

孙国峰, 陈虞雯, 盛 婧, 等. 稻麦农田土壤 Cu 累积条件下猪粪安全施用量[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2361-2366.

SUN Guo-feng, CHEN Yu-wen, SHENG Jing, et al. Safety dosage of pig manure based on soil copper accumulation on rice and wheat rotated farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2361-2366.

稻麦农田土壤 Cu 累积条件下猪粪安全施用量

孙国峰, 陈虞雯, 盛 婧, 张丽萍, 周 炜, 陈留根, 郑建初*

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/江苏省农业科学院循环农业研究中心, 南京 210014)

摘 要: 采用田间定位试验, 研究了稻麦农田猪粪替代化肥后耕层土壤重金属 Cu 的变化特征, 并基于耕层土壤 Cu 年累积速率探讨了猪粪安全施用量。结果表明, 水稻收获期, 耕层土壤总 Cu 和有效态 Cu 含量, 以及总 Cu 和有效态 Cu 的累积速率, 均随着猪粪施用比例的提高呈现线性增加趋势。由耕层 0~10 cm 土壤总 Cu 年累积速率可知, 稻麦农田猪粪可安全施用年限, 随着猪粪施用比例的提高呈现幂方程的降低趋势。在农业安全生产二级标准内, 20 年和 50 年尺度上猪粪氮替代化学氮肥比例分别为 50.3%~62.7% 和 19.1%~26.1%。据此, 基于该定位试验的耕层土壤 Cu 累积效应, 建议 20 年尺度上猪粪氮替代率不超过 50%, 50 年尺度上猪粪氮替代率不超过 20%。

关键词: 有机肥; 重金属; 累积速率; 替代率

中图分类号: S141.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)12-2361-06 doi:10.11654/jaes.2016-0831

Safety dosage of pig manure based on soil copper accumulation on rice and wheat rotated farmland

SUN Guo-feng, CHEN Yu-wen, SHENG Jing, ZHANG Li-ping, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, ZHENG Jian-chu*

(Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: A field experiment was conducted with different dosage of pig manure on rice and wheat rotated farmland. Five mixed soil samples were taken in the 0~10 cm and 10~20 cm soil layers in the rice harvest period in 2013 and 2014, respectively. The contents of total and available copper were determined by atomic absorption spectrometry after HF-HNO₃-HClO₄ heating digestion method and DTPA extraction method respectively to analyze the characteristic changes and accumulation rate of total and available copper under different dosage of pig manure. The analysis of pig manure safety use ages was according to the secondary standard of agricultural safety production combined with total copper annual accumulation rate of different dosages of pig manure in the 0~10 cm soil layer. The field experiments results clearly demonstrated that the contents and accumulation rate of total and effective copper showed a linearly increasing trend with the increased pig manure application ratio in the arable soil layer on rice harvest. By average annual accumulation rate of total copper, safety use ages of pig manure showed a decreasing trend of power equation with the increased pig manure application ratio in the 0~10 cm soil layer. Replacement ratios of pig manure nitrogen to chemical nitrogen were 50.3%~62.7% in 20 years scale, and 19.1%~26.1% in 50 years scale according to the secondary standard of agricultural safety production. In all, based on soil copper accumulation rate, it is suggested that replacement ratios of pig manure nitrogen are less than 50% in 20 years scale, and within 20% in 50 years scale in the rice and wheat field experiment.

Keywords: manure; heavy metal; accumulation rate; replacement ratio

收稿日期: 2016-06-21

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201203050-2)

作者简介: 孙国峰(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农牧结合与耕层构建方面研究。E-mail: sgf515@163.com

* 通信作者: 郑建初 E-mail: zjc@jaas.ac.cn

随着我国畜禽规模化养殖程度的快速发展,畜禽粪便产生量已高达每年 3.2×10^9 t^[1],成为农业面源污染的重要来源之一。据报道,2013年江苏省规模养殖占畜禽生产的比例,生猪、肉禽、蛋禽和奶牛分别达85%、96%、93%和93%。江苏省畜禽粪便排泄量达 5.3×10^7 t,而利用率不到60%,N、P、K养分浪费量分别达到了 1.43×10^5 、 9.1×10^4 t和 1.2×10^5 t,如将这些资源利用,可为 3.33×10^5 hm²农田提供肥料^[2],又可减少或避免规模养殖废弃物直接排放的环境污染风险,对促进农牧结合、高效循环农业技术的推广应用具有十分重要的理论和实践意义。然而,饲料添加剂的普遍使用,已造成规模化养殖场畜禽粪便重金属Cu、Zn等元素含量超标严重^[3]。柳开楼等^[4]以不同猪粪施用年限(0、5、16、22、30年)土壤Cu、Zn、Cr累积速率为依据,按照猪粪施用量($22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)折算红壤稻田猪粪安全施用时间分别为21.6、66.5、43.8年,故重金属Cu是影响猪粪安全利用的主要限制因素之一。张树清等^[5]对全国7个省市32个规模猪场调查分析指出,猪粪Cu含量范围在 $10.7 \sim 1591 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均约为 $491.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。猪粪中Cu含量超标率在69.0%~81.6%之间^[3,6]。已有研究表明,连续大量施用畜禽粪便,土壤重金属Cu等元素会有明显累积趋势^[7-10],并对土壤中重金属Cu等元素的有效性^[11-12]及其形态转化^[13-15]有显著影响;作物可食部位Cu等元素含量也会有所提高,其影响大小与有机肥种类、用量、土壤类型、pH值和作物种类等因素有关^[16]。另外,土壤中有毒重金属积累到一定程度,不仅会导致土壤退化、农作物产量和品质下降,还会通过径流、淋失作用污染地表水和地下水,恶化水文环境,并可能直接毒害植物或通过食物链途径危害人体健康^[17]。目前国内外关于农田土壤重金属Cu的累积特征研究较多,但在猪粪定量施用条件下重金属Cu年累积速率及其用量控制方面的研究不够。本试验以稻麦两熟制农田为对象,研究不同量猪粪施用后土壤总Cu和有效态Cu含量的变化规律及其年累积速率,并依此探讨稻麦农田猪粪适宜的施用量,为规模养猪场有机肥的安全利用技术推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验始于2010年11月,在江苏省农业科学院六合实验基地($32^{\circ}29'N$, $118^{\circ}36'E$)进行。该区属北亚热带季风湿润气候区,气候温和、四季分明,年平均温度

$15.3^{\circ}C$,年平均降雨量970 mm,年日照时数2200 h,年平均无霜期215 d,该区主要为冬小麦-水稻两熟制。

试验田土壤类型为黄褐土,耕层为重壤土。试验前耕层(0~20 cm)土壤容重 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,有机质 $12.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $5.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $105.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总Cu $34.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态Cu $3.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

猪粪来源于江苏省明天农牧科技有限公司,位于江苏省南京市六合区竹镇金磁村。麦季猪粪平均含N 2.01%、 P_2O_5 2.61%和 K_2O 0.81%,稻季猪粪平均含N 1.66%、 P_2O_5 2.66%和 K_2O 1.35%;猪粪平均含总Cu $172.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态Cu $25.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,根据猪粪用量,设置8个处理:①不施肥(CK),②化肥(CF),③25%猪粪+75%化肥(25%PM+75%CF,其中25%猪粪氮+35%化肥氮作基(蘖)肥施用、40%化肥氮作穗肥施用),④50%猪粪+50%化肥(50%PM+50%CF,其中50%猪粪氮+10%化肥氮作基(蘖)肥施用、40%化肥氮作穗肥施用),⑤75%猪粪+25%化肥(75%PM+25%CF,其中60%猪粪氮作基肥、15%猪粪氮+25%化肥氮作穗肥施用),⑥100%猪粪(100%PM,按基肥:穗肥为6:4分两次施用),⑦125%猪粪(125%PM,按基肥:穗肥为6:4分两次施用),⑧200%猪粪(200%PM,按基肥:穗肥为6:4分两次施用)。每个处理3次重复,各小区面积90 m²。选用当地主推品种宁麦16、南粳44为供试材料。耕作方式为旋耕,耕作深度8~12 cm。施肥量以化肥处理为参照,麦季施纯氮 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷(P_2O_5)、钾(K_2O)均为 $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,稻季施纯氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷(P_2O_5)、钾(K_2O)均为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,处理②至处理⑥均施用等量氮,处理⑦施氮量为化肥处理的1.25倍,处理⑧施氮量为化肥处理的2倍。根据测定的猪粪养分含量,按氮含量计算各猪粪处理麦季、稻季猪粪施用量,磷钾肥不足时分别用过磷酸钙(12%)和氯化钾(60%)补齐。麦季氮肥按基肥:穗肥为6:4施用,磷钾肥于耕作前作基肥一次撒施;稻季氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥为4:2:4施用,磷肥于耕作前作基肥一次撒施,钾肥作基肥和穗肥两次施用,每次50%。猪粪和化肥均采用人工撒施方式。其他田间管理措施按当地一般高产农田管理方式进行。

1.3 样品采集与分析

在2013年和2014年水稻收获时,采集5点混合样品,各处理中3次重复单独采样。分0~10 cm和

10~20 cm 两个层次采集土样,带回实验室自然风干后,剔除石砾及植物残茬等杂物,过筛后待测。

采用 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮和 DTPA 浸提(NY/T 890—2004)-原子吸收分光光度法分别测定土壤总 Cu 和有效态 Cu 含量。

1.4 数据分析

水稻收获期土壤 Cu 含量的年均累积速率和猪粪可安全施用年限的计算公式如下:

$$\text{HMI}_{\text{PM}} = (\text{HM}_{\text{PM}} - \text{HM}_{\text{CF}}) / n \quad (1)$$

$$\text{HMT}_{\text{PM}} = (100 - \text{HM}_{\text{CF}}) / \text{HMI}_{\text{PM}} \quad (2)$$

式中: HMI_{PM} 为不同用量猪粪处理土壤重金属 Cu 年均累积速率, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; HM_{PM} 为不同用量猪粪施用后第 n 年土壤重金属 Cu 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; HM_{CF} 为化肥处理第 n 年土壤重金属 Cu 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; n 为猪粪施用年限, a ; HMT_{PM} 为不同用量猪粪可安全施用年限, a ; 100 为农业安全生产二级标准土壤 pH 值为 6.5~7.5 的 Cu 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

采用 Office 2013 和 SPSS 10.0 软件进行数据处理及作图,处理间多重比较用 LSD 法。

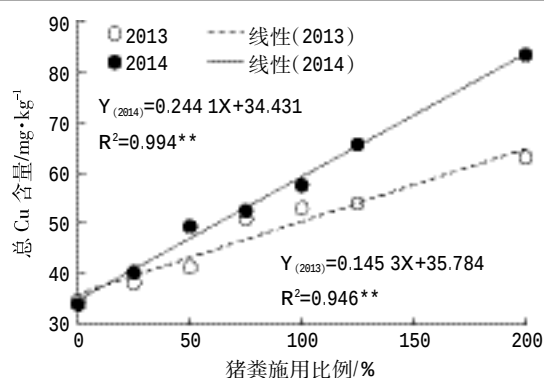
2 结果与分析

2.1 不同猪粪施用量对土壤总 Cu 含量的影响

水稻收获期,土壤总 Cu 含量随着猪粪施用比例提高呈线性增加趋势。2013 年和 2014 年水稻收获期,耕层 0~10 cm 土壤总 Cu 含量与猪粪施用比例的关系可分别用线性方程 $Y_{(2013)} = 0.1453X + 35.784$ 和 $Y_{(2014)} = 0.2441X + 34.431$ 来拟合(图 1),决定系数(R^2)分别为 0.946** 和 0.994**($n=7$);下层 10~20 cm 土壤总 Cu 含量与猪粪施用比例的关系可分别用线性方程 $Y_{(2013)} = 0.0656X + 34.41$ 和 $Y_{(2014)} = 0.0929X + 34.047$ 来拟合(图 2),决定系数(R^2)分别为 0.969** 和 0.886**($n=7$),均达到极显著水平。具体来看,2013 年和 2014 年水稻收获期,各猪粪处理耕层 0~10 cm 土壤总 Cu 含量变化范围分别为 38.2~62.9、40.1~83.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即不同量猪粪施用 3 至 4 年耕层 0~10 cm 土壤总 Cu 含量增加幅度为 1.4~20.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;下层 10~20 cm 土壤总 Cu 含量变化范围分别为 36.5~47.3、35.7~53.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即不同量猪粪施用 3 至 4 年下层 10~20 cm 土壤总 Cu 含量增加幅度为 -0.9~5.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,连续施用猪粪,耕层土壤总 Cu 存在累积现象,尤其是高量猪粪施用后总 Cu 含量增加幅度较大。

2.2 不同猪粪施用量对土壤有效态 Cu 含量的影响

水稻收获期,土壤有效态 Cu 与总 Cu 含量变化



* 表示显著性水平 $P < 0.05$, ** 表示显著性水平 $P < 0.01$ 。下同

图 1 耕层 0~10 cm 土壤总 Cu 与猪粪施用比例的关系
Figure 1 Relationship between total copper and pig manure application ratio in the 0~10 cm soil layer

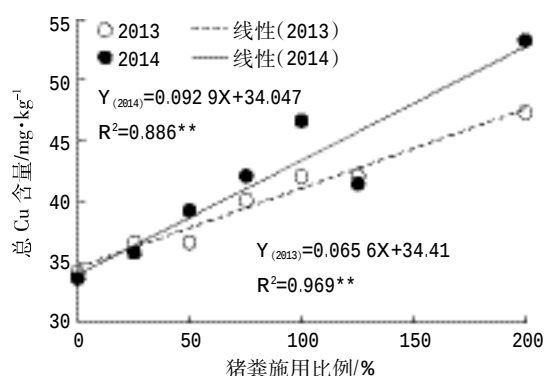


图 2 下层 10~20 cm 土壤总 Cu 与猪粪施用比例的关系
Figure 2 Relationship between total copper and pig manure application ratio in the 10~20 cm soil layer

规律一致,均随着猪粪施用比例提高呈线性增加趋势。2013 年和 2014 年水稻收获期,耕层 0~10 cm 土壤有效态 Cu 含量与猪粪施用比例的关系可分别用线性方程 $Y_{(2013)} = 0.0644X + 6.0234$ 和 $Y_{(2014)} = 0.0989X + 6.0486$ 来拟合(图 3),决定系数(R^2)分别为 0.844** 和 0.962**($n=7$);下层 10~20 cm 土壤有效态 Cu 含量与猪粪施用比例的关系可分别用线性方程 $Y_{(2013)} = 0.0413X + 3.3149$ 和 $Y_{(2014)} = 0.044X + 3.4943$ 来拟合(图 4),决定系数(R^2)分别为 0.983** 和 0.946**($n=7$),均达到极显著水平。具体来看,2013 年和 2014 年水稻收获期,不同猪粪处理耕层 0~10 cm 土壤有效态 Cu 含量变化范围分别为 6.5~16.7、8.2~24.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即不同量猪粪施用 3 至 4 年耕层 0~10 cm 土壤有效态 Cu 含量增加幅度为 1.2~7.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;下层 10~20 cm 土壤有效态 Cu 含量变化范围分别为 4.2~12.0、3.7~11.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即不同量猪粪施用后 3 至 4 年下层 10~20 cm 土壤有效态 Cu 含量增加幅度为 -0.5~1.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,连

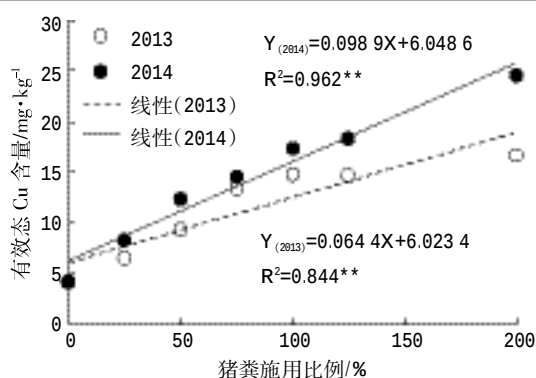


图3 耕层0~10 cm土壤有效态Cu与猪粪施用比例的关系
Figure 3 Relationship between available copper and pig manure application ratio in the 0~10 cm soil layer

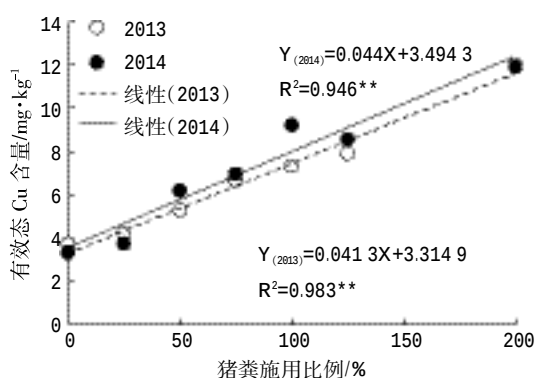


图4 下层10~20 cm土壤有效态Cu与猪粪施用比例的关系
Figure 4 Relationship between available copper and pig manure application ratio in the 10~20 cm soil layer

续施用猪粪,耕层土壤有效态Cu存在累积现象,尤其是高量猪粪施用后有效态Cu累积速度较快。

2.3 不同猪粪处理耕层土壤Cu年累积速率

水稻收获期,耕层0~10 cm土壤总Cu和有效态Cu年累积速率均随着猪粪施用比例提高呈线性增加趋势。猪粪施用后的3至4年,以化肥处理总Cu含量(34.7、33.7 mg·kg⁻¹)为基准,耕层0~10 cm土壤总Cu年累积速率与猪粪施用比例的关系可分别用线性方程 $Y_{(3)}=0.0466X+0.6227$ 和 $Y_{(4)}=0.0601X+0.305$ 来拟合(图5),决定系数(R^2)分别为0.925**和0.992** ($n=6$);以化肥处理有效态Cu含量(4.2、4.0 mg·kg⁻¹)为基准,耕层0~10 cm土壤有效态Cu年累积速率与猪粪施用比例的关系可分别用线性方程 $Y_{(3)}=0.0184X+1.0144$ 和 $Y_{(4)}=0.0222X+0.8317$ 来拟合(图6),决定系数(R^2)分别为0.794*和0.976** ($n=6$),均达到显著水平。具体来看,猪粪施用后的3至4年,各猪粪处理耕层0~10 cm土壤总Cu年累积速率变化范围分别为1.2~9.4、1.6~12.4 mg·kg⁻¹·a⁻¹,即年季间

变异范围在0.4~3.0 mg·kg⁻¹·a⁻¹之间;土壤有效态Cu年累积速率变化范围分别为0.8~4.2、1.1~5.1 mg·kg⁻¹·a⁻¹,即年季间变异范围在0.3~0.9 mg·kg⁻¹·a⁻¹之间。可见,就耕层土壤Cu年累积速率而言,不同量猪粪施用后前4年耕层土壤总Cu和有效态Cu年均累积速率普遍高于前3年,尤其是高量猪粪施用后差异较大。

2.4 基于土壤Cu累积的猪粪施用量

根据农业安全生产标准(二级标准),pH值在6.5~7.5之间,耕层土壤Cu含量不超过100 mg·kg⁻¹,结合不同猪粪施用比例的耕层土壤总Cu年均累积速率可知,猪粪可安全施用年限随着猪粪施用比例提高呈现降低的趋势。猪粪施用后的3至4年的可安全施用年限与其施用比例的关系可分别用乘幂方程

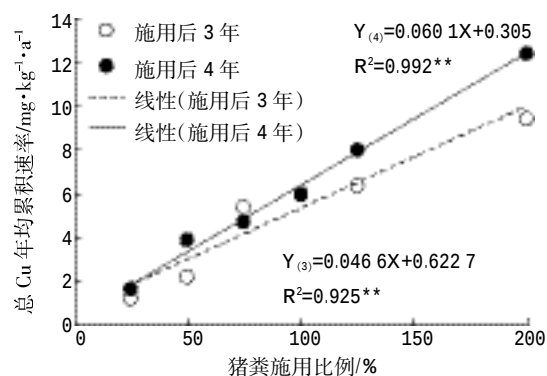


图5 耕层0~10 cm土壤总Cu年均累积速率与猪粪施用比例的关系

Figure 5 Relationship between average annual accumulation rate of total copper and pig manure application ratio in the 0~10 cm soil layer

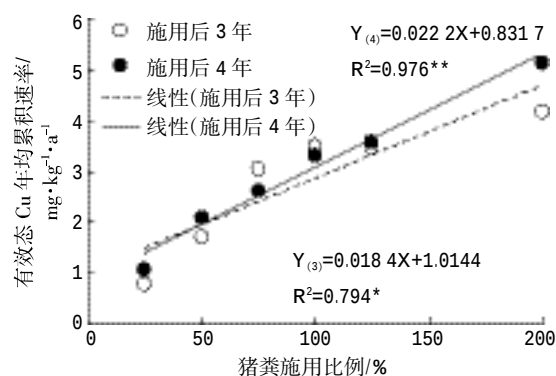


图6 耕层0~10 cm土壤有效态Cu年均累积速率与猪粪施用比例的关系

Figure 6 Relationship between average annual accumulation rate of available copper and pig manure application ratio in the 0~10 cm soil layer

$Y_{(3)}=1\,511.8X^{-1.045}$ 和 $Y_{(4)}=816.9X^{-0.947}$ 来拟合(图7),决定系数(R^2)分别为 0.944** 和 0.985**(n=6),均达到极显著水平。根据上述猪粪可安全施用年限与其施用比例的拟合方程,在农业安全生产二级标准内 20 年尺度上,猪粪氮替代化学氮肥比例为 50.3%~62.7%,50 年尺度上猪粪氮替代化学氮肥比例为 19.1%~26.1%。为此,基于本试验耕层土壤 Cu 累积效应,建议 20 年尺度上猪粪氮替代比例不超过 50%,50 年尺度上猪粪氮替代比例不超过 20%。

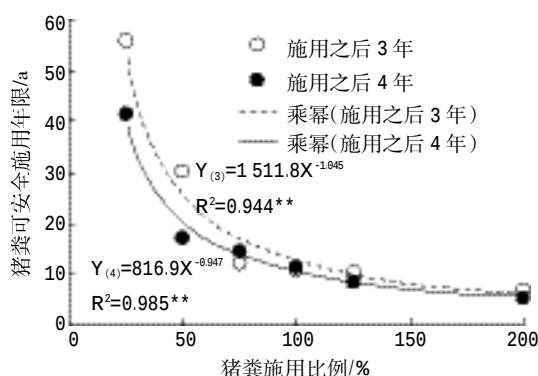


图 7 猪粪可安全施用年限与其施用比例的关系

Figure 7 Relationship between safety use ages and application ratio of pig manure

3 讨论

畜牧养殖业配方饲料添加铜等微量元素较为普遍,由于畜禽对添加剂中微量元素的利用率通常较低,这些微量元素大部分随粪便排出,故畜禽粪便有机肥料还田已成为农田重金属主要污染源之一^[3,9]。王婷等^[18]通过文献查阅和采样分析指出,整个水稻种植体系范围内各输入项(包括大气沉降、磷肥、畜禽粪便和灌溉水)中 92.4%~95.2%的 Cu 来自畜禽粪便。国内外研究表明,经常施用猪粪能够增加土壤表层 Cu 含量^[10,13,19-20]。本研究表明,连续施用不同量猪粪后第 3、4 年水稻收获期,土壤总 Cu 和有效态 Cu 含量均随着猪粪施用比例提高呈线性增加趋势。这与前人研究结果一致。Lipoth 等^[12]研究发现,长期施用有机肥会造成土壤中有有效态 Cu 含量的增加。姚丽贤等^[11]研究结果表明,施用粪肥明显提高了土壤中有有效态 Cu 的含量及其所占的比例。本研究也发现,水稻收获期各猪粪处理土壤有效态 Cu 占总 Cu 的比例为 16.9%~30.1%,显著($P<0.05$)高于不施肥(有效态 Cu 占 9.4%)和化肥(有效态 Cu 占 11.9%~12.0%)处理,主要是由于猪粪本身带入了有效态 Cu 的缘故。

从源头上控制农田土壤重金属污染是农业可持续发展和保障农产品质量安全的首要措施。国内外关于有机肥使用量及其重金属含量控制方面已有些报道,如:李祖章等^[10]通过定位试验研究指出,每年稻田以 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 猪粪+50%化肥配合施用,一般不会造成农田土壤有害重金属元素的积累;王婷等^[18]通过物质流分析法和情景分析法指出,畜禽粪便中铜含量应控制在 $35\sim95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内;Yang 等^[21]对试验点进行环境容量年限分析,若按照 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的量投入有机肥,Cu 将在 15 年内达到土壤容量标准。本研究根据猪粪可安全施用年限与其施用比例的乘幂拟合方程,基于耕层土壤总 Cu 年均累积速率,在农业安全生产二级标准内 50 年和 20 年尺度上猪粪氮替代比例变化范围分别为 19.1%~26.1%和 50.3%~62.7%,折算猪粪年施用量分别为 $5.6\sim7.6$ 、 $14.7\sim18.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。尽管 20 年尺度上猪粪施用量与李祖章等^[10]研究结果相近,但若按 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 猪粪施用量,则拟合结果显示耕层土壤总 Cu 含量将在 6.9~7.8 年达到土壤容量标准,远小于 Yang 等^[21]提出的 15 年。另外,上述水稻收获期各猪粪施用比例的耕层 0~10 cm 土壤总 Cu 年均累积速率变化范围为 $1.2\sim9.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,与双季稻土壤重金属 Cu 的年增加量变动范围 $0.2\sim9.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 相近,大于单季稻土壤重金属 Cu 的年增加量变动范围 $0.1\sim4.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[18]。这可能与气候条件、种植模式、土壤类型、有机肥 Cu 含量等因素有关。为此,基于本试验的耕层土壤总 Cu 累积效应,建议稻麦农田 20 年尺度上猪粪氮替代比例不超过 50%,即猪粪年施用量不超过 $14.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;50 年尺度上猪粪氮替代比例不超过 20%,即猪粪年施用量不超过 $5.9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。若猪粪总 Cu 含量由本文 $172.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提升至平均含量 $491.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (年施用猪粪中 Cu 总量保持一致),则稻麦农田 20 年尺度理论上猪粪年施用量不超过 $5.1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

4 结论

水稻收获期,耕层土壤总 Cu 和有效态 Cu 含量,以及总 Cu 和有效态 Cu 年均累积速率,均随着猪粪施用比例提高呈线性增加趋势。猪粪可安全施用年限,随着猪粪施用比例提高呈现乘幂方程的降低趋势,其中耕层土壤总 Cu 年累积速率为猪粪安全利用的重要限制因子之一。基于猪粪施用 3 至 4 年耕层土壤总 Cu 年均累积速率在农业安全生产二级标准内,20 年尺度上猪粪氮替代化学氮肥比例为 50.3%~

62.7%, 50 年尺度上猪粪氮替代化学氮肥比例为 19.1%~26.1%。据此, 基于本试验的耕层土壤 Cu 累积效应, 建议 20 年尺度上猪粪氮替代比例不超过 50%, 50 年尺度上猪粪氮替代比例不超过 20%。

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.
WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. China Environmental Science, 2006, 26(5): 614-617.
- [2] 郑建初, 陈留根, 甄若宏, 等. 江苏省现代循环农业发展研究[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(1): 5-8.
ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, ZHEN Ruo-hong, et al. Study on modern circular agriculture development in Jiangsu Province[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2010, 26(1): 5-8.
- [3] 姜萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 942-947.
JIANG Ping, JIN Sheng-yang, HAO Xiu-zhen, et al. Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5): 942-947.
- [4] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 303-313.
LIU Kai-lou, LI Da-ming, HUANG Qing-hai, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 303-313.
- [5] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪便主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 822-829.
- [6] 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.
LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 392-397.
- [7] Cang L, Wang Y J, Zhou D M, et al. Study of heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province[J]. Journal of Environmental Science, 2004, 16(3): 371-374.
- [8] Han F X, Kingery W L, Selim H M, et al. Accumulation of heavy metals in a long-term poultry waste amended soil[J]. Soil Science, 2000, 165(3): 260-268.
- [9] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soil in England and Wales[J]. Science of the Total Environment, 2003, 311(1/2/3): 205-219.
- [10] 李祖章, 谢金防, 蔡华东, 等. 农田土壤承载畜禽粪便能力研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(8): 140-145.
LI Zu-zhang, XIE Jin-fang, CAI Hua-dong, et al. Environmental loading capacity of farmland soil for dung of livestock and poultry[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(8): 140-145.
- [11] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 等. 施用禽畜粪对两种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 127-135.
YAO Li-xian, LI Guo-liang, HE Zhao-huan, et al. Bioavailability of As, Cu and Zn in two soils as affected by application of livestock and poultry manure[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(1): 127-135.
- [12] 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.
- [13] 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 Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, 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.
- [14] Zeng F R, Shafaqat A, Zhang H T, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environment Pollution, 2011, 159(1): 84-91.
- [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.
LIU Ping, WANG Hui, DONG Yuan-hua, et al. Effect of organic fertilizer application on copper speciation in soil[J]. Soils, 2013, 45(5): 910-917.
- [16] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480.
WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(2): 466-480.
- [17] Hsu J H, Lo S L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure[J]. Environment Pollution, 2001, 114(1): 119-127.
- [18] 王婷, 张倩, 杨海雪, 等. 农田土壤中铜的来源分析及控制阈值研究[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(4): 774-784.
WANG Ting, ZHANG Qian, YANG Hai-xue, et al. Analysis of copper source in farmland soil and threshold study for soil pollution control[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(4): 774-784.
- [19] Novak J M, Watts D W, Stoke K C. Copper and zinc accumulation, profile distribution and crop removal in coastal plain soils receiving long-term intensive applications of swine manure[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(5): 1513-1522.
- [20] Berenguer P, Cela S, Santiveri F, et al. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(4): 1056-1061.
- [21] Yang X L, Wang Y Q, Yan J, et al. Investigation on the accumulation of heavy metals from organic fertilizer in soil and plant[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(7): 1021-1025.