

生物炭对灌淤土理化性质及菜心品质的影响

李白云¹, 李慧¹, 许泽华¹, 郭鑫年², 周涛³, 邢润东², 李永祥⁴

(1. 宁夏农林科学院园艺研究所 银川 750002; 2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所 银川 750002;
3. 宁夏农林科学院 银川 750002; 4. 青铜峡市良种繁殖场 宁夏青铜峡 751606)

摘要: 分析生物炭对灌淤土理化性质、酶活性及作物产量和品质的影响, 为生物炭在农业中的推广应用提供科学依据。在青铜峡市供港蔬菜基地, 研究了不同生物炭施用量(CK, 0 t·hm⁻²; T1, 7.5 t·hm⁻²; T2, 15 t·hm⁻²; T3, 22.5 t·hm⁻²; T4, 30 t·hm⁻²)条件下土壤理化性质、酶活性及菜心品质变化。结果表明, 土壤肥力和土壤酶活性随着生物炭施用量的增加总体上均呈现先升高后降低的趋势。在施生物炭 2 a 后, 不同量生物炭还田对菜田土壤有机质、速效钾、有效磷、微生物量碳和土壤水分含量增加值与对照呈显著差异, 土壤有效磷、速效钾和土壤水分含量比对照分别增加 1.9%~6.9%、2.3%~7.4%、6.9%~12.9%。土壤脲酶活性提高 73.5%~175.4%, 土壤磷酸酶活性提高 50.9%~136.1%, 土壤蔗糖酶活性提高 20.3%~55.5%。各个处理中, 脲酶和蔗糖酶的活性高低依次为 T2>T4>T3>T1>CK。土壤铵态氮含量提高 56.4%~126.9%, 土壤硝态氮的含量提高 75.4%~166.9%, 土壤铵态氮的含量高低依次为 T2>T4>T3>T1>CK, 土壤硝态氮的含量高低依次为 T3>T4>T2>T1>CK。与对照相比, 生物炭还田能显著提高菜心叶片的维生素 C 和全氮含量, 提高幅度为 33.1%~146.2%、9.3%~103.2%, 维生素 C 含量各处理表现为 T3>T4>T2>T1>CK, 全氮含量各处理表现为 T2>T3>T4>T1>CK; 菜心叶片全磷含量 T2 和 T3 处理分别增加 6.6%和 7.4%, 菜心叶片全钾含量 T1 和 T4 处理分别增加 14.5%和 3.9%, 并与对照差异显著。通过主成分分析, 处理 T2 得分最高, 处理 T3 得分次之, 因此综合考虑各项指标, T2 即 15 t·hm⁻² 生物炭处理改善菜园土壤、提高菜心品质的效果最佳。

关键词: 土壤理化性质; 生物炭; 菜心; 品质

中图分类号: S634.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)03-193-08

Effects of biochar on the physicochemical property of irrigated silt soil and the quality of *Brassica campestris*

LI Baiyun¹, LI Hui¹, XU Zehua¹, GUO Xinnian², ZHOU Tao³, XING Rundong², LI Yongxiang⁴

(1. Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 4. Qingtongxia City Superior Seed Breeding Farm, Qingtongxia 751606, Ningxia, China)

Abstract: This study was conducted at a vegetable supply base for Hong kong in Qingtongxia city through filed plot experiments to investigate the effects of different biochar application rates (CK, 0 t·hm⁻²; T1, 7.5 t·hm⁻²; T2, 15 t·hm⁻²; T3, 22.5 t·hm⁻²; T4, 30 t·hm⁻²) on the physicochemical properties and enzyme activity of irrigated silt soil, as well as the yield and quality of *Brassica campestris*. The aim was to provide a scientific basis for the promotion and application of biochar in agricultural production. The results showed that soil fertility and soil enzyme activity generally exhibited a trend of first increasing and then decreasing with the increase of biochar application rate. Two years after applying biochar, all application rate treatments significantly increased soil organic matter, available potassium, available phosphorus, microbial biomass carbon, and soil moisture content in the vegetable field. Compared to the control, soil available phosphorus, available potassium, and soil moisture content increased by 1.9%-6.9%, 2.3%-7.4%, and 6.9%-12.9%, respectively. The activity of soil urease, phosphatase, and sucrase increased by 73.5%-175.4%, 50.9%-136.1%, and 20.3%-55.5%, respectively. Among the four treatments, the order of activity for urease and invertase enzymes was T2>T4>T3>T1>CK. Soil ammoni-

收稿日期: 2025-04-24; 修回日期: 2025-07-10

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2023BCF01049)

作者简介: 李白云, 男, 副研究员, 主要从事园艺作物栽培研究。E-mail: 124495776@qq.com

通信作者: 周涛, 男, 研究员, 主要从事土壤生态与植物营养研究。E-mail: zhoutao6084609@163.com

um nitrogen and nitrate nitrogen content increased by 56.4%-126.9%, and 75.4%-166.9%, respectively, with the order for ammonium nitrogen content being $T2>T4>T3>T1>CK$, and for nitrate nitrogen content being $T3>T4>T2>T1>CK$. Compared to the control, biochar application significantly increased the vitamin C and total nitrogen content of *Brassica campestris* leaves, with increases ranging from 33.1%-146.2%, and 9.3%-103.2%, respectively. The vitamin C content across treatments followed the order $T3>T4>T2>T1>CK$, while the total nitrogen content followed $T2>T3>T4>T1>CK$. Regarding total phosphorus content in leaves, the T2 and T3 treatments significantly increased by 6.6% and 7.4%, respectively. For the total potassium content, the T1 and T4 treatments significantly increased by 14.5% and 3.9%, respectively. Principal component analysis results showed that treatment T2 had the highest score, followed by treatment T3. Considering all indicators comprehensively, the application of $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (treatment T2) had the best overall effect on, improving vegetable soil quality and enhancing the quality of *Brassica campestris*.

Key words: Soil physicochemical properties; Biochar; *Brassica campestris*; Quality

宁夏供港蔬菜在 21 世纪初开始发展,到 2012 年形成了一定的规模,截止到 2022 年底,宁夏全区供港蔬菜面积在 3.57 万 hm^2 以上,主产区集中在引黄灌区和南部山区,产量在 50 万 t 以上,产值在 30 亿元以上,占全区蔬菜总产量的 10%,占全区供粤港澳大湾区农产品的 90%^[1-2]。宁夏供港菜心连续多年种植,大水重肥的管理方式导致土壤养分失衡,土传病害严重,产生的连作障碍严重影响了供港菜心的产量和品质,主要表现为田间根系浅、不下扎,菜薹味淡、口感变差^[3]。

在菜心产业发展过程中,如何高效利用农业资源提高菜心产量和品质以及维护土壤肥力是一个较大的难题。生物炭是一种土壤改良材料,具有对环境友好的特点,引起了相关科研人员的广泛关注,并能够通过影响土壤容重、孔隙度、团聚体结构、硬度及有机碳来改善土壤质量。房彬等^[4]研究表明,施用生物炭有利于降低土壤容重,提高土壤 pH、有机质含量、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量、有效磷含量、含水量,显示出生物炭作为土壤改良剂施用于农田能有效改良土壤理化性质和提高耕作性能。赵长江等^[5]研究表明,土壤中添加生物炭可提高生菜叶绿素含量和氮磷钾速效营养的利用效率,进而提高生菜的产量和品质,实现生菜减肥增效的有机栽培目标。顾佳艺等^[6]研究发现,添加生物炭可以促进白浆土中的中等稳定性磷和稳定性磷转化为活性磷。王姝婧等^[7]研究发现,生物炭与木本泥炭 2 种外源有机碳均可以起到提高土壤肥力和土壤酶活性的作用。但生物炭对菜心产量及土壤养分的影响是一个复杂而多变的问题。本研究以引黄灌区供港蔬菜种植的灌淤土为研究对象,探究生物炭还田对土壤肥力、土壤酶活性及生菜产量的影响,旨在为供港蔬菜种植土壤改良及菜心栽培技术研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点和材料

试验地位于宁夏青铜峡市良繁场,气候类型属暖温带大陆性干旱气候,年均气温 $11.8\text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量 200 mm,土壤类型为灌淤土。

菜心品种为玉田 3 号,由广州市农业科学研究院选育,试验在 2024 年进行,每年种植 4 茬,试验时间为第二茬(5 月 23 日至 7 月 1 日)。试验共设 4 个处理: $7.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(T1), $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(T2), $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(T3), $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(T4)以不添加生物炭作为对照(CK)。每个处理 20 m^2 ,3 次重复,蔬菜采用喷灌模式以水溶性肥料随水施入。菜地喷灌随水施肥,每茬用量 $\text{N } 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥 $7000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。所用生物炭是利用玉米秸秆通过缺氧不完全燃烧制成的。炭化过程的升温速率为 $18\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,炭化最高温度为 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 。生物炭产率(生物炭质量与原材料质量比)为 30%。生物炭的元素组成使用德国 Elementar 公司 Vario ELIII 型元素分析仪测定,经 K_2SO_4 溶液浸提后用 Elementar 公司 High TOCII 型总有机碳/氮分析仪测定可溶性有机碳含量,其他理化性质分析方法参照土壤样品分析方法^[8]。生物炭基本理化性质和有机碳、几种矿质养分组成如表 1 所示。

表 1 生物炭理化性质

指标 Indicator	w(C)/%	w(N)/%	w(H)/%	C/N	pH
数值 Value	72.3	1.22	1.30	68.58	10.1

1.2 指标测定方法

1.2.1 土壤养分含量测定 菜心采收后,采用对角线五点取样法在土壤深度为 0~20 cm 进行土钻采样,用四分法混合后获得约 1 kg 的样品,贴上标签

后装入无菌袋,用于土壤化学性状和酶活性的测定,采用 pH 计测定土壤 pH 值,采用电导率仪测定土壤电导率,采用重铬酸钾容量法测定土壤中有机质含量,采用烘干法测定土壤水分含量,采用环刀法测定土壤容重,采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提-TOC/重铬酸钾法测定土壤微生物量碳含量,采用气量法测定土壤碳酸钙含量,采用比重法测定土壤机械组成,采用电导法测定土壤盐分含量,采用靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量,采用紫外分光光度法测定硝态氮含量。采用凯氏定氮法测定土壤中全氮含量,采用 NaOH 熔融钼锑抗比色法测定全磷含量,采用 NaOH 熔融火焰光度法测定钾含量,采用碱解扩散法测定碱解氮含量,采用 Olsen 法测定速效磷含量。采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶活性,采用磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶活性,采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性^[8-9]。

1.2.2 菜心指标测定 在菜心采收期取样,测定菜心各项农艺指标。用直尺测量最大叶片的长和宽。株高:自菜薹第 3 节位至齐口花处,用直尺直接测定。茎粗:测定菜心 5~6 节处茎的粗度,用数显游标卡尺测定。地上部鲜质量:用十分之一电子天平称量第 4 片真叶以上部分记为地上部鲜质量;

干质量:鲜样经 105 °C 杀青 1 h 后 75 °C 烘干至恒质量,用万分之一天平称量。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮蒸馏法测定菜心全氮含量;采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,钒钼黄比色法测定全磷含量;采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,火焰光度法测定全钾含量。在 8 月上旬利用 TPS-2 光合仪于 09:00—11:30 测定菜心中部叶片的光合特性。采用 2,6-二氯酚靛滴定法测定菜心维生素 C 含量。

1.3 数据统计分析

采用 Excel 2013 进行数据统计,采用 IBM SPSS Statistics 23 对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同生物炭量还田对土壤理化指标的影响

由表 2 可以看出,不同量生物炭还田对菜园土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、微生物量碳含量和土壤水分含量的影响差异显著,而土壤 pH、容重和碳酸钙、土壤盐分含量无显著性差异。有机质和微生物量碳含量变化一致,表现为 T2 处理显著高于对照,分别增加 19.7%、49.5%;土壤有效磷、速效钾含量和土壤水分含量比对照分别增加 1.9%~6.9%、2.3%~7.4%、6.9%~12.9%。说明生物炭能增加土壤速效养分含量,保持土壤水分。

表 2 不同量生物炭还田对菜园土壤特征指标的影响

Table 2 Effects of different amounts of biochar returning on soil characteristic indicators in vegetable gardens

处理 Treatment	pH 值 pH value	w(有机质) Organic matter content/(g·kg ⁻¹)	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available potassium content/(mg·kg ⁻¹)	w(土壤水分) Soil moisture content/ (g·kg ⁻¹)
CK	8.21±0.02 a	20.8±0.22 c	1.94±0.02 a	129.5±1.12 b	550.7±0.93 c	194.7±1.66 c
T1	8.09±0.01 a	23.1±0.15 b	1.08±0.04 c	138.4±1.63 a	591.3±4.12 a	208.2±1.63 b
T2	8.19±0.01 a	24.9±0.03 a	1.97±0.01 a	131.9±3.21 ab	563.2±4.67 b	219.8±2.36 a
T3	8.24±0.01 a	24.3±0.06 a	1.99±0.03 a	133.1±1.47 a	570.9±0.52 b	210.8±1.45 a
T4	8.14±0.01 a	24.0±0.04 a	1.53±0.04 b	135.15±1.52 a	577.3±4.37 b	214.0±2.84 a
处理 Treatment	容重 Soil bulk dens/(g·cm ⁻³)	w(微生物量碳) Microbial biomass carbon content/(mg·kg ⁻¹)	w(碳酸钙) Calcium carbonate content/(g·kg ⁻¹)	w(土壤盐分) Soil salinity content/ (g·kg ⁻¹)	机械组成 Mechanical composition	
CK	1.47±0.02 a	146.30±0.43 d	140±0.01 a	1.78±0.02 a	粉(砂)壤土 Silty loam	
T1	1.49±0.01 a	188.60±0.64 b	140±0.02 a	1.82±0.02 a	粉(砂)壤土 Silty loam	
T2	1.48±0.02 a	218.80±0.91 a	144±0.01 a	1.77±0.02 a	粉(砂)壤土 Silty loam	
T3	1.38±0.01 a	174.56±0.41 bc	143±0.01 a	1.84±0.02 a	粉(砂)壤土 Silty loam	
T4	1.45±0.02 a	163.70±0.77 c	142±0.02 a	1.79±0.02 a	粉(砂)壤土 Silty loam	

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

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

2.2 不同生物炭还田对土壤酶活性的影响

由图 1 可以看出,土壤酶活性随生物炭施用量

的增加总体上表现出先升高后降低的趋势(除酸性磷酸酶外)。4 个处理均能升高土壤脲酶、酸性磷酸

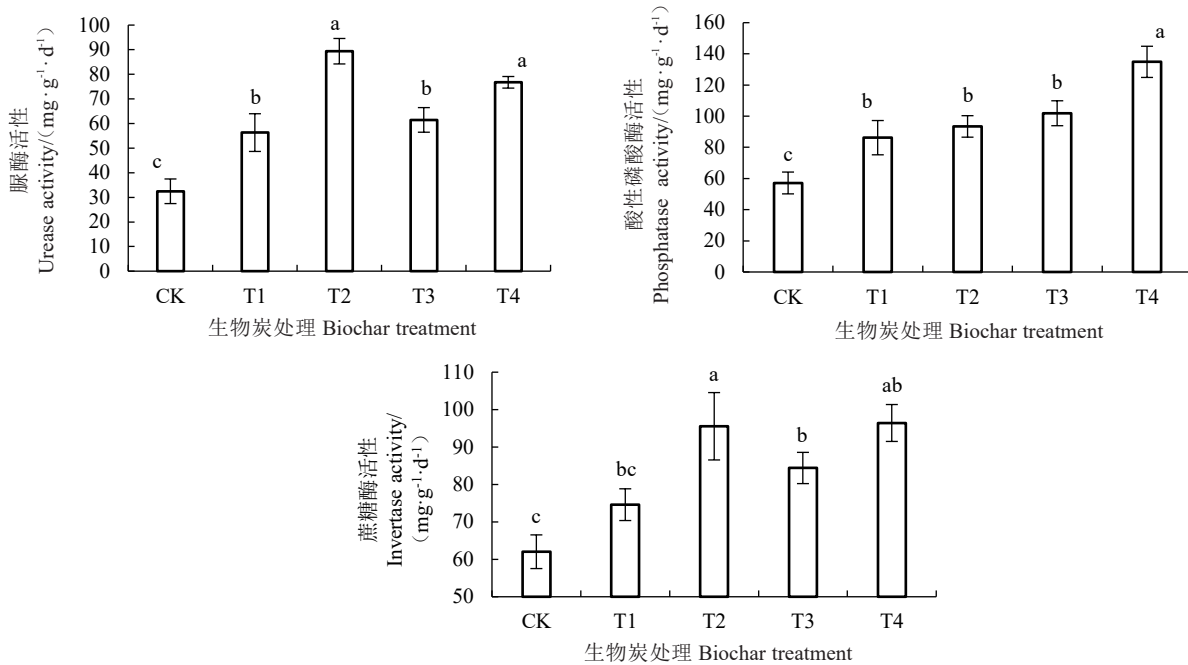


图 1 不同量生物炭还田对菜园土壤酶活性的影响

Fig.1 Effect of different amounts of biochar returning to the field on soil enzymes activity in vegetable gardens

酶和蔗糖酶 3 种土壤酶的活性,其中 T2 处理的土壤脲酶和蔗糖酶活性均最高。土壤脲酶活性提高 73.5%~175.4%,土壤磷酸酶活性提高 50.9%~136.1%,土壤蔗糖酶活性提高 20.3%~55.5%。各个处理中,脲酶和蔗糖酶的活性高低依次为 T2>T4>T3>T1>CK。

2.3 不同生物炭还田对土壤速效氮的影响

由图 2 可以看出,各个处理均能增加土壤铵态氮和硝态氮含量,土壤铵态氮含量提高 56.4%~126.9%,土壤硝态氮含量提高 75.4%~166.9%。各个处理中,土壤铵态氮含量高低依次为 T2>T4>T3>T1>CK。土壤硝态氮含量高低依次为 T3>T4>T2>T1>CK。

2.4 不同生物炭还田对菜心光合特性的影响

由图 3 可以看出,4 个处理与 CK 相比,不同量生物炭还田显著增加菜心净光合速率,增加幅度为 8.0%~9.89%,其中 T1 增加幅度最大,其次为 T4 处理。在蒸腾速率方面,T1 和 T4 分别降低 5.56%和 2.78%。生物炭还田增加气孔导度,但增加幅度较小,为 0.01%~0.10%。T3 处理增加了胞间 CO₂ 浓度 0.71%,其他处理的胞间 CO₂ 浓度有所降低,幅度为 0.05%~1.28%。

2.5 不同生物炭还田对菜心品质的影响

由表 3 可以看出,不同量生物炭还田对菜心叶绿素相对含量影响较大,与 CK 比差异显著,增幅为 16.0%~27.8%,各处理表现为 T1>T2>T4>T3>CK。

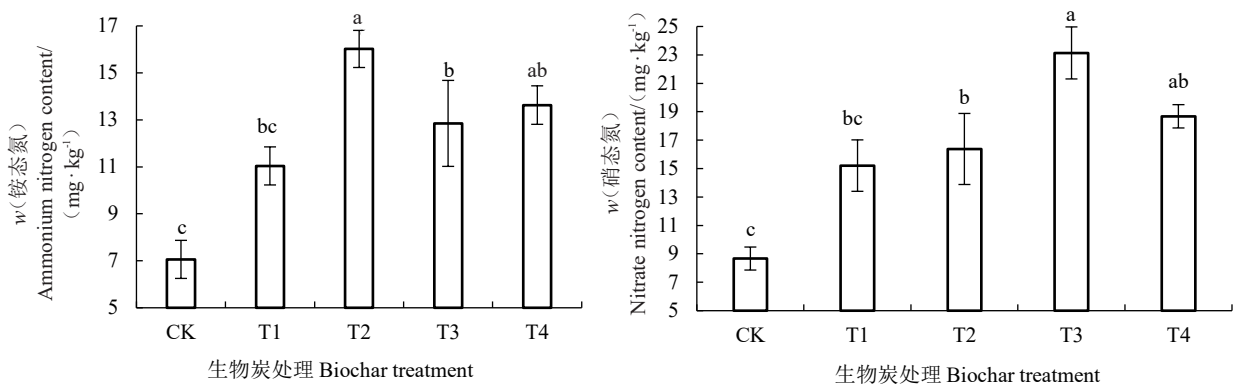


图 2 不同量生物炭还田对菜园土壤氮形态的影响

Fig. 2 Effect of different amounts of biochar returning to the field on nitrogen forms in vegetable garden soil

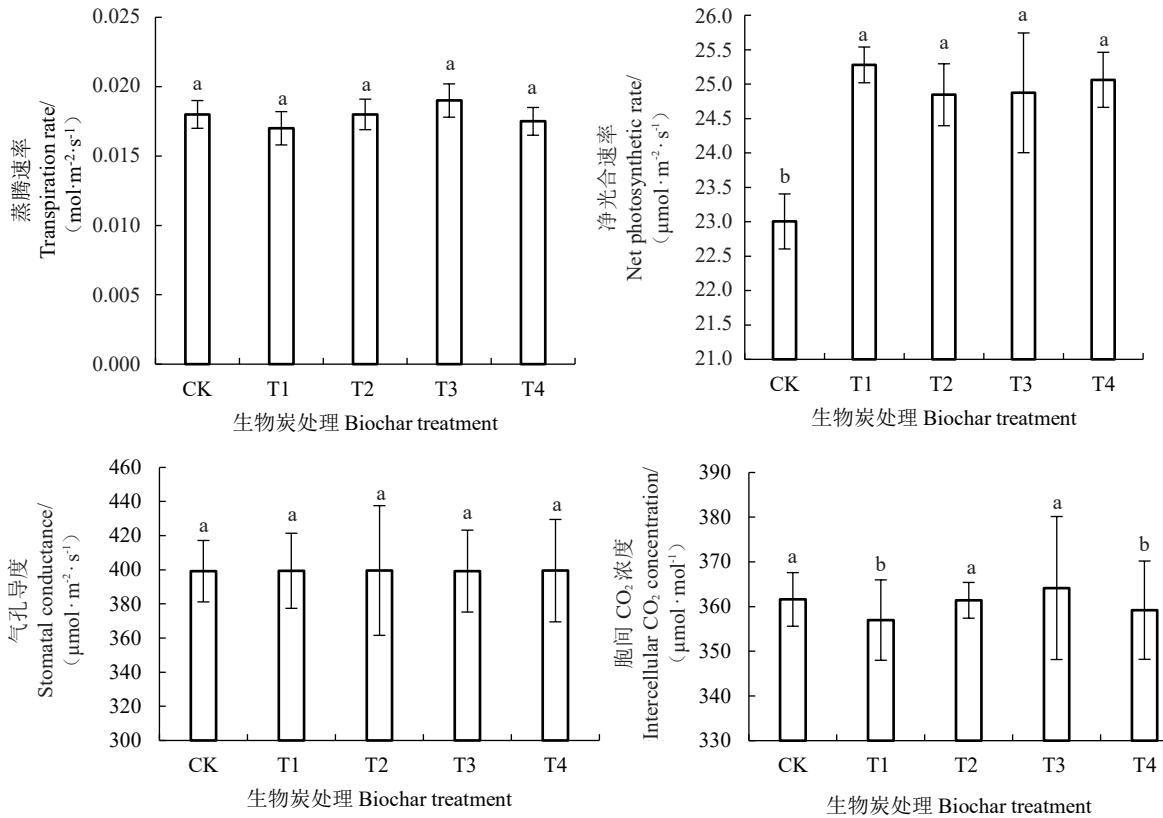


图3 不同生物炭还田对菜心叶片光合特性的影响

Fig. 3 Effect of different biochar returning fields on photosynthesis of Chinese cabbage leaves

表3 不同生物炭还田对菜心叶片的影响

Table 3 Effects of different biochar returning fields on cabbage leaves

处理 Treatment	叶绿素相对含量 Chlorophyll content/SPAD	最大叶片 The maximum leaf		株高 Plant height/cm
		长 Length/cm	宽 Width/cm	
CK	59.90±0.34 c	13.57±0.75 b	7.14±0.02 a	38.14±0.34 b
T1	76.60±0.32 a	15.93±0.24 a	7.11±0.03 a	36.93±0.71 b
T2	75.70±2.67 a	15.63±0.32 a	6.61±0.04 a	41.75±0.37 b
T3	69.48±1.03 b	16.44±0.41 a	7.41±0.03 a	48.50±0.87 a
T4	70.15±2.02 b	15.78±0.18 a	6.86±0.02 a	39.34±0.54 b

叶片长增加较多, 差异显著, 增幅为 15.2%~21.1%, 各处理表现为 T3>T1>T4>T2>CK。生物炭对叶片

影响不大, 差异未达到显著水平。T3 处理增加株高最明显, 差异达到显著水平, 增加 27.2%。

由表 4 可以看出, 与 CK 相比, 不同量生物炭还田对菜心的菜薹质量影响较大, 且差异显著, 增幅为 8.2%~37.8%, 各处理表现为 T2>T4>T1>T3>CK。生物炭对菜心地上鲜质量和地下鲜质量增加效果显著 (T3 除外), 分别增大 9.6%~15.1%、15.2%~63.4%, 各处理表现为 T2>T4>T1>T3>CK。地下干质量/地上干质量各处理表现为 T2>T1>T4>T3>CK。

由表 5 可以看出, 与 CK 相比, 生物炭还田可显著提高菜心叶片的维生素 C 和全氮含量, 提高幅度

表4 不同生物炭还田对菜心生长指标的影响

Table 4 Effects of different biochar returning fields on the growth indicators of cabbage

处理 Treatment	薹茎质量 Shoots mass/g	地上鲜质量 Aboveground fresh mass/g	地上干质量 Aboveground dry mass/g	地下鲜质量 Underground fresh mass/g	地下干质量 Underground dry mass/g	地下干质量/地上干质量 Underground dry mass/ Aboveground dry mass
CK	1.94±0.03 c	30.96±0.32 b	3.80±0.03 b	1.64±0.02 b	0.30±0.02 c	0.079±0.002 d
T1	2.26±0.19 b	35.00±0.75 a	4.20±0.03 a	2.63±0.03 a	0.54±0.03 a	0.129±0.001 b
T2	2.70±0.02 a	35.64±0.20 a	4.02±0.04 a	2.73±0.02 a	0.57±0.02 a	0.141±0.002 a
T3	2.12±0.02 b	33.94±0.87 b	3.50±0.02 b	1.89±0.04 b	0.30±0.03 c	0.085±0.004 d
T4	2.48±0.03 a	35.32±0.45 a	4.11±0.03 a	2.68±0.03 a	0.45±0.04 ab	0.111±0.003 c

表5 不同生物炭还田对菜心营养指标的影响

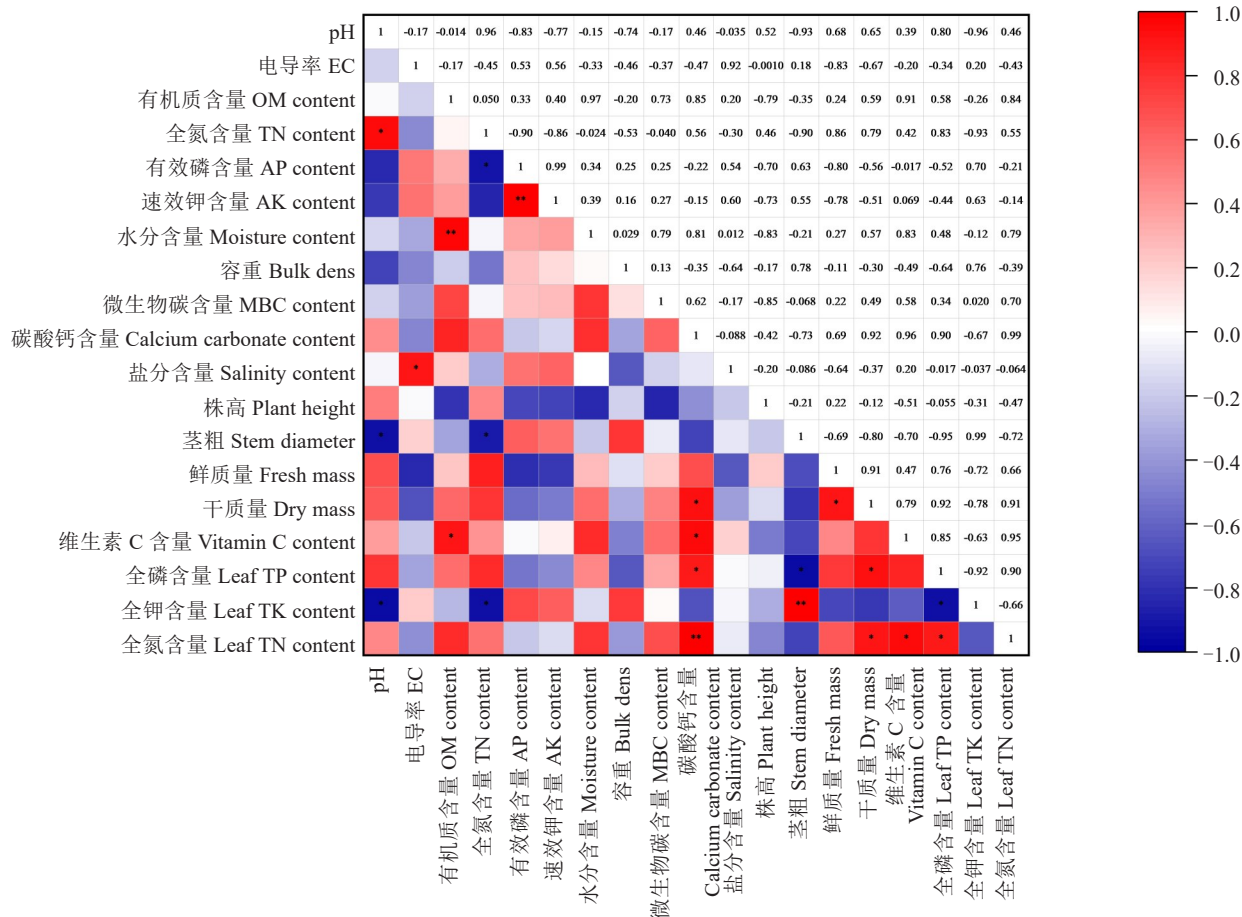
Table 5 Effects of different biochar returning fields on nutritional indicators of cabbage

处理 Treatment	w(维生素 C) Vitamin C/ (mg·100 g ⁻¹)	w(全磷) Total phosphorus content/(mg·100 g ⁻¹)	w(全钾) Total potassium content/(mg·100 g ⁻¹)	w(全氮) Total nitrogen content/(mg·100 g ⁻¹)
CK	3.90±0.11 c	6 814.24±0.02 b	51 592.26±13.32 b	9 290.70±10.05 d
T1	5.19±0.23 c	6 522.43±0.02 c	59 061.76±17.81 a	10 153.56±11.24 d
T2	7.38±0.21 b	7 266.99±0.02 a	50 216.76±15.53 b	22 150.65±11.13 a
T3	9.60±0.26 a	7 319.26±0.02 a	46 490.19±11.22 c	18 881.34±20.21 b
T4	7.49±0.32 b	6 867.89±0.02 b	53 623.59±13.23 a	13 864.97±12.82 c

为 33.1%~146.2%、9.3%~103.2%，维生素 C 含量各处理表现为 T3>T4>T2>T1>CK，全氮含量各处理表现为 T2>T3>T4>T1>CK。生物炭处理对菜心叶片全磷含量有影响，T2 和 T3 处理与对照差异显著，分别增加 6.6%和 7.4%。生物炭处理对菜心叶片全钾含量有影响，T1 和 T4 处理与对照差异显著，分别增加 14.5%和 3.9%。

2.6 不同生物炭还田土壤理化指标与菜心营养指标的相关分析

由图 4 可知，维生素 C 含量与有机质含量呈显著正相关，相关系数为 0.91；菜心中全磷含量与菜心干质量呈显著正相关，相关系数为 0.92；菜心中全钾含量与菜心茎粗呈极显著正相关，相关系数为 0.99；菜心中全钾含量与全磷含量呈显著负相关，相



注：*表示 P≤0.05；**表示 P≤0.01。下同。

Note: * indicates P≤0.05; ** indicates P≤0.01. The same below.

图 4 不同生物炭还田土壤理化指标与菜心营养指标的相关分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil physical and chemical indicators of different biochar returning fields and cabbage nutrition index

关系数为-0.92;土壤水分与土壤有机质含量呈极显著正相关,相关系数为0.97。

2.7 不同生物炭还田土壤理化指标与菜心营养指标的主成分分析

由表6可知,为明确不同生物炭还田处理的效果,对土壤的pH值、电导率、有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、水分含量、容重、微生物量碳含量、碳酸钙含量、盐分含量指标和菜心的株高、基部茎粗、鲜质量、干质量、维生素C含量、全磷含量、全钾含量、全氮含量指标进行主成分分析。结果表明,第1个主成分(土壤全氮含量、碳酸钙含量和菜心株高、鲜质量、干质量、全磷含量、全钾含量、全氮含量)的贡献率达51.44%;第2个主成分(土壤有机质含量、水分含量和菜心基部茎粗)贡献率达29.85%;第3个主成分(土壤电导率、容重、盐分含量)贡献率达16.79%。综上所述,处理T2得分最高,处理T3得分次之,因此综合考虑各项指标,T2即15 t·hm⁻²生物炭处理改善菜园土壤、提高菜心品质的效果最佳。

表6 不同生物炭还田土壤理化指标与菜心营养主成分分析
Table 6 Analysis of soil physical and chemical indicators and principal component analysis of cabbage nutrients in different biochar returning fields

处理 Treat- ment	主成分 Principal component			综合 得分 IFI Synthesis score IFI	排序 Rank
	F1	F2	F3		
CK	-0.42	-1.23	-0.09	-1.74	5
T1	-2.28	0.54	0.04	-1.71	4
T2	1.78	0.42	-0.34	1.85	1
T3	1.29	0.05	0.48	1.82	2
T4	-0.36	0.21	-0.08	-0.23	3
主成分贡献率 Principal component contribution rate/%	51.44	29.85	16.79		

3 讨论与结论

大量研究表明,施用生物炭后土壤内的有效态养分含量明显提高,说明生物炭具有提高土壤养分含量、减少养分流失的作用^[10]。党洪阳等^[11]研究发现,以生物炭施加量为5 t·hm⁻²处理的土壤有效养分含量和养分累积量最高。生物炭能够增加土壤有机质含量,改善土壤质量,提高土壤持水保水能力^[12-13]。赵建诚等^[14]研究表明,添加生物质炭处理显著提高了2个土层土壤中全氮、硝态氮、铵态氮和碱解氮含量以及全磷和有效磷含量,促进了氮、磷

活化,提高了土壤养分供应能力。姚奇等^[15]研究表明,配施4500 kg·hm⁻²的生物炭显著提高了蔗糖酶、脲酶和多酚氧化酶活性,说明高量生物质炭可以催化蔗糖分解成果糖和葡萄糖,促进尿素的水解,并且可以促进酚类物质和芳香类化合物的氧化,促进了有机物的降解,这与本研究结果一致。本试验研究结果表明,不同量生物炭还田对菜田土壤有机质、速效钾、有效磷、微生物量碳和水分含量差异显著,土壤有效磷、速效钾含量和水分含量比对照分别增加1.9%~6.9%、2.3%~7.4%、6.9%~12.9%。生物炭能增加土壤速效养分,保持土壤水分。铵态氮、硝态氮和水解性氮是植物吸收氮素的主要来源。生物炭处理均能增加土壤铵态氮和硝态氮含量,土壤铵态氮含量提高56.4%~126.9%,土壤硝态氮的含量提高75.4%~166.9%。生物炭对土壤的改良是一个长期且缓慢的过程,本试验只进行了2年,多年施用生物炭对土壤有机碳和养分固持的作用以及对土壤团聚体结构和微生物群落组成等方面的影响,还需进一步研究和验证。

生物炭对植物的影响是由其性质、施用量和施用方式等共同决定的。梁丽丽等^[16]研究表明,不同替代比例的稻壳生物炭和玉米秸秆生物炭均可通过改变基质的孔隙状况和养分含量来促进樱桃萝卜根系生长,进而提高樱桃萝卜产量,其中1/2的稻壳炭和1/6的玉米秸秆炭替代泥炭的效果最佳。韩召强等^[17]研究表明,生物质炭施用量为30 t·hm⁻²时对黄瓜增产效果最好,黄瓜产量较对照提高了21.80%。周武等^[18]研究表明,多数添加菌渣生物炭处理可有效提高生菜产量,但部分处理表现为抑制生菜生长,这可能与不同生物炭的性质差异有关。马凤兰等^[19]研究发现,在宁夏干旱地区,生物炭对土壤养分含量、土壤酶活性及玉米产量有明显影响,该地区生物炭的最佳施用量为22.5 t·hm⁻²。

在本研究条件下,土壤理化性质方面,生物炭还田对菜田土壤有机质、速效钾、有效磷、微生物量碳和土壤水分含量影响显著,土壤有效磷、速效钾和土壤水分含量比对照分别增加1.9%~6.9%、2.3%~7.4%、6.9%~12.9%。生物炭能增加土壤速效养分含量,保持土壤水分。铵态氮、硝态氮和水解性氮是植物吸收氮素的主要来源。生物炭处理均能增加土壤铵态氮和硝态氮含量,土壤铵态氮含量提高56.4%~126.9%,土壤硝态氮含量提高75.4%~166.9%。总体而言,生物炭作为土壤改良剂施用于农田能有效改良土壤和提高耕作性能。生物炭能

提高菜心产量,本研究结果表明,生物炭还田对菜心叶绿素含量影响较大,增幅为16.0%~27.8%;生物炭对菜心地上鲜质量和地下鲜质量增加明显,增幅分别为9.6%~15.1%、15.2%~63.4%。生物炭添加对产量增高的贡献存在差异,但本试验条件下基本表现为产量随生物炭用量增加呈先升高而后降低的趋势。综合考虑各项指标,T2(即15 t·hm⁻²生物炭处理)改善菜园土壤、提高菜心品质的效果最佳。

参考文献

- [1] 杨国华.宁夏菜心采收贮藏品质变化规律的研究[D].银川:宁夏大学,2020.
- [2] 马梅.宁夏菜心产业发展现状、存在问题及对策研究[J].宁夏农林科技,2022,63(6):58-60.
- [3] 李海俊.宁夏供港菜心连作土壤健康程度综合表征研究[D].银川:宁夏大学,2023.
- [4] 房彬,李心清,赵斌,等.生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J].生态环境学报,2014,23(8):1292-1297.
- [5] 赵长江,鞠世杰,贝丽霞,等.生物炭与化肥不同比例配施对生菜产量和品质的影响[J].黑龙江农业科学,2020(2):33-37.
- [6] 顾佳艺,赵子奥,毛慧,等.生物炭对白浆土磷形态及磷解吸特性的研究[J/OL].吉林农业大学学报,1-12[2025-04-22].<https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.20528>.
- [7] 王姝婧,王利娜,孙佳,等.外源有机碳对新疆骏枣园土壤肥力及土壤酶活性的影响[J].中南林业科技大学学报,2023,43(4):134-143.
- [8] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社:1986.
- [9] SHI W, DELL E, BOWMAN D, et al. Soil enzyme activities and organic matter composition in a turfgrass chronosequence[J]. Plant and Soil, 2006, 288: 285-296.
- [10] 许泽华,马军,李百云,等.不同用量有机肥和生物菌肥配施对设施番茄土壤性能和品质的影响[J].中国瓜菜,2025,38(3):131-137.
- [11] 党洪阳,胡斌,冯宏亮,等.生物炭施用对冬小麦产量及土壤养分的影响[J].作物研究,2025,39(1):16-22.
- [12] SAIFULLAH, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320-335.
- [13] 朱青和,马壮,裘立,等.竹炭和竹炭包膜复合肥对毛竹林土壤磷有效性的影响及其微生物学机理[J].植物营养与肥料学报,2022,28(3):450-459.
- [14] 赵建诚,杨振亚,王波,等.鸡粪有机肥配施生物炭提高雷竹林土壤肥力和竹笋产量品质[J].植物营养与肥料学报,2025,31(3):458-469.
- [15] 姚奇,俞若涵,张洪宇,等.生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2022(3):68-74.
- [16] 梁丽丽,钟璐瑶,张辽,等.生物炭及其替代泥炭比例对樱桃萝卜生长的影响[J].中国瓜菜,2025,38(6):158-166.
- [17] 韩召强,陈效民,曲成闯,等.生物质炭施用对潮土理化性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):272-278.
- [18] 周武,王丽,蒋文昕,等.不同菌渣生物炭对土壤养分及生菜产量的影响[J].江苏农业科学,2025,53(7):247-254.
- [19] 马风兰,王志丹,刘威帆,等.生物炭对宁夏干旱地区土壤养分、酶活性及滴灌玉米产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(8):1-9.