

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)	

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响

宋贤威¹, 赵秀兰^{1,2*}, 张进忠^{1,2}, 胡梦坤¹, 徐艳昭¹, 王明禹¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 以冷砂黄泥和矿子黄泥为研究对象, 猪粪沼渣为有机物料, 分别添加 0%、5%、7.5% 和 10% 质量分数的蒙脱石, 采用室内培养试验研究了蒙脱石对施有机物料土壤 pH、磷形态和有效性的影响。结果表明, 有机物料对两种土壤 pH 无显著影响, 而蒙脱石使土壤 pH 显著提高。施加有机物料使两种土壤铝结合态磷 (Al-P) 含量和分布比例提高, 铁结合态磷 (Fe-P) 含量培养后期提高、比例略有下降, 闭蓄态磷 (O-P) 含量无明显变化、比例下降。有机物料对冷砂黄泥中钙结合态磷 (Ca-P) 的含量无明显影响、比例下降, 却使矿子黄泥 Ca-P 含量和比例提高。在施加有机物料基础上添加蒙脱石后, 冷砂黄泥 Al-P 和 O-P 含量和比例下降, Fe-P 含量无明显变化、比例下降, Ca-P 含量和比例大幅度提高; 矿子黄泥 Fe-P 和 O-P 含量和比例下降, Al-P 含量无明显变化、比例下降, Ca-P 含量和比例大幅度提高。培养过程中, 有机物料使冷砂黄泥和矿子黄泥有效磷含量分别提高了 17.9%~38.0% 和 17.1%~33.7%, 土壤磷的活化系数也显著提高, 添加蒙脱石后使两种土壤有效磷含量分别降低 8.8%~35.5% 和 1.1%~11.6%。相关分析结果表明, 蒙脱石通过提高 pH 和 Ca-P 含量、降低 Al-P 含量降低冷砂黄泥磷的有效性, 通过提高 pH、降低 Fe-P 含量降低矿子黄泥磷的有效性, 对冷砂黄泥磷有效性的影响较矿子黄泥大。

关键词: 土壤; 蒙脱石; 有机物料; 磷形态; 有效磷

中图分类号: X144; X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-4020-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.10.046

Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer

SONG Xian-wei¹, ZHAO Xiu-lan^{1,2*}, ZHANG Jin-zhong^{1,2}, HU Meng-kun¹, XU Yan-zhao¹, WANG Ming-yu¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: An incubation experiment was carried out to study the effect of montmorillonite on pH, the fractions and availability of phosphorus in a sandy yellow soil (SY) and a mineral flavicant soil (MF) applied with biogas residues of swine manure (BSR). The rates of montmorillonite applied were 0%, 5%, 7.5% and 10%, respectively. The results indicated that soil pH was not affected by BSR, but was significantly increased by montmorillonite. In both soils, application of BSR caused an increase in the content and proportion of Al-P during the incubation, and an increase in the content but a slight decrease in the proportion of Fe-P in later period of incubation. The concentration of O-P was not markedly changed, but its proportion was decreased by applying BSR in both soils. The changes of Ca-P varied with soils. BSR had no significant influence on Ca-P content, but decreased the proportion of Ca-P in SY, meanwhile, it increased both Ca-P content and proportion in MF. Addition of montmorillonite in soils applied with BSR decreased the contents and proportions of Al-P and O-P, and the proportion of Fe-P did not change the contents of Fe-P, but increased the content and proportion of Ca-P in SY. In MF, montmorillonite could decrease the contents and proportions of Fe-P and O-P, and the proportion of Al-P did not affect the content of Al-P, but increased the contents and proportions of Ca-P greatly. The contents of available phosphorus (A-P) were enhanced by 17.9%-38.0% and 17.1%-33.7% in SY and MF respectively, and the phosphorus activation coefficient (PVC) was significantly improved in both soils by applying BSR. The contents of A-P were reduced by 8.8%-35.5% and 1.1%-11.6% in SY and MF respectively. Correlation analysis showed that montmorillonite reduced the availability of phosphorus through increasing pH and contents of Ca-P, decreasing the content of Al-P in SY, and through increasing pH and decreasing content of Fe-P in MF. The availability of phosphorus in SY was influenced more obviously than that in MF by montmorillonite.

Key words: soil; montmorillonite; organic fertilizer; phosphorus fractions; available phosphorus

有机物料作肥料施用是回收利用其中 N、P、有机质等养分资源、减轻其不合理处理带来的环境污染问题的有效途径^[1,2]。目前, 有机物料的施用量大多是以其氮含量确定的, 因此, 施入土壤的磷超过了作物的吸收量, 造成土壤磷富集^[3]。磷是水体富营养化的限制之一, 土壤中过量的磷通过地表径流和

淋溶渗漏等方式进入河流和地下水, 会引起水体富

收稿日期: 2016-03-09; 修订日期: 2016-04-29

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ11B03); 西南大学资源环境学院“光炯”创新基金项目(20130102)

作者简介: 宋贤威(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: sxwker@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zxl@swu.edu.cn

营养化,对水环境质量安全构成严重威胁^[4]. 近年来,水体和沉积物中的磷形态迁移转化成为研究热点^[5],为控制水体富营养化提供了丰富的理论基础^[6,7],而农业土壤磷素面源污染已经成为水体富营养化的一个重要因素^[8,9],有研究表明,土壤磷淋失的量与其中磷的有效量或水溶性磷含量呈显著相关^[10]. 因此,添加改良剂抑制磷的活性是降低土壤磷流失的方法之一^[11]. 在各种改良剂中,蒙脱石呈碱性,因其颗粒细小、比表面积大、带有永久负电荷和特殊结构域等特点,从而具有较强的吸附性、离子交换性、膨胀性等特殊性质,是一种天然的改良剂. 关于蒙脱石对土壤 pH、土壤电学性质^[12]、土壤的缓冲性能和土壤微生物活性^[13]的影响已有研究,但对蒙脱石影响土壤中磷形态转化及磷有效性的机制还不清楚.

沼渣有机质和有效养分含量高^[14],绝大多数大中型沼气工程产生的沼渣都是还田利用^[15]. 与其他有机物料相比,猪粪沼渣具有全磷含量高、无机磷占全磷比例大等特点,农地施用后引起的水环境风险更大^[16]. 黄壤是重庆市重要的土壤资源,占该市土地总面积 28.78%,是重要的旱粮和林业基地,该类土壤磷的流失对三峡水库水环境质量有重大影

响. 因此,本研究以重庆两种性质不同的黄壤为对象,以猪粪沼渣为有机物料,通过测定土壤磷形态和有效磷含量的变化,探究蒙脱石对施有机物料后土壤磷转化的影响及其影响途径,以期有机物料的合理施用及减少土壤磷素流失、保护三峡库区水环境质量等提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验有机物料猪粪沼渣采自重庆某养猪场,经自然风干后,粉碎过 1 mm 筛. 试验土样冷砂黄泥 (sandy yellow soil, SY) 采自重庆北碚缙云山坡地,成土母质为中生代三叠纪须家河组长石石英砂岩,土壤质地为砂质壤土; 矿子黄泥 (mineral flavicant soil, MF) 采自重庆市北碚区龙凤桥镇某农地,成土母质为三叠纪嘉陵江组石灰岩,土壤质地为黏质壤土. 土壤样品取自表层 (0 ~ 20 cm), 经自然风干后,粉碎过 2 mm 筛备用. 试验用蒙脱石为上海试四赫维化工有限公司生产的皂土,主要成分为钙基蒙脱石,含少量石英, pH 9.5, 表面积 720 m², < 0.002 mm 粒径占 86.5%. 猪粪沼渣、冷砂黄泥和矿子黄泥的基本性质见表 1.

表 1 供试有机物料及土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the organic material and soils used for the experiment

材料种类	pH	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	TOC /g·kg ⁻¹	容重 /g·cm ⁻³	粒径组成/%		
							2 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.002 mm	< 0.002 mm
猪粪沼渣 ^[16]	7.40	22.61	23.59	950.0	327.0	—	—	—	—
冷砂黄泥	4.51	1.42	0.35	22.8	15.4	1.26	60.6	24.0	16.4
矿子黄泥	5.26	1.53	0.74	35.3	12.6	1.28	2.7	48.7	48.6

1.2 试验方法

试验设对照 (CK, 不添加蒙脱石、不添加猪粪沼渣)、猪粪沼渣 (M₀, 不添加蒙脱石)、猪粪沼渣 + 5% 蒙脱石 (M₁, 蒙脱石添加量 5%)、猪粪沼渣 + 7.5% 蒙脱石 (M₂, 蒙脱石添加量 7.5%) 和猪粪沼渣 + 10% 蒙脱石 (M₃, 蒙脱石添加量 10%) 共 5 个处理, 重复 3 次. 将蒙脱石按设定的剂量分别添加到 1.0 kg 供试土样中, 加水混合均匀, 静置 7d, 风干、磨碎、过筛后施入猪粪沼渣、混匀, 根据猪粪沼渣的磷含量和重庆市农地土壤磷肥的施用量计算出猪粪沼渣的施用量为 0.94 g·kg⁻¹, 即施磷量约 22 mg·kg⁻¹. 将混匀样品装入内径 20 cm、深 8 cm 的培养盆中, 于 25℃、含水量 20% 条件下进行室内培养, 分别于 0、10、17、27、37、50 d 时取样, 取样后将剩余土壤和培养盆称重, 隔天再次称重补充去离

子水, 保持培养期间土壤含水量一致. 所取样品为 0 ~ 8 cm 深度土柱, 风干、过筛后测定其有效磷及各磷形态的含量.

1.3 分析方法

猪粪沼渣及土壤 pH 采用电位法测定, 总有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定, 全氮采用凯氏法测定, 全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消化法测定, 有效铝、有效铁采用比色法测定, 交换性钙采用 EDTA 滴定^[17]; 有效磷 (A-P) 采用 Bray I 法测定^[17]; 磷形态采用经过 Petersen 修改的 Chang 分级法测定^[18,19]: 用 1.0 mol·L⁻¹ NH₄Cl 提取松结合态磷 (S-P); 用 0.5 mol·L⁻¹ NH₄F 提取铝结合态磷 (Al-P); 用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 提取铁结合态磷 (Fe-P); 用 0.3 mol·L⁻¹ 柠檬酸钠 + 连二亚硫酸钠混合溶液提取闭蓄态磷 (O-P); 用 0.25 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 提取钙结合

态磷(Ca-P).

1.4 数据处理方法

本研究中的试验数据均为3次重复的平均值,数据分析和图表制作使用 SigmaPlot 12.5、SPSS 21.0、Excel 2013 软件完成.

2 结果与分析

2.1 蒙脱石对土壤 pH 的影响

如图 1 所示,冷砂黄泥和矿子黄泥原始土壤 pH 值分别为 4.51 和 5.26,培养结束时,猪粪沼渣处理两种土壤的 pH 分别提高 0.12 和 0.06 个单位,变化不显著($P>0.05$). 在施入猪粪沼渣条件下添加蒙脱石后,两种土壤的 pH 分别提高 1.52 ~ 2.15 和 0.38 ~ 1.76 个单位,均达显著水平($P<0.05$). 蒙脱石是一种 2:1 型矿物,组成蒙脱石的八面体中发生类质同像置换使蒙脱石结构带有负电荷,因而蒙脱石具有很强的离子交换能力和吸附能力,导致 H^+ 、 NH_4^+ 等阳离子被吸附,这些酸性阳离子被固定在蒙脱石矿物中,致使土壤 pH 的升高^[20]. 另一方面,钙基蒙脱石中的 Ca^{2+} 是一种弱碱离子, Ca^{2+} 离子交换到土壤中也导了土壤 pH 的升高. 从图 1 看出,蒙脱石的添加量越多,土壤 pH 升高幅度愈大,相关分析表明,两种土壤的 pH 均与蒙脱石的添加量呈显著的线性相关关系,相关方程分别为 $y = 20.126x + 4.7521$ ($r = 0.98$) 和 $y = 18.267x + 5.1633$ ($r = 0.93$),方程的斜率为冷砂黄泥大于矿子黄泥,表明蒙脱石对冷砂黄泥的 pH 影响更大,这与其土壤质地的差异有关.

2.2 土壤中磷形态的含量变化

2.2.1 土壤中 Al-P 含量的变化

土壤 S-P 含量的测定结果显示,两种土壤 S-P 含量在培养过程中维持在 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之内,占总量的比例低于 2%,本研究将其归入 Al-P 中. 如图 2

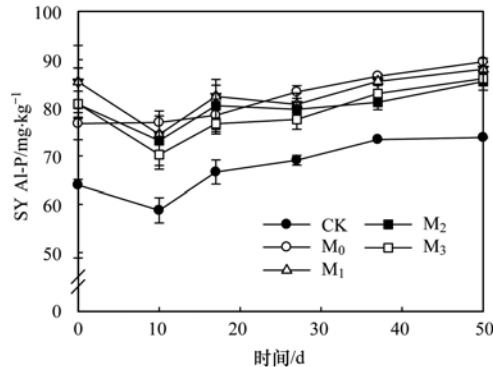


图 2 不同处理土壤 Al-P 含量的动态变化

Fig. 2 Dynamics of Al-P contents in two soils under different treatments

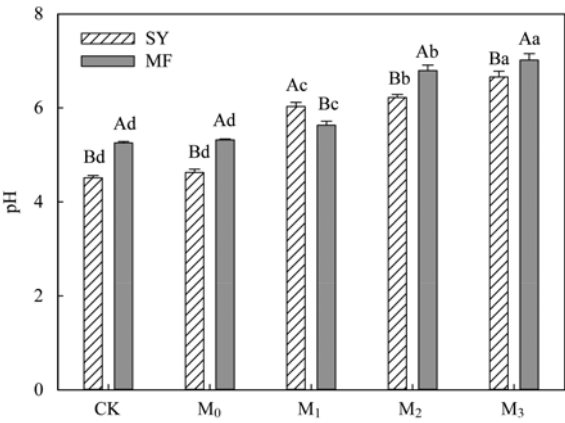


图 1 有机物料和蒙脱石对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effect of organic materials and montmorillonite on soil pH

所示,培养期间,冷砂黄泥 Al-P 含量呈先降低后升高趋势,以 10 d 为转折点,50 d 时 Al-P 含量最高;而矿子黄泥 Al-P 含量前期呈上升趋势,17 d 后趋于稳定. 与 CK 相比,施加猪粪沼渣使冷砂黄泥和矿子黄泥 Al-P 含量分别提高了 17.9% ~ 30.9% 和 5.7% ~ 17.3%,平均提高幅度分别为 21.4% 和 10.7%,表明猪粪沼渣可显著提高两种土壤的 Al-P 含量. 在施加猪粪沼渣的基础上添加蒙脱石后,与 M_0 相比,冷砂黄泥和矿子黄泥 Al-P 含量分别降低 1.7% ~ 4.6% 和 1.6% ~ 3.7% 之间,其中冷砂黄泥 Al-P 含量在 27 d 后显著降低,而矿子黄泥 Al-P 含量在 17 d 后显著降低(见表 2),表明培养后期蒙脱石对施猪粪沼渣的两种土壤 Al-P 的转化有一定抑制作用.

2.2.2 土壤中 Fe-P 含量的变化

如图 3 所示,培养过程中,冷砂黄泥 Fe-P 含量呈先上升后下降再上升的变化趋势,而矿子黄泥则呈先下降后上升的趋势,在 37 d 后两种土壤 Fe-P 基本趋于稳定状态,与赵海涛等的研究结果一

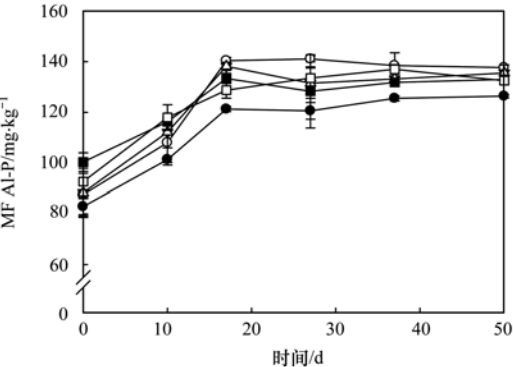


表 2 土壤不同处理间各组分差异分析¹⁾

Table 2 One-way ANOVA of phosphorus fractions between different treatments and soils

磷形态	处理	冷沙黄泥						矿子黄泥					
		0 d	10 d	17 d	27 d	37 d	50 d	0 d	10 d	17 d	27 d	37 d	50 d
Al-P	CK	b	c	b	c	c	c	b	c	d	b	c	d
	M ₀	ab	a	a	a	a	a	b	bc	a	a	a	a
	M ₁	a	ab	a	ab	a	ab	ab	ab	a	ab	ab	bc
	M ₂	ab	ab	a	b	b	b	a	ab	b	ab	b	c
	M ₃	ab	b	a	b	b	b	ab	a	c	ab	b	b
Fe-P	CK	b	a	a	b	b	b	a	b	ab	a	b	b
	M ₀	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	M ₁	ab	a	a	ab	ab	ab	ab	b	ab	ab	a	b
	M ₂	b	a	a	b	ab	ab	ab	bc	b	ab	bc	b
	M ₃	ab	a	a	b	ab	ab	b	c	b	b	c	b
O-P	CK	a	a	ab	ab	a	a	ab	a	b	ab	c	bc
	M ₀	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	M ₁	b	a	ab	ab	a	a	ab	b	b	b	ab	ab
	M ₂	b	a	b	ab	a	a	b	ab	a	a	b	bc
	M ₃	b	b	b	b	a	a	ab	b	b	b	b	c
Ca-P	CK	c	d	d	d	d	d	c	d	c	c	e	c
	M ₀	c	d	d	d	d	d	c	c	b	b	d	c
	M ₁	b	c	c	c	c	c	b	bc	a	b	c	b
	M ₂	b	b	b	b	b	b	a	b	a	b	b	b
	M ₃	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
A-P	CK	d	b	b	b	c	cd	b	b	b	b	c	d
	M ₀	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	M ₁	b	b	b	b	b	b	a	a	a	a	ab	b
	M ₂	bc	b	b	b	bc	c	a	a	a	a	b	bc
	M ₃	cd	c	c	c	d	d	a	a	a	a	b	c

1) 相同磷形态和培养时间同一列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

致^[21]. 与 CK 相比,猪粪沼渣使冷沙黄泥和矿子黄泥 Fe-P 含量分别平均提高 8.1% 和 3.6%,仅培养后期变化显著. 表明猪粪沼渣对 Fe-P 的影响作用较小且缓慢. 与 M₀ 相比,添加蒙脱石使冷沙黄泥和矿子黄泥的 Fe-P 含量分别降低 0.5% ~ 11.4% 和 1.1% ~ 15.3%,其中冷沙黄泥 Fe-P 含量变化不显著,矿子黄泥 M₁、M₂ 和 M₃ 处理下的 Fe-P 含量分别平均降低 5.4%、6.6% 和 9.9%,变化显著,但 M₁、M₂ 和 M₃ 处理之间变化不显著(见表 2). 表明

蒙脱石对施加猪粪沼渣的冷沙黄泥 Fe-P 无显著影响,却使矿子黄泥 Fe-P 含量显著降低,不同量蒙脱石处理之间无显著差异.

2.2.3 土壤中 O-P 含量的变化

如图 4 所示,培养过程中,两种土壤闭蓄态磷的含量均呈现出先上升后下降的趋势,但矿子黄泥下降趋势出现在第 10 d,而冷沙黄泥出现在第 17 d. 与 CK 相比,猪粪沼渣使冷沙黄泥和矿子黄泥 O-P 含量分别平均提高 1.2% 和 3.2%,但均不达显著水

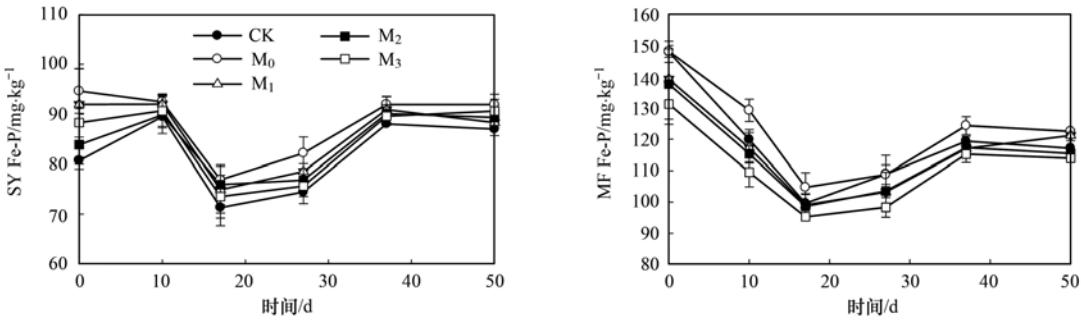


图 3 不同处理土壤 Fe-P 含量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of Fe-P contents in two soils under different treatments

平(表2). 与 M_0 相比,冷砂黄泥 M_1 、 M_2 和 M_3 处理下的 O-P 含量分别平均降低 1.8%、2.5% 和 2.9%,矿子黄泥 O-P 含量变化较冷砂黄泥略大,分别平均降低 3.2%、3.8% 和 5.9%. 其中两种土壤

均以 M_3 处理的 O-P 含量变化最显著(见表2). 表明猪粪沼渣对两种土壤 O-P 含量的影响不大,而大量蒙脱石对施猪粪沼渣的两种土壤 O-P 含量均有显著的抑制作用.

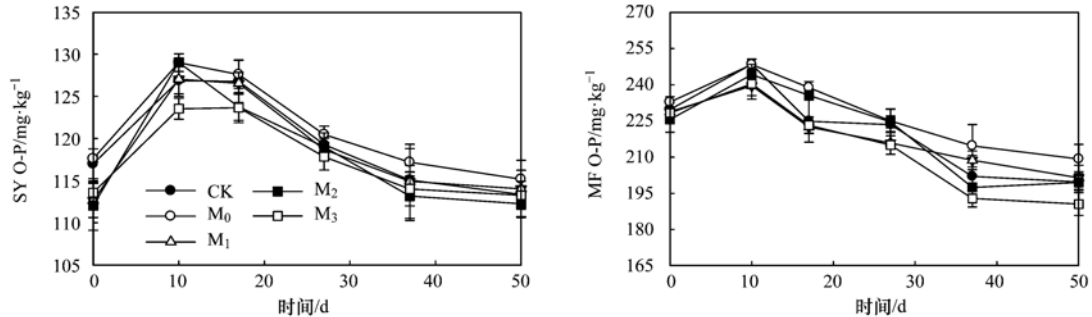


图4 不同处理土壤 O-P 含量的动态变化

Fig. 4 Dynamics of O-P contents in two soils under different treatments

2.2.4 土壤中 Ca-P 含量的变化

由图5可知,培养过程中,冷砂黄泥 Ca-P 含量相对稳定,而矿子黄泥 Ca-P 含量呈逐渐上升的趋势. 与 CK 相比,施加猪粪沼渣使冷砂黄泥 Ca-P 含量变化不明显,却使矿子黄泥 Ca-P 含量显著提高 2.6% ~ 24.6%,培养期间平均提高 13.1%. 表明猪粪沼渣对

性质不同的两种土壤 Ca-P 含量的影响也不同. 与 M_0 相比,蒙脱石使冷砂黄泥 Ca-P 含量提高 137.2% ~ 406.2%, M_1 、 M_2 和 M_3 处理分别平均提高 183.5%、259.0% 和 340%; 蒙脱石使矿子黄泥 Ca-P 含量提高 1.9% ~ 44.9%, 3 组处理分别平均升高 14.5%、15.3% 和 26.5%,均达显著水平(见表2).

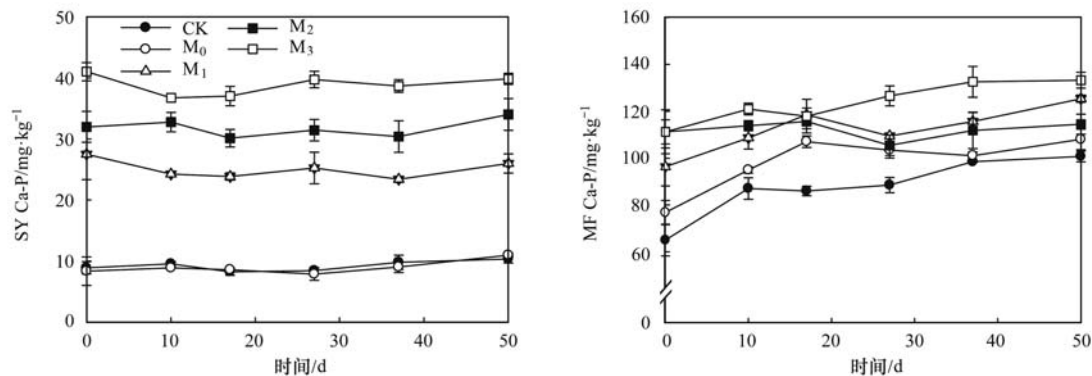


图5 不同处理土壤 Ca-P 含量的动态变化

Fig. 5 Dynamics of Ca-P contents in two soils under different treatments

取培养期间各处理平均值对 Ca-P 含量与蒙脱石添加量进行相关分析,获得冷砂黄泥和矿子黄泥的相关方程分别为 $y = 299.36x + 9.318$ 和 $y = 232.19x + 98.617$, 相关系数分别为 0.999 1 和 0.962 3,均达显著水平($r_{0.05} = 0.950$, $r_{0.01} = 0.990$),从相关系数看,蒙脱石对冷砂黄泥 Ca-P 含量的影响较矿子黄泥大.

2.2.5 土壤磷形态分布的变化

土壤是一个由多种无机成分、有机成分组成的不均一体系,进入土壤中的磷通过沉淀-溶解、吸附-解吸等过程与土壤各组成成分结合,以不同形态存在,且各形态相互转化,致使培养过程中各形态磷呈

现出一定的波动. 培养后期两种土壤磷的形态分布从高到低依次为 O-P > Al-P > Fe-P > Ca-P,其中冷砂黄泥和矿子黄泥 O-P 和 Al-P 分布比例分别达 60.0% ~ 70.9% 和 56.7% ~ 65.1%(图6),表明 O-P 和 Al-P 为这两种土壤主要的磷形态. 培养过程中,冷砂黄泥 CK 样品磷形态分布比例随时间变化不大,而矿子黄泥 CK 样品 Al-P 比例升高,Fe-P 比例下降,其他磷形态变化不大. 与 CK 相比,冷砂黄泥 M_0 处理 Al-P 比例升高,Fe-P 和 Ca-P 比例略微下降,O-P 比例明显下降;而矿子黄泥 M_0 处理 Al-P 和 Ca-P 比例升高,Fe-P 和 O-P 比例下降.

与 M_0 相比, M_1 、 M_2 和 M_3 处理冷砂黄泥 Al-P、

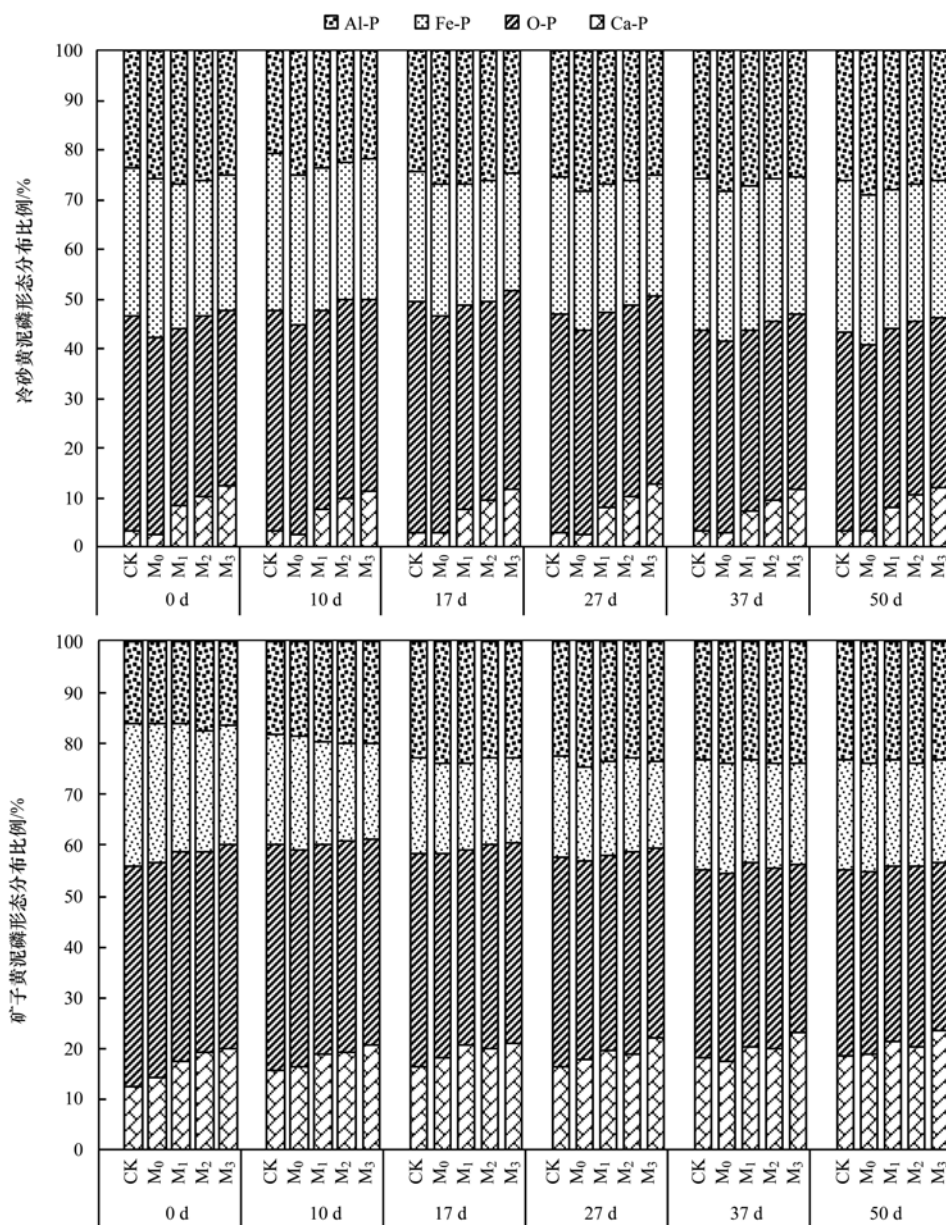


图6 不同处理土壤磷形态分布比例动态变化

Fig. 6 Dynamics of inorganic phosphorus distribution in two soils under different treatments

Fe-P 和 O-P 比例均下降, Ca-P 分布比例由 2.7% ~ 3.4% 增至 11.7% ~ 12.9%; 而矿子黄泥 Al-P 分布比例变化不显著, Fe-P 和 O-P 比例下降, Ca-P 分布比例由 12.5% ~ 18.5% 增加至 19.5% ~ 22.0%。两种土壤 Ca-P 分布比例均随蒙脱石用量增加而增大, 而其他磷形态分布比例受不同蒙脱石用量的影响不明显。从蒙脱石对磷形态分布比例的影响来看, 蒙脱石主要促进了施猪粪沼渣土壤磷素向 Ca-P 转化, 对其他磷形态的影响因土壤质地差异而不同。

2.3 土壤有效磷的含量变化

如图 7 所示, 培养过程中, 两种土壤 CK 的有效磷变化不明显, 施加猪粪沼渣后有效磷含量呈先缓

慢降低后上升的变化趋势, 37 d 时基本稳定。土壤中有有效磷的变化是有机磷矿化释放和土壤吸附固定平衡的结果^[22]。培养前期, 施加猪粪沼渣的土壤有效磷含量下降可能与土壤中的铁铝氧化物对有效磷的固定作用^[23]和培养初期微生物群落快速增殖过程中磷的生物固定有关^[24]。随后土壤有效磷含量升高表示有机物料中磷素转化过程以磷的释放为主, 培养结束时有效磷含量趋于稳定表明土壤磷的固定和释放处于平衡状态。

培养过程中, 与 CK 相比, 经过 M₀ 处理的冷砂黄泥和矿子黄泥的有效磷含量分别提高了 17.9% ~ 38.0% 和 17.1% ~ 33.7%, 均达显著水平, 表明

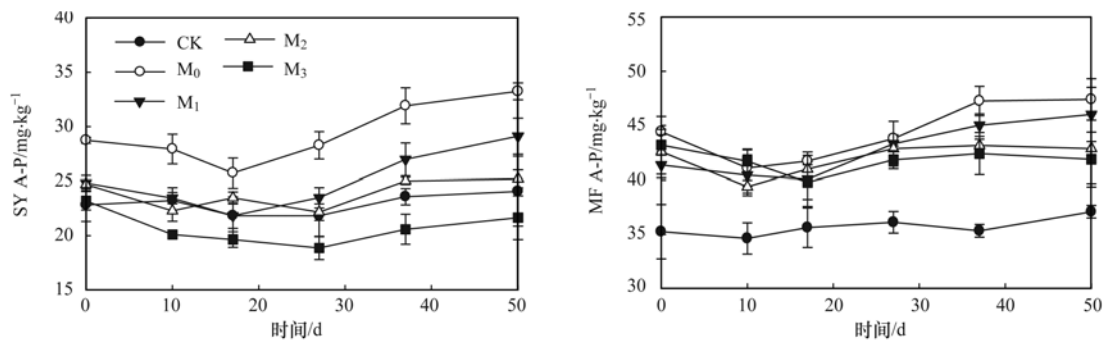


图7 不同处理土壤有效磷含量的动态变化

Fig. 7 Dynamics of available P in two soils under different treatments

猪粪沼渣可显著提高两种土壤的有效磷含量. 与 M_0 相比, M_1 、 M_2 和 M_3 处理的冷砂黄泥和矿子黄泥的有效磷含量分别降低 8.8% ~ 35.5% 和 1.1% ~ 11.6%, 其中冷砂黄泥有效磷含量变化显著, 矿子黄泥在培养后期变化显著(见表2). 两种土壤有效磷含量均以 M_3 处理最低, 培养期间平均分别降低 29.1% 和 5.4%. 表明在施猪粪沼渣基础上添加蒙脱石, 对冷砂黄泥有效磷的抑制作用较矿子黄泥更显著, 且添加大量蒙脱石对两种土壤有效磷含量的影响更大.

3 讨论

3.1 蒙脱石对施加有机物料土壤磷形态的影响

目前对于施肥对土壤磷形态的影响已有大量研究. 赵海涛等^[21]发现施磷使土壤各磷形态含量均有升高, 章爱群等^[25]将3种无机磷肥和一种有机磷肥(植酸钙)分别施加在酸性、中性和碱性土中, 也发现各磷形态含量均有不同幅度增加, 而李想等^[26]对无机有机肥磷配施土壤磷形态的测定发现即使在无机有机肥比例为 0:100 或 100:0 时, 土壤 Al-P 和 O-P 含量仍均较未施肥处理低. 由此可见, 不同研究者对磷肥施入土壤磷形态影响的研究获得的结果不同, 这可能与土壤性质如 pH 和元素组成、肥料类型及施肥量等诸多因素的不同有关. 本研究中, 施入猪粪沼渣后除冷砂黄泥 O-P 和 Ca-P、矿子黄泥 O-P 含量变化不显著之外, 其他形态磷含量均显著升高, 这与猪粪沼渣中磷的施入提高了土壤的磷含量有关. 而与冷砂黄泥相比, 矿子黄泥 Al-P 和 Fe-P 的提高幅度小、Ca-P 的提高幅度大, 一方面是由于矿子黄泥本身 Al-P 和 Fe-P 含量相对较高, 另一方面可能与两种土壤元素组成有关. 冷砂黄泥的有效 Al、有效 Fe 和交换性 Ca 含量分别是 $110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 矿子黄泥中三者含量分

别为 $126 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 结合先前的研究数据^[16]和本试验猪粪沼渣施用量计算出土壤中各磷形态的直接添加量, 在 Dou 等^[27]磷形态分析体系下 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 、 NaOH-P 、 HCl-P 和残留态磷分别为 0.13、0.75、0.48、18.55 和 $1.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 猪粪沼渣中主要磷形态 HCl-P 是连续浸提过程中使用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 提取的磷, 在一定程度上可表示 O-P 和 Ca-P 的总量, 即因直接施加猪粪沼渣可能引起土壤中含量升高的磷形态为 O-P 和 Ca-P. 而实际测定结果显示冷砂黄泥 O-P 和 Ca-P、矿子黄泥 O-P 分布比例反而下降, 这是由于两种供试土壤 pH 远远低于猪粪沼渣, 猪粪沼渣中 Ca-P 在酸性土壤中发生水解释放出磷结合位点, 根据磷酸盐的溶度积常数判断, 在酸性土壤中 Fe、Al 较 Ca 更易与磷结合. 同时, 酸性土壤与猪粪沼渣 pH 和氧化还原电位的变化可能腐蚀磷酸铁、铝盐外面的氧化铁胶膜而使 O-P 释放. 冷砂黄泥交换性 Ca 含量很低, 因而猪粪沼渣中的磷施加到土壤后, 对冷砂黄泥 Ca-P 影响不大, 却明显促进了矿子黄泥 Ca-P 的转化. 从土壤各形态磷的分布比例看, 施入猪粪沼渣使冷砂黄泥 Fe-P、O-P 和 Ca-P 分布比例均下降, Al-P 比例升高, 而矿子黄泥 Fe-P 和 O-P 分布比例下降, Al-P 和 Ca-P 比例升高, 表明猪粪沼渣使冷砂黄泥中 Fe-P、O-P 和 Ca-P 向 Al-P 转化, 使矿子黄泥中的 Fe-P 和 O-P 向 Al-P 和 Ca-P 转化.

在施加猪粪沼渣的基础上添加蒙脱石尽管对土壤磷总量及各形态磷的含量有一定的稀释作用, 但使两种土壤不同磷形态的变化趋势却不同. 蒙脱石使冷砂黄泥 Al-P 含量及比例下降, 对 Fe-P 含量和比例影响不显著, 而使矿子黄泥 Al-P 含量及形态分布比例变化不显著, 却使 Fe-P 含量和比例显著下降, 蒙脱石使两种土壤 O-P 含量及比例均显著降低, 而 Ca-P 的含量和比例显著提高. 土壤磷形态始

终处于一个动态平衡过程,且各形态磷在一定程度上相互影响和制约,任何磷形态和其他形态磷都有或多或少的相关性^[28]. 表 3 表明,冷砂黄泥中 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 与 O-P 呈显著或极显著相关关系,而矿子黄泥中,Al-P 与 Fe-P 和 O-P、Fe-P 和 Ca-P、O-P 和 Ca-P 显著或极显著负相关,而 Al-P 与 Ca-P 显著正相关,这表明土壤中磷形态转化的复杂性,但蒙脱石添加的两种土壤均表现为 Ca-P 含量及比例升高,其主要原因可能是钙基蒙脱石携带大量层间

阳离子 Ca^{2+} 进入土壤,通过专性吸附和表面吸附等作用固定土壤磷素,袁东海等^[29] 研究发现蒙脱石吸附的磷主要转化为 Ca-P,与本研究的结果一致. 此外,两种土壤 pH 均与 Ca-P 呈显著正相关关系,表明施入蒙脱石后土壤 pH 的升高也是 Ca-P 增加的一个重要原因. 蒙脱石提高了土壤 pH,使磷酸铁盐、磷酸铝盐在土壤溶液中的平衡反应均向水解方向进行,释放出的磷酸根离子与钙结合,在一定程度上促进了 Ca-P 的固定.

表 3 土壤 pH、磷形态和有效磷含量之间的相关性¹⁾

Table 3 Single correlation coefficient between pH, inorganic phosphate and available phosphate in soils							
Pearson 相关性		pH	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	A-P
SY	pH	1	-0.156	-0.201	-0.225	0.970 **	-0.797 **
	Al-P		1	0.075	-0.562 **	-0.155	0.429 **
	Fe-P			1	-0.271 *	-0.144	0.414 **
	O-P				1	-0.261 *	-0.166
	Ca-P					1	-0.770 **
	A-P						1
MF	pH	1	-0.023	-0.279 *	-0.211	0.575 **	-0.356 **
	Al-P		1	-0.692 **	-0.459 **	0.492 **	0.163
	Fe-P			1	0.064	-0.501 **	0.300 *
	O-P				1	-0.482 **	-0.383 **
	Ca-P					1	-0.111
	A-P						1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.2 蒙脱石对施加有机物料土壤有效磷的影响

土壤有效磷可以表征土壤磷的供应能力,不同磷形态与土壤有效磷的相关性可反映磷形态的有效性. 施加猪粪沼渣使冷砂黄泥和矿子黄泥的有效磷含量显著提高,与王旭东等^[30] 的研究基本一致. 这与猪粪沼渣对土壤磷的补充有关,还可能是猪粪沼渣在分解过程中产生的有机酸会对 Fe-P、Al-P 等无机磷有一定的活化作用^[31,32],而且猪粪沼渣作为一种有机物料,能够减少土壤胶体的吸附位点,降低了土壤对磷的吸附能力,进一步提高了土壤磷的有效性^[33]. 在猪粪沼渣的基础上添加蒙脱石使两种土壤有效磷含量显著降低,且冷砂黄泥有效磷含量的降低幅度大于矿子黄泥,这与冷砂黄泥黏粒含量低,缓冲能力弱有关.

土壤中磷以多种形态存在,不同形态磷的生物有效性不同,其养分循环的过程也存在差异. Kumar 等^[34] 研究发现,酸性土壤中不同组分磷酸盐对小麦的有效性顺序为 $\text{Ca-P} > \text{Al-P} > \text{Fe-P}$,孙桂芳等^[28] 报道,土壤有效磷库的主体是 $\text{Ca}_2\text{-P}$,其有效磷主要是由 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 提供的,而 Fe-P 和 Ca-P 对土壤有效磷库起重要调节作用,Al-P 是一种相当有效的磷源,在

供磷上也有一定意义. 本研究发现,冷砂黄泥中, A-P 与 Al-P 呈显著正相关,而与 pH 和 Ca-P 呈显著负相关;而矿子黄泥中, A-P 与 Fe-P 呈显著正相关,与 pH 和 O-P 呈显著负相关,但与 Ca-P 的相关性不显著. 说明 Al-P 和 Fe-P 分别是冷砂黄泥和矿子黄泥的有效磷库. 在施入猪粪沼渣的冷砂黄泥中,蒙脱石主要通过提高土壤 pH 和 Ca-P 含量及比例、降低 Al-P 含量来降低有效磷,而在施入猪粪沼渣的矿子黄泥中,蒙脱石主要是通过提高土壤 pH、降低 Fe-P 含量来抑制土壤有效磷的活性, Ca-P 含量和比例的提高对该土壤有效磷的贡献不大.

因全磷和有效磷是衡量土壤磷素状态的两个重要指标,有效磷和全磷之比即土壤磷素活化系数(PVC)可用来衡量土壤全磷有效性^[35]. 有研究表明,PVC 大于 2% 时说明全磷容易转化为有效磷, PAC 小于 2% 时说明各形态磷很难转化为有效磷,土壤磷素有效性不高^[36,37]. 表 4 所示,两种土壤本身均具有较高的 PVC,添加猪粪沼渣后两种土壤 PVC 显著升高,在此基础上添加蒙脱石显著降低了 PVC,且蒙脱石添加量越大,PVC 值越小,表明蒙脱石具有钝化土壤磷素活性的作用.

表 4 土壤不同处理磷素活化系数 (PVC) 变化/%

Table 4 Changes of soil phosphorus activation coefficient (PVC) under different treatments/%

PVC	CK	M ₀	M ₁	M ₂	M ₃
SY	6.9±0.1	8.8±0.1	7.7±0.4	6.7±0.2	5.7±0.5
MF	5.0±0.1	6.2±0.2	6.0±0.3	5.6±0.4	5.4±0.3

本试验中施加猪粪沼渣的冷砂黄泥和矿子黄泥有效磷含量最高分别达到 33 mg·kg⁻¹ 和 42 mg·kg⁻¹, 而吕家珑等^[38] 基于洛桑试验站长期肥料定位试验指出, 当有效磷含量高于 60 mg·kg⁻¹ 时, 土壤磷的渗漏风险会显著增加, 表明现有施肥量下两种土壤磷素尚无较大渗漏风险, 施用蒙脱石后可进一步降低其磷素流失风险。

4 结论

(1) 猪粪沼渣对土壤 pH 影响不显著, 显著提高了土壤有效磷含量和磷素活化系数, 对土壤磷形态的影响因土壤的不同而异。冷砂黄泥中, 猪粪沼渣使 Al-P 含量和比例提高, Fe-P 培养后期含量略有提高, O-P 和 Ca-P 无明显变化, Fe-P、O-P 和 Ca-P 比例均下降, 可促进 Fe-P、O-P 和 Ca-P 向 Al-P 的转化; 矿子黄泥中, 猪粪沼渣使 Al-P 和 Ca-P 含量和比例提高, Fe-P 培养后期略有提高, O-P 无明显变化, Fe-P 和 O-P 比例下降, 可促进 Fe-P 和 O-P 向 Al-P 和 Ca-P 转化。

(2) 在施入猪粪沼渣的基础上添加蒙脱石使土壤 pH 显著提高, 有效磷含量和磷素活化系数显著降低, 对两种土壤磷形态的影响也有差异。冷砂黄泥中, 蒙脱石使 Ca-P 含量和比例提高, Al-P 和 O-P 含量和比例下降, Fe-P 含量变化不显著、比例略有下降; 矿子黄泥中, 蒙脱石使 Ca-P 含量和比例提高, Fe-P 和 O-P 含量和比例下降, Al-P 含量略有下降、比例变化不明显。两种土壤中, 蒙脱石用量与 pH、Ca-P 含量均呈显著正相关, 与其他磷形态中向关系不明显。

(3) 冷砂黄泥有效磷含量与 pH 和 Ca-P 呈负相关、与 Fe-P 和 Al-P 呈正相关; 矿子黄泥有效磷含量与 pH 和 O-P 呈负相关、与 Fe-P 呈正相关。表明蒙脱石是通过提高 pH 和 Ca-P 含量、降低 Al-P 含量降低冷砂黄泥磷的有效性, 通过提高 pH、降低 Fe-P 含量降低矿子黄泥磷的有效性。蒙脱石对冷砂黄泥磷的有效性影响较矿子黄泥大, 其在降低农业土壤磷素流失风险方面的实际应用有待进一步研究。

参考文献:

[1] Kahiluoto H, Kuisma M, Ketoja E, *et al.* Phosphorus in manure

and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (4): 2115-2122.

[2] 邹原东, 范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, **29**(3): 12-16.

[3] Huang X L, Chen Y, Shenker M. Chemical fractionation of phosphorus in stabilized biosolids[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(5): 1949-1958.

[4] McDowell R W. Minimising phosphorus losses from the soil matrix[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, **23** (6): 860-865.

[5] 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 等. 锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1427-1436.

[6] 王睿喆, 王沛芳, 任凌霄, 等. 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1301-1308.

[7] 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见. 扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1422-1426.

[8] 崔键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. *中国农学通报*, 2006, **22**(1): 335-340.

[9] Sigua G C, Steward J S, Tweedale W A. Water- quality monitoring and biological integrity assessment in the Indian River Lagoon, Florida: status, trends, and loadings (1988- 1994) [J]. *Environmental Management*, 2000, **25**(2): 199-209.

[10] Kleinman P J A, Sharpley A N. Effect of broadcast manure on runoff phosphorus concentrations over successive rainfall events [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32** (3): 1072-1081.

[11] 王旭东, 杨雪芹. 聚丙烯乙酰胺对磷素在土壤中吸附-解析与迁移的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 300-305.

[12] 张伟. 土壤颗粒表面电场对酸性土壤硝化作用的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2010. 23-31.

[13] Macura J, Stotzky G. Effect of montmorillonite and kaolinite on nitrification in soil[J]. *Folia Microbiologica*, 1980, **25**(2): 90-105.

[14] 钟攀, 李泽碧, 李清荣, 等. 重庆沼气肥养分物质和重金属状况研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(S1): 165-171.

[15] 张国治, 吴少斌, 王焕玲, 等. 大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿现状调研及问题分析[J]. *中国沼气*, 2009, **28**(1): 21-24.

[16] 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 等. 不同有机物料中的磷形态特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1098-1104.

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 178-179.

[18] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, **84**(2): 133-144.

[19] Petersen G W, Corey R B. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates[J].

- Soil Science Society of America Journal, 1966, **30**(5): 563-565.
- [20] Utkaeva V F. Specific surface area and wetting heat of different soil types in European Russia[J]. Eurasian Soil Science, 2007, **40**(11): 1193-1202.
- [21] 赵海涛, 封克, 汪晓丽, 等. 磷在不同土壤和无机磷组分间的转化研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2006, **27**(3): 50-55.
- [22] 杨蕊, 李裕元, 魏红安, 等. 畜禽有机肥氮、磷在红壤中的矿化特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(3): 600-607.
- [23] Azeez J O, Van Averbek W. Fate of manure phosphorus in a weathered sandy clay loam soil amended with three animal manures[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(16): 6584-6588.
- [24] Kouno K, Wu J, Brookes P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(5): 617-622.
- [25] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 等. 有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(8): 4061-4069.
- [26] 李想, 刘艳霞, 刘益仁, 等. 无机有机肥磷配施对作物产量及土壤磷形态的影响[J]. 土壤, 2013, **45**(4): 641-647.
- [27] Dou Z, Toth J D, Galligan D T, *et al.* Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(2): 508-514.
- [28] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (2): 1-9.
- [29] 袁东海, 张孟群, 高士祥, 等. 几种粘土矿物和粘粒土壤吸附净化磷素的性能和机理[J]. 环境化学, 2005, **24**(1): 7-11.
- [30] 王旭东, 李祖荫, 张一平. 不同有机物料施入土壤后的磷素转化及其供磷能力的差异[J]. 土壤通报, 1998, **29**(3): 113-115.
- [31] Toor G S, Bahl G S. Effect of solitary and integrated use of poultry manure and fertilizer phosphorus on the dynamics of P availability in different soils[J]. Bioresource Technology, 1997, **62**(1-2): 25-28.
- [32] 黄敏, 肖和艾, 黄巧云, 等. 有机物料对水旱轮作红壤磷素微生物转化的影响[J]. 土壤学报, 2004, **41**(4): 584-589.
- [33] Siddique M T, Robinson J S. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(3): 1114-1121.
- [34] Kumar V, Gilkes R J, Bollang M D A. Phosphate fertilizer compounds in soils: Their influence on the relationship between plant yield and soil test value [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1992, **23**(13-14): 1461-1477.
- [35] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(7): 245-248.
- [36] 杨慧, 曹建华, 孙蕾, 等. 岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 135-140.
- [37] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究[J]. 土壤通报, 1994, **25**(6): 259-260.
- [38] 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(2): 142-146.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行