

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.034

施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响

魏永霞^{1,2} 肖敬萍¹ 王鹤¹ 石蕴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. 东北农业大学文理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明施加生物炭对黑土坡耕地的持续影响,以东北黑土区1.5°、3°、5°的坡耕地田间径流小区为研究对象,对土壤结构及其养分进行为期4年的观测。于2016年试验开始前,按75 t/hm²一次性施加玉米秸秆生物炭,各坡度均设置不施加生物炭的对照组,共计6个小区,后续年份不再施加生物炭。结果表明,单次施加生物炭能够提高土壤气相、液相比例,提高通气性和持水能力,改善土壤三相比例,较对照组土壤孔隙度提高2.83%~5.56%,土壤容重降低1.89%~3.62%。施炭后土壤中有机质、铵态氮、速效钾含量显著提高,分别提高9.54%~18.21%、21.35%~28.02%、11.99%~22.71%。各项指标均随着时间的推移有所降低。采用随机森林回归模型评估得出综合肥力等级指数,并拟合回归方程预测2020—2022年等级指数,比较肥力变化情况得出单次施用生物炭对培肥土壤作用的有效年限为6~7年。

关键词: 生物炭; 黑土坡耕地; 改土培肥效应; 随机森林模型

中图分类号: S152.5; S158.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0305-10

OSID:



Continual Influences of Applying Biochar on Soil Improvements in Sloping Farmland of Black Soil Region in Northeast China

WEI Yongxia^{1,2} XIAO Jingping¹ WANG He¹ SHI Yun¹ LIU Hui^{2,3}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency 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 ascertain the sustained influence of the application of biochar on sloping farmland in black soil region of Northeast China, field runoff plots with 1.5°, 3° and 5° of typical slopes in the region was chosen, where the 4-years experiments were conducted, and soil structure and soil nutrients were observed. In 2016, before the start of the experiment, biochar derived from corn straw was applied with 75 t/hm² in the soil, and a control group was without biochar application on each slope plots, counted up to six plots. Biochar was not applied in subsequent years. The results showed that the application of biochar can increase soil gas phase and liquid phase ratio, improve soil aeration, improve soil three-phase ratio, and then increase porosity by 2.83% ~ 5.56% and decrease bulk density by 1.89% ~ 3.62%. The contents of organic matter, ammonium nitrogen and available potassium in the soil were significantly increased after the application of biochar, increased by 9.54% ~ 18.21%, 21.35% ~ 28.02%, and 11.99% ~ 22.71%, respectively. And the effects of above was weakened with time. A random forest regression model was used to evaluate the comprehensive fertility grading indexes and fit the regression equation to predict the indexes of 2020—2022. Comparing fertility changes, it was concluded that the reasonable and effective life for one time application of biochar on soil fertility in the region would be 6 ~ 7 years.

Key words: biochar; slope farmland on black soil; soil improvements; random forest model

收稿日期: 2020-06-24 修回日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、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,主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: xiaolaida@163.com

0 引言

东北黑土区是我国主要粮食生产基地^[1]。该区土壤以黑土、黑钙土及草甸黑土为主,黑土结构好、肥力高、性状佳,是重要的土壤资源,特别适合玉米、大豆等粮食作物的生长。长期以来,由于耕作过度、滥用土地资源等人为因素致使土壤各项指标弱化,土壤有机质和养分含量下降、容重增大,从而导致土壤持水保肥能力降低、耕地质量下降,制约了社会、经济、生态的可持续发展。因此,研究黑土区土壤的科学保护与改良对农业可持续发展具有重要意义。

东北地区每年产生大量的秸秆资源,约占全国秸秆总量的19.2%^[2]。2017年黑龙江省秸秆产量约占全国秸秆总量的8.7%^[3],近年来仍呈增长趋势。随着农业经济的发展、生活条件和燃料结构的改变,秸秆常作为农业废弃物进行焚烧处理,这不但造成资源的严重浪费,而且易发生火灾和污染环境^[3]。因此,将秸秆制成生物炭施加于土壤中是东北地区秸秆资源合理利用的有效途径。

生物炭(Biochar)是农林废弃物等生物质(如作物秸秆、动物粪便等)在缺氧条件下热裂解形成的稳定的富碳产物^[4],一般含碳量大于50%,主要由芳香烃和单质碳或具有类石墨结构的碳组成,除富含大量的碳化组分外,也包含了大量的非碳化组分(N、P、K、Ca、Mg等)^[5]。含碳率高、孔隙结构丰富、比表面积大、理化性质稳定是生物炭固有的特点,这是生物炭能够还田改土、提高农作物产量、实现碳封存的重要结构基础。生物炭作为土壤改良剂,能够培肥地力,对实现作物高产、资源高效利用和环境保护具有重要作用。近年来,研究人员逐渐将生物炭应用于农业领域,且应用越来越广泛,生物炭在改善土壤结构、水分特性、养分以及节水增效等方面较其他有机添加物更具安全性和持久性。大量研究表明,施加生物炭可使土壤容重降低和孔隙度增加^[5-7]、田间持水率和饱和含水率升高^[5-6]、土壤肥力提高^[8-9]、作物产量和水分利用效率提高^[10-12]。

生物炭是惰性碳源,具有极强的稳定性,施入土壤后作用持续、长久。目前的研究多是在短期施加生物炭条件下研究生物炭对土壤理化性质的影响,对一次施加的持续性影响研究较少。曾爱等^[13]研究了不同生物炭施用量对小麦各生育期壤土的土壤含水量及速效养分含量等的影响。李明等^[10]通过短期室内培育试验,研究了不同性质生物炭对红壤性水稻土养分和微生物群落结构的影响。战秀梅等^[14]进行了连续4年定位试验,探索生物炭及炭基

肥改良棕壤理化性质和提高花生产量的作用,但试验以连续施用于为前提。本研究以东北黑土区典型的1.5°、3°、5°坡耕地为研究对象,以大豆为供试作物,于2016年一次性施加生物炭,后续年份不再施加,研究生物炭施加后不同坡度和年限对土壤改良和肥力提升的影响,以探索施加生物炭对不同坡度改土培肥的持续效应,为预测生物炭的合理使用年限提供依据,同时为合理节省肥料和秸秆资源提供技术支持,收到改土增产和环保双重效益,促进农业健康可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黑龙江省水利科学研究院综合试验基地(45°43'9"N,126°36'35"E),总面积55 hm²,多年平均气温3.1℃,无霜期130~140 d,多年平均水面蒸发量796 mm。耕地土壤多以黑土为主,入渗能力弱。年降水量介于400~650 mm,多集中在7—9月,且历时较短,7—9月的降水量占全年降水总量的70%以上。供试土壤为壤土,速效氮(N)质量比为100.9 mg/kg,速效磷(P₂O₅)质量比为16.9 mg/kg,速效钾(K₂O)质量比为280.1 mg/kg,pH值7.27。0~80 cm土层平均田间持水率(质量分数)为29.4%,土壤干容重为1.22 g/cm³。

1.2 试验材料

供试生物炭购于辽宁金和福开发有限公司,采用玉米秸秆在450℃无氧条件下烧制而成,粒径为1.5~2.0 mm,全碳质量分数70.38%,全氮质量分数1.53%,全磷质量分数0.73%,全钾质量分数1.66%,灰分质量分数25.7%,pH值为9.36。供试大豆品种为黑河3号。

1.3 试验设计

本试验在黑龙江省水利科学研究院综合试验基地的径流小区内进行,小区规格为2 m×5 m,坡度选择1.5°、3°、5°共3种在东北黑土区耕地中比较有代表性的坡度。每种坡度的径流小区分别设置施加生物炭和不施加生物炭处理,小区编号分别为T1.5、T3、T5和CK1.5、CK3、CK5,共计6个小区,各参数测定时按照坡上、坡中、坡下3次重复取其均值。各径流小区采用相同的施肥方案,化肥施用量为尿素57 kg/hm²、磷酸二铵146.5 kg/hm²、氯化钾63 kg/hm²,均以底肥形式于播种时一次性施入,试验在雨养条件下进行。根据前期研究成果^[15],生物炭施用量选择施用后增产效果较好的75 t/hm²,生物炭仅在2016年施用,2017—2019年均不再施加。生物炭施用方法为2016年播种前将生物炭粉均匀

铺撒于土壤表面,人工搅拌至与0~20 cm表层土壤充分均匀混合后静置待用。

1.4 观测指标与测量方法

1.4.1 土壤容重、孔隙度及三相比

在大豆全生育期末于各小区0~20 cm土层取土壤样品,采用室内环刀法测定土壤容重,利用DIK-1130型土壤三相仪进行孔隙度及土壤三相比的测定。

测定土壤三相比与适宜状态下土壤三相比在空间距离上的差值^[16-17]计算式为

$$R = \sqrt{0.4(X-50)^2 + (Y-25)^2 + 0.6(Z-25)^2} \quad (1)$$

式中 X——土壤固相比例

Y——土壤液相比例

Z——土壤气相比例

1.4.2 土壤养分指标

土壤有机质含量按照NY/T 1121.6—2006标准,采用重铬酸钾外加热法测定各小区土样有机质含量;铵态氮按LY/T 1228—2015标准,采用靛酚蓝比色法测定各小区土样N含量;有效磷含量使用Olsen法,采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定各小区土样P₂O₅含量;速效钾按照NY/T 889—2004标准,采用浸提火焰光度法测定各小区土样K₂O含量;土壤pH值采用PHS-3C型酸度计测量各小区土样pH值。

1.5 随机森林回归模型

随机森林回归(Random forest regression, RFR)模型是由BREIMAN^[18]于2001年提出的一种统计学习理论。RFR模型数据挖掘能力强、预测准确率高,善于处理多特征数据^[19-20]。在生成随机森林的过程中,袋外(Out-of-bag, OOB)数据具有无偏性,可代替测试样本评估模型的精确度。模型利用OOB数据的均方残差评价自变量对因变量的影响程度,即特征重要性的评估^[21-22]。本试验中采用随机森林回归模型对土壤养分进行综合评估,便于直观了解施加生物炭对土壤养分的改良情况,并估测生物炭对土壤养分改良的有效年份。应用随机森林算法进行土壤肥力评估的流程参照文献[23-24]。

1.6 数据处理方法

应用Microsoft Excel 2010、Origin 8.5、Matlab R2014a对数据进行处理与绘图。采用SPSS 19.0软件进行方差分析和回归分析,显著性水平为0.05、0.01,使用最小显著极差法(LSD法)进行多重比较。采用随机森林模型进行建模训练和土壤肥力评估,预测未来3年土壤综合肥力。各处理上述指标最终均按坡上、坡中、坡下3次重复取平均值。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭对土壤结构性指标的持续影响

2.1.1 施加生物炭对土壤容重的持续影响

土壤容重的变化如图1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示,各年份施加生物炭的各处理容重均低于相同坡度的对照组。施加生物炭当年,1.5°、3°、5°3种坡度施炭处理较对照组分别降低了3.62%、3.31%、3.27%,至施加生物炭后的第4年仍降低了2.43%、2.07%、1.89%,其中2016年T1.5处理容重最低(1.196 g/cm³),2019年CK5处理容重最高(1.252 g/cm³),可见,随着坡度增大,施炭处理较对照组容重的降低幅度呈现减小的趋势;随着时间的延长,容重逐年上升,施炭处理较对照组容重的降低幅度逐年减小,但至试验第4年容重仍极显著降低($P_{2019} = 0.009$)。对施炭处理进行显著性分析,其容重年际间变化均不显著,2016—2017年、2017—2018年、2018—2019年 P 分别为0.331、0.596、0.510,表明施加生物炭的持续效果较好;坡度变化对容重影响不显著($P = 0.058$)。试验结果表明,施用生物炭对容重有显著的负效应,容重随施用年限延长降低效果减弱,坡度影响不显著。

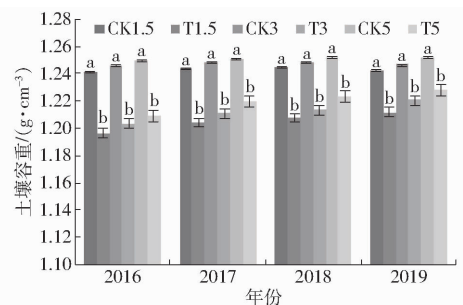


图1 不同处理的土壤容重

Fig. 1 Soil bulk density of different treatments

2.1.2 施加生物炭对土壤孔隙度的持续影响

各处理土壤孔隙度的变化如图2所示,2016年T1.5处理孔隙度达到最大值(49.4%),2019年CK5处理孔隙度达到最小值(45.9%),同一坡度施炭处理较对照处理孔隙度提高2.83%~5.56%。施炭当年,施炭处理孔隙度显著高于对照组,1.5°、3°、5°各坡度施炭处理较对照处理分别提高5.56%、5.17%、4.56%,各年施炭处理(T)与对照处理(CK)各处理变化趋势一致,施炭处理孔隙度随坡度的增加而减小,未施炭的各处理孔隙度略有改变但并不明显,同时,T与CK各处理孔隙度随时间延长而减小,至试验第4年,各坡度的T与CK处理差异仍达到显著水平($P = 0.018$)。试验表明,施加

生物炭作用于土壤孔隙的影响为正效应,有利于提高土壤通气性,且对土壤孔隙度有持续影响,但效果逐年减弱。

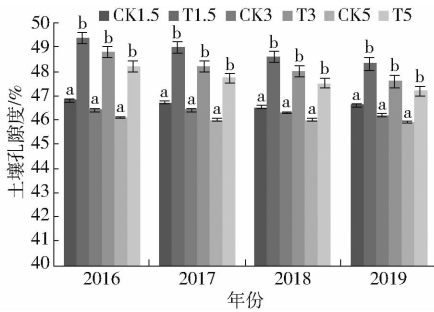


图2 不同处理土壤孔隙度

Fig.2 Soil porosity of different treatments

2.1.3 坡度和年限对容重和孔隙度的交互作用

采用 Matlab 建立施加生物炭小区的容重关于坡度 x 和生物炭施加年限 t 的二元二次多项式回归方程,得到容重 ρ_b 、孔隙度 n 关于生物炭施用后持续年限以及施加坡度的响应关系为

$$\rho_b = 1.182 + 0.004639x + 0.008242t - 0.000206x^2 - 0.0007583t^2 + 0.0003684xt \quad (2)$$

$$n = 50.977 - 0.74498x - 0.6129t + 0.05714x^2 + 0.04167t^2 + 0.015135xt \quad (3)$$

经方差分析,式(2)决定系数 $R^2 = 0.9866$,均方根误差为 0.001443 g/cm^3 ,调整决定系数 R^2_{adj} 为 0.9755 ,由回归结果及回归系数的检验可知,方程能够较好地反映施加生物炭后土壤容重关于施加年份及坡度的响应关系,且施加生物炭后持续年限的一次项对容重影响显著 ($P = 0.011$),除常数项其余各项均不显著。式(3)决定系数 $R^2 = 0.9934$,均方根误差为 0.0724% ,调整决定系数 R^2_{adj} 为 0.9879 ,达到极显著水平,表明方程能够较好地反映施加生物炭后土壤孔隙度关于施用年份及坡度的响应关系。由回归结果及回归系数的检验可知,施加生物炭后持续年限的一次项对孔隙度有显著负效应 ($P = 0.002$),二次项影响不显著 ($P = 0.093$),坡度一次项、二次项对孔隙度影响均极显著 ($P < 0.001$),年限与坡度交互项影响不显著。土壤容重、孔隙度与施用年限、坡度的相应关系如图3、4所示。

2.1.4 施加生物炭对土壤三相结构的持续影响

如图5可知,施加生物炭后,土壤固相比例下降,液相、气相比例有所上升,各处理生物炭对三相影响一致。土壤固相也称土壤基质,对土壤各物理力学性质起着重要的、决定性的影响。施加当年, 1.5° 、 3° 、 5° 坡度各 T 处理的固相较 CK 处理分别降低 4.89% 、 4.48% 和 3.90% ,下降程度随

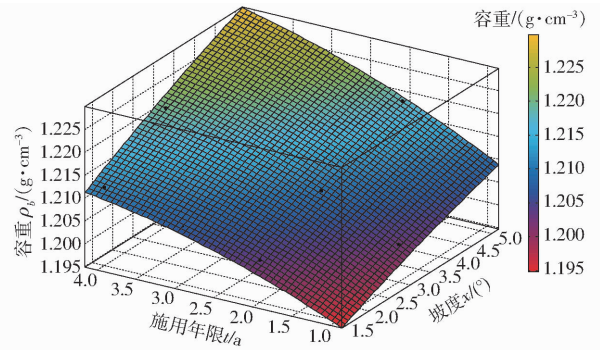


图3 土壤容重与施用年限、坡度的响应关系

Fig.3 Response relationship of soil bulk density with year and slope

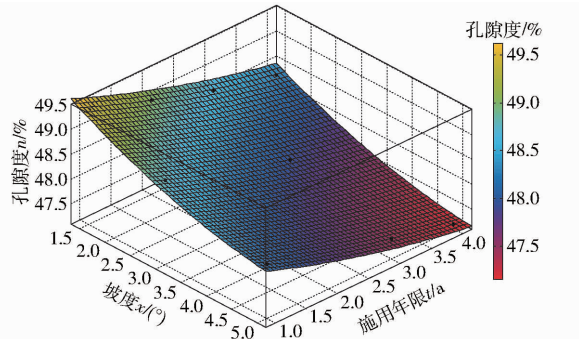


图4 土壤孔隙度与施用年限、坡度的响应关系

Fig.4 Response relationship of soil porosity with year and slope

时间呈减弱的趋势,至2019年,3个坡度T处理固相比例下降 3.18% 、 2.57% 和 2.40% 。液相即土壤溶液,直接参与土壤的形成、变化及作物吸水吸肥等过程。试验中,施炭处理液相比例均较对照组有所提高,施加当年,3个坡度液相分别提高 7.09% 、 6.76% 和 5.16% ,至2019年,施加生物炭对土壤液相仍有提高的效果,分别提高 2.68% 、 2.46% 和 2.36% 。土壤气相来源于大气交换以及生物化学过程产生的气体,在4年试验中,各施炭处理气相均有提高,且随坡度升高增加率减小,但年际间无明显规律。

通过计算 $R^{[16-17]}$,由表1可知,施加生物炭可以降低 R ,即土壤更接近理想状态。一般来说,理想状态下最适作物生长的土壤三相比为 $50:25:25$ (固相:液相:气相)^[25]。施加当年, 1.5° 、 3° 、 5° 坡度各 T 处理的 R 较 CK 处理分别降低了 60.88% 、 59.92% 和 54.47% ,虽然各处理 R 整体呈随时间不断增加的趋势,但施炭处理始终较对照组有改良效果,至2019年,各 T 处理 R 仍较 CK 处理降低 49.17% 、 35.80% 和 30.62% 。固相比例接近 50% ,液相比例和气相比例在 25% 左右,土壤水气比例协调,有利于土壤通气性和持水性,使土壤环境利于作物生长发育。

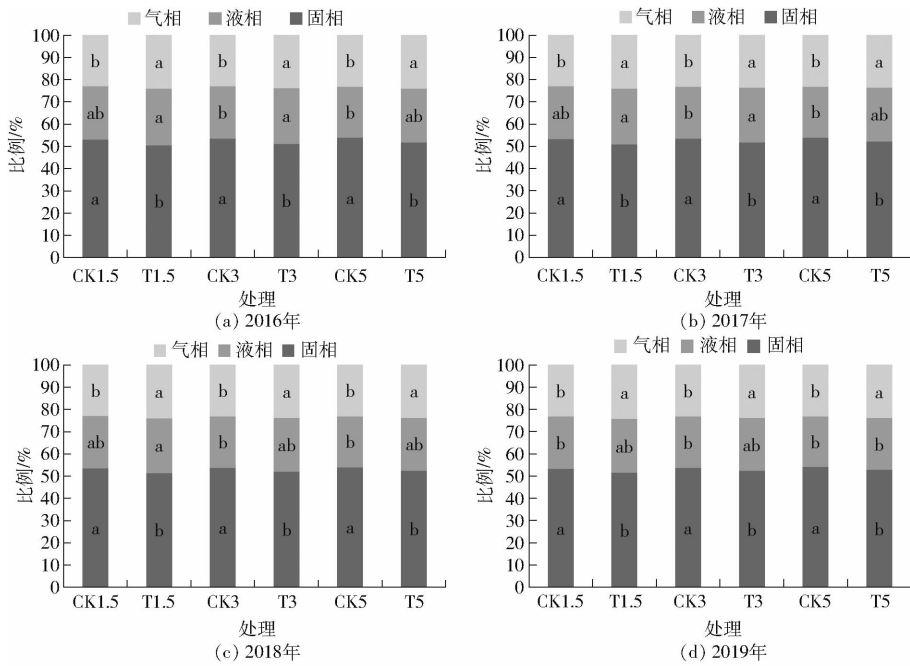


图 5 不同处理的土壤三相比

Fig. 5 Soil three-phase ratio of different treatments

表 1 不同处理的土壤 R

Tab. 1 R of different treatments

| 处理 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 | 2019 年 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| CK1.5 | 2.82 | 2.91 | 3.08 | 3.01 |
| T1.5 | 1.10 | 1.04 | 1.25 | 1.53 |
| CK3 | 3.17 | 3.18 | 3.28 | 3.38 |
| T3 | 1.27 | 1.63 | 1.76 | 2.17 |
| CK5 | 3.49 | 3.58 | 3.60 | 3.69 |
| T5 | 1.59 | 2.01 | 2.22 | 2.56 |

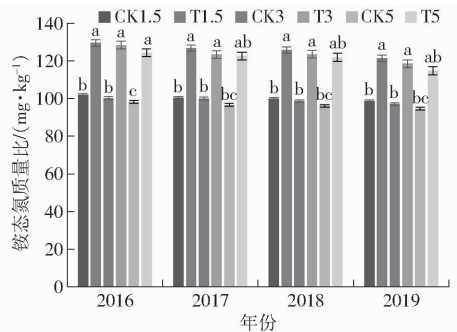


图 6 不同处理的土壤铵态氮含量

Fig. 6 Ammonium nitrogen content in different treatments

2.2 施加生物炭对土壤养分和 pH 值的影响

2.2.1 施加生物炭对土壤养分的持续影响

土壤养分是大豆生存生长过程中不可或缺的重要成分,氮是蛋白质的主要组成元素;磷形成核蛋白和其他磷化物并参与能量传递和利用过程(大豆吸磷动态与干物质积累动态基本相符);钾活跃在生长的芽、幼叶及根尖中;有机质可以改善土壤的结构状况,一般都是带电胶体,还可以提高土壤对酸碱变化的缓冲性,是植物所需养分的主要来源,是土壤肥力重要标志之一。

在 2016—2019 年试验中,土壤铵态氮含量如图 6 所示,CK 处理在 94.6 ~ 101.9 mg/kg 之间,T 处理在 114.8 ~ 129.5 mg/kg 之间,施炭处理较对照处理铵态氮含量提高 21.35% ~ 28.02%。全部处理中 2019 年 CK5 处理含量最低,2016 年 T1.5 处理含量最高。施炭当年,1.5°、3°、5°坡度 T 处理铵态氮含量较 CK 处理分别提高了 27.09%、28.02%、26.58%,与 CK 处理差异极显著($P < 0.001$)。同一年份,铵态氮含量随坡度升高而减小;坡度相同时,

随年份延长而减小,至 2019 年 3 个坡度施炭处理铵态氮含量分别提高 23.12%、22.04%、21.35%,施炭与否差异仍极显著($P < 0.001$)。根据土壤养分等级分级标准(表 2)可知^[26],4 年内,铵态氮养分等级有所变化,CK 各处理 4 年的铵态氮等级均为 3 级,T 各处理直至 2018 年均保持在 2 级不变,于 2019 年 T3、T5 降至 3 级。土壤中速效钾含量如图 7 所示,CK 处理变化范围为 282 ~ 267 mg/kg,T 处理于 2016 年 T1.5 达到最高值(346 mg/kg)、于 2019 年 T5 最低(299 mg/kg),变化趋势与铵态氮一致,施炭处理较对照处理速效钾含量提高 11.99% ~ 22.71%。其等级始终保持在 1 级标准,但各年是否施加生物炭对土壤中速效钾含量影响极显著($P < 0.01$)。可见施加生物炭对土壤铵态氮、速效钾含量有明显的提高,对土壤养分的改良有明显效果,且效果较为稳定。土壤中有效磷含量变化如图 8 所示,各年是否施用生物炭对有效磷的变化均不显著($P > 0.05$),有效磷始终保持在 3 级标准。CK 处理

中2018年CK1.5含量最高(19.1 mg/kg),2019年CK5最低(17.8 mg/kg);T处理中2016年T3最高(19.4 mg/kg),2019年T5处理最低(18.05 mg/kg)。土壤有机质含量变化如图9所示,施炭处理较对照处理有机质含量提高9.54%~18.21%。施炭当年,随坡度升高,施炭小区的有机质含量较对照组分别提高了18.21%、17.15%和14.89%,有机质含量增幅随时间减小,至2019年,增加率降至9.54%~11.88%,说明施加的生物炭至第4年仍对土壤有机质有增益效果,这与陈红霞等^[27]试验结果趋势一致,施炭处理于施加后第3年有机碳较对照组显著增加,土壤有机碳是土壤有机质的一种化学量度;黄连喜等^[28]也在一次性施加花生壳生物炭的多茬蔬菜轮作田间试验中得出,在连续多茬后土壤有机碳仍提高8.5%。依照养分等级划分,对照组各小区4年有机质等级均为3级,2016年,各T处理均达到2级,于第2年仅T5降至3级,第3年,仅有T1.5仍保持在2级,直至2019年,所有小区均降至3级。施炭处理有机质含量年际变化不显著,2016—2017年、2017—2018年、2018—2019年 P 分别为0.224、0.243、0.387;坡度变化对其影响不显著($P=0.135$);T处理与CK处理有机质含量差异显著($P_{2016}=0.011$ 、 $P_{2017}=0.024$ 、 $P_{2018}=0.034$),至第4年差异不显著($P_{2019}=0.056$)。试验结果表明,施入生物炭后土壤有机质含量增加,其增加率逐年减小,效果随时间在逐渐削弱,并且相同年份内坡度越大有机质增加率越小。

表2 土壤养分等级标准

Tab.2 Classification criterion of soil nutrients

| 分级 | 铵态氮 质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 有效磷 质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 速效钾 质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 有机质 质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
|----|---|---|---|--|
| 1级 | >150 | >40 | >200 | >40 |
| 2级 | 120~150 | 20~40 | 150~200 | 30~40 |
| 3级 | 90~120 | 10~20 | 100~150 | 20~30 |
| 4级 | 60~90 | 5~10 | 50~100 | 10~20 |
| 5级 | 30~60 | 3~5 | 30~50 | 6~10 |
| 6级 | 0~30 | 0~3 | 0~30 | 0~6 |

2.2.2 施加生物炭对土壤pH值的持续影响

图10为施加生物炭后pH值的变化情况,4年内T处理的pH值均高于相同坡度CK处理,是否施加生物炭对土壤pH值的影响极显著($P<0.01$),1.5°、3°、5°施炭处理的pH值增幅均于2016年增幅最大,分别为17.88%、17.68%和14.63%。T处理pH值于年际间变化不显著,2016—2017年、2017—2018年、2018—2019年 P 分别为0.328、0.56、0.22,坡度间变化亦不显著($P=0.093$)。由试验结

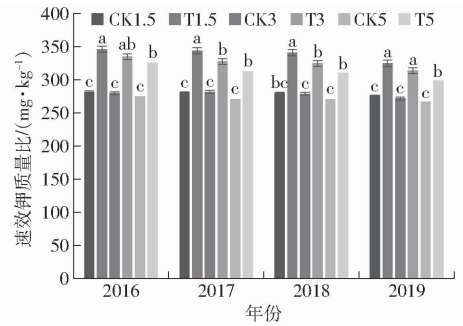


图7 不同处理的土壤速效钾含量

Fig.7 Available potassium content in different treatments

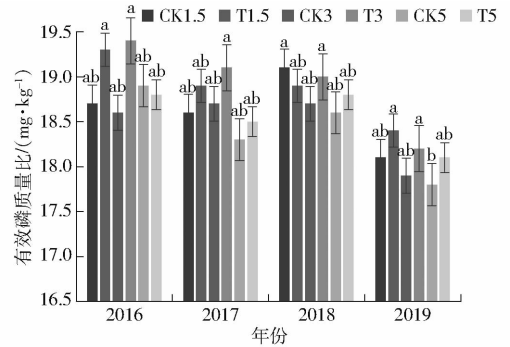


图8 不同处理的土壤有效磷含量

Fig.8 Available phosphorus content in different treatments

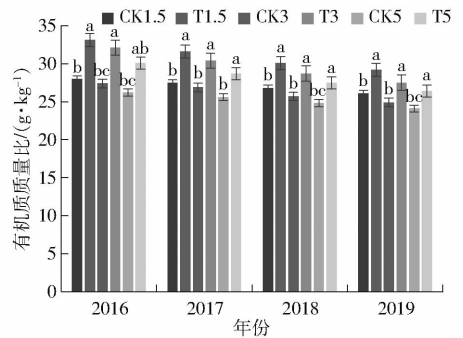


图9 不同处理的土壤有机质含量

Fig.9 Soil organic matter content in different treatments

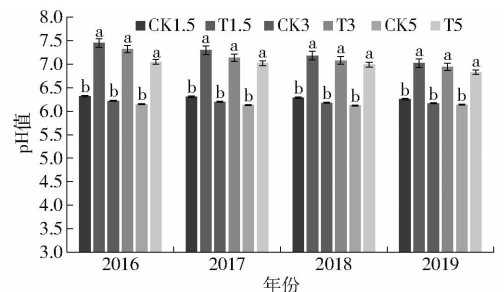


图10 不同处理的土壤pH值

Fig.10 pH value of soil in different treatments

果分析可知,单次施用生物炭可以使土壤pH值增大,且土壤pH值的增幅随时间减小、随坡度升高而减小。朱凯^[29]在分析施炭土有机碳含量低于生物炭添加量与土壤有机碳含量的理想叠加值时,认为可能的原因是部分生物炭在干湿交替中处于土壤表面,伴随自然(风、降雨)过程产生了生物炭的流失,

并认为生物炭作为土壤改良剂在野外环境中物理性流失普遍存在。因此,这一变化可能与生物炭流失有关,坡度较大时,生物炭本身流失量相对较大,土壤中保持的生物炭含量就会减少,pH值的增幅也就随之减小。

2.2.3 土壤综合肥力分析

选取连续4年土壤有机质质量比(X_1 , g/kg)、铵态氮质量比(X_2 , mg/kg)、有效磷质量比(X_3 , mg/kg)、速效钾质量比(X_4 , mg/kg)为肥力指标,采用随机森林回归模型得出土壤肥力等级指数,用于了解土壤的真实肥力状况。土壤主要养分分级标准共6级,且6级为最低,1级为最高,即数值越低综合肥力越高,所得综合土壤肥力等级指数如表3所示。同一年份,坡度越平缓肥力越高;同一坡度,施用生物炭能够使土壤肥力等级指数降低,提高土壤综合肥力;4年内土壤肥力等级指数均呈增大趋势,即肥力下降,生物炭的增肥潜力随使用年限的延长逐渐减弱。各坡度施炭与否土壤肥力等级指数的变化率随年份减小,原因可能是前期施加生物炭速效养分显著提高,作物生长情况优于对照组,消耗养分速度较快。

表3 2016—2019年土壤肥力等级指数

Tab.3 Soil fertility grading indexes from 2016 to 2019

| 年份 | CK1.5 | T1.5 | CK3 | T3 | CK5 | T5 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2016 | 2.656 | 2.046 | 2.684 | 2.062 | 2.700 | 2.080 |
| 2017 | 2.672 | 2.082 | 2.698 | 2.124 | 2.706 | 2.146 |
| 2018 | 2.692 | 2.226 | 2.712 | 2.238 | 2.718 | 2.280 |
| 2019 | 2.722 | 2.424 | 2.728 | 2.456 | 2.736 | 2.468 |

对CK1.5、T1.5、CK3、T3、CK5、T5分别建立土壤肥力等级指数(Soil fertility grading indexes, SFGI)与施用年限间的回归方程为

$$SFGI =$$

$$\begin{cases} 2.631 + 0.022t & (R^2 = 0.979, P = 0.011, CK1.5) \\ 1.875 + 0.128t & (R^2 = 0.924, P = 0.039, T1.5) \\ 2.669 + 0.015t & (R^2 = 0.999, P = 0.001, CK3) \\ 1.896 + 0.13t & (R^2 = 0.931, P = 0.035, T3) \\ 2.685 + 0.012t & (R^2 = 0.952, P = 0.024, CK5) \\ 1.919 + 0.13t & (R^2 = 0.958, P = 0.021, T5) \end{cases} \quad (4)$$

各回归方程的 R^2 大于0.9,表明回归方程拟合效果较好; $P < 0.05$ 表明由自变量施炭年限与因变量土壤肥力等级指数(SFGI)所建立的线性回归模型具有极显著的统计学意义;预测结果如表4所示,2021年土壤肥力等级指数差距已十分接近,土壤肥力的消耗情况应十分接近,而2022年T3、T5的土壤

肥力等级指数超过CK3、CK5,达到了生物炭对土壤肥力影响的有效年限,说明施加生物炭对土壤肥力的提高影响年限为6~7年。

表4 回归方程预测的2020—2022年土壤肥力分级指数

Tab.4 SFGI prediction by regression equation for

2020—2022

| 年份 | CK1.5 | T1.5 | CK3 | T3 | CK5 | T5 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2020 | 2.741 | 2.515 | 2.744 | 2.546 | 2.745 | 2.569 |
| 2021 | 2.763 | 2.643 | 2.759 | 2.676 | 2.757 | 2.699 |
| 2022 | 2.785 | 2.771 | 2.774 | 2.806 | 2.769 | 2.829 |

3 讨论

土壤结构是调节土壤水、肥、气、热的关键因素,且对土壤理化性质发挥重要作用。适于大豆生长的容重一般在 $1.00 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 之间,孔隙度在53%~55%之间^[30],本试验施入生物炭的土壤于施炭当年,容重降低了3.27%~3.62%,并随年限延长而回弹;孔隙度提高了4.56%~5.56%, R 降低表明施炭后土壤结构更接近理想状态,改良效果均逐年减弱。华北平原10年的生物炭田间定位试验表明,施加生物炭对土壤容重、孔隙度、有机质含量具有明显改善^[5]。土壤容重降低的原因:①生物炭密度小,远小于土壤密度^[6]。②生物炭促进了土壤团聚体结构的形成,从而增大了土壤孔隙度,造成土壤容重降低,进一步改善了土壤结构^[5]。陈温福等^[7]研究表明,生物炭施入土壤后,可使土壤容重降低9%,总孔隙度由45.7%提高到50.6%,土壤结构得到改善,与本试验结论一致。土壤是由固、液、气三相构成的,三相之间相互联系、转化、制约,是一个不可分割的有机整体,在功能上构成了土壤肥力的物质基础,调节合理土壤三相比为作物生长提供良好的水、热、气、肥条件是土壤结构改良的最终目的。一般来说,理想状态下最适合作物生长的土壤三相比为50:25:25(固相:液相:气相)^[25]。本试验中, R 明显减小,试验结果与文献[24]施加秸秆生物炭可提高土壤液相率与气相率、使得土壤含水量与通气性明显提高的结论一致,同时得出施加生物炭对土壤结构的改良效果随时间减弱。

施用生物炭会对土壤肥力产生影响,李际会等^[9]发现生物炭施入沙壤土中可以增加土壤有机碳、钾、磷等含量,张祥等^[31]研究发现生物炭的施加显著提高了红壤和黄棕壤的氮、磷、钾等元素的速效态含量,这与本试验部分结果一致,本试验中施加生物炭的土壤显著提高了铵态氮、速效钾和有机质含量,且后续不再施加生物炭仍有持续影响,各坡度养分提高效果均在首年效果最佳,并逐年减弱,且坡度

平缓效果较好。对有效磷含量的影响不显著,规律不明显。而史思伟等^[5]试验中生物炭处理的有效磷含量降低,并且达到了显著性差异水平;CHAN等^[32]进行的室内盆栽试验,生物炭提高了有效磷含量,与本试验不一致,原因可能是前者多年使用的生物炭在土壤中大量累积可能会增强对土壤中磷酸根的表面吸附,从而降低土壤有效磷含量,同时也与生物炭和土壤种类的不同及其他环境因素有关^[33]。土壤养分是土壤的本质属性,其含量直接影响作物产量。一般来说,有机质含量高的低容重土壤带来的农业效益更好^[33]。生物炭自身的养分和结构特性会对土壤养分含量产生影响。土壤有机质是微量元素的重要来源,是土壤团聚体的主要粘结剂,可以提高耕作质量,其中的胶体具有很强吸附能力,留肥储水,提高酸碱缓冲性能及碳氮比,提高土壤对氮素及其他养分元素的吸持容量^[6]。有机质含量的提高对土壤肥力的影响巨大,张祥等^[31]试验表明对我国南方红壤和黄棕壤施用生物炭有机质含量提高。康日峰等^[34]研究也表明土壤有机质含量与生物炭添加量呈显著正相关。本试验中施加生物炭土壤有机质含量显著提高,至第4年仍有显著效果。pH值是影响土壤肥力的重要因素之一,直接影响着土壤养分的存在形态、转化性和有效性。东北黑土区土壤pH值在5.7~6.4之间,而大豆最适宜的pH值在6.5~7.5之间,本试验中未施炭前pH值在6.12~6.32之间,施炭后pH值显著提高,达到6.99~7.45,更适宜大豆生长,且第4年仍达到显著水平,效果持续性强。与文献[35-36]研究结果一致,生物炭可以将酸性土壤改良为中性、弱碱性土壤,还可以显著提高盐碱土养分含量。史思伟等^[5]依托连续10年的生物炭田间定位试验,对生物炭进行探究,发现长期使用生物炭对土壤pH值没有显著影响,与本研究结果并不一致,原因可能是:①供试土壤的初始pH值不同,文献[5]pH值为8.1,供试土壤本身为碱性,所以影响不明显。②试验中生物炭的施加量不同,文献[5]各处理均低于10 t/hm²,本试验远超于其施加量。

本研究采用随机森林回归模型对土壤综合肥力等级进行计算,使计算结果具有客观性和无偏性,可用于本试验土壤综合肥力的评估,使土壤的潜在生产力能够得到准确而有效的评估。T处理土壤肥力等级指标减小、肥力提高。无论施炭与否各处理后连续年份等级指标逐年增大、肥力下降,施炭小区下降速度更快,这可能是由于速效养分含量高,作物生长较好,消耗更多的养分。由回归方程预测所得有效年限为6~7年。生物炭对东北黑土的改良效果在逐年削弱,说明施加生物炭不是永续的改善措施,但其对土壤的影响较为全面且持续稳定,对土壤改良培肥、水土保持以及节水增产都有积极影响。现今生物炭的生产技术不成熟,使用成本较高,须结合经济情况和生产效益进行调节,对其有效年限及效果的探索十分必要。同时,试验过程中发现生物炭本身会随着径流流失,对生物炭流失的情况有待今后进一步研究。目前,关于生物炭对农田土壤肥力的长期效应的认知仍然缺乏,需要更多的数据支持。

4 结论

(1)施加生物炭可显著提高土壤孔隙度、降低土壤容重、优化土壤三相结构。T处理孔隙度的增加率、容重的减小率均随时间延长而减小,与CK处理差距逐年减小,2016年T1.5处理容重最低(1.196 g/cm³),较CK1.5处理降低了3.62%,T1.5处理孔隙度达到最大值(49.4%),较CK1.5处理提高了5.56%。容重减小的幅度、孔隙度提高的幅度均随坡度增大而降低。T处理可降低土壤三相比R,至2019年T处理R仍小于CK处理,R降低30.62%。

(2)2016—2019年,土壤pH值和有机质、铵态氮、速效钾含量变化趋势大体相同,均随坡度升高、时间延长而降低,同一年份,坡度较高时增幅较小,对有效磷含量没有明显影响。4年内T1.5处理土壤综合肥力等级指数均最小,土壤肥力最高、培肥效果最优。初步预测生物炭培肥效应的有效年限为6~7年。

参 考 文 献

- [1] 韩晓增,李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学,2018,38(7):1032-1041.
HAN Xiaozeng, LI Na. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018,38(7):1032-1041. (in Chinese)
- [2] 李海亮,汪春,孙海天,等. 农作物秸秆的综合利用与可持续发展[J]. 农机化研究,2017,39(8):256-262.
LI Hailiang, WANG Chun, SUN Haitian, et al. Comprehensive utilization and sustainable development of agriculture straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(8):256-262. (in Chinese)
- [3] 刘煜杰,张惠远,李依,等. 关于秸秆露天焚烧管控与综合利用的思考——以黑龙江省为例[J]. 环境保护,2018,46(22):53-55.

- LIU Yujie, ZHANG Huiyuan, LI Yi, et al. Thoughts on crop straw comprehensive utilization and open field burning control in Heilongjiang Province[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(22): 53–55. (in Chinese)
- [4] 陈懿, 陈伟, 林叶春, 等. 生物炭对植烟土壤微生态和烤烟生理的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3781–3787.
CHEN Yi, CHEN Wei, LIN Yechun, et al. Effects of biochar on the micro-ecology of tobacco-planting soil and physiology of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3781–3787. (in Chinese)
- [5] 史思伟, 娄翼来, 杜章留, 等. 生物炭的10年土壤培肥效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(6): 16–22.
SHI Siwei, LOU Yilai, DU Zhangliu, et al. A 10-year field experiment on biochar amendment: effects on soil fertility[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(6): 16–22. (in Chinese)
- [6] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J]. *土壤与作物*, 2012, 1(4): 219–226.
ZHANG Qianfeng, WANG Guanghua. Research progress of physicochemical properties of biochar and its effects as soil amendments[J]. *Soils and Crops*, 2012, 1(4): 219–226. (in Chinese)
- [7] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324–3333.
CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324–3333. (in Chinese)
- [8] GLASER B, HAUMAIER L, GUGGENBERGER G, et al. The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37–41.
- [9] 李际会, 吕国华, 白文波, 等. 改性生物炭的吸附作用及其对土壤硝态氮和有效磷淋失的影响[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(2): 220–225.
LI Jihui, LÜ Guohua, BAI Wenbo, et al. Effect of modified biochar on soil nitrate nitrogen and available phosphorus leaching[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(2): 220–225. (in Chinese)
- [10] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(7): 1361–1369.
LI Ming, LI Zhongpei, LIU Ming, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7): 1361–1369. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 1–5.
GOU Mangmang, QU Zhongyi. Research on using biochar to agricultural soil amendment and crop yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(5): 1–5. (in Chinese)
- [13] 曾爱, 廖允成, 张俊丽, 等. 生物炭对壤土土壤含水量、有机碳及速效养分含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 1009–1015.
ZENG Ai, LIAO Yuncheng, ZHANG Junli, et al. Effects of biochar on soil moisture, organic carbon and available nutrient contents in manural loessial soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1009–1015. (in Chinese)
- [14] 战秀梅, 彭靖, 王月, 等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1633–1641.
ZHAN Xiumei, PENG Jing, WANG Yue, et al. Influences of application of biochar and biochar-based fertilizer on brown soil physicochemical properties and peanut yields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1633–1641. (in Chinese)
- [15] 魏永霞, 刘志凯, 冯鼎瑞, 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/OL]. *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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 201–207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160825&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025. (in Chinese)
- [16] 赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2489–2503.
ZHAO Yali, LIU Weiling, CHENG Sixian, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2489–2503. (in Chinese)
- [17] 冀保毅. 深耕与秸秆还田的土壤改良效果及其作物增产效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
JI Baoyi. Research on the effect of deep tillage and straw retained improve soil quality and enhance the yield of crop[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [18] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5–32.
- [19] CHEN X, ISHWARAN H. Random forests for genomic data analysis[J]. *Genomics*, 2012, 99(6): 323–329.
- [20] TESFAMARIAM S, LIU Z. Earthquake induced damage classification for reinforced concrete buildings[J]. *Structural Safety*,

- 2010, 32(2):154-164.
- [21] GROMPING U. Variable importance assessment in regression: linear regression versus random forest [J]. *American Statistician*, 2009, 63(4):308-319.
- [22] HEMANT I, MIN L. Standard errors and confidence intervals for variable importance in random forest regression, classification, and survival [J]. *Statistics in Medicine*, 2019, 38(4):558-582.
- [23] LIU Dong, FAN Zhongrui, FU Qiang, et al. Random forest regression evaluation model of regional flood disaster resilience based on the whale optimization algorithm [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250:119468.
- [24] 田钰朝,徐明德.应用随机森林模式识别的土壤肥力评价[J].*中北大学学报(自然科学版)*,2019,40(5):464-469.
TIAN Yuchao, XU Mingde. Application of random forest pattern recognition in soil fertility assessment [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2019, 40(5):464-469. (in Chinese)
- [25] 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/OL].*农业机械学报*,2018, 49(2):284-291,312.
WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of biochar's two consecutive years supply on soil improvement and water saving & yield increasing in sloping farmland of black soil region [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2):284-291,312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180236&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036. (in Chinese)
- [26] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对坡耕地土壤肥力和大豆产量的影响与预测[J/OL].*农业机械学报*,2019,50(7):302-312.
WEI Yongxia, WANG He, LIU Hui, et al. Influences of biochar on soil fertility and soybean yield and its prediction [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7):302-312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190733&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.033. (in Chinese)
- [27] 陈红霞,杜章留,郭伟,等.施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J].*应用生态学报*,2011,22(11):2930-2934.
CHEN Hongxia, DU Zhangliu, GUO Wei, et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density, cation exchange capacity, and particulate organic matter content in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11):2930-2934. (in Chinese)
- [28] 黄连喜,魏岚,李衍亮,等.花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究[J].*中国土壤与肥料*,2018(1):101-107.
HUANG Lianxi, WEI Lan, LI Yanliang, et al. Study on soil quality improvement, vegetable yield increasing of peanut shell biochar and its residual effect [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(1):101-107. (in Chinese)
- [29] 朱凯.紫色土添加生物炭对抗生素吸附特征的影响[D].成都:西南交通大学,2018.
ZHU Kai. Effects of biochar on the adsorption characteristics of antibiotics in purple soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [30] 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/OL].*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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8):309-320. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190834&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.034. (in Chinese)
- [31] 张祥,王典,姜存仓,等.生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J].*中国生态农业学报*,2013,21(8):979-984.
ZHANG Xiang, WANG Dian, JIANG Cuncang, et al. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8):979-984. (in Chinese)
- [32] CHAN K Y, ZWIETEN L V, MESZAROS I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments [J]. *Soil Research*, 2008, 46(5):437-444.
- [33] 李倩倩,许晨阳,耿增超,等.生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J].*环境科学*,2019,40(7):3388-3396.
LI Qianqian, XU Chenyang, GENG Zengchao, et al. Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of loess soil [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7):3388-3396. (in Chinese)
- [34] 康日峰,张乃明,史静,等.生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响[J].*中国土壤与肥料*,2014(6):33-38.
KANG Rifeng, ZHANG Naiming, SHI Jing, et al. Effects of biochar-based fertilizer on soil fertility, wheat growth and nutrient absorption [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(6):33-38. (in Chinese)
- [35] 李阳,李心清,王兵,等.四种改良剂对酸性黄壤土壤酸度和肥力的影响[J].*地球与环境*,2016,44(6):683-690.
LI Yang, LI Xinqing, WANG Bing, et al. Effects of four soil amendments on improving soil quality and acidity of yellow soils [J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(6):683-690. (in Chinese)
- [36] 黄哲,曲世华,白岚,等.不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响[J].*水土保持研究*,2017,24(4):290-295.
HUANG Zhe, QU Shihua, BAI Lan, et al. Effects of different straw mixing biochar on nutrient and enzyme activity of saline soil [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(4):290-295. (in Chinese)