

生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究

孙海妮^{1,2}, 王仕稳^{1,2,3}, 李雨霖^{2,3}, 杨文稼^{1,2},
殷修帅^{2,3}, 殷俐娜^{1,2,3}, 邓西平^{2,3}

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:通过田间定位试验研究不同用量生物炭施用及传统秸秆还田对黄土高原旱地冬小麦生育期内土壤水分、养分及产量和水分利用效率的影响。试验设置5个处理,分别为对照(CK)、生物炭施用量为 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (BC1)、 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (BC2)、 $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (BC3)及秸秆还田(SR)。试验结果表明,土壤硝态氮、铵态氮及速效钾、有机质含量在小麦整个生育期内均随生物炭施用量的增加而增加;土壤储水量(0~200 cm)及速效磷含量随生物炭施用量的增加先增加后减少;产量及水分利用效率随生物炭施用量的增加先增加后减少,当生物炭用量为 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,产量及水分利用效率最大,分别为 $6\,640\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $18.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,比对照(CK)分别显著增加17.2%、17.8%;秸秆还田(SR)使作物增产10.5%,但对水分利用效率影响并不显著。因此,施用适量生物炭在改善土壤水肥特性的同时,能够显著提高作物产量及水分利用效率。

关键词:生物炭施用量;秸秆还田;冬小麦;水分利用效率;产量

中图分类号:S512.1⁺1 **文献标志码:**A

Effects of biochar levels on winter wheat yield and water-use efficiency in Loess Plateau

SUN Hai-ni^{1,2}, WANG Shi-wen^{1,2,3}, LI Yu-lin^{2,3}, YANG Wen-jia^{1,2},
YIN Xiu-shuai^{2,3}, Yin Li-na^{1,2,3}, DENG Xi-ping^{2,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field trial was conducted to study the effects of biochar application rates and the straw-return on soil water content, soil nutrient, crop yield, and water use efficiency. There were five treatments: no biochar (CK), $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (BC1), $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (BC2), $45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ biochar (BC3), and straw-return. Results showed that the soil NO_3^--N , NH_4^+-N , available K, and organic matter content increased with increasing application rates of biochar in all growth stages of wheat. Soil water storage, available P, and crop yield, water-use efficiency increased initially but decreased subsequently with increasing application rates of biochar. Compared to the control and other biochar rates, the $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ of biochar significantly achieved peak yield (a 17.2% increase over CK to $6\,640\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and water-use efficiency (an increase of 17.8% to $18.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$). The straw-return increased yield by 10.5% but no effect on the water-use efficiency. Therefore, applying the appropriate rate of biochar can significantly improve soil fertility, crop yield, and water-use efficiency.

收稿日期:2017-07-11

修回日期:2018-09-29

基金项目:国家科技支撑计划(2015BAD22B01);国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB150402)

作者简介:孙海妮(1992-),女,硕士研究生,研究方向为植物营养。E-mail:1471086139@qq.com

通信作者:王仕稳,男,研究员,主要从事旱地农业及作物生理研究。E-mail:shiwenwang@nwsuaf.edu.cn

Keywords: biochar levels; straw return; winter wheat; water use efficiency; crop yield

生物炭(Biochar)一般指生物质如农作物废弃物、植株落叶、畜禽粪便等在完全或部分缺氧和相对温度“较低”(<700℃)条件下热裂解后得到的一种具有多孔隙、低容重、比表面积大等特性的固态黑色有机产物^[1]。生物炭一般呈碱性,能够提高土壤 pH,降低土壤酸度。生物炭的主要成分是碳(通常在 40%~75%左右)和氢、氮、氧等元素,C/N 比较大。生物炭含有丰富的羟基、羧基、苯环等官能团,所以具有较大的阳离子交换量(CEC)和强大的吸附能力,能够吸附、固定土壤中养分,减少养分淋溶损失^[2,3]。其次,生物炭的高度芳香化结构使其具备了抗氧化和抗生物分解能力强等特性^[4]。越来越多的研究表明,生物炭能够改良土壤、降低肥料及土壤养分的损失,从而提高粮食产量;又能够捕捉大气中的 CO₂,使其固持在土壤中,实现碳的封存固定,对大气温室气体具有减排增汇的作用^[5,6]。

围绕施用生物炭对作物产量的影响,国内外学者开展了大量研究,多数研究表明,生物炭能够延缓肥料养分在土壤中的释放过程,减少养分淋失,提高了土壤养分利用率,从而使作物增产^[7-9]。但也有分析发现,生物炭增产效果在不同土壤、作物以及不同生物炭种类之间差异很大^[10]。同时也有研究表明,生物炭的增产作用有一定的适用范围,施用生物炭量过高或过低,都可能导致作物减产^[11,12]。因此,对生物炭的使用需要从不同土壤及作物类型、生物炭用量等方面综合考虑。陕西长武地区属于黄土高原典型的旱作农业区,其土壤类型以黑垆土为主。生物炭的用量对该地区土壤水肥特性及小麦产量和水分利用效率影响的研究并不清楚。鉴于此,本研究以冬小麦为研究对象,通过设置不同梯度的生物炭用量及以常规秸秆还田作为另一对照因素,探究施用生物炭对麦田土壤水分、养分含量的影响,进一步探索生物炭的潜在价值,为培肥地力、增加作物产量及水分利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2014 年 9 月-2016 年 6 月在黄土高原中南部的中科院水利部水土保持研究所陕西省长武试验站(107°44.70'E, 35°12.79'N)进行,该地海拔高 1 220 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨 581 mm,主要集中于夏季。年日照时

长 2 226.5 h,年均气温 9.2℃,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,无灌溉条件,属典型旱作雨养农业区;土壤类型为典型的黄盖黏黑垆土,质地中壤,土层均匀疏松,土壤肥力中等。供试土壤基本理化性质为:pH 值 8.4;容重 1.30 g·cm⁻³;有机质 9.92 g·kg⁻¹;硝态氮 4.49 mg·kg⁻¹;铵态氮 1.22 mg·kg⁻¹;速效磷 9.54 mg·kg⁻¹;速效钾 127.02 mg·kg⁻¹。

2014-2015 年及 2015-2016 年间冬小麦生育期降雨量分别为 262.6 mm 和 234.6 mm。月降雨量如图 1 所示。

1.2 试验设计

本研究所用生物炭来源于陕西长武洪家木炭厂,是将小麦秸秆及枯枝残叶等(350~500℃)炭化得到的一种黑炭。生物炭的 pH 为 9.9,硝态氮 9.32 mg·kg⁻¹,铵态氮 5.06 mg·kg⁻¹,有效磷 4.62 mg·kg⁻¹,有机质 505.4 g·kg⁻¹。供试作物为抗旱型冬小麦“长旱 58”。生物炭于 2014 年 9 月小麦播种前按各个小区不同用量一次性施入,旋耕混匀。试验以不同生物炭的施用量作为一个因素,设计 4 个水平(CK:对照;BC1:15 t·hm⁻²;BC2:30 t·hm⁻²;BC3:45 t·hm⁻²),另设秸秆还田(SR)。每个处理重复 3 次。还田量为当年收获期小麦地上全部生秸秆粉碎量,试验采用随机区组设计。小区面积 4 m×10 m,播量 150 kg·hm⁻²,各处理在播前施基肥氮肥(尿素)120 kg·hm⁻²,施磷肥(过磷酸钙)90 kg·hm⁻²,拔节期追施氮肥(尿素)60 kg·hm⁻²。作物生长完全依靠自然降水,全生育期不灌溉。试验地的其它农作管理措施与当地常规管理措施一致。

1.3 样品采集

第一年由于天气原因,引起灌浆期的小麦大片倒伏,严重影响了小麦后期生长。因此,于小麦成熟收获期,各小区取 4 m²植株进行风干脱粒并测定籽粒产量,每个处理重复 3 次。

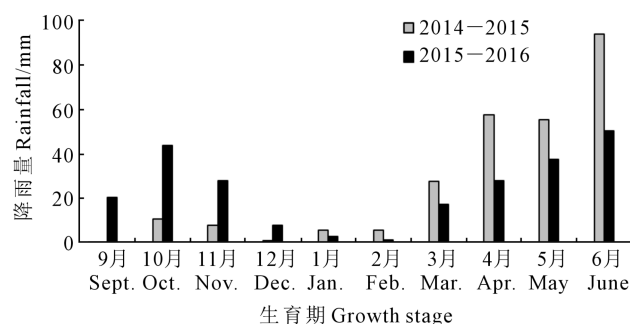


图 1 2014—2016 年冬小麦生育期降雨量

Fig.1 Rainfall during the winter wheat growth period in 2014-2016

于第二年小麦播种前(9月25日)、返青期(3月21日)、拔节期(4月20日)、开花期(5月20日)、灌浆末期(6月8日)、成熟期(6月30日)的各个生育期,分别用土钻取0~2 m(20 cm为一层)的土样,每个小区重复3次,同层次的土壤混合为1个土样。一部分用于测定土壤含水量(计算0~200 cm土壤储水量);一部分鲜土带回实验室于4℃冰箱中保存,用于土壤硝、铵态氮的测定。其余土样于阴凉处自然风干过筛,用于耕层0~20 cm土壤有机质、速效磷及速效钾的测定。小麦成熟收获时,各小区取3 m²的完整植物样,每个处理重复3次,称其风干重即地上部生物量,同时脱粒测定籽粒产量,计算收获指数,并测定小麦穗数、穗粒数及千粒重等指标。

1.4 测定项目与方法

基础指标按照土壤农化分析中的方法测定^[13]。土壤含水量采用烘干法测定;土壤硝、铵态氮采用1 mol·L⁻¹KCl浸提-AA3型连续流动分析仪测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量-外加热法;土壤速效磷采用0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法;土壤速效钾采用1 mol·L⁻¹NH₄OAc浸提-火焰光度法;土壤储水量及土壤水分利用效率的计算参考王缠军等^[14]。

1.5 数据处理及分析

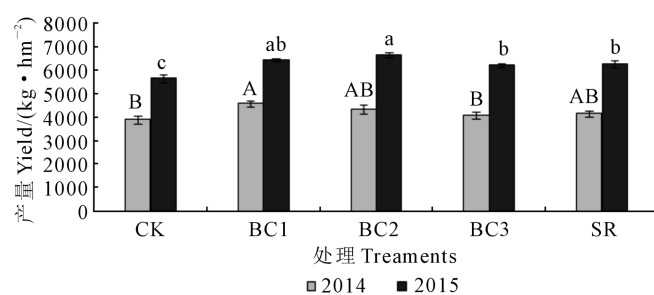
采用Microsoft Excel 2007进行数据整理和绘制图表,SPSS 18.0统计软件进行方差分析,用LSD法进行差异显著比较,显著性水平设为0.05。结果以“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 生物炭及秸秆还田对冬小麦产量及其产量构成因素的影响

图2结果显示,2014年,施用生物炭后的小麦产量为4 123~4 618 kg·hm⁻²,仅生物炭用量为15 t·hm⁻²(BC1)比对照(CK)显著增产17.7%,其余处理增产均不显著;2015年,各处理比上一年显著增产39.7%~52.0%。

由表1中可以看出,施用生物炭及秸秆还田均可显著提高冬小麦产量。生物炭用量为15 t·hm⁻²(BC1)、30 t·hm⁻²(BC2)、45 t·hm⁻²(BC3)及秸秆还田(SR)比对照(CK)分别显著增产13.8%、17.2%、9.5%、10.5%。从产量构成因素来看,产量增加的主要原因在穗数上,生物炭用量为15 t·hm⁻²(BC1)、30 t·hm⁻²(BC2)处理的穗数比对照(CK)分别显著提高13.8%、14.1%;穗粒数及千粒重各处



注:不同大写字母表示2014年各处理之间差异达到显著性水平,不同小写字母表示2015年各处理之间差异达到显著性水平($P < 0.05$)。

Note: Different capital letters mean significant difference in 2014, different lowercase letters mean significant difference in 2015 ($P < 0.05$).

图2 2014及2015年生物炭及秸秆还田对小麦产量的影响

Fig.2 Influence of biochar and straw-return on wheat yield in 2014 and 2015

理之间差异均不显著;生物炭用量为15 t·hm⁻²(BC1)、30 t·hm⁻²(BC2)、45 t·hm⁻²(BC3),秸秆还田(SR)处理的地上生物量比对照(CK)分别显著提高了19.7%、21.3%、13.3%、15.4%。冬小麦产量随生物炭施用量的增加先增加后减少,秸秆还田虽也有增产的作用,但效果不及生物炭。

2.2 生物炭及秸秆还田对土壤储水量的影响

图3结果显示,冬小麦各个生育期土壤储水量均随着生物炭施用量的增加先增加后减少。返青期,生物炭用量为15 t·hm⁻²(BC1)、30 t·hm⁻²(BC2),秸秆还田(SR)比对照(CK)分别显著增加4.9%、7.2%、5.8%;灌浆末期,生物炭用量为30 t·hm⁻²(BC2)及秸秆还田(SR)处理比对照(CK)分别增加9.3%、10.3%;成熟期,生物炭用量为15 t·hm⁻²(BC1)及秸秆还田(SR)处理比对照(CK)分别显著增加9.2%、13.0%。

2.3 生物炭及秸秆还田对土壤硝、铵态氮含量的影响

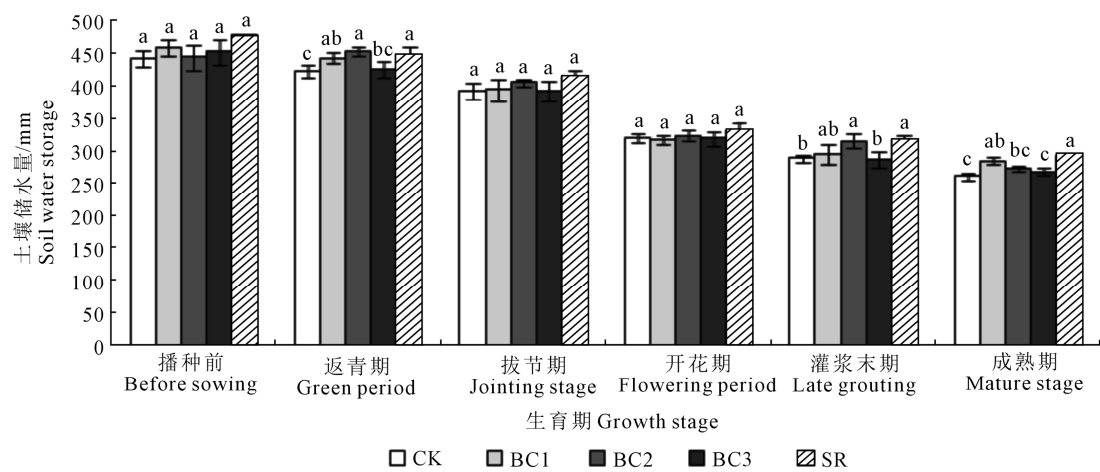
从图4中可以看出,随生物炭施用量的增加硝态氮含量显著增加。播种前,生物炭用量为45 t·hm⁻²(BC3),比对照(CK)显著增加28.9%,这主要与生物炭施入的时间有关;拔节期,生物炭用量为45 t·hm⁻²(BC3)比对照(CK)增加30.7%;开花期,生物炭处理的硝态氮含量比对照(CK)显著增加43.8%~57.7%;成熟期,生物炭用量为30 t·hm⁻²(BC2)、45 t·hm⁻²(BC3),分别比对照(CK)增加64.9%、55.7%。整个生育期,秸秆还田(SR)对于硝态氮含量的影响并不显著。各个处理土壤硝态氮含量大小表现为:BC3>BC2>BC1>SR>CK。

表 1 生物炭及秸秆还田对冬小麦产量及产量构成因素的影响

Table 1 Influence of biochar and straw-return on winter yield and yield components

处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	地上生物量 Biomass /(kg·hm ⁻²)	穗数 Panicle /(10 ⁴ No·hm ⁻²)	穗粒数 Spike grain number /grain	千粒重 1000-grain weight /g	收获指数 HI
CK	5666±165c	11106±356c	508±8b	38.3±1.2a	45.4±0.2a	0.51±0.03a
BC1	6450±58ab	13288±55ab	578±7a	42.9±0.3a	45.7±0.5a	0.49±0.00a
BC2	6640±112a	13475±144a	579±9a	41.1±0.9a	46.8±0.4a	0.49±0.01a
BC3	6204±92b	12587±39b	523±18b	40.4±2.0a	46.1±0.5a	0.49±0.01a
SR	6259±145b	12819±366ab	530±20b	38.6±2.5a	45.9±0.7a	0.49±0.00a

注:不同小写字母表示处理间差异达到显著性水平($P<0.05$),下同。
Note:Different lowercase letters mean significant difference ($P<0.05$). The same below.



注:不同小写字母表示处理间差异达到显著性水平($P<0.05$),下同。
Note:Different lowercase letters mean significant difference ($P<0.05$),The same below.

图 3 生物炭及秸秆还田对 0~200 cm 土壤储水量的影响

Fig.3 Influence of biochar and straw-return on soil water content in 0~200 cm layer

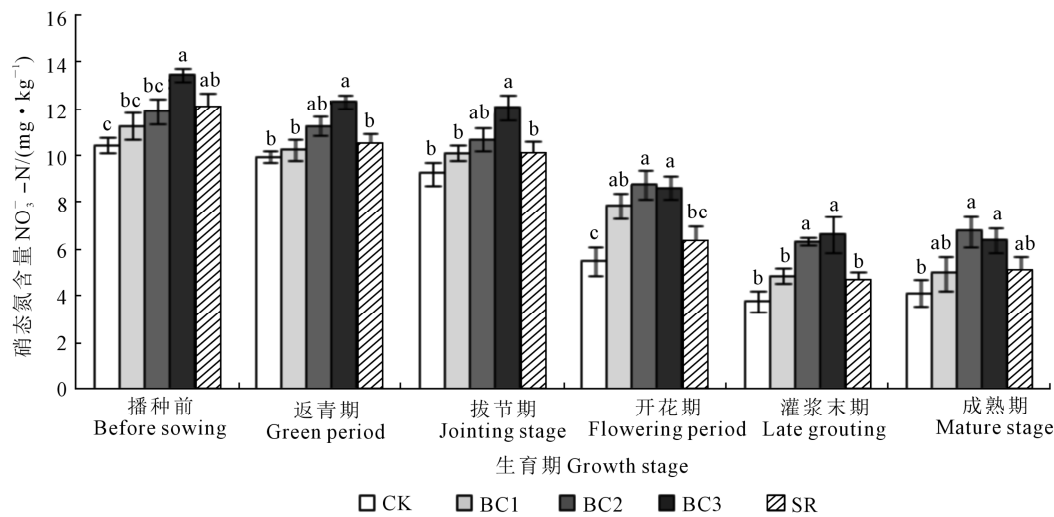


图 4 生物炭及秸秆还田对土壤硝态氮含量的影响

Fig.4 Influence of biochar and straw-return on soil NO₃⁻-N

从图 5 中可以看出,土壤中的铵态氮含量随生物炭施用量的增加而增加。播种前及拔节期,生物炭用量为 45 t·hm⁻² (BC3) 处理比对照 (CK) 分别显著增加 56.9%、56.3%;开花期,生物炭用量为 45 t·hm⁻² (BC3),秸秆还田处理 (SR) 比对照 (CK) 分

别增加了 53.9%、40.3%;灌浆末期,生物炭用量为 45 t·hm⁻² (BC3) 及秸秆还田处理 (SR) 比对照 (CK) 分别显著增加 52.6%、50.6%。整个生育期铵态氮含量大小表现为:BC3>BC2>BC1>SR>CK。

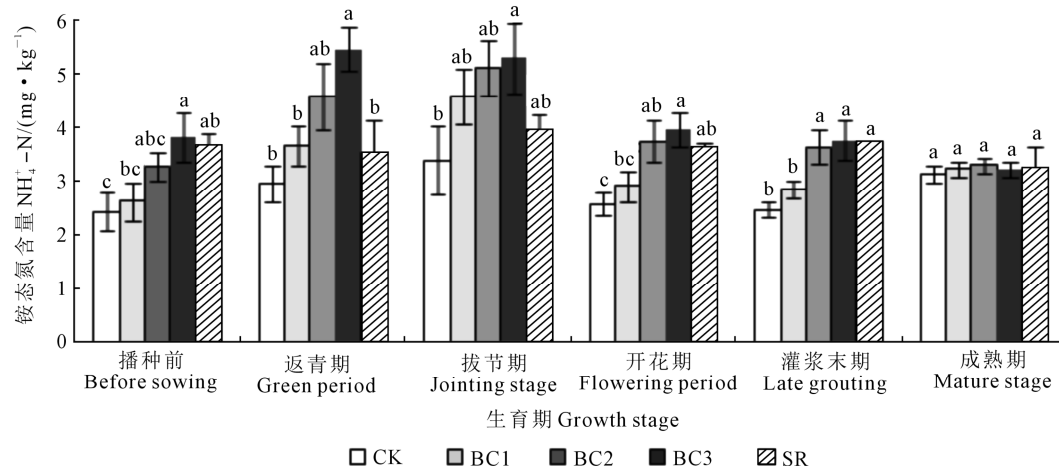


图5 生物炭及秸秆还田对土壤铵态氮含量的影响

Fig.5 Influence of biochar and straw-return on soil NH₄⁺-N

2.4 生物炭及秸秆还田对土壤中磷钾速效养分含量的影响

图6结果表明,土壤中速效磷含量随生物炭施用量的增加先增加后减少。播种前、返青及灌浆末期,各处理之间土壤速效磷含量均无显著性差异;拔节期、开花期及成熟期,生物炭用量为 30 t·hm⁻² (BC2) 比对照 (CK) 分别显著增加 25.2%、19.9%、40.9%。小麦整个生育期,秸秆还田 (SR) 与对照 (CK) 之间土壤速效磷含量无显著性差异。各个处理土壤中速效磷含量大小依次为:BC2>BC1>BC3>SR>CK。

由图7可以看出,土壤中速效钾含量随生物炭施用量的增加而增加。播种前,秸秆还田 (SR) 处理比对照 (CK) 显著增加了 15.9%;拔节期,生物炭用量为 30 t·hm⁻² (BC2)、45 t·hm⁻² (BC3),秸秆还田 (SR) 处理比对照 (CK) 分别增加 30.21%、38.3%、44.5%;灌浆末期,生物炭处理的土壤速效钾含量比对照 (CK) 增加了 29.9%~53.1%,秸秆还田 (SR) 比对照 (CK) 显著增加了 55.4%;成熟期,生物炭处理及秸秆还田 (SR) 的土壤速效钾含量均显著高于对照 (CK)。从冬小麦整个生育期来看,生物炭及秸秆还田有利于增加土壤中的速效钾含量,其中,秸秆还田的增加量大于生物炭的增加量。各处理速效钾含量大小依次为:SR>BC3>BC2>BC1>CK。

2.5 生物炭及秸秆还田对土壤有机质的影响

从图8可以看出,土壤有机质含量随生物炭施用量的增加而增加。播种前,生物炭用量为 45 t·hm⁻² (BC3) 比对照 (CK) 增加 27.8%;拔节期,生物炭处理的有机质含量比对照 (CK) 增加了 27.4%~49.5%,秸秆还田 (SR) 处理比对照 (CK) 增加 24.6%;灌浆末期,生物炭用量为 45 t·hm⁻² (BC3) 及秸秆还田 (SR) 比对照 (CK) 分别增加 41.1%、

20.6%;成熟期,生物炭用量为 45 t·hm⁻² (BC3) 及秸秆还田 (SR) 比对照 (CK) 分别增加 41.8%、31.0%。整个生育期土壤有机质的大小表现为:BC3>BC2>SR>BC1>CK。

2.6 生物炭及秸秆还田对土壤水分利用效率的影响

由表2可以看出,与对照 (CK) 相比,施用生物炭使土壤水分利用效率提高了 5.9%~17.8%,其中,生物炭用量为 30 t·hm⁻² (BC2) 比对照 (CK) 显著提高了 17.8%。秸秆还田 (SR) 使水分利用效率提高了 5.9%。各处理土壤水分利用效率由高到低依次为:生物炭用量为 30 t·hm⁻² (BC2)>15 t·hm⁻² (BC1)>45 t·hm⁻² (BC3) ≥ 秸秆还田 (SR) > 对照 (CK)。这表明,适量的生物炭施用量能使土壤水分利用效率显著提高,秸秆还田对土壤水分利用效率的增加并不显著。

3 讨论

3.1 施用生物炭对冬小麦产量及水分利用效率的影响

第一年小麦收获前,由于天气原因引起小麦大片倒伏,灌浆不充分,使小麦产量严重下降,因此对土壤养分及作物产量未进行详细分析;第二年,可能是由于生物炭对土壤水分、养分具有一定的持留能力,有利于提高土壤水肥供给,进而促进了小麦生长及产量大幅提高。Jeffery, 黄剑等^[15-16] 应用 Meta-analysis 方法得出生物炭改良土壤与提高作物产量之间具有很好的相关性,作物产量平均增幅达 10%。本研究结果表明,生物炭能显著提高冬小麦产量及水分利用效率,且均随生物炭施用量的增加先增加后减少。当生物炭施用量为 30 t·hm⁻² 时,小麦产量及水分利用效率最高,且显著高于秸秆还

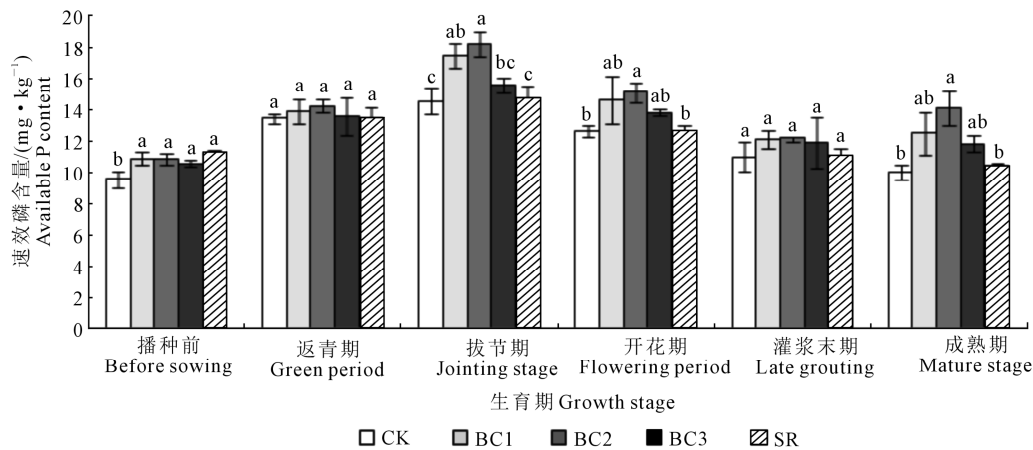


图 6 生物炭及秸秆还田对土壤速效磷含量的影响
Fig.6 Influence of biochar and straw-return on available soil P content

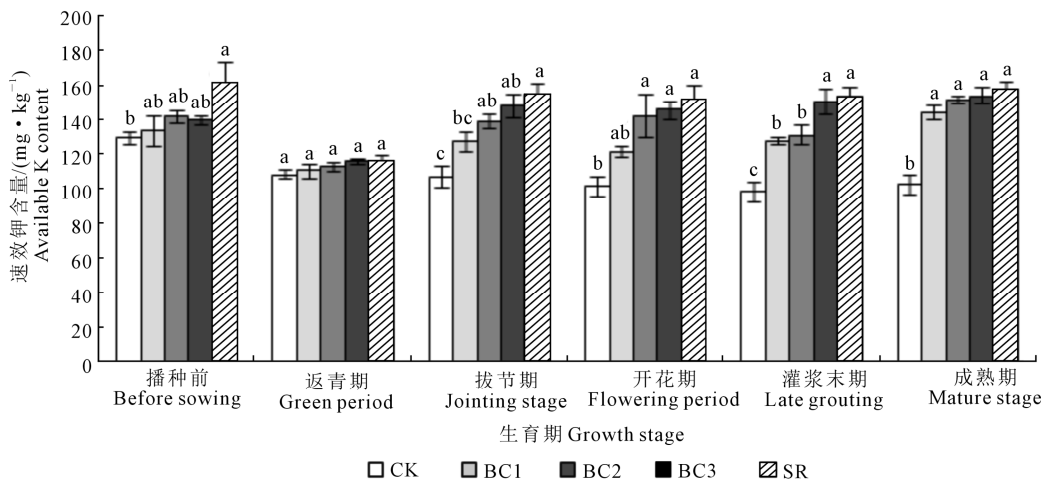


图 7 生物炭及秸秆还田对土壤速效钾含量的影响
Fig.7 Influence of biochar and straw-return on available soil K content

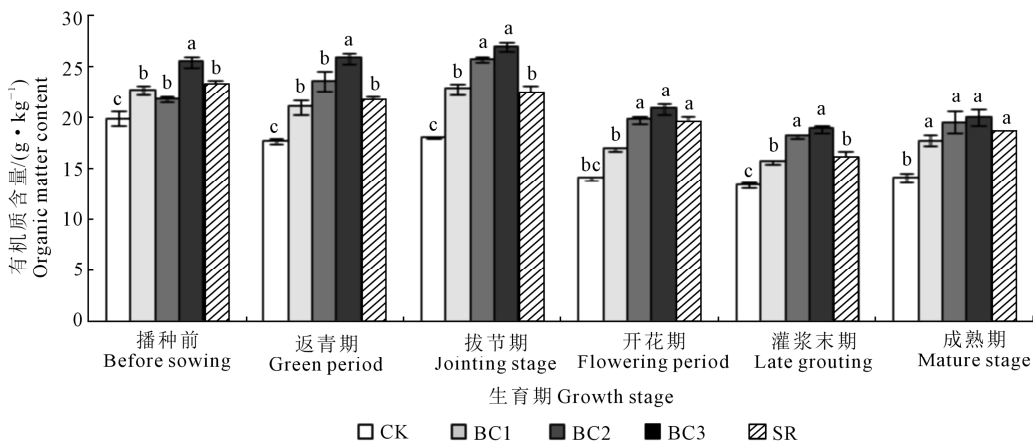


图 8 生物炭及秸秆还田对土壤有机质的影响
Fig.8 Influence of biochar and straw-return on soil organic matter content

表 2 生物炭及秸秆还田对土壤水分利用效率的影响

Table 2 Influence of biochar additions and straw-return on water use efficiency

处理 Treatment	土壤储水量/mm Soil water content		有效降雨 Effective rainfall /mm	作物耗水量 Water consumption /mm	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
	播种前	收获后				
	Before sowing	After harvest				
CK	440.4±13.0a	269.4±5.1bc	198.4	369.4±8.3a	5666±165c	15.3±0.2b
BC1	458.1±12.3a	283.2±6.1bc		373.3±6.7a	6450±58ab	17.3±0.3a
BC2	442.4±18.7a	271.9±4.6bc		368.9±15.6a	6640±112a	18.1±0.8a
BC3	450.5±18.3a	266.1±5.7c		382.9±12.7a	6204±92b	16.2±0.7ab
SR	476.8±2.1a	293.2±1.9a		385.3±2.0a	6259±145b	16.2±0.5ab

田;当生物炭用量继续增加到 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,产量及水分利用效率有下降趋势。这说明,生物炭施用量并不是越多越好,超过一定量反而会抑制作物生长,这与刘卉, Kammann 等^[12,17]的研究结果相似。当然,生物炭对产量的影响在不同作物及不同土壤类型上表现又不一致。Zwieten 等^[18]通过室内试验表明,施用生物炭能增加大豆的产量,但对小麦及萝卜产量有抑制作用;Chen 等^[19]研究表明,生物炭在壤土上增产 10%,在砂土上增产达 30%;而 Gaskin 等^[20]研究发现,黏性沙土中添加生物炭对作物产量无显著影响;Major^[21]通过连续 4 年试验发现,施用生物炭在第一年对玉米产量无影响,随后增产显著;刘宇娟等^[22]发现,短期施用生物炭对小麦产量无显著影响,连续在 9 季作物施用生物炭以后,小麦产量显著增加。因此,生物炭对作物的增产效果要依据土壤类型、作物类型、生物炭施用量及施入时间等因素综合考虑。

3.2 生物炭施用对土壤养分的影响

生物炭具有发达的孔隙结构和较高的阳离子交换量与吸附能力,含有较多的化学官能团,能改善土壤性质,可以作为肥料缓释载体,减缓肥料养分在土壤中的释放速率,降低肥料养分在土壤中的淋溶,增加作物对养分的吸收,从而提高了肥料利用率^[23-26]。本试验结果发现,生物炭的施用不同程度地增加了土壤中的硝、铵态氮,速效磷、钾及有机质含量。其中,硝、铵态氮、速效钾及有机质含量均随生物炭用量增加而增加,即当生物炭用量为 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,其养分含量最大。这主要是因为生物炭本身含有一定的碳、氮、钾(1.88%)等养分,随着生物炭施入量的增加,带入土壤中的养分含量相应地增加;其次,生物炭巨大的比表面积及较强的吸附作用能够吸附滞留土壤中一部分养分,以减缓养分的渗漏流失,提高了土壤的保肥性^[27]。

本研究中土壤速效磷含量随生物炭用量的增加先增加后减少,这与赵殿峰等^[28]的研究结果较为吻合,当生物炭施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,速效磷含量达到最大。造成这种现象的原因可能是低量的生物炭用量能够吸附土壤溶液中的磷酸根,与土壤中的铝、铁氧化物胶体竞争对磷的固定,减少了磷的固定损失,促进有机态磷的矿化,因而增加了土壤中有效磷含量^[4];当生物炭用量继续增加到 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤中 C/N 增大,引起有效磷的生物固定及加剧了 Ca-促磷酸根沉降反应^[7],因此,磷含量反而降低。而秸秆还田对土壤速效磷基本无影响,却使整个生育期土壤速效钾含量比对照(CK)显著增

加了 38.0%,这与幕平、李纯燕等^[29-30]的研究结果相似。因为秸秆还田增加了土壤磷的有效性,促进了作物对土壤速效磷的吸收,因此,磷含量基本不变;作物秸秆钾含量很高,归还回土壤中的钾增多,而且钾是离子状态很容易完全释放出来,所以土壤中速效钾含量显著升高。同时,本试验结果发现,施用生物炭对土壤有机质的提升作用高于秸秆还田,其中,当生物炭用量为 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,整个生育期土壤有机质含量比秸秆还田增加 13.8%,这与赵建坤等^[31]的研究结果一致。因为生物炭可以固定土壤里约 50%的碳,而秸秆还田一般只保留 10%~20%的碳,且有机质含量随生物炭施用量的增加而增加^[32]。这除了与生物炭本身含炭量高有关以外,还与生物炭表面催化活性作用促进了较小有机分子聚合形成土壤有机质有关^[3];另一方面,可能是因为生物炭能通过促进土壤有机-矿质复合体形成,提高团聚体稳定性而减少有机质淋失^[33]。有机质含量增加,同时也使有毒元素的危害减轻,增加了土壤中作物生长所需的养分。

综合来说,生物炭的施用提高了上述土壤养分的含量,增强了土壤保肥能力。同时,生物炭在土壤中可能转化为具有高度芳香化结构的土壤腐殖质,因而在增大土壤有机碳库、培肥土壤方面起着重要的作用。本研究结果表明,适量的生物炭用量($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)能够增强土壤对肥料养分的吸附,减少养分淋溶,提高了肥料的利用效率,促进植物和根系的生长,从而增加了作物产量;当生物炭用量继续增加到 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,作物产量及水分利用效率反而下降。一方面是因为生物炭会吸附固定土壤中的一部分养分,导致作物生长所需的养分得不到及时供应,作物吸收旺盛及生物炭自身的吸附双重作用导致土壤养分降低^[29]。另一方面可能是因为较高量的生物炭使土壤 C/N 比提高,降低了土壤养分尤其是氮素的有效性,不利于作物对养分的吸收,从而引起作物产量及水分利用效率的降低。

3.3 生物炭施用对土壤水分的影响

土壤的保水能力受到土壤质地及结构的影响,主要与土壤容重和孔隙度有关^[34]。本研究结果发现,土壤的水分含量随生物炭用量的增加先增加后减少,即当生物炭用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤的水分储存能力最强。这是由生物炭物理特性决定的,生物炭施入土壤能够降低土壤容重、增大土壤总孔隙度及通透性,促进了土壤水分入渗,从而增加了土壤的持水能力;另外,生物炭具有很大的比表面积,能在一定程度上减少土壤水分蒸发,提高了土壤保

水蓄水能力^[35],使各生育期水分得到充足供应,作物生长良好,引起作物产量及水分利用效率显著提高。但也有研究发现,过量的生物炭反而会降低土壤含水量^[34]。从小麦整个生育期来看,高量的生物炭用量($45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)反而使土壤储水量降低。一方面是由于生物炭存在亲水及斥水双重特性,当添加量超过一定量时,斥水性就会表现出来^[36];另一方面可能是因为高量的生物炭使土壤总孔隙度及毛管孔隙度增加,水分蒸发加快,土壤保水能力下降^[37],导致作物生长所需的水分得不到及时供应,因而作物产量及水分利用效率降低。

4 结 论

1) 土壤中硝、铵态氮,速效钾及有机质含量均随生物炭施用量的增加而增加,即当生物炭用量为 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,养分含量最高。土壤储水量及速效磷含量随生物炭施用量的增加先增加后减少,即当生物炭施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤储水量及速效磷含量最高,而秸秆还田对土壤速效磷影响不显著。

2) 产量及水分利用效率随生物炭施用量的增加先增加后减少,当生物炭用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦显著增产 17.2%,水分利用效率显著增加 17.8%;秸秆还田虽使小麦显著增产 10.5%,但对水分利用效率提升并不显著。从本研究的结果综合来看,在黄土高原黑垆土上,推荐生物炭用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不过今后对生物炭的研究还需综合考虑生物炭的类型、施入时间、施用量、土壤类型等,进一步明确生物炭对土壤性质的改善及产量、水分利用效率的提高作用。

参 考 文 献:

- [1] 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,(8):1292-1297.
- [2] 周志红,李心清,邢英,等.生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J].地球与环境,2011,39(2):278-284.
- [3] 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.
- [4] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2011, 5(7):381-387.
- [5] Yu L, Lin Q, Durenkamp M, et al. Soil priming effects following substrates addition to biochar treated soils after 431 days of preincubation[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2017, 53(3):315-326.
- [6] 贾兴永. 生物炭及翻堆频率对鸡粪堆肥过程中温室气体排放的影响[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
- [7] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1):275-290.
- [8] Zhang D X, Pan G X, Wu G, et al. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rained low fertility inceptisol[J]. *Chemosphere*, 2016, 42: 106-113.
- [9] 聂新星,李志国,张润花,等.生物炭及其与化肥配施对灰潮土土壤理化性质、微生物数量和冬小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9):27-32.
- [10] 王月玲,耿增超,尚杰,等.施用生物炭后壤土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 532-539.
- [11] 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.
- [12] 刘卉,周清明,黎娟,等.生物炭施用量对土壤改良及烤烟生长的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7):1411-1419.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2000, 22-24.
- [14] 王缠军,郝明德,折风霞,等.黄土区保护性耕作对春玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4):193-198.
- [15] Jeffery S, Fga V, Van d V M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1):175-187.
- [16] 黄剑,张庆忠,杜章留,等.施用生物炭对农田生态系统影响的研究进展[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2):232-239.
- [17] Kammann C I, Linsel S, Gößling J W, et al. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa*, Willd and on soil-plant relations[J]. *Plant and Soil*, 2011, 345(1):195-210.
- [18] Zwieten L V, Kimber S, Morris S, et al. Influence of biochars on flux of N_2O and CO_2 from Ferrosol[J]. *Soil Research*, 2010, 48(6):555-568.
- [19] Chen B, Zhou D, Zhu L. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(14):5137-5143.
- [20] Gaskin J. W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(6):2061-2069.
- [21] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant Soil*, 2010, 333(1/2):117-128.
- [22] 刘宇娟,谢迎新,董成,等.秸秆生物炭对潮土区小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报, 2018, (3):232-238.
- [23] 钟雪梅,朱义年,刘杰,等.竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1):154-157.
- [24] Lehmann J, Silva J P, Steiner C et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [25] Day D, Evans R J, Lee J W, et al. Valuable and stable carbon co-product from fossil fuel exhaust scrubbing[J]. Preprint Papers, American Chemical Society, Division of Petroleum

- (上接第 152 页)

- [15] 宿越, 李天来, 李楠, 等. 外源水杨酸对氯化钠胁迫下番茄幼苗糖代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1525-1528.
- [16] 黄玉平, 彭文娟, 张瑜, 等. NO 处理对草莓果实采后品质和苯丙烷类代谢的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(10): 1959-1966.
- [17] 张倩, 辛力, 亓雪龙, 等. 肉桂精油对甜樱桃果实品质和货架期的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(9): 1737-1742.
- [18] 马宗桓. 滴灌条件下不同施氮时期对酿造葡萄碳氮代谢的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [19] Pirie A, Mullins M G. Changes in anthocyanin and phenolics content of grapevine leaf and fruit tissues treated with sucrose, nitrate, and abscisic acid [J]. Plant Physiology, 1976, 58(4): 468.
- [20] 马文娟, 同延安, 高义民. 葡萄氮素吸收利用与累积年周期变化规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 504-509.
- [21] 宋阳, 崔世茂, 杜金伟, 等. 氮肥不同施用量对葡萄叶片生长及根、叶细胞结构的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(03): 204-208.
- [22] Schaffer A A, Liu K C, Goldschmidt E E, et al. Citrus leaf chlorosis induced by sink removal: starch, nitrogen, and chloroplast ultrastructure[J]. Plant Physiology, 1986, 124(s1-2): 111-121.
- [23] Neilsen G H, Neilsen D, Bowen P, et al. Effect of timing, rate, and form of N fertilization on nutrition, vigor, yield, and berry yeast-assimilable N of grape[J]. American Journal of Enology & Viticulture, 2010, 61(3): 327-336.
- [24] 彭福田, 姜远茂, 顾曼如, 等. 不同负荷水平下氮素对苹果果实生长发育的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(6): 690-694.
- [25] Garde-Cerdán T, Santamaría P, Rubio-Bretón P, et al. Foliar application of proline, phenylalanine, and urea to Tempranillo vines: Effect on grape volatile composition and comparison with the use of commercial nitrogen fertilizers [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(2): 684-689.
- [26] Hawker J S. Changes in the activities of enzymes concerned with sugar metabolism during the development of grape berries [J]. Phytochemistry, 1969, 8(1): 9-17.
- [27] 赵春艳, 马兴旺, 祁永春, 等. 水肥因素对葡萄产量和品质的效应[C]//第九届中国青年土壤科学工作者学术讨论会暨第四届中国青年植物营养与肥料科学工作者学术讨论会. 成都: 中国土壤协会, 2004.
- [28] Raath P J. Effect of varying levels of nitrogen, potassium and calcium nutrition on table grape vine physiology and berry quality [J]. Stellenbosch Stellenbosch University, 2012.
- [29] 张志勇, 马文奇. 酿酒葡萄‘赤霞珠’养分累积动态及养分需求量的研究[J]. 园艺学报, 2006, 33(3): 466-470.
- [30] 冯国明. 成龄葡萄施肥要点[J]. 河北果树, 2007(6): 50-51.
- [31] 任立民, 陵军成, 李平. 氮素延后施用对葡萄成熟期叶片衰老和果实品质的影响[J]. 河北林业科技, 2013, (04): 12-14.
- [32] Lobit P, Soing P, Génard M, et al. Effects of timing of nitrogen fertilization on shoot development in peach (Prunus persica) trees[J]. Tree Physiology, 2001, 21(1): 35-42.
- [33] 王连君, 王程翰, 乔建磊, 等. 膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 113-119.