

生物炭对塿土持水能力的影响

代镇,李伟,韩娟,温晓霞

(西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:通过连续6年定位试验,探究较长时间施用生物炭对土壤保水作用的影响,以期对塿土区水土保持和土壤改良提供理论参考。田间试验于2011年开始,设4个生物炭施用梯度:对照,不施生物炭(B0); $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B5); $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B10); $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B20)。在2017年测定了土壤含水量、土壤基础理化性质和水分累积蒸发量等。结果表明:生物炭能够显著减小土壤容重、增加土壤孔隙度、饱和含水量和田间持水量,且随着生物炭施入量的增加,各指标变化幅度也增大,B20与B0处理相比,土壤容重减少了8.28%,毛管孔隙度增加了20.17%,饱和含水量与田间持水量分别增加了22.17%和14.86%;生物炭显著增加了土壤团聚体稳定性,B20与B0处理相比,土壤水稳性团聚体含量增加了19.00%,团聚体破坏率和不稳定团粒指数分别降低了11.34%和9.61%;生物炭还可有效抑制土壤水分的蒸发,B10和B20处理的土壤累积蒸发量分别比B0处理减少了7.45%和10.18%。结合逐步回归分析与通径分析发现,生物炭对土壤结构的改良是其促进土壤持水能力的主要原因。土壤孔隙度和有机碳含量是影响土壤饱和含水量的主要因子,影响土壤毛管持水量的主要因子为有机碳含量和土壤毛管孔隙度,而毛管孔隙度与水稳性团聚体含量则解释了绝大部分土壤田间持水量的变化。研究表明生物炭施用可以显著改良土壤结构,提升塿土持水性能,增加干旱半干旱地区土壤的蓄水保墒能力。

关键词:生物炭;塿土;容重;土壤孔隙度;土壤团聚体;土壤水分常数;水分蒸发;土壤持水能力

中图分类号:S152.4 **文献标志码:**A

Influences of biochar on soil water retention capacity in the Lou soil

DAI Zhen, LI Wei, HAN Juan, WEN Xiaoxia

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the influence of biochar application on soil water retention capacity of the Lou soil in a six-year field experiment since 2011. Four treatments of different biochar application rates were set in this study as follows: 0 (B0), 5 (B5), 10 (B10), and 20 (B20) $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$. In 2017, the soil moisture content, soil physical and chemical properties, and water cumulative evaporation content were measured. The results showed that the addition of biochar significantly decreased soil bulk density and increased soil porosity, saturation moisture content, and field water holding capacity. These parameters also had large range of variation. Compared with B0 treatment, the B20 treatment decreased soil bulk density by 8.28%, increased capillary porosity by 20.17%, increased saturation moisture content and field water holding capacity by 22.17% and 14.86%, respectively. Biochar significantly increased the stability of soil aggregates. Compared with B0 treatment, the B20 treatment increased the content of soil water stable aggregates by 19.00%, and the proportion of soil aggregate destruction and the unstable aggregate index decreased by 11.34% and 9.61%, respectively. Moreover, biochar effectively inhibited the evaporation of soil water, and the cumulative evaporation of B10 and B20 was 7.45% and 10.18% less than that of B0. Furthermore, through regression analysis and path analysis we found that the improvement of soil structure was the main reason why biochar enhance soil water retention. Soil porosity and organic carbon

收稿日期:2019-01-21

修回日期:2019-03-25

资助项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(3176114303)

作者简介:代镇(1992—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为旱区高效农作制度与作物栽培技术。E-mail: daiz1729@nwfau.edu.cn

通信作者:温晓霞,女,教授,主要从事农业生态和高效农作制度研究。E-mail: wenxiaoxia6811@163.com

韩娟,女,副教授,主要从事旱区水肥高效利用、作物产量模拟等研究。E-mail: hjepest@nwsuaf.edu.cn

content were the main factors affecting soil saturation water content. The main factors affecting soil capillary water holding capacity were organic carbon content and soil capillary porosity. In addition, the capillary porosity and water stable aggregate content explained the most of the changes in soil field water holding capacity. The results indicated that biochar improved the soil water retention of the Lou soil, and increased the capacity of soil storage and water conservation in arid and semi-arid areas.

Keywords: biochar; Lou soil; bulk density; soil porosity; soil aggregates; soil moisture constant; water evaporation; soil water retention

土壤水分是重要的土壤肥力要素,水分的含量、时空变化常常引起土壤空气和热量状况的迅速改变,此外其作为溶质载体也影响着土壤的养分循环和养分的有效性^[1]。土壤持水能力主要取决于土壤的物理性质,一般而言土壤所具有的适宜的密度、孔隙度、团聚体结构和机械组成可以较好地协调土壤的水分运移、物质运输和能量交换,从而为作物生长提供良好的环境条件^[2-3],对于旱和半干旱地区来说,陆地生态系统生产力和土壤水的供应能力之间更是存在密切的联系^[4]。在这些地区,严重干旱往往会引发不可逆的土壤沙化和荒漠化进程,从而导致土壤蒸发水的永久流失和土壤持水能力下降^[5]。中国西北地区农业生产一直受到降水量少且年度分布不均、土壤保水性差、蒸发能力强、缺少灌溉条件等因素制约,如何应用可以改良土壤结构和提高保水能力的土壤改良剂已成为科学研究和农业生产的热点问题。

生物炭是由农林废弃有机物等生物质在限氧和较低温度($<700\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下热解形成的稳定的富碳产物^[6-7]。生物炭固有的含碳率高、孔隙结构丰富、比表面积大、表面富含(或可吸附)多种有机官能团、理化性质稳定等特点是其成为广泛应用的土壤改良剂的重要结构基础^[8]。关于生物炭改良土壤结构和增强土壤持水能力的研究,最近几年已有越来越多的科研人员报道。侯晓娜等^[9]将生物炭与秸秆配施,结果发现不仅提高了土壤大团聚体含量,增加土壤团聚体的稳定性,而且增加了土壤及不同粒级团聚体的有机碳含量。浙江大学的 Lu 等^[10]经温室培养 180 d 后发现生物炭对团聚体的组成和稳定性均有影响,其中 6% 稻壳生物炭在提高土壤 2~5 mm 和 0.25~0.5 mm 大团聚体含量的同时又减小了 $<0.25\text{ mm}$ 微团聚体含量,且显著提高了平均质量直径和平均几何直径。王丹丹等^[11]研究了生物炭施入 6 个月后土壤容重和田间持水量的变化,结果表明 1%、3% 和 5% 三种施用量都起到了降低土壤容重、增加土壤田间持水量的作用且施用量越大效果越明显。

当前就生物炭对土壤持水能力影响的研究多是室内土柱模拟试验或大田施用时间短,针对生物炭长时段应用于大田后对土壤物理性质和结构组成的影响还亟待加强。本研究在 2011 年已经开始设置不同添加梯度生物炭对土壤改良的定位试验,6 a 后对土壤的容重、孔隙度、团聚体组成和田间持水量等进行测定,结合室内土柱模拟蒸发试验来探究生物炭对土壤持水性能的影响机理,以期为农田生态系统中生物炭改良土壤性能的适宜性评价提供一定的理论依据和应用参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年在陕西省杨凌区西北农林科技大学标本园试验地($108^{\circ}24'\text{E}$, $34^{\circ}20'\text{N}$, 海拔 521 m)进行,试验区土壤为塿土,耕层(0~20 cm)土壤含粘粒 36.5%,粉粒 61.1%,砂粒 2.4%,耕层(0~20 cm)土壤含有机碳 $14.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $51.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $7.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $150.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 值 7.58(水土比 2.5:1)。采用的生物炭来自河南三利新能源公司,以小麦秸秆为原料在 500°C 限氧热解制备而得,其基本理化性质为有机碳 $467.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $5.90\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,钾 $26.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N 为 79.10,灰分质量分数 20.8%,pH10.40。

1.2 试验设计

本研究为长期定位试验,设 4 个处理,每处理 3 个重复,共 12 个小区,采用随机区组试验设计,小区面积为 $4\text{ m}\times 5\text{ m}=20\text{ m}^2$ 。生物炭初次于 2011 年 10 月施入土壤,施用水平分别为 $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B5)、 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B10)、 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (B20) 和对照不施生物炭(B0)。5 a 后 2016 年 10 月依照原施入量各处理再重复施入一次生物炭。作物种植方式为冬小麦(10 月中旬至次年 6 月上旬)和夏玉米(6 月中旬至 10 月初)一年两熟制。小麦播种前一次性施肥,基肥为每公顷 375 kg 尿素(含 N 46%)和 300 kg 磷酸二铵(含 P_2O_5 46%);玉米基肥每公顷施用 187.5 kg 尿

素(含N 46%)和375 kg 磷酸二胺(含P₂O₅ 46%),拔节期每公顷追施尿素112.5 kg。其他管理同常规大田管理方式。

1.3 土壤样品采集与测定方法

1.3.1 土壤样品的采集 土壤含水量的测定在夏玉米关键生育期使用土钻采取各小区0~20 cm 土层土壤。在夏玉米收获后(9月30日)采集每个小区0~20 cm 原状土样,用塑料盒带回实验室,避免受到机械压力而破碎,稍阴干时将土壤沿自然结构面轻轻地掰成直径约为1 cm 左右的小土块,除去粗根和小石块,风干后用于土壤团聚体的测定。另外每5 cm 一层采集各小区原状土壤,风干过2 mm 筛后用于模拟土壤蒸发实验。

1.3.2 测定方法 土壤容重、孔隙度、田间持水量和饱和含水量等物理指标采用100 cm³环刀采集0~20 cm 土壤后依照《土壤分析技术规范》测定^[12],其中土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定,土壤凋萎含水量采用饱和K₂SO₄法测定土壤最大吸湿含水量后乘以系数间接求得,本试验中该系数取1.5。机械稳定性团聚体和水稳性团聚体根据《土壤理化分析》测定^[13],干筛法分别通过孔径为10、5、2、1、0.5 mm 和0.25 mm 6个筛级;湿筛法分别通过孔径5、2、1、0.5 mm 和0.25 mm 5个筛级。根据各粒级团聚体数据,计算大于0.25 mm 机械稳定性团聚体(DR_{0.25})、大于0.25 mm 的水稳性团聚体(WR_{0.25})、平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、土壤团聚体破坏率(PAD)和土壤不稳定团粒指数(E_{LT})等指标^[14]。

土壤水分蒸发累积量的测定:土壤水分模拟蒸发试验在上口内径为19 cm,下口内径17 cm,高度为20 cm 的聚丙烯塑料桶中进行。试验前塑料桶底部均匀扎上等量小孔并垫滤纸备用。模拟试验用土取自各处理0~20 cm 原位土壤,每层5 cm 分层均匀装填入桶中,分层界面处土壤打毛。装土过程中控制桶中土壤体积为3 700 cm³,土壤容重控制为各处理测定值(表1)。装土后先使各处理自吸水48 h,塑料模封住顶部后再排除重力水12 h。然后将水桶放置于环境因子变化较为稳定的室内通风处,每天20:00时采用感度为0.1 g 的电子秤称水桶质量,确定蒸发损失水量,并换算成蒸发量。每处理设3个重复,取3次重复的平均值。

1.4 数据处理

土壤蒸发量(E)通过以下公式计算。

$$E = \frac{\Delta m}{\rho \times S} \quad (1)$$

式中,E为土壤水分蒸发量; Δm 为一定时间间隔内土柱的质量变化; ρ 为水的密度;S为土柱表面积。

采用Excel 2016进行数据整理、绘制图表,SPSS 24.0软件进行数据分析,不同处理之间多重比较采用Duncan氏新复极差法,然后经过t检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤物理特性和团聚体组成的影响

2.1.1 生物炭对土壤容重和孔隙度的影响 由表1知,生物炭大量施入土壤耕层后会显著降低容重,且施用量越高土壤容重越低,B5、B10和B20较B0处理土壤容重分别下降了2.11%、6.21%和8.28%。生物炭对土壤总孔隙度和毛管孔隙度的影响与土壤容重趋势相反,具体表现为B20>B10>B5>B0。与B0相比,生物炭处理的土壤总孔隙度增加了2.30%~9.84%,毛管孔隙度增加了6.78%~14.93%。说明生物炭高比表面积和高孔隙度的特性充分降低土壤容重并提高了土壤孔隙度。作为富碳产物,生物炭显著增加了土壤有机碳含量,B5、B10和B20有机碳含量分别比B0增加了15.21%、25.55%和60.65%。

2.1.2 生物炭对土壤团聚体及其稳定性的影响 土壤团聚体的测定方法一般分为干筛法与湿筛法。干筛法测定的是原状土壤中团聚体的总体数量,这些团聚体包括非水稳性团聚体和水稳性团聚体,湿筛法获得的则是抗水力分散的水稳性团聚体。这两种方法所得到的>0.25 mm 的团聚体数量如表2所示。生物炭对>0.25 mm 的机械稳定性团聚体(DR_{0.25})的粒径分布无显著影响,对水稳性团聚体(WR_{0.25})的影响达到显著水平($P<0.05$)。其中B10和B20分别比B0的WR_{0.25}含量显著增加了12.51%和19.00%。土壤团聚体平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,MWD和GMD值越大,表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强。由表2知,干筛法所得的MWD和GMD都远大于湿筛法,说明该土壤中团聚体大多数是机械稳定性团聚体。在干筛下,B5的MWD与GMD与B0相比都无显著差异,说明低施炭量对MWD和GMD无显著影响;B10和B20的MWD分别较B0显著增加9.62%和12.37%,GMD分别较B0显著增加19.60%和23.30%。在湿筛下,各处理的MWD与GMD含量差异均达到极显著水平($P<0.01$),B5、B10、B20的MWD和GMD较B0分别显著增加了11.63%、18.60%、

30.23%和 8.70%、13.04%、21.74%。土壤团聚体破坏率(PAD)和不稳定团粒指数(E_{LT})主要反映土壤结构的稳定性,其值越大,表明土壤退化程度越严重。由表 2 知,随着生物炭施用量的增加,PAD 和 E_{LT} 都明显呈下降趋势。B20 的 PAD 和 E_{LT} 分别较 B0 减少了 11.34%和 9.61%。

2.2 生物炭对土壤水分含量和水分常数的影响

由图 1 可知,当土壤含水量较为充足且超过田间持水量的 60%时,生物炭可起到增加土壤含水量

的作用,且施炭量越大土壤含水量增幅越明显。在 1 月 17 日和 4 月 18 日,B5 较 B0 处理含水量分别增加了 3.91%和 5.21%,B20 较 B0 处理含水量则分别增加了 12.92%和 12.80%。但当土壤含水量较低时,各处理间含水量已无明显差异,甚至生物炭处理土壤含水量还略低于对照。如在 5 月 17 日,B5、B10 和 B20 处理含水量分别比 B0 降低了 6.93%、11.47%和 2.03%,这可能是生物炭疏松多孔的结构加速了干旱状况下土壤水分的蒸发散失。

表 1 生物炭对容重、孔隙度和有机碳含量的影响

Table 1 Effects of biochar on bulk density, porosity, and organic carbon content

处理 Treatment	容重/($g \cdot cm^{-3}$) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	有机碳/($g \cdot kg^{-1}$) Organic carbon
B0	1.45±0.04a	45.21±1.34b	33.02±0.41c	12.19±1.76a	15.58±1.25c
B5	1.42±0.02a	46.25±0.58b	35.26±0.84b	10.99±0.68a	17.95±0.58b
B10	1.36±0.03b	48.82±0.99a	36.56±1.10ab	12.27±1.97a	19.56±0.64b
B20	1.33±0.02b	49.66±0.58a	37.95±0.83a	11.71±0.58a	25.03±0.64a

注:表中所列数值均为平均值±标准偏差(SD),不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Notes: The values listed in the table are all mean values ± standard deviation (SD), different lowercase letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

表 2 生物炭土壤团聚体含量和稳定性的影响

Table 2 Effects of biochar on soil aggregate content and soil aggregates stability

处理 Treatment	DR _{0.25} /%	WR _{0.25} /%	PAD/%	E_{LT} /%	机械稳定性土壤团聚体 Mechanical stable aggregate		水稳性团聚体 Water stable aggregates	
					MWD/mm	GMD/mm	MWD/mm	GMD/mm
B0	94.3±0.5a	33.6±1.6c	64.4±1.7a	66.4±1.6a	5.73±0.21b	3.46±0.26c	0.43±0.01c	0.23±0.01d
B5	95.0±1.2a	36.1±1.1bc	62.0±1.4ab	63.9±1.1ab	5.76±0.18b	3.64±0.32bc	0.48±0.01b	0.25±0.01c
B10	94.6±0.9a	37.8±0.9ab	60.1±1.4bc	62.2±0.9bc	6.28±0.11a	4.14±0.15ab	0.51±0.01b	0.26±0.00b
B20	94.7±0.8a	40.0±1.0a	57.8±1.4c	60.0±1.0c	6.44±0.11a	4.27±0.17a	0.56±0.01a	0.28±0.01a

注:DR_{0.25}:表示>0.25 mm 的机械稳定性团聚体,WR_{0.25}表示>0.25 mm 的水稳性团聚体,MWD 表示平均质量直径,GMD 表示平均几何直径,PAD 表示土壤团聚体破坏率, E_{LT} 表示土壤不稳定团粒指数。

Note: DR_{0.25} represents the mechanical stable aggregate with particle size > 0.25 mm; WR_{0.25} represents the water stable aggregates with particle size > 0.25 mm; MWD represents the mean weight diameter, GMD represents the geometric mean diameter; PAD represents the proportion of soil aggregate destruction; E_{LT} represents the unstable soil aggregate index.

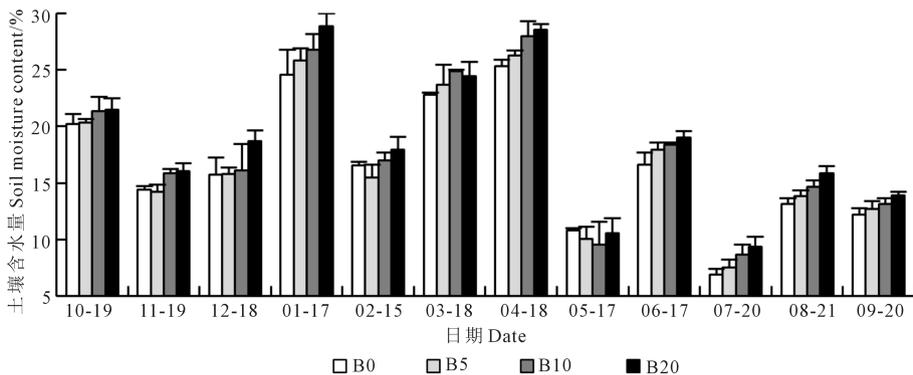


图 1 生物炭对 2016—2017 年麦玉两熟体系不同时期土壤含水量的影响

Fig.1 Effect of biochar on soil moisture in different periods of wheat-maize rotation system in 2016–2017 years

由表3可见,生物炭可不同程度地提高土壤的保水能力。生物炭显著增加了土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量,与不施生物炭的B0相比,生物炭处理的饱和含水量增加了5.75%~22.17%、毛管持水量增加了8.88%~25.11%,田间持水量增加了5.40%~14.86%。凋萎含水量是植物开始永久枯萎时的土壤含水量,生物炭对此无显著影响。

表3 生物炭对土壤水分常数的影响

Table 3 Effect of biochar on soil moisture constant

处理 Treatment	饱和含水量 Saturation moisture/%	毛管持水量 Capillary moisture capacity/%	田间持水量 Field capacity/%	凋萎含水量 Wilting moisture/%
B0	30.76±1.42c	22.74±0.27d	21.47±0.79c	10.60±0.50a
B5	32.52±0.87c	24.76±0.78c	22.63±0.30bc	10.54±0.50a
B10	35.50±0.82b	26.95±0.51b	23.66±0.91ab	10.35±0.49a
B20	37.58±0.69a	28.45±0.88a	24.66±0.35a	10.71±0.24a

2.3 生物炭对土壤水分蒸发特性的影响

由图2可以看出,在模拟实验的前5~7 d,土壤含水量充足,所有处理的日蒸发量均较大,各处理处于大量失水期。这一阶段每日蒸发量均值约为3 mm左右,且各处理之间蒸发量差异很小。在模拟实验的7~21 d,土壤蒸发失水进入稳定期,各处理之间日均蒸发失水量基本趋于稳定。土壤水分累积蒸发量在不同生物炭处理间表现出一定差异,生物炭减少土壤累积蒸发量差异明显。到第21 d时,B5、B10和B20的累积蒸发量分别比B0显著减少了1.07%、7.45%和10.18%。21 d之后,土壤表层越来越干燥,各处理的土壤水分日蒸发量已经很小,土壤水分累积蒸发量增长也十分缓慢。试验结束时,各处理之间累积蒸发量大小关系依次为B0>B5>B10>B20。

关于一维裸土的水分蒸发模拟实验中累积蒸发量随时间变化的函数拟合关系,Gardner等人研究发现累积蒸发量与蒸发天数的平方根呈线性关系^[15-16],

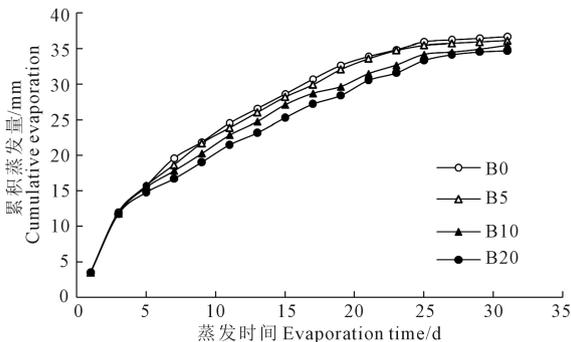


图2 生物炭处理下土壤累积蒸发量与时间的关系

Fig.2 The relationship between soil cumulative evaporation and evaporation time under biochar treatments

即

$$E = A_e t^{0.5}$$

式中, E 为累积蒸发量(mm), t 为累积蒸发时间(d), A_e 为与土壤性质有关的系数。本试验通过数据拟合分析发现,土壤累积蒸发量与时间的关系用乘幂函数 $E = a \cdot t^b$ 拟合效果最好,其中 a 和 b 的取值见表4。

由表4可知,当生物炭施用量增大时, a 和 b 的值基本呈减小的趋势。由该函数的数学性质可知,当时间 t 值相同时,参数 a 和 b 的值越小,函数值越小,故生物炭施用量越大土壤累积蒸发量越小。对此函数 $E = a \cdot t^b$ 求时间 t 的一阶导数可得土壤水分蒸发速率关系式: $dE/dt = a \cdot b \cdot t^{(b-1)}$,其中 $0 < b < 1$ 。由该式可知,在同一处理中, $a \cdot b$ 和 $b-1$ 为常数, t 越大,土壤水分蒸发速率越小。当 t 不变时, $a \cdot b$ 和 $b-1$ 的值越大,土壤水分蒸发速率越大,由此可知土壤水分蒸发速率随着生物炭施用量的增加而降低,从而说明生物炭对土壤水分的蒸发散失有着良好的抑制作用。

2.4 土壤水分常数与土壤物理性质的通径分析

2.4.1 土壤容重、孔隙度以及土壤团聚体含量与土壤水分常数的相关性 相关分析表明(表5),土壤饱和含水量、毛管持水量、田间持水量均与土壤容重呈显著的负相关,与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、有机碳含量、 $WR_{0.25}$ 呈显著正相关,与非毛管孔隙度和 $DR_{0.25}$ 不相关。土壤凋萎含水量与土壤容重、孔隙度等指标皆不相关。

2.4.2 土壤水分常数与各变量的通径分析 土壤物理结构与土壤有机碳含量和团聚体含量之间互相高度相关,使得其与土壤水分常数之间的显著相关关系并不能说明前者对后者的真实贡献及贡献大小。对此分别将土壤饱和含水量(Y_1)、毛管持水量(Y_2)与田间持水量(Y_3)及各土壤性质的基础数据做Z-score标准化处理,再采用逐步回归的方法做回归分析,得到回归方程(表6)。其中,总孔隙度、毛管孔隙度、有机碳含量和 $DR_{0.25}$ 分别为自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 。由表6可知,三个方程都达到极显著水平($P < 0.01$)。

表4 土壤水分累积蒸发量 E 与时间 t 的拟合曲线参数

Table 4 Fitting curve parameters of soil cumulative evaporation E and time t

处理 Treatment	a	b	R^2	$a \cdot b$	$b-1$	P 值 P value
B0	4.986	0.629	0.921	3.136	-0.371	<0.001
B5	4.900	0.630	0.927	3.086	-0.370	<0.001
B10	4.854	0.617	0.954	2.995	-0.383	<0.001
B20	4.708	0.614	0.966	2.891	-0.386	<0.001

土壤饱和含水量可以用土壤总孔隙度、毛管孔隙度和有机碳含量来解释,且这三个因子解释了其 98.5% 的变化。土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度两个因子解释了土壤毛管持水量 99.9% 的变化。DR_{0.25} 解释了土壤田间持水量 84.8% 的变化。其中,由于各变量之间高度相关,导致部分变量未能进入逐步回归方程。因此,需要再进一步运用通径分析(表 7)量化各变量对土壤水分常数的贡献。

表 5 土壤水分常数与土壤容重、孔隙度及团聚体含量的相关分析

Table 5 The correlation analysis between soil bulk density, porosity, soil aggregate content and soil moisture constant

指标 Index	饱和含水量 Saturation moisture	毛管持水量 Capillary moisture capacity	田间持水量 Field capacity	凋萎含水量 Wilting moisture
容重 Bulk density	-0.975 **	-0.927 **	-0.759 **	-0.003
总孔隙度 Total porosity	0.975 **	0.924 **	0.753 **	-0.009
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.872 **	0.967 **	0.918 **	0.010
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	0.186	-0.042	-0.235	-0.028
有机碳 Organic carbon	0.931 **	0.899 **	0.825 **	0.143
DR _{0.25}	0.121	0.137	-0.004	0.226
WR _{0.25}	0.842 **	0.921 **	0.928 **	-0.226

注: * 表示相关关系达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示相关关系达极显著水平 ($P < 0.01$), 下同。

Notes: * represents significance at 0 .05 level; ** represents extremely significance at 0 .01 level. The same below.

表 7 生物炭处理下不同土壤水分常数与各变量之间的通径分析结果

Table 7 The path analysis results of different soil moisture contents and variables under biochar application

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	通径系数 Path coefficient				决定系数 Coefficient of determination				P 值 P value
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
Y ₁	X ₁	<u>0.631</u>	0.181	0.251	-0.089	0.398	0.228	0.318	-0.112	<0.001
	X ₂	0.502	<u>0.227</u>	0.247	-0.105		0.052	0.112	-0.048	
	X ₃	0.542	0.192	<u>0.293</u>	-0.095			0.086	-0.056	
	X ₄	0.496	0.221	0.248	<u>-0.113</u>				0.013	
Y ₂	X ₁	0.408	0.482	0.018	0.016	0.166	0.394	0.014	0.013	<0.001
	X ₂	0.325	<u>0.606</u>	0.017	0.019		0.367	0.020	0.023	
	X ₃	0.350	0.511	<u>0.020</u>	0.017			0.000	0.001	
	X ₄	0.320	0.564	0.017	<u>0.020</u>				0.000	
Y ₃	X ₁	<u>-0.053</u>	0.313	0.083	0.410	0.003	-0.033	-0.009	-0.043	0.002
	X ₂	-0.042	<u>0.394</u>	0.082	0.485		0.155	0.065	0.383	
	X ₃	-0.046	0.332	<u>0.097</u>	0.442			0.009	0.086	
	X ₄	-0.042	0.366	0.082	<u>0.522</u>				0.272	

注:下划横线的数据为直接通径系数,其他为间接通径系数。

Note: The underlined data is direct path coefficient and the other is indirect path coefficient.

综合表 6、表 7 可知,DR_{0.25} 对土壤饱和含水量无直接影响,主要通过土壤总孔隙度来间接影响饱和含水量。直接影响土壤饱和含水量的因子为总孔隙度、有机碳含量和毛管孔隙度。综合来看,土壤总孔隙度对饱和含水量的影响效果最大。对土壤毛管持水量直接影响的因子是总孔隙度和毛管孔隙度,该两因子的决定系数和共同决定系数分别是 0.166、0.367 和 0.394,比其他因子的决定系数大出 1~2 个数量级。同理,对土壤田间持水量来说,总孔隙度和有机碳含量主要通过毛管孔隙度和 DR_{0.25} 两个因子起到间接影响作用,这两因子的决定系数和共同决定系数分别是 0.155、0.272 和 0.383,比其他因子的决定系数也大出 1~2 个数量级。

表 6 生物炭处理下不同土壤水分常数与各变量之间的回归分析

Table 6 The regression analysis for different soil moisture constants and variables under biochar application

方程 Equation	R ²	P 值 P value
$Y_1 = 0.629X_1 + 0.143X_2 + 0.270X_3$	0.985	<0.001
$Y_2 = 0.421X_1 + 0.632X_2$	0.999	<0.001
$Y_3 = 0.928X_4$	0.848	<0.001

注:因变量 Y₁、Y₂、Y₃ 分别表示指标土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量;自变量 X₁、X₂、X₃、X₄ 分别为土壤总孔隙度、毛管孔隙度、有机碳含量和 DR_{0.25},下同。

Note: The dependent variables, Y₁, Y₂, and Y₃, represent soil saturation moisture, capillary moisture capacity, and field capacity; the independent variables, X₁, X₂, X₃, and X₄ represent soil total porosity, capillary porosity, organic carbon content, and DR_{0.25}, respectively. The same below.

3 讨 论

3.1 生物炭对土壤物理性质的影响

生物炭的体积密度一般在 $0.08 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 远远低于土壤容重, 因此生物炭可显著降低土壤容重, 进而改善土壤孔隙度^[17-18]。Githinji 等^[19] 研究发现, 25% 体积比的生物炭混合土壤与对照相比, 容重降低了 18.05%, 土壤总孔隙度增加了 10%。岑睿等^[20] 以 $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 掺量添加生物炭进入 0~40 cm 土层后, 发现田间持水量增加了 11.52%, 土壤总孔隙度增加了 13.40%, 这与本试验测定结果一致。这主要原因除了生物炭本身巨大的表面积和丰富的微孔隙结构之外, 还可能是生物炭施入后土壤团聚性的提升^[21]。

Eynar 等^[22] 研究表明, 土壤有机碳含量和团聚体粒径分布是影响团聚体稳定性的主要因素。且土壤有机碳和团聚体之间也存在着紧密联系, 一方面有机碳作为土壤中的胶结物质促进了团粒结构的形成, 另一方面团聚体的包被作用也使其内部的有机碳免受微生物分解, 增加了有机碳的稳定性^[23-24]。本研究结果表明, 生物炭对土壤有机碳含量有显著影响, 对水稳性团聚体粒径组成和稳定性的影响均有差异显著, 对机械稳定性团聚体含量无显著影响。尚杰^[25] 研究了生物炭施入两年后对垆土理化性质的影响, 结果显示 $\text{DR}_{0.25}$ 、干筛与湿筛条件下的 MWD 与对照相比均显著增加, PAD 和 $E_{1\mu}$ 分别显著降低, 生物炭显著提高了团聚体的含量和稳定性, 这与本研究结果一致。Ouyang 等^[26] 将 2% 生物炭混合培养 90 天后发现, 生物炭对砂壤土的团聚体形成有促进作用, 但对粉质粘土的团聚体无显著影响。Zhang 和 Du 等通过一个多年定位实验表明^[27-28], 在生物炭施入第一年后土壤的团聚体粒径分布及稳定性均无显著变化, 但 6 a 后 $4\ 500 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭处理显著增加了土壤大团聚体 ($250 \sim 2\ 000 \mu\text{m}$) 质量比例和平均质量直径。生物炭对土壤团聚体粒径分布和稳定性的影响还与土壤类型、生物炭类型、施用量以及施用时间等因素相关, 有待进一步试验探究明确。

3.2 生物炭对土壤持水能力的影响

近年来, 已有越来越多的研究人员把生物炭改良土壤的试验重点放在土壤持水能力上。一般来说, 生物炭主要通过两种方式影响土壤水分状况, 直接影响是生物炭作为一种多孔介质所特有的多孔隙和强大的吸附性能可以直接吸附土壤水分, 增加土壤含水量; 间接影响是添加到土壤中的生物炭

会与其他土壤成分结合, 进而改善土壤结构, 从而增加土壤的持水量^[29-30]。Pudasaini 等^[31] 研究表明, 生物炭可显著增加土壤田间持水量并促进豇豆生长。Speratti 等^[32] 采用温室培养试验表明桉树生物炭对砂土体积含水量无显著影响, 但棉花生物炭和猪粪生物炭显著增加了体积含水量。Yao 等^[33] 在 0~20 cm 土层中分别施入 50、10、200 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 玉米秸秆生物炭, 结果显示土壤含水量随着生物炭施用量的增加而显著增加。本试验中生物炭显著增加了土壤饱和含水量、毛管持水量与田间持水量, 结合通径分析发现, 生物炭对土壤水分常数的影响主要来自于有机碳含量的增加、土壤孔隙结构的改良和土壤团聚性的提升等。这些因子或通过直接作用或通过其他因子的间接作用共同提高了土壤持水能力。

蒸发是土壤水分以水蒸气形式由土壤表面进入大气的一个扩散性物理过程, 是土壤-水分-大气系统中水从土壤转化为地面水蒸汽的重要组成部分^[34]。土壤蒸发能力的强弱是衡量土壤持水能力的又一个重要的指标。在干旱半干旱地区, 土壤蒸发量往往会超过降水量并限制作物正常生长, 因此减少土壤蒸发对于保持干旱地区的土壤生产力至关重要^[35]。柴冠群等^[36] 研究发现生物炭能提高土壤对降水的截存和保贮能力, 改善土壤结构和提高保水蓄水能力。肖茜等^[37] 研究表明生物炭对黄绵土和黑垆土的累积蒸发量的影响差异不显著, 却显著抑制了砂土前期的累积蒸发量。

本研究发现当土壤含水量接近饱和状态时, 各处理之间的蒸发失水速率差异不大, 但在之后生物炭显著降低了土壤的蒸发失水速率, 且生物炭施用量越高其降低幅度越大。原因可能是生物炭自身丰富的微孔隙结构和巨大的比表面积让生物炭拥有了较大的吸湿能力^[38], 当土壤中水分不断蒸发时, 生物炭的微空隙使更多的水处于毛细状态得到了较好的保持, 蒸发散失难度加大, 进而达到抑制土壤水分蒸发的效果^[39]。Wang 等^[40] 通过室内模拟试验发现生物炭减少了黄绵土和砂土的累积蒸发量, 且施炭量越高效果越显著, 与本试验结果一致。但是许健等^[41] 研究则发现, 生物炭在 5% 添加量下表现为抑制土壤蒸发, 10% 和 15% 添加量下却促进土壤蒸发。究其原因, 可能是不同类型、孔径大小、添加量的生物炭施入不同土壤后, 对土壤含水量、质地和结构、毛细管吸水能力和土壤色泽的影响也不尽相同^[42-43], 从而导致了各个研究之间生物炭对土壤水分蒸发影响的结论不一。因此, 未来

针对生物炭对土壤蒸发和持水能力的影响,还需要针对土壤类型、生物炭类型、添加时间和添加量的不同进行更全面和深入的研究或研究进展综述,这样才能更好地揭示生物炭对土壤水分蒸发和持水能力的影响的机理,为生物炭改良土壤的应用提供更有力的实践依据。

4 结 论

1) 土壤添加生物炭可有效改良土壤结构,增加土壤团聚体稳定性。与未添加生物炭相比,添加 5~20 t·hm⁻²的生物炭处理的土壤容重显著降低了 2.11%~8.28%,毛管孔隙度增高了 6.78%~14.93%,水稳性团聚体含量显著增加了 7.44%~19.00%。

2) 与对照相比,添加生物炭处理的土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量分别增加了 5.75%~22.17%、8.88%~25.11%和 5.40%~14.86%。由通径分析知,对不同土壤水分常数其主要影响因子也不同,土壤毛管孔隙度、有机碳含量和水稳性团聚体含量是生物炭改良土壤进而影响各土壤水分常数的直接影响因子。

3) 生物炭可显著减少土壤累积蒸发量,在蒸发的第 21 天,添加 20 t·hm⁻²处理的累积蒸发量比对照减少了 10.18%。表明适量生物炭可以提高土壤含水量,减少水分的蒸发散失,增强了壤土的持水能力。

参 考 文 献:

- [1] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:1-39.
- [2] 艾海舰.土壤持水性及孔性的影响因素浅析[J].干旱地区农业研究,2002,20(3):75-79.
- [3] 赵勇刚,赵世伟,华娟,等.半干旱典型草原区封育草地土壤结构特征研究[J].草地学报,2009,17(1):106-112.
- [4] Ma W M, Zhang X C. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(3):331-340.
- [5] Liu B X, Shao M A. Response of soil water dynamics to precipitation years under different vegetation types on the northern Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(1):47-59.
- [6] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2):403-427.
- [7] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms [J]. Plant and Soil, 2007, 300(1-2):9-20.
- [8] 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.
- [9] 侯晓娜,李慧,朱刘兵,等.生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响.中国农业科学,2015,48(4):705-712.
- [10] Lu S G, Sun F F, Zong Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly

- ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol) [J]. Catena, 2014, 114(2):37-44.
- [11] 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等.生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J].水土保持学报,2013,27(2):101-104.
- [12] 全国农业技术推广服务中心.土壤分析技术规范[M].北京:中国农业出版社,2006:1-40.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:514-518.
- [14] 张鹏,贾志宽,王维,等.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2012,45(8):1513-1520.
- [15] Gardner W R. Relation of water application to evaporation and storage of soil water [J]. Soil Science Society of America Journal. 1969, 33(2):192-196.
- [16] Gardner W R. Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media [J]. Soil Science Society of America Journal. 1959, 23(3):183-187.
- [17] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等.玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J].农业环境科学学报.2015,34(2):310-318.
- [18] 赵建坤,李江舟,杜章留,等.施用生物炭对土壤物理性质影响的研究进展[J].气象与环境学报.2016,32(3):95-101.
- [19] 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.
- [20] 岑睿,屈忠义,孙贯芳,等.秸秆生物炭对黏壤土入渗规律的影响[J].水土保持研究.2016,23(6):284-289.
- [21] Brodowski S, John B, Flessa H, et al. Aggregate - occluded black carbon in soil [J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4):539-546.
- [22] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of aggregate structure and organic C on wettability of Ustolls [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1):205-216.
- [23] 刘杰,马艳婷,王宪玲,等.渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2019,40(7):1-12.
- [24] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil [J]. Geoderma. 2004, 120(3-4):273-282.
- [25] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
- [26] Ouyang L, Wang F, Tang J, et al. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 13(4):991-1002.
- [27] 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.
- [28] Du Z L, Zhao J K, Wang Y D, et al. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3):581-589.
- [29] Kumari K G I D, Moldrup P, Paradelo M, et al. Effects of biochar on air and water permeability and colloid and phosphorus leaching in soils from a natural calcium carbonate gradient [J]. Journal of Environment Quality, 2014, 43(2):647-657.
- [30] Baronti S, Vaccari F P, Miglietta F, et al. Impact of biochar applica-

- tion on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 53(2):38-44.
- [31] Pudasainia K, Walsh K B, Ashwath N, et al. Effects of biochar addition on plant available water of a loamy sandy soil and consequences on cowpea growth [J]. *Acta Horticulturae*, 2016, 1112:357-364.
- [32] Speratti A, Johnson M, Martins Sousa H, et al. Impact of different agricultural waste biochars on maize biomass and soil water content in a Brazilian Cerrado Arenosol [J]. *Agronomy*, 2017, 7(3):49.
- [33] Yao Q, Liu J J, Yu Z H, et al. Changes of bacterial community compositions after three years of biochar application in a black soil of northeast China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113:11-21.
- [34] 张川, 闫浩芳, 大上博基, 等. 表层有效土壤水分参数化及冠层下土面蒸发模拟[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 102-107.
- [35] Razyaseef N, Rotenberg E, Yakir D. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3):454-462.
- [36] 柴冠群, 赵亚南, 黄兴成, 等. 不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 296-302.
- [37] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 128-134.
- [38] Johannes L, Stephen J. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation* [M]. New York: Routledge, 2015:89-111.
- [39] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2):205-212.
- [40] Wang T T, Stewart C E, Sun C C, et al. Effects of biochar addition on evaporation in the five typical loess plateau soils [J]. *Catena*, 2018, 162:29-39.
- [41] 许健, 牛文全, 张明智, 等. 生物炭对土壤水分蒸发的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3505-3513.
- [42] Hardie M, Clothier B, Bound S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? [J]. *Plant Soil*, 2014, 376(1):347-361.
- [43] Quin P R, Cowie A L, Flavel R J, et al. Oil mallee biochar improves soil structural properties-A study with x-ray micro-CT [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191:142-149.

(上接第 264 页)

- [9] 景建元, 孙晓, 杨阳, 等. 施氮水平对冬小麦冠层氨挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2): 401-408.
- [10] Yang Y, Ni X, Liu B, et al. Measuring field ammonia emissions and canopy ammonia fluxes in agriculture using portable ammonia detector method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 216:542-551.
- [11] Herrmann B, Mattsson M, Jones S K, et al. Vertical structure and diurnal variability of ammonia exchange potential within an intensively managed grass canopy [J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(1):15-23.
- [12] Ping J L, Bremer E, Janzen H H. Foliar uptake of volatilized ammonia from surface-applied urea by spring wheat [J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2000, 31(1-2):165-172.
- [13] 吴小庆, 徐阳春, 沈其荣, 等. 不同氮肥利用效率水稻品种开花后地上部分氨挥发研究 [J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(4): 429-433.
- [14] Nemitz E, Sutton M A, Gut A, et al. Sources and sinks of ammonia within an oilseed rape canopy [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2000, 105(4):385-404.
- [15] 于海彬, 蔡葆, 孙国琴, 等. 甜菜硝酸还原酶活性研究 [J]. *中国糖料*, 1993(3): 18-23.
- [16] 周阮宝, 谷雨萍, 茆敦俊, 等. 介绍两种简易测定硝态氮的比色方法 [J]. *植物生理学报*, 1991(4): 299-301.
- [17] Sheya S A N. Development of thermal desorption gas chromatography/mass spectrometry as a rapid method for ambient particulate characterization [J]. *Dissertation Abstracts International*, 2002, 63(10):4854.
- [18] Meng S, Zhang C, Su L, et al. Nitrogen uptake and metabolism of populus simonii in response to PEG-induced drought stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 123:78-87.
- [19] O'Leary B M, Rico A, Mccraw S, et al. The Infiltration-centrifugation technique for extraction of apoplastic fluid from plant leaves using phaseolus vulgaris as an example [J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2014, 55(94):2319-2331.
- [20] 杨阳, 李娜, 王林权, 等. 垄作对降低黄土高原南部冬小麦田氨挥发风险的影响 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 431-439.
- [21] Hao X, Chang C, Janzen H H, et al. Sorption of atmospheric ammonia by soil and perennial grass downwind from two large cattle feedlots [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(5):1960.
- [22] Langford A O, Fehsenfeld F C. Natural vegetation as a source or sink for atmospheric ammonia: A case study [J]. *Science*, 1992, 255(5044):581-583.
- [23] Harper L A, Sharpe R R, Langdale G W, et al. Nitrogen cycling in a wheat crop: Soil, plant, and aerial nitrogen transport [J]. *Agronomy Journal*, 1987, 79(6):965-973.
- [24] 李生秀, 李宗让, 田霄鸿, 等. 植物地上部分氮素的挥发损失 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1995(2): 18-25.
- [25] Guarda G, Padovan S, Delogo G. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels [J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 21(2):181-192.
- [26] Sheehy J E, Mitchell P L, Ferrer A B. Bi-Phasic growth patterns in rice [J]. *Annals of Botany*, 2004, 94(6):811-817.
- [27] Kumagai E, Araki T, Hamaoka N, et al. Ammonia emission from rice leaves in relation to photorespiration and genotypic differences in glutamine synthetase activity [J]. *Annals of Botany*, 2011, 108(7): 1381-1386.
- [28] 王月福, 姜东, 于振文, 等. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(5): 513-520.
- [29] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 等. 种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响 [J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 124-131.
- [30] 赵君霞, 马耕, 岳鹏莉, 等. 氮素和干旱胁迫对冬小麦幼苗生长发育及生理指标的影响 [J]. *河南农业科学*, 2015, 44(5): 26-30.