

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM_{2.5})排放测算方法:以上海市为例 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)

上海夏季PM_{2.5}中有机物的组分特征、空间分布和来源 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)

北京南郊区PM_{2.5}中水溶性无机盐季节变化及来源分析 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州 (2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)

载钼或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)

低温污水前置强化混凝 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)

夏季太湖草/藻型湖区N₂O生成与迁移特征及其影响因素 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)

太湖藻型湖区CH₄、CO₂排放特征及其影响因素分析 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO₂、N₂O特征 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO₂通量特征 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪 (2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇 (2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM_{2.5}健康效应 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈悦倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM_{2.5}污染空间分布的社会经济影响因素分析 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响

杨文斌¹, 高顺峰¹, 万锐¹, 孙祥¹, 王赢^{1,2}

(1. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 安徽省水土污染治理与修复工程实验室, 芜湖 241003; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230001)

摘要: 在实验室模拟研究根系发达的沉水植物狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum* L.) 和无固定根的沉水植物金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*) 对上覆水、间隙水中各形态磷的浓度及含量比例的影响, 探讨不同根系特征的沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响. 结果表明, 狐尾藻和金鱼藻生长期对上覆水和间隙水中各溶解态磷的浓度有较大的影响: ①狐尾藻生长期对上覆水中 DTP、SRP、DOP 吸收率分别为 7.0%、11.7%、3.5%, 对间隙水中 DTP、SRP、DOP 吸收率分别为 20.8%、12.5%、48.4%; ②金鱼藻生长期对上覆水中 DTP、SRP、DOP 吸收率分别为 30.3%、54.9%、13.2%, 对间隙水中 DTP、SRP、DOP 吸收率分别为 19.3%、3.8%、30.4%; ③狐尾藻组、金鱼藻组、对照组上覆水中 SRP 含量比例较初始状态分别减少了 13.0%、34.0%、-0.9%, PP 分别增加了 18.2%、33.1%、4.2%, DOP 分别增加了 7.2%、17.68%、-4.35%. 研究结果可为同类富营养化湖泊生态修复提供理论指导.

关键词: 狐尾藻; 金鱼藻; 磷形态; 吸收率; 迁移转化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2145-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707005

Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water

YANG Wen-bin¹, GAO Shun-feng¹, WAN Rui¹, SUN Xiang¹, WANG Ying^{1,2}

(1. Anhui Provincial Engineering Laboratory of Water and Soil Pollution Control and Remediation, College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China)

Abstract: The effects of *Myriophyllum spicatum* L. with developed root systems and rootless *Ceratophyllum demersum* on the concentration and proportion of different phosphorus fractions in the overlying water and the interstitial water were investigated by batch simulation experiments. The effects of different types of submerged macrophytes on the phosphorus fraction in the overlying water and interstitial water were explored. The results indicated a significant influence on the concentration of dissolved phosphorus in the overlying water and interstitial water by the growth of *Myriophyllum spicatum* L. and *Ceratophyllum demersum*. ① The absorptivities of DTP, SRP, and DOP by *Myriophyllum spicatum* L. in the overlying water were 7.0%, 11.7%, and 3.5%, respectively, and in the interstitial water were 20.8%, 12.5%, and 48.4%, respectively. ② The absorptivities of DTP, SRP, and DOP by *Ceratophyllum demersum* in the overlying water were 30.3%, 54.9%, and 13.2%, respectively, and in the interstitial water were 19.3%, 3.8%, and 30.4%, respectively. ③ The content of SRP in *Myriophyllum spicatum* L. group, *Ceratophyllum demersum* group, and the control group decreased 13.0%, 34.0%, and -0.9%, respectively; the PP increased 18.2%, 33.1%, and 4.2%, respectively; and the DOP increased 7.2%, 17.68%, and -4.35%, respectively. The results provide reference for eutrophic lake ecologic restoration.

Key words: *Myriophyllum spicatum* L.; *Ceratophyllum demersum*; phosphorus fraction; absorptivity; migration and transformation

磷是引起水体富营养化的重要限制因子, 同时也是控制湖泊初级生产的关键因素^[1]. 当外源污染被切断后, 沉积物中的内源磷负荷成为水体磷的“源”, 但磷并非直接释放到水体中, 部分磷通过各种形态转化释放到间隙水中, 从而参与湖泊营养盐的循环. 目前对磷的研究多集中在沉积物-水二相系统中磷的赋存形态及其转化^[2,3]、磷的扩散通量^[4]、内源磷负荷^[5]等方面, “沉积物-水-生物”三相系统中磷的迁移转化研究较少^[6], 水生生物对磷的影响研究仍不够全面^[7]. 沉水植物作为湖泊生态系统的重要组成部分之一, 占据着湖泊生态系统的关

界面, 对湖泊生态系统的生产力、物质循环和能量流动起着重要的调控作用^[8]. 沉水植物通过根系和茎叶直接吸收间隙水和上覆水中的活性磷来满足自身的生长需要^[9], 造成沉积物磷的释放, 影响上覆水与沉积物中各形态磷的交换; 沉水植物在生长发育、衰亡阶段, 通过光合、呼吸、残体分解等作用, 可以影响水体中的 DO、Eh、pH 等环境因子, 进

收稿日期: 2017-07-01; 修订日期: 2017-11-07

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1708085QD88); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41701577)

作者简介: 杨文斌(1968~), 男, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为水环境修复, E-mail: ywb1968@mail.ahnu.edu.cn

影响磷在“沉积物-水-沉水植物”系统中的迁移转化。

近年来,沉水植物对底泥磷循环的影响研究多集中在降低氮磷营养盐浓度的综合效应^[10,11]、对沉积物中磷赋存形态^[12]及迁移转化的影响^[13,14],沉水植物衰亡期对“水-沉积物”之间磷迁移^[15,16]及释放和再分配的影响^[17,18],未见沉水植物对富磷地质背景区域巢湖原位底泥磷迁移转化影响的研究,特别是不同根系特点的狐尾藻和金鱼藻对上覆水和间隙水中磷的赋存形态的影响未见报道。

本文以巢湖富磷沉积物作为底泥,选取根系差异较大的沉水植物狐尾藻和金鱼藻,建立“沉积物-水-沉水植物”微型湖泊生态系统,通过模拟浅水湖泊环境,研究狐尾藻和金鱼藻对上覆水、间隙水中磷的吸收率、赋存形态及含量比例的影响,探讨不同根系特征的沉水植物对各形态磷在上覆水、间隙水中迁移转化的作用机制,以期为同类富营养化湖泊生态修复提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

底泥采自巢湖东部湖区(31°33'49.29"N, 117°43'36.46"E),采用彼得森采泥器采集表层10 cm的沉积物。从宿迁市苏北环保水体生态修复基地购买沉水植物作为试验材料。按照沉水植物的根系特点不同,分别选取根系发达的狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)和无固定根的金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)作为试验材料,以说明不同根系特征的沉水植物生长期对上覆水和间隙水中各形态磷的影响。

1.2 试验方法

沉积物样品经自然风干磨碎后过100目筛,去除动植物残体及其它粗粒杂质并充分混匀,静置备用。将混匀后的沉积物倒入经过5%的HCl溶液清洗过的圆形塑料桶(顶直径×底直径×高=75 cm×65 cm×75 cm),沉积物平均厚度为15 cm,干重约为6450.00 g。然后缓慢注入暴晒3 d后的自来水至桶深70 cm处。

所有沉水植物都经过驯化培养后,用蒸馏水冲洗干净,以避免附着生物的影响,并选择性状均一的幼苗依据长江中下游植物种群平均密度种植于试验桶中。

试验桶装置共计9桶,其中分别种植3桶狐尾藻幼苗(每桶300 g,以鲜重计)和金鱼藻幼苗(每桶300 g,以鲜重计),另外3桶不种植沉水植物为对照

组。试验期间定期在上覆水中添加去离子水,补充蒸发和每次采样所消耗的水,维持上覆水水位不变。

1.3 样品采集和测定

试验桶装置置于实验室内,试验时间为2016年3月~2016年8月,共进行150 d,每隔30 d取一次样。上覆水的采集使用虹吸管抽取的方式,用毛细管在液面下5~10、25~30和45~50 cm处各采集50 mL上覆水,混匀经预处理后待测;将沉积物采样点均匀分布在桶底,用活塞式微型柱状采样器分别采集表层0~5 cm的沉积物,将采集的沉积物充分混匀后转入离心管中,经5000 r·min⁻¹离心20 min,然后经过0.45 μm玻璃纤维滤膜过滤上清液,制得间隙水^[19]。分别测定上覆水中总磷(TP)、颗粒态磷(PP)、溶解性活性磷(SRP)、溶解态有机磷(DOP)和间隙水中TP、SRP和DOP的浓度,测定方法按照相关规范分析^[20]。在试验第0 d和150 d记录狐尾藻主根形态(长度、直径)和主根生物量,长度、直径采用线绳法^[21]测定,生物量采用烘干法测定,如表1所示。

表1 试验第0 d和150 d狐尾藻主根形态及生物量指标

Table 1 Taproot morphology and biomass index of *Myriophyllum spicatum* L. at zero days and 150 days (Mean ± SE)

指标	单位	0 d	150 d
主根干重	g	0.029 ± 0.002 52	0.042 ± 0.001 53
主根长	cm	2.35 ± 0.153	12.32 ± 0.208
主根直径	cm	0.22 ± 0.014 5	0.42 ± 0.019 5

监测采样时的光照强度(台湾得益 DE-3351)、pH和温度(上海雷磁 PHSJ-3F)、Eh(恒奥德 HAD-421)等理化因子,试验初始状态下沉积物、上覆水和间隙水理化指标,如表2所示。

表2 试验系统初始状态沉积物、上覆水和间隙水理化指标¹⁾

Table 2 Physicochemical characteristics of sediment, overlying water, and interstitial water

项目	指标	单位	参数
沉积物	TP	mg·kg ⁻¹	826.14 ± 12.36
	Eh	mV	-140.27 ± 7.87
	pH	/	7.83 ± 0.1
间隙水	DTP	mg·L ⁻¹	0.50 ± 0.01
	DOP	mg·L ⁻¹	0.19 ± 0.01
	SRP	mg·L ⁻¹	0.31 ± 0.00
上覆水	TP	mg·L ⁻¹	0.06 ± 0.01
	PP	mg·L ⁻¹	0.01 ± 0.00
	DTP	mg·L ⁻¹	0.05 ± 0.01
	DOP	mg·L ⁻¹	0.03 ± 0.00
	SRP	mg·L ⁻¹	0.02 ± 0.01

1)表中数据为平均值±标准差(n=3),TP表示总磷,PP表示颗粒态磷,DTP表示溶解态总磷,DOP表示溶解态有机磷,SRP表示溶解性活性磷,Eh表示氧化还原电位,pH表示酸碱度

1.4 数据处理及计算

试验数据使用 SPSS 22.0 数据统计软件进行分析, 利用 Origin 9.0 进行绘图. 采用 One-Way ANOVA 对处理组和对照组数据进行差异性检验分析, $P < 0.05$ 为差异性显著. 根据下式计算水体中第 i 天的磷素吸收率(%):

$$\text{磷素吸收率} = \frac{c_{i0} \times V_{i0} - c_i \times V_i}{c_{i0} \times V_{i0}} \times 100$$

式中, c_{i0} 为第 i 天对照组水体中 DTP、DOP 和 SRP 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_{i0} 为第 i 天对照组水样体积 (L); c_i 为第 i 天处理组水体中 DTP、DOP 和 SRP 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_i 为第 i 天处理组水样体积 (L). 磷素平均吸收率为 6 次磷素吸收率的平均值.

2 结果与讨论

2.1 两种沉水植物对上覆水和间隙水中各溶解态磷浓度的影响

如图 1 所示, 狐尾藻组、金鱼藻组以及对照组上覆水中各溶解态磷浓度随时间均有先升高后降低的变化趋势; 狐尾藻组和金鱼藻组上覆水中 DTP 浓度在第 30 d 后开始有所降低并持续降低分别达到 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SRP 浓度在第 30 d 后有所降低, 在第 90 d 后有所升高, 后随时间降低分别达到 $0.009 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DOP 浓度第 30 d 后有所降低, 在第 120 d 后有所升高, 第 150 d 后, 狐尾藻组与对照组保持持平, 分别为 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而对对照组上覆水中各溶解态磷浓度在试验第 60 d 才开始下降.

在金鱼藻组和对照组上覆水各溶解态磷中, SRP 浓度存在显著差异 ($P < 0.05$), 见表 2, 说明试验微环境“沉积物-水-沉水植物”稳定后, 金鱼藻对上覆水中 SRP 有明显的吸收效果.

试验期间, 间隙水中各溶解态磷浓度随时间变化如图 2 所示, 对照组间隙水中各溶解态磷浓度均先升高后降低, 处理组总体上呈下降趋势; 狐尾藻组和金鱼藻组间隙水中 DTP 浓度随时间缓慢降低, SRP 浓度在狐尾藻组有明显的降低, 在金鱼藻组先升高后降低, DOP 浓度在试验前期降低较明显, 在试验后期趋于上升. 狐尾藻组、金鱼藻组和对照组间隙水中各溶解态磷浓度之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 见表 3, 说明试验微环境“沉积物-水-沉水植物”系统稳定后, 狐尾藻和金鱼藻对间隙水中各溶解态磷有明显的吸收效果, 对比两者的吸收效果可知, 狐尾藻的吸收效果要

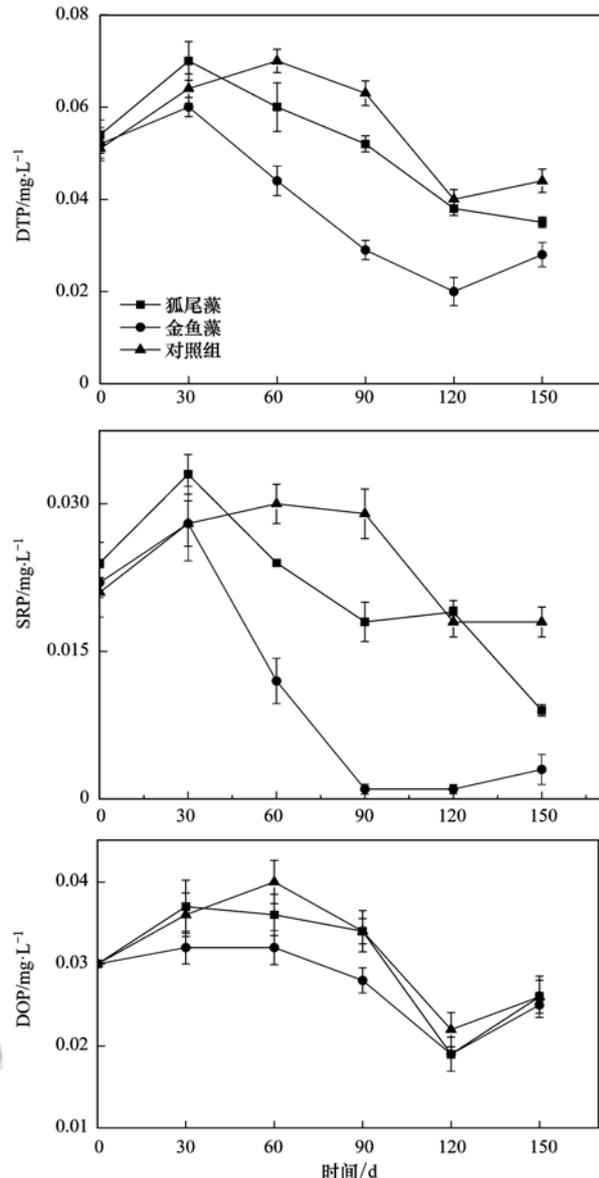


图 1 沉水植物对上覆水中各溶解态磷的影响 (平均值 \pm 标准误差)

Fig. 1 Effects of two species of submerged macrophytes on the dissolved phosphorus in the overlying water (Mean \pm SE)

好于金鱼藻.

上覆水中磷浓度的变化往往与对应沉积物磷的含量有一定的因果关系, 试验底泥采自巢湖东湖区富营养化区域 ($31^{\circ}33'49.29''\text{N}$, $117^{\circ}43'36.46''\text{E}$), 这一地区总磷平均含量为 $706 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [22], 采样点总磷平均含量为 $826.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于重度污染范畴 [23]. 狐尾藻组、金鱼藻组以及对照组上覆水中各溶解态磷浓度均有先升高后降低的变化, 主要是各溶解态磷在上覆水和间隙水中存在较为明显的浓度梯度, 由间隙水向上覆水扩散所致 [24], 但是间隙水中 SRP 不减反增, 由于试验初期沉积物中 Eh 较低, 处于厌氧状态, 微生物的解磷活性较强, 导致水体中铁磷、铝磷或是部分有机磷的释放 [25,26]. 试验

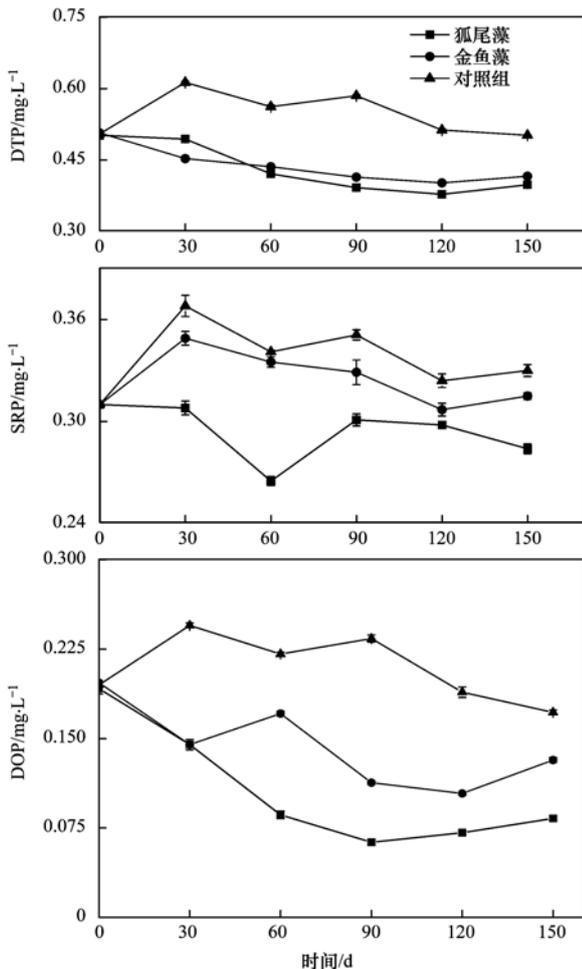


图2 沉水植物对间隙水中各溶解态磷的影响
(平均值 ± 标准误)

Fig. 2 Effects of two species of submerged macrophytes on the dissolved phosphorus in the interstitial water (Mean ± SE)

表3 试验期间上覆水和间隙水中各溶解态磷浓度变化/mg·L⁻¹

Table 3 Concentration changes of dissolved phosphorus in the overlying water and the interstitial water in the experiment/mg·L⁻¹

项目	上覆水			间隙水		
	DTP	SRP	DOP	DTP	SRP	DOP
对照组	0.055 ± 0.002 ^a	0.024 ± 0.002 ^a	0.031 ± 0.002 ^a	0.547 ± 0.002 ^a	0.337 ± 0.003 ^a	0.209 ± 0.003 ^a
狐尾藻	0.051 ± 0.003 ^a	0.021 ± 0.001 ^{ab}	0.030 ± 0.002 ^a	0.431 ± 0.002 ^b	0.294 ± 0.002 ^b	0.107 ± 0.002 ^b
金鱼藻	0.039 ± 0.003 ^a	0.011 ± 0.002 ^b	0.028 ± 0.001 ^a	0.438 ± 0.002 ^{bc}	0.324 ± 0.003 ^a	0.144 ± 0.002 ^{bc}

1) 不同字母表示经 Duncan 检验数据之间的差异显著 ($P < 0.05$)

环境中的营养物质^[35-37]。狐尾藻吸收营养物质主要的方式为利用其发达的根状茎直接吸收间隙水中的各溶解态磷,而金鱼藻则主要利用茎叶来吸收上覆水中各溶解态磷;狐尾藻通过其发达的根系向沉积物输氧,改变其根系周边沉积物的氧化还原环境,提高了沉积物 Eh,较高的 Eh 抑制了沉积物中磷的释放,导致间隙水中磷的浓度降低,而在金鱼藻组,沉积物为厌氧条件,厌氧微生物对磷的释放影响明显。

30 d 后,3 个试验组上覆水中各溶解态磷浓度均有所降低,处理组比对照组降低幅度大,一方面可能是因为狐尾藻和金鱼藻进入旺盛生长期,增加了对营养盐的需求量,本试验系统处于一个相对封闭的环境,没有外源磷的输入,狐尾藻和金鱼藻在生长过程中通过茎叶吸收上覆水中的生物有效磷^[27,28];另一方面也可能是因为在本试验条件下狐尾藻和金鱼藻抑制了沉积物中磷的释放^[29]。在试验后期,狐尾藻组和金鱼藻组上覆水中各溶解态磷浓度缓慢上升,这与沉水植物的生长状况有关,狐尾藻和金鱼藻发生衰退作用以及植株枯叶发生的分解作用导致间隙水各溶解态磷向上覆水的扩散通量有所上升^[30]。

沉水植物生长对间隙水中各溶解态磷的浓度有很大的影响^[31],可能的原因有:①沉水植物在生长过程中,根系可以直接从沉积物中吸收磷,而且底质吸收是植物组织矿质营养的主要来源^[32]。②沉水植物可以通过影响底泥环境因子来影响沉积物磷的释放,包括物理因子(风浪扰动)、化学因子(pH、DO、Eh)以及生物因子(微生物、动物扰动)等^[33,34]。

如表 1 所示,狐尾藻的主根长度在试验第 150 d 后达到 12.32 cm,直径 0.42 cm,根干重 0.042 g。金鱼藻无固定根,以长入土中的叶状态枝固定株体,或者漂浮水体生长。根系长度和根系直径通常作为植株适应环境能力的一个指标。根长并粗壮的根系比根短瘦弱、无根的沉水植物更能有效地利用

当沉积物处于好氧状态时,沉积物的 Eh 较高,沉积物磷释放量小于厌氧状态下的释放量,说明较高的 Eh 能抑制沉积物磷的释放^[38]。碱性条件下,pH 升高能促进沉积物中磷的释放,中性条件下,磷的释放量最小,酸性条件可以促进磷的释放^[39]。本试验是室内模拟试验,限制了水动力条件的变化,因此沉积物中环境因子 pH 值和 Eh 的变化是影响沉积物磷释放的主要环境因子。试验期间沉积物的 pH 值和 Eh 随时间变化如图 3 所示,狐尾藻组

和金鱼藻组沉积物的 pH 值均低于对照组, 并且狐尾藻组沉积物的 pH 值的降低幅度要大于金鱼藻组, 可以说明狐尾藻和金鱼藻均能降低沉积物的 pH 值, 并且 pH 的变化都在中性范围内, 沉积物磷释放量较小. 狐尾藻组沉积物 Eh 明显升高, 并且高于金鱼藻组和对照组 ($P < 0.05$), 可能是因为狐尾藻通过其发达的根系向沉积物输氧, 根系周边沉积物为氧化环境, 提高了沉积物 Eh, 较高的 Eh 抑制了沉积物中磷的释放, 导致间隙水中磷的浓度降低. 同时, 汪家权等^[40]对沉积物的研究表明, 好氧条件下, 沉积物非但不向水体释磷反而从水体吸附磷, 而在厌氧条件下, 微生物对磷的释放影响明显. 金鱼藻没有像狐尾藻一样发达的根茎, 对沉积物氧化还原环境影响较小, 沉积物 Eh 无明显变化, 试验期间与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$), 较低的 Eh 导致了沉积物磷的释放^[41].

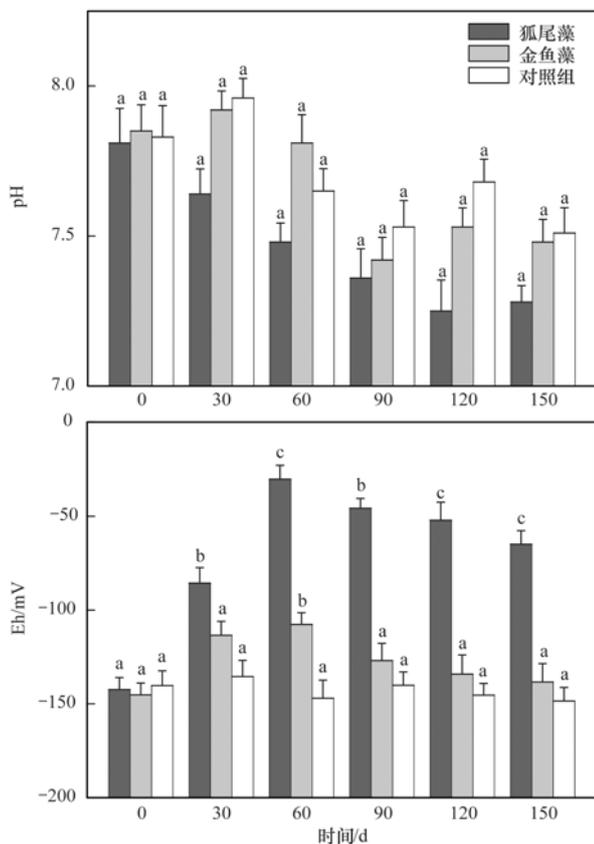


图3 试验期间沉积物中环境因子的变化

Fig. 3 Sediment environmental factor changes in the experiment

2.2 两种沉水植物对上覆水和间隙水中各溶解态磷的吸收效果

狐尾藻对上覆水中 DTP、SRP、DOP 平均吸收率分别为 7.0%、11.7%、3.5%, 对间隙水中 DTP、SRP、DOP 平均吸收率分别为 20.8%、12.5%、

48.4%; 金鱼藻对上覆水中 DTP、SRP、DOP 平均吸收率分别为 30.3%、54.9%、13.2%, 对间隙水中 DTP、SRP、DOP 平均吸收率分别为 19.3%、3.8%、30.4% (表 4). 对比狐尾藻和金鱼藻对上覆水和间隙水中各溶解态磷的平均吸收率可知, 狐尾藻对间隙水中各溶解态磷的平均吸收率高于上覆水, 说明狐尾藻对间隙水中各溶解态磷的吸收效果要好于上覆水, 而金鱼藻对上覆水中各溶解态磷的平均吸收率高于间隙水, 说明金鱼藻对上覆水中各溶解态磷的吸收效果要好于间隙水. 可能的原因有: ① 金鱼藻为无固定根沉水植物, 只能利用茎叶和不定根来吸收上覆水中各溶解态磷, 而相比较于金鱼藻而言, 狐尾藻根状茎发达, 除了可以利用茎叶吸收上覆水中各溶解态磷之外, 则主要通过根系来吸收间隙水中各溶解态磷, 从而减少其对上覆水中各溶解态磷的吸收^[42]; ② 上覆水中各形态磷之间发生了相互转化, 使得 SRP 和 DTP 保持在相对较低的水平. ③ 狐尾藻的根系具有泌氧作用, 使沉积物的氧化还原电位提高, 抑制了沉积物磷的释放, 导致狐尾藻间隙水中各溶解态磷含量明显低于对照组.

表 4 沉水植物对上覆水和间隙水中各溶解态磷的平均吸收率/%

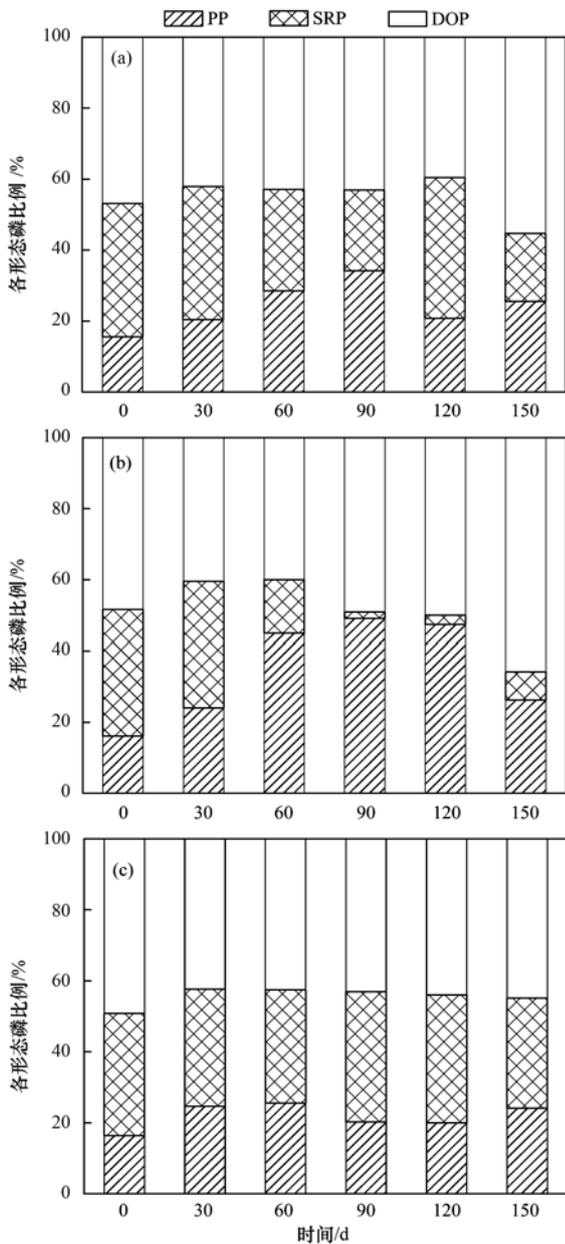
Table 4 Average removal rate of specific forms of dissolved phosphorus in the overlying water and the interstitial water by four submerged macrophytes/%

项目	上覆水			间隙水		
	DTP	SRP	DOP	DTP	SRP	DOP
狐尾藻	7.0	11.7	3.5	20.8	12.5	48.4
金鱼藻	30.3	54.9	13.2	19.3	3.8	30.4

由表 4 可知, 对比狐尾藻和金鱼藻对上覆水和间隙水中各溶解态磷的平均吸收率可知, 狐尾藻和金鱼藻对上覆水中 SRP 的平均吸收率高于 DOP, 说明两者对上覆水中 SRP 的吸收效果均好于 DOP, 可能的原因: 一方面沉水植物的茎叶可直接吸收上覆水中 SRP, 同化成自身组织, 而对 DOP 的直接吸收作用不明显^[43]; 另一方面沉水植物的枝体的衰败、腐烂也会增加上覆水中 DOP 的含量^[44], 狐尾藻和金鱼藻对间隙水中 DOP 的平均吸收率高于 SRP, 说明两者对间隙水中 DOP 的吸收效果均好于 SRP, 可能是因为沉积物中的有机磷部分具有活性, 约 50%~60% 的有机磷可被降解或转化为生物可利用磷形态^[45,46], 狐尾藻和金鱼藻不仅可以直接吸收间隙水中的这部分磷, 还可以通过改变沉积物中环境因子来影响难降解有机磷的溶出和转化^[47,48].

2.3 两种沉水植物对上覆水中各形态磷含量比例的影响

由图4可知,初始状态,上覆水中3种形态的磷占TP的含量比例(质量分数)为:PP 16.0%, SRP 35.8%, DOP 48.1%, DOP是上覆水中磷的主要赋存形态.在试验前期,狐尾藻组和金鱼藻组上覆水中SRP含量比例明显减少,PP含量比例明显增加,DOP含量比例基本保持不变,对照组上覆水中PP含量比例有所增加,SRP和DOP含量比例均无明显变化,这可能是由于在试验前期,沉积物磷



(a) 狐尾藻组; (b) 金鱼藻组; (c) 对照组

图4 上覆水中磷的形态转化规律

Fig. 4 Phosphorus conformation transformation principles in overlying water

的释放以及沉水植物对PP无明显吸收作用,使得PP含量比例增加.

在第90d,狐尾藻组、金鱼藻组和对照组上覆水中SRP含量比例较初始状态分别减少了13.0%、34.0%和-0.9%,PP的含量比例较初始状态分别增加了18.2%、33.1%、4.2%.处理组上覆水中SRP的含量比例有所降低,对照组上覆水中SRP的含量比例有所增加,说明沉积物中SRP向上覆水发生了释放作用,狐尾藻和金鱼藻对上覆水中SRP均具有吸收作用,并且金鱼藻对上覆水中SRP的吸收作用更加显著.同时发现,金鱼藻对上覆水中SRP和PP含量比例的影响大于狐尾藻,且金鱼藻改变了上覆水中TP的分布格局,此时DOP和PP成为上覆水TP中的主要形态.

在第150d,狐尾藻组和金鱼藻组上覆水中PP含量比例均有所减少,可能是因为试验后期环境温度有所降低,导致水体中的磷向沉积物沉降^[49],DOP含量比例均有所增加,分别增加了7.2%和17.68%,SRP的含量比例均有所减少,分别减少了16.6%和27.9%.在试验后期,狐尾藻和金鱼藻都有衰败迹象,对上覆水中SRP的吸收作用也有所降低,植物枝体的衰败腐烂增加了上覆水中DOP的含量比例.

试验期间,对照组上覆水中各形态磷含量比例未发生明显变化,处理组含量比例变化明显,表明狐尾藻和金鱼藻的生长影响了上覆水中各形态磷的分布格局.狐尾藻和金鱼藻对上覆水中各形态磷含量比例变化的影响是各种物理、生物、化学因素综合作用的结果,可能的原因有:①狐尾藻和金鱼藻对DOP和SRP选择性吸收,作为能被植物直接利用的无机态的溶解性正磷酸盐消耗比较大,而植物枝体的衰败、腐烂使得上覆水中DOP的含量升高.②狐尾藻和金鱼藻生理特性不同,对上覆水中不同形态磷酸盐的吸收存在差异性.③狐尾藻根系微环境与金鱼藻不同,在无微生物状态下,沉积物中磷的释放几乎为零,而由于微生物的参与,沉积物释放的磷比无菌状态下高出50%~100%^[50],从而导致磷的迁移和形态转化,改变了上覆水各形态磷的分布格局.④试验期间上覆水PP主要来源于沉积物磷的释放,而沉水植物对PP磷无明显的吸收作用,PP磷含量比例的变化主要取决于沉积物磷的释放作用和自身的沉降作用.

3 结论

(1) 试验研究了根系发达的狐尾藻和无固定根

的金鱼藻对上覆水、间隙水中磷的吸收率、赋存形态及含量比例的影响, 狐尾藻和金鱼藻生长期对上覆水和间隙水中各溶解态磷的浓度有较大的影响, 改变了上覆水中磷的分布格局; 金鱼藻对上覆水中 SRP 和 PP 含量比例的影响大于狐尾藻; 两者对间隙水中 SRP 的影响存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

(2) 在微环境中, 根系发达的狐尾藻生长期对间隙水中各溶解态磷的吸收效果明显强于无固定根的金鱼藻, 但对上覆水中各溶解态磷的吸收效果要弱于金鱼藻; 在上覆水和间隙水各溶解态磷之中, 两种植物对上覆水中 SRP 的吸收效果要强于对 DOP 的吸收效果, 而两种植物对间隙水 SRP 吸收效果要弱于对 DOP 的吸收效果。

参考文献:

- [1] Abdallah M A M. Potential for internal loading by phosphorus based on sequential extraction of surficial sediment in a Shallow Egyptian Lake [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **178**(1-4): 203-212.
- [2] 黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态 [J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 199-206.
Huang Q H, Wang L, Wang Z J. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese Lakes [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(3): 199-206.
- [3] 揣小明, 杨柳燕, 陈小锋, 等. 我国若干湖泊磷转化率的区域差异性研究 [J]. 中国环境科学, 2012, **32**(11): 2075-2082.
Chuai X M, Yang L Y, Chen X F, et al. The regional differences of phosphorus transfer rate in some Lakes of China [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(11): 2075-2082.
- [4] 关瑞, 吕昌伟, 何江, 等. 乌梁素海和岱海水-沉积物界面磷的扩散通量研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(8): 1609-1617.
Guan R, Lv C W, He J, et al. Diffusion fluxes of phosphorus across water-sediment interface in Lake Wuliangsu and Daihai [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(8): 1609-1617.
- [5] 黎睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1831-1839.
Li R, Wang S R, Xiao S B, et al. Sediments phosphorus forms and loading in the lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River and Yunnan Plateau, China [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(6): 1831-1839.
- [6] 葛绪广. 沉水植物对沉积物磷的影响研究进展 [J]. 人民黄河, 2011, **33**(6): 89-91.
- [7] 杨文斌, 李阳, 孙共献. 两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2156-2163.
Yang W B, Li Y, Sun G X. Effects of two submerged macrophytes on dissolved inorganic nitrogen in overlying water and interstitial water [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2156-2163.
- [8] Gumbrecht T. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems [J]. Ecological Engineering, 1993, **2**(1): 1-30.
- [9] 周彦锋, 胡庚东, 徐东坡, 等. 水体营养水平对 3 种沉水植物吸收磷的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, **27**(7): 390-394.
Zhou Y F, Hu G D, Xu D P, et al. Effects of different nutritional conditions on the phosphorus purification of three submerged macrophytes [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, **27**(7): 390-394.
- [10] Gulati R D, Van Donk E. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state-of-the-art review [J]. Hydrobiologia, 2002, **478**(1-3): 73-106.
- [11] Hilt S, Gross E M, Hupfer M, et al. Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes—a guideline and state of the art in Germany [J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 2006, **36**(3): 155-171.
- [12] 吴强亮, 谢从新, 赵峰, 等. 沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 对沉积物中磷赋存形态的影响 [J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 228-234.
Wu Q L, Xie C X, Zhao F, et al. Effects of *Vallisneria natans* on the occurrence characteristic of phosphorus fractions in sediment [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(2): 228-234.
- [13] 朱端卫, 朱红, 倪玲珊, 等. 沉水植物驱动的水环境钙泵与水磷循环的关系 [J]. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 355-361.
Zhu D W, Zhu H, Ni L S, et al. Relationship between calcium pump driven by submerged macrophytes and phosphorus cycle in water [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(3): 355-361.
- [14] 葛绪广, 王国祥, 陈成忠, 等. 苦草生长对沉积物中磷迁移转化的影响 [J]. 生态学报, 2014, **34**(20): 5802-5811.
Ge X G, Wang G X, Chen C Z, et al. Effects on the transformation of phosphorus in sediment with growing of *Vallisneria natans* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(20): 5802-5811.
- [15] 俞振飞, 徐东坡, 王国祥, 等. 苦草 (*Vallisneria natans*) 衰亡对水-沉积物之间磷迁移的影响 [J]. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 94-104.
Yu Z F, Xu D P, Wang G X, et al. Effects of decline phase of *Vallisneria natans* on phosphorus transportation between water and sediment [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(1): 94-104.
- [16] 王立志, 王国祥. 衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响 [J]. 生态学报, 2013, **33**(17): 5426-5437.
Wang L Z, Wang G X. Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(17): 5426-5437.
- [17] 叶春, 王博, 李春华, 等. 沉水植物黑藻腐解过程中营养盐释放过程 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2653-2659.
Ye C, Wang B, Li C H, et al. Nutrient release process during decomposition of submerged macrophytes (*Hydrilla verticillata* Royle) [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(10): 2653-2659.
- [18] 王博, 叶春, 李春华, 等. 初春苦草腐解过程中营养盐释放过程及规律 [J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(2): 171-

175.
Wang B, Ye C, Li C H, *et al.* Process and law of nutrient release during decomposition of submerged macrophytes. (*Vallisneria natans*) in early spring[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, **28**(2): 171-175.
- [19] Elderfield H, Mccaffrey R J, Luedtke N, *et al.* Chemical diagenesis in Narragansett Bay sediments[J]. American Journal of Science, 1981, **281**(8): 1021-1055.
- [20] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 961-967.
Jin X C, Tu Q Y. Survey of lake eutrophication survey (2nd ed.)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. 961-967.
- [21] 张立君, 张少英. 植物生理学基础实验指导[D]. 呼和浩特: 内蒙古农牧学院, 1995. 31-33, 39-40.
- [22] 温胜芳, 单保庆, 张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2322-2329.
Wen S F, Shan B Q, Zhang H. Spatial distribution character of phosphorus fractions in surface sediment from Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2012, **33**(7): 2322-2329.
- [23] 刘鸿亮, 金相灿, 荆一凤. 湖泊底泥环境疏浚工程技术[J]. 中国工程科学, 1999, **1**(1): 81-84.
Liu H L, Jin X C, Jing Y F. Environmental dredging technology of Lake sediment[J]. Engineering Science, 1999, **1**(1): 81-84.
- [24] 包先明, 陈开宁, 范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 515-522.
Bao X M, Chen K N, Fan C X. Effects on nitrogen and phosphorus distribution in interstitial water and sediment-water nitrogen and phosphorus release with growing of submerged macrophytes[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 515-522.
- [25] Uusitalo R, Turtola E, Puustinen M, *et al.* Contribution of particulate phosphorus to runoff phosphorus bioavailability[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(6): 2007-2016.
- [26] 苏争光, 冯慕华, 宋媛媛, 等. 抚仙湖不同污染源沉积物微生物解磷能力分析[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 83-91.
Su Z G, Feng M H, Song Y Y, *et al.* Phosphate-solubilizing capability of microbes in the sediments from different pollution sources in Lake Fuxian[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(1): 83-91.
- [27] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* The adsorption of phosphate on different Trophic Lake Sediments[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, **254**(1-3): 241-248.
- [28] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes[J]. Aquatic Botany, 1986, **26**: 341-370.
- [29] 俞振飞, 王国祥, 王立志, 等. 苦草(*Vallisneria natans*)和黑藻(*Hydrilla verticillata*)对沉积物各形态磷垂直分布的影响[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 378-383.
Yu Z F, Wang G X, Wang L Z, *et al.* Effects of macrophytes *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata* on the vertical distribution of different phosphorus fractions in sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(3): 378-383.
- [30] 张福林, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 不同沉水植物对沉积物磷迁移转化的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2081-2085.
Zhang F L, Wang S R, Yang S W, *et al.* Effects of different submerged macrophytes on migration and transformation of phosphorus in sediments [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(6): 2081-2085.
- [31] Sorrell B K, Downes M T, Stanger C L. Methanotrophic bacteria and their activity on submerged aquatic macrophytes[J]. Aquatic Botany, 2002, **72**(2): 107-119.
- [32] Schorer A, Schneider S, Melzer A. The importance of submerged macrophytes as indicators for the nutrient concentration in a small stream (Rotbach, Bavaria) [J]. Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters, 2000, **30**(4): 351-358.
- [33] Asaeda T, Trung V K, Manatunge J. Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in Shallow Lakes[J]. Aquatic Botany, 2000, **68**(3): 217-237.
- [34] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China[J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(2): 288-295.
- [35] Nielsen N E, Barber S A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake[J]. Agronomy Journal, 1978, **70**(5): 695-698.
- [36] Xie Y H, An S Q, Yao X, *et al.* Short-time response in root morphology of *Vallisneria natans* to sediment type and water-column nutrient[J]. Aquatic Botany, 2005, **81**(1): 85-96.
- [37] Xie Y H, Yu D. The significance of lateral roots in phosphorus (P) acquisition of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Aquatic Botany, 2003, **75**(4): 311-321.
- [38] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, *et al.* Effects of dissolved oxygen supply level on phosphorus release from Lake Sediments [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **316**(1-3): 245-252.
- [39] 王立志. 两种沉水植物对间隙水磷浓度的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(4): 1051-1058.
Wang L Z. Influence of two submerged macrophytes on pore water phosphorus concentration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(4): 1051-1058.
- [40] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 738-742.
Wang J Q, Sun Y M, Qian J Z, *et al.* Simulated study on phosphorus release of Chao Lake Sediment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, **22**(6): 738-742.
- [41] Barlow K, Nash D, Turrall H, *et al.* Phosphorus uptake and release in surface drains[J]. Agricultural Water Management, 2003, **63**(2): 109-123.
- [42] Gao Y X, Zhu G W, Qin B Q, *et al.* Effect of ecological engineering on the nutrient content of surface sediments in Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(11): 1624-1630.
- [43] Sorrell B K, Dromgoole F I. Oxygen transport in the submerged freshwater macrophyte *Egeria densa* planch. I. Oxygen production, storage and release[J]. Aquatic Botany, 1987, **28**(1): 63-80.
- [44] Huebert D B, Gorham P R. Biphasic mineral nutrition of the submersed aquatic macrophyte *Potamogeton pectinatus* L. [J]. Aquatic Botany, 1983, **16**(3): 269-284.
- [45] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken Sediment

- [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [46] Hantke B, Fleischer P, Domany I, *et al.* P-release from DOP by phosphatase activity in comparison to P excretion by zooplankton. *Studies in Hardwater lakes of different trophic level* [J]. *Hydrobiologia*, 1996, **317**(2): 151-162.
- [47] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 385-392.
Wang L Z, Wang G X, Yu Z F, *et al.* Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in the growth period[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 385-392.
- [48] 金相灿, 王圣瑞, 赵海超, 等. 磷形态对磷在水-沉水植物-底质中分配的影响[J]. *生态环境学报*, 2005, **14**(5): 631-635.
Jin X C, Wang S R, Zhao H C, *et al.* Effects of phosphorus form on the distribution of the phosphorus in water-sediment-submerge plant ecosystem[J]. *Ecology and Environment*, 2005, **14**(5): 631-635.
- [49] Jensen H S, Andersen F O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, Eutrophic Lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(3): 577-589.
- [50] 徐玉慧, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化[J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 869-873.
Xu Y H, Jiang X, Jin X C, *et al.* Seasonal variation of bioavailable phosphorus in sediments in northeast part of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(5): 869-873.

环境科学

CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM _{2.5}) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM _{2.5} in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM _{2.5} in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe ₂ O ₄ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N ₂ O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO ₂ and N ₂ O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO ₂ Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM _{2.5} Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)