

DOI: 10.11766/trxb202109140412

陈广银, 曹海南, 吴佩, 黄艳, 汪玉, 刘红江, 董金竹, 方彩霞. 稻麦轮作下施用猪粪水对作物生长及农田土壤质量的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 893–903.

CHEN Guangyin, CAO Hainan, WU Pei, HUANG Yan, WANG Yu, LIU Hongjiang, DONG Jinzhu, FANG Caixia. Effect of Pig Slurry Application on Crop Growth and Soil Quality of Farmland under Rice-Wheat Rotation System[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (3): 893–903.

稻麦轮作下施用猪粪水对作物生长及农田土壤质量的影响*

陈广银^{1, 2}, 曹海南², 吴佩², 黄艳², 汪玉², 刘红江³, 董金竹², 方彩霞^{1, 2}

(1. 安徽省水土污染治理与修复工程实验室, 安徽芜湖 241002; 2. 安徽师范大学生态与环境学院, 安徽芜湖 241002; 3. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要: 为解决猪粪水农田利用问题, 确定其最佳施用量, 降低可能带来的环境风险, 在实验室条件下, 基于自制土柱, 研究了猪粪水不同比例替代化肥及猪粪水全量替代化肥下不同施用量对稻麦生产及农田土壤质量的影响, 分析了稻麦株均穗数、叶绿素含量、穗和秸秆产量、穗和秸秆中氮磷含量、土壤渗滤液理化特性以及土壤氮磷、重金属含量的变化。结果表明: 猪粪水 50%和 100%替代化肥氮均可不同程度地促进稻麦生长, 提高稻麦植株产量, 但处理间差异不显著; 在猪粪水全量替代化肥氮条件下, 当猪粪水用量为 200%化肥氮时, 稻、麦穗均获得最大产量; 施用猪粪水提高了稻、麦穗和秸秆中氮磷含量, 减缓了土壤有机质和全氮下降幅度, 提高了土壤全磷含量, 但过量施用猪粪水造成水稻烂根、死苗, 小麦疯长, 土壤渗滤液中氮磷浓度升高, 污染地下水的风险增加, 部分指标甚至超过《地下水质量标准 (GB/T 14848-2017)》中IV类水标准; 大量施用猪粪水还会造成铜、镉和铅等在土壤中积累, 锌含量无明显增加。综上所述, 在本研究条件下猪粪水替代化肥是可行的, 建议猪粪水用量低于 200%化肥时可在促进稻麦生长、培肥土壤和控制农田环境污染等方面具有较好的效果。

关键词: 稻麦轮作; 猪粪水; 农田土壤质量; 氮素; 土壤渗滤液; 作物产量

中图分类号: X705 文献标志码: A

Effect of Pig Slurry Application on Crop Growth and Soil Quality of Farmland Under Rice-Wheat Rotation System

CHEN Guangyin^{1, 2}, CAO Hainan², WU Pei², HUANG Yan², WANG Yu², LIU Hongjiang³, DONG Jinzhu², FANG Caixia^{1, 2}

(1. Anhui Engineering Laboratory of Soil and Water Pollution Control and Remediation, Wuhu, Anhui 241002, China; 2. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu

* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0801403)、安徽高校协同创新项目 (GXXT-2019-010) 和国家自然科学基金项目 (21707001) 资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2017YFD0801403), the Collaborative Innovation Project of Anhui Universities of China (No. GXXT-2019-010), and the National Natural Science Foundation of China (No. 21707001)

作者简介: 陈广银 (1981—), 男, 江苏盐城人, 博士, 副研究员, 主要从事畜禽养殖污染治理方面的研究。E-mail: xzcf2004@163.com

收稿日期: 2021-09-14; 收到修改稿日期: 2022-03-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-05-27

Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: 【Objective】Pig is one of the most farmed breeds in China. In 2020, there were 406.50 million pigs in China and 41.13 million tons of pork were produced. Meanwhile, hundreds of thousands of tons of pig slurry and manure were produced during pig breeding in China. Many nutrient elements needed for crop growth are available in pig slurry, such as nitrogen, phosphorus, amino acids, trace elements, etc. Returning pig slurry to the field is one of the best ways for its utilization. To solve the problem of pig slurry application on farmland, studies are required to determine the optimal amount of pig slurry needed for the application and reduce the possible environmental risks which are associated with pig slurry application. 【Method】The experiments were carried out in a self-made soil column with a volume of 42.41 L and were designed with 7 treatments, including no fertilization (CK), 50% (50%W), 100% (100%W), 200% (200%W), and 300% (300%W) replacement of chemical nitrogen fertilizer by pig slurry, 50% replacement of chemical nitrogen fertilizer by pig slurry + 50% chemical nitrogen fertilizer (50%W+50%C), and 100% chemical nitrogen fertilizer (100%C). The average number of spikes, chlorophyll content, spike and straw yield, nitrogen and phosphorus content in spikes and straw, and the changes in physico-chemical properties of soil leachate and the contents of nitrogen, phosphorus and heavy metals were analyzed. 【Result】The results showed that both 50% and 100% replacement of chemical nitrogen fertilizer by pig slurry could promote the growth of rice and wheat to varying degrees and increase the yield. However, the difference between treatments was not significant. The excessive application of pig slurry caused rotten roots and dead seedlings in rice, wild growth in wheat, and increased nitrogen and phosphorus concentration in soil leachate, which increased the risk of contaminating groundwater, and some indexes even exceeded the standard of Class IV water in the National Groundwater Quality Standard (GB/T 14848-2017). Also, the massive application of pig slurry caused the accumulation of Cu, Cd and Pb in the soil whereas Zn content did not increase significantly. The above results indicate that, the replacement of chemical fertilizer by pig slurry is feasible under appropriate conditions as shown in this experiment. 【Conclusion】It is suggested that the application amount of pig slurry should not be more than 200% replacement of chemical nitrogen fertilizer which have a better effect in promoting the growth of rice and wheat, fertilizing the soil and controlling environmental pollution risk of farmland.

Key words: Rice-wheat rotation system; Pig slurry; Soil quality of farmland; Nitrogen; Soil leachate; Crop yield

将养殖粪污施入农田在我国有悠久历史,但随着集约化养殖的发展和种养分离的加剧,将养殖粪污施入农田的目的已从传统的培肥土壤转变为消纳粪污,粪污用量大幅增加,环境污染风险随之增加^[1-2]。目前,对猪粪农田利用的研究主要集中于猪粪或其堆肥产物用量^[3]、与其他物料配合施用^[4-5]以及对作物生长^[6]、培肥土壤^[7-9]、替代化肥^[10-11]和影响农田环境^[12-14]等方面,但对施用猪粪水的研究较少。

猪粪水是猪场干清粪后收集的高浓度污水或采用水冲粪、水泡粪收集的粪便与污水混合物。与粪便相比,猪粪水具有固含物和氮磷养分含量低、水溶性养分占比相对较高等特点^[15]。猪粪水用量大幅高于猪粪,加之猪粪水中水溶性养分占比较高的特点,其对农作物生长及农田土壤质量的影响并不十分清楚。张心良^[16]研究发现,与常规施肥相比,施用猪场废水后农田地地表径流化学需氧量(chemical

oxygen demand, COD)、全磷(total phosphorus, TP)和可溶性磷年流失负荷分别增加了 32.18%、15.46%和 28.13%,地下水 COD、硝态氮、TP 和可溶性磷浓度分别提高了 24.69%、17.04%、11.76%和 21.05%;殷勤^[17]研究发现,施用猪粪水显著提高了土壤有机质、全氮(total nitrogen, TN)、TP、碱解氮、硝态氮、有效磷和速效钾含量,但也显著提高了锌在土壤、玉米籽粒及其秸秆中的含量;夏运红等^[18]研究发现,猪粪水中的有机质可在轻黏土中渗透至 3 m 以下,过多施用猪粪水会使土壤酸化,且对地下水位高于 60 cm 的水源有较大的生物安全威胁。长江中下游地区是我国重要的种养殖基地,稻麦轮作在该地区是最主要的轮作模式,且生猪养殖污染治理压力大,研究施用猪粪水对作物生长及农田土壤质量的影响对解决生猪养殖污染、保护农田土壤有重要意义。

本研究基于稻麦轮作模式，在实验室条件下研究了猪粪水不同用量及猪粪水 50%、100%替代化肥对稻麦生长、产量、稻麦中氮磷含量、土壤渗滤液理化性质以及农田土壤质量的影响，较全面地评价施用猪粪水对稻麦生长及农田土壤质量的影响，为农业生产施用猪粪水提供理论指导。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

猪粪水取自安徽芜湖某养猪场，取回的猪粪水经贮存 3 个月后用于实验。猪场采用干清粪工艺，猪粪水主要为猪尿液、少量饮水滴漏和粪便，pH 为 7.49，COD、TN、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和 TP 浓度分

别为 6 600、854.3、646.6 和 77.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。以尿素作为化学氮肥 (含氮量 460 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)，以过磷酸钙 (P_2O_5 含量 120 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 作为化学磷肥，以氯化钾 (K_2O 含量 627 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 作为钾肥，均为分析纯，由国药集团化学试剂有限公司提供。小麦品种为苏麦 11，水稻品种为南粳 9108。实验用土壤取自安徽省阜阳市稻麦轮作农田，为黄棕壤，从上到下按照每 20 cm 一个土层取土，共取土 80 cm，取回的土壤经风干、敲碎、过筛后依次分层装入土柱中 (地表以下 0~20 cm 土壤过 10 目筛，地表以下 20~80 cm 土壤过 5 目筛)。由于风干、敲碎过程损失部分土壤以及去除杂物，过筛后的土壤放回土柱时，按照每 15 cm 一个土层回填土壤，整个土壤层厚度为 60 cm。实验用土壤理化特性见表 1。

表 1 实验用土壤理化特性

Table 1 Physico-chemical properties of test soil

土壤类型 Soil type	土层 Soil layer/cm	有机质 Organic matter / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	pH	TN / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	TP / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	铜 Cu / $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	铅 Pb / $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	锌 Zn / $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	镉 Cd / $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
黄棕壤	0~15	17.11	7.85	6.98	5.72	49.58	24.15	353.6	383.9
Yellow brown soil	15~30	11.98	7.92	1.40	4.92	56.93	24.04	342.2	353.0
	30~45	8.44	8.07	2.79	3.55	53.33	23.41	290.9	277.1
	45~60	8.58	7.98	2.79	2.91	52.10	26.68	516.2	453.6

注：TN，全氮；TP，全磷。Note: TN, total nitrogen; TP, total phosphorus.

1.2 试验装置

实验在订做的装置 (土柱) 内进行，由聚氯乙烯 (PVC) 管制作，直径 30 cm，有效高度 80 cm，土壤填充高度 60 cm。装置底部用纱布填充，纱布下面为一多孔支撑板，支撑板下方为倾斜挡板，支撑板与倾斜挡板间的空间用于汇集土壤渗滤液，装置底部侧面设一排水阀，用于排出支撑板与倾斜挡板间汇集的土壤渗滤液。土壤在装入装置时，每装入一层土壤，将土壤压实后再加入另一层土壤。在所有土壤均装入装置后，向装置内缓慢加入自来水，直至装置底部有水渗出。土壤在加水至饱和状态后，土壤与装置内壁充分接触，且整个实验过程中土壤均处于湿润状态，避免渗滤液沿管壁漏出的问题。

1.3 试验方法

于 2019 年 11 月 21 日播种小麦，2020 年 5 月

20 日收割，每个土柱播种 8 穴，每穴 2 粒种子 (种植密度每公顷 226 万株)；水稻由江苏省农业科学院育苗，于 2020 年 6 月 12 日移栽至土柱内，11 月 5 日收割，每个土柱种植 8 株苗 (种植密度每公顷 112.5 万株)。按照基肥：追肥 1：1 施入，在小麦播种或水稻移栽前一周施入基肥，在小麦拔节期或水稻抽穗期施入追肥。

肥料用量根据当地习惯施肥量确定，小麦：N 210 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ， P_2O_5 70 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ， K_2O 70 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；水稻：N 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ， P_2O_5 70 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ， K_2O 90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验设 7 个处理，分别为不施肥的对照 (CK)，基于化肥氮 50% (50%W)、100% (100%W)、200% (200%W) 和 300% (300%W) 用量的猪粪水，猪粪水用量分别为 140、280、560 和 840 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，基于化肥氮 50% 用量的猪粪水+50% 化肥氮 (50%W+50%C)

和 100% 化肥氮 (100%C)。每处理 4 个重复, 取平均值进行分析。在施用猪粪水时, 为避免猪粪水过快下渗以及沿土柱内壁短流, 采用少量多次的方式, 以土柱表面不形成液面滞留为宜。

土柱置于室外, 按照作物生长的常规方式管理。在土柱上方设置双层防虫网, 避免虫害及掉入杂物。定期排出土柱底部的渗滤液, 测定其体积、pH、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 和 TP 含量。在水稻抽穗时测定叶片叶绿素含量。作物收获后, 测定单株作物穗数、穗和秸秆质量及其氮磷含量, 稻穗铜 (Cu)、铅 (Pb)、锌 (Zn) 和镉 (Cd) 含量。经 1 年的稻麦轮作后, 采集表层土壤, 分析土壤有机质、TN、TP 和 Cu、Pb、Zn、Cd 含量。

1.4 测定指标及方法

土壤渗滤液 TN 采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂法, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法, TP 采用钼锑抗比色法, COD 采用重铬酸钾容量法^[19], pH 采用 SX751 型 pH 计测定; 植株 TN 采用浓硫酸-双氧水消解凯氏定氮法, TP 采用钼锑抗比色法^[20], 水稻叶片叶绿素含量采用叶绿素测定仪 (SPAD-502 Plus 型, 柯尼卡美能达, 日本) 测定; 土壤重金属采用原子吸收分光光度计

(AA6800 型, 岛津, 日本) 测定。

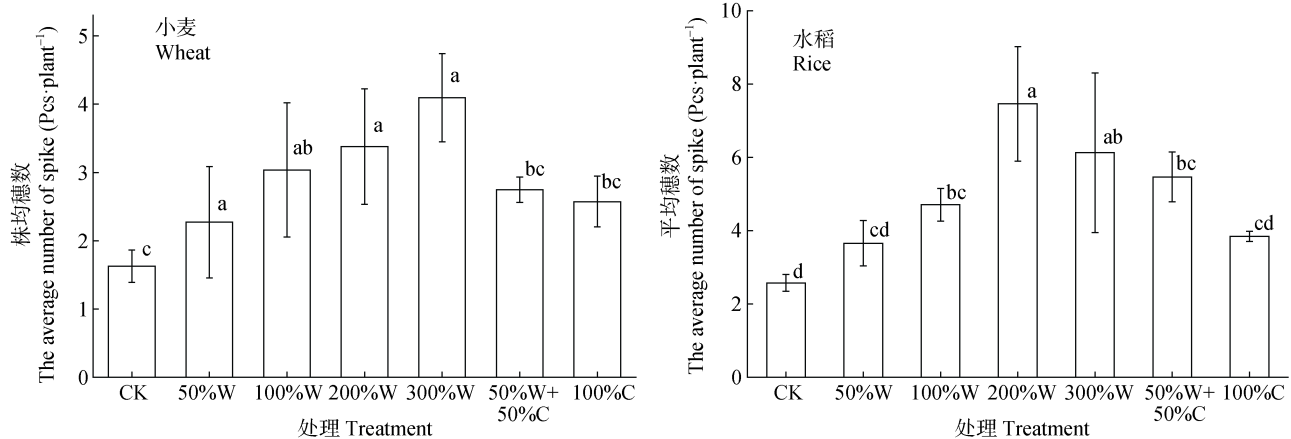
1.5 数据处理

实验数据采用 Excel 2016 处理, 绘图采用 Origin 2017, 采用 SPSS 24.0 对实验数据进行统计分析, 并使用邓肯 (Duncan's) 新复极差法检验差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 施用猪粪水对稻麦生长的影响

2.1.1 对稻麦株均穗数的影响 各处理稻麦株均穗数的结果见图 1。可以看出, 施肥显著提高了小麦株均穗数; 随着猪粪水用量增加, 小麦株均穗数逐渐增加, 当猪粪水用量为 300% 化肥氮时, 小麦株均穗数最高, 为每株 4.09 个, 表明增施猪粪水对促进小麦分蘖有明显效果, 但施用猪粪水的各处理间差异不显著; 与单施化肥相比, 100%W 和 50%W+50%C 的处理小麦株均穗数均有提高, 但处理间差异不显著。水稻的结果显示, 施用猪粪水提高了水稻株均穗数, 但当猪粪水用量为 300% 化肥氮时, 水稻株均穗数较 200%W 的处理反而降低, 即过量施用猪粪水对水稻分蘖有一定的抑制作用, 这



注: CK: 对照; 50%W: 施用化肥氮 50% 的猪粪水; 100%W: 施用化肥氮 100% 的猪粪水; 200%W: 施用化肥氮 200% 的猪粪水; 300%W: 施用化肥氮 300% 的猪粪水; 50%W+50%C: 施用化肥氮 50% 的猪粪水+50% 化肥氮; 100%C: 施用 100% 化肥氮。不同的小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Note: CK means control; 50%W, 100%W, 200%W and 300%W mean the replacement percentage of the amount of pig slurry application to chemical nitrogen fertilizer is 50%, 100%, 200% and 300%; 50%W+50%C means the application amount of 50% pig slurry and 50% chemical nitrogen fertilizer; 100%C means the application amount of 100% chemical nitrogen fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 1 各处理水稻和小麦株均穗数

Fig. 1 The average number of spikes of rice and wheat plants in each treatment

与小麦的结果不同；与对照相比，无论施用猪粪水还是化肥，均可显著提高水稻株均穗数，这与小麦的结果一致；与施 100%C 的处理相比，100%W 和 50%W+50%C 的处理水稻分蘖数均有提高，且大小顺序为：50%W+50%C>100%W>100%C，50%W+50%C 的处理水稻分蘖数较 100%C 和 100%W 处理分别提高 42.14%和 16.08%，表明在等氮条件下将猪粪水与化肥配施对促进水稻生长有更好的效果。

2.1.2 对水稻叶片叶绿素含量的影响 各处理在分蘖期叶绿素含量的结果见图 2。可以看出，水稻叶片叶绿素含量与株均穗数的变化趋势相似，均与猪粪水用量成正比，当猪粪水用量为 200%化肥氮时达最高，猪粪水用量为 300%化肥氮时反而降低，但 100%W、200%W 和 300%W 间差异不显著；200%W 的处理叶绿素含量较 CK、50%W、100%W、300%W 分别提高了 62.98%、26.99%、10.57%和 9.01%；施肥处理叶绿素含量均高于对照，除 50%W 外，其他处理均显著高于对照；在同等施氮量下，单施猪粪水、化肥以及猪粪水与化肥配合施用对水稻叶片叶绿素含量未表现出明显的影响。但是，在水稻生长前期，高用量猪粪水的处理出现水稻生长受到抑制（烂根、死苗），约两周后抑制作用逐步消除，这与游来勇^[21]研究结果一致，可能与猪粪水带入大量 COD 造成田间水溶解氧不足有关。

2.1.3 对稻麦植株产量的影响 各处理稻、麦穗和秸秆产量的结果见表 2。可以看出，施肥对提高稻、麦的穗和秸秆产量均有较好的效果，随着施肥

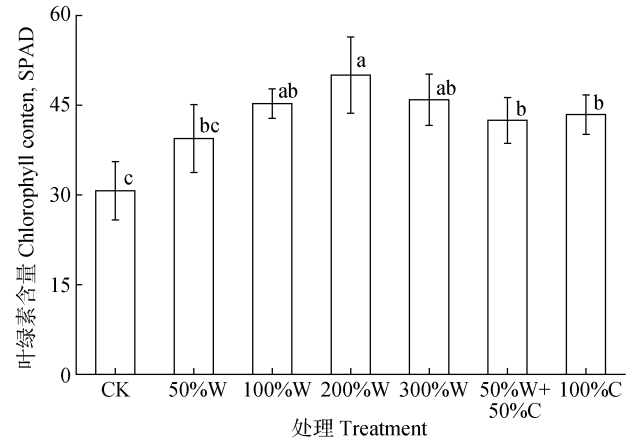


图 2 各处理水稻叶片叶绿素含量
Fig. 2 Chlorophyll content of rice leaves in each treatment

量增加作物生物量随之增加，水稻穗和秸秆最大产量分别为处理 200%W 和 300%W，且显著高于其他处理，表明在一定范围内增加猪粪水用量有利于提高水稻植株产量，但过量施用不利于养分向营养器官运移，造成作物疯长，这与梁靖越等^[22]研究结果一致。与水稻的结果不同，麦穗和麦秸产量均随着猪粪水用量增加而增加，最大产量均为 300%W 的处理，且不同猪粪水用量的处理麦穗产量间差异不显著，但 300%W 的麦秸产量显著高于其他处理，进一步表明虽然小麦地上部生物量与猪粪水用量成正比，但过量施用猪粪水不利于养分向穗转移。与单施化肥相比，无论是 50%W+50%C 还是 100%W 处理，稻、麦穗和秸秆产量均增加，表明施用猪粪水对提高稻、麦地上部生物量均有较好效果，但处理间差异不显著。

表 2 各处理水稻/小麦产量

Table 2 Yield of wheat/rice under pig slurry application in each treatment

处理 Treatment	水稻 Rice/ (kg·hm ⁻²)		小麦 Wheat/ (kg·hm ⁻²)	
	穗 Spike	秸秆 Straw	穗 Spike	秸秆 Straw
CK	2 391 ± 386e	3 604 ± 655f	4 714 ± 1 054c	3 409 ± 681c
50%W	5 149 ± 1 046d	7 455 ± 1 020de	11 440 ± 6 641ab	5 830 ± 2 031b
100%W	7 152 ± 1 564bc	10 650 ± 585c	10 160 ± 3 921ab	7 036 ± 2 045b
200%W	11 960 ± 4 466a	11 590 ± 5 401a	9 934 ± 999ab	7 185 ± 2 162b
300%W	9 196 ± 4 858b	17 980 ± 7 964b	10 820 ± 2 486a	8 360 ± 950a
50%W+50%C	6 637 ± 5 32bcd	7 656 ± 1 745cd	7 945 ± 1 455abc	5 485 ± 546bc
100%C	5 453 ± 406cd	6 150 ± 734e	6 477 ± 313bc	5 115 ± 768bc

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.2 施用猪粪水对稻麦植株氮、磷吸收的影响

稻/麦穗及秸秆中氮、磷含量及肥料氮、磷利用率的结果见表 3。可以看出, 施肥提高了稻麦秸秆及穗中氮、磷含量, 猪粪水用量与稻、麦秸秆氮、磷含量呈正相关, 表明施用猪粪水促进了作物对氮、磷养分的吸收及在穗和秸秆中的积累。稻、麦穗 TN 含量间接反映蛋白质含量的高低, 穗 TN 含量增加间接表明增施猪粪水提高了稻麦穗中蛋白质含量, 提高了产品品质。随着猪粪水用量增加, 肥料氮、磷利用率反而降低, 即低施肥水平下肥料利用率高, 高施肥水平下肥料利用率低。在低施肥水平下, 尽管肥料利用率较高, 但出现肥料氮、磷利用率超过 100% 的情况, 即低施肥水平下进行作物生产存在透支土壤地力的问题, 降低土壤肥力, 造成土壤质量下降。

2.3 施用猪粪水对土壤渗滤液理化特性的影响

从土壤渗滤液的结果(表 4)可以看出, 与对照相比, 施肥增加了土壤渗滤液氮、磷含量以及 EC、pH。具体为: 施肥处理土壤渗滤液 pH 普遍增加, 但 pH 与施肥量及施肥方式间并无明显规律; 施用猪粪水提高了土壤渗滤液的 EC, 且 EC 与猪粪水用量成正比 ($R^2=0.9808$), 表明过量施用猪粪水存在地下水盐分超标及土壤盐碱化的风险。土壤渗滤液 TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量与猪粪水用量成正比, 全磷含量有不同程度的增加, 但其含量变化与猪粪水用量间的关系受作物种类影响较大, 其含量在水稻种植中与猪粪水用量无明显规律, 但在小麦种植中受猪粪水用量影响显著, 其含量与猪粪水用量呈正相关 ($R^2=0.9147$); 与单施化肥相比, 在水稻种植中施用猪粪水降低了土壤渗滤液中氮素含量, 即

表 3 各处理稻/麦穗及秸秆中氮、磷含量

Table 3 Nitrogen and phosphorus content of ears of rice and wheat and their straw in each treatment

处 理 Treatment	水稻 Rice					
	穗 Spike		秸秆 Straw		肥料利用率 Fertilizer utilization	
	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TN/%	TP/ %
CK	14.01 ± 0.81c	3.20 ± 0.11b	8.11 ± 1.09bc	1.39 ± 0.21b	—	—
50%W	16.20 ± 1.02c	4.24 ± 0.26ab	7.37 ± 1.38c	1.81 ± 0.40ab	108.60	83.12
100%W	18.31 ± 1.14b	3.63 ± 1.45a	2.02 ± 2.42ab	1.89 ± 0.42ab	95.05	51.64
200%W	19.14 ± 0.21b	4.28 ± 0.19ab	11.30 ± 4.51ab	2.09 ± 0.45bc	75.14	42.72
300%W	21.02 ± 1.61a	4.51 ± 0.28ab	14.78 ± 1.51a	2.11 ± 0.19a	59.61	31.47
50%W+50%C	16.10 ± 0.82c	4.24 ± 0.21ab	9.71 ± 1.78bc	1.71 ± 0.20ab	66.43	50.11
100%C	18.30 ± 0.52b	3.89 ± 0.27b	11.30 ± 0.77ab	1.23 ± 0.07c	66.78	39.31
处 理 Treatment	小麦 Wheat					
	穗 Spike		秸秆 Straw		肥料利用率 Fertilizer utilization	
	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TN/%	TP/ %
CK	12.56 ± 1.78d	7.08 ± 0.56c	2.18 ± 0.22d	10.27 ± 0.89b	—	—
50%W	13.78 ± 2.89d	9.45 ± 2.42bc	6.21 ± 2.19c	11.01 ± 1.02b	52.49	186.10
100%W	16.02 ± 2.51cd	7.51 ± 0.47bc	3.10 ± 0.33bc	12.99 ± 1.28b	46.52	104.90
200%W	22.01 ± 3.50a	9.62 ± 0.37ab	13.12 ± 1.89ab	13.51 ± 0.37b	43.69	55.17
300%W	21.11 ± 1.64ab	11.10 ± 2.03a	18.42 ± 0.78a	17.03 ± 2.70a	28.59	46.84
50%W+50%C	15.43 ± 0.78cd	8.61 ± 0.72abc	10.81 ± 1.79bc	5.32 ± 1.47c	41.99	72.40
100%C	18.80 ± 3.44bc	8.80 ± 0.72abc	11.12 ± 2.31bc	6.10 ± 0.61c	40.26	72.72

表 4 各处理土壤渗滤液理化特性

Table 4 Physicochemical properties of soil leachate in each treatment

处理 Treatment	水稻 Rice					
	pH	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+-\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^--\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
CK	7.37±0.15ab	605±35c	0.14±0.04b	0.08±0.01c	0.25±0.02b	0.0339±0.0085b
50%W	7.28±0.14b	786±17c	0.25±0.22b	0.20±0.06c	0.47±0.01b	0.0413±0.0142b
100%W	7.52±0.15a	1 034±52c	0.35±0.15ab	0.42±0.15bc	0.97±0.22b	0.0381±0.0079b
200%W	7.47±0.12ab	1 312±400b	0.46±0.27ab	1.38±1.22ab	7.03±5.77b	0.0691±0.0385ab
300%W	7.44±0.05ab	1 928±560a	0.73±0.38a	5.22±3.87a	25.92±12.80a	0.1079±0.0648a
50%W +50%C	7.33±0.09b	888±102c	0.56±0.28ab	0.19±0.05c	0.87±0.09b	0.0360±0.0063b
100%C	7.36±0.11ab	784±27c	0.55±0.19ab	0.58±0.41bc	1.29±0.67b	0.0349±0.0125b
处理 Treatment	小麦 Wheat					
	pH	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+-\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^--\text{N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
CK	8.36±0.06d	0.64±0.04e	0.90±0.07bcd	0.89±0.06e	1.88±0.28c	0.0627±0.0058b
50%W	8.47±0.13cd	1.19±0.06de	0.97±0.06cd	6.03±0.98cd	7.25±1.23b	0.0733±0.0050b
100%W	8.65±0.06ab	1.75±0.11c	0.70±0.13d	9.98±2.04b	11.60±0.38b	0.0792±0.0236b
200%W	8.54±0.08bc	4.13±0.51b	1.03±0.10bc	20.67±1.84a	37.58±6.39a	0.0556±0.0128b
300%W	8.52±0.14bc	4.78±0.65a	1.40±0.28a	20.62±3.77a	38.22±5.04a	0.0697±0.0071b
50%W +50%C	8.74±0.08a	1.36±0.22cd	1.13±0.30b	4.33±3.08d	5.55±3.43bc	0.1104±0.0519a
100%C	8.55±0.11bc	1.40±0.17cd	1.01±0.21bc	8.03±1.39bc	9.56±2.19b	0.0568±0.0319b

减少了氮素进入地下水的风险，但在小麦生产中存在增加土壤渗滤液氮素含量的风险。

参考国家标准 (GB/T 14848-2017) [23] 发现，以铵态氮含量为参照，当猪粪水用量为 300% 化肥氮时，土壤渗滤液水质属于Ⅳ类水；以硝态氮为参考时，当猪粪水用量为 300% 化肥氮时，水稻土壤渗滤液水质属于Ⅲ类水，小麦土壤渗滤液水质属于Ⅳ类水。土壤渗滤液中磷的浓度较低，在 GB/T 14848-2017 中未对磷含量有规定，故磷的环境风险相对较低，基于氮素确定施用猪粪水量更合适。以上结果表明，施用猪粪水存在污染地下水风险，且风险程度与猪粪水用量成正比；在施用猪粪水时，需严格控制猪粪水用量，在本试验条件下猪粪水用量需控制在 200% 化肥氮以下。

2.4 施用猪粪水对农田土壤质量的影响

从试验后表层土壤质量的结果 (表 5) 可以看出，试验后土壤有机质、TN、TP 和重金属 (Cu、Pb、Zn 和 Cd) 含量均发生了较大变化。与试验前相比，土壤有机质和 TN 含量均下降，全磷含量除

CK 外均增加，除 Zn 以外的 3 种重金属均有不同程度的积累，Zn 含量无明显规律。与试验前相比，CK 土壤有机质、TN 和 TP 含量均显著降低，重金属含量均下降 (下降幅度与重金属种类有关)，Zn 的下降幅度最大，其他 3 种间差异不显著，表明在不施肥条件下种植作物造成土壤地力明显下降；与 CK 相比，施肥提高了土壤有机质及氮、磷含量，且其含量与猪粪水用量呈正相关，当猪粪水用量为 300% 化肥氮时土壤有机质、氮、磷含量最高，分别为 11.18、8.24 和 24.74 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，表明增施猪粪水可提高土壤肥力；施肥提高了土壤 Cu、Pb 和 Cd 含量，尤其是 Cu 含量与施肥量有较好的正相关关系，表明过量施肥存在土壤重金属积累和污染的风险，但对 Zn 含量未表现出明显规律，这可能与 Zn 化合物具有较强的水溶性和迁移性有关；与单施化肥相比，配施或单施猪粪水对提高土壤有机质和氮磷含量有较好的效果，但处理间差异不显著 ($P>0.05$)，对土壤重金属含量无明显影响。

表 5 施用猪粪水对土壤质量的影响

Table 5 Effect of pig slurry application on soil quality of farmland

处理 Treatment	有机质 ^① /(g·kg ⁻¹)	TN /(g·kg ⁻¹)	TP /(g·kg ⁻¹)	Cu /(mg·kg ⁻¹)	Pb /(mg·kg ⁻¹)	Zn /(mg·kg ⁻¹)	Cd /(mg·kg ⁻¹)
试验前 ^②	17.11±0.41a	6.98±1.03a	5.72±0.21b	49.58±1.36c	24.15±1.51b	353.6±16.30a	0.38±0.01a
CK	7.86±0.65c	3.24±0.32 a	4.92±0.33b	47.79±1.53c	24.09±1.25b	302.2±32.14a	0.32±0.03a
50%W	8.32±0.55bc	5.70±1.09 a	7.76±0.90b	60.91±3.55bc	31.93±0.76ab	310.7±84.02a	0.41±0.06a
100%W	9.69±1.39bc	5.03±1.64 a	11.12±1.21b	66.98±2.61b	33.49±2.58a	424.7±108.7a	0.53±0.11a
200%W	10.33±1.10bc	6.91±3.74a	24.41±8.02a	86.40±5.93a	30.09±3.19ab	265.7±31.98a	0.43±0.02a
300%W	11.18±1.05b	8.24±5.83a	24.74±2.92a	58.65±4.63bc	33.32±2.40a	352.2±25.97a	0.48±0.04a
50%W+50%C	10.31±0.53bc	3.92±1.52 a	9.71±0.71b	54.96±1.87c	26.86±2.12ab	359.5±81.04a	0.44±0.05a
100%C	8.72±0.88bc	3.81±0.23 a	6.03±0.81b	50.89±0.81c	25.92±2.79b	363.1±69.10a	0.41±0.06a

①Organic matter, ②Before the experiment.

3 讨论

3.1 猪粪水施用影响稻麦生长

施用猪粪可促进作物生长, 提高作物产量已有大量研究报道^[24-25]。与猪粪相比, 猪粪水中氮、磷和有机物浓度均较低, 且大多为水溶态, 故施用猪粪水对作物生长的影响与猪粪可能不同。由研究结果(图 2)看出, 施用猪粪水提高了植物光合作用能力, 水稻叶片叶绿素含量明显增加, 促进了植株分蘖, 稻麦分蘖数较不施肥和单施化肥均大幅增加, 但促进效果与猪粪水用量并不总呈正相关, 水稻和小麦单株分蘖数最高分别出现在 200%W 和 300%W 的处理, 表明在水稻生长中过量施用猪粪水不利于提高水稻植株产量。金熠^[24]研究发现, 增施猪粪有机肥增加了水稻谷粒结实率和千粒重, 水稻产量随有机肥用量增加而增加; 游来勇^[21]认为, 施用猪粪增产的途径主要通过提高稻-麦有效穗数和穗粒数来实现; 韩蕊^[8]将猪粪用于玉米和小麦轮作也有相同的发现; 张涛^[26]基于猪粪长期定位试验发现, 增施猪粪对小麦产量有正向作用, 但高量增施猪粪会降低对小麦增产的正向效应。梁靖越等^[22]研究发现, 适量施用猪粪有利于稻麦干物质积累和氮素向籽粒运移, 达到增产及提高氮素利用率的效果, 但过量施用猪粪导致土壤氮素供应过量, 干物质向经济器官运移受阻, 氮素向茎秆富集, 贪青晚熟严重, 稻

麦籽粒产量显著下降; 游来勇^[21]研究发现, 当猪粪氮替代率大于 100%时显著抑制水稻生育前期的生长, 表现为水稻株高和生物量降低, 但随着生育期推进, 抑制作用减弱, 这在本试验水稻种植中也出现该现象。然而, 有研究认为, 施用猪粪并不影响作物产量^[27], 过量施用还会增加温室气体排放^[28]。

本研究中, 施用猪粪水不仅提高了稻麦产量, 还提高了稻麦穗中氮、磷含量(表 2, 表 3), 这在其他研究中也有报道, 如金熠^[24]研究发现, 增施猪粪有机肥增加了水稻谷粒和秸秆中 TN、TP 累积量; 张奇茹等^[29]研究发现, 施用有机肥小麦籽粒氮含量较施化肥显著提高 9.6%~12.8%。

3.2 猪粪水施用影响农田土壤质量

施用猪粪可有效阻控土壤酸化^[25], 提高土壤 TN^[13, 30]、总有机碳及活性有机碳^[31-32]、TP、有效磷^[33]和速效钾含量^[8], 提高土壤微生物数量和酶活性^[33]。猪粪水中有机物、氮、磷等含量远低于猪粪, 故等氮量施用猪粪水时其用量远大于猪粪。就本研究结果(表 5)而言, 各处理土壤有机质和 TN 含量均较试验前下降, 施用猪粪水的处理下降幅度小于单施化肥的处理, 且猪粪水用量与土壤有机质、TN 含量下降幅度成反比。陈晓锋等^[34]研究发现, 一定浓度的猪场废水灌溉配合追肥可增加土壤 TN、TP、硝态氮和有机质含量。大量施用猪粪不仅提高了表层土壤中氮磷含量, 对深层土壤硝态氮含量的提高也有显著作用^[30]。

施用猪粪在改善土壤理化性质和肥力的同时,也带来一系列潜在的环境问题。齐伟等^[35]认为,土壤 TN 含量的增加与地下水硝态氮含量有一定的相关性,即猪粪还田虽然提高了土壤中全氮含量,但也增加了地下水硝态氮含量提高的风险;陈晓锋等^[34]研究发现,污水灌溉增加了土层硝态氮含量,存在污染地下水风险。此外,在农田生态系统中,粪肥的大量施用导致土壤磷大量流失进入地表水,使水体富营养化,系统流失的磷主要是正磷酸盐、磷酸单酯、磷酸二酯^[14]。Bakhsh 等^[36]研究发现,在玉米-大豆系统中,施用液态猪粪存在地下水硝酸盐增加风险。在水稻生产中,大量施用猪粪增加了稻田 TN、TP 径流流失量和流失率^[3],高粪污用量下还可能导致地表水污染和地下水水质退化^[1-2]。

尽管本研究仅进行了一年,但土壤 Cu、Pb 和 Cd 含量均有增加,表明施用猪粪水存在重金属在土壤积累的风险。殷勤^[17]将猪粪水用于苹果及玉米种植,发现施用猪粪水显著提高了苹果地土壤 Cu、Zn 含量 ($P<0.05$),施用猪粪水 11 年和 5 年土壤表层 Cu 含量较施化肥处理分别提高 82.4%和 94.5%,Zn 含量分别提高 116.5%和 145.5%,在玉米地也有相似的结果;史艳财^[37]认为,长期施用猪粪导致土壤 Cu、Zn 污染;柳开楼等^[25]研究发现,长期施用猪粪还会导致土壤砷 (As) 累积。

4 结 论

在本研究条件下,将猪粪水用于稻麦生产是可行的,稻麦植株产量与猪粪水用量成正比,稻麦植株产量均在猪粪水用量为 200%化肥氮时达最高,但过量施用造成植株疯长,不利于增产。施用猪粪水提高了稻麦株均穗数、穗和秸秆中氮磷含量,对减缓土壤有机质和氮素损失、提高土壤磷素含量效果较好,但过量施用造成土壤渗滤液中氮、磷浓度升高,在小麦种植中尤为突出,存在污染地下水风险。施用猪粪水对促进作物生长、提高作物产量有较好效果,但过量施用存在污染地下水及农田土壤重金属富集风险,需严格控制猪粪水用量。在稻麦生产中,建议猪粪水用量为 200%化肥氮以内,且分次施用,降低环境污染风险。

参考文献 (References)

- [1] Smith K A, Jackson D R, Withers P J. Nutrient losses by

surface run-off following the application of organic manures to arable land. 2. Phosphorus [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 112 (1): 53—60.

- [2] Long G, Sun B. Nitrogen leaching under corn cultivation stabilized after four years application of pig manure to red soil in subtropical China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146 (1): 73—80.

- [3] Guo Z, Zhou W, Chen L G, et al. Effect of pig manure application on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during the paddy season in intensive rice-wheat rotation field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (6): 21—25, 61. [郭智, 周炜, 陈留根, 等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27 (6): 21—25, 61.]

- [4] Yin D, Li H, Xu J B, et al. Composition characteristics of organic carbon pool in upland red soil under long-term application of straw and pig manure [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1259—1269. [殷丹, 李欢, 徐江兵, 等. 长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地有机碳库组成特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1259—1269.]

- [5] Duan G L, Wang F, Cen K, et al. Effects of straw and biochar application on heavy metal accumulation in rice fertilized with pig-biogas residues [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37 (11): 4287—4295. [段桂兰, 王芳, 岑况, 等. 秸秆及生物炭添加对猪粪沼渣施肥水稻重金属积累的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37 (11): 4287—4295.]

- [6] Zou W X, Qiu C, Han X Z, et al. Effects of long-term manure application on black soil fertility and maize yield [J]. *Soils and Crops*, 2020, 9 (4): 407—418. [邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9 (4): 407—418.]

- [7] Yang X D, Zeng X B, Wen J, et al. Effects of application of pig manure on physicochemical properties and enzyme activities of red soil upland [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (3): 739—749. [杨小东, 曾希柏, 文炯, 等. 猪粪施用量对红壤旱地理化性质及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (3): 739—749.]

- [8] Han R. Study of different tillage measures and fertilizer application on soil quality in system of double cropping [D]. Xinxiang, Henan: Henan Normal University, 2018. [韩蕊. 耕作措施和肥料施用对麦玉两熟制农田土壤质量影响的研究[D]. 河南新乡: 河南师范大学, 2018.]

- [9] Ma X Y, Liu M, Li Z P. Dynamics of N and P in surface water of paddy soil in subtropical China under different rates of swine manure application [J]. *Soils*, 2015, 47 (2): 289—296. [马晓焉, 刘明, 李忠佩. 不同猪粪施用量下红壤水稻土表层水氮磷动态[J]. *土壤*, 2015, 47 (2): 289—296.]

- [10] Ma F F. Effects of organic fertilizer replacement on

- rice-wheat yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss from farmland [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.[马凡凡. 有机肥替代对稻-麦产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[D].合肥: 安徽农业大学, 2019.]
- [11] Li M, Wang C Q, Li B, et al. Effects of pig manure replacing nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen components under rice-wheat rotation [J]. *Soils*, 2016, 48 (3): 449—454.[李萌, 王昌全, 李冰, 等. 猪粪替代氮肥对稻麦轮作条件下土壤有机氮组分的影响[J]. 土壤, 2016, 48 (3): 449—454.]
- [12] Jiang P. Heavy metals pollution and their control in garden red soil received intensive farming livestock manures [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2010.[姜萍. 猪粪对红壤菜地重金属污染过程的影响及调控[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.]
- [13] Yang S Q, Han R Y, Wang Y S, et al. Effect of swine manure application to soil nitrate leaching of paddy-upland rotation—A case study in the Yellow River irrigation area [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36 (2): 492—499.[杨世琦, 韩瑞芸, 王永生, 等. 猪粪还田对土壤硝态氮淋失的影响研究——以黄灌区稻旱轮作作为例[J]. 中国环境科学, 2016, 36 (2): 492—499.]
- [14] Solomon D, Lehman N L. Loss of phosphorus from soil in semi-arid northern Tanzania as a result of cropping, evidence from sequential extraction and ^{31}P NMR spectroscopy [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51 (4): 699—708.
- [15] Zhu J Y, Li Z S, Deng L W. Study on the characteristics of swine wastewater [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36 (4): 1578—1579, 1588.[朱娟玉, 李正山, 邓良伟. 猪粪水特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (4): 1578—1579, 1588.]
- [16] Zhang X L. Effects of application of swine farm wastewater coupled with chemical fertilizer on water, soil and crop [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32 (4): 645—650.[张心良. 猪场污水还田与化肥配施对农田水土环境和作物产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32 (4): 645—650.]
- [17] Yin Q. Effect of pig manure application on soil physical and chemical properties and microflora composition [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2019.[殷勤. 施用猪场粪水对种植土地土壤理化性状及菌群组成的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2019.]
- [18] Xia Y H, Bai L, Cheng S, et al. Simulation study of the effect of pig manure water infiltration on soil properties [J]. *China Swine Industry*, 2016, 11: 19—23.[夏运红, 白林, 程帅, 等. 猪粪水渗透对土壤性质产生影响的模拟研究[J]. 中国猪业, 2016, 11: 19—23.]
- [19] State Environmental Protection Administration. Water and waste water monitoring and analysis methods [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 254—284. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254—284.]
- [20] Bao S D. Analysis for soil and agrochemistry [M]. 3rd ed. Beijing: Beijing China Agriculture Press, 2000: 30—110. [鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30—110.]
- [21] You L Y. Effects of straw and pig manure incorporation on nitrogen transformation and utilization features in wheat-rice rotation system [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015.[游来勇. 稻-麦轮作条件下猪粪和秸秆还田对氮素转化利用特征的影响研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.]
- [22] Liang J Y, Wang C Q, Li B, et al. Effects of combined application of pig manure with urea on grain yield and nitrogen utilization efficiency in rice-wheat rotation system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (4): 1088—1096.[梁靖越, 王昌全, 李冰, 等. 猪粪配施化肥对稻-麦轮作系统籽粒产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (4): 1088—1096.]
- [23] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017. [国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.]
- [24] Jin Y. Impact of swine manure and swine-manure-derived biochar on migration and transformation of phosphorus in rice paddy fields [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.[金熠. 增施猪粪及猪粪生物炭对稻田土壤磷素迁移转化的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.]
- [25] Liu K L, Yu P L, Tan W G, et al. Effect of long-term application of pig manure on soil arsenic content and fertility of red upland and paddy soils [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24 (6): 1057—1062. [柳开楼, 余跑兰, 谭武贵, 等. 长期施用猪粪对红壤旱地和水稻土肥力和土壤 As 转化的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24 (6): 1057—1062.]
- [26] Zhang T. The impacts of swine manure treatments and application years on soil nitrogen flux [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.[张涛. 猪粪处置方式及施用年限对土壤氮通量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.]
- [27] Luo W Q, O'Brien P L, Hatfield J L. Crop yield and nitrous oxide emissions following swine manure application: a meta-analysis[J]. *Agricultural & Environmental Letters*, 2019, 4 (1): 1—5.
- [28] Zhang T, Liu H B, Luo J F, et al. Long-term manure

- application increased greenhouse gas emissions but had no effect on ammonia volatilization in a Northern China upland field [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 230—239.
- [29] Zhang Q R, Xie Y H, Li T L, et al. Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (23): 4866—4878.[张奇茹, 谢英荷, 李廷亮, 等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应[J]. *中国农业科学*, 2020, 53 (23): 4866—4878.]
- [30] Zhang J J. The dynamics change of carbon and nitrogen in soil wheat system research with deep tillage and organic fertilizers [D]. Xinxiang, Henan; Henan Normal University, 2014.[张紧紧. 深耕和有机物料还田对土壤-小麦系统碳、氮动态影响的研究[D]. 河南新乡: 河南师范大学, 2014.]
- [31] Huang F. The effect of planting and breeding wastes on soil organic carbon and soil enzyme activity under rice-wheat rotation system [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015.[黄帆. 稻麦轮作体系下种养废弃物还田对土壤有机碳和酶活性的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.]
- [32] Chen Y Q, Sui P, Yan L L, et al. Effects of different organic wastes incorporation on soil organic carbon and its fraction under wheat-maize cropping system in North China Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (S2): 94—102.[陈源泉, 隋鹏, 严玲玲, 等. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (S2): 94—102.]
- [33] Hu X. Effects on soil fertility in the application of organic materials in paddy field [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019.[胡啸. 稻田施用有机物料对土壤肥力影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [34] Chen X F, Chang Z Z, Huang H Y, et al. Study on the effect of animal waste water reuse on rice yield and soil fertility [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009 (2): 39—42, 70.[陈晓锋, 常志州, 黄红英, 等. 养殖污水回用对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2009 (2): 39—42, 70.]
- [35] Qi W, Xu Y, Zhang F R. Study on evaluation methods of soil nutrient balance and application at county level in Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37 (2): 238—243.[齐伟, 徐艳, 张凤荣. 黄淮海平原农区县域土壤养分平衡评价方法及其应用[J]. *中国农业科学*, 2004, 37 (2): 238—243.]
- [36] Bakhsh A, Kanwar R S, Karlen D L. Effects of liquid swine manure applications on NO_3^- -N leaching losses to subsurface drainage water from loamy soils in Iowa[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 109 (1): 118—128.
- [37] Shi Y C. Ecological risk of heavy metals and antibiotics in pig manure and slurry application and its biological regulation [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.[史艳财. 猪粪、沼液农用重金属和抗生素的生态风险及生物调控研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.]

(责任编辑: 陈荣府)