

猪粪液高量还田对象草及土壤质量的影响^①

周 丽^{1,2}, 曾茂芹¹, 付 薇^{1,2}, 王小利¹, 韩永芬^{1,2*}, 桂永清³, 王 静³, 张雪梅³

(1 贵州省草业研究所, 贵阳 550006; 2 贵州金农富平生态农牧科技有限公司, 贵州松桃 554100; 3 松桃苗族自治县农业农村局, 贵州松桃 554100)

摘 要: 针对猪粪液高量还田可能引发的环境风险问题, 为确定其最佳施用量, 本研究开展了为期 2 年的田间试验, 探究猪粪液全量替代化肥条件下不同消纳量对象草生产性能及土壤质量的影响。试验系统分析了象草粗蛋白含量, 生物量, 镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu)、锌(Zn)等 5 种重金属积累特征以及土壤养分(全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质)、重金属(Cd、As、Hg、Cu、Zn)含量和土壤 pH。结果表明: 象草植株重金属 Cd 和 Hg 含量在各粪液消纳量处理中均低于检出限值; 粪液浇灌显著提高了象草植株中重金属 As、Cu、Zn 的含量, 其中 200% N 粪液处理含量达最高值, 分别为 0.41、13.49、38.31 mg/kg, 但所有处理 As 含量均远低于 GB 13078—2017《饲料卫生标准》限量值(4.0 mg/kg), 饲草饲用安全性有保障。粪液消纳对土壤钾含量提升效果有限, 但能整体改善土壤肥力。200% N 粪液用量下改善土壤肥力效果最为显著, 土壤全氮、碱解氮、全磷、有效磷及有机质含量较常规化肥对照处理显著提升, 增幅依次为 45.24%、42.94%、42.20%、74.77%、55.91%。试验区域土壤 Cd 背景值较高, 粪液施用 Cd 呈现累积现象; 但其余 4 种重金属含量均符合 GB 15618—2018 中规定的农用地土壤污染风险筛选值要求。在本研究条件下, 象草种植体系高量消纳猪粪液(≤200% N)具有可行性, 既能维持象草产量与品质, 又可提升土壤肥力, 且环境风险可控。建议实际应用中粪液消纳量控制在 200% N 以内, 以实现生产效益与生态安全的协同优化。

关键词: 猪粪液; 象草; 土壤质量; 重金属; 土壤培肥

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A

Effects of High-rate Pig Digested Slurry Application on *Pennisetum purpureum* and Soil Quality

ZHOU Li^{1,2}, ZENG Maoqin¹, FU Wei^{1,2}, WANG Xiaoli¹, HAN Yongfen^{1,2*}, GUI Yongqing³, WANG Jing³, ZHANG Xuemei³

(1 Guizhou Institute of Prataculture, Guiyang 550006, China; 2 Guizhou Jinnongfuping Eco-agriculture and Animal Husbandry Technology Co., Ltd., Songtao, Guizhou 554100, China; 3 Songtao Miao Autonomous County Agriculture and Rural Affairs Bureau, Songtao, Guizhou 554100, China)

Abstract: In order to explore the potential environmental risks associated with high-volume application of separated pig digested slurry and determine its optimal application rate, a two-year field experiment was conducted to investigate the effects of different application rates of pig slurry (complete substitution of chemical fertilizers) on the production performance *Pennisetum purpureum* and soil quality. The crude protein content, biomass, and heavy metal (Cd, As, Hg, Cu, Zn) accumulation characteristics of *Pennisetum purpureum*, as well as soil pH and nutrients (total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, and soil organic matter) were analyzed and compared. The results showed that: the concentrations of heavy metals Cd and Hg in the plant under all pig slurry application treatments were below the detection limit. Pig slurry application significantly increased the contents of As, Cu, and Zn in the plants, with the 200% chemical N equivalent treatment reaching peak values of 0.41, 13.49, and 38.31 mg/kg, respectively. However, all measured values were well below the limits specified in the *Hygiene Standard for Feeds* (GB 13078—2017) (As: 4.0 mg/kg;), indicating safe being used as forage grass. The effect of pig slurry on increasing soil potassium content was limited, but generally

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1301200)、铜仁市科技支撑计划项目(铜仁科研(2022)33 号)和贵州省农业科学院杰出人才团队项目(黔农科院杰出团队(2026)04 号)资助。

* 通信作者(442694189@qq.com)

作者简介: 周丽(1994—), 女, 贵州毕节人, 硕士, 助理研究员, 主要从事高产牧草选育及利用研究。E-mail: zli1994@163.com

improved soil fertility. The most significant improving soil fertility was observed at the 200% N application rate, with notable increases in total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, and organic matter compared to the conventional fertilizer control, with the increase rates being 45.24%, 42.94%, 42.20%, 74.77% and 55.91%, respectively. The experimental area exhibited a naturally high background level of Cd in the soil, and Cd accumulation was observed following pig slurry application. However, the contents of the other four heavy metals all met the requirements of the risk screening values for soil contamination of agricultural land specified in GB 15618—2018. Under the experimental conditions, high-volume pig slurry application ($\leq 200\%$ N) in *Pennisetum purpureum* cultivation systems is proved feasible, maintaining yield and forage quality while enhancing soil fertility and keeping environmental risks manageable, thus, it is recommended to be used in the study area to achieve a balance between production efficiency and ecological safety.

Key words: Separated pig digested slurry; *Pennisetum purpureum*; Soil quality; Heavy metals; Soil fertility improvement

随着生猪养殖规模化发展,如何实现粪污资源化利用已成为制约行业可持续发展的关键问题。《农业农村部办公厅 财政部办公厅关于开展绿色种养循环农业试点工作的通知》(2021)^[1]明确提出,应重点推进液体粪肥就近就地还田利用,着力构建低成本、低风险的液体粪肥还田技术体系。液体粪肥富含氮、磷、钾等速效养分,科学施用可提升作物产量并改善土壤质量^[2-3],但其中潜在的重金属污染风险不容忽视。饲料添加剂中的大部分重金属元素会随动物代谢排出体外,导致粪肥中重金属残留问题突出^[4]。粪液施用量与土壤-作物系统重金属累积量呈显著正相关^[5],这提示科学的粪液用量是保障农田生态安全的关键。然而,当前粪液还田技术体系仍存在以下瓶颈:首先,不同养殖类型粪液重金属含量差异大,表现为集约化养猪场>养牛场>散户养殖;其次,不同农业系统对粪液的消纳能力存在显著差异,不同耕地类型消纳容量排序为杂交象草>速生用材林>叶类蔬菜>木本果树^[6];再者,现有技术尚未建立差异化施用标准,难以适应区域农业多样性需求。值得注意的是,多项长期定位试验为粪液安全利用提供了科学依据。习彦花等^[7]通过 5 年田间试验证实,白三叶草地按 4.5 t/hm² 年施用量连续施用粪液,在提升土壤有机质 28.7% 的同时未引发重金属污染。陈园园等^[8]研究显示,在玉米-小麦轮作体系中实施沼液配施模式,连续 3 年试验周期内作物籽粒重金属含量均低于国家食品安全标准。这些研究成果为构建区域适配的粪液还田技术体系提供了重要参考,但不同气候带、土壤类型及耕作制度下的粪液安全消纳仍需进一步验证。

在贵州喀斯特地区耕地资源有限的现实条件下,如何通过科学调控提升单位土地粪液消纳能力,成为破解种养结合瓶颈的关键。这一转型亟待通过系统研究构建基于区域土壤特性与农作制度的技术标准体

系,以保障粪液资源化利用的生态安全性。象草(*Pennisetum purpureum*)为多年生 C4 植物,具有生物量大、根系发达、耐刈割、抗逆性强等优点^[9],被广泛应用于各类土壤修复研究中。本研究针对贵州喀斯特地貌区“耕地碎片化、粪污消纳空间受限”的突出问题,通过构建象草粪液消纳梯度田间试验,对解决西南生态脆弱区规模化生猪养殖粪液消纳困境具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选址于贵州省铜仁市松桃县黄板镇(109.21°E, 28.17°N),属典型喀斯特地貌农业区,供试土壤为黄壤。供试作物为桂闽象草(*Pennisetum purpureum* cv. Guiminyin),于 2021 年 3 月定植,栽培当年实行零施肥管理以消除前茬肥料干扰。本粪液消纳试验为连续 2 年的田间定位试验(2022 年 4 月—2024 年 10 月),试验所用粪液取自周边 2 km 范围内的规模化生猪养殖场。养殖场收集的粪污经过固液分离装置预处理后几乎拦截了绝大部分未被猪消化的饲料及猪毛等大颗粒物,液态部分进入串联的六级沉淀池系统进行无害化处理。该工艺通过多级自然沉淀逐步去除悬浮颗粒,并通过长时间的静置贮存进行厌氧发酵和自然沉降,从而显著降低粪液中的有害物质含量,并有效杀灭病原体及寄生虫卵,最终获得性质稳定的试验用粪液。供试土壤(耕作层)及粪液基本性状见表 1。

1.2 试验设计

本研究以“种养结合、循环利用”的绿色发展理念为指导,针对现有液体粪肥还田技术缺乏差异化标准、难以适应区域农业多样性需求的瓶颈,聚焦集约化养猪场粪液量大的特点,选取消纳容量较高的象草-土壤系统为研究对象,通过构建“饲草安全-环境安全”双目标导向的梯度试验体系,系统探究猪粪液

表 1 供试土壤、粪液基本性状

Table 1 Characteristics of tested soil and separated pig digested slurry

样品	pH	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	有机质(g/kg)	As(mg/kg)	Hg(mg/kg)
土壤	7.02±0.63	1.64±0.10	1.11±0.29	15.8±0.95	15.51±0.82	6.50±0.45	0.025±0.007
粪液	7.71±0.20	0.68±0.7	0.24±0.11	1.27±0.27	0.09±0.02	0.22±0.04	0.003±0.000 38
样品	Cu(mg/kg)	Cd(mg/kg)	Zn(mg/kg)	蛔虫卵(个/mL)	血吸虫卵(个/mL)	钩虫卵(个/mL)	
土壤	26.61±3.0	0.32±0.32	71.22±4.80	—	—	—	
粪液	0.78±0.12	0.004±0.000 6	5.20±0.57	0	0	0	

注：“—”表示未检测该项目，下表同。

生态安全消纳阈值。试验设计综合考虑象草常规化肥施用规律与粪液养分特征，参照当地化肥施用习惯(苗期、拔节期及刈割后分别施用尿素 300 kg/hm²)分 3 次浇灌粪液，浇灌粪液时选在晴朗无雨的天气进行，粪液浇灌量大的处理采用少量多次浇灌，避免粪液过快下渗。粪液浇灌量依据粪液全氮含量(0.68 g/kg)进行氮素当量换算，设置 6 个梯度粪液处理及常规化肥对照(CK)，粪液处理具体包括：80%(F1)、100%(F2)、150%(F3)、200%(F4)、250%(F5)、300%(F6)氮素替代处理，每个处理 10 个重复。试验采用定制化隔离装置确保独立性：选用抗腐蚀 PVC 材质排污管(直径 1.0 m×高 0.4 m)构建环形围隔，垂直嵌入土层 20 cm 形成物理屏障，有效阻隔田面水侧渗和跨区迁移。供试象草定植密度按 45 000 株/hm² 标准化种植，在试验期间，各处理间的田间管理措施均保持一致。

1.3 样品采集

试验象草提前一年种植，生长期间不作任何施肥处理。象草一年割 2 茬，于粪液消纳试验开始后第二

年在象草第二茬刈割时采集土壤和植株样品。测产后各处理每个重复随机取象草植株 1 kg 左右混合后留取 3 份每份 1 kg 的样品，105 ℃ 杀青 30 min 后 65 ℃ 烘干用于测定粗蛋白含量。以 5 点采样法用直径 50 mm 的不锈钢土钻取各处理每个重复 0~20 cm 的表层土壤，去除根系、杂草、石块等杂质后充分混合，每个处理留取 3 份样品，每份 1 kg；土壤样品自然风干，碾碎过 100 目筛，保存于自封袋中备用。

1.4 样品测定与方法

粪液、土壤及象草植株的粗蛋白、全氮、全钾、全磷、碱解氮、速效钾、有效磷、Cu、Zn、Cd、As、Hg 含量及 pH 由武汉普奈斯检测技术有限公司检测，检测方法如表 2 所示。

1.5 数据统计与分析

试验数据采用 Excel 2019 进行整理，采用 SPSS 26 进行统计分析，并运用 Origin 2018 进行绘图。以 LSD 法进行多重比较，差异显著水平为 $P<0.05$ ；采用 Pearson 法进行相关性分析。

表 2 各项指标检测方法

Table 2 Analytical methods for measured parameters

检测项目	土壤	粪液	牧草
粗蛋白(%)	—	—	GB/T 6432—2018 ^[22]
pH	NY/T 1377—2007 ^[10]	NY/T 1377—2007 ^[10]	—
有机质(g/kg)	NY/T 1121.6—2006 ^[11]	NY/T 525—2021 ^[18]	—
全氮(g/kg)	LY/T 1228—2015 ^[12]	HJ 636—2012 ^[19]	—
碱解氮(mg/kg)	LY/T 1228—2015 ^[12]	LY/T 1228—2015 ^[12]	—
全磷(g/kg)	LY/T 1232—2015 ^[13]	LY/T 1232—2015 ^[13]	—
有效磷(mg/kg)	LY/T 1232—2015 ^[13]	LY/T 1232—2015 ^[13]	—
全钾(g/kg)	LY/T 1234—2015 ^[14]	LY/T 1234—2015 ^[14]	—
速效钾(mg/kg)	LY/T 1234—2015 ^[14]	LY/T 1234—2015 ^[14]	—
Cu、Zn(mg/kg)	HJ 491—2019 ^[15]	HJ 700—2014 ^[20]	GB/T 13885—2017 ^[23]
Cd(mg/kg)	GB/T 17141—1997 ^[16]	HJ 680—2013 ^[17]	GB/T 13082—2021 ^[24] 石墨炉原子吸收光谱法
As(mg/kg)	HJ 680—2013 ^[17]	GB/T 7475—1987 ^[21]	GB/T 13079—2022 ^[25]
Hg (mg/kg)	HJ 680—2013 ^[17]	GB/T 7475—1987 ^[21]	GB/T 13081—2022 ^[26]

2 结果与分析

2.1 粪液消纳对土壤重金属含量的影响

从表 3 可以看出, 试验地土壤重金属 Cd 的背景值偏高, 浇灌粪液后土壤中 Cd 含量较 CK 有增加的趋势, 在 F5 和 F6 处理时土壤中 Cd 的含量达到最大, 与 CK 差异显著($P<0.05$)。浇灌粪液后各处理土壤中的 As 含量显著高于 CK($P<0.05$), 但不同粪液消纳量处理的 As 含量仍远低于农用地土壤污染风险筛选值, 且各粪液处理间差异不显著。浇

灌粪液对土壤中的 Hg 影响较小, 各粪液消纳处理间 Hg 含量与 CK 差异不显著。Cu 和 Zn 的变化规律一致, 粪液消纳后土壤中 Cu 和 Zn 含量较 CK 有所增加, 在 F4 处理时含量达到最高且显著高于 CK, 随着粪液消纳量的增加, 其含量又呈降低的趋势。浇灌粪液后土壤中重金属 As、Hg、Cu 和 Zn 的含量较 CK 有不同程度的增加, 但这 4 种重金属在不同粪液消纳量处理下的含量均在农用地土壤污染风险筛选值(GB15618—2018)安全范围内, 表明这些重金属的污染风险较低。

表 3 不同粪液消纳量下土壤重金属含量变化(mg/kg)
Table 3 Soil heavy metal contents under different pig slurry application rates

处理	As	Hg	Cu	Cd	Zn
CK	6.65±0.17b	0.022±0.002a	27.09±7.59b	0.31±0.01b	73.96±11.36c
F1	8.64±0.33a	0.023±0.002a	31.37±6.96ab	0.33±0.01ab	90.82±14.99bc
F2	8.66±0.98a	0.023±0.006a	38.70±11.31ab	0.33±0.01ab	91.86±17.05bc
F3	8.93±0.91a	0.024±0.004a	34.08±6.57ab	0.31±0.01b	90.13±18.49bc
F4	8.40±0.23a	0.025±0.001a	44.84±6.74a	0.33±0.01ab	123.58±15.20a
F5	8.11±0.50a	0.025±0.002a	38.87±6.00ab	0.35±0.03a	96.72±3.43bc
F6	7.99±0.40a	0.025±0.006a	40.70±1.19ab	0.34±0.02a	107.25±3.93ab
农用地土壤污染风险筛选值 ^[27]	30	2.40	100	0.30	250

注: 同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同。

2.2 粪液消纳对土壤养分含量的影响

由表 4 可知, 粪液消纳对土壤 pH 影响不大, 各粪液处理的土壤 pH 与 CK 差异均不显著。随粪液消纳量的增加, 土壤有机质、全磷和全氮含量呈先增高

后降低的趋势, 且均在 F4 处理时达到最大值, 显著高于 CK($P<0.05$), 增幅分别为 55.91%、42.20%、45.24%。粪液消纳对土壤全钾含量的影响较小, 各粪液消纳处理间及与 CK 处理间差异均不显著。

表 4 不同粪液消纳量下土壤理化性质变化
Table 4 Soil physicochemical properties under different pig slurry application rates

处理	pH	有机质(g/kg)	全磷(g/kg)	全氮(g/kg)	全钾(g/kg)
CK	7.14±0.06ab	41.62±2.10c	1.09±0.02c	2.52±0.06b	7.02±0.69a
F1	6.87±0.10b	48.12±9.96bc	1.26±0.11bc	2.92±0.54ab	7.10±0.71a
F2	6.88±0.24b	53.04±11.43abc	1.41±0.24ab	3.19±0.68ab	7.41±1.19a
F3	7.07±0.02ab	57.51±10.66abc	1.49±0.07ab	3.39±0.70ab	8.26±0.47a
F4	7.21±0.02a	64.89±7.64a	1.55±0.18a	3.66±0.18a	7.92±0.64a
F5	7.17±0.09a	59.81±5.66ab	1.48±0.07ab	3.29±0.35ab	8.19±0.37a
F6	7.15±0.28ab	57.14±7.37abc	1.35±0.17ab	3.38±0.19ab	7.27±0.29a

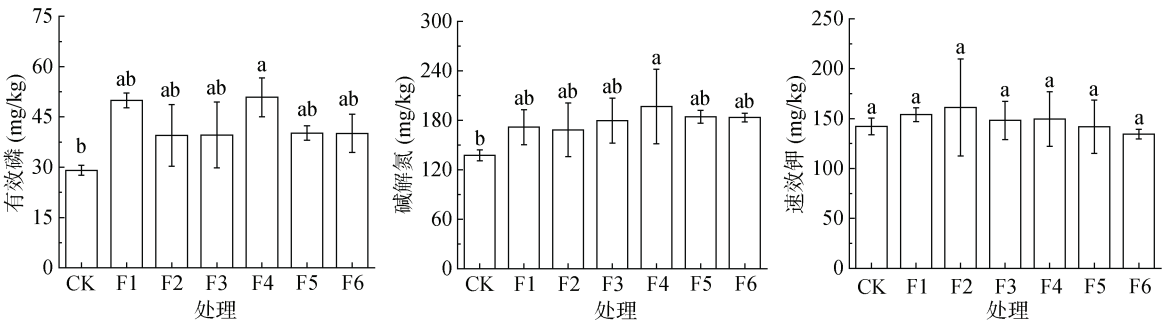
由图 1 可知, 粪液消纳后土壤中有效磷和碱解氮的变化规律与全磷和全氮的变化规律一致, 浇灌粪液后土壤中的有效磷和碱解氮含量较 CK 增加, 并在 F4 处理时显著高于 CK($P<0.05$), 增幅分别为 74.77%、42.94%, 但各粪液处理间差异不显著。粪污消纳对土壤中速效钾含量影响较小, 各粪液消纳处理与 CK 差异不显著。

2.3 粪液消纳对象草生长及重金属含量的影响

由图 2 可知, 适宜的粪液消纳量不会造成象草减产, 除了在 F1 处理时象草的鲜草产量显著低于 CK($P<0.05$), 其他粪液处理的鲜草产量与 CK 差异不显著。不同粪液消纳量处理的象草粗蛋白含量变化趋势与鲜草产量一致, 除 F1 处理外, 其他粪液消纳量处理下象草粗蛋白含量与 CK 差异不显著。

由表 5 可知, 象草植株中重金属 Hg 和 Cd 含量较低, 在不同粪液消纳量处理下均未检出。粪液消纳处理象草植株中的 As、Cu、Zn 含量均高于 CK, 且随粪液消纳量的增加呈先增高后降低的趋势, 在 F4

处理时含量达到最高, 较 CK 分别显著提升 241.67%、25.61%、75.98%($P<0.05$)。但其 As 含量仍远低于 GB 13078—2017《饲料卫生标准》的限量值, 可以安全饲喂家畜。



(图中小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同)

图 1 不同粪液消纳量处理下土壤有效磷、碱解氮和速效钾含量

Fig. 1 Contents of soil available phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available potassium under different pig slurry application rates

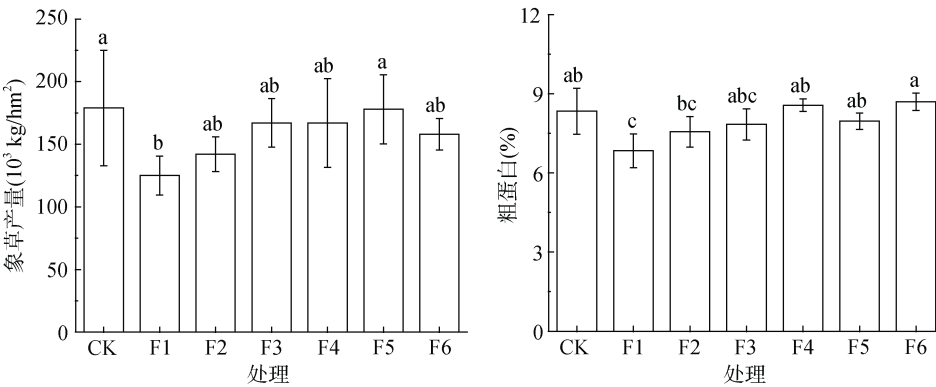


图 2 不同粪液消纳量处理下象草产量和粗蛋白含量

Fig. 2 Yields and crude protein contents of *Pennisetum purpureum* under different pig slurry application rates

表 5 不同粪液消纳量处理下象草植株重金属含量(mg/kg)

Table 5 Heavy metal contents in *Pennisetum purpureum* under different pig slurry application rates

处理	As	Cu	Zn	Hg	Cd
CK	0.12±0.04c	10.74±0.65b	21.77±29.01c	/	/
F1	0.23±0.09bc	12.17±0.58a	29.01±3.47bc	/	/
F2	0.27±0.04abc	12.17±0.56a	29.05±4.03bc	/	/
F3	0.31±0.11ab	12.74±0.77a	30.77±4.93ab	/	/
F4	0.41±0.07a	13.49±0.59a	38.31±4.71a	/	/
F5	0.39±0.09ab	12.63±1.11a	33.76±3.81ab	/	/
F6	0.29±0.13ab	12.86±0.91a	35.33±5.45ab	/	/

注: “/”表示未检出。Hg 和 Cd 检出限均为 0.002 mg/kg; 牧草的 As、Cd、Hg 限量值采用 GB 13078—2017《饲料卫生标准》^[28]中饲料原料的相关限量值, 分别为 4.0、1.0、0.1 mg/kg; Cu、Zn 没有限量值标准。

2.4 粪液消纳后土壤理化性质与重金属含量的相关性

对粪液消纳量、土壤重金属和理化性质进行相关分析可知(表 6), 土壤重金属 As、Hg、Cu、Zn 含量与土壤有机质、有效磷、全磷和全氮呈显著或极显著正相关, 土

壤 Cd 含量仅与粪液消纳量呈极显著正相关。土壤 pH 与土壤有机质呈显著正相关, 与粪液消纳量及土壤养分相关性不显著。粪液消纳量与土壤重金属 Cu、Cd、Zn 呈显著或极显著正相关, 与重金属 As 和 Hg 的相关性不显著, 与土壤有机质、全磷、全氮呈显著或极显著正相关。

表 6 粪液消纳量与土壤肥力指标及重金属含量的相关性
Table 6 Correlations between pig slurry application rate with soil fertility indicators and heavy metal contents

	土壤 pH	粪液消纳量	有机质	全钾	有效磷	全磷	碱解氮	速效钾	全氮
As	-0.173	0.228	0.539*	0.164	0.503*	0.696**	0.451*	0.298	0.678**
Hg	0.402	0.399	0.663**	-0.029	0.456*	0.517*	0.392	0.28	0.782**
Cu	0.287	0.547*	0.765**	-0.144	0.672**	0.728**	0.432	0.073	0.710**
Cd	0.05	0.598**	0.312	0.354	0.387	0.271	0.306	-0.003	0.365
Zn	0.273	0.567**	0.750**	-0.012	0.735**	0.651**	0.405	0.01	0.728**
土壤 pH	1	0.378	0.496*	-0.078	0.247	0.138	0.275	-0.148	0.328
粪液消纳量		1	0.589**	0.335	0.402	0.521*	0.507*	-0.191	0.535*

注：*、**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平(双侧)显著相关。

3 讨论

3.1 粪液消纳对象草生长的影响

粪液作为有机肥源,其养分构成与作物需求具有高度适配性。粪液中水溶性氮、有效磷及可溶性有机质等活性组分占比显著高于常规化肥,这些组分可通过促进根系分泌物分泌,激活土壤磷酸酶和脲酶活性,进而增强养分生物有效性^[29-30]。本研究揭示(图 2),当粪液施用量达 100% 氮替代(F2 处理)时,象草年产量达 142 t/hm²,粗蛋白含量 7.56%,与常规化肥处理(CK)无显著差异。这表明适宜的粪液可以代替化肥,但过量地施用粪液并不利于提高象草产量。这种“抛物线型”产量响应规律在多类作物系统中得到印证。陈广银等^[31]发现,猪粪水 200% 氮替代时水稻可获得最大产量,但过量施用猪粪水造成水稻烂根、死苗,小麦疯长;娄雨等^[32]通过叶面生理分析揭示,沼液替代化肥可使小白菜根长和株高增加,提高叶片叶绿素含量,其提质机制与粪液含有的氮磷钾、腐殖酸、维生素 C 等营养物质的生物强化作用密切相关。Rahaman 等^[33]的长期定位试验进一步证实,38% 氮替代模式在维持玉米产量的同时,可使氨挥发通量降低,这为粪液农用的环境协同效益提供了量化依据。以上研究表明粪液中的养分能够满足作物生长所需,粪液安全施用量应通过作物-土壤系统的养分供需平衡与重金属累积风险的耦合分析确定。

粪液中不仅含有丰富的营养物质,还含有重金属,作物在吸收利用营养物质的同时也会吸收重金属,长期或过量施用可能会对作物造成污染。有研究表明,施用猪粪/粪液后茄子^[34]、蔬菜^[35]、水稻^[31]中的重金属含量增加。本研究中,施用粪液后象草植株中的重金属含量高于常规化肥处理,在 200% N 粪液消纳(F4 处理)时象草植株重金属含量最高,但仍远低于 GB 13078—2017《饲料卫生标准》^[28]限值。不同

作物对重金属的吸收具有一定的差异,艾平等^[36]研究发现蔬菜类作物较粮食作物更易积累重金属。刘炳好等^[6]对不同土地利用类型的沼液还田风险进行分析和评价,结果表明,不同耕地类型对沼液的消纳容量大小为杂交象草>速生用材树>叶类蔬菜>木本果树;沼液还田对不同植物的可食用部分的污染风险为水果类>蔬菜类>牧草类。此外,我国 GB 13078—2017《饲料卫生标准》^[28]中牧草的重金属限量值较低,As、Cd、Hg 含量限量值分别为 2、1、0.1 mg/kg,是 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[37]中蔬菜 As(0.5 mg/kg)的 4 倍、Cd(0.05 mg/kg)的 20 倍、Hg(0.01 mg/kg)的 10 倍。象草是多年生草本植物,再生能力强,生物量大。因此,施用沼液不易造成象草重金属污染,可通过周期性的刈割,少量多次地从土壤中提取并移除重金属。这种方法不仅减轻了粪污对环境的污染风险,还因其低成本和可持续性,为粪污消纳提供了一种经济可行的解决方案。

3.2 粪液消纳对土壤养分含量的影响

粪液中含有植物生长所需的各种养分,施用粪液能改善土壤肥力,提高土壤生产力。前人研究表明,施用粪液能有效改善土壤质量^[8]。本研究表明,施用粪液后土壤氮、磷及有机质增加,这与前人研究结果一致^[38]。分析原因为:浇灌粪液后通过吸收、挥发以及硝化作用将其中的铵态氮转化为了土壤中的硝态氮。同时,粪液中所含的纤维素、木质素等高分子物质在微生物的作用下分解转化为土壤有机质,其所含的氮、磷、钾等元素则直接补充土壤有效养分,从而显著提升土壤有机质及有效养分含量,改善土壤肥力^[39]。但粪液消纳对土壤肥力的提升并不是粪液消纳量越大肥力提升效果越明显。在本研究中,粪液消纳量 200% 氮替代(F4 处理)时土壤中有机质、全氮、全磷、有效磷和碱解氮含量增加达到显著水平,随着粪液消纳量的进一步增加,各养分含量呈降低趋势,

这表明土壤对粪液的保持能力有限。粪液中的养分除大部分被象草和土壤吸收外,还有部分粪液向深层土壤迁移^[40]。为更好地给粪液安全消纳提供参考依据,后续还需对不同土层剖面以及高施用量、不同施用频次下粪液消纳对土壤的影响进行研究。

本研究中粪液消纳对土壤中全钾和有效钾的含量影响不显著,表明粪液对土壤钾的补充效果不明显,这与胡振民等^[41]、马强等^[42]、罗伟等^[43]的研究结果一致。这可能与土壤中钾的形态分布有关,土壤中大部分钾以矿物晶格中的结构性钾形式存在,这种形态的钾由于结构稳定,难以被植物直接吸收利用。而且,土壤中可直接被植物利用的水溶性钾和交换性钾的比例较低^[44]。虽然用粪液完全代替化肥对象草的产量及粗蛋白含量无明显影响,但是从维持土壤养分平衡的角度,使用粪液种植时需要额外补充养分钾^[41]。本研究也表明,粪液消纳后土壤 pH 较为稳定,这一现象可能归因于供试粪液呈微碱性,且供试土壤呈中性,导致粪液对试验土壤的 pH 影响较小,这与艾平等^[36]、金柯达等^[45]的研究结果一致。值得注意的是,粪液中富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 等碱基阳离子,这些离子能有效补充土壤交换性盐基,增强土壤盐基饱和度,从而显著提升土壤缓冲能力和抗酸化潜力^[46]。

3.3 粪液消纳对土壤重金属含量的影响

饲料中常添加含有 Cu、Zn、As 等元素的矿物质和化学物质,这些元素在动物体内不易被吸收,最终大部分随粪便排出体外,在粪污厌氧发酵过程中,微生物无法降解有机物中的重金属成分,这些重金属最终会残留在沼液沼渣中^[47]。尽管本研究仅进行了 2 年,但土壤中 As、Cu、Zn、Cd 含量较常规化肥处理显著增加,表明施用粪液存在土壤重金属富集的风险。这与顾佳等^[48]对江苏省规模化生猪养殖场重金属污染风险评价的结果一致,其研究表明规模化养猪场土壤中重金属 Zn、Cu、Cd、As 存在不同程度的累积现象。在施用 200% N 粪液(F4 处理)时土壤 Zn、Cu、As 含量最高,但仍远低于农用地土壤污染风险筛选值,随着粪液量的加大,3 种土壤重金属含量降低。这与土壤养分的变化规律一致,表明 Zn、Cu、As 3 种重金属可能发生了纵向迁移。受成土母质影响,研究区土壤重金属 Cd 的背景值偏高^[49],施用粪液后土壤中 Cd 呈现累积趋势,但象草植株中未检出 Cd(检出限 0.002 mg/kg)。这可能是由于研究区土壤呈中性,导致 Cd 的生物有效性较低,从而限制了象草对 Cd 的吸收和转运。为进一步优化粪液的安全高

效消纳,后续研究应重点关注粪液施用对土壤 Cd 不同赋存形态的影响,以更科学地评估其环境风险。

4 结论

粪液消纳控制在适宜范围内可有效改良土壤。本试验中,施用 200% N 粪液对土壤的改良效果最佳,可显著提高土壤有机质、氮和磷含量,但对钾的补充效果较为有限。研究区域受地质背景影响,土壤 Cd 背景值较高。尽管粪液施用使土壤中 As、Hg、Cu、Zn 含量较常规施肥有所增加,但所有检测值均低于 GB 15618—2018 中规定的农用地土壤污染风险筛选值。然而,过量施用粪水可能导致地下水污染和重金属富集风险,因此建议在种植象草用于粪污消纳时,以施用 200% N 粪液为宜。象草能够适应土壤高负荷粪液消纳的需求,并可吸收粪液中的重金属。通过周期性地刈割象草,可实现土壤重金属的安全提取,降低环境风险。同时,所产象草的重金属含量远低于 GB 13078—2017《饲料卫生标准》的限量要求,可用于饲喂牛羊等家畜。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部办公厅 财政部办公厅关于开展绿色种养循环农业试点工作的通知. (2021-05-26). https://zzys.moa.gov.cn/tzgg/202105/t20210526_6368443.htm
- [2] 王威,唐蛟,殷金忠,等. 秸秆全量还田配施沼液对砂姜黑土水稳性团聚体及结合有机碳的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 53-61.
- [3] 唐琪,曹蕾,钱建南,等. 沼液替代化肥对稻田土壤节肢动物群落的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 904-912.
- [4] 尹燕,张凯,裴强,等. 畜禽粪污厌氧发酵全量利用模式效果分析——以河南省潢川县为例[J]. 农业工程, 2023, 13(12): 49-53.
- [5] 杨健伟,周志高,张迪,等. 不同肥力红壤氮磷渗漏损失特征及猪粪安全消纳量的研究[J]. 土壤, 2019, 51(2): 305-315.
- [6] 刘炳好,王—佩,姚作芳,等. 沼液还田下不同种植模式的重金属风险评价及安全消纳量分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(8): 1507-1515.
- [7] 习彦花,程辉彩,刘敬,等. 沼液长期施用对白三叶草地土壤环境质量的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(4): 1080-1088.
- [8] 陈园园,豆红光,丁文金,等. 砂姜黑土区周年麦玉轮作沼液替代对土壤养分及重金属积累的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(4): 684-693.
- [9] 马兰心,唐棋,辜娇峰,等. 酒石酸与农艺刈割联合辅助象草植物修复镉污染土壤的效应以及对土壤微生物群落的影响[J]. 环境科学研究, 2024, 37(2): 359-370.

- [10] 中华人民共和国农业部. 土壤中 PH 值的测定: NY/T 1377—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [11] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [12] 国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [13] 国家林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 国家林业局. 森林土壤钾的测定: LY/T 1234—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 生态环境部. 土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法: HJ 491—2019[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.
- [16] 国家环境保护总局. 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法: GB/T 17141—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法: HJ 680—2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [18] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T 525—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [19] 中华人民共和国环境保护部. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法: HJ 700—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [21] 国家环境保护局. 水质 铜、锌、铅、镉的测定 原子吸收分光光度法: GB 7475—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法: GB/T 6432—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中钙、铜、铁、镁、锰、钾、钠和锌含量的测定 原子吸收光谱法: GB/T 13885—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 饲料中镉的测定: GB/T 13082—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 饲料中总砷的测定: GB/T 13079—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 饲料中汞的测定: GB/T 13081—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [27] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料卫生标准: GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [29] Cai J B, Ran Q F, Zhou J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and biogas slurry application on plant growth, soil composition, and microbial communities of hybrid *Pennisetum*[J]. Sustainability, 2024, 16(19): 8416.
- [30] 秦乃群, 陈现朝, 高敬伟, 等. 沼液施用对花生小麦轮作土壤养分和重金属含量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(10): 1422—1428.
- [31] 陈广银, 曹海南, 吴佩, 等. 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.
- [32] 娄雨, 李艳, 姜灵伟, 等. 不同浓度沼液及施用方式对小白菜生长效果的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 86—94.
- [33] Rahaman M A, Zhan X Y, Zhang Q W, et al. Ammonia volatilization reduced by combined application of biogas slurry and chemical fertilizer in maize-wheat rotation system in North China Plain[J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4400.
- [34] 孙毅, 王笑颖, 陈宗培, 等. 猪粪对茄子和土壤重金属积累的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(5): 52—56, 90.
- [35] 程娟, 刘沐衡, 肖能武, 等. 猪场粪水施用对设施白菜及土壤重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2559—2567.
- [36] 艾平, 李柏伦, 金柯达, 等. 沼肥施用对土壤和不同作物的重金属含量及风险影响 Meta 分析[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(10): 2653—2663.
- [37] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [38] Wang Z C, Sanusi I A, Wang J D, et al. Biogas slurry significantly improved degraded farmland soil quality and promoted *Capsicum* spp. production[J]. Plants, 2024, 13(2): 265.
- [39] Amlinger F, Götz B, Dreher P, et al. Nitrogen in biowaste and yard waste compost: Dynamics of mobilisation and availability—a review[J]. European Journal of Soil Biology, 2003, 39(3): 107—116.
- [40] 商小兰, 徐著, 张海娟, 等. 沼液灌溉对南方低丘果园土壤碳氮磷积累与淋移的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(29): 52—58.
- [41] 胡振民, 万青, 李欢, 等. 喷灌沼液对茶园土壤性质及茶叶产量和品质的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(11): 2757—2763.
- [42] 马强, 刘中良, 周桦, 等. 不同施肥模式对作物-土壤系统养分收支的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 520—524.
- [43] 罗伟, 张智慧, 伍钧, 等. 沼液对成都平原地区土壤氮、磷、钾含量及其平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 185—191.
- [44] Zhang M Y, Riaz M, Xia H, et al. Four-year biochar study: Positive response of acidic soil microenvironment and *Citrus* growth to biochar under potassium deficiency

- conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152515.
- [45] 金柯达, 彭宇志, 杨高中, 等. 蔬菜栽培中连续施用猪粪沼肥的肥效与重金属风险研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 359–370.
- [46] Shi R Y, Liu Z D, Li Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 77–84.
- [47] 李轶, 宫兴隆, 崔铁浩, 等. 膨润土对猪粪厌氧发酵重金属铬钝化的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8): 195–203.
- [48] 顾佳, 辛东帅, 姜辞冬, 等. 江苏某市规模化养殖场土壤重金属污染与生态健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(2): 398–408.
- [49] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2877–2884.

(责任编辑：毛小芳)