

添加生物质炭对猪场废水灌溉土壤 养分状况及铅有效性的影响

王月清^{1,2}, 赵京³, 黄玉茹⁵, 高青^{1,2}, 孙向辉³, 蔡寒玉³, 崔世慧⁴, 杜臻杰^{1,2*}
(1.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院 河南新乡农业水土
环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002; 3.河南工学院 有机固废处理与资源化实验室,
河南 新乡 453003; 4.获嘉县农业农村局, 河南 新乡 453800;
5.新乡市环境保护科学设计研究院, 河南 新乡 453800)

摘要:【目的】为养猪废水安全灌溉提供科学依据。【方法】试验选取新乡郊区农田0~20 cm表层土壤, 采用PVC根箱法种植小麦, 试验设置4种水平的生物质炭添加量0%、0.5%、2%、5% (W0、W0.5、W2、W5) 和对照CK (无作物和生物质炭)。测定了各处理根际和非根际土壤养分状况与含铅量, 探讨了处理间土壤养分状况和铅迁移规律的差异特征。【结果】与CK相比, 施加生物质炭改善了土壤理化性状, W2和W5处理显著增加了土壤有机质量、碱解氮量、速效磷量与速效钾量, 尤其是非根际土壤的增幅更大。同时, 施加生物质炭处理能够降低土壤有效铅量, W2和W5处理土壤有效铅量降幅较大, 达20.7%~33.3%, 且非根际土壤有效铅量显著低于根际土壤。【结论】对于北方碱性土壤, 灌溉养猪废水时添加适量的生物质炭(W2), 能够改善土壤理化性质, 降低铅的生物有效性, 减少向植物体内的迁移。

关键词: 有效态铅; 生物质炭; 养猪废水; 土壤养分状况

中图分类号: X53

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020449

OSID:



王月清, 赵京, 高青, 等. 添加生物质炭对猪场废水灌溉土壤养分状况及铅有效性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 40(3): 87-93.

WANG Yueqing, ZHAO Jing, GAO Qing, et al. Amending Soil with Biochar Increases Soil Nutrients and Reduce Pb Mobility in Soil Irrigated with Piggery Wastewater [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 40(3): 87-93.

0 引言

【研究意义】利用再生水、养殖废水以及微咸水等替代水源进行灌溉是缓解农业用水紧缺的重要途径^[1]。随着我国社会经济的快速发展, 畜禽养殖业由粗放型逐渐走向规模化和集约化。养殖过程中会产生大量的废水, 如果不经处理就恣意排放会对生态环境造成巨大污染。养殖废水中含有一定量的氮、磷、钾等作物生长必需的元素, 用来灌溉不仅可以提高土壤养分、减少化学肥料的施用, 同时也能在一定程度上缓解灌溉水源短缺的压力^[2-3]。值得关注的是, 养殖废水中还含有铅镉铜锌等重金属、病原体和盐基离子, 直

接灌溉农田存在一定的环境风险^[1], 铅作为一种分布面积广泛、危害程度极深的重金属, 一直备受关注。土壤中铅主要是非代谢性的被动进入植物体内, 能够降低根细胞的有丝分裂速度, 影响作物生长发育, 导致其生长缓慢和中毒现象, 同时铅的半衰期较长, 在食物链富集最终会危害人体健康^[4]。因此, 科学、合理、安全地利用养殖废水, 对缓解农业用水矛盾、提升地力水平以及保护生态环境都具有重要的现实意义。

生物质炭是有机质在厌氧环境中经过热解形成的一种不完全燃烧产物即一类富炭、高芳香化和高稳定性的固体产物, 是黑炭的一种存在形式^[5]。具有巨大的比表面积、丰富的孔隙结构以及大量的含氧活性基团, 能够作为土壤改良剂^[6], 改善土壤理化性状, 使土壤有害物质降解或失活来提高土壤肥力^[7], 钝化土壤中重金属从而降低其生物有效性^[8]。【研究进展】研究发现, 长期施用生物质炭能够有效提高土壤孔隙度, 改善土壤环境。施加生物质炭能够提高土壤pH值, 改善酸性土壤质量^[9]。另有研究表明, 生物质炭的添

收稿日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779260, 51879268, 21906041); 河南省科技攻关项目(192102110051, 202102110123); 中央级科研院所基本科研业务费(FIRI2017-11); 河南省高校重点科研项目(21B610004)

作者简介: 王月清(1994-), 男, 河南信阳人。主要从事土壤污染控制与修复研究。E-mail: wyqh12@163.com

通信作者: 杜臻杰(1982-), 男, 河南新乡人。副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事农业水土资源利用与环境方面的研究。E-mail: imdzj11@163.com

加可以有效增加土壤速效养分和有机碳的量^[10-12]。除此之外,生物质炭由于其自身的特性,常被用作土壤重金属的修复材料。【切入点】目前关于生物质炭对重金属污染土壤修复方面的研究较多^[13-15],但在养猪废水灌溉下施用生物质炭对小麦根际和非根际土壤理化性状改善和重金属迁移的研究较少^[1]。【拟解决的关键问题】选取新乡市郊区农田土壤,通过根箱试验,研究生物质炭添加对猪场废水灌溉根际和非根际土壤养分和有效态铅量的影响和互作效应,以期为猪场废水的农业安全利用提供科学依据和理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 11 月 6 日—2019 年 2 月 2 日在中

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 The basic physicophysicals of the soil for testing

项目	Eh/mv	田间持水率/(cm ³ ·cm ⁻³)	pH 值	有机质量/(mg·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)
数值	412.62	33.76	8.53	2.49	554.25	0.89	16.47	8.26

表 2 供试猪场废水水质指标

Table 2 Basic water quality indicators for wastewater in pig farms

项目	pH 值	COD/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	Mn/(mg·L ⁻¹)	Pb/(mg·L ⁻¹)
数值	6.25±0.087	185±15.00	215±21.34	80.56±16.78	157.5±26.12	0.15±0.032	0.012±0.003

表 3 小麦秸秆生物质炭组分结构

Table 3 The structure index of the carbon part of wheat straw

项目	总氮/(g·kg ⁻¹)	总磷/(g·kg ⁻¹)	总钾/(g·kg ⁻¹)	总碳/(g·kg ⁻¹)	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	阳离子交换量/(mmol·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)
数值	5.2	0.9	44.2	625.8	8.8	33.6	9.2

1.3 试验设计

试验采用长 14 cm、宽 12 cm、高 17 cm 的 PVC 根箱进行试验,沿长边把根箱用 300 目尼龙网分成 5 部分(5 cm: 1 cm: 2 cm: 1 cm: 5 cm),5 cm 的部分为非根际,1 cm 为过渡区,中间 2 cm 为根际,小麦种植于 2 cm 的根际部分^[1]。供试生物质炭为小麦秸秆生物质炭,试验设置 W0(不添加生物质炭)、W0.5(0.5% C)、W2(2% C)、W5(5% C)4 个水平的生物质炭处理,每个处理设 3 个重复。同时设对照 CK(不施用生物质炭、不种植作物)。供试土壤经过自然风干、破碎、然后过 2 mm 筛,每个根箱装 3 kg 土,底肥添加量为 1 g/kg 的复合肥料(N、P₂O₅、K₂O 量分别为 15%、25%、4%)和生物质炭充分混合后装入根箱。装土过程中把根际土、非根际土以及过渡区域土装平,再分别加入 300 mL 去离子水静置 12 h。每盆播种 8~10 粒,播深 5 cm。播后每隔 2 d 观察出苗情况,并于出苗 7 d 后,每盆定株 5 棵。每隔 2 d 通过质量法来确定各处理间土壤的含水率,猪场废水稀释 5 倍后达到农田灌溉水质标准(GB5084—2005),

国农业科学院农田灌溉所洪门野外科学观测试验站人工气候室进行。试验站地处北纬 35°19′,东经 113°53′,海拔 73.2 m,多年平均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时间 2 398.8 h,多年平均降水量 588.8 mm,丰水年与枯水年相差 3~4 倍,7—9 月降水量占全年降水量的 70% 左右。多年平均蒸发量 2 000 mm。

1.2 试验材料

试验土壤来自新乡市郊区农田 0~20 cm 土壤,土壤类型为潮土。土壤性质基本理化质如表 1 所示。猪场废水取自新乡市新乡县某养殖场内的 UASB 升流式厌氧塔内,原液稀释 5 倍后作为供试废水浇灌根箱,供试废水水质指标如表 2 所示。生物质炭购于河南省商丘市三利新能源有限公司,小麦秸秆生物质炭的组分结构如表 3 所示。供试小麦品种为百农 4919。

再进行灌溉。CK 的灌溉量保持土壤含水率在田间持水率的 60% 左右,持续 90 d,总灌水量约为 9 L/pot。

1.4 试验指标测定

小麦生长 90 d 后,使用 40 cm 小型土钻,在根际与非根际中分别取 0~15 cm 的土层,每采 1 个样后,土钻使用去离子水清洗擦拭干净再使用。土样自然风干,破碎备用。指标测定参照《土壤农业化学分析方法》^[16]。按 1:2.5 的固液比制备土壤悬液,用电位法测定 pH 和 Eh。土壤有机质用重铬酸钾容量法测定。土壤碱解氮用碱解扩散法。土壤速效钾用 NH₄AC 提取—火焰光度法测定。土壤有效态 Pb 用 DTPA 提取—原子吸收分光光度法测定。

1.5 数据处理

试验数据通过 SPSS 16.0 进行统计分析(显著性水平为 0.05),通过 Origin 2018 进行作图。

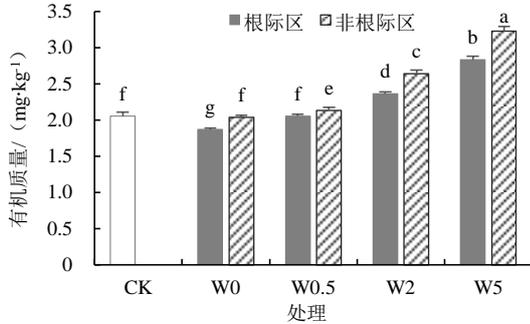
2 结果与分析

2.1 不同生物质炭添加量土壤有机质的影响

图 1 为根际与非根际有机质量。由图 1 可知,与

CK 相比, W0 处理根际土壤有机质量显著降低了 8.83%, 非根际土壤有机质量无显著差异; W0.5 处理根际土壤有机质量与 CK 无显著差异, W2 和 W5 处理根际土壤有机质量显著增加了 15.17% 和 38.02%; W0.5、W2、W5 处理非根际土壤有机质量也显著增加了 4.22%、28.95%、57.55%; 表明随着生物质炭施用量的不断增加, 各处理土壤中有机质量不断增加。

与根际相比, W0、W0.5、W2、W5 处理的非根际土壤有机质量显著增加了 9.21%、4.04%、11.97%、14.15%。



注 图中不同的字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 1 根际与非根际有机质量

Fig.1 The organic quality of the root and non-root zones

2.2 不同生物质炭添加量对土壤速效养分的影响

2.2.1 不同生物质炭添加量对土壤碱解氮的影响

图 2 为根际与非根际碱解氮量。由图 2 可知, 与 CK 相比, W0 处理根际与非根际土壤碱解氮量显著降低了 11.63% 和 8.41%, W0.5 处理根际土壤碱解氮量与 CK 相比无显著差异, W2 和 W5 处理根际土壤碱解氮量显著增加了 6.50% 和 13.67%; W0.5、W2、W5 处理非根际土壤碱解氮量与 CK 相比显著增加了 21.38%、42.12%、55.45%。

与根际相比, W0、W0.5、W2、W5 处理非根际土壤碱解氮量显著增加了 3.65%、20.84%、33.45%、36.75%。

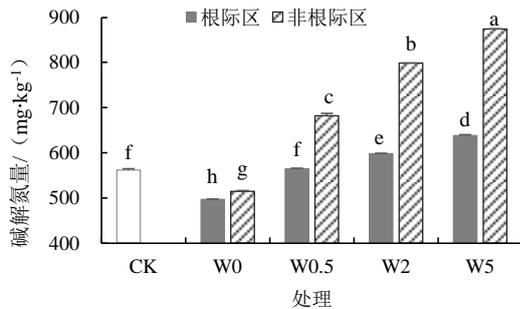


图 2 根际与非根际碱解氮量

Fig.2 The amount of nitrogen dissociates the base between the root region and the non-root zone

2.2.2 不同生物质炭添加量对根际和非根际土壤速效磷的影响

图 3 为根际与根际速效磷量。由图 3 可知, 与

CK 相比, W0 和 W0.5 处理根际土壤速效磷量显著降低了 15.90% 和 26.15%, 非根际速效磷量显著降低了 13.52% 和 7.88%, W2 和 W5 处理非根际土壤速效磷量显著增加了 11.59% 和 17.53%。

与根际相比, W0.5、W2、W5 处理非根际土壤速效磷量显著高出 24.75%、10.77%、15.31%。

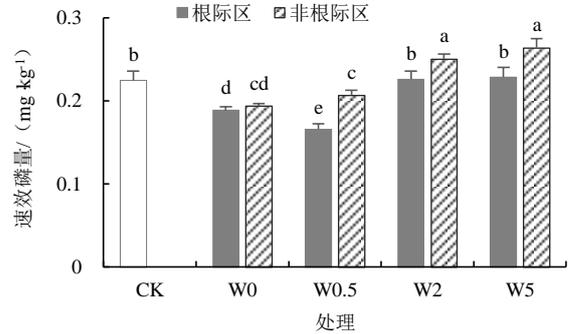


图 3 根际与非根际速效磷量

Fig.3 The amount of quick-acting phosphorus in the root and non-root regions

2.2.3 不同生物质炭添加量对土壤速效钾的影响

图 4 为根际与非根际速效钾量, 由图 4 可知, 与 CK 相比, W0.5 处理根际土壤速效钾量显著降低了 5.30%; W2 和 W5 处理根际土壤速效钾量显著降增加了 73.45% 和 24.43%, W0.5、W2、W5 非根际土壤速效钾量与 CK 相比分别增加了 7.65%、70.72%、178.0%。

与根际相比, W0、W0.5、W2、W5 处理非根际土壤速效钾量差异显著, W0.5 和 W5 处理显著高出根际土壤 13.67% 和 123.1%; W0 和 W2 处理显著降低了 6.04% 和 1.58%。W2 处理根际的速效钾量显著高于 W5 处理, 而非根际表现则恰好相反。

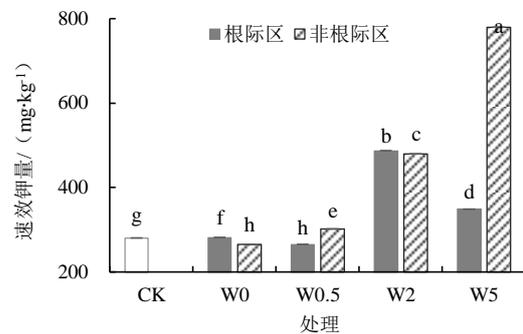


图 4 根际与非根际速效钾量

Fig.4 The amount of quick-acting potassium in the root and non-root regions

2.3 不同生物质炭添加量对土壤有效铅的影响

图 5 为根际与非根际有效铅量。由图 5 可知, 与 CK 相比, W0、W0.5、W2、W5 处理根际土壤有效铅量显著降低了 10.64%、19.49%、20.69%、21.98%, 非根际土壤有效铅量分别显著降低了 22.08%、30.90%、28.92%、33.33%。

与根际相比, W0、W0.5、W2、W5 处理非根际

土壤有效铅量显著降低了 12.80%、14.18%、10.38%、14.54%。

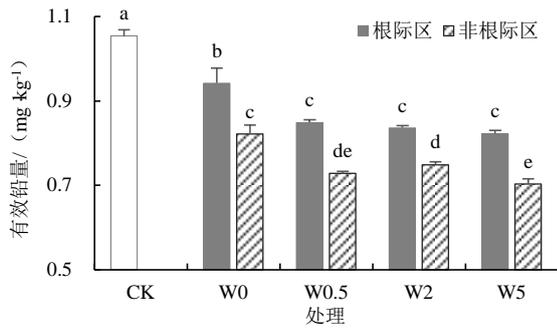


图 5 根际与非根际有效铅量

Fig.5 Effective lead content between root and non-root zones

2.4 土壤养分状况与有效铅的相关性分析

2.4.1 根际土壤养分状况与土壤有效铅的相关性分析

根际土壤养分状况与土壤有效铅的相关性分析结果见表 3。结果发现，根际土壤有效铅量与有机质量及碱解氮量显著负相关，而与速效磷量及速效钾量相关性不显著。速效磷量与有机质量正相关。各养分之间，速效钾量与有机质量相关性不显著，与速效磷量正相关。碱解氮量与有机质量极显著性正相关，与速效磷量正相关，与速效钾量正相关。

表 3 根际土壤养分状况与有效铅的相关性分析结果

Table 3 Correlation analysis between nutrient status and effective lead in soil

结果	有机质量	速效磷量	速效钾量	碱解氮量	有效铅量
有机质量	1				
速效磷量	0.577*	1			
速效钾量	0.499	0.562*	1		
碱解氮量	0.927**	0.564*	0.520*	1	
有效铅量	-0.583*	0.086	-0.490	-0.541*	1

注 *表示在 0.05 水平上相关性显著；**表示在 0.01 水平上相关性极显著。下同。

表 4 非根际土壤养分状况与有效铅的相关性分析结果

Table 4 Correlation analysis of nutrient status and soil effective lead in non-rooted areas

结果	有机质量	速效磷量	速效钾量	碱解氮量	有效铅量
有机质量	1				
速效磷量	0.932**	1			
速效钾量	0.993**	0.906**	1		
碱解氮量	0.900**	0.936**	0.877**	1	
有效铅量	-0.697*	-0.674*	-0.693*	-0.860*	1

2.4.2 非根际土壤养分状况与有效铅的相关性分析

受根系、微生物状况等影响，非根际土壤与根际土壤相比，土壤养分、有效铅量及其效应关系有一定的差异。由表 4 可知，非根际土壤有效铅量与有机质量、速效磷量、速效钾量及碱解氮量之间均显著负相关。各养分之间，非根际土壤速效磷量与有机质量极显著正相关。速效钾量与有机质量极显著正相关，速

效钾量与速效磷量极显著正相关。碱解氮量与速效钾量极显著正相关，碱解氮量与速效磷量极显著正相关，碱解氮量与速效钾量极显著正相关。

3 讨论

生物质炭能够提高土壤有机质量^[17-18]，在本试验中，生物质炭处理的土壤有机质量的增加显著，可能与其自身含碳量高有关，而且生物质炭通过微生物分解能够形成腐殖质，也会导致土壤有机质量的增加。此外，生物质炭的高孔隙度和大比表面积等特性，能够吸附固持土壤中易矿化的有机质，从而降低有机质的可利用性^[19]。本试验发现，施用生物质炭可以显著改善根际和非根际养分状况，其提高幅度与生物质炭的施用量显著相关，这与前人研究结果^[20-21]基本保持一致。而且，施加生物质炭对根际和非根际土壤速效养分也有不同程度的增加，尤其土壤速效钾和速效磷。这与张祥等^[22]研究结果一致。

值得关注的是，添加生物质炭后，非根际土壤与根际土壤相比，土壤养分、有效铅量及其效应关系表现出较大的差异，尤其是在有效铅量与速效养分量的相关性方面，根际土壤有效铅量仅与有机质量、碱解氮量显著负相关关系，而非根际土壤有效铅量与有机质量、碱解氮量、速效磷量及速效钾量之间均显著负相关关系。土壤有机质中含有纤维素、腐殖质、类脂物质、甾类、维生素、萜类等多种物质，其中腐殖质在土壤中可以呈游离的腐殖酸和腐殖酸盐类状态存在，也可以呈凝胶状与矿质黏粒紧密结合，成为重要的胶体物质，从而降低铅的生物有效性^[6]。肖亚涛等^[23]研究表明，NO₃-N 在一定程度上降低土壤重金属的生物有效性，冬小麦地上部组织和根系中的 Cd 量，这是由于在受重金属胁迫后，冬小麦根系的转录组变化中苯丙生物合成，氮代谢通路较为活跃，差异表达基因显著富集上调，这些通路对重金属胁迫的响应、防御和解毒都密切相关。土壤中的磷与铅可以通过吸附、溶解/沉淀机制形成难溶性的磷酸铅类化合物，磷基材料修复土壤铅甚至被美国环境保护署 (USEPA) 列为最好的修复土壤重金属的管理措施^[24]。而在本试验中，根际土壤有效铅量与速效磷量的相关性并不显著，这可能是由于在根系附近的速效养分由于易被吸收，利用效率较高，发生沉淀反应的几率小所致。刘平等^[25]研究表明，土壤中钾元素尤其是速效钾能够影响铅的有效性及其生物富集，钾肥通过改变土壤中铅的赋存形态来促进植物对铅的吸收，如 KCl 可通过提高土壤中水溶性铅和碳酸盐态铅量，来提高铅的生物有效性，这与本研究结果并不一致。钾肥改变重金属形态的原因主要与其伴随阴离子 (Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 等) 的交换、配

位等反应有关^[26]，但从生理学来看， K^+ 是植物生长的必需元素，是植物遭遇胁迫时渗透调节的主要无机离子^[27]，土壤速效钾量的提高可能会促进植株渗透调节从而降低铅的生物有效性。

此外，不少研究结果^[28-29]表明，生物质炭能够提高土壤 pH 值，然而本试验中，施用生物质炭对土壤 pH 值影响并不显著，根际 pH 值为 8.35~8.42，非根际 pH 值 8.23~8.28。而刘源等^[1]研究中也发现，在碱性土壤中施加生物质炭，并未引起土壤 pH 值的显著升高。而有机酸对土壤吸附能力取决于土壤和有机酸的性质及反应条件，一般在酸性条件下，有机酸可以增加土壤和矿物对重金属离子吸附能力，但在北方 pH 值 > 8 的潮土反而会降低土壤和矿物对重金属吸附能力^[30]。基于前人研究结果和本试验结果判断，土壤中有有效 Pb 的降低主要取决于生物质炭本身的特性。如巨大比表面积、富含羧基、酚羟基等含氧官能团等，使得其能够与重金属发生静电吸附和络合作用，从而降低土壤有效态重金属的量。而本试验结果根际有效 Pb 量显著高于非根际，是受小麦根系对重金属的吸收调控作用。

生物质炭可以有效降低碱性土壤中有效态重金属量^[31]，邵云等^[32]研究表明，土壤中添加离子纤维素可以减少 Pb 向植株中迁移，在小麦植株中，Pb 量表现为根 > 茎叶 > 籽粒。黄黎粤等^[33]研究表明，施加生物质炭能够有效降低小麦幼苗根系 As、Cd 和 Pb 的富集量，且随着施用量的增加有害元素的富集量降低更为明显。从试验结果分析，生物质炭几种不同施加量对有效铅降低效果显著，对土壤肥力指标的改善效果与施加量呈正比，从成本来看，W2 处理的施用量更具有可行性。对于不同生物质炭的不同施加量，有待进一步研究。综上，施加生物质炭能够改善土壤理化性质，增加土壤速效养分，降低铅的生物有效性，降低养猪废水灌溉农田的环境风险。

4 结论

1) 养猪废水经过厌氧发酵后稀释 5 倍 (NH_4^+-N 量在 160 mg/L 左右、TP 80 mg/L 左右、COD 量 180 mg/L 左右) 既能够满足农田灌溉标准，也为作物提供生长所需的养分；同时，施用 0.5%~5% 水平的小麦秸秆生物质炭，能够显著减少根际及非根际土壤中有效铅的量。

2) 施加生物质炭处理能够提高土壤有机质、碱解氮、速效磷与速效钾等的量，尤其是非根际土壤。

3) 施加生物质炭处理能够钝化土壤中有效铅，降低其生物有效性，减少铅向植物体内迁移。

4) 添加生物质炭后，根际土壤有效铅量仅与有

机质量、碱解氮量呈显著负相关关系，而非根际土壤有效铅量与有机质量、碱解氮量、速效磷量及速效钾量之间均呈显著负相关关系。土壤有机质量、碱解氮量、速效磷量以及速效钾量的量在根际与非根际土壤中均呈显著正相关关系 ($p < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 刘源, 崔二革, 李中阳, 等. 养殖废水灌溉下施用生物质炭和果胶对土壤养分和重金属迁移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 424-434.
LIU Yuan, CUI Erping, LI Zhongyang, et al. Migration of nutrient and heavy metals impacted by biochar and pectin under the irrigation with livestock wastewater[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 424-434.
- [2] 李欣怡. 生物炭配施沼液对土壤水平入渗特征及理化性质的影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
LI Xinyi. Study on the effect of biochar combined with biogas slurry on horizontal infiltration characteristics and physical and chemical properties of soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [3] 郑健, 李欣怡, 马静, 等. 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 111-112.
ZHENG Jian, LI Xinyi, MA Jing, et al. Effect of biogas slurry combined with straw biochar on soil organic matter and total nitrogen content[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 111-112.
- [4] 杨金燕, 杨肖娥, 何振立. 土壤中铅的来源及生物有效性[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 765-772.
YANG Jinyan, YANG Xiao'e, HE Zhenli. Resource and bio-availability of lead in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(5): 765-772.
- [5] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota - A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [6] BOURNE D, FATIMA T, VAN MEURS P, et al. Is adding charcoal to soil a good method for CO₂ sequestration - Modeling a spatially homogeneous soil[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(9/10): 2463-2475.
- [7] GROSSMAN J M, O'NEILL B E, TSAI S M, et al. Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy[J]. Microbial Ecology, 2010, 60(1): 192-205.
- [8] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
GAO Ruili, ZHU Jun, TANG Fan, et al. Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1): 251-256.
- [9] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 779-785.
YUAN Jinhua, XU Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J].

- Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(4): 779-785.
- [10] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(6): 907-913.
CONG Rihuan, LI Xiaokun, LU Jianwei. Advances in research on influence factors of soil potassium transformation[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(6): 907-913.
- [11] 才吉卓玛. 生物炭对不同类型土壤中磷有效性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2013.
CAI Ji Zhuo Ma. Impact of biochar on availability of phosphorus in different soil types[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [12] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1 948-1 955.
GAO Haiying, HE Xusheng, CHEN Xinxiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1 948-1 955.
- [13] 马献发, 李伟彤, 孟庆峰, 等. 生物炭对土壤重金属形态特征及迁移转化影响研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(6): 82-90.
MA Xianfa, LI Weitong, MENG Qingfeng, et al. Research advance on biochars of the speciation, mobility and transfer of heavy metals in soils[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(6): 82-90.
- [14] 梁媛, 李飞跃, 杨帆, 等. 含磷材料及生物炭对复合重金属污染土壤修复效果与修复机理[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2 377-2 383.
LIANG Yuan, LI Feiyue, YANG Fan, et al. Immobilization and its mechanisms of heavy metal contaminated soils by phosphate-containing amendment and biochar[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12): 2 377-2 383.
- [15] 王丽丽. 不同生物炭对铅锌矿尾矿重金属污染土壤修复效果的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
WANG Lili. The remediation of heavy metal contaminated soil around A Pb/Zn mine by different biochars derived from rice straw and pig manure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Rukun. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [17] 王丽渊, 刘国顺, 王林虹, 等. 生物质炭对烤烟干物质积累量及根际土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 140-144.
WANG Liyuan, LIU Guoshun, WANG Linhong, et al. Effects of biochar on dry matter accumulation of flue-cured tobacco and physical and chemical property of rhizosphere soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(1): 140-144.
- [18] 乌英嘎. 生物质炭施用对华北潮土土壤理化性质及微生物多样性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014.
WU Ying'ga. Effects of biochar application on bacterial diversity and physical-chemical properties in fluvio-aquic soil of North China[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.
- [19] 王英惠, 杨旻, 胡林潮, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1 585-1 591.
WANG Yinghui, YANG Min, HU Linchao, et al. Effects of biochar amendments synthesized at varying temperatures on soil organic carbon mineralization and humus composition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(8): 1 585-1 591.
- [20] 刘逊, 邓小华, 周米良, 等. 湘西植烟土壤有机质含量分布及其影响因素[J]. 核农学报, 2012, 26(7): 1 037-1 042.
LIU Xun, DENG Xiaohua, ZHOU Miliang, et al. Distribution of organic matter contents of tobacco-growing soil and its influencing factors in Xiangxi[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(7): 1 037-1 042.
- [21] 邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2 483-2 488.
XING Ying, LI Xinqing, WANG Bing, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2 483-2 488.
- [22] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 979-984.
ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cuncang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 979-984.
- [23] 肖亚涛. 冬小麦苗期对镉胁迫的响应及阻控机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2019.
XIAO Yatao. The response and control mechanism of cadmium stress during seedlings stage of winter wheat[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [24] 袁志辉, 刘敏超, 陈志良, 等. 磷基材料钝化土壤铅及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1 514-1 522.
YUAN Zhihui, LIU Minchao, CHEN Zhiliang, et al. A review of research progress on phosphorus immobilization of lead and its affecting factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(6): 1 514-1 522.
- [25] 刘平, 徐明岗, 李菊梅, 等. 不同钾肥对土壤铅植物有效性的影响及其机制[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 202-206.
LIU Ping, XU Minggang, LI Jumei, et al. Effects of different potassium fertilizers on the phytoavailability of Pb in soil and its mechanisms[J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 202-206.
- [26] 罗永清, 陈银萍, 陶玲, 等. 兰州土壤-蔬菜系统铅污染特征及全钾速效钾与 pH 对其富集特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1 477-1 482.
LUO Yongqing, CHEN Yinping, TAO Ling, et al. Pb pollution in soil-vegetable system related to the effect of total soil K, available K and pH in Lanzhou, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(8): 1 477-1 482.
- [27] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 6, 282-286.
- [28] 宋延静, 龚骏. 施用生物质炭对土壤生态系统功能的影响[J]. 鲁东

- 大学学报(自然科学版), 2010, 26(4): 361-365.
- SONG Yanjing, GONG Jun. Effects of biochar application on soil ecosystem functions[J]. Ludong University Journal (Natural Science Edition), 2010, 26(4): 361-365.
- [29] 孙贇, 何志龙, 林杉, 等. 不同生物质炭对酸化茶园土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2 544-2 552.
- SUN Yun, HE Zhilong, LIN Shan, et al. Effects of different biochars on N₂O and CO₂ emission from acidified tea field soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(12): 2 544-2 552.
- [30] 徐仁扣. 低分子量有机酸对可变电荷土壤和矿物表面化学性质的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 233-241.
- XU Renkou. Effect of low-molecular-weight organic acids on surface chemical properties of variable charge soils and minerals[J]. Soil, 2006, 38(3): 233-241.
- [31] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 不同钝化材料对污灌农田镉污染土壤修复效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 42-44.
- LI Zhongyang, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Remediation of cadmium polluted soils by different amendments[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 42-44.
- [32] 邵云, 崔景明, 李晓波, 等. 离子交换纤维对麦田土壤铅污染的修复效果[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(6): 762-768.
- SHAO Yun, CUI Jingming, LI Xiaobo, et al. Remediation effect of ion-exchange fiber on lead pollution in wheat field[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(6): 762-768.
- [33] 黄黎粤, 丁竹红, 胡忻, 等. 生物炭施用对小麦和玉米幼苗根际和非根际土壤中 Pb、As 和 Cd 生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 348-355.
- HUANG Liyue, DING Zhuhong, HU Xin, et al. Effects of biochars on bioavailability of Pb, As, and Cd in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of corn and wheat seedlings[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(2): 348-355.

Amending Soil with Biochar Increases Soil Nutrients and Reduce Pb Mobility in Soil Irrigated with Piggery Wastewater

WANG Yueqing^{1,2}, ZHAO Jing³, HUANG Yuru⁵, GAO Qing^{1,2},
SUN Xianghui³, CAI Hanyu³, CUI Shihui⁴, DU Zhenjie^{1,2*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City of Henan Province of CAAS,

Xinxiang 453002, China; 3. Laboratory of Organic Solid Waste Treatment and Resource Utilization,

Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China; 4. Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Huojia 453800, China;

5. Xinxiang Research Academy of Environmental Science and Design, Xinxiang 453002, China)

Abstract: 【Background】 Piggery wastewater is rich in organic matter and nutrients, and it can be used as a supplementary water source for irrigation. But it also contains various organic and inorganic contaminants, and irrigating with it risks soil and crop contamination. How to make most of the piggery wastewater while in the meantime ameliorating dissemination of its pollutants is thus critical to its safe use and has been studied intensively over the past decade. 【Objective】 The objective of this paper is to study the feasibility and efficacy of using biochar amendment to improve soil nutrients and reducing Pb mobility in soil irrigated with piggery wastewater. 【Method】 The experiment was conducted in rhizobox and used winter wheat as the model plant. It consisted of four treatments with soil amended with biochar at a ratio of 0, 0.5%, 2% and 2.5% respectively; a treatment without fertilization was taken as the control. In each treatment, we measured the change in organic matter, available N, P and K, as well as mobile Pb in the rhizosphere and bulk soils. 【Result】 Biochar amendment improved physical properties of the soil. Compared with the control, amending the soil with 2% and 5% of biochar significantly increased the content of organic matter, available N, P and K, especially in the bulk soil, while in the meantime reducing the mobile Pb by 20.7%~33.3%. It was also found that Pb content in the rhizosphere was higher than that in the bulk soil, indicating that it was root uptake rather than Pb mobility that limited Pb uptake and its translocation in the plant. 【Conclusion】 Biochar amendment of the alkaline soil irrigated with piggery wastewater as studied in this paper can improve physicochemical properties of the soil, and reduced Pb bioavailability thereby ameliorating its root uptake and translocation in winter wheat.

Key words: Pb bioavailability; biochar amendment; piggery wastewater; soil nutrients

责任编辑：赵宇龙