

# 基于水稳定同位素技术的生物炭对土壤持水性影响分析

郑利剑<sup>1</sup> 马娟娟<sup>1</sup> 郭飞<sup>1</sup> 任荣<sup>1</sup> 郭向红<sup>1</sup> 孙西欢<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西水利职业技术学院, 运城 044004)

**摘要:** 以不同生物炭配比的土壤样品为研究对象,通过低温真空抽提和稳定同位素光谱技术,进行不同抽提时间下的土壤水稳定同位素分析,采用绘制土壤抽提曲线和计算抽提贡献率的方法,探讨生物炭对土壤持水性的影响。结果表明,低温真空抽提下,砂土的最短抽提时间( $T_{\min}$ )为30 min,壤土为45 min,粘土为60 min。土壤持水性的变化会导致抽提过程中水稳定同位素值、 $T_{\min}$ 和抽提贡献率发生变化,通过分析不同生物炭配比下土壤的 $T_{\min}$ 、水稳定同位素分馏情况以及计算贡献率可得出,生物炭显著影响砂土持水性,且与生物炭添加量呈线性正相关;而对壤土和粘土的持水性有一定影响,但过量或过少则不明显,壤土对生物炭更为敏感。

**关键词:** 生物炭; 稳定同位素; 土壤持水性; 抽提技术

**中图分类号:** S152.7<sup>+</sup>1; S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0193-06

## Impact of Biochar Addition on Soil Water Retention Based on Water Stable Isotopes

Zheng Lijian<sup>1</sup> Ma Juanjuan<sup>1</sup> Guo Fei<sup>1</sup> Ren Rong<sup>1</sup> Guo Xianghong<sup>1</sup> Sun Xihuan<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. Shanxi Conservancy Technical College, Yuncheng 044004, China)

**Abstract:** Application of biochar in soil is being increasingly discussed as a mean to sequester carbon and improve chemical and physical properties for plant growth. Compared with the studies assessing the impact on water retention, little research has been published elucidating the mechanisms which were responsible for the change of water stable isotope extraction time. The impacts of biochar on water retention of three types soil (sandy, loam and clay) with different biochar application rates were investigated by extraction timing curve and mean proportional contribution. The mixtures were extracted by cryogenic vacuum distillation and analyzed with isotope ratio infrared spectroscopy. The results showed that the minimum extraction time ( $T_{\min}$ ) was 30 min for sandy soil, 45 min for loam soil and 60 min for clay soil. The biochar application rates changed the  $T_{\min}$ , as well as the water hydrogen isotope value and mean proportional contribution. The isotopic composition of extracted sandy soil water was more depleted in  $^2\text{H}$  with the increase of biochar application rates at  $T_{\min}$ , while the extent of deviation to the standard values displayed peak for loam and clay soil water hydrogen isotope. The results indicated that biochar application rate was directly correlated to the water retention of sandy soil, and it was increased with the increase in water retention of loam and clay soils, but not all biochar application rates had the same impact. The loam soil was more sensitive than the clay soil to the biochar application.

**Key words:** biochar; stable isotope; water retention; extraction technique

收稿日期: 2015-11-25 修回日期: 2015-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51579168)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(20111402120006、20121402110009)和山西省科技攻关项目(20110311018-1、20140311016-6)

**作者简介:** 郑利剑(1992—),男,博士生,主要从事节水灌溉研究,E-mail: zhenglijian0049@link.tyut.edu.cn

**通信作者:** 马娟娟(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与土壤水动力学研究,E-mail: mjjsxy@163.com

## 引言

当前,在保证粮食产量的前提下如何有效减少温室气体排放,是我国农业发展面临的重要问题<sup>[1]</sup>。近年来,利用生物炭来锁定碳素和改良土壤已成为研究热点<sup>[1-2]</sup>。随着研究的深入,国内外研究者从生物炭的类型、制备条件到其对温室气体排放、作物生长及产量等的作用等方面进行了大量研究<sup>[3-8]</sup>。而基于机理上阐释这种正效应,则多集中在生物炭对土壤养分、pH值、容重、孔隙度等方面进行分析<sup>[8-11]</sup>,就生物炭对土壤持水性等土壤水分变化的研究相对较少<sup>[12-15]</sup>,且基本围绕土壤入渗、蒸发、淋失的规律以及土壤水分特征曲线等水力参数的变化<sup>[8-16]</sup>,利用水稳定同位素抽提技术,从抽提时间和水稳定同位素变化的角度研究土壤持水性变化则较少。

水稳定同位素抽提技术是指在利用水稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ )进行水分生理生态变化的研究过程中,将水从研究样品(如植物木质部、叶片、土壤)中抽提出来的前处理方法。在众多方法中,最常用的是低温真空抽提法<sup>[17-21]</sup>。其基本原理为:植物或土壤样品中的水分,在真空系统中被加热形成水汽,水汽在冷冻阱(液氮)中凝结并收集。由于抽提过程遵循瑞利蒸馏曲线<sup>[17]</sup>,因此,抽提出不发生分馏的水样一般需要15~180 min<sup>[18-23]</sup>,甚至360 min以上<sup>[21]</sup>。其抽提时间的长短和抽提出水样的水稳定同位素值的变化,除了与方法本身的真空度、加热温度以及测试技术等有关外,主要与不同土质的持水性相关。WEST等<sup>[18]</sup>和GOEBEL等<sup>[20]</sup>研究表明砂土抽提时间为30 min、粘土为40 min;KOENIGER等<sup>[19]</sup>和IGNATEV等<sup>[22]</sup>得出抽提时间受土壤孔隙、团粒结构大小的影响。本文利用低温真空抽提技术,研究在不同土质中添加不同量生物炭对抽提过程中抽提时间和水样稳定同位素值的影响,以期为生物炭的保水保肥机理以及施用量提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料制备

3种实验土壤(砂土、壤土和粘土)和生物炭经粉碎、过2 mm筛后置于干燥器中。将生物炭按5种配比分别与砂土、壤土和粘土均匀混合,于105℃干燥24 h,分别取10 g不同配比的土样与1 mL已知同位素值的蒸馏水( $\delta^{18}\text{O}$ 为 $(-8.49 \pm 0.2)\%$ 、 $\delta^2\text{H}$ 为 $(-65.25 \pm 1.1)\%$ )充分混匀,置于10 mL离心管中并用Parafilm膜封口,于-20℃冷冻并稳定至少24 h后备用。具体实验设计见表1。

表1 生物炭配比方案设计

Tab.1 Design of biochar application rates

土壤类型	生物炭配比/(g·g <sup>-1</sup> )				
	0	0.01	0.05	0.10	0.15
砂土	S1	S2	S3	S4	S5
壤土	L1	L2	L3	L4	L5
粘土	C1	C2	C3	C4	C5

注:字母后数字1~5表示不同生物炭配比。

### 1.2 实验方法

利用低温真空抽提系统进行不同生物炭配比的土壤水抽提实验,其装置系统与文献[18,20]类似,具体见图1。

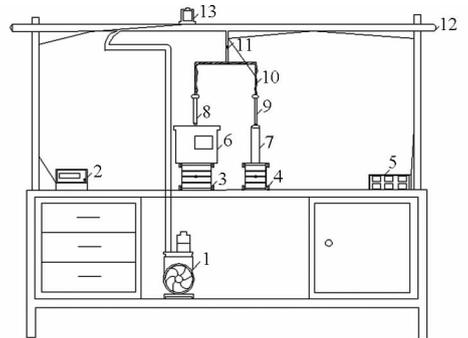


图1 低温真空抽提系统原理图

Fig.1 Schematic of cryogenic vacuum extraction system

1. 真空泵
2. 真空计显示器
3. 大升降台
4. 小升降台
5. 加热带温度控制平台
6. 水浴锅
7. 液氮杯
8. 大试管样品管
9. 小试管收集管
10. 加热带
11. 抽提单元
12. 真空管路
13. 真空计

抽提水分的基本过程:将装土样的离心管放于抽提系统的样品管(共5组)中,并放入一小团棉花盖住样品管口,以防在抽真空过程中土壤样品从样品管中迸出影响结果。将各组样品管与收集管连接,用液氮冷冻样品管15 min,确保样品中所有水分冷冻,然后将整个系统抽真空(真空值稳定在3.9 Pa以内)。打开加热带温控开关(温度为65℃),将样品管浸在水温90℃的水浴锅中,同时将液氮杯移至收集管底端,促进水汽凝结。设置土壤水抽提时间依次为15、30、45、60、75、90、105、120、150、180 min,并收集对应的水分样品。抽提时间从收集管出现水汽凝结开始计时,到达某一预设抽提时间后,取下收集管并用Parafilm膜密封,待其解冻后将水样转移至2 mL样品瓶中,在4℃下保存待测。

利用稳定同位素光谱技术(Isotope ratio infrared spectroscopy, IRIS)分析不同抽提时间下土壤水样中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 。测量仪器为Picarro L2130-i型(Picarro Inc., Santa Clara, 美国)。通过添加micro-pyrolysis模块(A0214)和Chem Correctpost-processing软件去除可能带来的有机物污染。测量

结果用3种国际(International atomic energy agency)标样(SLAP2、VSOMW2和GISP)进行校准。

同位素含量一般表述为同位素比值 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ ,其计算式为

$$\delta^{18}\text{O} = \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, $R_{\text{sample}}$ 和 $R_{\text{standard}}$ 是样品与标样(Vienna standard mean ocean water, VSMOW)中的重轻稳定同位素分度之比(如 $\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O}$ )。 $\delta^2\text{H}$ 计算式与 $\delta^{18}\text{O}$ 相同。测量的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的精度分别为 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 1\text{‰}$ 。

### 1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2013进行作图分析。

基于水稳定同位素值和抽提时间的关系,绘制West式<sup>[18]</sup>和Orlowski式<sup>[23]</sup>土壤水分抽提时间曲线。其中,Orlowski式将添加已知水的同位素值作为标准值,建立不同抽提时间下的氢氧同位素值的关系,将首次最接近标准值的时间作为样品抽提所需要的最短时间( $T_{\text{min}}$ )。

而West式以时间梯度为 $x$ 轴,以抽提水分的 $\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_{\geq T_{\text{min}}}$ (‰)和 $\delta^2\text{H} - \delta^2\text{H}_{\geq T_{\text{min}}}$ (‰)值为 $y$ 轴,绘制不同土壤水分抽提时间曲线,其中,以 $\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_{\geq T_{\text{min}}}$ (‰)为例, $\delta^{18}\text{O}$ 表示不同时间梯度所获得水样的同位素值; $T_{\text{min}}$ 表示样品抽提所需要的最短时间,随后抽提出的水分同位素值不会因抽提时间的延长而增大,可以直接由视觉判断得出; $\delta^{18}\text{O}_{\geq T_{\text{min}}}$ 表示所有抽提时间大于 $T_{\text{min}}$ 所获得水样的同位素均值。

IsoSource软件<sup>[24]</sup>是基于水稳定同位素来分析不同土层对植物水的贡献率的一种线性模型计算软件,其原理为对比分析植物木质部水和不同土层土壤水的稳定同位素值之间的相互关系,确定各土层土壤水对植物水分的贡献率。利用该软件分析已知添加水和不同抽提时间下水样的水稳定同位素值,来进行不同抽提时间对抽提水的贡献率研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于水稳定同位素的不同土壤抽提时间曲线

利用S1、L1、C1等3种未添加生物炭的土壤样品,绘制不同土壤类型的Orlowski式土壤抽提时间曲线,见图2a~2c,图中的水平实线和虚线分别表示 $\delta^{18}\text{O}$ 标准值和 $\delta^2\text{H}$ 标准值,第1个点为添加已知蒸馏水的同位素值(标准值)。由图2a~2c可得出,随着抽提时间的增加,其抽提出水样的水稳定同位素值先趋于标准值,后在其附近小幅度波动。砂土在30 min后同位素值较稳定,粘土于60 min后同位素值稳定,壤土在45~60 min之间首次与标准值

差异最小。图2c中,相比标准值,粘土的 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 并未有较明显的贫化,即未出现由于低温真空抽提过程中将部分弱束缚水抽提出来的现象<sup>[19-23]</sup>,这与WEST等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。

表2 不同样品的水稳定同位素值

Tab. 2 Water stable isotope values of different samples

	已知水	S1	L1	C1
$T_{\text{min}}/\text{min}$		30	45	60
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-8.49	-8.11	-8.50	-8.52
$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	-65.25	-64.48	-66.22	-66.33

图2d~2f为3种土壤类型(S1、L1、C1)的West式土壤抽提时间曲线,图中垂向虚线表示获得可分析水样所需的最短抽提时间( $T_{\text{min}}$ )。由图2d~2f可知,随着抽提时间的增加,其抽提出的水稳定同位素值先增大,达到某阈值(接近零)后趋于稳定。最初达到该阈值的时间即为获得不发生同位素分馏的土壤水样品的最短抽提时间( $T_{\text{min}}$ )<sup>[18]</sup>。该 $T_{\text{min}}$ 受土壤类型变化的影响(表3)。砂土在30 min后变化幅度较小,壤土和粘土情况类似,均在45 min后保持稳定。

表3 不同土壤类型获得未分馏水同位素值的最短抽提时间( $T_{\text{min}}$ )以及 $T_{\text{min}}$ 后同位素值的标准差和范围

Tab. 3 Minimum extraction time ( $T_{\text{min}}$ ) required for unfractionated water isotope value for difference types soil and range and standard deviation of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  for all samples extracted for  $T_{\text{min}}$  and longer than  $T_{\text{min}}$

土壤类型	$T_{\text{min}}/\text{min}$	$\delta$ (大于等于 $T_{\text{min}}$ )的范围/‰		$\delta$ (大于等于 $T_{\text{min}}$ )的标准差SD/‰	
		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
S1	30	0.23	1.59	0.08	0.76
L1	45	0.16	2.10	0.05	0.75
C1	45	0.12	1.19	0.04	0.61

结合2种抽提时间曲线并考虑到水汽冷凝存在一定滞后性,得出3种土壤样品的 $T_{\text{min}}$ 分别为:砂土30 min,壤土45 min,粘土60 min。这与在类似抽提系统下WEST等<sup>[18]</sup>得出的砂土为30 min,粘土40 min、GOEBEL等<sup>[20]</sup>得出的砂质粘壤土为30 min和MEIK等<sup>[25]</sup>的粘土抽提时间为90 min类似,而与KOENIGER等<sup>[19]</sup>研究得出砂土的最短抽提时间为15 min和ORLOWSKI等<sup>[29]</sup>的土壤抽提时间为180 min有差异。主要是由于各抽提系统中的真空度存在差异<sup>[23]</sup>,本实验真空度保持在3.9 Pa,而GOEBEL等<sup>[20]</sup>真空度为13 Pa,WEST等<sup>[18]</sup>真空度为8.0 Pa,KOENIGER等<sup>[19]</sup>真空度为3.07 Pa,MEIK等<sup>[25]</sup>真空度为1 Pa,ORLOWSKI等<sup>[23]</sup>真空度为0.3 Pa。

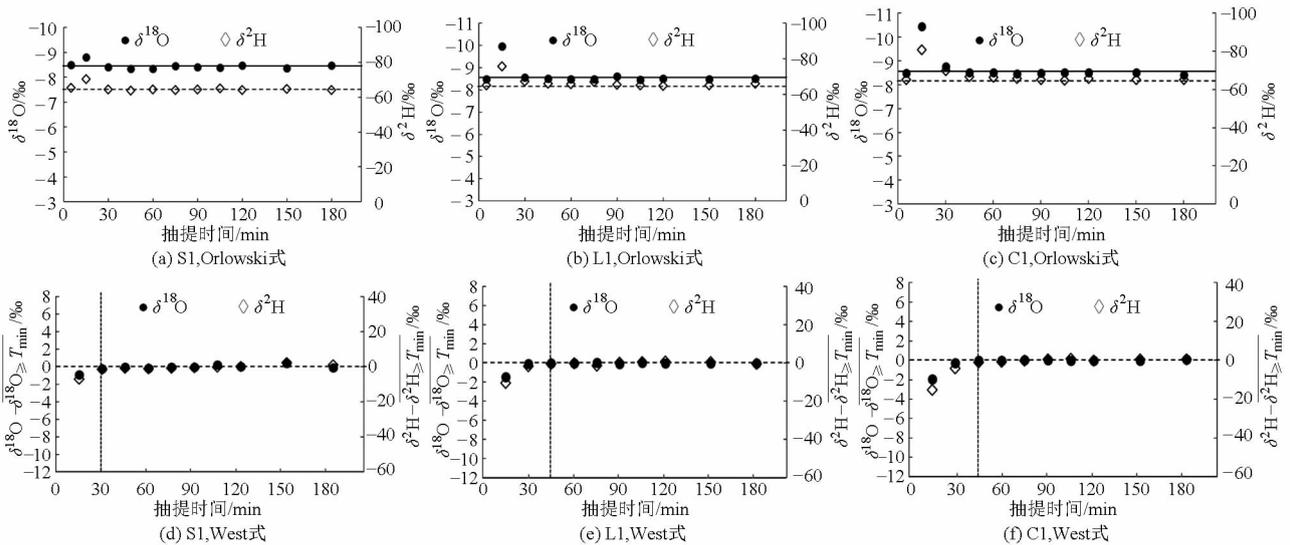


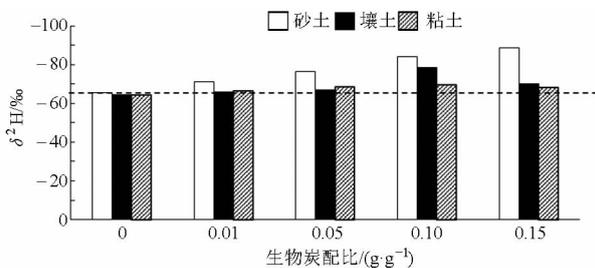
图2 不同类型土壤水分提取的抽提时间曲线

Fig. 2 Extraction time curves for water extracted from different types of soil

## 2.2 不同生物炭配比在 $T_{\min}$ 下氢氧稳定同位素的变化

基于2.1节中得出的未添加生物炭的不同土壤的  $T_{\min}$ , 通过测定不同生物炭配比的土壤样品在该抽提时间下所抽提出水样的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^2\text{H}$ , 来分析不同生物炭比对土壤持水性的影响。其原理为<sup>[25-26]</sup>: 若添加生物炭对土壤持水性起到促进或抑制作用, 则在同一  $T_{\min}$  下, 添加生物炭后抽提出的水样, 其氢氧稳定同位素值较已知水(标准值)会发生明显变化; 反之, 若生物炭对土壤持水性没有影响, 则其水样的同位素值应基本保持稳定。

为避免抽提过程中土壤含碳量和土壤温度变化可能引起添加水样的  $\delta^{18}\text{O}$  发生分馏现象<sup>[25]</sup>, 故以  $\delta^2\text{H}$  为例进行分析, 见图3, 其中水平虚线表示已知水的  $\delta^2\text{H}$ 。

图3 不同生物炭配比的土壤在  $T_{\min}$  下的  $\delta^2\text{H}$  值Fig. 3 Hydrogen isotope value of soil with different biochar application rates at  $T_{\min}$ 

由图3可知, 在同一抽提时间梯度下, 随着生物炭添加的比例增大, 样品水分的  $\delta^2\text{H}$  呈不同幅度的减小。其中, 对砂土而言, S1 ~ S5 的  $\delta^2\text{H}$  为递减趋势, 且随着生物炭添加量的增大, 变化幅度越大, 这说明生物炭能够有效提高砂土的持水性, 导致原本得出的  $T_{\min}$  下获得的水样抽提不完全, 存在明显的

分馏, 且随着生物炭比例的增大, 效果愈显著, 且生物炭配比与  $\delta^2\text{H}$  值呈线性相关 ( $Y = -145X - 68.167, R^2 = 0.9607$ , 其中  $Y$  为生物炭配比,  $X$  为  $\delta^2\text{H}$ ), 这与 PEREIRA 等<sup>[26]</sup> 结果一致。这是由于生物炭具有较高的孔隙度和内表面积<sup>[11]</sup>, 从而改变土壤结构, 增加土壤孔隙度, 增加砂土吸水量, 提高土壤持水能力, 该结果与肖茜等<sup>[10]</sup>、ABEL 等<sup>[14]</sup>、BRUUN 等<sup>[15]</sup> 和田丹等<sup>[27]</sup> 的研究结果一致。

而不同生物炭配比下的壤土和粘土样品与砂土  $\delta^2\text{H}$  值变化并不一致。壤土样品 L1 ~ L5 的  $\delta^2\text{H}$  值呈明显波谷, L1 ~ L3 同位素值变化不大, L4 明显下降, L5 下降幅度降低; 而粘土 C1 ~ C5 的  $\delta^2\text{H}$  值有一定幅度的起伏, 大小依次为: C1、C2、C3 及 C5 大于 C4。这表明生物炭能提高壤土和粘土的持水性, 但并不是所有配比条件下均适用。在 0 ~ 0.05 g/g 生物炭配比条件下, 提高效果并不显著, 而在 0.10 ~ 0.15 g/g 生物炭配比下, 能够显著提高壤土和粘土的持水性, 但这种增加效应是有限度的, 在达到一定配比后趋于稳定, 甚至出现过高的生物炭配比 (0.15 g/g) 会减弱土壤持水性的提高幅度, 这与田丹等<sup>[27]</sup> 和高海英等<sup>[28]</sup> 的研究结果一致。且相对粘土而言, 壤土的持水性对生物炭添加量的变化更为敏感, OUYANG 等<sup>[16]</sup> 也得出相类似的结论。

VENTURA 等<sup>[12]</sup> 在原位黏壤土中添加果树生物炭, 并未发现其对土壤持水性产生明显影响; HARDIE 等<sup>[13]</sup> 也认为在果园砂壤土中施加低于 0.05 g/g 的生物炭并不能显著提高土壤水分有效性; STREUBEL 等<sup>[29]</sup> 的研究表明, 在 60 种不同配比的生物炭和土壤混合样品中, 仅有 25 种显示出提高土壤持水能力; 而 HERATH 等<sup>[11]</sup> 研究表明 0.01 g/g

左右的生物炭配比可以提高粉砂壤土的持水性。由此可见,添加生物炭并不一定能影响土壤持水性,这与其用量、制备条件以及土壤环境相关。

### 2.3 不同生物炭比对土壤 $T_{\min}$ 和抽提贡献率的影响

根据不同生物炭比对土壤最短抽提时间和抽提贡献率的影响,来分析不同生物炭比对土壤持水性的影响。其原理为<sup>[18-22]</sup>:土壤最短抽提时间和

土壤持水性均与土壤质地、孔隙度、有机质等有良好相关性,当生物炭改变土壤的持水性时,其最短抽提时间和相应的抽提贡献率会发生变化;反之,则不变。

根据绘制的 West 式和 Orłowski 式土壤抽提时间曲线(图2),综合确定不同生物炭配比下的土壤样品的最短抽提时间( $T_{\min}$ ),同时,利用 IsoSource 软件分析不同生物炭比对土壤抽提的贡献率变化情况,结果见表4。

表4 不同生物炭配比在不同抽提时间下的平均贡献率

Tab.4 Mean proportional contribution of different biochar application rates at different extraction time

抽提时间/min	贡献率/%														
	S1	S2	S3	S4	S5	L1	L2	L3	L4	L5	C1	C2	C3	C4	C5
15	0.034	0.005	0.009	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0
30	0.067	0.142	0.073	0.005	0	0.030	0.026	0.003	0.001	0	0.030	0.001	0.001	0	0
45	0.153	0.138	0.127	0.013	0	0.128	0.093	0.062	0.027	0.008	0.127	0.111	0.005	0	0
60	0.162	0.139	0.153	0.090	0.004	0.130	0.185	0.160	0.191	0.193	0.102	0.062	0.008	0	0.008
90	0.151	0.093	0.150	0.213	0.073	0.116	0.258	0.095	0.215	0.109	0.189	0.144	0.080	0.066	0.185
120	0.149	0.145	0.162	0.199	0.332	0.147	0.111	0.127	0.173	0.407	0.152	0.179	0.210	0.263	0.220
150	0.148	0.146	0.178	0.201	0.245	0.281	0.078	0.340	0.189	0.111	0.139	0.258	0.404	0.438	0.260
180	0.136	0.146	0.147	0.279	0.345	0.169	0.249	0.212	0.205	0.172	0.260	0.244	0.292	0.233	0.326
West 式和 Orłowski 式确定的 $T_{\min}$ /min	30	30	45	90	120	45	45	60	120	60	60	90	120	120	90

由表4可知,同一生物炭配比条件下,除0.15 g/g外,3种土壤的  $T_{\min}$  由大到小依次为粘土、壤土、砂土,这与3类土壤整体的持水性保持一致。不同生物炭比对砂土样品的  $T_{\min}$  影响呈线性增长( $T_{\min} = 630.98X + 23.88, R^2 = 0.9757$ ,其中  $X$  为生物炭配比)趋势,而其对壤土和粘土  $T_{\min}$  的影响基本一致,均为先增大后减小的趋势,且壤土变化幅度较大。由此可得出,生物炭能显著影响砂土持水性,且与生物炭添加量呈线性正相关,而对壤土和粘土的持水性有一定影响,壤土对生物炭更为敏感。

同一生物炭配比条件下,大于等于  $T_{\min}$  所对应的抽提贡献率较大,反之则较小,且基本以 West 式和 Orłowski 式确定的  $T_{\min}$  为基准,小于  $T_{\min}$  的抽提时间内,越接近  $T_{\min}$ ,其对应贡献率越大,而大于  $T_{\min}$  的抽提时间内,其贡献率波动幅度不大。对砂土而言,15~90 min内,随着生物炭配比的提高,同一抽提时间对应抽提贡献率减小;120~180 min内,则增大。对于壤土  $T_{\min}$  为45 min,随着生物炭配比的提高,对应的贡献率减小,粘土也表现出类似结果。这说明添加生物炭可以改变土壤的最短抽提时间,导致  $T_{\min}$  下的抽提贡献率下降,从而表明生物炭能够影响

不同土质的持水性。

### 3 结论

(1)根据 West 式和 Orłowski 式土壤抽提曲线,得出3种土壤的  $T_{\min}$  分别为:粘土60 min、壤土45 min、砂土30 min。

(2)在最短抽提时间( $T_{\min}$ )下,随着生物炭配比的提高,抽提出砂土的水样  $\delta^2\text{H}$  偏离标准值的幅度越大,而抽提出壤土和粘土的水样  $\delta^2\text{H}$ ,偏离标准值的幅度为先增大后减小且壤土变化幅度较大,说明生物炭对砂土的持水性具有明显的促进作用;对壤土和粘土的持水性在一定配比范围内具有一定的促进作用。

(3)砂土的  $T_{\min}$  随着生物炭添加量的增大而增长,而壤土和粘土的  $T_{\min}$  呈先增大后减小的趋势,且壤土变化幅度较大;不同生物炭配比能够影响抽提贡献率,在不同土壤的  $T_{\min}$  下,抽提贡献率随着生物炭配比的增大而减小,说明生物炭能显著影响砂土持水性,且与生物炭添加量呈线性相关,而对壤土和粘土的持水性有一定影响,壤土对生物炭更为敏感。

### 参 考 文 献

- agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209:108–124.
- 2 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)
- 3 SCHIMMELPFENNIG S, MULLER C, GRUNHAGE A, et al. Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland—effects on greenhouse gas emissions and plant growth [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 191:39–52.
- 4 SUN Y, GAO B, YAO Y, et al. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 240:574–578.
- 5 赵世翔, 姬强, 李忠徽, 等. 热解温度对生物质炭性质及其在土壤中矿化的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6):183–192.  
ZHAO Shixiang, JI Qiang, LI Zhonghui, et al. Characteristics and mineralization in soil of apple-derived biochar produced at different temperatures [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6):183–192. (in Chinese)
- 6 FENG Y, XU Y, YU Y, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46:80–88.
- 7 PRENDERGAST-MILLER M T, DUVALLA M, SOHI S P. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):173–185.
- 8 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1):137–142.  
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1):137–142. (in Chinese)
- 9 陈心想, 何绪生, 张雯, 等. 生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1):110–114.  
CHEN Xinxiang, HE Xusheng, ZHANG Wen, et al. Effects of quantity of biochar on nitrogen leaching in simulated soil columns and soil moisture parameters in field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1):110–114. (in Chinese)
- 10 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.  
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(16):128–134. (in Chinese)
- 11 HERATH H M S K, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M, et al. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an alfisol and an andisol[J]. *Geoderma*, 2013, 209–210:188–197.
- 12 VENTURA F, SALVATORELLI F, PIANA S, et al. The effects of biochar on the physical properties of bare soil[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2012, 103:5–11.
- 13 HARDIE M, CLOTHIER B, BOUND S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water [J]. *Availability Plant Soil*, 2014, 376:347–361.
- 14 ABEL S, PETERS A, TRINKS S, et al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil [J]. *Geoderma*, 2013, 202–203:183–191.
- 15 BRUUN E W, PETERSEN C T, HANSEN E, et al. Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(3):109–118.
- 16 OUYANG L, WANG F, TANG J. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(4):991–1002.
- 17 INGRAHAM N L, SHADEL C. A comparison of the toluene distillation and vacuum/heat methods for extracting soil water for stable isotopic analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 1992, 140:371–387.
- 18 WEST A G, PATRICKSON S J, EHLERINGER J R. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis[J]. *Rapid Communications Mass Spectrometry*, 2006, 20(8):1317–1321.
- 19 KOENIGER P, MARSHALL J D, LINK T, et al. An inexpensive, fast, and reliable method for vacuum extraction of soil and plant water for stable isotope analyses by mass spectrometry [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2011, 25(9):3041–3048.
- 20 GOEBEL T S, LASCANO R J. System for high throughput water extraction from soil material for stable isotope analysis of water [J]. *Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation*, 2012, 2(4):203–207.
- 21 VENDRAMINI P F, STERNBERG L D S L. A faster plant stemwater extraction method [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2007, 21(2):164.
- 22 IGNATEV A, VELIVETCKAIA T, SUGIMOTO A, et al. A soil water distillation technique using He-purging for stable isotope analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 498:265–273.
- 23 ORLOWSKI N, FREDE H G, BRUGGEMANN N, et al. Validation and application of a cryogenic vacuum extraction system for soil and plant water extraction for isotope analysis[J]. *Journal of Sensors & Sensor Systems*, 2013, 2(2):179–193.
- 24 PHILLIPS D L, GREGG J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. *Oecologia*. 2003, 136(2):261–269.

- 14 潘国艳,夏军,张翔,等.生物滞留池水文效应的模拟试验研究[J].水电能源科学,2012,30(5):13-15.  
PAN Guoyan, XIA Jun, ZHANG Xiang, et al. Research on simulation test of hydrological effect of bioretention units [J]. Water Resources and Power, 2012,30(5):13-15. (in Chinese)
- 15 李家科,李亚,沈冰,等.基于SWMM模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J].水力发电学报,2014,33(4):60-67.  
LI Jiake, LI Ya, SHEN Bing, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(4):60-67. (in Chinese)
- 16 DAVIS A P. Field performance of bioretention; hydrology impacts[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008,13(2):90-95.
- 17 CHAPMAN C, HORNER R R. Performance assessment of a street-drainage bioretention system [J]. Water Environment Research, 2010, 82(2):109-119.
- 18 PALLA A, GNECCO I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale [J]. Journal of Hydrology, 2015,528:361-368.
- 19 DAMODARAM C, GIACOMONI M, KHEDUN C P, et al. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010,46(5):907-918.
- 20 王文亮,李俊奇,宫永伟,等.基于SWMM模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J].中国给水排水,2012,28(21):42-44.  
WANG Wenliang, LI Junqi, GONG Yongwei, et al. LID stormwater control effect simulation based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2012,28(21):42-44. (in Chinese)
- 21 BURSZTA-ADAMIAK E, MROWIEC M. Modeling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM [J]. Water Science and Technology, 2013,68(1):36-42.
- 22 孙艳伟,把多铎,王文川,等. SWMM模型径流参数全局灵敏度分析[J].农业机械学报,2012,43(7):42-49.  
SUN Yanwei, BA Duoduo, WANG Wenchuan, et al. Global sensitivity analysis of runoff parameters of SWMM model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7):42-49. (in Chinese)
- 23 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154,182.  
LI Guifang, ZHENG Fenli, LU Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):147-154,182. (in Chinese)
- 24 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].农业机械学报,2014,45(2):169-175.  
YAN Qinghong, YUAN Cuiping, LEI Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on loess plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2):169-175. (in Chinese)

(上接第198页)

- 25 MEIK M, MICHAEL K, LUITGARD S, et al. Soil water uptake by trees using water stable isotopes ( $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ )—a method test regarding soil moisture, texture and carbonate [J]. Plant and Soil, 2014,376(1-2):327-335.
- 26 PEREIRA R, HEINEMANN A, MADARI B, et al. Transpiration response of upland rice to water deficit changed by different level of eucalyptus biochar [J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2012, 47(5):716-721.
- 27 田丹,屈忠义,勾芒芒,等.生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析[J].土壤通报,2013,44(6):1374-1378.  
TIAN Dan, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Influence and mechanism analysis of biochar on water diffusivity of different soil textures [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013,44(6):1374-1378. (in Chinese)
- 28 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J].中国农学通报,2011,27(24):207-213.  
GAO Haiying, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011,27(24):207-213. (in Chinese)
- 29 STREUBE J D, COLLINS H P, GARCIA-PEREZ M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(4):1402-1413.