

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

**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

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 ..... 许稳,金鑫,罗少辉,冯兆忠,张霖,潘月鹏,刘学军(1279)

兰州春夏季 PM<sub>10</sub> 碳组分昼夜变化特征与来源分析 ..... 马丽,余晔,王博,赵素平,李刚(1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 ..... 王璐,刘子锐,温天雪,苗红妍,王跃思(1298)

2015年北京城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 及前体气体的污染特征 ..... 丁萌萌,周健楠,刘保献,王焱,张博韬,石爱军,杨懂艳,常森(1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 ..... 齐丽,任玥,刘爱民,黄业茹,赵震,王江,李泓(1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 ..... 胡亚东,马安周,吕鹏翼,张扬,庄国强(1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 ..... 李笑语,吴琳,邹超,张意,毛洪钧,荆博宇(1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 ..... 李曦峰,孙宇琦,王仲鹏,牟宗刚,崔兆杰(1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 ..... 徐华山,赵磊,孙昊苏,任玉芬,丁涛,常帅,王海东,李森,果钊(1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 ..... 李琳琳,张依章,唐常源,郑磊,孟伟,卢少勇,敦宇(1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 ..... 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩,吉正元(1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 ..... 俞焰,刘德富,杨正健,张佳磊,徐雅倩,刘晋高,严广寒(1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 ..... 王靖淇,王书平,张远,林佳宁,高欣,臧小苗,赵茜(1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 ..... 戴文芳,郭永豪,郁维娜,熊金波(1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 ..... 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,金漫彤,李非里(1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 ..... 丁洋,黄焕芳,李绘,罗杰,郑煌,孙焰,杨丹,张原,祁士华(1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 ..... 边博,周燕,张琴(1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 ..... 朱广伟,李静,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军,张运林,秦伯强(1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 ..... 杨海燕,王灿,鄢忠森,李冬平,赵焱,瞿芳术,梁恒,徐叶琴,李圭白(1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 ..... 李青松,李学艳,姚宁波,骆靖宇,李国新,陈国元,高乃云(1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 ..... 韩慧丽,王宏杰,董文艺(1477)

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 ..... 李莉莉,陈翠柏,兰华春,刘菲,安晓强(1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 ..... 范艺,王哲,赵连勤,吴德意(1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 ..... 郑吉,周振超,陈芳,陈涛,魏媛媛,韩玥,陈红(1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 ..... 张秋亚,马晓妍,王晓昌,游猛(1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 ..... 吕文洲,张树林,乔宇祥,刘英(1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 ..... 杨波,丁凤友,徐辉,李方,田晴,马春燕(1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 ..... 南亚萍,周国标,袁林江(1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 ..... 付昆明,周厚田,苏雪莹,王会芳(1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 ..... 曹雁,王桐屿,秦玉洁,韩彬,任君怡(1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 ..... 何正坤,宋博宇,朱南文,董军(1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH<sub>4</sub> 厌氧去除特性 ..... 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 ..... 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,苏光明,王晓明(1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 ..... 何梦媛,董同喜,茹淑华,苏德纯(1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 ..... 葛蔚,程琪琪,柴超,曾路生,吴娟,陈清华,朱祥伟,马东(1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 ..... 王建伟,张彩香,潘真真,廖小平,刘媛,吕幽,汤蜜(1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 ..... 蔡观,胡亚军,王婷婷,袁红朝,王久荣,李巧云,葛体达,吴金水(1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 ..... 陈珊,丁成庆,祝贞科,王娟,彭佩钦,葛体达,吴金水(1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 ..... 张阳阳,胡学玉,邹娟,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(1622)

淹水水稻土消耗 N<sub>2</sub>O 能力及机制 ..... 王玲,邢肖毅,秦红灵,刘毅,魏文学(1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 ..... 李惠娟,彭党聪,刘文博,姚倩,卓杨(1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 ..... 杨雨滢,易建婷,张成,陈宏,木志坚(1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 ..... 迟苏琳,徐卫红,熊仕娟,王卫中,秦余丽,赵婉伊,张春来,李彦华,李桃,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 ..... 彭琴,李哲,梁东丽,王梦柯,郭璐(1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 ..... 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,黄永春,蒋航(1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 ..... 金彩霞,司晓薇,王万峰,王春峰,王子英,张琴文,王婉(1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 ..... 孙松,李楚娴,张成,王永敏,王定勇(1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 ..... 何明靖,李琦,王登祥,赵佳渊,杨婷(1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 ..... 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 ..... 黄力华,李秀芬,任月萍,王新华(1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 ..... 容跃(1726)

《环境科学》征稿简则(1505) 《环境科学》征订启事(1682) 信息(1339, 1459, 1612)

# 畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异

何梦媛<sup>1</sup>,董同喜<sup>1</sup>,茹淑华<sup>2</sup>,苏德纯<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院,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:** 通过田间小区试验,量化研究连续 4 a 施用不同量猪粪、鸡粪有机肥后不同重金属在土壤剖面中迁移积累特征及生物有效性差异,为科学确定农田土壤重金属的环境容量提供依据。结果表明,连续 4 a 施用猪粪显著增加了耕层土壤中 Cu、Cd 的含量,与对照增幅分别是 43.8%~118.6% 和 28.2%~44.9%。施用鸡粪显著增加耕层土壤 Cu、Zn、Cd、Cr、As、Pb 含量,增幅分别为 29.7%~48.5%,239%~456%,19.9%~80.8%,40.4%~163%,11.8%~22.0% 和 80.3%~95.0%。猪粪带入的 Cu、Zn 在耕层土壤中的积累率分别为 76.4%~119% 和 14.2%~20.4%,鸡粪带入 Cu、Zn 在耕层土壤中的积累率分别为 72.1%~88.7% 和 63.9%~78.9%。施用高量的猪粪、鸡粪 Cu、Zn 存在明显向土壤深层迁移现象,连续 4 a 施用 60 t·hm<sup>-2</sup> 的猪粪,Cu 迁移到了 15~30 cm 土层。连续 4 a 施用 60 t·hm<sup>-2</sup> 鸡粪,Zn 迁移到了 30~60 cm 土层。但连续 4 a 施用不同量猪粪和鸡粪,土壤剖面中耕层以下土层中 Cd、Cr、As、Pb 含量均没有显著增加。连续 4 a 施用鸡粪显著降低小麦籽粒中 Cu、Cd 含量,显著增加了小麦籽粒中 Zn、Cr 含量和小麦秸秆中 Zn 含量,连续 4 a 施用猪粪显著降低了小麦籽粒中 Zn 含量,60 t·hm<sup>-2</sup> 猪粪显著增加了小麦子粒中 As 含量,猪粪处理还显著增加了秸秆中 Cu、As 含量。4 a 小麦收获累计对有机肥带入重金属的携出率小于 6%。小麦籽粒对 Cu、Zn 的累计携出量高于秸秆,对 Cd、Cr、As、Pb 携出量低于秸秆,有机肥用量越高,小麦收获对有机肥带入重金属的携出率越低。确定农田土壤重金属环境容量时应考虑不同有机肥中重金属在土壤剖面中积累特征和向下迁移量。

**关键词:** 畜禽粪便;重金属;土壤剖面;迁移;小麦

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1576-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609227

## Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure

HE Meng-yuan<sup>1</sup>, DONG Tong-xi<sup>1</sup>, RU Shu-hua<sup>2</sup>, SU De-chun<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Agro-resource and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** The long term and high dosage application of livestock manure may result in heavy metal accumulation and migration in the soil, which may endanger food security and affect the top soil heavy metal environmental capacity. Thus, one of the most important tasks for prevention of soil heavy metal pollution is scientific determination of the safe use load of heavy metals in livestock manure. A 4-year field plot experiment was carried out to quantitatively study the accumulation and migration characteristics of heavy metals from pig and chicken manure in soil profiles and the differences of bioavailability. The results showed that the contents of Cu and Cd increased significantly by 43.8% - 118.6% and 28.2% - 44.9% in topsoil (0-15 cm) after 4-consecutive year application of pig manure, and the contents of Cu, Zn, Cd, Cr, As, Pb also increased by 29.7% - 48.5%, 239% - 456%, 19.9% - 80.8%, 40.4% - 163%, 11.8% - 22.0% and 80.3% - 95.0% obviously after application of chicken manure. The accumulation rates of Cu and Zn in topsoil were 76.4% - 119% and 14.2% - 20.4% with pig manure, 72.1% - 88.7% and 63.9% - 78.9% with chicken manure. Under a high dosage of pig and chicken manure, Cu and Zn migrated to a deeper soil evidently. Applying 60 t·hm<sup>-2</sup> of pig manure after 4-consecutive year, Cu could migrate to 15-30 cm soil layer, Zn migrated to 30-60 cm soil layer with chicken manure. Except topsoil, the contents of Cr, Cd, As, Pb did not significantly increase in other soil layers. 4-year continuous application of chicken manure significantly decreased the contents of Cu and Cd, but increased the contents of Zn and Cr in wheat grain and the content of Zn in wheat straw. Pig manure significantly decreased the content of Zn in wheat grain, but increased As content with 60 t·hm<sup>-2</sup>, the contents of Cu and As in wheat straw also increased significantly. Besides, the cumulative rate of heavy metals in wheat was no more than 6%, wheat grain carried out more Cu, Zn than straw, but the Cd, Cr, As, Pb were opposite. The cumulative rate of heavy metals in wheat decreased with the increasing application of manure. This research has an important significance in scientific determination of the heavy metal loads of plow layer, ensuring the quality and safety of agricultural production, and providing a scientific basis for the source

收稿日期: 2016-09-28; 修订日期: 2016-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271488); 河北省自然科学基金项目(C2013301066)

作者简介: 何梦媛(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染控制与修复,E-mail:hmy\_lotus@163.com

\* 通信作者,E-mail:desu@cau.edu.cn

control of soil heavy metal pollution and the safety production of agricultural goods.

**Key words:** livestock and poultry manure; heavy metal; soil profile; migration; wheat

随着我国规模化畜禽养殖量大幅度增加, 畜禽粪便排放量快速增长. 据统计, 2010 年全国畜禽粪便排放总量为 22.35 亿 t<sup>[1]</sup>, 形成污染的畜禽粪便量为 2.27 亿 t, 有研究预测, 2020 年全国畜禽粪便总污染量将大幅增加 31%<sup>[2]</sup>. 土地利用是畜禽粪便经济高效的处置方式, 富含大量有机质和营养元素的畜禽粪便经堆肥处理施用于农田土壤中, 可以改善土壤理化性质, 增加土壤肥力, 提高作物品质<sup>[3]</sup>. 但如果施用不合理, 畜禽粪肥也会成为农田生态系统中重金属的主要来源. Nicholson 等<sup>[4]</sup>发现英国农田土壤中, 畜禽粪肥是仅次于大气沉降的重金属来源. 在我国, 畜禽粪肥对农田土壤中 Cu、Zn 的贡献率分别达到 69% 和 51%<sup>[5]</sup>. 集约化养殖过程中普遍使用含重金属的饲料添加剂, 由于其生物利用度较低, 多数重金属随畜禽粪便排出<sup>[6,7]</sup>, 导致畜禽粪便中重金属含量超标. 李书田等<sup>[8]</sup>发现, 我国猪粪中 Zn、Cu 超标率分别为 62.5% 和 70.0%. 长期施用重金属含量过高的畜禽粪肥, 使农田土壤重金属污染的环境风险增加. Brock 等<sup>[9]</sup>经过 40a 长期定位试验发现, 施用有机肥后农田土壤中 Zn、Cu 总量和生物有效性增加, 其环境风险也进一步增加. Zhang 等<sup>[10]</sup>发现长期施用畜禽粪肥会增加土壤和地表水中 Cu 的潜在风险. 畜禽粪便带入农田土壤中的重金属存在于有机物中, 随有机物分解释放出来并在土壤中积累, 被作物吸收, 进一步通过食物链危害人体健康<sup>[11,12]</sup>.

叶必雄等<sup>[13]</sup>研究发现, 长期施用畜禽粪便有机肥, Zn、Hg、As 等重金属均存在明显的表层聚集现象. 连续 17 a 施用猪粪导致土壤表层中 Cd 含量增加 17~18.9 倍<sup>[14]</sup>. 以往人们确定农田土壤中的重

金属负荷一般是按土壤耕层中的含量来计算的, 研究农田土壤重金属污染也多是集中考虑农田土壤耕层的重金属含量. 但畜禽粪肥带入土壤的重金属也会因为耕作、淋溶等因素发生纵向迁移, 重金属在土壤剖面中的迁移是表征重金属迁移能力和土壤污染程度最直观的指标之一<sup>[15,16]</sup>. 有研究发现, 牛粪、鸡粪集中施用区的 Cu、Pb、Cr 等重金属存在明显的淋溶下移性<sup>[13]</sup>, 潘霞等<sup>[17]</sup>研究也发现, 施用有机肥后设施菜地和露天菜地土壤 Zn 含量分别在 >40~60 cm 和 >60~80 cm 土层出现峰值. 科学确定畜禽粪便有机肥安全施用重金属负荷是预防土壤重金属污染的首要任务, 研究连续施用畜禽粪便有机肥后, 不同重金属在农田土壤剖面的积累和迁移特征, 对科学地确定农田耕层的重金属负荷, 确保农产品安全具有重要意义. 本文通过大田试验, 定量研究连续 4 a 施用鸡粪、猪粪有机肥后不同重金属在土壤剖面中累积和迁移以及生物有效性差异, 以期科学确定农田土壤重金属负荷和农田土壤重金属污染的源头控制提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

田间试验地点位于河北省农林科学院大河试验站试验田 (38°07'32"N, 114°23'00"E), 试验地属于大陆季风性气候, 年均温 13.3℃, 年日照时数 2 554 h, 年平均降雨量 550 mm, 土壤类型为黏壤质洪冲积石灰性褐土. 试验用猪粪、鸡粪分别选自河北省某集约化养殖场. 供试土壤和有机肥基本理化性质和重金属含量见表 1. 试验作物为小麦, 品种为石新 618.

表 1 供试土壤和有机肥的基础理化性质和重金属含量

Table 1 Basic characteristics and heavy metal contents of tested soil and manures

项目	pH	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>	全氮 /g·kg <sup>-1</sup>	全磷 /g·kg <sup>-1</sup>	全钾 /g·kg <sup>-1</sup>	速效磷 /mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾 /mg·kg <sup>-1</sup>	Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	Zn /mg·kg <sup>-1</sup>	Pb /mg·kg <sup>-1</sup>	Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	Cr /mg·kg <sup>-1</sup>	As /mg·kg <sup>-1</sup>
试验用土	7.9	18.1	1.1	0.8	17.9	19.7	96.3	22.9	68.0	30.0	0.150	67.4	10.5
鸡粪	7.1	313	20.2	20.6	10.3	—	—	107	4 485	145	2.53	505	6.71
猪粪	8.6	318	24	27.8	12.2	—	—	236	522	25.1	3.48	61.6	16.3

### 1.2 试验设计

试验包括猪粪和鸡粪两种有机肥, 每种有机肥设 4 个施用量, Z1、Z2、Z3、Z4 和 J1、J2、J3、J4 分别表示猪粪和鸡粪的 15、30、45、60 t·hm<sup>-2</sup> 施用量, 另设 1 个常规施肥作为对照处理. 每个处理重

复 3 次, 共 27 个小区, 每个小区面积为 12 m<sup>2</sup> (3 m × 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. 为保证各小区小麦产量基本一致, 有机肥中 N、P 按化肥的 70% 折算, 氮磷钾肥施用量按当地习惯确定为 N 300 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$   $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 施用有机肥养分不足时,用尿素、低镉磷肥、氯化钾补足。为了控制施肥方式一致,所有有机肥料和磷、钾采用一次性基肥施用,管理方式同当地习惯。本试验从 2011 ~ 2014 年连续 4 a, 每年均按以上相同方案施用肥料。

### 1.3 样品采集与测定

(1) 样品采集 每年小麦收获后采集土壤样品,土壤样品采集用“S”形多点采样法,采样深度分别为 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 60、60 ~ 90 cm。土样经自然风干后研磨先过 1 mm 尼龙筛,供 pH 测定;再用四分法取部分土样过 0.149 mm 尼龙筛,供土壤重金属全量分析使用。植物样品在小麦收获期采集,用“样方法”采样,每个小区选 3 个  $1\text{ m}^2$  的样方,将样方内小麦植株收割后,清洗,烘干、粉碎过 1 mm 尼龙筛,备用。

(2) 样品测定 pH 用酸度计法测定(水土比 2.5:1);有机质含量采用重铬酸钾法;土壤全 P 采用三酸( $\text{HNO}_3$ - $\text{HClO}_4$ -HF) 消煮,钼锑抗比色法;土壤全 N 采用半微量凯式定氮法;土壤全 K 采用三酸消煮,火焰光度法;土壤样品加 8 mL 优级纯王水,植物样品加 8 mL 优级纯  $\text{HNO}_3$ , 分别经微波消解仪(美国 CEM 公司, MARS5) 消煮,用 ICP-AES 测定 Cu、Zn 总量,用 ICP-MS(美国安捷伦公司 ICP-MS7700) 测定 Cr、As、Cd、Pb 总量。每批样品均加入相应土壤或植株标样(GSBZ50014-88, GSBZ51001-94, GBW10046) 做质量控制。

### 1.4 数据分析

数据图表采用 Excel 2010 绘制,显著性差异采用 SPSS 20.0 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后耕层(0 ~ 15 cm) 土壤 pH 变化

表 2 是 2011 ~ 2014 年连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后耕层土壤 pH 的变化,可以看出,连续 4 a 施用猪粪显著降低了耕层土壤 pH,并且随施肥量的增加呈逐渐降低趋势。猪粪各处理相比于对照分别降低了 0.13、0.22、0.28 和 0.39 个单位。连续 4 a 施用鸡粪,除  $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  处理外,其余均显著降低了耕层土壤 pH,分别比对照降低了 0.12、0.21 和 0.35 个单位。猪粪处理的土壤 pH 降低幅度大于鸡粪。有机肥对土壤 pH 的影响作用会随着施肥时间的增加而更加明显,这是由于畜禽粪便有机肥施入土壤后,在微生物的作用下,分解产生的有机酸在土壤中

积累,随着腐解时间的延长 pH 值降低<sup>[18,19]</sup>。不同种类的有机肥所含的糖类、纤维素、蛋白质、有机酸等也有差别,对土壤 pH 产生的影响就会不同。

表 2 连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥对土壤 pH 的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Topsoil pH value after 4-year application of pig and chicken manure

处理	猪粪 pH	鸡粪 pH
CK	7.93 ± 0.08a	7.93 ± 0.08a
1	7.80 ± 0.07b	7.97 ± 0.06a
2	7.71 ± 0.03cb	7.81 ± 0.01b
3	7.65 ± 0.04c	7.72 ± 0.04b
4	7.54 ± 0.07d	7.58 ± 0.09c

1) 同一列中无共同字母表示差异达到 5% 显著水准( $P \leq 0.05$ )

### 2.2 连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后土壤剖面中 Cu、Zn 分布

图 1(a)、图 1(b) 分别为连续施用猪粪、鸡粪 4 a 后,土壤剖面中 Cu 含量的变化情况。从图 1(a) 可以看出,连续施用猪粪第 4 a 后,耕层(0 ~ 15 cm) 土壤 Cu 含量显著高于对照,且随施肥量增加而增加,不同施肥量之间差异显著;耕层土壤中 Cu 含量与对照比增加了 43.8% ~ 118.6%。15 ~ 30 cm 土层中,高用量( $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 猪粪处理土壤中的 Cu 含量也显著高于对照, Cu 含量增加了 24.1% 和 22.0%。低用量( $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 处理与对照差异则不显著;30 ~ 60 cm 土层和 60 ~ 90 cm 土层中,猪粪处理与对照土壤 Cu 含量差异不显著,表明本试验条件下猪粪带入的 Cu 主要积累在土壤耕层(0 ~ 15 cm),但施用量高时也会迁移到亚表层(15 ~ 30 cm)。

从图 1(b) 可以看出,连续施用鸡粪第 4 a 后,中高用量(30、45 和  $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 鸡粪显著增加了耕层(0 ~ 15 cm) Cu 含量,增加幅度分别为 29.7%、37.0% 和 48.5%,不同施肥量之间差异显著。15 ~ 90 cm 土层中,鸡粪处理和对照的 Cu 含量无显著差异。鸡粪带入土壤中的 Cu 主要积累在土壤耕层,与猪粪处理相比,鸡粪中带入的 Cu 向下迁移的幅度小。

图 1(c)、图 1(d) 分别为连续施用猪粪、鸡粪 4 a 后,土壤剖面中 Zn 含量的变化。从图 1(c) 可以看出,连续施用猪粪 4 a 后,土壤剖面 0 ~ 90 cm 土层中 Zn 含量各处理之间均无显著差异。鸡粪处理则不同,由于鸡粪中 Zn 含量很高,连续施用鸡粪 4 a 后,中高用量(30、45 和  $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 鸡粪显著增加了耕层(0 ~ 15 cm) Zn 含量[图 1(d)],增加幅度为 239% ~ 456%,不同施肥量之间差异显著。15 ~ 30

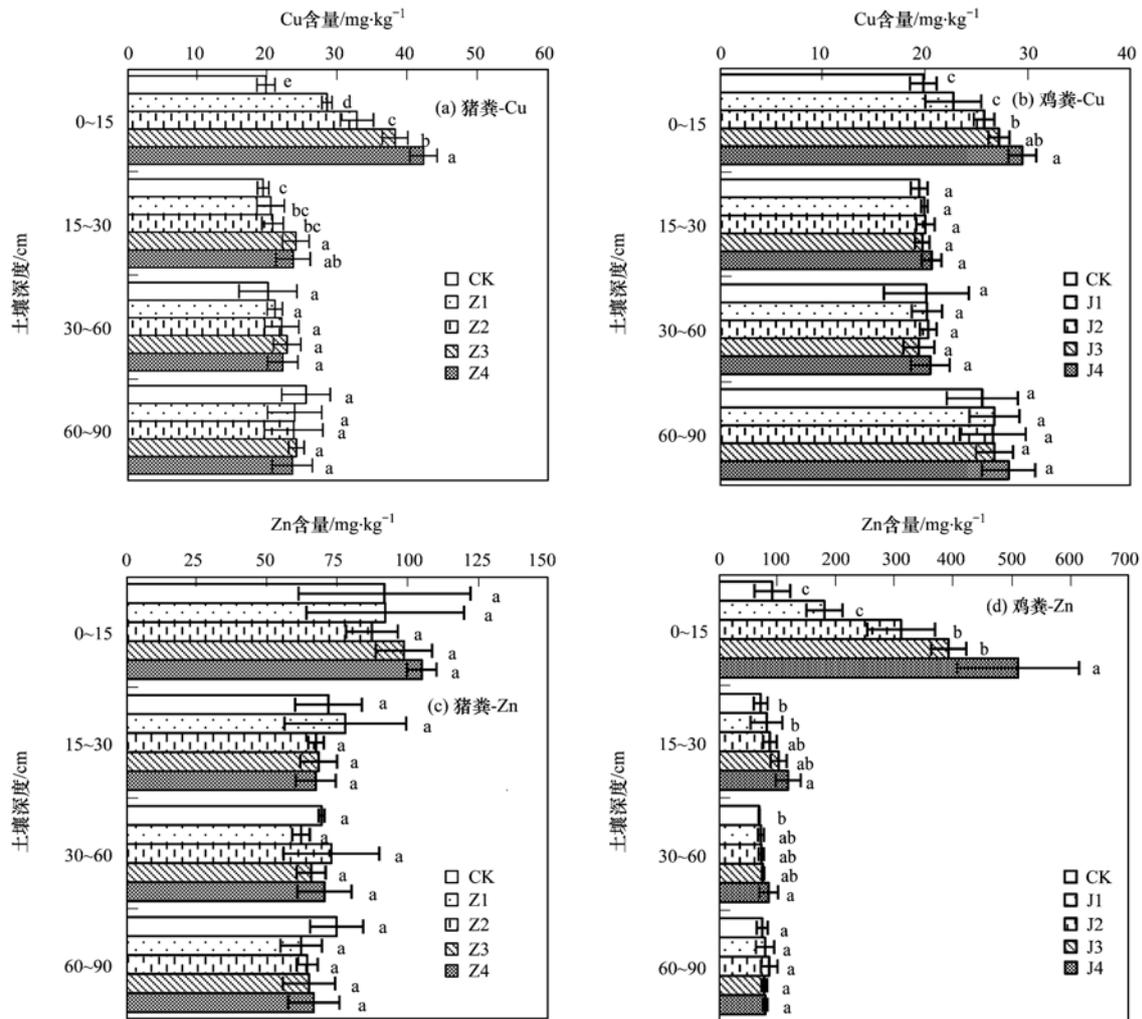


图1 连续施用猪粪、鸡粪4 a后土壤剖面 Cu、Zn 含量

Fig. 1 Distribution of Cu, Zn in soil profiles after 4-consecutive year application of pig and chicken manure

cm 和 30~60 cm 土层中, 60 t·hm<sup>-2</sup> 鸡粪处理的土壤中 Zn 含量也显著高于对照, 增加幅度分别为 65.1% 和 23.3%。这表明本试验条件下连续 4 a 施用鸡粪, 60 t·hm<sup>-2</sup> 用量显著增加了 0~60 cm 土层中 Zn 含量, 30 t·hm<sup>-2</sup> 和 45 t·hm<sup>-2</sup> 用量只显著增加了土壤耕层 (0~15 cm) Zn 含量, 15 t·hm<sup>-2</sup> 用量对 Zn 含量影响不显著, 60 t·hm<sup>-2</sup> 用量鸡粪中 Zn 已经迁移至 30~60 cm 的土层, 30 t·hm<sup>-2</sup> 和 45 t·hm<sup>-2</sup> 处理鸡粪中 Zn 积累在土壤耕层。

以耕层 (0~15 cm) 土壤中 Cu、Zn 净增加量占 4 a 累计有机肥 Cu、Zn 带入量计算 Cu、Zn 在耕层土壤的积累率。猪粪带入的 Cu 在耕层土壤中的积累率达到了 76.4%~119%, 部分处理积累率大于 100%, 说明耕层土壤中 Cu 含量除了猪粪带入, 还存在如大气沉降等其他来源, Hou 等<sup>[20]</sup> 研究表明大气沉降对我国长江三角洲地区农田土壤中 Cu 贡献率有 35% 左右。鸡粪带入的 Cu 在耕层土壤中的积

累率达到了 72.1%~88.7%, 猪粪带入 Cu 在耕层土壤中积累率高于鸡粪。猪粪带入的 Zn 在耕层土壤中的积累率为 14.2%~20.4%, 鸡粪带入 Zn 在耕层土壤中的积累率达到了 63.9%~78.9%, 鸡粪带入土壤的 Zn 在耕层的积累率显著高于猪粪。董同喜等<sup>[21]</sup> 研究也表明, 华北地区农田土壤中的重金属主要来源于畜禽粪便, 其次是大气沉降。

### 2.3 连续 4 a 施用畜禽粪肥有机肥后土壤剖面中 Cd、Cr、As、Pb 含量变化

表 3 是连续 4 a 施用猪粪有机肥后土壤剖面中 Cd、Cr、As、Pb 含量变化情况。从中可见, 连续 4 a 施用猪粪显著增加了耕层土中 Cd 的含量, 且随施用量增加而增加, 各用量处理下, 耕层 Cd 含量比对照增加了 28.2%~44.9%; 15~30 cm 土层中, Cd 含量随猪粪施用量的增加而显著降低, 各用量处理下, 比对照组降低了 18.9%~32.3%。施用猪粪对 30~90 cm 土层的 Cd 含量无显著影响。

连续 4 a 施用猪粪对耕层土壤 Cr 含量无显著影响,但显著降低了 15 ~ 30 cm 土层中 Cr 含量,比对照组降低了 21.5% ~ 41.2%,且随有机肥施用量的增加而降低. 施用猪粪对 30 ~ 90 cm 土层中 Cr 含量没有显著影响.

施用猪粪对土壤剖面中 As、Pb 含量的影响规律与 Cr 类似. 耕层土壤中 As、Pb 含量均无显著影响,但连续 4 a 施用猪粪显著降低了 15 ~ 30 cm 土层中 As、Pb 含量,且各用量下分别比对照降低了 23.0% ~ 28.2% 和 23.3% ~ 44.4%. 施用猪粪对 30 ~ 90 cm 土层中 As、Pb 含量无显著影响.

表 3 连续 4 a 施用猪粪后土壤剖面中 Cd、Cr、As、Pb 含量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 3 Distribution of Cd, Cr, As, Pb in soil profiles after 4-consecutive year application of pig manure/mg·kg<sup>-1</sup>

土壤深度/cm	处理	Cd	Cr	As	Pb
0 ~ 15	CK	0.156 ± 0.019b*	28.41 ± 1.28a	9.24 ± 0.71a	15.86 ± 0.73a
	Z1	0.200 ± 0.014a	30.85 ± 2.84a	10.82 ± 1.14a	17.21 ± 1.37a
	Z2	0.202 ± 0.016a	32.20 ± 1.28a	10.8 ± 1.29a	16.47 ± 1.48a
	Z3	0.215 ± 0.013a	30.18 ± 1.98a	9.88 ± 0.38a	15.51 ± 0.9a
	Z4	0.226 ± 0.022a	31.61 ± 1.89a	9.89 ± 0.72a	15.2 ± 1.21a
15 ~ 30	CK	0.164 ± 0.016a	41.28 ± 1.24a	12.05 ± 0.25a	20.19 ± 0.78a
	Z1	0.133 ± 0.017b	31.99 ± 1.49b	9.28 ± 0.29b	15.48 ± 0.22b
	Z2	0.122 ± 0.011b	33.21 ± 2.12b	9.05 ± 0.46b	14.64 ± 0.68b
	Z3	0.130 ± 0.008b	29.61 ± 4.13bc	8.89 ± 0.69b	14.33 ± 1.05b
	Z4	0.111 ± 0.026b	24.26 ± 5.16c	8.65 ± 0.45b	11.23 ± 2.19c
30 ~ 60	CK	0.092 ± 0.004a	32.18 ± 1.38a	9.2 ± 0.12a	14.27 ± 0.46a
	Z1	0.073 ± 0.008a	24.61 ± 2.05b	8.66 ± 0.7a	12.47 ± 1.15a
	Z2	0.083 ± 0.023a	25.85 ± 1.61ab	9.11 ± 0.61a	14.55 ± 3.33a
	Z3	0.079 ± 0.018a	26.41 ± 3.94ab	7.48 ± 1.47a	13.92 ± 2.01a
	Z4	0.091 ± 0.024a	28.13 ± 2.73ab	9.99 ± 1.57a	13.91 ± 2.82a
60 ~ 90	CK	0.104 ± 0.036a	35.17 ± 5.65a	10.35 ± 1.93a	15.71 ± 3.71a
	Z1	0.127 ± 0.012a	40.6 ± 3.77a	11.44 ± 0.87a	18.47 ± 2.01a
	Z2	0.103 ± 0.016a	36.12 ± 3.26a	10.48 ± 1.12a	15.74 ± 2.17a
	Z3	0.102 ± 0.028a	32.55 ± 8.12a	9.89 ± 1.9a	15.38 ± 3.18a
	Z4	0.114 ± 0.016a	36.47 ± 3.44a	11.12 ± 0.99a	17.14 ± 1.48a

1) 同一列中,同一土层无共同字母表示差异达到 5% 显著水准 ( $P \leq 0.05$ ),下同

表 4 是连续 4 a 施用鸡粪有机肥后土壤剖面 Cd、Cr、As、Pb 的分布情况. 从中可见,当鸡粪施用量超过 15 t·hm<sup>-2</sup>时,连续 4a 施用鸡粪显著增加了耕层土中 Cd 含量,各用量处理比对照组增加了 19.9% ~ 80.8%. 施用鸡粪也显著降低了 15 ~ 30 cm 土层中 Cd 含量,分别比对照组降低了 18.9% ~ 23.8%,但不同鸡粪用量间差异不显著. 施用鸡粪对 30 ~ 90 cm 土层中 Cd 含量无显著影响.

与猪粪不同,连续施用鸡粪显著增加了耕层土中 Cr 的含量,且随施用量的增加而增加,分别比对照组增加了 40.4% ~ 163%,这主要是由于鸡粪中 Cr 含量较高所致. 施用鸡粪也显著降低 15 ~ 30 cm 土层中 Cr 含量,比对照降低了 20.6% ~ 55.7%,但

由以上结果可知,连续 4 a 施用猪粪显著增加了土壤耕层 Cd 含量,主要是猪粪中的 Cd 积累在土壤耕层中,这与 Wu 等<sup>[14]</sup>的研究一致. 连续 4 a 施用猪粪后耕层下面的 15 ~ 30 cm 土层中 Cd、Cr、As、Pb 含量显著降低,这可能是因为耕层有机肥分解后的可溶性有机质、有机酸使亚表层土壤中重金属发生淋溶,导致亚表层的重金属含量显著降低. Kaschl 等<sup>[22]</sup>采用土柱试验研究发现,施用污泥堆肥后,原土壤中 Cu、Ni、Zn 等重金属明显向下淋溶,在石灰性土壤上作用更为突出.

各不同施用量处理间差异不显著. 连续施用鸡粪对 30 ~ 90 cm 土层中 Cr 含量无显著影响.

As 在土壤剖面中的分布规律与 Cd 类似,鸡粪施用量超过 15 t·hm<sup>-2</sup>时,连续 4 a 施用鸡粪显著增加了耕层土中 As 含量,各用量处理比对照增加了 11.8% ~ 22.0%. 连续施用鸡粪也显著降低 15 ~ 30 cm 土层中 As 含量,比对照降低了 23.0% ~ 28.5%,各鸡粪用量处理间无显著差异. 施用鸡粪对 30 ~ 90 cm 土层中 As 含量也无显著影响.

Pb 在土壤剖面中的分布也与 Cd 类似,鸡粪施用量超过 15 t·hm<sup>-2</sup>时,连续 4 a 施用鸡粪耕层土中 Pb 含量显著增加,各用量处理比对照组增加了 80.3% ~ 95.0%. 15 ~ 30 cm 土层中,鸡粪处理也显

著降低了该土层中 Pb 含量, 比对照降低了 17.5% ~ 25%, 各鸡粪用量处理间无显著差异. 施用鸡粪对 30 ~ 90 cm 土层中 Pb 含量无显著影响.

由以上结果可知, 连续 4 a 施用鸡粪, 用量超过 15 t·hm<sup>-2</sup> 时, 耕层土壤中 Cd、Cr、As 和 Pb 含量均显

著增加, 本试验条件下, 畜禽粪肥带入的 Cd、Cr、As 和 Pb 主要积累在了耕层土壤中, 耕层中这些重金属积累施用鸡粪比施用猪粪更明显. 连续 4 a 施用鸡粪, 亚表层 (15 ~ 30 cm) 土壤中 Cd、Cr、As 和 Pb 含量也均显著降低, 其可能原因与施用猪粪类似.

表 4 连续 4 a 施用鸡粪后土壤剖面中 Cd、Cr、As、Pb 含量/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 4 Distribution of Cd, Cr, As, Pb in soil profiles after 4-consecutive year application of chicken manure/mg·kg<sup>-1</sup>

土壤深度/cm	处理	Cd	Cr	As	Pb
0 ~ 15	CK	0.156 ± 0.019b	28.41 ± 1.28d	9.24 ± 0.71c	15.86 ± 0.73b
	J1	0.187 ± 0.007b	39.88 ± 3.78c	9.67 ± 0.73bc	19.47 ± 1.62b
	J2	0.247 ± 0.004a	59.77 ± 0.82b	10.96 ± 0.54ab	28.6 ± 0.87a
	J3	0.282 ± 0.033a	73.68 ± 7.59a	11.27 ± 0.51a	30.93 ± 3.09a
	J4	0.274 ± 0.03a	74.72 ± 10.1a	10.33 ± 0.70ab	30.92 ± 3.38a
15 ~ 30	CK	0.164 ± 0.016a	41.28 ± 1.24a	12.05 ± 0.25a	20.19 ± 0.78a
	J1	0.128 ± 0.008b	28.30 ± 2.19b	8.9 ± 0.32b	15.14 ± 0.85b
	J2	0.128 ± 0.006b	29.93 ± 2.74b	9.24 ± 0.48b	15.81 ± 0.71b
	J3	0.133 ± 0.013b	32.79 ± 2.95b	9.31 ± 0.53b	16.65 ± 1.41b
	J4	0.125 ± 0.022b	30.95 ± 4.35b	8.61 ± 1.06b	16.14 ± 2.83b
30 ~ 60	CK	0.092 ± 0.004a	32.18 ± 1.38a	9.2 ± 0.12a	14.27 ± 0.46a
	J1	0.081 ± 0.001a	27.26 ± 0.7a	8.49 ± 0.07a	13.05 ± 0.82a
	J2	0.078 ± 0.011a	29.87 ± 5.66a	7.62 ± 1.41a	12.78 ± 2.05a
	J3	0.088 ± 0.009a	30.92 ± 2.22a	7.84 ± 0.23a	13.98 ± 1.02a
	J4	0.078 ± 0.009a	29.07 ± 1.15a	7.88 ± 0.86a	12.71 ± 0.99a
60 ~ 90	CK	0.104 ± 0.036a	35.17 ± 5.65a	10.35 ± 1.93a	15.71 ± 3.71a
	J1	0.120 ± 0.016a	36.20 ± 0.62a	11.4 ± 0.29a	17.45 ± 1.21a
	J2	0.118 ± 0.005a	34.19 ± 1.61a	10.66 ± 0.43a	16.29 ± 0.62a
	J3	0.122 ± 0.014a	35.80 ± 2.54a	11.48 ± 0.85a	17.61 ± 1.98a
	J4	0.129 ± 0.011a	36.24 ± 3.72a	11.57 ± 0.58a	18.35 ± 1.31a

#### 2.4 连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后小麦秸秆中重金属含量

表 5 为连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后, 小麦秸秆中重金属的变化. 从中可见, 连续 4 a 施用猪粪, 秸秆中 Cu 含量显著增加, 比对照组增加了 17.3% ~ 82.1%; 猪粪用量超过 15 t·hm<sup>-2</sup> 时, 秸秆 As 含量随猪粪用量的增加也显著增加, 比对照增加了 32.9% ~ 44.2%. 施用猪粪对小麦秸秆中 Zn、

Cd、Cr、Pb 含量无显著影响. 连续 4 a 施用鸡粪后, 15、45 和 60 t·hm<sup>-2</sup> 鸡粪处理分别使小麦秸秆 Zn 含量显著增加了 120%、190% 和 350%, 与对照相比, 鸡粪处理对秸秆中其他重金属含量无显著影响.

#### 2.5 连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后小麦籽粒中重金属含量

表 6 为连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后, 小麦籽粒中重金属的变化. 从中可见, 猪粪用量超过

表 5 连续 4 a 施用畜禽粪肥对小麦秸秆中重金属含量的影响/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 5 Effect of pig and chicken manure on the heavy metals concentration of wheat straw/mg·kg<sup>-1</sup>

处理	重金属含量					
	Cu	Zn	Cd	Cr	As	Pb
CK	3.07 ± 0.12b	11.5 ± 6.33a	0.066 0 ± 0.001a	4.75 ± 0.33a	0.249 ± 0.02b	2.33 ± 0.17a
Z1	3.60 ± 0.20a	8.87 ± 2.20a	0.056 0 ± 0.01a	3.83 ± 1.53a	0.282 ± 0.03ab	1.80 ± 0.32a
Z2	5.59 ± 2.42a	12.3 ± 4.89a	0.066 9 ± 0.017a	4.10 ± 1.63a	0.331 ± 0.05a	2.19 ± 0.71a
Z3	5.06 ± 0.70a	11.4 ± 0.95a	0.060 9 ± 0.005a	6.71 ± 2.51a	0.340 ± 0.05a	2.02 ± 0.31a
Z4	4.93 ± 0.42a	13.1 ± 0.57a	0.069 4 ± 0.012a	3.90 ± 2.37a	0.359 ± 0.05a	2.06 ± 0.39a
CK	3.07 ± 0.12a	11.5 ± 6.33d	0.066 0 ± 0.001a	4.75 ± 0.33a	0.249 ± 0.02ab	2.33 ± 0.17a
J1	3.27 ± 1.17a	25.3 ± 3.26bc	0.051 0 ± 0.013a	5.34 ± 0.48a	0.284 ± 0.06a	2.47 ± 0.59a
J2	2.86 ± 0.57a	19.1 ± 1.82cd	0.047 9 ± 0.011a	7.80 ± 3.22a	0.200 ± 0.04b	1.80 ± 0.46a
J3	3.79 ± 0.40a	33.3 ± 3.16b	0.047 6 ± 0.009a	7.64 ± 2.13a	0.266 ± 0.06ab	1.98 ± 0.52a
J4	3.59 ± 0.72a	51.8 ± 5.80a	0.055 0 ± 0.007a	8.82 ± 4.93a	0.285 ± 0.02a	2.35 ± 0.30a

15 t·hm<sup>-2</sup>时,小麦籽粒 Zn 含量显著降低,比对照组降低了 13.7% ~ 37.0%。当猪粪用量达到 60 t·hm<sup>-2</sup>时,小麦籽粒 As 含量显著增加,其余用量无显著影响。施用猪粪对小麦籽粒中 Cu、Cd、Cr、Pb 含量无显著影响。

连续 4 a 施用鸡粪后,小麦籽粒中 Cu、Cd 含量显著降低,分别比对照组降低了 32.6% ~ 41.9% 和 42.2% ~ 52.2%,这可能是由于畜禽粪便有机肥增加了土壤中有机结合态重金属含量,降低了交换态

及铁锰氧化物结合态所占比例,重金属的生物有效性降低,导致作物吸收减少<sup>[23,24]</sup>。籽粒 Zn 含量随鸡粪施用量的增加而增加,且当施用量为 45、60 t·hm<sup>-2</sup>时显著高于对照组,小麦籽粒 Cr 含量也显著增加,比对照组增加了 36.2% ~ 60.1%,并且超过食品安全国家标准(GB 2762-2012),这与鸡粪中 Zn、Cr 含量很高有关,施用鸡粪显著增加了耕层土壤中 Zn、Cr 含量,进而增加了小麦籽粒对 Zn、Cr 的吸收。施用鸡粪对小麦籽粒中 As、Pb 含量无显著影响。

表 6 连续 4 a 施用畜禽粪肥对小麦籽粒中重金属含量的影响/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 6 Effect of pig and chicken manure on the heavy metals concentration of wheat grain/mg·kg<sup>-1</sup>

处理	重金属含量					
	Cu	Zn	Cd	Cr	As	Pb
CK	5.73 ± 0.65a	48.9 ± 9.84a	0.026 8 ± 0.006a	0.807 ± 0.13a	0.023 7 ± 0.005b	0.153 ± 0.01a
Z1	5.13 ± 0.92a	35.3 ± 9.78ab	0.016 1 ± 0.005a	0.408 ± 0.05a	0.057 0 ± 0.037ab	0.255 ± 0.16a
Z2	4.73 ± 0.42a	33.7 ± 5.80b	0.014 2 ± 0.002a	0.250 ± 0.22a	0.032 5 ± 0.003ab	— <sup>1)</sup>
Z3	4.80 ± 0.6a	30.8 ± 4.26b	0.017 6 ± 0.001a	0.777 ± 0.45a	0.041 2 ± 0.008ab	0.070 ± 0.07a
Z4	5.47 ± 0.76a	42.2 ± 5.3ab	0.028 4 ± 0.001a	0.625 ± 0.34a	0.068 0 ± 0.020a	0.238 ± 0.15a
CK	5.73 ± 0.65a	48.9 ± 9.84b	0.026 8 ± 0.006a	0.807 ± 0.13b	0.023 7 ± 0.005a	0.153 ± 0.01a
J1	3.86 ± 0.42b	60.9 ± 7.43b	0.013 9 ± 0.005b	1.292 ± 0.18a	0.024 9 ± 0.005a	1.044 ± 0.51a
J2	3.59 ± 0.20b	59.1 ± 6.87b	0.014 8 ± 0.003b	1.263 ± 0.11a	0.023 0 ± 0.005a	0.886 ± 0.43a
J3	3.33 ± 0.23b	80.7 ± 3.50a	0.015 5 ± 0.001b	1.099 ± 0.34ab	0.024 7 ± 0.005a	0.952 ± 0.40a
J4	3.46 ± 0.12b	79.2 ± 7.43a	0.012 8 ± 0.004b	1.232 ± 0.12a	0.031 6 ± 0.010a	0.595 ± 0.58a

1) —表示仪器未检出

## 2.6 小麦收获对不同畜禽粪便有机肥带入重金属的累计携出量及携出率

以小麦籽粒和秸秆中重金属含量与单位公顷收获量的生物量乘积计算小麦每年收获携出重金属的量,4 a 总和计算 4 a 累计携出量。由表 7 可知,小麦籽粒对 Cd、Cr、As 和 Pb 的累计携出量低于小麦秸秆,而籽粒对 Cu、Zn 的累计携出量高于秸秆。小麦收获对 Cu、Zn、Cr 的累计携出量较大,猪粪处理下最大累计携出量分别为 0.259、1.282 和 0.204 kg·hm<sup>-2</sup>,鸡粪处理下为 0.218、4.173 和 0.168 kg·hm<sup>-2</sup>,且 Zn 的累计携出量随鸡粪施用量的增加而增加,这可能与鸡粪中的 Zn 含量很高有关。小麦收获对 Cd、As、Pb 的累计携出量较低,猪粪处理下最大累计携出量分别为 0.003 4、0.014 3 和 0.085 kg·hm<sup>-2</sup>,鸡粪处理下为 0.003 1、0.012 5 和 0.084 kg·hm<sup>-2</sup>。

以小麦收获 4 a 累计重金属携出量占有机肥 4 a 累计重金属输入量的百分比表示畜禽粪便有机肥带入重金属的累计携出率。猪粪、鸡粪处理下,15 t·hm<sup>-2</sup>用量下的累计携出率最高,且随施用量的增加而减小。猪粪处理小麦收获对 Cu、Zn、Cd、Cr、As、Pb 累计携出率分别为 0.46% ~ 1.7%、1.02%

~ 3.94%、0.41% ~ 1.62%、1.38% ~ 4.96%、0.34% ~ 1.37%、1.12% ~ 5.61%,小麦收获对 As 携出率最低,这可能是因为旱地条件下,砷易以五价砷的形态存在,五价砷较三价砷的附着能力强,移动性弱,生物有效性也较低<sup>[25]</sup>。鸡粪处理小麦收获对 Cu、Zn、Cd、Cr、As、Pb 累计携出率分别为 0.85% ~ 3.38%、0.39% ~ 1.02%、0.42% ~ 1.58%、0.11% ~ 0.58%、0.77% ~ 2.60%、0.23% ~ 0.81%。本试验条件下小麦收获对各种重金属 4 a 累计携出率均不超过 6%,且除 Cu 外,施用鸡粪小麦收获对其他重金属携出率均小于施用猪粪处理。

## 3 讨论

### 3.1 连续施用畜禽粪便有机肥土壤剖面中重金属的积累与迁移

集约化养殖场畜禽粪便有机肥中较高的重金属含量是影响其安全利用的重要因素,科学确定农田土壤的重金属负荷是从源头上防治土壤重金属污染,保障农产品和生态环境安全的重要手段。本研究表明,畜禽粪便有机肥带入土壤中的 Cu、Zn 在耕层土壤的积累率很高,猪粪带入的 Cu 在耕层土壤

表 7 连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥后小麦收获重金属累计携出量及累计携出率<sup>1)</sup>  
Table 7 Removal amount of heavy metals by wheat and the cumulative removal rate of heavy metals after  
4-consecutive year application of pig and chicken manure

元素	处理	Z1	Z2	Z3	Z4	J1	J2	J3	J4
Cu	RAG	0.156	0.145	0.140	0.156	0.127	0.124	0.120	0.121
	RAS	0.084	0.106	0.104	0.103	0.09	0.083	0.084	0.097
	CRRW	1.70	0.89	0.57	0.46	3.38	1.61	1.06	0.85
Zn	RAG	0.872	0.788	0.739	0.905	1.31	1.464	1.717	1.847
	RAS	0.362	0.38	0.383	0.377	1.003	1.249	1.952	2.326
	CRRW	3.94	1.86	1.19	1.02	0.86	0.51	0.46	0.39
Cd	RAG	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
	RAS	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	CRRW	1.62	0.67	0.51	0.41	1.58	1.01	0.51	0.42
Cr	RAG	0.018	0.021	0.021	0.021	0.016	0.009	0.014	0.019
	RAS	0.166	0.177	0.166	0.183	0.146	0.16	0.152	0.112
	CRRW	4.96	2.68	1.69	1.38	0.53	0.28	0.18	0.11
As	RAG	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
	RAS	0.012	0.012	0.012	0.011	0.009	0.011	0.009	0.011
	CRRW	1.37	0.73	0.46	0.34	2.60	1.41	0.86	0.77
Pb	RAG	0.009	0.006	0.005	0.006	0.017	0.014	0.018	0.011
	RAS	0.075	0.073	0.07	0.062	0.054	0.066	0.066	0.068
	CRRW	5.61	2.62	1.68	1.12	0.81	0.46	0.32	0.23

1) RAG; removal amount of heavy metals by grain, 籽粒携出量, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; RAS; removal amount of heavy metals by straw, 秸秆携出量, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; CRRW; cumulative removal rate of heavy metals by wheat, 累计携出率, 单位: %

中的积累率达到了 76.4% ~ 119%, 鸡粪带入 Cu、Zn 在耕层土壤中的积累率分别为 72.1% ~ 88.7% 和 63.9% ~ 78.9%, 但仍有一定比例的 Cu、Zn 迁移到了耕层下面的土层。有机肥施用量越高, 向下迁移的越深。60  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  猪粪处理 Cu 迁移到了 15 ~ 30 cm 土层; 60  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  鸡粪处理 Zn 迁移至 30 ~ 60 cm 土层。本试验条件下畜禽粪便有机肥带入的 Cd、Cr、As、Pb 没有明显迁移到耕层以下土层, 但畜禽粪便有机肥的施用造成了次表层土壤中 Cd、Cr、As、Pb 的淋溶。有研究表明, 土壤中 Cu、Zn、Cd 存在一定程度的垂直迁移的能力<sup>[17]</sup>。Cd 的迁移能力最强, Pb、Zn、Cr、Cu 和 As 的潜在迁移能力依次减弱<sup>[26]</sup>。本试验中 Cr、Pb、As 以及 Cd 均没有产生明显的向下迁移现象, 潘霞等<sup>[17]</sup> 研究也有类似结果。除了与所施用有机肥中这些重金属元素含量较低有关, 还可能因为本研究试验用土为黏壤土, 有研究表明土壤中重金属的运移与土壤质地有关, 土壤黏粒越多, 对重金属的吸附作用就越强, 阻滞作用越明显, 进而降低了重金属的迁移能力<sup>[27]</sup>。

施用到土壤中的猪粪、鸡粪分解时会产生大量可溶性有机质 (DOM) 和有机酸<sup>[28]</sup>, 这些分解产物会影响重金属的存在形态和土壤颗粒对重金属的吸附<sup>[29]</sup>, 提高重金属的溶解度和移动性, 使其更易向

土壤下层迁移。本研究中施用猪粪、鸡粪有机肥显著降低了耕层土壤的 pH。Schwab 等<sup>[18]</sup> 的研究表明, 土壤中的有机酸会通过降低土壤 pH 来增强重金属的迁移能力<sup>[19]</sup>。另外, 其它环境因素如强降雨或频繁灌溉时, 结构孔隙和作物根孔造成的水分优势流也会加剧重金属向下迁移<sup>[30]</sup>。Sterckeman 等认为<sup>[15]</sup>, 影响重金属垂直迁移距离的因素有: 表层重金属含量、土壤 pH、氧化还原电位和有机碳含量, 表层重金属含量越高, pH 越低, 其向下的迁移距离会越大, 氧化还原电位、有机碳含量与重金属的迁移距离也呈正相关。本研究发现, 猪粪、鸡粪带入土壤的 Cu、Zn 迁移能力存在差异, 这是由于试验施用的鸡粪 Zn 含量远远高于猪粪, 施用鸡粪后耕层土壤的 Zn 积累量高于猪粪处理, 表层土壤重金属含量与重金属垂直迁移距离有关<sup>[15]</sup>, 因此, 本研究中鸡粪带入的 Zn 在土壤剖面中向下迁移至 30 ~ 60 cm 土层, 而猪粪带入的 Zn 没有发生明显的向下迁移现象; 本试验中猪粪中 Cu 含量高于鸡粪, 贾武霞等<sup>[31]</sup> 研究发现, 猪粪中水溶态 Cu 含量占总量的 30.47%, 这部分 Cu 极易随雨水的淋洗发生迁移, EDTA 提取态 Cu 为 35.96%, 说明猪粪中的 Cu 与鸡粪相比具有更高的生物有效性, 在环境中的移动性也更大, 因此, 猪粪中的 Cu 迁移至 15 ~ 30 cm 土层,

而鸡粪中的 Cu 未发生明显的向下迁移现象。

定量化研究畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中的积累和迁移,对确定农田土壤耕层重金属污染负荷具有重要价值。本研究表明高用量猪粪、鸡粪会分别使 Cu、Zn 向深层土壤迁移,则耕层土壤的 Cu、Zn 环境容量会增加。因此,确定农田土壤重金属负荷时,应考虑施用的不同畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中的迁移特征和迁移量。

### 3.2 连续 4 a 施用畜禽粪便有机肥对小麦吸收重金属的影响

农产品质量安全受到越来越多的关注,人类对农产品的要求已经从温饱转变为粮食安全和营养健康的更高要求。本研究结果显示,高用量猪粪处理显著增加了小麦籽粒中 As 含量,鸡粪显著增加了 Zn、Cr 含量,且 Cr 含量超过食品安全国家标准(GB 2762-2012)。可见长期施用高量畜禽粪便有机肥会增加农产品可食部位重金属含量,由此引发的粮食安全问题值得关注。Lipoth 等<sup>[32]</sup>通过 5~7a 的野外试验发现长期施用猪粪,Cd 的生物有效性增加,小麦和大麦体内 Cd 含量也增加。此外,还有研究表明畜禽粪便农用提高了土壤中 Cd、Cu、Zn 的溶解性,水溶态 Cd 含量和小麦籽粒 Cd 含量有显著线性相关关系<sup>[33,34]</sup>,增加了粮食安全风险。连续 4 a 施用猪粪使小麦籽粒中 Zn 含量最高降低了 37%,施用鸡粪使小麦籽粒中 Cu、Cd 含量最高降低 41.9% 和 52.2%。这可能是由于当有机肥中这些重金属含量较低时,施用有机肥后,土壤有机质含量大大增加,这些有机质的官能团对这些少量的重金属的吸附能力较强,与重金属络合形成更为稳定的络合物,从而降低重金属的生物有效性<sup>[35]</sup>。但当有机肥中这些重金属含量很高时可能就会是相反的结果。也有研究表明,施用畜禽粪便有机肥后,有机结合态重金属含量显著增加,水溶态和可交换态含量降低,即有效态含量显著降低<sup>[23]</sup>。这可能也是本试验中施用猪粪、鸡粪显著降低小麦籽粒重金属含量的一个原因。连续 4 a 施用猪粪、鸡粪有机肥,小麦秸秆中 Cd、Cr、As、Pb 含量高于籽粒,而 Cu、Zn 相反,说明除 Cu、Zn 外,小麦秸秆对同一种重金属的富集能力大于小麦籽粒,与其他研究结果一致<sup>[36,37]</sup>。由于 Cd、As、Pb 等重金属更易在秸秆中富集,因此秸秆再次利用时应慎重考虑。

集约化养殖场猪粪、鸡粪中 Zn、Cu 等含量较高,是由于为了促进畜禽生长、治疗控制疾病,Zn、Cu、Cd 等重金属微量元素被广泛添加到动物饲料

中<sup>[38]</sup>,而畜禽对微量元素的利用率低,大部分随畜禽粪便排出体外。合理施用畜禽粪便有机肥是保证粮食作物安全的重要途径,在农业生产中应尽量避免一次性大量施用或者长期连续施用畜禽粪便有机肥。此外,由于畜禽粪便有机肥中的重金属主要来源于饲料中的添加剂,控制添加剂中重金属含量也是需要关注的问题。

## 4 结论

(1)本田间条件下连续 4 a 施用猪粪和鸡粪,猪粪带入的 Cu、Zn 在耕层土壤中的积累率分别达到 76.4%~119% 和 14.2%~20.4%,鸡粪带入 Cu、Zn 在耕层土壤中的积累率分别达到 72.1%~88.7% 和 63.9%~78.9%。连续施用高量鸡粪 Zn 迁移到了 30~60 cm 土层,连续施用高量猪粪 Cu 迁移至 15~30 cm 土层。

(2)连续 4 a 施用猪粪显著增加了土壤耕层中 Cu、Cd 的含量,连续施用鸡粪显著增加土壤耕层 Cu、Zn、Cd、Cr、As、Pb 含量,对耕层以下土层中的 Cd、Cr、As 和 Pb 含量没有显著影响。畜禽粪便带入的 Cd、Cr、As、Pb 主要积累在土壤耕层。

(3)连续 4 a 施用猪粪,显著降低小麦籽粒中 Zn 含量,显著增加了小麦秸秆中 Cu、As 含量。连续 4 a 施用鸡粪显著降低小麦籽粒中 Cu、Cd 含量,显著增加 Zn、Cr 含量,显著增加了小麦秸秆中 Zn 含量。4 a 小麦收获累计对有机肥带入重金属的携出率小于 6%。小麦籽粒对 Cu、Zn 的累积携出量大于秸秆,而 Cd、Cr、As、Pb 相反。有机肥施用量越高,小麦收获对有机肥带入重金属的携出率越低,在土壤中积累率越高。

### 参考文献:

- [1] 耿维,胡林,崔建宇,等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 171-179.  
Geng W, Hu L, Cui J Y, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 171-179.
- [2] 仇焕广,廖绍攀,井月,等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2766-2774.  
Qiu H G, Liao S P, Jing Y, et al. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China [J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2766-2774.
- [3] Lazcano C, Gómez-Brandón M, Domínguez J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure [J]. Chemosphere, 2008, 72(7): 1013-1019.
- [4] 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.
- [5] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [6] Nasiru A, Ismail N, Ibrahim M H. Vermicomposting: tool for sustainable ruminant manure management[J]. *Journal of Waste Management*, 2013, **2013**: 732759.
- [7] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 725-759.
- [8] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(1): 179-184.  
Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(1): 179-184.
- [9] Brock E H, Ketterings Q M, McBride M. Copper and zinc accumulation in poultry and dairy manure-amended fields [J]. *Soil Science*, 2006, **171**(5): 388-399.
- [10] Zhang F S, Li Y X, Yang M, *et al.* Copper residue in animal manures and the potential pollution risk in northeast China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, **2**(1): 91-96.
- [11] Suthar S, Sajwan P, Kumar K. Vermiremediation of heavy metals in wastewater sludge from paper and pulp industry using earthworm *Eisenia fetida* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **109**: 177-184.
- [12] Lv B Y, Xing M Y, Yang J. Speciation and transformation of heavy metals during vermicomposting of animal manure [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **209**: 397-401.
- [13] 叶必雄, 刘圆, 虞江萍, 等. 施用不同畜禽粪便土壤剖面中重金属分布特征[J]. *地理科学进展*, 2012, **31**(12): 1708-1714.  
Ye B X, Liu Y, Yu J P, *et al.* Characteristics of the distribution of heavy metals in the profiles of the soils fertilized with different livestock manures [J]. *Progress in Geography*, 2012, **31**(12): 1708-1714.
- [14] Wu L H, Tan C Y, Liu L, *et al.* Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure [J]. *Geoderma*, 2012, **173-174**: 224-230.
- [15] Sterckeman T, Douay F, Proix N, *et al.* Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the North of France [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **107**(3): 377-389.
- [16] 刘洪莲, 李恋卿, 潘根兴. 苏南某些水稻土中 Cu Pb Hg As 的剖面分布及其影响因素 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(5): 1221-1227.  
Liu H L, Li L Q, Pan G X. Profile distribution of total Cu, Pb, Hg, As in some paddy soils from the southern Jiangsu, China and the influencing factors [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(5): 1221-1227.
- [17] 潘霞, 陈励科, 卜元卿, 等. 畜禽有机肥对典型蔬果地土壤剖面重金属与抗生素分布的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2012, **28**(5): 518-525.  
Pan X, Chen L K, Bu Y Q, *et al.* Effects of livestock manure on distribution of heavy metals and antibiotics in soil profiles of typical vegetable fields and orchards [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, **28**(5): 518-525.
- [18] Schwab A P, Zhu D S, Banks M K. Influence of organic acids on the transport of heavy metals in soil [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(6): 986-994.
- [19] Renella G, Landi L, Nannipieri P. Degradation of low molecular weight organic acids complexed with heavy metals in soil [J]. *Geoderma*, 2004, **122**(2-4): 311-315.
- [20] Hou Q Y, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 68-84.
- [21] 董同喜, 杨海雪, 李花粉, 等. 华北农田小麦-玉米轮作体系下土壤重金属积累特征研究 [J]. *农业资源与环境学报*, 2014, **31**(4): 355-365.  
Dong T X, Yang H X, Li H F, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in the soil with wheat-corn rotation system in North China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, **31**(4): 355-365.
- [22] Kaschl A, Römheld V, Chen Y. The influence of soluble organic matter from municipal solid waste compost on trace metal leaching in calcareous soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **291**(1-3): 45-57.
- [23] 华路, 白铃玉, 韦东普, 等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响 [J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(4): 346-350.  
Hua L, Bai L Y, Wei D P, *et al.* Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn on Cd, Zn formation in soil and wheat growth [J]. *China Environmental Science*, 2002, **22**(4): 346-350.
- [24] 商和平, 李洋, 张涛, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 314-324.  
Shang H P, Li Y, Zhang T, *et al.* Form tendency and bio-availability dynamics of Cu and Zn in different farm soils after application of organic fertilizer of livestock and poultry manures [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 314-324.
- [25] 王金翠, 孙继朝, 黄冠星, 等. 土壤中砷的形态及生物有效性研究 [J]. *地球与环境*, 2011, **39**(1): 32-36.  
Wang J C, Sun J C, Huang G X, *et al.* Research on speciation and bioavailability of arsenic in soil [J]. *Earth and Environment*, 2011, **39**(1): 32-36.
- [26] 王晓春, 路国慧, 刘晓端, 等. 沈阳细河沿岸土壤中重金属垂直分布特征与形态分析 [J]. *岩矿测试*, 2010, **29**(2): 97-103.  
Wang X C, Lu G H, Liu X D, *et al.* Vertical distribution characteristics and speciation analysis of heavy metals in top-soils around Xihe river of Shenyang [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, **29**(2): 97-103.
- [27] 张茹吉, 姚世雅, 奥岩松. 土壤表层中的 Cu、Cd、Pb 的垂直运移规律 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2013, **31**(5): 67-71, 94.  
Zhang R J, Yao S Y, Ao Y S. Vertical transport rules of Cu, Cd, Pb in the surface of soil [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2013, **31**(5): 67-71, 94.
- [28] 王林权, 周春菊, 王俊儒, 等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响 [J]. *土壤学报*, 2002, **39**(2): 268-275.  
Wang L Q, Zhou C J, Wang J R, *et al.* Organic acids in chicken

- feces and their effects on availability of nutrients in loess soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(2): 268-275.
- [29] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究——I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, **4**(2): 151-155.
- Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C, *et al.* Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms——I. Effect of organic manure (matter) on activation to different phosphate in soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, **4**(2): 151-155.
- [30] Richards B K, Steenhuis T S, Peverly J H, *et al.* Metal mobility at an old, heavily loaded sludge application site [J]. *Environmental Pollution*, 1998, **99**(3): 365-377.
- [31] 贾武霞, 文炯, 许望龙, 等. 我国部分城市畜禽粪便中重金属含量及形态分布[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(4): 764-773.
- Jia W X, Wen J, Xu W L, *et al.* Content and fractionation of heavy metals in livestock manures in some urban areas of China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 764-773.
- [32] Lipoth S L, Schoenau J J. Copper, zinc, and cadmium accumulation in two prairie soils and crops as influenced by repeated applications of manure [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, **170**(3): 378-386.
- [33] Bolan N, Adriano D, Mahimairaja S. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2004, **34**(3): 291-338.
- [34] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(8): 1500-1510.
- Wang M, Li S T, Ma Y B, *et al.* Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn, and Cd in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(8): 1500-1510.
- [35] 张丽娜, 宗良纲, 沈振国. 有机肥和生态肥对土壤中镉行为以及水稻生长的影响[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(6): 1182-1186.
- Zhang L N, Zong L G, Shen Z G. Effects of organic fertilizer and ecological fertilizer on behaviors of cadmium and rice growth in Cd contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(6): 1182-1186.
- [36] 陈曦, 杨丽标, 王甲辰, 等. 施用污泥堆肥对土壤和小麦重金属累积的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(8): 278-283.
- Chen X, Yang L B, Wang J C, *et al.* Effect of sewage sludge compost application on heavy metals accumulation in soil and wheat shoots[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(8): 278-283.
- [37] 叶必雄, 刘圆, 虞江萍, 等. 畜禽粪便农用区土壤——小麦系统中重金属污染及迁移[J]. *地理研究*, 2013, **32**(4): 645-652.
- Ye B X, Liu Y, Yu J P, *et al.* Heavy metal pollution and migration in soil-wheat system of different livestock manures agricultural areas [J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(4): 645-652.
- [38] 王瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(9): 1705-1719.
- Wang R, Wei Y S. Pollution and control of tetracyclines and heavy metals residues in animal manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(9): 1705-1719.

## CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City .....	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>10</sub> During Spring and Summer of Lanzhou .....	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan .....	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> in PM <sub>2.5</sub> and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing .....	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing .....	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) of Beijing and Baoding .....	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data .....	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals .....	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project .....	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares .....	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer .....	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors .....	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohé River Through High-throughput Sequencing .....	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay .....	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface .....	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland .....	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake .....	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China .....	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water .....	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate .....	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> .....	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride .....	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water .....	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes .....	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes .....	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater .....	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment .....	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process .....	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor .....	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor .....	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills .....	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse .....	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou .....	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure .....	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong .....	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain .....	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil .....	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil .....	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil .....	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N <sub>2</sub> O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism .....	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO <sub>2</sub> Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes .....	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil .....	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels .....	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism .....	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings .....	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize .....	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing .....	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing .....	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode .....	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States .....	RONG Yue (1726)