

炭基土壤调理剂对生菜生长及土壤理化性状的影响

杜宣延, 甲卡拉铁, 向蕊, 刘琼, 黄艳, 李喜, 肖赞, 杨晓峰, 胡湘军

(攀枝花市农林科学研究院蔬菜研究所 四川攀枝花 617000)

摘要:以白云石、石灰石、生物炭、有机肥为原料,采用4因素3水平正交试验,白云石、石灰石添加量均分别为0、2.5、5.0 g·kg⁻¹,生物炭添加量分别为0、10、20 g·kg⁻¹,有机肥添加量分别为0、30、60 g·kg⁻¹,共9个处理,通过盆栽生菜试验,研究炭基土壤调理剂对生菜生长和土壤理化性状的影响。结果表明:施入不同配比的炭基土壤调理剂后,T2处理(白云石0 g·kg⁻¹、石灰石2.5 g·kg⁻¹、生物炭10 g·kg⁻¹、有机肥30 g·kg⁻¹)生菜株高和根长分别较CK(白云石、石灰石、生物炭、有机肥均为0 g·kg⁻¹)提高了50.35%和77.78%,T3处理(白云石0 g·kg⁻¹、石灰石5 g·kg⁻¹、生物炭20 g·kg⁻¹、有机肥60 g·kg⁻¹)叶片数较CK提高了80.56%,T8处理(白云石5 g·kg⁻¹、石灰石2.5 g·kg⁻¹、生物炭0 g·kg⁻¹、有机肥60 g·kg⁻¹)叶片氮含量较CK提高了26.76%,各处理较CK均能显著增加生菜单株产量,其中T2处理产量最高,较CK显著增加591.19%;在生菜植株氮磷钾含量方面,T6处理(白云石2.5 g·kg⁻¹、石灰石5 g·kg⁻¹、生物炭0 g·kg⁻¹、有机肥30 g·kg⁻¹)全氮含量最高,较CK显著提高15.29%,T2处理全磷含量最高,较CK显著提高17.49%,T4处理全钾含量最高,较CK提高23.41%;与CK相比,T2~T9处理均能降低土壤容重和提高土壤pH;除硝态氮外,T2~T9处理的土壤有机质、全氮、铵态氮、有效磷、速效钾含量均较CK有不同程度提高。通过极差分析,有机肥对生菜单株产量、植株氮磷钾含量、土壤容重以及土壤全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾含量影响均最大;生物炭对土壤有机质含量影响最大;白云石对根长的影响最大。针对不同的指标,炭基土壤调理剂的最佳组合不同。综上,施用炭基土壤调理剂能够有效提高生菜产量,改良土壤物理化学性质,建议优先选择白云石0 g·kg⁻¹、石灰石2.5 g·kg⁻¹、生物炭10 g·kg⁻¹、有机肥30 g·kg⁻¹(T2)的炭基土壤调理剂组合。

关键词:炭基土壤调理剂;生菜生长;土壤理化性状

中图分类号:S636.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)04-192-09

Effects of carbon-based soil conditioners on the growth of lettuce and the physical and chemical property of soil

DU Xuanyan, JIANG Latie, XIANG Rui, LIU Qiong, HUANG Yan, LI Xi, XIAO Zan, YANG Xiaofeng, HU Xiangjun

(Vegetable Research Institute, Panzhihua Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Using dolomite, limestone, biochar, and organic fertilizer as raw materials, a 4-factor 3-level orthogonal experiment was conducted. The addition levels of dolomite and limestone were 0, 2.5, and 5.0 g·kg⁻¹, respectively; the addition levels of biochar were 0, 10, and 20 g·kg⁻¹; and the addition levels of organic fertilizer were 0, 30, and 60 g·kg⁻¹. There were a total of 9 treatments. Through a pot lettuce experiment, the effects of biochar-based soil conditioner on lettuce growth and soil physicochemical property were investigated. The results showed that after applying biochar-based soil conditioner with different ratios, the plant height and root length of treatment T2(dolomite 0 g·kg⁻¹+limestone 2.5 g·kg⁻¹+biochar 10 g·kg⁻¹+organic fertilizer 30 g·kg⁻¹)increased by 50.35% and 77.78% compared to the control(CK)(dolomite, limestone, biochar, organic fertilizer were all 0 g·kg⁻¹). The number of leaves in treatment T3(dolomite 0 g·kg⁻¹+limestone 5 g·kg⁻¹+biochar 20 g·kg⁻¹+organic fertilizer 60 g·kg⁻¹)increased by 80.56% compared to CK. The nitrogen content in leaves in treatment T8(dolomite 5 g·kg⁻¹+limestone 2.5 g·kg⁻¹+biochar 0 g·kg⁻¹+organic fertilizer 60 g·kg⁻¹)increased by 26.76% compared to CK. All treatments significantly increased the yield per plant compared to CK, among them, the yield of treatment T2 was the highest, increase of 591.19%. Regarding the nitrogen, phosphorus and potassium content in

收稿日期:2025-06-17;修回日期:2025-10-20

基金项目:四川省科技计划(2023YFS0485);四川省特色蔬菜创新团队攀西设施蔬菜高效节本栽培技术研究示范岗位(SC-CXTD-2024-22);国家大宗蔬菜产业技术体系建设专项(GARS-23-G36)

作者简介:杜宣延,男,助理研究员,研究方向为植物营养学。E-mail:571396485@qq.com

通信作者:甲卡拉铁,男,副研究员,研究方向为土壤肥料。E-mail:48211893@qq.com

lettuce plant, the T6 treatment (dolomite $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ + limestone $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ + biochar $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ + organic fertilizer $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) had the highest total nitrogen content, which was 15.29% higher than that of CK. The T2 treatment had the highest total potassium content, which was 17.49% higher than that of CK. The T4 treatment had the highest total potassium content, which was 23.41% higher than that of CK. Compared to CK, treatments T2 to T9 all reduced soil bulk density and increased soil pH. Except for nitrate nitrogen, the soil organic matter, total nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus, and available potassium content in treatments T2 to T9 all increased to varying degrees. Through range analysis, organic fertilizer had the greatest impact on lettuce yield per plant, plant nitrogen, phosphorus, and potassium content, soil bulk density, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus, and available potassium content; biochar had the greatest impact on soil organic matter content; and dolomite had the greatest impact on root length. For different indicators, the optimal combination of carbon-based soil conditioners varies. In summary, the application of carbon-based soil conditioner can effectively increase lettuce yield and improve soil physicochemical property. It is recommended to prioritize the carbon-based soil conditioner combination of $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ dolomite, $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ limestone, $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biochar, and $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ organic fertilizer (T2).

Key words: Carbon-based soil conditioner; Lettuce growth; Soil physicochemical property

土壤作为农业生产的根基,其理化性状的优劣直接关系到作物生长与农产品质量。然而,长期不合理的施肥方式、工业污染以及自然侵蚀等因素,导致全球范围内土壤退化问题日益严重,土壤酸化、盐渍化、板结及养分失衡等现象频发。杨右君等^[1]研究指出,未经改良的酸性土壤中有效磷含量显著低于中性土壤,且碱解氮含量随酸化程度加剧呈下降趋势,直接制约水稻等作物的产量。管西林等^[2]对胶东酸化设施菜田的研究表明,土壤酸化导致番茄果实维生素 C 含量降低 12%~18%,产量损失 15%~25%。这些问题凸显了土壤改良技术的迫切需求,而土壤调理剂因其能够针对性地调节土壤 pH、补充养分及改善土壤物理结构,成为当前农业可持续发展的重要技术手段。

现有研究表明,不同类型的土壤调理剂如矿物型土壤调理剂、有机物土壤调理剂、腐殖酸土壤调理剂、生物炭基土壤调理剂等,在改良土壤理化性状方面效果存在差异。矿物型土壤调理剂如硅钙钾镁肥,可通过提高土壤 pH 及交换性钙镁含量,显著提升作物产量。孙涛等^[3]研究表明,在酸化梨园中施用硅钙钾镁肥,可使土壤 pH 提升 0.8~1.2,同时可使果实糖酸比提高 15%~20%。有机物土壤调理剂如腐殖酸、牡蛎壳粉等,则通过增加土壤有机质含量及提高微生物活性,改善土壤质量。王文英等^[4]发现,施用腐殖酸调理剂可使西瓜产量提升 21.69%,且土壤呼吸强度提高 42.62%。生物炭基土壤调理剂作为新兴材料,由生物炭和其他土壤调理剂配伍制备而成,兼具碳封存与土壤改良功能,闫辉等^[5]研究证实,配施低碳氮比生物炭调理剂可使烤烟上等烟比例提高 8.64%,同时土壤全氮含量增

加 9%~12%。李其勇等^[6]研究表明,使用含矿源黄腐酸钾土壤调理剂可使生菜增产 3.66%,且能够提高生菜叶片中维生素 C 和蛋白质含量。王豪吉等^[7]研究表明,与单施生物炭相比,生物炭、有机肥配施能显著提高白菜产量与土壤酶活性。

本研究以生物有机肥、生物炭、白云石、石灰石为原料,其中石灰石、白云石属于石灰类型改良剂,能够增加土壤的钙、镁含量,中和土壤酸度;有机肥属于有机物土壤调理剂,能够增加土壤有机质含量,改善土壤物理性质,提高土壤中微生物和酶的活性^[8];生物炭比表面积大、质量轻、富碳、无机养分多,能够改善土壤结构、增加土壤碳含量,对土壤养分有吸持作用^[9]。以以上 4 种原料,研究不同配比的土壤调理剂对生菜生长及土壤理化性状的协同影响。研究结果将为炭基土壤调理剂在叶菜类作物栽培中的科学应用提供理论依据,助力农业绿色发展。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2024 年 7—8 月在四川省攀枝花市仁和区沙沟基地进行。

供试生菜为美国大速生品种,购自哈尔滨佳禾农业开发有限公司,该品种叶型大,叶片多,叶缘皱褶呈波浪状,耐寒性强,生育期约 45 d。

供试土壤:采自攀枝花市布德镇巴关河社区耕地,0~20 cm 耕层土壤,该地区土壤容重高、肥力低、土层薄。风干后,过 2 mm 筛,混匀、备用。该土壤的理化性质如下:pH 6.85,有机质含量(w ,后同) $13.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $285 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

有机肥由番茄秸秆堆肥发酵制成。生物炭以番茄秸秆为原料,在厌氧条件下 400 °C 热解 2 h 制备。白云石、石灰石均购自四川省攀枝花市沃特科技有限公司。原料基本性质见表 1,4 种原料中镉、铬、砷、铅含量均远低于 GB 38400—2019^[10]所规定的限值,可安全使用。供试肥料为复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15),购自攀枝花市仁和区金色农资有限公司。

1.2 试验设计

试验因素包括 4 个,分别是白云石(A)、石灰石(B)、生物炭(C)、有机肥(D),每个因素包含 3 个水平,采用 4 因素 3 水平正交试验设计,风干土中白云石、石灰石添加量均分别为 0、2.5、5.0 g·kg⁻¹,生物炭添加量分别为 0、10、20 g·kg⁻¹,有机肥添加量分别为 0、30、60 g·kg⁻¹,共 9 个处理(T1~T9,T1 为 CK)(表 2),风干土与土壤调理剂混匀后备用。每个处

表 1 原料基本性质

Table 1 Basic properties of raw materials

原料类型 Raw material type	pH	w(氧化钙) CaO content/%	w(氧化镁) MgO content/(g·kg ⁻¹)	w(镉) Cd content/%	w(铬) Cr content/%	w(砷) As content/(mg·kg ⁻¹)	w(铅) Pb content/%
有机肥 Organic fertilizer	8.24			<0.01	<0.01		<0.01
生物炭 Biochar	8.22	0.83	0.13	<0.01	<0.01		<0.01
白云石 Dolomite	9.26	52.09	31.43	<0.01	<0.01	0.80	<0.01
石灰石 Limestone	8.85	89.85	0.41	<0.01	<0.01	0.60	<0.01

表 2 炭基土壤调理剂正交试验方案

Table 2 Orthogonal experiment scheme of carbon-based soil conditioners (g·kg⁻¹)

处理 Treatment	白云石 Dolomite	石灰石 Limestone	生物炭 Biochar	有机肥 Organic fertilizer
T1(CK)	0.0	0.0	0	0
T2	0.0	2.5	10	30
T3	0.0	5.0	20	60
T4	2.5	0.0	10	60
T5	2.5	2.5	20	0
T6	2.5	5.0	0	30
T7	5.0	0.0	20	30
T8	5.0	2.5	0	60
T9	5.0	5.0	10	0

理 4 盆(口径 16 cm,高 15 cm),为 4 次重复,每盆移栽 3 株长势相同的生菜。种植生菜的盆中装 1.5 kg 风干土,以复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)作为底肥,每盆均施用 1 g 复合肥,并均进行常规栽培管理。

收获时每个处理选取长势一致的 3 盆进行收获。洗净测定整株鲜质量,鲜样 85 °C 杀青后于 65 °C 烘干,用于测定植株的全氮、全磷、全钾含量。在植株收获的当天取盆内土壤,一部分风干备用,一部分冰盒带回实验室 4 °C 保存,1 周内测定土壤酶活性。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生菜农艺性状 生菜采收当天选取长势一

致的 3 盆,用电子秤称量整株生菜质量,并求平均值。用卷尺分别测量各处理生菜的株高、根长,记录叶片数,用叶绿素测定仪(TYS-4N,山东云唐智能科技有限公司)测定叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)、氮含量。

1.3.2 生菜植株全氮、全磷、全钾含量 参照鲍士旦的方法^[11],分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度计法测定烘干后的生菜植株样品中全氮、全磷、全钾含量。

1.3.3 土壤的理化性质 采收后参照鲍士旦的方法^[11],采用环刀法测定土壤容重,采用电位法(水:土=2.5:1)测定土壤 pH,采用混合催化剂-全自动凯氏定氮仪法测定土壤全氮含量,采用 2 mol·L⁻¹ KCl 土水比 1:5 提取流动分析仪测定土壤硝态氮、铵态氮含量,采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量,采用钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量,采火焰光度法测定土壤速效钾含量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,采用 SPSS20.0 软件进行差异显著性分析、极差(R)分析。

2 结果与分析

2.1 不同炭基土壤调理剂添加处理对生菜生长的影响

由表 3 可知,各处理生菜株高为 10.73~16.13 cm,

表3 不同土壤调理剂添加处理对生菜生长的影响

Table 3 Effects of different soil conditioner addition treatments on the growth of lettuce

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	叶片数 Number of blades	SPAD	w(氮) Nitrogen content/(mg·g ⁻¹)
T1(CK)	10.73±4.10 b	6.30±1.08 c	9.00±3.74 c	16.83±4.51 b	7.96±1.43 b
T2	16.13±0.55 a	11.20±0.82 a	15.00±0.82 a	21.57±5.66 ab	9.47±1.80 ab
T3	15.43±0.90 a	7.23±0.75 bc	16.25±2.36 a	21.37±2.73 ab	9.41±0.87 ab
T4	14.28±1.20 ab	8.43±1.29 b	13.75±3.40 ab	18.57±1.12 ab	8.52±0.35 ab
T5	13.88±1.97 ab	6.33±1.59 cd	10.00±1.63 bc	16.72±2.18 b	7.93±0.69 b
T6	13.65±1.14 ab	5.50±1.00 cd	14.50±2.89 ab	21.88±1.97 ab	9.57±0.63 ab
T7	13.53±1.82 ab	6.20±0.90 cd	13.00±4.08 abc	19.60±4.01 ab	8.85±1.28 ab
T8	13.10±1.64 ab	5.27±1.04 cd	12.50±2.65 abc	23.51±2.20 a	10.09±0.70 a
T9	12.75±3.59 ab	5.13±0.60 d	8.75±2.99 c	17.57±2.47 b	8.20±0.79 b

注: 同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

T2~T9 处理均高于 T1(CK), T2、T3 处理较高, 较 T1 分别显著增加了 50.35%、43.82%; 从根长来看, T2 处理显著高于其他处理, 较 T1 显著增加了 77.78%; 从叶片数来看, T2、T3 处理叶片数最高, 较 T1 分别显著增加了 66.67%、80.56%; 叶绿素相对含量(SPAD 值)方面, T8 处理含量最高, 较 T1 显著增加了 39.70%; 叶片氮含量方面, T8 处理含量最高, 较 T1 显著增加了 26.76%。

通过极差分析不同因素对生菜农艺性状的影响, 结果如表 4 所示。根据极差 R 值可知, 对生菜株高的影响由大到小为有机肥>生物炭>石灰石>白云石, 促进株高的最佳组合为 A₁B₂C₂D₂; 对于根长的影响由大到小为白云石>生物炭>有机

肥>石灰石, 促进根长的最佳组合为 A₁B₂C₂D₂; 对叶片数的影响由大到小为有机肥>白云石>石灰石>生物炭, 叶片数最多的组合为 A₁B₃C₃D₃ 或 A₁B₃C₃D₂; 对叶片 SPAD 值和氮含量影响由大到小均为有机肥>石灰石>生物炭>白云石, 最佳组合均为 A₃B₂C₁D₃; 综上所述可以看出, 对生菜的株高、叶片数、叶绿素相对含量和氮含量影响最大的均为有机肥。

2.2 不同炭基土壤调理剂添加处理对生菜单株产量的影响

由表 5 可知, 在化肥施用量相同的情况下, 使用炭基土壤调理剂均能够显著增加生菜单株产量, 与 T1(CK)相比, T2、T4、T8 处理单株产量分别显著

表4 不同因素对生菜农艺性状影响的极差分析结果

Table 4 Results of range analysis on the effects of different factors on the agronomic traits of lettuce

因素 Factor	水平 Level	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	叶片数 Number of blades	SPAD	w(氮) Nitrogen content/(mg·g ⁻¹)
A: 白云石 Dolomite	K1	14.09	8.24	13.42	19.92	8.95
	K2	13.93	6.98	12.75	19.06	8.67
	K3	13.13	5.53	11.42	20.22	9.05
	R	0.97	2.71	2.00	1.16	0.37
B: 石灰石 Limestone	K1	12.84	6.98	11.92	18.33	8.44
	K2	14.37	7.60	12.50	20.60	9.16
	K3	13.94	6.18	13.17	20.27	9.06
	R	1.53	1.42	1.25	2.27	0.72
C: 生物炭 Biochar	K1	12.49	5.91	12.00	20.74	9.21
	K2	14.38	8.26	12.50	19.24	8.73
	K3	14.28	6.59	13.08	19.23	8.73
	R	1.89	2.34	1.08	1.51	0.48
D: 有机肥 Organic fertilizer	K1	12.45	5.92	9.25	17.04	8.03
	K2	14.43	7.86	14.17	21.02	9.30
	K3	14.27	6.98	14.17	21.15	9.34
	R	1.98	1.93	4.92	4.11	1.30

注: K1、K2、K3 分别为各因素水平 1、2、3 的均值, R 为极差。下同。

Note: K1, K2, and K3 represent the mean values of each factor at levels 1, 2, and 3, respectively. R denotes the range. The same below.

表5 不同土壤调理剂添加处理对生菜单株产量的影响
Table 5 Effects of different soil conditioner addition treatments on the yield per plant of lettuce

处理 Treatment	单株产量/(g·株 ⁻¹) Yield per plant/(g·plant ⁻¹)	比CK+ More than CK+/%
T1(CK)	10.28±1.30 f	
T2	71.08±1.25 a	591.19
T3	40.93±1.03 bc	298.06
T4	44.84±4.31 b	336.01
T5	20.39±1.53 de	98.31
T6	39.48±3.91 c	283.92
T7	23.26±2.54 d	126.22
T8	45.59±2.56 b	343.37
T9	18.29±3.00 e	77.86

增加了591.19%、336.01%、343.37%；T2处理单株产量最高，为71.08 g。

通过极差分析不同因素对生菜单株产量的影响，结果如表6所示。根据极差R值可知，对生菜单株产量的影响由大到小为有机肥>石灰石>生物炭>白云石，生菜单株产量最高的组合为A₁B₂C₂D₂。

表6 不同因素对生菜单株产量影响的极差分析结果

Table 6 Results of range analysis on the effects of different factors on the yield per plant of lettuce (g·plant⁻¹)

水平 Level	A:白云石 Dolomite	B:石灰石 Limestone	C:生物炭 Biochar	D:有机肥 Organic fertilizer
K1	40.76	26.13	31.79	16.32
K2	34.90	45.69	44.73	44.61
K3	29.05	32.90	28.20	43.79
R	11.72	19.56	16.54	28.28

表7 不同土壤调理剂添加处理对生菜养分含量的影响

Table 7 Effects of different soil conditioner addition treatments on the nutrient content of lettuce

处理 Treatment	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	比CK+ More than CK+/%	w(全磷) Total phosphorus content/(g·kg ⁻¹)	比CK+ More than CK+/%	w(全钾) Total potassium content/(g·kg ⁻¹)	比CK± More than CK±/%
T1(CK)	28.25±0.11 e		2.23±0.04 d		47.84±0.26 e	
T2	31.11±0.08 b	10.12	2.62±0.02 a	17.49	54.75±0.45 bc	+14.44
T3	30.30±0.09 c	7.26	2.28±0.04 bcd	2.24	54.31±0.12 c	+13.52
T4	29.11±0.08 d	3.04	2.35±0.01 b	5.38	59.04±0.57 a	+23.41
T5	29.30±0.21 d	3.72	2.27±0.02 cd	1.79	53.48±0.33 d	+11.79
T6	32.57±0.14 a	15.29	2.33±0.04 bc	4.48	58.69±0.24 a	+22.68
T7	30.39±0.16 c	7.58	2.28±0.03 bcd	2.24	54.97±0.22 b	+14.90
T8	32.37±0.52 a	14.58	2.33±0.02 bc	4.48	58.86±0.08 a	+23.04
T9	28.96±0.20 d	2.51	2.28±0.07 cd	2.24	47.32±0.33 e	-1.09

通过极差分析不同因素对土壤容重的影响，结果如表9所示。根据极差R值可知，对土壤容重影响由大到小为有机肥>生物炭=石灰石>白云石，土

2.3 不同炭基土壤调理剂添加处理对生菜养分含量的影响

由表7可知，除T9处理外，不同的炭基土壤调理剂处理均能够增加生菜养分含量，T2~T9处理植株全氮含量较T1(CK)显著增加了2.51%~15.29%，其中T6、T8处理增加较高，分别为15.29%、14.58%；T2~T9处理植株全磷含量较T1增加了1.79%~17.49%，T2处理含量最高，为2.62 g·kg⁻¹，显著高于T1；T2~T9处理植株全钾含量较T1增加了-1.09%~23.41%，T4、T6、T8处理显著高于其他处理。

通过极差分析不同因素对生菜各养分含量的影响，结果如表8所示。根据极差R值，对生菜植株全氮含量影响由大到小为有机肥>石灰石>生物炭>白云石，植株全氮含量最高的组合为A₃B₂C₁D₂；对生菜植株全磷含量影响由大到小为有机肥>生物炭>石灰石>白云石，植株全磷含量最高组合为A₁B₂C₂D₂；对生菜植株全钾含量影响由大到小为有机肥>白云石>石灰石>生物炭，植株全钾含量最高组合为A₂B₂C₁D₃。对生菜养分吸收影响最大的为有机肥。

2.4 不同炭基土壤调理剂添加处理对土壤容重的影响

土壤容重反映了土壤的紧实程度，高容重的土壤一般较为坚硬，不利于水分的渗透和作物根系的生长，低容重的土壤则较为疏松，有利于根系生长和保水保肥。由图1可知，T1(CK)处理土壤容重最高，为1.54 g·cm⁻³，显著高于其他处理，T7处理最低，为1.25 g·cm⁻³。

2.5 不同炭基土壤调理剂添加处理对土壤pH的影响

由图2可知，与T1(CK)相比，T2~T9处理均能

壤容重最低的组合为A₃B₃C₃D₂。

壤容重最低的组合为A₃B₃C₃D₂。

表8 不同因素对生菜养分含量影响的极差分析结果
Table 8 Results of range analysis on the effects of different factors on the nutrient content of lettuce (g·kg⁻¹)

因素 Factor	水平 Level	w(全氮) Total nitrogen content	w(全磷) Total phosphorus content	w(全钾) Total potassium content
A:白云石 Dolomite	K1	29.89	2.38	52.30
	K2	30.33	2.32	57.07
	K3	30.57	2.30	53.72
	R	0.69	0.08	4.77
B:石灰石 Limestone	K1	29.25	2.29	53.95
	K2	30.93	2.41	55.70
	K3	30.61	2.30	53.44
	R	1.68	0.12	2.26
C:生物炭 Biochar	K1	31.06	2.30	55.13
	K2	29.73	2.42	53.70
	K3	30.00	2.28	54.25
	R	1.34	0.14	1.43
D:有机肥 Organic fertilizer	K1	28.84	2.26	49.55
	K2	31.36	2.41	56.14
	K3	30.59	2.32	57.40
	R	2.52	0.15	7.86

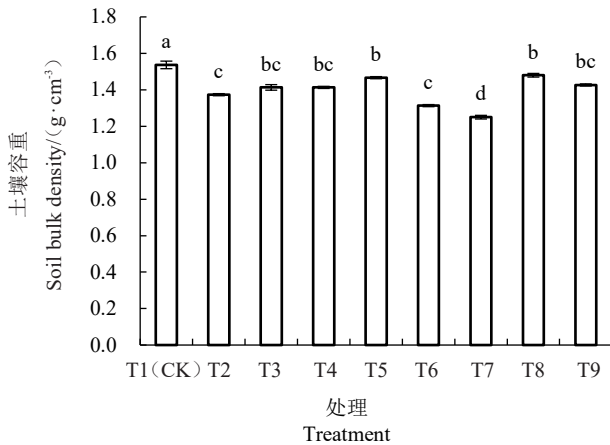


图1 不同土壤调理剂添加处理对土壤容重的影响
Fig. 1 Effects of different soil conditioner addition treatments on soil bulk density

表9 不同因素对土壤容重影响的极差分析结果
Table 9 Results of range analysis on the effects of different factors on soil bulk density (g·cm⁻³)

水平 Level	A:白云石 Dolomite	B:石灰石 Limestone	C:生物炭 Biochar	D:有机肥 Organic fertilizer
K1	1.44	1.40	1.44	1.48
K2	1.40	1.44	1.40	1.31
K3	1.39	1.38	1.38	1.44
R	0.05	0.06	0.06	0.17

显著提高土壤 pH,其中 T3、T4、T7 处理的增加效果较好。通过极差分析不同因素对土壤 pH 的影响,结果如表 10 所示。根据极差 R 值可知,对土壤 pH 提升效果由大到小为有机质>生物炭>白云石>石灰石,pH 最大的组合为 A₃B₃C₃D₃。

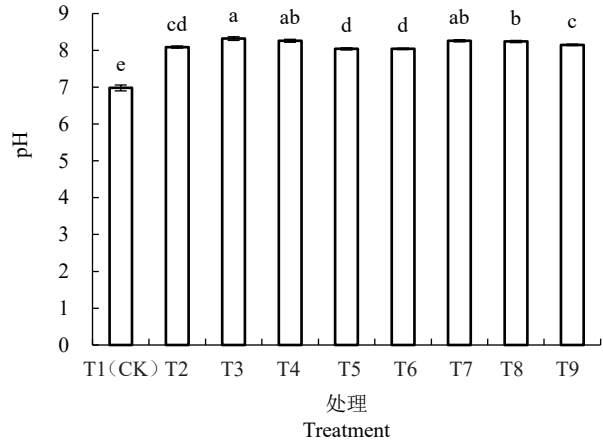


图2 不同土壤调理剂添加处理对土壤 pH 的影响
Fig. 2 Effects of different soil conditioner addition treatments on soil pH

表10 不同因素对土壤 pH 影响的极差分析结果
Table 10 Results of range analysis on the effects of different factors on soil pH

水平 Level	A:白云石 Dolomite	B:石灰石 Limestone	C:生物炭 Biochar	D:有机肥 Organic fertilizer
K1	7.80	7.83	7.75	7.72
K2	8.11	8.12	8.17	8.13
K3	8.22	8.17	8.21	8.27
R	0.42	0.34	0.45	0.55

2.6 不同炭基土壤调理剂添加处理对土壤有机质和养分含量的影响

由表 11 可知,与 T1(CK)相比,T2~T9 处理土壤的有机质含量均显著增加,增幅为 12.57%~176.56%,其中 T3、T5、T7 处理增幅最高;与 T1 相比,T2~T9 处理土壤全氮含量均增加,增幅为 2.67%~104%,其中以 T3 处理含量最高,为 1.53%;T8 处理土壤硝态氮含量显著高于其他处理,T5 处理含量为 6.44 mg·kg⁻¹,显著低于 T1;与 T1 相比,T2~T9 处理土壤铵态氮含量均有所增加,其中 T3 处理最高,为 13.61 mg·kg⁻¹,显著高于其他处理;与 T1 相比,T2~T9 处理土壤有效磷含量均显著增加,T3 处理含量最高,为 36.20 mg·kg⁻¹;与 T1 相比,T2~T9 处理土壤速效钾含量均显著增加,T3 和 T4 处理含量较高,分别为 666.67、665.00 mg·kg⁻¹。

表 11 不同土壤调理剂添加处理对土壤有机质和养分含量的影响

Table 11 Effects of different soil conditioner addition treatments on soil organic matter and nutrient content

处理 Treatment	w(有机质) Organic matter content/(g·kg ⁻¹)	w(全氮) Total nitrogen content/%	w(硝态氮) Nitrate nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(铵态氮) Ammonium nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)
T1(CK)	12.97±0.31 e	0.75±0.02 e	9.80±0.26 d	3.15±0.06 d	4.60±0.62 f	314.67±7.37 f
T2	32.50±1.01 ab	1.32±0.01 b	9.84±0.68 d	3.16±0.04 d	20.73±1.46 c	544.67±14.84 c
T3	35.87±0.40 a	1.53±0.01 a	14.18±0.66 c	13.61±0.76 a	36.20±1.77 a	666.67±23.03 a
T4	26.43±0.42 b	1.31±0.02 b	17.75±0.60 b	10.39±0.29 b	25.17±1.72 b	665.00±12.12 a
T5	33.17±0.15 a	0.92±0.01 d	6.44±0.30 e	4.52±0.68 d	8.57±1.60 e	432.67±10.41 d
T6	14.60±0.20 d	1.13±0.02 c	9.40±0.42 d	10.32±0.40 b	11.87±1.89 d	455.67±23.50 d
T7	34.37±0.31 a	1.30±0.02 b	15.51±0.28 c	7.51±0.33 c	18.63±1.20 cd	636.67±5.69 b
T8	18.03±0.51 c	1.29±0.01 b	24.13±0.34 a	3.91±0.57 d	18.23±0.67 d	568.67±15.53 c
T9	18.20±0.82 c	0.77±0.02 e	10.72±0.49 d	3.54±0.42 d	7.07±0.29 e	352.67±10.50 e

通过极差分析不同因素对土壤有机质和养分含量的影响,结果如表 12 所示。根据极差 *R* 值可知,对土壤有机质含量影响由大到小为生物炭>有机肥>石灰石>白云石,土壤有机质含量最高的组

合为 A₁B₂C₃D₂;对土壤全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾含量影响最大的均为有机肥,含量最高的组合分别为 A₁B₂C₃D₃、A₃B₁C₁D₃、A₁B₂C₃D₃、A₁B₃C₃D₃、A₃B₁C₃D₃。

表 12 不同因素对土壤有机质和养分含量的影响极差分析结果

Table 12 Results of range analysis on the effects of different factors on soil organic matter and nutrient content

因素 Factor	水平 Level	w(有机质) Organic matter content/(g·kg ⁻¹)	w(全氮) Total nitrogen content/%	w(硝态氮) Nitrate nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(铵态氮) Ammonium nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)
A:白云石 Dolomite	K1	27.11	1.20	11.27	1.20	20.51	508.67
	K2	24.73	1.12	11.20	1.12	15.20	517.78
	K3	23.53	1.12	16.79	1.12	14.64	519.34
	<i>R</i>	3.58	0.08	5.51	0.08	5.87	10.67
B:石灰石 Limestone	K1	24.59	1.12	14.35	1.12	16.13	538.78
	K2	27.90	1.18	13.47	1.18	15.84	515.34
	K3	22.89	1.14	11.43	1.14	18.38	491.67
	<i>R</i>	5.01	0.06	2.92	0.06	2.54	47.11
C:生物炭 Biochar	K1	15.20	1.06	14.44	1.06	11.57	446.34
	K2	25.71	1.13	12.77	1.13	17.66	520.78
	K3	34.47	1.25	12.04	1.25	21.13	578.67
	<i>R</i>	8.76	0.19	2.40	0.19	9.57	132.33
D:有机肥 Organic fertilizer	K1	21.45	0.81	8.99	0.81	6.75	366.67
	K2	27.16	1.25	11.58	1.25	17.08	545.67
	K3	26.78	1.38	18.69	1.38	26.53	633.45
	<i>R</i>	5.71	0.56	9.70	0.56	19.79	266.78

3 讨论

3.1 不同炭基土壤调理剂添加处理对生菜单株产量和养分吸收的影响

作物产量和养分吸收的提升,是土壤调理剂对土壤物理和化学性质改变的综合反映。本研究中不同炭基土壤调理剂组合均能增加生菜单株产量,通过极差分析可知,生菜单株产量最高的组合为 A₁B₂C₃D₂,除 T9 处理外都能够提高植株对氮磷钾的

吸收,这与前人的研究一致。杨汇豪等^[10]研究表明,生物炭、生石灰、粉煤灰、钢渣复配炭基土壤调理剂能补充土壤中微量元素含量、提高有机质含量、改善土壤微生态环境,最终使作物增产,养分含量增加。付梦雪等^[12]通过生物炭加秸秆配制的生物炭基土壤调理剂可以显著提高作物产量,提高氮素真实利用率。刘海萍等^[13]在重金属污染的土壤上施用 5 种土壤调理剂时,与不施调理剂相比,有 3 种土壤调理剂能够增加生菜产量。李其勇等^[6]通过对生菜

施加4种土壤调理剂,结果表明有2种土壤调理剂均能够增产,并且4种调理剂均可提高生菜叶片数、叶绿素含量和氮含量。

3.2 不同炭基土壤调理剂添加处理对土壤理化性质的影响

炭基土壤调理剂通过改变土壤容重、孔隙分布、饱和导水率等影响土壤孔隙从而改善土壤结构^[14],施用有机肥能够提高土壤有机质含量,土壤中有机质含量越高,土壤容重越小,孔隙度越大,且土壤持水能力主要受土壤容重、孔隙度、有机质含量等因素的影响^[15-16]。本研究4种土壤调理剂中生物炭和有机肥碳元素含量最多,对土壤有机碳的含量贡献最大,在试验中土壤有机质含量最高的处理为T3、T5、T7,均添加了生物炭,并且这3个处理较T1(CK)均能显著降低土壤容重,极差分析表明容重最小的组合为A₃B₃C₃D₂。这与陈丹平^[17]和向江书等^[18]的研究结果相一致。

在土壤pH方面,有机物类土壤调理剂、石灰类土壤调理剂均富含氧化物、OH⁻、CO₃²⁻等碱性成分,易与土壤中的H⁺发生中和、复分解等反应,从而提高土壤pH^[19]。田学中等^[20]通过在土壤中施用牡蛎壳、钾长石、白云石等调理剂,土壤pH从4.1分别提高到了7.5、7.1、7.1。Raboin等^[21]在酸性土壤中施入白云石、生物炭,发现均能够将土壤pH提升至5以上,且pH随两者施用量的增大而增大。本研究中4种土壤调理剂均为碱性,与T1相比,各土壤调理剂组合均能够显著提高土壤pH,最佳组合为A₃B₃C₃D₃,表明各种土壤调理剂用量越高,pH提高越明显。

此外,本研究中施用炭基土壤调理剂后土壤全氮、有效磷、速效钾含量均有不同程度的提高,这可能是由于改良剂本身含有丰富的N、P、K、Ca和Mg,加入均能提高土壤对应的养分,促进生菜生长,同时生物炭具有较大的比表面积,可以通过微孔结构或表面电荷直接吸附养分,减少土壤养分的淋失^[22]。陈琨等^[23]研究表明,在冷泥田中施用碱性土壤调理剂能够提高土壤养分的有效性,促进作物对N、P、K的吸收。沈彦辉等^[24]研究表明,在设施黄瓜种植时使用土壤调理剂,较不施土壤调理剂处理能显著增加有效磷、速效钾、交换性钙和有机质的含量。

4 结论

本研究结果表明,生菜单株产量最高的土壤调

理剂组合为A₁B₂C₂D₂;有利于株高和根系生长的最佳组合均为A₁B₂C₂D₂;叶片数最多的组合为A₁B₃C₃D₃;叶片叶绿素相对含量和氮含量最高的组合均为A₃B₂C₁D₃。植株全氮含量最高的组合为A₃B₂C₁D₂;植株全磷含量最高的组合为A₁B₂C₂D₂;植株全钾含量最高的组合为A₂B₂C₁D₃。土壤容重最小的组合为A₃B₃C₃D₂;土壤pH值最高的组合为A₃B₃C₃D₃;土壤有机质含量最高的组合为A₁B₂C₃D₂;土壤全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾含量最高的组合分别为A₁B₂C₃D₃、A₃B₁C₁D₃、A₁B₂C₃D₃、A₁B₃C₃D₃、A₃B₁C₃D₃。这表明针对不同的指标土壤调理剂最佳配比不同。

综合分析,以白云石、石灰石、生物炭、有机肥4种土壤调理剂组合复配的炭基土壤调理剂,建议优先选择白云石0g·kg⁻¹、石灰石2.5g·kg⁻¹、生物炭10g·kg⁻¹、有机肥30g·kg⁻¹(A₁B₂C₂D₂,T2)的炭基土壤调理剂组合,在此基础上若土壤为酸性土可适当提高4种土壤调理剂用量,本研究为蔬菜增产、蔬菜土壤质量提升提供了理论依据。

参考文献

- [1] 杨右君,冯浪佳,任科润,等.6种土壤调理剂对酸性水稻土改良效果的综合评价[J/OL].农业资源与环境学报,1-12[2025-03-13].<https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0969>.
- [2] 管西林,张玉凤,田慎重,等.不同土壤改良措施对胶东酸化设施菜田的改良效果[J].中国蔬菜,2024(10):89-96.
- [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] 王文英,刘喜存,霍建中,等.不同含量土壤调理剂对重茬地西瓜产量和土壤化学性质的影响[J].中国瓜菜,2023,36(1):67-71.
- [5] 闫辉,宋鹏飞,李枝武,等.炭基土壤调理剂对云南热区植烟土壤培肥及烤烟产质量效果研究[J].西南农业学报,2021,34(1):100-105.
- [6] 李其勇,陈德西,何忠全,等.土壤调理剂对生菜生产及土壤养分的影响研究[J].安徽农学通报,2024,30(21):17-21.
- [7] 王豪吉,施梦馨,徐应垚,等.生物炭与有机肥配施对耕地红壤酶活性及作物产量的影响[J].云南师范大学学报(自然科学版),2021,41(1):56-63.
- [8] 矫威.不同改良剂对作物生长发育及酸性土壤理化性状的影响[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [9] 武盼盼,杨素芬,刘书武,等.炭基土壤调理剂配施专用肥对玉米土壤微生物及酶活性的影响[J].中国农学通报,2021,37(26):66-73.
- [10] 杨慧豪,郭秋萍,黄帮裕,等.生物炭基土壤调理剂对酸性菜田土壤的改良效果[J].农业资源与环境学报,2023,40(1):15-24.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 付梦雪,吴名字,韩碧波,等.秸秆还田与生物炭配施对麦-玉

- 轮作体系产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(8): 89-96.
- [13] 刘海萍, 杨阳, 贾聪, 等. 不同土壤调理剂对生菜产量及重金属累积的影响[J]. 肥料与健康, 2023, 50(5): 15-19.
- [14] 张猛. 干湿交替过程中土壤容重、水分特征曲线和热特性的动态变化特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [15] NOTTINGHAM A C, THOMPSON J A, TURK P J, et al. Seasonal dynamics of surface soil bulk density in a forested catchment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4): 1163-1168.
- [16] 张琛, 赫有有, 薛婷婷, 等. 松嫩平原北部未开垦黑土土壤物理性状垂直变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 231-240.
- [17] 陈丹平. 第四纪红土发育红壤孔隙的数量特征、控制因子和重构[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [18] 向书江, 余砾, 熊子怡, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6067-6077.
- [19] HOLLAND J E, BENNETT A E, NEWTON A C, et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review[J]. Science of the Total Environment, 2018(610/611): 316-332.
- [20] 田中学, 徐丽萍, 王旭. 土壤调理剂对小油菜镉吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 94-100.
- [21] RABOIN L M, RAZAFIMAHAFALY A H D, RABENJARI-SOA M B, et al. Improving the fertility of tropical acid soils: liming versus biochar application: A long term comparison in the Highlands of Madagascar[J]. Field Crops Research, 2016, 199: 99-108.
- [22] 刘玉学, 吕蒙蒙, 石岩, 等. 生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 304-310.
- [23] 陈琨, 秦鱼生, 喻华, 等. 不同肥料/改良剂对冷泥田水稻生长、养分吸收及土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 773-781.
- [24] 沈彦辉, 胡璋健, 赵冬梅, 等. 矿物型土壤调理剂用量对设施黄瓜生长、品质及土壤性状的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(8): 33-41.