# 不同腐殖酸类对黄土坡面侵蚀和养分流失的影响

吴军虎<sup>1</sup>,朱端端<sup>1</sup>,王海洋<sup>2</sup>,杨婷<sup>1</sup>,刘业伟<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,西安 710048;2. 杭州华耕土地规划设计咨询有限公司,杭州 310012; 3. 江西省水利科学研究院,南昌 330029)

摘要:在陕西省长武县黄土高原农业生态试验站进行了在相同的上方来水量 18 L/min 条件下 3 种不同腐殖酸 类(NHA、BFA、FA)的黄土坡面侵蚀和养分流失的试验,分析了不同腐殖酸类及不同量的同一腐殖酸对土壤侵蚀 和养分流失的影响。结果表明:不同量的 NHA 处理下,径流量均随时间的增加而增加,NHA 浓度 150,300 g/m<sup>2</sup> 的坡面径流量是 500 g/m<sup>2</sup> 的坡面径流量的 1.14,1.08 倍,含沙率和 Br<sup>-</sup>浓度均随时间的增加而减少,累积径流 量、累积泥沙量、累积流失量均随用量的增加而减少,150,300 g/m<sup>2</sup>的坡面累积泥沙量是用量 500 g/m<sup>2</sup> 的 2.16, 1.87倍,累积 Br<sup>-</sup>流失量是用量 500 g/m<sup>2</sup> 的 1.38,1.23 倍,用量 500 g/m<sup>2</sup> NHA 对防止土壤侵蚀和养分流失的效 果最佳;不同浓度 FA 处理下,径流量随时间的增加而增加,FA 浓度为 0.1%,0.03%的累积径流量是浓度 0.05%的1.19,1.33倍,含沙率和Br<sup>-</sup>浓度大体随时间的增加而减少,累积径流量、累积泥沙量、累积流失 量均随浓度的增加先减少后增加,浓度为 0.1%,0.03%的累积泥沙流失量是浓度 0.05%的 3.03,4.09倍, 累积 Br<sup>-</sup> 流失总量是 0.05%Br<sup>-</sup> 流失总量的 1.1,1.26 倍,浓度 0.5%FA 对防止土壤侵蚀和养分流失的效 果最佳;不同浓度 BFA 处理下,径流量随时间的增加而增加,BFA 浓度为 0.1%,0.05%的坡面累积径流量 是浓度 0.03%的 1.15,1.1 倍,含沙率和 Br<sup>-</sup>浓度随时间的增加而减少,累积径流量、累积泥沙量随浓度的 增加而增加,累积流失量随浓度的增加先减少后增加,浓度为0.1%,0.05%累积泥沙量是0.03%累积泥沙总 量的1.36,0.49倍,Br<sup>-</sup>流失总量是0.05%Br<sup>-</sup>流失总量的4.06,3.5倍,浓度0.5%BFA对防止土壤侵蚀和养分流 失的效果最佳;综合考虑3种不同腐殖酸类防止坡面侵蚀和养分流失效果为BFA>FA>NHA。 关键词: 天然腐殖酸(NHA);矿源黄腐酸(FA);生化黄腐酸(BFA);黄土坡面;侵蚀;养分流失 中图分类号:S157.2 **文章编号:**1009-2242(2017)01-0024-06 文献标识码:A DOI: 10. 13870/j. cnki. stbcxb. 2017. 01. 005

# Effect of Different Types Humic Acid Class on Erosion and Nutrient Loss on Loess Slope

WU Junhu<sup>1</sup>, ZHU Duanduan<sup>1</sup>, WANG Haiyang<sup>2</sup>, YANG Ting<sup>1</sup>, LIU Yewei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xian University of Technology, Xian 710048;2. HuaGeng Land Planning and Design Consulting co. LTD,

Hangzhou 310012;3. Jiangxi Provincial Research Institute of Water Resources, Nanchang 330029)

Abstract: Under the conditions of three different types humic acid on erosion and nutrient loss on loess slope experiment above the same amount of 18 L/min in the Chinese academy of sciences agricultural ecological experimental station of the loess plateau, analyzed the impact of different types humic acid (NHA, FA and BFA) and humic acid in different amount on soil erosion and nutrient loss. Results showed that the different amount of NHA treatment, runoff increased with time. Compared with the slope runoff of 500 g/m<sup>2</sup>, NHA content of 150 g/m<sup>2</sup> and 300 g/m<sup>2</sup> was 1.14 times, 1.08 times respectively. Sand content and concentration of Br<sup>-</sup> both decreased with the increase of time, cumulative runoff, sediment accumulation, the cumulative loss all decreased with the increase of dosage, slope cumulative runoff of 150 g/m<sup>2</sup>, 300 g/m<sup>2</sup> was 2.16 times, 1.87 times as much as 500 g/m<sup>2</sup>, Br<sup>-</sup> cumulative loss was 1.38 times, 1.23 times as much as 500 g/m<sup>2</sup>. Dosage of 500 g/m<sup>2</sup> NHA to prevent soil erosion and nutrient loss was the best. Under different concentrations of FA, runoff increased with time, the cumulative runoff of concentration of 0.1%, 0.03% was 1.19

**收稿日期:**2016-08-05 **资助项目:**国家自然科学基金重点项目(51239009);西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地科研项目(2016ZZKT-9);陕西省教育厅 科研计划项目(14JK1518)

第一作者:吴军虎(1974—),男,博士,副教授,陕西铜川人,硕士生导师,主要从事节水灌溉、土壤溶质运移研究。E-mail:wujunhu@126.com

times, 1. 33 times of 0. 05% concentration, Br<sup>-</sup> concentration and rate of sand containing substantially reduced with increasing time, cumulative runoff, accumulated sediment and cumulative loss decreased firstly and then increased with increasing concentration, the sediment loss of the concentration of 0. 1%, 0. 03% was 3. 03 times, 4. 09 times as much as 0.05%, cumulative Br<sup>-</sup> loss was 1. 1 times, 1. 26 times to the total loss of 0.05% Br<sup>-</sup>, and the effect of 0.5% FA concentration on soil erosion and nutrient loss was the best. Under different concentrations of BFA, runoff increased with time, slope cumulative runoff of BFA concentration of 0.1%, 0.05% was 1. 15 times, 1. 1 times as much as 0.03%, sandy rate and Br<sup>-</sup> concentration decreased with increasing time. Cumulative runoff, sediment accumulation increased with the increase of the concentration, however, cumulative runoff increased firstly and then decreased with the increase of concentration, the cumulative sediment of concentration of 0.1%, 0.05% was 1. 36 times, 0.49 times as much as 0.03%. The total loss of 0.01% Br<sup>-</sup> and 0.03% Br<sup>-</sup> was 4.06 times, 3.5 times as much as 0.05% Br<sup>-</sup>, and the effect of 0.5% BFA concentration on soil erosion and nutrient loss was the best. Comprehensive consideration of the effect of 0.5% BFA concentration on soil erosion and nutrient loss on the slope was BFA>FA>NHA. Keywords: NHA;FA;BFA;the loess slope;erosion;nutrient loss

腐殖酸类是一类广泛存在于自然界的高分子物质, 是动植物通过一系列复杂的生化反应形成的,占水体和 土壤这2种生态体系总有机质的50%~80%[1-2]。具 有羧基、酚羟基、醇羟基、甲氧基、酮基、酯基等多种活 性官能团,赋予腐殖质酸性、亲水性、界面活性、阳离 子交换能力、络合及吸附性等优点,因此广泛应用于 工、农、林、牧、石油、医药、环保、建材等领域,具有"绿 色肥料"的美称<sup>[3-5]</sup>。腐殖酸类按 PH 酸碱性可分为 腐殖酸、富里酸和胡敏素,腐殖酸和富里酸是组成土 壤腐殖质的最重要组分,在改善土壤团粒、增加土壤 团聚体的水稳定性、提高和保持土壤肥力等方面有着 显著作用[6]。因此如果在土壤中施加腐殖质肥料,可 胶结土壤中的黏粒,形成水稳定性结构的小水库,增 加了土壤空隙,进而提高土壤保水保肥能力,且腐殖 质中的羧基、羟基等官能团能与氮素形成络合物,这 些络合物在土壤存留时间长,逐渐分解,提高氮素利 用率。腐殖质来源丰富,易被土壤中微生物所降解, 且无毒,因此可以将其作为绿色肥料。已经有学者对 腐殖酸类的作用进行了研究,党亚爱等[7]以黄土高原 0-200 cm 土壤剖面为研究对象,分析不同剖面腐殖 酸、胡敏酸和富里酸含量随土层深度和地理位置的变 化趋势;褚慧等[8]研究不同种植模式下土壤腐殖质的 变化,发现土壤在长期有机种植模式下利于土壤有机 碳的积累和土壤腐殖化进程;刘利军等[9]运用盆栽试 验,分析了不同 PH 下腐殖酸对土壤 As 的转化和毒 性影响,结果表明腐植酸更有利于土壤中 AE-As 向其他相对稳定的形态转化;刘兰兰等[10]分析了在 生姜不同生育期腐殖酸肥料对土壤微生物和酶活性 的影响。还有不少学者研究腐殖酸对烤烟品质成分的 影响[11-12]、腐殖酸的吸附性研究[13-14]等。然而到目前腐 殖酸类在黄土坡面侵蚀和养分流失的研究甚少[15]。郭 太龙等<sup>[16]</sup>、孔刚等<sup>[17]</sup>、王辉等<sup>[18]</sup>、张亚丽等<sup>[19]</sup>在陕西长 武县、神木县,山西水保所等地开展了不同坡度、植被类 型、碎石粒径、不同上方来水量、秸秆覆盖度等方面对黄 土坡面土壤侵蚀及其养分流失的室内室外试验,并无腐 殖酸类在黄土坡面侵蚀和养分流失的研究。本文以陕 西长武县黄土坡面为研究对象,开展了在相同的上方来 水量 18 L/min 条件下 3 种不同腐殖酸(NHA、BFA、FA) 对黄土坡面侵蚀和养分流失的试验,分析了不同的腐殖 酸及不同量的同一腐殖酸对土壤侵蚀和养分流失的影 响,研究成果为防止黄土坡面养分流失及腐殖酸在水保 方面研究提供了一定的参考。

# 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2014 年 7 月至 2016 年 5 月在中国科学 院长武黄土高原农业生态试验站进行。试验区位于 长武县洪家镇王东村(107°44′ N,35°13′ E),年均降 水量 584 mm,分布不均,最高气温 36.9 °C,最低气 温-24.9 °C,平均气温 9.1 °C,海拔 1 202 m,年日照 时数 2 226.5 h<sup>[20]</sup>,属于暖温带半干旱大陆性季风气 候,该试验小区为多年撂荒地,主要植被类型是长芒 草和白羊草,土壤容重在 0.99~1.47 g/cm<sup>3</sup>之间,平 均容重 1.33 g/cm<sup>3</sup>,有机质 2.24 g/cm<sup>3</sup>,全氮 0.22 g/kg,土壤 pH 8.3,小区表层(50 cm 以上)土壤是黄 绵土,下层为黑垆土,属于粉砂质壤土,粘土、粉粒、砂 粒各占 3.43%,91.44%,5.13%。试区内塬面平坦 宽阔,土壤侵蚀微弱,塬边附近沟道分布较多,沟岸滑 塌和沟头溯源侵蚀现象严重。

### 1.2 试验设计及测定

试验装置由供水装置、放水冲刷装置和径流小区组成,径流小区10 m×1 m,坡度10.5°,小区之间用

400

350

300

250

200

100

50

0

35

流

全

职 150

石棉瓦隔开,如图1所示。根据当地降雨观测资料、 小区地形及地面径流汇流后可能出现的最大径流量 确定放水流量为18 L/min。

在施加不用的腐殖酸以及不同量的腐殖酸。其中 施加 NHA 与 0-5 cm 土壤干湿混合,先把试验小区 0-5 cm 土壤装入相应筒中,向每个筒中施加不同量 的天然腐殖酸 150(NHA<sub>1</sub>),300(NHA<sub>2</sub>),500(NHA<sub>3</sub>) g/cm<sup>2</sup>,搅动均匀后铺入试验小区表层;施加 BFA、FA 是将其配置不同浓度的水溶液,用喷雾器以雾状均匀 的喷湿在小区土壤表面 3 748 L/hm<sup>2</sup>,浓度分别为 0.1% (BFA<sub>1</sub>, FA<sub>1</sub>), 0.03% (BFA<sub>2</sub>, FA<sub>2</sub>), 0.05%(BFA3、FA3);施加腐殖酸2个月后进行放水试验。试 验前先将坡面的影响物清除,采用网格测定覆盖度,设 计覆盖度为 60%, 去除多余杂草, 人工拔草, 待其放置 10 d 后进行试验。试验测定步骤:每次放水前用称重 法率定进水口的放水流量,在小区底部放置集流桶接 水,放水时间从坡底出现径流开始,持续35 min,地面 产流后的前 20 min 内,每分钟用塑料桶收集一次径流 样,此后每间隔4min取1次。试验测定方法:(1)在放 水前24h及放水后24h分别在坡上、坡中、坡下3个 部位沿土壤坡面采集土样,垂直分层每隔5 cm 取样, 取至40 cm。土样用于测定土壤含水量,采用烘干法测 定。(2)径流放置24h后,用取样瓶取各时段的径流, 然后用雷磁 PXSI-216F 型离子计测定径流样中溴离 子浓度。(3)用电子秤称量各时段的径流量,过滤晒干 泥沙,称量径流含沙量。



图 2

#### 结果与分析 2

## 2.1 施加不同腐殖酸及不同量的同种腐殖酸对黄土 坡面径流的影响

坡面径流是一个做功耗能的过程,是影响坡面侵 蚀的主要参数之一。由图2可知,不同腐殖酸类不同 用量处理下,径流量呈先增长后稳定趋势;NHA 前 10 min 径流量增长迅速,10 min 后基本达到稳定,径 流量大小顺序依次为 NHA<sub>1</sub> > NHA<sub>2</sub> > NHA<sub>3</sub>; FA 20 min 后保持稳定,20 min 前波动性较大,径流量大 小顺序依次为  $FA_3 > FA_1 > FA_2$ ,同 BFA 一致。3 种 用量下的累积径流量均随时间的增加而增加,前20 min 增长较快,20 min 后趋于稳定,NHA 累积径流 量大小排序为  $NHA_1 > NHA_2 > NHA_3$ ,  $NHA_1$ 、  $NHA_2$  的 坡 面 径 流 量 是  $NHA_3$  的 坡 面 径 流 量 的 1.14,1.08 倍,对图 2 进行拟合,拟合结果见表 2,在 NHA<sub>1</sub>、NHA<sub>2</sub> NHA<sub>3</sub> 的用量处理下,拟合斜率依次 为11.4,10.98,10.07,与NHA的用量呈反比,可知 NHA 用量影响着累积径流量的变化,用量越大径流 量越小, FA 累积径流量大小排序为  $FA_3 > FA_1 >$  $FA_2$ ,( $FA_1$ 、 $FA_3$ 的坡面累积径流量是  $FA_2$  坡面径流 量的 1.19,1.33 倍,在 FA1、FA2、FA3 的用量处理 下,拟合斜率依次为 9.90,9.54,10.92。BFA 累积径 流量大小排序为 BFA1>BFA2>BFA3, BFA1、BFA3 的坡面径流量是 BFA₂ 坡面径流量的 1.15,0.97倍, 在 FA1、FA2、FA3 的用量处理下, 拟合斜率依次为 10.65,8.99,11.84。整体来看,NHA 径流量增长速 率明显高于 FA、BFA,这主要是因为 NHA 的吸附强 度高于 FA、BFA,所以径流量达到稳定时间较快, NHA 吸附量低于 FA、BFA,所以 NHA 的径流量最 大,3种腐殖酸减少径流效果最明显是 BFA,对于同 种 NHA 减少径流效果最明显是 NHA3, 对于 FA 的 是 FA<sub>2</sub>,对于 BFA 的是 BFA<sub>3</sub>。

. <u>6</u>. ô. ô.

25

施加不同量的腐殖酸对坡面径流量随时间的影响

27

ñ

29

31

.....

33

BFA,累积径流量

NHA。累积径流量

BFA<sub>2</sub>径流量

FA,累积径流量

<b>从</b> 11月周沮散示你任师里的日世。	表 2	2 不同腐殖酸累利	只径流量拟合曲线
--------------------------	-----	-----------	----------

试验处理	拟合方程	$R^2$
$NHA_1$	y = 11.4x - 24.78	0.9186
$\rm NHA_2$	y = 10.98x + 21.21	0.9200
$NHA_3$	y = 10.07x + 21.78	0.9212
$FA_1$	y = 9.9x + 21.28	0.9215
$FA_2$	y = 9.54x + 24.95	0.9143
$FA_3$	y = 10.92x + 27.92	0.9291
$BFA_1$	y = 10.65x + 25.08	0.9191
$BFA_2$	y = 8.99x + 18.97	0.9558
$BFA_3$	y = 11.84x + 32.54	0.9184

#### 2.2 施加不同腐殖酸及不同量的同种腐殖酸对黄土 坡面径流泥沙量的影响

径流含沙量是影响坡面侵蚀的重要参数之一,在 坡面侵蚀过程中,含沙量随时间呈动态形式。图3为 3种不同的腐殖酸(NHA、BFA、FA)及不同量的同 种腐殖酸在同等上方来水量 18 L/min 对黄土坡面含 沙量的影响,其含沙量均呈下降趋势,前 20 min 下降 迅速,20 min 后基本达到稳定。HA 用量的含沙量

大小顺序为 NHA<sub>1</sub>>NHA<sub>2</sub>>NHA<sub>3</sub>, NHA<sub>1</sub>、NHA<sub>2</sub> 呈波动下降,说明土壤稳定性较差;FA 用量的含沙 量大小顺序为  $FA_3 > FA_1 > FA_2$ , BFA 用量的径流量 大小顺序为 BFA3>BFA1>BFA2,BFA3 含沙率递 减缓慢,波动性较小。其累积泥沙量均随时间的增加 而增加,前20 min 增长较快,20 min 后趋于稳定。 NHA 3 种不同用量下累积含沙量大小排序为 NHA<sub>1</sub>> NHA<sub>2</sub>>NHA<sub>3</sub>,这说明在 NHA 处理下,用量越大, 侵蚀泥沙量越小,用量与防止泥沙量流失效果呈正 比。对图 3 进行 拟合, 拟合结果如表 3, 可知在 NHA<sub>3</sub>用量下效果最明显。FA 累积含沙量大小排 序为 $FA_3 > FA_1 > FA_2$ ,  $FA_1$ 、 $FA_3$ 的坡面含沙量是 FA2 坡面含沙量的 3.03 倍和 4.09 倍,从拟合结果可 知随着浓度增大,泥沙量先减小后增大。BFA 累积 含沙量大小排序为 BFA<sub>1</sub> > BFA<sub>2</sub> > BFA<sub>3</sub>, BFA<sub>1</sub>、 BFA3 的坡面径流量是 BFA2 坡面径流量的 1.36, 0.49倍,可知浓度越小,累积泥沙量越小。



图 3	他加个问重的腐殖酸坡面系积古沙重

表3 不同腐殖酸累积含沙量拟合曲	线
------------------	---

试验处理	拟合方程	$R^2$
NHA1	$y = 4294 \ln(x) - 1435$	0.9584
$\rm NHA_2$	$y = 3741 \ln(x) - 1064$	0.9668
$NHA_3$	$y = 1810 \ln(x) + 196$	0.9688
$FA_1$	$y = 2179 \ln(x) + 226$	0.9691
$FA_2$	$y = 945 \ln(x) + 444$	0.9824
$FA_3$	$y = 3089 \ln(x) - 401$	0.9755
$BFA_1$	$y = 1906 \ln(x) + 709$	0.9822
$BFA_2$	$y = 730 \ln(x) - 242$	0.9558
$BFA_3$	$y = 2391 \ln(x) + 1833$	0.9746

#### 2.3 施加不同腐殖酸及不同量的同种腐殖酸对黄土 坡面养分流失的影响。

图 4 为 3 种不同的腐殖酸(NHA、FA、BFA)及不 同量的同种腐殖酸在同等上方来水量 18 L/min 对黄 土坡面养分流失的影响。总体上,放水初期径流溶质 Br<sup>-</sup>的浓度较高,随着时间变化,Br<sup>-</sup>的浓度迅速衰减, 20 min 后基本达到稳定且值较小。3 种 NHA 用量的 Br<sup>-</sup>浓度大小顺序为 NHA<sub>1</sub> > NHA<sub>2</sub> > NHA<sub>3</sub>,3 种 FA 用量的  $Br^{-}$ 浓度大小顺序为  $FA_3 > FA_1 > FA_2$ ;3 种

BFA 用量的 Br<sup>-</sup>浓度大小顺序为 BFA<sub>1</sub> > BFA<sub>3</sub> > BFA2;3种腐殖酸类的累积流失量均随时间的增加而 增加,前20min增长较快,20min趋于稳定。NHA累 积流失量大小排序为 NHA<sub>1</sub> > NHA<sub>2</sub> > NHA<sub>3</sub>, 用量 NHA1、NHA2 累积径流 Br<sup>-</sup>流失量是 NHA3 流失量 的 1.38,1.23 倍。对图 4 进行拟合,拟合结果见表 4, 可看出拟合曲线对数项系数随 NHA 用量的增加而 减少。FA 累积流失量大小排序为 FA<sub>3</sub> > FA<sub>1</sub> >  $FA_2$ ,用量  $FA_1$ 、 $FA_3$  累积径流  $Br^-$ 流失量是  $FA_2$ 流 失量的 1.09,1.26 倍, 拟合曲线对数项系数随 FA 浓 度的增加先减少后增加;BFA 累积流失量大小排序 为 BFA<sub>1</sub>>BFA<sub>3</sub>>BFA<sub>2</sub>,用量 BFA<sub>1</sub>、BFA<sub>3</sub>累积径 流 Br<sup>-</sup>流失量是 BFA<sub>2</sub> 流失量的 4.06,3.5 倍。不同 腐殖酸的各种累积量见表 5,总体来看,3种腐殖酸减 少 Br<sup>-</sup>流失量效果 BFA>FA>NHA,对于 NHA 效 果最明显的是 NHA3, 对于 FA、BFA 效果最明显的 都是浓度 FA<sub>2</sub>、BFA<sub>2</sub>。



表 4 不同腐殖酸 Br<sup>-</sup>累积流失量拟合曲线

试验处理	拟合方程	$R^2$
NHA <sub>1</sub>	$y = 4163 \ln(x) + 3529$	0.9477
$\rm NHA_2$	$y = 3814 \ln(x) + 2847$	0.9540
$NHA_3$	$y = 2854 \ln(x) + 2866$	0.9700
$FA_1$	$y = 4090 \ln(x) + 8893$	0.9524
$FA_2$	$y = 2980 \ln(x) + 5564$	0.9578
$FA_3$	$y = 3911 \ln(x) + 6387$	0.9681
$BFA_1$	$y = 4350 \ln(x) + 6443$	0.9822
$BFA_2$	$y = 4503 \ln(x) + 4729$	0.9586
$BFA_3$	$y = 4670 \ln(x) + 9013$	0.9696

表 5 不同腐殖酸的各种累积量

试验处理	拟合方程		$R^2$
NHA1	346.77	12877.85	16267.96
$\rm NHA_2$	328.43	11151.42	14463.33
$NHA_3$	303.61	5971.13	11746.14
$FA_1$	323.89	6911.99	20399.26
$FA_2$	272.31	2279.74	18607.82
$FA_3$	361.87	9332.21	23519.18
$BFA_1$	343.16	9608.23	21280.76
$BFA_2$	298.86	7075.3	5242.04
$BFA_3$	288.97	3490.58	18381.15

## 3 结论

(1)不同 NHA 用量下径流量均随时间的增加而增加,含沙量和 Br<sup>-</sup>浓度均随时间的增加而减少。用量 NHA<sub>1</sub>、NHA<sub>2</sub>的坡面累积径流量是用量 NHA<sub>3</sub>的1.14, 1.08倍,累积径流量、径流量大小与天然腐殖酸用量呈 正比,用量 NHA<sub>1</sub>、NHA<sub>2</sub>的坡面累积泥沙量是用量 NHA<sub>3</sub>的 2.16,1.87倍,用量 NHA<sub>1</sub>、NHA<sub>2</sub>的坡面 累积 Br<sup>-</sup>流失量是用量 NHA<sub>3</sub>的 1.38,1.23倍,累 积泥沙量与 Br<sup>-</sup>流失量的拟合曲线对数项系数随用 量的增加而减少。因此,对黄土坡面而言,NHA<sub>3</sub>防止土壤侵蚀和养分流失的效果最佳。

(2)不同浓度 FA 径流量随时间的增加而增加, 前 20 min 增长较快,20 min 趋于稳定,含沙率和径流 Br<sup>-</sup>浓度均随时间的增加而减少,累积径流量、累积 泥沙量、累积 Br<sup>-</sup>流失量均随浓度的增加先减少后增加。 FA<sub>1</sub>、FA<sub>3</sub>的累积径流量是 FA<sub>2</sub> 的 1. 19 倍和 1. 33 倍, FA<sub>1</sub>、FA<sub>3</sub>的累积泥沙流失量是 FA<sub>2</sub>的 3.03,4.09 倍,FA<sub>1</sub>、FA<sub>3</sub>累积 Br<sup>-</sup>流失总量是 FA<sub>2</sub>Br<sup>-</sup>流失总量 的 1.1,1.26 倍。总体考虑不同浓度 FA 对黄土坡面 土壤侵蚀及养分流失的影响,FA<sub>2</sub>效果最佳。

(3)不同浓度 BFA 径流量随时间的增加而增加, 前 20 min 增长较快,20 min 趋于稳定,含沙率、径流 Br<sup>-</sup>浓度随时间的增加而减少;累积径流量、累积泥 沙量均随浓度的增加而增加,累积 Br<sup>-</sup>流失量随浓度 的增加先减少后增加。BFA<sub>1</sub>、BFA<sub>2</sub>的坡面累积径 流量是 BFA<sub>3</sub>的1.15,1.1倍,BFA<sub>1</sub>、BFA<sub>2</sub>累积泥沙 量是 BFA<sub>3</sub>累积泥沙总量的1.36,0.49倍,BFA<sub>1</sub>、 BFA<sub>2</sub>的 Br<sup>-</sup>流失总量是 BFA<sub>3</sub>的 Br<sup>-</sup>流失总量的 4.06,3.5倍。总体考虑不同浓度 BFA 对黄土坡面 土壤侵蚀及养分流失的影响,BFA<sub>3</sub>效果最佳。

(4)3种不同腐殖酸防止坡面侵蚀和养分流失效 果 BFA>FA>NHA,Br<sup>-</sup>流失量是影响养分流失的主 要参数,吸附量 BFA>FA>NHA,吸附强度 BFA< FA<NHA,故 NHA 达到稳定速率快,但累积径流 量大,同理 BFA 的养分流失最小。

### 参考文献:

- [1] 王亚军,马军.水体环境中天然有机质腐殖酸研究进展 [J].生态环境学报,2012,21(6):1155-1165.
- [2] 牛育华,李仲谨,郝明德,等.腐殖酸的研究进展[J].安 徽农业科学,2008,36(11):4638-4639,4651.
- [3] 丁文川,田秀美,王定勇,等.腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(N)的影响机制研究[J].环境科学,2012,11(33): 3847-3853.
- [4] 唐景春,孙青,王如刚,等. 堆肥过程中腐殖酸的生成演 化及应用研究进展[J]. 环境污染与防治,2010,32(5): 73-77,88.
- [5] 于春艳,赵慧敏,陈硕,等.水体中腐殖酸与 Fe(Ⅲ)的络 合物对 2,4-D 光降解的作用[J].环境科学,2010,31 (2):379-384.
- [6] 窦森,李艳,关松,等.腐殖物质特异性及其产生机制 [J].土壤学报,2016,53(4):821-831.

- [7] 党亚爱,李世清,王国栋.黄土高原典型区域土壤腐殖酸组 分剖面分布特征[J].生态学报,2012,32(6):1820-1829.
- [8] 褚慧,宗良纲,汪张懿,等.不同种植模式下菜地土壤腐 殖质组分特性的动态变化[J].土壤学报,2013,50(5): 931-939.
- [9] 刘利军,洪坚平,闫双堆,等.不同 pH 条件下腐植酸对 土壤中砷形态转化的影响[J].植物营养与肥料学报, 2013,19(1):134-141.
- [10] 刘兰兰,史春余,梁太波,等.腐植酸肥料对生姜土壤微 生物量和酶活性的影响[J].生态学报,2009,29(11): 6136-6141.
- [11] 张喜峰,张立新,高梅,等.不同氮肥形态和腐殖酸对陕西典型生态区烤烟化学成分和产质量的影响[J].草业学报,2013,22(6):60-67.
- [12] 叶协锋,凌爱芬,张斌,等.腐殖酸对烤烟土壤性状及烟 叶品质的影响[J]. 华北农学报,2009,24(5):170-173.
- [13] 丁文川,田秀美,王定勇,等.腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(\])的影响机制研究[J].环境科学,2012,33(11):
- (上接第23页)
- [6] 赵光旭,王全九,张鹏宇,等.短坡坡长对坡地风沙土产 流产沙及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2016, (4):13-18.
- [7] 朱司航,王红,周大迈,等.石灰岩地不同作物坡面土壤 侵蚀和养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30 (3):12-18.
- [8] Cookson W R, Muller C, Obrien P A, et al. Nitrogen dynamics in an Australian semiarid grassland soil[J]. Ecology, 2006, 87(8): 2047-2057.
- [9] 闫建梅,何丙辉,田太强,等.施肥水平与耕作模式对紫 色土坡耕地地表径流磷素流失的影响[J].水土保持学 报,2015,29(1):132-136.
- [10] 袁敏,文石林,徐明岗,等. 湘南红壤丘陵区不同生态种 植模式下土壤磷素流失特征[J]. 应用生态学报,2013, 24(11):3162-3168.
- [11] 王全九,王辉.黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移有效 混合深度模型特征分析[J].水利学报,2010,41(6): 671-676.
- [12] 赵伟,杨培岭,李海山,等.呼伦湖流域3种利用方式草 场水土及氮磷流失特征[J].农业工程学报,2011,27

3847-3853.

- [14] 周岩梅,张琼,汤鸿霄.多环芳烃类有机物在腐殖酸上的吸附行为研究[J].环境科学学报,2010,30(8):1564-1571.
- [15] 董文财. 黄土高原坡面养分径流流失模拟研究[D]. 陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境中心,2012.
- [16] 郭太龙,王全九.黄土坡面土壤侵蚀中溶质随径流迁移的水动力特性研究[J].水土保持学报,2008,22(5):17-21,25.
- [17] 孔刚,王全九,樊军.坡度对黄土坡面养分流失的影响 实验研究[J].水土保持学报,2007,21(3):14-18.
- [18] 王辉,王全九,邵明安.人工降雨条件下黄土坡面养分随径 流迁移试验[J].农业工程学报,2006,22(6):39-44.
- [19] 张亚丽.黄土坡面土壤氮磷等化学物质径流迁移与混 合层深度研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [20] 王全九,柴晶,王翔翔.夏闲期降水对黄土旱塬冬小麦 水氮利用效率的影响[J].农业工程学报,2015,31 (24):82-88.

(9):220-225.

- [13] 姜志国.内蒙古达赉湖国家级自然保护区综合考察报告[M].呼和浩特:内蒙古大学出版社,2013:3-337.
- [14] 樊才睿,李畅游,孙标,等.不同放牧制度草场产流产沙 过程模拟试验[J].水土保持学报,2016,30(1):47-53.
- [15] Wu X Y,Zhang L P,Yu X X. Impacts of surface runoff and sediment on nitrogen and phosphorus loss in red soil region of southern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(7):1939-1949.
- [16] Ahuja L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process[J]. Soil Science Society of American Journal, 1990, 54(4): 149-188.
- [17] 韩佩江,李卫平,于玲红,等.不同放牧强度对流域降雨 径流中氮磷流失的影响[J].水土保持研究,2016,23 (1):8-12.
- [18] Dodd R J, Sharpley A N. Conservation practice effectiveness and adoption: Unintended consequences and implications for sustainable phosphorus management
  [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 104 (3):373-392.