

王琼瑶, 李 森, 周 玲, 等. 猪粪-秸秆还田对土壤、作物重金属铜锌积累及环境容量影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1764–1772.
WANG Qiong-yao, LI Sen, ZHOU Ling, et al. Accumulation and environmental capacity of Cu and Zn in soil-crop with swine manure applying and straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1764–1772.

猪粪-秸秆还田对土壤、作物重金属铜锌积累及环境容量影响研究

王琼瑶¹, 李 森¹, 周 玲¹, 王贵胤², 张楚儿², 张世熔²

(1.四川省自然资源科学研究院, 成都 610015; 2.四川农业大学环境学院, 成都 611130)

摘 要:为评价畜禽养殖废弃物和种植业废弃物还田对土壤、作物安全性的影响,通过水稻-小麦轮作田间试验,设置不同猪粪-秸秆还田处理,研究土壤、作物重金属 Cu、Zn 的含量变化,开展污染评价和农田土壤重金属静态环境容量及猪粪最高施用量研究,以期为养殖业与种植业废弃物的农田利用和农业安全生产提供合理建议。结果表明:在猪粪-秸秆还田下,稻麦两季表层土壤重金属 Cu、Zn 含量略有升高,但处理间的差异性不显著($P>0.05$),且均在土壤环境质量一级标准范围内,土壤地累积指数 I_{geo} 均小于 0;稻麦籽粒重金属 Cu、Zn 含量均在食品安全国家标准食品中污染物限量之内,单因子污染指数 PI 均小于 1。因此,猪粪-秸秆还田对土壤、作物的 Cu、Zn 污染影响不显著。稻麦轮作后,土壤 Cu、Zn 静态环境容量均降低,最小静态环境容量分别为 11.32、135.06 kg·hm⁻²。综合考虑土壤铜锌的污染安全问题,在稻麦轮作后建议猪粪还田的最高施用量为 1 028.77 t·hm⁻²。

关键词:猪粪;秸秆;小麦;水稻;铜;锌;环境容量

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)09-1764-09 doi:10.11654/jaes.2016-0336

Accumulation and environmental capacity of Cu and Zn in soil-crop with swine manure applying and straw returning

WANG Qiong-yao¹, LI Sen¹, ZHOU Ling¹, WANG Gui-yin², ZHANG Chu-er², ZHANG Shi-rong²

(1.Sichuan Province Natural Resources Science Academy, Chengdu 610015, China; 2.College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: To assess the security of soil and crop after agricultural waste application, a field experiment under rice-wheat rotation with different swine manure-straw treatments was conducted to evaluate the pollution characteristics and dynamic changes of Cu and Zn in soil-crop, and estimate their static environmental capacity, and the highest application rate of swine manure. The Cu and Zn concentrations in the surface soil among the treatments slightly increased after the swine manure-straw incorporation, and showed no significant differences ($P>0.05$). Moreover, they in rice and wheat growing season were within the scope of Class I of the soil environment quality, and their cumulative indexes (I_{geo}) were less than zero. In addition, the Cu and Zn concentrations in rice and wheat grain were small than the threshold for the national food safety standards of food contaminants, and the pollution indexes (PI) were less than 1. Therefore, swine manure-straw returning did not have significant effects on the soil and crop. The static environmental capacities of soil Cu and Zn decreased after rice-wheat rotation, and the minimum static environmental capacities were 11.32 and 135.06 kg·hm⁻². Considering the Cu and Zn pollution safety problems, we suggest that the application amount of swine manure should be less than 1 028.77 t·hm⁻² after rice-wheat rotation.

Keywords: swine manure; straw; wheat; rice; Cu; Zn; environmental capacity

收稿日期:2016-03-15

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2014NZ0044)

作者简介:王琼瑶(1986—),女,四川雅安人,硕士研究生,助理研究员,从事农业资源环境与可持续发展研究。E-mail: wangqiongyao020@sina.com

随着我国畜禽养殖业的规模化快速发展^[1],由此带来的环境问题日益突出,目前已成为农村面源污染的主要来源之一^[2-3]。畜禽粪便是农业中常用的有机肥料,富含氮磷钾和有机质等养分^[4],还田施用能减少环境污染,提高土壤肥力,促进农业可持续发展^[5-6]。但近年来,国内外畜禽养殖中滥用或超量使用 Cu、Zn 等微量元素作为饲料添加剂,这些元素在畜禽体内的消化吸收利用率低,致使粪便中重金属 Cu、Zn 增高,经还田积累在土壤中造成环境污染^[7-9]。Zhang 等^[10]报道了东北地区畜禽粪便施用增加了农田土壤 Cu 污染的风险,且猪粪中 Cu 含量高于牛粪和鸡粪;叶必雄等^[11]研究指出长期施用畜禽粪便的土壤剖面中 Cu、Zn、Pb 等重金属含量高于未施用畜禽粪便的土壤。当土壤重金属含量超过土壤临界值时,将对农作物、农产品等造成严重污染^[12-13],并通过食物链危害人类健康^[14]。目前,关于畜禽粪便施用后对土壤-农作物重金属含量影响的研究较多,但主要集中于盆栽试验模拟^[15],或仅单一畜禽粪便施用对重金属迁移转化及对形态的影响^[12,16]等方面。而关于畜禽粪便-秸秆还田条件下土壤-农作物体系中重金属的迁移转化、污染评价和环境容量研究相对较少^[17]。成都平原秸秆资源丰富,秸秆还田施用可增加农田土壤有机质含量,还能促进土壤微生物繁殖和活性增强^[18-19],有效提高土壤有机碳的含量,对提高土壤肥力和作物产量、增强固碳能力都具有重要的科学意义^[20]。同时,秸秆还田有利于提高资源利用效率、减少环境污染和实现农业的可持续发展^[21]。因此,在本区域开展畜禽粪-秸秆还田对农田土壤、作物重金属含量影响的研究,评价污染情况、了解土壤环境容量,可为科学有效地帮助和指导农业生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验处理设置

试验小区:试验区选在崇州市桤泉镇现代农业研发基地,采用完全随机区组设计,每个处理设置 3 个重复,小区面积为 70.0 m²,小区间隔 0.5 m。

供试材料:供试猪粪采自崇州市养殖场,试验用氮肥为尿素(N 含量 46.3%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%),钾肥为氯化钾(K₂O 含量 60%)。水稻品种为冈优系列,小麦品种为内麦 836,水稻季所用为上一季小麦秸秆,其 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 0.72%、0.19%、1.01%,Cu 和 Zn 含量分别为 0.76、8.89 mg·kg⁻¹;小麦季所用秸秆为上一季水稻秸秆,其 N、P₂O₅、K₂O

含量分别为 0.84%、0.25%、1.05%,Cu 和 Zn 含量分别为 0.74、9.32 mg·kg⁻¹;猪粪含 N、P₂O₅、K₂O 分别为 0.82%、0.55%、0.48%,Cu 和 Zn 分别为 11.00、73.96 mg·kg⁻¹。

水稻季试验处理设置:按水稻产量 9000~10 500 kg·hm⁻²,各处理施肥量 N、P₂O₅、K₂O 分别为 180、90、90 kg·hm⁻²,其中猪粪和秸秆还田量以纯化肥为标准,计算两者 N、P₂O₅、K₂O 含量,不足由化肥补充。试验共设计 6 个处理,施肥方案见表 1。

表 1 水稻季试验方案设计(kg·hm⁻²)

Table 1 The experimental design for the rice season(kg·hm ⁻²)					
处理	尿素	过磷酸钙	氯化钾	猪粪	秸秆
CK	—	—	—	—	—
T1	337.76	746.27	149.25	—	—
T2	305.52	646.72	131.79	2 179.10	—
T3	241.34	445.22	96.72	6 567.16	—
T4	166.27	414.18	2.24	4 373.13	6 402.99
T5	170.00	355.67	22.09	6 567.16	4 268.66

小麦季试验处理设置:按小麦产量 6750~7500 kg·hm⁻²,各处理施肥量 N、P₂O₅、K₂O 分别为 180、90、90 kg·hm⁻²,其中猪粪和秸秆还田量以纯化肥为标准,计算两者 N、P₂O₅、K₂O 含量,不足由化肥补充。试验共设计 6 个处理,施肥方案见表 2。

表 2 小麦季试验方案设计(kg·hm⁻²)

Table 2 The experimental design for the wheat season(kg·hm ⁻²)					
处理	尿素	过磷酸钙	氯化钾	猪粪	秸秆
CK	—	—	—	—	—
T1	388.77	750.00	150.00	—	—
T2	349.89	649.39	132.44	2 190.00	—
T3	272.14	448.17	97.32	6 600.00	—
T4	194.38	416.25	2.25	4 395.00	6 435.00
T5	194.38	357.50	22.25	6 600.00	4 290.00

1.2 样品采集与测定

样品采集:分别在作物种植前和收割期采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土样测定重金属含量,植物收获后测定各器官(根、茎叶和籽粒)中重金属含量。

测定方法:将收获后的植物样清洗后 65 ℃恒温烘干,磨碎(0.5 mm)并用 HNO₃-HClO₄ 进行消煮,过滤后备测。土样风干、研磨过 0.2 mm 筛后用 HNO₃-HF-HClO₄ 三酸进行消煮、过滤。植物样和土样过滤液

通过原子吸收分光光度计测定重金属 Cu、Zn 含量。

1.3 研究方法

1.3.1 数据常规统计分析

采用 SPSS17.0 软件统计分析猪粪-秸秆还田处理下土壤和作物重金属 Cu、Zn 含量的差异,通过单因素方差分析(ANOVA)模块检验重金属含量差异显著性,进一步利用最小显著差数法(LSD)在 $P<0.05$ 水平上做多重比较。

1.3.2 土壤-植物重金属污染评价及环境容量分析

为确定不同施肥处理对农田土壤的污染情况,本文以中国土壤元素背景值为评价标准,采用地累积指数法,评价重金属的污染程度及其分级情况^[22]。

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n}$$

式中: I_{geo} 是地累积指数; C_n 是样品中元素 n 的浓度; B_n 是元素 n 的背景值; 1.5 是所取系数。

根据 Muller(1969)将 I_{geo} 分为 7 个等级,指数越大表明污染越严重,即:无污染($I_{geo} \leq 0$),轻-中等污染($0 < I_{geo} \leq 1$),中等污染($1 < I_{geo} \leq 2$),中-强污染($2 < I_{geo} \leq 3$),强污染($3 < I_{geo} \leq 4$),强-极强污染($4 < I_{geo} \leq 5$),极严重污染($I_{geo} > 5$)。

以国家食品卫生标准为评价标准,运用单因子指数法对两种作物籽粒重金属污染水平进行评价。

$$PI = \frac{C_n}{B_n}$$

式中: PI 为单一重金属污染指数; C_n 为样品中元素 n 的实测浓度; B_n 为元素 n 的背景值。

重金属单因子污染等级划分: $PI < 1$ 为清洁, $1 \leq PI < 2$ 为轻度污染, $2 \leq PI < 3$ 为中度污染, $PI \geq 3$ 为重度污染。

1.3.3 土壤重金属静态容量及废弃物施用量分析

根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)和研究区内农田土壤现有重金属含量,计算养殖废弃物的最高施用量。

土壤重金属静态容量计算方法如下:

$$Q_i = 2.25 \times (S_i - C_i)$$

式中: Q_i 为土壤重金属 i 的静态环境容量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; S_i 为土壤重金属 i 的临界值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_i 为土壤重金属 i 的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

废弃物的最高施用量按下式计算:

$$S_{\max} = \frac{Q_i}{W_{si}} \times 10^6$$

式中: $S_{\max}$ 为废弃物最高施用量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; W_{si} 为废弃物中重金属 i 的平均含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 猪粪-小麦秸秆(水稻季)还田重金属铜锌含量变化及环境容量研究

2.1.1 猪粪-小麦秸秆还田对土壤铜锌含量的影响

研究结果表明,在水稻种植前,农田表层土壤(0~20 cm)重金属 Cu、Zn 含量略低于下层土壤(20~40 cm),见图 1、图 2。这可能是由于灌溉水下渗作用使得下层土壤重金属含量富集相对较高,表层土壤 Cu 平均含量为 $29.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下层土壤 Cu 平均含量 $29.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;表层土壤 Zn 平均含量为 $39.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下层土壤 Zn 平均含量 $39.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在不同处理的水稻收割期,土壤 Cu 含量除 T5 以外,均表现为表层土壤略低于下层土壤,T5 表层土壤 Cu 平均含量为 $30.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,略高于下层土壤 Cu 平均含量 $29.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这可能是由于 T5 处理加入的猪粪和秸秆量最高,土壤 Cu 累积量略高于其他各处理,且表层土壤 Cu 累积量也略高于下层土壤。土壤 Zn 含量则表现为表层土壤略低于下层土壤(T4、T5 持平除外),表

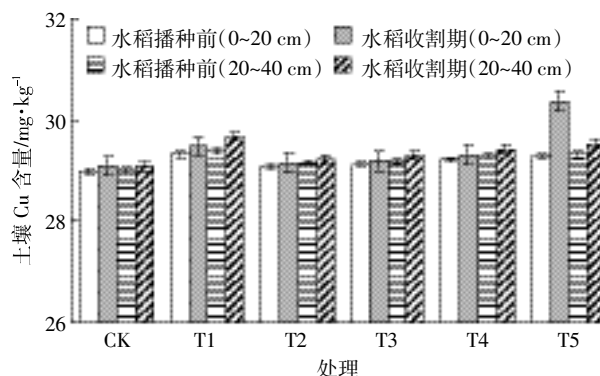


图 1 不同处理下水稻季土壤 Cu 含量

Figure 1 The Cu concentrations of soil in different treatments

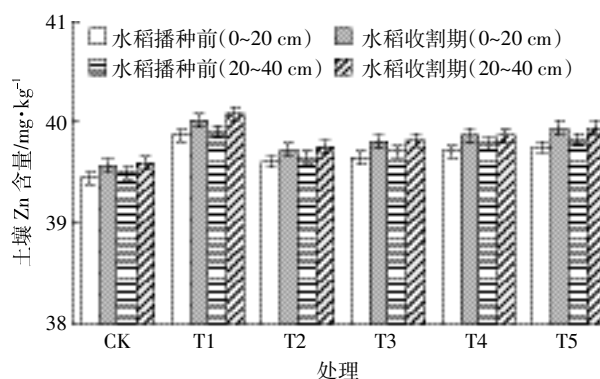


图 2 不同处理下水稻季土壤 Zn 含量

Figure 2 The Zn concentrations of soil in different treatments

层土壤Zn 平均含量为 39.88 mg·kg⁻¹,下层土壤 Zn 平均含量为 39.90 mg·kg⁻¹。

经过猪粪-秸秆还田处理,农田土壤 Cu、Zn 含量均表现为收割期略高于种植前。水稻种植前土壤 Cu、Zn 平均含量分别为 29.23、39.75 mg·kg⁻¹,收割期土壤 Cu、Zn 平均含量分别为 29.46、39.89 mg·kg⁻¹,表明猪粪-秸秆还田处理后对土壤 Cu、Zn 含量具有一定的累积作用。不同还田处理土壤 Cu(平均含量 29.35 mg·kg⁻¹)、Zn(平均含量 39.82 mg·kg⁻¹)均高于对照(Cu 平均含量 29.04 mg·kg⁻¹,Zn 平均含量 39.53 mg·kg⁻¹),且均在土壤环境质量一级标准(GB 15618—2008)范围内。在不同还田处理下,随着施入猪粪量的增加,土壤 Cu、Zn 含量均呈现出增加趋势,但处理之间差异性均不显著($P>0.05$),表明猪粪-秸秆还田处理对土壤 Cu、Zn 含量影响不显著。

2.1.2 猪粪-小麦秸秆还田对水稻铜锌含量的影响

不同猪粪-小麦秸秆还田处理下,水稻植物体各部分的 Cu、Zn 含量表现为各处理(T1~T5)均高于CK(图 3、图 4),其中 T1 水稻植株 Cu、Zn 平均含量最高,分别为 0.77、21.78 mg·kg⁻¹,CK 水稻植株 Cu、Zn

平均含量分别为 0.72、20.43 mg·kg⁻¹,这表明猪粪-秸秆还田模式与纯化肥种植相比,在一定程度上减少了水稻植株中 Cu、Zn 的累积。水稻植株 Cu、Zn 含量均表现为根>茎叶>籽粒,表明水稻的根对 Cu、Zn 的累积能力大于茎叶和籽粒。各处理水平下水稻根、茎叶、籽粒中Cu、Zn 含量的差异性均不显著($P>0.05$),表明猪粪-小麦秸秆还田对水稻植株中重金属的累积影响不显著。对照《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中 Cu、Zn 的临界值($Cu\leq 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $Zn\leq 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),水稻各器官 Cu、Zn 含量均在保障农业生产、维护人体健康的标准限量值以内。

2.1.3 猪粪-小麦秸秆还田土壤、水稻铜锌污染评价

以土壤元素背景值为标准,采用地累积指数法对水稻农田土壤进行评价,结果如表 3 所示。水稻农田土壤评价中 Cu、Zn 的地累积指数 I_{geo} 均小于 0,表明在猪粪-秸秆还田处理下水稻农田土壤没有受到 Cu、Zn 污染。土壤 Zn 的平均地累积指数为-1.915,Cu 的平均地累积指数为-0.211。与水稻播种前相比,水稻收割期土壤 Cu、Zn 的地累积指数略有升高,由地累积指数相比可见,Cu 比 Zn 对农田的污染危害更大。

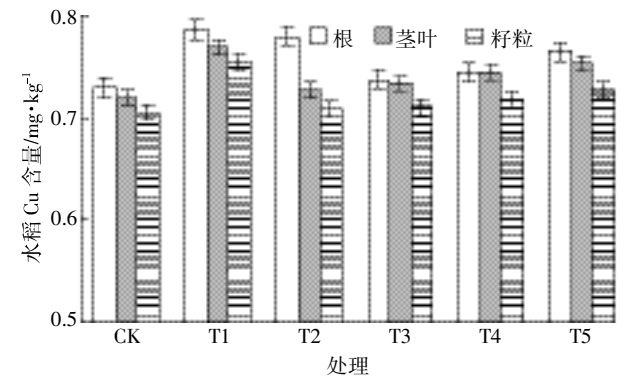


图 3 不同处理下水稻 Cu 含量

Figure 3 The Cu concentrations of rice in different treatments

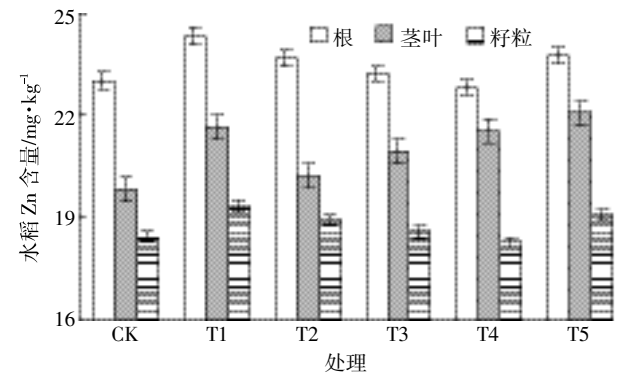


图 4 不同处理下水稻 Zn 含量

Figure 4 The Zn concentrations of rice in different treatments

表 3 不同还田处理下水稻季土壤铜锌地累积指数(I_{geo})

Table 3 The cumulative index (I_{geo}) of soil Cu and Zn under different treatments in rice season

处理	土壤 Cu 地累积指数				土壤 Zn 地累积指数			
	播种前 (0~20 cm)	收割期 (0~20 cm)	播种前 (20~40 cm)	收割期 (20~40 cm)	播种前 (0~20 cm)	收割期 (0~20 cm)	播种前 (20~40 cm)	收割期 (20~40 cm)
CK	-0.226	-0.221	-0.225	-0.221	-1.927	-1.922	-1.925	-1.921
T1	-0.209	-0.202	-0.206	-0.192	-1.912	-1.906	-1.910	-1.904
T2	-0.221	-0.218	-0.218	-0.214	-1.921	-1.916	-1.919	-1.916
T3	-0.219	-0.216	-0.216	-0.211	-1.920	-1.914	-1.917	-1.913
T4	-0.215	-0.210	-0.210	-0.205	-1.917	-1.912	-1.914	-1.912
T5	-0.211	-0.159	-0.209	-0.199	-1.916	-1.909	-1.913	-1.909

从重金属单因子污染指数分析结果(表4)来看,水稻植株内重金属 Cu、Zn 污染指数 PI 均小于 1,表明水稻未受到重金属污染,其中水稻籽粒 Cu、Zn 污染指数 PI 与根和茎叶相比为最小。水稻植株 Cu 污染指数 PI 在 0.07~0.08 之间,Zn 污染指数 PI 在 0.37~0.49 之间,相对而言 Zn 比 Cu 对水稻的污染危害更大。在还田处理下,各处理之间的重金属单因子污染指数差异性不显著,表明猪粪-秸秆还田对水稻植株中重金属的污染危害不显著。

表4 不同还田处理下水稻铜锌单项因子污染指数(PI)

Table 4 The single factor pollution index(PI) of rice Cu and Zn in different treatments

处理	水稻 Cu 单因子污染指数			水稻 Zn 单因子污染指数		
	根	茎叶	籽粒	根	茎叶	籽粒
CK	0.07	0.07	0.07	0.46	0.40	0.37
T1	0.08	0.08	0.08	0.49	0.43	0.39
T2	0.08	0.07	0.07	0.47	0.40	0.38
T3	0.07	0.07	0.07	0.46	0.42	0.37
T4	0.07	0.07	0.07	0.46	0.43	0.37
T5	0.08	0.08	0.07	0.48	0.44	0.38

2.1.4 水稻季土壤铜锌环境容量研究

根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)来计算水稻季土壤 Cu、Zn 静态环境容量以及猪粪的最高施用量(表5)。经统计,在水稻播种前土壤 Cu、Zn 平均静态环境容量分别为 13.06、135.67 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,水稻收割期土壤 Cu、Zn 平均静态环境容量分别为 12.60、135.37 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,猪粪-小麦秸秆还田处理后土壤 Cu、Zn 平均静态环境容量分别降低了 3.52%、0.22%。按照土壤 Cu 环境质量一级标准计算(Cu 含量 $\leq 22.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在水稻播种前、水稻收割期的猪粪平均最高施用量分别为 1 187.45、1 145.69 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$;按照土壤

Zn 环境质量一级标准计算(Zn 含量 $\leq 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在水稻播种前、水稻收割期的猪粪平均最高施用量分别为 1 834.24、1 830.21 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。综合考虑土壤铜锌的污染安全问题,在该季后种植所需猪粪还田的最高施用量为 1 032.86 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.2 猪粪-水稻秸秆(小麦季)还田重金属铜锌含量变化及环境容量研究

2.2.1 猪粪-水稻秸秆还田对土壤铜锌含量的影响

研究结果表明,小麦季农田表层土壤 T1~T4 Cu、Zn 含量略低于下层土壤(图5、图6)。这可能是由于灌溉水下渗作用使得下层土壤 Zn 含量富集相对较高,表层土壤 Cu、Zn 平均含量分别为 29.32、39.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下层土壤 Cu、Zn 平均含量分别为 29.44、39.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。小麦种植前与收割期相比,经过猪粪-秸秆还田处理,农田土壤 Cu、Zn 含量均表现为收割期略高于种植前,小麦种植前土壤 Cu、Zn 平均含量分别为 29.46、39.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,收割期土壤 Cu、Zn 平均含量分别为 29.53、39.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明猪粪-秸秆还田处理后对土壤 Cu、Zn 含量具有一定的累积作用。在小麦收割期,土壤 Cu、Zn 含量均表现为各处理(T1~T5)高于 CK,且其中 T1 为最高,Cu、Zn 平均含量分别为 29.72、40.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明猪粪-秸秆还田模式与纯化肥种植(T1)相比,猪粪-秸秆在增加土壤有机质的同时,降低了 Cu、Zn 在土壤中的活性,减少了游离态重金属在土壤中的累积。

不同还田处理土壤 Cu(平均含量 29.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Zn(平均含量 39.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均高于对照(Cu 平均含量 29.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Zn 平均含量 39.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),均在土壤环境质量一级标准(GB 15618—2008)范围内。在不同还田处理下,处理之间土壤 Cu、Zn 含量的差异性均为不显著($P>0.05$),表明猪粪-秸秆还田处理对土壤重金属 Cu、Zn 含量影响不显著。与水稻季相比,小

表5 不同还田处理下水稻季土壤铜锌静态环境容量及猪粪最高施用量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 5 The static environmental capacities of soil Cu and Zn and the highest amount of swine manure under different treatments in rice season($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理	土壤 Cu 静态环境容量		针对 Cu 的猪粪最高施用量		土壤 Zn 静态环境容量		针对 Zn 的猪粪最高施用量	
	播种前	收割期	播种前	收割期	播种前	收割期	播种前	收割期
CK	13.51	13.31	1 228 183.80	1 209 776.38	136.18	135.93	1 841 207.77	1 837 861.50
T1	12.71	12.21	1 155 576.77	1 109 558.22	135.25	134.89	1 828 583.21	1 823 715.91
T2	13.25	13.10	1 204 663.21	1 190 346.33	135.82	135.56	1 836 340.47	1 832 842.10
T3	13.15	12.96	1 195 459.50	1 178 074.72	135.72	135.42	1 834 971.54	1 830 864.76
T4	12.93	12.69	1 175 006.82	1 153 531.50	135.56	135.29	1 832 842.10	1 829 191.62
T5	12.83	11.36	1 165 803.11	1 032 860.65	135.46	135.11	1 831 473.17	1 826 757.97

麦季各处理土壤 Cu、Zn 含量略高于水稻季。这可能是由于水稻季施肥后土壤重金属残留,使本底值有所升高^[23-24]。

2.2.2 猪粪-水稻秸秆还田对小麦铜锌含量的影响

不同猪粪-水稻秸秆还田处理下,小麦植株各部分的 Cu、Zn 含量表现为各处理(T1~T5)均高于 CK,其中 T1 小麦 Cu、Zn 含量最高,分别为 0.79、21.26 mg·kg⁻¹,CK 小麦 Cu、Zn 平均含量分别为 0.73、20.42 mg·kg⁻¹(图 7、图 8),表明猪粪-秸秆还田模式与纯化肥种植相比,在一定程度上减少了小麦植株 Cu、Zn 的累积。小麦植株 Cu、Zn 含量均表现为根>茎叶>籽粒,表明根对 Cu、Zn 的累积能力大于茎叶和籽粒。各处理水平下小麦根、茎叶、籽粒中的 Cu、Zn 含量的差异性均不显著($P>0.05$),表明猪粪-秸秆还田对小麦植株中重金属的累积影响不显著。依据《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中 Cu、Zn 的临界值($\text{Cu} \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{Zn} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),小麦各器官 Cu、Zn 含量均在保障农业生产、维护人体健康的标准限量值以内。

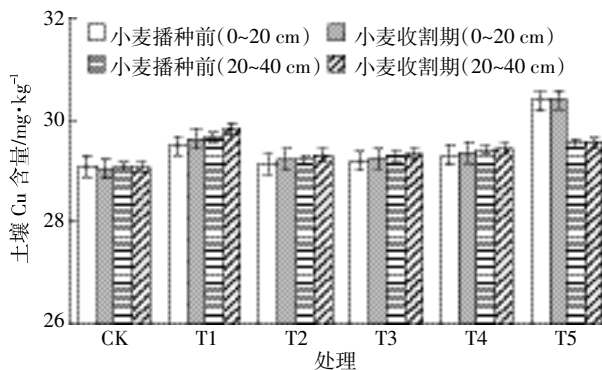


图 5 不同处理下小麦季土壤 Cu 含量

Figure 5 The Cu concentrations of soil in different treatments in wheat season

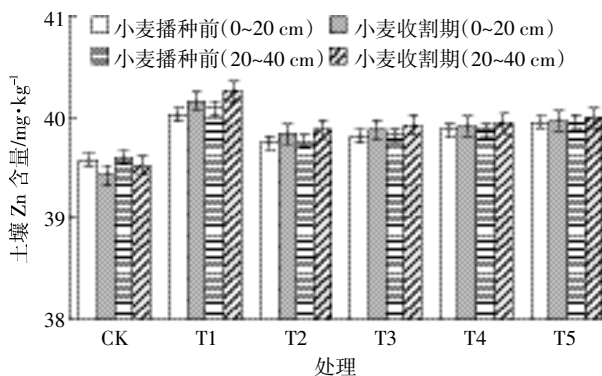


图 6 不同处理下小麦季土壤 Zn 含量

Figure 6 The Zn concentrations of soil in different treatments in wheat season

2.2.3 猪粪-水稻秸秆还田土壤、小麦铜锌污染评价

以土壤元素背景值为标准,采用地累积指数法对小麦农田土壤进行评价,结果如表 6 所示。小麦农田土壤评价中 Cu、Zn 的地累积指数 I_{geo} 均小于 0,表明在猪粪-秸秆还田处理下小麦农田土壤未受到 Cu、Zn 污染。土壤 Zn 的平均地累积指数为 -1.912, Cu 的平均地累积指数为 -0.204。与小麦播种前相比,收割期土壤 Cu、Zn 的地累积指数略有升高,由地累积指数相比, Cu 比 Zn 对农田土壤的污染危害更大。与水稻季相比,土壤 Cu、Zn 地累积指数都略有升高,可能是由于经过稻麦两季的秸秆-猪粪还田,增加了 Cu、Zn 在土壤中的累积,从而增大了地累积指数。

从重金属单因子污染指数分析(表 7)看,小麦植株体内 Cu、Zn 污染指数 PI 均小于 1,表明小麦未受到重金属污染,其中小麦籽粒 Cu、Zn 污染指数 PI 与根和茎叶相比为最小。小麦植株 Cu 污染指数 PI 在 0.07~0.08 之间, Zn 污染指数 PI 在 0.36~0.48 之间,相对而言 Zn 比 Cu 对小麦的污染危害更大。在还田处理下,各处理之间的重金属单因子污染指数差异性不

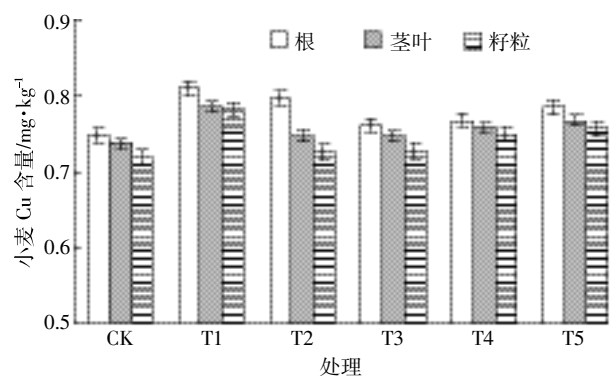


图 7 不同处理下小麦 Cu 含量

Figure 7 The Cu concentrations of wheat in different treatments

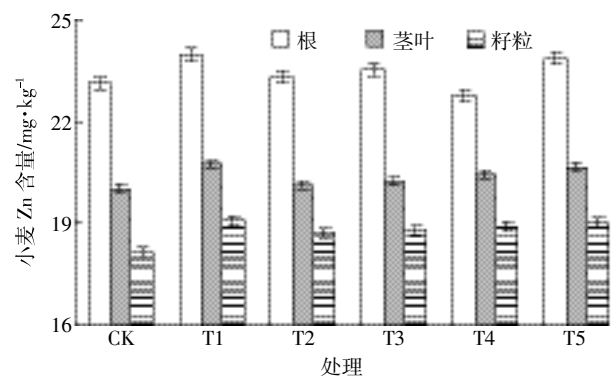


图 8 不同处理下小麦 Zn 含量

Figure 8 The Zn concentrations of wheat in different treatments

表 6 不同还田处理下小麦季土壤铜锌地累积指数(I_{geo})

处理	土壤 Cu 地累积指数				土壤 Zn 地累积指数			
	播种前	收割期	播种前	收割期	播种前	收割期	播种前	收割期
	(0~20 cm)	(0~20 cm)	(20~40 cm)	(20~40 cm)	(0~20 cm)	(0~20 cm)	(20~40 cm)	(20~40 cm)
CK	-0.221	-0.223	-0.221	-0.222	-1.922	-1.928	-1.921	-1.924
T1	-0.202	-0.195	-0.192	-0.185	-1.906	-1.901	-1.904	-1.898
T2	-0.218	-0.214	-0.214	-0.210	-1.916	-1.913	-1.916	-1.912
T3	-0.216	-0.213	-0.211	-0.208	-1.914	-1.912	-1.913	-1.910
T4	-0.210	-0.208	-0.205	-0.204	-1.912	-1.910	-1.912	-1.909
T5	-0.159	-0.158	-0.199	-0.198	-1.909	-1.908	-1.909	-1.907

表 7 不同还田处理下小麦铜锌单项因子污染指数(PI)

Table 7 The single factor pollution index(PI) of wheat Cu and Zn in different treatments

处理	小麦 Cu 单因子污染指数			小麦 Zn 单因子污染指数		
	根	茎叶	籽粒	根	茎叶	籽粒
CK	0.07	0.07	0.07	0.46	0.40	0.36
T1	0.08	0.08	0.08	0.48	0.41	0.38
T2	0.08	0.07	0.07	0.47	0.40	0.37
T3	0.08	0.07	0.07	0.47	0.40	0.38
T4	0.08	0.08	0.07	0.46	0.41	0.38
T5	0.08	0.08	0.08	0.48	0.41	0.38

显著,表明猪粪-秸秆还田对小麦植株的重金属污染危害不显著。

2.2.4 小麦季土壤铜锌环境容量研究

根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)计算小麦季土壤 Cu、Zn 静态环境容量以及猪粪的最高施用量(表 8)。经统计,在小麦播种前土壤 Cu、Zn 平均静态环境容量分别为 12.60、135.37 kg·hm⁻²,小麦收割期土壤 Cu、Zn 平均静态环境容量分别为 12.49、135.26 kg·hm⁻²,猪粪-水稻秸秆还田处理后土壤 Cu、Zn 平均静态环境容量分别降低了 0.87%、0.08%。与

水稻季相比,小麦季土壤 Cu、Zn 静态环境容量也呈现降低的趋势。按照土壤 Cu 环境质量一级标准计算(Cu 含量≤22.6 mg·kg⁻¹),在小麦播种前、小麦收割期的猪粪平均最高施用量分别为 1 145.69、1 135.29 t·hm⁻²;按照土壤 Zn 环境质量一级标准计算(Zn 含量≤100 mg·kg⁻¹),在小麦播种前、小麦收割期的猪粪平均最高施用量分别为 1 830.21、1 828.68 t·hm⁻²。综合考虑土壤铜锌的污染安全问题,在该季后种植所需猪粪还田的最高施用量为 1 028.77 t·hm⁻²。

2.3 小结

农田消纳是废弃物资源化利用的重要途径^[25]。畜禽粪便还田施用增加了农田土壤重金属污染的风险,土壤重金属的含量和累积特征与畜禽粪便的重金属含量、施用量和施用频率等因素有关。本研究所选猪粪 Cu、Zn 含量不高,在还田过程中,土壤重金属累积是一个长期的过程,实验结果也表明,经过稻麦两季猪粪-秸秆还田,土壤对 Cu、Zn 具有累积效应。鉴于此,综合考虑农田系统的可持续性和作物的安全性,通过监测土壤重金属含量,计算土壤环境容量,得出最高猪粪施用量,为指导下一季及后期猪粪-秸秆的还田提供安全施用量范围,同时为畜禽养殖废弃物和

表 8 不同还田处理下小麦季土壤铜锌静态环境容量及猪粪最高施用量(kg·hm⁻²)

Table 8 The static environmental capacities of soil Cu and Zn and the highest amount of swine manure under different treatments in wheat season(kg·hm⁻²)

处理	土壤 Cu 静态环境容量		针对 Cu 的猪粪最高施用量		土壤 Zn 静态环境容量		针对 Zn 的猪粪最高施用量	
	播种前	收割期	播种前	收割期	播种前	收割期	播种前	收割期
CK	13.31	13.38	1 209 776.38	1 215 912.19	135.93	136.19	1 837 861.50	1 841 359.87
T1	12.21	11.88	1 109 558.22	1 079 901.83	134.89	134.54	1 823 715.91	1 819 000.72
T2	13.10	12.90	1 190 346.33	1 172 961.55	135.56	135.34	1 832 842.10	1 829 800.04
T3	12.96	12.85	1 178 074.72	1 167 848.38	135.42	135.24	1 830 864.76	1 828 431.11
T4	12.69	12.61	1 153 531.50	1 146 373.06	135.29	135.17	1 829 191.62	1 827 518.49
T5	11.36	11.32	1 032 860.65	1 028 770.11	135.11	135.06	1 826 757.97	1 825 997.46

种植业废弃物的资源化利用提供科学依据。

3 结论

(1)在猪粪-秸秆还田处理下,稻麦两季农田土壤Cu、Zn含量均在土壤环境质量一级标准(GB 15618—2008)范围内,不同猪粪-秸秆还田处理对土壤Cu、Zn含量影响不显著。采用地累积指数法评价,农田土壤Cu、Zn的地累积指数 I_{geo} 均小于0,但相对而言Cu比Zn对农田土壤的污染危害更大。

(2)在猪粪-秸秆还田处理下,稻麦植物体各部分的Cu、Zn含量均在保障农业生产、维护人体健康的标准限量值以内,不同猪粪-秸秆还田处理对农作物Cu、Zn含量影响不显著。采用单项因子污染指数法评价,作物体内Cu、Zn污染指数 PI 均小于1,但相对而言Zn比Cu对作物的污染危害更大。

(3)在猪粪-秸秆还田处理下,土壤对Cu、Zn具有累积效应,在稻麦轮作后,土壤Cu、Zn的最小静态环境容量分别为11.32、135.06 kg·hm⁻²,综合考虑土壤Cu、Zn的安全问题,在该轮稻麦轮作后,建议猪粪还田的最高施用量为1 028.77 t·hm⁻²。

参考文献:

- [1] 李江涛,钟晓兰,赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2837-2845.
LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHAO Qi-guo. Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10):2837-2845.
- [2] 龚俊勇,彭小珍,廖新伟. 广东省梅州市农地畜禽粪便环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3):25-28.
GONG Jun-yong, PENG Xiao-zhen, LIAO Xin-di. Risk assessment of livestock manure in Meizhou area of Guangdong[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3):25-28.
- [3] Han J Ko, Ki Y Kim, Hyeon T Kim, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. *Waste Management*, 2008, 28(5):813-820.
- [4] 王成贤,石德智,沈超峰,等. 畜禽粪便污染负荷及风险评估:以杭州市为例[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11):2562-2569.
WANG Cheng-xian, SHI De-zhi, SHEN Chao-feng, et al. Pollution load and risk assessment of livestock manure: A case study in Hangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11):2562-2569.
- [5] 贾中涛,王文亮,汤建华,等. 畜禽粪便有机肥与氮肥配施对玉米土壤理化性状的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6P):34-39.
JIA Zhong-tao, WANG Wen-liang, TANG Jian-hua, et al. Effect of animal manure organic fertilizer and nitrogen combined application on maize soil physical & chemical properties[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(6P):34-39.
- [6] Mahanta D, Bhattacharyya R, Gopinath K A, et al. Influence of farmyard manure application and mineral fertilization on yield sustainability, carbon sequestration potential and soil property of gardenpea-french bean cropping system in the Indian Himalayas[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164:414-427.
- [7] 彭来真,刘琳琳,张寿强,等. 福建省规模化养殖场畜禽粪便中的重金属含量[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2010, 39(5):523-527.
PENG Lai-zhen, LIU Lin-lin, ZHANG Shou-qiang, et al. Heavy metals content in manure of commercial animal farms in Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2010, 39(5):523-527.
- [8] 吴二社,张松林,刘焕萍,等. 农村畜禽养殖与土壤重金属污染[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3):285-288.
WU Er-she, ZHANG Song-lin, LIU Huan-ping, et al. Livestock and poultry breed aquatics in rural areas and soil heavy metal pollutions[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3):285-288.
- [9] 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.
- [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] 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, 32(12):1708-1714.
YE Bi-xiong, LIU Yuan, YU Jiang-ping, 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, 32(12):1708-1714.
- [12] 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 He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, 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.
- [13] 刘全东,蒋代华,高利娟,等. 畜禽粪便有机肥源重金属在土壤-蔬菜系统中累积、迁移规律的研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(1):252-256.
LIU Quan-dong, JIANG Dai-hua, GAO Li-juan, et al. Research progress on heavy metal accumulation and migration of livestock dung organic fertilizer in soil-vegetable system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1):252-256.
- [14] 许 芳,梁合斌,樊 娟,等. 福州地区农业用地土壤重金属环境容量评价[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(4):6-8.
XU Fang, LIANG He-cheng, FAN Juan, et al. Evaluation of soil heavy metal environmental capacity of agricultural land in Fuzhou area[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2009, 16(4):6-8.
- [15] 张 妍,崔骁勇,罗 维,等. 小白菜对猪粪中高Cu和Zn的富集与转运[J]. 环境科学, 2011, 32(5):1482-1488.
ZHANG Yan, CUI Xiao-yong, LUO Wei, et al. Bioconcentration and

- translocation of Cu and Zn by *Brassica sinensis* L. planted in high Cu and Zn contaminated pig manure-applied soils[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5):1482-1488.
- [16] 徐秋桐, 鲍陈燕, 张莉, 等. 施用富铜锌猪粪对低丘茶园土壤及茶叶重金属积累的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):204-210.
XU Qiu-tong, BAO Chen-yan, ZHANG Li, et al. Effects of copper and zinc-rich pig manure application on accumulation of heavy metal in soil and tea plant of hilly tea garden[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):204-210.
- [17] 庞妍, 唐希望, 吉普辉, 等. 关中平原畜禽粪便重金属农用风险估算[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12):3824-3832.
PANG Yan, TANG Xi-wang, JI Pu-hui, et al. The agricultural pollution risk estimation of livestock manures on heavy metals in Guanzhong plain[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(12):3824-3832.
- [18] 魏赛金, 李昆太, 涂晓嵘, 等. 稻草还田配施化肥与腐杆菌剂下的土壤微生物及有机碳组分特征[J]. 核农学报, 2012, 26(9):1317-1321.
WEI Sai-jin, LI Kun-tai, TU Xiao-rong, et al. The characteristics of microbes and organic carbon composition in the soils applied together with chemical fertilizer, straw incorporation and microbial agent[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(9):1317-1321.
- [19] 谭周进, 李倩, 李建国, 等. 稻草还田量对晚稻土壤微生物数量及活度的动态影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3):670-673.
TAN Zhou-jin, LI Qian, LI Jian-guo, et al. Effect of returning quantity of rice-straw to soil on quantities and activity of microbial in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):670-673.
- [20] 史然, 陈晓娟, 沈建林, 等. 稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展[J]. 土壤, 2013, 45(2):193-198.
SHI Ran, CHEN Xiao-juan, SHEN Jian-lin, et al. A review on application of rice straw in soil carbon sequestration and greenhouse gases emission in paddy ecosystems[J]. *Soils*, 2013, 45(2):193-198.
- [21] 李明德, 吴海勇, 聂军, 等. 稻草及其循环利用后的有机废弃物还田效用研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(17):3572-3579.
LI Ming-de, WU Hai-yong, NIE Jun, et al. Utilities of straw and wastes of straw recycling returning on rice planting[J]. *China Agriculture Science*, 2010, 43(17):3572-3579.
- [22] Förstner U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: Geochemical background, man's influence and environmental impact[J]. *Geojournal*, 1981, 5(5):417-432.
- [23] 张云青, 张涛, 李洋, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在不同农田土壤中生物有效性动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):87-96.
ZHANG Yun-qing, ZHANG Tao, LI Yang, et al. Bioavailability dynamics of heavy metals in livestock and poultry manure added to different farmland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):87-96.
- [24] 董同喜, 张涛, 李洋, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在水稻土中生物有效性动态变化[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2):621-629.
DONG Tong-xi, ZHANG Tao, LI Yang, et al. Bioavailability dynamics of heavy metals in manure and their effect on uptake of rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2):621-629.
- [25] 李瀚, 邓欧平, 胡佳, 等. 成都平原农业废弃物施用下稻田面水氮磷动态变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):485-493.
LI Han, DENG Ou-ping, HU Jia, et al. Dynamics of nitrogen and phosphorus in paddy field water under agricultural residue applications in Chengdu plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):485-493.