DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.027
巩品祥,付强,李天霄,等.不同耕作模式和生物炭添加对黑土区土壤氮磷转化及玉米生长的调控[J].水土保持学报,2024,38(3):356-368.
GONG Pinxiang, FU Qiang, LI Tianxiao, et al. Nitrogen and phosphorus transformation of soil and growth of maize in black soil area by different tillage patterns and biochar addition[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):356-368.

不同耕作模式和生物炭添加对黑土区土壤氮磷转化及玉米生长的调控

巩品祥[1,2], 付 强[1,2], 李天霄[1,2], 侯仁杰[1,2], 李 茉[1,2], 石国新[1,2]
(1.东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030;
2.东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室,哈尔滨 150030)

摘 要:[目的] 为探究不同耕作模式和生物炭施加量对黑土区农田土壤氮磷转化和玉米生长发育的影响。**[方法]** 通过野外大田试验,设置 2 种耕作(深耕和浅耕)和 5 个生物炭添加处理(0,3,6,9,12 t/hm^2),探究不同耕作模式和生物炭施加量对土壤氮磷组分、酶活性及玉米生理特性的综合影响。**[结果]** (1)深耕和浅耕配合施加生物炭可有效改善土壤结构,提高团聚体几何平均直径,降低破坏百分比,且深耕处理效果优于浅耕处理;(2)施加生物炭提高土壤氮磷组分、脲酶活性和碱性磷酸酶活性,施加 9 t/hm^2 生物炭效果最好,且深耕更为显著;(3)深耕处理下生物炭施加量达到 9 t/hm^2 时,提高叶片的全氮、全磷含量和谷氨酰胺合成酶活性,降低酸性磷酸酶活性;(4)深耕条件下施加 9 t/hm^2 生物炭的玉米的产量达到 17.37 t/hm^2,相比于 0 提高 28.9%。**[结论]** 深耕处理并施加 9 t/hm^2 生物炭对于黑土区农田养分环境和作物生长提供参考意义。

关键词: 生物炭;耕作方式;氮磷;酶活性;玉米
中图分类号:S156.2;S513 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242-(2024)03-0356-13

Nitrogen and Phosphorus Transformation of Soil and Growth of Maize in Black Soil Area by Different Tillage Patterns and Biochar Addition

GONG Pinxiang[1,2], FU Qiang[1,2], LI Tianxiao[1,2], HOU Renjie[1,2], LI Mo[1,2], SHI Guoxin[1,2]
(1.*School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*;
2. *Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources of Ministry of Agriculture*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the effects of different tillage patterns and biochar addition on soil nitrogen and phosphorus transformation and maize growth and development in farmland in the black soil area. [**Methods**] Through a field experiment, two tillage treatments (deep tillage and shallow tillage) and five biochar addition treatments (0, 3, 6, 9, and 12 t/hm^2) were set up to investigate the combined effects of different tillage patterns and biochar addition on soil nitrogen and phosphorus fractions, enzyme activities, and physiological characteristics of maize. [**Results**] (1) Deep tillage and shallow tillage in combination with biochar addition could effectively improve soil structure, increase the geometric mean diameter of agglomerates, and reduce the percentage of damage. The deep tillage treatment was more effective than the shallow tillage treatment. (2) The addition of biochar improved soil nitrogen-phosphorus fractions, urease activity, and alkaline phosphatase activity, and the effect of applying biochar at the rate of 9 t/hm^2 was the best, which was more pronounced in the deep tillage treatment. (3) The application of biochar up to 9 t/hm^2 under deep tillage treatment increased the total nitrogen and phosphorus contents and

收稿日期:2023-11-11 **修回日期:**2023-12-20 **录用日期:**2024-01-22 **网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-04-11
资助项目:国家自然科学基金区域联合基金项目(U20A20318);国家自然科学基金面上项目(52179033,52279035);国家杰出青年科学基金项目(51825901);黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2020E002,YQ2022E007)
第一作者:巩品祥(1999—),男,硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:gpx0506@126.com
通信作者:付强(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:fuqiang0629@126.com

glutamine synthetase activity of leaves and decreased the acid phosphatase activity. (4) The yield of corn under deep tillage condition with the addition of 9 t/hm^2 of biochar was as high as 17.37 t/hm^2, which was increased by 28.9% compared with that of 0 of biochar. [**Conclusion**] The deep-tillage treatment and addition of 9 t/hm^2 biochar provided a reference for the nutrient environment and crop growth in agricultural fields in the black soil area.

Keywords: biochar; tillage practices; nitrogen and phosphorus; enzyme activity; maize

Received: 2023-11-11　　**Revised**: 2023-12-20　　**Accepted**: 2024-01-22　　**Online**(www.cnki.net): 2024-04-11

近年来，随着气候变化和粮食需求不断增加，导致黑土资源被高强度利用，进而降低土壤质量和养分含量，粮食生产力受到制约[1]。因此，合理的耕作方式对于土地资源的利用至关重要。深耕(DP)作为黑土区常用的耕作方式，能够增加水分在土壤剖面中的渗透速率和分配系数，进而促进作物根系发育[2]。深耕能够增加 0—40 cm 土层的土壤有机质含量及氮磷养分含量，对于促进土壤养分的分解和提高土壤肥力有积极影响[3]。秸秆还田能改善土壤的基本理化性质，提高土壤保水保肥能力，并呈可持续性和累积性的影响；深耕配合秸秆还田能改善土壤结构，提高出苗率，提升土壤温度以帮助作物御寒，从而提高作物产量[4]。

生物炭是生物质在无氧或缺氧条件下通过热降解得到的固体产物，生物炭具有多孔的结构、较大的表面积、较好的稳定性与吸附性，增加土壤氮素有效性并减少氮损失[5]。YANG 等[6]发现，生物炭能够有效固持土壤中磷素，显著提高土壤有机磷含量，促进无机磷向活性磷转化，同时，增加土壤中的微生物活性，提高土壤酶的有效性。由此可见，生物炭在提高土壤养分有效性、增加酶活性等方面发挥着重要作用。土壤酶是土壤生化反应的重要生物催化剂，在土壤养分的产生及微生物分解中发挥着至关重要的作用。土壤脲酶(UA)和碱性磷酸酶(ALP)在土壤养分循环中发挥着重要作用，被认为是评估土壤管理引起的质量变化的可靠指标[7]。已有研究[8]表明，生物炭可显著增加与氮素相关的土壤酶活性；也能通过提高土壤碱性磷酸酶的活性，从而改善土壤微生物环境，提高土壤质量。植物酶是参与高等植物养分代谢的重要因子，与养分利用效率、植物抗逆性及植物产量和品质密切相关。其中，谷氨酰胺合成酶(GS)是植物氮代谢和氨同化的关键酶之一，其活性的高低对植物养分的吸收利用和产量有着重要影响[9]。酸性磷酸酶(ACP)是作物体内一种重要的水解酶，不仅在植物碳水化合物的转化及蛋白质的合成中起着重要作用，还与土壤及植株体内有机磷的分解和再利用有着密切的关系[10]。关于生物炭和耕作方式结合对农田生境的影响。周明星等[11]发现，免耕配施生物炭可增加团聚体的有机碳含量及团聚体稳定性，并对玉米的产量有积极影响；石国新[12]发现，深耕耕作方式下，施加适量的生物炭能够提高土壤养分，改善微生物环境，提高玉米和大豆的产量。

针对松嫩平原出现的土地退化、养分流失及产量降低等问题，以松嫩平原黑土区为研究区域，以生物炭和保护性耕作为调控措施，探讨不同耕作方式和生物炭施加量对农田氮磷组分、酶活性和玉米生长的综合影响，揭示土壤环境和作物生长对生物炭和耕作方式的响应机理，提出有利于农田生产的最佳调控模式。通过耕作方式和生物炭施加联合调控，探究土壤养分和作物养分吸收有何变化规律，分析生物炭不同施加量对于土壤和作物酶活性影响有何差异，探究不同耕作方式下施加生物炭对农田土壤—作物有怎样的调控机制。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

试验于 2021 年 10 月至 2022 年 10 月在黑龙江省东北农业大学试验基地(45°30′N，126°54′E)开展。试验区地处松嫩平原，属温带季风性气候，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥。全年平均降水量 569.1 mm，降雨主要集中在 6—9 月，降水量约占全年 60%，平均气温 5.6 ℃。土壤为典型黑土，pH 为 6.38，土壤无机氮含量为 3.34 mg/kg，全氮含量 0.79 g/kg，有效磷含量 47.06 mg/kg，全磷含量 0.07 g/kg(图 1)。生物炭购置于辽宁省金和福生物炭制厂，生物炭 pH 为 8.86，全氮含量为1.53%，全磷含量为 0.78%，灰分含量为 29.70%。

1.2　试验设计

试验共采用 2 种耕作方式(深耕和浅耕，标记为 DP 和 SP)，每种耕作方式下共布设 0，3，6，9，12 t/hm^2 5 种生物炭施用量，分别标记为 DCK 和 SCK，D3 和 S3，D6 和 S6，D9 和 S9，D12 和 S12，共 10 种处理，试验小区面积为 7 m×15 m，每个处理 3 次重复。将生物炭一次性均匀撒入试验小区内，并用旋耕机进行耕作处理，其中，深耕深度为 30 cm，浅耕 20 cm，使生物炭均匀拌合，起垄静置 7 天，不额外施加肥料。

供试作物为玉米(*Zea mays L.*),品种为"西星五彩甜粽",于 5 月播种,9 月收获。

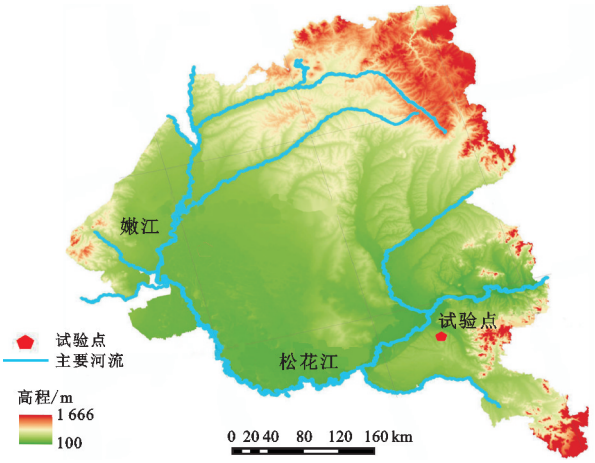


图 1 区域概况

Fig. 1 Overview of the experimental area

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品测定 土壤样品测定参考《土壤农化分析》[13]和《土壤酶及其研究法》[14],分别在玉米生长的拔节期(JS)、抽雄期(TS)、开花期(FS)、灌浆期(GP)和成熟期(MS)采用 5 点取样法在每个小区土壤表层采集土样,每个小区的取样重复 3 次,将土样分成 2 部分:一部分用于鲜土无机氮(TIN)和有效磷(AP)测定,其中,无机氮包括土壤铵态氮(NH_4^+—N)和硝态氮(NO_3^-—N),采用 KCl 溶液浸提进行样品预处理,有效磷采用 $NaHCO_3$ 溶液浸提进行预处理;另一部分在室温下风干,挑出杂质,用于全氮(TN)、全磷(TP)、脲酶(UA)和碱性磷酸酶(ALP)的测定,全氮和全磷采用消煮法进行样品预处理;脲酶和碱性磷酸酶采用试剂盒法进行预处理,试剂盒购置于苏州梦犀生物医药科技有限公司。其中,无机氮(TIN)、土壤有效磷(AP)和土壤全氮(TN)含量使用 AA3 连续流动分析仪(Autoanalaser III, Bran Lucbbe Co.Ltd, Germany)进行上机测定;土壤全磷(TP)、土壤脲酶(UA)和碱性磷酸酶(ALP)采用全波长酶标分析仪(HBS—ScanX)测定;土壤团聚体稳定性指标采用湿筛法和干筛法[15]测定,平均直径(GMD)和团聚体破坏百分比(PAD)计算公式为:

$$\mathrm{GMD}=\exp\sum_{i_1=1}^{n}W_i\ln\bar{x}_i \tag{1}$$

$$\mathrm{PAD}=\frac{DR_{0.25}-WR_{0.25}}{DR_{0.25}}\times 100\% \tag{2}$$

式中:$\bar{x}_i$ 为第 i 粒级的平均直径(mm);W_i 为 $\bar{x}_i$ 相对应的粒级团聚体占总体积的百分比(%);$WR_{0.25}$ 为>0.25 mm 水稳性团聚体含量(g);$WR_{0.25}=1-\frac{M_{x<0.25}}{M_T}$,$M_{x<0.25}$ 为<0.25 mm 团聚体的重量(g);M_T 为团聚体总重量(g);$DR_{0.25}$ 为>0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量,通过干筛法测 $DR_{0.25}$(%)。

1.3.2 植株样品测定 植株样品测定参考《土壤农化分析》[13]《植物生理学实验指导》[16]及邱红波[17]方法,在玉米拔节期(JS)、开花期(FS)和成熟期(MS)进行采集,在拔节期取最上部第 3 片叶子,开花期和成熟期取穗位叶,放入保温箱内低温保存,叶片中的谷氨酰胺合成酶(GS)及酸性磷酸酶(ACP)由试剂盒法进行样品预处理,试剂盒购置于苏州科铭生物技术有限公司,并采用全波长酶标分析仪测定;叶绿素的 SPAD 值采用 TYS—3N 植株养分速测仪进行测定;玉米叶片全氮(LTN)和全磷(LTP)通过消煮法进行预处理,并采用 AA3 流动分析仪和全波长酶标分析仪进行上机测定;在成熟期,取玉米地上部植株进行干重的测定,同时,取果实进行产量的测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016、SPSS 26.0、ArcGIS 10.7 和 Origin 2018 软件对数据进行处理并绘制图像;采用邓肯(ducan)法检验处理间的差异性,显著性水平为 $p<0.05$;采用皮尔逊(pearson)法进行相关性分析,显著性水平为 $p<0.01$;采用熵权—TOPSIS 模型[18]进行综合评价。

2 结果与分析

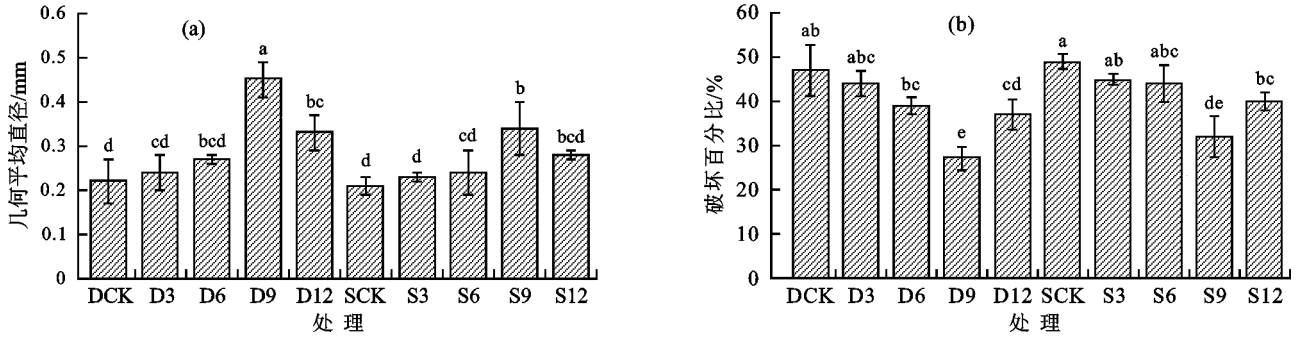
2.1 土壤结构变化特征

由图 2 可知,不同处理下土壤团聚体稳定性特征,生物炭和耕作方式对土壤团聚体稳定性的影响存在不同的差异。随着生物炭施加量的增加,几何平均直径(GMD)呈先增加后减小趋势;破坏百分比(PAD)则呈先降低后升高趋势,二者均在 D9 处理下达到最大(最小)值,与 DCK 相比均有显著性差异($p<0.05$)。与 SP 处理相比,DP 处理的 GMD 增加 4.76%~32.35%,DP 处理的 PAD 降低 2.22%~15.63%,可见 DP 处理相比于 SP 处理更具稳定性。综上所述,在 D9 处理下,土壤团聚体具有最佳的稳定性。

2.2 土壤氮素变化特征

由图 3a 可知,整个生育期内,土壤 TIN 呈先降低后增加趋势,并在开花期达到最大值;随着生物炭施加量的增加,TIN 呈先增加后降低趋势,在 9 t/hm^2 生物炭施加量下达到最大值,与 CK 处理相比,D9 处理中 TIN 含量提高 40.3%;S9 处理中 TIN 含量提高 31.9%,DP 和 SP 处理相比较而言,DP 处理的 TIN 含量普遍高于 SP 处理。由图 3b 可知,土壤 TN 含量在拔节期至开花期逐步增加,在开花期至成熟期逐步减少。从施炭水平来看,当生物炭施加量为

9 t/hm²时,土壤 TN 含量最高。D9 处理的 TN 含量相比于 CK 提高 9.1%;S9 处理的 TN 含量相比于 CK 提高 19.0%。DP 处理下的 TN 含量均高于 SP 处理。从表 1 可以看出,D9 和 S9 处理下的氮素含量显著高于其他处理,生物炭和耕作方式 2 种处理对土壤 TIN 和 TN 有极显著或显著影响,二者交互作用对 TIN 和 TN 无显著影响。综上所述,在深耕处理下,施用 9 t/hm²的生物炭的土壤氮素含量最高。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2　成熟期团聚体几何平均直径和破坏百分比变化特征

Fig. 2　Characterization of changes in geometric mean diameter and percentage destruction of agglomerates at maturity

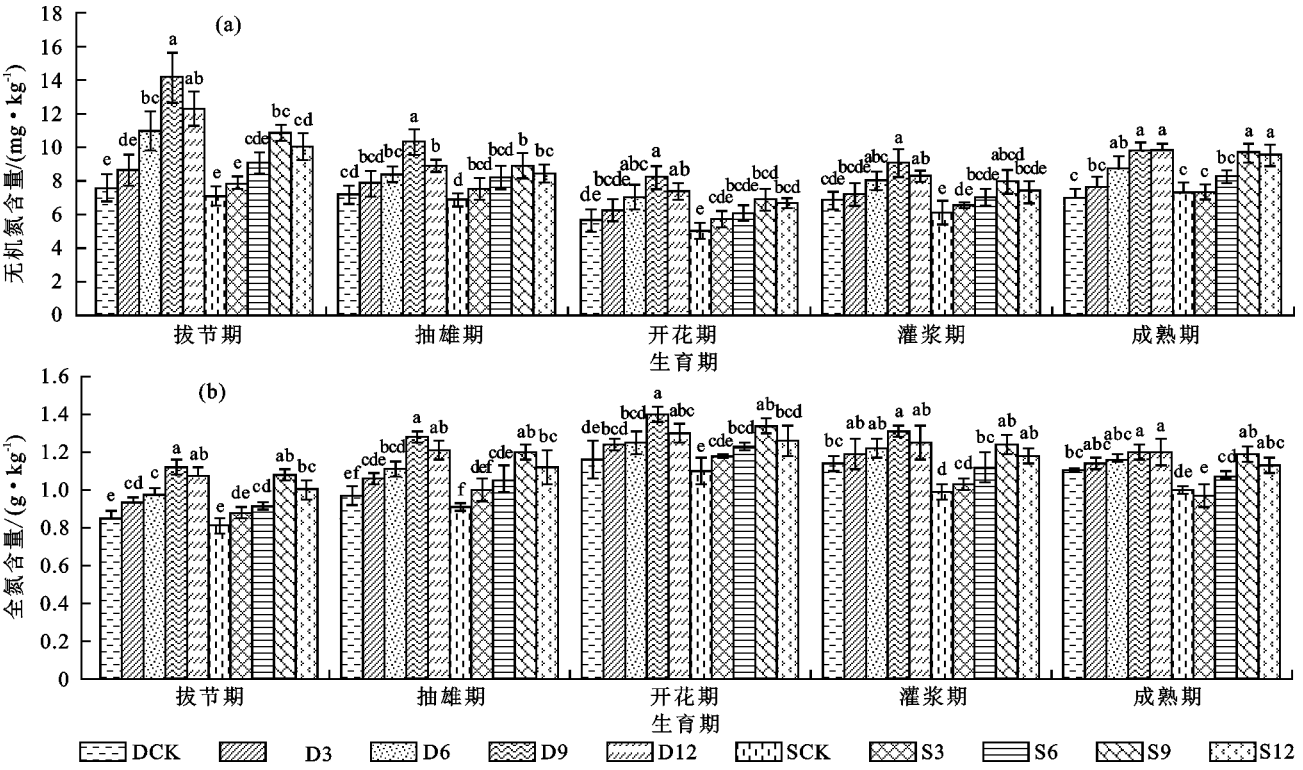


图 3　不同生育期内土壤无机氮和全氮含量变化特征

Fig. 3　Variation in soil inorganic nitrogen and total nitrogen at different growth stages

2.3　土壤磷素变化特征

由图 4 可知,生育期内土壤 AP 和 TP 的动态变化趋势均为先增加后降低,土壤 AP 和 TP 均在生物炭施加量为 9 t/hm²时达到最大值。在 SP 处理下,土壤 AP 含量在 S9 处理下可达到最大值 85.98 mg/kg,相较于 SCK 提高 25.6%;在 DP 处理下,土壤 AP 含量在 D9 处理下可达到最大值 93.16 mg/kg,相较于 DCK 提高 34.7%。整体而言,DP 处理的提升效果高于 SP 处理,D9 处理下的 AP 含量相比于 S9 增加 8.4%。TP 和 AP 有着相似的变化规律,在 SP 处理下,S9 处理的 TP 含量相比于 SCK 提高29.3%;在 DP 处理下,D9 处理的 TP 含量相比于 DCK 提高36.4%,相比于 S9 处理,D9 处理的 TP 含量增加7.3%。从表 1 可以看出,D9 和 S9 处理下的磷素含量显著高于其他处理,生物炭和耕作方式 2 种处理对土壤 AP 和 TP 有极显著影响,二者交互作用对 AP 有显著影响,对 TP 无显著影响。综上所述,在深耕耕作模式下,施加 9 t/hm²生物炭时,土壤 AP 和 TP 含量最高。

表 1 土壤氮磷组分特征

Table 1 Characteristics of soil nitrogen and phosphorus nutrients

处理	无机氮/(mg·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})
DCK	6.98±0.66Ad	1.10±0.02Ab	48.30±0.97Ae	0.082±0.002Ae
D3	7.64±0.36Acd	1.14±0.08Aab	56.06±0.68Ad	0.088±0.001Ad
D6	8.73±0.62Abc	1.20±0.07Aab	59.29±0.68Ac	0.097±0.002Ac
D9	10.92±1.03Aa	1.26±0.03Aa	70.09±1.06Aa	0.104±0.002Aa
D12	9.82±0.45Aab	1.22±0.03Aab	63.62±0.54Ab	0.100±0.002Ab
SCK	6.51±0.52Ad	0.95±0.06Bc	43.75±1.02Be	0.086±0.001Bd
S3	7.35±0.60Acd	0.97±0.07Abc	52.30±0.77Bd	0.093±0.001Bc
S6	8.25±0.56Abc	1.08±0.02Aab	57.76±0.37Bc	0.098±0.002Ab
S9	9.66±0.75Aa	1.19±0.06Aa	67.64±0.79Aa	0.109±0.001Ba
S12	9.04±0.43Aab	1.13±0.04Ab	62.02±0.48Bb	0.103±0.002Bb
生物炭(B)	**	**	**	**
耕作方式(F)	*	**	**	**
B*F	NS	NS	*	NS

注:同列中不同的小写字母表示同一耕作方式下不同生物炭处理间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同一生物炭处理下不同耕作方式间差异显著($p<0.05$);** 表示 $p<0.01$;* 表示 $p<0.05$;NS 表示无显著性。下同。

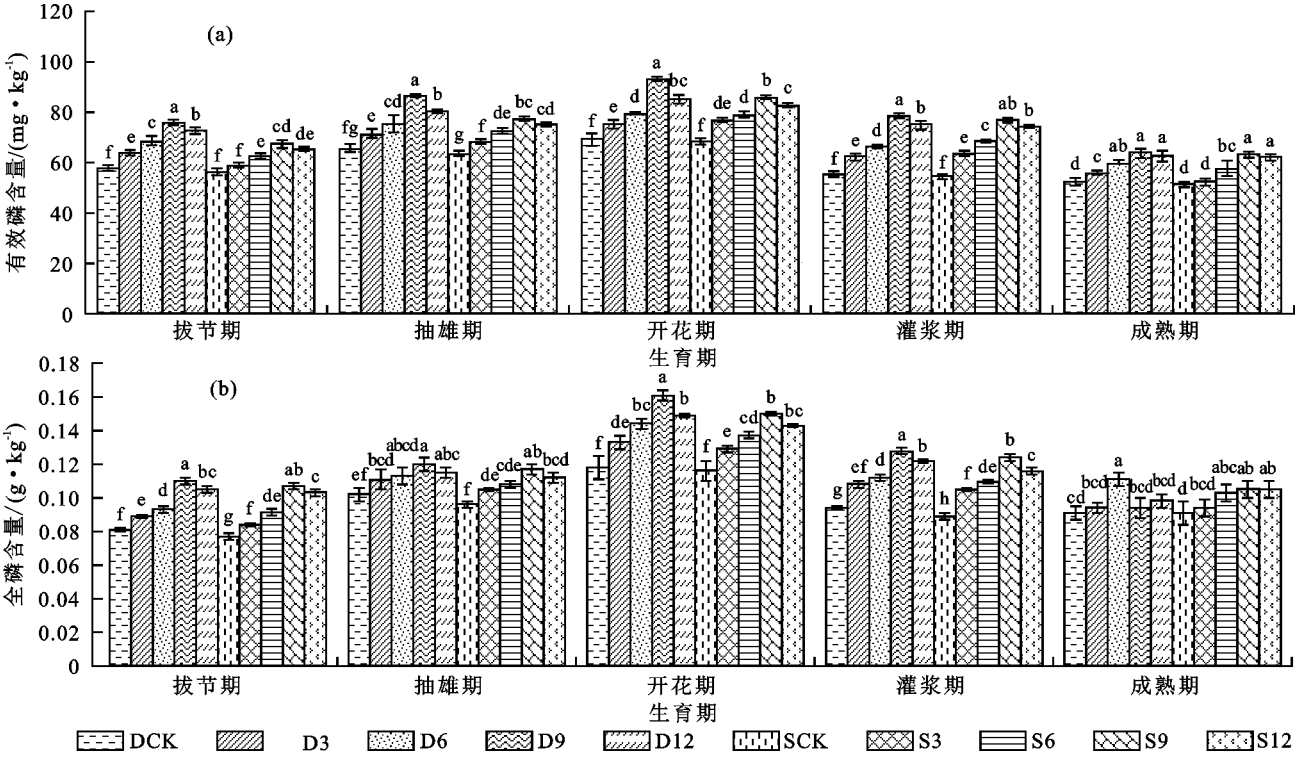


图 4 不同生育期内土壤有效磷和全磷含量变化特征

Fig. 4 Variation in soil available phosphorus and total phosphorus at different growth stages

2.4 土壤酶活性变化特征

图 5 为土壤 UA 和 ALP 活性的变化特征,在全生育期内,土壤 UA 和 ALP 均呈先增加后降低趋势。由图 5a 可知,从拔节期到开花期,土壤 UA 活性逐渐增加,从灌浆期到成熟期呈下降趋势,且下降速率较慢;由图 5b 可知,从拔节期到抽雄期,土壤 ALP 活性逐渐增加,从抽雄期到成熟期,ALP 活性逐渐下降。随着生物炭施加量的增加,UA 和 ALP 均呈先增加后降低趋势,均在 9 t/hm^{2}施加量下达到最大。DP 处理下,D3、D6、D9、D12 的 UA 活性相比于 DCK 分别提高 14.1%,21.6%,47.7%,33.1%,SP 处理下,S3、S6、S9、S12 的 UA 活性相比于 SCK 分别提高 19.1%,28.1%,45.1%,40.8%,而 D9 处理相比于 S9 处理提高 13.4%;与对照相比,DP 处理下,D3、D6、D9、D12 的 ALP 活性相比于 DCK 分别提高11.0%,14.0%,42.7%,21.3%,SP 处理下,S3、S6、S9、S12 的 ALP 活性相比于 SCK 分别提高 8.9%,14.9%,37.6%,22.2%,D9 处理相比于 S9 处理 ALP 的活性增加 5.8%。

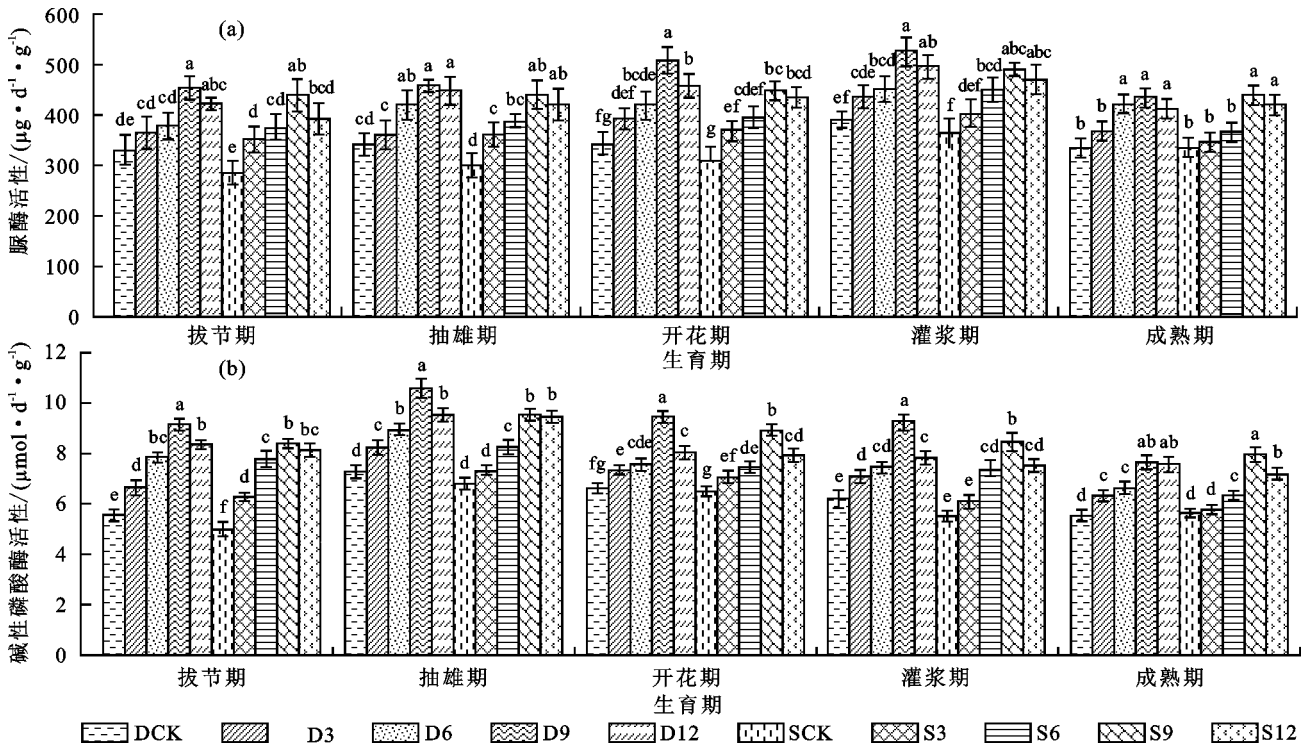


图 5　不同生育期内土壤脲酶和碱性磷酸酶活性变化特征

Fig. 5　Variation in soil urease and alkaline phkaline phosphatase activities at different growth stages

2.5　植物酶活性及产量变化特征

图 6 为玉米叶片在拔节期、开花期和成熟期的 GS 和 ACP 活性变化特征。由图 6a 可知,DP 和 SP 处理下的 GS 活性变化有着相似的变化规律,均呈先增加后降低趋势,随着生物炭施用量的增加均表现为先增加后降低变化规律。在生物炭施加量为 9 t/hm^{2}时达到最大值,在 DP 处理下,D9 的 GS 活性相比于 DCK 提高 38.9%,SP 处理下,S9 的 GS 活性相比于 SCK 提高 37.8%。DP 处理下 GS 的活性更为明显。

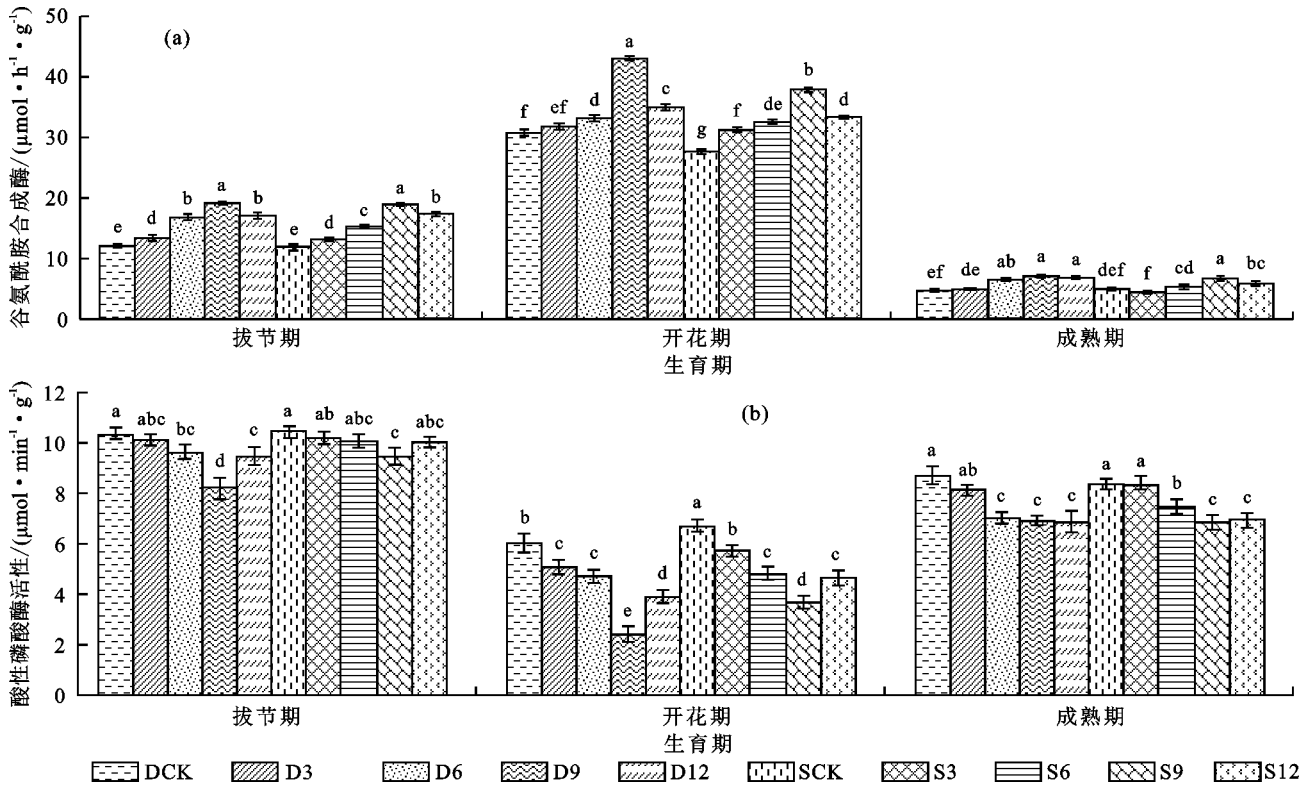


图 6　不同生育期内叶片谷氨酰胺合成酶和酸性磷酸酶活性变化特征

Fig. 6　Variation in leaf glutamine synthetase and acid phosphatase activity at different growth stages

由图 6b 可知，在不同耕作模式下，玉米叶片在拔节期、开花期和成熟期的 ACP 活性均呈先降低后升高趋势，DP 处理下的 ACP 活性低于 SP 处理下的活性，DP 处理的 ACP 活性比 SP 处理降低10.3%～34.2%。在 DP 和 SP 处理下，伴随着生物炭施加量的增加，ACP 活性呈现先降低后增加趋势，ACP 活性均在生物炭施加量为 9 t/hm^{2}时达到最低。在 DP 处理下，D9 的 ACP 活性相比于 DCK 降低 59.9%，SP 处理下，S9 活性相比于 SCK 降低 45.2%。

随着生物炭施加量的增加，SPAD 呈先增加后降低趋势(图 7a)，在 9 t/hm^{2}施加量下达到最大，D9 处理的 SPAD 比 CK 提高28.2%，S9 处理较 CK 提高 24.3%。DP 处理的 SPAD 略高于 SP 处理，相比于 SP 处理，DP 处理的 SPAD 提高0.9%～4.8%。

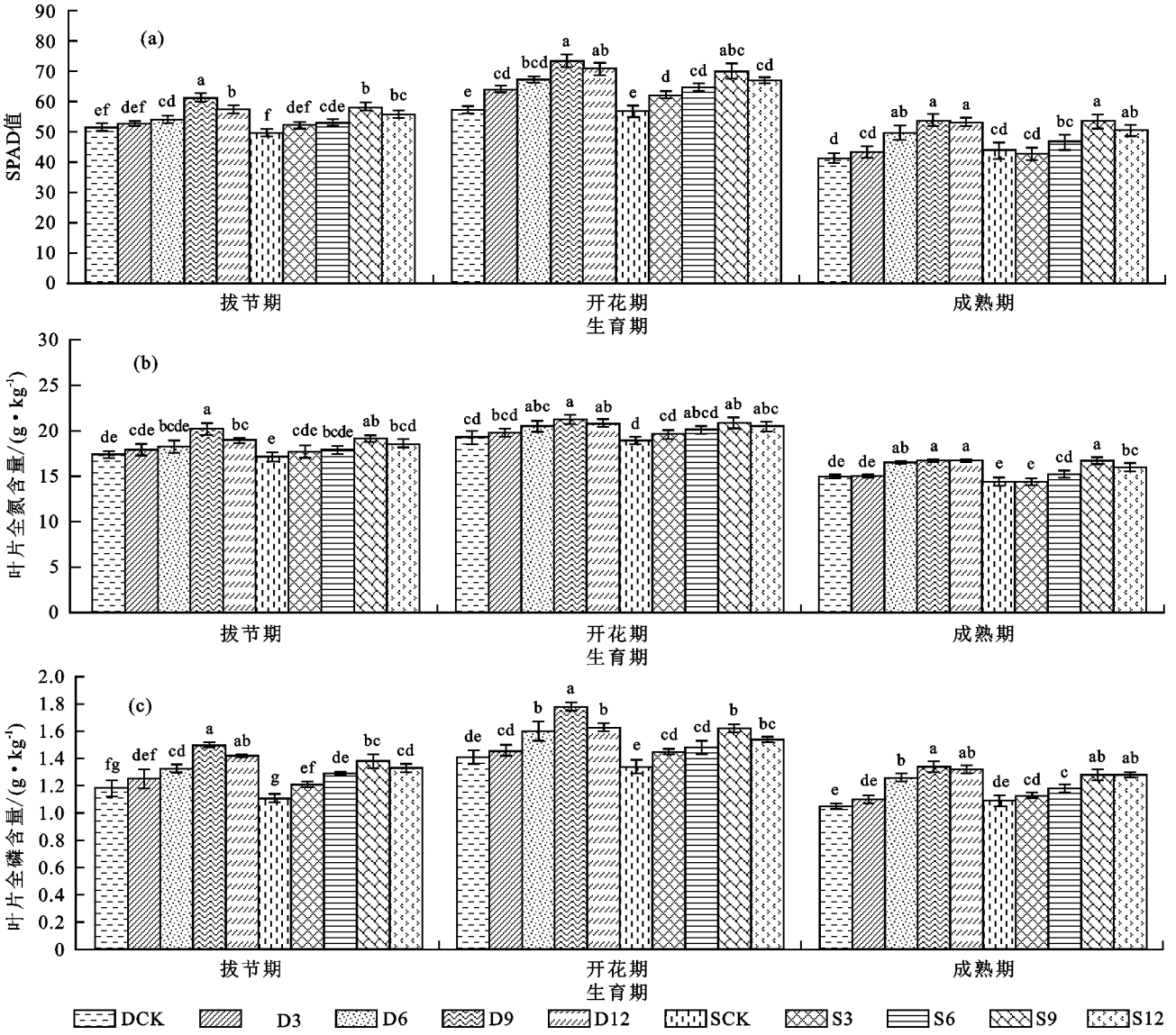


图 7 不同生育期内玉米生长发育变化特征

Fig. 7 Characteristics of growth and development of maize at different growth stages

由图 7b、图 7c 可知，在施加 9 t/hm^{2}生物炭后，LTN 和 LTP 含量高于其他处理，同时，DP 处理的氮磷含量高于 SP 处理，D9 处理的氮磷含量最高。由表 2 可知，施加生物炭可明显提高玉米干重和产量，与 CK 相比，SP 处理下的干重分别提高 0.7%～14.2%，DP 处理下的干重分别提高0.3%～20.0%。与 CK 相比，SP 处理下的产量分别提高 5.2%～21.6%，DP 处理下的产量分别提高9.3%～28.9%，D9 处理产量达到 17.37 t/hm^2。相比于 SP，DP 处理的产量提高 0.6%～6.6%，生物炭和耕作方式对干重和产量均有极显著影响，二者交互作用对干重有显著影响，对产量无显著影响。

2.6 土壤结构、养分、酶活性和玉米生长指标间的相关性分析

为探究土壤结构、养分及玉米生长发育间的关系，采用皮尔逊(pearson)法对相关指标进行相关性分析(图 8)。在 DP 处理下，UA 与土壤氮磷组分、ALP、GS、LTP 和 GMD 呈正相关，与 ACP 和 PAD 呈负相关；ALP 与土壤氮磷组分、UA、GS、叶片氮磷含量以及 GMD 呈正相关，与 ACP 呈负相关；GS 与

土壤氮磷组分、UA、ALP 及叶片氮磷含量呈正相关,与 ACP 呈负相关;ACP 与 PAD 呈正相关,与土壤氮磷含量、酶活性及叶片氮磷含量呈成负相关。在 SP 处理下,UA 与氮磷组分、ALP、GS、LTP 和 GMD 呈正相关,与 ACP 和 PAD 呈负相关;ALP 与土壤氮磷组分、UA、GS、叶片氮磷含量及 GMD 呈正相关,与 ACP 和 PAD 呈负相关;GS 与土壤氮磷组分、UA、ALP 及叶片氮磷含量呈正相关,与 ACP 呈负相关;ACP 与 PAD 呈正相关,与土壤氮磷含量、酶活性及叶片氮磷含量呈负相关。

表 2　玉米产量特征

Table 2　Characteristics of growth and development of maize

处理	干重/g	产量/(t·hm^{-2})
DCK	241.68±9.59Ac	13.47±0.38Ad
D3	242.49±10.20Ac	14.73±0.46Ac
D6	262.33±11.28Abc	15.84±0.38Ab
D9	320.07±9.23Aa	17.37±0.44Aa
D12	281.86±11.62Ab	15.98±0.40Ab
SCK	241.31±11.28Ab	13.40±0.34Ac
S3	242.96±3.13Ab	14.09±0.27Ac
S6	246.24±10.27Ab	14.94±0.37Ab
S9	274.01±10.03Ba	16.29±0.48Ba
S12	264.03±12.37Aab	15.72±0.33Aab
生物炭(B)	**	**
耕作方式(F)	**	**
B*F	*	NS

2.7　耕作方式和生物炭调控处理下作物生境综合评价

选取熵权—TOPSIS 评价模型对农田生境健康进行综合评价,熵权法是根据各指标原始数据传递的差异信息求得最优权重值,避免主观影响。通过熵权法,以不同耕作方式和生物炭施加量对作物生境的调控效果为评价对象,选取土壤结构指标(团聚体几何平均直径和破坏百分比)、养分指标(无机氮、全氮、有效磷和全磷)、酶活性指标(脲酶、碱性磷酸酶、谷氨酰胺合成酶和酸性磷酸酶)、玉米生长指标(SPAD、全氮和全磷)、干重和产量进行综合评价(表 3),并对相关评价指标进行标准化处理(表 4)。

根据标准化信息表,采用熵权法计算各指标信息熵值 E 和权重(表 5),通过权重,计算正负理想解距离以及综合得分指数,并进行排序(表 6)。由表 6 可知,未施加生物炭处理和低量生物炭处理的 DCK、SCK、D3、S3 排名靠后,而施加大量生物炭处理的 D9、S9、D12、S12 排名靠前,说明施加高含量生物炭能够有效提高作物生境健康水平,但施加量最高的 D12 和 S12 处理排名并不是最高,说明过量生物炭施加量对于生境健康水平有一定抑制作用。在 DP 和 SP 耕作方式下,生物炭施加量达到 9 t/hm^2 时,综合得分指数最高,且随着生物炭施加量的增加,DP 调控效果优于 SP 处理,说明适量的生物炭施加量搭配深耕模式对农田生境调控效果最优。D9 处理排序最高,且综合得分为 0.721,相比于 DCK 提高0.6。综上所述,对于玉米作物生境的最佳调控模式为深耕配施 9 t/hm^2 生物炭。

3　讨 论

3.1　不同生物炭施加量和耕作方式对土壤结构和土壤氮磷组分的影响

土壤团聚体稳定性是评价土壤质量的重要指标之一。李慧等[19]研究发现,添加生物炭可增加土壤团聚体稳定性,对土壤性质的变化产生积极影响,有助于减少农田养分的流失,深耕处理有利于>1 mm 粒径土壤水稳性团聚体的形成,有效增加土壤团聚体的稳定性。与本研究的结果相似,施加生物炭能够增加水稳性团聚体的 GMD,降低团聚体的 PAD,且深耕效果优于浅耕,是由于生物炭本身具有较大的比表面积和有机大分子结构,能够促进微团聚体的聚集,而深耕可促进大团聚体的形成,进而增加团聚体的稳定性。但是,当生物炭施加量达到 12 t/hm^2 时,团聚体 GMD 降低,PAD 升高,是因为高量生物炭提高土壤有机质含量,使土壤松散,对土壤团聚体的形成产生不利影响,降低团聚体稳定性[20]。

生物炭的添加可有效提高土壤中的养分,抑制氮磷养分的流失。生物炭的施加对于磷元素含量的提高有助于维持作物的健康和生长,提高农田生态系统的生产力。生物炭可增加土壤氮素含量,提高氮素利用效率,同时,生物炭的施加可提高土壤团聚体稳定性,改善土壤有机质环境,从而提高土壤 TN 含量[21]。杜衍红等[22]研究认为,生物炭施入土壤后可增强土壤对 AP 的吸附和固持作用,减少 N_2O 的排放。生物炭因其本身的性质可对土壤磷元素进行吸附,减少磷素的流失,能够显著增加土壤 AP 含量[23]。生物炭可促进根际土壤中有机氮的氮供应和氮矿化,有利于氮固定,并且显著提高土壤有机质含量和 TN 含量[24],与本试验结果相似。本试验表明,向土壤中施加生物炭有助于土壤氮磷含量的提高,随着生物炭施加量的增加,土壤氮磷含量均呈先增加后减少变化趋势(图 3、图 4),在 D9 中表现最为明显,同时,可看出生物炭施加量达到 12 t/hm^2 时,土壤氮磷组分含量显著低于 9 t/hm^2,证明生物炭施加量对于土壤养分的促进作用并非随着施用量的增加而增加,当达到一定量后,对土壤养分的增加产生抑制作用。

HAN 等[25]研究发现，在黄土高原施加油松生物炭对土壤无机氮无显著影响，与本研究结果相反，可能是生物炭的种类及土壤性质不同所造成的结果。此外，生物炭裂解温度的不同也对土壤养分的影响产生差异，400 ℃热解的生物炭具有更多的含氧官能团，能够刺激养分交换，从而提高土壤养分含量[26]。

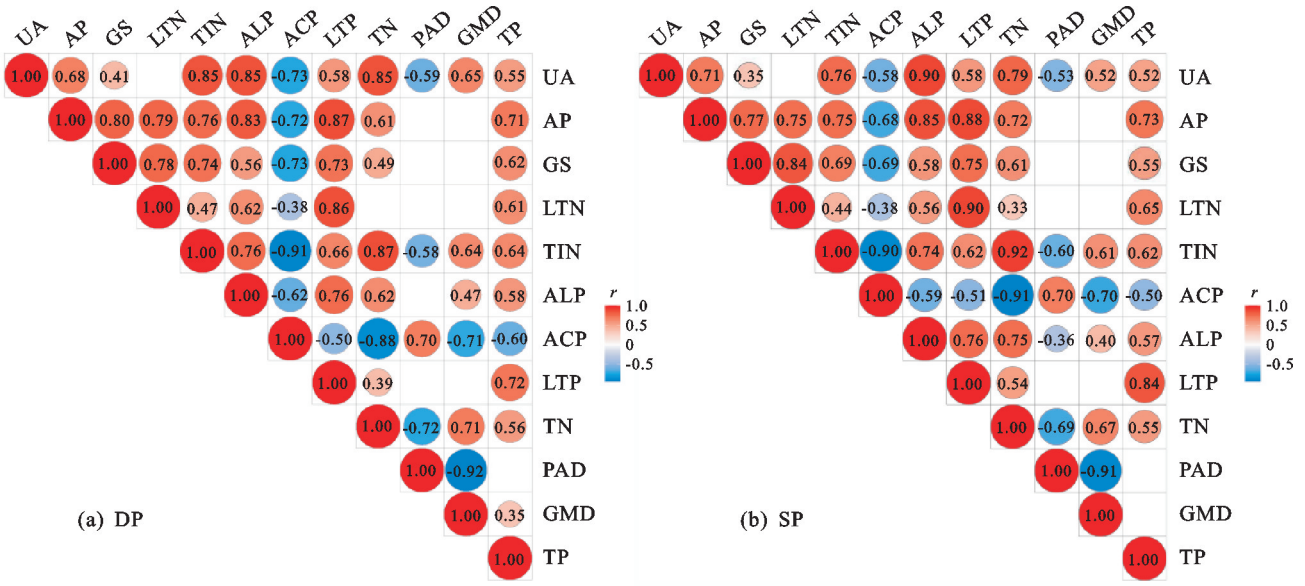


图 8 土壤氮磷成分、土壤结构、酶活性和叶片氮磷含量的相关性

Fig. 8 Correlation matrix of soil nitrogen and phosphorus components, soil structure, enzyme activity and leaf nitrogen and phosphorus content

表 3 作物生境评价指标体系

Table 3 Crop habitat evaluation index system

作物生境	指标名称	指标缩写	指标类型	作物生境	指标名称	指标缩写	指标类型
土壤结构	团聚体几何平均直径/mm	GMD	极大值	玉米生长	谷氨酰胺合成酶/[μmol/(h·g]	GS	极大值
	团聚体破坏百分比/%	PAD	极小值		酸性磷酸酶[μmol/(min·g)]	ACP	极小值
土壤养分	无机氮/(mg/kg)	TIN	极大值		SPAD	SPAD	极大值
	全氮/(g/kg)	TN	极大值		叶片全氮/(g/kg)	LTN	极大值
	有效磷/(mg/kg)	AP	极大值		叶片全磷/(g/kg)	LTP	极大值
	全磷/(g/kg)	TP	极大值	其他	干重/g		极大值
酶活性	脲酶/[μg/(d·g)]	UA	极大值		产量/(t/hm)		极大值
	碱性磷酸酶/[μmol/(d·g)]	ALP	极大值				

表 4 耕作模式和生物炭调控下指标标准化信息

Table 4 Table of standardized information on indicators under tillage patterns and biochar regulation

指标	SCK	S3	S6	S9	S12	DCK	D3	D6	D9	D12
GMD	0.229 3	0.251 1	0.262 0	0.371 2	0.305 7	0.240 2	0.262 0	0.294 8	0.491 3	0.360 3
PAD	0.378 6	0.347 7	0.340 0	0.247 3	0.309 1	0.363 2	0.340 0	0.301 3	0.208 6	0.285 9
TIN	0.270 0	0.271 1	0.304 3	0.356 4	0.351 6	0.257 5	0.281 8	0.322 1	0.361 2	0.361 2
TN	0.282 2	0.273 7	0.304 8	0.335 8	0.318 9	0.310 4	0.321 7	0.330 2	0.338 6	0.338 6
AP	0.277 3	0.283 1	0.312 6	0.341 6	0.335 7	0.283 4	0.303 4	0.326 3	0.344 3	0.344 1
TP	0.295 2	0.288 7	0.318 2	0.341 2	0.328 0	0.282 1	0.305 1	0.360 9	0.295 2	0.337 9
UA	0.272 4	0.280 6	0.296 8	0.356 1	0.340 7	0.271 3	0.298 8	0.342 7	0.352 0	0.334 5
ALP	0.265 3	0.271 9	0.298 3	0.374 6	0.339 3	0.261 0	0.297 3	0.312 9	0.360 5	0.356 2
GS	0.267 9	0.238 8	0.301 4	0.371 1	0.329 1	0.248 6	0.273 3	0.348 7	0.378 0	0.365 2
ACP	0.348 1	0.350 3	0.310 5	0.284 9	0.288 2	0.362 6	0.337 5	0.292 4	0.287 8	0.286 1
SPAD	0.287 8	0.280 9	0.306 3	0.351 4	0.331 7	0.272 2	0.285 3	0.327 1	0.354 4	0.350 5
LTN	0.289 9	0.289 5	0.310 2	0.336 2	0.321 7	0.301 8	0.302 6	0.332 2	0.336 6	0.336 4
LTP	0.285 5	0.296 0	0.309 1	0.335 3	0.335 3	0.275 1	0.288 2	0.330 1	0.351 0	0.345 8
干重	0.290 4	0.292 4	0.296 3	0.329 7	0.317 7	0.290 8	0.291 8	0.315 7	0.385 1	0.339 2
产量	0.278 1	0.292 5	0.310 1	0.338 2	0.326 4	0.279 7	0.305 8	0.328 9	0.360 6	0.331 6

表 5　不同调控下各指标权重

Table 5　Weighting of indicators under different regulations

指标	信息熵值(E)	权重/%
GMD	0.801	8.484
PAD	0.865	5.773
TIN	0.866	5.705
TN	0.916	3.608
AP	0.870	5.571
TP	0.699	12.860
UA	0.844	6.659
ALP	0.850	6.423
GS	0.873	5.435
ACP	0.889	4.724
SPAD	0.865	5.775
LTN	0.860	5.971
LTP	0.884	4.959
干重	0.708	12.455
产量	0.869	5.598

表 6　作物生境评价结果

Table 6　Results of crop habitat evaluation

处理	正理想解距离(D^+)	负理想解距离(D^-)	综合得分指数	排序
SCK	0.948	0.093	0.089	10
S3	0.919	0.113	0.109	9
S6	0.661	0.396	0.374	6
S9	0.319	0.805	0.716	2
S12	0.446	0.644	0.591	5
DCK	0.950	0.130	0.121	8
D3	0.804	0.267	0.249	7
D6	0.432	0.697	0.617	4
D9	0.357	0.920	0.721	1
D12	0.328	0.776	0.703	3

合理的耕作措施可有效改善土壤结构和土壤养分,为作物生长提供有利的环境和条件,并提高作物的产量。与传统耕作相比,免耕可节省劳动力及机械成本,同时能够富集土壤表层的有机质和养分,保护土壤结构,然而,长期免耕导致土壤质量退化,增加杂草密度,减少土壤有机质以及氮磷养分的有效性,对作物生长发育造成负面影响[27]。ZHANG 等[28]通过深耕对土壤养分的影响发现,深耕对春玉米的根长和比表面积有显著的促进作用,根系附近的氮素积累有显著的提高。深耕能够将土壤表层所含有的大部分营养物质转移到深层土壤中,且深耕可将耕作层变厚 20～40 cm,从而改变土壤物理性质,增加土壤养分含量,促进作物生长,与本试验的研究结果一致。在本研究中,深耕处理下的土壤 TIN、TN、AP 及 TP 的含量均高于浅耕处理,是因为深耕处理可改善土壤结构,提高团聚体稳定性,将土壤表层养分转移更深层的土壤中,改善土壤通气性,更好地调节土壤和微生物环境,相比于浅耕处理更利于玉米的生长发育。总体来说,深耕配合生物炭的应用能够提高土壤氮磷养分的含量,减少养分的流失,有效提高作物对养分的利用效率,而深耕与 9 t/hm^2 生物炭施加量相结合能更好地促进土壤养分的增加和利用。

3.2　不同生物炭施加量和耕作方式对土壤酶活性的影响

土壤酶活性能够反映微生物的活性,是土壤肥力和土壤环境变化的敏感指标。酶活性的变化对土壤养分循环、有机物的分解及土壤呼吸产生影响,生物炭在土壤中的施用可增强与养分循环相关的酶活性。本研究发现,生物炭的施加显著提高土壤 UA 和 ALP 的活性,DP 处理下更加明显,是因为生物炭所具备的疏松多孔的结构,能够防止土壤水分流失,改善土壤通气性,有利于保持稳定的土壤酶活性;另一方面,土壤中的氮磷组分能够为土壤酶提供有机底物。而生物炭的加入促进养分的增加,从而诱导酶活性的增加。生物炭可刺激土壤中的有机磷矿化来增强 ALP 的活性并通过改变 pH 来促进磷的解吸和溶解,以此来增加土壤有机磷含量,有利于作物的利用[29]。已有研究[30]表明,向土壤中施加 5 t/hm^2 的家禽粪便生物炭比施加 2.25 t/hm^2 的脲酶活性增加 32.0%;施加生物炭可提高土壤磷酸酶的活性,在与没有施加生物炭的处理相比,添加高量生物炭的碱性磷酸酶的活性增加 11.0%[31]。由此可见,高水平的施炭量对于土壤中酶活性的增加有着更为显著的效果。本研究发现,当施炭量超过 9 t/hm^2 之后,UA 和 ALP 的活性受到抑制,可能是由于生物炭施用量过高,释放较多的抑制剂,从而干扰酶催化反应。比如,在热解过程中,植物生物炭产生苯并呋喃、多环芳烃和杂环化合物,对土壤酶产生抑制作用[32]。

3.3　不同生物炭施加量和耕作方式对玉米酶活性及生长发育的影响

氮磷作为玉米生长发育所必需的营养元素,对于产量的评估起到关键作用。GS 是参与无机氮转化以及氨同化的关键酶,是植物吸收氮素的重要因子[33]。植物获取磷酸盐是一个重要的过程,直接涉及作物产量的优化,植物体内分泌的 ACP 的变化可有效反映植物是否处在缺磷的状态。葛国锋等[34]研究发现,施加氮肥相比于不施加氮肥能够提高植物生育前期的 GS 活性;WANG 等[35]研究发现,当面临磷胁迫时,植物可通过增强 ACP 的分泌来进行调节,施加有机肥可改善植物的 ACP 活性,促进植物对磷酸盐的吸收。本试验发现,较高的生物炭施加量可提高玉米

叶片中GS的活性，同时，ACP的活性低于不施加生物炭和较低生物炭施加量的处理，其中，在生物炭施加量达到9 t/hm²时，GS活性最高，而ACP活性相较于其他处理较弱，是因为在施加9 t/hm²的生物炭时，土壤条件适宜，促进氮磷养分的提高，对调节作物酶活性产生积极影响，进而有助于作物的吸收和利用。程效义等[36]研究发现，向土壤中施加生物炭后，生物炭通过吸附能力吸附多种形式的氮，经过物化反应重新释放，为植物提供可利用的营养物质；KHAN等[37]研究发现，施用生物炭能够显著影响玉米作物的生长特性，施加不同剂量的生物炭可改善玉米植株的生长，增加叶面积指数、干重及籽粒灌浆速率和持续时间。在本研究中，施用生物炭能够显著提高玉米的氮磷含量、干重和产量，生物炭的施加促进玉米对于氮磷的吸收和利用，从而促进玉米的生长。在深耕模式下，施加生物炭能够有效提升玉米叶片的SPAD、全氮和全磷含量，在D9处理下的玉米生理指标优于其他处理，是由于生物炭的施加提高土壤中的养分，为植物提供更好的养分供给条件，刺激植物中氮磷相关的酶活性的提升，促进植株的生长发育。武爱莲等[38]研究认为，过量的生物炭为微生物的生长和繁殖提供大量的碳源，加强微生物与作物对氮素的竞争关系，降低作物吸收氮的速率，进而对产量造成影响。当生物炭用量达到12 t/hm²时，玉米的SPAD、氮磷含量和产量等均低于9 t/hm²，原因是添加过量的生物炭增加土壤中有机碳的含量，破坏土壤中的碳氮平衡，进而对作物生长产生负面影响。

4 结论

(1)在深耕和浅耕方式下，施加生物炭可有效增加土壤中的氮磷组分，增强土壤酶活性，提高作物对于养分的吸收和利用，促进作物的生长发育并提高作物产量，深耕和浅耕可通过改变土壤结构和酶活性来改善土壤环境，打破犁底层，增加耕层厚度，促进养分的积累。在9 t/hm²生物炭施加量下，深耕和浅耕间存在显著差异，D9相比于S9产量提升6.63%，且生境综合评价中相同生物炭施加量下，深耕排序均高于浅耕，说明深耕效果优于浅耕。9 t/hm²生物炭施加量相较于其他施加量存在显著差异($p<0.05$)，且产量提升3.63%～28.90%。

(2)适量的生物炭施加量可改善土壤养分环境并作物提高产量；而施用量过高或者过低则对土壤养分和作物生长发育的促进效果不明显或产生一定的抑制作用；施加9 t/hm²的生物炭对于土壤养分、微生物环境及玉米生理特性的改善有最佳的效果；D9和S9处理下的玉米产量达到17.37，16.29 t/hm²，相比于0分别提高28.9%和21.6%。

(3)深耕模式下施加9 t/hm²的生物炭可作为有利于农田生境健康的调控模式。生物炭和深耕可改善黑土区土壤功能，增加玉米作物产量，对松嫩平原黑土区抑制土壤退化及保障粮食增产稳产具有一定意义，为黑土区农田土壤环境和作物生境研究提供实践依据。

参考文献：

[1] ZHANG M, HOU R J, LI T X, et al. Study of soil nitrogen cycling processes based on the ^{15}N isotope tracking technique in the black soil areas[J].Journal of Cleaner Production,2022,375:e134173.

[2] MELO L B B, BENEVENUTE P A N, BARBOSA S M, et al. Spatial and temporal electrical resistivity dynamics in a dense Ultisol under deep tillage and different citrus root-stocks[J]. Soil and Tillage Research,2023,228:e105629.

[3] 王玉玲，李军，柏炜霞.轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作土壤生产性能的影响[J].农业工程学报,2015,31(1):107-116.
WANG Y L, LI J, BAI W X. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in Loess Platform region of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(1):107-116.

[4] HU R W, LIU Y J, CHEN T, et al. Responses of soil aggregates, organic carbon, and crop yield to short-term intermittent deep tillage in southern China[J].Journal of Cleaner Production,2021,298:e126767.

[5] LIANG X Q, JI Y J, HE M M, et al. Simple N balance assessment for optimizing the biochar amendment level in paddy soils[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis,2014,45(9):1247-1258.

[6] YANG C D, LU S G. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol[J].The Science of the Total Environment,2022,805:e150325.

[7] ADETUNJI A T, NCUBE B, MEYER A H, et al. Soil pH, nitrogen, phosphatase and urease activities in response to cover crop species, termination stage and termination method[J].Heliyon,2021,7(1):e05980.

[8] PANDEY B, SUTHAR S, CHAND N. Effect of biochar amendment on metal mobility, phytotoxicity, soil enzymes, and metal-uptakes by wheat (*Triticum aestivum*) in contaminated soils[J].Chemosphere,2022,307(Pt 2):e135889.

[9] 吕淑敏，曲小菲，王林华，等.不同沼液用量对夏玉米源库代谢关键酶及产量的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):338-343.
LÜ S M, QU X F, WANG L H, et al. Effects of apply-

ing biogas liquid manure on the key source-sink metabolism enzymes and grain yield of summer maize[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(2):338-343.

[10] 张丽梅,郭再华,张琳,等.缺磷对不同耐低磷玉米基因型酸性磷酸酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):898-910.
ZHANG L M, GUO Z H, ZHANG L, et al. Effects of phosphate deficiency on acid phosphatase activities of different maize genotypes tolerant to low- p stress[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2015,21(4):898-910.

[11] 周明星,樊军,王茜,等.免耕覆盖与生物炭对黑垆土团聚体稳定性和腐殖质性质的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(5):848-859.
ZHOU M X, FAN J, WANG Q, et al. Effects of no-tillage mulching and biochar application on the stability and humus properties of black loam soil aggregate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2023,29(5):848-859.

[12] 石国新.生物炭与耕作措施联合调控对季节性冻土区农田生境健康及作物生长的影响研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.
SHI G X. Effects of combined regulation of biochar and tillage on habitat health and crop growth in seasonal frozen soil area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 3 版.北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M].3 rd.Beijing: China Agricultural Press,2000.

[14] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:294-313.
GUAN S Y. Soil enzymes and research methodology [M].Beijing: Agricultural Press, 1986:294-313.

[15] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J].Soil Science Society of America Journal,1986,50(3):e627.

[16] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:125-127
ZOU Q. Plant physiology laboratory instruction[M]. Beijing: China Agricultural Press,2000:125-127.

[17] 邱红波.玉米酸性磷酸酶活性的 QTL 分析[D].重庆:西南大学,2013.
QIU H B. QTL analysis of acid phosphatase activity in maize[D]. Chongqing: Southwest University,2013.

[18] 雷勋平, ROBIN Q,刘勇.基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2016,32(13):243-253.
LEI X P,ROBIN Q, LIU Y. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13):243-253.

[19] 李慧,代新俊,高志强.夏闲期耕作对黄土高原旱地麦田土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J].中国农业科学,2018,51(13):2524-2534.
LI H, DAI X J, GAO Z Q. Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different tillage treatments in summer fallow on the Loess Plateau[J].Scientia Agricultura Sinica,2018,51(13):2524-2534.

[20] 袁晶晶,齐学斌,赵京,等.生物炭配施沼液对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(1):80-86.
YUAN J J, QI X B, ZHAO J, et al.The effect of biochar amendment and slurry application on soil aggregation and organic carbon distribution[J].Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(1):80-86.

[21] ZHANG C, ZHAO X, LIANG A J, et al. Insight into the soil aggregate-mediated restoration mechanism of degraded black soil via biochar addition: Emphasizing the driving role of core microbial communities and nutrient cycling [J]. Environmental Research, 2023, 228: e115895.

[22] 杜衍红,蒋恩臣,王明峰,等.炭-肥互作对芥菜产量和肥料利用率的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):59-64.
DU Y H, JIANG E C, WANG M F, et al. Effect of interaction of biochar and fertilizer on mustard yield and fertilizer utilization rate[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):59-64.

[23] GAO S, DELUCA T H. Rangeland application of biochar and rotational grazing interact to influence soil and plant nutrient dynamics [J]. Geoderma, 2022, 408: e115572.

[24] WANG D, LAN Y, CHEN W F, et al. The six-year biochar retention interacted with fertilizer addition alters the soil organic nitrogen supply capacity in bulk and rhizosphere soil[J].Journal of Environmental Management, 2023,338:e117757.

[25] HAN F P, REN L L, ZHANG X C. Effect of biochar on the soil nutrients about different grasslands in the Loess Plateau[J].Catena,2016,137:554-562.

[26] MANDAL S, PU S Y, ADHIKARI S, et al. Progress and future prospects in biochar composites: Application and reflection in the soil environment[J].Critical Reviews in Environmental Science and Technology,2021, 51(3):219-271.

[27] YANG H S, ZHOU J J, FENG J X, et al. Ditch-buried straw return: A novel tillage practice combined with tillage rotation and deep ploughing in rice-wheat rotation systems[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam:

Elsevier,2019:257-290.

[28] ZHANG X, WANG M G, ZHANG D D, et al. Increasing soil organic carbon pools and wheat yields by optimising tillage and fertilisation on the Loess Plateau in China[J].European Journal of Soil Science,2022,73(1):e13197.

[29] QI S T, YANG S H, LIN X Y, et al. The long-term effectiveness of biochar in increasing phosphorus availability and reducing its release risk to the environment in water-saving irrigated paddy fields[J].Agricultural Water Management,2023,282:e108295.

[30] MIERZWA-HERSZTEK M, GONDEK K, BARAN A. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth[J].Applied Soil Ecology,2016,105:144-150.

[31] TAHERI M A R, ASTARAEI A R, LAKZIAN A, et al. Sorbitol and biochar have key roles in microbial and enzymatic activity of saline-sodic and calcareous soil in millet cropping[J].Rhizosphere,2022,24:e100598.

[32] ZHU X M, CHEN B L, ZHU L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review[J].Environmental Pollution,2017,227:98-115.

[33] PINTO E, FIDALGO F, TEIXEIRA J, et al. Influence of the temporal and spatial variation of nitrate reductase, glutamine synthetase and soil composition in the N species content in lettuce (*Lactuca sativa*)[J].Plant Science,2014,219/220:35-41.

[34] 葛国锋,王树会,刘卫群.氮肥对不同烤烟品种碳氮代谢关键酶活性的影响[J].中国农业科技导报,2014,16(1):59-64.
GE G F, WANG S H, LIU W Q. Effects of nitrogen fertilizer on activities of key enzymes of carbon and nitrogen metabolism of different flue-cured tobacco varieties[J].Journal of Agricultural Science and Technology,2014,16(1):59-64.

[35] WANG B S, WANG Y, SUN Y, et al. Watermelon responds to organic fertilizer by enhancing root-associated acid phosphatase activity to improve organic phosphorus utilization[J].Journal of Plant Physiology, 2022,279:e153838.

[36] 程效义,孟军,黄玉威,等.生物炭对玉米根系生长和氮素吸收及产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2016,47(2):218-223.
CHENG X Y, MENG J, HUANG Y W, et al. Effect of biochar on root growth, absorption of nitrogen and maize yield[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2016,47(2):218-223.

[37] KHAN I, IQBAL B, ALI KHAN A, et al. The interactive impact of straw mulch and biochar application positively enhanced the growth indexes of maize (*Zea mays* L.) crop[J].Agronomy,2022,12(10):e2584.

[38] 武爱莲,王劲松,董二伟,等.施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J].土壤学报,2019,56(1):176-185.
WU A L, WANG J S, DONG E W, et al. Effect of application of biochar and straw on fate of fertilizer N in cinnamon soil[J].Acta Pedologica Sinica,2019,56(1):176-185.

(上接第355页)

[23] 吴建繁,王运华,贺建德,等.京郊保护地番茄氮磷钾肥料效应及其吸收分配规律研究[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):409-416.
WU J F, WANG Y H, HE J D, et al. Study on the effect, absorption and distribution of NPK on tomato in greenhouse of Beijing suburbs[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2000,6(4):409-416.

[24] 褚屿,骆洪义,林举梅,等.番茄对氮磷钾及中微量元素的吸收规律研究[J].中国土壤与肥料,2021(1):247-255.
CHU Y, LUO H Y, LIN J M,et al. Study on the absorption law of nitrogen, phosphorus, potassium and trace elements of tomatoes[J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2021(1):247-255.

[25] 郭孝宇,路强,张宇涵,等.喷施磷肥对樱桃番茄品质和营养元素含量的影响[J].山东农业科学,2022,54(5):120-127.
GUO X Y, LU Q, ZHANG Y H, et al. Effects of spraying phosphate fertilizer on quality and nutrient content of cherry tomato[J].Shandong Agricultural Sciences,2022,54(5):120-127.