

DOI:10.11918/202201036

基于化学计量学分析生物炭-N配施的联合效应

王立¹, 鞠畅¹, 陈荣健², 油勇强¹

(1. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2. 伊春鹿鸣矿业有限公司, 黑龙江 铁力 152500)

摘要:为探讨新型土壤调理剂——生物炭及氮肥配施对土壤养分调理的影响,采用培养实验结合化学计量方法分析玉米秸秆生物炭(SBC)、鸡粪生物炭(MBC)和氮肥(尿素)配施的添加效应。结果表明:生物炭能够提高土壤养分质量分数,但其调理效果具有剂量依赖性和种类异质性。随着生物炭用量的提高,土壤养分质量分数呈上升趋势。SBC处理使土壤有机碳(SOC)和全磷(TP)质量分数最高提升101.754%和34.592%。MBC处理使土壤SOC和TP质量分数最高提升了23.684%和84.396%。SBC通过诱导土壤SOC质量分数的提高进而提高土壤碳氮质量比(C/N)和碳磷质量比(C/P)。而MBC处理则通过磷剂量稀释效应降低了土壤C/P和氮磷质量比(N/P)。生物炭和氮肥之间不是单一的叠加效应,实际应用过程中应充分考虑氮肥与生物炭的交互效应。

关键词:生物炭;土壤调理剂;土壤养分平衡;化学计量;剂量依赖性;种类异质性

中图分类号: X71 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2023)02-0019-08

Stoichiometric analysis of combined effect of biochar and nitrogen application

WANG Li¹, JU Chang¹, CHEN Rongjian², YOU Yongqiang¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China; 2. Yichun Luming Mining Co., Ltd., Tieli 152500, Heilongjiang, China)

Abstract: The effects of combined application of biochar (a new type of soil conditioner) and nitrogen fertilizers on soil nutrient conditioning were investigated. The incubation experiment based on stoichiometric method was carried out to analyze the additive effects of the combined application of corn straw biochar (SBC), chicken manure biochar (MBC), and nitrogen fertilizer (urea). Results show that biochar improved the contents of soil nutrients, but its conditioning effect was dose-dependent and heterogeneous among species. The nutrient content of the soil increased in parallel with the dosage of biochar. Treatment with SBC increased the contents of soil organic carbon (SOC) and total phosphorous (TP) by 101.754% and 34.592% respectively, while treatment with MBC increased the contents of SOC and TP by 23.684% and 84.396% respectively. SBC increased C/N (ratio of SOC to total nitrogen (TN)) and C/P (ratio of SOC to TP) by promoting SOC, while the MBC treatment decreased C/P and N/P (ratio of TN to TP) by the dose-diluting effect of phosphorus. There was not a single additive effect between the biochar and nitrogen fertilizer, and the interactive effect of nitrogen fertilizer and biochar should be fully considered in actual application.

Keywords: biochar; soil conditioner; soil nutrient balance; stoichiometry; dose-dependence; species heterogeneity

生物炭是经生物质热裂解后制成的,除C、H、O、N等作为其基本骨架结构外,还含有P、K、Na、Ca等丰富的矿质元素^[1-2]。由于其自身较大的比表面积和丰富的孔隙结构,生物炭能高效吸附土壤中的营养元素,减少土壤养分流失,影响土壤C、N、P循环并提高土壤养分的有效性^[3-5]。同时,生物炭因其营养性和稳定性已成为一种新型肥料,有望在土

壤营养调理方面发挥重要功能。但与固定配方的传统化学肥料不同,生物炭是一种综合营养补充剂,其元素组成受原材料影响显著,不同炭源生物炭产品的元素组成成分波动巨大。已有研究表明,草本植物和木本植物的纤维素、半纤维素、木质素含量较高,制备出的植物源生物炭具有更高的碳质量分数和碳氮质量比^[6-7];而畜禽粪便由于含有较多的

收稿日期: 2022-01-09; 录用日期: 2022-03-28; 网络首发日期: 2022-05-17

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220516.1840.002.html>

基金项目: 生物质能源开发利用国家地方联合工程研究中心项目(2021C001); 黑龙江省应用技术与开发计划(GA20C014)

作者简介: 王立(1978—),女,教授,博士生导师

通信作者: 王立, wanglihit@hotmail.com; wli@hit.edu.cn

N、P 等矿质元素^[8],制备出的生物炭碳氮质量比相对较低。要想契合植物生长需求,生物炭新型肥料的使用需要首先对其营养元素进行化学计量解析,再根据其营养特征进行目标调配,补充必要元素肥料,进而达到最佳的田间使用效果。

生态化学计量学是研究生态系统能量和多种化学元素间动态平衡的科学^[9]。化学计量比可以反映土壤有机质组成、土壤质量、土壤养分供应能力以及 C、N、P 等养分的矿化状态^[10-11]。基于利比希最小因子定律可知,元素比例失调使得部分元素盈余浪费,但此时植物生长仍然受到抑制,所以,对于土壤元素比例调控的意义重大^[12]。研究土壤 C、N、P 元素质量分数及其化学计量比可以深入揭示土壤养分特征与限制性因子的相互关系^[13]。近年来,土壤生态化学计量方面的研究也逐渐受到国内学者的重视。

农田生态系统因其特殊的功能需求,对土壤中 C、N、P 元素的生物地球化学循环和土壤生态化学计量关系依赖性尤为显著^[14-15]。本研究拟通过对不同炭源生物炭材料进行化学计量分析,根据其营养缺口补充氮肥,系统分析不同营养添加剂之间复杂的交互效应及其对土壤条件的影响,为生物炭田间科学使用方法与效应提供理论依据和科学指导。

1 实验

1.1 实验材料

本实验于 2020 年 7—9 月份在城市水资源与水环境国家重点实验室内进行,实验用土为基本农田土壤。生物炭制备原料为废弃生物质,分别为玉米秸秆和鸡粪。将玉米秸秆和鸡粪置于通风干燥处自然风干,随后在烘箱中烘至恒重,粉碎后过 1 mm 筛备用。分别将粉碎过筛后的玉米秸秆和鸡粪粉末在真空气氛箱式电阻炉内于 300 °C 进行限氧热裂解,制备成玉米秸秆生物炭(SBC)和鸡粪生物炭(MBC)进行后续实验。

1.2 实验设计

实验采用两个双因素组合设计(SBC 和 N、MBC 和 N),共 15 个处理。其中 SBC 和 MBC 投加质量分数分别为 0、1% 和 2%,记为 BC₀、SBC₁、SBC₂ 和 MBC₁、MBC₂;尿素投加量分别为 0、0.2 和 0.4 g/kg,记为 N₀、N₁ 和 N₂。称取 2.5 kg 土壤于培养器中(高度 17 cm,上直径 16 cm,底部直径 12.5 cm),将生物炭

和尿素按各处理设计投加量施入其中,混合均匀。培养期内每天用称重补水法使土壤含水量保持在田间持水量的 70%。土壤培养 70 d 后取样,土壤样品在室温下风干,粉碎后过筛进行土壤理化性质测试,每个处理包括 3 个平行。

1.3 测定方法

全磷(TP)采用王水-HClO₄消解,之后采用电感耦合等离子体发射光谱(Optima 8300,美国 Perkin Elmer)测定^[16];全氮(TN)采用元素分析仪(VarioEL III,德国 Elementar)测定;有机碳(SOC)、碱解氮(AN)和有效磷(AP)分别采用重铬酸钾外加加热法、碱解扩散法和 0.5 mol/L NaHCO₃ 比色法进行测定^[17]。

1.4 统计分析

使用 SPSS 23.0 软件进行统计分析,其中,使用双因素方差分析检验不同种类生物炭和氮肥投加对土壤养分和化学计量特征的影响,使用单因素方差分析的 Duncan 检验分析不同处理 PC1 和 PC2 得分间的差异性;使用 CANOCO5.0 统计软件进行主成分分析(PCA);作图采用 Origin 2017 软件。

2 结果与讨论

2.1 不同材料元素特征分析

由于土壤是营养元素的输入端,很大程度决定植物对养分的吸收能力^[18]。土壤碳、氮、磷是生态系统维持平衡不可缺少的组成成分,其质量分数变化会对土壤质量产生影响。同时,其质量比 C/N(SOC/TN)、C/P(SOC/TP)和 N/P(TN/TP)能很好地指示土壤养分状况,其中,土壤 N/P 又是养分限制类型的预测指标^[19]。表 1 展示了供试样品的营养元素组成特征。两种生物炭的 SOC、TN、TP 质量分数均高于基本农田土壤。其中,SBC 具有更高的 SOC 质量分数,MBC 具有更高的 TN 和 TP 质量分数。C/N 和 C/P 均为 SBC > 供试土壤 > MBC,N/P 为 MBC < 供试土壤 < SBC。供试土壤的 C/N 略低于中国土壤平均值(11.9),C/P 和 N/P 均低于中国土壤平均值(61.0 和 5.2)^[20],这意味着供试土壤受到磷限制的作用较小,植被生长主要受到氮限制^[21],是氮限制型,需补充氮素。但由于 SBC 和 MBC 的 N/P 与供试土壤较为接近,仅仅依靠生物炭的输入缓解土壤氮限制是无法实现的,需要额外补充氮肥。

表 1 供试样品营养元素组成特征

Tab. 1 Nutrient element composition characteristics of test samples

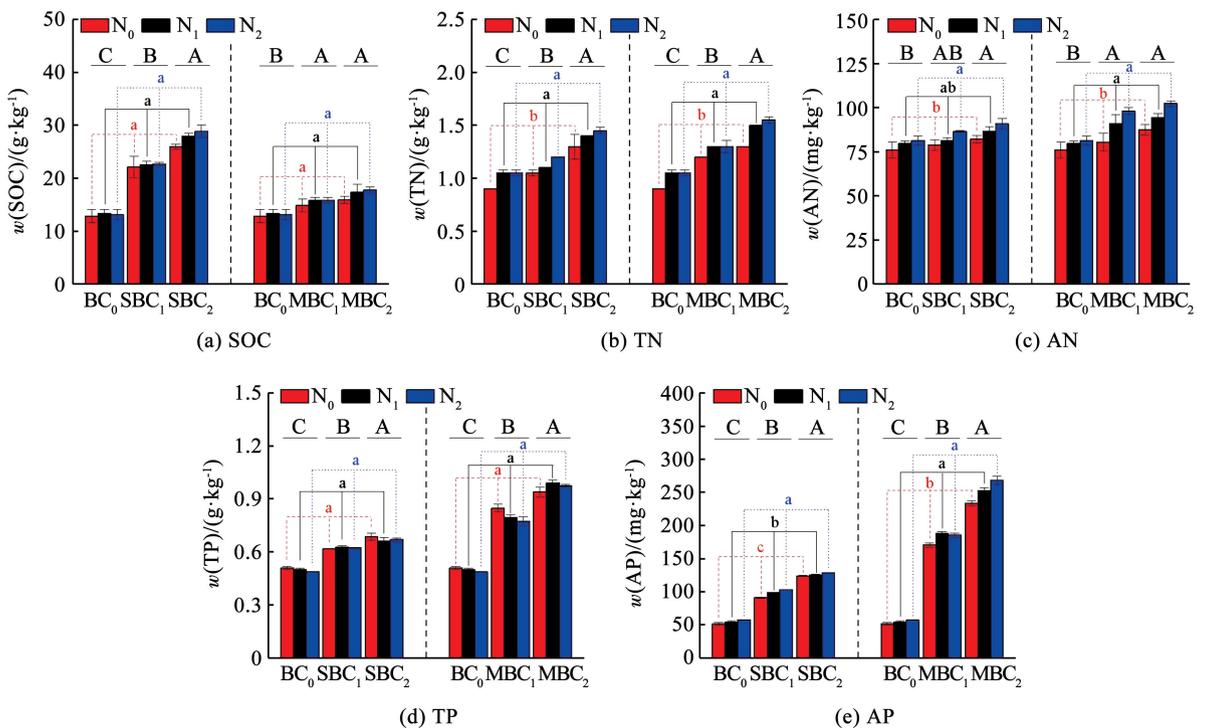
| 样品 | $w(\text{SOC})/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ | $w(\text{TN})/\%$ | $w(\text{TP})/\%$ | $w(\text{AN})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | $w(\text{AP})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | C/N | C/P | N/P |
|-----|---|-------------------|-------------------|---|---|--------|--------|-------|
| 土壤 | 11.395 | 0.110 | 0.058 | 79.625 | 49.327 | 10.359 | 19.647 | 1.897 |
| SBC | 663.385 | 1.955 | 0.779 | | | 33.933 | 85.159 | 2.510 |
| MBC | 375.692 | 6.405 | 6.028 | | | 5.866 | 6.232 | 1.063 |

2.2 生物炭与氮肥互作对土壤养分的影响

土壤 SOC 是衡量土壤肥力的重要指标之一,生物炭的添加显著影响土壤 SOC 质量分数,表现为随生物炭投加量增加,土壤 SOC 质量分数呈上升趋势(图 1(a)、表 2),这与生物炭丰富的碳质量分数有关^[22]。不同处理下土壤 SOC 变化及差异性如图 1(a)所示,其中,土壤 SOC 对不同生物炭添加的响应因生物炭特性的不同而存在较大差异。SBC 处理和 MBC 处理分别使土壤 SOC 质量分数最高提升了 101.754% 和 23.684%,这与 SBC 相比 MBC 具有更高的碳质量分数有关。有研究表明,施用生物炭初期能使原生 SOC 分解(正启动效应)^[5,23],但长期效应能降低 SOC 矿化率(负启动效应),同时负启动效应随生物炭 C/N 的增加而增加。SBC 相对 MBC 具有更高的 C/N,能够降低土壤 SOC 矿化,有利于碳保存。同一生物炭施用量下,氮肥施用对土壤 SOC 质量分数影响不显著(图 1(a)、表 2),这与宋大利等^[24]研究结果一致。两种生物炭处理中均在配施氮肥后(BC₂N₂)其土壤 SOC 质量分数最高,较 BC₀N₀处理分别增加 124.561%(SBC)和 38.596%

(MBC)。整体而言,生物炭和氮肥的使用共同增加了土壤 SOC 质量分数,这对于改善农田土壤质量具有重要意义。

方差分析结果表明,SBC、MBC 和氮肥投加均对土壤 TN 和 AN 质量分数有显著影响(表 2)。生物炭的施用提高了土壤 TN 和 AN 质量分数(图 1(b)、(c)),这与生物炭自身的性质和结构有关。生物炭自身的氮素释放提高了土壤氮质量分数^[25],并且生物炭丰富的孔隙结构也能够对氮素起到很好的截留作用^[26],使氮素更好地储存在土壤中,减少土壤中氮素淋溶损失^[27-28],这一特点在配施氮肥后更为突出。氮肥提高了土壤 TN 质量分数(图 1(b)),施氮处理中 SBC₂和 MBC₂分别使土壤 TN 质量分数最高提升了 38.095% 和 47.619%。这是由于生物炭可以提高土壤中脲酶活性^[29],而脲酶可以将尿素水解成氨,并介导有机氮转化为无机氮^[30-31]。同时添加生物炭后 N₁水平下的土壤 TN 质量分数均高于 BC₀处理的 N₂水平。综上,在土壤中采用生物炭配施氮肥能够减少氮素磷溶,提高肥料利用率,对于氮肥的“减施增效”具有重要意义。



采用双因素方差分析检验不同种类生物炭和氮肥投加对土壤养分的影响,不同字母表示处理间的显著差异($P < 0.05$),其中,不同大写字母表示同类生物炭处理中不同生物炭施用量之间的显著差异($P < 0.05$),不同小写字母表示同类生物炭处理中不同氮肥施用量之间的显著差异($P < 0.05$)。

图 1 不同处理对土壤养分的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil nutrient

磷在土壤中有效性低、移动性差,是限制陆地生态系统生产力的重要元素之一。本研究发现生物炭

对土壤磷元素质量分数有显著影响(表 2),土壤 TP、AP 质量分数与生物炭施用量之间呈正效应

(图 1(d)、(e))。生物炭自身具有丰富的磷元素,这与其原料中的磷质量分数有关^[32]。热解过程中生物炭中磷元素由于自身的温度低敏性而被保存,同时,其他元素的挥发导致生物炭中的磷质量分数进一步上升^[32-34],因此,生物炭可以作为磷源提高土壤磷质量分数。添加 SBC 和 MBC 分别使土壤 TP 质量分数最高提升了 34.592% 和 84.396%。这是由于 MBC 中磷质量分数比 SBC 更为丰富,对土壤 TP 质量分数提升程度也优于 SBC。与 TP 类似,随着生物炭施用量的增加,土壤中 AP 质量分数也显著增加,这说明生物炭提供的磷在很大程度上是可

表 2 SBC、MBC 与氮肥互作对土壤养分影响的双因素方差分析 F 值及显著性

Tab. 2 F -value and significance for effects of SBC and MBC interacting with nitrogen fertilizer on soil nutrients by two-way ANOVA

| 指标 | SBC-N | | | MBC-N | | |
|-----|--------------|-----------|----------|--------------|-----------|----------|
| | SBC | N | SBC * N | MBC | N | MBC * N |
| SOC | 156.730 ** | 1.237 ns | 0.538 ns | 12.965 ** | 1.048 ns | 0.201 ns |
| TN | 62.550 ** | 9.450 ** | 0.450 ns | 237.000 ** | 39.000 ** | 2.357 ns |
| AN | 6.441 ** | 5.912 * | 0.183 ns | 17.503 ** | 10.661 ** | 0.972 ns |
| TP | 178.329 ** | 0.713 ns | 0.761 ns | 610.298 ** | 1.155 ns | 3.612 * |
| AP | 3 730.405 ** | 38.420 ** | 4.713 ** | 2 791.215 ** | 24.603 ** | 6.254 ** |

注:ns 代表 $P > 0.05$, * 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$ 。

2.3 生物炭与氮肥互作对土壤化学计量特征的影响

对于作物而言,营养元素的绝对量限制和比例限制同时存在。为了提升产量而盲目过多施肥不仅会造成生产资料的浪费,还会造成元素盈余进而带来环境污染问题。适宜的土壤生态化学计量比对于维持生态系统的结构、功能和稳定性至关重要。

不同处理下土壤生态化学计量比特征如图 2 所示。土壤 C/N 受土壤 TN 和土壤 SOC 的影响,可以敏感地反映土壤质量状况^[10],其变化趋势对土壤碳氮循环有重要影响。合理的土壤 SOC 和 TN 质量分数是提升土壤固碳、固氮能力以及实现土壤 C/N 耦合平衡的重要途径^[36]。本研究各处理下土壤 C/N 基本维持在 11.494 ~ 20.989。相同生物炭处理中氮肥的输入降低了土壤 C/N。不同生物炭对土壤 C/N 的改善具有种类异质性,其中,SBC 处理促进了土壤 C/N 增加。相比 BC₀,土壤 C/N 在 SBC 处理中最高提升了 46.876%,而 MBC 处理与 SBC 处理呈现相反结果,表现为降低了土壤 C/N(图 2(a))。这是由于 SBC 具有更高的 C/N,同时,SBC 处理中土壤 SOC 的提升效果明显高于 MBC 处理,但二者对于 TN 的改善效果差异并不明显(图 1(a)、(b))。

土壤 C/P 通常用来表征土壤 SOC 的分解和积累以及土壤固持磷素的能力^[37-38]。两种生物炭的施用均显著影响了土壤 C/P,氮肥对土壤 C/P 影响

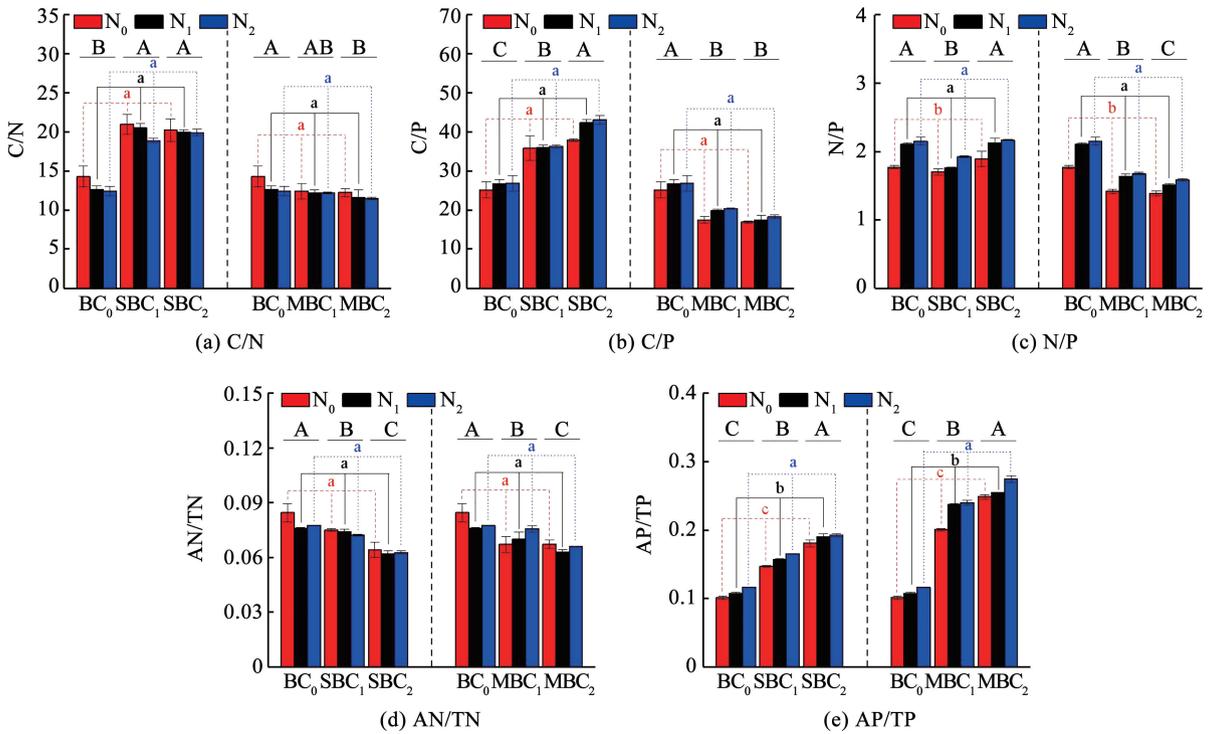
以直接利用的。添加 MBC 后土壤 AP 的上升幅度高于 SBC,这与 Gao 等^[35]的荟萃分析结果相似,施用 C/N 低的生物炭(MBC)对土壤 AP 的改善效果更好。氮水平并未显著影响土壤 TP 质量分数,但是,氮肥的施用显著影响了土壤 AP 质量分数,表现为施氮后土壤 AP 质量分数提升(图 1(d)、(e))。方差分析结果显示,生物炭和氮肥及其二者之间的交互作用显著影响了土壤 AP 质量分数(表 2)。整体而言,SBC 倾向于提升土壤 SOC,而 MBC 倾向于改善土壤 TP 和 AP 质量分数。

并不显著(表 3)。由图 2(b)可以看出,SBC 和 MBC 处理对于土壤 C/P 改善效果呈相反趋势,这表明生物炭对土壤 C/P 的影响因种类不同而具有差异性。SBC 的施用使土壤 SOC 质量分数大幅度提高(图 1(a)),但对 TP 的提升幅度较小(图 1(d)),因此,施用 SBC 后土壤 C/P 显著高于 BC₀。同时,SBC 高 C/P 促进了土壤微生物对磷的同化,提高土壤微生物磷固存和磷储量,降低了磷活性^[39]。相反,施用 MBC 使土壤 TP 质量分数大幅度提高(图 1(d)),但对土壤 SOC 的提升效果并不显著(图 1(a)),所以,添加 MBC 后土壤 C/P 明显低于 BC₀,但此时有利于有机物分解过程中的养分释放,促进了磷矿化,改善了土壤磷的有效性^[39]。

土壤氮、磷是植物赖以生存的物质基础和环境条件,其比值对群落结构和功能起关键性作用,也可以判断土壤对植物养分供应状况,是限制性养分判断的重要指标^[37]。本研究中,MBC 的施用降低了土壤 N/P(相比 BC₀),且与其施用量呈负相关(图 2(c)),这与 MBC 处理后土壤 TP 质量分数显著提升有关(图 1(d)),同时,SBC 处理下土壤 N/P 高于 MBC 处理。同一生物炭处理中,氮肥的施用对土壤 N/P 影响显著(表 3),表现为施用氮肥提高了土壤 N/P(图 2(c)),这与土壤 TN 质量分数的提升有关(图 1(b))。两种生物炭的施用均显著影响了

土壤 AN 与 TN 质量比 (AN/TN) 和 AP 与 TP 质量比 (AP/TP) (表 3), 土壤 AP/TP 随着生物炭施用量的增加呈上升趋势 (图 2(e)), 土壤中磷的可用性提高, 且 MBC 处理中提升更为明显。整体而言, SBC

通过诱导土壤 SOC 质量分数的上升进而提高土壤 C/N 和 C/P, MBC 处理则通过磷剂量稀释效应降低了土壤 C/P 和 N/P。



采用双因素方差分析检验不同种类生物炭和氮肥投加对土壤化学计量特征的影响, 不同字母表示处理间的显著差异 ($P < 0.05$), 其中, 不同大写字母表示同类生物炭处理中不同生物炭施用量之间的显著差异 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同类生物炭处理中不同氮肥施用量之间的显著差异 ($P < 0.05$)。

图 2 不同处理对土壤化学计量特征的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil stoichiometry characteristics

表 3 SBC、MBC 与氮肥互作对土壤化学计量特征影响的双因素方差分析 F 值及显著性

Tab. 3 F -value and significance for effects of SBC and MBC interacting with nitrogen fertilizer on soil stoichiometric characteristics by two-way ANOVA

| 指标 | SBC-N | | | MBC-N | | |
|-------|------------|-----------|----------|-------------|-----------|-----------|
| | SBC | N | SBC * N | MBC | N | MBC * N |
| C/N | 64.408 ** | 2.021 ns | 0.491 ns | 2.629 ns | 1.513 ns | 0.367 ns |
| C/P | 70.674 ** | 2.155 ns | 0.768 ns | 46.382 ** | 2.270 ns | 0.200 ns |
| N/P | 22.659 ** | 25.968 ** | 2.013 ns | 217.006 ** | 64.482 ** | 3.201 * |
| AN/TN | 37.573 ** | 2.635 ns | 0.888 ns | 18.968 ** | 1.488 ns | 2.165 ns |
| AP/TP | 628.520 ** | 21.572 ** | 0.566 ns | 2721.103 ** | 77.651 ** | 12.709 ** |

注: ns 代表 $P > 0.05$, * 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$ 。

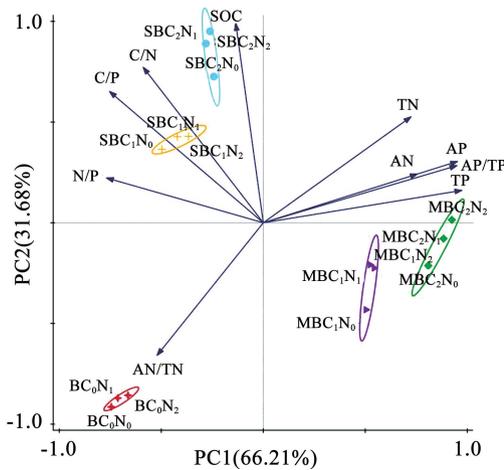
2.4 不同处理对土壤养分及土壤化学计量特征影响

采用 PCA 分析评估土壤养分元素质量分数及其化学计量比与不同处理之间的关系。PC1 和 PC2 分别解释了 66.21% 和 31.68% 的变量 (图 3(a))。不施用生物炭、施用 SBC 和施用 MBC 处理在不同象限被分隔开, 这表明不同处理中土壤养分及其化学计量特征存在差异, 且生物炭投加的种类差异导致其功能趋向性不同。不同生物炭添加处理在 PC1

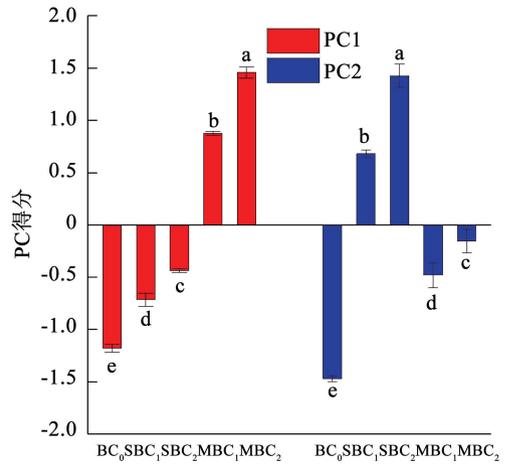
和 PC2 的得分均呈现显著差异 (图 3(b)), 这表明与 PC1、PC2 具有强相关性的代表因子均可以描述生物炭投加和 BC₀ 处理之间的差异^[40]。同时, TP、AP、AP/TP 是 PC1 的代表因子, SOC 是 PC2 的代表因子 (表 4), MBC 处理对 PC1 得分的影响更大, 而 SBC 处理对 PC2 得分的影响更突出 (图 3(b))。这进一步说明 MBC 对磷质量分数和磷养分有效性的改善更突出, 而 SBC 更倾向于改善

碳的利用。同时,通过比较图 3(a)中的指标可知,相关性较高的指标排列在相近位置,SOC 与 C/N 和

C/P 关系密切,这也验证了前文提到的 SBC 通过提升 SOC 进而增大 C/N 和 C/P。



(a) 不同处理下土壤养分及其化学计量之间的主成分分析



(b) 不同处理PC1和PC2得分的ANOVA分析

采用单因素方差分析的 Duncan 检验分析不同处理 PC1 和 PC2 得分间的差异性,不同小写字母代表同一成分中不同处理之间的得分存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 3 主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis

表 4 不同处理对土壤养分及其化学计量进行主成分分析中 PC1 和 PC2 得分

Tab.4 PC1 and PC2 scores in principal component analysis of soil nutrients and their stoichiometry under different treatments

| 变量 | PC1 | PC2 |
|---------------------------|--------------|--------------|
| SOC/($g \cdot kg^{-1}$) | -0.135 | 0.989 |
| TN/($g \cdot kg^{-1}$) | 0.724 | 0.526 |
| AN/($mg \cdot kg^{-1}$) | 0.755 | 0.242 |
| TP/($g \cdot kg^{-1}$) | 0.973 | 0.161 |
| AP/($mg \cdot kg^{-1}$) | 0.952 | 0.305 |
| C/N | -0.588 | 0.772 |
| C/P | -0.753 | 0.652 |
| N/P | -0.769 | 0.223 |
| AN/TN | -0.521 | -0.658 |
| AP/TP | 0.949 | 0.284 |

注:加粗的特征值(得分绝对值) ≥ 0.800 说明在主成分分析中的高相关性^[40]。

3 结论

1) 两种生物炭的添加均提升了土壤 SOC、TN、AN、TP 和 AP 质量分数,且随着生物炭用量的提高,土壤养分质量分数呈上升趋势。SBC 处理下土壤 SOC 质量分数最高提升了 101.754%,MBC 处理下土壤 TP 质量分数最高提升了 84.396%。

2) 不同生物炭的添加对土壤元素计量比的影响效应存在差异性。SBC 的施加显著提升土壤 C/N

和 C/P,更有利于土壤有机碳的补充。MBC 的施加在提升土壤 AP/TP 的同时会降低土壤中 C/P 和 N/P,能够缓解基质的磷限制,适用于缺磷导致的土壤营养失衡。

3) 生物炭和氮肥结合使用对提高氮肥利用率,实现“减施增效”具有重要意义。同时,二者共同施用并不是简单的叠加效应,存在显著的交互效应,在改善土壤磷元素有效性方面显示出巨大的潜力。

参考文献

[1] XIAO Xin, CHEN Baoliang, CHEN Zaiming, et al. Insight into multiple and multilevel structures of biochars and their potential environmental applications; a critical review [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(9): 5027. DOI: 10.1021/acs.est.7b06487

[2] ZHAO Ling, CAO Xinde, MASEK O, et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 256: 1. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.04.015

[3] GUL S, WHALEN J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2016, 103: 1. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.08.001

[4] WANG Yan, LIU Ronghou. Improvement of acidic soil properties by biochar from fast pyrolysis [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2018, 37(5): 1743. DOI: 10.1002/ep.12825

[5] LI Shuailin, WANG Shuo, FAN Miaoqun, et al. Interactions between biochar and nitrogen impact soil carbon mineralization and the microbial community[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 196: 104437. DOI: 10.1016/j.still.2019.104437

- [6] YU Z, CHEN L, PAN S, et al. Feedstock determines biochar-induced soil priming effects by stimulating the activity of specific microorganisms[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 5214. DOI: 10.1111/ejss.12542
- [7] SINGH B P, COWIE A L, SMERNIK R J. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(21): 11770. DOI: 10.1021/es302545b
- [8] CHEN Tingwei, LUO Ling, DENG Shihuai, et al. Sorption of tetracycline on H₃PO₄ modified biochar derived from rice straw and swine manure[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 431. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.07.074
- [9] YU Zaipeng, WANG Minhuang, HUANG Zhiqun, et al. Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1308. DOI: 10.1111/gcb.13939
- [10] ZHANG Ke, SU Yongzhong, YANG Rong. Variation of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and biogeographic factors across the desert ecosystem of Hexi Corridor, northwestern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 49. DOI: 10.1007/s11368-018-2007-2
- [11] ZECHMEISTER B S, KEIBLINGER K M, MOOSHAMMER M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. *Ecological Monographs*, 2015, 85(2): 133. DOI: 10.1890/14-0777.1
- [12] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 296
WU Wei, HE Xingdong, ZHOU Qixing. Review on N:P stoichiometry in ecosystem[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 296
- [13] DONG Zhengwu, LI Congjuan, LI Shengyu, et al. Stoichiometric features of C, N, and P in soil and litter of Tamarix cones and their relationship with environmental factors in the Taklimakan Desert, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2): 690. DOI: 10.1007/s11368-019-02481-6
- [14] WANG Huanhuan, REN Tianbao, MUELLER K, et al. Soil type regulates carbon and nitrogen stoichiometry and mineralization following biochar or nitrogen addition[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 141645. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141645
- [15] HE Jinxi, DU Lin, ZHAI Cheng, et al. Physicochemical properties and stoichiometry of Mollisols in responses to tillage and fertilizer management[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(8): 1034. DOI: 10.1080/03650340.2020.1775198
- [16] WANG Gen, WANG Li, MA Fang, et al. Integration of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi into phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Solanum nigrum* L.[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121873. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121873
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
BAO Shidan. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000
- [18] 徐露燕, 田大伦, 王光军, 等. 湘潭锰矿采场树叶片和土壤 N, P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2316
XU Luyan, TIAN Dalun, WANG Guangjun, et al. N and P stoichiometry of *Koeleruteria paniculata* leaf and soil in Xiangtan Manganese Mine wasteland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2316. DOI: 10.5846/stxb201308012004
- [19] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8326.
LUO Yan, GONG Lu, ZHU Meiling, et al. Stoichiometry characteristics of leaves and soil of four shrubs in the upper reaches of the Tarim River Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8326. DOI: 10.5846/stxb201611222379
- [20] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, ZHANG Chi, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3): 139. DOI: 10.1007/s10533-009-9382-0
- [21] 姚蒙蒙, 郭琛文, 赫凤彩, 等. 晋北盐碱草地土壤化学计量特征及其与植物多样性的关系[J]. *草地学报*, 2021, 29(12): 2800
YAO Mengmeng, GUO Chenwen, HE Fengcai, et al. Soil stoichiometric characteristics and its relationship with plant diversity in saline-alkali grassland of northern Shanxi[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(12): 2800. DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2021.12.021
- [22] JING Yulin, ZHANG Yuhu, HAN I, et al. Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 8837. DOI: 10.1038/s41598-020-65796-2
- [23] DING Fan, VAN ZWIETEN L, ZHANG Weidong, et al. A meta-analysis and critical evaluation of influencing factors on soil carbon priming following biochar amendment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1507. DOI: 10.1007/s11368-017-1899-6
- [24] 宋大利, 习向银, 黄绍敏, 等. 秸秆生物炭配施氮肥对潮土土壤碳氮含量及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 369
SONG Dali, XI Xiangyin, HUANG Shaomin, et al. Effects of combined application of straw biochar and nitrogen on soil carbon and nitrogen contents and crop yields in a fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 369. DOI: 10.11674/zwyf.16399
- [25] RIAZ M, KHAN M, ALI S, et al. Sugarcane waste straw biochar and its effects on calcareous soil and agronomic traits of okra[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(23): 752. DOI: 10.1007/s12517-018-4113-2
- [26] 林少颖, 赖清志, 刘旭阳, 等. 秸秆及配施生物炭对福州茉莉园土壤碳, 氮, 磷, 铁含量及其生态化学计量学特征影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3777
LIN Shaoying, LAI Qingzhi, LIU Xuyang, et al. Effects of straw and biochar on soil carbon, nitrogen, phosphorus and iron contents and ecological stoichiometric characteristics of jasmine garden in Fuzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(9): 3777. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0320
- [27] LU Haohao, WANG Yaofeng, LIU Yuxue, et al. Effects of water-washed biochar on soil properties, greenhouse gas emissions, and rice yield[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2018, 46(4): 1700143. DOI: 10.1002/clen.201700143
- [28] YAO Ying, GAO Bin, ZHANG Ming, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.06.002

- [29] BHADURI D, SAHA A, DESAI D, et al. Restoration of carbon and microbial activity in salt-induced soil by application of peanut shell biochar during short-term incubation study[J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 86. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.12.130
- [30] CHEN Guixiu, HE Weiwei, WANG Yan, et al. Effect of different oxytetracycline addition methods on its degradation behavior in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 479: 241. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.124
- [31] TENG Yong, ZHOU Qixing. Response of soil enzymes, functional bacterial groups, and microbial communities exposed to sudan I-IV [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 166: 328. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.102
- [32] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1690
LIU Yuxue, TANG Xu, YANG Shengmao, et al. Review on the effect of biochar on soil phosphorus transformation and mechanisms [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1690. DOI: 10.11674/zwf.14585
- [33] SUN Daquan, HALE L, KAR G, et al. Phosphorus recovery and reuse by pyrolysis: applications for agriculture and environment[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 682. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.035
- [34] UCHIMIYA M, HIRADATE S. Pyrolysis temperature-dependent changes in dissolved phosphorus speciation of plant and manure biochars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(8): 1802. DOI: 10.1021/jf4053385
- [35] GAO Si, DELUCA T H, CLEVELAND C C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems; a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 463. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.124
- [36] 熊杏, 熊清华, 郭熙, 等. 南方典型丘陵区耕地土壤全氮, 有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1656
XIONG Xing, XIONG Qinghua, GUO Xi, et al. Spatial variation characteristics of total nitrogen, organic carbon and ratio of carbon to nitrogen of cultivated land in typical hilly areas in south China and its influencing factors [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1656. DOI: 10.11674/zwf.20017
- [37] BING Haijian, WU Yanhong, ZHOU Jun, et al. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of Eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 405. DOI: 10.1007/s11368-015-1200-9
- [38] NIELSEN P L, ANDRESEN L C, MICHELSEN A, et al. Seasonal variations and effects of nutrient applications on N and P and microbial biomass under two temperate heathland plants [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(3): 279. DOI: 10.1016/j.apsoil.2009.05.006
- [39] LU Qiongqiong, BAI Junhong, ZHANG Guangliang, et al. Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 104: 9. DOI: 10.1016/j.pce.2018.04.001
- [40] HUANG Xiaochen, WANG Li, MA Fang. Arbuscular mycorrhizal fungus modulates the phytotoxicity of Cd via combined responses of enzymes, thiolic compounds, and essential elements in the roots of *Phragmites australis*[J]. *Chemosphere*, 2017, 187: 221. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.021

(编辑 刘彤)