

4 种环境材料复合配施对北方果园酸化土壤性状改良研究

冯泽坤¹ 袁学武² 马 莉² 冯俊义¹ 赵萌萌¹ 马 倩³ 黄占斌^{1*}

1 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院 北京 100083

2 宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区大河红崖小学 吴忠 751999

3 北京嘉博文生物科技有限公司 北京 100015

摘 要: 针对北方果园土壤酸化导致的土壤结构和性状退化问题, 本研究采用四因素三水平正交土壤培养试验, 探究生化腐植酸(A)、煤基腐植酸(B)、石灰(C)及生物炭(D)复合配施对酸化土壤团聚体结构、pH 及交换性铝含量的影响。结果表明, 生化腐植酸通过高分子胶体吸附促进土壤团聚体(> 0.25 mm)形成, A2 水平(2 g/kg)较对照提升 16.53%; 煤基腐植酸凭借官能团络合与骨架稳定作用, 在 B3 水平(8 g/kg)可显著降低交换性铝含量(达 91.26%), 并协同维持土壤酸碱平衡; 石灰在 C2 水平(2 g/kg)通过中和活性酸使 pH 快速提升至 7.16, 但过量施用(C3 水平)会导致铝溶出量较 C1 和 C2 水平增加; 生物炭则通过调节土壤酸碱平衡, 显著降低交换性铝的活性。经综合效益评估, 确定 A2B3C2D3 为北方果园酸化土壤改良的最优组合方案, 该组合可实现土壤团聚体含量提升与酸度有效降低的协同改良效应, 并为酸化土壤改良提供科学参考依据。

关键词: 酸化土壤; 土壤改良; 环境材料; 生化腐植酸; 煤基腐植酸; 正交试验

中图分类号: O655.22, S151.9

文章编号: 1671-9212(2025)04-0018-09

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2025.04.003

Synergistic Amendment of Acidified Soils in Northern China Orchard by Combined Application of Four Environmental Materials

Feng Zeshen¹, Yuan Xuewu², Ma Li², Feng Junyi¹, Zhao Mengmeng¹, Ma Qian³, Huang Zhanbin^{1*}

1 School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing, 100083

2 Dahe Hongya Primary School, Hongsipu District, Wuzhong City, Ningxia Hui Autonomous Region, Wuzhong, 751999

3 Beijing Goldenway Bio-tech Co. Ltd., Beijing, 100015

Abstract: To address the structure and properties degradation of the soil caused by acidification in northern orchards, four-factor three-level orthogonal soil incubation experiment was conducted to investigate the effects of combined application of biochemical humic acid (A), coal-based humic acid (B), lime (C) and biochar (D) on the aggregate structure, pH and exchangeable aluminum content of the acidified soils. The results showed that biochemical humic acid facilitated the formation of soil aggregates (>0.25 mm) through polymeric colloidal adsorption, with the A2 treatment (2 g/kg) increasing the aggregate content by 16.53% relative to the control. Coal-based humic acid reduced significantly exchangeable aluminum content by 91.26% at the B3 treatment (8 g/kg) via functional group complexation and structural stabilization, while

[基金项目] 北京嘉博文生物科技有限公司科研项目(典型问题土壤改良与修复配方筛选与效果机理研究)资助(项目编号 YF-2023-05)。

[收稿日期] 2024-11-29

[作者简介] 冯泽坤, 男, 1996 年生, 工程师, 主要研究方向为酸化和盐碱化土壤改良, E-mail: 919276191@qq.com。* 通讯作者: 黄占斌, 男, 教授/博士生导师, E-mail: zbhuan2003@163.com。



synergistically maintaining soil acid-base equilibrium. Lime with the C2 treatment (2 g/kg) elevated rapidly pH to 7.16 by neutralizing active acids, whereas excessive application (C3) induced greater aluminum dissolution than C1 and C2 treatments. Biochar mitigated significantly exchangeable aluminum activity by regulating soil acid-base equilibrium. Comprehensive evaluation identified the A2B3C2D3 combination as the optimal strategy for amending acidified soils in northern orchards. This combination achieved a synergistic enhancement of soil aggregate content while mitigating effectively soil acidity. These findings offer a scientific basis for the rational amendment of acidified agricultural soils.

Key words: acidified soil; soil improvement; environment material; biochemical humic acid; coal-based humic acid; orthogonal experiment

目前,我国北方经济作物种植区土壤酸化严重,土壤 pH 平均值较以往降低了 0.58 个单位,其中胶东果园地区酸化问题尤为突出。数据显示,1984—2015 年烟台地区土壤 pH 降低了 1.0 个单位^[1],棕壤果园土壤 pH 最低达到 4.22^[2]。目前,胶东果园地区有 88% 以上的果园土壤因酸化对土壤质量和苹果产量、品质造成了不同程度的危害^[3, 4]。研究表明,山东省胶东地区果园土壤酸化的主要原因是长期施用氮肥,导致 NH_4^+ 在土壤中通过硝化向土壤释放大量 H^+ ,造成土壤酸化^[3, 5, 6]。土壤 pH 与果实的产量、可溶性固形物、可溶性糖、果皮色泽和风味评价均呈显著相关性^[7]。北方苹果产区土壤酸化问题逐渐严重,导致果园营养元素淋失,果实质量下降和品质降低,严重制约了当地苹果业的发展^[8]。因此,针对北方果园酸化土壤的改良工作迫在眉睫。

目前,酸化土壤改良的方案主要集中在开发更高效、更环保的环境材料上,并致力于降低环境负荷、提高改良效率以及减少二次污染。常见的生化腐植酸有机质含量超过 75%,可以快速提高土壤有机质含量,弊端在于其作用短效^[9]。煤基腐植酸可以长效补充土壤有机质,一方面可以粘结土壤颗粒形成土壤团粒结构,改善土壤结构;另一方面作为弱酸,在维持酸碱平衡时可以起到缓冲作用^[10, 11]。石灰是传统的酸化土壤改良材料,可以快速提高土壤 pH,使铝离子沉淀并补充钙含量,弊端在于长期或者过量施用会加剧土壤反酸^[8, 12 ~ 14]。生物炭凭借自身的碱性提高酸化土壤的 pH,并抑制土

壤的硝化作用,同时巨大的孔隙和表面积可以改善土壤结构,但是长期使用可能会引发二次污染^[6, 8, 12, 15]。鉴于此,本研究通过四因素三水平正交土壤培养试验,筛选北方果园酸化土壤改良的最优组合,以期为酸化土壤的科学改良提供针对性解决方案,并为改良材料的选择与配比优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:取自山东省烟台市栖霞市臧家庄镇寨里村 2019 年新植果园表土层(0 ~ 20 cm),经风干、过 2 mm 筛后装袋保存待用。土壤类型为褐土, pH 为 5.67,交换性铝含量为 1.27 cmol(+)/kg,土壤团聚体(> 0.25 mm,全文无特殊说明时均为此粒径级别)含量为 54.95%。

生化腐植酸:由餐厨废弃物制备,有机质含量为 69.9%,总腐植酸含量为 41.88%,由北京嘉博文生物科技有限公司提供。煤基腐植酸:由风化煤和褐煤碱熔融法活化制备,粉末状,纯度 > 70%,总腐植酸含量为 48.13%,购自山西林海腐植酸科技有限公司。石灰:主要化学成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,分析纯,购自上海麦克林生化科技股份有限公司。生物炭:由稻壳在 450 °C 下热解并磨碎过 18 目筛所得,购自中联西北工程设计研究院有限公司。去离子水: pH 为 6.40,电导率(EC)为 0.73 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。试验装置(图 1):黑色塑料方形花盆,上边长

80 mm、下边长 64 mm、高 70 mm。



图 1 土壤培养试验装置

Fig.1 Soil incubation experiment device

1.2 试验设计

本研究以生化腐植酸(A)、煤基腐植酸(B)、石灰(C)、生物炭(D)为因素变量,采用四因素三水平正交土壤培养试验 $L_9(3^4)$ 筛选复合改良材料最优组合。各因素水平设置如下: A 为 1、2、5 g/kg^[16], B 为 2、4、8 g/kg^[10], C 为 1、2、5 g/kg^[17~20], D 为 5、10、20 g/kg^[15, 21, 22], 以未添加改良材料的处理组作为对照(CK), 共 10 个处理, 每个处理重复 3 次。将各处理混合材料与 500 g 供试土壤充分混匀后装盆, 置于室内培养 60 天。培养期间每 4 天浇 1 次去离子水, 每次用量为 100 mL。培养结束后取样, 经自然风干、过 2 mm 筛后密封保存。特别说明: 文中改良材料单位面积(亩)施用量基于土壤容重(1350 kg/m^3)与体积($666.67 \text{ m}^2/\text{亩} \times 0.2 \text{ m}$ 土层深度)的乘积计算得出。

1.3 测定指标与方法

土壤团聚体采用湿筛法《土壤检测第 19 部分: 土壤水稳性大团聚体组成的测定》(NY/T 1121.19—2008)并借助土壤团聚体测定仪(TTF-100)测定; 土壤 pH 依据《土壤 pH 值的测定 电位法》(HJ 962—2018)采用玻璃电极法测定; 土壤交换性铝采用电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞 ICAP-MS-Qc)测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行统计分析 with 极差分析, 采用 SPSS 23.0 进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 4 种环境材料复合配施对酸化土壤团聚体的影响

土壤团聚体是表征土壤结构的核心指标, 是土壤中各种物理、化学和生物作用的结果。作为土壤结构构建的基础, 其稳定性与降雨入渗、土壤侵蚀过程密切相关, 直接调控土壤表层的水土界面行为^[12, 18]。各因素对北方果园酸化土壤团聚体的影响分析见表 1。4 种材料对酸化土壤团聚体的影响主次顺序为 $A > B > D > C$, 随着 A、B、C 和 D 添加量的增加, 土壤团聚体含量相对 CK 处理呈增长趋势, 表明 4 种材料均可促进土壤颗粒团聚形成大团聚体^[10, 11]。其中, A2、B3、C2、D3 水平下的土壤团聚体含量分别达 64.49%、63.83%、61.89% 和 61.98%。综合分析, 提升酸化土壤团聚体的优组合为 A2B3C2D3, 其相近处理组合 6 (A2B3C1D2) 的土壤团聚体含量为 64.69%, 较 CK 提高了 16.90%。

2.2 4 种环境材料复合配施对酸化土壤 pH 的影响

土壤 pH 是表征土壤活性酸强度的关键参数, 主要由土壤溶液中 H^+ 浓度决定, 研究表明北方水果生长的适宜土壤 pH 范围为 6.5 ~ 7.2^[2, 18]。各因素对北方果园酸化土壤 pH 的影响见表 2。结果分析表明, 4 种材料对土壤 pH 均有改善效果, 其影响主次顺序为 $C > D = B > A$ 。随着 A 添加量增加, 土壤 pH 呈现上升趋势, A1 与 A3 之间差异显著 ($P < 0.05$), 而 A1、A2、A3 之间差异不显著, A3 的 pH 高达 7.21。随着 B 用量增加, 土壤 pH 呈上升趋势, B1、B2 处理间无显著差异, 但 B3 与 B1、B2 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。随着 C 用量的增加, 土壤 pH 呈显著上升趋势 ($P < 0.05$), 各处理间差异显著, 其中 C3 的 pH 高达 8.21。随着 D 用量的增加, 土壤 pH 呈上升趋势, D1、D2 处理间无显著差异, D3 与 D1、D2 处理间差异显著 ($P < 0.05$), D3 处理 pH 高达 7.30。综合分析, 提升酸化土壤 pH 的优组合为 A3B1C2D3, 其相近处理组合 4 (A2B1C2D3) 的 pH 为 7.16, 较 CK 提高了 25.20%。



表 1 四因素对土壤团聚体的影响分析
Tab.1 Effects of four factors on soil aggregates

编号	生化腐植酸	煤基腐植酸	石灰	生物炭	土壤团聚体 (%)
CK	—	—	—	—	55.34
1	A1	B1	C1	D1	54.73
2	A1	B2	C2	D2	57.47
3	A1	B3	C3	D3	62.12
4	A2	B1	C2	D3	63.52
5	A2	B2	C3	D1	65.26
6	A2	B3	C1	D2	64.69
7	A3	B1	C3	D2	57.27
8	A3	B2	C1	D3	60.31
9	A3	B3	C2	D1	64.69
指标	土壤团聚体 (%)				
	A	B	C	D	
K_1	174.32	175.51	179.73	184.68	
K_2	193.47	183.05	185.67	179.43	
K_3	182.27	191.50	184.65	185.95	
k_1	58.11	58.50	59.91	61.56	
k_2	64.49	61.02	61.89	59.81	
k_3	60.76	63.83	61.55	61.98	
极差 R	6.38	5.33	1.98	2.17	
主次顺序	A > B > D > C				
优水平	A2	B3	C2	D3	
优组合	A2B3C2D3				

注： K_i 表示任一列上水平号为 i 时所对应的试验结果之和， $k_i=K_i/3$ ，表示任一列上因素取水平 i 时所得试验结果的算术平均值。下同。

表 2 四因素对土壤 pH 的影响分析
Tab.2 Effects of four factors on soil pH

编号	生化腐植酸	煤基腐植酸	石灰	生物炭	土壤 pH
CK	—	—	—	—	5.72
1	A1	B1	C1	D1	6.23
2	A1	B2	C2	D2	6.80
3	A1	B3	C3	D3	8.14
4	A2	B1	C2	D3	7.16
5	A2	B2	C3	D1	8.20
6	A2	B3	C1	D2	6.07

表 2 续

编号	生化腐植酸	煤基腐植酸	石灰	生物炭	土壤 pH
7	A3	B1	C3	D2	8.30
8	A3	B2	C1	D3	6.59
9	A3	B3	C2	D1	6.75
指标	土壤 pH				
	A	B	C	D	
K_1	21.17	21.69	18.89	21.18	
K_2	21.44	21.60	20.71	21.18	
K_3	21.64	20.96	24.64	21.89	
k_1	7.06	7.23	6.30	7.06	
k_2	7.15	7.20	6.90	7.06	
k_3	7.21	6.99	8.21	7.30	
极差 R	0.16	0.24	1.92	0.24	
主次顺序	$C > D = B > A$				
优水平	A3	B1	C3	D3	
优组合	A3B1C3D3				

2.3 4 种环境材料复合配施对酸化土壤交换性铝的影响

土壤交换性铝是表征土壤潜酸性活度的关键指标。土壤潜酸性酸主要指吸附于土壤胶体表面的 H^+ 和 Al^{3+} 总量，其中交换性氢因化学活性高易转化为交换性铝，导致土壤酸度显著升高，故土壤交换性铝含量是决定土壤酸度的核心因子^[23, 24]。各因素对北方果园酸化土壤交换性铝的影响见表 3，四因素影响主次顺序为 $C > D > B > A$ 。A 添加量增加时，土壤交换性铝含量无规律性变化，A1、A2、A3 处理间无显著差异，A2 处理交换性铝含量最低为 0.23 cmol(+)/kg；B 添加量增加使交换性铝含量呈下降趋势，B1 与 B2、B3 处理间差异显著 ($P < 0.05$)，表明因素 B 可降低土壤交换性铝含量^[10]；C 和 D 添加量增加时，交换性铝含量未呈现明显规律性变化，C2 和 D3 处理的交换性铝含量最低分别为 0.12 和 0.13 cmol(+)/kg。综合分析，降低酸化土壤交换性铝的优化组合为 A2B3C2D3，其相近处理组合 4 (A2B1C2D3) 的交换性铝含量为 0.02 cmol(+)/kg，较 CK 降低了 98.50%。

2.4 相关性分析

Pearson 相关性分析结果见表 4。可以看出，因素 A 与土壤 pH、交换性铝含量均呈极弱正相关，与土壤团聚体含量呈弱正相关，表明因素 A 对提升土壤团聚体含量、提高土壤 pH 及降低交换性铝含量的效果有限。因素 B 与土壤团聚体含量呈显著中等正相关，与土壤 pH、交换性铝含量分别呈极弱负相关和弱负相关，表明因素 B 对土壤团聚体含量提升效果显著，对交换性铝含量的降低有一定作用，但是对土壤 pH 影响微弱。因素 C 与土壤 pH 呈极显著正相关，与土壤交换性铝含量呈中等正相关，与土壤团聚体含量呈弱正相关，表明因素 C 对提升土壤 pH 具有显著效应，同时对土壤交换性铝含量具有一定的调控作用；值得注意的是，当因素 C 用量达到较高水平时，存在增加土壤潜酸性酸的风险，且其对土壤团聚体含量的提升效果有限。因素 D 与土壤团聚体含量、pH 均呈极弱正相关，与交换性铝含量呈中等负相关，表明因素 D 对降低土壤交换性铝含量具有一定作用，而对土壤 pH 和团聚体含量的提升效果较弱。



表 3 四因素对土壤交换性铝的影响分析
Tab.3 Effects of four factors on soil exchangeable aluminum

编号	生化腐植酸	煤基腐植酸	石灰	生物炭	土壤交换性铝 [cmol(+)/kg]
CK	—	—	—	—	1.36
1	A1	B1	C1	D1	0.48
2	A1	B2	C2	D2	0.16
3	A1	B3	C3	D3	0.25
4	A2	B1	C2	D3	0.02
5	A2	B2	C3	D1	0.47
6	A2	B3	C1	D2	0.21
7	A3	B1	C3	D2	0.77
8	A3	B2	C1	D3	0.14
9	A3	B3	C2	D1	0.17

指标	土壤交换性铝 [cmol(+)/kg]			
	A	B	C	D
K_1	0.89	1.28	0.83	1.12
K_2	0.70	0.76	0.35	1.15
K_3	1.08	0.64	1.49	0.40
k_1	0.30	0.43	0.28	0.37
k_2	0.23	0.25	0.12	0.38
k_3	0.36	0.21	0.50	0.13
极差 R	0.13	0.21	0.38	0.25
主次顺序	$C > D > B > A$			
优水平	A2	B3	C2	D3
优组合	A2B3C2D3			

表 4 四因素与各指标的相关性分析
Tab.4 Correlation analysis between the four factors and each indicator

指标	生化腐植酸 (A)	煤基腐植酸 (B)	石灰 (C)	生物炭 (D)	土壤交换性铝	土壤 pH	土壤团聚体
生化腐植酸 (A)	1						
煤基腐植酸 (B)	0	1					
石灰 (C)	0	0	1				
生物炭 (D)	0	0	0	1			
土壤交换性铝	0.118	-0.397	0.409	-0.440	1		
土壤 pH	0.078	-0.122	0.957**	0.118	0.489	1	
土壤团聚体	0.297	0.598*	0.184	0.048	0.122	-0.435	1

注：** 表示在 0.01 水平，相关性显著；* 表示在 0.05 水平，相关性显著。

3 讨论

本研究中, 4 种环境材料对酸化土壤团聚体的影响主次顺序为 $A > B > D > C$, 表明生化腐植酸快速构建土壤团聚体骨架效果更优。本研究中, 生化腐植酸 A2 水平 (2 g/kg) 与煤基腐植酸 B3 水平 (8 g/kg) 复配 (组合 6) 时, 团聚体含量显著提升至 64.69%, 较 CK 提升 16.90%, 表明二者通过“快速胶结 - 长效固着”的协同路径优化土壤结构, 这与已有研究中“生化腐植酸与煤基腐植酸的协同作用是驱动土壤团聚体形成与稳定的核心机制”^[10, 25 ~ 27] 的结论一致。石灰 C2 (2 g/kg)、生物炭 D3 (20 g/kg) 水平下的土壤团聚体含量分别达 61.89% 和 61.98%, 略低于 A2 和 B3 单因素处理或复配组, 这可能是因为石灰与生物炭的碱性成分主要作用于土壤酸碱平衡, 而非直接参与团聚体构建^[15, 28 ~ 31] 有关。

4 种环境材料对 pH 的影响主次顺序为 $C > D = B > A$, 表明石灰 (C) 的强碱性主导 pH 变化, 这与前人研究结果一致。C 是酸性土壤改良的常用措施, 其强碱性成分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 通过中和土壤活性酸 (H^+) 迅速提高 pH^[31]。本研究中 C3 水平 (5 g/kg) 下 pH 提升至 8.21, 较 CK 提升 43.50%; 但过量施用导致交换性铝溶出量增加, 引发“pH 骤升 - 铝毒反跳”效应^[23, 28, 29], 故 C2 水平 (2 g/kg) 为最优选择。煤基腐植酸 (B) 和生物炭 (D) 对 pH 的影响效果相当, 但其作用机制和最佳用量不同。B 作为天然酸碱缓冲剂, 其弱酸性官能团通过质子释放 - 吸附平衡机制抑制 pH 剧烈波动, 发挥“酸碱缓冲阀”作用^[10, 25 ~ 27], 本研究中以 B3 水平效果最佳, 较 B1 处理 pH 降低 0.24 单位; D 则通过表面碱性基团 (如酚盐基) 及灰分中的钙镁氧化物中和土壤酸^[28, 29], D3 水平 pH 达 7.30, 其孔隙结构还可吸附酸性物质延缓酸释放, 与王海洋等^[12] 的研究结果一致。

交换性铝含量的降低依赖“化学中和 - 吸附固定 - 形态转化”多重机制^[24]。本研究中, 4 种环境材料对交换性铝含量的影响主次顺序为 $C > D > B > A$, 以石灰 (C) 的调控效应最为显著, 但

其作用强度与施用量呈非线性关系。在 C2 水平 (2 g/kg) 时, 通过交换性铝含量为 0.12 cmol(+)/kg, 降幅达 91.20%; 增加到 C3 水平 (5 g/kg) 时, 溶出量反增, 主要是因为适宜 pH 使 Al^{3+} 转化为惰性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀^[30], 过高则导致铝形态活化。生物炭 (D) 的微孔结构 (平均孔径 2.3 nm) 及表面负电荷通过物理吸附与静电作用捕获 Al^{3+} , 其含有的硅铝氧化物亦可能通过离子交换固定铝^[15, 29], 本研究中 D3 水平吸附量为 0.13 cmol(+)/kg, 显著低于 D1 水平 0.37 cmol(+)/kg 和 D2 水平 0.38 cmol(+)/kg, 证实 D 对铝的吸附能力与其灰分中钙镁氧化物含量呈正相关。煤基腐植酸 (B) 中的羧基、酚羟基等官能团与 Al^{3+} 形成稳定络合物 (如腐植酸 - 铝螯合物)^[10, 25 ~ 27], 可以降低其交换活性, B3 水平交换性铝含量仅 0.21 cmol(+)/kg, 较 B1 降低 51.20%, 说明 B 对铝的络合效应与其芳香度和含氧官能团密度密切相关。生化腐植酸 (A) 对交换性铝影响不显著, 可能因其水溶性有机质占比高, 短期作用以团聚体构建为主, 对潜性酸调控能力有限^[25, 28]。值得注意的是, B 与 D 通过络合 - 吸附作用协同可以降低土壤交换性铝活性, 弥补单一材料的功能短板, 这种协同效应在王智等^[32]、黄占斌等^[33] 和赵萌萌等^[34] 的研究中均得到佐证。

综上所述, 4 种环境材料对酸化土壤结构及性状的改良作用存在显著差异。具体而言, 生化腐植酸快速构建土壤团聚体骨架, 煤基腐植酸通过疏水作用与金属离子桥联增强骨架稳定性, 二者协同形成“双腐植酸结构强化体系”, 协同提升团聚体水稳性^[32, 35, 36]。石灰可中和和活性酸提升土壤 pH, 同时需注意避免过量引发铝溶出。生物炭通过碱性缓冲与吸附的双重作用^[35], 协同实现土壤 pH 的改良。本研究通过复配整合 4 种环境材料功能优势, 建立定向改良技术体系, 可同步解决土壤酸化导致的土壤结构退化、酸碱失衡及铝毒等次生障碍, 实现对酸化土壤的多维协同修复。

4 结论

基于生化腐植酸 (A)、煤基腐植酸 (B)、



石灰(C)、生物炭(D)的四因素三水平正交试验,通过对土壤团聚体含量、pH、交换性铝含量等指标优化组合分析,得出如下结论:

(1)在酸化土壤改良过程中,四因素对酸化土壤团聚体的影响次序为: $A > B > D > C$;对酸化土壤 pH 的影响次序为: $C > D = B > A$;对土壤交换性铝含量影响次序为: $C > D > B > A$ 。

(2)极差和 Pearson 相关性分析表明,生化腐植酸可以提高土壤团聚体含量;煤基腐植酸可以显著提高土壤团聚体含量,同时提升土壤 pH 和降低交换性铝含量;石灰可以显著提高土壤 pH;生物炭可以提高土壤 pH 并降低土壤交换性铝含量,从而有效缓解土壤酸化问题。

(3)石灰对酸化土壤 pH 和交换性铝含量的影响次序排第一位,其中 C 添加量为 2 g/kg (折合 360.00 kg/亩)时,土壤团聚体含量和 pH 分别提高 11.80% 和 21.70%,土壤交换性铝含量降低 91.20%;同理分析可得,因素 A、B、D 分别选择添加量为 2、8、20 g/kg (折合 360.00、1440.01、3600.02 kg/亩)时,土壤改良效果良好。

(4)经综合效益评估,针对北方果园酸化土壤改良的最优组合方案为 A2B3C2D3,该组合可实现土壤理化性质的协同优化。然而,本研究结论基于实验室条件得出,后续需进一步开展田间试验以验证该改良方案的实际应用效果。

参考文献

- [1] 李涛,于蕾,万广华,等.近 30 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J].土壤学报,2021,58(1):180~190.
- [2] 虞璐.生物炭对酸化土壤的改良效应及其对土壤硝化作用的影响[D].浙江大学博士学位论文,2019.
- [3] 孙涛,郭兵,管西林,等.果园生草与施用土壤调理剂对酸化梨园土壤质量及梨产量品质的影响[J].山东农业科学,2025,57(2):97~104.
- [4] 高文胜,张辉,李国栋,等.果园土壤酸化及其调控研究进展[J].落叶果树,2022,54(1):7~10.
- [5] 刘汉涛.山东栖霞苹果园土壤状况分析[J].果树实用技术与信息,2019(9):43~45.
- [6] 李金业,程昊,梁晓敏,等.酸化土壤改良与固碳研究进展[J].生态学报,2024,44(17):7871~7884.
- [7] 乔清华,黄瑞基,盛福瑞,等.不同土壤改良剂对酸化土壤微生物群落结构的影响[J].中国土壤与肥料,2023(2):62~72.
- [8] 罗玉博,吕鑫航,刘文彬,等.镁改性生物炭对酸化茶园土壤的改良效果[J].江苏农业科学,2025,53(6):231~239.
- [9] 向文明,孙媛,周富忠.土壤调理剂的种类、作用及科学使用[J].长江蔬菜,2021(13):70~72.
- [10] 陈士更.腐植酸土壤调理剂研制及其在酸化果园土壤上的应用[D].山东农业大学硕士学位论文,2019.
- [11] 陈士更,张民,丁方军,等.腐植酸土壤调理剂对酸化果园土壤理化性状及苹果产量和品质的影响[J].土壤,2019,51(1):83~89.
- [12] 王海洋,夏昊,李红霞,等.生物炭配施土壤改良剂对酸性土壤特性及烤烟品质的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2024,39(3):79~89.
- [13] 韦慕贤,莫春丽,梁群,等.不同土壤调理剂对酸化土的改良效果试验[J].农业与技术,2016,36(3):12~13.
- [14] 黄建凤,吴腾飞,叶芳,等.有机肥与石灰配施对华南酸性土壤的改良效果[J].农业资源与环境学报,2024,41(3):606~613.
- [15] 张瑞清,杨剑超,孙晓,等.两种生物质炭对果园酸化土壤改良效果的研究[J].山东农业科学,2016,48(2):74~79.
- [16] 杨彩迪,刘静静,卢升高.生物质炭改良酸性土壤的电化学特性研究[J].土壤学报,2023,60(3):815~823.
- [17] 郑志杰.五种改良剂对鄂南地区酸性土壤改土培肥及温室气体减排效果[D].华中农业大学硕士学位论文,2023.
- [18] 胡敏.恩施州耕地土壤酸化现状及石灰等土壤调理剂降酸效果初探[D].华中农业大学硕士学位论文,2017.
- [19] 王道泽,邬奇峰,葛媛颖,等.不同调理剂对南方

- 丘陵新垦耕地酸性土壤的改良效果[J]. 土壤通报, 2025, 56(2): 561 ~ 569.
- [20] 王力敏. 高碱度生物炭对酸性土壤大豆生长的改良效果与作用途径[D]. 华中农业大学硕士学位论文, 2024.
- [21] 陈乐, 詹思维, 刘梦洁, 等. 生物炭对不同酸化水平稻田土壤性质和重金属 Cu、Cd 有效性影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 358 ~ 364.
- [22] 邱志腾. 生物炭对红壤的降酸效果与毛豆生长的影响[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2015.
- [23] 周雨舟, 曹胜, 黄兰, 等. 湖南省柑橘园土壤酸度与交换性氢、铝的关系[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(7): 1120 ~ 1122.
- [24] 颜晓军, 苏达, 郑朝元, 等. 长期施肥对酸性土壤磷形态及有效性的影响[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1139 ~ 1144.
- [25] 冯俊义, 赵萌萌, 谭菁, 等. 四种环境材料单施对煤矿区土壤结构和性状的影响研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(1): 72 ~ 82.
- [26] 孔令健, 张琳, 刘一帆, 等. 三种环境材料混施对高寒矿区边坡土壤的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 97 ~ 105.
- [27] 孔令健, 张琳, 任杰, 等. 高寒矿区环境材料混施下土壤改良及工程应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 299 ~ 311.
- [28] 云望舒, 刘德鸿, 寇太记, 等. 增温条件下生物炭和腐植酸改良铜污染土壤对小麦吸持养分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 189 ~ 197.
- [29] 李璞君, 唐丽, 赵博, 等. 生物炭基土壤改良剂对镉矿区土壤质量及亮叶桦生长的影响[J]. 生态环境学报, 2024, 33(12): 1953 ~ 1963.
- [30] 高华. 石灰类物质与生物炭施用对酸性土壤改良和 N_2O 排放的影响[D]. 华中农业大学硕士学位论文, 2024.
- [31] 黄建凤, 吴腾飞, 叶芳, 等. 有机肥与石灰配施对华南酸性土壤的改良效果[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 606 ~ 613.
- [32] 王智, 张惠芬, 秦谊, 等. 矿源黄腐酸与生化黄腐酸热裂解组分的对比研究[J]. 腐植酸, 2020(5): 20 ~ 26.
- [33] 黄占斌, 郝文静, 冯泽坤, 等. 腐植酸在土壤改良和污染修复中的应用现状及研究展望[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 354 ~ 361, 376.
- [34] 赵萌萌, 冯俊义, 黄震, 等. 煤基与生物基腐植酸配施对土壤结构改良的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(1): 83 ~ 91.
- [35] 赵鹏, 史兴萍, 尚卿, 等. 矿区复垦地土壤改良研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 1 ~ 14.
- [36] 谭菁, 黄占斌, 赵鹏. 腐植酸复合材料对矿区渣土改良应用研究[J]. 腐植酸, 2022(6): 13 ~ 20.

理事长新语：我们要做黑土地的主人

全球黑土地集中分布在乌克兰的乌克兰大平原、美国的密西西比平原、南美洲阿根廷连至乌拉圭的潘帕斯大草原和中国的东北平原等四大区域，占据全球耕地的六分之一，是世界粮食的“压舱石”。

四大黑土地，成因不同，形态各异，南北有别，如同“四大睡美人”，各个娇艳。或修长妩媚，或热情奔放，或钟情顾盼，或敞开心扉，黝黑魅力，香殷无限。“黑土地肥得流油”，地球人唯美是瞻。

黑土地的本真就是腐植酸。她是土壤生命的基础，是黑土地的核心力，是测试土壤肥力的“金标准”。保护黑土地，我们有的是智慧，即通过工业提取的腐植酸大量反哺，以恢复其本来面目。

当前，“搞好土肥关系，应对气候变化”的任务十分艰巨。我们一定要坚持“让腐植酸从土壤中来回到土壤中去”的路线不动摇，我们一定要备足腐植酸这一“肾源”，补足黑土地的“肾气”，让腐植酸做黑土地的主人。

(2018年9月19日曾宪成题)