

生物炭对不同地下水位番茄需水规律与产量的影响

邵光成¹ 高 阳¹ 林 洁² 刘正军³ 黄豆豆⁴

(1. 河海大学农业工程学院, 南京 210098; 2. 江宁区水务局, 南京 211100; 3. 淮安区水利局, 淮安 223200;
4. 奉化区锦屏街道办事处, 宁波 315500)

摘要: 为解决渍水胁迫这一困扰南方避雨栽培区农业生产的障碍性问题, 定量评估施加生物炭对缓解作物渍害的影响, 以避雨栽培番茄为对象, 借助土柱试验, 系统分析不同地下水位及生物炭施加量对作物耗水规律、土壤氧化还原电位及产量的影响。结果表明, 地下水位越浅, 作物渍害胁迫越严重, 导致耗水量越少; 施用生物炭后, 作物耗水量显著降低, 生物炭保水作用随地下水位降低而有所削弱。地下水补给量随地下水埋深变大而减小, 相同地下水位条件下, 施用生物炭可显著增加地下水利用量。施用生物炭可使土壤氧化还原电位变大, 改善土壤通气性能。地下水位在 -80 cm 时, 5% 生物炭施加量可显著提高番茄产量和水分利用效率, 其增幅分别达到 38.7%、56.6%, 地下水位对番茄产量影响显著, 而地下水位和生物炭交互作用对产量及水分利用效率影响均不显著。

关键词: 番茄; 生物炭; 地下水位; 需水规律; 产量

中图分类号: S278; S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0250-09

Effects of Biochar on Water Requirement Regulation and Yield of Tomato under Different Groundwater Tables

SHAO Guangcheng¹ GAO Yang¹ LIN Jie² LIU Zhengjun³ HUANG Doudou⁴

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. Jiangning Water Conservancy Bureau, Nanjing 211100, China
3. Huai'an Water Conservancy Bureau, Huai'an 223200, China
4. Jinping Street Office of Fenghua District, Ningbo 315500, China)

Abstract: Aiming to solve waterlogging stress, an obstacle that limits agricultural production under rain-shelter cultivation in southern China, and quantitatively evaluate the possible influences of biochar on alleviating damage to crops caused by waterlogging stress, tomato was taken as the experimental object, and the effects of different groundwater tables and biochar application rates on water consumption, soil redox potential and yield were analyzed systematically by soil column experiments. The results showed that the shallower the groundwater table was, the more serious the influence of waterlogging stress on tomato was, leading to less water consumption. The total water requirement was significantly reduced with biochar application. However, the soil water kept by biochar was weakened with the decrease of groundwater table. The groundwater recharge was decreased with the increase of groundwater depth. Under the same groundwater table, the application of biochar could significantly increase the contribution of groundwater to water consumption. Biochar application could increase the soil redox potential and improve the ventilation performance of soil. When the groundwater table was -80 cm, 5% biochar addition could significantly improve tomato yield and water use efficiency, with an increase of 38.7% and 56.6%, respectively. Groundwater table significantly affected tomato yield, but the interaction of groundwater table and biochar had no significant effect on yield and water use efficiency.

Key words: tomato; biochar; groundwater table; water requirement regulation; yield

0 引言

地下水是南方作物耗水的重要来源,对作物需水规律及生长发育起着重要作用^[1]。SOPPE 等^[2]借助称重式蒸渗仪研究发现,当地下水埋深保持在 1.5 m 时,地下水补给量占红花日耗水量比例达到 40%。大量研究表明,小麦产量和地下水埋深之间存在一定线性关系,当地下水埋深小于 1 m 时,小麦可获得较高产量^[3]。而 KAHLOWN 等^[4]研究发现,地下水埋深由 3.0 m 降至 0.5 m 时,地下水利用量(地下水补给量占作物耗水量的比例)达到峰值,而玉米产量降至 1 t/hm² 以下。地下水位过浅会使作物遭受渍害胁迫,对作物生理功能产生负面影响,甚至导致作物死亡^[5]。由于季风气候影响,中国南方地区经常连续降雨或多次降雨,造成地下水持续高水位,导致作物受渍减产。因此,南方地区防治渍害的关键在于控制地下水位。

目前,南方避雨栽培区应对渍害胁迫的措施主要是农田排水,尤其是暗管排水^[6]。但现有排水方式成本较高,需要持续投入和维护,如果排水系统运行和管理不完善,往往使作物受到不同程度渍害胁迫^[7]。暗管排水在加快地下水回落的同时,也加剧了土壤养分流失^[8]。渍后补施肥料和施用生长调节剂也是常用的应对办法,但是该方法不仅增加成本,而且易造成农田面源污染^[9]。在实际生产中,探索低成本、绿色生态的新方法对南方地区作物优质高效生产具有重要意义。

生物炭是指杂草、秸秆等废弃生物质在缺氧或绝氧环境中,经热解炭化形成的富碳固态产物^[10]。其丰富孔隙和较大比表面积^[11-12]能够提高土壤孔隙率,降低容重和密度^[13],促进团聚体稳定^[14],有利于提高土壤持水量,减少土壤氮素损失,为作物生长提供良好环境^[15-17]。因此,土壤中添加生物炭在农业上具有很高应用价值和环境效益。目前,有关生物炭研究主要集中在土壤改良、作物增产、温室气体减排和调控土壤微环境等方面^[18-20]。而对不同地下水位下施加生物炭如何影响番茄生长、能否缓解地下水位过高造成的渍害胁迫等相关研究尚比较缺乏。本研究通过土柱试验,系统分析施加生物炭对不同地下水位作物产量及水分利用效率的影响,探讨施加生物炭缓解作物渍害胁迫可能性,为避雨环境农田地下水位管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为“金粉低架王”,按照传统生育

期划分,将番茄整个生育期划分为苗期(4 月 6 日—5 月 9 日)、开花坐果期(5 月 10 日—6 月 7 日)和成熟采摘期(6 月 8 日—7 月 19 日)。试验使用生物炭为秸秆生物炭,热解温度 550 ~ 600℃,碳化时间 4 ~ 6 h,容重 0.19 g/cm³,比表面积 9 m²/g,总孔隙度 67.03%,通气孔隙度 12.87%,持水孔隙度 61.10%,pH 值为 10.24,固定碳、速效磷、速效钾质量比分别为 650、10.2、55.65 g/kg。

1.2 试验区概况

试验区位于河海大学水利部节水园区(北纬 31°57′,东经 118°50′),属亚热带季风气候区,降水丰沛,多年平均降雨量为 1 061.1 mm(东山站,1931—2017 年),最大年降雨量为 2 015.2 mm,最大日降雨量为 302.2 mm,但降雨量年内分配不均,多集中在汛期。汛期多年平均降雨量 638.7 mm,占年平均降雨量百分比超过 60%。试验区年平均气温 15℃,最高气温 43℃,最低气温 -14℃,年平均日照时数为 2 146 h,多年平均蒸发量为 950.1 mm,平均风速 3.5 m/s,平均无霜期为 231 d。

1.3 试验设计

试验于 2017 年 2—8 月进行,2017 年 2 月 25 日在温室内覆膜育苗,4 月 6 日选取长势一致的良好幼苗移栽至土柱中,种植密度约为 14 000 株/hm²。同时在 0 ~ 30 cm 土层内施用复合肥(N、P₂O₅、K₂O 比例为 15:15:15)400 kg/hm²,移栽后,每个土柱中各灌一次水,且灌水量相同,以保证幼苗成活率。

试验所用土柱高 120 cm、内径 30 cm、壁厚 5 mm,从下往上依次装入细砂和粘壤土,分层压实。其中,细砂垫层高 15 cm,与地下水观测管相连;粘壤土层高 95 cm,土壤平均容重 1.44 g/cm³,田间持水量 31.5%(体积含水率),pH 值为 7.2,速效氮质量比 27.65 mg/kg,速效磷质量比 12.5 mg/kg,砂粒(粒径 0.02 ~ 2 mm)、粉粒(粒径 0.002 ~ 0.02 mm)、黏粒(粒径 0 ~ 0.002 mm)体积分数分别为 29.4%、41.7%、28.9%。0 ~ 30 cm 粘壤土层内掺有不同含量生物炭,距土面 40、60、80 cm 各设一排水孔,不同地下水位条件通过马氏瓶软管给土柱供水来控制,如图 1 所示。

试验设 10 个处理,无生物炭和地下水位控制的对照处理(CK)、2 个生物炭处理(生物炭含量分别为 5% 和 10%)和 3 个地下水位处理(地下水位分别为 -40、-60、-80 cm),每个处理重复 3 次,具体试验方案设计如表 1 所示。

1.4 观测内容与测定方法

在番茄全生育期内,每隔 4 d 测定一次土壤含水率,当土壤含水率低于 70% 田间持水量时,灌水

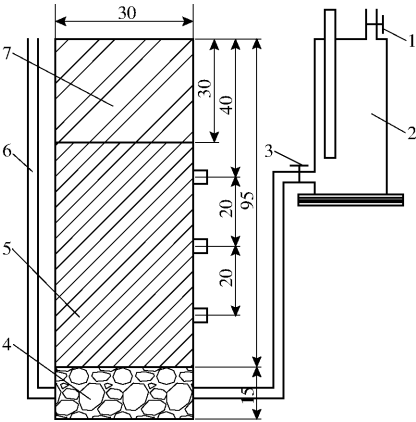


图 1 土柱及马氏瓶示意图

Fig. 1 Schematic of soil column and Mariotte bottle
1. 金属闸门 2. 马氏瓶 3. 塑料阀门 4. 细砂垫层 5. 粘壤土层 6. 地下水观测管 7. 掺有不同含量生物炭的粘壤土层

表 1 避雨栽培番茄土柱试验方案设计
Tab.1 Design of soil column experiment of tomato under rain shelter cultivation

处理	生物炭含量/%	全生育期地下水位/cm
CK		0
T2	0 (B0)	-40 (G40)
T3		-60 (G60)
T4		-80 (G80)
T5	5 (B5)	-40 (G40)
T6		-60 (G60)
T7		-80 (G80)
T8	10 (B10)	-40 (G40)
T9		-60 (G60)
T10		-80 (G80)

至田间持水量,每次灌水前记录马氏瓶读数,马氏瓶读数差值即为地下水补给量。番茄开花坐果期和成熟采摘期两次灌水后,利用 FJA-4 型氧化还原电位

去极化法自动测定系统测定灌水后 5 d 内土壤氧化还原电位值。

本次试验中番茄为避雨栽培,因此在土壤水量平衡计算中不考虑降雨量,只考虑灌水量、地下水补给量和土壤计划湿润层储水量,其中灌水量通过量杯进行计量,地下水补给量以马氏瓶水位变化量进行折算,因此作物水分利用效率计算公式为

WUE = Y_a/ET_a (1)

式中 WUE——作物水分利用效率,kg/m³
Y_a——作物经济产量,t/hm²
ET_a——作物实际耗水量,mm

果实成熟后,对各植株所有单果质量进行称量,累加得到每个处理果实产量。

1.5 数据处理

采用 Excel 2007 处理试验数据,并用 Origin 9.0 作图,对各处理结果运用 SPSS 22.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对番茄需水规律的影响

从表 2 可以看出,在整个生育阶段内,各处理日均耗水量呈现出先增大后减小的变化规律:苗期较低,开花坐果期达到最大,成熟采摘期有所降低,这是由于番茄生长发育特点和外界环境综合影响所导致^[21]。番茄总耗水量以无生物炭、无地下水的对照处理(CK)最大,达到 315.58 mm,且与其他处理(T2 ~ T10)存在显著差异。从苗期到成熟采摘期,施加等量生物炭,不同地下水位处理间番茄耗水量差异显著;而对于不同生物炭含量,耗水量由小到大均为 G40、G60、G80。可见在生物炭含量相同情况下,地下水位越高番茄需水量越小。

表 2 番茄全生育期耗水量及各生育阶段日均耗水量

Tab.2 Water consumption and average daily water consumption during whole growth period of tomato

处理	日均耗水量/(mm·d ⁻¹)				全生育期耗水量/mm			
	苗期	开花坐果期	成熟采摘期	平均	苗期	开花坐果期	成熟采摘期	总计
CK	1.67 ^a	4.76 ^a	2.95 ^a	3.03 ^a	56.72 ^a	137.93 ^a	120.93 ^a	315.58 ^a
T2	1.21 ^e	3.49 ^d	1.86 ^f	2.10 ^g	41.13 ^f	101.25 ^d	76.10 ^f	218.49 ^g
T3	1.51 ^c	4.11 ^c	2.72 ^c	2.71 ^c	51.09 ^c	119.19 ^c	111.48 ^c	281.76 ^c
T4	1.64 ^b	4.27 ^b	2.85 ^b	2.85 ^b	55.77 ^b	123.98 ^b	116.86 ^b	296.61 ^b
T5	1.11 ^g	2.38 ^f	1.44 ^g	1.59 ^h	37.81 ^j	68.99 ^f	58.93 ^g	165.73 ^h
T6	1.24 ^d	3.39 ^e	2.28 ^d	2.25 ^e	42.18 ^e	98.23 ^e	93.57 ^d	233.98 ^e
T7	1.27 ^d	4.09 ^c	2.88 ^{ab}	2.69 ^c	43.10 ^d	118.49 ^c	117.95 ^{ab}	279.54 ^c
T8	1.12 ^g	2.31 ^f	1.24 ^h	1.50 ⁱ	38.00 ^{hj}	67.01 ^f	50.74 ^h	155.75 ⁱ
T9	1.15 ^f	3.39 ^e	2.18 ^e	2.18 ^f	38.87 ^h	98.34 ^e	89.35 ^e	226.56 ^f
T10	1.17 ^f	4.04 ^c	2.84 ^b	2.63 ^d	39.84 ^g	117.11 ^c	116.29 ^b	273.24 ^d

注:表中数据为每个处理 3 次重复的平均值,同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

不同地下水位条件下番茄耗水量对生物炭施加量响应规律一致,其由大到小表现为 B0、B5、B10。

对于不同地下水位,各生物炭处理对番茄耗水量影响存在差异,本研究发现生物炭保水作用随地下水

位降低而有所削弱。在地下水位为 -40 cm 时,与 B0 处理相比,B5 处理耗水量减少 24.1%,B10 处理耗水量减少 28.7%;当地下水位下降至 -80 cm 时,在生物炭施加量由 0 增加至 10% 过程中,番茄耗水量减少幅度变小。

2.2 不同处理对地下水补给量的影响

不同处理番茄全生育期及各生育阶段内地下水补给量与地下水利用量见表 3。在相同生物炭施加量条件下,地下水位越浅,其地下水补给量越大,地下水利用量也越大,由大到小表现为 G40、G60、G80,其中 G40 处理与其余两个处理之间有显著差

异,而地下水位较低的两个处理(G60、G80)之间总体上差异并不明显。这是因为地下水位过高,使得土壤含水率一直较高,导致灌水量较少。

从生物炭施加量上看,全生育期内,当地下水位为 -40 cm 时,生物炭施加量从 0 增加至 10%,地下水利用量从 14.78% 逐渐增加至 26.89%,增幅达到 81.9%,地下水利用量随生物炭施加量增大而增大,当地下水位下降至 -80 cm 时,B10 处理地下水利用量较 B0 处理增加 26.8%。这与前面生物炭保水作用随地下水位下降而有所削弱的结论一致。

表 3 番茄全生育期及各生育阶段地下水补给量
Tab.3 Increment of groundwater during whole growth period of tomato

处理	苗期		开花坐果期		成熟采摘期		全生育期	
	地下水补 给量/mm	地下水利 用量/%	地下水补 给量/mm	地下水利 用量/%	地下水补 给量/mm	地下水利 用量/%	地下水补 给量/mm	地下水利 用量/%
CK	0 ^f	0 ^e	0 ^e	0 ^e	0 ^f	0 ^f	0 ^f	0 ^g
T2	4.12 ^a	10.01 ^a	13.60 ^{cd}	13.43 ^{bc}	14.59 ^{cd}	19.10 ^c	32.31 ^{bce}	14.78 ^c
T3	3.01 ^b	5.88 ^b	13.78 ^{cd}	11.56 ^{cd}	12.42 ^{de}	11.14 ^e	29.21 ^{ce}	10.37 ^{ef}
T4	1.13 ^{de}	2.02 ^{cde}	15.92 ^{abc}	12.84 ^{bcd}	10.91 ^e	9.33 ^e	27.97 ^e	9.43 ^f
T5	1.44 ^{cde}	3.80 ^{bc}	17.03 ^{ab}	24.65 ^a	20.23 ^a	34.28 ^b	38.70 ^a	23.35 ^b
T6	1.23 ^{de}	2.90 ^{cd}	13.63 ^{cd}	13.87 ^{bc}	14.34 ^{cd}	15.33 ^d	29.20 ^{ce}	12.48 ^d
T7	0.59 ^{ef}	1.37 ^{de}	14.39 ^{bcd}	12.14 ^{cd}	17.78 ^{ab}	15.07 ^d	32.76 ^{bc}	11.72 ^{de}
T8	2.29 ^{bc}	6.02 ^b	18.26 ^a	27.20 ^a	20.21 ^a	39.77 ^a	41.93 ^a	26.89 ^a
T9	2.06 ^{cd}	5.26 ^b	14.96 ^{bcd}	15.14 ^b	15.60 ^{bc}	17.42 ^{cd}	33.88 ^b	14.96 ^e
T10	1.53 ^{cde}	2.89 ^{cd}	12.49 ^d	10.65 ^d	18.71 ^{ab}	16.06 ^d	32.73 ^{bc}	11.96 ^{de}

2.3 土壤氧化还原电位的动态变化

由图 2 和图 3 可见,番茄开花坐果期和成熟采

摘期两次灌水后各处理土壤氧化还原电位动态变化基本一致,在每次灌水后土壤氧化还原电位会明显

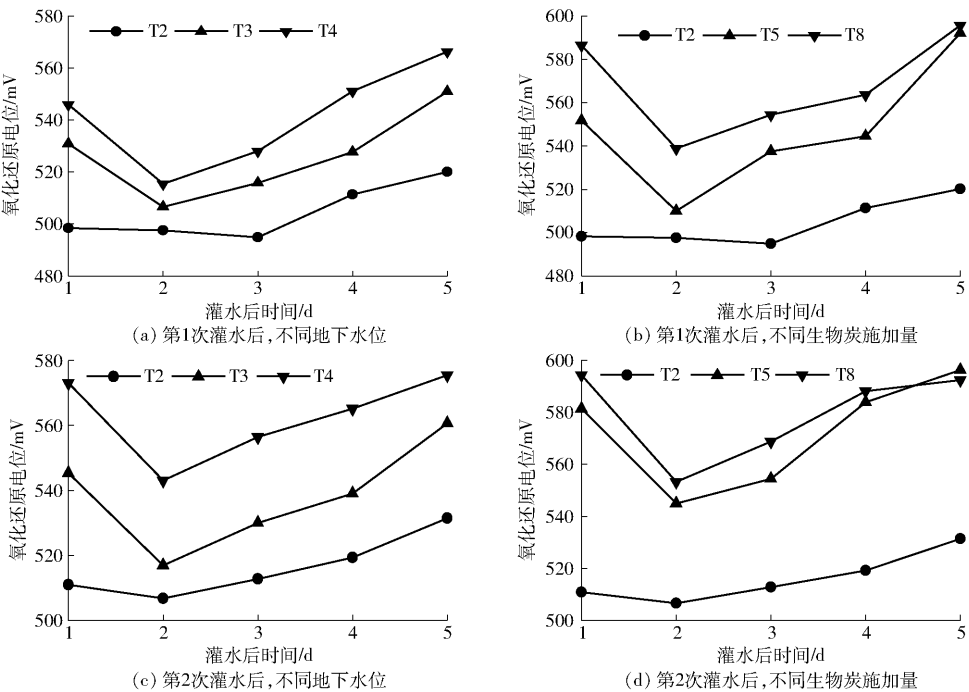


图 2 番茄开花坐果期灌水后土壤氧化还原电位的动态变化曲线

Fig. 2 Dynamic changing curves of soil Eh after irrigation in blossoming and bearing fruits stage of tomato

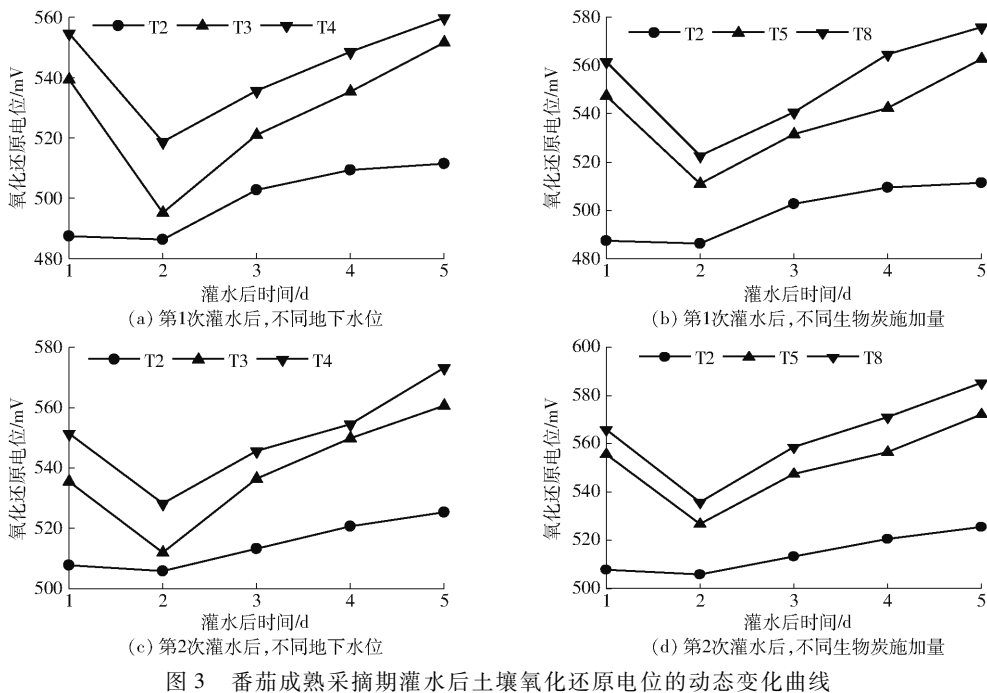


图 3 番茄成熟采摘期灌水后土壤氧化还原电位的动态变化曲线

Fig. 3 Dynamic changing curves of soil Eh after irrigation in fruit maturation stage of tomato

下降,灌水后第 2 天达到最小,不久又逐渐上升,恢复至正常水平。这是因为灌水后土壤含水率较高,处于还原状态,而番茄开花坐果期和成熟采摘期生长旺盛,蒸发蒸腾作用强烈,需水强度和蒸发强度大,土壤含水率下降得很快。由此可知,避雨栽培番茄根际土壤氧化还原电位受土壤含水率影响较大。

未添加生物炭时,土壤氧化还原电位对地下水位响应由小到大表现为 G40、G60、G80,如图 2a、2c、3a、3c 所示,土壤氧化还原电位由小到大依次为 T2、T3、T4,可见地下水位对土壤氧化还原电位的影响是通过改变土壤含水率来实现。从生物炭施加量来看,在地下水位为 -40 cm 条件下,开花坐果期与成熟采摘期土壤氧化还原电位变化趋势一致,由小到大表现为 B0、B5、B10。由此表明,施用生物炭有助于改善土壤通气性能,生物炭含量越大,土壤通气性越好,土壤氧化还原电位也越大。

2.4 不同处理对番茄产量与水分利用效率的影响

不同处理对番茄产量及水分利用效率的影响如表 4 所示。方差分析发现,地下水位和生物炭添加对番茄产量影响均显著,而地下水位对水分利用效率影响不显著。对于不同生物炭施加量而言,番茄产量随地下水埋深增大而增加,其中 T7、T9 和 T10 处理产量均显著高于对照处理。相同地下水位下,产量随生物炭添加量增多而增加,与对照相比,地下水位调控下 T2 和 T3 处理产量虽均出现明显下降,但差异不显著;在地下水位为 -40 cm 时,B5 和 B10 处理均明显高于 B0 处理,而且 B10 与 B0 处理之间出现显著差异,施加生物炭的 6 种处理水分利用效

率较对照均出现显著增加,但 5% 生物炭施加量条件下各处理间差异不显著。在无生物炭施加情况下,地下水位从 -40 cm 下降至 -80 cm 时,WUE 由小到大表现为 G40、G60、G80,上述结果表明,地下水位过高,会导致作物遭受渍害胁迫,致使作物产量减少和水分利用效率降低。生物炭施加量增至 10% 时,相同地下水位处理,其 WUE 均大于无生物炭添加处理。从地下水位和生物炭交互作用上看,番茄产量及水分利用效率受其影响不显著。

表 4 不同生物炭及地下水位处理下番茄产量与水分利用效率

Tab.4 Yield and water use efficiency of tomato under different biochar and groundwater table treatments					
处理	耗水量/ mm	产量/ (t·hm ⁻²)	WUE/ (kg·m ⁻³)	耗水量减 幅/%	增产 率/%
CK	315.58 ^a	140.04 ^{cd}	44.38 ^e		
T2	218.49 ^g	100.05 ^d	45.79 ^{de}	30.8 ^c	-28.6 ^d
T3	281.76 ^c	133.74 ^{cd}	47.54 ^{cde}	10.7 ^g	-4.5 ^{cd}
T4	296.61 ^b	142.63 ^{bcd}	48.09 ^{cde}	6.0 ^h	1.9 ^{bcd}
T5	165.73 ^h	134.36 ^{cd}	81.05 ^{ab}	47.5 ^b	-4.1 ^{cd}
T6	233.98 ^e	165.10 ^{abc}	70.59 ^{bc}	25.9 ^e	17.9 ^{abc}
T7	279.54 ^c	194.20 ^a	69.49 ^{bcd}	11.4 ^g	38.7 ^a
T8	155.75 ⁱ	156.77 ^{abc}	100.99 ^a	50.7 ^a	12.0 ^{abc}
T9	226.56 ^f	189.50 ^{ab}	83.64 ^{ab}	28.2 ^d	35.3 ^{ab}
T10	273.24 ^d	198.36 ^a	72.68 ^b	13.4 ^f	41.7 ^a
F	生物炭	8.73 [*]	15.52 [*]		
	地下水位	6.37 [*]	1.64		
	生物炭× 地下水位	0.14	0.81		
	地下水位				

注: * 表示在 0.05 水平差异显著。

3 讨论

3.1 地下水位对番茄需水规律及产量的影响

地下水位是作物生长发育重要因素,地下水位过深不利于植物从地下水中补充水分^[22]。HUO 等^[23]利用 HYDRUS-1D 模拟地下水位持续稳定下降,发现当地下水埋深从 1 m 增加到 4 m 时,补给量明显减少,而当地下水埋深大于最大蒸发深度时,补给量保持稳定。本试验结果表明,地下水补给量随地下水位上升而逐渐增大,地下水利用量也与地下水位呈正相关,这与 KARIMOV 等^[24]通过 HYDRUS-1D 数值模拟结果相一致。YANG 等^[25]认为,地下水位过度下降必然增加从地下水中吸收水分难度,减少作物对地下水利用,从而对作物生长及其从土壤中吸收养分产生不利影响。因此,由于水分供应不足,地下水过深会恶化植物生长环境,降低作物产量^[26]。而浅层地下水在为作物提供更多所需水分同时,也可能由于土壤通气不良而使作物生长环境恶化^[27-28]。浅层地下水可使作物根系生长缺氧而受抑制,影响作物生理过程,降低干物质积累^[29-31]。本研究中,随地下水位上升,土壤氧化还原电位逐渐减小,番茄耗水量和产量也逐渐下降。其中,地下水位为 -40 cm 时,番茄受到一定程度渍害胁迫,不施加生物炭条件下,地下水位为 -40 cm 时,番茄减产最多,较对照处理减产 28.6%,耗水量最少,土壤氧化还原电位最低。因此,地下水位过深或过浅都不利于作物生长^[32-33]。GHAMARNIA 等^[34]对小麦进行试验研究发现,存在一个最优地下水埋深,使得小麦产量和地下水利用效率达到峰值。HUO 等^[35]也发现,正常灌溉条件下,小麦产量随地下水位下降先增加后减少,在地下水埋深为 2.0 m 时达到最大。本研究地下水位处理受场地因素限制设计较少,后续需针对地下水埋深开展研究,以便进一步明确最优地下水埋深。

3.2 生物炭对番茄需水规律及产量的影响

大量研究认为生物炭具有节水增产作用^[36-38]。本研究设计两种生物炭施用量(5%、10%),结果发现生物炭施用后,番茄全生育期耗水量减少,产量增加,水分利用效率提高。而且随生物炭施用量增加,耗水量逐渐减小,产量和水分利用效率逐渐增加,与 XIAO 等^[39]2013 年田间试验结果相一致。当地下水埋深控制在 40 cm 和 60 cm 时,10% 生物炭施加量下,G40 和 G60 处理产量均高于对照处理,表明生物炭添加能够缓解作物受渍而造成的减产。其原因可能在于生物炭可以改善土壤理化性质,增加土壤通气、透水性能,有利于作物根系发育^[40]。本研

究中,地下水位为 -40 cm 时,5% 生物炭施加量下,土壤氧化还原电位和番茄产量分别提高 6.4% 和 34.3%,且生物炭施加量越大,土壤氧化还原电位越大,从而反映出生物炭可以改善土壤通气性能。此外,生物炭本身含有一定量养分,施入土壤后,提高土壤养分含量^[41];另外,生物炭具有巨大比表面积和较强吸附性能,能够吸附土壤中滞留养分,减少土壤养分淋溶^[42]。番茄耗水量减少主要是由于生物炭复杂孔隙结构和较强吸附性能,可以增强土壤持水能力,有效抑制表土层土壤水分蒸发,从而减少土壤水损失^[43]。也有研究发现过量生物炭反而会增加作物耗水量,减少产量和水分利用效率^[44-46]。但张新学等^[47]研究不同栽培模式下生物炭对马铃薯耗水量影响,得到相反结论,马铃薯耗水量随生物炭施用量先增加后减少。刘超等^[48]在寒地黑土区进行生物炭试验发现,施加适量生物炭可以提高玉米日耗水量和全生育期耗水量。而张妙^[49]指出在黄绵土上施加生物炭,玉米地上生物量、籽粒质量、穗粒数和水分利用效率显著降低。LIU 等^[50]研究表明,在酸性土壤中生物炭对马铃薯产量和水分利用效率均有不利影响。因此,生物炭节水增产作用要依据土壤质地、作物种类和生物炭施用量等因素综合考虑。此外,目前生物炭节水效应研究多集中于“节流”^[15,43,46],而本文从“开源”出发,探究生物炭能否提高作物对地下水利用效率,研究发现施用生物炭可以提高地下水补给量,而且地下水补给量随生物炭施加量增大而增大。地下水补给量增加,降低灌溉需求,使得灌水量减少^[4],在实际生产中,对节约农业用水具有重要意义。

3.3 生物炭对不同地下水位下番茄的影响

已有研究表明生物炭可以缓解作物渍害胁迫^[51],本研究发现,当地下水位为 -40 cm 时,与 B0 处理相比,B10 处理产量和水分利用效率分别提高 56.7% 和 120.6%,而当地下水位为 -60 cm 时,B10 处理产量和水分利用效率增幅变为 41.7% 和 75.9%。对于不同地下水位,生物炭对番茄需水规律影响也存在差异。地下水位由 -40 cm 降至 -80 cm,B10 处理耗水量较 B0 处理减幅由 28.7% 降至 7.9%,地下水利用量增幅由 81.9% 降至 26.8%。因此渍害胁迫越严重,生物炭缓解作物渍害胁迫作用越强,节水效应越显著。不过,与对照相比,-40 cm 地下水位和 10% 生物炭施加量组合(T8 处理)节水效果最显著,但产量增加并不显著,而 -80 cm 地下水位和 10% 生物炭施加量组合(T10 处理)产量增加显著,但节水效果并不显著。因此,适宜地下水位和适当生物炭施加量组合最为经济合

理。本研究中,T7 处理为最佳组合,与对照相比,各项指标差异显著,耗水量减少 11.4%,产量和水分利用效率分别增加 38.7%、56.6%。

此外,本研究发现,生物炭施加与否,WUE 对地下水位响应规律略有不同。未添加生物炭时,番茄水分利用效率随地下水位下降而增加。而在生物炭添加情况下,WUE 由大到小表现为 G40、G60、G80,这可能是因为当地下水埋深较浅时,上层土壤中生物炭可吸收一部分水分,而表层土壤水分蒸发时,生物炭可释放之前吸收水分,使土壤水分总体达到一个相对平衡状态,进而提高番茄水分利用效率,该问题需要通过对番茄生育期内土壤含水率监测作进一步试验研究论证。

4 结 论

(1)适宜地下水位有助于提高作物产量和水分利用效率。地下水位越浅,地下水补给量占作物耗水量比例越大,作物受到渍害胁迫越严重,导致番茄

产量减少、水分利用效率降低。地下水位为 -40 cm 时,番茄渍害胁迫较严重,其产量较对照处理减少 28.6%,而 -80 cm 地下水位下,番茄产量增加 2.59 t/hm²,水分利用效率提高 3.71 kg/m³。

(2)施加生物炭可以缓解作物渍害胁迫,抑制作物耗水量,增加地下水利用量。地下水埋深为 40 cm 时,施加 5% 生物炭可使土壤氧化还原电位和产量增加,分别提高 6.4% 和 34.3%。相同地下水位条件下,B10 处理耗水量最少,地下水利用量最大,产量和水分利用效率最高,分别为 155.75 mm、26.89%、156.77 t/hm² 和 100.99 kg/m³。

(3)相同生物炭施加量下,地下水位越浅,生物炭节水增产效应越显著。但地下水位和生物炭互作效应对番茄产量及水分利用效率影响均不显著。-80 cm 地下水位和 5% 生物炭施加量组合最为适宜,与对照相比,各项指标差异显著,耗水量减少 11.4%,产量和水分利用效率分别增加 38.7%、56.6%。

参 考 文 献

[1] GRIES D, ZENG F, FOETZKI A, et al. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table[J]. Plant, Cell and Environment, 2003, 26(5): 725-736.

[2] SOPPE R W O, AYARS J E. Characterizing groundwater use by safflower using weighing lysimeters[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(1): 59-71.

[3] KAHLOWN M A, IQBAL M, SKOGERBOE G V, et al. Water logging, salinity and crop yield relationships[R]. Mona Reclamation Experimental Project, WAPDA, Report No. 233, 1998.

[4] KAHLOWN M A, ASHRAF M, ZIA-UL-HAQ. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields[J]. Agricultural Water Management, 2005, 76(1): 24-35.

[5] XU X, HUANG G H, SUN C, et al. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin[J]. Agricultural Water Management, 2013, 125: 46-60.

[6] 方锐. 南方地区农田暗管排水工程建设模式与标准[D]. 扬州:扬州大学,2013.

[7] 朱建强,乔文军,刘德福,等. 农田排水面临的形势、任务及发展趋势[J]. 灌溉排水学报,2004,23(1): 62-65.

[8] ZHU Jianqiang, QIAO Wenjun, LIU Defu, et al. Situation and tasks of farmland drainage facing, and its tendency[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(1): 62-65. (in Chinese)

[9] 袁念念,黄介生,谢华,等. 暗管控制排水棉田氮素流失规律试验[J]. 农业工程学报,2010,26(9): 8-13.

[10] YUAN Niannian, HUANG Jiesheng, XIE Hua, et al. Experimental study of nitrogen leaching pattern in controlled pipe-drainage cotton field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 8-13. (in Chinese)

[11] ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 156(4): 1-11.

[12] BEESLEY L, MORENO-JIMÉNEZ E, GOMEZ-EYLES J L, et al. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3269-3282.

[13] SOLAIMAN Z M, ANAWAR H M. Application of biochars for soil constraints: challenges and solutions[J]. Pedosphere, 2015, 25(5): 631-638.

[14] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3-4): 443-449.

[15] GITHINJI L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60(4): 457-470.

[16] ZHANG Q Z, DU Z L, LOU Y L, et al. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions[J]. CATENA, 2015, 127: 26-31.

[17] 魏永霞,王鹤,吴昱,等. 生物炭对不同坡度坡耕地土壤水动力学参数的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3): 231-240.

[18] WEI Yongxia, WANG He, WU Yu, et al. Effect of biochar on soil hydrodynamic parameters under different slopes[J/OL].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 231–240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190325&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.025. (in Chinese)
- [16] 谢迎新, 刘宇娟, 张伟纳, 等. 潮土长期施用生物炭提高小麦产量及氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 115–123. XIE Yingxin, LIU Yujuan, ZHANG Weina, et al. Long-term application of biochar in fluvio-aquatic soil improving wheat yield and nitrogen utilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 115–123. (in Chinese)
- [17] ZWIETEN L V, SINGH B P, KIMBER S W L, et al. An incubation study investigating the mechanisms that impact N_2O flux from soil following biochar application[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2014, 191: 53–62.
- [18] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 1–12. GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 1–12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.001. (in Chinese)
- [19] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1–7. HE Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 1–7. (in Chinese)
- [20] 李瑞霞, 李洪杰, 霍艳丽, 等. 生物炭对华北冬小麦根系形态和内生真菌多样性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 235–242. LI Ruixia, LI Hongjie, HUO Yanli, et al. Effect of biochar on root morphology and endophytic fungal diversity of winter wheat in north China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 235–242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180328&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.028. (in Chinese)
- [21] 王峰, 杜太生, 邱让建, 等. 亏缺灌溉对温室番茄产量与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 46–52. WANG Feng, DU Taisheng, QIU Rangjian, et al. Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of tomato in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 46–52. (in Chinese)
- [22] ZIMMERMANN I, FLEIGE H, HORN R. Longtime effects of deep groundwater extraction management on water table levels in surface aquifers[J]. Soils Sediments, 2017, 17(1): 133–143.
- [23] HUO S Y, JIN M G, LIANG X, et al. Changes of vertical groundwater recharge with increase in thickness of vadose zone simulated by one-dimensional variably saturated flow model[J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(6): 1043–1050.
- [24] KARIMOV A K, ŠIMŮNEK J, HANJRA M A, et al. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia) [J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 57–69.
- [25] YANG Y, LI C, LI J, et al. Growth dynamics of Chinese wingnut (*Pterocarya stenoptera*) seedlings and its effects on soil chemical properties under simulated water change in the Three Gorges Reservoir region of Yangtze River[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2013, 20(10): 7112–7123.
- [26] TRILLO N, FERNÁNDEZ R J. Wheat plant hydraulic properties under prolonged experimental drought: stronger decline in root-system conductance than in leaf area[J]. Plant Soil, 2005, 277(1–2): 277–284.
- [27] JIANG D, FAN X, DAI T, et al. Nitrogen fertiliser rate and post-anthesis waterlogging effects on carbohydrate and nitrogen dynamics in wheat[J]. Plant Soil, 2008, 304(1–2): 301–314.
- [28] REN B, DONG S, LIU P, et al. Ridge tillage improves plant growth and grain yield of waterlogged summer maize[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 392–399.
- [29] GHOBADI M E, GHOBADI M, ZEBARJADI A. Effect of waterlogging at different growth stages on some morphological traits of wheat varieties[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(4): 635–645.
- [30] PEREIRA E S, SILVA O N, FILHO A P, et al. Antioxidant enzymes efficiently control leaf and root cell damage in young *Euterpe oleraceaplants* exposed to waterlogging[J]. Indian Journal of Plant Physiology, 2015, 20(3): 213–219.
- [31] NAJEEB U, ATWELL B J, BANGE M P, et al. Aminoethoxyvinylglycine (AVG) ameliorates waterlogging-induced damage in cotton by inhibiting ethylene synthesis and sustaining photosynthetic capacity[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 76(1): 83–98.
- [32] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 128–136. HAO Yuanyuan, XU Xu, HUANG Quanzhong, et al. Modeling soil water-salt dynamics and maize yield responses to groundwater depths and irrigations[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 128–136. (in Chinese)
- [33] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617–624. LIU Zhandong, LIU Zugui, YU Jianhe, et al. Effects of groundwater depth on maize growth and water use efficiency[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 617–624. (in Chinese)
- [34] GHAMARNIA H, FARMANIFARD M. Yield production and water-use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under shallow groundwater use in semi-arid region[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60(12): 1677–1700.
- [35] HUO Z L, FENG S Y, HUANG G H, et al. Effect of groundwater level depth and irrigation amount on water fluxes at the

- groundwater table and water use of wheat[J]. *Irrigation and Drainage*, 2012, 61(3): 348–356.
- [36] AKHTAR S S, LI G, ANDERSEN M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138: 37–44.
- [37] 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)
- [38] 付威, 樊军, 胡雨彤, 等. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1158–1167.
- FU Wei, FAN Jun, HU Yutong, et al. Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1158–1167. (in Chinese)
- [39] XIAO Q, ZHU L X, SHEN Y F, et al. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 284–293.
- [40] 勾芒芒, 屈忠义. 土壤中施用生物炭对番茄根系特征及产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1348–1352.
- GOU Mangmang, QU Zhongyi. Effect of biochar on root distribution and yield of tomato in sandy loam soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8): 1348–1352. (in Chinese)
- [41] 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/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 137–142.
- GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 137–142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140122&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022. (in Chinese)
- [42] BU X L, XUE J H, ZHAO C X, et al. Nutrient leaching and retention in riparian soils as influenced by rice husk biochar addition[J]. *Soil Science*, 2017, 182(7): 241–247.
- [43] 吴昱, 刘慧, 杨爱峥, 等. 黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 287–294.
- WU Yu, LIU Hui, YANG Aizheng, et al. Influences of biochar supply on water and soil erosion in slopping farm-land of black soil region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 287–294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.034. (in Chinese)
- [44] 孙海妮, 王仕稳, 李雨霖, 等. 生物炭施用量对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 159–167.
- SUN Haini, WANG Shiwen, LI Yulin, et al. Effects of biochar levels on winter wheat yield and water-use efficiency in Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 159–167. (in Chinese)
- [45] 朱士江, 叶晓思, 王斌, 等. 不同水分调控、生物炭配比对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. *节水灌溉*, 2018(1): 1–5.
- ZHU Shijiang, YE Xiaosi, WANG Bin, et al. Effects of water-biochar coupling on rice yield and water use efficiency[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(1): 1–5. (in Chinese)
- [46] 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 two consecutive years supply of biochar on soil improvement, water saving and 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?flag=1&file_no=20180236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036. (in Chinese)
- [47] 张新学, 张国辉, 王效瑜, 等. 不同栽培模式下生物炭对土壤水分保持能力的影响[J]. *农业科学研究*, 2017, 38(1): 44–47.
- ZHANG Xinxue, ZHANG Guohui, WANG Xiaoyu, et al. Effects of biological carbon on soil water retention capacity under different cultivation patterns[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 38(1): 44–47. (in Chinese)
- [48] 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 and Hydropower*, 2015(4): 5–8. (in Chinese)
- [49] 张妙. 生物炭与 PAM 共施对土壤水分、玉米生理特性及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [50] LIU C, LIU F, RAVNSKOV S, et al. Impact of wood biochar and its interactions with mycorrhizal fungi, phosphorus fertilization and irrigation strategies on potato growth[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2016, 203(5): 1385–1427.
- [51] 刘杨, 刘晓宇, 石春林, 等. 生物炭缓解稻麦轮作区小麦渍害胁迫的作用[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1518–1526.
- LIU Yang, LIU Xiaoyu, SHI Chunlin, et al. Effect of biochar alleviating waterlogging stress of winter wheat in rice-wheat rotation systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1518–1526. (in Chinese)