

# 植被毯对内蒙古清水河县黄土丘陵沟壑区 黄土边坡产流产沙量的影响

郭宇<sup>1</sup>, 王树森<sup>1</sup>, 马迎梅<sup>1</sup>, 徐军<sup>2</sup>, 李国婧<sup>3</sup>,  
黎光<sup>4</sup>, 王少华<sup>4</sup>, 孟凡旭<sup>1</sup>, 张平<sup>1</sup>, 张娜<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,荒漠生态系统保护与修复国家林业局重点实验室,

内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室,呼和浩特 010018;

2.内蒙古农业大学草原与资源环境学院,呼和浩特 010018;3.内蒙古农业大学生命科学院,

内蒙古自治区植物逆境生理与分子生物学重点实验室,呼和浩特 010018;4.内蒙古蒙树生态环境有限公司,呼和浩特 010018)

**摘要:**黄土丘陵沟壑区地形复杂,坡陡沟深,水土流失严重,为缓解黄土丘陵沟壑区边坡水土流失严重的问题,以内蒙古清水河县段兰窑流域黄土边坡为研究区,采用3种植被毯措施:豆科植物和禾本科植物混播(以下简称豆禾混播)比例为1:1+椰丝毯(L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>)、豆禾混播比例为1:2+椰丝毯(L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>)和豆禾混播比例为2:1+椰丝毯(L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>)。在30°,35°,40°和45°边坡设置径流小区,分析该区域不同自然降雨条件和坡度对边坡产流与产沙量的影响。结果表明:(1)铺设植被毯可以有效的减少黄土边坡产流产沙量。(2)当降雨强度为1~5 mm/h时,各植被毯措施的产流量和产沙量随着坡度的增加呈上升趋势;当降雨强度为30~50 mm/h时,各植被毯措施的产流量和产沙量随着坡度的增加呈先增加后减小的趋势,坡度为40°时出现峰值。(3)3种植被毯措施的减流效益大小依次为L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>(75.11%)>L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>(49.3%)>L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>(48.11%);3种植被毯措施减沙效益大小依次为L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>(87.96%)>L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>(60.96%)>L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>(58.95%)。说明在黄土丘陵沟壑区L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>是一种有效的边坡水土流失治理措施。

**关键词:**黄土丘陵沟壑区;植被毯;产流产沙量

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0061-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.009

## Effect of Vegetation Carpet on Runoff and Sediment Yield of Loess Slope in Hilly-Gully Loess Region of Qingshuihe County, Inner Mongolia

GUO Yu<sup>1</sup>, WANG Shusen<sup>1</sup>, MA Yingmei<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, LI Guojing<sup>3</sup>,

LI Guang<sup>4</sup>, WANG Shaohua<sup>4</sup>, MENG Fanxu<sup>1</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>, ZHANG Na<sup>1</sup>

(1.College of Desert Control, Inner Mongolia Agricultural University, College of Desert Control

Science and Engineering, Aeolian Physics and Desertification Engineering Key Laboratory, The Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State Forest Administration of China, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;2.College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

3.College of Life Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Key Laboratory of Plant Stress Physiology and Molecular Biology, Hohhot 010018;4.Inner Mongolia Mengshu Ecological Environment Limited Company, Hohhot 010018)

**Abstract:** In order to alleviate the serious soil and water loss of slope in Hilly-Gully Loess Region, this paper took DuanLanyao drainage loess slope in Qingshuihe County of Inner Mongolia as the research area, and adopted three vegetation carpet measures: the mixed planting of Legumes and Gramineae plants with a ratio of 1:1+coconut carpet (L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>), the mixed planting ratio of 1:2+coconut carpet (L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>), and the ratio of 2:1+coconut carpet (L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>). Runoff plots were set up with slope gradients of 30°, 35°, 40° and 45°. The effects of different natural rainfall conditions and slopes on slope runoff and sediment yield were analyzed. The results showed that: (1) Vegetation carpet could effectively reduce the runoff and sediment yield of Loess slope. (2) When the rainfall intensity was 1~5 mm/h, the runoff and sediment yield of vegetation carpet measures increased with the increase of slope gradients; when the rainfall intensity was 30~50 mm/h, the runoff and sediment yield of vegetation carpet measures increased first and then decreased with the

收稿日期:2019-05-17

资助项目:呼和浩特市科技计划项目重大专项“北方高寒干旱半干旱地区沟壑边坡植被修复技术研究”(2017-社-重-4)

第一作者:郭宇(1993—),女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:1058613249@qq.com

通信作者:王树森(1970—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生导师,教授,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:wsswt@126.com

increase of slope gradients, and the peak value appeared when the slope was 40°. (3) The benefits of three vegetation carpet measures were  $L_1G_1(75.11\%) > L_1G_2(49.3\%) > L_2G_1(48.11\%)$  and  $L_1G_1(87.96\%) > L_1G_2(60.96\%) > L_2G_1(58.95\%)$ , respectively. It could be concluded that  $L_1G_1$  was an effective measure to control soil and water loss of slope in the Hilly-Gully Loess Region.

**Keywords:** hilly-gully loess region; vegetation carpet; runoff and sediment yield

我国是水土流失最严重的国家之一<sup>[1]</sup>,水土流失面积达 295 万 km<sup>2</sup>,占国土面积的 30.72%,其中黄土高原是我国生态环境问题和生态建设的重点区<sup>[2]</sup>,黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀量高达 50~100 t/hm<sup>2</sup>,面积约 21.18 万 km<sup>2</sup>,约占黄土高原面积的 1/3<sup>[3]</sup>。内蒙古黄土丘陵沟壑区系指阴山的南面、黄土高原的北面延伸至鄂尔多斯高原东部,包括准格尔旗、清水河县、和林格尔县西南部、伊金霍洛旗的东南部,以及达拉特旗南部的一小部分,属黄土丘陵沟壑区第一副区<sup>[4]</sup>,是我国水土流失最严重的地区之一,也是我国生态环境建设的重点区域。研究区清水河县段兰窑流域是典型的黄土丘陵沟壑区,降雨、地形、植被等自然因素是影响该区水土流失的主要因素<sup>[5]</sup>,其中降雨和坡度是影响边坡产流产沙的重要因素<sup>[6-8]</sup>。降雨及其产生的径流是造成边坡土壤侵蚀的直接动力。降雨的降雨量、降雨强度、降雨历时等都会对边坡产流产沙产生影响<sup>[9-10]</sup>。通常,降雨强度越大,历时越长,雨量越大,对下垫面提供的侵蚀动能越大,对土壤的侵蚀能力越强<sup>[11]</sup>。水土保持措施对防控边坡水土流失起着重要的作用,主要包括工程、农业技术和生物措施三大类<sup>[12]</sup>。其中植被毯护坡是一种工程措施结合生物措施的新型护坡方式,多用于公路和河堤边坡保护措施<sup>[13-15]</sup>,而黄土丘陵沟壑区地形复杂,坡陡沟深,单采用生物措施的边坡减流减沙效益欠佳。前人<sup>[16-22]</sup>研究表明,铺设植被毯相比其他措施可以减少水分蒸发,增加地面粗糙度,减少边坡径流,减缓径流速度,缓解雨水对边坡表土的冲刷,是有效、简便、廉价的环保型边坡防护技术。因此,本文以内蒙古清水河县段兰窑流域沟壑边坡区为研究区,分析不同降雨条件和坡度在不同植被毯覆盖措施下对边坡产流量和产沙量的影响。为黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律研究、水土流失的控制提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区清水河县是典型的黄土丘陵沟壑区,位于内蒙古自治区中部,地理坐标为 39°35'—40°35'N, 111°21'—112°07'E(图 1)。东南与山西省平鲁县、偏关县为邻,西隔黄河与鄂尔多斯市准格尔旗相望,北连和林格尔县、托克托县,总面积 2 859 km<sup>2</sup><sup>[23]</sup>,平均海拔 1 373.6 m。地表有比较厚的黄土覆盖层且地

形平缓,由东南向西北的地势整体呈缓坡状。地处中温带,属典型的半干旱大陆性季风气候,年平均气温 7.5 °C,平均风速 3.5 m/s。年平均降水量 410 mm,年蒸发量 2 577.2 mm。土壤类型主要以黄潮土、栗钙土、栗褐土和灰褐土为主<sup>[24]</sup>。

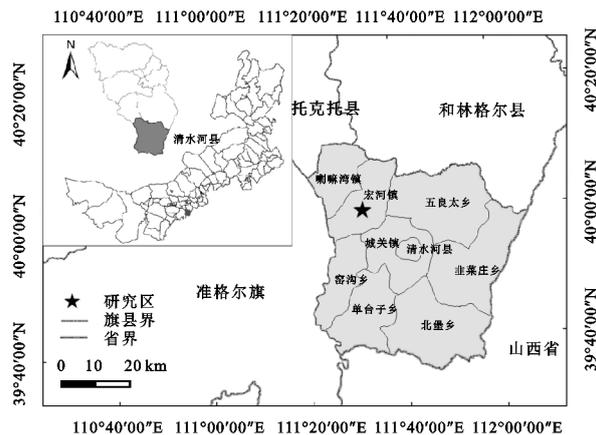


图 1 研究区地理位置

### 1.2 试验材料

供试草种由北京佰青源畜牧业科技发展有限公司提供。主要包括红豆草 (*Onobrychis viciifolia* Scop. Fl. Carn.)、百脉根 (*Lotus corniculatus* Linn.)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa* Linn.)、高羊茅 (*Festuca elat* Keng ex E. Alexeev)、无芒雀麦 (*Bromus inermis* Leyss.)、冰草 (*Agropyron cristatum* Gaertn.) 和老芒麦 (*Elymus sibiricus* Linn.)(表 1)。

供试椰丝毯由禹城通佳边坡材料有限公司提供。规格为厚度 0.7 cm,宽 2.5 m,长 50 m,孔隙度 15~20 mm,抗压强度  $\geq 800$  Pa(n/m<sup>2</sup>)。

表 1 试验草种名称与质量

| 草种名称  | 质量标准  |       |       |
|---|-------|-------|-------|
|   | 千粒重/g | 发芽率/% | 纯净度/% |
| 红豆草 ( <i>Onobrychis viciifolia</i> Scop. Fl. Carn.) | 20.53 | 80    | 95    |
| 百脉根 ( <i>Lotus corniculatus</i> Linn.)              | 1.42  | 93    | 95    |
| 紫花苜蓿 ( <i>Medicago sativa</i> Linn.)                | 4.53  | 97    | 95    |
| 高羊茅 ( <i>Festuca elat</i> Keng ex E. Alexeev)       | 2.01  | 84    | 95    |
| 无芒雀麦 ( <i>Bromus inermis</i> Leyss.)                | 3.28  | 82    | 95    |
| 冰草 ( <i>Agropyron cristatum</i> Gaertn.)            | 3.72  | 84    | 95    |
| 老芒麦 ( <i>Elymus sibiricus</i> Linn.)                | 3.38  | 83    | 95    |

### 1.3 植被毯设计

混播种植指的是使用 2 种或更多种草种进行播

种的栽培方法。利用各草种的优势,提高混播种植的成功率和整体的优势,如耐阴性、耐踩踏性、耐低刈割性、抗病毒性和抗虫性,而且可以延长植物的绿色期,提高植物的自我恢复能力,这是由于混播组合相比单播具有广泛的种群基因遗传背景,对外界环境具有更强的适应性。混播组合中各个草种具有不同的遗传特性,对不同自然条件(空气、土壤、水分、养分)的适应存在很多差异,通过合理的混播配置,使之更好的适应环境<sup>[25]</sup>。豆科与禾本科植物混播系统中,因禾本科植物具有广布的须根系,能够较强竞争性地吸收水分,从而促进豆科植物在水分供应不足条件下的生物固氮能力。豆禾混播草地通过生物固氮能够改善草地生态系统中氮素营养平衡,提高土壤肥力,在短时间内有效的防止水土流失。因此,合理的豆科植物与禾本科植物混播配置将会产生较好的生态价值<sup>[20]</sup>。

植被毯是由植物纤维层和草种、保水剂、营养土

混合物复合形成的三维复合草毯结构。植被毯可以使种子能够在坡面驻留,不会被雨水和浇灌用水冲跑,能够在贫瘠的立地条件下为植物的生长保水,保证植物生长。人工植被草毯防护技术是迄今为止十几年来国际公认的有效、简便、廉价的环保型边坡防护技术,具有极佳的应用前景<sup>[22]</sup>。本研究中的植被毯是以椰丝毯为主要原料,在其基础上播种了豆科与禾本科混播比例为 1:1,1:2 和 2:1 的植物种子并覆土(表 2)。混播的播种量计算公式为:

$$K = \frac{hT}{X} \quad (1)$$

式中: $K$  为混播时某一草种的播种量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $h$  为某一草种利用价值为 100%时的单播量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ); $T$  为某一草种在混播中所占比例(%); $X$  为某一草种的纯净度乘以发芽率<sup>[26]</sup>,发芽率和纯净度通过试验获得(表 2)。

表 2 植被毯设置

| 编号                            | 处理                     | 混播播量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ |       |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|------------------------|--|-------|------|------|------|------|------|
|                               |                        | 紫花苜蓿                                     | 红豆草   | 百脉根  | 高羊茅  | 无芒雀麦 | 冰草   | 老芒麦  |
| L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 豆科植物和禾本科植物混播比例 1:1+椰丝毯 | 2.73                                     | 19.74 | 2.28 | 4.70 | 4.84 | 2.83 | 4.77 |
| L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 豆科植物和禾本科植物混播比例 1:2+椰丝毯 | 1.82                                     | 13.16 | 1.52 | 6.27 | 6.46 | 3.77 | 6.36 |
| L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 豆科植物和禾本科植物混播比例 2:1+椰丝毯 | 3.64                                     | 26.32 | 3.03 | 3.13 | 3.23 | 1.88 | 3.18 |

#### 1.4 径流小区及植被毯建设

根据实地测量,研究区黄土边坡坡度范围为 30°~45°,因此选取 4 个坡度(30°,35°,40°,45°)的黄土边坡,平整坡面,在每个坡度的边坡设 3 种不同植被毯措施(A、B、C)和裸地(CK)处理,每个处理 3 次重复,共计 48 个径流小区(图 2)。由于黄土边坡地形限制,每个小区规格为 0.8 m×6 m,由 PVC 板隔开,PVC 板地表露出 20 cm,地下埋入 20 cm;每个试验小区最低处设置 1 个体积为 50 L 的集流桶,用于导出地表径流。建成径流小区后,每个径流小区表面覆盖 0.7 cm 厚椰丝毯,并将混播草种均匀撒播在椰丝毯上,覆土 1 cm,轻轻压实。

#### 1.5 指标测定

1.5.1 降雨特征 2018 年 6—10 月,采用 RG3-M 型雨量计自动监测不同时段降雨量。根据降雨量和降雨历时计算降雨强度。研究区共降雨 10 次,降雨量为 180 mm,降雨主要集中在 8,9 月,最大降雨量

出现在 8 月 30 日,降雨量为 36.6 mm。由于椰丝毯表面覆土,下雨将表面的土冲下来,导致产流和产沙量增加。根据采集的数据发现 7 月 11 日、7 月 19 日和 7 月 24 日的数据异常,因此在分析数据中剔除这 3 次的数据,只选取试验区 and 对照区剩余 7 场单次降雨中的产流量和产沙量进行分析(表 3)。

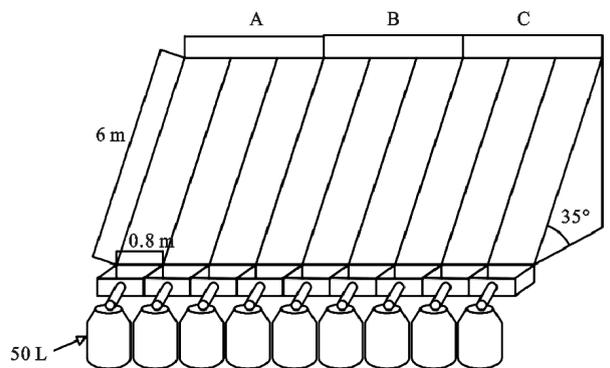


图 2 径流小区示意

表 3 7 场降雨情况

| 降雨日期                                    | 8 月 9 日 | 8 月 11 日 | 8 月 13 日 | 8 月 26 日 | 8 月 30 日 | 9 月 1 日 | 9 月 28 日 |
|---|---------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 降雨量/mm                                  | 11.60   | 12.40    | 35.20    | 21.00    | 36.60    | 31.40   | 13.60    |
| 降雨历时/h                                  | 7.32    | 8.30     | 0.75     | 0.60     | 7.68     | 9.76    | 3.82     |
| 降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ | 1.58    | 1.49     | 46.93    | 35.00    | 4.77     | 3.22    | 3.56     |

1.5.2 产流量和产沙量 每场降雨后将集流桶内径流泥沙混合物摇匀,取得 500 mL 混合样品,使用滤

纸过滤混合样品,将带有泥沙的滤纸在 105 °C 的烘箱中烘干 12 h,计算泥沙总量。计算公式为:

$$\text{泥沙重: } G = G_{\text{带滤纸}} - G_{\text{滤纸}} - g \quad (2)$$

$$\text{含沙量: } \alpha = \frac{G}{500} \quad (3)$$

$$\text{泥沙总量: } S_T = 1000\alpha R \quad (4)$$

式中:  $G$  为取样瓶中的泥沙量(g);  $g$  为信封重(g);  $\alpha$  为含沙量(g/mL);  $S_T$  为径流小区泥沙总量(kg);  $R$  为集流桶内径流泥沙体积(mL)<sup>[27]</sup>。

1.5.3 减流和减沙效益计算 减流效益( $P_{ri}$ )和减沙效益( $P_{si}$ )计算公式为:

$$P_{ri} = \frac{Q_{bi} - Q_{mi}}{Q_{bi}} \quad (5)$$

$$P_{si} = \frac{S_{bi} - S_{mi}}{S_{bi}} \quad (6)$$

式中:  $Q_{bi}$  和  $Q_{mi}$  分别是裸地和不同植被毯措施覆盖的产流量( $\text{g}/\text{m}^2$ );  $S_{bi}$  和  $S_{mi}$  分别是对照组和不同植被毯措施覆盖的产沙量( $\text{g}/\text{m}^2$ )。(不同坡度  $i$  为  $30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ )<sup>[28]</sup>。

## 2 数据处理与分析

数据处理方法采用 SPSS 20.0 统计软件进行相关性分析,采用 Origin 9.1 软件进行作图。

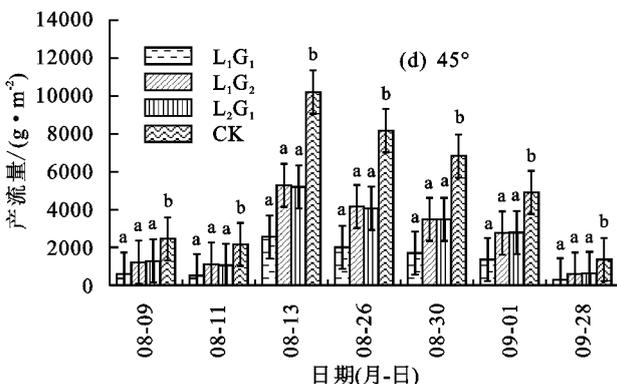
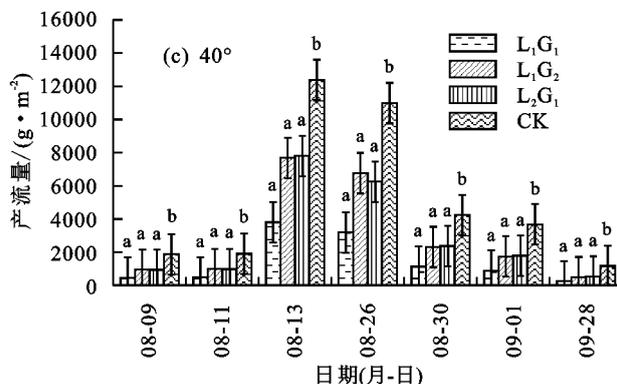
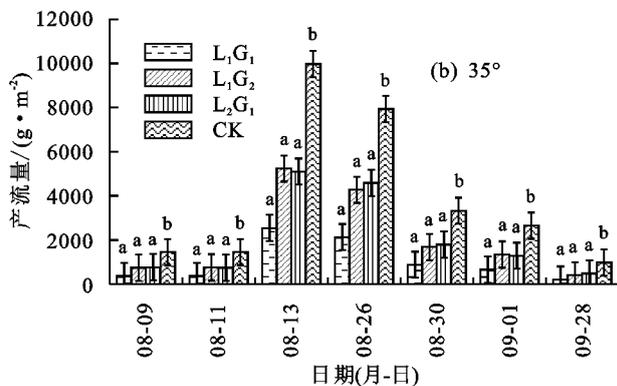
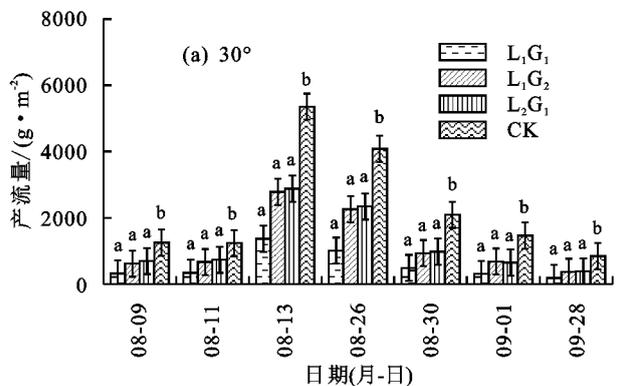
## 3 结果与分析

### 3.1 不同植被毯措施产流量和产沙量

从产流量来看,在相同坡度下,降雨条件一定时,3种植被毯措施的产流量无显著性差异,3种植被毯

措施与裸地的产流量差异显著( $p < 0.05$ )。坡度为  $30^\circ$  时,裸地的平均产流量是  $L_1G_1$  的 4.06 倍,是  $L_1G_2$  的 1.97 倍,是  $L_2G_1$  的 1.88 倍;坡度为  $35^\circ$  时,裸地的平均产流量是  $L_1G_1$  的 3.89 倍,是  $L_1G_2$  的 1.92 倍,是  $L_2G_1$  的 1.88 倍;坡度为  $40^\circ$  时,裸地的平均产流量是  $L_1G_1$  的 3.55 倍,是  $L_1G_2$  的 1.73 倍,是  $L_2G_1$  的 1.76 倍;坡度为  $45^\circ$  时,裸地的平均产流量是  $L_1G_1$  的 4 倍,是  $L_1G_2$  的 1.94 倍,是  $L_2G_1$  的 1.95 倍(图 3)。

从产沙量来看,在相同坡度下,降雨条件一定时,  $L_1G_1$  的产沙量与  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  之间差异显著,3种植被毯措施与裸地的产沙量差异显著( $p < 0.05$ )。坡度为  $30^\circ$  时,裸地的平均产沙量是  $L_1G_1$  的 5.98 倍,是  $L_1G_2$  的 2.23 倍,是  $L_2G_1$  的 2.16 倍,  $L_1G_1$  相比  $L_1G_2$  平均产沙量减少 93.74  $\text{g}/\text{m}^2$ ,相比  $L_2G_1$  平均产沙量减少 98.48  $\text{g}/\text{m}^2$ ;坡度为  $35^\circ$  时,裸地的平均产沙量是  $L_1G_1$  的 6.8 倍,是  $L_1G_2$  的 2.18 倍,是  $L_2G_1$  的 2.21 倍,  $L_1G_1$  相比  $L_1G_2$  平均产沙量减少 147.88  $\text{g}/\text{m}^2$ ,相比  $L_2G_1$  平均产沙量减少 144.45  $\text{g}/\text{m}^2$ ;坡度为  $40^\circ$  时,裸地的平均产沙量是  $L_1G_1$  的 7.16 倍,是  $L_1G_2$  的 2.62 倍,是  $L_2G_1$  的 2.28 倍,  $L_1G_1$  相比  $L_1G_2$  平均产沙量减少了 173.96  $\text{g}/\text{m}^2$ ,相比  $L_2G_1$  平均产沙量减少了 214.83  $\text{g}/\text{m}^2$ ;坡度为  $45^\circ$  时,裸地的平均产沙量是  $L_1G_1$  的 6.16 倍,是  $L_1G_2$  的 2.29 倍,是  $L_2G_1$  的 2.21 倍,  $L_1G_1$  相比  $L_1G_2$  平均产沙量减少 173.27  $\text{g}/\text{m}^2$ ,相比  $L_2G_1$  平均产沙量减少 183.34  $\text{g}/\text{m}^2$ (图 4)。



注:图中不同小写字母表示各处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 3 不同植被毯措施产流量

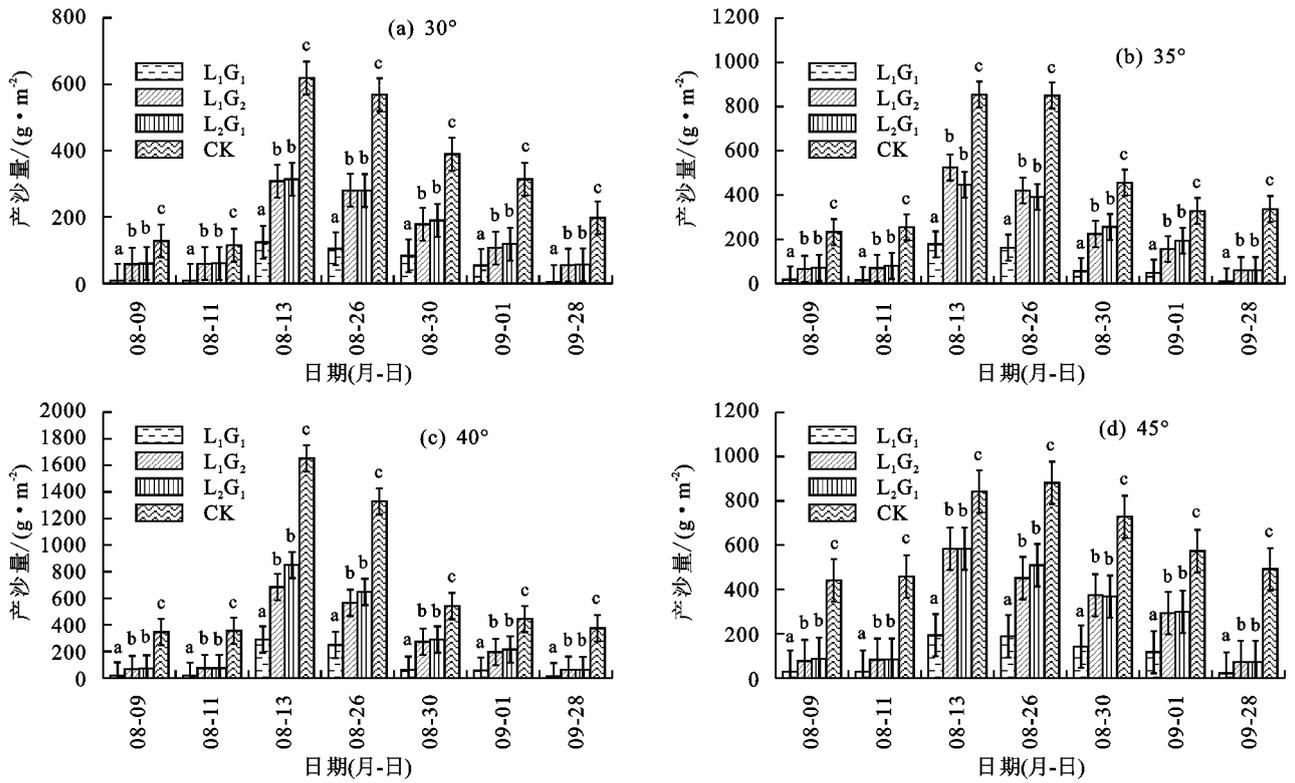


图 4 不同植被毯措施产沙量

3.2 不同降雨条件对各植被毯措施产流和产沙量影响

对各植被毯措施产流产沙量和降雨量数据进行相关性分析得出, 在 30°~40°时, 各植被毯措施的产流量与降雨量、产沙量与降雨量的相关性不显著, 在 45°时, 各植被毯措施的产流量与降雨量、产沙量与降雨量具有较好的相关性 ( $p < 0.05$ ) (表 4)。

行相关性分析得出, 在 30°~40°时, 各植被毯措施的产流量与降雨历时具有较好的相关性 ( $p < 0.05$ ), 在 45°时各植被毯措施的产流量与降雨历时相关性不显著。各植被毯措施的产沙量与降雨历时的相关性不显著, 在 35°时, 各植被毯措施的产沙量与降雨历时具有较好的相关性 ( $p < 0.05$ ) (表 5)。

表 4 各植被毯措施产流量—降雨历时、产沙量—降雨量的相关性

| 坡度/<br>(°) | 不同植被<br>毯措施                   | 产流量—降雨量 |       | 产沙量—降雨量 |       |
|------------|-------------------------------|---------|-------|---------|-------|
|            |                               | 相关系数    | Sig.  | 相关系数    | Sig.  |
| 30         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.491   | 0.263 | 0.688   | 0.135 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.470   | 0.287 | 0.636   | 0.125 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.449   | 0.312 | 0.672   | 0.098 |
|            | CK                            | 0.533   | 0.218 | 0.704   | 0.077 |
| 35         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.537   | 0.213 | 0.529   | 0.222 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.532   | 0.219 | 0.619   | 0.139 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.511   | 0.242 | 0.701   | 0.079 |
|            | CK                            | 0.546   | 0.205 | 0.491   | 0.263 |
| 40         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.513   | 0.239 | 0.481   | 0.275 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.497   | 0.257 | 0.604   | 0.151 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.529   | 0.222 | 0.593   | 0.160 |
|            | CK                            | 0.526   | 0.225 | 0.469   | 0.289 |
| 45         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.805*  | 0.029 | 0.782*  | 0.038 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.797*  | 0.032 | 0.811*  | 0.027 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.806*  | 0.028 | 0.765*  | 0.045 |
|            | CK                            | 0.778*  | 0.039 | 0.667   | 0.102 |

表 5 各植被毯措施产流量—降雨历时、产沙量—降雨历时的相关性

| 坡度/<br>(°) | 不同植被<br>毯措施                   | 产流量—降雨历时 |       | 产沙量—降雨历时 |       |
|------------|-------------------------------|----------|-------|----------|-------|
|            |                               | 相关系数     | Sig.  | 相关系数     | Sig.  |
| 30         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | -0.781*  | 0.038 | -0.579   | 0.173 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | -0.793*  | 0.033 | -0.733   | 0.061 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | -0.798*  | 0.032 | -0.705   | 0.077 |
|            | CK                            | -0.775*  | 0.041 | -0.709   | 0.075 |
| 35         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | -0.776*  | 0.04  | -0.779*  | 0.039 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | -0.775*  | 0.041 | -0.749   | 0.053 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | -0.792*  | 0.034 | -0.664   | 0.104 |
|            | CK                            | -0.775*  | 0.041 | -0.854*  | 0.014 |
| 40         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | -0.788*  | 0.035 | -0.813*  | 0.026 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | -0.795*  | 0.033 | -0.755*  | 0.050 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | -0.784*  | 0.037 | -0.763*  | 0.046 |
|            | CK                            | -0.775*  | 0.041 | -0.838*  | 0.019 |
| 45         | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | -0.528   | 0.223 | -0.532   | 0.219 |
|            | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | -0.535   | 0.216 | -0.564   | 0.187 |
|            | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | -0.525   | 0.227 | -0.598   | 0.156 |
|            | CK                            | -0.571   | 0.180 | -0.691   | 0.086 |

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

对各植被毯措施产流产沙量和降雨历时数据进行

相关性分析得出, 在 30°~40°时, 各植被毯措施的

产流量、产沙量与降雨强度具有极显著相关性( $p < 0.01$ ),在  $45^\circ$ 时各植被毯措施的产流量、产沙量与降雨强度具有显著相关性( $p < 0.05$ )。在坡度相同时,

对各植被毯措施产流量和产沙量数据进行相关性分析得出在各植被毯措施的产流量与产沙量具有极显著相关性( $p < 0.01$ )(表 6)。

表 6 各植被毯措施产流量—降雨强度、产沙量—降雨强度的相关性

| 坡度/<br>( $^\circ$ ) | 不同植被<br>毯措施                   | 产流量—降雨强度 |       | 产沙量—降雨强度 |       | 产流量—产沙量 |       |
|---------------------|-------------------------------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|
|                     |                               | 相关系数     | Sig.  | 相关系数     | Sig.  | 相关系数    | Sig.  |
| 30                  | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.981**  | 0     | 0.842*   | 0.018 | 0.885** | 0.008 |
|                     | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.986**  | 0     | 0.929**  | 0.002 | 0.959** | 0.001 |
|                     | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.984**  | 0     | 0.916**  | 0.004 | 0.942** | 0.002 |
|                     | CK                            | 0.980**  | 0     | 0.898**  | 0.006 | 0.928** | 0.003 |
| 35                  | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.978**  | 0     | 0.971**  | 0     | 0.997** | 0     |
|                     | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.981**  | 0     | 0.961**  | 0.001 | 0.993** | 0     |
|                     | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.977**  | 0     | 0.908**  | 0.005 | 0.968** | 0     |
| 40                  | CK                            | 0.981**  | 0     | 0.962**  | 0.001 | 0.970** | 0     |
|                     | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.983**  | 0     | 0.988**  | 0     | 0.998** | 0     |
|                     | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.981**  | 0     | 0.963**  | 0     | 0.991** | 0     |
| 45                  | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.984**  | 0     | 0.973**  | 0     | 0.996** | 0     |
|                     | CK                            | 0.975**  | 0     | 0.997**  | 0     | 0.988** | 0     |
|                     | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> | 0.835*   | 0.019 | 0.805*   | 0.029 | 0.982** | 0     |
|                     | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> | 0.842*   | 0.017 | 0.846*   | 0.016 | 0.995** | 0     |
| 45                  | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> | 0.833*   | 0.020 | 0.863*   | 0.012 | 0.990** | 0     |
|                     | CK                            | 0.856*   | 0.014 | 0.854*   | 0.014 | 0.951** | 0.001 |

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

各植被毯措施的产流量随着降雨强度的增大呈增加趋势。在降雨强度一定时,CK、L<sub>1</sub>G<sub>2</sub> 和 L<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 的产流量远大于 L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>,其中在  $30^\circ$ 时,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub> 在观测期间平均产流量为  $573.56 \text{ g/m}^2$ ,相比 L<sub>1</sub>G<sub>2</sub> 减少 51.57%,相比 L<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 减少 53.62%,相比 CK 减少 75.39%;在  $35^\circ$ 时,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub> 在观测期间平均产流量为  $1\ 018.89 \text{ g/m}^2$ ,相比 L<sub>1</sub>G<sub>2</sub> 减少

50.53%,相比 L<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 减少 51.61%,相比 CK 减少 74.3%;在  $40^\circ$ 时,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub> 在观测期间平均产流量为  $1\ 456 \text{ g/m}^2$ ,相比 L<sub>1</sub>G<sub>2</sub> 减少 51.28%,相比 L<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 减少 50.61%,相比 CK 减少 71.89%;在  $45^\circ$ 时,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub> 在观测期间平均产流量为  $1\ 290.65 \text{ g/m}^2$ ,相比 L<sub>1</sub>G<sub>2</sub> 减少 51.49%,相比 L<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 减少 51.18%,相比 CK 减少 74.98%(图 5)。

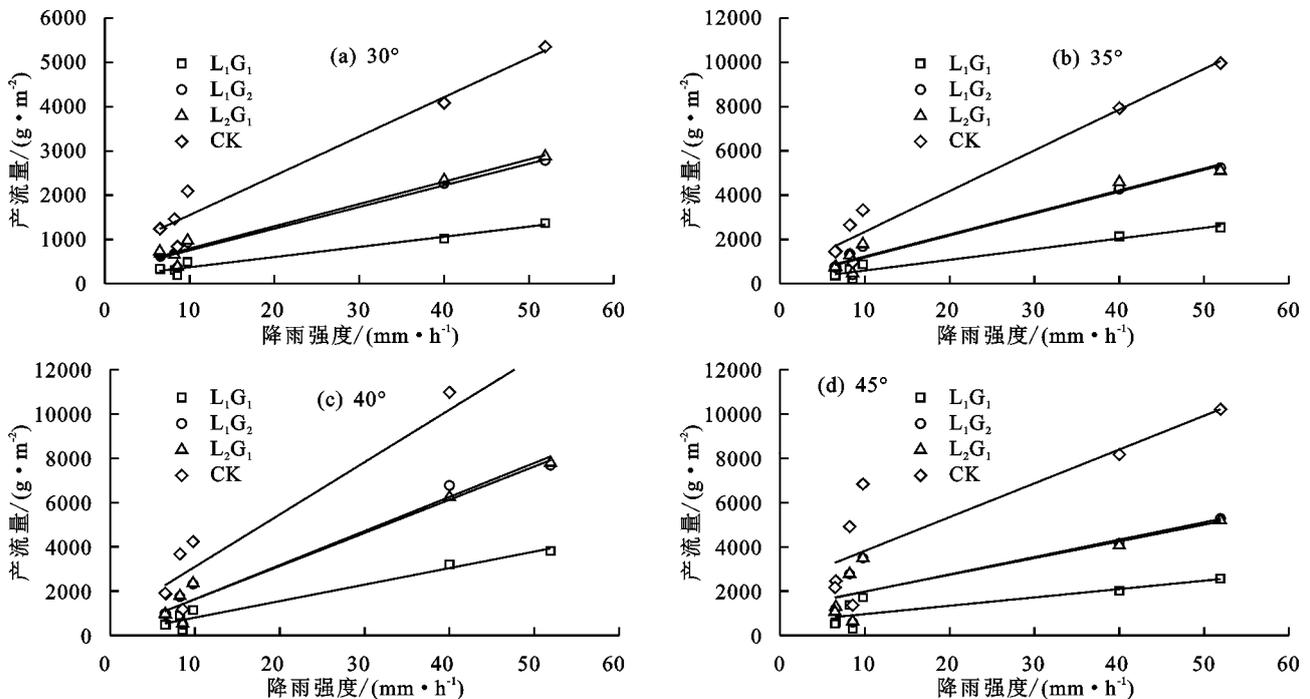


图 5 不同植被毯措施产流量—降雨强度关系

各植被毯措施的产沙量随着降雨强度的增大呈增加趋势。在降雨强度一定时,CK、 $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  的产沙量远大于  $L_1G_1$ , 其中在  $30^\circ$  时,  $L_1G_1$  在观测期间平均产沙量为  $47.12 \text{ g/m}^2$ , 相比  $L_1G_2$  减少 68.47%, 相比  $L_2G_1$  减少 69.43%, 相比 CK 减少 85.85%; 在  $35^\circ$  时,  $L_1G_1$  在观测期间平均产沙量为  $69.55 \text{ g/m}^2$ , 相比  $L_1G_2$

减少 68.01%, 相比  $L_2G_1$  减少 67.49%, 相比 CK 减少 85.29%; 在  $40^\circ$  时,  $L_1G_1$  在观测期间平均产沙量为  $100.51 \text{ g/m}^2$ , 相比  $L_1G_2$  减少 63.38%, 相比  $L_2G_1$  减少 68.12%, 相比 CK 减少 86.03%; 在  $45^\circ$  时,  $L_1G_1$  在观测期间平均产沙量为  $102.46 \text{ g/m}^2$ , 相比  $L_1G_2$  减少 62.88%, 相比  $L_2G_1$  减少 64.14%, 相比 CK 减少 83.75% (图 6)。

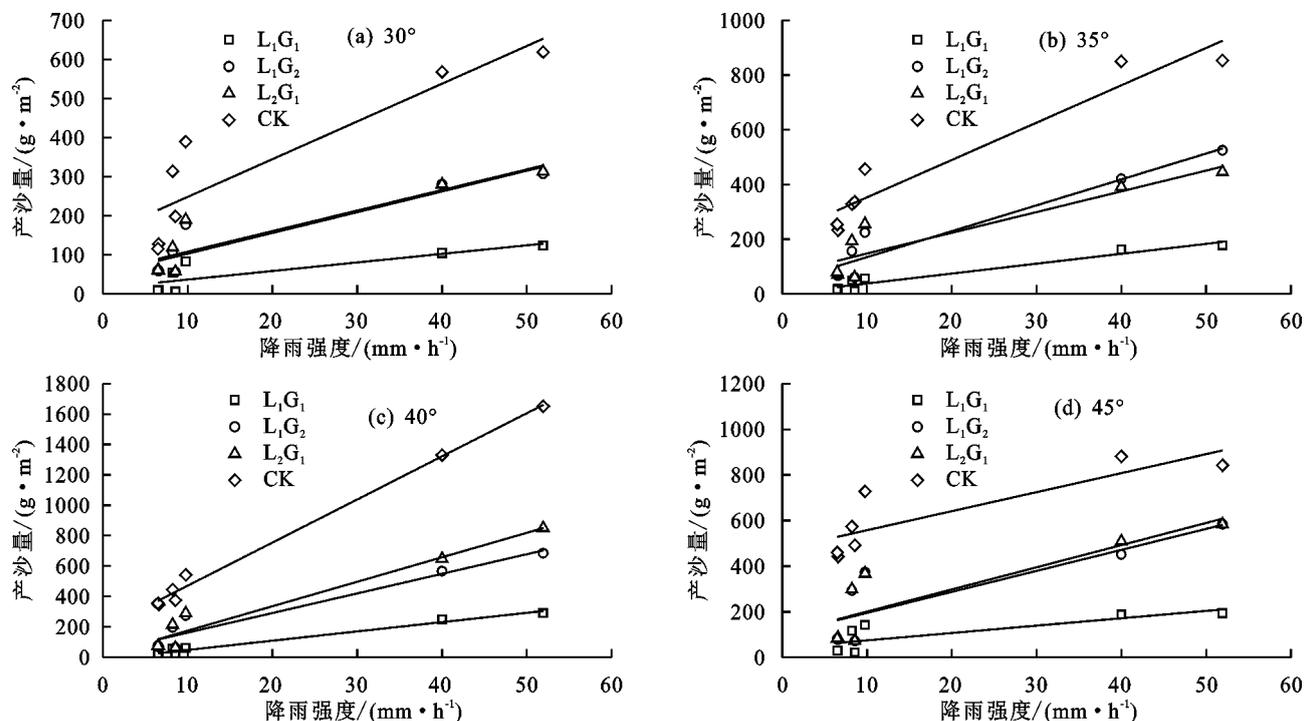


图 6 不同植被毯措施产沙量—降雨强度关系

### 3.3 不同坡度对各植被毯措施产流量和产沙量的影响

对于不同降雨强度,坡度变化的规律不同。从产流量来看,当降雨强度为 46.93, 35 mm/h 时,  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和裸地的产流量随着坡度的增加呈先增加后减小的趋势,  $40^\circ$  坡度下的  $L_1G_1$  ( $3\ 801.34, 3\ 190.18 \text{ g/m}^2$ )、 $L_1G_2$  ( $7\ 680.13, 6\ 766.31 \text{ g/m}^2$ )、 $L_2G_1$  ( $7\ 796.13, 6\ 247.58 \text{ g/m}^2$ ) 和裸地 ( $12\ 376.93, 10\ 980.87 \text{ g/m}^2$ ) 产流量较多,  $30^\circ$  坡度下的  $L_1G_1$  ( $1\ 367.32, 1\ 012.92 \text{ g/m}^2$ )、 $L_1G_2$  ( $2\ 779.27, 2\ 255.23 \text{ g/m}^2$ )、 $L_2G_1$  ( $2\ 877.93, 2\ 342.41 \text{ g/m}^2$ ) 和裸地 ( $5\ 351.26, 4\ 082.36 \text{ g/m}^2$ ) 产流量较少。当降雨强度为 1.49, 1.58, 3.56, 4.77, 3.22 mm/h 时,  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和裸地的产流量随着坡度的增加呈增加的趋势,  $45^\circ$  坡度下的  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和 CK 产流量较多,  $30^\circ$  坡度下  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和 CK 产流量较少 (图 7)。

从产沙量来看,当降雨强度为 46.93, 35 mm/h 时,  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和裸地的产沙量随着坡度的增加呈先增加后减小的趋势,  $40^\circ$  坡度下的  $L_1G_1$  ( $289.06, 248.15 \text{ g/m}^2$ )、 $L_1G_2$  ( $683.30, 565.20 \text{ g/m}^2$ )、 $L_2G_1$  ( $849.73, 647.16 \text{ g/m}^2$ ) 和裸地 ( $1\ 651.27, 1\ 329.48 \text{ g/m}^2$ ) 产沙量较多,  $30^\circ$  坡度下的  $L_1G_1$  ( $123.85, 104.41 \text{ g/m}^2$ )、 $L_1G_2$

( $307.84, 280.41 \text{ g/m}^2$ )、 $L_2G_1$  ( $313.54, 279.88 \text{ g/m}^2$ ) 和裸地 ( $619.15, 568.32 \text{ g/m}^2$ ) 产沙量较少。当降雨强度为 1.49, 1.58, 3.56, 4.77, 3.22 mm/h 时,  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和裸地的产沙量随着坡度的增加呈增加的趋势,  $45^\circ$  坡度下的  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和 CK 产沙量较多,  $30^\circ$  坡度下  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  和 CK 产沙量较少 (图 8)。

### 3.4 不同植被毯措施减流减沙效益分析

坡度相同时,植被毯措施不同,减流减沙效益存在一定的差异性,  $L_1G_1$  的减流减沙效益整体高于  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$ 。在  $30^\circ$  时,  $L_1G_1$  的平均减流效益比  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  高 25.03% 和 27.62%,  $L_1G_1$  的平均减沙效益比  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  高 32.20% 和 33.72%, 其中随着降雨强度的增大,  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  的减流效益变化不明显,  $L_1G_1$  的减沙效益从 91.97% 减少到 80%,  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  的减沙效益变化不明显 (表 7)。

在  $35^\circ$  时,  $L_1G_1$  的平均减流效益比  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  高 25.23% 和 27.04%,  $L_1G_1$  的平均减沙效益比  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  高 28.30% 和 29.94%, 其中随着降雨强度的增大,  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$ 、 $L_2G_1$  的减流效益变化不明显,  $L_1G_1$  的减沙效益从 93.95% 减少到 79.26%,  $L_1G_2$  的减沙效益从 72.36% 减少到 38.58%,  $L_2G_1$  的减沙效益从 68.82% 减少到 47.74% (表 8)。

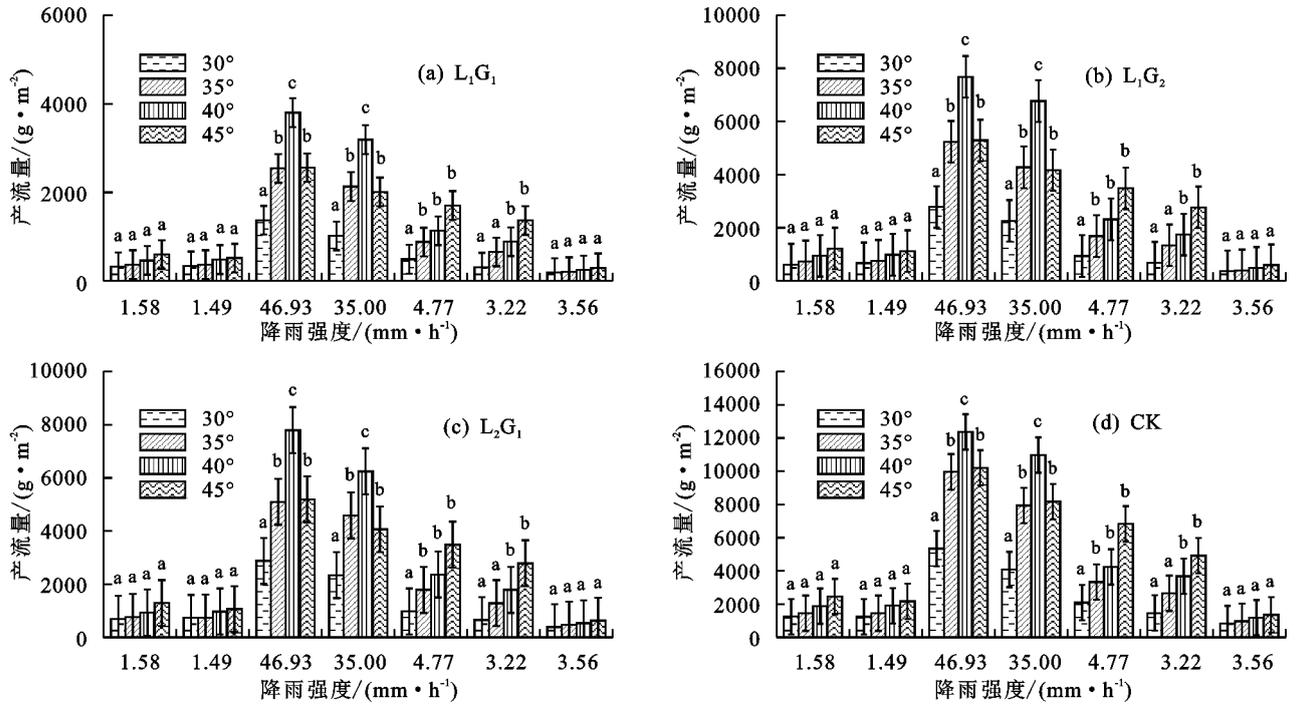


图 7 不同坡度下各植被毯措施产流量

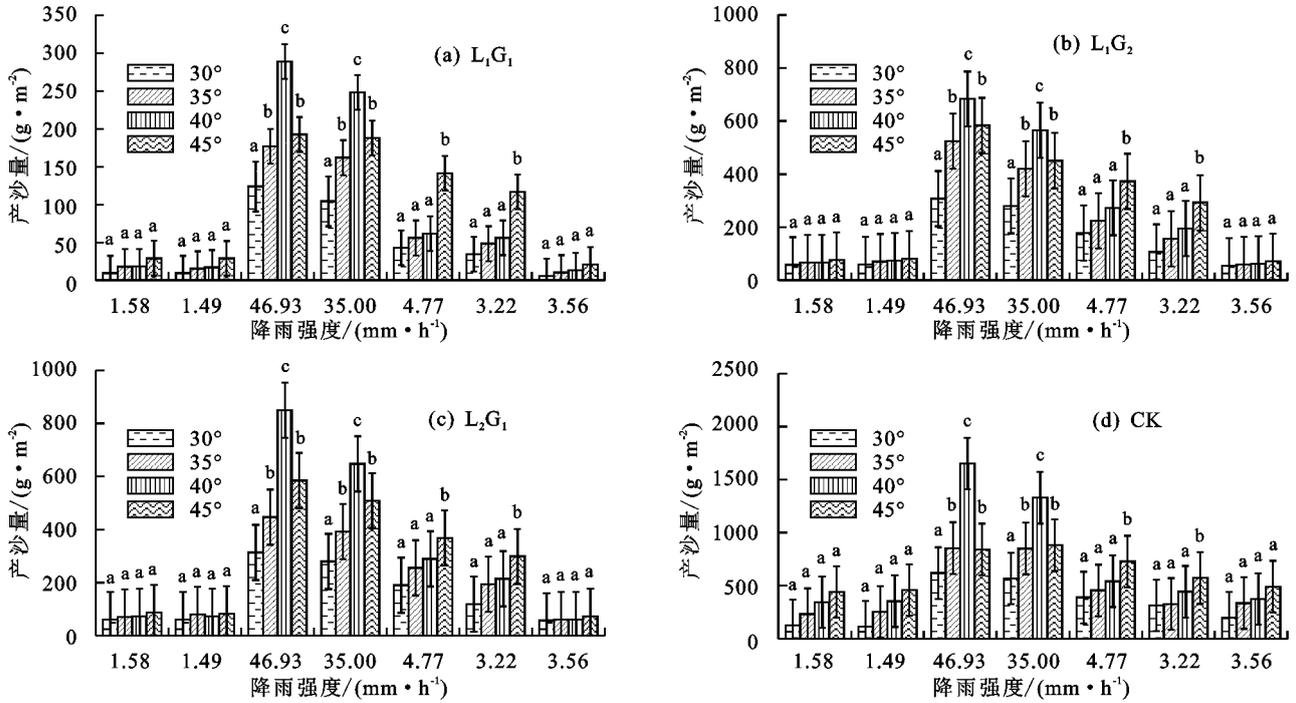


图 8 不同坡度下各植被毯措施产沙量

表 7 各植被毯措施在 30°下的减流减沙效益

| 降雨强度/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> |        | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> |        | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> |        |
|--------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
|                                | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% |
| 1.49                           | 72.82                         | 91.97  | 46.32                         | 48.47  | 40.59                         | 47.46  |
| 1.58                           | 74.53                         | 92.64  | 50.79                         | 54.19  | 44.65                         | 53.00  |
| 3.22                           | 79.03                         | 89.06  | 53.38                         | 65.91  | 55.45                         | 62.09  |
| 3.56                           | 77.79                         | 97.21  | 56.51                         | 72.16  | 54.29                         | 71.47  |
| 4.77                           | 76.70                         | 88.94  | 55.48                         | 54.32  | 53.34                         | 51.26  |
| 35.00                          | 75.19                         | 81.63  | 44.76                         | 50.66  | 42.62                         | 50.75  |
| 46.93                          | 74.45                         | 80.00  | 48.06                         | 50.28  | 46.22                         | 49.36  |

表8 各植被毯措施在35°下的减流减沙效益

| 降雨强度/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> |        | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> |        | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> |        |
|--------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
|                                | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% |
| 1.49                           | 74.94                         | 93.95  | 48.02                         | 72.36  | 49.12                         | 68.82  |
| 1.58                           | 74.73                         | 92.28  | 49.16                         | 71.51  | 47.14                         | 69.44  |
| 3.22                           | 75.38                         | 85.26  | 49.40                         | 52.40  | 51.55                         | 40.89  |
| 3.56                           | 79.09                         | 96.99  | 59.22                         | 82.11  | 51.09                         | 82.07  |
| 4.77                           | 73.62                         | 87.73  | 49.44                         | 50.81  | 46.22                         | 43.92  |
| 35.00                          | 73.15                         | 80.94  | 46.10                         | 50.51  | 42.16                         | 53.92  |
| 46.93                          | 74.52                         | 79.26  | 47.49                         | 38.58  | 48.84                         | 47.74  |

在40°时,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的平均减流效益比L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>高26.86%和27.05%,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的平均减沙效益比L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>高23.11%和26.58%,其中随着降雨强度的增大,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的减流效益变化不明显,L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>的减流效益从48.56%减少到37.95%,L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>的减流效益从49.03%减少到37.01%;L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的减沙效益从95.19%减少到82.49%,L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>的减沙效益从79%减少到58.62%,L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>的减沙效益从79.38%减少到48.54%(表9)。

表9 各植被毯措施在40°下的减流减沙效益

| 降雨强度/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> |        | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> |        | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> |        |
|--------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
|                                | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% |
| 1.49                           | 74.81                         | 95.19  | 48.56                         | 79.00  | 49.03                         | 79.38  |
| 1.58                           | 75.40                         | 94.65  | 49.59                         | 80.43  | 50.35                         | 78.88  |
| 3.22                           | 75.91                         | 87.35  | 52.60                         | 55.92  | 51.36                         | 51.77  |
| 3.56                           | 79.23                         | 96.49  | 58.40                         | 83.36  | 54.54                         | 83.63  |
| 4.77                           | 73.36                         | 88.62  | 45.41                         | 49.54  | 44.22                         | 46.53  |
| 35.00                          | 70.95                         | 81.33  | 38.38                         | 57.49  | 43.10                         | 51.32  |
| 46.93                          | 69.29                         | 82.49  | 37.95                         | 58.62  | 37.01                         | 48.54  |

从表10可以看出,植被毯措施在45°时,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的平均减流效益分别比L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>高26.11%和26.29%,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的平均减沙效益分别比L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>高24.40%和25.80%,其中随着降雨强度的增大,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>、L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>、L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>的减流效益变化不明显,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的减沙效益从93.7%减少到78.13%,L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>的减沙效益从82.19%减少到33.74%,L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>的减沙效益从81.99%减少到33.7%。

表10 各植被毯措施在45°下的减流减沙效益

| 降雨强度/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | L <sub>1</sub> G <sub>1</sub> |        | L <sub>1</sub> G <sub>2</sub> |        | L <sub>2</sub> G <sub>1</sub> |        |
|--------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
|                                | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% | 减流效益/%                        | 减沙效益/% |
| 1.49                           | 76.27                         | 93.70  | 48.33                         | 82.19  | 50.93                         | 81.99  |
| 1.58                           | 75.81                         | 93.41  | 50.54                         | 82.68  | 47.58                         | 80.37  |
| 3.22                           | 72.23                         | 79.64  | 43.69                         | 48.94  | 43.33                         | 47.90  |
| 3.56                           | 78.46                         | 95.80  | 56.57                         | 85.42  | 54.02                         | 85.32  |
| 4.77                           | 75.08                         | 80.60  | 49.06                         | 48.72  | 48.96                         | 49.49  |
| 35.00                          | 75.43                         | 77.66  | 49.05                         | 46.48  | 50.26                         | 39.57  |
| 46.93                          | 74.94                         | 78.13  | 48.23                         | 33.74  | 49.13                         | 33.70  |

## 4 讨论

从各植被毯措施的产流和产沙量分析来看,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>、L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>相比裸地产流量分别平均减少73.90%、46.52%和46.27%,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>、L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>相比裸地产沙量分别平均减少85.18%、57.47%和55.05%,这与李宏钧等<sup>[29]</sup>得出的植被毯可以有效减少水土流失量,相比裸地减少产沙量56%~98.9%,减少径流26%~81%的结论相似。L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的平均产

流量比L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>减少51.21%和51.43%,L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的平均产沙量比L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>平均减少65.14%和67.03%,这主要是因为L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的地表植被覆盖度高,豆科植物和禾本科植物的长势良好,能有效截流固沙,L<sub>1</sub>G<sub>2</sub>和L<sub>2</sub>G<sub>1</sub>地表植被覆盖度低,豆科植物和禾本科植物的长势较差,因此L<sub>1</sub>G<sub>1</sub>的防治水土流失的效果最好。

各植被毯措施的产流产沙量与降雨量的相关性

较差;各植被毯措施的产流量与降雨历时的相关性大于产沙量与降雨历时的相关性;各植被毯措施的产流产沙量与降雨强度呈极显著相关( $p < 0.01$ )。坡度一定时,各植被毯措施的产流产沙量随着降雨强度的增大呈增大趋势。在降雨强度一定时, $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  的产流产沙量远大于  $L_1G_1$ ,  $L_1G_1$  产流产沙量比  $L_1G_2$  减少 48.78% 和 35.60%, 比  $L_2G_1$  减少 48.25% 和 34.08%。这与葛金金等<sup>[30]</sup> 研究得出的采用室内人工模拟降雨试验,覆盖植被在同一坡度下累计产流产沙量随降雨强度的增加而增加的结论相似。

坡度是影响边坡产流产沙的重要因素之一,当降雨强度一定时,不同坡度对边坡产流和产沙的影响十分显著。坡度可以改变边坡径流的受力状况及其承雨面积。所以分析坡度与边坡产流产沙量之间的关系,对黄土丘陵沟壑区治理水土流失提供重要依据<sup>[28]</sup>。降雨强度为 35.46.93 mm/h,坡度在 30°~40°时,边坡产流量和产沙量随坡度增加呈增加趋势,坡度在 40°~45°时,边坡产流量和产沙量随坡度增加呈减少趋势,即在 40°附近出现临界坡度。这与白玉洁<sup>[31]</sup> 研究得出的黄土边坡在降雨强度为 1.0, 1.5 mm/min 时,产流量和产沙量随着坡度的增加呈先增加后减小的趋势,坡度为 40°~45°时存在峰值的结论相近,而与张会茹等<sup>[32]</sup> 研究得出的红壤边坡在 50 mm/h 时,产流量和产沙量呈先增加后减小的变化趋势,20°附近存在临界坡度的结论不一样,这主要因为地区不同,土壤质地、地表坡度和地表糙率不同导致,所以不同地区产流产沙临界坡度也不同<sup>[33]</sup>。耿晓东等<sup>[34]</sup> 研究表明,降雨强度和坡度与边坡产沙产流密切相关,降雨强度较小和坡度为 5°~30°时,坡度对产流产沙过程起主导作用。与本研究得出的结论相似,当降雨强度较小(1.49, 1.58, 3.22, 3.56, 4.77 mm/h),坡度为 30°~45°时,坡度是边坡产流量和产沙量的主要因素。

## 5 结论

(1)在产流和产沙方面, $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  相比裸地产流量分别平均减少 73.90%, 46.52% 和 46.27%,  $L_1G_1$ 、 $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  相比裸地产沙量分别平均减少 85.18%, 57.47% 和 55.05%,  $L_1G_1$  的减流减沙效果最明显。

(2)同一坡度下各植被毯措施的产流产沙量随着降雨强度的增加呈增加趋势。

(3)当降雨强度为 1~5 mm/h 时,3 种植被毯措施和裸地的产流量和产沙量随着坡度的增加呈上升趋势;当降雨强度为 30~50 mm/h 时,3 种植被毯措施和裸地的产流产沙量随着坡度的增加呈先增加后

减小的趋势,坡度为 40°时出现峰值。

(4)同一坡度下植被毯措施不同,减流减沙效益也存在一定的差异性。 $L_1G_1$  的减流减沙效益整体高于  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$ ,  $L_1G_1$  的平均减流效益比  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  高 25.81% 和 27.00%,  $L_1G_1$  的平均减沙效益比  $L_1G_2$  和  $L_2G_1$  高 27.00% 和 29.01%。所以在黄土丘陵沟壑区,  $L_1G_1$  的防治水土流失效果最好。

## 参考文献:

- [1] 党宏民,张兴昌,高照良.中国西部地区水土流失影响因素及其防治对策研究[J].产业与科技论坛,2009,8(5):26-29.
- [2] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [3] Chen L D, Wang J, Fu B J, et al. Land-use change in a small catchment of northern Loess Plateau, China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 115 (1/4):161-173.
- [4] 魏强,柴春山.半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土流失治理综合效益评价指标体系与方法[J].水土保持研究,2007,14(2):87-89.
- [5] 贾志军,王小平,李俊义.晋西黄土高原降雨侵蚀力研究[J].中国水土保持,1991(1):45-48.
- [6] 朱显谟.黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J].水土保持通报,1981(4):13-18.
- [7] 王占礼,黄新会,张振国,等.黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J].水土保持通报,2005,25(4):1-4.
- [8] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等.黄土高原水土流失与土壤退化的研究[J].水土保持通报,1987(6):12-18.
- [9] 肖海,夏振尧,杨悦舒,等.三峡库区小流域产流产沙试验研究[J].水土保持通报,2014,34(4):260-263.
- [10] 张冠华,程冬兵,张平仓,等.紫鹊界梯田区域坡面产流产沙特征的模拟试验研究[J].水土保持通报,2013,33(6):9-12.
- [11] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,31(2):99-102.
- [12] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等.中国水土保持措施分类[J].水土保持学报,2013,27(2):80-84.
- [13] 岳恒陞,杨建英,杨阳,等.不同降雨强度条件下植被毯护坡技术的产流特性[J].中国水土保持科学,2015,13(1):35-41.
- [14] 杨晓晖,王小平,秦永胜.生态垫在京北石质山区盘山公路边坡绿化工程中应用效果评价[J].水土保持研究,2006,13(3):119-120.
- [15] 解学相,解世伟,牛似龙.柔性生态毯在莒县洛河治理工程中的应用[J].山东水利,2018(10):51-52.
- [16] 骆汉,赵廷宁,彭贤锋,等.公路边坡绿化覆盖物水土保持效果试验研究[J].农业工程学报,2013,29(5):63-70.

- [17] 唐涛,郝明德,单凤霞.人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J].水土保持研究,2007,14(4):9-11.
- [18] 王安,郝明德,王英文.人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J].水土保持通报,2012,32(2):26-28.
- [19] 刘巧玲,孙守文,冯大千,等.不同覆盖物对城市绿地土壤保水效果的试验研究[J].新疆农业科学,2006(5):436-438.
- [20] 顾小华,丁国栋,刘胜,等.一种新型的高速公路边坡生态防护技术[J].水土保持研究,2006,13(1):106-107.
- [21] 赵方莹,逢红,祁有祥,等.城市河渠生态护坡技术效益对比:以北京市新开渠为例[J].中国水土保持科学,2006(增刊1):67-70.
- [22] 马文宝,姬慧娟,宿以明,等.植被毯边坡防护特点及其研究应用[J].中国水土保持,2013(1):30-33.
- [23] 周美超.清水河县公益林生态效益评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [24] 杨阳.呼和浩特市清水河县银贡山公园观叶树木引种适应性评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [25] 闵俊杰.不同植被格局下人工模拟降雨对坡面侵蚀的影响[D].南京:南京林业大学,2012.
- [26] 陈建纲.混播草地播种量的计算方法[J].农村养殖技术,2004(17):34.
- [27] 路炳军,袁爱萍,章文波.径流小区集流桶(池)泥沙含量快速测定方法探讨[J].水土保持通报,2009,29(2):15-17.
- [28] 田野.堆渣边坡两种护坡措施的水土保持效益研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [29] 李宏钧,孔亚平,张岩.植物纤维毯生态防护效益研究述评[J].中国水土保持科学,2016,14(3):146-154.
- [30] 葛金金,杨加智,詹美礼,等.坡度与降雨强度对坡面侵蚀产沙过程影响的试验研究[J].源科学,2015,33(2):101-104.
- [31] 白玉洁.急陡黄土坡面土壤侵蚀过程研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [32] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [33] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001(5):449-457.
- [34] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.
- (上接第60页)
- [22] Yan H J, Bai G, He J Q, et al. Influence of droplet kinetic energy flux density from fixed spray-plate sprinklers on soil infiltration, runoff and sediment yield[J]. Biosystems Engineering,2011,110(2):213-221.
- [23] 张晓艳,李琴书.不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):12-17.
- [24] 张少良,张兴义,刘晓冰,等.典型黑土区不同坡位剖面土壤速效钾空间分布规律研究[J].土壤,2014,46(2):218-224.
- [25] 岳坤前,顾再柯,李瑞.喀斯特石漠化地区地下水土流失研究进展与展望[J].中国水土保持,2015(5):58-61.
- [26] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.牧草覆盖对坡面土壤矿质氮素流失的影响[J].应用生态学报,2006,17(12):2297-2301.
- [27] Young R A, Olness A E, Mutchler C K, et al. Chemical and physical enrichments of sediment from cropland[J].Transactions of the Asae,1986,29(1):165-169.
- [28] 张冠华,刘国彬,王国梁,等.黄土丘陵区两种典型灌木群落坡面侵蚀泥沙颗粒组成及养分流失的比较[J].水土保持通报,2009,29(1):1-6.
- [29] 廖晓勇,陈治谏,刘邵权,等.三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征[J].水土保持研究,2005,12(1):159-161.