

赵耀东,侯江涛. 减氮配施生物炭对花生—油菜轮作系统土壤肥力和花生产量与氮素利用的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(23):81-87.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.23.013

减氮配施生物炭对花生—油菜轮作系统土壤肥力和花生产量与氮素利用的影响

赵耀东¹, 侯江涛²

(1. 商丘职业技术学院,河南商丘 476000; 2. 商丘学院,河南商丘 476000)

摘要: 探明氮肥减量配施生物炭对花生—油菜轮作系统土壤肥力和花生生长发育的影响,为氮肥减量增效背景下生物炭的合理施入提供理论依据。2020—2022 年,以花生—油菜轮作系统为研究对象,设置不施肥(CK)、常规施肥(CF)、减氮 15% + 5.28 t/hm² 生物炭(RN₁₅B)、减氮 30% + 10.56 t/hm² 生物炭(RN₃₀B)、减氮 45% + 15.84 t/hm² 生物炭(RN₄₅B)、减氮 60% + 21.12 t/hm² 生物炭(RN₆₀B)6 个处理,研究不同减氮配施生物炭处理对土壤养分含量、酶活性及花生产量、品质和氮素利用效率的影响。结果表明,与 CK、CF 处理相比,不同减氮配施生物炭处理均可提高土壤养分含量、酶活性及花生产量、品质和氮素利用效率。其中,与 CF 处理相比,RN₄₅B 处理速效氮、有机质含量分别显著提高 10.23%、13.80%,RN₆₀B 处理速效磷、速效钾含量分别显著提高 11.20%、17.89%,pH 值均无显著差异;RN₄₅B 处理脲酶活性显著提高 12.04%,RN₆₀B 处理蔗糖酶、碱性磷酸酶活性分别显著提高 11.89%、16.28%,RN₃₀B 处理过氧化氢酶活性显著提高 7.64%;RN₄₅B 处理花生产量、百果质量、百仁质量、饱果率、出仁率分别显著提高 14.22%、17.33%、7.66%、6.89%、8.55%;RN₄₅B 处理花生含油率、油酸含量、亚油酸含量分别提高 3.99%、5.19%、3.90%,油酸含量显著提高,油亚比均无显著差异;RN₄₅B 处理氮素收获指数、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率分别显著提高 7.00%、14.21%、60.23%、11.43%。相关性分析表明,花生产量、品质及土壤养分含量与土壤酶活性变化密切相关。综上,适量减氮配施生物炭能够提高土壤肥力,促进花生生长发育,提升氮肥利用效率。

关键词: 施肥;生物炭;花生;土壤肥力;产量;品质;氮素利用效率

中图分类号: S565.206;S344.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2023)23-0081-07

化肥在保障我国粮食安全和农产品持续供给中伴有重要角色,据相关部门统计,截至 2020 年底,我国化肥使用量达 5 250.9 万 t,是世界上化肥使用最多的国家,且化肥利用率远低于发达国家,对我国自然环境保护和绿色食品发展带来了巨大挑战^[1-3]。花生是河南省重要油料与经济作物,种植面积和产量均居全国第 1 位^[4]。近年来,随着农业供给侧结构改革,花生产业迎来了新的发展机遇,而为提高花生产量和经济效益,大量使用化肥,尤其是氮肥^[5-6]。氮肥是花生生长必需的主要营养元素,在一定范围内,氮肥施用量的提高能够促进花生生长发育,提高花生产量^[7-8]。但过量施用氮肥不仅造成氮素损失,环境污染加重,还易造成土壤

结构失衡、肥力降低、土地生产力下降等问题,严重制约花生产业可持续发展^[9-11]。因此,如何改进施氮措施,提高花生氮素利用效率,成为了未来花生产业健康持续发展的重要方向^[12]。有研究表明,施氮时期、配施有机肥等措施是提升土壤肥力,促进作物生长发育及提高氮素利用效率的有效途径^[13-15]。袁光等的研究表明,减氮配施有机肥能够明显促进花生生长发育,增加地下部生物累积量,提高花生产量^[16]。杨莉莉等的研究表明,有机肥替代部分化肥能够显著提高氮肥偏生产力、土壤酶活性以及作物产量^[17]。刘中良等的研究表明,合理氮肥与有机肥比例能够提高土壤养分含量、酶活性,降低作物硝酸盐含量^[18]。由此可见,氮肥减量与有机肥配施能够对土壤肥力、作物成长发育及氮肥利用效率等产生不同的影响。

生物炭是由农作物秸秆等有机物在无氧或缺氧环境下高温裂解生成的 pH 值高、碳稳定性与吸附力强的富碳物质,近年来,生物炭作为一种良好

收稿日期:2023-03-23

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:182102110311)。

作者简介:赵耀东(1985—),男,河南商丘人,硕士,讲师,主要从事农业技术服务与推广模式研究。E-mail:sqzyzyd@163.com。

的土壤调理剂应用于各种农田^[19-20]。有研究表明,生物炭施入土壤中能够提高降低土壤容重,提高土壤肥力,改善土壤通风透气状况,有利于提升氮肥利用效率,促进作物生长发育^[21-22]。因此,在氮肥减量增效的背景下,如何利用生物炭提高土壤肥力,提升氮肥利用率及花生氮素吸收等研究备受关注。近年来,氮肥减量配施生物炭对作物生长发育及土壤肥力的研究报道有很多^[22-23]。关于氮肥减量配施生物炭对花生的研究也有部分报道,但主要集中在花生氮素吸收与利用及产量等方面^[24-25]。关于探讨氮肥减量配施不同比例生物炭对花生—油菜轮作田土壤养分、酶活性、花生产量、品质和氮素利用率的影响以及它们之间的关联性变化,但目前缺乏系统性研究。为此,本研究通过田间定位试验,研究不同氮肥减量与生物炭配施比例条件下花生—油菜轮作田土壤养分、酶活性、花生产量、品质及氮素利用率的变化特点,探讨它们间的关联性。找到适宜的配施比例,为氮肥减量增效背景下生物炭的合理施入提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2020 年 10 月至 2022 年 10 月,在河南省商丘市睢阳区包公庙镇朱楼村(115°52'E, 35°84'N)进行,试验点属暖温带大陆季风性气候,冬冷夏热,四季分明。年均气温一般为 13.5~14.5℃,年降水量一般为 650~800 mm,年均日照时长约 2 200 h。供试土壤为黄潮土,土壤质地为中壤。试验前土壤理化性质:碱解氮含量 48.16 mg/kg,速效磷含量 54.29 mg/kg,速效钾含量 112.82 mg/kg,有机质含量 10.60 g/kg,pH 值为 8.07。

1.2 供试材料

供试花生:冀花 4 号,由河北省农林科学院粮油作物研究所培育;供试油菜:中双 9 号,由中国农业科学院油料作物研究所培育;供试化肥:纯氮、过磷酸钙(P_2O_5 16%)、硫酸钾(K_2O 50%);供试生物炭:以油菜秸秆为原材料,在 500℃厌氧高温条件下烧制 2 h 而成,其养分含量为:N 4.26 g/kg、 P_2O_5 3.82 g/kg、 K_2O 6.48 g/kg。

1.3 试验设计

试验按照等量施氮原则,设 6 个处理,分别为不施肥(CK)、常规施肥(CF)、减氮 15% + 5.28 t/hm² 生物炭(RN₁₅B)、减氮 30% + 10.56 t/hm² 生物炭

(RN₃₀B)、减氮 45% + 15.84 t/hm² 生物炭(RN₄₅B)、减氮 60% + 21.12 t/hm² 生物炭(RN₆₀B)。其中,常规施肥处理化肥用量:纯氮 150 kg/hm²、过磷酸钙 600 kg/hm²、硫酸钾 150 kg/hm²。每个处理 3 次重复,随机区组排列。小区面积 42 m²,走道 1 m,保护行 3 m。花生生育期为 6 月 15 日至 10 月 8 日,种植密度约为 15 万穴/hm²,行间距为 60 cm。油菜生育期为 11 月 1 日至次年 6 月 1 日,直播,种植密度约为 2.2 万株/hm²。试验中花生季进行减氮施肥处理,70% 氮肥作为基肥施入,30% 氮肥在花生结荚期进行追肥,磷肥与钾肥均为基肥。花生季不进行特殊处理,按照当地常规种植。

1.4 样品采集

土壤样品采集:于 2022 年 9 月 30 日花生收获前 1 周采集土壤样品。利用专业螺旋土钻及 5 点取样法采集 0~20 cm 土样,带回实验室后拣出杂物,自然风干,待用于土壤养分含量和土壤酶活性的测定。

植株样品采集:于 2022 年 9 月 30 日花生收获前 1 周采集花生茎叶、果壳和果仁,用于花生氮素吸收的测定。在花生收获时,测定小区内花生产量,并在每个小区内采集连续 10 株花生用于花生品质和百果质量、百仁质量、饱果率、出仁率和地上部生物量的测定。

1.5 测定项目与方法

土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量和 pH 值的测定分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠法、火焰光度法、重铬酸钾加热法、水土比法^[26]。土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性的测定分别采用苯酚钠-次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、高锰酸钾滴定法、磷酸苯二钠比色法^[27]。花生含油率、油酸含量、亚油酸含量均利用近红外分析仪(Bruck Optics)进行测定。其中,油亚比=油酸含量/亚油酸含量。花生根、茎、叶、荚果含氮量均采用凯氏定氮法^[26]。氮肥利用率计算公式如下:

氮素收获指数 = 荚果氮素累积量/植株氮素累积量 × 100%;

氮肥偏生产力(kg/kg) = 施氮区荚果产量/施氮量;

氮肥农学效率(kg/kg) = (施氮区荚果产量 - 对照区荚果产量)/施氮量;

氮肥利用率 = (施氮区植株吸氮量 - 对照区植株吸氮量)/施氮量 × 100%。

1.6 数据分析

利用 Excel 2018 进行数据处理、计算与图表制作,利用 DPS 19.05 进行数据差异显著分析与相关性分析,利用 CANOCO 5.0 进行冗余(RDA)分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥减量配施生物炭对土壤养分含量和 pH 值的影响

由表 1 可知,不同减氮配施生物炭处理土壤养分含量和 pH 值存在明显差异。与 CK 相比,不同施肥处理均可显著提高土壤速效氮、速效磷、速效钾和有机质含量,pH 值也均不同程度地提高,但无显

著差异。而与 CF 处理相比,不同减氮配施生物炭处理均可不同程度地提高土壤速效养分、有机质含量及土壤 pH 值。其中,RN₄₅B 处理速效氮、有机质含量最高,较 CF 处理分别显著提高 10.23%、13.80%;其次是 RN₃₀B 处理速效氮和 RN₆₀B 处理有机质含量,显著高于 CF 处理,而与 RN₄₅B 处理相比均无显著差异。RN₆₀B 处理速效磷、速效钾含量均最高,较 CF 处理分别显著提高 11.20%、17.89%;其次是 RN₄₅B 处理速效磷、速效钾含量,显著高于 CF 处理,而与 RN₆₀B 处理相比均无显著差异。不同施肥处理土壤 pH 值均无显著变化。

表 1 减氮配施生物炭对土壤养分含量和 pH 值的影响

处理	速效氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)	pH 值
CK	38.52 ± 2.35d	50.27 ± 3.14d	93.65 ± 4.85e	8.85 ± 0.55e	8.05 ± 0.02a
CF	42.61 ± 2.69c	56.85 ± 3.92c	118.64 ± 8.16d	9.49 ± 0.41d	8.07 ± 0.01a
RN ₁₅ B	44.16 ± 3.32bc	58.42 ± 2.84bc	125.92 ± 5.63c	9.89 ± 0.69cd	8.09 ± 0.01a
RN ₃₀ B	45.86 ± 2.19ab	59.91 ± 2.33b	129.89 ± 7.88bc	10.26 ± 0.38bc	8.10 ± 0.02a
RN ₄₅ B	46.97 ± 2.53a	61.07 ± 3.08ab	136.21 ± 8.02ab	10.80 ± 0.48a	8.12 ± 0.02a
RN ₆₀ B	45.24 ± 2.80ab	63.22 ± 3.84a	139.86 ± 5.26a	10.42 ± 0.61ab	8.15 ± 0.01a

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 氮肥减量配施生物炭对土壤酶活性的影响

由表 2 可知,不同减氮配施生物炭处理土壤酶活性存在显著差异。与 CK 相比,不同施肥处理土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性均显著提高。而与 CF 处理相比,不同减氮配施生物炭处理能够不同程度地提高土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性。其中,RN₄₅B 处理脲酶活性最高,较 CF 处理显著提高 12.04%;其次是 RN₃₀B 处理脲酶活性,显著高于 CF 处理,而与 RN₄₅B 处理

相比无显著差异。RN₆₀B 处理蔗糖酶、碱性磷酸酶活性最高,较 CF 处理分别显著提高 11.89%、16.28%;其次是 RN₄₅B 处理蔗糖酶、碱性磷酸酶活性,显著高于 CF 处理,而与 RN₆₀B 处理相比均无显著差异。RN₃₀B 处理过氧化氢酶活性最高,较 CF 处理显著提高 7.64%;其次是 RN₄₅B 处理过氧化氢酶活性,显著高于 CF 处理,而与其他施肥处理相比均无显著差异。

表 2 减氮配施生物炭对土壤酶活性的影响

处理	脲酶活性 [mg/(g·d)]	蔗糖酶活性 [mg/(g·d)]	过氧化氢酶活性 [mL/(g·d)]	碱性磷酸酶活性 [mg/(g·d)]
CK	0.95 ± 0.08d	22.48 ± 1.23d	1.49 ± 0.07c	1.22 ± 0.05d
CF	1.08 ± 0.06c	24.05 ± 1.52c	1.57 ± 0.10b	1.29 ± 0.08c
RN ₁₅ B	1.12 ± 0.08bc	25.12 ± 1.83bc	1.62 ± 0.11ab	1.36 ± 0.06b
RN ₃₀ B	1.17 ± 0.10ab	25.84 ± 1.50ab	1.69 ± 0.08a	1.44 ± 0.05a
RN ₄₅ B	1.21 ± 0.08a	26.57 ± 1.46a	1.68 ± 0.08a	1.48 ± 0.06a
RN ₆₀ B	1.15 ± 0.05b	26.91 ± 1.82a	1.62 ± 0.09ab	1.50 ± 0.11a

2.3 氮肥减量配施生物炭对花生产量及构成因素的影响

由表 3 可知,不同减氮配施生物炭处理花生生产

量及构成因素存在显著差异。与 CK 相比,不同施肥处理花生产量、百果质量、百仁质量、饱果率、出仁率均不同程度提高。其中,不同减氮配施生物炭

处理均显著提高。而与 CF 处理相比,不同减氮配施生物炭处理花生产量、百果质量、百仁质量、饱果率、出仁率也均不同程度提高。其中,RN₄₅B 处理花生产量、百果质量、百仁质量、饱果率、出仁率均最高,较 CF 处理分别显著提高 14. 22%、17. 33%、

7. 66%、6. 89%、8. 55%;其次是 RN₃₀B 处理花生产量、百果质量、百仁质量、饱果率、出仁率。其中,与 CF 处理相比,RN₃₀B 处理花生产量、百果质量、百仁质量显著提高,而与 RN₄₅B 处理相比,RN₃₀B 处理除花生产量显著降低外,其他指标均无显著性差异。

表 3 减氮配施生物炭对花生产量及构成因素的影响

处理	产量 (kg/hm ²)	百果质量 (g)	百仁质量 (g)	饱果率 (%)	出仁率 (%)
CK	3 275. 6 ± 184. 2d	182. 75 ± 12. 23e	75. 21 ± 4. 19d	78. 84 ± 5. 11e	73. 62 ± 4. 26e
CF	4 285. 2 ± 137. 8c	198. 30 ± 15. 67d	78. 36 ± 6. 22cd	81. 66 ± 4. 69bc	76. 29 ± 4. 97bc
RN ₁₅ B	4 342. 9 ± 211. 9bc	209. 62 ± 15. 90cd	80. 03 ± 5. 96bc	82. 92 ± 5. 67b	77. 90 ± 6. 17b
RN ₃₀ B	4 526. 8 ± 267. 8b	224. 26 ± 9. 86ab	83. 75 ± 6. 70ab	85. 02 ± 5. 96ab	79. 27 ± 5. 49ab
RN ₄₅ B	4 894. 4 ± 210. 2a	232. 67 ± 11. 39a	84. 36 ± 5. 85a	87. 29 ± 6. 22a	82. 81 ± 4. 82a
RN ₆₀ B	4 422. 1 ± 195. 1bc	216. 20 ± 16. 53bc	82. 82 ± 6. 33ab	84. 86 ± 7. 08ab	78. 54 ± 7. 24b

2.4 氮肥减量配施生物炭对花生品质的影响

由表 4 可知,不同减氮配施生物炭处理花生各品质含量存在明显差异。与 CK 相比,不同施肥处理花生含油率、油酸含量、亚油酸含量及油亚比均不同程度地提高。其中,油亚比均无显著差异。与 CF 处理相比,不同减氮配施生物炭处理花生含油率、油酸含量、亚油酸含量均不同程度提高。其中,

RN₄₅B 处理花生含油率、油酸含量、亚油酸含量较 CF 处理分别提高 3. 99%、5. 19%、3. 90%,油酸含量显著提高,而含油率、亚油酸含量均无显著性差异;其次是 RN₃₀B 处理花生含油率、油酸含量、亚油酸含量,与 CF、RN₄₅B 处理相比无显著差异。不同施肥处理花生油亚比均无显著性变化。

表 4 减氮配施生物炭对花生品质的影响

处理	含油率(%)	油酸含量(%)	亚油酸含量(%)	油亚比
CK	50. 20 ± 2. 12b	48. 24 ± 2. 97c	28. 86 ± 2. 12b	1. 67 ± 0. 10a
CF	51. 62 ± 4. 85ab	49. 92 ± 3. 40bc	29. 52 ± 2. 61ab	1. 69 ± 0. 13a
RN ₁₅ B	51. 95 ± 2. 69ab	51. 06 ± 2. 55ab	29. 64 ± 1. 53ab	1. 72 ± 0. 08a
RN ₃₀ B	52. 41 ± 3. 84ab	51. 75 ± 2. 86ab	29. 85 ± 1. 90ab	1. 73 ± 0. 15a
RN ₄₅ B	53. 68 ± 1. 11a	52. 51 ± 2. 49a	30. 67 ± 1. 24a	1. 71 ± 0. 11a
RN ₆₀ B	52. 04 ± 2. 92ab	51. 32 ± 3. 62ab	29. 71 ± 2. 01ab	1. 73 ± 0. 13a

2.5 氮肥减量配施生物炭对花生氮素吸收的影响

由表 5 可知,不同减氮配施生物炭处理花生各部位对氮素的吸收存在较大差异。与 CK 相比,不同施肥处理根、茎、叶以及荚果含氮量均不同程度地提高。而与 CF 处理相比,不同减氮配施生物炭处理根、茎、叶以及荚果含氮量均不同程度地提高。其中,RN₄₅B 处理根、荚果含氮量较 CF 处理分别提高 5. 23%、3. 77%,根含氮量显著提高,而荚果含氮量无显著差异;其次是 RN₃₀B 处理根含氮量和 RN₆₀B 处理荚果含氮量,与 CF、RN₄₅B 处理相比无显著差异。RN₆₀B 处理茎氮量最高,较 CF 处理显著提高 11. 49%;其次是 RN₄₅B 处理,显著高于 CF、RN₁₅B 处理,而与 RN₆₀B 处理相比无显著差异。

RN₃₀B 处理叶含氮量最高,较 CF 处理显著提高 6. 74%,其他处理间均无显著差异。

2.6 氮肥减量配施生物炭对花生氮素利用效率的影响

由表 6 可知,不同减氮配施生物炭处理对花生氮素利用效率产生较大的差异。与 CK 相比,不同施肥处理氮素收获指数显著提高 7. 50% ~ 15. 03%。与 CF 处理相比,不同减氮配施生物炭处理均可提高氮素收获指数、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率。其中,RN₄₅B 处理氮素收获指数、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率均最高,较 CF 处理分别显著提高 7. 00%、14. 21%、60. 33%、11. 43%,氮肥偏生产力、氮肥农学效率显

表 5 减氮配施生物炭对花生氮素吸收的影响

处理	含氮量(mg/g)			
	根	茎	叶	荚果
CK	8.64 ± 0.62c	5.39 ± 0.42d	15.36 ± 0.78c	25.81 ± 1.35b
CF	8.99 ± 0.49bc	5.92 ± 0.38c	16.17 ± 0.92b	26.23 ± 1.66ab
RN ₁₅ B	9.12 ± 0.61ab	6.24 ± 0.49bc	16.48 ± 1.05ab	26.47 ± 1.69ab
RN ₃₀ B	9.24 ± 0.50ab	6.46 ± 0.41ab	17.26 ± 0.84a	26.80 ± 2.08ab
RN ₄₅ B	9.46 ± 0.71a	6.55 ± 0.33a	16.82 ± 0.93ab	27.22 ± 1.21a
RN ₆₀ B	9.23 ± 0.62ab	6.60 ± 0.29a	16.95 ± 0.79ab	26.82 ± 1.77ab

著高于其他减氮配施生物炭处理,而氮素收获指数、氮肥利用率与其他处理相比均无显著差异;其次是 RN₆₀B 处理氮素收获指数、氮肥利用率,显著高于 CF 处理,而与 RN₄₅B 处理相比均无显著差异。氮素收获指数、氮肥利用率整体表现均为 RN₄₅B >

RN₆₀B > RN₃₀B > RN₁₅B > CF;其次是 RN₃₀B 处理氮肥偏生产力、氮肥农学效率,均显著高于 CF 处理,显著低于 RN₄₅B 处理。氮肥偏生产力、氮肥农学效率整体表现为 RN₄₅B > RN₃₀B > RN₆₀B > RN₁₅B > CF。

表 6 减氮配施生物炭对花生氮素利用效率的影响

处理	氮素收获指数 (%)	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥农学效率 (kg/kg)	氮肥利用率 (%)
CK	32.54 ± 2.92c			
CF	34.98 ± 2.05b	28.57 ± 2.09c	6.73 ± 0.45e	16.89 ± 1.14b
RN ₁₅ B	35.22 ± 1.86a	28.95 ± 2.33bc	7.12 ± 0.62d	17.65 ± 1.06ab
RN ₃₀ B	35.84 ± 1.43a	30.18 ± 2.18b	8.34 ± 0.51b	18.04 ± 0.99a
RN ₄₅ B	37.43 ± 1.60a	32.63 ± 1.93a	10.79 ± 0.65a	18.82 ± 1.54a
RN ₆₀ B	36.09 ± 2.02a	29.48 ± 2.12bc	7.64 ± 0.44c	18.26 ± 1.22a

2.7 各指标间的相关性分析

通过花生产量及品质与土壤酶活性相关性分析结果可知,产量与土壤脲酶、过氧化氢酶活性呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶活性呈显著正相关($P < 0.05$);饱果率与土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性呈显著正相关($P < 0.05$);荚果出仁率与土壤蔗糖酶活性呈显著正相关($P < 0.05$);花生含油率与土壤过氧化氢酶活性呈显著正相关($P < 0.05$);油亚比与土壤脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性呈显著正相关($P < 0.05$);其他指标间也均呈正相关关系(表 7)。为进一步分析土壤酶活性变化与土壤养分含量及 pH 值间的相关性,利用土壤酶活性与养分含量进行冗余(RDA)分析,结果见图 1。由图 1 可知,土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性与土壤速效氮含量、速效磷含量、速效钾含量、有机质含量和 pH 值均呈正相关关系,其中,pH 值对土壤酶活性的影响明显低于其他养分因子。而表征不同处理点的各种符号空间分布较为分散,表明不同减氮配施

生物炭处理对土壤酶活性变化产生的影响不同。由此可见,土壤生物学活性的提高不仅有利提高保障土壤养分供应,还能够提高作物对养分的吸收与利用。

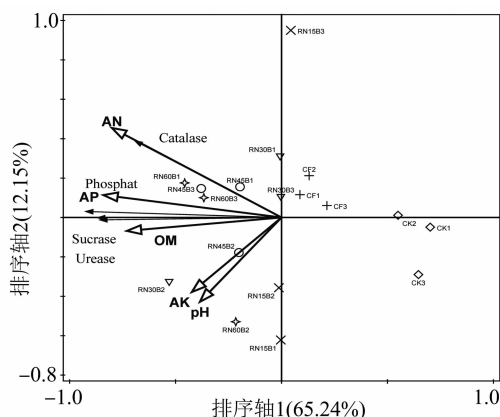
表 7 花生产量及品质与土壤酶活性的相关性分析

项目	相关系数				
	产量	饱果率	出仁率	含油率	油亚比
脲酶活性	0.94 **	0.89 *	0.69	0.59	0.83 *
蔗糖酶活性	0.88 *	0.82 *	0.82 *	0.65	0.69
过氧化氢酶活性	0.92 **	0.78 *	0.72	0.85 *	0.84 *
碱性磷酸酶活性	0.83 *	0.81 *	0.68	0.72	0.77 *

注: *、** 分别表示显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$)相关。

3 讨论

土壤养分是农作物根系获取养分的直接来源,其含量直接影响作物养分吸收及生长发育^[28]。土壤酶是土壤中具有生物催化能力的特殊蛋白质类化合物总称,能够催化土壤中大多数生化反应过程,主要来源于动植物残体、微生物代谢产物等,是表征土壤生物学特性和土壤肥力的重要指标^[29-30]。



图中 AN、AP、AK、OM、pH 分别指土壤速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量及 pH 值；
Urease、Sucrase、Catalase、Phosphat 分别指土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性

图1 土壤酶活性变化与土壤养分含量变化的冗余分析结果

有研究表明,配施生物炭能够改善土壤特性,提高养分含量和生物学活性^[20]。本研究结果表明,减氮配施生物炭有利于提高土壤养分含量、pH 值及土壤酶活性。这与李玥等的研究^[31]较为一致。pH 值的提高是因为生物炭表面富含丰富的有机官能,能够吸附土壤中的 H^+ ,进而提高土壤 pH 值。土壤养分含量及酶活性的提高可能是多方面影响,一是施入的生物炭含有大量的氮磷钾及有机质,腐烂分解后能够通过增加土壤酶数量提高酶活性;二是生物炭养分释放速率较慢,能够有效降低肥效损失;三是生物炭表面含有丰富的多孔结构,施入土壤后能够有效改善土壤通风透气状况,提高微生物代谢活性,进而提高生物学活性以及养分分解与转化效率^[32-34]。

氮素收获指数、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率是表征氮肥利用效率的定量指标,能够从侧面反映作物对氮肥的利用状况^[12]。本研究结果表明,与单施化肥相比,不同减氮配施生物炭处理均能够提高氮素收获指数、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率。其中,在施氮量相同的情况下, RN₄₅B 处理氮素利用效率表现突出。经分析,发现生物炭的大量施入在改善土壤透气状况、提高生物学活性及养分分解与转化效率的前提下,有可能是生物炭能够吸附土壤中不易被利用的无机氮,减少氮素损失,提高氮素利用效率。而 RN₄₅B 处理氮素收获指数、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥利用率明显高于 RN₆₀B 处理,这可能是生物炭养分释放速效较慢,无机氮肥减量过多土壤中氮素不能满足花生需求所致,也可能是大量生物炭带入的磷钾元素致使土壤磷钾含量过多,对根系吸收起到负

面影响,进而影响到氮素利用。

本研究结果表明,与对照不施肥或单施化肥相比,氮肥减量配施生物炭能够明显提高花生产量及品质。其中, RN₄₅B 处理表现明显优于其他减氮配施生物炭处理。分析认为,生物炭的施入在提高土壤肥力和生物学活性的同时,能够带入大量的磷钾元素供花生吸收利用,能够提高花生的磷、钾吸收量与利用效率,进而促进炭花生生长发育,提高花生的产量及品质^[35]。但生物炭并不是替代氮肥越多越好,虽然生物炭对土壤肥力具有明显的促进作用,而生物炭养分释放速率明显低于无机肥,无机氮减量过多,生物炭释放的速率不能满足作物生长需要,且磷、钾饱和或过多,同样不利于花生根系对养分的吸收与利用,所以表现出 RN₆₀B 处理产量、品质均弱于 RN₄₅B 处理^[36]。

在花生产量、品质及土壤养分与土壤酶活性的相关性分析中表明,土壤生物学活性的变化与土壤养分供应及作物对养分的吸收与利用密切相关。综合来看,氮肥减量配施生物炭对土壤肥力、花生产量、品质及氮素利用效率的提高有明显的促进作用,但生物炭替代氮肥比例产生的影响并不是越多越好。本研究关于氮肥减量配施生物炭对花生产量及品质方面的结论并不严谨,未能清晰配施生物炭带入的磷钾元素对花生生长发育的影响,需要进一步考虑氮肥减量与生物炭配施时磷钾元素的摄入,提高磷钾肥利用效率,避免磷钾肥资源的浪费。

4 结论

与对照不施肥或单施化肥处理相比,不同减氮配施生物炭处理能够提高土壤养分含量和酶活性,

提升氮素利用效率,促进花生生长发育,进而提升花生产量及品质。在一定减氮范围内,随着生物炭比例的增加,土壤肥力、花生产量、品质及氮素利用效率逐渐提高。综合土壤肥力、花生生长发育及氮素利用效率分析可知,减氮 45% + 15.84 t/hm² 生物炭处理表现优于其他处理。

参考文献:

- [1] 魏启文,曾娟,秦萌,等. 新时期我国化肥农药减量增效与农产品质量安全提升的探讨[J]. 农产品质量与安全,2023(1): 6-9,14.
- [2] 周卫,丁文成. 新阶段化肥减量增效战略研究[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(1):1-7.
- [3] 张哲晰,康婷,穆月英,等. 要素替代视角下的化肥减量机制及驱动因素:来自设施蔬菜优势产区的微观实证[J]. 中国农业大学学报,2022,27(5):267-279.
- [4] 陈雷,张枫叶,吴继华,等. 施硅对连作花生生长发育和产量的影响[J]. 花生学报,2022,51(3):28-33.
- [5] 纪耀坤,郭振升,田伟,等. 不同用量缓释肥对麦茬花生生长发育及养分利用的影响[J]. 东北农业科学,2022,47(3):94-98.
- [6] 刘钦普. 中国化肥面源污染环境风险时空变化[J]. 农业环境科学学报,2017,36(7):1247-1253.
- [7] 张维乐,戴志刚,任涛,等. 不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(7):1254-1266.
- [8] 杨吉顺,李尚霞,张智猛,等. 施氮对不同花生品种光合特性及干物质积累的影响[J]. 核农学报,2014,28(1):154-160.
- [9] 阮泽斌,王兰鸽,蓝王凯宁,等. 氮肥减量配施生物炭对水稻氮素吸收和土壤理化性质的影响[J]. 浙江农业学报,2023,35(2): 394-402.
- [10] 罗静静,王贺亚. 减量施氮及氮肥运筹对春小麦群体结构和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(23):62-67.
- [11] 胡中泽,衣政伟,杨大柳,等. 氮肥减施与花生秸秆还田对麦田土壤氮挥发、氮肥利用率及产量的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(6):1492-1499.
- [12] 姚瑞,赵凯能,谢畅,等. 氮肥后移对花生氮代谢相关酶活性、氮素利用效率及产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2022,44(4):877-883.
- [13] 李太魁,寇长林,郭战玲,等. 有机氮替代部分无机氮对砂姜黑土冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学,2021, 49(5):97-101.
- [14] 潘亚杰,朱晓辉,常会庆,等. 秸秆有机肥替代化学氮肥对菠菜生长和氮利用率的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(3): 650-656.
- [15] 侯云鹏,杨建,尹彩侠,等. 氮肥后移对春玉米产量、氮素吸收利用及土壤氮素供应的影响[J]. 玉米科学,2019,27(2): 146-154.
- [16] 袁光,张冠初,丁红,等. 减施氮肥对旱地花生农艺性状及产量的影响[J]. 花生学报,2019,48(3):30-35.
- [17] 杨莉莉,王永合,韩稳社,等. 氮肥减量配施有机肥对苹果产量

- 品质及土壤生物学特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2021, 40(3):631-639.
- [18] 刘中良,高俊杰,陈震,等. 氮肥减量配施有机肥对大白菜产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40 (11):1138-1144.
 - [19] 吴强建,胡梦蝶,侯松峰,等. 减氮配施生物炭基肥对蜜柚土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 河南农业大学学报,2022,56 (5):732-741.
 - [20] 张继宁,周胜,李广南,等. 秸秆生物炭对水稻生长及滩涂土壤化学性质的影响[J]. 农业资源与环境学报,2018,35(6): 492-499.
 - [21] 彭红宇,刘红恩,王秋红,等. 低温生物炭和化肥配施对冬小麦生长和土壤铅镉生物有效性的影响[J]. 江苏农业科学,2023, 51(4):212-219.
 - [22] 段建军,郭琴波,徐彬,等. 氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(6):298-308.
 - [23] 李海珀,水清明,贾莉. 氮肥减量配施生物炭对玉米根系生理及氮素去向的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(21):102-109.
 - [24] 崔文芳,陈静,鲁富宽,等. 生物炭与氮肥减量调控对土壤养分和肥力的影响[J]. 西南农业学报,2021,34(11):2429-2436.
 - [25] 索炎炎,张翔,司贤宗,等. 施用石灰与生物炭对酸性土壤花生氮素吸收及产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2023,45 (1):148-154.
 - [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:224-406.
 - [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986: 274-339.
 - [28] 沈仁芳,赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. 生态学报,2015,35(20):6584-6591.
 - [29] 张涵苒,张敏,王静,等. 不同菌渣配施化肥对土壤肥力和酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(6):364-370.
 - [30] 曹瑞,吴福忠,杨万勤,等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1257-1264.
 - [31] 李玥,韩萌,杨劲峰,等. 炭基肥配施有机肥对风沙土养分含量及酶活性的影响[J]. 花生学报,2020,49(2):1-7,15.
 - [32] 陈坤,徐晓楠,彭靖,等. 生物炭及炭基肥对土壤微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(10):1920-1930.
 - [33] 魏春辉,任奕林,刘峰,等. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展[J]. 河南农业科学,2016,45(3):14-19.
 - [34] 郭书亚,尚赏,王坤,等. 施用生物炭5年后对夏玉米田土壤理化性质及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(15): 74-78.
 - [35] 石吕,薛亚光,韩笑,等. 不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻产量、品质和土壤理化性状的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(23):222-228.
 - [36] 于衷浦,杨浩鹏,纪利成,等. 化肥减量配施生物炭基肥对玉米产量及土壤温室气体排放特征的影响[J]. 河南农业大学学报,2022,56(5):742-749.