

DOI: 10.11766/trxb201504170027

## 添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响\*

吴媛媛<sup>1, 3</sup> 杨明义<sup>1, 2†</sup> 张凤宝<sup>1, 2</sup> 张加琼<sup>1, 2</sup> 赵恬茵<sup>2</sup> 刘 森<sup>1, 3</sup>

(1 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)

(2 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要** 生物炭因其固有的特性和理化性质成为新兴的土壤结构改良添加剂, 目前大多研究集中在添加生物炭后土壤理化性质及作物产量变化方面, 而对添加生物炭后土壤抗侵蚀效应变化的研究很少。以黄土高原典型黄绵土为例, 采用室内人工模拟降雨试验, 研究添加不同含量 (0%、1%、3%、5%、7%) 和粒级 (< 2mm、< 1mm、< 0.25mm) 的生物炭对坡面片蚀的影响。结果表明: (1) 生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用对降雨侵蚀有显著影响, 生物炭粒级对侵蚀的影响效应相对较弱。(2) 各次降雨中, 添加1%含量的各粒级生物炭均可产生减流减沙作用, 探讨其他含量的生物炭对侵蚀和径流的影响时需结合生物炭的粒级进行具体分析。(3) 产流时间随生物炭含量的增加而减小, 且≤3%的生物炭添加量可延迟产流时间。

**关键词** 片蚀; 土壤可蚀性; 生物炭; 黄土坡面

**中图分类号** S157 **文献标识码** A

生物炭 (biomass-derived black carbon 或 biochar) 是指农林废弃有机物质在完全或部分缺氧和相对低温 (< 700 °C) 条件下炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质<sup>[1]</sup>, 相关研究随着19世纪末巴西亚马逊流域黑土的考古发现而展开<sup>[2]</sup>。生物炭的特性 (吸附力、抗氧化力、抗生物分解力强等) 和理化性质使其在各个领域内均开展了大量的研究<sup>[3]</sup>, 农业领域的研究主要集中在人工施用生物炭后土壤理化性状改良、植物生长状况改善、温室气体减排及土壤污染修复等方面<sup>[4-11]</sup>。Jindo等<sup>[12-15]</sup>的研究结果表明生物炭具有改善土壤质量、改变土壤容重和孔隙度、增加土壤团聚体结构数量和改良土壤水动力学效应的作用, 是具有改变土壤、地形、植被等侵蚀因素而改善侵蚀状况的

土壤改良添加剂, 相对于其他土壤侵蚀改良添加剂, 生物炭不仅改善侵蚀状况, 且可以培肥地力达到增产的目的。

土壤可蚀性作为评价土壤对侵蚀敏感程度的重要指标和土壤侵蚀预报的重要参数, 是进行土壤侵蚀和水土流失定量评价的重要依据<sup>[16]</sup>。黄土高原是全球土壤侵蚀最严重的地区之一, 坡耕地在该区的农耕地中所占比例高达90%, 且坡度较大, 土壤熟化程度低、抗冲性弱、水土流失严重<sup>[17]</sup>。近些年生物炭作为土壤改良剂被广泛应用, 生物炭不仅改变了土壤理化性质, 还具有延迟产流时间、改变土壤饱和导水率、提高团聚体稳定性的作用<sup>[14-15, 18-19]</sup>, 起到了减流减沙、增加土壤抗蚀性的效应, 但目前这方面的研究相对较少。Jien和Wang<sup>[18]</sup>在高度风

\* 国家自然科学基金项目 (41171228, 41371283)、中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-04-03) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.41171228 and 41371283) and the Chinese Academy of Sciences Funded Key Project (No.KZZD-EW-04-03)

† 通讯作者Corresponding author, E-mail: ymyzly@163.com

作者简介: 吴媛媛 (1990—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: yuanyuanwu1990@gmail.com

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-05-11

化的酸性老成土中添加0%、2.5%、5%的生物炭培养105d后进行模拟降雨实验,发现侵蚀量随着生物炭含量的增加而明显减少,刘祥宏<sup>[20]</sup>在添加较低含量(0、0.4、0.8、1.6%)的生物炭条件下在室外培养18个月并进行降雨,发现不同场次降雨得到的减流减沙效果不尽相同,但表现出减水减沙的潜力,Beck等<sup>[21]</sup>在模拟绿化屋顶的试验中添加0、7%含量的生物炭,发现添加的生物炭具有截留雨水、减少径流的作用。总体而言,目前关于土壤中添加生物炭后侵蚀状况发生改善的研究还不系统,如添加不同粒径的生物炭及生物炭含量与粒径的交互作用等对侵蚀的影响还未见报道,因此本文以黄土高原典型黄绵土为研究对象,采用人工模拟降雨的试验方法,通过测定添加不同比例和不同粒级的生物炭后坡面片蚀的水沙过程,探讨添加生物炭对黄土坡面耕层土壤可蚀性的影响,以期为进一步利用生物炭改良土壤侵蚀提供理论依据。

## 1 材料与方法

本研究通过人工模拟降雨方法,在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅使用自制人工模拟针式降雨器降雨,降雨器高度3m,针头密度250个 $m^{-2}$ ,降雨雨滴均匀度可达90%以上,为了降低水质对土壤理化性质的影响,降雨用水使用纯净水。供试土壤为陕西省安塞县的农耕地表层黄绵土(0~20cm),生物炭是由陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司提供的锯末生物炭,炭化温度为550℃,生物炭过筛分成<2mm、<1mm、<0.25mm三种粒级备用,采用MS-2000激光粒度分析仪测定供试材料的机械组成见表1。

黄土高原的土壤侵蚀主要是由少数几次特大暴雨所引起的,往往一次特大暴雨的侵蚀量占年

侵蚀总量的60%以上,甚至超过90%<sup>[22]</sup>,考虑到最低土壤侵蚀暴雨标准,本试验选用降雨强度 $90mmh^{-1}$ ,雨滴能量为 $212.4Jm^{-2}h^{-1}$ 。安塞地区,坡度在0~35°之间变化时,侵蚀模数随着坡度的增大而增大,表明坡度与侵蚀量之间呈正相关关系,该区细沟侵蚀一般发生在>10°的坡面<sup>[23]</sup>,由于本试验是机理探究试验,坡长较短,所选坡度为15°。降雨试验土槽为变坡钢槽,底部打孔,长1m、宽0.8m、高0.4m,中间用隔板分成两个宽为0.4m的小土槽,作为重复。装土之前,土槽底部铺设20cm的干沙,铺上透水纱布以保证良好的透水条件,试验土壤风干过5mm筛,与生物炭混合均匀后即刻装槽降雨,土层厚度20cm,装土容重控制在 $1.1\sim 1.2gcm^{-3}$ 之间,土壤含水率控制在9%~13%。

三种粒级的生物炭分别以1%、3%、5%、7%(质量百分比)等四种含量添加至土壤中,并设置一个空白处理作为对照,共13个处理,每个处理降雨2次,共进行26场降雨,且两次平行试验结果的最大相对误差小于8%。

降雨开始直至坡面产流,记录产流时间,产流后在小区的径流口接全样,前5个样品每1min接一次,接下来5个样品每2min接一次,剩下的样品每3min接一次样直至降雨历时达到1h,降雨历时从降雨开始计时。降雨结束后,称量接取样品的质量,同时将样品烘干后再称重,并将烘干样品装袋,以备后续试验的指标测定。

后期数据采用Microsoft Excel2010、SPSS16.0及Sigmaplot10.0进行统计分析和作图,采用多变量方差分析(Multivariate analysis of variance)和最小显著极差法(LSD)比较各试验条件下降雨径流量、侵蚀泥沙量和径流含沙量之间的差异( $\alpha=0.05$ )。

表1 供试材料的机械组成

Table 1 Mechanical composition of the material in the experiment

材料类型 material type	粒径 particle size (mm)	颗粒含量particle content (mm, %)				
		2~1	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.002	<0.002
黄绵土 Loessal soil	<0.25	—	—	30.20	60.87	8.93
	<2	20.22	30.02	22.47	25.68	1.60
生物炭 biochar	<1	—	39.46	33.23	25.97	1.33
	<0.25	—	—	78.25	20.50	1.25

注:“—”表示颗粒含量为0 Note:“—” represents null of particle content

## 2 结果与讨论

### 2.1 添加生物炭对坡面径流的影响

由图1可知，各次降雨过程中产流速率随降雨历时的变化趋势相似，即在降雨开始产流速率急速增加，然后缓慢增加直至趋于稳定。但是由于生物炭的添加，各次降雨过程中产流时间、稳渗阶段的产流速率出现差异，最终致使降雨径流量的变化：（1）相同含量不同粒级生物炭时，产流时间的变化没有明显规律，但相同粒级不同含量生物炭时，产流时间随着生物炭含量的增加而呈现减小的趋势，且少量的生物炭添加量（ $\leq 3\%$ ）可延迟产流时间，过量的生物炭含量使产流时间提前。

（2）降雨过程中，添加1%含量的各个粒级的生物炭均可减小产流速率；添加3%含量生物炭时，只有 $<0.25\text{mm}$ 粒级生物炭处理中产流速率小于对照；添加量为5%和7%时， $<0.25\text{mm}$ 粒级生物炭可增大产流速率， $<1\text{mm}$ 粒级的生物炭可减小产流速率， $<2\text{mm}$ 粒级的生物炭则对产流速率无明显影响。

方差分析结果显示，生物炭含量、粒级及二者的交互作用对坡面径流量有显著影响，导致降雨径流量变化的因子有生物炭含量、粒级、二者的交互作用及其他不可控因子，各因子贡献率<sup>[24]</sup>分别为21.35%、7.27%、41.18%、30.20%。（1）表2~表3中径流量均值的多重比较显示：相对于空白试验，在不考虑生物炭粒级的条件下，只有添加量为1%的生物炭可显著减少15.34%的径流量，其余生物炭添加量对径流量无明显影响；在不考虑生物炭含量的条件下，添加 $<1\text{mm}$ 和 $<0.25\text{mm}$ 粒级的生物炭可显著减少5.34%和4.26%的径流量。（2）表3中各次降雨总径流量数据显示：在降雨历时内，相对于对照，添加量为1%的 $<2\text{mm}$ 、 $<1\text{mm}$ 和 $<0.25\text{mm}$ 粒级的生物炭可分别减少6.11%、10.12%和29.8%产流量；添加量为3%时，只有 $<0.25\text{mm}$ 的粒级可减少14.25%的产流量，其余粒级的生物炭均增加了产流量；添加5%含量的生物炭，只有 $<1\text{mm}$ 的粒级可减少产流，且可减少11.27%的径流量；7%生物炭含量中，只有 $<1\text{mm}$ 粒级可减少5.82%的产流量。

由以上分析可知：添加少量（ $\leq 3\%$ ）的生物炭可延迟产流时间、减小产流速率、增加降雨入渗，过量的生物炭添加量无显著的减流效应；大颗粒的生物炭（ $<2\text{mm}$ ）的产流速率与对照差异不显

著，小颗粒（ $<1\text{mm}$ 和 $<0.25\text{mm}$ ）的生物炭对径流的影响主要是通过生物炭含量的交互作用体现的，且随着颗粒的减小，这种交互作用越明显。出现以上现象的主要原因是：（1）生物炭巨大的孔隙度和表面能，使其在降雨过程中吸持水分、截留雨水、增加入渗<sup>[14]</sup>；（2）生物炭粒级通过对土壤大小孔隙度的不同分配而影响产流，相对于大颗粒生物炭，小颗粒的生物炭由于体积小、表面积大<sup>[14]</sup>，形成大量细小孔隙，土壤总孔隙度相对减少的较小，降雨过程中可吸持更多的水分<sup>[15]</sup>，所以小颗粒的生物炭出现了减少径流的作用；

（3）装槽时土壤容重基本一致，生物炭的多孔性和低密度特性<sup>[15]</sup>使得随着生物炭添加量的增加，固体颗粒的空间增加，土壤总孔隙度减少，导致土壤入渗速率减少，径流增加；（4）不少研究已表明土壤持水能力随着生物炭添加量的增加而增加，但由于生物炭自身的斥水性使得添加量超过阈值时持水量呈现下降的趋势，且生物炭类型不同时其阈值也不同。高海英等<sup>[25]</sup>研究结果显示添加不同类型的生物炭5、20、40 t  $\text{hm}^{-2}$ ，土壤含水量随生物炭添加量增加而增加，但在80 t  $\text{hm}^{-2}$ 添加量时又出现下降现象。Dugan等<sup>[26]</sup>研究玉米秸秆生物炭的添加量为0、5、10、15 t  $\text{hm}^{-2}$ 时田间持水量的变化，发现试验组的田间持水量明显大于对照组，但试验组之间无明显差异。

### 2.2 添加生物炭对坡面侵蚀的影响

由图2可知，各次降雨过程中侵蚀率随降雨历时的变化趋势大体一致，即随降雨历时的延长呈现先急剧增加后逐步降低最后趋于稳定的现象。生物炭的添加使得产流时间、最高侵蚀率和稳渗阶段侵蚀率均发生变化，致使侵蚀泥沙量发生变化：降雨过程中，生物炭添加量为1%时，各粒级的侵蚀率均小于对照；3%的生物炭添加量时，只有 $<0.25\text{mm}$ 粒级的侵蚀率小于对照；5%和7%的生物炭添加量时，各个粒级的侵蚀率均大于对照。

方差分析结果显示，生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用对坡面侵蚀泥沙量有显著影响，生物炭粒级对侵蚀泥沙量无显著影响，所以导致侵蚀泥沙量变化的因子有生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用及其他不可控因子，其贡献率分别为32.48%、35.59%、31.93%。（1）表2~表3中侵蚀量均值的多重比较显示：相对于对照，在

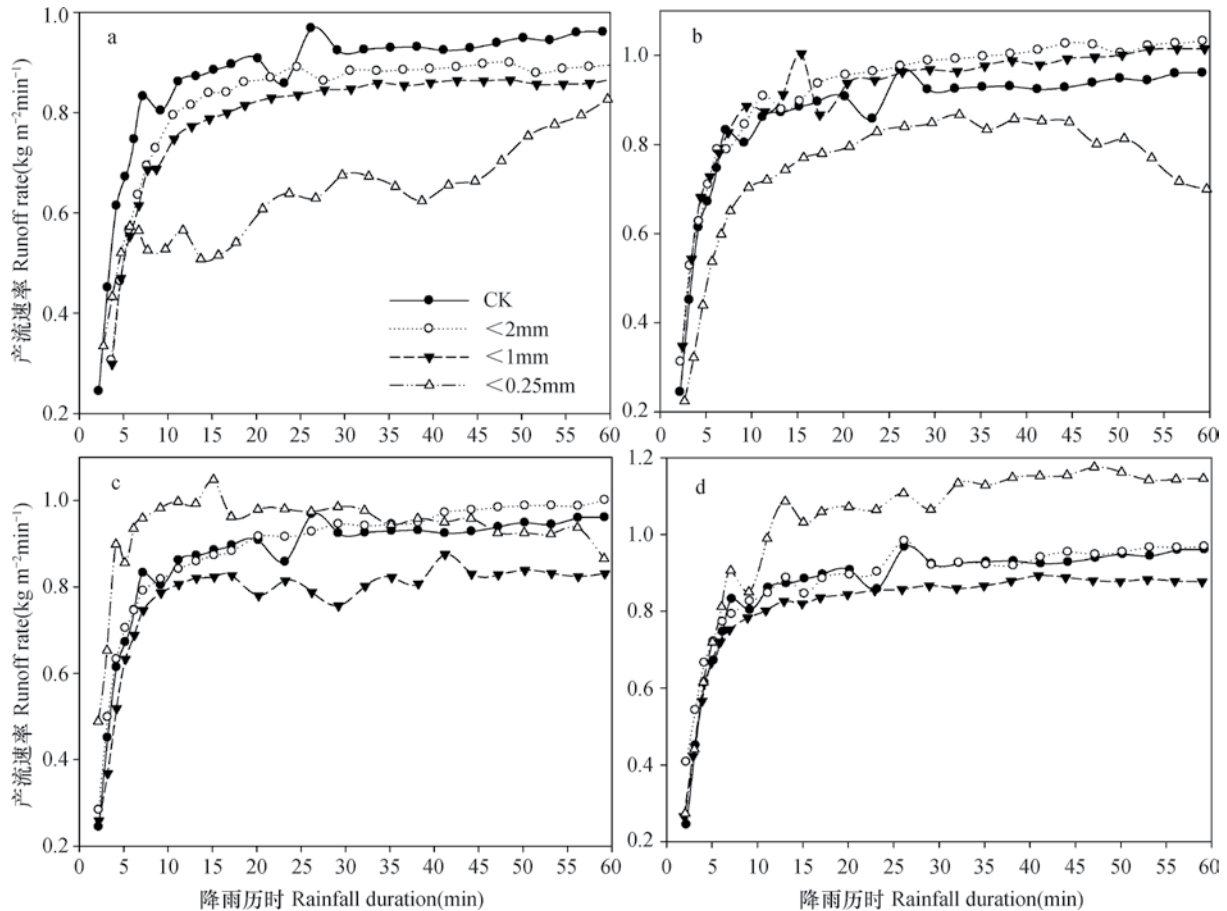


图1 不同生物炭含量和粒径对次降雨过程中坡面产流速率的影响

(图中a、b、c、d分别代表生物炭含量为1%、3%、5%、7%，下同)

Fig. 1 Effect of application rate of biochar and particle size of the biochar on runoff rate during the process of each rainfall event

(The lowercase letters a, b, c and d in the figure represents biochar application rate, 1%, 3%, 5% and 7%, respectively, the same as below)

不考虑生物炭粒级的条件下, 添加1%含量的生物炭可显著减少22.11%的侵蚀量, 7%的生物炭含量可增加36.84%的侵蚀泥沙量, 其余生物炭添加量对侵蚀量无明显影响; 在不考虑生物炭含量时, 添加不同粒级的生物炭对侵蚀泥沙量影响不显著。

(2) 表3中次降雨总侵蚀量数据显示: 在降雨历时内, 相对于对照, 添加1%含量的各个粒径<2mm、<1mm和<0.25mm的生物炭, 可分别减少19.8%、27.5%和22.3%的土壤侵蚀量; 3%生物炭添加量时, 只有<0.25mm的粒径有减蚀作用, 可减少26%的侵蚀量; 施用5%、7%含量的各粒径生物炭均可增加侵蚀量。

由以上分析可知: 导致坡面侵蚀量发生变化的因素主要有生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用。生物炭含量对侵蚀的作用表现为少量的生物炭添加量(<3%)可减少侵蚀量, 过量的添加量

反而增大侵蚀量; 生物炭含量与粒级的交互作用随着颗粒的减小, 对侵蚀的作用效应表现越明显, 即大颗粒的生物炭(<2mm)对侵蚀的影响随生物炭含量的变化不明显, 小颗粒生物炭对侵蚀的作用效应随含量变化显著。在降雨过程中, 雨滴打击地面及土壤自重沉积引起土壤湿陷收缩, 生物炭的轻质性使得在容重相同条件下固体颗粒的数量增加, 土壤湿陷收缩有所改善, 土壤孔隙结构优于对照, 且添加少量的生物炭时土壤入渗能力和持水性能均有所提高, 使土壤可蚀性得到改善。但是, 生物炭的自身性质与土壤差异大, 施入土壤后改变了土壤颗粒组成和土壤黏结性, 从而影响土壤的可蚀性。生物炭的低密度性质使其在降雨侵蚀过程中更易随水流失, 具体表现为生物炭添加量超过一定阈值时, 随着添加量的增加侵蚀量增加。Wang等<sup>[19]</sup>研究在0、10%生物炭添加量下生物炭的易蚀性, 揭露

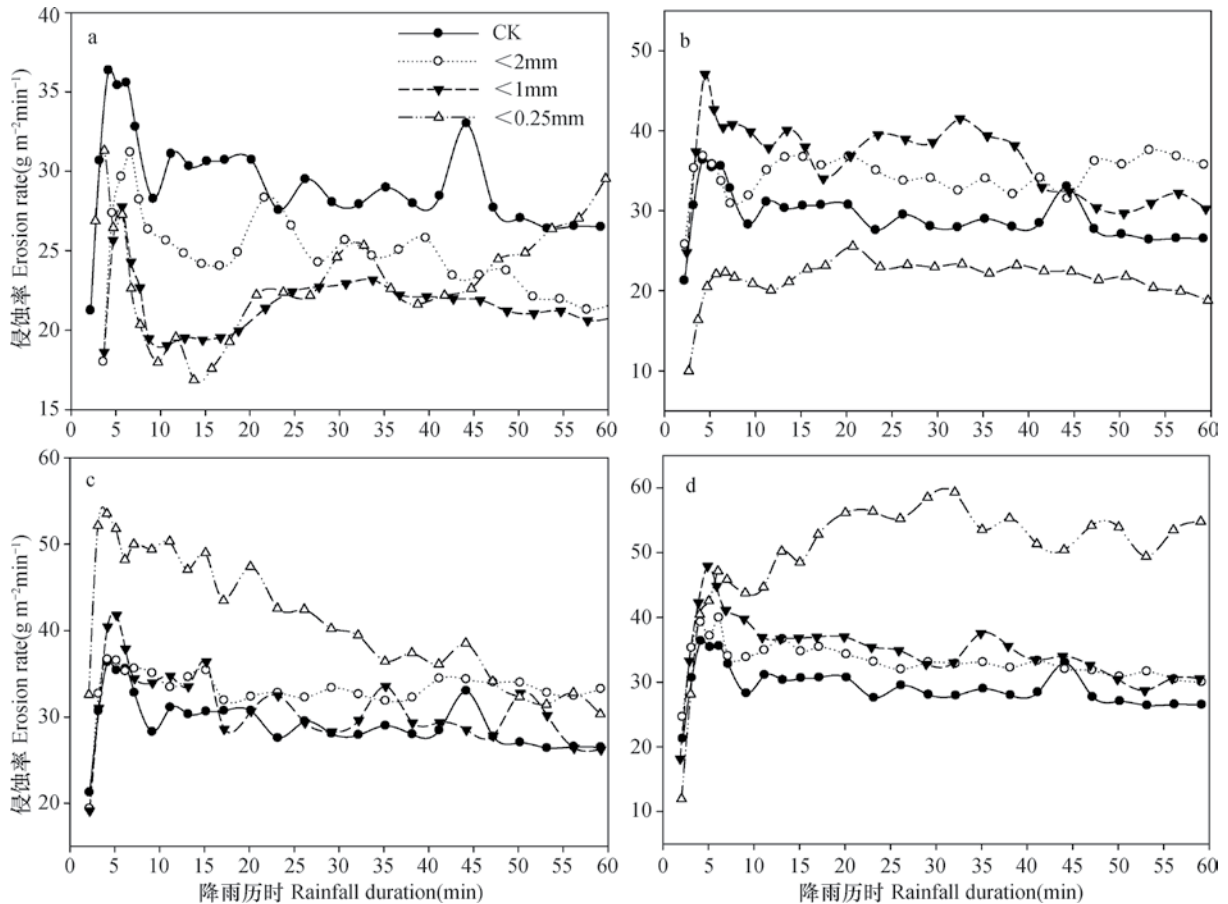


图2 不同生物炭含量和粒径对次降雨过程中坡面侵蚀率的影响

Fig. 2 Effect of application rate of biochar and particle size of the biochar on erosion rate of the soil during the process of each rainfall event

了生物炭自身的浮力和易扩散性是其易蚀性的原因。同时，生物炭粒径与含量的交互作用使得降雨径流的冲刷力发生变化，进而导致侵蚀泥沙量发生变化。

### 2.3 添加生物炭对径流含沙量的影响

由图3可知，各次降雨过程中径流含沙量随时间的变化趋势大体一致，均是随降雨历时的延长呈现先急剧降低后逐步降低最后趋于稳定的规律。生物炭的添加使得产流时间和稳渗阶段含沙量发生变化，致使径流含沙量发生变化：降雨过程中，添加1%含量的<2mm和<1mm粒级的生物炭，侵蚀含沙量少于对照；3%的生物炭含量中，只有<0.25mm的粒级含沙量小于对照；5%和7%的生物炭含量中，各个粒级的生物炭均可增加径流含沙量。

方差分析结果显示，生物炭含量、粒径和二者的交互作用对坡面径流含沙量有极显著影响，导致径流含沙量变化的因子有生物炭含量、粒径、二

者的交互作用及其他不可控因子，其贡献率分别为32.9%、8.66%、35.21%、23.23%。（1）表2~表3含沙量均值的多重比较显示：在不考虑生物炭粒级的条件下，添加1%和3%含量生物炭的处理与对照差异不显著，其余生物炭添加量对径流含沙量均有增加作用；在不考虑生物炭含量时，添加<2mm粒级的处理与对照差异不显著，其余生物炭粒级对径流含沙量均有增加作用；（2）表3中次降雨总含沙量数据显示：在降雨历时内，相对于对照，添加1%含量的<2mm和<1mm的粒级生物炭，可减少11.9%和19.26%的径流含沙量；添加3%含量的生物炭，只有<0.25mm的粒级有减少含沙量的作用，可减少14.6%；添加5%、7%含量的各粒级生物炭均可增加径流含沙量。

由以上分析可知：随着生物炭添加量的增加，侵蚀含沙量增加，且随着生物炭粒径的减小，侵蚀含沙量增加，而生物炭含量和粒径的交互效应则使得部分试验中侵蚀含沙量有减少的现象。含沙量的



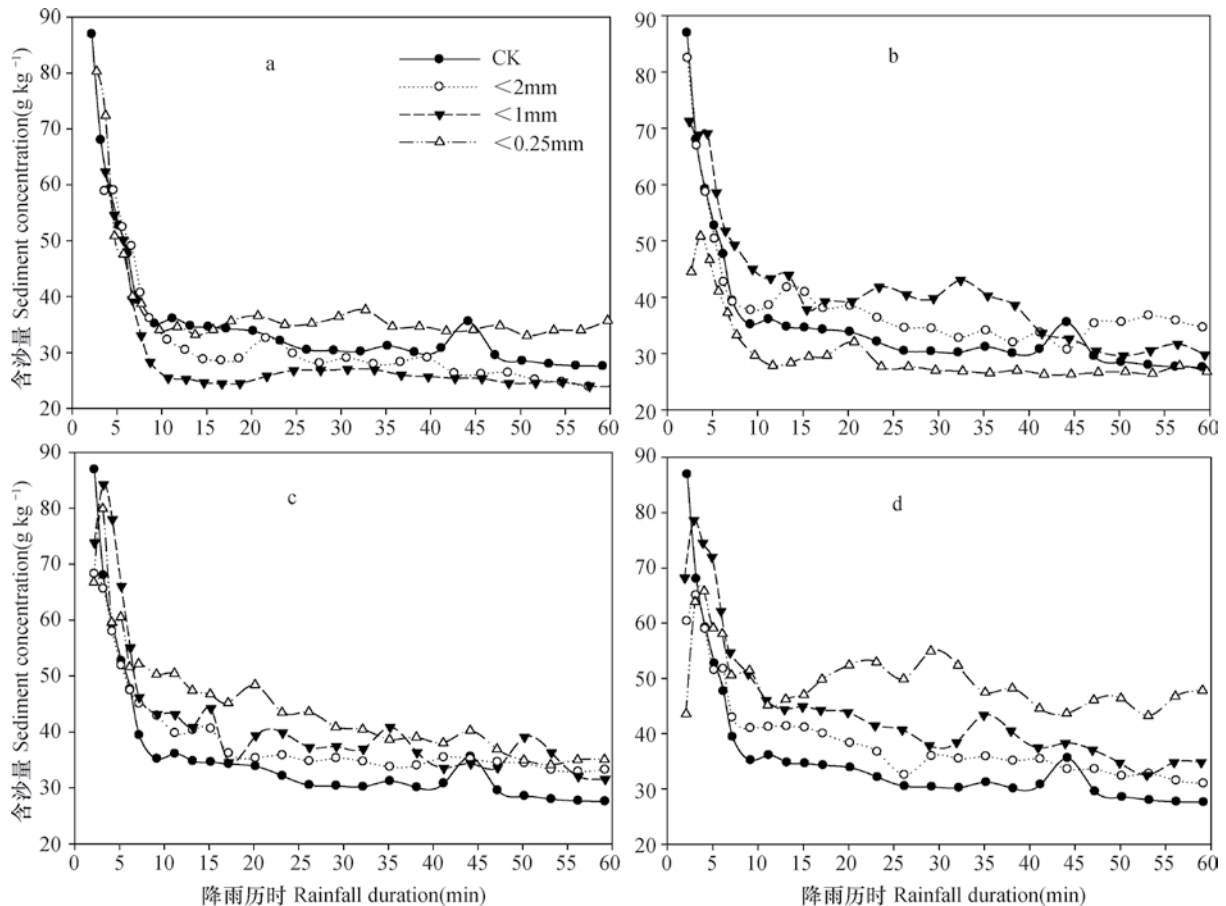


图3 不同生物炭含量和粒径对次降雨过程中径流含沙量的影响

Fig. 3 Effect of application rate of biochar and particle size of the biochar on sediment content in runoff during the process of each rainfall event

变化主要取决于侵蚀量和径流量的变化, 前述的结论显示: (1) 少量的 (<3%) 生物炭添加量可减少侵蚀产流产沙量, 随着添加量继续增加至7%时侵蚀量增加显著而径流量变化不显著; (2) 随着生物炭粒级的减小, 侵蚀量增加, 但是差异不显著, 径流量表现为大颗粒的生物炭 (<2mm) 使得径流量增加, 但是与对照差异不显著, 添加小颗粒的生物炭径流量均显著小于对照。亦表明随着生物炭添加量的增加含沙量增加, 随着生物炭粒级的减小含沙量增加。

#### 2.4 添加生物炭对土壤可蚀性的影响

土壤可蚀性是评价土壤是否易受侵蚀营力破坏的性能和土壤对侵蚀营力分离和搬运作用的敏感性指标<sup>[16]</sup>, 是土壤性质中的一个重要方面, 国外在20世纪30年代开始研究侵蚀与土壤性质的关系, 我国于50年代开始, 已取得了不少成果, 现在主要有5种方法测定土壤可蚀性: 土壤理化性质测定法、仪器测定法、小区测定法、数学模型和图解

法、水动力学模型实验求解法<sup>[27]</sup>, 其中Olson和Wischmeier<sup>[28]</sup>用单位侵蚀力在标准小区上引起的土壤侵蚀量为指标来评价土壤可蚀性, 由于其侵蚀量预报的优势而被广泛应用<sup>[27-29]</sup>, 表达式为:

$$K=A/R$$

式中,  $K$ 为土壤可蚀性因子,  $A$ 为单位面积上土壤侵蚀量,  $R$ 为降雨侵蚀力因子。

对于本次非标准小区, 坡度坡长的修订采用刘宝元等<sup>[30]</sup>提出的陡坡坡度公式和USLE公式中的坡长公式。

方差分析结果显示, 生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用对可蚀性 $K$ 值的变化有显著影响, 生物炭粒级对 $K$ 值无显著作用, 导致土壤可蚀性变化的原因有生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用和其他不可控因子, 其贡献率分别为37.16%、34.46%和28.38%。表2~表3中的可蚀性因子均值的多重比较显示: 相对于对照, 在不考虑生物炭粒级的条件下, 添加1%含量的生物炭土壤

表2 生物炭粒级对片蚀基本特征参数影响的差异性检验

**Table 2** Variance test of impact of biochar size on basic characteristic parameters of sheet erosion

粒级 Biochar particle size (mm)	含量 Biochar application rate (%)	产流时间 Runoff time (min)	次降雨总径流量 Total volume of runoff (kg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	径流量均值 Mean volume of runoff (kg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	K值 Factor of erodibility	可蚀性因子 Mean of K value	次降雨总侵蚀量 Total erosion amount (kg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	侵蚀量均值 Mean erosion Amount (kg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	次降雨总含沙量 sediment concentration (g kg <sup>-1</sup> )	含沙量均值 Mean sediment concentration (g kg <sup>-1</sup> )
空白 对照		2.21	50.93	50.93a	0.0080	0.0080a	1.69	1.69a	33.40	33.40c
	1	3.64	47.82		0.0067		1.41		29.43	
	3	2.26	54.31	51.39a	0.0094	0.0086a	1.99	1.81a	36.75	35.06bc
<2	5	2.21	52.11		0.0091		1.92		36.90	
	7	2.18	51.32		0.0090		1.91		37.15	
	1	3.72	45.78		0.0058		1.22		26.97	
	3	2.45	53.51	48.11b	0.0099		2.09	1.78a	39.05	36.87ab
<1	5	2.21	45.19		0.0084	0.0084a	1.78		39.45	
	7	1.93	47.97		0.0096		2.02		42.03	
	1	2.72	35.75		0.0062		1.31		37.11	
	3	2.67	43.67	48.76b	0.0059		1.25	1.98a	28.52	39.05a
<0.25	5	2.13	54.84		0.0112	0.0094a	2.37		42.76	
	7	2.07	60.77		0.0142		2.99		47.83	

注：同列不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )，下同

Note: Different small letters indicated significant difference at 0.05 level, same as below

表3 生物炭含量对片蚀基本特征参数影响的差异性检验

Table 3 Variance test of impact of biochar content on basic characteristic parameters of sheet erosion

含量 Biochar application rate (%)	粒度 Biochar particle size (mm)	产流时间 Runoff time (min)	次降雨总径流量 Total volume of runoff ( $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	径流量均值 Mean volume of runoff ( $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	土壤可蚀性因子K值 Factor of erodibility	可蚀性因子均值 Mean of K value	次降雨总侵蚀量 Total erosion amount ( $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	侵蚀量均值 Mean erosion amount ( $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )	次降雨总含沙量 sediment concentration ( $\text{g kg}^{-1}$ )	含沙量均值 Mean sediment concentration ( $\text{g kg}^{-1}$ )
空白 对照		2.21	50.93	50.93a	0.0080	0.0080b	1.69	1.69b	33.40	33.40c
1	<2	3.64	47.82		0.0067		1.41		29.43	
	<1	3.72	45.78	43.12b	0.0058	0.0062c	1.22	1.31c	26.97	31.17c
	<0.25	2.72	35.75		0.0062		1.31		37.11	
	<2	2.26	54.31		0.0094		1.99		36.75	
3	<1	2.45	53.51	50.50a	0.0099	0.0084b	2.09	1.78b	39.05	34.77bc
	<0.25	2.67	43.67		0.0059		1.25		28.52	
	<2	2.21	52.11		0.0091		1.92		36.90	
5	<1	2.21	45.19	50.72a	0.0084	0.0096ab	1.78	2.02ab	39.45	39.71ab
	<0.25	2.13	54.84		0.0112		2.37		42.76	
	<2	2.18	51.32		0.0090		1.91		37.15	
7	<1	1.93	47.97	53.35a	0.0096	0.0109a	2.02	2.31a	42.03	42.34a
	<0.25	2.07	60.77		0.0142		2.99		47.83	



可蚀性显著降低, 7%的生物炭含量显著增加土壤的可蚀性, 其余生物炭添加量对土壤可蚀性无明显影响; 在不考虑生物炭含量时, 添加不同粒级的生物炭对土壤可蚀性无显著影响; 生物炭含量与粒级的交互作用随着生物炭粒级的减小对土壤可蚀性的影响越明显。

土壤可蚀性受空间变化、土壤性质的时间动态变化和人类活动因素的影响, 但是土壤性质是决定土壤可蚀性的内在因素, 土壤性质具体又可以分为: 内在性质, 包括质地、有机质、盐分等随时间变化缓慢的因素; 暂时性质, 包括微地形、容重、团聚体密度等随管理方式和气候急剧变化的因素, 决定着土壤的可蚀性<sup>[16]</sup>。本次试验主要是人为添加生物炭后即刻进行模拟降雨改变了土壤的渗透性和颗粒组成, 造成了土壤可蚀性的变化。影响入渗的主要因子有土壤容重、坡度、降雨强度、土壤初始含水率和管理措施等<sup>[31]</sup>, 生物炭的添加引起坡面产流历时和土壤稳渗速率发生变化, 且添加 $\leq 3\%$ 含量的生物炭使产流时间延长、产流速率减小、降雨入渗增加, 生物炭含量增加至7%时, 径流量有所增加, 但由于未至添加量的阈值, 所以未引起入渗量的显著减少; 生物炭粒级主要是通过对土壤大小孔隙度的分配产生作用来影响产流, 相对于加入大颗粒生物炭, 小颗粒的生物炭产生减流作用。如表1所示, 生物炭的砂砾含量超过70%, 加入土壤使得土壤的砂砾增加而其他颗粒含量减少, 土壤可蚀性因子K值增大, 且生物炭与土壤的异质性同样使土壤更易发生侵蚀, 但 $< 3\%$ 含量的生物炭由于添加量少, 且减流作用而使得土壤可蚀性减小。文曼<sup>[14]</sup>、颜勇毫等<sup>[15]</sup>等研究表明生物炭对土壤饱和含水率产生作用, 使得降雨入渗发生变化而影响土壤可蚀性, 保护性耕作<sup>[32]</sup>、生物结皮<sup>[33]</sup>等措施和JagC162<sup>[34]</sup>、PAM<sup>[35]</sup>等化学添加剂均改变了土壤的保水性、保肥性、团聚性和渗透性等性质从而影响土壤可蚀性, 生物炭也是通过改变土壤的性质而改变入渗和侵蚀, 进而影响土壤的可蚀性。

### 3 结 论

添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响主要表现为对坡面产流时间、产流产沙量和径流含沙量的作用。在相同生物炭粒级的条件下, 产流时间随着生物炭含量的增加呈现减小的趋势, 且添加

少量的生物炭( $\leq 3\%$ )可延迟产流时间, 过量的生物炭使产流时间提前。但是, 在相同的生物炭含量条件下, 生物炭粒级对产流时间的影响无明显规律。各次降雨中, 添加量为1%的各个粒级的生物炭均具有减流减沙效应, 探讨其他含量的生物炭的减流减沙效应时需结合生物炭的粒级进行具体分析。生物炭含量、粒级、二者的交互作用及其它不可控因子对降雨径流量变化的贡献率分别为21.35%、7.27%、41.19%、30.20%, 对径流含沙量变化的贡献率分别为32.90%、8.66%、35.21%、23.23%, 由于生物炭粒级对土壤可蚀性和侵蚀泥沙量影响不显著, 所以引起土壤可蚀性和侵蚀泥沙量变化的因素有生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用及其它不可控因子, 对土壤可蚀性变化的贡献率分别为37.16%、34.46%、28.38%, 对侵蚀量变化的贡献率分别为32.48%、35.59%、31.93%。由此可知, 生物炭含量、生物炭含量与粒级的交互作用对降雨侵蚀有显著影响, 生物炭粒级的作用则相对较弱。本次试验是小尺度的机理探究性研究, 为今后生物炭在土壤侵蚀方向大尺度的研究提供科学参考具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] Antal M J, Gronli M. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003, 42 (8): 1619—1640
- [2] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green. *Nature*, 2006, 442: 624—626
- [3] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究. *中国工程科学*, 2011, 13 (2): 83—89  
Chen W F, Zhang W M, Meng J, et al. Researches on biochar application technology (In Chinese). *Engineering Sciences*, 2011, 13 (2): 83—89
- [4] Cayuela M L, van Zwieten L, Singh B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 5—16
- [5] Downie A E, van Zwieten L, Smernik R J, et al. Terra preta australis: Reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140 (1/2): 137—147
- [6] Guerena D, Lehmann J, Hanley K, et al. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. *Plant and Soil*, 2013, 365 (1/2): 239—254

- [ 7 ] Jeffery S, Verheijen F G A, Bastos A C, et al. A comment on ' biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis ' : On the importance of accurate reporting in supporting a fast-moving research field with policy implications. *GCB Bioenergy*, 2014, 6 ( 3 ) : 176—179
- [ 8 ] Macias F, Arbestain M C. Soil carbon sequestration in a changing global environment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2010, 15 ( 6 ) : 511—529
- [ 9 ] Sarkhot D V, Berhe A A, Ghezzehei T A. Impact of biochar enriched with dairy manure effluent on carbon and nitrogen dynamics. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41 ( 4 ) : 1107—1114
- [ 10 ] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景. *中国农业科学*, 2013, 46 ( 16 ) : 3324—3333  
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture ( In Chinese ). *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 ( 16 ) : 3324—3333
- [ 11 ] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展. *土壤与作物*, 2012, 1 ( 4 ) : 219—227  
Zhang Q F, Wang G H. Research progress of physiochemical properties of biochar and its effects as soil amendments ( In Chinese ). *Soil and Crop*, 2012, 1 ( 4 ) : 219—227
- [ 12 ] Jindo K, Sanchez-Monedero M A, Hernandez T, et al. Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes. *Science of the Total Environment*, 2012, 416: 476—481
- [ 13 ] Liu X H, Han F P, Zhang X C. Effect of biochar on soil aggregates in the loess plateau: Results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2012, 14 ( 6 ) : 975—979
- [ 14 ] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012  
Wen M. Effect of biochar on soil hydrodynamic parameter in the Loess Plateau ( In Chinese ). Yangling: Northwest A&F University, 2012
- [ 15 ] 颜永毫, 郑纪勇, 张兴昌, 等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响. *水土保持学报*, 2013, 27 ( 4 ) : 120—125  
Yan Y H, Zheng J Y, Zhang X C, et al. Impact of biochar addition into typical soils on field capacity in Loess Plateau ( In Chinese ). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 ( 4 ) : 120—125
- [ 16 ] 阳宋, 刘连友, 严平, 等. 土壤可蚀性研究述评. *干旱区地理*, 2006, 29 ( 1 ) : 124—131  
Song Y, Liu L Y, Yan P, et al. A review of soil erodibility research ( In Chinese ). *Arid Land Geography*, 2006, 29 ( 1 ) : 124—131
- [ 17 ] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀. 陕西: 陕西人民出版社, 1997  
Liu B Z, Wu F Q. Soil erosion ( In Chinese ). Shaanxi: Shaanxi People's Publishing House, 1997
- [ 18 ] Jien S H, Wang C S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 2013, 110: 225—233
- [ 19 ] Wang C, Walter M T, Parlange J Y. Modeling simple experiments of biochar erosion from soil. *Journal of Hydrology*, 2013, 499: 140—145
- [ 20 ] 刘祥宏. 生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用. 杨凌: 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 2013  
Liu X H. Effects of biochar application on soil improvement on the Loess Plateau ( In Chinese ). Yangling: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy Sciences, 2013
- [ 21 ] Beck D A, Johnson G R, Spolek G A. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution*, 2011, 159 ( 8/9 ) : 2111—2118
- [ 22 ] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准. *水土保持通报*, 1987, 7 ( 1 ) : 38—44  
Zhou P H, Wang Z L. Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau ( In Chinese ). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1987, 7 ( 1 ) : 38—44
- [ 23 ] 王占礼, 邵明安. 黄土高原典型地区土壤侵蚀共性与特点. *山地学报*, 2001, 19 ( 1 ) : 87—91  
Wang Z L, Shao M A. On commonness and speciality of soil erosion in typical regions of the Loess Plateau ( In Chinese ). *Journal of Mountain Science*, 2001, 19 ( 1 ) : 87—91
- [ 24 ] 陶敬轩. 析因试验与因子贡献率. *数学的实践与认识*, 2006, 36 ( 11 ) : 105—109  
Tao J X. Analyze and test of factors and contribution rate ( In Chinese ). *Mathematics in Practice and Theory*, 2006, 36 ( 11 ) : 105—109
- [ 25 ] 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. *中国农学通报*, 2011, 27 ( 24 ) : 207—213  
Gao H Y, He X S, Geng Z C, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity ( In Chinese ). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 ( 24 ) : 207—213
- [ 26 ] Dugan E, Verhoef A, Robinson S, et al. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities ( WHC ) of three soils from Ghana. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for

- a Changing World 2010: 9—12
- [ 27 ] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用. 自然资源学报, 1999, 14 ( 4 ) : 345—351  
Liu B Y, Zhang K L, Jiao J Y. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model ( In Chinese ) . Journal of Natural Resources, 1999, 14 ( 4 ) : 345—351
- [ 28 ] Olson T, Wischmeier W. Soil erodibility evaluation for soils on the runoff and erosion stations. Soil Science Society of American Proceedings, 1963, 27 ( 5 ) : 590—592
- [ 29 ] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44 ( 1 ) : 7—13  
Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China ( In Chinese ) . Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 ( 1 ) : 7—13
- [ 30 ] 刘宝元, 张科利, 谢云. 土壤侵蚀模型. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.  
Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. Soil loss prediction model ( In Chinese ) . Beijing: China Science and Technology Press, 2001
- [ 31 ] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析. 水土保持通报, 2003, 23 ( 1 ) : 16—19  
Wu F Q, Zhao X N, She D. Analysis on affecting factors of soil infiltration in slope farm land ( In Chinese ) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23 ( 1 ) : 16—19
- [ 32 ] 王育红, 蔡典雄, 姚宇卿, 等. 保护性耕作对豫西黄土坡耕地降水产流、土壤水分入渗及分配的影响. 水土保持学报, 2008, 22 ( 2 ) : 29—32  
Wang Y H, Cai D X, Yao Y Q, et al. Effects of conservation tillage on rainfall runoff, soil water infiltration and distribution on Loess sloping farming in the western part of Henan ( In Chinese ) . Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 ( 2 ) : 29—32
- [ 33 ] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响. 应用生态学报, 2013, 24 ( 1 ) : 105—113  
Gao L Q, Zhao Y G, Qin N Q, et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in hilly Loess Plateau region of Northwest China ( In Chinese ) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 ( 1 ) : 105—113
- [ 34 ] 念焦, 王占礼, 刘俊娥. Jag C162对黄土坡面降雨入渗的调控效应研究. 水土保持通报, 2009, 34 ( 1 ) : 25—31  
Nian J, Wang Z L, Liu J E. Regulating effect of Jag C162 application on infiltration on Loess slope ( In Chinese ) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 34 ( 1 ) : 25—31
- [ 35 ] Levy G J, Levin J, Gal M, et al. Polymers effects on infiltration and soil-erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56 ( 3 ) : 902—907

## Effect of Biochar Application on Erodibility of Plow Layer Soil on Loess Slopes

WU Yuanyuan<sup>1, 3</sup> YANG Mingyi<sup>1, 2†</sup> ZHANG Fengbao<sup>1, 2</sup> ZHANG Jiaqiong<sup>1, 2</sup> ZHAO Tianyin<sup>2</sup>  
LIU Miao<sup>1, 3</sup>

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

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

( 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China )

**Abstract** The Loess Plateau is one of the areas that suffer the most serious soil erosion and the soil in the area is characterized by low soil fertility and high soil erodibility. Thanks to its inherent characteristics and physicochemical properties, biochar has become a novel soil structure amendment. However, so far studies on biochar have mostly focused on its effects of improving soil physical and chemical properties and plant growth conditions, reducing greenhouse gas emission and remedying polluted soil, and demonstrated that its positive effects on soil quality, soil bulk density, soil porosity, quantity and structure of soil aggregate and soil water dynamics. Little has been reported on its effects on soil resistance to erosion. Getting to know the effects of biochar on soil erosion will be of great significance not only to soil and water conservancy, but

also to soil building and crop yield. An indoor artificial rainfall experiment was carried out to explore effect of biochar on sheet erosion on loessal soil slope. The experiment was designed to have one rainfall intensity ( $90 \text{ mm h}^{-1}$ ), five application rates (0%, 1%, 3%, 5% and 7%) and three particle sizes ( $< 2\text{mm}$ ,  $< 1\text{mm}$  and  $< 0.25\text{mm}$ ) of biochar of sawdust. Results show that the effect of biochar application on erodibility of loessal soil plow layers is attributed mainly to its effects altering composition and porosity of the soil and the effect of its own properties on water, which were embodied in delayed runoff and reduced runoff and sediment yields and sediment in runoff. Incorporation of biochar, the same in particle size, shortened the duration of runoff and the effect intensified with rising application rate of biochar. However, when the application rate was lower than 3%, it delayed runoff, but when the rate went on rising, it affected runoff reversely. Incorporations of biochar, the same in rate, but different in particle size, did not show much difference in affecting time of runoff yield. Incorporation of biochar of any size at a rate of 1% demonstrated runoff and sediment reducing effects in every rainfall event. So, in exploring effects of biochar application rate on runoff and sediment yields, it is essential to take into account particle size of the biochar. Biochar application rate, biochar particle size, interaction of the two elements and other uncontrollable factors were responsible for 21.35%, 7.27%, 41.19% and 30.20%, respectively, of the variation of runoff yield brought about by rainfall and for 32.9%, 8.66%, 35.21% and 23.23%, respectively, of the variation of sediment content in runoff. As the biochar particle size does not have much influence on soil erodibility and sediment yield, biochar application rate, interaction between content and particle size of the biochar, and other uncontrollable factors, are the factors contributing 37.16%, 34.46% and 28.38%, respectively, to variation of soil erodibility and 32.48%, 35.59% and 31.94%, respectively, to variation of erosion. Obviously, biochar application rate and interaction between content and particle size of the biochar are major factors affecting rainfall erosion significantly, and particle size of biochar is a minor one. Though this study is a small scale research on mechanism of biochar affecting soil erosion, the findings in this study may serve as reference of scientific significance to large-scale researches on effect of biochar on soil erosion in future.

**Key words** Sheet erosion; Soil erodibility; Biochar; Loess slope

(责任编辑: 檀满枝)