

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

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 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH₄吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O₃及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响
..... 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果
..... 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑曦,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)

景观、区域和全球生态

南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)

资源与产业生态

基于GIS的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)

学术信息与动态

全球土地计划第二次开放科学大会 (GLP 2 nd Open Science Meeting) 会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
---	----------------

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

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

DOI: 10.5846/stxb201312082909

刘文静, 张平究, 董国政, 孔令柱, 郑真, 司红君. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2654-2662.

Liu W J, Zhang P J, Dong G Z, Kong L Z, Zheng Z, Si H J. Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2654-2662.

不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化

刘文静¹, 张平究^{1,*}, 董国政², 孔令柱¹, 郑真¹, 司红君¹

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院/安徽自然灾害过程与防控研究省级重点实验室, 芜湖 241003;

2. 南京牛首山园林管理有限公司, 南京 211100)

摘要:选取菜子湖区不同退耕年限(2、5、8、10a 和 20a)湿地为研究对象,以仍耕作油菜地和原始湿地为参照,分析了土壤全磷(TP)、有效磷(AP)、有机磷(OP)和无机磷(IP)各形态含量,探讨退耕还湖后湿地土壤磷素组分特征变化规律。结果表明:研究区土壤无机磷各形态含量大小顺序为:铁磷(Fe-P:73.55—391.76 mg/kg) > 钙磷(Ca-P:21.64—108.04 mg/kg) > 闭蓄态磷(O-P:17.15—29.57 mg/kg) > 铝磷(Al-P:5.84—25.97 mg/kg),其中 Fe-P 占了土壤无机磷总量的 54.20%—74.13%;退耕还湖 2—8a 期间,湿地土壤 Al-P、Fe-P 和 O-P 含量有逐渐降低趋势,而退耕 8—20a 后逐渐上升,以 Fe-P 为主的这 3 形态磷左右着退耕后土壤无机磷的变化;Ca-P 随退耕年限增加整体呈上升趋势,对土壤无机磷的贡献逐渐增加;无机磷占土壤全磷的比例为 35.90%—67.27%,主导着退耕后湿地土壤全磷变化;有机磷占土壤全磷的 17.82%—50.51%,在退耕 2a 后下降,随后开始逐渐上升,对退耕后湿地土壤磷库恢复的贡献逐渐增加;其中 Fe-P、O-P 和 Al-P 控制着退耕后土壤磷素有效性变化。退耕后水文条件、植被生长和土壤黏粒含量变化不仅影响退耕后湿地土壤磷素组分特征,也影响着退耕后湿地土壤磷素有效性。

关键词:退耕还湖;湿地土壤;磷素形态;磷素有效性;菜子湖

Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province

LIU Wenjing¹, ZHANG Pingjiu^{1,*}, DONG Guozheng², KONG Lingzhu¹, ZHENG Zhen¹, SI Hongjun¹

1 College of Territorial Resource and Tourism, Anhui Normal University/ Anhui key Laboratory of Natural Disasters Process and Prevention, Wuhu 241003, China

2 Niushoushan Garden Management Company Limited, Nanjing 211100, China

Abstract: Phosphorus (P) is often the critical limiting nutrient controlling the productivity of wetlands. However, water eutrophication caused by P over enrichment impairs water quality and destroys wetland ecosystem. Very limited information is available on the characteristics change of P pool in wetland soils after returning farmland to lake (RFL). We used P fractionation techniques to investigate P distribution in soils, sampled from wetlands with various age (2, 5, 8, 10 and 20a) of RFL, rape field, and native wetlands in the Caizi lake, Anhui province. The results showed that the contents of inorganic P (IP) were in the order: Fe-P (73.55—391.76 mg/kg) > Ca-P (21.64—108.04 mg/kg) > O-P (17.15—29.57 mg/kg) > Al-P (5.84—25.97 mg/kg), moreover Fe-P, as a main component, accounted for 54.20%—74.13% of IP in studied field. All of Al-P, Fe-P and O-P declined within the restoration period of 2—8a, and began to increase gradually after 8a of RFL. The contents of Ca-P increased progressively with the age of RFL, and showed more and more contribution to IP. Soil inorganic P accounted for 35.90%—67.27% of soil total P, owning the same change tendency as Fe-P with various age of RFL, and dominated the change tendency of TP after RFL. Soil organic P accounted for 17.82%—50.51% of

基金项目:国家自然科学基金项目(41001369; 41301249);安徽省自然科学基金资助(1308085MD22)

收稿日期:2013-12-08; 修订日期:2014-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: changpj2006@163.com

total P and increased gradually with the RFL age. With restoration age, the contribution of Ca-P to inorganic P pool and organic P to total P pool increased. The results also indicated Al-P, Fe-P and O-P controlled P availability in wetlands with RFL age. The changes of soil P contents, composition, and availability were attributed to soil clay content, and shift of hydrological condition and recovery status of vegetation after RFL.

Key Words: returning farmland to lake; wetland soil; forms of phosphorus; phosphorus availability; Caizi lake

湿地是介于陆地和水生生态系统之间的过渡地带,具有独特的水文、土壤、植被与生物特征,是自然界生物多样性最丰富的生态景观和人类重要的生存环境,被誉为“自然之肾”^[1]。由于人类长期的不合理开发利用,长江中下游湿地生态系统有着退化的趋向。自 1998 年长江特大洪水后,退耕还湖成为我国长江中下游湿地生态恢复的重要举措。退化湿地生态系统功能恢复及其环境效应成为湿地科学研究的重要方向^[2]。

磷是湿地生态系统的主要限制性养分之一,影响着湿地生态系统结构、功能和生产力^[3]。湿地可通过土壤基质吸附、植物吸收和微生物积累等途径截留外源磷素,增加湿地土壤磷含量^[1,4-5]。同时湿地土壤或沉积物在一定条件下释放自身磷素或吸附的外源磷素,致使上覆水体中磷含量增加,导致湿地上覆水体富营养化^[4-7],破坏良性湿地生态系统的结构与功能。磷素通过在湿地土壤的生物地球化学过程,形成生物化学性质各异的各种形态,不同生物化学性质的形态磷素不仅影响磷素总体生物有效性,也影响磷素在土壤及土壤与水体间迁移转化^[5-9]。因此,湿地土壤磷素分级研究方法不仅可有效揭示湿地土壤磷素状况^[10],也可更好评估湿地土壤磷流失风险。当前湿地土壤磷素形态研究表明湿地利用方式^[11-12]、植被类型及生长^[13-14]、干湿交替^[4,6]、季节变化^[15]、土壤母质^[16-17]和季节性淹水或洪水^[18-19]等均对磷素形态组分及含量产生影响,进而影响湿地土壤磷素生物有效性及磷素迁移转化行为,但尚未见到退耕还湖后湿地土壤磷素形态组分变化的研究报道。

本文通过磷素分级方法研究不同退耕年限(2、5、8、10a 和 20a)湿地、原始湿地和仍耕作油菜地土壤全磷、有效磷、有机磷和无机磷组分进行比较分析,探讨退耕还湖后湿地生态恢复过程中土壤磷库特征变化及环境效应,为长江中下游沿江退化湿地

生态恢复及其有效管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

菜子湖位于安徽省安庆市,是长江中下游淡水湖泊群的重要组成部分之一。湖区地貌以丘陵和冲积平原为主,年平均气温 16.6℃,年平均降水量 1325.5 mm。4—10 月为丰水期,水深 3 m 以上,11 月—翌年 3 月为枯水期,湖底大多出露为滩涂。湖区主要土壤类型为红壤、潮土和水稻土。20 世纪 50 年代菜子湖区开始大规模围垦,导致湿地大面积消失,到 80 年代中期开始逐步退耕还湖,1998 年特大洪水后,加快退耕还湖进程。本研究中退耕还湖湿地样地均为水产养殖区,养殖区水体与自然水域自由联通。

1.2 土样采集与处理

于 2010 年 12 月在菜子湖区先让村、双兴村、许咀村、玉咀村和苏家庄村,选择不同退耕年限湿地(×aW)、原始湿地(NW)和油菜地(RF)典型样地。退耕湿地除退耕年限不同外,其他条件相同或相似,植被均为乳突苔草群落(*Carex maximowiczii*),退耕前耕作历史均为种植油菜(*Brassica campestris*)。退耕湿地退耕年限分别为 2a(2aW)、5a(5aW)、8a(8aW)、10a(10aW)和 20a(20aW)。2010 年 12 月份采样时,苔草尚在发芽,当时未描述样地植被高度和盖度。本文采用 2011 年 4 月在该样地采样时的植被描述。RF(30°53'57" N, 117°06'07" E):植株高约 145 cm,盖度约 95%;2aW(30°55'36" N, 117°06'08" E):植株高约 40 cm,盖度约 30%;5aW(30°55'35" N, 117°06'08" E):植株高约 55 cm,盖度约 75%;8aW(30°53'43" N, 117°06'43" E):植株高约 80 cm,盖度约 100%;10aW(30°53'46" N, 117°06'44" E):植株高约 80 cm;盖度约 100%;20aW(30°53'11" N, 117°00'59"E):植株高约 100 cm,盖度约 100%;NW

(30°56'44" N, 117°06'25" E); 植株高约 90 cm, 盖度约 100%。每个样地随机设置 3 个重复, 每个重复样地面积 30 m×30 m, 在此范围内按“S”型样线采 5 个土样混合 1 个样, 分表层(0—6 cm)和亚表层(6—16 cm)分别采集。土壤样品经自然风干后磨碎, 分别过 2 mm 和 0.149 mm 径筛, 保存备用。

1.3 分析方法

土壤理化性质指标测定方法^[20]如下: 土壤容重测定采用环刀法, 同时测定土壤含水量; pH 值测定

采用电位计法 [$V(\text{水}):m(\text{土}) = 2.5:1$]; 土壤有机质 (SOM) 含量测定采用重铬酸钾-外加热法; 全氮 (TN) 含量测定采用半微量-凯氏法; 全磷 (TP) 含量测定采用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法; 有效磷 (AP) 含量测定采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法; 土壤黏粒 (CC) 含量分析参照 MURRAY 的方法^[21]; 无机磷 (IP) 分级采用张守敬和 Jackson 的方法^[19]; 有机磷 (OP) 含量测定采用烧灼法^[20]。研究区样地土壤基本理化性质见表 1。

表 1 研究区样地土壤基本理化性质^[23]

Table 1 Soil physical and chemical properties of the studied soils

样地 Sample plot	土壤层次/cm Soil depth	pH (H ₂ O)	含水量/% Water content	黏粒/% Soil clay	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen
RF	0—6	4.75±0.11	13.44	19.78±2.35	17.07±0.68	1.29±0.17
	6—16	4.69±0.15	17.98	19.72±2.16	16.57±0.34	1.01±0.11
2aW	0—6	4.63±0.06	19.58	19.17±0.43	20.93±0.36	1.22±0.21
	6—16	4.60±0.08	20.26	18.44±0.21	17.65±0.28	0.70±0.03
5aW	0—6	4.69±0.09	23.89	22.84±0.37	23.79±0.32	2.61±0.07
	6—16	4.86±0.15	20.24	23.82±0.31	18.20±0.48	0.76±0.08
8aW	0—6	4.64±0.05	25.27	27.36±1.04	25.59±0.88	2.43±0.06
	6—16	4.97±0.04	19.77	26.55±0.71	18.94±0.31	0.84±0.01
10aW	0—6	4.54±0.06	28.35	30.81±0.66	29.65±0.60	2.17±0.21
	6—16	4.84±0.02	20.51	32.60±0.82	19.12±0.16	1.03±0.08
20aW	0—6	4.60±0.05	45.19	31.09±1.43	44.29±1.47	1.87±0.28
	6—16	4.67±0.10	33.38	32.24±1.70	20.27±0.80	0.87±0.08
NW	0—6	4.56±0.13	60.97	34.86±1.18	51.77±3.34	3.28±0.50
	6—16	4.62±0.06	52.97	34.67±1.83	24.15±0.62	1.47±0.29

RF 为油菜地 RF representing rape field; 2aW、5aW、8aW、10aW 和 20aW 分别为退耕 2、5、8、10 和 20 年湿地, 2aW、5aW、8aW、10aW 和 20aW representing wetlands with 2, 5, 8, 10 and 20 years of restoration; NW 为原始湿地 NW representing natural wetland

1.4 数据处理分析

利用 EXCEL2003 对数据进行处理、制图; 应用 SPSS(17.0) 对数据进行差异分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 退耕后湿地土壤无机磷各形态含量变化

土壤中磷素的形态决定磷素有效性, 恰当的磷素分级方法能较好地评价土壤有效磷库的大小和磷素的供应状况^[8,10]。本文针对研究区湿地土壤属于酸性土的特点(表 1), 采用张守敬和 Jackson 提出的无机磷分级方法, 把湿地土壤无机磷分为 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 四种形态, 退耕后湿地土壤不同形态无机磷含量变化如图 1。研究区退耕湿地土壤无机磷形态以 Fe-P 为主, 含量在 73.55—391.76mg/kg 之

间, 占总无机磷的比例为 54.20%—74.13%; Ca-P 次之, 含量在 21.64—108.04mg/kg, 占总无机磷的 7.26%—26.72%; O-P 含量在 17.15—29.57mg/kg, 占总无机磷的比例为 4.93%—16.28%; Al-P 含量在 5.84—25.97mg/kg 之间, 占总无机磷的比例最低, 在 3.54%—9.02% 之间。研究结果与白军红等对向海湿地^[24]和张彬等对三峡库区消落带湿地土壤无机磷以 Ca-P 为主^[7]的结果有差异, 这与该研究区土壤属于酸性土而向海湿地和三峡库区消落带湿地土壤属中性或碱性土有关, 一般酸性土壤无机磷以 Fe-P、Al-P 为主, 而中性或碱性土壤无机磷以 Ca-P 为主^[4,8]。由表 2 可知, 退耕湿地土壤无机磷与 Al-P、O-P 呈显著正相关 ($P < 0.005$), 与 Fe-P、Ca-P 呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 同时 Fe-P 占土壤无机磷比重

最大(54.20%—74.13%)。因此,退耕后湿地土壤 Fe-P 主导着无机磷变化趋势。

研究区湿地土壤 Al-P 和 Fe-P 在退耕 2—8a 表层含量低于亚表层,退耕 8a 后开始高于亚表层;土壤 O-P 含量均表现为表层低于或等于亚表层;土壤 Ca-P 均表现等于或高于亚表层。总体上退耕 2—8a

内湿地土壤 Al-P、Fe-P 和 O-P 含量均有不同程度逐渐减少趋势,其中 Fe-P 含量减少幅度最大,在退耕 8a 后,湿地土壤 Al-P、Fe-P 和 O-P 含量开始上升,而湿地土壤 Ca-P 含量随退耕年限的增加整体呈增长趋势。

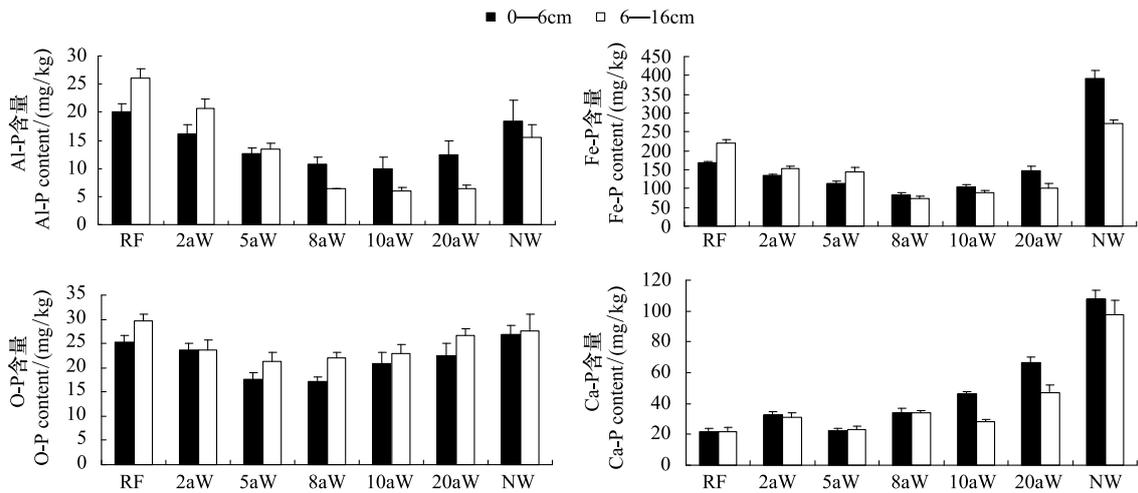


图 1 不同退耕年限下湿地土壤 Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P 含量的变化

Fig.1 Al-P, Fe-P, O-P, Ca-P contents in wetlands with various restoration age

RF 为油菜地 RF representing rape field; 2aW、5aW、8aW、10aW 和 20aW 分别为退耕 2、5、8、10 和 20 年湿地 2aW, 5aW, 8aW, 10aW and 20aW representing wetlands with 2, 5, 8, 10 and 20 years of restoration; NW 为原始湿地 NW representing natural wetland

2.2 退耕后湿地土壤无机磷、有机磷和全磷含量变化

土壤中的全磷可分为无机磷和有机磷两大部分,其中无机磷是磷素的一个极其重要的组成部分,是植物所需磷的主要来源,其含量占全磷的 60%—80%^[4,20]。退耕后湿地土壤无机磷含量在 135.69—545.18mg/kg, 占全磷的 35.90%—67.27%。退耕后湿地土壤无机磷含量的消长变化趋势与 Al-P、Fe-P

和 O-P 相似,在退耕 2—8a 内呈逐渐降低趋势且表层含量低于亚表层,在退耕 8a 后呈增长趋势且表层含量开始高于亚表层(图 2)。土壤有机磷是土壤磷素的重要组成部分,对土壤肥力和植物营养有着重要影响,我国大部分土壤有机磷占全磷的 20%—40%^[20]。研究区湿地土壤有机磷含量在 81.25—275.01 mg/kg, 占全磷比例为 17.82%—50.50%, 总体低于研究区湿地土壤无机磷含量。这与东北三江

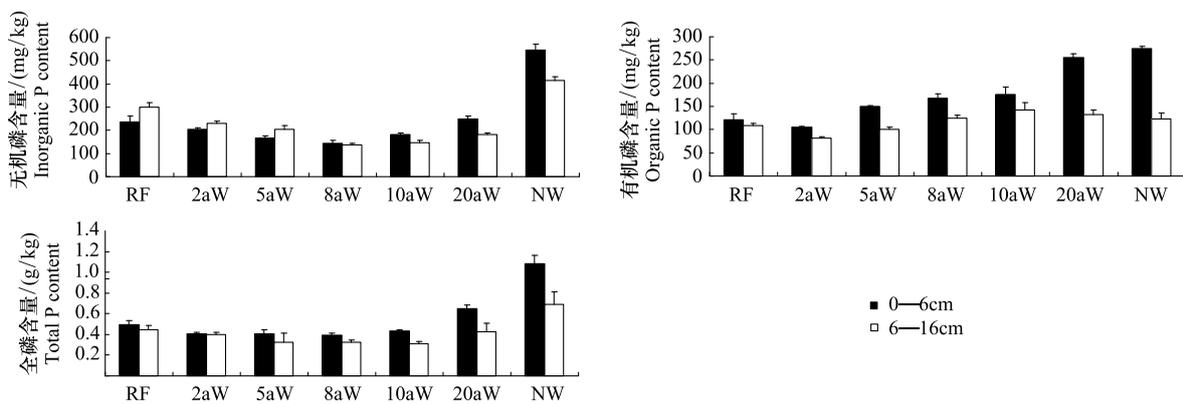


图 2 不同退耕年限下湿地土壤无机磷、有机磷、全磷含量的变化

Fig.2 Inorganic P, Organic P, Total P contents in wetlands with various restoration age

平原小叶章草甸土壤有机磷总量高于无机磷^[15] 表现出差异。退耕还湖后湿地土壤有机磷含量在退耕后 2a 内有所下降,退耕 2a 后开始随退耕年限增加而增加,且所有样地表层土壤有机磷含量高于亚表层(表 2)。土壤全磷表示土壤磷素的总储量,是衡量磷素营养水平的参考指标,主要来源于成土母质和动植物残体的归还,也与施肥措施等人类生产活动有关^[20]。研究区湿地土壤全磷含量在 0.31—1.08g/kg 之间,且在退耕 2—8a 时逐渐缓慢下降,在退耕 8a 后开始升高,总体与退耕后湿地土壤无机磷变化一致(图 1,图 2)。

本文中若用各个形态无机磷之和再加上有机磷代表土壤全磷,那么数值均小于实测土壤全磷含量,基本只有实测全磷的 75%—95%,但退耕后湿地土壤加和的全磷与实测全磷变化趋势基本一致,这可能是由于在无机磷连续分级中,每个步骤均有可能不同程度磷损失有关。

2.3 退耕后湿地土壤磷素有效性变化

土壤速效磷是土壤中可被植物吸收的组分,是土壤磷素养分直接供应水平高低的指标。退耕还湖后湿地土壤有效磷表现出退耕 10a 期间连续减低,而退耕 20a 后升高(图 3)。全磷和有效磷是用以衡量土壤磷素状态的两个重要指标,用速效磷与全磷之比——土壤磷素活化系数(Phosphorus activation coefficient,简称 PAC)来衡量土壤全磷的有效性。有研究表明,PAC 大于 2.0%说明土壤全磷容易转化为速效磷,PAC 小于 2.0%说明全磷各形态很难转化为速效磷^[25]。退耕后湿地土壤磷素活化系数在退耕 2—10a 内逐渐下降,退耕 20a 后开始上升,但仍未达到原始湿地水平,总体与 Al-P 和 Fe-P 变化趋势一致。其中退耕 5、8a 和 10 a 湿地土壤 PAC 低于 2.0%,而油菜地、退耕 2 a 湿地、退耕 20 a 湿地和原始湿地高于 2.0%(图 3)。

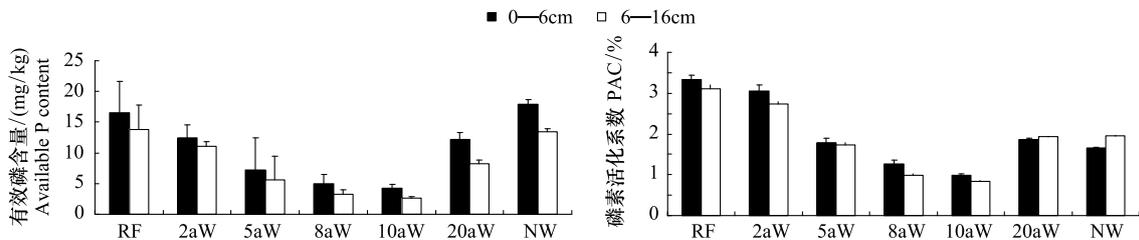


图 3 不同退耕年限下有效磷、PAC 的变化

Fig.3 Available P contents, PAC in wetlands with various restoration age

表 2 研究区湿地土壤磷素形态与土壤理化性状间的相关系数

Table 2 Correlation analysis of soil phosphorus fractions and soil physical and chemical properties

	TP	IP	OP	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	AP	CC	SOM	pH
IP	0.921 **										
OP	0.726 **	0.446									
Al-P	0.336	0.540 *	-0.141								
Fe-P	0.887 **	0.991 **	0.393	0.612 *							
O-P	0.431	0.625 *	-0.079	0.498	0.625 *						
Ca-P	0.884 **	0.815 **	0.643 *	0.029	-0.254	0.380					
AP	0.718 **	0.775 **	-0.110	0.780 **	0.793 **	0.651 *	0.456				
CC	0.490	0.345	0.626 *	-0.543 *	-0.632 *	0.100	0.740 **	-0.617 *			
SOM	0.829 **	0.597 *	0.958 **	-0.006	-0.141	0.005	0.760 **	-0.015	0.582 *		
pH	-0.542 *	-0.465	-0.414	-0.361	-0.423	-0.132	-0.495	-0.485	-0.166	-0.534 *	
PAC	0.064	0.779 **	-0.379	0.861 **	0.814 **	0.585 *	-0.203	0.734 **	-0.693 **	-0.275	-0.230

$n=14$; * 表示在 $\alpha=0.05$ 水平上显著相关; ** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平上显著相关

3 讨论

土壤无机磷是湿地植物所需磷的主要来源,一

般在酸性土壤无机磷形态中以 Fe-P 和 O-P 占主要部分,Al-P 次之,而 Ca-P 含量很低^[4,8,10]。研究区样地酸性土壤环境下 Fe-P 含量最高,占土壤无机磷比

重最大,与无机磷相关性系数最高(表2),主导着无机磷变化趋势;但Ca-P含量也较高,处于第2位。前人研究表明湿地利用方式、植被类型及生长、干湿交替、季节变化、土壤母质和季节性洪水等均影响湿地土壤磷素形态组分及含量^[11-19,26]。本研究区同处于菜子湖区,除对照油菜样地植被为油菜外,其他样地优势植被均为由于退耕年限不同而长势不同的苔草,同时土壤母质、水文条件导致的干湿交替和洪水频率与性质均相同。因此,不同退耕年限后的植被状况差异是影响湿地土壤磷素形态的重要因素。植物根系通过分泌有机酸活化土壤中的Al-P、Fe-P和Ca-P,提高土壤磷素生物有效性^[27-28],而有机酸也可促进土壤O-P的积累^[28]。研究区退耕还湖后苔草绝大多数根系分布在表层(0—6 cm),利用和消耗根系附近土壤Al-P和Fe-P,导致退耕2—8a内湿地表层和亚表层土壤Al-P和Fe-P含量的减少,并表现出的表层降低幅度大于亚表层。退耕还湖后湿地恢复了周期性淹水的水文条件,而淹水条件致使土壤Al-P、Fe-P和O-P转化水溶性磷,进而容易流失^[4,6],而Ca-P则不易流失^[9],加上退耕期短,植被保肥功能尚未恢复,致使退耕后湿地表层土壤磷素流失^[23]。因此退耕后周期性淹水进一步促使退耕2—8a内湿地表层土壤Al-P、Fe-P和O-P含量降低。当退耕8a后,随着苔草等植被得到较好恢复,湿地土壤对外源磷截留和保持能力增强^[23],同时由于植被恢复而增多的枯枝落叶及根系残留物中有机磷经微生物分解矿化可促进土壤Al-P、Fe-P和O-P含量逐渐升高^[8],并表现出表层土壤提高幅度高于亚表层。土壤Ca-P在中性至碱性反应的、相对未风化的成土初期占优势,在中性至强酸性土壤的逐渐风化过程中可转化为生物有效性高的Al-P和Fe-P^[8]。退耕后湿地土壤Ca-P含量逐渐增加,表层土壤Ca-P含量均高于亚表层,且表层土壤Ca-P占无机磷比例也由油菜地的9.2%增到退耕20a的26.7%,对无机磷贡献越来越大。这可能与湿地土壤Ca-P较难被植被吸收利用^[4,8],也不容易随淹水而流失^[9]有关。有研究表明三峡库区消落带由于淹水带来的Ca-P积累远多于Al-P、Fe-P和O-P^[7],因此退耕后周期性淹水或季节性洪水可带来丰富Ca-P^[19],尤其水体中大悬浮颗粒含有较高磷灰石碎屑^[29],促使退耕后湿地土壤Ca-P积累而持续上升。目前本课题组正对淹水

后研究区地表余留结皮中磷形态组分进行分析,以探明淹水带来沉积物对湿地土壤磷素形态的影响。另外一般酸性条件下土壤Ca-P较少^[8],而本研究区土壤pH为4.54—4.97,但在退耕8—20a湿地土壤Ca-P不断积累,占无机磷达到19.5%—26.7%,这种酸性土壤环境下Ca-P积累机制需进一步研究。

土壤有机质是有机磷的载体,研究区湿地土壤有机磷含量与土壤有机质呈极显著正相关($P < 0.001$)(表2)。土壤有机磷的多少取决于土壤有机质数量及有机质分解速率^[4]。同时土壤有机磷与Ca-P可能结合在一起^[30],有研究表明湿地沉水植物腐烂可促进土壤Ca-P沉积^[31],本文研究结果也表明退耕后两者变化趋势一致,两者之间存在显著正相关关系(表2)。退耕后随着人类活动的减弱,湿地土壤植被的不断恢复^[15,23]。虽然退耕后植被恢复也带来微生物分解有机质活性增强,但周期性淹水导致的还原条件时微生物活性降低,总体上微生物对有机质的分解速率小于有机质的累积速率^[4,15],促使退耕湿地土壤有机质逐渐提高^[23],土壤有机磷不断积累。同时周期性淹水也可带来丰富的外源有机磷^[7]。而湿地土壤黏粒具有较大的比表面积,易吸附固定有机物质,并通过粘土胶体保护有机质免受微生物的分解,进而保护有机磷免受微生物分解矿化。研究区土壤有机磷含量与土壤黏粒呈显著正相关($P < 0.005$),表明黏粒也是影响退耕后土壤有机磷积累的重要因素,随着退耕年限增加黏粒含量增加也可促进湿地土壤有机磷提高。

土壤全磷表示土壤磷素的总储量,是衡量磷素营养水平的参考指标。研究区退耕后湿地土壤全磷含量与无机磷和有机磷相关系数分别为0.921和0.726,均呈极显著正相关($P < 0.001$)(表2),而无机磷占全磷平均比重大于有机磷,表明退耕后无机磷变化主导土壤全磷的变化。但退耕后湿地土壤有机磷含量逐渐升高,占土壤全磷的比重也逐渐增加,表明有机磷对于退耕湿地土壤磷库恢复也起着重要作用。对于退耕还湖前油菜地,土壤全磷来源土壤母质,也来源于化肥施用;退耕后湿地生态系统,周期性淹水或季节性洪水是外源磷主要来源。因此,研究区退耕初期周期性淹水条件造成可溶磷素的流失以及植被恢复对土壤磷的消耗,导致土壤全磷降低,而退耕后期随着植被恢复导致土壤无机磷和有机磷

增加进而导致全磷增加。

湿地土壤有机磷的磷素有效性较低,需经微生物分解矿化提高有效性^[7],酸性或中性土壤环境下无机磷中 Al-P 和 Fe-P 的磷素有效性很高,而淹水促进 Fe³⁺的还原使部分 O-P 得到释放,并向有效性较高的 Al-P 和 Fe-P 转化,Ca-P 有效性较低,可在植物分泌的有机酸作用下可提高生物有效性^[4,6]。研究区退耕 2—8a 土壤表层 Al-P、Fe-P 和 O-P 含量表现出低于亚表层,而土壤 Ca-P 和有机磷却均为表层高于或等于亚表层,佐证了 Al-P、Fe-P 和 O-P 利用性或活性高于 Ca-P 和有机磷,3 种无机磷形态易被植被恢复对磷素利用或周期性淹水而流失。退耕后湿地土壤有效磷含量和有效率也与 Al-P、Fe-P 和 O-P 变化趋势基本一致,并存在显著或极显著正相关关系,却均与有机磷呈负相关关系,但未达到显著水平,与 Ca-P 相关性不显著(表 2)。表明退耕后湿地无机磷控制着土壤磷素有效性。湿地土壤磷素生物有效性不仅与磷素形态有关,而且与植被生长状况、土壤微生物活性、理化性质等环境密切相关^[4-5,13,15]。退耕后前期由于植被恢复对有效磷的吸收和湿地周期性淹水导致有效磷流失,同时由于植被尚在恢复,植被分泌有机酸能力和保肥能力均较弱,而土壤微生物活性也不高,因此,土壤有效磷逐渐降低;退耕后期随着植被恢复,植被保肥能力、截留外源磷能力和分泌有机酸能力逐渐增强,同时土壤微生物活性增强,增加对有机磷的分解,表现出较高磷素有效性。相关性分析表明研究区湿地土壤有效磷含量和土壤磷素活化系数均与黏粒含量呈极显著负相关关系,与土壤有机质和 pH 呈负相关关系,但均未达到显著水平(表 2),表明退耕后湿地土壤磷素有效性也受土壤黏粒含量的影响。

另外,退耕湿地前是油菜地,由于农业施肥措施使土壤无机磷含量较高。退耕还湖 2—5a,植被尚在恢复过程中,有较多地表裸露,周期性淹水可导致可溶性磷或颗粒态磷流失。因此,研究区土壤全磷量降低,其中主要是生物有效性较高的 Al-P、Fe-P 和 O-P 的流失,表明这段时期退耕湿地对于湖泊水体来讲是“磷”的释放源,存在污染水体的风险。退耕 8 a 以后,无论是有机磷还是无机磷均存在上升趋势,相对于水体表现出“汇”的功能,起着净化水体作用。退耕湿地的磷素“源”“汇”生态功能的转换与

植被恢复密切相关。

4 结论

(1) 菜子湖区湿地土壤无机磷形态以 Fe-P 为主,占无机磷总量的 54.20%—74.13%,且退耕后与 Al-P 和 O-P 均呈先降低后升高趋势,而 Ca-P 退耕后一直持续增加,对无机磷贡献率(7.26%—26.72%)也持续增加,是退耕后湿地无机磷库恢复重要组分。周期性淹水和植被生长是导致退耕后无机磷各形态组分消长的重要因素。周期性淹水或洪水可能是退耕后湿地土壤 Ca-P 持续增加原因之一,而退耕后酸性土壤环境下 Ca-P 累积机理需进一步研究。

(2) 湿地土壤无机磷占全磷的比例为 35.90%—67.27%,有机磷占全磷的 17.82%—50.50%。无机磷和全磷含量均随退耕年限延长呈先减少后增加的趋势,而有机磷含量退耕后逐渐升高,但无机磷主导着退耕后土壤全磷变化。退耕后植被恢复状况和周期性淹水带来的外源磷是湿地土壤全磷的增加重要因素。

(3) 退耕后湿地土壤有效磷和磷素活化系数变化趋势均与 Al-P、Fe-P 和 O-P 一致,且与该 3 种无机磷存在显著或极显著正相关关系,结合退耕后几年该 3 种无机磷表层含量均低于亚表层,表明退耕后湿地磷素生物有效性取决于该 3 种形态无机磷含量,而有机磷和 Ca-P 生物有效性较小。同时退耕湿地土壤黏粒也是影响湿地土壤磷素生物有效性的重要因素。

(4) 退耕还湖 2—5a 存在湿地表层土壤磷流失的风险,表现出磷素“源”的功能,而退耕 8a 后,湿地土壤表现出磷素“汇”的功能逐渐恢复,起着净化水体作用。而退耕湿地植被状况是土壤磷素“源”“汇”功能转换的驱动力。因此,应减少或避免对退耕湿地植被恢复过程的干扰,促使退耕湿地向原始湿地生态方向演变,进而恢复和提升退耕湿地的外源磷“汇”的生态功能。

References:

- [1] Mitsch W J, Gosslink J G. Wetlands. New York: John Wiley and Sons, 2000: 49-120.
- [2] Lu X G, Liu X H. Wetland Research Progresses in China. Scientia Geograph Ica Sinica, 2008, 28(3): 301-308.
- [3] Grunwald S, Corstanje R, Weinrich B E, Reddy K R. Spatial

- patterns of labile forms of phosphorous in a subtropical wetland. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(1): 378-389.
- [4] Wang G P. Character of Phosphorus Biogeochemistry on Wetlands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 193-199.
- [5] Noe G B, Childers D L, Jones R D. Phosphorus Biogeochemistry and the Impact of phosphorus Enrichment: Why Is the Everglades so Unique? *Ecosystems*, 2001, 4(7): 603-624.
- [6] Ma L M, Zhang M, Teng Y H, Zhao J F. Characteristics of Phosphorous Release from Soil in Periodic Alternately Waterlogged and Drained Environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 1035-1039.
- [7] Zhang B, Fang F, Chen Y P, Li Z, Guo J S, Huang X M. Phosphorus speciation and physical-chemical characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central district of Three Gorges Reservoir area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(3): 713-720.
- [8] Xiang W S, Huang M, Li X Y. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 663-670.
- [9] Tian J, Liu L, Ding H S, Chen T. Mobilization and transformation of phosphorus from water-soil interface of flooded soil. *Environmental science*, 2008, 29(7): 1818-1823.
- [10] Qu F Z, Yu J B, Chen X B, Chen X B, Wang Y L. A Review on Soil Phosphorus Fractionation Scheme on Wetlands. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 243-248.
- [11] Yang W J, Cheng H G, Hao F H, Ouyang W, Liu S Q, Lin C Y. The influence of land-use change on the forms of phosphorus in soil profiles from the Sanjiang Plain of China. *Geoderma*, 2012, 189-190: 207-214.
- [12] Qin S J, Liu J S, WANG G P, Zhou W M. Tillage effects on phosphorus fractions of freshwater wetlands. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2008, 34(3): 315-321.
- [13] Liang W, Shao X X, Wu M, Li W H, Ye X Q, Jiang K Y. Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in hangzhou bay coastal wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5025-5033.
- [14] Crews T E, Brookes P C. Changes in soil phosphorus forms through time perennial versus annual agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 184: 168-181
- [15] Qin S J, Liu J S, Wang G P, Wang J D. Seasonal changes of soil phosphorus fractions under *Calamagrostis angustifolia* wetlands in Sanjiang Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3844-3851.
- [16] Zhang L Y, Wang S R, Chu Z S, Yang S W, Jin X C, Bao L, Zhang F L, Ni Z K. Distribution characteristics of phosphorus in sediment of Yanghe Reservoir and in soil of its basin. *China Environmental Science*, 2010, 30(11): 1529-1536.
- [17] Mishra A, Tripathi J K, Mehta P, Rajamani V. Phosphorus distribution and fractionation during weathering of amphibolites and gneisses in different climatic setups of the Kavei river catchment, India. *Applied Geochemistry*, 2013, 33: 173-181.
- [18] Zhang B, Fang F, Guo J S, Chen Y P, Li Z, Guo S S. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 153-159.
- [19] Avilés, Niell F X. Patten of phosphorus forms in a Mediterranean shallow estuary: Effects of flooding events. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 64(4): 786-794.
- [20] Lu R K. *Methods of Agricultural Chemical Analysis is Soil*. Beijing: Chinese Agricultural science and Technology Press, 1999: 107-178.
- [21] Murray M R. Is Laser Particle Size Determination Possible for Carbonate-Rich Lake Sediments? *Journal of Paleolimnology*, 2002, 27(2): 173-183.
- [22] Chang S, Jackson M. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 1957, 84(2): 133-144.
- [23] Yang Y F, Meng X D, Zhang P J. Physical and Chemical Properties of Soils in Wetlands of Caizi Lake Different in Restoration in Anqing, Anhui Province. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(3): 322-328.
- [24] Bai J H, Yu G Y, Zhang Y X. Existing Forma of Soil Inorganic Phosphorus in Xianghai Wetland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 98-101.
- [25] Li X M, Zhang J M. Study on Forms of Phosphates in Fluvo-Aquic Soil in Hebei Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(6): 259-260.
- [26] Wang G P, Bao K S, Yu X F, Zhao H M, Lin Q X, Lu X G. Forms and accumulation of soil P in a subalpine peatland of Mt. Changbai in Northeast China. *Catena*, 2012, 92: 22-29.
- [27] Feng C, Guang L Z, Yan L, Zhou J J, Zhang G C, Song D. Effects of low-molecular-weight organic acids on release of soil phosphorus and inorganic phosphorus fractions in continuous leaching condition. *China Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 607-611.
- [28] Zhang A Q, He L Y, Zhao H E, Guo Z H, Cui X M. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soils and its readily available phosphate. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4061-4069.
- [29] Wei J F, Chen H T, Liu Y L, Shan K, Yao Q Z, He H J, Yu Z G. Phosphorus forms of the suspended particulate matter in the Yellow River downstream during water and sediment regulation 2008. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 368-374.
- [30] Linquist B A, Ruark M D, Hill J E. Soil order and management practices control soil phosphorus fractions in managed wetland ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90(1): 51-62.

- [31] Zhao H C, Zhao H X, Wang S R, Jin X C, Liu J H. Effect of inorganic phosphorus forms in the sediment and soil by submerged plant. *Ecology and Environment*, 2008, 17(1): 74-80.
- 参考文献:**
- [2] 吕宪国, 刘晓辉. 中国湿地研究进展. *地理科学*, 2008, 28(3): 301-308.
- [4] 王国平. 湿地磷的生物地球化学特征. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 193-199.
- [6] 马利民, 张明, 滕衍行, 赵建夫. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响. *环境科学*, 2008, 29(4): 1035-1039.
- [7] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 李哲, 郭劲松, 黄轩民. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 713-720.
- [8] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性. *植物营养与肥料学*, 2004, 10(6): 663-670.
- [9] 田娟, 刘凌, 丁海山, 陈涛. 淹水土壤-水界面磷素迁移转化研究. *环境科学*, 2008, 29(7): 1818-1823.
- [10] 屈凡柱, 于君宝, 陈小兵, 王永丽. 湿地土壤磷分级方法研究. *土壤通报*, 2012, 43(1): 243-248.
- [12] 秦胜金, 刘景双, 王国平, 周望明. 沼泽湿地开垦对土壤磷形态的影响. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2008, 34(3): 315-321.
- [13] 梁威, 邵学新, 吴明, 李文华, 叶小齐, 蒋科毅. 杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征. *生态学报*, 2012, 32(16): 5025-5033.
- [15] 秦胜金, 刘景双, 王国平, 王金达. 三江平原湿地土壤磷形态转化动态. *生态学报*, 2007, 27(9): 3844-3851.
- [16] 张丽媛, 王圣瑞, 储昭升, 杨苏文, 金相灿, 包亮, 张福林, 倪兆奎. 洋河水库流域土壤与库区沉积物中磷形态特征研究. *中国环境科学*, 2010, 30(11): 1529-1536.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 107-178.
- [23] 杨艳芳, 孟向东, 张平究. 不同退耕年限条件下菜子湖湿地土壤理化性质变化. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(3): 322-328.
- [24] 白军红, 余国营, 张玉霞. 向海湿地土壤中无机磷酸盐的存在形态研究. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 98-101.
- [25] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究. *土壤通报*, 1994, 25(6): 259-260.
- [27] 冯晨, 关连珠, 颜丽, 周景景, 张广才, 宋丹. 持续淋溶条件下有机酸对土壤磷素释放及无机磷组分的影响. *土壤通报*, 2013, 44(3): 607-611.
- [28] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 郭再华, 崔雪梅. 有机酸对土壤无机磷转化和速效磷的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4061-4069.
- [29] 魏俊峰, 陈洪涛, 刘月亮, 单凯, 姚庆祯, 何会军, 于志刚. 2008年调水调沙期间黄河下游悬浮颗粒物中磷的赋存形态. *环境科学*, 2011, 32(2): 368-374.
- [31] 赵海超, 赵海香, 王圣瑞, 金相灿, 刘景辉. 沉水植物对沉积物及土壤垂向各形态无机磷的影响. *生态环境*, 2008, 17(1): 74-80.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenetic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xiping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,280 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

本期责任副主编 祖元刚 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 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元