

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化

商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 通过土壤培养试验, 研究了不同畜禽粪便有机肥中重金属 Cu、Zn 在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化过程, 为合理确定由畜禽粪便有机肥带入农田土壤的重金属负荷, 科学评价畜禽粪便有机肥中重金属进入土壤后的生态风险提供理论依据。结果表明, 土壤中施用畜禽粪便有机肥后, 酸性土壤 pH 值升高, 而石灰性土壤 pH 值降低。施用鸡粪后 6 个月内, 有效态 Cu 含量在 2 种土壤中显著低于等量 Cu 无机盐处理, 而有效态 Zn 含量则与等量 Zn 无机盐处理无显著差异; 施用猪粪后 6 个月内, 有效态 Cu 和 Zn 含量在 2 种土壤中均与等量 Cu 和 Zn 无机盐处理无显著差异。形态归趋研究表明, 通过畜禽粪便有机肥进入土壤中的 Cu 和 Zn 在土壤中主要以交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态以及有机结合态的形式存在, 且畜禽粪便有机肥的来源不同, 各形态 Cu 和 Zn 在不同土壤中所占比例不同。土壤中施用畜禽粪便有机肥 6 个月时, Cu 和 Zn 交换态以及铁锰氧化物结合态所占比例低于等量 Cu 和 Zn 无机盐处理, 而有机结合态所占比例高于等量 Cu 和 Zn 无机盐处理, 其它形态与无机盐处理无显著差异。

关键词: 畜禽粪便施肥; Cu; Zn; 形态归趋; 有效性; 农田土壤

中图分类号: X53; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0314-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.01.042

Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures

SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, SU De-chun*

(College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Soil incubation experiments were conducted with different sources of manures containing heavy metals to evaluate the bioavailability of heavy metals (Cu and Zn) and their form transformation in different soils. This study may assist in developing strategies to ascertain the loads of heavy metals which entered into soils together with manures, and promote policies to evaluate the ecological risk in agriculture soils. The results showed that, during the six months of soil incubation, the pH value of acidic soil increased and the pH value of calcareous soil reduced. After adding chicken manures, the contents of available Cu in both calcareous and acid soils were significant lower than those in the equivalent inorganic salt treatments, but there was no significant difference between the treatments in the contents of available Zn in both calcareous and acid soils. Furthermore, there were also no significant differences between pig manures and the equivalent inorganic salt treatments in the contents of available Cu and Zn in both calcareous and acid soils. The results of form tendency showed that the main forms of Cu and Zn in both calcareous and acid soils, which entered into soils together with manures, were exchangeable, carbonate, Fe-Mn oxides, and organic. And the proportions of different heavy metals species in calcareous and acid soils were different with different manures sources. After six months of incubation, the contents of exchangeable and Fe-Mn oxides Cu, Zn were lower than those in the equivalent inorganic salt treatments, the contents of organics Cu and Zn were higher than those in the equivalent inorganic salt treatments, and other Cu and Zn forms in soils showed no difference with inorganic salt treatments.

Key words: livestock and poultry manure; copper; zinc; form tendency; bio-availability; farm soils

我国每年约产生畜禽粪便 30 亿 t^[1], 直接和间接还田利用的畜禽粪便占排放量的 60% 以上^[2]。畜禽粪便有机肥可以为作物提供养分, 并能改良土壤和提高农产品品质。但由于 Cu、Zn、Cr、As 等微量元素饲料添加剂的普遍使用^[3], 造成集约化养殖场的畜禽粪便中重金属含量超标。畜禽粪便的施用已经成为农田土壤重金属污染的重要来源^[4~6]。调查显示我国畜禽粪便中重金属以 Cu、Zn 超标最为严重^[4]。刘荣乐等^[7]分析了我国主要商品有机肥和

有机废弃物的重金属含量, 鸡粪中 Zn、Cu 超标率分别是 31.9%、23.4%, 猪粪中 Zn、Cu 超标率分别是 58.6%、69.0%。黄磊等^[8]对北京地区有代表性的 21 个规模化养猪场不同饲养阶段的新鲜猪粪重金

收稿日期: 2014-06-08; 修订日期: 2014-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271488); 公益性行业(农业)科研专项(200903015)

作者简介: 商和平(1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤重金属污染控制与修复, E-mail: shangheping1@163.com

* 通讯联系人, E-mail: desu@cau.edu.cn

属含量测定发现, Cu 的最高含量可达 $1\,170\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 的最高含量可达 $1\,860\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Xiong^[6]等分析 215 个畜禽粪便样和 210 个饲料样中重金属也发现, 猪粪中 Cu 含量平均值为 $699\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 饲料中 Cu 含量平均值为 $131\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 长期定位试验表明, 施用猪粪后, 土壤全 Cu、全 Zn 较仅施用化肥处理分别增长 53.6%、23.6%^[9]. 连续 4 a 施用猪粪, 土壤中全 Cu 和全 Zn 含量分别经过 10 a 和 15 a 就会超过国家农田土壤二级标准^[10]. 施用猪粪和鸡粪显著增加了萝卜和小白菜可食部分的 Cu、Zn 含量^[11]. 畜禽粪便中腐殖质结合态存在的 Cu、Zn 占 50%~75%, 腐殖质对 Cu、Zn 的生物有效性有重要作用, 腐殖质既可活化也可钝化重金属^[12, 13]. 研究表明, 低用量畜禽粪便可降低 Cu 在土壤中的移动性, 但高用量时增加了 Cu 在土壤中的移动性^[14]. 还有研究表明, 施有机肥使土壤 Cu 的氧化物结合态含量显著减少, 有机结合态含量显著增加, 土壤中 Cu 的活性态含量总体减少, Cu 浓度较高的有机肥施入土壤后, 使土壤 Cu 的酸提取态和有机结合态明显增加, 增强了土壤 Cu 的活性^[15]. 这些存在矛盾的结果可能与畜禽粪便有机肥中重金属的形态归趋过程不同有关.

畜禽粪便中的重金属与重金属无机盐不同, 畜禽粪便中重金属存在于有机物中, 随有机物在土壤中的逐步分解, 其中的重金属在土壤中的行为、与有机物结合的形态及生物有效性也会与进入土壤的

重金属无机盐有明显的区别. 研究畜禽粪便有机肥中重金属在农田土壤中的形态归趋过程及生物有效性演变过程, 明确不同畜禽粪便有机肥中重金属与重金属无机盐在不同土壤中环境行为的差异, 对科学确定农田土壤由不同有机肥料带入的重金属负荷, 客观评价畜禽粪便有机肥中重金属进入土壤后的生态风险和环境质量标准制定有重要的指导意义.

本文选用两种典型规模化养殖场畜禽粪便有机肥, 研究其在石灰性和酸性土壤中 Cu、Zn 的有效性变化以及形态归趋过程, 并与等量 Cu、Zn 无机盐进行比较, 以期合理确定农田土壤由畜禽粪便有机肥带入的重金属负荷, 了解畜禽粪便有机肥中重金属进入土壤后的生态风险, 为有效控制土壤重金属积累和向农产品中的转移, 提高农产品安全性提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用土壤分别为采自河北省河北农林科学院大河试验站的石灰性褐土(石灰性土壤)和采自福建省闽侯县的酸性黄泥土(酸性土壤). 试验用鸡粪、猪粪分别采自河北省石家庄市典型的规模化养鸡和养猪场, 新鲜鸡粪和猪粪分别添加少量草炭堆放腐熟 1 个月后风干备用. 试验用土壤和鸡粪、猪粪的基本化学性质和 Cu、Zn 含量见表 1.

表 1 供试土壤和有机肥料的基本化学性质和 Cu、Zn 含量
Table 1 Basic chemical properties and Cu, Zn contents of the test soil and organic manure fertilizers

项目	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
河北石灰性褐土	7.23	18.1	22.9	68.0
福建酸性黄泥土	5.09	31.6	32.6	114
鸡粪	7.12	313	107	4 485
猪粪	8.60	318	236	522

1.2 试验方案

2 种土壤上分别设 9 个处理, 分别为对照、施 2% 鸡粪(JF2%)、施 5% 鸡粪(JF5%)、施用与 JF2%、JF5% 等量 Cu、Zn 的无机盐(JY2%、JY5%); 施 2% 猪粪(ZF2%)、施 5% 猪粪(ZF5%)、施用与 ZF2%、ZF5% 含等量 Cu、Zn 的无机盐(ZY2%、ZY5%). 每个处理 3 个重复, 共 54 盆. 土壤和有机肥分别风干并过 4 mm 筛, 用无孔塑料盆在温室做连续 6 个月的培养试验, 每盆装土 2 kg, 把土壤和相应粪肥反复充分混合均匀后装盆, 同时用 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 配置与 2%、5%

鸡粪和猪粪含等量 Cu、Zn 的无机盐溶液, 无机盐溶液与土壤充分混匀后装盆. 培养期间温室温度为 15~25℃. 培养过程通过称重法保持土壤含水量为田间持水量的 60%~70%, 分别在培养 1、2、3、4、5、6 个月时盆中纵向取样 100 g, 取样后再把盆中土充分混合继续培养. 取出的土样风干, 分别过 1 mm 和 0.149 mm 筛备用.

1.3 pH 测定方法

取过 1 mm 筛的培养 1~6 个月的土样测定土壤 pH, 测定方法采用去离子水浸提 pH 计法(水土比 2.5:1).

1.4 土壤有效态重金属提取方法和重金属形态分级方法

土壤有效态 Zn、Cu 用 0.05 mol·L⁻¹ EDTA 提取:称取过 1 mm 筛的培养 1、2、3、4、5、6 个月的 10 g 样品放于 100 mL 离心管,加入 0.05 mol·L⁻¹ EDTA 即乙二胺四乙酸二钠盐溶液 50 mL,盖紧离心管盖子,置于振荡机上 200 r·min⁻¹ 往复

式振荡 2 h. 于离心机上 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,过滤,待测^[16].

土壤中 Zn、Cu 形态分级采用改进的 Tessier 连续提取法:取过 0.149 mm 筛的培养 1、6 个月的土样,用改进 Tessier 连续提取法测定土壤中 Cu、Zn 的赋存形态. 所用改进 Tessier 法^[17] 提取过程见表 2. 残渣态用差减法计算.

表 2 改进的 Tessier 连续提取法
Table 2 An improved Tessier sequential extraction method

组分名称	提取剂	操作条件
交换态	1 mol·L ⁻¹ MgCl ₂ pH 7.0	振荡 1 h,离心 15 min (4 000 r·min ⁻¹),过滤土液比 1:8
碳酸盐结合态	1 mol·L ⁻¹ NaOAc pH 5.0 用 HOAC 调节	振荡 5 h,离心 15 min(4 000 r·min ⁻¹),过滤土液比 1:8
铁锰氧化物结合态	0.04 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl 的 25% (体积比) HOAC 溶液	加盖置于 96℃ ±3℃ 水浴中,间隔搅拌 6 h,离心 15 min(4 000 r·min ⁻¹),过滤土液比 1:15
有机结合态	0.04 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 30% H ₂ O ₂ 3.2 mol·L ⁻¹ NH ₄ OAC 的 20% (体积比) HNO ₃ 溶液	置于 85℃ ±3℃ 水浴中,间隔搅拌 5 h,离心 15 min (4 000 r·min ⁻¹),过滤,土液比 1:8
残渣态	差减法计算	全量减 4 种形态之和

1.5 土壤重金属含量测定方法

EDTA 提取液中有有效态 Cu、Zn 含量和连续提取法各步骤提取的各形态 Cu、Zn 含量用原子吸收光谱法(TAS-990 普析通用原子吸收分光光度仪)测定^[18].

1.6 数据处理方法

数据用 Sas V8 软件,在 $P < 0.05$ 水平下进行统计分析. 图表中数据均在 $P < 0.05$ 的置信水平下比较,以不同字母表示达到显著差异水平. 用 Excel 软件绘图制表.

2 结果与分析

2.1 施用鸡粪、猪粪有机肥后土壤 pH 的动态变化

pH 是影响土壤重金属形态和有效性的重要因素,施用畜禽粪便有机肥后对土壤 pH 的影响也会直接影响到土壤重金属形态和转化. 图 1 为施用不同量鸡粪、猪粪和对应等量 Cu、Zn 无机盐后石灰性[图 1(a)、图 1(c)]和酸性[图 1(b)、图 1(d)]土壤 pH 随培养时间的动态变化. 从图 1 中可以看出,在 6 个月内的培养过程中,与不施有机肥的对照处理相比,施用有机肥后石灰性土壤的 pH 值显著降低,酸性土壤的 pH 显著升高,且施用量越高土壤 pH 升高或降低的幅度也越大. 与施用有机肥不同,施用等量 Cu、Zn 的无机盐的处理,土壤 pH 与对照差异不明显.

酸性土壤中施用有机肥后土壤 pH 值升高的原因可能是有机肥 pH 值本身高于酸性土壤,从而导

致施入鸡粪后土壤 pH 值升高. 另外,畜禽粪便等有机肥的施用,大量盐基离子被带入土壤中,释放溶解后极大地增强了土壤溶液的离子强度和阳离子交换量,也会使土壤 pH 升高. 龙光强等^[19] 在长期施用猪粪对红壤酸度的改良效应的试验中发现,Ca 作为有机肥施用提高土壤盐基离子总量中贡献最大的元素,可代换大量的交换性氢铝,从而间接增加土壤 pH. 有机肥 pH 值大于或略小于石灰性土壤,但施入有机肥后土壤 pH 降低,这说明除施入有机肥会对土壤 pH 影响外,还存在其他主导因素影响土壤 pH 值,有研究发现,鸡粪中有机物在土壤中分解、微生物代谢产生大量低分子有机酸导致土壤 pH 降低^[20].

从土壤 pH 随培养时间的动态变化看,与对照处理相比,有机肥施入石灰性土壤后,猪粪处理土壤 pH 值在培养 1~4 个月中下降明显,这主要是由于猪粪中有机物分解产生了大量有机酸,5~6 个月中有机物分解过程基本完成,因此,pH 值又上升至与 1 个月时水平相当,与猪粪相比,鸡粪处理土壤 pH 值随时间变化较平缓,这可能是由于鸡粪的分解过程较缓慢^[21]. 酸性土壤中,除 5% 猪粪处理外,其它处理与对照土壤 pH 变化趋势大致相同,即前 4 个月下降,后 2 个月上升,这说明土壤 pH 值变化除受有机肥影响外是多种因素共同作用的结果,5% 猪粪处理使酸性土壤 pH 值在 1~6 个月中持续上升,可能是因为猪粪本身 pH 值(pH = 8.6)较高,高用量有机肥施入土壤后抵消了有机物分解产酸降低土壤

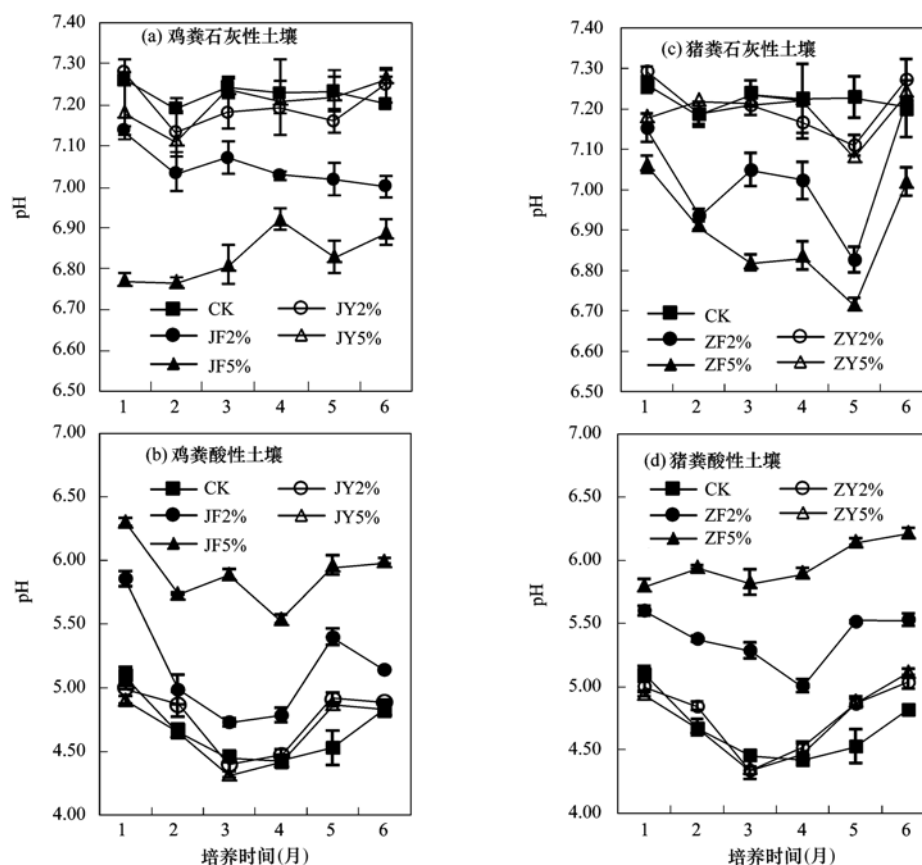


图 1 施用不同量畜禽粪便和无机盐后不同土壤 pH 的动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil pH after application of different amounts of manure and inorganic salt

pH 的过程.

2.2 施用鸡粪、猪粪有机肥和等量 Cu、Zn 无机盐后土壤有效态 Cu、Zn 含量动态变化

2.2.1 施用鸡粪、猪粪有机肥和等量 Cu 无机盐后土壤有效态 Cu 含量动态变化

EDTA 提取态重金属是常用来表征土壤中重金属生物有效态高低的指标. 图 2 为施用不同量鸡粪、猪粪以及对应含等量 Cu 无机盐后石灰性土壤[图 2(a)、图 1(c)]和酸性土壤[图 2(b)、图 1(d)]中 EDTA 提取态 Cu 动态变化. 从图 2 可以看出,与对照相比施用鸡粪、猪粪后 2 种土壤有效态 Cu 含量显著升高,且随着施用量的增加而增加. 从不同施肥处理石灰性和酸性土壤有效态 Cu 含量随时间的动态变化看,在培养的前 3~4 个月中所有处理土壤有效态 Cu 含量均呈逐步上升趋势,这是因为有效态 Cu 含量受 pH 影响,pH 值下降导致其向活性较高的有效态转化,培养 4 个月后变化则不显著,这可能是因为培养前期,Cu 主要和土壤以及粪肥矿化产生的小分子的有机酸结合,随着培养时间的延长,小分子结合的 Cu 达到饱和,有效性变化不再明显^[22].

从图 2(a)、2(b)还可以看出,在培养的 6 个月内,石灰性和酸性土壤上施用鸡粪后土壤有效态 Cu 含量显著低于施用等量 Cu 无机盐的处理,这表明鸡粪中 Cu 的有效性在石灰性和酸性土壤中均低于等量无机盐中的 Cu. 这可能是由于鸡粪中的 Cu 有相当一部分是有机质结合态的,使鸡粪中的 Cu 较无机盐带入的 Cu 有效性低^[22]. 从图 2(c)、图 2(d)可以看出,在等量 Cu 施用量条件下,施用猪粪与施用 Cu 无机盐后石灰性和酸性土壤有效态 Cu 含量差异不显著,这表明猪粪中 Cu 的有效性在石灰性和酸性土壤中均与等量 Cu 无机盐相当. 这可能是本试验所用的猪粪 Cu 含量比鸡粪高所致,也有相关研究发现猪粪的年分解率大于等量鸡粪^[21],因此,猪粪比鸡粪更易分解也是导致上述结果的原因. 也有研究表明,猪粪中 DTPA 提取 Cu 含量较高,占总量比例高达 34.45%^[24],说明猪粪中 Cu 的有效性很高.

2.2.2 施用鸡粪、猪粪有机肥和等量 Zn 无机盐后土壤有效态 Zn 含量动态变化

图 3 为施用不同量的鸡粪、猪粪以及对应含等

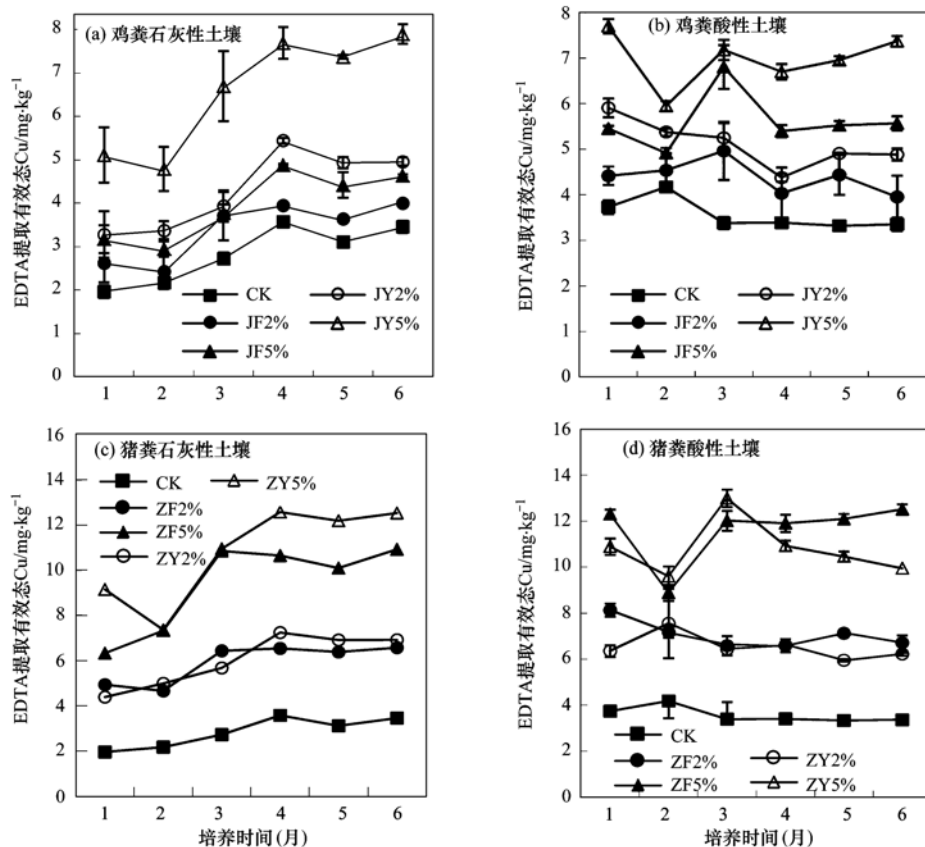


图2 施用不同量畜禽粪便和无机盐后石灰性和酸性土壤有效态Cu含量的动态变化

Fig. 2 Dynamics of EDTA extractable Cu concentration in calcareous and acidic soil after application of different amounts of manure and inorganic salt

量Zn的无机盐后石灰性土壤[图3(a)、图3(c)]和酸性[图3(b)、图3(d)]土壤中EDTA提取态Zn含量的动态变化。从图3可以看出,与对照相比施用鸡粪、猪粪后2种土壤中有效态Zn含量显著提高,且随着粪肥施用量的增加而增加。从石灰性和酸性土壤有效态Zn含量的动态变化看,鸡粪、猪粪处理和等量Zn无机盐处理有效态Zn含量变化基本一致,前3个月增加,后3个月降低。其原因与有效态Cu增加类似,即土壤pH值的下降导致有效态Zn含量在前3个月增加,不同之处在于与猪粪处理相比,鸡粪处理土壤有效态Zn含量在前3个月内上升趋势更明显,这主要是由于本试验所用鸡粪中全Zn含量高达 $4\,485\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远大于猪粪中全Zn含量,与全Zn含量存在正相关关系的有效态Zn含量也应大于猪粪处理^[25],因此,鸡粪本身有效态Zn含量较高是其上升显著的主要原因。

从图3还可以看出,施用鸡粪和猪粪后石灰性和酸性土壤有效态Zn含量及动态变化与施用等量Zn无机盐处理无显著差异,这表明鸡粪、猪粪中Zn

的有效性在石灰性土壤和酸性土壤中均与等量Zn无机盐相当。

2.3 鸡粪、猪粪有机肥中Cu、Zn在不同土壤中形态归趋

2.3.1 鸡粪、猪粪有机肥及对应无机盐带入的Cu在不同土壤中的赋存形态变化

表3为石灰性土壤和酸性土壤中施用不同量鸡粪和含等量Cu无机盐后,1个月和6个月时2种土壤中各形态Cu含量和占土壤全Cu的质量分数。从中可以看出,在石灰性土壤中,施用鸡粪1个月时,随施用量增加,土壤中交换态、碳酸盐结合态和有机质结合Cu含量及占土壤全Cu的比例增加,且施用鸡粪的处理交换态Cu增加量显著高于等量Cu无机盐处理。铁锰氧化物结合态相反,无机盐处理增加量显著高于鸡粪处理。残渣态含量及占土壤全Cu比例变化不明显。这表明通过鸡粪进入石灰性土壤中的Cu前期主要以交换态、碳酸盐结合态和有机结合态的形式存在,而通过Cu无机盐进入石灰性土壤中Cu的形态除上述3种外还包括铁锰氧

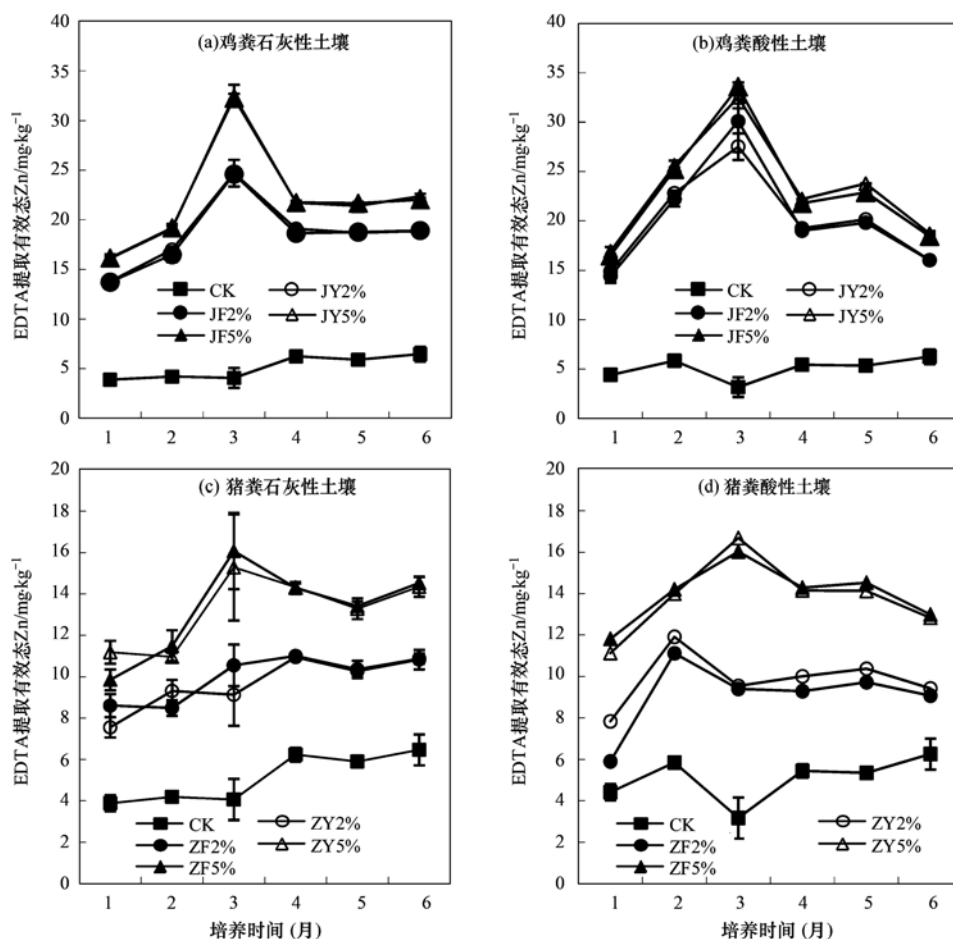


图3 施用不同量畜禽粪便和无机盐后石灰性和酸性土壤有效态 Zn 含量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of EDTA extractable Zn concentration in calcareous and acidic soil after application of different amounts of manure and inorganic salt

化物结合态. 培养6个月时,鸡粪处理交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Cu 含量及比例较1月降低,有机结合态 Cu 含量进一步增加,铁锰氧化物结合态 Cu 含量仍是 Cu 无机盐处理高于含等量的鸡粪处理,但其它形态的变化与鸡粪差异变的不明显.

在酸性土壤中,施用鸡粪1个月时,土壤中交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机质结合 Cu 含量及占土壤全 Cu 的比例随用量增加均增加. 与等量 Cu 无机盐处理相比,鸡粪进入酸性土壤中的碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Cu 比例低. 6个月时,鸡粪处理交换态和铁锰氧化物结合态 Cu 含量及占全 Cu 比例较1月增加,进入各形态的比例与等量 Cu 无机盐已无明显差异.

表4为石灰性土壤和酸性土壤中施用不同量猪粪和含等量 Cu 无机盐后,1个月和6个月时2种土壤中各形态 Cu 含量和占土壤全 Cu 的比例. 从中可以看出,在石灰性土壤中,施用猪粪1个月时,高施

用量猪粪处理土壤中交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态 Cu 含量及占全 Cu 比例显著增加,但残渣态 Cu 占全 Cu 比例降低. 这表明通过猪粪进入石灰性土壤中的 Cu 前期主要以交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态存在,与等量 Cu 无机盐相比,猪粪中进入石灰性土壤中的有机结合态 Cu 含量和所占比例比较高,碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Cu 含量和比例比较低. 6个月时,猪粪处理各形态含量较1个月时无明显变化,等量 Cu 无机盐处理的碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Cu 含量及比例仍高于猪粪处理,交换态和有机结合态 Cu 含量及比例变化不显著.

在酸性土壤中,施入猪粪及等量 Cu 无机盐1个月时,随施入量增加,交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合态 Cu 含量和比例显著增加. 6个月时,猪粪和等量 Cu 无机盐处理进入土壤中的残渣态含量占全 Cu 比例与1个月相比显著增

表 3 鸡粪和无机盐带入土壤中的 Cu 在不同土壤中的赋存形态变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Change of Cu form in different soil after application of chicken manure and inorganic salt/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

形态	处理	石灰性土壤				酸性土壤			
		培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%	培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%
交换态	CK	0.352d ¹⁾	1.54	0.136e	0.59	0.053d	0.16	0.200c	0.61
	JF2%	0.507b	2.07	0.315d	1.28	0.144c	0.42	0.280b	0.82
	JF5%	0.704a	2.62	0.472b	1.76	0.381a	1.05	0.480a	1.33
	JY2%	0.432c	1.76	0.408c	1.66	0.221b	0.65	0.232cb	0.68
	JY5%	0.488cb	1.82	0.520a	1.93	0.355a	0.98	0.264b	0.73
碳酸盐结合态	CK	0.311b	1.36	0.180c	0.79	0.0560d	0.17	0.880c	2.7
	JF2%	0.620a	2.53	0.328bc	1.34	0.112cd	0.33	0.250c	0.73
	JF5%	0.695a	2.59	0.683a	2.54	0.240cb	0.66	0.215c	0.6
	JY2%	0.503ba	2.05	0.372c	1.52	0.269b	0.79	0.335b	0.98
	JY5%	0.580a	2.16	0.424a	1.58	0.568a	1.57	0.475a	1.31
铁锰氧化物结合态	CK	1.57c	6.86	0.665c	2.9	0.450d	1.38	0.225c	0.69
	JF2%	1.26c	5.14	0.795c	3.24	0.825c	2.42	1.01cb	2.97
	JF5%	1.36c	5.07	0.925c	3.44	0.982c	2.72	1.01cb	2.8
	JY2%	2.14b	8.72	1.80b	7.32	1.19b	3.49	0.682c	2
	JY5%	3.35a	12.5	2.59a	9.61	2.40a	6.64	1.37a	3.8
有机质结合态	CK	0.782c	3.41	0.810c	3.54	1.09d	3.34	0.710c	2.18
	JF2%	1.26bc	5.14	1.40b	5.72	1.59dc	4.68	1.17b	3.45
	JF5%	2.14a	7.97	2.19a	8.15	2.66b	7.36	1.43ba	3.96
	JY2%	1.21ba	4.94	1.55b	6.33	2.10ba	6.17	1.14b	3.35
	JY5%	1.75ba	6.52	2.38a	8.86	3.67a	10.2	1.68a	4.66
残渣态	CK	19.9	86.8	21.1	92.2	31	95	30.6	93.8
	JF2%	20.9	85.1	21.7	88.4	31.4	92.2	31.3	92
	JF5%	22	81.8	22.6	84.1	31.9	88.2	33	91.3
	JY2%	20.3	82.5	20.4	83.2	30.3	88.9	31.7	93
	JY5%	20.7	77	21	78	29.1	80.6	32.3	89.5

1) 同一列中,相同培养时间下同一形态间比较,无共同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同

表 4 猪粪和无机盐带入土壤中的 Cu 在不同土壤中的赋存形态变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Change of Cu form in different soil after application of pig manure and inorganic salt/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

形态	处理	石灰性土壤				酸性土壤			
		培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%	培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%
交换态	CK	0.352d	1.54	0.136c	0.59	0.053d	0.16	0.200c	0.61
	ZF2%	0.320d	1.18	0.675b	2.49	0.770c	2.1	0.0900d	0.25
	ZF5%	0.973a	2.94	0.944a	2.86	1.51a	3.57	0.180c	0.43
	ZY2%	0.560c	2.07	0.651b	2.4	0.770c	2.1	0.410b	1.12
	ZY5%	0.731b	2.21	0.923a	2.79	0.980b	2.32	0.730a	1.73
碳酸盐结合态	CK	0.311c	1.36	0.180c	0.79	0.0560c	0.17	0.880a	2.7
	ZF2%	0.255c	0.94	0.352d	1.3	0.950b	2.6	0.460c	1.26
	ZF5%	0.679b	2.05	0.712b	2.15	2.29a	5.42	0.730b	1.73
	ZY2%	0.644b	2.38	0.480c	1.77	1.28b	3.5	0.510c	1.39
	ZY5%	1.51a	4.58	1.03a	3.12	2.68a	6.34	0.950a	2.25
铁锰氧化物结合态	CK	1.57d	6.86	0.665d	2.9	0.450e	1.38	0.225c	0.69
	ZF2%	2.51c	9.27	1.78c	6.57	2.31d	6.31	0.940a	2.57
	ZF5%	3.87b	11.7	2.78b	8.41	4.09b	9.67	1.01a	2.39
	ZY2%	2.93c	10.8	2.12c	7.83	3.06c	8.36	0.910a	2.49
	ZY5%	5.71a	17.3	3.91a	11.8	4.74a	11.2	1.01a	2.39
有机质结合态	CK	0.782c	3.41	0.810c	3.54	1.09d	3.34	0.710c	2.18
	ZF2%	1.85b	6.83	1.81b	6.68	3.42c	9.35	1.88bc	5.14
	ZF5%	2.56a	7.75	3.20a	9.68	6.38a	15.1	3.70a	8.75
	ZY2%	1.36cb	5.02	1.88b	6.94	2.85c	7.79	1.57c	4.29
	ZY5%	1.79b	5.42	3.01a	9.11	4.93b	11.7	2.96ba	7
残渣态	CK	19.9	86.8	21.1	92.2	31	95	30.59	93.8
	ZF2%	22.1	81.8	22.5	83	29.1	79.6	33.2	90.8
	ZF5%	25	75.5	25.4	76.9	28	66.3	36.7	86.7
	ZY2%	21.6	79.7	21.9	81.1	28.6	78.2	33.2	90.7
	ZY5%	23.3	70.5	24.2	73.2	29	68.5	36.6	86.6

加,增加比例最高达 30% 左右,而其他 4 种形态含量及占全 Cu 比例有所降低. 与等量 Cu 无机盐相比,猪粪处理 6 个月时,有机结合态 Cu 含量及占全量比例仍高于 Cu 无机盐处理,交换态和碳酸盐结合态 Cu 含量低于等量无机盐,其他形态随时间变化不显著.

2.3.2 鸡粪、猪粪有机肥及对应无机盐带入的 Zn 在不同土壤中的赋存形态变化

表 5 为石灰性土壤和酸性土壤中施用不同量鸡粪和含等量 Zn 无机盐后,1 个月和 6 个月时 2 种土壤中各形态 Zn 含量和占土壤全 Zn 的比例. 从中可以看出,在石灰性土壤中,施入鸡粪 1 个月时,随施入量增加,交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合态 Zn 含量和比例显著增加,与等量 Zn 无机盐相比,鸡粪处理的铁锰氧化物结合态和有机结合态 Zn 含量和比例略高,交换态和碳酸盐结合态 Zn 含量相对较低. 这说明通过鸡粪和无机盐进入了石灰性土壤中的 Zn 主要以交换态、碳酸盐结

合态、铁锰氧化物结合态以及有机结合态的形式存在,并且通过等量 Zn 无机盐进入土壤中 Zn 的交换态和碳酸盐结合态所占比例较高. 6 个月时,与 1 个月时相比,鸡粪处理交换态 Zn 含量及比例降低,有机结合态 Zn 含量及比例增加,有机结合态和铁锰氧化物结合态仍高于等量 Zn 无机盐,其他形态变化不显著.

在酸性土壤中,施入鸡粪 1 个月时,Zn 的 5 种形态的含量和占全 Zn 比例均显著增加,随施入量增加,交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态占全 Zn 比例先增加后降低. 等量 Zn 无机盐处理进入土壤中的交换态 Zn 含量显著高于鸡粪处理,碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Zn 含量低于鸡粪处理,其他形态差异不显著. 6 个月时,与 1 个月时相比,碳酸盐结合态和有机结合态 Zn 含量增加,铁锰氧化物结合态比例降低,鸡粪处理与等量 Zn 无机盐处理的差异除 1 个月时表现出的外,鸡粪处理的有机结合态含量及占全 Zn 比例高于等量 Zn 无机盐处理.

表 5 鸡粪和无机盐带入土壤中的 Zn 在不同土壤中的赋存形态变化/mg·kg⁻¹

Table 5 Change of Zn form in different soil after application of chicken manure and inorganic salt/mg·kg ⁻¹									
形态	处理	石灰性土壤				酸性土壤			
		培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%	培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%
交换态	CK	0.980c	1.44	0.610e	0.900	3.69d	3.24	2.77e	2.43
	JF2%	5.30b	3.43	2.45c	1.58	11.7c	5.84	13.5c	6.76
	JF5%	10.8a	3.88	5.93a	2.13	12.1c	3.75	11.4d	3.53
	JY2%	5.55b	3.59	1.75d	1.13	22.2b	11.1	17.9b	8.98
	JY5%	11.3a	4.05	3.45b	1.24	29.7a	9.22	23.0a	7.14
碳酸盐结合态	CK	3.28e	4.82	2.64d	3.88	1.62d	1.42	4.13d	3.62
	JF2%	22.4d	14.5	22.2b	14.4	21.2b	10.6	29.0b	14.5
	JF5%	29.2b	10.5	31.6a	11.4	27.1a	8.41	44.4a	13.8
	JY2%	23.8c	15.4	20.1c	13.0	13.8c	6.89	16.2c	8.10
	JY5%	30.5a	11.0	30.8a	11.1	21.7b	6.73	30.0b	9.33
铁锰氧化物结合态	CK	12.3c	18.1	12.6d	18.5	10.3e	9.00	11.6e	10.2
	JF2%	35.6b	23.0	37.7c	24.4	40.5c	20.3	31.7c	15.9
	JF5%	54.3a	19.5	52.2b	18.8	57.7a	17.9	39.9a	12.4
	JY2%	34.5b	22.3	40.6c	26.3	33.0d	16.5	29.7d	14.9
	JY5%	52.5a	18.9	56.9a	20.4	52.6b	16.3	37.3b	11.6
有机质结合态	CK	1.26d	1.85	2.95d	4.34	3.53c	3.10	5.04e	4.42
	JF2%	2.93c	1.90	6.22c	4.02	5.85b	2.93	8.95c	4.48
	JF5%	5.83a	2.09	10.5b	3.78	9.90a	3.07	13.3a	4.11
	JY2%	2.39c	1.55	6.63c	4.29	5.94b	2.97	7.29d	3.65
	JY5%	4.60b	1.65	12.6a	4.53	9.18a	2.85	10.9b	3.39
残渣态	CK	50.2	73.8	49.2	72.4	94.9	83.3	90.5	79.4
	JF2%	88.4	57.1	86.0	55.7	121	60.4	117	58.4
	JF5%	178.2	64.0	178.	64.0	215	66.9	213	66.2
	JY2%	88.4	57.2	85.5	55.3	125	62.5	129	64.4
	JY5%	179	64.5	175	62.7	209	64.9	221	68.6

表 6 为石灰性土壤和酸性土壤中施用不同量猪粪和含等量 Zn 无机盐后,1 个月和 6 个月时 2 种土壤中各形态 Zn 含量和占土壤全 Zn 的比例. 从中看

出,在石灰性土壤中,施入猪粪和等量 Zn 无机盐 1 个月时,交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合态 Zn 的含量及占全 Zn 比例增加,这

表明通过猪粪和等量 Zn 无机盐进入石灰性土壤中的 Zn 主要以上述 4 种形态存在. 6 个月时,猪粪处理交换态 Zn 含量及比例降低,铁锰氧化物结合态和有机结合态 Zn 含量及比例增加,Zn 无机盐进入石灰性土壤中的交换态和铁锰氧化物结合态含量高于猪粪处理,碳酸盐结合态 Zn 含量低于猪粪处理.

在酸性土壤中,施入猪粪 1 个月时,随施入量增加,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合

态 Zn 含量增加. 猪粪处理交换态 Zn 含量及占全量比例降低,这与等量无机盐处理正好相反,残渣态变化不明显. 这表明,通过猪粪进入酸性土壤中的 Zn 主要以铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态以及有机结合态存在,通过 Zn 无机盐进入土壤中的形态除上述 3 种外,还包括交换态. 6 个月时,猪粪处理各形态 Zn 含量及比例变化同石灰性土壤相似,其中,交换态 Zn 的含量无机盐处理高于猪粪处理.

表 6 猪粪和无机盐带入土壤中的 Zn 在不同土壤中的赋存形态变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 6 Change of Zn form in different soil after application of pig manure and inorganic salt/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

形态	处理	石灰性土壤				酸性土壤			
		培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%	培养 1 个月	占全量/%	培养 6 个月	占全量/%
交换态	CK	0.980d	1.44	0.610b	0.9	3.69cb	3.24	2.77c	2.43
	ZF2%	2.00cb	2.6	0.580b	0.75	2.96c	2.43	0.580d	0.48
	ZF5%	2.19b	2.44	0.950b	1.06	2.14c	1.60	0.170d	0.13
	ZY2%	1.96c	2.55	0.680b	0.88	5.31b	4.35	5.90b	4.84
	ZY5%	2.71a	3.02	1.47a	1.64	9.88a	7.40	11.3a	8.44
碳酸盐结合态	CK	3.28d	4.82	2.64d	3.88	1.62d	1.42	4.13b	3.62
	ZF2%	5.84c	7.59	5.80c	7.54	4.93c	4.04	4.38b	3.59
	ZF5%	9.79b	10.9	10.3a	11.5	7.83a	5.87	8.33a	6.24
	ZY2%	6.44c	8.37	5.59c	7.27	2.42d	1.98	3.11b	2.55
	ZY5%	11.0a	12.3	8.99b	10	6.37b	4.77	4.17b	3.13
铁锰氧化物结合态	CK	12.3d	18.1	12.6e	18.5	10.3c	9	11.6e	10.2
	ZF2%	15.3c	19.9	15.8d	20.5	14.5b	11.89	17.8c	14.56
	ZF5%	19.6b	21.9	20.3b	22.7	19.8a	14.85	23.4a	17.50
	ZY2%	15.9c	20.6	18.5c	24	14.0b	11.43	15.3d	12.57
	ZY5%	22.1a	24.7	24.7a	27.5	17.9a	13.45	20.2b	15.15
有机质结合态	CK	1.26b	1.85	2.95d	4.34	3.53b	3.1	5.04a	4.42
	ZF2%	1.73ba	2.25	3.31c	4.3	4.55a	3.73	6.07a	4.98
	ZF5%	1.77ba	1.98	3.80b	4.24	4.22ba	3.16	6.32a	4.74
	ZY2%	1.46b	1.9	3.88b	5.05	3.90ba	3.20	5.81a	4.76
	ZY5%	2.34a	2.61	4.63a	5.17	4.41a	3.31	5.74a	4.30
残渣态	CK	50.2	73.8	49.2	72.4	94.9	83.3	90.5	79.4
	ZF2%	52	67.7	51.5	66.9	95.1	77.92	93.2	76.40
	ZF5%	56.3	62.8	54.2	60.5	99.4	74.52	95.3	71.39
	ZY2%	51.2	66.6	48.3	62.8	96.4	79.03	91.8	75.28
	ZY5%	51.4	57.4	49.9	55.6	94.8	71.07	92.0	68.99

3 讨论

农田土壤中重金属的生物有效性及生物毒性是影响农产品质量和土壤生态安全的重要因素. 目前,随着集约化养殖场的发展、微量元素饲料添加剂的规模化使用,畜禽粪便有机肥的施用已是造成土壤重金属污染的重要来源. 本试验表明,土壤有效态 Cu、Zn 含量随有机肥施用量的增加而增加,造成上述结果的原因一是有机肥本身向土壤带入的重金属的生物有效性较高,二是有机肥腐解过程、以及施肥后土壤理化性质的改变,也对土壤中强结合态的微量元素有活化效应^[26]. 王开峰^[27]等长期定位试验也表明,长期施用有机肥明显提高了土壤

Cu、Zn 的有效态含量和活化率. 赵明等^[28]研究表明,施用鸡粪和猪粪的土壤有效 Cu 含量比对照分别增加 5.2%、32.4%,其中,施用猪粪处理有效 Cu 含量增加量最大. 茹淑华等^[29]通过盆栽试验研究了含 Zn 鸡粪的施用对土壤 Zn 生物有效性的影响,表明随着鸡粪施用量的增加,土壤有效 Zn 含量呈上升趋势,施肥量与有效 Zn 含量增加的相关性显著,这都与本试验结论大致相同. 从施入有机肥 6 个月内土壤中有效态含量的动态变化来看,随着时间的延长,有效态 Cu、Zn 含量在前 3~4 个月显著上升,而培养 4 个月后,土壤有效 Zn 含量又有显著下降趋势,其原因可能是有机肥中小分子有机酸与 Zn 形成络合物的速率高于大分子的腐殖酸,当小分子有机

酸被土壤微生物分解后, Zn 逐步和土壤中大分子的腐殖酸结合, 从而有效态含量减少。

重金属生物毒性不仅与其总量及有效态含量有关, 各形态分布也起着关键作用, 不同的形态产生不同的环境效应, 直接影响到重金属的毒性、迁移及在自然界的循环。研究重金属的形态分布可提供更为详细的重金属元素迁移性和生物可利用性的信息。施肥是影响土壤重金属形态分布的重要因素, 有机肥施入对重金属形态的影响包括两方面: 一是通过影响土壤理化性质进而影响重金属各形态的分布。有机肥施入土壤后产生大量溶解性有机质, 溶解性有机质常使土壤 pH 下降, pH 下降首先影响碳酸盐结合态, 其次是铁锰氧化物结合态, 并使两种形态趋于不稳定状态^[30]。本试验研究表明, 施用猪粪和鸡粪有机肥 6 个月内, 酸性土壤 pH 值升高, 石灰性土壤的 pH 值降低, 陈同斌等^[31]研究结果与本试验类似, 即溶解性有机质可使酸性土壤的 pH 升高, 使碱性土壤的 pH 降低。二是有机肥中本身含各形态重金属及大量有机质组分, 它们在土壤中发生吸附、络合等一系列化学作用, 使土壤中重金属形态发生变化。本试验表明, 有机肥的施入均向土壤中带入了交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机结合态的 Cu、Zn, 其中, 交换态和碳酸盐结合态的 Cu、Zn 因与土壤结合较弱最易被释放, 有机肥还向土壤中带入较多有机结合态 Cu、Zn。李延等^[32]发现, 随猪粪用量的增加, 土壤各形态 Zn 的分配系数表现为有机结合态 Zn 呈提高的趋势, 而残留态尤其是交换态 Zn 降低。马荣辉等^[33]研究也表明, 土壤添加 1% 猪粪, 碳酸盐结合态和有机结合态 Cu 显著增加, 但与本试验不同的是, 其土壤中水溶态和交换态 Cu 含量是显著降低的。施有机肥对土壤金属形态的影响还与施肥时间有关, 随时间延长, 有机肥的施用对土壤重金属也可起到形态钝化的作用, 一定量的有机肥可以使重金属可交换态向其他有效性低的形态转化^[34, 35]。本试验结果表明, 施用鸡粪 6 个月时, 石灰性土壤中交换态 Cu、Zn 含量降低, 有机结合态 Cu、Zn 含量增加, 说明重金属由交换态向有机结合态转化。Mohamed 等^[36]向土壤中加入粪肥、秸秆、绿肥这 3 种有机肥, 测定土壤重金属形态的变化, 结果表明 3 种有机肥的加入均使得土壤可交换态重金属减少, 有机结合态、无机还原态增加, 且以加入秸秆转化效果最好, 其次是猪粪肥。但也有研究发现, 连续 7 a 施畜禽粪便会增加土壤 CEC, 但并未影响其有效态含量^[37]。因此, 施入

有机肥后土壤重金属形态的转化不仅与施肥量、施肥时间有关, 它是包括土壤理化性质在内多种因素共同作用的结果。

以重金属无机盐形式进入土壤的方式主要有大气沉降、灌溉、无机肥的施用、农药的喷施等, 随无机物进入土壤的重金属有效性会在一段时间内降低然后基本趋于平衡^[38]。本研究表明, 施用鸡粪后 6 个月内, 石灰性和酸性土壤有效态 Cu 含量显著低于施用等量 Cu 无机盐的处理, 说明鸡粪中 Cu 进入土壤后的生物有效性低于等量无机盐中的 Cu, 由于 Zn 与有机物的结合比例比 Cu 小, 施用鸡粪和猪粪后 6 个月内, 石灰性和酸性土壤有效态 Zn 含量与施用等量 Zn 无机盐的处理无显著差异。形态转化方面, 施用畜禽粪便有机肥 6 个月时, 有机肥带入土壤的 Cu、Zn 进入交换态和铁锰氧化物结合态的比例低于等量 Cu、Zn 无机盐, 进入有机结合态比例高于等量 Cu、Zn 无机盐, 其它形态与等量 Cu、Zn 无机盐差异基本不明显。

4 结论

(1) 施用猪粪和鸡粪有机肥 6 个月内, 酸性土壤 pH 值升高, 石灰性土壤的 pH 值降低。施用鸡粪后 6 个月内, 有效态 Cu 含量在 2 种土壤中显著低于施用等量 Cu 无机盐处理, 有效态 Zn 含量则与施用等量 Zn 无机盐处理无显著差异。施用猪粪后 6 个月内, 有效态 Cu、Zn 含量在 2 种土壤中均与施用等量无机盐处理无显著差异。

(2) 通过畜禽粪便有机肥进入土壤中的 Cu 和 Zn 主要以交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态以及有机结合态的形式存在, 不同畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 进入不同土壤中各形态的比例存在差异。

(3) 施用畜禽粪便有机肥 6 个月时, Cu 和 Zn 交换态以及铁锰氧化物结合态所占比例低于等量 Cu 和 Zn 无机盐处理, 而有机结合态所占比例高于等量 Cu 和 Zn 无机盐处理, 其它形态与无机盐处理无显著差异。

参考文献:

- [1] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617.
- [2] 彭奎, 朱波. 试论农业养分的非点源污染与管理[J]. 环境保护, 2001, (1): 15-17.
- [3] 张勇, 朱宇旌. 饲料与饲料添加剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 100-105.
- [4] Cang L, Wang Y J, Zhou D M, *et al.* Heavy metals pollution in

- poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, **16**(3): 371-374.
- [5] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [6] Xiong X, Li Y X, Lin W, *et al.* Copper content in animal manures and potential risk of soil copper pollution with animal manure use in agriculture [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **54**(11): 985-990.
- [7] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(2): 392-397.
- [8] 黄磊, 郭金花, 李彦明. 不同饲养阶段猪粪中微量元素含量水平调查研究[J]. *北京农业*, 2011, (3): 39-42.
- [9] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用[J]. *中国农业科学*, 2006, **39**(2): 337-343.
- [10] 黄治平, 徐斌, 张克强, 等. 连续四年施用规模化猪场猪粪温室土壤重金属积累研究[J]. *农业工程学报*, 2008, **23**(11): 239-244.
- [11] Zhou D M, Hao X Z, Wang Y J, *et al.* Copper and Zn uptake by radish and pakchoi as affected by application of livestock and poultry manures [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(2): 167-175.
- [12] 卢丽兰, 王旭东, 王虎, 等. 鸡粪腐解过程中不同溶性腐殖质结合铜的变化[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(5): 980-987.
- [13] García-Mina J M, Antolín M C, Sanchez-Diaz M. Metal-humic complexes and plant micronutrient uptake: a study based on different plant species cultivated in diverse soil types [J]. *Plant and Soil*, 2004, **258**(1): 57-68.
- [14] Guan T X, He H B, Zhang X D, *et al.* Cu fractions, mobility and bioavailability in soil-wheat system after Cu-enriched livestock manure applications [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 215-222.
- [15] 刘平, 王辉, 董元华, 等. 有机肥施用对土壤铜形态的影响研究[J]. *土壤*, 2013, **45**(5): 910-917.
- [16] 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. 231-233.
- [17] 李非里, 刘丛强, 宋照亮. 土壤中重金属形态的化学分析综述[J]. *中国环境监测*, 2005, **21**(4): 21-27.
- [18] 景丽洁, 马甲. 火焰原子吸收分光光度法测定污染土壤中5种重金属[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (1): 74-77.
- [19] 龙光强, 蒋瑀霁, 孙波. 长期施用猪粪对红壤酸度的改良效应[J]. *土壤*, 2012, **44**(5): 727-734.
- [20] 苏帆, 尹梅, 付利波, 等. 禽畜粪肥和化肥对结球西生菜生产的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, **17**(4): 630-636.
- [21] 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.
- [22] 刘帅, 卢丽兰, 张俊峰, 等. 粪肥腐解过程中不同溶性腐殖质态铜、锌变化及其结合竞争[J]. *中国农业科学*, 2008, **41**(8): 2347-2354.
- [23] 杨丽娟, 李天来, 付时丰, 等. 长期施肥对菜田土壤微量元素有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, **12**(4): 549-553.
- [24] 黄国锋, 张振钿, 钟流举, 等. 重金属在猪粪堆肥过程中的化学变化[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(1): 94-99.
- [25] 李双异, 刘赫, 汪景宽. 长期定位施肥对棕壤重金属全量及其有效性影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(6): 1125-1129.
- [26] 高明, 车福才, 魏朝富, 等. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, **6**(1): 11-17.
- [27] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(1): 105-108.
- [28] 赵明, 陈雪辉, 赵征宇, 等. 鸡粪等有机肥料的养分释放及对土壤有效铜, 锌, 铁, 锰含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, **15**(2): 47-50.
- [29] 茹淑华, 张国印, 苏德纯, 等. 禽粪有机肥对土壤锌积累特征及其生物有效性的影响[J]. *华北农学报*, 2011, **26**(2): 186-191.
- [30] 吴耀国, 惠林. 溶解性有机物对土壤中重金属迁移性影响的化学机制 [A]. 见: 中国化学会第八届水处理化学大会暨学术研讨会论文集 [C]. 北京: 中国化学会, 2006.
- [31] 陈同斌, 陈志军. 土壤中溶解性有机质及其对污染物吸附和解吸行为的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, **4**(3): 201-210.
- [32] 李延, 彭来真, 刘琳琳, 等. 施用猪粪对土壤 Zn 形态和菜心 Zn 含量的影响[J]. *核农学报*, 2011, **25**(3): 548-552.
- [33] 马荣辉, 朱蕊, 宗玉统, 等. 猪粪对黑土-水稻系统中铜的化学形态、生物积累和有效性的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, **38**(1): 108-118.
- [34] Curiel T J, Coukos G, Zou L H, *et al.* Specific recruitment of regulatory T cells in ovarian carcinoma fosters immune privilege and predicts reduced survival [J]. *Nature Medicine*, 2004, **10**(9): 942-949.
- [35] 卢丽兰, 王旭东, 尚浩博, 等. 鸡粪腐解过程不同溶性腐殖物质结合形态锌的动态[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(5): 1202-1209.
- [36] Mohamed I, Ahamadou B, Li M, *et al.* Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(6): 973-982.
- [37] Canet R, Pomares F, Tarazona F. Chemical extractability and availability of heavy metals after seven years application of organic wastes to a citrus soil [J]. *Soil Use and Management*, 1997, **13**(3): 117-121.
- [38] Tang X Y, Zhu Y G, Shan X Q, *et al.* The ageing effect on the bioaccessibility and fractionation of arsenic in soils from China [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(7): 1183-1190.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenruiang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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