

基于稻麦轮作农田土壤锌累积的猪粪安全施用量

孙国峰, 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:【目的】针对江苏省规模养殖废弃物超排, 严重引起环境污染且资源大量浪费的突出问题, 开展了稻麦农田猪粪有机肥替代化肥后耕层土壤重金属 Zn 的变化特征研究, 并基于耕层土壤 Zn 累积速率探讨了猪粪有机肥安全施用量, 为规模养猪场有机肥安全利用技术推广提供科学依据。【方法】采用田间定位试验方法, 根据稻麦两熟制农田猪粪有机肥用量, 设对照 (CK)、化肥 (CF)、25% 猪粪 + 75% 化肥 (25%PM)、50% 猪粪 + 50% 化肥 (50%PM)、75% 猪粪 + 25% 化肥 (75%PM)、100% 猪粪 (100%PM)、125% 猪粪 (125%PM) 和 200% 猪粪 (200%PM), 共 8 个处理, 每个处理 3 次重复。在 2013 和 2014 年水稻收获期, 分 0—10 cm 和 10—20 cm 两个土层采集 5 点混合土壤样品。采用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮和 DTPA 浸提—原子吸收分光光度法分别测定土壤总 Zn 和有效态 Zn 含量, 分析不同量猪粪有机肥施用后土壤总 Zn 和有效态 Zn 的变化特征和累积速率。根据农业安全生产二级标准, 结合不同猪粪有机肥施用量的耕层土壤总 Zn 年累积速率, 分析稻麦农田猪粪有机肥可安全施用年限。【结果】稻麦农田猪粪有机肥施用后第 3、4 年水稻收获期, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层总 Zn 和有效态 Zn 含量, 以及总 Zn 和有效态 Zn 的累积速率, 均随着猪粪有机肥施用比例提高呈线性增加趋势。2014 年水稻收获期, 不同猪粪有机肥处理耕层 0—10 cm 土壤总 Zn 和有效态 Zn 含量的变化范围分别为 91.1~236.5 和 8.9~49.4 mg/kg, 年累积速率变化范围分别为 6.6~42.9 和 1.9~2.0 mg/(kg·a), 即耕层土壤年累积的有效态 Zn 含量占总 Zn 含量的比例为 28.0%~31.3%。由耕层 0—10 cm 土壤总 Zn 的年累积速率可知, 稻麦农田猪粪有机肥可安全施用年限随着猪粪有机肥施用比例提高呈现幂函数的降低趋势。在农业安全生产二级标准内 50 年尺度上猪粪有机肥氮替代比例为 11.1%~12.5%, 20 年尺度上猪粪有机肥氮替代比例为 33.6%~35.5%。【结论】猪粪有机肥连续施用后, 稻麦两熟农田耕层土壤 Zn 存在累积效应, 并随着猪粪有机肥施用量增加呈线性增强的趋势。基于该定位试验的耕层土壤总 Zn 累积速率, 建议短期猪粪有机肥氮替代率不超过 35%, 中长期猪粪有机肥氮替代率不超过 12.5%。

关键词: 有机肥; 锌; 累积速率; 替代率; 安全用量

Safety dosage of pig manure based on zinc accumulation in rice and wheat rotated farmland

SUN Guo-feng, SHENG Jing, ZHANG Li-ping, ZHOU Wei, CHEN Liu-gen, ZHENG Jian-chu*
(Institute of Agricultural Resources and Environments/Circular Agriculture Research Center,
Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: 【Objectives】 In order to solve the outstanding problem of waste ultra-discharge by scale aquaculture in Jiangsu province, which caused serious environmental pollution and massive waste of nutrient resources, the characteristic changes of heavy metal zinc of soil were studied after chemical fertilizer replaced by pig manure, in addition, pig manure application amount of security was discussed based on tith soil zinc accumulation rate. The results will provide theoretical basis for popularization and application of pig manure security technique in the scale pig farms. 【Methods】 A field experiment was conducted with different dosages of pig manure on rice and wheat rotated farmland. Eight treatments were designed: control (CK), chemical fertilizer (CF), 25% pig

收稿日期: 2016-06-28 接受日期: 2016-09-27

基金项目: 农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (201203050-2) 资助。

作者简介: 孙国峰 (1982—), 男, 江苏泗洪人, 副研究员, 博士, 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 E-mail: zjc@jaas.ac.cn

manure and 75% chemical fertilizer (25% PM), 50% pig manure and 50% chemical fertilizer (50% PM), 75% pig manure and 25% chemical fertilizer (75% PM), 100% pig manure (100% PM), 125% pig manure (125% PM), 200% pig manure (200% PM), and each treatment was repeated three times. 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 zinc 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 zinc under different dosage of pig manure. The analysis of the safety application age limit of pig manure application was according to the secondary standard of agricultural safety production combined with the total zinc annual accumulation rate of different dosages of pig manure in the 0–10 cm soil layer. **【 Results 】** The content and accumulation rate of total and effective zinc showed a linearly increase with the increased application ratio of pig manure in the 0–10 cm and 10–20 cm soil layers on rice harvest during the first 3–4 years. The contents of total and effective zinc were 91.1–236.5 and 8.9–49.4 mg/kg, and the accumulation rate of total and effective zinc were 6.6–42.9 and 1.9–12.0 mg/(kg·a) in the 0–10 cm soil layer under different pig manure treatments in 2014, respectively. The percentage of accumulation content of effective zinc varied from 28.0% to 31.3% of accumulation content of total zinc in the arable soil layer. By accumulation rate of total zinc, the safety application dosage limit of pig manure showed a decreasing trend of power equation with the increased application ratio of pig manure in the 0–10 cm soil layer. The replacement ratios of pig manure nitrogen were 11.1%–12.5% in 50 years scale, and 33.6%–35.5% in 20 years scale according to the secondary standard of agricultural production. **【 Conclusions 】** The cumulative effect of zinc existed due to use of pig manure, and a linearly increasing trend is observed with the increased ratios of pig manure in the arable soil layer on rice and wheat rotated farmland. Based on accumulation rate of soil zinc, it is suggested that the replacement ratios of pig manure nitrogen are less than 35% for short-term use, and within 12.5% for medium-and long-term use in the practical use.

Key words: manure; Zinc; accumulation rate; replacement ratio; safety dosage

随着我国畜禽规模化养殖的快速发展, 畜禽粪便排放量已高达每年 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 年江苏规模养殖在畜禽生产中的主体地位基本确立, 如生猪、肉禽、蛋禽和奶牛规模养殖占畜禽生产的比例分别为 85%、96%、93% 和 93%。江苏畜禽粪便排泄量达 5.3×10^7 t, 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 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、高效循环低碳农业技术的推广应用具有十分重要的意义。有机化肥配合施用有利于作物稳产高产、改良土壤理化性质、提高土壤肥力和肥料利用率^[3]。然而, 伴随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锌等元素含量超标严重^[4]。据调查, 规模猪场产生的猪粪中锌含量范围在 71.3~8710 mg/kg 之间, 平均含量约为 1012.8 mg/kg^[5-7], 其中猪粪锌含量超标率达

58.6% 以上^[4, 7]。已有研究表明, 连续大量施用畜禽粪便, 土壤重金属锌等元素会有明显的累积趋势^[8-11], 并对土壤中重金属锌等元素的有效性^[12-14]及其形态转化^[15-17]有显著影响; 作物可食部位锌等元素含量也会有所提高^[17], 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^[19]。另外, 土壤有害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, 而且还会通过径流、淋失作用污染地表水和地下水, 并可能直接毒害植物或通过食物链途径危害人体健康^[20]。目前国内外关于农田土壤重金属锌的累积特征研究较多, 但在猪粪有机肥定量施用条件下重金属锌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研究对象, 研究不同猪粪有机肥施用量条件下土壤总锌和有效态锌含量的变化规律及其年累积速率, 并依此探讨稻麦两熟农田猪粪有机肥适宜的施用量, 为规模养猪场有机肥安全利用技术推广应用提供科学依据。

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°29'N, 118°36'E) 进行。该区属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℃, 年平均降雨量 970 mm, 年日照时数 2200 h, 年平均无霜期 215 天, 该区主要为冬小麦—水稻轮作的一年两熟制。

试验田土壤类型属黄马肝土, 耕层为重壤土。试验前耕层 (0—20 cm) 土壤容重 1.38 g/cm³、有机质 12.1 g/kg、全氮 0.91 g/kg、全磷 0.55 g/kg、速效钾 105.6 mg/kg、总锌 66.8 mg/kg、有效态锌 1.60 mg/kg。

猪粪有机肥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镇金磁村。麦季猪粪有机肥平均含 N 2.0%、P₂O₅ 2.6% 和 K₂O 0.8%; 稻季猪粪有机肥平均含 N 1.7%、P₂O₅ 2.7% 和 K₂O 1.4%; 猪粪有机肥含总锌 893.5 mg/kg、有效态锌 183.5 mg/kg。

1.2 试验设计

采用随机区组设计, 根据猪粪有机肥用量, 设置: 1) 不施肥 (CK); 2) 化肥 (CF); 3) 25% 猪粪 + 75% 化肥 (25%PM, 其中 25% 猪粪作基肥施用); 4) 50% 猪粪 + 50% 化肥 (50%PM, 其中 50% 猪粪作基肥施用); 5) 75% 猪粪 + 25% 化肥 (75%PM, 其中 60% 猪粪作基肥、15% 猪粪 + 25% 化肥做穗肥施用); 6) 100% 猪粪 (100%PM, 按基肥: 穗肥为 6: 4 分两次施用); 7) 125% 猪粪 (125%PM, 按基肥: 穗肥为 6: 4 分两次施用); 8) 200% 猪粪 (200%PM, 按基肥: 穗肥为 6: 4 分两次施用), 共 8 个处理, 3 次重复。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, 耕层厚度为 10—12 cm。施肥量以化肥处理为参照, 麦季施纯氮 225 kg/hm², 磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 均为 112.5 kg/hm², 稻季施纯氮 300 kg/hm², 磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 均为 150 kg/hm², 处理 1) 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 100% 猪粪处理, 麦季、稻季猪粪施用量分别为 11.17、18.05 t/hm² (干重), 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: 穗肥比例 6: 4, 磷钾肥于耕作前作基肥一次撒施; 稻季氮肥按基肥: 分蘖肥: 穗肥比例 4: 2: 4 施用, 磷钾肥于耕作

前作基肥一次撒施, 钾肥作基肥和穗肥两次施用, 每次 50%。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 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 共 2 个层次采集土壤, 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 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮和 DTPA 浸提 (NY/T890-2004) —原子吸收分光光度法分别测定土壤总 Zn 和有效态 Zn 含量。

1.4 数据分析

采用 Office 2013 和 SPSS10.0 软件进行数据处理及作图, 用 LSD 法进行处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同猪粪有机肥施用量对土壤总 Zn 含量的影响

水稻收获期, 土壤总锌含量随着猪粪有机肥施用比例提高呈线性增加趋势 (图 1)。2013 和 2014 年水稻收获期, 耕层 0—10 cm 土壤总锌含量与猪粪有机肥施用比例的关系可分别用线性方程 $y_{2013} = 0.5312x + 76.721$ 和 $y_{2014} = 0.8359x + 70.65$ 来拟合, 决定系数 (R^2) 分别为 0.9456 和 0.9935 ($n = 7$); 下层 10—20 cm 土壤总锌含量与猪粪有机肥施用比例的关系可分别用线性方程 $y_{2013} = 0.1518x + 72.411$ 和 $y_{2014} = 0.3574x + 65.552$ 来拟合, R^2 分别为 0.9324 和 0.963 ($n = 7$), 均达到显著水平。具体来看, 2013 和 2014 年水稻收获期, 不同猪粪有机肥处理耕层 0—10 cm 土壤总锌含量变化范围分别为 84.5~174.8mg/kg 和 91.1~236.5 mg/kg, 即不同量猪粪有机肥施用后第 3 至 4 年耕层 0—10 cm 土壤总锌含量的增加幅度为 6.6~61.7 mg/kg; 10—20 cm 土壤总锌含量变化范围分别为 73.5~99.7mg/kg 和 71.9~137.2 mg/kg, 即不同量猪粪有机肥施用后第 3 至 4 年下层 10—20 cm 土壤总锌含量的增加幅度为 -1.5~37.5 mg/kg。可见, 连续大量施用猪粪有机肥, 土壤总锌含量存在明显的累积现象, 尤其是耕层 0—10 cm 土壤总锌含量增加幅度较大。

2.2 不同猪粪有机肥施用量对土壤有效态 Zn 含量的影响

水稻收获期, 土壤有效态锌与总锌含量变化规律一致, 均随着猪粪有机肥施用比例提高呈线性增

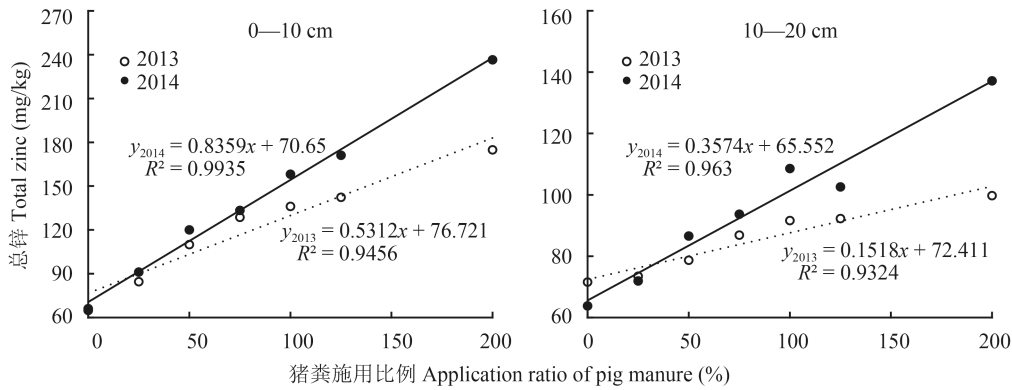


图 1 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤总 Zn 与猪粪有机肥施用比例的关系

Fig. 1 Relationship between total zinc and application ratio of pig manure in 0—10 cm and 10—20 cm soil layers

加趋势 (图 2)。2013 和 2014 年水稻收获期, 耕层 0—10 cm 土壤有效态锌含量与猪粪有机肥施用比例的关系可分别用线性方程 $y_{2013} = 0.1292x + 5.84$ 和 $y_{2014} = 0.2357x + 3.5832$ 来拟合, R^2 分别为 0.819 和 0.9872 ($n = 7$); 10—20 cm 土壤有效态锌含量与猪粪有机肥施用比例的关系可分别用线性方程 $y_{2013} = 0.0406x + 2.794$ 和 $y_{2014} = 0.0884x + 0.7464$ 来拟合, R^2 分别为 0.8767 和 0.939 ($n = 7$), 均达到显著水平。具体来看, 2013 和 2014 年水稻收获期, 不同猪粪有机肥处理耕层 0—10 cm 土壤有效态锌含量变化范围分别

为 5.9~27.5 和 8.9~49.4 mg/kg, 即不同量猪粪有机肥施用后第 3 至 4 年耕层 0—10 cm 土壤有效态锌含量的增加幅度为 3.0~21.9 mg/kg; 10—20 cm 土壤有效态锌含量变化范围分别为 3.0~10.1 和 2.1~19.2 mg/kg, 即不同量猪粪有机肥施用后第 3 至 4 年 10—20 cm 土壤有效态锌含量的增加幅度为 -0.9~9.2 mg/kg。可见, 连续大量施用猪粪有机肥, 土壤有效态锌含量存在明显的累积现象, 尤其是耕层 0—10 cm 土壤有效态锌含量累积速度较快。

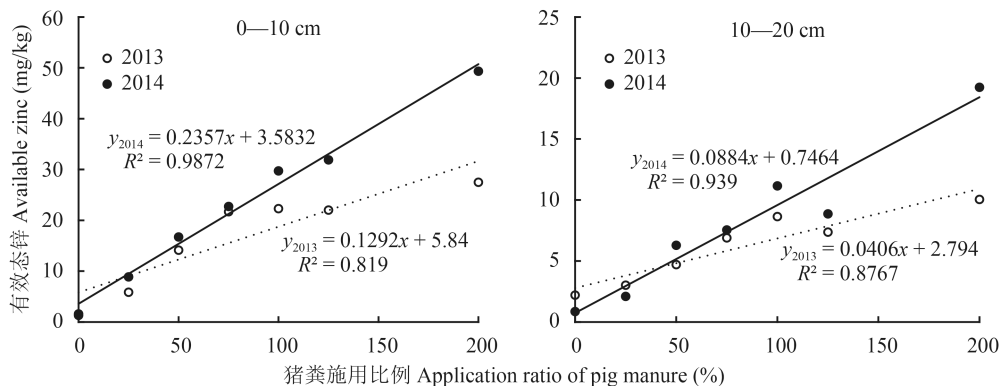


图 2 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤有效态 Zn 与猪粪有机肥施用比例的关系

Fig. 2 Relationship between available zinc and application ratio of pig manure in 0—10 cm and 10—20 cm soil layers

2.3 不同猪粪有机肥处理耕层土壤 Zn 年累积速率

水稻收获期, 耕层 0—10 cm 土壤总锌和有效态锌年累积速率, 均随着猪粪有机肥施用比例提高呈线性增加趋势 (图 3)。2013 和 2014 年水稻收获期, 以化肥处理总锌含量 (66.1 和 64.9 mg/kg) 为基准, 耕层 0—10 cm 土壤总锌年累积速率与猪粪有机肥施用比例的关系可分别用线性方程 $y_{2013} = 0.1595x +$

5.8028 和 $y_{2014} = 0.2018x + 2.3714$ 来拟合, R^2 分别为 0.9452 和 0.9946 ($n = 6$); 以化肥处理有效态锌含量 (1.60 和 1.31 mg/kg) 为基准, 耕层 0—10 cm 土壤有效态 Zn 年累积速率与猪粪有机肥施用比例的关系可分别用线性方程 $y_{2013} = 0.036x + 2.3219$ 和 $y_{2014} = 0.0561x + 0.9357$ 来拟合, R^2 分别为 0.7614 和 0.9888 ($n = 6$), 均达到显著水平。具体来看, 2013 和 2014 年水稻收获期, 各猪粪有机肥处理耕层 0—10 cm 土

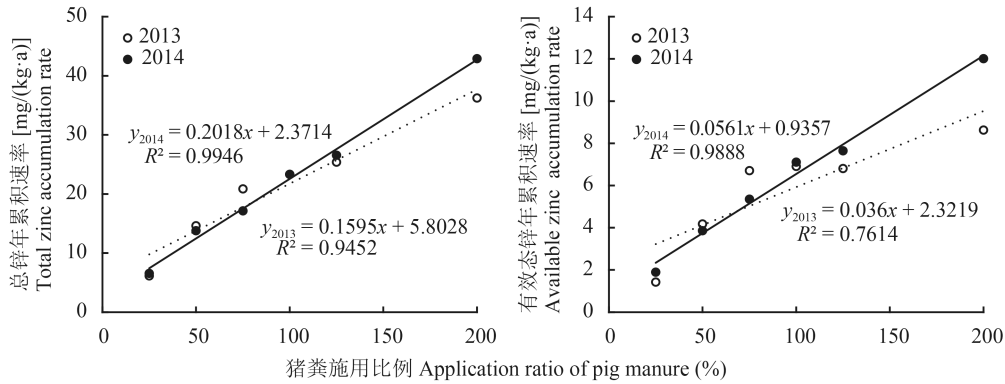


图3 耕层 0—10 cm 土壤总 Zn 和有效态 Zn 年累积速率与猪粪有机肥施用比例的关系

Fig. 3 Relationship between total and available zinc accumulation rate and application ratio of pig manure in 0–10 cm soil layer

壤总锌年累积速率的变化范围分别为 6.1~36.2 和 6.6~42.9 mg/(kg·a), 即年季间变异范围在 0.01~6.7 mg/(kg·a) 之间, 占 0.02%~15.6%; 土壤有效态锌年累积速率变化范围分别为 1.4~8.6 和 1.9~12.0 mg/(kg·a), 即年季间变异范围在 0.2~3.4 mg/(kg·a) 之间, 占 2.9%~28.1%。另外, 2013 和 2014 年水稻收获期, 各猪粪有机肥处理耕层 0—10 cm 土壤年累积的有效态锌含量占总锌含量的比例分别为 23.2%~32.2% 和 28.0%~31.3%。由此可见, 就耕层土壤锌年累积速率而言, 各猪粪有机肥处理年际间差异不大, 其中耕层土壤总锌年累积速率相对稳定。

2.4 基于土壤 Zn 累积的猪粪有机肥施用量

根据农业安全生产标准 (二级标准), pH 值在 6.5~7.5 之间的水田耕层土壤锌含量不超过 250 mg/kg, 结合不同猪粪有机肥施用量处理耕层土壤总锌年累积速率可知, 猪粪有机肥可安全施用年限随着猪粪有机肥施用比例提高呈现降低的趋势。2013 和 2014 年水稻收获期, 猪粪有机肥可安全施用年限与其施用比例的关系可分别用乘幂方程 $y_{2013} = 363.48x^{-0.825}$ 和 $y_{2014} = 455.8x^{-0.876}$ 来拟合, R^2 分别为 0.9553 和 0.9925 ($n = 6$), 均达到显著水平 (图 4)。根据拟合方程, 在农业安全生产标准内 50 年尺度上猪粪有机肥氮替代比例为 11.1%~12.5%, 20 年尺度上猪粪有机肥氮替代比例为 33.6%~35.5%。为此, 基于本试验的耕层土壤锌累积效应, 建议短期猪粪有机肥氮替代比例不超过 35%, 中长期猪粪有机肥氮替代比例不超过 12.5%。

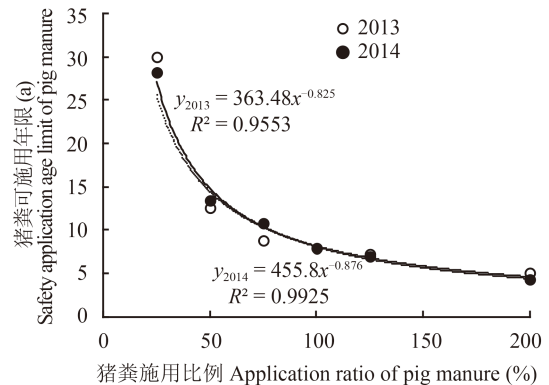


图4 猪粪有机肥可施用年限与施用比例的关系

Fig. 4 Relationship between safety application age limit and application ratio of pig manure

3 讨论

畜牧养殖业配方饲料添加锌等微量元素较为普遍, 由于畜禽对添加剂中的微量元素吸收利用率通常较低, 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^[4, 10]。国内外研究表明, 经常施用猪粪能够增加土壤表层锌含量^[11, 19, 21-23]。本研究表明, 连续施用不同量猪粪有机肥后第 3、4 年水稻收获期, 土壤总锌和有效态锌含量均随着猪粪有机肥施用比例提高呈线性增加趋势。这与前人研究结果一致。Lipoth 和 Schoenau^[14] 研究发现, 长期施用有机肥会造成土壤中有效态 Zn 含量的增加。姚丽贤等^[13] 研究表明, 施用粪肥明显提高了土壤中有效态锌的含量及其所占的比例。本研究也发现, 水稻收获期各猪粪有机肥处理土壤有效态锌占总锌的比例为 6.9%~20.9%, 显著 ($P < 0.05$) 高于不施肥 (有效态锌占 1.9%~2.1%) 和化肥 (有效态锌占 2.0%~2.4%) 处理, 这与王开峰

等^[23]报道一致, 主要是由于猪粪有机肥本身带入了有效态锌的缘故。

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有些报道。如李祖章等^[11]通过定位试验研究指出, 每年稻田施用 15 t/hm² 猪粪有机肥 + 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。柳开楼等^[24]按照 22.5 t/(hm²·a) 猪粪施用量的土壤 Cu、Zn、Cr 和 As 等累积速率推算, 连续施用猪粪 50 年尺度上红壤稻田猪粪最多施用量应最多不超过 6.40 t/(hm²·a)。Yang 等^[25]对试验点进行环境容量年限分析, 若按照 45 t/hm² 的量投入有机肥, 连续施用 15 年将达到土壤容量标准。本研究根据猪粪有机肥可安全施用年限与其施用比例的乘幂拟合方程, 基于耕层土壤锌年累积速率, 在农业安全生产二级标准内 50 年和 20 年尺度上猪粪有机肥氮替代比例的变化范围分别为 11.1%~12.5% 和 33.6%~35.5%, 折算猪粪有机肥施用量分别为 3.2~3.7 和 9.8~10.4 t/(hm²·a)。这在 50 年尺度上猪粪有机肥施用量显著低于柳开楼等^[24]研究结果, 20 年尺度上猪粪有机肥施用量也显著低于李祖章等^[11]研究结果, 这可能与气候条件、土壤类型、种植模式等因素有关。另外, 上述水稻收获期, 不同猪粪有机肥施用量处理耕层 0—10 cm 土壤总锌年累积速率的变化范围为 6.13~42.9 mg/(hm²·a), 有效态锌年累积速率的变化范围为 1.42~12.0 mg/(hm²·a)。为此, 基于本试验的耕层土壤总锌累积效应, 建议稻麦两熟农田短期猪粪有机肥氮替代比例不超过 35%, 即猪粪有机肥年施用量不超过 10.2 t/(hm²·a); 中长期猪粪有机肥氮替代比例不超过 12.5%, 即猪粪有机肥年施用量不超过 3.7 t/(hm²·a)。

4 结论

水稻收获期, 耕层土壤总锌和有效态锌含量, 以及总锌和有效态锌年累积速率, 均随着猪粪有机肥施用比例提高呈线性增加趋势。猪粪有机肥可安全施用年限, 随着猪粪有机肥施用比例提高呈现乘幂方程的降低趋势, 其中耕层土壤总锌累积速率为猪粪有机肥安全利用的重要限制因子之一。基于水稻收获期耕层土壤总锌累积速率, 在农业安全生产二级标准内 50 年尺度上猪粪有机肥氮替代比例为 11.1%~12.5%, 20 年尺度上猪粪有机肥氮替代比例为 33.6%~35.5%。为此, 基于本试验的耕层土壤锌

累积效应, 建议短期猪粪有机肥氮替代比例不超过 35%, 中长期猪粪有机肥氮替代比例不超过 12.5%。

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 F B, Ma W Q, Dou Z X, *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 J C, Chen L G, Zhen R H, *et al.* Study on modern circular agriculture development in Jiangsu province[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 26(1): 5-8.
- [3] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139.
Xu M G, Li D C, Li J M, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [4] 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 P, Jin S Y, Hao X Z, *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.
- [5] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪便主要有毒成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.
Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, *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] 彭来真, 刘琳琳, 张寿强, 李 延. 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 L Z, Liu L L, Zhang S Q, Li Y. 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.
- [7] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 王 敏. 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 R L, Li S T, Wang X B, Wang M. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392-397.
- [8] Cang L, Wang Y J, Zhou D M, Dong Y H. 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.
- [9] 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.
- [10] 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(1-3): 205-219.
- [11] 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 Z Z, Xie J F, Cai H D, *et al.* Environmental loading capacity of farmland soil for dung of livestock and poultry[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(8): 140-145.
- [12] 郝佳丽, 卜玉山, 贾峥嵘, 等. 不同有机物料与外源锌对土壤锌形态及生物有效性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(3): 263-268.
Hao J L, Bu Y S, Jia Z R, *et al.* Effects of different organic materials and exogenous Zn on Zn distribution in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3): 263-268.
- [13] 姚丽贤, 李国良, 党志, 等. 施用鸡粪和猪粪对 2 种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2592-2598.
Yao L X, Li G L, Dang Z, *et al.* Bioavailability of As, Cu and Zn in two soils as affected by application of chicken and pig manure[J]. *Environment Sciences*, 2008, 29(9): 2592-2598.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 高明, 车福才, 魏朝富. 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.
Gao M, Che F C, Wei C F. Effect of long-term application of organic fertilizer on the forms of Fe, Mn, Cu and Zn in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 11-17.
- [18] 王瑾, 韩剑众. 饲料中重金属和抗生素对土壤和蔬菜的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(4): 90-93.
Wang J, Han J Z. Effects of heavy metals and antibiotics on soil and vegetables[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4): 90-93.
- [19] 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 M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466-480.
- [20] 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.
- [21] 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: 1513-1522.
- [22] 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: 1056-1061.
- [23] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 谢小立. 长期使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.
Wan K F, Peng N, Wang K R, Xie X L. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1): 105-108.
- [24] 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 K L, Li D M, Huang Q H, *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.
- [25] 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.