

## 太行山土石山区典型植物措施水土保持效应

高磊<sup>1,2</sup>, 饶良懿<sup>1,2</sup>, 崔飞波<sup>3</sup>, 李志斌<sup>3</sup>, 杜柳红<sup>3</sup>, 刘利峰<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3. 山西省长治市水土保持试验站, 山西 长治 046000)

**摘要:** 基于山西省平顺县白马小流域标准坡面径流小区的观测试验, 以裸地作为对照, 运用统计学分析方法, 对不同降水量和降雨强度下典型植物措施坡面的产流产沙量进行对比, 同时分析各坡面的土壤含水率变化情况, 研究太行山土石山区典型植物措施坡面的产流产沙规律和降雨对坡面土壤含水率的影响。结果表明: ①大雨和暴雨是造成各坡面水土流失的主要降雨类型; 在中雨强和高雨强条件下, 各坡面径流小区的产流量占总产流量的 71.94%~73.60%, 产沙量占总产沙量的 80.78%~90.35%。②在各降雨类型条件下, 各坡面的产流产沙量为: 裸地>自然荒坡>人工草地>灌木林地>乔木林地, 灌木林地和乔木林地的产流产沙最少, 能够有效防治该地区的水土流失。③各坡面径流小区的土壤含水量变化趋势基本一致, 其变化趋势与降雨分布有很好的一致性, 土壤含水率变化受降雨影响明显。图 5 表 2 参 18

**关键词:** 水土保持学; 典型植物措施; 产流产沙; 坡面; 太行山土石山区

**中图分类号:** S714.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2017)06-1079-08

## Soil and water conservation effects of plant measures in rocky areas of the Taihang Mountains

GAO Lei<sup>1,2</sup>, RAO Liangyi<sup>1,2</sup>, CUI Feibo<sup>3</sup>, LI Zhibin<sup>3</sup>, DU Liuhong<sup>3</sup>, LIU Lifeng<sup>3</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Experimental Station of Soil and Water Conservation of Changzhi City, Changzhi 046000, Shanxi, China)

**Abstract:** This study was undertaken to determine the regulation of runoff and sediment yield on slopes with typical plant cover measures and the influence of rainfall on soil moisture for slope-land in rocky areas of the Taihang Mountains. Based on standard runoff plot observations in the Baima Small Watershed in Pingshun County, Shanxi Province, runoff and sediment yield on slopes with typical plant cover measures for different rainfall patterns and rainfall intensities were compared. Analysis of changes in soil moisture content for each slope with bare land as a control was conducted with statistical analysis methods. Results showed that 1) heavy rain and rainstorms were the main rainfall patterns causing soil and water losses. With moderate rainfall intensity and high rainfall intensity, runoff and sediment yield of runoff plots on slopes accounted for up to 71.94%–73.60% of the total runoff and 80.78%–90.35% of the total sediment. 2) With various patterns of rainfall, runoff and sediment yield on slopes with different cover patterns were bare land > natural slope > artificial grasses > shrubs > forest. 3) The slope runoff plots for changes in soil moisture were identical with and rainfall distribution being consistent. Thus, shrub and forests could effectively control soil and water loss in this area with soil moisture changes being strongly influenced by rainfall. [Ch, 5 fig. 2 tab. 18 ref.]

**Key words:** soil and water conservation; typical plant measures; runoff and sediment yield; slope; rocky areas

收稿日期: 2016-11-07; 修回日期: 2017-01-06

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201501045)

作者简介: 高磊, 从事水土保持和生态工程研究。E-mail: 530638343@qq.com。通信作者: 饶良懿, 教授, 博士, 从事水土保持和生态工程研究。E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

of the Taihang Mountains

降雨是导致北方土石山区水土流失的主要动力,其时间和空间尺度上的变化对坡面径流和土壤侵蚀影响较大<sup>[1-2]</sup>。除降雨以外,整地方式、土壤特性、植被覆盖、坡度坡长等<sup>[3-6]</sup>也是影响坡面水土流失的重要因素。目前,国内外不少学者开展了坡面尺度上不同措施的水土流失特征研究<sup>[7-9]</sup>,例如,利用土壤侵蚀模型评价水土保持措施对土壤侵蚀的影响研究<sup>[10-12]</sup>等。王忠科等<sup>[13]</sup>对河北张家口地区的水土保持措施效益进行了研究,发现水平梯田的拦沙蓄水效果最高,植物措施结合适当整地可以取得良好的水土保持效果,沟头防护措施可以减少沟道径流,有效抑制沟道土壤侵蚀。和继军等<sup>[14]</sup>评价了张家口地区水土保持措施空间配置的适宜性,认为水平沟、鱼鳞坑整地形式的荒坡地水土保持效益最好,人工种草和自然封禁次之。许海超等<sup>[15]</sup>就燕山土石山区下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响进行研究,认为鱼鳞坑、梯田、水平阶等整地工程在改变坡面下垫面条件的情况下,能够有效蓄水拦沙,防治坡面侵蚀。路炳军等<sup>[16]</sup>认为北京西部山区减流减沙效益最大的是人工苜蓿 *Medicago sativa* 草地,其次为天然草地和树盘/人工林,再次为石坎梯田/蔬菜,平播农作物的效益最小,但也明显优于裸地。由于各地区的地理环境和土地利用状况不同,自然降雨的特点也存在差异,因此不同地区的水土流失规律不尽相同。太行山地区属典型北方土石山区,是华北重要供水水源地。该区人口众多,生态环境脆弱,水土流失严重<sup>[17]</sup>。迄今为止,该区不同措施水土保持效应研究的报道较少,亟待开展这方面的研究工作。本研究以山西省平顺县白马小流域坡面径流小区的观测数据为基础,运用统计学方法,分析北方土石山区太行山地区的降雨、产流产沙特征,比较不同植物措施对坡面产流产沙的影响。研究结果可为该区生态环境建设、水土流失综合治理和坡面水土保持措施效应评价提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于山西省平顺县青羊镇白马小流域,面积为 4.47 km<sup>2</sup>,属于海河流域浊漳河水系,为典型北方土石山区。地理位置为 36°07′19″~36°08′52″N, 113°20′30″~113°22′11″E, 海拔 1 303.3~1 522.5 m, 暖温带大陆性气候,土壤侵蚀类型以水蚀为主。多年平均气温为 9.1 ℃, ≥10 ℃的积温 3 177.5 ℃, 无霜期 125.0 d, 多年平均降水量为 628.9 mm, 主要集中在 6~9 月, 且年际、年内变化较大, 分配不均匀。多年平均蒸发量为 1 631.6 mm, 气候干旱。土壤类型为石灰性褐土, 是该区最普遍的土壤类型, 土层厚度为 0~50 cm, 抗蚀性差, 水土流失严重。流域内植被主要是森林、灌丛、草地、荒山、玉米地等, 主要植物有白羊草 *Bothriochloa ischaemum*, 紫蒿 *Artemisia verlotorum*, 黄栌 *Cotinus coggygia*, 黄刺梅 *Rosa xanthina*, 山桃 *Amygdalus davidiana*, 油松 *Pinus tabulaeformis*, 山杨 *Populus davidiana*, 侧柏 *Platycladus orientalis*, 辽东栎 *Quercus wutaishansea*, 山杏 *Prunus armeniaca*, 虎榛子 *Ostryopsis davidiana*, 胡枝子 *Lespedeza bicolor*, 沙棘 *Hippophae rhamnoides* 和铁杆蒿 *Heteropappus altaicus* 等。

## 2 试验设计与方法

### 2.1 试验设计

根据平顺县白马小流域水土流失综合观测站的地形条件和当地植被类型,在试验区内共设置 10 个坡面径流试验小区。小区统一规格为长 20 m 宽 5 m 面积 100 m<sup>2</sup>, 其中包括 1 个标准小区, 4 个植物措施和 5 个植物+工程措施小区, 于 2006 年开始观测。本研究选取标准小区和 4 个植物措施小区进行研究, 所涉及的植物均为该区常见物种, 可代表该区的水土保持植物措施情况。坡面小区在植被生长期隔 15 d 进行 1 次乔灌木覆盖度调查, 通过修枝、除草等措施控制植被覆盖度。径流小区外围砌有 10 cm 厚的水泥板, 以防止外界径流流入, 小区两侧各留有 0.3 m 宽的隔离带, 上方设置排水沟, 下方出口与分水箱连接。分水箱与集水箱连接, 以收集降雨产生的径流和泥沙。各径流小区基本情况见表 1。

### 2.2 观测方法

径流小区降雨数据观测: 采用虹吸式自记雨量计(记录纸分度范围为 0.1~10.0 mm; 记录误差为 ±0.05 mm)观测降雨, 每天 8:00 更换记录纸, 根据降雨过程线分析降雨量、降雨历时和降雨强度; 利用观测

表 1 径流小区基本情况

Table 1 Basic situation of the runoff plots

| 小区 | 坡度/(°) | 坡向/(°) | 土地利用           | 整地方式  | 土壤类型  | 土层厚度/cm | 覆盖度/% | 植株密度/(株·m <sup>-2</sup> ) |
|----|--------|--------|----------------|-------|-------|---------|-------|---------------------------|
| 1  | 18°20′ | 210    | 裸地(标准小区)       | 无     | 石灰性褐土 | 50      | 0     | 0                         |
| 2  | 18°20′ | 210    | 自然坡(白羊草、紫萁、黄栌) | 自然荒草坡 | 石灰性褐土 | 50      | 50    | 22.00                     |
| 3  | 18°20′ | 210    | 人工种草(白羊草)      | 条播    | 石灰性褐土 | 50      | 40    | 20.00                     |
| 4  | 18°20′ | 210    | 灌木(黄刺梅)        | 鱼鳞坑   | 石灰性褐土 | 50      | 45    | 2.50                      |
| 5  | 18°20′ | 210    | 乔木(山桃)         | 鱼鳞坑   | 石灰性褐土 | 50      | 42    | 0.16                      |

的降雨数据,应用降雨侵蚀力计算软件计算出降雨侵蚀力,计算公式:  $E = \sum_{k=1}^n (e_k P_k)$ ;  $e_k = 0.119 + 0.873 \log i_k$ ;

$R = EI_{30}$ 。其中:  $E$  为降雨总动能,  $\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $e_k$  为  $k$  时段单位降雨动能,  $\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;  $P_k$  为  $k$  时段降雨量,  $\text{mm}$ ;  $i_k$  为  $k$  时段降雨强度,  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $R$  为降雨侵蚀力,  $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $I_{30}$  为最大 30 min 降雨强度,  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

径流量观测:每次自然降雨后,立即采用水位计(精度为  $\geq \pm 0.5\%$ )测定分水箱中水深,计算地表径流总量、径流深及径流系数;若降雨量较大,致降雨从分水箱的出口流入集水箱,则立即测定集水箱中的水深,计算公式:  $H = 10^3 V / S$ ;  $V = S_1 H_1 + r S_2 H_2$ 。其中:  $H$  为坡面径流深 ( $\text{mm}$ );  $V$  为坡面总产流体积 ( $\text{m}^3$ );  $S$  为径流小区面积 ( $\text{m}^2$ );  $S_1$  为分水箱底面积 ( $\text{m}^2$ );  $S_2$  为集水箱底面积 ( $\text{m}^2$ );  $H_1$  为分水箱水深 ( $\text{m}$ );  $H_2$  为集水箱水深 ( $\text{m}$ );  $r$  为一级分流系数。

产沙量观测:充分搅匀分水箱中的泥水,分层取 2 000 mL 泥水混合样带回实验室,将样品过滤后烘干,用千分之一电子天平称其质量,以计算各坡面产沙模数,计算公式:  $M = 10^4 M_s / S$ ;  $M_s = 10^{-6} [m(1-c) + 10^3 (S_1 H_1 C_1 + r S_2 H_2 C_2)]$ 。其中:  $M$  为坡面产沙模数 ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ );  $M_s$  为坡面总产沙量 ( $\text{t}$ );  $m$  为水箱土总重量 ( $\text{g}$ );  $c$  为分水箱土含水率;  $C_1$  为分水箱含沙率 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $C_2$  为集水箱含沙率 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )。

土壤含水量观测:采用时域反射仪(TDR)法测定土壤含水量,隔 15 d 测定 1 次,测定深度为 5, 10, 20, 30 cm;

### 2.3 数据来源和处理

收集整理 2015 年(4–10 月)平顺县白马小流域的降雨数据,各坡面径流小区的产流产沙数据。本研究把能够导致坡面径流小区发生水土流失的降雨均视为侵蚀性降雨。在汛期的 45 场降雨中有 12 场侵蚀性降雨,将 12 场侵蚀性降雨按照降雨等级划分标准 GB/T 28592–2012《降水量等级》进行划分(表 2)。

运用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 统计软件进行数据的整理以及统计分析,应用 Pearson 相关系数进行显著性检验。

## 3 结果与分析

### 3.1 白马小流域降雨分布特征

研究区降雨主要发生在 4–10 月,期间共有 45 场降雨,降雨量总量为 440.30 mm,其中侵蚀性降雨有 12 场(表 2),侵蚀性降雨总量为 285.67 mm,占 4–10 月份降雨总量的 64.88%。由表 2 可知:侵蚀性降雨主要集中于 5–8 月,该期间降雨量为 362.8 mm 占监测期总降雨量的 82.39%;月最大降雨量为 101.4 mm,出现在 8 月;单次最大降雨量为 61.7 mm,出现在 6 月 23 日,最小降雨量为 5.8 mm,出现在 8 月 29 日;次降雨的最大平均雨强为  $15.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最小为  $1.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;最大 30 min 雨强最大值为  $41.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最小为  $3.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;最大降雨侵蚀力  $298.5 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最小为  $7.9 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 3.2 坡面产流量与降雨量、降雨强度的关系

将侵蚀性降雨按 GB/T 28592–2012 的降雨等级划分标准分成 3 个等级,分别是中雨、大雨、暴雨。在不同降雨等级下各坡面径流小区的产流量情况见图 1。在中雨、大雨、暴雨条件下,各坡面径流小区的产流情况是裸地 > 自然荒坡 > 人工草地 > 灌木林地 > 乔木林地,可见乔木林地在各降雨等级下的减流效应最大,在大雨量降雨发生时能够有效减少坡面径流的产生。在中雨条件下,4 种典型植物措施坡面径流小区的产流量相差不大,差异不显著 ( $P > 0.05$ );在大雨条件下各坡面径流小区的产流量均有显著

表 2 2015 年 4–10 月白马小流域 12 场侵蚀性降雨特征

Table 2 Characteristics of 12 erosive rainfall in Baima small watershed on April to October of 2015

| 日期(月-日) | 降雨历时/min | 降雨量/mm | 降雨类型 | 平均雨强/(mm·h <sup>-1</sup> ) | <i>I</i> <sub>30</sub> /(mm·h <sup>-1</sup> ) | 降雨侵蚀力/(MJ·mm·hm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
|---------|----------|--------|------|----------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 04-02   | 371      | 21.2   | 大雨   | 3.43                       | 12.23                                         | 41.22                                            |
| 05-01   | 901      | 34.1   | 大雨   | 2.27                       | 18.16                                         | 99.53                                            |
| 05-06   | 496      | 16.5   | 大雨   | 2.00                       | 24.14                                         | 96.16                                            |
| 05-28   | 818      | 26.8   | 大雨   | 1.97                       | 4.78                                          | 15.54                                            |
| 06-23   | 600      | 61.7   | 暴雨   | 6.18                       | 10.96                                         | 53.95                                            |
| 07-15   | 766      | 14.1   | 中雨   | 1.10                       | 4.53                                          | 7.96                                             |
| 07-17   | 266      | 27.1   | 大雨   | 6.09                       | 41.85                                         | 298.54                                           |
| 07-21   | 77       | 15.1   | 大雨   | 11.77                      | 23.66                                         | 90.72                                            |
| 08-03   | 873      | 15.9   | 中雨   | 1.09                       | 13.12                                         | 48.54                                            |
| 08-05   | 50       | 10.7   | 中雨   | 12.84                      | 19.95                                         | 52.75                                            |
| 08-29   | 23       | 5.9    | 中雨   | 15.10                      | 31.76                                         | 17.56                                            |
| 08-31   | 427      | 36.28  | 暴雨   | 5.09                       | 11.44                                         | 276.22                                           |

增加，相比于中雨条件增加幅度分别是：裸地 114.88%，自然荒坡 190.01%，人工种草 232.62%，灌木 313.45%，乔木451.77%。与中雨和大雨条件相比，在暴雨条件下，各坡面径流小区的产流量增加显著，相比于中雨条件增加幅度分别是：裸地 295.44%，自然荒坡 339.07%，人工种草 400.86%，灌木 565.97%，乔木 765.25%。相比于大雨条件增加幅度分别是：裸地 84.74%，自然荒坡 51.39%，人工种草 50.58%，灌木 61.08%，乔木 56.81%。与裸地相比 4 种典型植物措施坡面径流小区的产流量显著减少；在大雨和暴雨条件下各坡面产流量占总产流量的 85.91%~93.58%。可见，该区 4 种植物措施能有效发挥保水作用，尤其是在大雨和暴雨发生时，产流量最少。

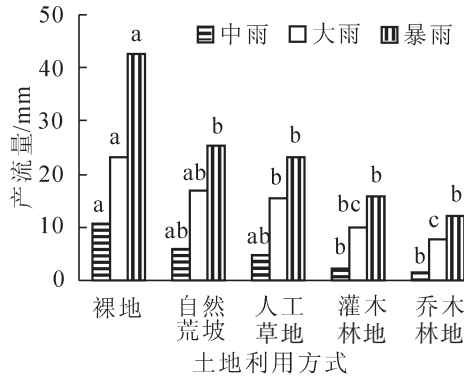
将侵蚀性降雨以最大 30 min 降雨强度的大小进行雨强分类，分为低雨强( $I_{30} \leq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )，中雨强( $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} < I_{30} \leq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )和高雨强( $I_{30} > 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。各坡面径流小区在各雨强等级下的产流量情况见图 2。在低雨强、中雨强、高雨强下，各坡面径流小区的产流情况是裸地>自然荒坡>人工草地>灌木林地>乔木林地，产流量变化不大且相对比较均匀，但与裸地相比在不同降雨强度下 4 种植物措施的产流量显著偏少。在低雨强条件下，各坡面径流小区的产流量差异不显著，可能是因为雨强较小使得大部分降雨入渗土壤或被植被截留；在中雨强和高雨强下，各坡面径流小区的产流量占总产流量的 71.94%~73.60%，与裸地小区比较，灌木林地和乔木林地在中雨强和高雨强下的减流效应最为显著。

3.3 坡面产沙量与降雨量、降雨强度的关系

在地形、土壤、坡度、降雨等条件相同的情况下，植物覆盖对坡面产沙量的影响最为突出。在侵蚀性降雨分为 3 个等级的条件下，各坡面径流小区的产沙量如图 3 所示。

由图 3 可知：在各降雨等级条件下，坡面径流小区的产沙量是裸地>自然荒坡>人工草地>灌木林地>乔木林地，乔木林地的减沙效应最优。在中雨条件下，各坡面径流小区的产沙量差异不大，基本都在北方土石山区允许的土壤流失范围内(小于 200 t·km<sup>-2</sup>)；相比于中雨条件下，大雨条件下各坡面径流小区产流量有所增加，增幅分别是裸地 207.16%，自然荒坡 251.68%，人工草地 143.30%，灌木林地 4.87%，乔木林地 115.78%，灌木林地增幅最小，可见降雨量变化对灌木林地产沙量影响最小。在暴雨条件下，降雨量最大，雨滴击溅地表，破坏土壤结构，使得入渗能力降低，坡面径流增加，土壤流失严重。因此各坡面径流小区在暴雨条件下的产沙量最大，占坡面总产沙量的 48.10%~64.95%。总体来看，在大雨和暴雨条件下灌木林地和乔木林地小区的产沙量最少(小于 200 t·km<sup>-2</sup>)，防治土壤侵蚀的效果最优，4 种典型植物措施小区的减沙效应明显。因此，在太行山地区应加强人工草地、灌木林地、乔木林地等植物措施的合理布设，防治各类降雨造成的水土流失。

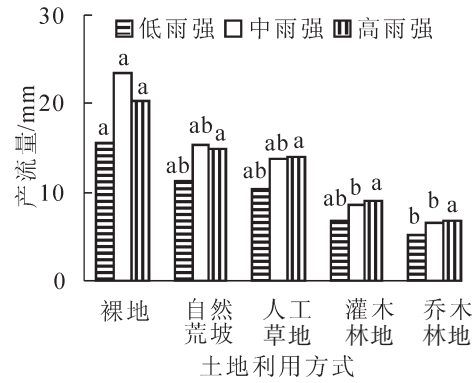
将侵蚀性降雨以最大 30 min 降雨强度大小进行雨强分类，分为低雨强、中雨强、高雨强 3 种类型。各雨强等级下各坡面径流小区产沙量如图 4 所示。在低雨强条件下，雨滴动能较小，对地面的击溅作用较弱，仅有面蚀产生，因此产沙量较小，各坡面径流小区产沙量差异不显著( $P > 0.05$ )；在中雨强和高雨强条件下，雨滴的动能较大，对地面的击溅作用增强，破坏土壤结构，入渗减弱，径流量增加，侵蚀



不同小写字母表示相同降雨量下  
不同土地利用方式产流量间存在  
显著差异( $P < 0.05$ )

图 1 各降雨等级下典型植物措施坡面产流量

Figure 1 Runoff yield of typical plant measures under different rainfall levels



不同小写字母表示相同雨强下不  
同土地利用方式产流量间存在显  
著差异( $P < 0.05$ )

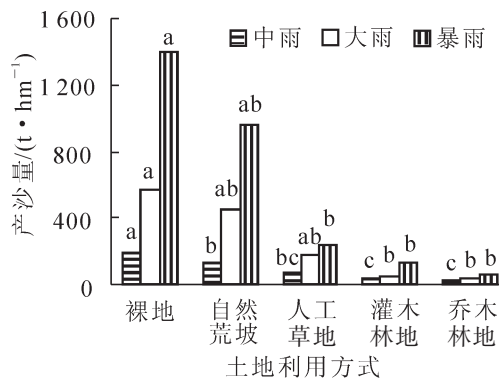
图 2 各雨强等级下典型植物措施坡面产流量

Figure 2 Runoff yield of typical plant measures under different rainfall intensity

能力增强, 因此各坡面径流小区产沙量明显增加。相比于低雨强条件, 在中雨强下各坡面产沙量增加, 增幅分别为裸地 262.73%, 自然荒坡 315.97%, 人工草地 116.29%, 灌木林地 95.33%, 乔木林地 84.52%。而在高雨强下各坡面产沙量增幅则分别是裸地 473.62%, 自然荒坡 690.59%, 人工草地 310.61%, 灌木林地 170.00%, 乔木林地 135.71%。其中, 裸地、自然荒坡、人工草地产沙量增幅最大, 而灌木、乔木林地产沙量增幅较小, 均在北方土石山区允许土壤流失量范围内(小于  $200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ )。总之, 与裸地小区相比, 在各雨强等级下 4 种典型植物措施小区产沙量明显较少, 其中乔木林地、灌木林地的产沙量最低, 人工草地和自然荒坡次之。

### 3.4 不同措施坡面径流小区土壤含水率变化规律

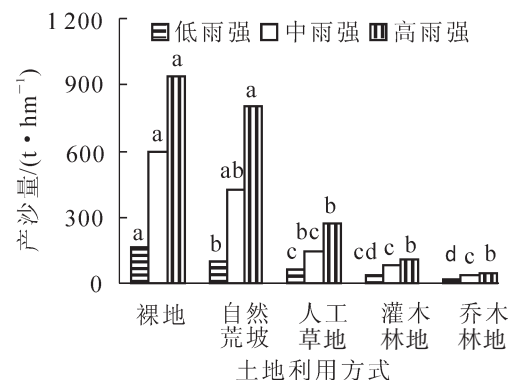
2015 年(4–10 月)标准小区和 4 个植物措施坡面径流小区 0~30 cm 土层平均含水率动态变化如图 5 所示。由于土壤含水率是隔 15 d 监测 1 次, 因此降雨量也计算 15 d 内的总降水量。由图 5 知, 在 4–10 月的降雨过程中, 各措施坡面径流小区的土壤含水率变化趋势基本一致, 其变化趋势与半个月降雨量分布有很好的-致性。降雨主要集中在 7 月和 8 月, 且这 2 个月降雨次数较多, 降雨量大, 相对均匀, 因此导致这期间各坡面径流小区土壤含水率最高, 为 17.1%~26.0%。此外, 汛期的侵蚀性降雨也主要出现在这 2 个月, 再加之较高的土壤含水率, 极易导致各坡面径流小区发生水土流失。4 月 2 日初次观测的土壤含水率较高, 为 16.6%~21.9%。分析发现在 4 月 2 日有一场产流性降雨, 降雨量为 21.2 mm, 可见降雨对表层土壤含水率影响较大。4 月中期降雨量几乎为 0, 导致土壤含水率明显下降, 同时这一时



不同小写字母表示相同降雨量下  
不同土地利用方式产沙量间存在  
显著差异( $P < 0.05$ )

图 3 各降雨等级下典型植物措施坡面产沙量

Figure 3 Sediment yield of typical plant measures under different rainfall levels



不同小写字母表示相同雨强下不  
同土地利用方式产流量间存在显  
著差异( $P < 0.05$ )

图 4 各雨强等级下典型植物措施坡面产沙量

Figure 4 Sediment yield of typical plant measures under different rainfall intensity levels

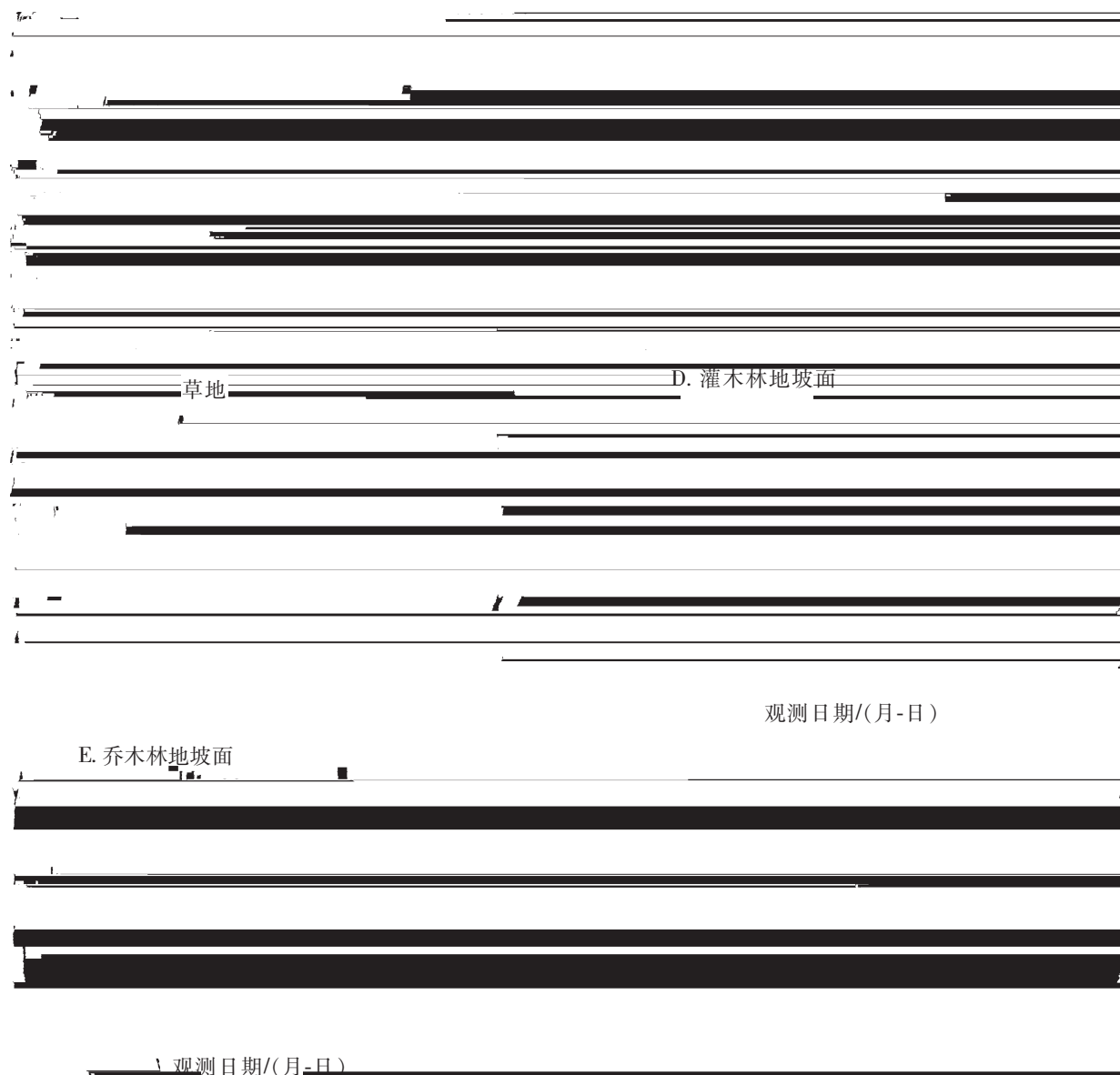


图 5 不同坡面(A~E)土壤含水率动态变化

Figure 5 Dynamic changes of soil moisture content in different slope (A – E)

期植被处于萌发生长状态需水量大，也是导致土壤含水率下降的原因。随着 5 月降水量逐渐增多，以及植物措施保水作用的发挥使得土壤含水率呈增加趋势，为 14.9%~23.1%；9 月和 10 月土壤含水率下降明显，主要是因为这一时期降水量明显减少，植物开始枯萎保水作用减弱。该时期各坡面径流小区土壤含水量差异明显。总之，7 月和 8 月降雨次数多，降雨量大且均匀，因此土壤含水率最高，为 17.1%~26.0%，即为“丰水期”；4~6 月，降雨逐渐增多，植物萌发保水作用增强，土壤含水率升高，这一时期为“波动期”；9 月和 10 月，降雨明显减少，植被枯萎，土壤含水率下降明显，因此这一时期为“枯水期”。各坡面径流小区土壤含水率变化趋势基本一致，其变化趋势与降雨分布有很好的一致性，土壤含水率变化受降雨影响明显。

4 讨论

在大雨和暴雨条件下，各坡面径流小区产流产沙量增幅较大，是造成该区水土流失的主要降雨类型。马鹏<sup>[18]</sup>也认为与大雨相比，暴雨更容易造成土壤侵蚀，土壤侵蚀的主要贡献者是大雨。本研究认为 4 种典型植物措施中灌木林地和乔木林地各种降雨类型下产流产沙量最少，能够有效防治该地区的水土流失，在低雨强条件下，降雨造成的坡面径流和土壤侵蚀并不严重，但在中雨强和高雨强条件下，各坡面径流小区的产流量占总产流量的 71.94%~73.60%，产沙量占总产沙量的 80.78%~90.35%。可见中雨

强和高雨强造成的产流产沙量是该区水土流失的主要来源，这与王志伟等<sup>[8]</sup>研究结果一致。降雨不仅导致坡面水土流失，同时也对坡面土壤含水率有一定影响。研究发现：4–6 月降雨较少且不均匀，同时植被处于萌发生长阶段需水量较大，导致各坡面表层土壤含水率波动较大，含水率较低，为 10.0%~22.3%。此时期为“波动期”；7–8 月降雨相对较多且降雨均匀，植被的保水作用也在这一时期得到充分发挥，表层土壤含水率较高且稳定，土壤含水率基本维持在 17.1%~26.0%，此时期为“丰水期”；9–10 月降雨急剧减少，植被枯萎，土壤含水率基本处于最低，维持在 10.8%~16.0%，此时期为“枯水期”。同时，发现各坡面径流小区的土壤含水率的变化趋势与降雨分布有很好的一致性，土壤含水率变化受降雨影响明显。

## 5 结论

本研究以山西省太行山土石山区白马小流域为研究区域，通过对标准小区和 4 个植物措施坡面径流小区的降雨和产流产沙进行观测，分析了不同降雨类型条件下各坡面径流小区产流产沙和表层土壤含水率变化规律。结论如下：①大雨和暴雨是造成各坡面水土流失的主要降雨类型；在中雨强和高雨强条件下，各坡面径流小区的产流量占总产流量的 71.94%~73.60%，产沙量占总产沙量的 80.78%~90.35%。②在不同降雨类型条件下，各坡面产流产沙量为裸地>自然荒坡>人工草地>灌木林地>乔木林地，灌木林地和乔木林地在各种降雨类型下产流产沙量最少，能够有效防治该区的水土流失。③4–6 月为各坡面表层土壤含水率“波动期”；7–8 月表层土壤含水率最高且稳定，土壤含水率在 17.1%~26.0%，此时期为“丰水期”；9–10 月为“枯水期”。各坡面径流小区土壤含水率变化趋势基本一致，其变化趋势与降雨分布有很好的一致性，土壤含水率变化受降雨影响明显。

综上所述，在太行山土石山区开展水土保持工作时，在裸地要采取必要的植物措施，尤其是乔木林和灌木林的布设将更加有利于水土流失防治。在雨季应注意防范大雨量、大雨强降雨事件引发的水土流失。每年 5–8 月是水土保持工作的关键时期，要加强水土流失防范工作。

## 6 参考文献

- [1] 李海防, 卫伟, 邓居礼, 等. 关川河流域 1995–2010 年降雨特征及其水土流失效应[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(6): 84 – 93.  
LI Haifang, WEI Wei, DENG Jülü, *et al.* Characteristics of precipitation and soil erosion from 1995 to 2010 Guanchuan River Basin [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2013, **33**(6): 84 – 93.
- [2] 梁娟珠. 不同植被措施下红壤坡面径流变化特征[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(6): 159 – 163.  
LIANG Juanzhu. Runoff changes on slope with different vegetation measures in red soil region [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2015, **35**(6): 159 – 163.
- [3] 姜娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(6): 36 – 41.  
JIANG Na, SHAO Ming'an. Characteristics of soil and water loss of different slope land uses in small watershed on the Loess Plateau [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2011, **27**(6): 36 – 41.
- [4] ZHAO Longshan, LIANG Xinlan, WU Faqi. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China [J]. *J Arid Land*, 2014, **6**(4): 400 – 409.
- [5] 闫胜军, 郭青霞, 闫瑞, 等. 不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(2): 45 – 49.  
YAN Shengjun, GUO Qingxia, YAN Rui, *et al.* Relationship of rainfall intensity and the characteristics of soil and water erosion under different land use types [J]. *J Soil Water Conserv*, 2015, **29**(2): 45 – 49.
- [6] 景可, 王万忠, 郑粉莉. 中国土壤侵蚀与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 樊登星, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2014, **12**(2): 24 – 28.  
FAN Dengxing, YU Xinxiao, JIA Guodong, *et al.* Characteristics of soil and water loss and its influencing factors on scale in rocky mountain area of Beijing [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2014, **12**(2): 24 – 28.
- [8] 王志伟, 陈志成, 艾钊, 等. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2012,

26(6): 17 – 20, 26.

WANG Zhiwei, CHEN Zhicheng, AI Zhao, *et al.* Erosion and desertification with mountain Yimeng typical surface soil caused by different rainfall intensity and slope [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, 26(6): 17 – 20, 26.

- [9] 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 81 – 86.

XIE Songhua, ZENG Jianling, YANG Jie, *et al.* Effects of different tillage measures on soil and water conservation in slope farmland of red soil in Southern China [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2010, 26(9): 81 – 86.

- [10] 林波, 刘琪璟, 尚鹤, 等. MIKE 11 /NAM 模型在挠力河流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 99 – 108.

LIN Bo, LIU Qijing, SHANG He, *et al.* Application of coupled MIKE11 /NAM model in Naoli River Basin, north-eastern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, 36(5): 99 – 108.

- [11] BETRIE G D, MOHAMED Y A, van GRIENSVEN A, *et al.* Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model [J]. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2011, 15(3): 807 – 818.

- [12] 樊登星. 北京山区坡面土壤侵蚀响应特征及模型模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

FAN Dengxing. *Study on Response Characteristics and Model Simulation of Soil Erosion in Mountainous Area of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

- [13] 王忠科, 和继军, 蔡强国. 北方土石山区小流域综合治理措施及效应研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 11 – 16.

WANG Zhongke, HE Jijun, CAI Qiangguo. Integrated control measures and their effects of small watershed in the rocky area of Northern China [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2008, 28(4): 11 – 16.

- [14] 和继军, 蔡强国, 方海燕, 等. 张家口地区水土保持措施空间配置效应评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 69 – 75.

HE Jijun, CAI Qiangguo, FANG Haiyan, *et al.* Effect evaluation of spatial allocation of water and soil conservation measures in Zhangjiakou area [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2009, 25(10): 69 – 75.

- [15] 许海超, 李子君, 林锦阔, 等. 燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 46 – 53.

XU Haichao, LI Zijun, LIN Jinkuo, *et al.* Influences of rainfall and underlying surface conditions on soil erosion and sediment yield in Yanshan Rocky Mountain Area [J]. *J Mount Res*, 2016, 34(1): 46 – 53.

- [16] 路炳军, 王志强. 北京西部山区径流小区产流产沙和土壤养分流失特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 33 – 39.

LU Bingjun, WANG Zhiqiang. Water and nutrient losses on runoff plots in the mountainous area at western Beijing [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2015, 13(6): 33 – 39.

- [17] 李秀彬, 马志尊, 姚孝友, 等. 北方土石山区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 9 – 15.

LI Xiubin, MA Zhizun, YAO Xiaoyou, *et al.* Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for rocky mountain areas in the Northern China [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2008, 6(1): 9 – 15.

- [18] 马鹏. 降雨因素对坡面产流产沙影响的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.

MA Peng. *Research of Rainfall Runoff and Sediment Factors on the Impact of Slope* [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.