

黑土夏玉米施用生物质炭最佳施用时期和最佳用量

韩晓亮, 王秀茹, 侯琨, 贾芳芳, 孙妍, 赵森, 王铭浩, 阎世煜, 马景行

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 生物质炭作为一种新型的土壤改良剂, 不仅可以维持土壤肥力、改善土壤退化和污染, 也可提升作物长势及生产效率。以松嫩平原黑土区为研究对象, 设置了3种生物质炭施加水平 [$C_5(5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$, $C_{10}(10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$, $C_{15}(15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$], 各水平设置下3种施加方案 [F_1 (秋季施加), F_2 (春秋两季各施加一半), F_3 (春季施加)], 同时设置1组对照 [BL(无生物质炭施加)], 共计10种处理。比较分析了不同处理条件下夏玉米 *Zea mays* 植株根系特征、氮素空间分布状况、根系呼吸强度以及氮素利用效率等指标差异, 构建生物质炭用量与氮素利用效率以及收获指数之间的关联函数, 进而阐述生物质炭调控模式与作物生产效率之间的作用关系, 为寻求生物质炭合理、高效利用的管理模式提供理论指导。结果表明: 夏玉米根系长势受生物质炭调节的影响较大, 其中 C_5F_1 , $C_{10}F_1$ 和 $C_{15}F_1$ 处理条件下植株根系长度分别相对于 BL 处理增加了 1 009.10, 1 640.05 和 1 270.24 cm, C_{10} 水平效果较为明显。同时, 在 F_2 和 F_3 方案下, 3种不同生物质炭用量处理表现出相同的规律; 生物质炭的调控作用有效抑制了土壤氮素的无效流失, 并且在 $C_{10}F_1$ 处理条件下, 土壤的固氮效果达到最优; 生物质炭的保水性和保肥性提升了作物根系的呼吸强度, 随着生物质炭的施入量增加, 作物呼吸强度效果表现出先增加后减小的趋势, 适宜地增加生物质炭的用量可以有效提升植株根系的代谢活动; 生物质炭的调控作用在一定程度上促进了作物产量的积累, 随着生物质炭施入量的增加以及施入方案的调整, $C_{10}F_1$ 处理条件下的作物产量、氮素利用效率以及收获指数最高。另外, 生物质炭的施入量与作物产量、氮素利用效率等指标之间具有显著的二次函数关系, 表明生物质炭供应与植株生产力之间存在最佳阈值。图6表2参27

关键词: 土壤肥科学; 生物质炭; 调控; 根系特征; 氮素分布; 呼吸强度; 收获指数

中图分类号: S158.3; S714.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)01-0096-11

Application period and dosage optimums for biochar additions in black soil with summer maize

HAN Xiaoliang, WANG Xiuru, HOU Kun, JIA Fangfang, SUN Yan, ZHAO Sen, WANG Minghao,
YAN Shiyu, MA Jinghang

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a new soil conditioner, biochar not only maintains soil fertility, improves soil degradation, and resolves pollution problems, also enhances crop growth and production efficiency. To promote a low-carbon economy for the world with biochar development, the Songnen Plain black soil area was selected as the research object. A total of ten treatments were set with three biochar application levels (C_5 - $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, C_{10} - $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, and C_{15} - $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$); three different application schemes (F_1 - applied in autumn, F_2 - half applied in spring and half in autumn. and F_3 - applied in spring) for each application level; and one control group (BL- no biochar applied), and each test was processed in parallel. Combined with crop growth period, and regular artificial sampling. On this basis, the characteristics of the plant root system, nitrogen (N) spatial distribution, root respiration, and N-use efficiency for different treatment conditions were compared and analyzed. A correlation

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-03-07

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201401001)

作者简介: 韩晓亮, 从事水土保持与农业生态等研究。E-mail: hanxl@bjfu.edu.cn。通信作者: 王秀茹, 教授, 博士生导师, 从事水土保持与农田水利等研究。E-mail: wang-xr@163.com

function of biochar amount and N-use efficiency versus the harvest index was constructed, and then the relationship between the biochar control mode and crop production efficiency was expounded. Results of the study showed that compared to the BL treatment, root length of plants with biochar treatments increased for C₅F₁ (1 009.10 cm), for C₁₀F₁ (1 640.05 cm), and for C₁₅F₁ (1 270.24 cm) as did F₂ and F₃ for the three biochar application treatments and the results passed the significance test of $P < 0.05$. The control effect of biological carbon effectively inhibited the ineffective loss of soil N, and the N fixation effect of the soil reached the best level with the C₁₀F₁ treatment. Biochar's water retention and fertility enhanced the respiration rate of the plant roots; an increase in the biochar application rate first increased and then decreased the respiration rate ($P < 0.05$). Regulation of biochar additions promoted the accumulation of crop yield with an increase in the biochar application rate and adjustment of the application scheme; the C₁₀F₁ treatment had the best yield, N-use efficiency, and harvest index ($P < 0.05$). In addition, there was a quadratic function relationship between the biochar application rate and crop yield, N-use efficiency ($P < 0.05$), and other indicators meaning that there was an optimal threshold between biochar supply and plant productivity. Through the above studies, it can be seen that appropriate amount of biochar, with appropriate addition period, can effectively increase the growth and metabolism of crop lines, thereby increasing the yield and production efficiency of crops. Thus, this study provided theoretical guidance for seeking a reasonable and efficient management model with biochar, and showed that appropriately increasing the amount of biochar could effectively promote plant root metabolism. [Ch, 6 fig. 2 tab. 27 ref.]

Key words: soil fertilizer science; biochar; regulation; root traits; nitrogen distribution; respiration rate; harvest index

水分和养分是影响作物生长发育各项生理指标的重要环境因子，合理的灌溉制度及肥料补给是作物高效生产的重要保障^[1-2]。作物对于土壤养分的吸收主要是依赖于其根系活性，适宜的土壤环境能够有效促进根系对于土壤氮、磷、钾元素的吸收，从而保证作物果实的积累和有效物质的生成^[3-5]。生物质炭作为一种新型的土壤改良剂，具有孔隙度高、表面积大，并且聚集大量负电荷的性能^[6-7]。生物质炭的施入可以有效地改善农田土壤的颗粒结构组成，调节土壤的酸碱平衡^[8]，提高土壤的保水效果^[9]，吸附养分并提高其利用效率^[10]，为作物生长提供良好的环境，提高水肥利用效率，确保粮食的稳定增产。学者们针对生物质炭的调节改良作用进行了大量研究，表明生物质炭有极强的吸附性及抗氧化性，对于土壤理化改良、土壤养分状况改善具显著的效果^[11]。生物质炭提升了土壤的通透性^[12]、持水性以及渗透性^[13-14]，进而调节了土壤的水热特征参数，有效地减小了土壤的地表径流和土壤侵蚀过程，提升了水土保持效果。生物质炭具有较大的比表面积、较强的表面负电荷量以及较高的电子密度等特点^[15]，这些性质增强了土壤的吸附和金属固持能力。生物质炭能够有效调节土壤的酸碱度，为作物生长提供良好的土壤环境^[16]。同时，生物质炭与肥料施配能够显著提高肥料利用效率，进而改善玉米 *Zea mays* 产量构成因素，提升玉米产量^[17-18]。大量研究大多侧重于土壤的结构以及养分的调节效应，对于植株根系的养分吸收以及呼吸代谢效应研究较少。本研究立足于东北松嫩平原黑土耕作区，探究不同生物质炭施入方式对于夏玉米植株的根系生长状况、氮素利用效率以及根系的呼吸作用的影响，旨在探索黑土区生物质炭对于植株生物性状的改善以及氮素利用效率的提升，为提升黑土区生物质炭还田技术及水土资源的高效利用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区域概况

该试验区位于哈尔滨市水利科学研究院万家试验站(45°53′~45.13′N, 123°45′~124°13′E)，黑龙江省南部，地处松嫩平原腹地，平均海拔为134 m。该区域四季分明，冬季寒冷漫长，夏季高温多雨。全年平均降水量为578.4 mm，受温带大陆性季风气候的影响，降水主要集中在夏季的7-8月，约占全年降水量的60%，为夏季作物生长提供了充足的水分补给。该区域的主要土壤类型为黑色壤土，经取样分

析(表1)可知,土壤的平均干容重为 $1.28\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,饱和含水率为46.92%,田间持水率为36.88%。另外,通过NKT 6100-C型激光粒度仪检测土壤中的颗粒机械组成成分,其中黏粒($<0.002\text{ mm}$)占19.58%,粉粒($0.002\sim 0.020\text{ mm}$)占33.21%,砂粒($\geq 0.020\text{ mm}$)占47.21%。土壤颗粒结构空隙相对较大,持水性较强。区域土壤养分较为丰富,经取样分析可知,土壤有机质为 $3.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷为 $25.90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾为 $251.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮为 $69.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表1 试验区土壤物理参数

土层深度/cm	饱和含水率/%	初始含水率/%	田间持水率/%	土壤容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_{\text{有机质}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	土壤质地
0~10	43.30	28.13	33.55	1.46	3.45	壤土
10~20	42.50	29.07	35.90	1.50	2.68	壤土
20~30	40.11	27.68	34.67	1.52	1.32	壤土
30~40	40.85	27.99	35.12	1.57	0.79	壤土
40~50	38.13	26.85	33.99	1.65	2.34	壤土

1.2 试验布置

该试验于2017年4~11月之间进行,夏玉米的品种选用‘郑单958’‘Zhengdan 958’。该品种适合于东北地区砂质壤土,具有明显的高产抗旱优势。试验共设置30个试验小区,各小区大小为 $6\text{ m}\times 8\text{ m}$ 。结合区域的土壤结构状况以及养分指标水平,试验区的生物质炭施入量共设置3个水平: $C_5(5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$, $C_{10}(10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$ 和 $C_{15}(15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$ 。同时,各水平生物质炭的施加时期为前1年秋季(F_1)和春秋两季各施一半(F_2)和春季(F_3)等3种方式。另外,设置1个对照处理(BL),重复3次·处理 $^{-1}$ 。供试土壤类型为黑色壤土,生物质炭的类型为玉米秸秆生物质炭,采购于辽宁金和福农业开发有限公司。制备方式为在无氧条件下 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 高温裂解。经检验可知:生物质炭的总有机碳为 $702.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮为 $12.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷为 $2.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在播种前期,统一施加肥料,肥料类型选用尿素,施肥方式采用开沟填埋,并且在玉米大喇叭口期进行相同剂量的追加施肥。在作物全生育过程中,土壤含水率保持在70%~100%田间持水率。夏玉米植株的行间距为30 cm(具体布置方式如图1)。

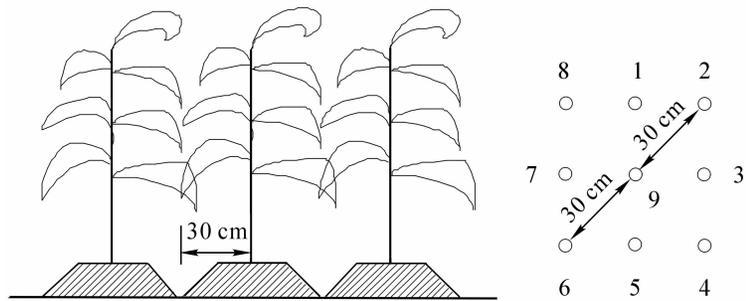


图1 土壤取样方式

Figure 1 Soil sampling method

1.3 指标测量

根系特征参数:在作物生长的不同时期内,按照土壤剖面法,以植株茎秆为中心,以30 cm为半径,用根钻在植株根系的下方位置分层取样至50 cm处,将根系装入尼龙网中,在水中浸泡30 min,用清水将其冲洗干净。采用HP Scanjet 8200扫描仪对不同土层处植株根系进行图片扫描,最后用软件(Delta-T Area Meter Type AMB2, Delta-T Devices, Cambridge)分析植株根系的长度(cm),根表面积(cm^2)和根体积(cm^3),同时采用烘干法测定植株根质量(g)。

土壤硝态氮空间分布:以植株根系为中心,在根系分布区域内,设置3个分布均匀的取样点,并且取样的层面分别为10, 20, 30, 40, 50 cm。在各个取样点分别称取12 g的新鲜土壤样品,采用流动分析仪(BRAN+LUEBBE)测定土壤硝态氮。

空间吻合度计算:根据根密度与土壤硝态氮质量分数的乘积来计算空间吻合度^[19-20]。种植行根长密度与土壤硝态氮空间吻合度(RLD-N)=种植行根长密度 \times 土壤硝态氮质量分数;种植行根干质量密度与土壤硝态氮空间吻合度(RWD-N)=种植行根干质量密度 \times 土壤硝态氮质量分数。

根系呼吸:采用LICOR公司生产的LI-8100型土壤呼吸仪测定土壤呼吸效率,研究中利用根系排除法来计算根系的呼吸强度,即用根区土壤呼吸强度减去非根区土壤的呼吸强度^[21-22]。

植株氮素积累:将不同生育时期获取的植株样品烘干、称量、粉碎,采用硫酸-过氧化氢(H_2SO_4 -

H₂O₂)对样品进行联合消煮,进而采用 Bran+Luebbe AA3 型号流动分析仪测定植株氮素,生育期氮素积累量(mg)= \sum 某生育期各器官含氮量(mg·kg⁻¹)×干物质积累量(g)/1 000。

植株产量测定:在成熟期各个试验小区随机取 30 个果穗,装入尼龙网袋中,晒干后进行脱粒称量,得到籽粒产量。

氮素利用效率(kg·kg⁻¹):作物经济产量/植株氮素积累量。作物收获指数:产量/生物量。

1.4 数据处理方法

在研究过程中,采用 Excel 2013 进行数据的统计整理,采用 SPSS 19.0 进行试验数据统计分析,同时采用软件 Origin 8.0 和 SigmaPlot 12.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对植株根系特征的影响

不同生物质炭调控模式下夏玉米根系的特征参数如表 2 所示。总体分析可知:施炭量对玉米的各个拔节期、抽穗期和灌浆期各项生理指标的影响均达到了极显著水平($P<0.01$),生物质炭施加时间在各个生育期对于拔节期植株的根长影响不显著,而两者的交叉作用对于抽穗期植株的根表面积和根质量影响不显著。

表 2 不同生物质炭调控模式下夏玉米根系特征

Table 2 Characteristics of root systems of summer maize under different biological charcoal regulation modes

处理	拔节期				抽穗期				灌浆期			
	根长/cm	根表面积/cm ²	根质量/g	根体积/cm ³	根长/cm	根表面积/cm ²	根质量/g	根体积/cm ³	根长/cm	根表面积/cm ²	根质量/g	根体积/cm ³
BL	4 467.12 b	1 207.32 f	4.41 b	46.12 a	5 789.21 a	1 703.46 d	6.31 d	65.12 c	6 451.43 d	1 911.24 d	7.11 d	73.42 d
C ₅ F ₁	5 476.22 a	1 326.00 efg	6.33 b	62.46 b	6 832.23 c	1 923.25 c	7.75 c	79.13 d	7 568.21 c	2 257.21 bc	8.52 bc	83.12 c
C ₁₀ F ₁	6 107.17 b	1 698.00 a	7.52 a	68.53 a	8 167.31 a	2 207.21 a	9.32 a	92.48 a	8 447.85 a	2 538.27 a	9.96 a	97.25 a
C ₁₅ F ₁	5 737.36 c	1 541.00 bc	6.59 b	64.14 b	7 531.53 b	2 057.78 b	8.35 b	87.15 b	7 968.51 b	2 467.29 a	8.89 b	86.14 b
BL	4 467.75 a	1 207.00 b	4.41 a	46.15 d	5 789.54 c	1 703.59 d	6.31 b	65.16 d	6 451.39 b	1 911.38 e	7.11 c	73.47 e
C ₅ F ₂	4 796.24 d	1 367.00 def	5.28 d	54.77 d	6 537.75 e	1 786.87 b	6.97 e	74.53 e	6 758.54 ef	2 037.64 d	7.64 ef	78.23 d
C ₁₀ F ₂	5 188.31 d	1 597.00 ab	6.37 b	58.32 c	6 753.24 cd	2 059.69 c	7.79 c	81.25 c	7 366.64 d	2 287.78 b	8.21 cd	86.68 b
C ₁₅ F ₂	5 079.87 e	1 446.00 cd	5.69 c	55.28 d	6 681.37 d	1 931.15 d	7.28 d	77.37 b	6 854.57 e	2 209.61 bc	7.88 def	81.36 c
BL	4 467.66 d	1 207.00 f	4.41 d	46.14 b	5 789.85 d	1 703.77 c	6.31 g	65.16 d	6 451.24 b	1 911.35 b	7.11 d	73.45 ef
C ₅ F ₃	4 559.21 e	1 233.00 g	4.68 f	47.13 f	5 937.46 g	1 745.58 d	6.45 f	68.53 g	6 537.58 g	1 967.59 d	6.98 g	68.47 f
C ₁₀ F ₃	4 786.74 f	1 418.00 de	5.13 de	51.24 e	6 489.27 e	1 924.28 c	7.33 d	73.44 ef	7 267.94 d	2 237.81 bc	7.95 de	79.12 d
C ₁₅ F ₃	4 607.34 f	1 287.00 fg	4.87 ef	48.4 ef	6 244.38 f	1 858.71 cd	6.97 e	72.18 f	6 678.61 fg	2 159.52 c	7.54 f	72.11 e
显著性检验(F 值)												
因素 1	95.32**	157.61*	141.22*	158.46**	163.53*	245.33**	124.87*	112.36**	80.23**	54.21**	41.81*	102.50*
因素 2	12.42	20.63*	17.24*	34.21**	19.65*	14.21*	28.54**	51.21**	21.85**	17.64*	19.64*	32.54**
交叉	0.78*	0.98**	1.21*	1.34**	3.24**	5.24	1.18	2.41*	0.54**	0.87*	0.61*	0.98*

说明:不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。因素 1 代表施炭量;因素 2 代表施入时间;交叉代表施炭量×施入时间。*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$)

在拔节期内,C₅F₁处理下,植株根系的总长为 5 476.22 cm,由于生物质炭施入量的差异,C₁₀F₁和 C₁₅F₁处理下的总根长分别相对于 C₅F₁处理增加了 630.95 和 261.14 cm,表明在 F₁方案处理下(前 1 年秋季施加生物质炭),随着生物质炭施入量的增加,生物质炭对于土壤的空隙结构及养分供应具有较好的调节作用,并且 C₁₀F₁处理下根系的生长优势显著,能够有效促进根系的生长。与此同时,对比 F₂时期下的 3 种生物质炭调控模式可知,C₅F₂,C₁₀F₂和 C₁₅F₂调控模式下的玉米根系长度总体水平上相对于 F₁时期有所降低,同时,C₁₀F₂处理下总长分别相对于 C₅F₂和 C₁₅F₂条件增加了 8.17%和 2.14%。此外,C₅F₃,C₁₀F₃,C₁₅F₃处理下根系的总长分别相对于 F₁和 F₂时期施加生物质炭处理有所降低。由此可以发

现：从生物质炭施加方案角度分析， F_1 方案要优于 F_2 和 F_3 ，而从有机碳施入量的角度分析，随着生物质炭施入量的增加， C_{10} 处理要优于 C_5 和 C_{15} ，表明在一定范围内增加生物质炭的施入量可有效促进根系的生长，而过量的生物质炭对于玉米植株根系的发育影响不显著。

抽穗期内，植株对于土壤养分的吸收能力不断增强，根系总长度也在不断的增加。具体分析可知： C_5F_1 处理条件下植株根系总长达到6 832.23 cm，而 $C_{10}F_1$ 和 $C_{15}F_1$ 处理分别相对于 C_5F_1 处理增加了1 335.08和699.30 cm，随着植株生育期的进行，根系总长的差异显著。与拔节期变化趋势相似，在 F_2 方案模式下，其根系的整体长势相对于 F_1 方案有所减弱，但随着施入量的增加， $C_{10}F_2$ 处理下植株根系长势突出，根系长度从高到低依次为 $C_{10}F_2$ ， $C_{15}F_2$ ， C_5F_2 。而在 F_3 时期施加生物质炭，植株根系的总长度整体水平弱于 F_1 和 F_2 水平，但是其根系生长水平平均优于对照处理(BL)。

在灌浆期内，植株个体基本发育成熟，因此，植株根系之间的差异逐渐减弱。比较分析可知： C_{10} ($10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)施入水平条件下植株根系的长势具有较强的优势，并且在 $C_{10}F_1$ 处理下最为明显。由此可知，在 F_1 ， F_2 和 F_3 这3种施肥方案下， F_1 方案能够较好地满足作物根系生长的需要，同时，适量的施加生物质炭可以有效促进根系的生长。

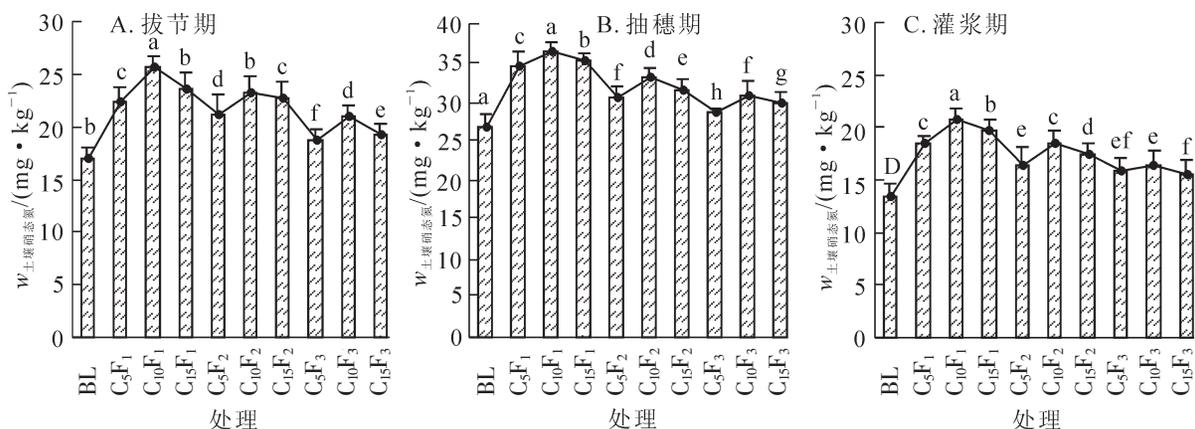
在此基础之上，分析植株根系的表面积、根体积和根系质量可知，在各个生育期内生长趋势与总根长相似。可知：在3种不同时期施入生物质炭具有不同的调节效果，其中，前1年秋季施加生物质炭，土壤经历了冬季的冻融循环作用，土壤的通透性、养分含量得到良好的休整，能够为植株的生长提供适宜的水肥环境，有效提升了植株根系的生长优势，而在秋季和春季各施加一半、春季施加2种方案的作用效果有所减弱。随着生物质炭的施入量增加，适量的生物质炭补给能够提高土壤的保水保肥效果，而过量的生物质炭补给对于植株分析的长势效果差异影响减弱。

2.2 生物质炭对土壤硝态氮空间变异影响

在夏玉米生育过程中，按照上述图1示例进行土壤取样，图1中北方向代表1号点位，东北方向代表2号点位，东方向代表3号点位，其他点位依次排列。研究中取各个点位土壤硝态氮平均值代表不同处理条件下土壤硝态氮的空间变异状况。

由图2可知：在拔节期， C_5F_1 ， $C_{10}F_1$ ， $C_{15}F_1$ 处理下的土壤硝态氮质量分数分别为22.34，25.61和223.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，分别相对于BL处理提升了5.52，8.70和6.65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于生物质炭具有一定的吸附效果，减弱了土壤受雨水冲刷以及水土流失所导致的氮素消耗，固氮能力显著增强，在 F_1 方案条件下， $C_{10}F_1$ 调控模式效果最为明显。同时，比较 F_2 方案下土壤硝态氮的空间变异状况可知， C_5F_2 ， $C_{10}F_2$ 和 $C_{15}F_2$ 处理下土壤硝态氮分别相对于BL处理提升了4.20，6.39和5.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其质量分数的提升水平相对于 F_1 方案下的3种处理作用效果有所减弱。此外，在 F_3 方案下， C_5F_3 ， $C_{10}F_3$ 和 $C_{15}F_3$ 处理下土壤硝态氮分别相对于BL处理提升了8.92%，21.57%和14.13%，其质量分数整体相对 F_1 和 F_2 方案均呈现出不同程度的降低，同时， $C_{10}F_3$ 处理下的土壤固氮效果明显。

随着生育期的进行，由于在玉米大喇叭口期进行了追肥处理，因此，在抽穗期，土壤的硝态氮出现



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)，相同小写字母表示处理间差异不显著($P > 0.05$)

图2 不同生物质炭调控模式下夏玉米根区硝态氮分布状况

Figure 2 Nitrate-N distribution in the root region of summer maize under different biological charcoal regulation modes

了大幅度的增加，而该时期氮素的有效供应直接影响植株的干物质积累及果实的形成。对比不同处理条件下土壤硝态氮的水平可知： C_5F_1 处理下，土壤硝态氮的为 $34.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，在 F_1 方案下，随着生物质炭施入量的增加， $C_{10}F_1$ 和 $C_{15}F_1$ 处理下的质量分数分别相对于 C_5F_1 增加了 1.70 和 $0.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $C_{10}F_1$ 处理下土壤硝态氮的水平较高，为植株的生长提供充足的氮素补给。此外，在 F_2 和 F_3 方案下，其土壤硝态氮相对于 F_1 有所降低，但其整体水平均优于 BL，并且在 $C_{10}F_2$ 和 $C_{10}F_3$ 处理下表现出明显的优势。

在灌浆期内，作物生长基本趋于成熟，土壤硝态氮水平将影响第 2 年春季播种期土壤氮素的供应。比较分析可知：该时期土壤硝态氮水平与拔节期和抽穗期的变化趋势相似，在秋季施加生物质炭，经过冬季冻融循环作用，生物质炭与土壤进行了较好地融合，并且营造了良好的土壤生态环境，对于土壤氮素的截留具有很好的作用，使得氮素能够稳定地储存在耕层土壤中。因此， F_1 方案要优于 F_2 和 F_3 方案，并且随着生物质炭施入量的增加，在 C_{10} 水平下达到最佳效果。

2.3 生物质炭对植株根系呼吸强度影响

整体分析植株根系呼吸强度的变化趋势可知：不同处理条件下的根系呼吸速率均呈现单峰型变化。由于植株长势以及养分供应的差异，在一定程度上影响着植株根系的呼吸代谢作用。由图 3A 可知：研究期内 C_5F_1 、 $C_{10}F_1$ 和 $C_{15}F_1$ 处理下植株根系的平均呼吸速率分别为 257.45 、 296.98 、 $266.54 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，植株根系平均呼吸速率从大到小依次为 $C_{10}F_1$ 、 $C_{15}F_1$ 、 C_5F_1 ，分别比 BL 增加了 33.42% 、 19.72% 和 15.66% ，并且这种差异性在植株生长的抽穗期表现最为明显。

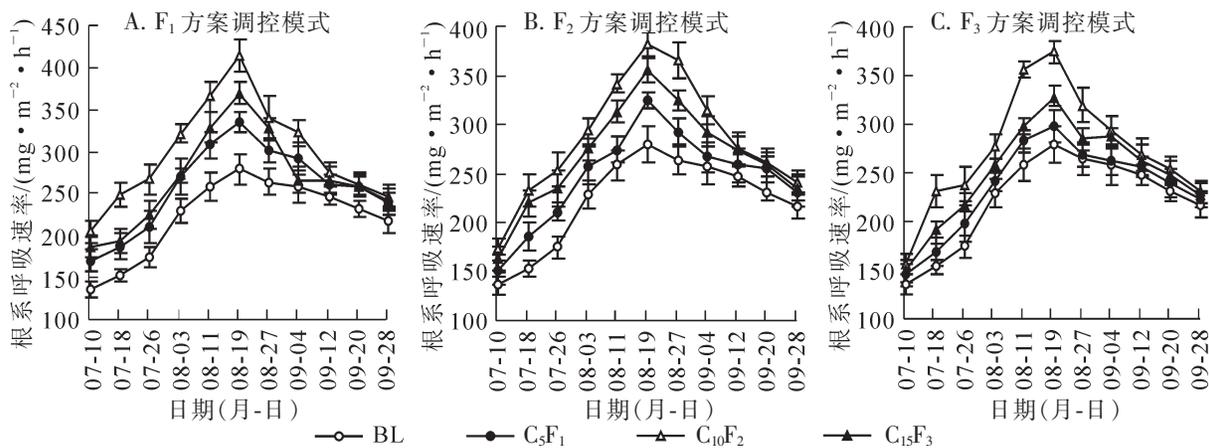


图 3 不同生物质炭调控模式下植株根系呼吸强度

Figure 3 Respiration intensity of plant root systems under different biological charcoal control modes

分析 F_2 方案下 3 种调控模式状况，其中，在 C_5F_2 处理下，拔节期根系的呼吸速率为 $186.35 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。随着生育期的进行，抽穗期根系的呼吸速率变为 $324.74 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，灌浆期时，植株各项生理活动进一步减弱，其呼吸速率减小为 $231.37 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ，其呼吸速率经历先增加后减小的变化趋势。在 $C_{10}F_2$ 和 $C_{15}F_2$ 处理下，其植株根系的呼吸速率与 C_5F_2 的整体变化趋势一致，但是 $C_{10}F_2$ 处理下的植株根系呼吸效果明显增强，而 $C_{15}F_2$ 处理下植株的呼吸强度介于 C_5F_2 和 $C_{10}F_2$ 之间。

在农田土壤生态体系中，土壤的呼吸作用主要由植株的根系呼吸和微生物的呼吸组成，因而，在上述分析植株根系呼吸强度的基础上探索根系对于土壤呼吸的贡献度。分析图 4A 可知：在拔节期，植株根系呼吸作用所占比例为 $45\% \sim 65\%$ ，并且生物质炭调控处理下的植株根系呼吸比例均高于 BL 处理。其中， C_5F_1 处理下，植株根系呼吸所占比例为 62.35% ，而随着生物质炭施入量的增加，在 $C_{10}F_1$ 和 $C_{15}F_1$ 处理下，其呼吸比例依次增长为 65.89% 和 63.77% ， $C_{10}F_1$ 处理下根系呼吸的比例最大，表明其根系呼吸代谢能力显著。同样，在 C_5F_2 、 $C_{10}F_2$ 和 $C_{15}F_2$ 处理下，其根系呼吸强度比例相对于 F_1 方案下的 3 种处理有所降低，但是变化趋势上仍然表现为 $C_{10}F_2$ 最强。

在作物抽穗期内，植株发育以及各项生理活动处于快速发展阶段，因此，其植株根系的呼吸强度比例也有所增强，约占土壤呼吸的 $70\% \sim 90\%$ 。在 C_5F_1 处理下，植株根系呼吸所占比例为 81.21% ，而在 $C_{10}F_1$ 和 $C_{15}F_1$ 处理下，植株根系呼吸强度所占比例分别为 89.34% 和 85.27% 。由此可知：该时期内植株

根系呼吸对于土壤呼吸贡献最为显著。而在 F_2 和 F_3 方案下, 各处理条件下植株根系的呼吸作用所占比例相对于 F_1 方案有所降低, 但相对于 BL 处理提升幅度较大, 其整体仍处于较高的水平, 表明生物质炭有效促进了植株根系的呼吸代谢效果, 而抑制了微生物生命活动, 有利于作物的各项生命活动的运行。

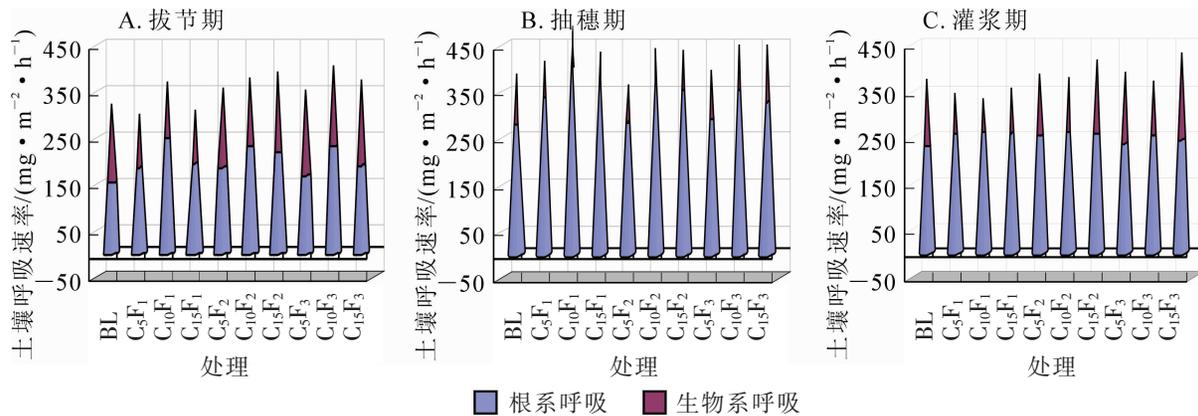


图4 不同生物质炭调控下根系呼吸比例变化

Figure 4 Respiration intensities of plant root systems under different biological charcoal control modes

植株根系呼吸是土壤孔隙结构、氮素供应以及根系长势等因素共同作用的结果, 而生物质炭的调控作用改善了土壤的物理结构, 加之充足的养分供给, 极大程度促进了植株根系的呼吸代谢作用, 也因此为植株地上部分的各项生命代谢活动提供了能量支持。综合上述分析可知: 在前1年秋季施加生物质炭 (F_1) 对于植株根系呼吸作用的影响较为明显, 此外, 过量施用生物质炭, 土壤结构对于植株根系的呼吸影响效果减弱。

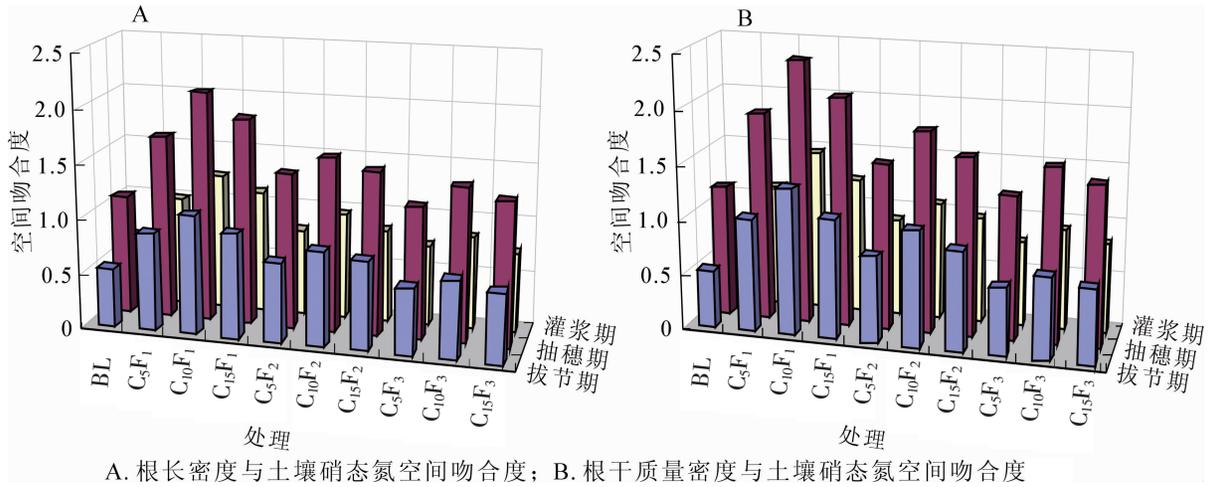
2.4 生物质炭对植株氮素利用效率影响

在植株生长过程中, 其根系具有一定的向水性和向肥性, 其生长分布对于土壤水分和肥力具有一定的适应性和趋向性。植株吸收养分的能力一方面取决于根系的长度及根表面积, 另一方面取决于根系分布与土壤的养分空间分布的吻合程度。在研究中, 计算植株根系的根长密度与硝态氮空间吻合度如图5A所示。

拔节期, 在 C_5F_1 处理条件下, 植株根长密度与土壤硝态氮的吻合度为 0.898, 而在 $C_{10}F_1$ 和 $C_{15}F_1$ 处理下, 二者的吻合度分别为 1.091 和 0.961, 分别比 C_5F_1 处理提升了 21.46% 和 7.14%, $C_{10}F_1$ 处理下两者的吻合度较高。同理, 在 F_2 和 F_3 方案下, 由于生物质炭的施加时期不同, 对于土壤养分的空间分布调控能力有所差异, 这 2 种条件下植株根系的根长密度与土壤硝态氮之间的吻合度有所减低。在抽穗期, 上述提到在玉米大喇叭口期追施肥料, 因此, 该时期植株根系根长密度与土壤硝态氮的吻合度大幅度提升, 但是它在整体变化趋势上仍然呈现出随着生物质炭的施用量增加, 其吻合度呈现先增加后减小的趋势。分析图 5B 可知: 针对于植株根干质量密度与土壤硝态氮的空间吻合度, 其变化过程与根长密度在空间上的吻合度效果相似, 而这种良好的吻合效果对于植株生长过程的养分吸收和运输提供了坚实的保障, 进而促进了作物果实的形成。

通过上述对于植株根系特征参数、根系呼吸代谢效果以及氮素空间分布特征的分析, 适当施加生物质炭对玉米植株的生理过程具积极作用。在此基础之上, 进一步分析不同处理下植株氮素生产效率的差异。通过图 6A 可知: C_5F_1 处理条件下作物的产量为 $9\,579.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而在相同生物质炭施入水平下, C_5F_2 和 C_5F_3 处理下作物产量分别相对于 C_5F_1 处理降低了 6.51% 和 9.54%。另外, 在 C_{10} 生物质炭施入水平的条件下, $C_{10}F_1$ 处理下的产量更为显著, 并且 $C_{10}F_1$, $C_{10}F_2$ 和 $C_{10}F_3$ 条件下的作物产量分别相对于 C_5F_1 , C_5F_2 和 C_5F_3 呈现不同水平的升高。当生物质炭的施用量增加为 C_{15} 水平时, 其作物产量则介于 C_5 和 C_{10} 之间, 表明适量增加生物质炭的使用量可以有效提升作物的生产效果。同理, 植株对于氮素的吸收效果与作物的产量变化趋势相一致。

进一步探究不同处理条件下植株的氮素利用效率和收获指数的变异规律可知(图 6B), 在 F_1 方案



A. 根长密度与土壤硝态氮空间吻合度；B. 根干质量密度与土壤硝态氮空间吻合度

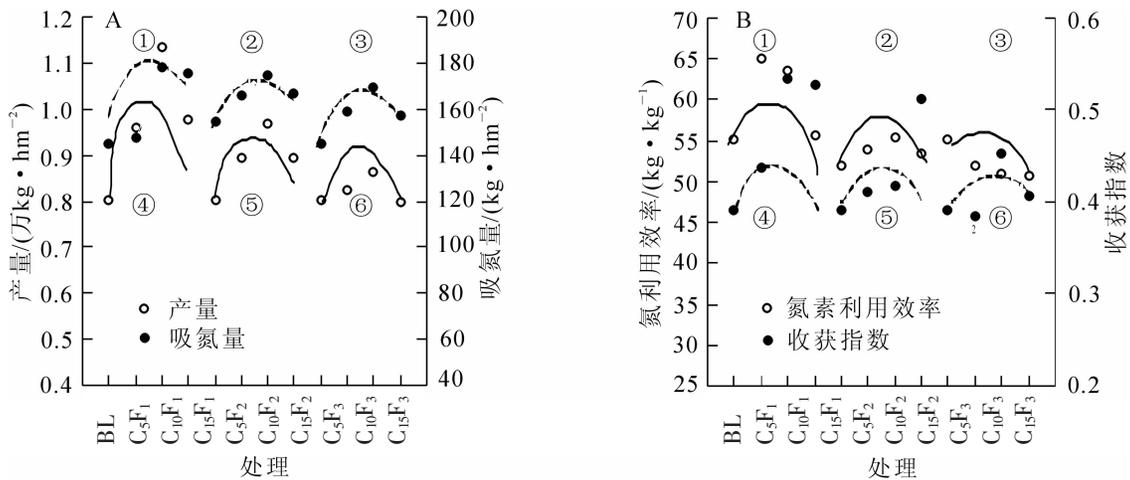
图 5 植株根系与土壤硝态氮的空间吻合度

Figure 5 Spatial consistency of plant roots and nitrate nitrogen in soil

下，生物质炭的适用量与植株氮素利用效率之间呈现出显著的二次函数关系，拟合抛物线的决定系数 $R^2=0.887$ 。基于这种二次函数关系可以发现，随着生物质炭施入量的增加，植株的氮素利用效率呈现出先增加后减小的趋势，因此证明生物质炭施入量与植株氮素利用效率之间的数值关系存在一个峰值最优解，在适量的生物质炭施入水平时最大限度地提升植株氮素的利用效率。对比 F_1 , F_2 和 F_3 施加生物质炭的方案，其效果的优劣水平从高到低依次为 F_1 , F_2 , F_3 。生物质炭的施入量与植株的收获指数之间，同样体现出显著的二次相关关系。

3 讨论

根系生长状况是作物对水肥利用重要体现，受到土壤颗粒结构、孔隙度以及持水性的直接影响，随着生物质炭的施入量以及施入时期的调整，其根系体现出一定的趋向性。 F_3 方案下的植株根系生长效果相对于 F_1 和 F_2 显著，冻结过程对于碳-土复合系统水养环境调节效果较好。正如王丽学等^[23]研究提出的在前 1 年进行生物质炭翻耕覆盖处理能够有效调节土壤的水热状况和养分，进而提升土壤生产能力。另



① $y = -0.087x^2 + 2.490x + 143.200$, $R^2 = 0.895$;
 ② $y = -0.291x^2 + 5.170x + 155.600$, $R^2 = 0.819$;
 ③ $y = -0.402x^2 + 6.570x + 147.100$, $R^2 = 0.948$;
 ④ $y = -22.490x^2 + 339.200x + 818.200$, $R^2 = 0.845$;
 ⑤ $y = -27.060x^2 + 386.100x + 814.400$, $R^2 = 0.934$;
 ⑥ $y = -43.710x^2 + 658.800x + 830.300$, $R^2 = 0.927$

① $y = -0.161x^2 + 2.210x + 53.100$, $R^2 = 0.887$;
 ② $y = -0.118x^2 + 1.360x + 56.600$, $R^2 = 0.901$;
 ③ $y = -0.031x^2 + 0.160x + 55.300$, $R^2 = 0.851$;
 ④ $y = -0.011x^2 + 0.017x + 0.410$, $R^2 = 0.794$;
 ⑤ $y = -0.007x^2 + 0.0102x + 0.390$, $R^2 = 0.827$;
 ⑥ $y = -0.002x^2 + 0.036x + 0.390$, $R^2 = 0.912$

A. 不同调控模式下作物产量和吸氮量差异；B. 不同调控模式下作物氮素利用效率和收获指数差异

图 6 不同生物质炭调控下氮素利用效率

Figure 6 Nitrogen use efficiency under the control of different biological charcoal

外,随着生物质炭施入量增加,作物生长优势体现出先增加后减小的过程,生物质炭的施入量也在很大程度上影响植株根系生长状态。正如刘超等^[24]发现的适量的生物质炭可以有效地促进玉米生长发育,也增加了玉米的日耗水量,而过量施入生物质炭反而会抑制其影响效果。

植株根系的呼吸强度在一定程度上体现了其养分吸收能力和代谢强度,而适宜的土壤空隙结构和水养环境能够较大程度地促进植株的呼吸效果。在本研究中,随着生物质炭施入量增加,C₁₀处理植株呼吸强度效果要优于C₁₅和C₅处理。正如田冬等^[25]总结得出的,生物质炭还田对土壤温度具有“削高填低”效应,平缓了土壤水分和温度的变化幅度,促进植株根系的呼吸效果。同时,F₃处理方案下,碳-土复合体经历冻融循环作用,生物质炭与土壤能够进行较好融合,土壤空隙结构得到良好调节,进而也提升了植株的适应性和活动性。该发现也验证了张晗芝等^[26]提出的生物质炭与土壤充分的混合能够有效提升土壤的理化性状,极大程度促进植株根系的呼吸代谢和养分吸收。

充足的氮素补给对作物的产量具有显著的影响,而生物质炭的调节作用影响土壤有机碳和氮素的组成与数量,进而改变土壤供氮能力。比较分析C₅F₁,C₁₀F₁和C₁₅F₁这3种生物质炭施入量水平条件下土壤硝态氮质量分数可知,分别相对于BL处理提升了5.52,8.70和6.65 mg·kg⁻¹,这与宋大利等^[27]研究结果相似,即生物质炭能够较好地调节土壤硝态氮与铵态氮的比例平衡,并且适宜的生物质炭对于土壤氮素的调节的效果显著,能够有效促进植株的生长和粮食产量的提升。此外,植株氮素的利用效率与生产指数与土壤氮素质量分数具有显著的正相关性。因此,生物质炭通过激发土壤微生物活性促进氮素循环以及良好的氮素固持效应,对作物产量起间接作用。

4 结论

作物生长发育过程中,生物质炭的大空隙性和养分吸附性影响着植株根系的长势,而不同时期、不同用量施加生物质炭也会改善根系生长特征。随着生物质炭施入量的增加,在C₅F₁,C₁₀F₁和C₁₅F₁处理下,植株根系的长度、根质量和体积分别表现为先增大后减小的趋势,在一定范围内适量增加生物质炭施入量可以显著提升根系生长状况。此外,F₁方案处理效果较为明显,冬季冻融循环能够最大限度的改良土壤环境状况。

植物的呼吸效果、氮素累计体现了植株的代谢能力,旺盛的呼吸能力以及充足的氮素积累为生物体的各项生理过程提供了物质基础。生物质炭的施入改善了植株根系的呼吸强度及氮素的吸收效果,并且在C₁₀水平下,植株根系的呼吸效果最强。另外,植株的吸氮量变异规律和根系呼吸强度能够较好吻合,并且同样在C₁₀水平下达到最佳效果。

生物质炭的施加影响作物产量的积累,进而改善氮素的生产效率以及收获指数。适宜时期生物质炭调节可以有效提升作物的产量,从施加时期角度分析,F₁方案施加生物质炭的调控效果更为显著。而从生物质炭的施入量角度分析,随着生物质炭施入量的增加,在C₁₀水平下达到最佳水平。氮素的利用效率以及收获指数表现出相同的效果,并且与生物质炭施入量之间具有显著的二次相关关系。

5 参考文献

- [1] 李秀芳,李淑文,和亮,等.水肥配合对夏玉米养分吸收及根系活性的影响[J].水土保持学报,2011,25(1):188-191.
LI Xiufang, LI Shuwen, HE Liang, et al. Effects of water and fertilizer cooperation on plant nutrient accumulation and root activity of summer maize [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, 25(1): 188 - 191.
- [2] 龙健,李娟,汪境仁.贵州中部岩溶丘陵区不同土地利用和管理方式对土壤肥力的影响[J].土壤通报,2006,37(2):249-252.
LONG Jian, LI Juan, WANG Jingren. Effects of land use and management on soil fertility in the middle karst region of Guizhou Province [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, 37(2): 249 - 252.
- [3] 李亚星,刘善江,徐秋明,等.氮、磷营养过量对土壤养分及黄瓜营养吸收的影响初探[J].水土保持学报,2013,27(1):98-101.
LI Yaxing, LIU Shanjiang, XU Qiuming, et al. Preliminary study on the effects of excess soil N and P on soil nutrient elements and cucumber nutrient absorption [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, 27(1): 98 - 101.

- [4] 杜青峰, 王党军, 于翔宇, 等. 玉米间作夏季绿肥对当季植物养分吸收和土壤养分有效性的影响[J]. 草业学报, 2016, **25**(3): 225 - 233.
DU Qingfeng, WANG Dangjun, YU Xiangyu, *et al.* The effects of corn and green manure intercropping on soil nutrient availability and plant nutrient uptake [J]. *Acta Pratac Sin*, 2016, **25**(3): 225 - 233.
- [5] 刘慧颖, 韩瑛祚, 华利民. 施氮方式对玉米氮吸收及土壤养分、N₂O排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(6): 17 - 21.
LIU Huiying, HAN Yingzuo, HUA Limin. Effect of N application on plant N uptake and change of soil nutrition and N₂O emission in maize [J]. *Soil Fertil Sci China*, 2013(6): 17 - 21.
- [6] 戴静, 刘阳生. 生物炭的性质及其在土壤环境中应用的研究进展[J]. 土壤通报, 2013, **44**(6): 1520 - 1525.
DAI Jing, LIU Yangsheng. Review of research on the properties of biochar and its applications in soil [J]. *Chin J Soil Sci*, 2013, **44**(6): 1520 - 1525.
- [7] 卜晓莉, 薛建辉. 生物炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(3): 535 - 540.
BU Xiaoli, XUE Jianhui. Biochar effects on soil habitat and plant growth: a review [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23**(3): 535 - 540.
- [8] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(1): 68 - 79.
WU Yu, XU Gang, LÜ Yingchun, *et al.* Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps [J]. *Adv Earth Sci*, 2014, **29**(1): 68 - 79.
- [9] 魏永霞, 刘志凯, 冯鼎锐, 等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J]. 农业机械学报, 2016, **47**(8): 201 - 207.
WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, *et al.* Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall [J]. *Transe Chin Soc Agric Mach*, 2016, **47**(8): 201 - 207.
- [10] 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪, 等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(4): 1049 - 1055.
WANG Yanfeng, LIU Yuxue, LÜ Haohao, *et al.* Effect of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2015, **21**(4): 1049 - 1055.
- [11] BUSSCHER W J, NOVAK J M, EVANS D E, *et al.* Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand [J]. *Soil Sci*, 2010, **175**(1): 10 - 14.
- [12] DELUCA T H, MACKENZIE M D, GUNDALE M J, *et al.* Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70**(2): 448 - 453.
- [13] SADEGHI S H, HAZBAVI Z, HARCHEGANI M K. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar [J]. *Sci Total Environ*, 2016, **541**: 483 - 490.
- [14] 魏永霞, 冯鼎锐, 刘志凯, 等. 生物炭对黑土区坡耕地水土保持及大豆增产效应研究[J]. 节水灌溉, 2017(5): 37 - 41.
WEI Yongxia, FENG Dingrui, LIU Zhikai, *et al.* The effect of biochar on soil and water conservation and crop yield of the slope farmland in black soil region [J]. *Water Sav Irrig*, 2017(5): 37 - 41.
- [15] 崔立强, 杨亚鸽, 严金龙, 等. 生物质炭修复后污染土壤铅赋存形态的转化及其季节特征[J]. 中国农学通报, 2014, **30**(2): 233 - 239.
CUI Liqiang, YANG Yage, YAN Jinlong, *et al.* Speciation and season change characteristic of lead in contaminated soil with biochar amendment [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, **30**(2): 233 - 239.
- [16] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(4): 779 - 785.
YUAN Jinhua, XU Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, **20**(4): 779 - 785.
- [17] 王友华, 许波, 许海涛. 生物炭对夏玉米形态指标、生理特性和产量性状的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2017, **45**(5): 1 - 7.
WANG Youhua, XU Bo, XU Haitao. Effects of biochar on morphological index, photosynthetic-physiological characters and yield traits of summer maize [J]. *J Henan Inst Sci Technol Nat Sci Ed*, 2017, **45**(5): 1 - 7.
- [18] 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(8): 1569 -

1574.

ZHANG Na, LI Jia, LIU Xuehuan, *et al.* Effects of biochar on growth and yield of summer maize [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2014, **33**(8): 1569 – 1574.

- [19] 尹飞, 王俊忠, 孙笑梅, 等. 夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(11): 2166 – 2178.
- YIN Fei, WANG Junzhong, SUN Xiaomei, *et al.* Response of spatial concordance index between maize root and soil nitrate distribution to water and nitrogen treatments [J]. *Sci Agric Sin*, 2017, **50**(11): 2166 – 2178.
- [20] 朱晋宇, 惠放, 李苗, 等. 氮水平对盆栽沙培番茄苗期根系三维构型与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(23): 131 – 137.
- ZHU Jinyu, HUI Fang, LI Miao, *et al.* Effect of different nitrogen concentrations on roots architecture and nitrogen use efficiency in potting tomato seedling [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, **31**(23): 131 – 137.
- [21] JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, WANG Fengqu, *et al.* Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**(4): 653 – 660.
- [22] 朱凡, 王光军, 田大伦, 等. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子[J]. 生态学报, 2010, **30**(9): 2499 – 2506.
- ZHU Fan, WANG Guangjun, TIAN Dalun, *et al.* Seasonal variation of soil respiration by root exclusion and its controlling factors in a *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(9): 2499 – 2506.
- [23] 王丽学, 李振鹏, 刘四平, 等. 不同耕作和覆盖方式对玉米长势及光合特性的影响[J]. 玉米科学, 2016(2): 142 – 146.
- WANG Lixue, LI Zhenpeng, LIU Siping, *et al.* Effects of different tillage and mulching methods on the growth and photosynthetic characteristics of maize [J]. *J Maize Sci*, 2016(2): 142 – 146.
- [24] 刘超, 魏永霞. 秸秆生物炭对寒地黑土区玉米生长发育及耗水规律的影响[J]. 中国农村水利水电, 2015(4): 5 – 8.
- LIU Chao, WEI Yongxia. Effects of straw biochar on growth and development and water consumption rule of maize in cold black soil region [J]. *China Rural Water Hydrop*, 2015(4): 5 – 8.
- [25] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2988 – 2999.
- TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems [J]. *Environ Sci*, 2017, **38**(7): 2988 – 2999.
- [26] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2713 – 2717.
- ZHANG Hanzhi, HUANG Yun, LIU Gang, *et al.* Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(11): 2713 – 2717.
- [27] 宋大利, 刁向银, 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 – 379.
- 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]. *J Plant Nutr Fert*, 2017, **23**(2): 369 – 379.