

# 不同污泥施用量条件下赤红壤坡地水土流失特征的研究<sup>\*</sup>

陈炎辉<sup>1</sup>, 杨舜成<sup>2</sup>, 王 果<sup>1</sup>, 陈明华<sup>2</sup>, 陈文祥<sup>2</sup>, 柴 鹏<sup>2</sup>

(1. 福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002; 2. 福建省水土保持试验站, 福州 350003)

**摘 要:** 研究了人工模拟降雨条件下不同污泥施用量对赤红壤坡地上水土流失特征的影响。结果表明: 污泥撒施后的前期(1 d 和 18 d)径流中, 各施用量处理的径流颗粒物浓度及流失量均达到峰值, 撒施 60 t/hm<sup>2</sup> 对应峰值分别为 4 517.0 mg/L 和 79.3 g/m<sup>2</sup>, 为撒施 120 t/hm<sup>2</sup> 对应峰值的 83.8% 和 96.7%, 此后撒施 60 t/hm<sup>2</sup> 径流颗粒物浓度和流失量不同程度高出撒施 120 t/hm<sup>2</sup> 处理, 是同期对应值 1.1~4.1 倍。模拟试验期内, 撒施 60 t/hm<sup>2</sup> 径流量是撒施 120 t/hm<sup>2</sup> 同期指标的 1.2~2.3 倍, 撒施污泥用量越低, 径流累积产生量和颗粒相(颗粒物和悬浮物)累积流失量越高, 但污泥用量对穴施上述指标并无明显影响。

**关键词:** 施用量; 模拟降雨; 坡地; 水土流失; 污泥

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0001-05

## Effects of the Application Rate of Sewage Sludge on the Losses on Soil and Water of Lateritic Red Slope Soil Plots

CHEN Yan-hui<sup>1</sup>, YANG Shun-cheng<sup>2</sup>, WANG Guo<sup>1</sup>,

CHEN Ming-hua<sup>2</sup>, CHEN Wen-xiang<sup>2</sup>, CHAI Peng<sup>2</sup>

(1. Department of Resources and Environmental Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Water and Soil Conservation Experimental Station in Fujian, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** The effects of different application rates of sewage sludge on soil and water losses of lateritic red slope soil plots were studied under simulated rainfall conditions. When the sludge was broadcasted and mixed with surface soils (BM), the concentration and the loss amount of particulates were the highest at 1 day or 18 days after application. The peak values of the concentration and the loss amount of particulates were 4 517.0 mg/L and 79.3 g/m<sup>2</sup> respectively, for the BM plots receiving 60 t/hm<sup>2</sup> of sewage sludge (BM60), being 83.8% and 96.7% respectively of the corresponding values for the BM plots receiving 120 t/hm<sup>2</sup> of sewage sludge (BM120). Afterwards, the concentration and the loss amount of particulates from the BM60 plots were 1.1~4.1 times higher than those from the BM120 plots. During the whole experimental period, the runoff amounts of BM60 treatment were 1.2~2.3 times of those of BM120 treatment. The accumulative runoff amounts and the accumulative loss amounts of particulates for the BM treatment increased when the application rate decreased. Sludge application rate had no significant effects on the accumulative runoff amounts and accumulative loss amounts of particulates in the runoff for the hole-application treatment.

**Key words:** application rate; simulated rainfall; sloping field; soil and water loss; sewage sludge

污泥含有丰富的营养元素, 有较强的黏性和吸水性能, 对土壤及其生产力有利, 适宜对退化土壤(矿山废弃地、严重水土流失区等)进行生态恢复<sup>[1-2]</sup>。在营养元素普遍缺乏的南方赤红壤坡地施

用污泥, 可改善土壤理化特性(如土壤结构和营养含量)<sup>[3]</sup>, 但潜在风险在于南方多雨, 地表径流强, 累积于坡地上的污泥污染物易在降雨-径流作用下产生面源污染。探讨坡地施用污泥后的水土流失特征,

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-09-22

基金项目: 教育部重点项目(204075); 福建省教育厅重点项目; 福建省科技厅重大专项前期研究项目(2005YZ1001)

作者简介: 陈炎辉(1980-), 男, 福建龙岩人, 博士, 讲师, 从事环境生态研究。E-mail: yhchenm@yahoo.com.cn

通信作者: 王果(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土壤环境化学与污染生态。E-mail: gwang572003@yahoo.com.cn

可为评估赤红壤坡地上污泥污染物随径流的流失风险奠定基础。污泥施用量是影响坡地水土流失的重要因素,直接的研究材料并不多见,但关于污泥用量对土壤理化属性及其它间接效应的影响,国内外学者做了大量研究。有研究认为,随污泥用量增加,土壤水分含量、总孔隙度和饱和导水率均升高,土壤容重则降低<sup>[4]</sup>。还有研究指出,污泥用量愈大,土壤有机质含量和 CEC 增加愈快,土壤容重降幅愈大<sup>[5-6]</sup>。Chow 等研究指出,施用造纸污泥可极大减少地表径流,归因于对土壤结构的破坏<sup>[7]</sup>。陈同斌等研究表明污泥用量越高,栽培基质保水能力越强,但这种差异随时间推移将不断缩小<sup>[8]</sup>。Aggelides 等研究表明,污泥堆肥提高了土壤团聚体稳定性,改良效果与堆肥用量呈正比<sup>[9]</sup>。以上研究结果虽不尽一致,但对污泥用量影响坡地水土流失有一定的参考价值。本文旨在探讨不同施用量条件下,赤红壤坡地上(直形坡、裸地条件、坡度 15°),污泥撒施和穴施处理坡地水土流失随时间的变化特征,为合理确定赤红壤坡地上的污泥用量,降低可能引发的面源

污染风险提供依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 小区设计

野外原位模拟试验布设在福建省厦门市集美水土保持试验站(118°00′23″E、24°37′9.6″N)内,属亚热带海洋性气候,年均气温为 21℃,多年平均降雨量在 1 100 mm 左右。试验在 16 个 15°径流小区上进行。每个小区宽 1 m(与等高线平行),长 5 m(水平投影),水平投影面积 5 m<sup>2</sup>。小区砌成后,前期先分层回填土壤(花岗岩发育的酸性赤红壤,性质见表 1),用少量水喷洒土壤表面,使表土保持平整,并自然沉实一段时期。

## 1.2 试验处理

试验污泥(性质见表 1)取自厦门海沧污水处理厂,将湿污泥晾干、捣碎,过 5 mm 筛,备用。试验共设 5 个处理,各处理重复 2~3 次,随机区组排列。污泥于 2006 年 9 月 2 日一次性施入土壤。试验处理如表 2。

表 1 供试土壤和污泥的部分理化性质

项目	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH	CEC/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	黏粒/ %	粉粒/ %	砂粒/ %
土壤	0.29	0.31	13.0	5.2	5.1	44.7	12.9	42.5
污泥	40.50	11.26	320.1	7.5	27.8	67.4	15.3	17.4

注: pH 水土比为 2.5:1,质地测定采用吸管法,颗粒分级按国际制,其余指标测定参考文献<sup>[10]</sup>。

表 2 试验处理

对照(CK)	撒施 120(BM120)	撒施 60(BM60)	穴施 120(HA120)	穴施 60(HA60)
不施污泥	污泥撒施(broadcasted and mixed with surface soils), 60 kg 干污泥均匀撒在单个小区土面上,用竹耙将污泥与表层约 15 cm 土壤混匀,保持坡面平整,用量为 120 t/hm <sup>2</sup>		污泥穴施(hole-application),每个小区内挖 3 个深度约 35 cm,直径约 60 cm 的土穴,沿小区长边均匀分布排列,每穴施入干污泥 20 kg,表层覆盖土壤,并保持坡面平整,用量为 120 t/hm <sup>2</sup>	

## 1.3 试验方法与测定

严重的地表径流和土壤侵蚀多发生在历时较短而雨强大的暴雨事件中,本研究采用人工模拟降雨模拟当地可能出现的大暴雨。分别于污泥施用后第 1, 18, 65, 125, 195 d,进行了 5 组人工模拟降雨,每组降雨持续 20 min,降雨强度分别为:(1.473±0.09), (1.468±0.18), (1.502±0.09), (1.531±0.13), (1.505±0.14) mm/min。

人工模拟降雨采用中科院水土保持研究所研制的组合侧喷式模拟降雨器。产流试验选定直径 13 mm 的出流孔板,压力为 0.2 MPa,以达到所需要求。模拟降雨试验一般于早晨 5:00–9:00 时或黄

昏后 18:00–22:00 时无风时进行。将降雨装置安放在小区外围埂的适当位置,采用 1 对侧喷式降雨设备对喷,4 个小区一组,先用小孔径喷头产生的小雨饱和土壤,使其处于产流的临界状态,尽量控制各小区表层土壤含水量一致。每组小区均匀布设 8 个雨量器(铅垂直方向放置),降雨历时为 20 min,产流结束后,分别记录径流量和雨量器中的降雨量。将接盛径流液的塑料桶内的径流样搅匀,平行采集两份浑水样(分别用于混匀样和静置样指标的测定),径流样尽快送回实验室分析。降雨结束后,各小区全坡面覆盖塑料布,因此试验未受天然降雨影响。

取适量混匀样(摇匀瓶中水样使水和固体颗粒

混合均匀) 和静置水样( 混匀水样自然沉降 30 min, 取其上层非沉降部分水样) 用烘干法测定径流中颗

粒物和悬浮物含量。数据处理和图表制作均使用 Microsoft Excel 2003 上完成。

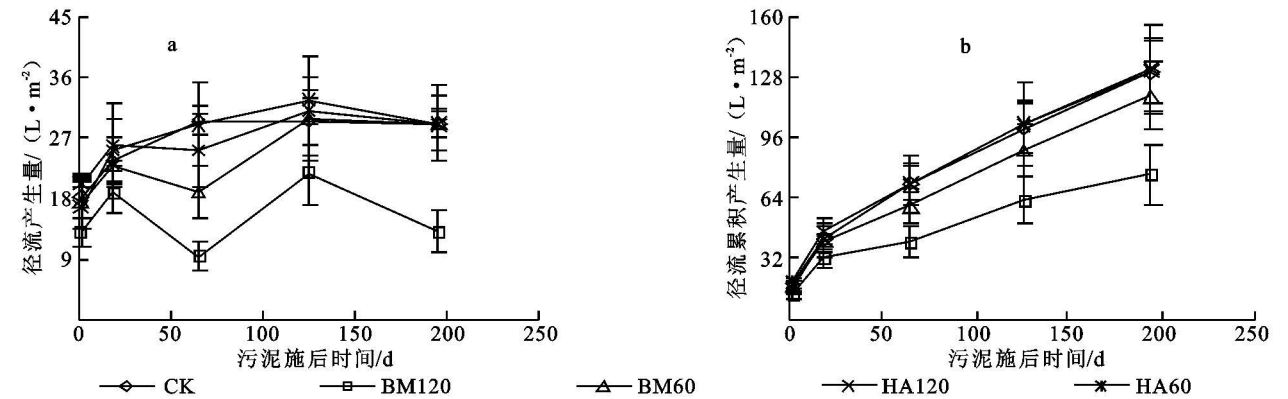


图 1 径流量和累积产生量的变化趋势

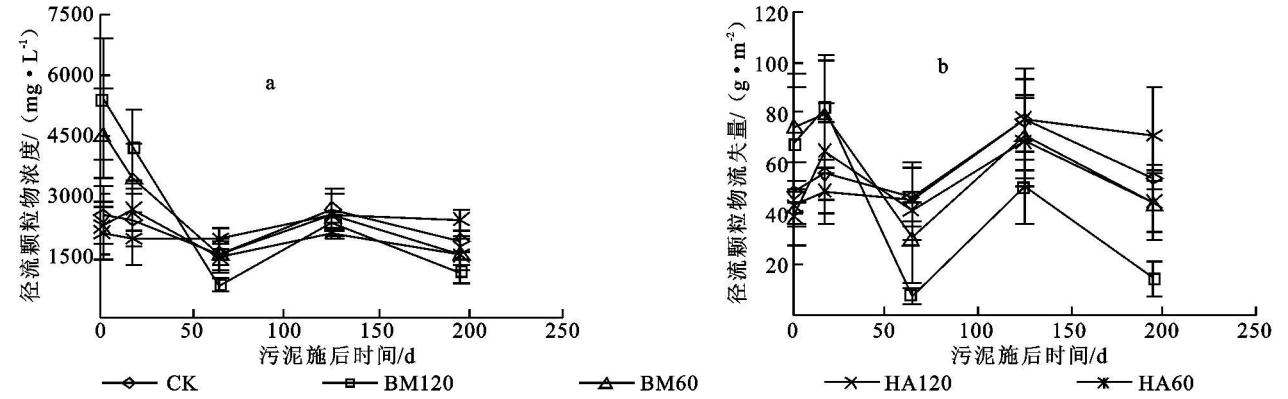


图 2 径流颗粒物浓度和流失量的变化趋势

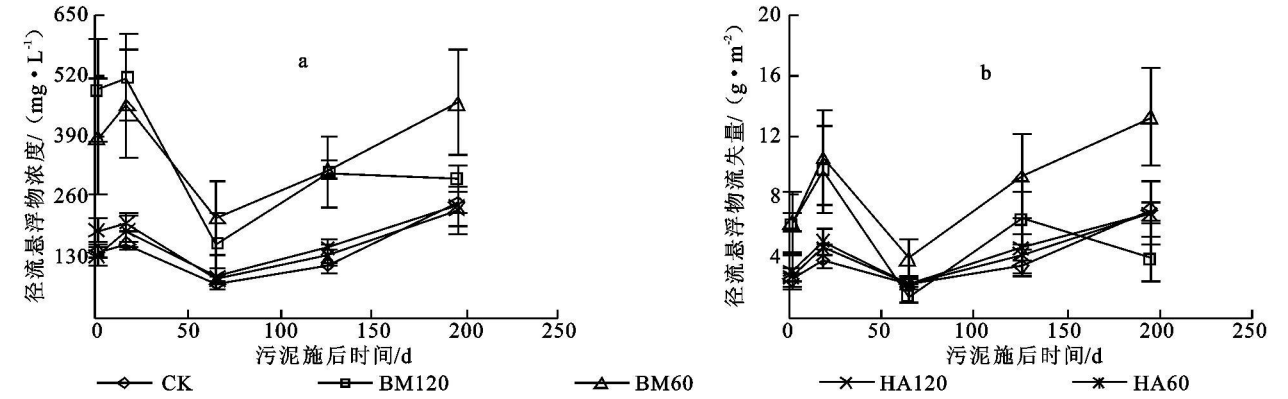


图 3 径流悬浮物浓度和流失量的变化趋势

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同污泥施用量下的径流流失特征

图 1a 显示, 模拟试验期内, 污泥施用量对同期穴施径流量影响不大, HA60 和 HA 120 径流量分别介于 20.3~ 31.0 L/m<sup>2</sup> 和 16.9~ 32.5 L/m<sup>2</sup>, 其中 HA60 径流量是 HA120 同期指标的 0.9~ 1.2 倍。Meyer 等用圆盘耙在土壤 10~ 20 cm 处施用污泥的研究表明, 污泥用量对坡地径流量无明显影响<sup>[11]</sup>。而施用量可明显影响污泥撒施处理的径流量, BM 60 和 BM 120 径流量分别介于 17.4~ 29.8 L/

m<sup>2</sup> 和 13.0~ 21.6 L/m<sup>2</sup>, 其中 BM60 径流量是 BM120 同期指标的 1.2~ 2.3 倍, 同期相应径流量比 BM120 高出 4.2~ 16.3 L/m<sup>2</sup>, 平均增幅 8.5 L/m<sup>2</sup>。Harris- Pierce 等研究表明, 表施污泥用量越高, 土壤稳定入渗率越高, 径流量越少<sup>[12]</sup>。Joshua 等研究表明, 污泥处理区径流量显著低于对照, 且径流减少量与污泥施用量呈正比, 归因于污泥多孔利于吸附水分, 撒施增加了地表粗糙度, 降低径流流速, 利于表土对雨水截留<sup>[13]</sup>。可见, 一定污泥施用量范围内, 撒施污泥用量越高, 给表土带来的污泥水稳性团聚颗粒体越多, 可产生更高比例的各类孔隙,

更加明显降低土壤容重,允许储存更多水分,促进更多雨水向下渗透,减少地表径流。污泥胶结性较强,穴施污泥集中施用,经过干湿交替,易板结,形成隔水层,产生疏水效应,阻止水分下渗。因污泥穴施对表土影响仅限于施肥处,污泥用量对可能形成的隔水层及其产生的疏水效应影响不大,未引起径流量的显著差异。图 1b 显示,径流累积产生量大小依次为:HA120> HA60> BM60> BM120,其中 HA120 高达  $132.6 \text{ L/m}^2$ ,分别是后三处理的 1.0、1.1 和 1.7 倍,因污泥用量引起穴施径流累积产生量差值仅为  $1.5 \text{ L/m}^2$ ,而撒施间差值则高达  $42.7 \text{ L/m}^2$ 。

可见,其它条件(表层土壤含水状况、降雨量和坡度等)相对一致情况下,一定时期和污泥用量范围内,撒施污泥用量越高,径流累积产生量越少,但污泥用量基本未对穴施对应指标产生影响。

## 2.2 不同污泥施用量下的颗粒相流失特征

由图 2 可见,污泥撒施后的前期(1 d 和 18 d)径流中,BM60 和 BM120 径流中总颗粒物浓度及流失量均达到最高值,其中 BM60 对应峰值分别为  $4517.0 \text{ mg/L}$  和  $79.3 \text{ g/m}^2$ ,为 BM120 对应峰值的 83.8% 和 96.7%,前期径流中,BM120 颗粒物浓度比同期 BM60 高出  $794.5 \sim 870.7 \text{ mg/L}$ ,但颗粒物流失量差异不大。这是因为撒施污泥与土壤颗粒间处于较松散状态,在暴雨-径流作用下,污泥用量越高,颗粒相中污泥颗粒所占比例相应也高。随时间推移,一定时期内,不同用量撒施污泥均不同程度改善了土壤理化性质,BM60 径流颗粒物浓度和流失量分别是 BM120 同期对应值的 1.1~2.0 倍和 1.4~4.1 倍,对应增幅分别为  $198.8 \sim 766.2 \text{ mg/L}$  和  $20.0 \sim 29.9 \text{ g/m}^2$ ;而 BM60 径流颗粒物浓度和流失量最低值分别为  $1540.0 \text{ mg/L}$  和  $30.2 \text{ g/m}^2$ ,仅及 BM60 对应峰值的 34.1% 和 38.1%,是 BM120 对应最低值的 2.0 倍和 4.0 倍。可见,撒施污泥可较明显减少颗粒物流失,降幅与污泥用量成正比,这与前人一些研究结果相近<sup>[14]</sup>。这可由以下几个方面来分析:(1)在污泥改良期内,一定污泥用量范围内,施用量越低,撒施污泥胶结土壤颗粒物的机会和能力就越小,团聚体稳定性和污泥-土壤抗冲刷能力就越差,颗粒物更易被降雨-径流冲刷而流失。(2)污泥有机物质中含脂肪、蜡、油脂、多糖、纤维素和木质素等化合物,在土壤水文中起重要作用,如可提高土壤黏粒的抗分散性和土壤稳定性;污泥对土壤的团聚作用随有机质矿化作用而衰减;污泥用量越低,投入土壤的有机物质及其易分解部分相对较少,矿化速度较快,大大减弱在改善土壤渗透性和减

少土壤流失方面的积极效应<sup>[15]</sup>,并缩短撒施污泥改良土壤的有效期。模拟试验期内,HA60 颗粒物浓度和流失量分别介于  $1901.9 \sim 2489.2 \text{ mg/L}$  和  $42.8 \sim 77.7 \text{ g/m}^2$ ,HA120 对应值则分别介于  $1477.0 \sim 2677.5 \text{ mg/L}$  和  $38.6 \sim 68.4 \text{ g/m}^2$ ,HA60 颗粒物浓度和流失量分别是 HA120 同期指标的 0.7~1.6 倍和 0.8~1.6 倍。

模拟试验期内,径流颗粒物平均浓度大小依次为:BM120> BM60> HA60> HA120,其中 BM120 为  $2749.0 \text{ mg/L}$ ,分别是后三者处理的 1.0、1.3 和 1.4 倍,BM120 与 BM60、HA120 与 HA60 处理间平均浓度差值分别为  $47.2$  和  $162.2 \text{ mg/L}$ 。颗粒物累积流失量大小依次为:BM60> HA60> HA120> BM120,其中 BM60 高达  $298.7 \text{ g/m}^2$ ,分别是后三者处理的 1.0、1.2 和 1.3 倍,BM120 与 BM60、HA120 与 HA60 处理间颗粒物累积流失量差值分别为  $76.6$  和  $27.0 \text{ g/m}^2$ 。造成 BM60 处理颗粒物累积流失量偏高的原因是在撒施高风险期(18 d 之前)即撒施污泥还未发挥改良作用时,径流颗粒物流失量就占累积流失量的 51.4%,此后其改良期有限,使得试验期内颗粒物累积流失量略高出 HA60,可见污泥撒施后不久,污泥-土体十分不稳定,应加强对可能引发的水土流失的监控。可见,其它条件(表层土壤含水状况、降雨量和坡度等)相对一致情况下,一定时期和污泥用量范围内,撒施污泥用量越高,颗粒物流失量越少,但这与降雨的间隔和降雨期十分密切,而污泥用量对穴施颗粒物流失影响并不大。

悬浮物是人为将水样静置获得的一种微粒实体,具有颗粒小、比表面大、表面电荷多的特点,与相同质量颗粒物相比,它对污染物具有更大的吸附容量,同时它在径流远程迁移中十分活跃,较难被阻挡,迁移速度和范围都较大,其携带污染物对水体的危害不容小觑,与污泥、土壤细颗粒粒径和密度有很大关系。图 3 显示,污泥撒施径流悬浮物浓度及流失量基本在前期(1 d 和 18 d)居于较高值,而后呈降低再不同程度升高趋势。BM60 径流悬浮物浓度和流失量分别是同期 BM120 对应指标的 0.8~1.5 倍和 1.0~3.4 倍,BM60 同期悬浮物流失量增幅为  $0.2 \sim 9.4 \text{ g/m}^2$ ,平均增加  $3.1 \text{ g/m}^2$ 。BM60 悬浮物浓度和流失量峰值分别为  $461.4 \text{ mg/L}$  和  $13.2 \text{ g/m}^2$ ,是 BM120 对应峰值的 0.9 和 1.4 倍。悬浮物浓度及流失量最低值均出现在撒施 65 d 后的径流中,BM60 最低值分别为  $213.1 \text{ mg/L}$  和  $3.9 \text{ g/m}^2$ ,为 BM120 对应最低值的 1.3 和 2.8 倍。模拟试验期内,悬浮物平均浓度与累积流失量大小依次均为:

BM 60> BM 120> HA 120> HA 60, BM60 对应值分别高达 367. 0 mg/L 和 43. 2 g/m<sup>2</sup>, 分别是后三者处理的 1. 0, 2. 2, 2. 3 倍和 1. 6, 2. 0, 2. 1 倍, BM 60 与 BM 120 对应差值分别为 12. 9 mg/L 和 15. 6 g/m<sup>2</sup>, 而 HA 120 与 HA 60 的差值仅为 8. 1 mg/L 和 0. 4 g/m<sup>2</sup>。BM60 悬浮物流失量高于 BM 120 的原因主要是: (1) 径流量较高。(2) BM60 中污泥有机质分解较快, 土壤- 污泥颗粒抗侵蚀性较弱, 改良土壤的有效期较短, 一定时期内, 向水体释放的污泥细小微粒更多。Price 研究指出, 污泥施入土壤, 有机质经过前期快速分解后, 对土壤物理性质的改良效应将逐渐降低<sup>[3]</sup>。可见, 其它条件(表层土壤含水状况、降雨量和坡度等) 相对一致情况下, 一定时期和污泥用量范围内, 撒施污泥用量越高, 径流累积产生量、颗粒物和悬浮物累积流失量越少, 但污泥用量对穴施上述指标无明显影响。

3 结 论

(1) 污泥撒施后的前期(1 d 和 18 d) 径流中, 径流总颗粒物浓度及流失量均达到峰值, 撒施 60 t/hm<sup>2</sup> 对应峰值分别为 4 517. 0 mg/L 和 79. 3 g/m<sup>2</sup>, 为 BM 120 对应峰值的 83. 8% 和 96. 7%, 此后撒施 60 t/hm<sup>2</sup> 径流颗粒物浓度和流失量不同程度高出撒施 120 t/hm<sup>2</sup> 同期对应值。模拟试验期内, 撒施 60 t/hm<sup>2</sup> 径流量和悬浮物流失量是撒施 120 t/hm<sup>2</sup> 同期指标的 1. 0~ 3. 4 倍。

(2) 模拟试验期内, 径流累积产生量大小依次为: HA 120> HA 60> BM 60> BM 120, 颗粒物累积流失量大小依次为: BM 60> HA 60> HA 120> BM 120, 悬浮物累积流失量大小依次为: BM 60> BM 120> HA 120> HA 60, 即撒施污泥用量越低, 径流累积产生量和颗粒相( 颗粒物和悬浮物) 累积流失量越高, 但污泥用量对穴施上述指标并无明显影响。

(3) 合理控制污泥用量, 阻滞径流颗粒相( 尤其是撒施颗粒相中的污泥颗粒) 及其携带的污染物, 是有效控制污染物流失的重点。

参考文献:

[ 1 ] 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 等. 利用城市污泥防治水土流失[ J ]. 土壤与环境, 1999, 8( 1 ) : 66-70.  
[ 2 ] 白莉萍, 伏亚萍. 城市污泥应用于陆地生态系统研究进展[ J ]. 生态学报, 2009, 29( 1 ) : 416-425.

[ 3 ] Price G W, Voroney R P. Papermill biosolids effect on soil physical and chemical properties[ J ]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36: 1704-1714.  
[ 4 ] Brauer D, Aitken G. Effects of a waste paper product on soil phosphorus, carbon, and bulk density[ J ]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35: 898-902.  
[ 5 ] 薛澄泽, 张增强, 孟昭福, 等. 复合污泥堆肥施用于高速公路绿化带效果的研究③: 土壤化学、植物营养及环境问题的探讨[ J ]. 农业环境保护, 2000, 19( 5 ) : 263-266, 281.  
[ 6 ] 傅华, 王玉梅, 周志宇, 等. 施用污泥对黑麦草草坪绿地土壤理化性质和重金属元素含量的影响[ J ]. 草业学报, 2003, 12( 2 ) : 82-86.  
[ 7 ] Chow T L, Rees H W, Fahmy S H, et al. Effects of pulp fibre on soil physical properties and soil erosion under simulated rainfall[ J ]. Canadian Journal of Soil Science, 2003, 83: 109-119.  
[ 8 ] 陈同斌, 高定, 李新波. 城市污泥堆肥对栽培基质保水能力和有效养分的影响[ J ]. 生态学报, 2002, 22( 6 ) : 802-807.  
[ 9 ] Aggelides S M, Londra P A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil[ J ]. Bioresource Technology, 2000, 71: 253-259.  
[ 10 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[ M ]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.  
[ 11 ] Meyer V F, Redente E F, Barbarick K A, et al. Bio-solids applications affect runoff water quality following forest fire[ J ]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30: 1528-1532.  
[ 12 ] Harris Pierce R L, Redente E F, Barbarick K A. Sewage sludge application effects on runoff water quality in a semiarid grassland[ J ]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24: 112-115.  
[ 13 ] Joshua W D, Michalk D L, Curtis I H, et al. The potential for contamination of soil and surface waters from sewage sludge ( biosolids ) in a sheep grazing study, Australia [ J ]. Geoderma, 1998, 84: 135-156.  
[ 14 ] Sort X, Alcaniz J M. Contribution of sewage sludge to erosion control in rehabilitation of limestone quarries[ J ]. Land Degradation and Development, 1996, 7( 1 ) : 69-76.  
[ 15 ] Andraski T W, Bundy L G, Kilian K C. Manure history and long- term tillage effects on soil properties and phosphorus losses in runoff[ J ]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32: 1782-1789.