doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.032

连年施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响

魏永霞[1,2]　朱烟豫[1]　刘　慧[2,3]

(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；
3.东北农业大学理学院，哈尔滨 150030)

摘要：为研究连年施加生物炭对黑土区坡耕地的土壤结构、持水性能、玉米产量及可持续性的影响，从2015年开始，在黑土区3°坡耕地径流小区内，将玉米作为试验作物连续进行4年生物炭效应试验。共设置C0(0 t/hm^2)、C25(25 t/hm^2)、C50(50 t/hm^2)、C75(75 t/hm^2)和C100(100 t/hm^2)5种生物炭的施用量处理。结果表明：4年中土壤容重随生物炭的增加有减小的倾向，孔隙度有逐渐增加的倾向；适量生物炭可有效降低土壤固相比例，提高气相和液相比例，除2015年外，连续3年广义土壤结构指数(GSSI)随施炭量的增加先增大后减小，土壤三相结构距离指数(STPSD)随施炭量的增加先减小后增大，均在第3年C50处理达到最优(99.96、0.63)，同时土壤三相比偏离值R最小(1.03)，三相比最接近理想状态；连续4年大于0.25 mm团聚体含量$R_{0.25}$、平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)随着生物炭的增加有先增加后减小的倾向；连续3年加入50 t/hm^{2}生物炭提高土壤稳定性的效果最好；连续4年饱和含水率与施炭量呈正相关；除2015年外，田间持水率随施炭量的增加先增加后减小，分别在C100、C50、C50和C25处达最优，在2018年C25处为峰值37.33%；土壤有效含水率与田间持水率的变化规律相同。玉米各生育期0~60 cm土层土壤储水量呈先升高后降低倾向；60~100 cm土层土壤储水量与施炭量呈负相关；玉米产量可持续性指数(SYI)在C50处达到最大(0.954)，变异系数(CV)在C100处理处最低(0.022)；逐年施加50 t/hm^{2}生物炭对促进玉米产量稳定性与可持续性效果最明显。

关键词：玉米；黑土区坡耕地；生物炭；土壤结构；土壤持水性能；产量可持续性指数

中图分类号：S157.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2022)01-0291-11　　**OSID：**

Effects of Successive Application of Biochar on Soil Improvement and Maize Yield of Black Soil Region

WEI Yongxia[1,2]　ZHU Tianyu[1]　LIU Hui[2,3]

(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Key Laboratory of High Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
3. *School of Science*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to study the effects of biochar application on soil structure, water holding capacity, maize yield and sustainability of sloping farmland in black soil area, four consecutive years of biochar effect experiments were carried out in the runoff plot of 3° sloping farmland in black soil area from 2015. A total of five biochar application rates C0 (0 t/hm^2), C25 (25 t/hm^2), C50 (50 t/hm^2), C75 (75 t/hm^2) and C100 (100 t/hm^2) were set. The results showed that soil bulk density was decreased with the increase of biochar in the four years, and porosity was increased gradually. Appropriate amount of biochar can effectively reduce the proportion of soil solid phase and improve the proportion of gas phase and liquid phase. In addition to 2015, the generalized soil structure index (GSSI) was increased first and then decreased with the increase of biochar application rate for three consecutive years, and the

收稿日期：2020-11-18　修回日期：2021-01-22

基金项目：国家自然科学基金项目(51479033)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)和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开放项目(2017009)

作者简介：魏永霞(1961—)，女，教授，博士生导师，主要从事农业水土资源高效利用与保护研究，E-mail：wyx0915@163.com

通信作者：刘慧(1981—)，女，副教授，博士，主要从事水土保持理论与技术研究，E-mail：xiaolaida@163.com

three-phase structure distance index (STPSD) was decreased first and then increased with the increase of biochar application rate, reaching the optimal values (99.96, 0.63) in the third year of C50 treatment. At the same time, the soil three-phase ratio R was the smallest (1.03), and the three-phase ratio was the closest to the ideal state. For four consecutive years, the aggregate content $R_{0.25}$, mean mass diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) were increased first and then decreased with the increase of biochar application rate. Adding 50 t/hm^2 biochar for three consecutive years had the best effect on improving soil stability. The saturated moisture content was positively correlated with carbon application rate for four consecutive years. In addition to 2015, the field water holding rate was increased first and then decreased with the increase of carbon application rate, and reached the optimal treatment at C100, C50, C50 and C25, respectively. The peak value was 37.33% at C25 in 2018. The change rule of soil effective moisture content and field water holding capacity was the same. Soil water storage in 0 ~ 60 cm soil layer of maize at different growth stages was increased first and then decreased. Soil water storage in 60 ~ 100 cm soil layer was negatively correlated with carbon application rate. The maize yield sustainability index (SYI) reached the maximum at C50 (0.954), and the coefficient of variation (CV) was the lowest at C100 (0.022). Annual application of 50 t/hm^2 biochar to promote maize yield stability and sustainability effect was the most obvious.

Key words: maize; slopping farm land of black soil region; biochar; soil structure; soil water holding capacity; sustainability yield index

0 引言

黑土是我国宝贵的资源,合理利用黑土关系到区域生态安全[1]。随着农业技术的蓬勃发展,近年来我国粮食产量逐年递增,但由于对黑土资源缺少合理的管理,水土流失严重,东北黑土耕作层变薄,土壤酸化,降低了土地的生产力。另一方面,东北黑土区秸秆资源丰富,大面积焚烧秸秆不仅浪费资源,而且产生严重雾霾,严重影响人民生活质量。探索黑土资源的高效利用与保护以及秸秆资源的合理利用刻不容缓[2-3]。

生物炭是作物秸秆、动物粪便等原材料在缺氧的条件下,高温(<700℃)裂解而成的一种高度芳香化、富含碳素的固态产物[4]。秸秆是生物炭的理想来源,以生物炭为核心的秸秆炭化还田技术同时满足高效率利用秸秆资源、减少面源污染的需要,因而受到了许多学者的关注。大量研究表明,施加生物炭可以减小土壤容重[5]、提高孔隙度[6-9]、稳固土壤三相比例[10]、改善土壤团聚体结构[11-13]、提高土壤储水量[14]、提高田间持水率和饱和含水率[15-16]、大幅提高农作物产量[17-19]并且维持高产稳产性[20]。但经过学者研究,发现生物炭也有负面影响。经田间试验发现,施加 4 t/hm^2 的生物炭,会使水稻产量降低 23.3%[21];长期大剂量施用生物炭会使土壤呼吸速率显著增加,不利于土壤固碳减排[22]。这表明土地和作物受生物炭影响的过程十分复杂。目前,关于生物炭短期应用的研究成果十分丰富,但缺乏关于中长期效果的研究。为此,本研究以玉米为供试作物,黑土区坡耕地为研究对象,连续施加 4 年生物炭,旨在探讨中长期施加生物炭后年际间土壤结构、持水性能与作物产量及其稳定性等指标的变化规律,找出该地区最优生物炭施加量和施用年限,为高效利用黑土资源及农作物秸秆资源提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2015—2018 年在黑龙江省农垦北安管理局红星农场试验基地(48°2′~48°17′N,126°47′~127°15′E)进行试验,试验小区地势自东向西倾斜,坡度 3°~5°。该区年平均降雨量为 553 mm,近 90% 降雨量集中在 7—9 月,多年平均气温 3.1℃,无霜期110 d左右。耕层土壤以草甸黑土为主,主要种植大豆、玉米和水稻。

1.2 供试材料

供试土壤为草甸黑土,理化性质为 pH 值 6.3,总有机碳质量比 34.83 g/kg,全氮质量比 1.1 g/kg,全磷质量比 0.45 g/kg,全钾质量比 0.35 g/kg,容重 1.15 g/cm^3。供试玉米品种为德美亚 1 号。玉米生育期分为苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期 4 个时期。试验所用生物炭购自辽宁金和福农业开发有限公司,将玉米秸秆在 450℃ 无氧条件下高温裂解烧制而成,其理化性质为:总有机碳质量比 70.21 g/kg、全氮质量比 13.97 g/kg、全钾质量比 2.24 g/kg、全磷质量比 34.55 g/kg、pH 值 9.14、比表面积 81.85 m^2/g、总孔容积 0.080 cm^3/g。

1.3 试验设计

试验于 2015—2018 年在试验基地的径流小区

内进行，按照生物炭施加量不同设置 5 个处理：C0（对照处理）、C25（25 t/hm^2）、C50（50 t/hm^2）、C75（75 t/hm^2）和 C100（100 t/hm^2），每个处理两次重复，共计 10 个小区。小区坡度为 3°，规格为 20 m × 5 m，10 个径流小区平行铺设。为防止小区间的水分交换，各小区边界用埋入地下 1 m 深的铁板隔开，每个小区设置 1 m 间隔。每年播种前，将生物炭撒于土壤表面并反复搅拌，使其与耕层土壤（0 ~ 20 cm）充分混合，起垄静置 7 d。小区作物管理方案均与当地农户相同。

1.4　相关指标及计算方法

1.4.1　土壤容重、孔隙度、三相比

各年份全生育期末利用环刀收集耕层原状土，各处理 4 次重复（相同处理小区各取 2 次重复），采用 DIK－1130 型土壤三相仪测定土壤容重、孔隙度和土壤三相比，并计算土壤三相比偏离值 R、广义土壤结构系数（GSSI）和土壤三相结构距离指数（STPSD）[22]。

1.4.2　土壤水稳性团聚体含量

每年于玉米全生育期末取各小区耕层土壤样品，采集后在室内风干，过 8 mm 筛，除去其中较大杂质。采用 TTF－100 型土壤团聚体分析仪测定土壤水稳性团聚体含量。分别计算大于 0.25 mm 团聚体含量（$R_{0.25}$）[23]、平均质量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）[24]。

1.4.3　土壤水分常数

于玉米收获期每个小区选取 2 个取样点（共 4 次重复），采用室内环刀法测定田间持水率和饱和含水率；采用生物法测定凋萎系数；有效含水率（Available water-holding capacity，AWC）利用测定的田间持水率和凋萎系数计算获得，计算公式为

$$AWC = (F_C - P_{WP})B_D \tag{1}$$

式中　AWC——土壤有效含水率

F_C——田间持水率

P_{WP}——凋萎系数

B_D——土壤容重，g/cm^3

1.4.4　土壤储水量

连续 4 年在玉米各生育阶段采用 TDR 测量土壤深度 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 的土壤含水率，每个层位重复测量 3 次，计算土壤储水量[25]，公式为

$$W = \frac{\theta_m \rho_b h}{\rho_w} \tag{2}$$

式中　W——土壤总储水量，mm

θ_m——土壤体积含水率，%

ρ_b——土壤容重，g/cm^3

h——土层厚度，mm

ρ_w——水密度，g/cm^3

0 ~ 100 cm 土层储水量为每层土壤储水量之和。

1.4.5　产量稳定性及其可持续性指标

在每个径流小区的坡上、中、下相应位置选取 3 个 10 m^2 的地块。通过对选择地块的实收测产来计算玉米总产量。用统计学上的变异系数（Coefficient of variation，CV）[26] 表示玉米产量稳定性，计算公式为

$$CV = \sigma / \overline{Y} \tag{3}$$

式中　σ——某一处理 4 年玉米产量标准差，t/hm^2

$\overline{Y}$——某一处理 4 年玉米平均年产量，t/hm^2

玉米产量可持续性指标用产量可持续性指数（Sustainability yield index，SYI）[27] 表示，公式为

$$SYI = (\overline{Y} - \sigma) / Y_{max} \tag{4}$$

式中　Y_{max}——试验点最高产量，t/hm^2

1.5　数据处理方法

应用 Microsoft Excel 2010、Origin 2018 对数据进行处理与绘图。采用 SPSS 25.0 软件进行方差分析，LSD 法进行多重比较（$P < 0.05$）。

2　结果与分析

2.1　施加生物炭对土壤结构的影响

2.1.1　对土壤容重和孔隙度的影响

图 1a 为生物炭施用量和施用年限变化对土壤容重的影响。如图 1a 所示，连续施炭 4 年土壤容重均与生物炭施用量呈负相关。随着生物炭施用年限的增加，各处理土壤容重降低的速率逐步减慢：C25 处理容重以平均每年 1.5% 的速率均速下降；C50 处理容重 2017 年较 2016 年下降幅度增加 1%，但 2018 年较 2017 年下降幅度减少 1.8%；C75 和 C100 处理在 2015—2017 年土壤容重急速下降，相较当年 C0 处理最多降低了 11.3% 和 11.4%，在 2018 年容重降低基本趋于平稳，比上一年仅降低了 0.98% 和 0.99%。

图 1b 为生物炭施用量及施用年限变化对土壤孔隙度的影响。如图 1b 所示，随生物炭施用量的增加，4 年土壤孔隙度均有增加，2015 年 C25、C50、C75、C100 处理土壤孔隙度较 C0 分别增加 1.8%、2.6%、7.4% 和 9.4%；连续施用 2 年后，各处理土壤孔隙度较同年 C0 处理增加幅度为 6.4%、11.6%、17.7% 和 18.3%；连续施用 3 年后，增幅分别为 9.6%、13.5%、18.4% 和 20.4%；4 年不间断施加后，增幅分别为 11.6%、18.2%、20.6% 和 22.8%。

2.1.2　对土壤三相比的影响

在理想状态下，土壤三相比为 50∶25∶25（固相：

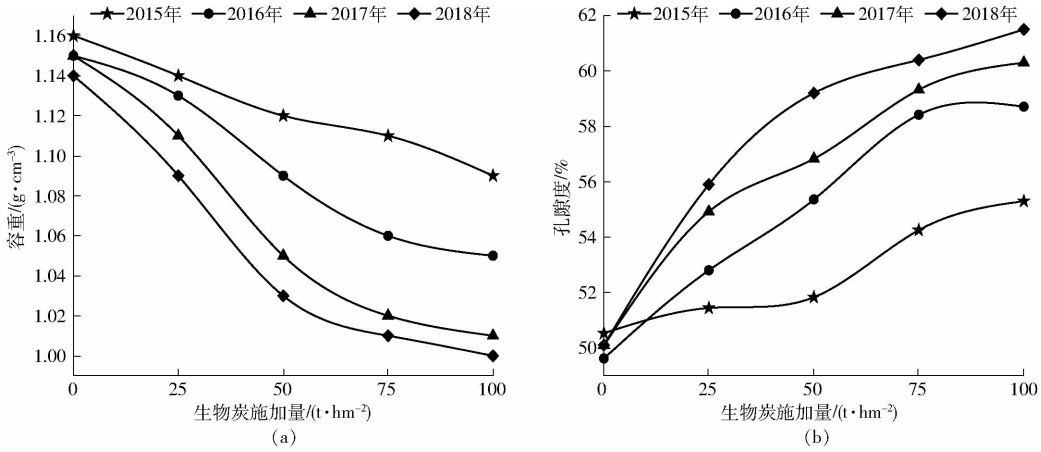

图 1 2015—2018 年土壤容重、孔隙度变化曲线

Fig. 1 Soil bulk density and porosity in 2015—2018

液相:气相)最适合作物生长[10]。图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$))为各年份的土壤三相比例。由图 2 可知,随施炭量的增加,2015—2018 年土壤固相比例逐渐下降,气相比例逐渐上升,而液相比例则呈现先升高后降低的倾向。2015—2018 年各施炭处理的土壤固相比例较 C0 降低幅度为 0.88% ~19.57%,土壤气相比例升高幅度为 1.96% ~66.34%,土壤液相比例最大处理较 C0 提高 13.59%。

土壤三相比偏离值 R 表示测定土壤三相比例与理想土壤三相比例的空间距离差值。由表 1 可知,4 年三相比例分别在 C100、C50、C50、C50 处与理想点最接近,R 分别为 1.79、1.83、1.03、0.97。GSSI、STPSD 常被用来评价土壤三相比分配,GSSI 越大、STPSD 越小,土壤三相比分配越接近理想状态[28]。由表 1 可知,在相同施用年限,除 2015 年随施炭量的增加,GSSI 逐渐增加外,2016—2018 年连续 3 年随施炭量的增加,GSSI 在 C50 处前不断增加,在 C50 处后不断减小,C50 处为最大值。GSSI 较 C0 处理分别增加了 2.16%、2.19% 和 2.21%,差异显著($P<0.05$)。在施炭量相同而施用年限不同时,随着施用年限的增加,C25、C100 处理 GSSI 逐渐增加;C50、C75 处理土壤 GSSI 呈先增后减的变化倾向。STPSD 变化规律与 GSSI 相反。对比 4 年试验数据可知,连续 3 年施加 50 t/hm^2 的生物炭对黑土区土壤三相比的改善情况最好。

2.1.3 对土壤水稳性团聚体含量的影响

图 3 为各年份不同粒径土壤水稳性团聚体含

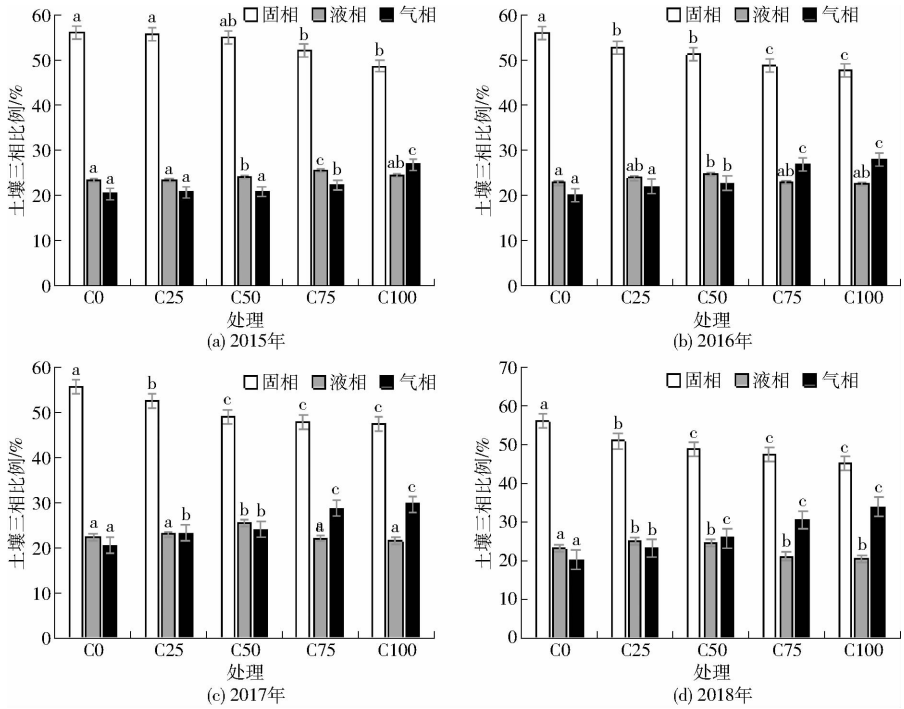

图 2 2015—2018 各处理土壤三相比例

Fig. 2 Soil three-phase ratio of each treatment in 2015—2018

表 1　2015—2018 年各处理土壤三相比偏离值 R、广义结构系数和土壤三相结构距离指数

Tab. 1　Values of R, GSSI and STPSD of each treatment in 2015—2018

处理	2015 年			2016 年			2017 年			2018 年		
	R	GSSI	STPSD	R	GSSI	STPSD	R	GSSI	STPSD	R	GSSI	STPSD
C0	5.53[a]	97.75[e]	31.08[a]	5.69[a]	97.64[d]	32.68[a]	5.55[a]	97.81[e]	30.67[a]	5.52[c]	97.78[d]	30.79[b]
C25	5.08[b]	98.10[d]	26.19[b]	2.98[c]	99.33[c]	9.07[c]	2.63[d]	99.54[b]	6.33[d]	1.41[d]	99.87[b]	1.81[d]
C50	4.51[c]	98.46[c]	20.73[c]	1.83[e]	99.76[a]	3.27[e]	1.03[e]	99.96[a]	0.63[e]	0.97[e]	99.94[a]	0.91[e]
C75	2.56[d]	99.52[b]	6.19[d]	2.38[d]	99.70[b]	4.09[d]	4.24[c]	99.04[c]	13.39[c]	5.92[b]	98.17[c]	25.72[c]
C100	1.79[e]	99.80[a]	2.83[e]	3.46[b]	99.33[c]	9.21[b]	5.25[b]	98.53[d]	20.53[b]	8.80[a]	95.74[e]	62.17[a]

注：同列数字后不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。下同。

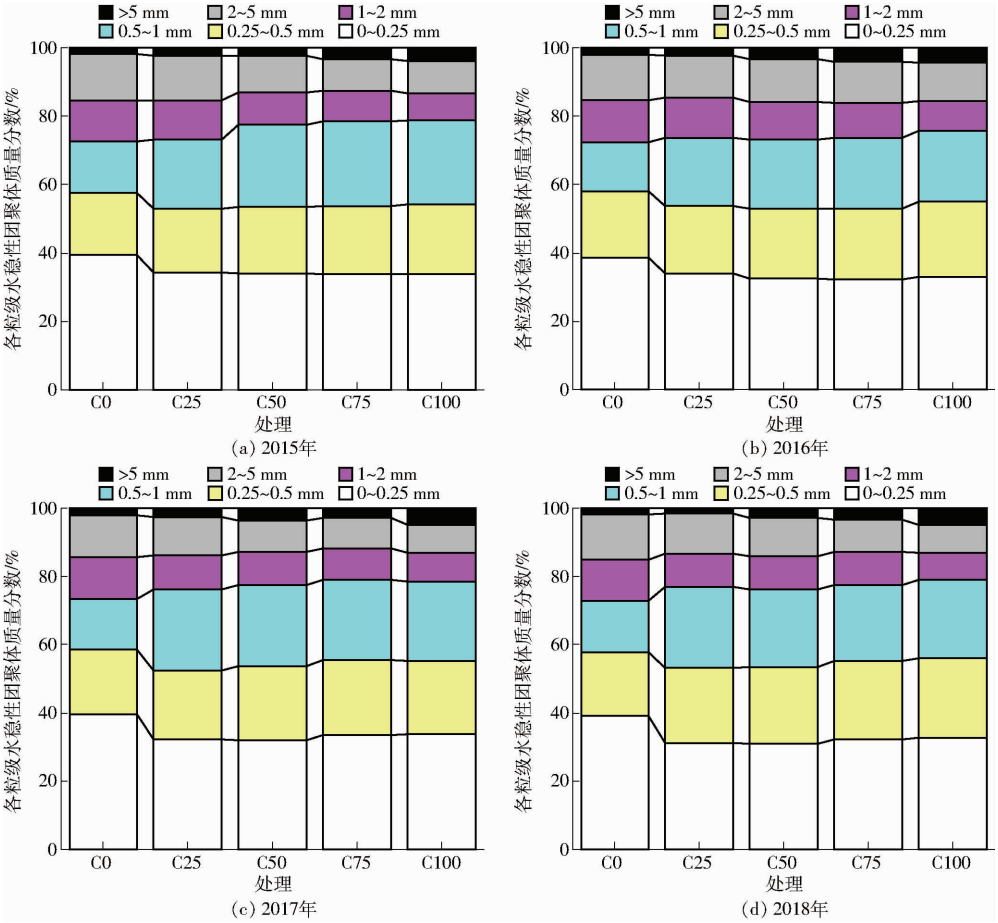

图 3　2015—2018 年各粒级水稳性团聚体分布

Fig. 3　Distributions of water stable agglomerate in 2015—2018

量。连续 4 年，每一年大于 5 mm 粒级水稳性团聚体含量都随着生物炭的施加而增加；2 ~ 5 mm、1 ~ 2 mm粒级水稳性团聚体含量逐渐减小。而0.5 ~ 1 mm粒级水稳性团聚体含量在 2015、2017 年均出现先增大后减小倾向，分别在 C75、C50 处达到最大。0.25 ~ 0.5 mm 粒级水稳性团聚体含量在 2015、2016、2018 年随施炭量的增加逐渐增大；在 2017 年呈先增大后减小倾向，C75 处达到峰值。由此可知，向土壤中施加生物炭可以增加土壤中大于 5 mm 粒级水稳性团聚体含量；降低 1 ~ 2 mm、2 ~ 5 mm 粒级水稳性团聚体含量；适量生物炭可以增加0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm 粒级水稳性团聚体含量。

$R_{0.25}$用来表征土壤团聚体稳定性，其含量越高，土壤结构性越好[24]。MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体分布的重要指标，其值越大，说明土壤平均团聚度越高[29]。土壤水稳性团聚体稳定性指数如表 2 所示。由表 2 可知，在相同施用年限，随施炭量的增加，$R_{0.25}$、MWD、GMD 均呈先增后减的变化倾向，4 年最优处理分别为 C75、C50、C50 和 C25，各处理与同年 C0 相比均达到显著性差异（$P<0.05$）。由此可知，适量的生物炭可以调节土壤团粒结构。对比 4 年试验结果可知，连续 3 年施加50 t/hm^{2}的生物炭可以达到提升土壤稳定性的最优效果，与同年对照处理相比分别提高了 113.9% 和 23.2%。

表 2 2015—2018 年水稳性团聚体稳定性指数

Tab. 2 MWD and GMD in 2015—2018

年份	处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}$/%
2015	C0	0.622[d]	0.209[c]	37.5[d]
	C25	0.695[c]	0.231[b]	48.9[c]
	C50	0.735[b]	0.242[b]	64.6[b]
	C75	0.756[a]	0.253[a]	66.8[a]
	C100	0.712[b]	0.221[b]	49.6[c]
2016	C0	0.639[d]	0.202[d]	42.6[c]
	C25	0.724[b]	0.233[b]	47.7[b]
	C50	0.777[a]	0.263[a]	59.5[a]
	C75	0.739[b]	0.236[b]	54.7[a]
	C100	0.702[c]	0.223[c]	50.4[b]
2017	C0	0.603[d]	0.203[c]	36.8[d]
	C25	0.693[b]	0.223[b]	50.7[b]
	C50	0.743[a]	0.243[a]	78.7[a]
	C75	0.723[a]	0.22[b]	55.1[b]
	C100	0.661[c]	0.213[b]	49.2[c]
2018	C0	0.607[c]	0.204[c]	39.5[d]
	C25	0.645[a]	0.241[a]	63.6[a]
	C50	0.636[a]	0.231[a]	50.9[b]
	C75	0.621[b]	0.212[b]	45.9[c]
	C100	0.596[d]	0.198[d]	38.8[e]

2.2 施加生物炭对土壤持水性能的影响

2.2.1 对土壤水分常数的影响

土壤持水性指标的变化规律如表 3 所示。连续 4 年饱和含水率与施炭量呈正相关。除 2015 年田间持水率随施炭量的增加呈逐渐增加的倾向外，2016—2018 年均呈先增大后减小的倾向，最优处理分别为 C100、C50、C50 和 C25，在 2018 年 C25 处理提高最多，为 14.44%。另一方面，2018 年 C100 处理田间持水率低于对照处理，且差异显著（$P<0.05$）。土壤有效含水率是指土壤中能被植物根系吸收的水分含量，被认为是土壤侵蚀对土壤生产力影响的重要表现，是评价土壤生产力的重要指标[30]。连续 4 年土壤有效含水率变化倾向与田间持水率相同。由此可见，施加生物炭可以提高土壤的饱和含水率，适量的生物炭可以提高田间持水率和土壤有效含水率，但是过高的施炭量会降低土壤的持水性能，甚至产生负效应。

2.2.2 对土壤储水量的影响

施加生物炭后 0～100 cm 土层的土壤储水量如表 4 所示。由表 4 可知，随施炭量的增加，2015—2016 年各生育阶段 0～60 cm 土壤储水量呈先升高后降低的倾向，2015 年各生育阶段各处理均在 C75 处取得最大值，各施炭处理与 C0 相比均达到显著性差异（$P<0.05$）；2016 年各生育阶段各处理均在 C25 处取得最大值，各施炭处理与 C0 相比达到显著性差异（$P<0.05$）。随施炭量的增加，2017—2018 年各生育阶段 0～60 cm 土壤储水量呈下降倾向。2017、2018 年 C100 处理各生育阶段土壤储水量较 C0 处理分别降低 12.37%、14.01%（苗期），7.2%、11.11%（拔节期），10.2%、15%（抽雄期）和 10.67%、11.12%（灌浆期），差异达到显著水平（$P<0.05$）。随施炭量的增加，连续 4 年各生育阶段 60～100 cm 土壤储水量呈降低倾向，4 年 C100 处理各生育阶段土壤储水量较 C0 处理分别降低 5.75%、4.83%、3.32%、2.36%（苗期），4.83%、8.32%、11.84%、13.73%（拔节期），3.32%、6.87%、14.46%、12.75%（抽雄期）和 2.36%、5.94%、13.35%、12.88%（灌浆期），差异均达到显著水平（$P<0.05$）。综合 4 年试验分析，施加适当的生物炭可提高 0～60 cm 土层的土壤储水量，降低 60～100 cm 土层的土壤储水量，而过高的施炭量会使生物炭对土壤蓄水保水的改良效果减弱。

表 3 2015—2018 年土壤水分常数指标

Tab. 3 Soil water constant index in 2015－2018 %

处理	田间持水率				饱和含水率				土壤有效含水率			
	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
C0	31.96[e]	32.33[e]	32.54[e]	32.62[d]	43.94[e]	43.15[e]	43.56[e]	43.57[e]	24.50[d]	24.79[c]	24.95[c]	25.01[c]
C25	33.25[d]	33.16[d]	35.66[b]	37.33[a]	45.12[d]	46.73[d]	49.48[d]	51.28[d]	24.77[d]	24.98[b]	26.39[a]	27.13[a]
C50	33.82[c]	35.94[a]	36.10[a]	36.69[b]	46.28[c]	50.79[c]	54.12[c]	57.48[c]	25.25[c]	26.12[a]	25.27[b]	25.20[b]
C75	34.65[b]	35.23[b]	34.12[c]	33.83[e]	48.87[b]	55.11[b]	58.16[b]	59.80[b]	25.64[b]	24.90[bc]	23.20[d]	22.78[d]
C100	35.69[a]	33.91[c]	33.65[d]	30.37[c]	50.73[a]	55.91[a]	59.70[a]	62.30[a]	25.93[a]	23.74[d]	22.66[e]	19.90[e]

2.3 施加生物炭对玉米产量及其可持续性的影响

2.3.1 对玉米产量及其构成要素的影响

表 5 为各年份玉米产量及其构成要素。由表 5 可知，同一施用年限，玉米产量随施炭量的增加呈先增后减倾向，2015、2016 年均在 C50 处理产量最大，较 C0 分别提高了 14.12%、11.97%，达到显著性差异（$P<0.05$）；2017、2018 年均在 C25 处理产量最大，较 C0 分别提高了 13.89%、13.74%，而 2018 年的 C100 处理产量却低于对照处理 1.1%，差异未达到显著水平（$P>0.05$）。玉米穗长、穗径和百粒质量的变化规律与玉米产量大致相同，各年份最优处理分别为 C50、C50、C25、C25；而 2017 年 C100 处理

表 4　2015—2018 年 0 ~ 100 cm 土层土壤储水量

Tab. 4　Soil water storage in 0 ~ 100 cm of soil layer in 2015 – 2018　　mm

生育阶段	处理	0 ~ 60 cm				60 ~ 100 cm			
		2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
苗期	C0	165.0^{e}	148.4^{b}	157.3^{a}	155.9^{a}	304.8^{a}	304.8^{a}	282.9^{a}	303.6^{a}
	C25	168.7^{d}	152.6^{a}	154.8^{b}	151.1^{b}	300.4^{b}	297.8^{b}	273.1^{b}	286.1^{b}
	C50	170.1^{b}	148.5^{b}	149.6^{c}	139.4^{c}	294.6^{c}	286.7^{c}	259.4^{c}	269.9^{c}
	C75	170.4^{a}	138.6^{c}	139.8^{d}	134.2^{d}	293.6^{d}	280.4^{d}	253.0^{d}	266.1^{d}
	C100	169.6^{c}	136.0^{d}	137.9^{e}	134.1^{d}	287.2^{e}	276.7^{e}	250.5^{e}	262.5^{e}
拔节期	C0	150.4^{d}	159.4^{c}	165.6^{a}	159.3^{a}	280.0^{a}	280.0^{a}	300.2^{a}	292.7^{a}
	C25	150.7^{c}	168.6^{a}	165.2^{b}	159.1^{b}	276.5^{b}	274.0^{b}	289.7^{b}	277.5^{b}
	C50	151.1^{b}	165.5^{b}	164.6^{c}	155.2^{c}	273.3^{c}	266.0^{c}	267.8^{c}	262.8^{c}
	C75	151.4^{a}	151.9^{d}	153.7^{d}	142.4^{d}	270.8^{d}	258.6^{d}	264.6^{d}	256.3^{d}
	C100	151.1^{b}	151.8^{d}	153.4^{e}	138.0^{e}	266.5^{e}	256.7^{e}	261.1^{e}	252.5^{e}
抽雄期	C0	172.5^{d}	158.7^{b}	146.3^{a}	132.5^{a}	287.5^{a}	287.5^{a}	309.4^{a}	275.4^{a}
	C25	173.5^{b}	162.6^{a}	146.2^{a}	128.7^{b}	280.3^{c}	276.9^{b}	297.5^{b}	260.3^{b}
	C50	174.3^{a}	158.3^{c}	144.6^{b}	123.4^{c}	280.8^{b}	272.5^{c}	275.1^{c}	246.2^{c}
	C75	174.3^{a}	146.5^{d}	137.9^{c}	117.1^{d}	280.0^{d}	268.2^{d}	264.6^{d}	243.4^{d}
	C100	173.0^{c}	146.1^{e}	131.5^{d}	109.4^{e}	278.0^{e}	267.8^{e}	261.1^{e}	240.3^{e}
灌浆期	C0	155.3^{e}	148.4^{b}	173.2^{a}	180.5^{a}	266.8^{a}	266.8^{a}	300.2^{a}	298.8^{a}
	C25	158.3^{d}	151.4^{a}	173.2^{a}	180.0^{b}	265.6^{b}	263.3^{b}	289.7^{b}	291.5^{b}
	C50	159.8^{c}	144.1^{c}	169.0^{b}	168.6^{c}	263.2^{c}	256.2^{c}	270.9^{c}	272.8^{c}
	C75	163.1^{a}	139.8^{d}	155.7^{c}	163.7^{d}	263.1^{c}	251.2^{d}	261.1^{d}	263.8^{d}
	C100	162.3^{b}	139.8^{d}	154.7^{d}	160.4^{e}	260.5^{d}	251.0^{e}	260.1^{e}	260.3^{e}

表 5　2015—2018 年玉米产量及其构成要素

Tab. 5　Maize production and components in 2015—2018

年份	处理	穗长/cm	穗径/cm	百粒质量/g	产量/(kg·hm^{-2})
2015	C0	(21.2 ± 1.24)^{b}	(5.06 ± 0.27)^{b}	(34.84 ± 1.67)^{a}	(8 500 ± 200)^{d}
	C25	(22.7 ± 0.83)^{ab}	(5.44 ± 0.34)^{ab}	(36.56 ± 0.55)^{a}	(9 400 ± 67)^{bc}
	C50	(23.2 ± 0.39)^{a}	(5.63 ± 0.18)^{a}	(36.99 ± 1.08)^{a}	(9 700 ± 100)^{a}
	C75	(22.1 ± 0.93)^{ab}	(5.51 ± 0.46)^{ab}	(35.92 ± 1.86)^{a}	(9 600 ± 133)^{ab}
	C100	(21.6 ± 1.08)^{ab}	(5.40 ± 0.21)^{ab}	(35.45 ± 2.06)^{a}	(9 200 ± 50)^{c}
2016	C0	(22.3 ± 0.54)^{b}	(5.34 ± 0.30)^{a}	(31.94 ± 1.76)^{c}	(9 200 ± 150)^{b}
	C25	(23.1 ± 1.03)^{ab}	(5.45 ± 0.26)^{a}	(33.36 ± 0.33)^{bc}	(10 200 ± 250)^{a}
	C50	(24.5 ± 0.50)^{a}	(5.72 ± 0.19)^{a}	(36.87 ± 2.15)^{a}	(10 300 ± 150)^{a}
	C75	(24.1 ± 0.86)^{a}	(5.5 ± 0.25)^{a}	(35.28 ± 1.58)^{ab}	(10 150 ± 150)^{a}
	C100	(23.8 ± 1.14)^{ab}	(5.48 ± 0.33)^{a}	(32.44 ± 1.63)^{bc}	(9 500 ± 166)^{b}
2017	C0	(21.6 ± 0.32)^{bc}	(5.22 ± 0.16)^{b}	(33.45 ± 1.41)^{bc}	(9 000 ± 200)^{c}
	C25	(24.0 ± 0.43)^{a}	(5.69 ± 0.14)^{a}	(36.41 ± 0.69)^{a}	(10 250 ± 225)^{a}
	C50	(23.6 ± 0.92)^{a}	(5.56 ± 0.24)^{ab}	(36.00 ± 1.67)^{ab}	(10 150 ± 350)^{a}
	C75	(22.8 ± 1.2)^{ab}	(5.34 ± 0.36)^{ab}	(33.94 ± 0.85)^{abc}	(9 600 ± 166)^{b}
	C100	(21.3 ± 0.45)^{c}	(5.24 ± 0.07)^{b}	(32.52 ± 2.36)^{c}	(9 200 ± 450)^{bc}
2018	C0	(21.8 ± 0.95)^{c}	(5.17 ± 0.33)^{c}	(33.26 ± 1.83)^{b}	(9 100 ± 200)^{c}
	C25	(24.6 ± 1.68)^{a}	(5.84 ± 0.29)^{a}	(37.02 ± 1.14)^{a}	(10 350 ± 150)^{a}
	C50	(23.9 ± 0.45)^{ab}	(5.76 ± 0.09)^{ab}	(36.59 ± 0.65)^{a}	(10 225 ± 225)^{a}
	C75	(22.3 ± 0.32)^{bc}	(5.37 ± 0.43)^{abc}	(34.15 ± 1.26)^{b}	(9 850 ± 166)^{b}
	C100	(21.7 ± 0.67)^{c}	(5.16 ± 0.36)^{bc}	(33.24 ± 1.52)^{b}	(9 000 ± 200)^{c}

的穗长，2017、2018 年 C100 处理的百粒质量却低于对照处理 1.39%、2.78%、0.06%，差异不显著（$P > 0.05$）。同一施炭量，C25 处理产量随着施用年限的增加逐渐升高，2018 年较 2015 年增加了 10.1%；C50、C75 处理在 2016 年产量达到最大，较 2015 年分别增加了 6.18%、5.72%；随着施用年限的增加 C100 处理产量呈先升高后降低倾向，2016 年最高，较 2015 年增加了 3.26%，而 2018 年较 2015 年降低

了 2.17%。各处理玉米穗长、穗径和百粒质量与产量的变化规律大体相同。综上分析可知,连续施加 25 t/hm^2 的生物炭会使产量提高,连续施加 50、75、100 t/hm^2 的生物炭均在第 2 年产量达到最大。

2.3.2 对产量稳定性及可持续性的影响

如图 4 所示,玉米可持续性产量指数 SYI 表征玉米产量的可持续性,变异系数 CV 表征玉米产量的稳定性。SYI 是评价作物产量可持续性的一个重要指标,用以阐明某一处理产量随时间变化过程的可持续程度,进而说明系统是否能持续生产,通常情况下,SYI 越大,产量的可持续性越高[31]。SYI 可分为 3 个等级:第 1 等级包括 C50 和 C100 处理(SYI 大于 0.94,其中 C50 处理为 0.954);第 2 等级包括 C0 和 C75 处理(SYI 大于 0.93 且小于 0.94);C25 处理为第 3 等级(SYI 小于 0.93)[32]。变异系数 CV 可衡量同一品种作物不同年份平均产量间的变异程度[26],CV 越大则说明产量稳定性越低。玉米产量的变异系数可分为 3 个水平:C25 处理最高(CV 大于 0.04);C0 处理次之(CV 等于 0.035);C50、C75 和 C100 处理最低(CV 小于 0.03,其中 C100 处理为 0.022)。这说明,生产实践中加入生物炭有利于促进玉米产量稳定性与可持续性的提高,其中逐年施加 50 t/hm^2 生物炭的处理效果最明显。

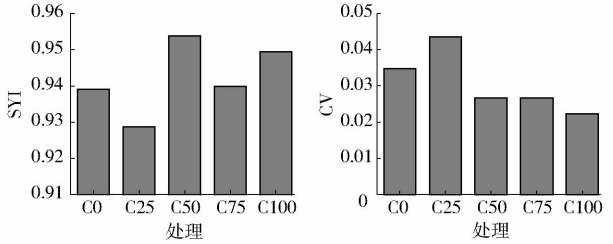

图 4 不同处理的玉米 SYI 和 CV

Fig. 4 SYI and CV in maize under different treatments

3 讨论

从土壤学方面来看,土壤结构在土壤理化性质、水分运移中发挥重要的作用,是调节土壤中水、肥、气、热的关键因素。研究表明,土壤结构越合理,土壤肥力和产量越高[33]。在本研究中,土壤容重随生物炭施加量的增加逐渐降低,孔隙度随生物炭施加量的增加逐渐升高,这与李昌见等[34]的研究结果一致。原因有两方面:①由于生物炭本身具有孔隙结构发达、质轻、颗粒细小、比表面积大等结构特点,施入土壤后可改善土壤结构[35]。②由于生物炭含有烃基等官能团,具有强大的吸附能力,可以增加土壤微生物量和生物活性,增强团聚性,从而改善土壤结构。

土壤三相比在评价土壤水、肥、气、热相互关系方面有重要意义。在本研究中,随着生物炭施加量的增加,土壤固相质量分数逐渐降低,气相质量分数逐渐增加;2015 年 GSSI 与施碳量呈正相关,STPSD 与施碳量呈负相关,2016—2018 年 GSSI 随施炭量的增加先增大后减小,STPSD 先减小后增大,在 2017 年 C50 处理处 GSSI 取得最大值,STPSD 和 R 取得最小值,土壤三相比最接近理想三相比,而 C100 处理的土壤结构逐年变差,这与刘慧等[36]的研究结果一致。这是由于累积施炭量过高使土壤液相、气相体积分数失调,进而导致土壤结构变差。

土壤团粒结构是土壤肥力的物质基础。在本研究中,土壤中大于 5 mm 粒级水稳性团聚体含量会因施加生物炭增加,1 ~ 2 mm、2 ~ 5 mm 粒级水稳性团聚体含量会因施加生物炭减少;适量生物炭可以增加 0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm 粒级水稳性团聚体含量。这与尚杰[37]的研究结果一致。本试验结果显示:$R_{0.25}$、MWD、GMD 随施炭量的增加均呈先增后减倾向,且在第 3 年 C50 处理提高最大。这与徐国鑫等[38]的研究结果相似。

生物炭施入土壤后可改善土壤结构,增加土壤水分含量[39],这是由于生物炭具有疏松多孔、高比表面积和强吸附等特性。在本试验中饱和含水率与施炭量呈正相关,土壤有效含水率在施加第 1 年与施炭量呈正相关,在后 3 年随生物炭的增加呈先升高后降低倾向,田间持水率与土壤有效含水率变化倾向一致。这是因为过高施炭量会使土壤的持水能力减弱[10],导致田间持水率下降。这与颜永毫等[40]研究结果一致。在本研究中,连续 4 年施加生物炭可以增加 0 ~ 60 cm 土层的土壤储水量,但累积施炭量过高会降低土壤储水量,产生这种现象的原因是生物炭本身的强吸附性可以吸附降雨,但当施炭量过高时,会超过生物炭的最大吸附能力,导致储水量降低[41]。而生物炭保水作用是持水性与斥水性相互作用的结果[21],在 60 ~ 100 cm 土层,斥水作用和细粒子结构阻塞了上层渗水,因此降低了下层土壤储水量。这与李荣等[42]和魏永霞等[43]的研究结论相似。

许多学者认为施加生物炭可提高作物产量及其构成要素[44]。本试验通过连续 4 年施加生物炭得出以下结果:在相同施用年限,玉米产量随施炭量的增加先增后减,4 年内 2015 年 C50 处理对产量及其构成要素提高效果最好。2018 年 C100 处理玉米穗长、穗径、百粒质量和产量均低于对照处理,这与魏永霞等[45]的结论一致。陈欢等[46]认为施加生物炭可以提高作物产量稳定性;姜慧敏等[20]经过 3 年试

验研究得出施加生物炭可以提高作物产量的可持续性。在本研究中，综合比较 5 种不同施炭模式下玉米产量的稳定性和可持续性，除 C25 处理外，连续 4 年施加生物炭各处理 SYI 都高于 C0 处理，CV 都低于 C0 处理，其中 C50 处理 SYI 最大，C100 处理 CV 最小。表明施加生物炭可以一定程度增加玉米产量的可持续性及稳定性，进而降低环境、生物与人为因素等对产量的影响[47]。

4　结论

（1）4 年中土壤容重随生物炭的增加有减小的倾向，孔隙度有逐渐增加的倾向；适量生物炭可有效降低土壤固相比例，提高气相和液相比例，除 2015 年外，连续 3 年广义土壤结构指数（GSSI）随施炭量的增加先增大后减小，土壤三相结构距离指数（STPSD）随施炭量的增加先减小后增大，均在第 3 年 C50 处理达到最优（99.96、0.63），同时土壤三相比偏离值 R 最小（1.03），三相比最接近理想状态；连续 4 年大于 0.25 mm 团聚体含量 $R_{0.25}$、平均质量直径（MWD）和几何平均直径（GMD）随着生物炭的增加呈先增加后减小倾向。连续 3 年加入 50 t/hm^2 生物炭提高土壤稳定性的效果最好。

（2）连续 4 年饱和含水率与施炭量呈正相关；除 2015 年外，田间持水率随施炭量的增加先增加后减小，分别在 C100、C50、C50 和 C25 处达最优处理，在 2018 年 C25 处为峰值 37.33%；土壤有效含水率与田间持水率的变化规律相同。随施炭量的增加，玉米各生育期 0 ~ 60 cm 土层土壤储水量呈先升高后降低倾向；60 ~ 100 cm 土层土壤储水量与施炭量呈负相关。

（3）连续 4 年玉米产量随生物炭施加量的增加呈先增后减倾向。玉米产量可持续性产量指数 SYI 在 C50 处达到最大，为 0.954。变异系数 CV 在 C100 处理处最低，为 0.022。连续施加 25 t/hm^2 的生物炭会使产量提高，连续施加 50 t/hm^2 的生物炭对促进玉米产量稳定性与可持续性效果最明显。

参　考　文　献

[1] 魏丹，匡恩俊，迟凤琴，等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学，2016(1)：158 - 161.
WEI Dan，KUANG Enjun，CHI Fengqin，et al. Status and protection strategies of black soil resources in Northeast China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences，2016(1)：158 - 161.（in Chinese）

[2] 刘慧，魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J]. 农业工程学报，2014，30(20)：288 - 296.
LIU Hui，WEI Yongxia. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation[J]. Transactions of the CSAE，2014，30(20)：288 - 296.（in Chinese）

[3] 杨爱峥，魏永霞，张忠学，等. 坡耕地综合治理技术模式的蓄水保土及增产效应[J]. 农业工程学报，2011，27(11)：222 - 226.
YANG Aizheng，WEI Yongxia，ZHANG Zhongxue，et al. Effects of technology modes for sloping farm-land comprehensive control on soil water conservation and crop yield[J]. Transactions of the CSAE，2011，27(11)：222 - 226.（in Chinese）

[4] 袁帅，赵立欣，孟海波，等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(5)：1402 - 1417.
YUAN Shuai，ZHAO Lixin，MENG Haibo，et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2016，22(5)：1402 - 1417.（in Chinese）

[5] 吴昱，赵雨森，刘慧，等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J]. 农业机械学报，2017，48(7)：247 - 256.
WU Yu，ZHAO Yusen，LIU Hui，et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(7)：247 - 256.（in Chinese）

[6] PICCOLO A，MBAGWU J S C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. Annals of Laboratory Medicine，2014，34(6)：426 - 432.

[7] FORBE M S，RAISON R J，SKJEMSTD J O. Formation，transformation and transport of black carbon（charcoal）in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. Science of the Total Environment，2006，370(1)：190 - 206.

[8] ZU Xiang，LIU Xiaomin，CHEN Yanjing，et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. CATENA，2014，123(2 - 3)：45 - 51.

[9] 陈心想，何绪生，耿增超，等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. 生态学报，2013，33(20)：6534 - 6542.
CHEN Xinxiang，HE Xusheng，GENG Zengchao，et al. Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield[J]. Journal of Ecology，2013，33(20)：6534 - 6542.（in Chinese）

[10] 魏永霞，张翼鹏，张雨凤，等. 黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J]. 农业机械学报，2018，49(2)：284 - 291，312.
WEI Yongxia，ZHANG Yipeng，ZHANG Yufeng，et al. Influences of two consecutive years supply of biochar on soil improvement，water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(2)：284 - 291，312.（in Chinese）

[11] 朱秋丽，王纯，严锦华，等. 施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体及碳氮磷含量的影响[J]. 水土保持学报，2017，31(4)：191 - 197.
ZHU Qiuli，WANG Chun，YAN Jinhua，et al. Effects of straw and waste application on soil aggregates and soil carbon，nitrogen and phosphorus in the jasmine garden[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，31(4)：191 - 197.（in Chinese）

[12] 邱晓蕾,宗良纲,刘一凡,等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 环境科学,2015,36(3):1045-1052.
QIU Xiaolei,ZONG Lianggang,LIU Yifan,et al. Effects of different cultivation patterns on soil aggregates and organic carbon fractions[J]. Environmental Science,2015,36(3):1045-1052. (in Chinese)
[13] 王月玲,耿增超,王强,等. 生物炭对塿土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学,2016,37(9):3634-3641.
WANG Yueling,GENG Zengchao,WANG Qiang,et al. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil[J]. Environment Science,2016,37(9):3634-3641. (in Chinese)
[14] 刘菁华,米彩红,周丽丽,等. 生物炭还田对融雪期棕壤有效养分的影响[J]. 西北农业学报,2018,27(6):880-887.
LIU Jinghua,MI Caihong,ZHOU Lili,et al. Effect of biochar returning on brown soil available nutrient during snowmelt period [J]. Northwest Agricultural Journal,2018,27(6):880-887. (in Chinese)
[15] BUSSCHER W J,NOVAK J M,JEFF M,et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a norfolk loamy sand[J]. Soil Science,2010,175(1):10-14.
[16] 勾芒芒,屈忠义,杨晓,等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J]. 农业机械学报,2014,45(1):137-142.
GOU Mangmang,QU Zhongyi,YANG Xiao,et al. Coupling effect of biochar and fertilizer on soil water content and tomato yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):137-142. (in Chinese)
[17] ALFREDl O,JAN M,VEGARD M,et al. Insitu effects of biochar on aggregation,water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. Soil and Tillage Research,2016,155:35-44.
[18] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. 农业工程学报,2018,34(3):159-165.
YUAN Jingjing,TONG Yan'an,LU Shaohui,et al. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):159-165. (in Chinese)
[19] 李中阳,齐学斌,樊向阳,等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(12):119-124.
LI Zhongyang,QI Xuebin,FAN Xiangyang,et al. Influences of biochars on growth,yield,water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(12):119-124. (in Chinese)
[20] 姜慧敏,郭俊姆,刘晓,等. 不同来源氮素配合施用提高东北春玉米氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):933-941.
JIANG Huimin,GUO Junmei,LIU Xiao,et al. Effects of combined application of nitrogen from different source on nitrogen utilization of spring maize and sustainability of soil fertility in Northeast China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2017,23(4):933-941. (in Chinese)
[21] ASAI H,SAMSON B K,STEPHAN H M,et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos:1. Soil physical properties,leaf SPAD and grain yield[J]. Field Crops Research,2009,111(1-2):81-84.
[22] 李亚森,丁松爽,殷全玉,等. 多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响[J]. 环境科学,2019,40(2):915-923.
LI Yasen,DING Songshuang,YIN Quanyu,et al. Effect of long-term biochar application on soil respiration in flue-cured tobacco planting fields in Henan Province[J]. Environmental Science,2019,40(2):915-923. (in Chinese)
[23] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟. 基于土壤三相的广义土壤结构的定量化表达[J]. 生态学报,2009,29(4):2067-2072.
WANG Enzhen,ZHAO Yusen,CHEN Xiangwei. Quantitative of generalized soil structure based on soil three phase[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(4):2067-2072. (in Chinese)
[24] 朱秋丽,曾冬萍,王纯,等. 废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J]. 环境科学学报,2016,36(8):3000-3008.
ZHU Qiuli,ZENG Dongping,WANG Chun,et al. Effects of waste applications on the distribution and stability of soil aggregates in the paddy field of Fuzhou plain[J]. Acta Scientiae Cirumstantiae,2016,36(8):3000-3008. (in Chinese)
[25] 白永红,高志永,陆静,等. 模拟干化土壤中的植被生长及土壤水分变化[J]. 西北林学院学报,2018,33(5):1-8,74.
BAI Yonghong,GAO Zhiyong,LU Jing,et al. Effects of simulated dry soil on vegetation growth and soil water variaton[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(5): 1-8,74. (in Chinese)
[26] 刘振兴,杨振华,邱孝煊,等. 肥料增产贡献率及其对土壤有机质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1994(5):19-26.
LIU Zhenxing,YANG Zhenhua,QIU Xiaoxuan,et al. Contribution of fertilizers to yield increase and its effect on soil organic matter[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,1994(5):19-26. (in Chinese)
[27] 李忠芳,徐明岗,张会民,等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. 应用生态学报,2010,21(5):1264-1269.
LI Zhongfang,XU Minggang,ZHANG Huimin,et al. Sustainability of crop yield in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(5):1264-1269. (in Chinese)
[28] 李晓龙,高聚林,胡树平,等. 不同深耕方式对土壤三相比及玉米根系构型的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(4):1-7,29.
LI Xiaolong,GAO Julin,HU Shuping,et al. Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize[J]. Agricultural Research in Arid Areas,2015,33(4):1-7,29. (in Chinese)
[29] WILLIAMS J R,ALLMARAS R R,RENARD K G. Soil erosion effect on soil productivity:a research perspective[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1981,36(2):82-90.
[30] YAN F L,SHI Z H,LI Z X,et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of ultisols in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research,2008,100(1-2):34-41.

[31] 刘明钟,张爱君,魏猛,等.长期施肥对潮土有机碳含量及小麦产量的影响[J].江苏农业科学,2018,46(24):88－91.
LIU Mingzhong,ZHANG Aijun,WEI Meng,et al. Effects of long-term fertilization on organic carbon content and wheat yield in fluvo-aquic soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(24):88－91. (in Chinese)

[32] 高洪军,彭畅,张秀芝,等. 长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4790－4799.
GAO Hongjun,PENG Chang,ZHANG Xiuzhi,et al. Effect of long-term different fertilization on maize yield stability in the northeast black soil region[J]. Scientia Agricultura Sinica,2015,48(23):4790－4799. (in Chinese)

[33] SHINJO H,FUJITA H,GINTZBURGER G. Soil aggregate stability under different land scapes and vegetation types in asemiarid area in Northeastern Syria[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2000,46(1):229－240.

[34] 李昌见,屈忠义,勾芒芒,等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(11):2187－2193.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. Journal of Agro-Environment Science,2014,33(11):2187－2193. (in Chinese)

[35] 房彬,李心清,赵斌,等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报,2014,23(8):1292－1297.
FANG Bin,LI Xinqing,ZHAO Bin,et al. Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field[J]. Ecology and Environmental Sciences,2014, 23(8):1292－1297. (in Chinese)

[36] 刘慧,温小艳,李禹韬,等.生物炭施用模式生态效益与经济效益耦合协调度研究[J].农业机械学报,2021,52(11):287－296.
LIU Hui,WEN Xiaoyan,LI Yutao,et al. Coupling coordination degree of ecological benefits and economic benefits of biochar application models[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):287－296. (in Chinese)

[37] 尚杰. 添加生物炭对塿土理化性质和作物生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
SHANG Jie. Effect of adding biochar on the physical and chemical properties and crop growth in Lou soil[D]. Yangling: Northwest A&F University,2016. (in Chinese)

[38] 徐国鑫,王子芳,高明,等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学,2018,39(1):355－362.
XU Guoxin,WANG Zifang,GAO Ming,et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2018,39(1):355－362. (in Chinese)

[39] 王艳阳,魏永霞,孙继鹏,等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报,2016,32(8):113－119.
WANG Yanyang,WEI Yongxia,SUN Jipeng,et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(8):113－119. (in Chinese)

[40] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(4):120－124,190.
YAN Yonghao,ZHENG Jiyong,ZHANG Xingchang,et al. Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(4):120－124,190. (in Chinese)

[41] 王湛,李银坤,王利春,等. 生物炭对有机菜心产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业机械学报,2018,49(12):273－280.
WANG Zhan,LI Yinkun,WANG Lichun,et al. Effects of biochar on yield,quality and water utilization of organic flowering Chinese cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):273－280. (in Chinese)

[42] 李荣,王敏,贾志宽,等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(2):106－113.
LI Rong,WANG Min,JIA Zhikuan,et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature,moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(2):106－113. (in Chinese)

[43] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(5):285－294.
WEI Yongxia,SHI Guoxin, FENG Chao,et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):285－294. (in Chinese)

[44] 张进红,吴波,王国良,等.生物炭对盐渍土理化性质和紫花苜蓿生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(8):285－294.
ZHANG Jinhong, WU Bo, WANG Guoliang, et al. Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):285－294. (in Chinese)

[45] 魏永霞,石国新,冯超,等. 黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(8):309－320.
WEI Yongxia,SHI Guoxin,FENG Chao,et al. Effects of applying biochar on soil structure and soybean yield on slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):309－320. (in Chinese)

[46] 陈欢,曹承富,孔令聪,等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. 中国农业科学,2014,47(13):2580－2590.
CHEN Huan,CAO Chengfu,KONG Lingcong,et al. Study on wheat yield stability in Huaibei lime concretion black soil area based on long-term fertilization experiment[J]. Scientia Agricultura Sinica,2014,47(13):2580－2590. (in Chinese)

[47] 杨生茂,李凤民,索东让,等. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(10): 2043－2052.
YANG Shengmao, LI Fengmin, SUO Dongrang, et al. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu Oasis[J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(10):2043－2052. (in Chinese)