

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM_{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量特征及其影响因素 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异

张田¹, 许浩¹, 茹淑华², 苏德纯^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193; 2. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051)

摘要: 为明确连续施用不同有机肥后土壤剖面中磷的分布规律和迁移特征, 探讨不同有机肥磷投入下农田磷负荷. 通过 4 a 连续田间定位试验, 定量研究连续施用不同有机肥后土壤剖面中磷的累积迁移特征与有效性差异. 结果表明: ①连续 4 a 施用不同有机肥后, 肥料中磷主要积累在 0~15 cm 表层土壤, 土壤全磷、速效磷含量均随土壤深度增加逐渐降低; 连续 4 a 施用高量有机肥后, 其带入的磷可明显迁移到 15~30 cm 土层, 施用高量猪粪速效磷可迁移到 60~90 cm 土层. ②连续 4 a 施用不同有机肥后, 土壤表层中速效磷占全磷比例增加, 且高用量与低用量之间差异显著. 土壤剖面中速效磷占全磷比例的大小顺序为: 猪粪处理 > 鸡粪处理 > 污泥处理 > 磷肥处理. ③施用鸡粪、猪粪、污泥和磷肥后土壤表层中速效磷含量随磷投入量增加呈先增加后平缓的规律. ④本试验条件下, 不同有机肥相同磷投入下对表层土壤速效磷贡献存在较大差异, 表现为: 猪粪 > 鸡粪 > 污泥. 猪粪带入磷的生物有效性和移动性明显高于鸡粪、污泥和磷肥.

关键词: 有机肥; 磷; 土壤剖面; 迁移; 累积

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5247-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705027

Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers

ZHANG Tian¹, XU Hao¹, RU Shu-hua², SU De-chun^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Farmland Pollution Prevention-control and Remediation, College of Resource and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Agro-resource and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: This study clarifies the distribution and migration characteristics of phosphorus in the soil profile and discusses the phosphorus load of farmland after continuous application of different organic fertilizers. The distribution and migration characteristics of phosphorus in soil profiles were studied through a field experiment lasting four consecutive years. The results showed that total phosphorus and Olsen-P are mainly accumulated in the soil surface, and their contents decrease with the deepening of soil depth after the continuous application of different fertilizers. With a four-year application of higher levels of organic fertilizer, the total phosphorus was found to migrate into the 15-30 cm soil layer. Olsen-P was found to migrate into the 60-90 cm soil layer under higher levels of pig manure. The ratio of available phosphorus to total phosphorus in the soil surface increased, and there were significant differences after the application of different amounts of organic fertilizers. The amount of Olsen-P as a proportion of total phosphorus in the soil profile decreased as pig manure treatment > chicken manure treatment > sludge treatment > phosphate fertilizer treatment. After the application of chicken manure, pig manure, sludge, and phosphate fertilizer, the value of Olsen-P in the soil surface increased with an increase in phosphorus input and then remained stable. When applying the same phosphorus onto the soil, the contribution of different organic fertilizers to Olsen-P in the surface soil was quite different. The bioavailability and mobility of phosphorus from pig manure was significantly higher than that of chicken manure, sludge, and phosphate fertilizer.

Key words: organic fertilizer; phosphorus; soil profile; transfer; accumulation

磷是作物生长发育的必需营养元素, 作物所需的磷主要来源于土壤, 包括土壤本身含有的磷以及人为施入土壤的磷^[1]. 施入土壤的磷肥当季利用率很低, 仅有 10%~20%, 其余的则被固定在土壤磷库, 长期施用磷肥容易造成土壤磷素累积^[2]. Macdonald 等^[3]的研究表明全球每年向土壤中投入化肥磷 1 420 万 t 和有机肥磷 960 万 t, 但是每年作物吸收带走的磷仅有 1 230 万 t, 这导致全球 71% 的

耕地有磷素积累现象, 其中亚洲东部、欧洲西南部、美国东西海岸以及巴西南部等地的土壤中磷素积累现象较严重. 我国土壤也存在磷素过度积累现

收稿日期: 2017-05-04; 修订日期: 2017-06-14

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503106); 国家自然科学基金项目(41271488)

作者简介: 张田(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制与修复, E-mail: ml8811073028@163.com

* 通信作者, E-mail: dcsu@cau.edu.cn

象,有研究表明,2009年全国磷盈余总量为1 035.8万t,盈余强度为 $59.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ [4]。在不同磷水平土壤上施用磷肥和有机肥后,土壤速效磷和土壤渗液中可溶性磷均显著增加[5],过量磷累积会加剧土壤磷淋失和环境污染[6]。由于自然和人为因素的影响,农田土壤速效磷含量具有时空变化特点,若缺乏对其背景值及时空变异情况的了解,不能根据其变化确定施肥量和施肥方式,有可能导致农田磷素亏缺或盈余[7]。农田土壤磷素盈余增加,向环境流失风险就会增大,带来地表水体和浅层地下水的富营养化[8]。研究表明造成大面积地表水体富营养化的一个重要原因是农业面源污染磷素的流失,并且磷是水体是否发生富营养化的一个限制因素[5,9,10]。

畜禽粪便和污泥都含有大量的有机质和氮磷养分,我国畜禽粪便和城市污泥年产生量达40.2亿t[5,11],有机肥可以提高土壤中氮磷养分,增加土壤肥力[12],可以有效地替代化肥提高作物产量并培肥土壤。但有机肥大量施用也会带来环境风险,特别是有机肥促进土壤中磷素活化和磷在土壤中移动,从而加大农田磷的环境风险[5,13]。土壤速效磷是土壤磷库中对作物最有效的部分,可供作物直接吸收利用,是评价土壤肥力、指导磷肥用量和评价农业磷环境风险的重要指标[14]。Lourenzi等[15]的研究表明施用畜禽粪便后土壤剖面中速效磷的含量增加并促进了磷的迁移。Sharpley等[16]的研究也发现大量施用有机肥会增加磷的移动性。施用有机肥促进磷向下迁移的原因一方面可能是长期施肥导致土壤中磷含量超过了土壤对磷最大吸附量,水溶性磷和吸附性磷通过土壤孔隙下移,另一方面是有机肥分解产生的大量有机酸对土壤本身的磷有活化作用,降低土壤对磷的吸附强度[17]。王月立等[18]的研究还发现,与化肥相比施用有机肥更容易导致磷向下迁移。化肥主要增加的是土壤无机磷组分,猪

粪等有机肥主要是增加有机磷含量,而有机磷的移动性更强[19,20]。Koopmans等[21]的研究表明土壤表层中有机磷矿化产生的正磷酸盐促进了磷在土壤剖面中的向下迁移。磷在土壤剖面中的迁移能力会因磷投入量、有机肥种类等因素的不同而存在差异[22]。

施用有机肥会对磷在土壤剖面中的迁移产生影响。近年来有机肥的应用越来越广泛,有机肥提供作物生长所需要的大量营养元素的同时也造成了土壤中磷过度积累和向下淋溶,带来严重的面源污染问题。本文通过连续4a的田间试验,量化研究连续施用不同种类有机肥后土壤剖面磷的分布规律和迁移特征,探讨不同有机肥磷投入下农田磷负荷,以期有机废弃物合理资源化利用,降低农业面源污染提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤与肥料

供试土壤:田间试验地位于河北农科院大河试验站试验田,地理位置为北纬 $38^{\circ}07'32''$,东经 $114^{\circ}23'00''$,海拔94.22m。母质:洪冲积物;土壤类型:黏壤质洪冲积石灰性褐土。

供试肥料:本试验中施用的肥料包括鸡粪、猪粪、污泥和磷肥这4种。鸡粪选用河北省某有机肥厂生产的成品有机肥,猪粪为有机肥厂生产的半成品有机肥,污泥为河北某生活污水处理厂的污泥,将污泥加入一定比例的秸秆,发酵后制成;磷肥(过磷酸钙)是云南云天化国际化工股份有限公司生产。为了控制施肥方式一致,所有有机肥和磷、钾肥采用播种前一次性基肥施用。对照、磷肥处理和低用量有机肥处理补充的氮肥1/2做基肥,另外1/2作为追肥在拔节期施用。试验地的地下水埋深18~20cm。供试土壤、肥料的基础理化性质和N、P、K含量分别见表1。

表1 供试土壤和肥料的基础理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil and manures

项目	pH	有机碳 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
供试土壤土	7.20	10.4	1.10	0.80	17.9	19.7	96.3
鸡粪	7.10	182	20.2	20.6	10.3	—	—
猪粪	8.60	184	24.0	27.8	12.2	—	—
污泥	6.62	201	22.4	25.0	8.00	—	—
磷肥	—	—	—	69.8	—	—	—

1.2 试验设计

本试验共设5个处理,包括1个常规对照处理

(CK)和4种肥料处理:猪粪(Z)、鸡粪(J)、污泥(W)和磷肥(P)。每种肥料设4个用量梯度,共17

个处理, 每个处理设 3 次重复, 共 51 个试验小区. 每个小区面积为 12 m^2 (长 3 m, 宽 4 m), 各小区随机排列, 小区南北向用田埂隔开, 东西向用塑料板隔开, 各肥料用量见表 2. 田间管理方式参照当地. 施肥后与耕层土壤 (0 ~ 15 cm) 用小型悬耕机充分混匀. 试验期 4 a, 每年均按表 2 施用肥料并种植小麦, 小麦一年一熟, 收获后不再种植其他作物.

表 2 田间试验肥料用量

处理代号	试验处理	肥料用量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$		
		有机肥或磷肥	尿素 ¹⁾	氯化钾 ¹⁾
1	CK	0	0.65	0.15
2	P1	0.90	0.65	0.15
3	P2	1.80	0.65	0.15
4	P3	2.70	0.65	0.15
5	P4	3.60	0.65	0.15
6	J1	15.00	0.19	0
7	J2	30.00	0	0
8	J3	45.00	0	0
9	J4	60.00	0	0
10	Z1	15.00	0.14	0
11	Z2	30.00	0	0
12	Z3	45.00	0	0
13	Z4	60.00	0	0
14	W1	15.00	0.14	0.05
15	W2	30.00	0	0
16	W3	45.00	0	0
17	W4	60.00	0	0

1) 为使各小区产量基本保持一致, 有机肥中的 N 和 P 按相当于化肥 70% 折算, N、 K_2O 分别补足 $0.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $0.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 用尿素、氯化钾补充, 超过不补; 尿素基肥和追肥各 1/2

1.3 样品采集和预处理

土壤样品在小麦成熟期 (每年 6 月) 采集. 采用方法为“S”型多点采样法. 每个小区分别在土壤深度为 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 60 和 60 ~ 90 cm, 4 个土层采样, 每层取土壤 5 个样点, 混匀为 1 个土壤样品. 土样经自然风干后研磨先过 1 mm 尼龙筛, 供测定土壤速效磷使用; 从中取部分土样过 100 目尼龙筛, 供测定土壤全磷使用.

1.4 土壤中全磷和速效磷的测定

土壤速效磷 (Olsen-P) 用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ ($\text{pH} = 8.5$) 溶液提取 (水土比 20:1) 后采用钼锑抗比色法测定, 土壤全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮-钼锑抗比色法测定^[23].

1.5 数据处理

数据处理使用 Microsoft Office Excel 2010、Origin8.0 软件绘图, 使用 SAS 9.1.3 软件在 $P < 0.05$ 水平下对数据进行显著性分析.

2 结果与分析

2.1 连续施用不同种类有机肥后全磷在土壤剖面中的累积与迁移

从图 1(a) 中可以看出, 连续 4 a 施用不同量鸡粪后 0 ~ 15 cm 土层土壤中全磷含量均明显增加. 其中 30、45、 $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的鸡粪用量土壤全磷含量分别达到 1536 、 1754 、 $2033 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与对照相比分别增加了 32.3%、51.1%、75.1%, 达到显著水平. 15 ~ 30 cm 土层中, $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 鸡粪用量土壤全磷含量也显著增加, 相比对照增加了 16.6%. 在 30 ~ 60 cm、60 ~ 90 cm 土层中, 各鸡粪用量处理对土壤全磷含量的影响均不显著. 图 1(b) 是连续 4 a 施用不同量猪粪后全磷在土壤剖面中的分布状况. 在 0 ~ 15 cm 土层中, 15、30、45、 $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的猪粪处理均显著增加了土壤全磷含量, 且随着猪粪施用量的增加全磷含量显著增加, 与对照相比分别增加了 13.1%、27.4%、44.6%、60.5%. 在 15 ~ 30 cm 土层中, $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 猪粪用量下的土壤全磷含量达到 $1044.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比对照显著增加了 26.2%. 在 30 ~ 60 cm、60 ~ 90 cm 土层中, 4 个用量的猪粪均对土壤全磷含量没有显著影响. 图 1(c) 是连续 4 a 施用不同量污泥后全磷在土壤剖面中的分布状况. 在 0 ~ 15 cm 土层中, 各污泥用量处理下土壤全磷含量均增加, 其中 30、45、 $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的污泥处理条件下全磷含量增加显著, 与对照相比分别增加了 28.2%、44.6%、67.7%. 在 15 ~ 30 cm 土层中 $60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的污泥处理下全磷含量显著增加, 达到了 $1030 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 30 ~ 60 cm 和 60 ~ 90 cm 土层中施用不同量污泥后土壤全磷含量与对照比没有显著变化. 图 1(d) 是连续 4 a 施用不同量磷肥后全磷在土壤剖面中的分布状况. 磷肥显著增加了表层土壤中全磷含量, 其中 1.8、2.7、 $3.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的磷肥用量处理下全磷含量分别达到了 1280、1461、 $1500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与对照相比增加了 10.2%、25.8%、29.2%. 本试验条件下连续施用磷肥对表层以下土层中全磷含量影响不显著, 这说明连续 4 a 施用磷肥带入的全磷主要积累在土壤表层, 没有向下迁移. 从图 1 中还可以看出, 各肥料处理土壤全磷含量均呈随土层深度增加而明显降低的规律.

2.2 连续施用不同种类有机肥后速效磷在土壤剖面中的累积与迁移

土壤全磷含量表征土壤供磷的潜力^[24], 速效磷作为土壤磷贮库中对作物最为有效的部分, 能直

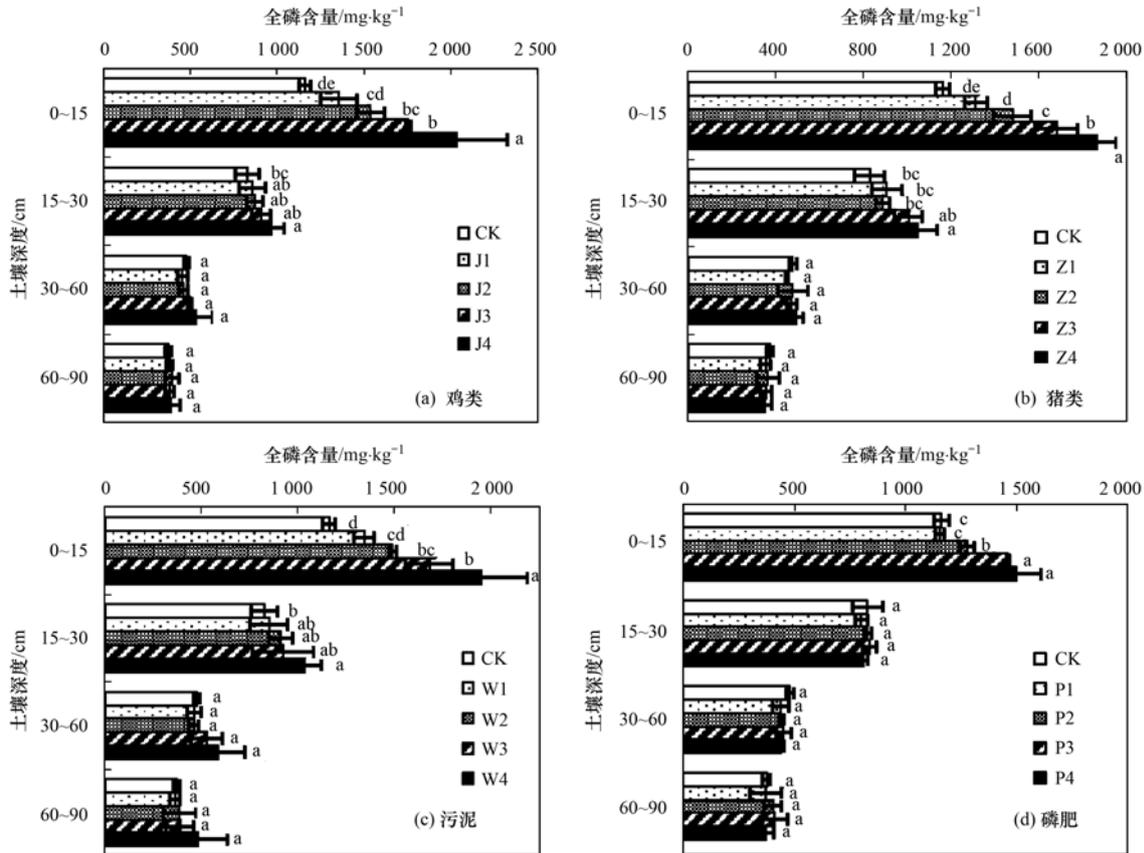


图 1 施用不同种类不同用量肥料后全磷在土壤剖面的累积与迁移

Fig. 1 Distribution of total phosphorus in the soil profile after application of different amounts and different kinds of fertilizer

接供作物吸收利用,因而是评价土壤供磷能力的重要指标^[7].与全磷相比,土壤速效磷含量受耕作、施肥等措施的影响更为显著^[25].图2是连续4 a施用不同量有机肥后速效磷在土壤剖面中的分布.从图中可以看出,施用不同有机肥和磷肥后土壤剖面中速效磷含量的分布规律与全磷相似,也呈随土层深度增加而明显降低的规律.从图2(a)可以看出,在0~15 cm土层中连续施用鸡粪后土壤速效磷含量显著增加,15、30、45、60 t·hm⁻²的鸡粪处理下土壤速效磷含量分别为57.9、86.3、120、145 mg·kg⁻¹,与对照相比分别增加了105%、205%、324%、412%,速效磷增加与全磷含量显著增加有关^[19,26].在15~30 cm土层中,60 t·hm⁻²的鸡粪处理速效磷含量也显著增加,是对照的1.79倍.在30~60 cm和60~90 cm土层中,各鸡粪用量处理速效磷含量与对照增加不显著.这表明连续4年施用高量鸡粪后速效磷可迁移到15~30 cm土层.从图2(b)中可以看出,在0~15 cm土层中,15、30、45、60 t·hm⁻²的猪粪处理均显著增加了土壤速效磷含量,土壤速效磷含量分别达到80.3、131、

170、200 mg·kg⁻¹,并且随猪粪施用量的增加土壤速效磷显著增加.与对照相比速效磷分别增加了183%、363%、501%、605%.在15~90 cm各土层中,45 t·hm⁻²、60 t·hm⁻²的猪粪处理的土壤速效磷含量也显著增加,这表明高用量条件下连续4a施用猪粪后土壤速效磷可迁移到60~90 cm的深土层.从图2(c)中可以看出,在0~15 cm土层中15、30、45、60 t·hm⁻²的污泥处理条件下,土壤速效磷含量也均显著增加,土壤速效磷含量分别达到44.7、56.4、68、89.4 mg·kg⁻¹,且不同用量之间差异显著,与对照相比分别增加了57.8%、99.1%、140%、216%.在15~30 cm土层中30、45、60 t·hm⁻²的污泥处理条件下,土壤速效磷含量与对照也显著增加,分别达到了21.4、23.7、21.5 mg·kg⁻¹.在30~60 cm土层中高用量污泥处理的土壤速效磷含量与对照相比仍显著增加,但各污泥用量处理对60~90 cm土层中速效磷的含量则没有显著影响.从图2(d)中可以看出,在0~15 cm土层中2.7 t·hm⁻²、3.6 t·hm⁻²的磷肥处理土壤速效磷含量增加较显著,与对照相比分别增加了

50.2%、61.4%。与全磷相似, 各磷肥用量处理对 15~90 cm 土层中速效磷的含量影响不显著。这说

明本用量条件下连续 4 a 施用磷肥土壤速效磷也主要积累在土壤表层, 没有向下迁移。

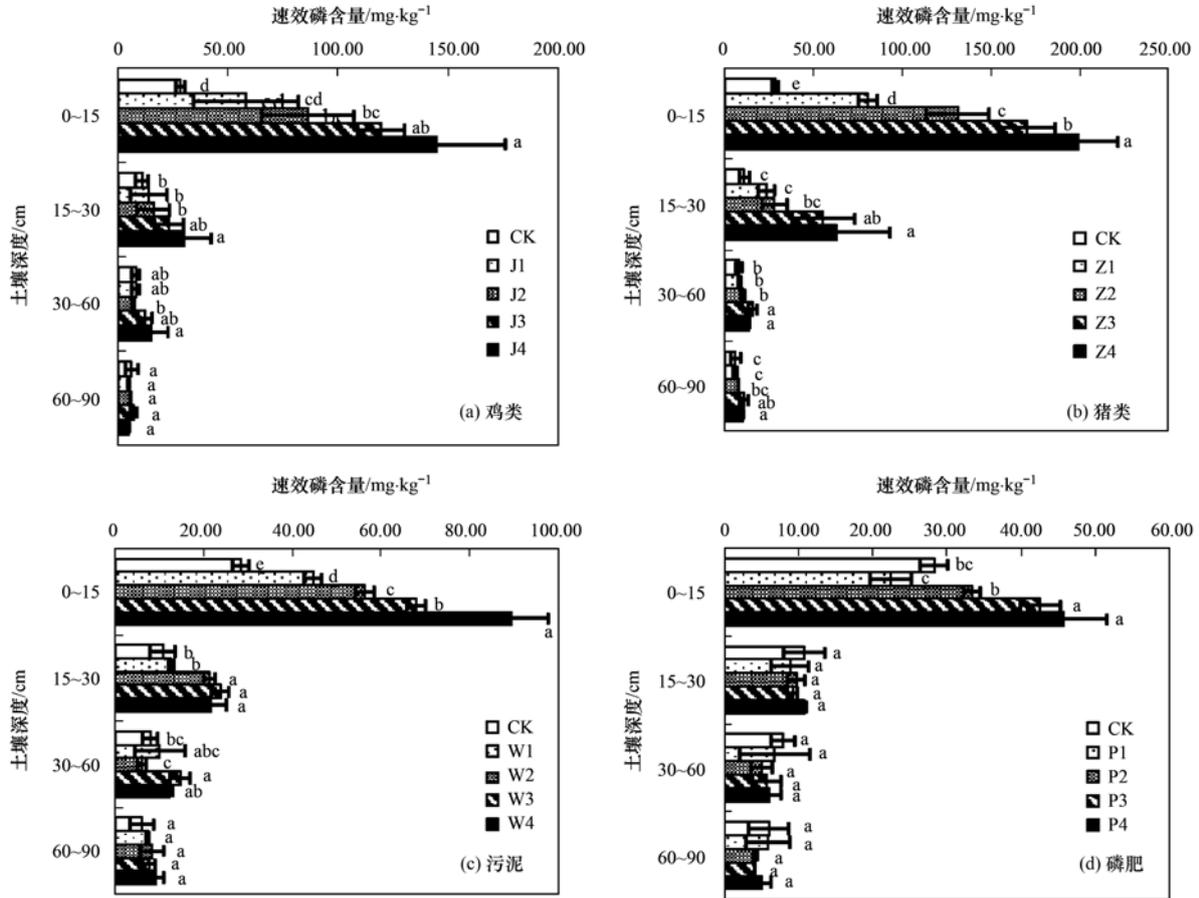


图 2 施用不同种类不同用量肥料后速效磷在土壤剖面的迁移累积

Fig. 2 Distribution of Olsen-P in the soil profile after application of different amounts and different kinds of fertilizer

2.3 连续施用不同种类有机肥后土壤剖面中速效磷占全磷的比例的变化

不同肥料带入到土壤中的磷, 其形态和有效性会随时间发生变化. 土壤对肥料磷的固定使其有效性逐渐降低, 但不同有机肥由于其组成不同转化会存在差异. 从表 3 可以看出, 在 0~15 cm 土层中, 高用量磷肥处理 (P3、P4) 土壤速效磷占全磷的比例与对照比显著增加, 由 2.44% 增加到了 2.91%、3.03%; 30、45、60 t·hm⁻² 鸡粪用量下土壤速效磷占全磷的比例在 0~15 cm 土层中也显著增加, 由 2.44% 增加到了 5.63%~7.13%; 各猪粪和污泥用量处理也均显著增加了表层土壤速效磷占全磷的比例, 其中 45 t·hm⁻² 和 60 t·hm⁻² 猪粪用量处理表层土壤速效磷占全磷比例超过了 10%. 施用猪粪和鸡粪后对表层土壤速效磷占全磷的比例的提高幅度高于污泥和磷肥。

从表 3 还可以看出, 各磷肥用量处理对在 15 cm 以下土层中速效磷占全磷的比例无显著影响。

有机肥则不同, 60 t·hm⁻² 高鸡粪用量下, 15~30 cm 土层中土壤速效磷占全磷的比例也显著增加. 45 t·hm⁻²、60 t·hm⁻² 的猪粪用量对 15~30、30~60 和 60~90 cm 土层中速效磷占全磷的比例均有显著影响, 与对照相比在 15~30 cm 土层中速效磷占全磷的比例由 1.29% 分别增加到了 5.49%、5.91%; 30~60 cm 土层中由 1.67% 分别增加到了 3.26%、2.73%; 60~90 cm 土层中由 1.62% 分别增加到了 2.99%、2.83%. 高用量的污泥处理也能显著增加 15~30 cm 土层中速效磷占全磷的比例. 这表明与施用磷肥相比, 施用有机肥能显著增加下层土壤中速效磷占全磷的比例, 这也增加了有机肥处理磷的淋溶风险。

2.4 不同种类有机肥中单位磷投入对表层土壤速效磷的贡献

图 3 是施用不同有机肥和磷肥时, 单位磷投入量与土壤表层速效磷的关系. 从中可以看出, 施用不同的有机肥和磷肥时, 土壤表层速效磷含量与磷

表 3 施用不同量不同种肥料后速效磷占全磷的比例¹⁾/%

Table 3 Proportion of Olsen-P to total phosphorus in the soil profile after application of different amounts and different kinds of fertilizer/%

项目	0 ~ 15 cm	15 ~ 30 cm	30 ~ 60 cm	60 ~ 90 cm
CK	2.44 ± 0.17c	1.29 ± 0.24a	1.67 ± 0.38a	1.62 ± 0.76a
P1	1.95 ± 0.24d	1.11 ± 0.35a	1.51 ± 0.97a	1.55 ± 0.58a
P2	2.62 ± 0.12bc	1.17 ± 0.09a	1.15 ± 0.30a	1.55 ± 0.58a
P3	2.91 ± 0.17ab	1.10 ± 0.12a	1.24 ± 0.34a	1.03 ± 0.13a
P4	3.03 ± 0.23a	1.34 ± 0.04a	1.39 ± 0.34a	1.35 ± 0.27a
CK	2.44 ± 0.17c	1.29 ± 0.24b	1.67 ± 0.38ab	1.62 ± 0.76a
J1	4.38 ± 2.08bc	1.59 ± 0.83b	1.75 ± 0.47ab	1.26 ± 0.10a
J2	5.63 ± 1.04ab	1.84 ± 0.66ab	1.47 ± 0.05b	1.42 ± 0.13a
J3	6.82 ± 0.61a	2.57 ± 0.88ab	2.43 ± 0.64ab	1.76 ± 0.32a
J4	7.13 ± 1.09a	3.08 ± 1.01a	2.71 ± 1.18a	1.22 ± 0.16a
CK	2.44 ± 0.17c	1.29 ± 0.24c	1.67 ± 0.38c	1.62 ± 0.76b
Z1	6.12 ± 0.38b	2.60 ± 0.70c	1.82 ± 0.20c	1.57 ± 0.11b
Z2	8.89 ± 1.38a	3.14 ± 0.72bc	2.12 ± 0.56bc	2.14 ± 0.28ab
Z3	10.2 ± 1.40a	5.49 ± 1.58ab	3.26 ± 0.35a	2.99 ± 0.65a
Z4	10.8 ± 1.65a	5.91 ± 2.42a	2.73 ± 0.28ab	2.83 ± 0.24a
CK	2.44 ± 0.17d	1.29 ± 0.24c	1.67 ± 0.38b	1.62 ± 0.76a
W1	3.33 ± 0.14c	1.50 ± 0.20bc	2.13 ± 1.10ab	2.05 ± 0.21a
W2	3.79 ± 0.09bc	2.35 ± 0.23a	1.33 ± 0.31b	2.08 ± 0.26a
W3	4.06 ± 0.17b	2.64 ± 0.64a	2.84 ± 0.57a	2.19 ± 0.57a
W4	4.62 ± 0.57a	2.08 ± 0.18ab	2.19 ± 0.57ab	2.02 ± 0.75a

1) 相同肥料种类同土层比较, 无共同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平

投入量符合线性加平台回归模型. 图 3(a) 是施鸡粪时磷 4a 累计投入量与土壤表层速效磷的关系. 从中可以看出, 土壤表层速效磷含量与磷投入量的关系可用分段方程 $y = 108.4x + 25.169$, ($0 < x < 1.1046$); $y = 144.907$, ($x \geq 1.1046$) 表示, 决定系数 $R^2 = 0.97$, 施用鸡粪时土壤表层速效磷含量与磷

投入量呈极显著正相关. 当磷投入量从 0 增加到约 $1.1046 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 速效磷的含量逐渐增加, 当磷投入量从 $1.1046 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 继续增加时, 速效磷的含量保持稳定达到 $145 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右. 图 3(b) 是施猪粪时磷累计投入量与土壤表层速效磷的关系. 土壤表层速效磷含量与磷投入量的关系可用分段方

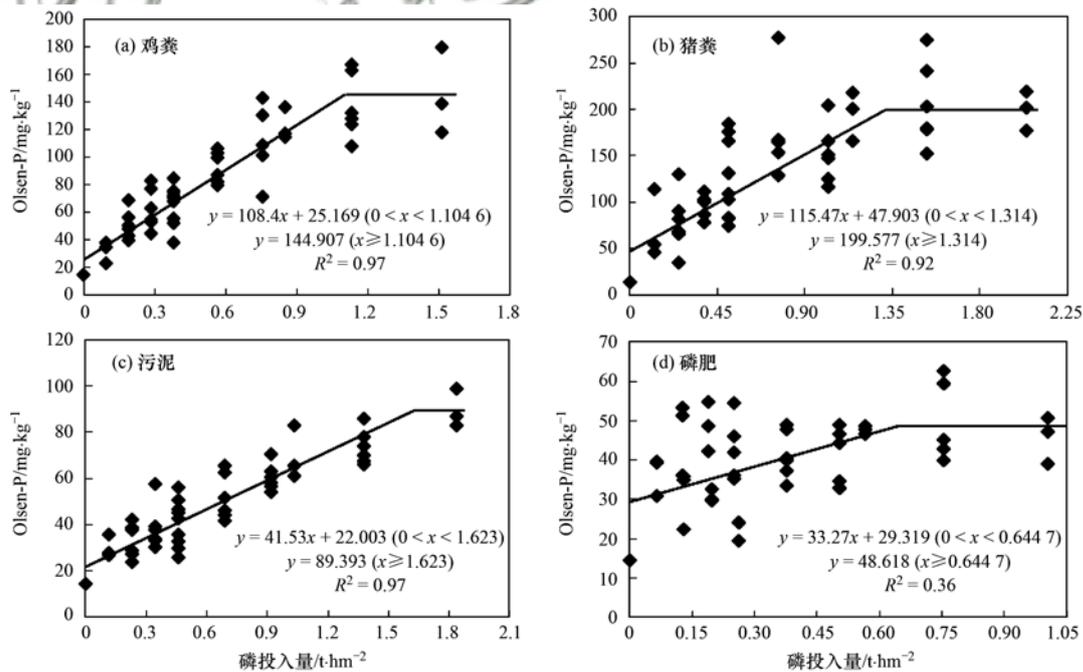


图 3 施不同有机肥和磷肥时磷投入量对土壤表层速效磷的回归分析

Fig. 3 Regression analysis of phosphorus input and Olsen-P in surface soil under different kinds of fertilizer application conditions

程: $y = 115.47x + 47.903$, ($0 < x < 1.314$); $y = 199.577$, ($x \geq 1.314$) 表示, 决定系数 $R^2 = 0.92$, 施用猪粪土壤表层速效磷含量与磷投入量也呈极显著正相关. 当磷投入量从 0 增加到约 $1.314 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 速效磷的含量逐渐增加, 当磷投入量从 $1.314 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 继续增加时, 速效磷的含量达到约 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 图 3(c) 是施污泥时磷累计投入量与土壤表层速效磷的关系. 土壤表层速效磷含量与磷投入量的关系可用分段方程: $y = 41.53x + 22.003$, ($0 < x < 1.623$); $y = 89.393$, ($x \geq 1.623$) 表示, 决定系数 $R^2 = 0.97$, 施用污泥土壤表层速效磷含量与磷投入量呈极显著正相关. 当磷投入量从 0 增加到约 $1.623 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 速效磷的含量逐渐增加, 当磷投入量从 $1.623 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 继续增加时, 速效磷的含量保持稳定达到约 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 图 3(d) 是施磷肥时磷累计投入量与土壤表层速效磷的关系. 土壤表层速效磷含量与磷投入量的关系可用分段方程: $y = 33.27x + 29.319$, ($0 < x < 0.6447$); $y = 48.618$, ($x \geq 0.6447$) 表示, 但数据较离散, 决定系数较低, $R^2 = 0.36$. 当磷投入量从 0 增加到约 $0.6447 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 速效磷的含量逐渐增加, 当磷投入量从 $0.6447 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 继续增加时, 速效磷的含量保持稳定.

为对比不同肥料磷投入对土壤表层速效磷贡献的差异, 将连续 4 a 施用 4 种肥料后土壤表层速效磷增加量与磷投入量的回归关系在一起比较(图 4). 从图 4 中可以看出, 在等磷量投入条件下, 猪粪处理对土壤表层速效磷净增加量明显高于鸡粪处理, 且猪粪和鸡粪均大于污泥和磷肥处理. 有研究表明在等磷量投入下, 施用鸡粪、猪粪对土壤表层速效磷累积量分别比化肥高出 50.60%、70.29%^[27]. 从图 4 还可以看出, 当磷投入量小于 $0.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 施用磷肥对土壤表层速效磷的增加

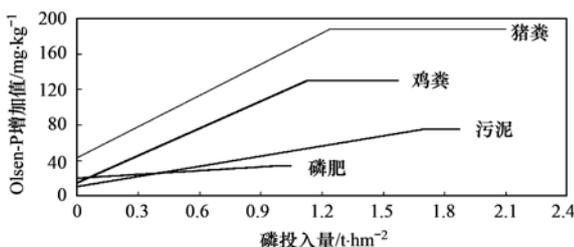


图 4 不同肥料磷投入量对土壤表层速效磷增加值趋势

Fig. 4 Linear plus plateau model analysis of phosphorus input and the net increase of Olsen-P in surface soil with the application of different fertilizers

高于施用污泥.

3 讨论

尽管不同有机肥中全磷含量存在较大差异^[28], 但在本试验条件下, 连续 4 a 施用 3 种有机肥均显著增加了表层土壤速效磷含量, $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 低用量的鸡粪和猪粪处理表层土壤速效磷含量均超过了 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的高用量处理表层土壤速效磷含量分别达到了 $145 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Heckrath 等^[29] 在英国洛桑试验站长期观测发现, 土壤磷素发生淋溶时的阈值是速效磷 (Olsen-P) $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 当土壤磷素含量超出这一阈值时, 土壤淋溶液中磷素含量最高可达到 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而低于阈值时, 淋溶液中磷素含量仅为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 本试验条件下连续施用 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的鸡粪、猪粪和污泥后, 土壤全磷、速效磷均出现明显向下迁移的现象, 全磷可迁移至 $15 \sim 30 \text{ cm}$, 速效磷最远可迁移到 $60 \sim 90 \text{ cm}$. 而施用磷肥的处理, 磷主要累积在了表层土壤. 有研究表明, 有机蔬菜生产中过量施用有机肥会显著增加土壤磷素淋失风险^[30]. 相对于化肥而言, 相同磷素投入下有机肥对于土壤磷素累积, 尤其是活性态磷的累积贡献更大^[31]. 施用有机肥相对于施用化学磷肥, 会使土壤速效磷更易于向下层迁移^[18]. Eghball 等^[32] 的研究结果也表明, 在施磷量相同的情况下有机肥中的磷在土壤剖面的迁移比化肥磷更深. 有机肥中磷更易迁移主要是由于有机肥含有大量的有机质, 有机质在分解过程中产生的有机酸减少了土壤对磷的固定, 从而增强了磷的移动性和有效性^[17]. 本研究还表明, 施用猪粪比施用鸡粪土壤中磷的有效性与淋失风险更高. 造成不同有机肥处理间差异的原因可能与有机肥本身的 C/P 比不同有关, 有机物料的 C/P 决定了其矿化速率与有效性^[33]. 本试验条件下, 施用鸡粪后速效磷在土壤剖面中的分布规律与全磷相似, 但施用猪粪后速效磷相比于全磷更易向下迁移. 这可能与猪粪比鸡粪更易分解有关^[34]. 有研究表明施猪粪后土壤全磷比对照增加了 79.2%, 而速效磷含量增加 10 倍^[35].

土壤速效磷占土壤全磷的百分数, 既能反映土壤磷素的供应强度, 也可以反映土壤的磷素容量, 是评判土壤磷素有效性的重要指标之一^[36]. 本试验条件下, 与施用磷肥相比, 施用不同有机肥对土层中有效磷占全磷的比例增加更显著. 与鸡粪和污泥相比, 猪粪对土层中有效磷占全磷的比例增加更

显著. 有研究发现, 速效磷占全磷的比例低于 2.00% 说明全磷不易于转化为速效磷^[37]. 施用猪粪后土壤中有效磷占全磷的比例最高可达到 10.8%.

本试验条件下, 不同有机肥相同磷投入下对表层土壤速效磷贡献存在较大差异, 表现为: 猪粪 > 鸡粪 > 污泥. 按 Heckrath 等^[29] 提出的土壤速效磷含量 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 阈值标准, 为控制农田磷的淋溶风险, 鸡粪、猪粪和污泥堆肥农田磷投入量不宜超过 321、103 和 $915 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

4 结论

(1) 连续 4 a 施用不同种类有机肥后, 有机肥带入土壤的磷主要积累在了土壤表层. 高有机肥用量土壤磷会向深层土壤迁移, 连续 4a 施用 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 鸡粪和污泥堆肥, 全磷、速效磷均可迁移到 15~30 cm 土层. 施用 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 猪粪, 全磷可迁移到 15~30 cm, 速效磷可迁移到 60~90 cm.

(2) 连续施用猪粪和鸡粪后表层土壤速效磷占全磷的比例显著增加, 最高分别可达到 10.8%、7.13%. 而施用磷肥和污泥后表层土壤速效磷占全磷的增加较小, 最高分别只有 3.04%、4.62%. 连续施用猪粪可影响到 60~90 cm 土层中速效磷占全磷的比例.

(3) 本试验条件下, 不同有机肥相同磷投入下对表层土壤速效磷贡献存在较大差异, 表现为: 猪粪 > 鸡粪 > 污泥. 通过施用猪粪带入土壤的磷生物有效性和淋溶风险明显高于鸡粪、污泥和磷肥.

参考文献:

- [1] 宋春, 韩晓增. 长期施肥条件下土壤磷素的研究进展[J]. 土壤, 2009, **41**(1): 21-26.
Song C, Han X Z. Advances in phosphorus in long-term fertilized soil[J]. Soils, 2009, **41**(1): 21-26.
- [2] 曾招兵, 曾思坚, 汤建东, 等. 广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(3): 444-451.
Zeng Z B, Zeng S J, Tang J D, et al. Space-temporal variation of farmland soil AP in Guangdong province and their causing factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(3): 444-451.
- [3] Macdonald G K, Bennett E M, Potter P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, **108**(7): 3086-3091.
- [4] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(1): 1-8.
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, et al. Research progress on cropland phosphorus balance in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(1): 1-8.
- [5] 张作新, 廖文华, 刘建玲, 等. 过量施用磷肥和有机肥对土壤磷渗漏的影响 [J]. 华北农学报, 2008, **23**(6): 189-194.
Zhang Z X, Liao W H, Liu J L, et al. The effect of phosphate fertilizer and manure on phosphorus leaching [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, **23**(6): 189-194.
- [6] Carpenter S R. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, **102**(29): 10002-10005.
- [7] 廖菁菁, 黄标, 孙维侠, 等. 农田土壤有效磷的时空变异及其影响因素分析——以江苏省如皋市为例 [J]. 土壤学报, 2007, **44**(4): 620-628.
Liao J J, Huang B, Sun W X, et al. Spatio-temporal variation of soil available phosphorus and its influencing factors—a case study of rugao county, Jiangsuprovince [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(4): 620-628.
- [8] Heredia O S, Cirelli A F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity [J]. Geoderma, 2007, **137**(3-4): 426-431.
- [9] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source Pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1159-1168.
- [10] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(2): 508-520.
- [11] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(1): 129-135.
Li B Y, Huang S M, Zhang Y T, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(1): 129-135.
- [12] 荣勤雷, 梁国庆, 周卫, 等. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(5): 1168-1177.
Rong Q L, Liang G Q, Zhou W, et al. Effects of different organic fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(5): 1168-1177.
- [13] Sharpley A N, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(1): 176-181.
- [14] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护 [J]. 磷肥与复肥, 2003, **18**(1): 4-8.
Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2003, **18**(1): 4-8.
- [15] Lourenzi C R, Ceretta C A, Cerini J B, et al. Available content, surface runoff and leaching of phosphorus forms in a typical hapludalf treated with organic and mineral nutrient sources [J]. Revista Brasileira de Ciênciado Solo, 2014, **38**(2): 544-556.
- [16] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, **68**(6): 2048-2057.
- [17] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响 [J]. 土壤学报, 1991, **28**(1): 7-13.
Zhao X Q, Lu R K. Effect of organic manures on soil phosphorus

- adsorption[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, **28**(1): 7-13.
- [18] 王月立, 张翠翠, 马强, 等. 不同施肥处理对潮棕壤磷素累积与剖面分布的影响[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(4): 761-768.
Wang Y L, Zhang C C, Ma Q, *et al.* Effects of fertilization on accumulation and profile distribution of phosphorus in aquatic brown soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(4): 761-768.
- [19] 叶会财, 李大明, 黄庆海, 等. 长期不同施肥模式红壤性水稻土磷素变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(6): 1521-1528.
Ye H C, Li D M, Huang Q H, *et al.* Variation of soil phosphorus under long-term fertilization in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(6): 1521-1528.
- [20] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(6): 1389-1393.
Zhang S X, Zhang W J, Shen R F, *et al.* Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(6): 1389-1393.
- [21] Koopmans G F, Chardon W J, McDowell R W. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36**(1): 305-315.
- [22] Pizzeghello D, Berti A, Nardi S, *et al.* Phosphorus-related properties in the profiles of three Italian soils after long-term mineral and manure applications[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **189**: 216-228.
- [23] 崔雯雯, 宋全昊, 高小丽, 等. 糜子不同种植方式对土壤酶活性及养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(1): 234-240.
Cui W W, Song Q H, Gao X L, *et al.* Influence of different cropping patterns on soil enzyme activities and yield of broomcorn millet[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(1): 234-240.
- [24] Shepherd M A, Withers P J. Applications of poultry litter and triple superphosphate fertilizer to a sandy soil: effects on soil phosphorus status and profile distribution[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, **54**(3): 233-242.
- [25] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翻. 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.
Liu J L, Zhang F S, Yang F H. Fractions of phosphorus in cultivated and vegetable soils in northern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2000, **6**(2): 179-186.
- [26] 信秀丽, 钦绳武, 张佳宝, 等. 长期不同施肥下潮土磷素的演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(6): 1514-1520.
Xin X L, Qin S W, Zhang J B, *et al.* Dynamics of phosphorus in fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(6): 1514-1520.
- [27] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤有效磷累积与淋溶的影响[J]. *土壤通报*, 2012, **43**(5): 1195-1200.
Xiao H, Pan J, Cheng W J, *et al.* Effect of different organic manures on accumulation and leaching of Olsen-P in greenhouse soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, **43**(5): 1195-1200.
- [28] 严正娟, 陈硕, 王敏锋, 等. 不同动物粪肥的磷素形态特征及有效性分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, **32**(1): 31-39.
Yan Z J, Chen S, Wang M F, *et al.* Characteristics and availability of different forms of phosphorus in animal manures[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, **32**(1): 31-39.
- [29] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, **24**(5): 904-910.
- [30] 王敏锋, 严正娟, 陈硕, 等. 施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(7): 1351-1359.
Wang M F, Yan Z J, Chen S, *et al.* Effects of manure and biogas slurry applications on phosphorus accumulation and mobility in organic vegetable soil under greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(7): 1351-1359.
- [31] Reddy D D, Rao A S, Rupa T R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol[J]. *Bioresource Technology*, 2000, **75**(2): 113-118.
- [32] Eghball B, Binford G D, Baltensperger D D. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25**(6): 1339-1343.
- [33] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(4): 593-598.
Xu Y C, Shen Q R, Mao Z S. Influences of long-term fertilization on the contents and distributions of forms of organic P in soil and soil particle sizes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(4): 593-598.
- [34] 周桦, 柳敏, 宇万太. 有机物料及其配施在潮土中的残留特点[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(6): 1311-1314.
Zhou H, Liu M, Yu W T. Properties of decomposition and residue of organic materials and its mixture in aquatic brown earth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(6): 1311-1314.
- [35] 赵云英, 谢永生, 郝明德. 施肥对黄土旱塬区黑垆土土壤肥力及硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(6): 1273-1279.
Zhao Y Y, Xie Y S, Hao M D. Effect of fertilization on fertility and nitrate accumulation of blackloessial soil of dry land in Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, **15**(6): 1273-1279.
- [36] 刘志祥, 江长胜, 祝滔. 缙云山不同土地利用方式对土壤全磷和有效磷的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, **35**(3): 140-145.
Liu Z X, Jiang C S, Zhu T. Effects of different land use patterns on soil total phosphorus and available phosphorus in Jinyun mountain[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2013, **35**(3): 140-145.
- [37] 陈新, 梁成华, 张恩平, 等. 长期定位施肥对蔬菜保护地土壤磷素空间分布的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, **21**(12): 209-212, 276.
Chen X, Liang C H, Zhang E P, *et al.* Effect of long-term located fertilization on spatial distribution characteristics of phosphorus in vegetable soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, **21**(12): 209-212, 276.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui, <i>et al.</i> (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si, <i>et al.</i> (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong, <i>et al.</i> (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi, <i>et al.</i> (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)