

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 17 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 翀,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110231569

白秀玲, 周云凯, 张雷. 水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5581-5588.

Bai X L, Zhou Y K, Zhang L. The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5581-5588.

水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响

白秀玲^{1,2,*}, 周云凯^{1,2}, 张 雷³

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 河南大学水资源与水环境数字模拟研究所, 开封 475004;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要:以太湖常见底栖动物——水丝蚓为研究对象, 借助室内流动培养装置和 ^{31}P 核磁共振技术 (phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy) (^{31}P -NMR), 研究生物扰动对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响。结果表明: 短时间内水丝蚓扰动对沉积物有机磷化合物种类组成影响并不显著, 但会引起上层沉积物中稳定性较差的有机磷化合物磷脂和 DNA 含量出现显著降低, 同时沉积物中总磷和有机磷的垂向分布亦发生明显改变。此外, 水丝蚓扰动下沉积物含水率、孔隙率和碱性磷酸酶活性显著增加, 使活性较高的有机磷化合物分解加速, 最终导致表层沉积物中的磷脂与 DNA 含量降低。

关键词: 生物扰动; 有机磷; 沉积物; 水丝蚓

The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu

BAI Xiuling^{1,2,*}, ZHOU Yunkai^{1,2}, ZHANG Lei³

1 Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Institute of Numerical Simulation on Water Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China

3 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Bioturbation is an important dynamic process in lake sediment. Tubificid worms, widely distributed in Taihu Lake, were selected to study the potential effects of bioturbation on organic phosphorus (P) components and their vertical distribution in sediments. The experiments were performed with the field sediment column under a constant-flow incubation condition in laboratory, while the contents and components of organic P in sediments were analyzed by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy (^{31}P -NMR) which is currently a more direct and powerful tool in characterization of organic P forms at the molecular level. The obtained results demonstrated orthophosphate monoesters, phospholipids, DNA, pyrophosphate and phosphonates were the main organic P components. Compared with the control group (no bioturbation of tubificid worms), organic P components in sediments had no significant difference after the bioturbation of tubificid worms, while their vertical distribution changed obviously. The maximum concentration of total P and organic P appeared in the 0—0.5 cm sediment layer, and then decreased sharply downwards in control group, however, the maximum concentration of total P and organic P in sediments with the bioturbation of tubificid worms appeared in the 0.5—1cm sediment layer, their concentration in the 0—0.5 cm sediment layer were lower than that in control group. Based on ^{31}P NMR analysis, the concentration of labile organic P in 0.5—1cm sediment layer with the bioturbation of tubificid worms

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41001319; 41101089); 河南大学科研启动基金资助项目 (2009080); 河南大学博士后科研启动项目 (BH2011045)

收稿日期: 2011-10-23; **修订日期:** 2012-06-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bxling@163.com

was reduced significantly, such as DNA, which content was reduced from 11.2 mg/kg to 6.1 mg/kg. In addition, some physical and chemical indexes in sediments were also changed with the bioturbation of tubificid worms, water content, porosity in the 0—4cm sediment layer and alkaline phosphatase activity in the 0—1.5 cm sediment layer were increased significantly. Some research had found that the increase of water content and porosity in sediments can effect the substance release from sediments. In this research, alkaline phosphatase activity was found to be negatively correlated with the concentration of DNA and phospholipids, this indicated that the increasing of alkaline phosphatase activity can accelerate the decomposition of labile organic P, resulting in the decrease of DNA and phospholipids in the upper sediment.

Key Words: bioturbation; organic P; sediment; tubificid worms

磷是湖泊生态系统中重要营养元素之一。在湖泊水体中,磷的来源有外源和内源之分,随着外源输入基本得到控制,内源沉积物的释磷作用逐渐引起人们关注^[1]。在影响内源沉积物释磷作用的因子中,除沉积物-水界面的环境要素以外,沉积物磷的形态及含量也是一个重要影响因子^[2-3]。目前对沉积物磷形态的研究多采用化学分级提取法^[4-5],不同的分级提取方法中均将有机磷看作稳定性较高的一个整体^[6],而忽略了有机磷组成稳定性的差异及对微环境变化的响应。近年来,³¹P 核磁共振技术(phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy)(³¹P-NMR)的迅速发展及其在海洋与淡水沉积物磷测定中的应用^[7-8],为深入了解湖泊沉积物有机磷组成特征提供了强有力的技术支撑。应用该技术测定沉积物有机磷的组成主要包括正磷酸单酯、二酯、焦磷酸盐和多聚磷^[9],其中,正磷酸单酯稳定性最高,而焦磷酸盐和多聚磷稳定性较低^[10]。沉积物中不同有机磷的含量与水-沉积物界面微环境密切相关,在污染严重湖区沉积物高活性有机磷和中等活性有机磷含量相对较高^[2]。

水丝蚓是一种常见的大型底栖动物,其通过摄食、匍行、筑穴、钻孔等扰动形式对沉积物颗粒产生搬运和混合,较大程度上改变了沉积物-水界面的 pH 值、Eh 值及溶氧含量等微环境^[11-12]。目前,关于底栖动物扰动效应研究主要围绕沉积物性质变化、营养盐、重金属及有机污染物的迁移及释放规律等方面开展^[13-16],而对沉积物营养盐形态变化研究较少。基于此,选择太湖富营养化湖区的常见底栖动物-水丝蚓作为研究对象,通过室内模拟试验分析生物扰动对沉积物有机磷组成及垂向分布的影响,以期为更深入了解磷的生物地球化学循环过程提供科学借鉴。

1 实验与方法

1.1 实验设计

采用重力柱状采泥器采集太湖沉积物。首先将所采集的沉积物柱样表层 10 cm 切分为 5 层,每层 2 cm;然后将相同深度的沉积物样品混合均匀,并过筛(60 目)以去除其中的底栖动物、大颗粒物;最后按切割顺序将沉积物回灌至内径 11 cm、高度 18 cm 的有机玻璃柱内,并放置于流动培养槽内,静止一周后添加水丝蚓,主要为太湖底栖动物优势种霍甫氏水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*);参照相关文献^[17]及前期调查结果,设置 3 个平行样,每个柱样添加 101 个体长为 35—45 mm 且活力较强的水丝蚓,同时设置 3 个不放底栖动物对照柱样,培养 1 个月以后,按照 0—0.5 cm、0.5—1 cm、1—1.5 cm、1.5—2.5 cm、2.5—4 cm、4—6 cm、6—8 cm、8—10 cm 规格切割上述沉积物柱样,并将每层沉积物中水丝蚓挑出,最后将相同高度沉积物混合均匀后装入塑料带冷藏保存,以备分析。

1.2 沉积物理化性质分析

用坩埚取适量新鲜沉积物,在 105 °C 条件下烘 24 h,测定烘干前后沉积物重量,通过计算得到沉积物含水率和空隙率^[18];沉积物总磷含量是在 450 °C 条件下灼烧 3 h,然后用 3.5 mol/L HCl 振荡提取后测定而得;沉积物无机磷含量采用 1 mol/L HCl 直接振荡提取测定^[4];而沉积物中有机磷含量则通过总磷与无机磷之间的差值计算获得。

1.3 沉积物有机磷的提取及 ^{31}P -NMR 分析

沉积物有机磷提取前,首先需要将样品冷冻干燥,再进行研磨过筛,称取过筛后 1.0 g 沉积物置于离心管中,加入 8 mL 0.25 mol/L NaOH+50 mmol/L EDTA 提取剂,在 20 ℃ 条件下振荡提取 16 h,然后在 10000 r/min 下离心 10 min,保留上层清液;取小部分样品按照钼酸铵比色法测定提取液中的总磷;将剩余样品在 28 ℃ 下旋转蒸发,浓缩 10 倍左右,浓缩样品冷冻贮存直到分析。在进行 ^{31}P -NMR 分析前,先以 10,000 r/min 的转速将浓缩样品离心 10 min,并在提取液中加入 0.1 mL 的 D_2O 锁定信号,采用 BRUKER 标准腔 5 mm 的 BBO 探头, ^{31}P 谱的脉冲 $\text{P1}=5.9\ \mu\text{s}$,脉冲功率 $\text{PL1}=-1.00\ \text{dB}$, ^{31}P 的共振频率为 161.98 MHz,循环延迟 $\text{dl}=3\ \text{s}$,扫描 20,000 次左右,测定温度为 20 ℃,所有 ^{31}P 化学位移均参照 85% 的正磷酸。参考已发表文献确定不同化学位移磷的组成^[8,19-20]。

1.4 沉积物碱性磷酸酶的分析

称量 0.5 g 左右湿沉积物于灭菌的 50 mL 反应管中,加入 0.5 mol/L 的 tris-HCl (pH=8.4) 缓冲液 10 mL,混匀后在 37 ℃ 下反应 1 h,然后加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液 2 mL 终止反应,离心过滤上层清液,410 nm 比色,转换成单位质量干泥的活性强度^[21]。

2 实验结果

2.1 水丝蚓扰动下沉积物物理性质的变化特征

从图 1 可看出,水丝蚓扰动下沉积物的含水率和孔隙率均出现明显增加,特别是表层 0—4 cm 的沉积物,其含水率和孔隙率比对照组增加约 8%。

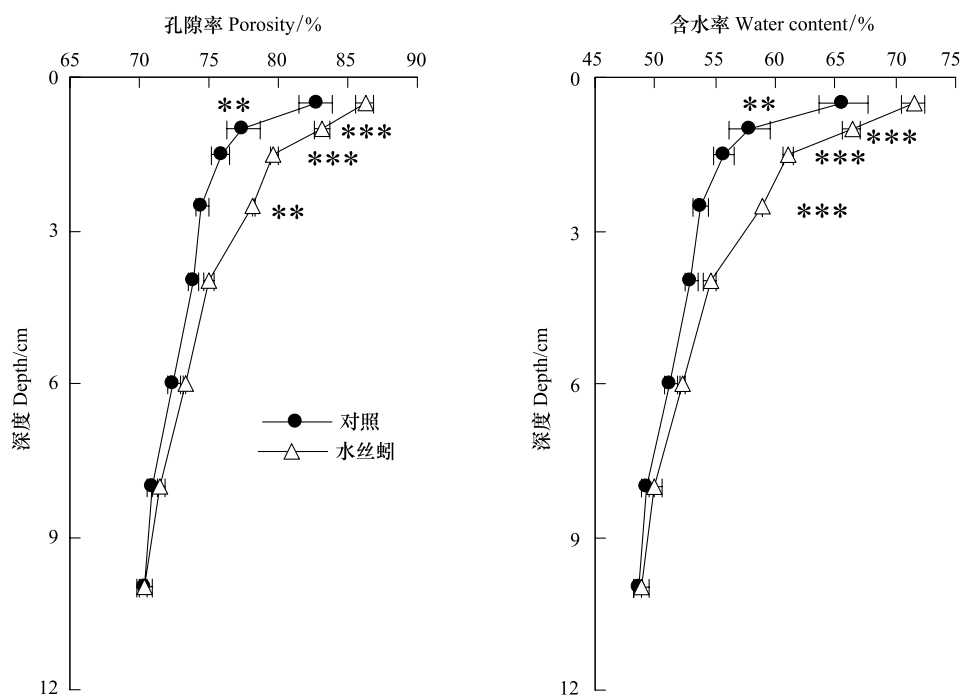


图 1 沉积物含水率和孔隙率随深度变化

Fig. 1 Changes of water content and porosity in sediment with depth

*** 表示显著水平 $P < 0.001$; ** 表示显著水平 $P < 0.01$

2.2 水丝蚓扰动下沉积物总磷和有机磷的垂向分布特征

已有研究表明水丝蚓垂向迁移深度一般在 3 cm 左右^[12],同时从图 1 亦可看出,水丝蚓对沉积物扰动主要发生在表层 0—4 cm。因此,本文对水丝蚓的扰动效应主要通过表层 0—4 cm 沉积物性质的变化来分析。

对照组表层 0—0.5 cm 沉积物总磷为 781.0 mg/kg,有机磷为 180.2 mg/kg,约占沉积物总磷的 23%。0.5 cm 以下,沉积物总磷和有机磷显著降低,但含量随深度增加变化较小,约为 572.3 mg/kg 和 125.6 mg/kg

(图 2)。

与对照组沉积物磷含量垂向分布不同,水丝蚓扰动下沉积物总磷最大值出现在 0.5—1 cm,为 736.8 mg/kg,略低于对照组沉积物总磷的最大值。表层 0—0.5 cm 沉积物总磷为 548.4 mg/kg,明显低于对照组表层沉积物磷含量。1 cm 以下,沉积物总磷含量逐渐降低,但变化幅度较小。而水丝蚓扰动下沉积物有机磷含量随深度变化无明显规律性,其最大值出现在 0.5—1 cm,为 171.9 mg/kg,最小值出现在表层 0—0.5 cm,为 130.0 mg/kg(图 2)。

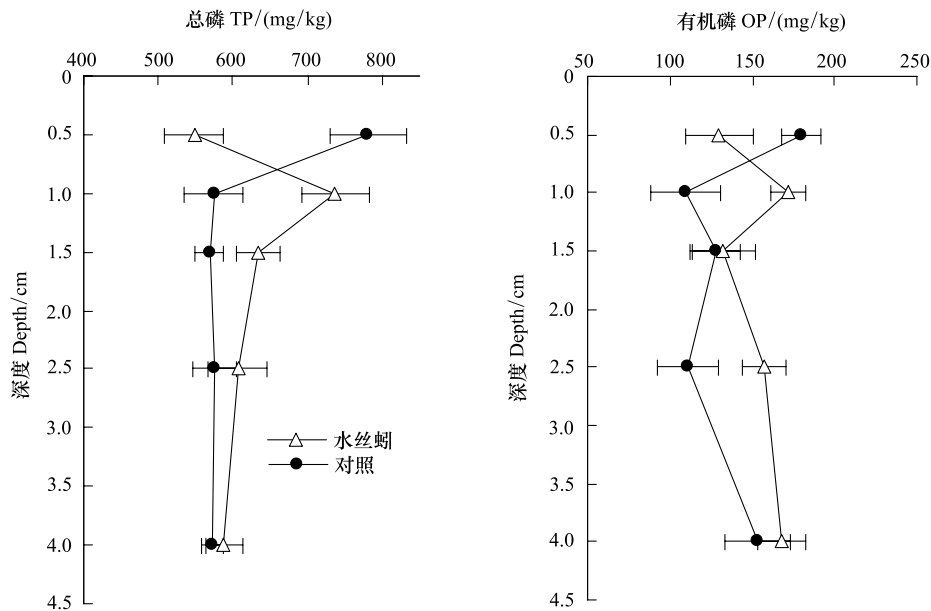


图 2 沉积物总磷和有机磷随深度变化

Fig. 2 Total phosphorus (TP) and organic phosphorus (OP) in sediment with depth

2.3 水丝蚓扰动下沉积物有机磷组成的变化特征

利用³¹P-NMR 分析样品所需时间较长(大于 12 h),且所需费用较高。在考虑生物扰动垂向迁移深度的基础上,本文每组从表层 0—4 cm 的沉积物样品中,选择磷含量差别较大的两层沉积物用来分析有机磷组成,分别选择 0.5—1 cm 和 2.5—4 cm 沉积物。

从表 1 可知,对照组 0.5—1 cm 和 2.5—4 cm 两层沉积物 NaOH-EDTA 提取液总磷分别为 230.6 mg/kg 和 252.2 mg/kg,水丝蚓扰动下表层 0.5—1 cm 沉积物 NaOH-EDTA 提取液总磷含量显著增加,为 343.9 mg/kg,下层 2.5—4 cm 沉积物 NaOH-EDTA 提取液总磷含量为 248.4 mg/kg。

表 1 NaOH-EDTA 提取沉积物总磷和利用³¹P-NMR 测定的有机磷组成及含量(mg/kg)

Table 1 Content of TP extracted with NaOH-EDTA and individual phosphorus compound in sediments detected by ³¹ P-NMR								
		提取液总磷 TP in NaOH-EDTA	磷酸酯 Phosphonate	正磷酸盐 Ortho- phosphate	单酯 Monoester	磷脂 Phos- pholipids	DNA	焦磷酸 Pyro- phosphate
0.5—1 cm	水丝蚓 Tubificid worms	343.9	3.0 (0.88) ^a	304.3 (88.50)	24.3 (7.07)	3.0 (0.88)	6.1 (1.77)	3.0 (0.88)
	对照 Control	230.6	1.9 (0.81)	187.5 (81.30)	24.4 (10.57)	3.8(1.63)	11.2 (4.88)	1.9 (0.81)
2.5—4 cm	水丝蚓 Tubificid worms	248.4	4.1 (1.65)	205.3 (82.64)	22.6 (9.09)	4.1(1.65)	10.3 (4.13)	2.1 (0.83)
	对照 Control	252.2	4.1 (1.63)	206.7 (81.96)	24.8 (9.84)	4.1(1.64)	12.4 (4.92)	n. d.

a: 利用³¹P-NMR 测定各形态磷的百分比; n. d.: 低于检测极限

从沉积物 NaOH-EDTA 提取液中磷化合物组成来看(图 3),水丝蚓作用组和对照组基本相同,包括磷酸

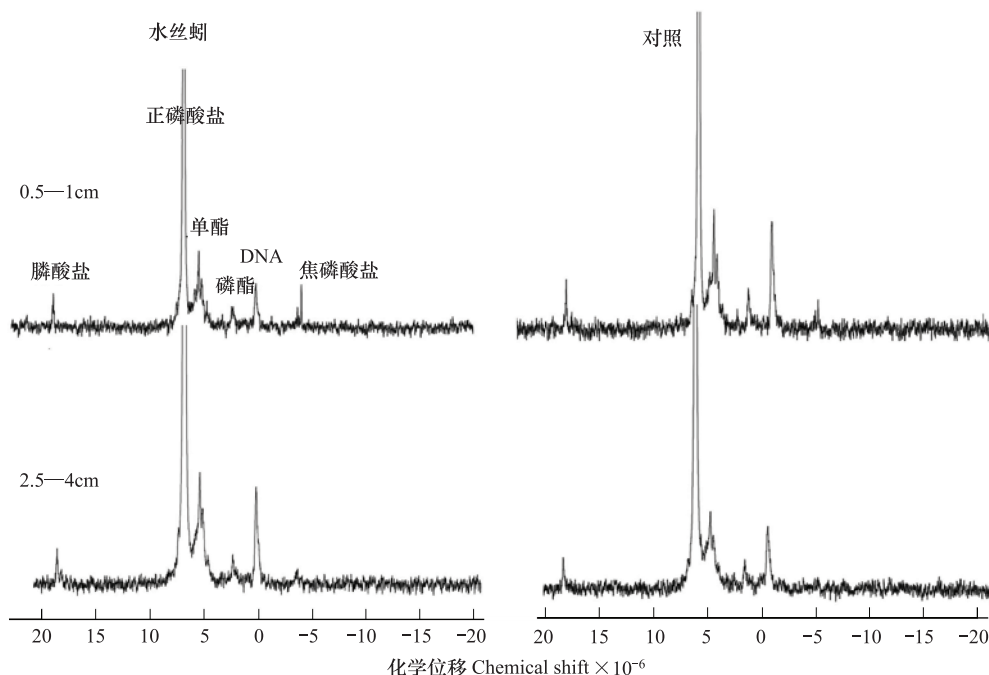


图 3 沉积物 NaOH-EDTA 提取液的³¹P-NMR 波谱

Fig. 3 ³¹P-NMR spectra of NaOH-EDTA in sediment

酯($18 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{-6}$)、正磷酸盐($6 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$)、单酯($4 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6}$)、正磷酸二酯中的磷脂($1 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-6}$)和 DNA(0×10^{-6}),且正磷酸盐具有绝对优势,占 80% 以上,其次是单酯,所占比例为 7%—10%,其他组成含量较低,低于 5% (表 1)。对照组的 2.5—4 cm 沉积物焦磷酸盐($-3.5 \times 10^{-6} - -4.5 \times 10^{-6}$)含量低于检测极限。

从沉积物 NaOH-EDTA 提取液中有机磷化合物含量来看,与对照组相比,水丝蚓扰动下两层沉积物中单酯的含量变化均较小,而 0.5—1 cm 沉积物中 DNA 和磷脂含量明显降低,分别从 11.2 mg/kg 和 3.8 mg/kg 降低为 6.1 mg/kg 和 3.0 mg/kg。2.4—5 cm 沉积物中 DNA 和磷脂含量变化并不明显。0.5—1 cm 和 2.5—4 cm 两层沉积物中焦磷酸盐含量在水丝蚓作用组均高于对照组。0.5—1 cm 沉积物中水丝蚓作用组磷酸酯含量亦高于对照组,但在 2.5—4 cm 处两组沉积物中磷酸酯含量相当。

2.4 水丝蚓扰动下沉积物碱性磷酸酶活性变化及与不同磷组成的关系

水丝蚓扰动下,表层 0—1.5 cm 沉积物碱性磷酸酶活性均明显高于对照组,增加率约为 57%。但沉积物碱性磷酸酶活性随深度变化规律与对照组一致,均是随深度增加而降低(图 4)。将 0.5—1 cm 和 2.5—4 cm

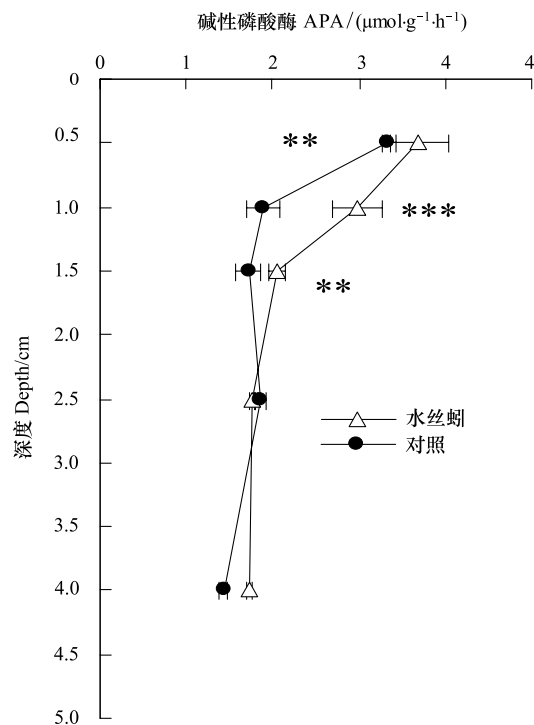


图 4 沉积物碱性磷酸酶活性随深度变化

Fig. 4 Variations of alkaline phosphatase activity (APA) in sediment with depth

*** 表示显著水平 $P < 0.001$; ** 表示显著水平 $P < 0.01$

沉积物碱性磷酸酶活性与相应沉积物 NaOH-EDTA 提取液中有有机磷各主要成分进行相关分析,发现碱性磷酸酶活性与有机磷的不同组成关系并不一致,与二酯中的磷脂与 DNA 却呈显著负相关,但和单酯与磷酸酯关系均不显著(图 5)。

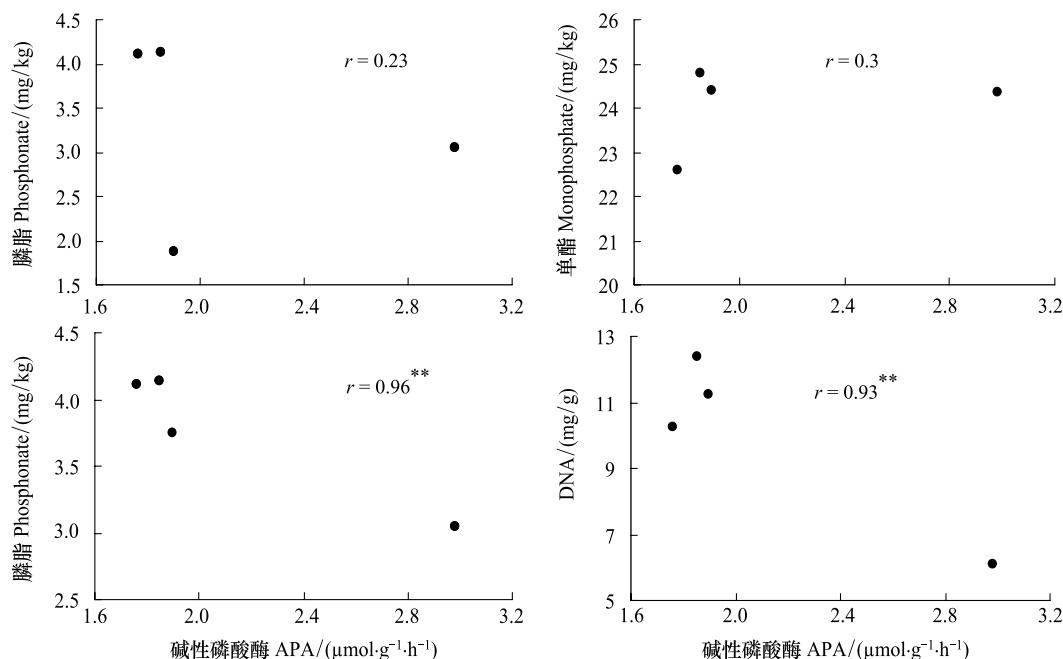


图 5 沉积物有机磷不同组成与碱性磷酸酶活性关系

Fig. 5 Relationships of individual P compounds with APA in sediment

* * * 表示显著水平 $P < 0.001$

3 讨论

在湖泊生态系统中,生物扰动是沉积物结构改变及营养盐输移的重要动力之一。水丝蚓是太湖富营养化湖区底栖动物的优势种^[17],虽个体较为细小,但其活动可使沉积物物理结构发生细微变化^[12],并影响到沉积物的理化性质。研究发现,水丝蚓扰动使沉积物(特别是表层 0—4 cm)的含水率和孔隙率增加明显,并且表层沉积物总磷和有机磷有所降低,该现象表明水丝蚓扰动对沉积物磷释放具有一定的促进作用,这与其他学者的观点相一致^[22-23]。生物扰动促进磷释放的机理解释涉及层面较多,相对复杂。目前研究者普遍认为,沉积物释磷速率的变化主要受控于沉积物理化环境及微生物过程的改变^[12,24-25]。例如,吴方同等研究发现,厌氧条件下水丝蚓的生物扰动会增强,总磷释放的增量为好氧状态下的 2 倍^[24]。本研究中扰动组表层沉积物磷含量降低可能与水丝蚓活动引起的沉积物含水率和孔隙率的显著增加有关。此外,水丝蚓生命过程中会不断摄食深层沉积物,并将深层沉积物以粪便的形式排放到表层,在沉积物-水界面上形成棕红色的蚓粪^[12],因此,水丝蚓的新陈代谢亦可能造成表层沉积物总磷和有机磷含量出现降低。水丝蚓扰动组 0—0.5 cm 沉积物磷含量降低,而沉积物 0.5—4 cm 总磷含量却明显增加,特别是 0.5—1 cm 处,总磷含量增加最大,究其原因,主要是因为水丝蚓扰动使磷含量较高的表层沉积物颗粒向下迁移^[26],导致底层沉积物磷含量有所增加。与总磷相比,生物扰动下沉积物有机磷的变化规律并不明显。

水丝蚓作用下沉积物磷组成与对照组基本一致,主要包括正磷酸盐、单酯、二酯中的磷脂、DNA、焦磷酸盐和磷酸酯,与目前利用³¹P-NMR 技术测定淡水沉积物磷的组成结果相类似^[7,9],这表明实验期间水丝蚓的扰动作用对沉积物磷组成的直接影响并不明显。但试验结束后,沉积物不同磷组成的含量变化并不一致。这除了与沉积物磷组成本身的稳定性相关外,沉积物碱性磷酸酶活性的变化也是影响沉积物磷(特别是有机磷)含量变化的一个重要因素。

碱性磷酸酶是一种专一性的磷酸酯水解酶,可以催化所有磷酸酯的水解反应和磷酸基团的转移反应,其

活性与磷的循环速率、溶解态有机磷的生物可利用性及生物可利用磷等密切相关^[27-28]。水丝蚓扰动下表层沉积物碱性磷酸酶活性增加(图4),表明沉积物中由磷酸酶介导的磷循环速率加快。在沉积物磷组成中,不同形态磷的稳定性差异较大,因此,其与碱性磷酸酶活性关系也不尽相同。单酯在本研究沉积物有机磷组成中所占比例最高,其含量与沉积物碱性磷酸酶活性关系并不显著,且单酯具有较高的电荷密度,能与固体颗粒紧密结合,在一定程度上限制自身酶解或直接释放到水体中^[29],因此,在水丝蚓作用下其含量变化较小。

二酯中 DNA 和磷脂的含量与碱性磷酸酶活性呈显著负相关,该两种组分与固态颗粒结合并不紧密,其活性相对较高^[28],在水丝蚓扰动下,表层沉积物碱性磷酸酶活性增加促使磷脂和 DNA 发生快速分解或转化,因此,扰动组中其含量出现明显降低。磷酸酯含有 C—P 键,耐酸碱,稳定性较高^[30],其含量与沉积物碱性磷酸酶活性关系并不显著,但磷酸酯在沉积物有机磷组成中所占比例较小,生物扰动下其变化规律并不明显。焦磷酸盐的半衰期小于单酯、磷脂和 DNA^[10],受微生物或化学环境影响而易分解,但通过研究发现,水丝蚓作用下沉积物焦磷酸盐含量有所增加,由于目前对焦磷酸盐的来源还知之甚少,且焦磷酸盐含量也较低,因此,仅依据文中数据,还难以推断出焦磷酸盐含量增加与生物扰动有关。

水丝蚓作用下沉积物有机磷不同组成呈现出的变化差异较大,而这种变化依靠传统的沉积物有机磷总量分析还难以反映出来,核磁共振技术的发展及应用则在一定程度上能够弥补该方面的不足。

References:

- [1] Fan C X, Wang C X. Environmental Geochemistry and Eutrophication of Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Catchment. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, Fu P Q, Li W, Wang L Y, Liao H Q, Guo J Y. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China. Environmental Pollution, 2008, 152(2): 366-372.
- [3] Murphy T, Lawson A, Kumagai M, Nalewajko C. Release of phosphorus from sediments in Lake Biwa. Limnology, 2001, 2(2): 119-128.
- [4] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, Rauret G, Muntau H, Quevauviller P. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment. Journal of Environmental Monitoring, 1999, 1(1): 51-56.
- [5] Golterman H L. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds: a simplification, and comparison with other methods. Hydrobiologia, 1996, 335(1): 87-95.
- [6] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. Limnology and Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [7] Bai X L, Ding S M, Fan C X, Liu T, Shi D, Zhang L. Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China. Environmental Pollution, 2009, 157(8/9): 2507-2513.
- [8] Cade-Menun B J. Characterizing phosphorus in environmental and agricultural samples by ³¹P nuclear magnetic resonance spectroscopy. Talanta, 2005, 66(2): 359-371.
- [9] Carman R, Edlund G, Damberg C. Distribution of organic and inorganic phosphorus compounds in marine and lacustrine sediments: A ³¹P NMR study. Chemical Geology, 2000, 163(1/4): 101-114.
- [10] Ahlgren J, Reitzel K, Tranvik L, Gogoll A, Rydin E. Degradation of organic phosphorus compounds in anoxic Baltic Sea sediments: a ³¹P nuclear magnetic resonance study. Limnology and Oceanography, 2006, 51(5): 2341-2348.
- [11] Zhang L, Gu X Z, Wang Z D, Shen Q S, Fan C X, Zhong J C, Yin H B. The influence of *Tubificid worms* bioturbation on the exchange of phosphorus across sediment-water interface in lakes. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(5): 666-674.
- [12] Zhang L. Changes of Sediment-Water Interface Properties and Phosphorus Dynamics Under Bioturbation in Lake [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [13] Zhang C, Wang S G, Zheng Y H, Chen G Z. The effects of roots and crabs bioturbation on AVS, migration and transformation of heavy metals in mangrove sediments. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 3037-3045.
- [14] Lewandowski J, Hupfer M. Effect of macrozoobenthos on two-dimensional small-scale heterogeneity of pore water phosphorus concentrations in lake sediments: a laboratory study. Limnology and Oceanography, 2005, 50(4): 1106-1118.
- [15] Lu Y Z, Yan B X. Effect of bioturbation by worms on the transport of Pb and Cd between sediments and waters. China Environmental Science, 2010, 30(2): 251-255.
- [16] Nie X B, Wu S J, Wu F T, Sun S Q, Jiang C B, Tan W C, Wan J L. Effects of the bioturbation activity of *Tubifex tubifex* on nitrogen release from sediments. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(1): 107-113.

- [17] Cai Y J, Gong Z J, Qin B Q. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China. *Biodiversity Science*, 2010, 18(1): 50-59.
- [18] Jin X C, Tu Q Y. *The Standard Methods for Observation and Analysis in Lake Eutrophication*. 2nd ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990.
- [19] Wang X J, Ding S M, Jiang H Q, Bai X L, Fan C X. Characterizing phosphorus in environmental model samples by ^{31}P -NMR. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(1): 45-50.
- [20] Turner B L, Mahieu N, Condron L M. Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectral assignments of phosphorus compounds in soil NaOH-EDTA extracts. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(2): 497-510.
- [21] Gao G, Qin B Q, Zhu G W, Fan C X, Ji J. Seasonal variation of alkaline phosphatase activity in Meiliang Bay, Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(3): 245-251.
- [22] Hughes D J, Atkinson R J A, Ansell A D. A field test of the effects of megafaunal burrows on benthic chamber measurements of sediment-water solute fluxes. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 195: 189-199.
- [23] Wang J J. Establishment of Lab Simulation Systems for Benthic Flux and Their Applications in Biogeochemical Cycles of Oxygen at the Sediment-Water Interface [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2008: 48-65.
- [24] Wu F T, Yan Y H, Sun S Q, Tan W C. Influence of *Limnodrilus hoffmeisteri* bioturbation on phosphorus release from sediment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(5): 1071-1076.
- [25] Avnimelech Y, Ritvo G, Meijer L E, Kochba M. Water content, organic carbon and dry bulk density in flooded sediments. *Aquaculture Engineering*, 2001, 25(1): 25-33.
- [26] Du Y F, Zhang Z N. The effect of bioturbation of *rudistapes philippinarum* on the vertical distribution of sediment particles. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(6): 988-992.
- [27] Zhang T X, Wang X R, Jin X C. Vertical variation of alkaline phosphatase activity and phosphorus forms in the Taihu Lake sediment and the relationship between them. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 36-40.
- [28] Gao G, Zhu G W, Qin B Q, Chen J, Wang K. Alkaline phosphatase activity and the phosphorus mineralization rate of Lake Taihu. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2006, 49(S1): 176-185.
- [29] Leytem A B, Mikkelsen R L, Gillian J W. Sorption of organic phosphorus compounds in Atlantic coastal plain soils. *Soil Science*, 2002, 167(10): 652-658.
- [30] Kittredge J S, Roberts E. A carbon-phosphorus bond in nature. *Science*, 1969, 164(3875): 37-42.

参考文献:

- [1] 范成新, 王春霞. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] 张雷, 古小治, 王兆德, 申秋实, 范成新, 钟继承, 尹洪斌. 水丝蚓 (*Tubificid worms*) 扰动对磷在湖泊沉积物-水界面迁移的影响. *湖泊科学*, 2010, 22(5): 666-674.
- [12] 张雷. 生物扰动下湖泊沉积物-水界面特征变化与磷的迁移转化 [D]. 南京: 中科院南京地理与湖泊研究所, 2010: 32-32.
- [13] 张驰, 王树功, 郑耀辉, 陈桂珠. 生物扰动对红树林沉积物中 AVS 和重金属迁移转化的影响. *生态学报*, 2010, 30(11): 3037-3045.
- [15] 路永正, 阎百兴. 颤蚓扰动作用对铅镉在沉积物-水相中迁移的影响. *中国环境科学*, 2010, 30(2): 251-255.
- [16] 聂小保, 吴淑鹃, 吴方同, 孙士权, 蒋昌波, 谭万春, 万俊力. 颤蚓生物扰动对沉积物氮释放的影响. *环境科学学报*, 2011, 31(1): 107-113.
- [17] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性. *生物多样性*, 2010, 18(1): 50-59.
- [18] 金相灿, 屠清英. 湖泊富营养化调查规范 (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 王晓钧, 丁士明, 蒋海青, 白秀玲, 范成新. 湖泊磷的核磁共振 (NMR) 分析—1 环境标准样品的 ^{31}P -NMR 表征. *湖泊科学*, 2008, 20(1): 45-50.
- [21] 高光, 秦伯强, 朱广伟, 范成新, 季江. 太湖梅梁湾中碱性磷酸酶的活性及其与藻类生长的关系. *湖泊科学*, 2004, 16(3): 245-251.
- [23] 王建军. 湖泊水土界面室内模拟系统的建立及其在界面氧气生物地球化学过程研究中的应用 [D]. 南京: 中科院南京地理与湖泊研究所, 2008: 48-65.
- [24] 吴方同, 闫艳红, 孙士权, 谭万春. 水丝蚓生物扰动对沉积物磷释放的影响. *环境工程学报*, 2011, 5(5): 1071-1076.
- [26] 杜永芬, 张志南. 菲律宾蛤仔的生物扰动对沉积物颗粒垂直分布的影响. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2004, 34(6): 988-992.
- [27] 章婷曦, 王晓蓉, 金相灿. 太湖沉积物中碱性磷酸酶活力 (APA) 和磷形态的垂向特征及相关性. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 36-40.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元