揭示生境变化对藻类集群的选择机制、预测藻类群落演替结果提供有力的工具^[17]。

目前常用于研究藻类的功能组类群有:功能组(functional group, FG)和形态功能(morphology-based functional group, MBFG)。Reynolds 等^[15]以浮游植物的形态、生理、生态特性为基础,了解相似集群对环境适应性的难度,借用陆地植物生态学概念定义了31种特定生境模式下的浮游植物功能类群。Padisák 等^[16]在此基础上根据功能类群对某些环境因子的敏感性和耐受性,重新定义了功能类群,将具有相似环境适应性的浮游植物归为一类,完善了浮游植物功能群。Kruk 等^[18]在前人研究基础上提出了更为简便直观的形态功能群(MBFG),仅以浮游植物在光学显微镜下所观察的形态特征为基础,定义了7个功能组类群。目前国内采用形态功能组(MBFG)对深水型水库浮游植物群落动态的研究尚不多见。

藻类形态功能组(MBFG)根据浮游植物的形态特征,仅依据浮游植物的大小和比表面积,以及鞭毛、硅质细胞壁、胶被和伪空胞的有无,将浮游植物分为7个功能组类群,为研究浮游植物群落的演替提供了新的思路和方法,也减少了研究浮游植物演替的工作量,同时使得从浮游植物的演替观察水库水质提供了更为简便的反映依据。

深水型水源水库作为重要的水域环境之一,具有水面宽、水深大、流速缓等有别于天然河流湖泊的特点。因水体流速变缓,入库水体携带的各种营养物质会在库区中富集,易造成水体的富营养化,进而导致藻类的季节性高发^[19],降低水源水质,系统地研究深水型水库中藻类的演替规律,对深入了解水库生态系统的结构和功能、保护和改善水环境质量具有重要的理论和实际意义。

本文的目的是应用藻类形态功能组(MBFG)方法,探究深水型水库中藻类形态变化特征及功能组演替规律,以及研究影响藻类演替的主要环境因子,以期为水库的管理和治理提供更为简便直观的指导与建议。

1 材料与方法

1.1 研究区域与取样方法

金盆水库于陕西省黑河峪口以上约1.5 km处,

距西安市86 km,是西安最主要的地表饮用水供水水源,水库主库区最大水深可达90~105 m,平均水深60~95 m。水库设计正常高水位594 m,正常低水位为570 m,总库容为 $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

选取水库一点为取样点,自2011年8月至2013年7月,沿纵向每月进行1次采样,采样水深为0、5、10、20、30、40、50、60 m,采样时间控制在当日11:00~15:00。采用美国哈希公司产品Hydrolab多参数水质分析仪DS5进行现场水温等指标测定。现场取1000 mL水样,加10 mL鲁哥试剂固定,用于实验室藻细胞密度计数及藻种鉴定,剩余水样完成所有化学指标的分析测定。

1.2 藻类监测及分析方法

将加有鲁哥试剂的水样静置48 h后浓缩至50 mL,在普通光照显微镜下进行藻类鉴定、计数^[20]。藻类鉴定及计数方法参考文献[21],计数方法如下:显微镜采用10×40放大倍数,藻类计数框为20 mm×20 mm规格的SR-藻类计数框,其计数体积为0.1 mL,计数方格100个。按照下列公式计算藻类生物量:

$$N = \left[\frac{A}{A_c} \times \frac{V_s}{V_a \cdot V} \right] \cdot n \quad (1)$$

式中, N 为每升原水中的浮游植物生物密度($\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$); A 为计数框面积(mm^2),为 400 mm^2 ; A_c 为计数面积(mm^2),即视野面积×视野数,为 15.9 mm^2 ; V_s 为1 L水原水样中沉淀浓缩后的体积(mL),为50 mL; V_a 为计数框的体积(mL),为0.1 mL; V 为测试水样量,为1 L; N 为计数所得浮游植物的数目。

根据Kruk等^[18, 22]的研究成果对检出的藻种进行分类,对个别形态特征不明显的藻种,则结合前人研究结果和形态特征,粗判其功能群组别。现场采用美国哈希公司产品Hydrolab多参数水质分析仪DS5测定水温,实验室采用德国BranLuebbe公司产品Auto Analyzer3测定 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度,过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测TP的质量浓度。采用CANOCO5.0软件对水库的藻类功能组数据进行趋势对应分析,选择冗余分析(RDA)方法分析藻类功能群组与环境因子的关系,藻类形态功能组的生物密度和环境因子数据均经过 $\lg(x+1)$ 转换。

2 结果与分析

2.1 藻类形态功能组及代表藻种

研究期间深水型水库的水体中共发现5个形态

功能组: II、IV、V、VI、VII。其中,形态功能组 VI、IV 较为常见,分别占检测到的藻种总数的 85.67% 和 11.88%,形态功能组 V 占 2.1%,形态功能组 II 和 VII 出现的频率最低,几乎没有。各形态功能组的划分可依据图 1^[18]。参照淡水植物藻类图谱,研究期间监测到的藻类共有 4 门 27 属,包括绿藻门 14 属、硅藻门 10 属、蓝藻门 2 属、金藻门 1 属。其中具有个体小,有鞭毛和硅质细胞壁等形态特点的

金藻,划入形态功能组 II;没有明显特征的中等大小藻种,如绿球藻目、颤藻目、黄藻纲和接合藻纲划入形态功能组 IV;中等到大型的有鞭毛的单细胞种类,如隐藻、甲藻、裸藻、团藻等划入形态功能组 V;无鞭毛有硅质细胞壁的硅藻划入形态功能组 VI;形态功能组 VII 具有胶被,比表面积低、群体较大等特点,主要包括色球藻、绿球藻和颤藻等。其各形态功能组的主要代表性藻种如表 1 所示。



图 1 MBFG 功能组的分类

Fig. 1 Key for classifying phytoplankton into morphologically based groups

表 1 研究期间金盆水库藻类形态功能组 (MBFG) 代表藻种

Table 1 Representative species of morphologically-based functional groups in Jinpen Reservoir during the study period	
功能组别	代表藻种(属)
Group II	金怀藻 <i>Prymnesium</i>
Group IV	小球藻 <i>Chlorella</i> 、浮球藻 <i>Planktosphaeria</i> 、卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.、四角藻 <i>Tetraedron</i> 栅藻 <i>Scenedesmus</i> 、并联藻 <i>Quadrigula chodatii</i> 、棒条藻 <i>Rhabdoderma</i>
Group V	实球藻 <i>Pandorina morum</i> 、绿梭藻 <i>Chlorogonium</i> 、空球藻 <i>Eudorina</i> sp.
Group VI	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.、针杆藻 <i>Synedra</i> sp.、直链藻 <i>Melosira</i> sp.、舟形藻 <i>Navicula</i> sp. 羽纹藻 <i>Pinnularia</i> 、冠盘藻 <i>Stephanodiscus</i>
Group VII	平裂藻 <i>Merismopedia</i> 、蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> sp.、空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.、盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp. 腔球藻 <i>Coelosphaerium</i> 、微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.

2.2 藻类形态功能组演替特征

如图 2 所示,在水库的表层,形态功能组 VI 生物密度最多,占表层藻种总生物密度的 77.93%,分布时间跨度较大,在整个研究期间均检测出功能组 VI 的存在,且在夏秋季出现的频率高达 64.33%,分别在 2012 年 7 月、2011 年 9 月、2013 年 5 月出现峰值,在 2013 年 5 月其生物密度达到最大值 $495.08 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;形态功能组 IV 主要出现在夏秋季,生物密度占整个研究期间其生物总量的 60.17%,在

2012 年 9 月和 2013 年 7 月,其生物密度分别达到季节峰值 $165.47 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $260.91 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,秋冬季形态功能组 IV 几乎没有出现。形态功能组 VII 在整个研究期间仅出现在夏秋季,其生物密度在 2013 年 7 月达到最大值 $95.6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;形态功能组 II、V 仅在 2012 年夏季出现,生物密度最少。

结合图 2~5,可以看出水库的藻类群落在纵向分布上具有一定的规律性,水库藻类形态功能组 VI、

IV的生物密度随水深的增加而相应递减,且20 m、40 m、底部的藻类形态功能组VI、IV的季节演替与表层具有一定的相似性,即:形态功能组VI、IV在各个水层的分布与表层相似,夏秋季其生物密度居多;形态功能组VII在水库20 m的季节分布与表层相似,在水库40 m也有出现,而未出现在水库底部;形态功能组II仅在2012年夏季的水库表层、40 m水体出现,在其他时间、其他水层未出现;形态功能组V仅出现在表层水体,其余水层均未出现。

综上所述,藻类群落形态功能组的季节演替有一定的特点,在夏秋季出现多种形态功能组,各个形态功能组的生物密度数量较多,冬春季形态功能组的组成较为单一,且数量较少。在研究期间,优势形态功能组变化不大,主要为形态功能组VI,占总生物密度的85.67%,其次为形态功能组IV,其余功能组出现的频率较低且数量较少。优势形态功能组在各水层纵向分布上具有一定的相似性,形态功能组VI、IV在不同的水层出现规律较为一致,较大的不同主要表现在随水深的增加形态功能组的生物密度减小,生物密度较小的形态功能组II、V、VII则在纵向分布上出现一定的差异。

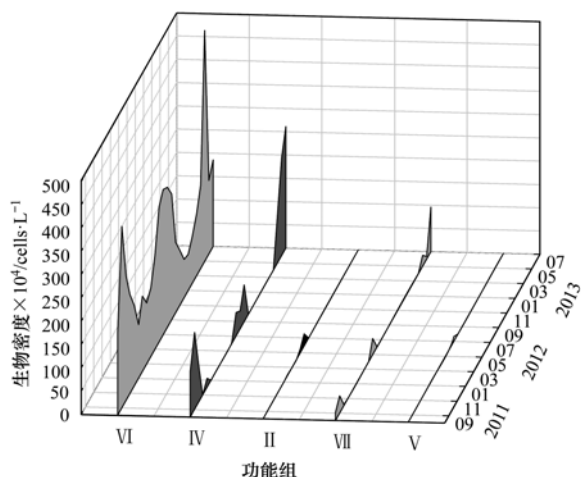


图2 水库表层形态功能组的生物密度

Fig. 2 Density of MBFG (ten thousand cells · L⁻¹) in surface water layer of the Jinpen Reservoir

2.3 藻类功能群组的生物密度与环境因子的关系

2.3.1 影响功能组藻类分布的主要环境因子

图6为藻类形态功能组(MBFG)与环境因子的RDA排序结果。从中可知,表层主要分布在第一、第三和第四象限,20 m、40 m和底层主要集中在第二、三象限,表层的藻类群落形态功能组组成与其他水层有所不同,而20 m、40 m和底层藻类群落的形态功能组组成基本一致。实际监测出的水库表层

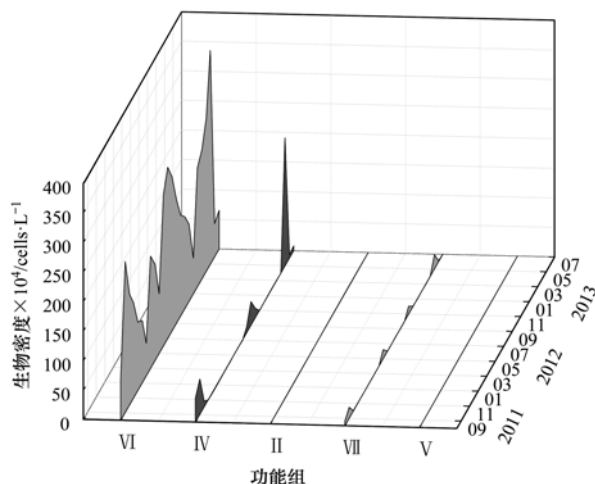


图3 水库20 m形态功能组的生物密度

Fig. 3 Density of MBFG (ten thousand cells · L⁻¹) in the depth of 20 meters in the Jinpen Reservoir

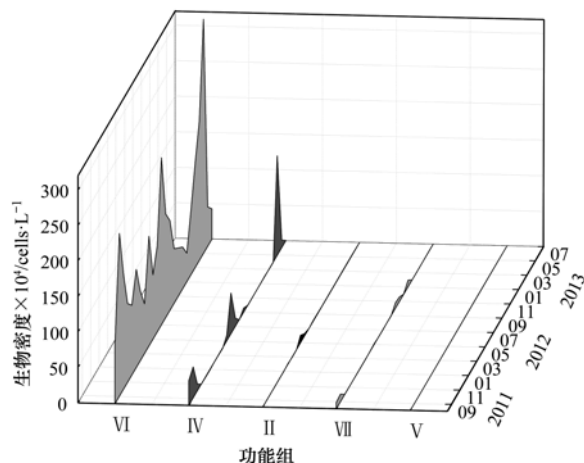


图4 水库40 m形态功能组的生物密度

Fig. 4 Density of MBFG (ten thousand cells · L⁻¹) in the depth of 40 meters in the Jinpen Reservoir

藻类形态功能组由功能组II、IV、V、VI、VII共同组成,20 m、40 m和底层的藻类形态功能组主要由形态功能组IV、VI组成,与RDA分析的结果相同。

在RDA分析中,前两个冗余轴解释了数据总差异的86.6%(轴1:60.7%,轴2:5.9%),水库的水温、TN的质量浓度和NO₃⁻-N的质量浓度与轴1呈正相关,相关系数分别为0.474 4、0.193 7和0.132 7,NH₄⁺-N的质量浓度和TP的质量浓度与轴1呈负相关,相关系数分别为-0.203 2和-0.112 0,形态功能组II、IV、VI、VII与轴1呈明显的正相关,显示这几个形态功能组受上述环境因子影响较大;水温、TN的质量浓度、NO₃⁻-N的质量浓度、NH₄⁺-N的质量浓度和TP的质量浓度均与轴2呈正相关,形态功能组V呈明显正相关,显示形态功能组V受上

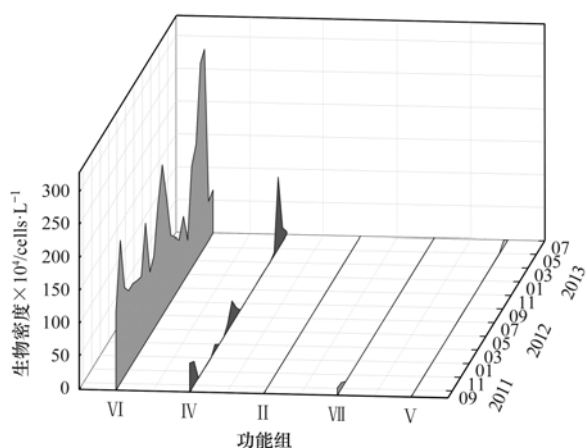


图5 水库底部形态功能组的生物密度

Fig. 5 Density of MBFG (ten thousand cells · L⁻¹) at the bottom of the Jinpen Reservoir

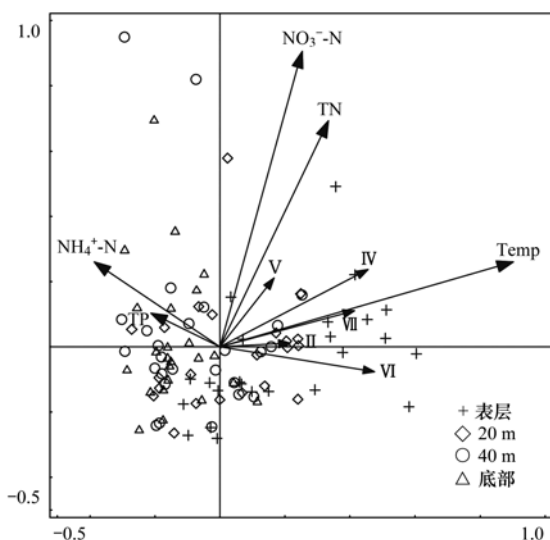


图6 水库不同水层藻类功能群组结构与环境因子的冗余分析(RDA)

Fig. 6 Redundancy analysis of structure of algae morphologically-based functional groups and environmental factors in different water layers in the Jinpen Reservoir

述环境变量影响较大。

在金盆水库中,由图2~5可知优势藻类群落功能组为功能组Ⅳ、Ⅵ,由RDA排序分析可知,功能组Ⅳ、Ⅵ的显著影响因子为水温 and TN 的质量浓度。Kruk 等^[22]在研究浮游植物形态功能组的生境时也证实了藻类形态功能组Ⅳ、Ⅵ受温度和 TN 的质量浓度的影响较大。

2.3.2 水温

在研究期间,表层形态功能组Ⅳ和形态功能组Ⅵ生物密度的变化与表层水温密切相关。如图7所示,表层形态功能组Ⅵ的生物密度与表层水温的变

化趋势基本一致,在表层的高低水温的水体中都会存在,表层水温在 15℃ 以上时,其生物密度较多,最高达到 $495.08 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,温度在 15℃ 以下,形态功能组Ⅵ的生物密度较少,最少为 $77.68 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;第二优势形态功能组Ⅳ仅存在于水温在 15℃ 以上的表层水体,其生物密度最大达到 $38.72 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;形态功能组Ⅱ、Ⅴ仅在 2012 年夏季出现,这也与温度有密切关系,2012 年夏季平均气温在 23℃ 以上。

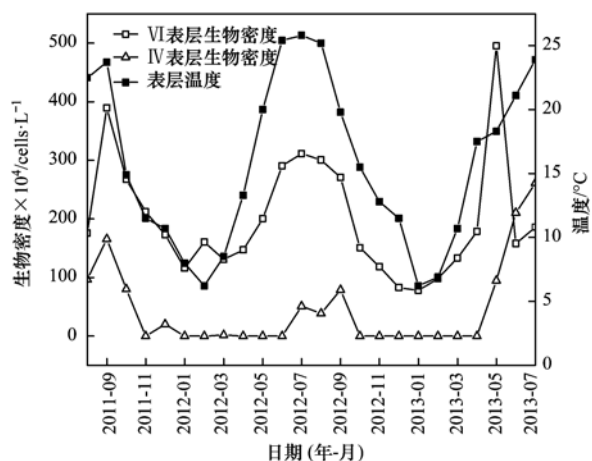


图7 水库表层水温与功能组Ⅵ、Ⅳ生物密度

Fig. 7 Surface temperature and the density of surface morphologically-based functional groups VI, IV

2.3.3 总氮

由RDA排序结果可知,功能组Ⅵ作为水库中的优势形态功能组,受水库中TN的质量浓度影响较大。如图8~11所示,水库表层、20 m、40 m 和底层的TN的质量浓度基本在 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,随着水深的增加,水中TN的质量浓度范围无明显变化,形态功能组Ⅵ的生物密度随水深的增加而减少。从中

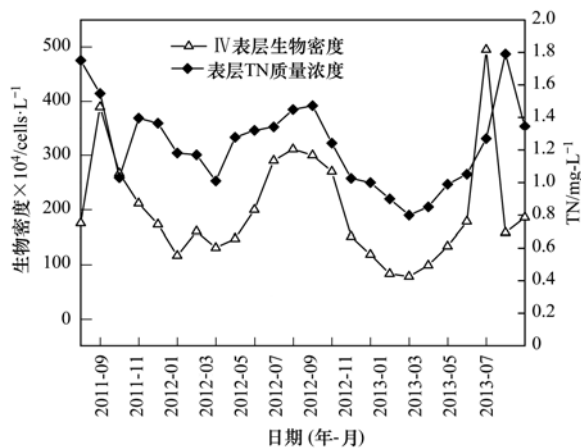


图8 水库TN的质量浓度和功能群组Ⅵ生物密度(表层)

Fig. 8 Reservoir surface concentration of TN and the density of surface morphologically-based functional group VI

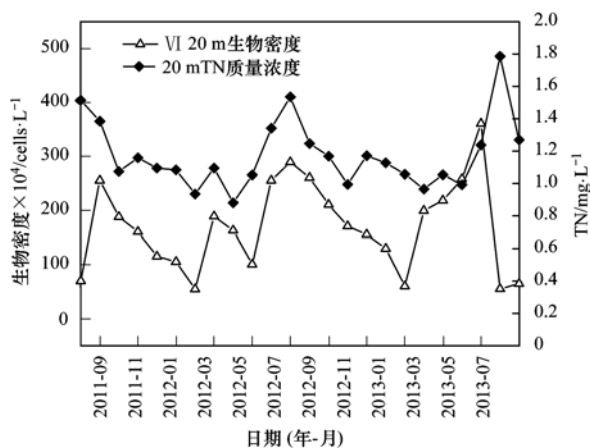


图9 水库 TN 的质量浓度和功能群组 VI 生物密度 (20 m)

Fig. 9 Concentration of TN and the density of morphologically-based functional group VI in the reservoir (20 m)

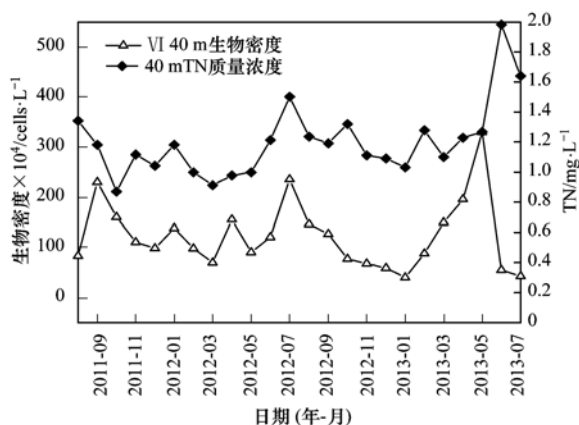


图10 水库 TN 的质量浓度和功能群组 VI 生物密度 (40 m)

Fig. 10 Concentration of TN and the density of morphologically-based functional group VI in the reservoir (40 m)

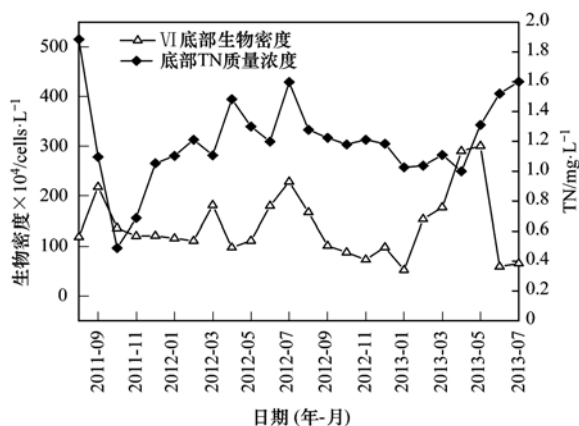


图11 水库 TN 的质量浓度和功能群组 VI 生物密度 (底层)

Fig. 11 Concentration of TN and the density of morphologically-based functional group VI at the bottom of the reservoir

可看出,形态功能组 VI 与 TN 的质量浓度之间的变化关系不随水深的变化而改变,水体中的 TN 的质

量浓度在夏秋季的积累量较大,形态功能组 VI 在夏秋季的生物密度较大;当水体中的 TN 的质量浓度低于 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,形态功能组 VI 的生物密度会下降,水体中 TN 的质量浓度高于 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,形态功能组 VI 的生物密度增多。

3 讨论

藻类形态功能组以藻种(属)在形态上的相似性为划分依据,将藻类功能组分类方法进一步简化,当水库水体中出现罕见藻种(属),缺乏其详细的植物生理资料时,采用形态功能组能够快速识别该藻种(属)所在的功能组别,减少了研究藻类群落演替过程中的繁杂工作量,并且降低了罕见藻种(属)的鉴别分类难度,提供了一种更为高效简便的藻类功能组分类方法。

在水库藻类季节性演替中,从冬春季到夏秋季,藻类形态功能组由单一的形态功能组向多元化的形态功能组进行转化,藻类的形态由单一的无鞭毛的、有硅质细胞壁向以无鞭毛、有硅质细胞壁为主,有鞭毛、有胶被、比表面积低等多种形态共存转变。其中形态功能组 VI 基于广泛的时间跨度分布和较强的环境适应性,在藻类的季节性演替和沿季节性水深的纵向演替中,均成为优势形态功能组。而形态功能组 IV、VII、II、V 在各个季节的各个水层出现的状况参差不齐。水生环境中的环境因素如光照^[23]、水温、氮磷的质量浓度和降雨等,与浮游植物的生长密切相关,环境因子的变化会对浮游植物的群落结构产生一定的影响^[24],各功能组呈现上述演替特性的原因可能是在水库表层,光照充足,各功能组中的藻种(属)生长环境适宜,随着水深的增加光照减弱,使得表层各藻种(属)生物密度减少;形态功能组 VI 主要由硅藻组成,硅藻的生长环境对光照要求较低,光照较弱时,硅藻也能生长,所以在各个水层仍能检测出形态功能组 VI;而其他形态功能组对水温有一定的要求,适宜的温度条件是它们大量生长的关键,所以形态功能组 IV、VII、II、V 常出现在夏季;通过 RDA 的进一步分析发现,各个形态功能组的演替都是由环境因子共同作用的结果,如形态功能组 VI 的演替受温度和总氮的质量浓度的综合影响,由此反推,当水库中的藻类形态功能组的组成发生较大变化时,可以用形态功能组的变化来粗略表征水库中水质的变化;同时也可以用水库环境因子的变化来预测水库中藻类浮游植物的群落结构变化,为水库水质的监测与治理提供了一种方法。

采用不同的藻类群落功能组分类方法研究藻类群落演替特征,对优势功能组的显著影响因子不同.采用藻类群落功能组(FG)分类方法研究湖库中浮游植物群落的演替特征时,显著影响优势功能组的环境因子为温度和 NO_3^- -N的质量浓度^[25,26];采用藻类群落形态功能组(MBFG)分类方法研究湖库藻类群落演替特征时,显著影响优势功能组的环境因子为温度和TN的质量浓度^[22].各种藻类功能组分类方法的适用性,有待进一步研究与探讨.

4 结论

(1) 金盆水库水体中共监测出5个形态功能组:Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ,其中形态功能组Ⅵ较为常见,生物密度在各个水层均占绝对优势.

(2) 研究期间,藻类功能组的季节性演替特征:夏秋季时,水库中多种藻类形态功能组(MBFG)共存,春冬季时,功能组结构较为单一;藻类功能组的纵向演替规律:优势功能组在各个研究水层均有出现,且随着水深的增加,生物密度有所减少.

(3) 采用藻类形态功能组(MBFG)分类方法研究金盆水库藻类群落的演替特征时,对优势形态功能组影响显著的环境因子为水温和TN的质量浓度.

参考文献:

- [1] Marchetto A, Padedda B M, Mariani M A, *et al.* A Numerical index for evaluating phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep Mediterranean reservoirs [J]. *Journal of Limnology*, 2009, **68**(1): 106-121.
- [2] 李秋华, 韩博平. 基于CCA的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析[J]. *生态学报*, 2007, **27**(6): 2355-2364.
Li Q H, Han B P. Structure and dynamics of phytoplankton community based CCA analysis in a pumped storage reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2355-2364.
- [3] 周川, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 873-883.
Zhou C, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 873-883.
- [4] 苟婷, 马千里, 许振成, 等. 贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 946-954.
Gou T, Ma Q L, Xu Z C, *et al.* Phytoplankton community structure and eutrophication risk assessment of Beijiang River [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 946-954.
- [5] Bortolini J C, Rodrigues L C, Jati S, *et al.* Phytoplankton functional and morphological groups as indicators of environmental variability in a lateral channel of the Upper Paraná River floodplain [J]. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2014, **26**(1): 98-108.
- [6] 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.
- [7] Shen H L, Li B, Cai Q H, *et al.* Phytoplankton functional groups in a high spatial heterogeneity subtropical reservoir in China [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(4): 859-869.
- [8] Cellamare M, Pinto P D T, Leitão M, *et al.* Using functional approaches to study phytoplankton communities in a temperate region exposed to tropical species dispersal [J]. *Hydrobiologia*, 2013, **702**(1): 267-282.
- [9] 李磊, 李秋华, 焦树林, 等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4436-4443.
Li L, Li Q H, Jiao S L, *et al.* Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4436-4443.
- [10] 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.
- [11] Costa L S, Huszar V L M, Ovalle A R. Phytoplankton functional groups in a tropical estuary: hydrological control and nutrient limitation [J]. *Estuaries and Coasts*, 2009, **32**(3): 508-521.
- [12] 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.
- [13] Devercelli M, O'Farrell I. Factors affecting the structure and maintenance of phytoplankton functional groups in a nutrient rich lowland river [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, **43**(2): 67-78.
- [14] Crossetti L O, Becker V, Cardoso L D S, *et al.* Is phytoplankton functional classification a suitable tool to investigate spatial heterogeneity in a subtropical shallow lake? [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, **43**(3): 157-163.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Kruk C, Mazzeo N, Lacerot G, *et al.* Classification schemes for phytoplankton: a local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement [J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(9): 901-912.
- [18] Kruk C, Huszar V L M, Peeters E T H M, *et al.* A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(3): 614-627.
- [19] 刘信安, 湛敏, 马艳娥. 三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 95-99.
Liu X A, Zhan M, Ma Y E. Relationship between algal growth and nutritious materials absorbability in the Three-Gorges Valley [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(4): 95-99.

- [20] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [21] 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.
- [22] Kruk C, Segura A M. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups[J]. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 191-202.
- [23] 宋正光, 高磊, 范婧, 等. 环境因子对汾河水上公园再生水中藻类生长的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(10): 3997-4003.
Song Z G, Gao L, Fan J, *et al.* Effects of environmental factors on algal growth in Fenhe water park [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(10): 3997-4003.
- [24] Jiang Y J, He W, Liu W X, *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu)[J]. *Ecological Indicators*, 2014, **40**(5): 58-67.
- [25] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江(澎溪河)藻类功能分组及其季节演替特点[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 392-400.
Li Z, Fang F, Guo J S, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton function groups in the Xiaojiang (Pengxi) River backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 392-400.
- [26] 卢金锁, 张颖, 胡亚潘. 深水型水库中藻类功能群组演替及其与环境因子的关系[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(11): 4605-4611.
Lu J S, Zhang Y, Hu Y P. Succession of algae functional groups and its relationship with environmental factors in a deep water reservoir[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(11): 4605-4611.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172