

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征

韩晓飞, 高明, 谢德体*, 王子芳

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 以 1990 年建立的耕作制定位试验田紫色土为研究对象, 分析了常规中稻-冬水田平作(CF)、中稻-冬水田垄作免耕 1(RNT1)、中稻-小麦或油菜垄作免耕 2(RNT2)和中稻-小麦或油菜水旱轮作(CR)等耕作方式对紫色土剖面不同形态无机磷分布演变特征的影响。结果表明, 与试验前土壤相比, 长期不同耕作处理的土壤上下层全磷、有效磷和各形态无机磷均有不同程度的增加, 各处理土壤中不同形态无机磷含量大小顺序为 RNT2 > CF > CR > RNT1。除了 Fe-P 含量下层土壤高于上部耕层外, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、O-P 都表现为耕层高于下层的特征。不同耕作措施对紫色土剖面各形态无机磷含量影响显著, 对各形态无机磷有效性影响效果为 CR > RNT > CF。长期水旱轮作更有利于作物对磷的吸收。相关分析表明各组分无机磷对紫色土有效磷的贡献为 $\text{Ca}_2\text{-P}(0.936\ 9) > \text{Al-P}(0.915\ 8) > \text{Ca}_8\text{-P}(0.901\ 2) > \text{Fe-P}(0.828\ 7) > \text{Ca}_{10}\text{-P}(0.805\ 9) > \text{O-P}(0.747\ 2)$ 。

关键词: 紫色土; 长期耕作制; 垄作免耕; 无机磷; 剖面分布

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2284-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.036

Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments

HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti*, WANG Zi-fang

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In this study the effects of tillage methods (rice-winter paddy field conventional farming, CF; rice-winter paddy field combing ridge with no-tillage, RNT1; rice-wheat or rape combing ridge with no-tillage, RNT2; rice-wheat or rape conventional paddy-upland rotation tillage, CR) on purple soil profile of different forms of inorganic phosphorus distribution characteristics were investigated in a long-term experimental site established in 1990, Chongqing City, China. The results showed that compared to the status before the experiment, the total phosphorus, available phosphorus and various morphologies of inorganic phosphorus all increased to a certain degree in the soils with different long-term tillage treatments, and the contents of different forms of inorganic phosphorus in soil size ranked as RNT2 > CF > CR > RNT1. Except that the contents of Fe-P in the lower layer were higher than those in the upper layer, contents of $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and O-P in the arable layers were all higher than those in the lower layers. The effects of farming practices on the availability of various phosphorus forms were significant. They were in the order of CR > RNT > CF. Long-term conventional paddy-upland rotation tillage was more advantageous to crops in the absorption of phosphorus. It was shown by relevant analysis that the contribution of various groups of inorganic phosphorus to purple soil was in the order of $\text{Ca}_2\text{-P}(0.936\ 9) > \text{Al-P}(0.915\ 8) > \text{Ca}_8\text{-P}(0.901\ 2) > \text{Fe-P}(0.828\ 7) > \text{Ca}_{10}\text{-P}(0.805\ 9) > \text{O-P}(0.747\ 2)$.

Key words: purple soil; long-term tillage method; combing ridge with no-tillage; inorganic phosphorus; distribution on profiles

磷素作为植物生长发育所必需的大量营养元素, 植株所需的磷主要从土壤本身磷库和外界施入土壤的磷肥中获得的。土壤磷素形态主要由有机态和无机磷组成, 无机磷占土壤磷总量的 60% ~ 80%^[1], 是植物所需磷素的主要来源。磷素在土壤中的化学行为和存在形态, 直接影响着对作物的有效性。磷肥施入农田容易被土壤固定形成难以被植物利用的形态, 当季利用率一般仅为 10% ~ 25%^[2]。维持农业高产稳产, 势必每年要向土壤中施加大量磷肥, 土壤中各形态无机磷均会有不同程度的累计, 过量施用化学磷肥与生物有机肥可以使土壤表层的磷素显著增加^[3~7], 进而导致磷素的径流流失, 给环境带来一系列问题, 农田生态系统中磷

的流失已经成为水体富营养化的重要影响因子^[8], 研究发现径流水中磷浓度与施入土壤中的磷肥量直接相关^[9,10]。耕层土壤磷素的累积也会导致磷垂直迁移的可能性增大, 因此研究土壤磷素的肥力特征和界面迁移意义重大。国内外对土壤剖面磷素的分布已经有一些研究^[11~14], 大多都是针对长期定位施肥或者不同土地利用类型对土壤磷素分布的影

收稿日期: 2015-11-22; 修订日期: 2016-01-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104003); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD15B04003); 西南大学中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013D005)

作者简介: 韩晓飞(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农业面源污染磷素迁移转化, E-mail: hanxiaofei55@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xdt@swu.edu.cn

响^[15~22]。近年来保护性耕作土壤环境方面的研究也多集中在碳、氮方面^[23~27],而针对长期保护性免耕、垄作、水旱轮作等不同耕作制度下土壤磷素空间分布研究鲜见报道,而经过 22 a 不同耕作制度后紫色土壤中无机磷组分变化及其关系的研究还未见报道。本文应用蒋柏藩^[29]和顾益初^[30]的无机磷分级体系,以 1990 年在重庆北碚建立的耕作制国家紫色土长期定位试验田水稻土为研究对象,对定位试验剖面土壤无机磷的形态组成进行了分级测定,并运用相关分析、逐步回归分析对土壤无机磷各组分与速效磷之间的关系进行探讨,揭示紫色土中无机磷的形态转化及在土体中的空间分布和移动规律,以期为在农业生产中制定更好的土壤磷管理措施以及保障该地区农业的可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与试验处理

试验地点设在国家紫色土土壤肥力与肥料

效益长期监测基地(以下称长期定位点),长期定位点基地位于重庆市北碚区西南大学试验农场,地处东经 106°26′,北纬 30°26′,属紫色丘陵区,方山浅丘坳谷地形,海拔 266.3 m,年均气温 18.4℃,日照 1 276.7 h,全年降水 1 105.5 mm,为亚热带季风气候。试验土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属。重庆大部分区县多分布此类土壤,因此,用作供试土壤具有广泛的代表性。试验始于 1990 年,试验为随机区组设计。共设计 4 个处理:①常规平作(中稻-冬水田,conventional farming,CF);②垄作免耕 1(中稻-冬水田,combing ridge with no-tillage,RNT1);③垄作免耕 2(中稻-油菜或小麦,combing ridge with no-tillage,RNT2);④水旱轮作(中稻-油菜或小麦,conventional paddy-upland rotation tillage,CR)。每个处理小区面积 20 m²,设计 3 次重复。具体处理以及耕作方式见表 1。

表 1 试验处理基本情况
Table 1 Basic situation of the treatments

处理	具体耕作处理	施肥
常规平作(CF)	按传统的方法每年三犁三耙翻耕植稻,水稻收获后灌冬水	各处理的施肥量均为:尿素(N 46%) 273.1 kg·hm ⁻² ,过磷酸钙(P ₂ O ₅ 12%) 500.3 kg·hm ⁻² ,氯化钾(K ₂ O 60%) 150.1 kg·hm ⁻² ,小麦和水稻都是过磷酸钙作底肥一次施用,尿素底肥施 2/3,追肥施 1/3,氯化钾底肥和追肥各施 1/2,每年都是如此,1990~1997 年处理 RNT2、CR 水稻-小麦轮作,之后为水稻-油菜轮作,水稻品种汕优 63 号,小麦品种西农麦 1 号,油菜品种渝油 1 号,常规生产管理
垄作免耕 1(RNT1)	作垄方法:拉线起垄,将垄沟的土壤抱在陇埂上,垄面不宜用手抹平,尽量保持土壤结构,一垄一沟 55 cm,垄顶宽 25 cm,沟宽 30 cm,沟深 35 cm,水稻植在垄梗的两侧,每垄栽两行,每小区作 5 垄,水稻收获后免耕灌冬水	
垄作免耕 2(RNT2)	全年不翻不耕,作垄方法与垄作免耕 1 相同,水稻收获后种小麦,小麦生长期,降低垄沟水位,保持浸润灌溉,第二年小麦收获后灌水种植水稻	
水旱轮作(CR)	按传统方法水稻平作,水稻收获后,翻耕种小麦,小麦收货后灌水犁耙种水稻	

试验前土壤(before farming, BEF)的基本理化性质为,pH 7.7,有机质 23.9 g·kg⁻¹,全氮 1.29 g·kg⁻¹,全磷 0.48 g·kg⁻¹,全钾 22.7 g·kg⁻¹,碱解氮 93.2 mg·kg⁻¹,有效磷 4.3 mg·kg⁻¹,速效钾 71.1 mg·kg⁻¹,CaCO₃ 0.059%,物理性黏粒 144.2 g·kg⁻¹。

1.2 测定项目及其方法

2013 年 8 月水稻收获后采用 S 形多点采样法,分别采集定位试验地各处理 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm(本研究只对变化比较明显且较为规律的 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤剖面为研究对象)土层土样 1.5 kg,带回实验室风干、过筛,测定全磷,有效磷,pH,有机质及各层次的 Ca₂-P、Al-P、Fe-P、Ca₈-P、O-P(闭蓄态磷)与 Ca₁₀-P 等

6 种形态(均为 3 次重复的平均值)含量,土壤基本理化性质按常规方法测定^[28],无机磷分级浸提采用蒋柏藩的方法^[29],数据采用 Microsoft Excel 2007、SPSS 17.0 进行处理,各处理均值多重比较采用 LSD 法,显著性水平分别为 0.05 和 0.01。

2 结果与分析

2.1 长期保护性耕作对紫色土耕层土壤全磷、无机磷、有效磷含量的影响

由表 2 可以看出,经过 22 年常规平作,冬水田,垄作免耕,水旱轮作等不同耕作后,土壤耕层中全磷、无机磷、有效磷含量都发生了很大的变化。所有处理耕层土壤的全磷、有效磷含量都较试验前土壤有明显上升(表 2)。经过统计分析得出,长期不

同耕作方式处理后紫色土壤有效磷含量差异达到了极显著水平 ($P < 0.01$), 全磷含量除了常规平作 (CF) 处理和水旱轮作 (CR) 处理没有显著性差异外, 其他各个处理之间也都达到了显著水平 ($P < 0.05$). 无机磷总量各处理与试验前土壤差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$), 除垄作免耕 1 (RNT1) 与水旱轮作 (CR) 外, 各处理间差异也达到了极显著水平 ($P < 0.01$). 变化范围: 全磷为 $483.2 \sim 1\,717.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷为 $5.6 \sim 39.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 无机磷 $410.7 \sim 1\,492.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各处理大小依次为 $\text{RNT2} > \text{CF} > \text{CR} > \text{RNT1} > \text{BEF}$.

同时从表 2 还可以看出经过 22 年的不同耕作处理后土壤中各形态的无机磷含量都发生了很大的

表 2 不同耕作处理土壤各形态磷含量¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Table 2 Contents of different phosphorus forms in soil with different tillage treatments/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理	无机磷	全磷	有效磷
试验前土壤 (BEF)	410.7eD	483.2dD	5.6eE
常规平作 (CF)	1 165.7bB	1 665.0bB	23.9bB
垄作免耕 1 (RNT1)	1 019.8dC	1 520.0cC	16.5dD
垄作免耕 2 (RNT2)	1 492.7aA	1 717.0aA	39.4aA
水旱轮作 (CR)	1 073.5cC	1 660.0bB	19.1cC

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 同列不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$), 下同

表 3 不同耕作处理各形态无机磷含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Contents of different inorganic phosphorus forms in soil with different tillage treatments/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	O-P
试验前土壤 (BEF)	$6.7 \pm 0.53\text{c}$	$16.7 \pm 1.25\text{e}$	$26.2 \pm 0.82\text{d}$	$24.5 \pm 1.97\text{d}$	$219.10 \pm 3.96\text{e}$	$117.5 \pm 10.38\text{e}$
常规平作 (CF)	$25.75 \pm 0.78\text{ab}$	$42.06 \pm 1.01\text{b}$	$52.34 \pm 1.80\text{b}$	$53.75 \pm 1.84\text{b}$	$659.70 \pm 6.71\text{b}$	$332.1 \pm 7.03\text{c}$
垄作免耕 1 (RNT1)	$25.39 \pm 0.60\text{ab}$	$24.63 \pm 0.55\text{d}$	$50.42 \pm 1.11\text{bc}$	$49.24 \pm 1.32\text{c}$	$596.05 \pm 5.04\text{c}$	$274.1 \pm 8.53\text{d}$
垄作免耕 2 (RNT2)	$26.92 \pm 0.94\text{a}$	$46.88 \pm 1.50\text{a}$	$90.45 \pm 2.04\text{a}$	$130.72 \pm 2.69\text{a}$	$696.75 \pm 5.76\text{a}$	$501.02 \pm 9.95\text{a}$
水旱轮作 (CR)	$24.25 \pm 0.83\text{b}$	$27.57 \pm 0.83\text{c}$	$48.02 \pm 1.50\text{c}$	$54.4 \pm 0.79\text{b}$	$493.17 \pm 6.85\text{d}$	$426.14 \pm 5.76\text{b}$

Fe-P 和 Al-P 已经证实也是植物的一种有效磷源, 其中 Al-P 的作用与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 相当^[30]. 其含量范围为 $24.50 \sim 130.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $26.2 \sim 90.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 3). 各处理含量大小与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 基本一致. 其中 Fe-P 和 Al-P 含量增加较少的是垄作免耕 1 (RNT1) 和水旱轮作 (CR) 处理. 针对 Fe-P 来看, 常规平作 (CF) 和水旱轮作 (CR) 处理之间没有显著性差异, 其余处理间差异水平都达到了显著水平 ($P < 0.05$), 且各处理含量均高于试验前土壤.

$\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 作为植物的潜在磷源, 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Fe-P 和 Al-P 不同的是各处理其含量差异水平均达到了显著水平 ($P < 0.05$), 同时 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 含量较试验前土壤也增加最多, 这可能与它们作为不活

变化, 具体表现为都比试验前土壤有了明显的提升, 其中垄作免耕 2 (RNT2) 处理较试验前增加了近 2 倍多, 垄作免耕 1 (RNT1) 处理也增加了近 1.5 倍.

2.2 长期保护性耕作对耕层土壤不同形态无机磷含量的影响

经过长期不同耕作处理之后土壤中不同形态无机磷含量发生了显著的变化, 较之试验前土壤也都有了较大的增加, 其中累积增长幅度较大的是垄作免耕 2 (RNT2) 的 Fe-P 和 O-P 的增加, 分别比试验前土壤增加了 4.3 倍和 3.26 倍. 由表 3 可以看出, 各处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 含量间差异达到了显著水平 ($P < 0.05$), 含量范围为 $16.7 \sim 46.88$ 、 $219.10 \sim 696.75$ 和 $117.5 \sim 501.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 3). 各处理大小分别为 $\text{RNT2} > \text{CF} > \text{CR} > \text{RNT1} > \text{BEF}$. 各处理大小顺序跟有效磷、全磷差不多. $\text{Ca}_2\text{-P}$ 作为植物的高效有效磷源已被证实^[28~30]. 各处理间 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量差别不大, 但均高于试验前土壤. 长期耕作施肥能显著地提高土壤中的各形态无机磷的含量. 这主要是因为每年都向土壤中施加磷肥, 土壤中的磷被固定累积, 再者土壤中磷的释放与固定处于一个动态平衡的系统中, 各形态无机磷也处于一个此消彼长互相转化的变动中.

跃的潜在磷源有关, 当有效磷源与缓效潜在磷源累积到一定程度时候, 它们之间可以进行相互转化, 长期耕作外加施肥, 植物在从土壤中吸收有效磷素的同时 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 等潜在磷源也可以慢慢转化为有效的可供植物体吸收的有效磷源. 韩晓日等^[14]和林利红等^[31]在棕壤上的研究发现长期没有磷素投入补偿的情况下, O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 一样都能慢慢地转化成能被植物利用的有效磷源.

2.3 长期保护性耕作对紫色土无机磷各组分相对含量的影响

图 1 为长期不同耕作处理后与试验前土壤中 Al-P、Fe-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、O-P 占总无机磷的质量分数.

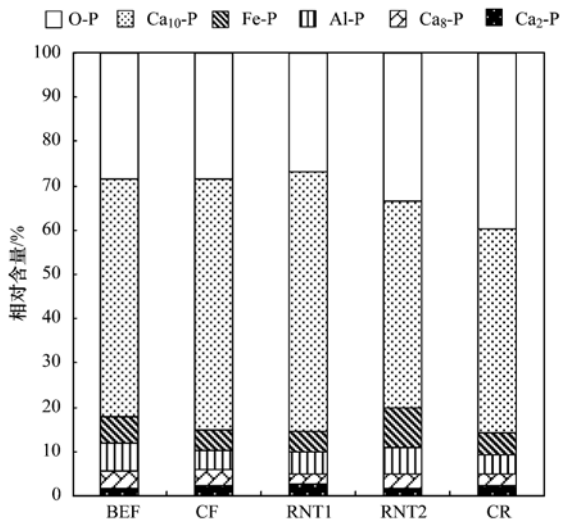


图1 不同耕作处理各组分无机磷相对含量

Fig. 1 Relative contents of different forms of inorganic phosphorus in soil with different tillage treatments

可以看出,试验前土壤的组成中,各形态无机磷的大小比例为 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (53.35%) > O-P (28.61%) > Al-P (6.38%) > Fe-P (5.97%) > $\text{Ca}_8\text{-P}$ (4.07%) > $\text{Ca}_2\text{-P}$ (1.63%)。这与紫色菜园土中无机磷含量顺序 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ > $\text{Ca}_8\text{-P}$ > Fe-P $\approx$ Al-P $\approx$ O-P > $\text{Ca}_2\text{-P}$ 不

同^[32]。与棕壤土各无机磷组分比例也不尽相同,棕壤土中闭蓄态 O-P 含量较多^[14]。经过 22a 不同耕作处理施肥后,各个处理不同形态无机磷比例发生了变化,其中 CF、RNT2、CR 处理的 Fe-P 含量大于了 Al-P 的含量。从图 1 中看出,紫色土中钙磷总体所占比例较高,这是紫色土风化程度较低的缘故。其中对植物有效的磷源 Al-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量较低,而 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 含量分别占到总的无机磷的 28.49% ~ 39.69% 和 45.94% ~ 58.45% 之多。说明土壤中对植物体比较有效的磷源不足,而一半左右的无机磷都是以潜在磷源的形式存在。

2.4 长期保护性耕作对紫色土无机磷各组分剖面分布的影响

从图 2 可以看出,长期不同耕作试验后,各处理 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量分布均为耕层 0 ~ 20 cm 大于 20 ~ 40 cm,深度增加,含量减少的趋势。0 ~ 20 cm 耕层土壤中,处理常规平作 (CF) 较垄作免耕 1 (RNT1) 高 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处理间差异不显著;而 20 ~ 40 cm,处理垄作免耕 1 (RNT1) 比常规平作 (CF) 高 $2.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且处理间差异显著。长期不同耕作试验

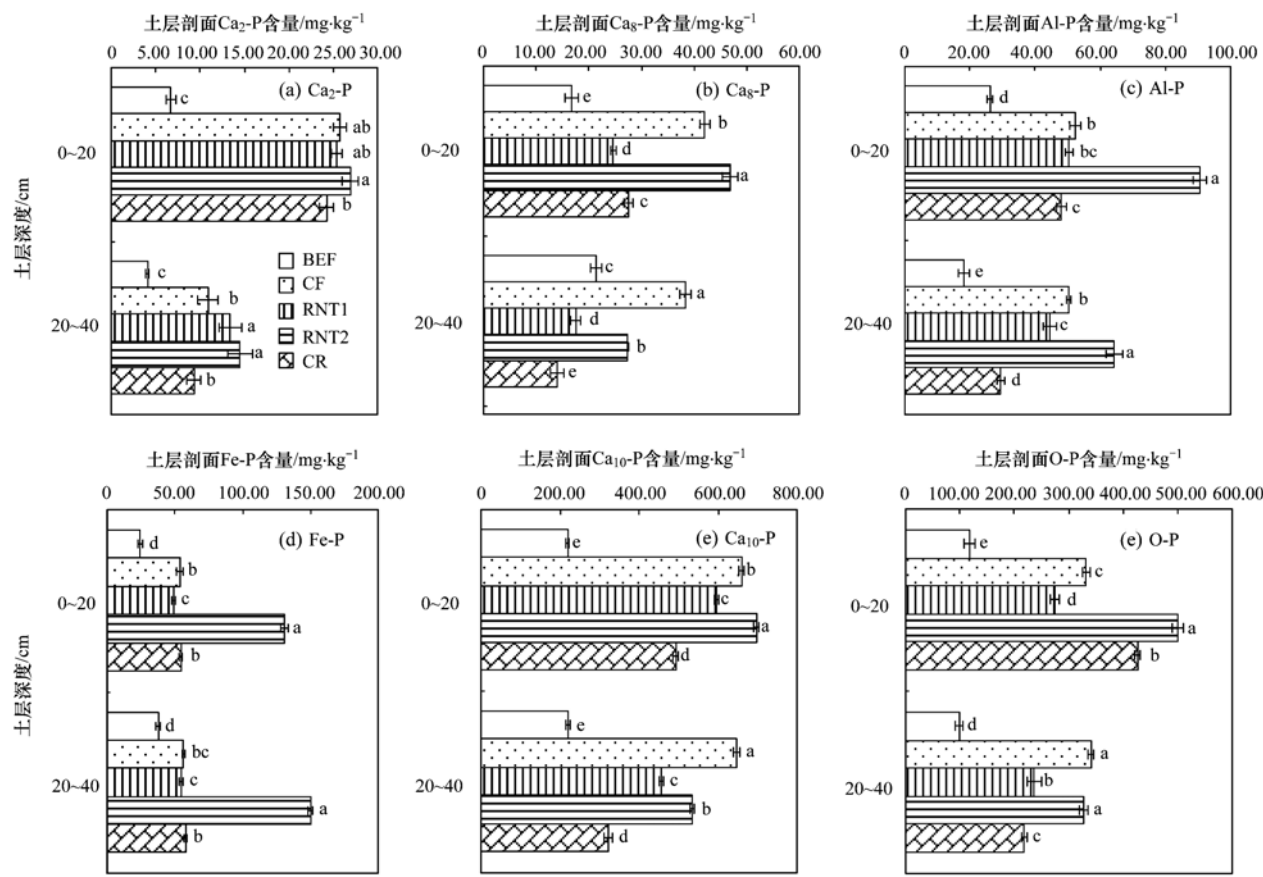


图2 不同耕作处理土壤剖面各组分无机磷分布

Fig. 2 Distribution of different forms of inorganic phosphorus in soil profile with different tillage treatments

后,各处理 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量分布与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 分布趋势较为一致,均为耕层 0 ~ 20 cm 较高,20 ~ 40 cm 深度土壤中含量较低. 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 不同的是不管是 0 ~ 20 cm 的耕层土壤还是 20 ~ 40 cm 的下层土壤,各处理间 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$). 22 年试验后各处理 Al-P 含量都有了明显的提高,耕层变化不大,20 ~ 40 cm 差异较为显著,变幅在 18.10 ~ 90.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间.

从图 2 不同耕作处理土壤 Fe-P 剖面分布可以看出与其他形态磷剖面分布不太一致. 20 ~ 40 cm 土层中 Fe-P 含量要高于表层 0 ~ 20 cm. 对于出现下层土壤 Fe-P 高于耕层土壤的原因可能是因为试验是实行的水稻轮作制度,水稻季时,由于淹水密闭,水土环境的 pH 升高,氧化还原电位降低,从而促进磷酸铁的水解加强,高价铁的磷酸盐还原为低价铁的磷酸盐,铁、硅复合体也被还原. 下层还原更强,再者上层的形成的 Fe-P 又向下淋溶导致下层土壤中 Fe-P 含量高于耕层土壤.

各个处理 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 整体含量在无机磷总量中都是比较高的. 说明供植物体吸收的土壤中磷

大部分还是以无效态即潜在磷源存在. 同时由于土壤中的无机磷在一定条件下可以互相转化,缺磷条件下潜在磷源 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 转化分解为可以为植物体所吸收利用的有效磷源. 造成 O-P 耕层高于底层的原因可能是因为闭蓄态的磷被铁铝等氧化物包裹,在下层土壤中由于还原性强,包膜被溶解还原,转化为非闭蓄态的磷,从而造成了底部 O-P 含量低于耕层的分布特征.

2.5 土壤各形态磷及其与土壤基本理化性质之间的相关关系分析

表 4 为土壤各形态磷及其与土壤基本理化性质相关分析结果,从中可以看出各形态磷及其与土壤基本理化指标之间多存在相关关系. 土壤全磷与各形态无机磷之间均呈现显著相关关系. 作为反应土壤磷素养分供应水平高低指标的有效磷与全磷、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 Al-P 也均呈显著的相关关系. 从表 4 中还可以看出土壤 pH 与各组分磷及其全磷之间大多呈现显著的负相关关系. 通过各组分之间的相关分析可以看出,土壤磷循环系统中,各形态磷素都处在一个相互影响的动态平衡之中.

表 4 土壤磷素各组分与土壤基本理化性状相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficient between soil phosphorus fractions and soil physicochemical properties

	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	Al-P	Fe-P	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	O-P	土壤全磷	有效磷	pH	有机质
$\text{Ca}_2\text{-P}$	1									
$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.909 1 *	1								
Al-P	0.900 1 **	0.954 7 **	1							
Fe-P	0.828 8 *	0.833 1 *	0.813 5 *	1						
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	0.861 3 *	0.894 5 *	0.903 0 *	0.625 9	1					
O-P	0.740 5	0.766 2	0.842 2 *	0.811 3 *	0.955 8 **	1				
土壤全磷	0.982 3 **	0.997 2 **	0.908 9 *	0.935 5 **	0.950 3 **	0.909 5 *	1			
有效磷	0.936 9 **	0.901 2 *	0.915 8 **	0.828 7 *	0.805 9 *	0.747 2	0.903 5 *	1		
pH	-0.884 1 *	-0.887 9 *	-0.844 1 *	-0.904 1 *	-0.875 6 *	-0.905 6 *	-0.919 1 **	-0.794 1	1	
有机质	0.845 7 *	0.858 8 *	0.867 3 *	0.781 9	0.829 3 *	0.848 1 *	0.8939 *	0.738 6	0.795 6	1

1) * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)

2.6 长期不同耕作耕层土壤无机磷对有效磷的贡献

通过表 4 的相关分析,土壤有效磷与各形态无机磷组分之间的相关系数大小为 $\text{Ca}_2\text{-P}(0.936 9) > \text{Al-P}(0.915 8) > \text{Ca}_8\text{-P}(0.901 2) > \text{Fe-P}(0.828 7) > \text{Ca}_{10}\text{-P}(0.805 9) > \text{O-P}(0.747 2)$, 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 呈极显著正相关,与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 呈显著正相关,与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 呈不显著的正相关. 其中土壤有效磷与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的相关系数最大,说明他们之间的相关程度最高,也表明它是最有效的磷源. Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 是仅次于 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的有效磷源, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 为非有效潜在磷源.

3 讨论

免耕作为农业生产中一种重要的保护性耕作方式,不需翻地整修,最大化地减少了机械对土壤的不必要的扰动,是维护土壤良好结构的重要措施. 其作用机制主要是免耕可以改变土壤的通气透水性,同时能调控土壤的物理化学和生物性能,从而能够延长或缩短作物的生长期,促进或者抑制作物对养分的吸收^[33]. 本研究中不同耕作方式土壤中不同磷素形态的含量差异很大,这与免耕垄作对土壤理化性质所发挥的作用有密切关系. 免耕措施可以

增加土壤水分渗透和与空气之间的气体交换,提高土壤导温率,促进水稻各个时期的生长. 土壤透气良好,从而促进其中微生物的活力,能增加土壤中磷素的供应,减少磷素流失^[34];同时,垄作与平作相比,可以通过微地形改造显著的改善了田间微气候,形成植株群体通风透光的新途径^[35],垄作还可以促进团粒结构的发育^[36,37],良好的土壤结构有利于作物根系的分布及其对水分、养分的吸收,降低土壤对肥料的固定截留,肥料的利用率也会相应地提高. 综合来看,垄作免耕要优于常规平作,更有利于水稻发育对养分磷素的需求,残留于土壤中的磷素就要比常规平作少. 故经过 22 a 长期定位试验结果使得常规平作处理中不同形态磷素含量要高于垄作免耕处理.

试验结果垄作免耕 2(RNT2) 土壤中各形态无机磷含量比垄作免耕 1(RNT1)、常规平作(CF)都要高,其原因是垄作免耕 2(RNT2)在水稻收获后种小麦,增加了肥料的施入;再者垄作免耕 1(RNT1)和常规平作(CF)灌入冬水田时残留在田间的水稻秸秆会被淹水分解,释放的养分也会被第二年水稻生长再次吸收. 同时,垄作免耕 2(RNT2)比水旱轮作(CR)各形态无机磷要高,主要是因为虽说垄作免耕具有众多优点,但是垄作在起垄过程中受到人工耕作,导致土壤比较松散,大量营养元素骤减,可溶态的微量元素含量降低,其次由于土壤长期保持浸润灌溉,氧化还原电位很低,关键是它主要针对常规耕层采取的措施,虽然增加了耕层土壤的生态功能,但是土壤下层的理化性质和生态环境却不能有效改变,而水旱轮作(CR)处理通过干旱和淹水分别种植不同作物,可以较彻底地改善土壤耕层以下土壤的生态环境,通过水旱轮作有利于土壤氧化还原电位的提高,利于有机物质分解,更加有利于作物的对养分磷素的吸收和利用. 以上因素共同作用产生了本研究的结果.

4 结论

(1)经过 22 a 的保护性耕作之后土壤 0~20、20~40 cm 全磷、有效磷和各形态无机磷含量都发生了很大的变化,均比试验前土壤有不同程度的增加. 其中无机磷含量,垄作免耕 2(RNT2)处理较试验前增加了近 2 倍多,垄作免耕 1(RNT1)处理也增加了近 1.5 倍. 不同耕作土壤中不同形态无机磷含量大小顺序为垄作免耕 2(RNT2) > 常规平作(CF) > 水旱轮作(CR) > 垄作免耕 1(RNT1). 土壤中的

磷素容易被土壤中金属离子和矿物所吸附固定而累积,利用率非常低,只有最终能被植物体很好地吸收才能体现出其有效性,所以针对保护性耕作土壤中累积的磷素怎样更高效地利用问题是以后研究的方向. 不同耕作制度来看,优势大小依次为水旱轮作、垄作免耕和常规平作. 水旱轮作作为较为优势的一种耕作制度实施起来也要根据当地实际的具体生产情况.

(2)紫色土不同形态磷素之间存在着显著正相关关系,无机磷各组分对紫色土有效磷的贡献为 $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{O-P}$.

(3)从各形态无机磷在不同剖面紫色土总无机磷中所占比重来看, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 较大,钙磷整体所占比重最大.

参考文献:

- [1] 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, 1999. 169-175.
- [2] Pavinato P S, Merlin A, Rosolem C A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **105** (1): 149-155.
- [3] 王新民, 侯彦林. 有机物料对石灰性土壤磷素形态转化及吸附特性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004, **24** (3): 440-443.
- [4] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J]. 土壤学报, 2012, **49** (6): 1136-1146.
- [5] 颜晓, 王德建, 张刚, 等. 长期施磷的产量效应及其环境风险评价[J]. 环境科学, 2013, **34** (8): 3205-3210.
- [6] Zheng Z M, Simard R R, Lafond J, et al. Changes in phosphorus fractions of a Humic Gleysol as influenced by cropping systems and nutrient sources[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2001, **81** (2): 175-183.
- [7] Escudéy M, Galindo G, Förster J E, et al. Chemical forms of phosphorus of volcanic ash-derived soils in Chile [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, **32** (5-6): 601-616.
- [8] 庞燕, 项颂, 储昭升, 等. 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究[J]. 环境科学, 2015, **36** (11): 4005-4012.
- [9] Kogelmann W J, Lin H S, Bryant R B, et al. A statewide assessment of the impacts of phosphorus-index implementation in Pennsylvania[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, **59** (1): 9-18.
- [10] 郑丽娜, 王先之, 沈禹颖. 保护性耕作对黄土高原塬区作物轮作系统磷动态的影响[J]. 草业学报, 2011, **20** (4): 19-26.
- [11] 杨学云, 李生秀, Brookes P C. 灌溉与旱作条件下长期施肥壤土剖面磷的分布和移动[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, **10** (3): 250-254.
- [12] 熊俊芬, 石孝均, 毛知耘. 定位施磷对土壤无机磷形态土层

- 分布的影响[J]. 西南农业大学学报, 2000, **22**(2): 123-125.
- [13] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翮. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, **6**(2): 179-186.
- [14] 韩晓日, 马玲玲, 王晔青, 等. 长期定位施肥对棕壤无机磷形态及剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(4): 51-55, 144.
- [15] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬, 等. 连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J]. 草业学报, 2015, **24**(8): 218-224.
- [16] 来璐, 郝明德, 彭令发. 长期施肥对黄土高原旱地土壤无机磷空间分布的影响[J]. 水土保持研究, 2003, **10**(1): 76-77, 126.
- [17] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施肥条件下栗褐土磷素积累特征[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(5): 1215-1220.
- [18] 王建国, 杨林章, 单艳红, 等. 长期施肥条件下水稻土磷素分布特征及对水环境的污染风险[J]. 生态与农村环境学报, 2006, **22**(3): 88-92.
- [19] 滕泽琴, 李旭东, 韩会阁, 等. 土地利用方式对陇中黄土高原土壤磷组分的影响[J]. 草业学报, 2013, **22**(2): 30-37.
- [20] 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.
- [21] 秦胜金, 刘景双, 王国平, 等. 三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2777-2782.
- [22] 黄永杰, 张世熔, 蒲玉琳, 等. 滇江流域不同土地利用方式下土壤磷积累特征及流失风险[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(2): 337-344.
- [23] 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 等. 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2815-2820.
- [24] 汪娟, 蔡立群, 毕冬梅, 等. 保护性耕作对麦-豆轮作土壤有机碳全氮及微生物量碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(7): 1516-1521.
- [25] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2419-2425.
- [26] 潘莹, 胡正华, 吴杨周, 等. 保护性耕作对后茬冬小麦土壤CO₂和N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2771-2776.
- [27] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析——基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(12): 2464-2475.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005. 141-149.
- [29] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, **22**(3): 58-66.
- [30] 顾益初, 蒋柏藩, 鲁如坤. 风化对土壤粒级中磷素形态转化及其有效性的影响[J]. 土壤学报, 1984, **21**(2): 134-143.
- [31] 林利红, 韩晓日, 刘小虎, 等. 长期轮作施肥对棕壤磷素形态及转化的影响[J]. 土壤通报, 2006, **37**(1): 80-83.
- [32] 孙倩倩, 王正银, 赵欢, 等. 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(8): 2539-2549.
- [33] 陈强, 孙涛, 宋春雨. 免耕对土壤物理性状及作物产量影响[J]. 草业科学, 2014, **31**(4): 650-658.
- [34] 陈欣, 宇万太, 沈善敏. 磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化: II. 土壤有效磷及土壤无机磷组成[J]. 土壤学报, 1997, **34**(1): 81-88.
- [35] 马红亮, 高明, 魏朝富. 农艺措施对紫色水稻土无机磷形态的影响[J]. 土壤, 2003, **35**(3): 248-254.
- [36] 袁俊吉, 彭思利, 蒋先军, 等. 稻田垄作免耕对土壤团聚体和有机质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(12): 153-160.
- [37] 熊又升, 徐祥玉, 张志毅, 等. 垄作免耕影响冷浸田水稻产量及土壤温度和团聚体分布[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(15): 157-164.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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	中国国际图书贸易总公司 (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