

# 湘西北小流域坡面尺度地表径流与侵蚀产沙特征及其影响因素

周璟<sup>1,2</sup>, 张旭东<sup>2</sup>, 何丹<sup>3</sup>, 周金星<sup>2</sup>, 周小玲<sup>4</sup>, 王中建<sup>5</sup>

(1. 广州地理研究所, 广州 510070; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 湖南省林业科学研究院, 长沙 410004; 5. 慈利县林业局, 湖南 张家界 415300)

**摘要:** 根据湖南西北部武陵山区女儿寨小流域 2004 - 2008 年间坡面径流小区降雨产流产沙的定位观测资料, 对流域坡面尺度产流产沙特征及其影响因素进行了分析, 为评价流域植被恢复提供参考。结果表明: 灌木林和润楠林具有良好的保水减沙效益, 油桐林相对较差, 自然植被恢复同样带来良好效益, 坡耕地年均产流产沙均为最高, 反衬了植被与自然恢复措施较好的水土保持效应。降雨因子中, 降雨量  $P$  与坡面产流产沙相关性最强, 其次是降雨侵蚀力  $R$ , 最大 10 min 雨强  $I_{10}$  与坡面产流产沙相关性最小, 其相关系数不到 0.5; 多元逐步回归分析表明, 降雨因子对产流产沙的影响明显。坡耕地产沙随产流的变化趋势最大, 其决定系数  $R^2$  达到 0.7693, 灌木林最小, 其  $R^2$  仅为 0.425。通过灰色关联分析, 植被、地形、土壤相关因子对坡面产流产沙影响显著, 关联度值均在 0.5 以上, 植被总盖度对坡面产流产沙的影响均为最大, 说明植被具有很强的水土保持功能, 植被恢复仍是该区域今后改善生态环境的重要措施。

**关键词:** 女儿寨小流域; 坡面尺度; 产流产沙; 影响因素

中图分类号: S157.1; S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2010)03-0018-05

## Characteristic of Runoff and Sediment Yield and Its Influencing Factors Analysis on Slope Scale of Small Watershed in Northwest Hunan

ZHOU Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xu-dong<sup>2</sup>, HE Dan<sup>3</sup>, ZHOU Jin-xing<sup>2</sup>, ZHOU Xiao-ling<sup>4</sup>, WANG Zhong-jian<sup>5</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101; 4. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004; 5. Forestry Bureau of Cili County, Zhangjiajie 415300)

**Abstract:** Based on 2004 - 2008 observed data on runoff plots of Nverzhai small watershed in Wuling mountain of northwest Hunan, this paper discussed runoff and sediment yield characteristic and its influencing factors on slope scale. This will provide reference for evaluating vegetation restoration in watershed. The result showed that shrub and *Pingii* community had preferable benefit to prevent soil and water loss. Tung tree were comparatively worse. Natural vegetation restoration also had better benefit. Average runoff and sediment yield of slope farmland were the maximum, this illuminated that vegetation and natural restoration had better effect of soil and water conservation. Relativity between rainfall ( $P$ ) and runoff and sediment yield on slope were the most from rainfall factors. The next was rainfall erosivity ( $R$ ). Relativity between  $I_{10}$  and runoff and sediment yield on slope were the least, its correlation coefficient were basically less than 0.5. Mutiple stepwise regression analysis showed that rainfall factors had evident effect on runoff and sediment yield. The trend of sediment changed following with runoff on slope farmland were the most, its decision coefficient ( $R^2$ ) was 0.7693. The trend of shrub were the least, its  $R^2$  only 0.425. Based on grey relational analysis to kinds of factors about vegetation, landform and soil affecting runoff and sediment yield on slope scale, these factors had evident effect on runoff and sediment yield and its grey relational degree were all exceeded 0.5. Total cover of vegetation had most effect on runoff and sediment yield on slope, this showed vegetation had preferable benefit for soil and water conservation. Vegetation

收稿日期: 2010-03-22

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目“长江中下游低山丘陵生态退化区植被恢复技术试验示范”(2006BAD03A16)

作者简介: 周璟 (1981 - ), 男, 贵州贵阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事流域水文分布式模拟与流域管理研究。E-mail: windboy1981@163.com

通讯作者: 张旭东 (1962 - ), 男, 研究员, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: zhxd@forestry.ac.cn

restoration were the main measure for improving ecology environment in this region in future.

**Key words:** Nverzhai small watershed; slope scale; runoff and sediment yield; influencing factor

地表径流和土壤侵蚀量是水土保持中主要的研究内容之一。地表径流是指在倾斜的坡面上,降水强度超过林冠层、地被物层、凋落物层的截留和土壤下渗强度时,部分水量可能暂留于地表,当水量超过一定限度时,即向低处流动,此过程为地表径流<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀是指在陆地表面,水力、风、冻融和重力等外力作用下,土壤、土壤母质及其他地面组成物质被破坏、剥蚀、转运和沉积的全部过程<sup>[2]</sup>。坡面是景观的基本单元,在地处长江中下游低山丘陵区的湖南西北部,坡面是一种主要的景观单元,坡面地表径流与侵蚀产沙是在植被、土壤、气候及其他因素综合作用下产生的,其大小是评价植被保持水土、土壤持水能力与入渗能力、植被对于土壤的改良效果等的一个基本指标,在此方面国内外学者已有不少研究<sup>[3-5]</sup>。严重的坡面水土流失将会导致土壤质量下降及坡面生产力下降。影响坡面水土流失的因素众多而复杂,主要有降雨、植被、坡面地形、土壤性质等,其中既有定性因子又有定量因子。降雨是水土流失的原动力,是水土流失产生的主要因素,而植被、坡面等因素及各因素间的交互作用同样有着重要影响。许多研究者对影响坡面水土流失的因素进行了大量的研究<sup>[6-9]</sup>,并对此进行了总结<sup>[10]</sup>。目前,在长江中下游低山丘陵区已大面积实行植被恢复政策,对坡面水土流失特征的研究也显得更为重要,这是评价植被恢复改善效果的重要指标,也可为今后的植被建设提供依据。鉴于以往该区域定量研究相对较少,并且多是单因子对坡面侵蚀的影响研究居多,本研究选取武陵山区女儿寨小流域作为研究区,深入研究其坡面尺度上水土流失特征以及各因素对坡面径流侵蚀的影响。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于湖南省西北部张家界市武陵山区女儿寨小流域(29°30'N, 110°10'E),属武陵山脉低山区,地形复杂,山峦起伏,沟壑纵横,流域面积 2.81 km<sup>2</sup>。流域地处亚热带湿润季风气候区,光热充足,雨量充沛,年平均降雨量约 1 400 mm,但降雨时空分布不均,4-8 月雨量占全年的 60%以上。流域海拔 210.0~917.4 m。流域内母岩主要为板页岩、砂岩,土壤主要为山地黄壤、黄棕壤及红壤。流域自上世纪 90 年代开始进行植被恢复,目前流域林地面积占总面积 75%以上,如今形成了 7 种具有代表性的植被恢复模式,主要为马尾松(*Pinus massoniana*)天然林、杜仲(*Eucommia ulmoides*)人工林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、油桐(*Vernicia fordii*)人工林、润楠(*Machilus Pingii*)次生林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)杉木混交林、荒草灌丛。

### 1.2 研究方法

(1) 在流域地形开阔处设有自动气象站及虹吸式自记雨量计,常年观测记录降雨量与降雨过程。

(2) 流域根据植被恢复模式布设坡面径流小区,小区面积均为 20 m × 5 m。各径流小区的林分特征与立地状况见表 1,1~4 号径流小区各有 3 个重复以提高监测精度,6 号坡耕地和 7 号 CK 均为对照小区。小区下方建有集水槽、集水池。每次产流后,测定集水池中的总径流量,然后均匀取径流样,测定泥沙体积及其含量。有 3 个重复的小区取其平均值。本次研究收集 2004-2008 年间径流小区产流产沙观测资料进行分析。

表 1 径流小区的林分状况

| 小区号 | 群落名称    | 株数/株 | 乔层盖度/% | 灌层盖度/% | 草层盖度/% | 总盖度/% | 海拔/m | 坡向 | 坡度/(°) | 土类    | 质地  | 母岩 |
|-----|---------|------|--------|--------|--------|-------|------|----|--------|-------|-----|----|
| 1   | 马尾松林    | 176  | 85     | 75     | 20     | 90    | 380  | 南坡 | 15     | 红壤    | 粘壤土 | 砂岩 |
| 2   | 杜仲林     | 83   | 70     | 15     | 35     | 75    | 290  | 南坡 | 18     | 黄棕壤   | 壤土  | 砂岩 |
| 3   | 油桐林     | 75   | 65     | 45     | 30     | 70    | 410  | 南坡 | 30     | 黄棕壤   | 壤土  | 砂岩 |
| 4   | 灌丛      | 20   | 75     | 60     | 83     | 310   | 南坡   | 40 | 黄壤     | 粉砂质粘土 | 砂岩  |    |
| 5   | 阔叶林(润楠) | 98   | 75     | 30     | 20     | 80    | 450  | 北坡 | 30     | 黄壤    | 粘壤土 | 砂岩 |
| 6   | 坡耕地(油菜) |      | 20     | 40     | 45     | 280   | 西坡   | 35 | 黄棕壤    | 粉砂壤土  | 砂岩  |    |
| 7   | CK(荒山)  |      | 65     | 80     | 85     | 420   | 南坡   | 35 | 红壤     | 粘壤土   | 砂岩  |    |

注:坡向、坡度、土类部分资料引自文献[12]。

(3) 在径流小区内沿坡面分上、中、下 3 层采集表层土壤样品(0-20 cm),混合后测定土壤物理性质,主要有容重、孔隙度、最大持水量、毛管持水量,测定方法参照《土壤分析技术规范(第二版)》。此外,渗透速度采用双环入渗法,有关渗透速度的详细分析见文献[11]。

(4) 评价径流小区的水土保持功能,只有在综合考虑多个因素的前提下,选出影响最大的几个指标来进行比较。因而分析中采用了灰色关联度方法分析,其基本思路为:假设比较序列为  $\{X_i(k)\} = \{(X_i(1), X_i$

(2), ...,  $X_i(n)$ }, ( $k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m$ )。用  $X_0(k)$  表示参比序列第  $k$  个因素值, 该值为选用  $i$  种方案中的同一影响因素的理想因素值, 由其构成参比序列:  $\{X_0(k)\} = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$ , 在对原始数据消除量纲后, 在某一状态  $k=t$  时,  $\{X_0(t)\}$  与  $\{X_i(t)\}$  的关联系数  $i(t)$  表达式为:

$$i(t) = \frac{\min(i) \min(k) X_0(t) - X_i(t) + \max(i) \max(k) X_0(t) - X_i(t)}{X_0(t) - X_i(t) + \max(i) \max(k) X_0(t) - X_i(t)}$$

式中: 为分辨系数, 其意义在于提高关联系数间的差异显著性, 取值范围(0, 1), 通常取 0.5。

关联度  $R_i$  计算式为:

$$R_i = 1/n \sum_{t=1}^m i(t)$$

式中:  $n$  为比较序列长度(数据个数)。  $R_i$  大小直接反映各比较序列对参比序列的“优劣”程度。

所有统计分析均在 SPSS. 13 中进行。

## 2 结果与分析

表 2 2004 - 2008 年径流小区各年产流产沙量

| 年份   | 雨量/mm   | 小区编号         | 1    | 2    | 3     | 4    | 5    | 6     | 7    |
|------|---------|--------------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| 2004 | 1301.90 | 径流量/ $m^3$   | 4.71 | 2.05 | 6.84  | 1.80 | 0.85 | 18.36 | 3.18 |
|      |         | 泥沙量/kg       | 0.48 | 0.22 | 0.63  | 0.10 | 0.16 | 73.79 | 1.16 |
| 2005 | 877.70  | 径流量/ $m^3$   | 2.75 | 2.25 | 4.63  | 1.05 | 1.15 | 3.07  | 4.09 |
|      |         | 泥沙量/kg       | 0.82 | 0.82 | 2.02  | 0.98 | 1.04 | 7.18  | 0.38 |
| 2006 | 941.80  | 径流量/ $m^3$   | 2.03 | 2.37 | 4.11  | 0.20 | 1.51 | 7.13  | 1.24 |
|      |         | 泥沙量/kg       | 0.35 | 0.48 | 0.75  | 0.07 | 0.72 | 11.13 | 0.07 |
| 2007 | 839.30  | 径流量/ $m^3$   | 3.74 | 5.27 | 6.75  | 2.81 | 1.19 | 1.86  | 2.48 |
|      |         | 泥沙量/kg       | 0.86 | 0.96 | 1.80  | 0.93 | 0.61 | 3.79  | 0.20 |
| 2008 | 1283.00 | 径流量/ $m^3$   | 5.24 | 7.18 | 10.70 | 6.84 | 3.26 | 6.07  | 2.45 |
|      |         | 泥沙量/kg       | 2.63 | 2.58 | 2.43  | 2.75 | 2.39 | 17.36 | 0.53 |
| 年均值  | 1048.74 | 径流年均值/ $m^3$ | 3.70 | 3.83 | 6.61  | 2.54 | 1.60 | 7.30  | 2.69 |
|      |         | 泥沙年均值/kg     | 1.03 | 1.02 | 1.53  | 0.97 | 0.99 | 22.65 | 0.47 |

注: 如某场降雨每个小区都没有产流产沙发生, 则在统计降雨量中不计算在内。

(22.65 kg) > 3 号(1.53 kg) > 1 号(1.03 kg) > 2 号(1.02 kg) > 5 号(0.99 kg) > 4 号(0.97 kg) > 7 号(0.47 kg)。

6 号小区由于存在耕作的人为因素, 其土壤相对松动, 年平均产流产沙量均为最高。1 - 5 号的林地小区中, 4 号灌木林和 5 号润楠林小区具有良好的保水减沙效益, 可能与这两种林地小区群落结构稳定、物种组成丰富有关, 这有助于拦蓄降雨、增加入渗, 还可能与这两种林地人为干扰较少有关。3 号油桐林小区产流产沙量则略大于其他林地小区。7 号 CK 小区主要是进行自然的灌木、草本层的恢复, 其年均产沙量 0.47 kg 为最低, 这体现了自然生态恢复在控制水土保持方面的巨大作用, 随着年限的增长, 其发挥的作用越明显。由于坡耕地小区的产流产沙量均为最大, 尤其是产沙量, 是其次 3 号小区产沙量的 14.8 倍, 可以说明林地小区的植被及 7 号 CK 小区的自然恢复有效的控制了水土流失, 增加了水土保持效应。

### 2.2 降雨与产流产沙的关系

降雨与坡面地表径流及产沙有密切关系, 降雨量与雨强是研究的主要因子。分析中收集 5 年来次降雨产流产沙资料, 选取每场降雨每个小区都有产流产沙发生的 69 场典型降雨资料进行分析。

降雨因子包括场降雨量  $P$ (mm)、最大 10 min 雨强  $I_{10}$ (mm/h)、最大 30 min 雨强  $I_{30}$ (mm/h)、最大 60 min 雨强  $I_{60}$ (mm/h)、降雨侵蚀力  $R$ (MJ · mm/(hm<sup>2</sup> · h)) 5 个因子, 有关降雨量及降雨侵蚀力的详细计算及分析见文献[13]。将 5 个因子与产流产沙进行相关性分析, 结果见表 3。进一步进行多元回归分析, 用逐步回归方法(Stepwise)建立降雨因子与产流产沙的回归方程, 结果见表 4。

表 3 径流小区降雨因子和产流产沙相关性比较

| 小区号      | 1                                       | 2                                       | 3                                      | 4                        | 5          | 6                                      | 7                        |
|----------|---|---|--|--------------------------|------------|--|--------------------------|
| $P$      | 0.86 <sup>**</sup> (0.61 <sup>*</sup> ) | 0.87 <sup>**</sup> (0.74 <sup>*</sup> ) | 0.83 <sup>**</sup> (0.57)              | 0.64 <sup>*</sup> (0.51) | 0.51(0.29) | 0.64 <sup>*</sup> (0.67 <sup>*</sup> ) | 0.62 <sup>*</sup> (0.30) |
| $I_{10}$ | 0.36(0.43)                              | 0.43(0.31)                              | 0.52(0.44)                             | 0.29(0.24)               | 0.25(0.20) | 0.42(0.47)                             | 0.25(0.21)               |
| $I_{30}$ | 0.42(0.46)                              | 0.51(0.41)                              | 0.59(0.54)                             | 0.33(0.29)               | 0.30(0.21) | 0.56(0.56)                             | 0.38(0.29)               |
| $I_{60}$ | 0.53(0.53)                              | 0.60 <sup>*</sup> (0.49)                | 0.69 <sup>*</sup> (0.62 <sup>*</sup> ) | 0.47(0.42)               | 0.42(0.26) | 0.63 <sup>*</sup> (0.65 <sup>*</sup> ) | 0.50(0.33)               |
| $R$      | 0.64 <sup>*</sup> (0.52)                | 0.70 <sup>*</sup> (0.52)                | 0.75 <sup>*</sup> (0.61 <sup>*</sup> ) | 0.47(0.37)               | 0.45(0.28) | 0.74 <sup>*</sup> (0.71 <sup>*</sup> ) | 0.49(0.34)               |

注: 括号内为降雨因子与产沙量的相关系数; \* 为  $p < 0.05$ , \*\* 为  $p < 0.01$ , 下同。

表 4 径流小区降雨因子与产流产沙的逐步回归分析

| 小区号 | 产流回归方程  | 产沙回归方程   |
|-----|---|--|
| 1   | $Q = 0.008 P - 0.205 (r=0.861^{**})$                | $S = 0.002 P + 0.002 I_{10} - 0.113 (r=0.655^*)$ |
| 2   | $Q = 0.01 P + 0.004 I_{10} - 0.343 (r=0.883^{**})$  | $S = 0.003 P - 0.086 (r=0.735^*)$                |
| 3   | $Q = 0.006 P + 0.012 I_{60} - 0.329 (r=0.867^{**})$ | $S = 0.001 P + 0.006 I_{60} - 0.1 (r=0.67^*)$    |
| 4   | $Q = 0.003 P - 0.063 (r=0.645^*)$                   | $S = 0.002 P - 0.032 (r=0.507)$                  |
| 5   | $Q = 0.01 P - 0.137 (r=0.51)$                       | $S = 0.022 P - 0.038 (r=0.294)$                  |
| 6   | $Q = 0.002 P - 0.099 (r=0.755^*)$                   | $S = 0.005 R - 0.012 (r=0.751^*)$                |
| 7   | $Q = 0.001 P - 0.02 (r=0.616^*)$                    | $S = 0.006 R + 0.005 (r=0.337)$                  |

注:Q 为产流量(m<sup>3</sup>),S 为产沙量(kg);样本数为 69。

相关系数越大,则该因子与产流或产沙的相关性越强。由表 3 可见,与小区产流产沙相关性最强的是 P 因子,其与 1,2,3 号小区产流均达到 0.8 以上的极显著相关,P 除与 5,7 号小区产沙相关系数低相关性不强外,与其余小区产流产沙的相关性均达到 0.5 以上的显著相关。与产流产沙相关性其次的是 R 因子,除 4,5,7 号小区外,R 与其余小区产流产沙均为 0.5 以上的显著相关,最大相关系数为与 3 号小区产流的 0.75。余下 3 个雨强因子综合来看,表现为 I<sub>60</sub> 最强,I<sub>10</sub> 最小,I<sub>10</sub> 除与 3 号小区产流相关系数为 0.52 达到显著外,与其余小区产流产沙相关性均在显著以下,相关性不明显。值得注意的是 4,5,7 号小区,5 个降雨因子与产流产沙的相关系数基本都在显著以下,即使是 P 因子,达到显著后相关系数也不高,这也说明 4,5,7 号小区相对于其他小区,降雨因子与产流产沙的相关性不明显,这也是这 3 个小区年均产流产沙比其他小区少的原因之一。

由表 4 来看,除 5,7 号小区产沙回归方程相关系数在 0.5 以下,未达显著外,其余回归方程相关系数均在显著以上,这也表明,从总体来看,降雨因子与产流产沙达到显著相关性,降雨因子对产流产沙的影响明显。

2.3 产流量与产沙量的关系

以 69 场降雨资料对小区产流量与产沙量进行回归分析,统一以乘幂形式进行拟合,得到各小区产流产沙的回归关系,结果见表 5。

产流产沙之间的相互关系受到所在径流小区植被群落特征、小区的地形因素及人为干扰程度大小各因素的综合影响,R<sup>2</sup> 的大小是这一综合影响总变化趋势的反映,R<sup>2</sup> 越大,表明产沙量随产流量的变化趋势越大。从结果可以看出,6 号坡耕地小区产沙随产流的变化趋势最大,其 R<sup>2</sup> 为 0.769 3,其次是 2 号杜仲林地,4 号灌木林小区产沙随产流的变化趋势最小,其 R<sup>2</sup> 仅为 0.425 0。

2.4 影响径流小区产流产沙的主导因子判断

在此不考虑降雨因子,选择林分结构、地形、土壤性质等相关环境特征因子进行分析。以不同小区产流量和产沙量分别作为母因素集(参比序列),选择坡度、乔层盖度、灌层盖度、草层盖度、总盖度、土壤容重、孔隙度、渗透速度、最大持水量、毛管持水量 10 个因子作为子因素集(比较序列),对数据进行无量纲化处理后进行灰色关联度分析。10 个环境因子特征值见表 6。

关联度值越大,各因子对产流产沙的

影响也越大。对于产流量,各因子灰色关联度大小依次为:总盖度(0.738) > 坡度(0.716) > 容重(0.709) > 平均渗透速度(0.704) > 孔隙度(0.686) > 乔层盖度(0.680) > 最大持水量(0.643) > 草层盖度(0.642) > 灌层盖度(0.641) > 毛管持水量(0.639),对于产沙量,总盖度(0.746) > 最大持水量(0.728) > 乔层盖度(0.725) > 毛管持水量(0.722) > 灌层盖度(0.696) > 草层盖度(0.671) > 坡度(0.667) > 孔隙度(0.656) > 容重(0.637) > 平均渗透速度(0.573)。

表 5 径流小区产流产沙关系

| 小区号 | 回归方程                    | 决定系数 R <sup>2</sup> |
|-----|-------------------------|---------------------|
| 1   | $Y = 0.1664 X^{0.9131}$ | 0.6995              |
| 2   | $Y = 0.187 X^{0.9778}$  | 0.7049              |
| 3   | $Y = 0.1577 X^{0.8838}$ | 0.6785              |
| 4   | $Y = 0.0613 X^{0.7393}$ | 0.4250              |
| 5   | $Y = 0.5021 X^{1.1048}$ | 0.6421              |
| 6   | $Y = 2.1412 X^{1.2324}$ | 0.7693              |
| 7   | $Y = 0.041 X^{0.6923}$  | 0.5690              |

注:X 为产流量(m<sup>3</sup>),Y 为产沙量(kg);样本数为 69。

表 6 径流小区环境因子特征值

| 小区                             | 1 号   | 2 号   | 3 号   | 4 号   | 5 号   | 6 号   | 7 号   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 坡度/(°)                         | 15    | 18    | 30    | 40    | 30    | 35    | 35    |
| 容重/(g·cm <sup>-3</sup> )       | 1.62  | 1.54  | 1.69  | 1.56  | 1.51  | 1.6   | 1.65  |
| 孔隙度/%                          | 34.43 | 26.69 | 23.2  | 30.13 | 34.56 | 38.37 | 50.47 |
| 平均渗透速度/(mm·min <sup>-1</sup> ) | 4.85  | 5.73  | 4.23  | 4.29  | 3.2   | 5.1   | 5.3   |
| 乔层盖度/%                         | 85    | 70    | 65    | 20    | 75    | 0     | 0     |
| 灌层盖度/%                         | 75    | 15    | 45    | 75    | 30    | 20    | 65    |
| 草层盖度/%                         | 20    | 35    | 30    | 60    | 20    | 40    | 80    |
| 总盖度/%                          | 90    | 75    | 70    | 83    | 80    | 45    | 85    |
| 最大持水量/%                        | 24.2  | 19.54 | 17.62 | 36.11 | 24.94 | 15.04 | 32.63 |
| 毛管持水量/%                        | 17.96 | 13.49 | 11.35 | 25.34 | 20.51 | 10.86 | 22.8  |

由结果可见,各因子对坡面产流产沙影响程度不一致。植被因子的总盖度对于产流产沙的影响均为最大,关联度值分别达到 0.738 与 0.746;地形因子的坡度可影响林地土壤水分及径流的流速等,因而对产流的影响较大,仅次于总盖度,但对产沙的影响相对较小;土壤因子中的容重、平均渗透速度与孔隙度对产流的影响较大,但对产沙的影响以最大持水量为最大。各因子对产流与产沙的关联度值均在 0.5 以上,说明这些因子对坡面林分小区的水土保持功能都有较强的影响,乔、灌、草多层次混交的植被以及地形、土壤的相关因子能在不同程度上对坡面小区水土流失构成影响,这也与坡面土壤侵蚀影响因子研究的大多数结论相一致<sup>[10]</sup>。

### 3 讨 论

在降雨与产流产沙的关系分析中,由于用于降雨量与降雨过程观测的自动气象站与自记雨量计布置在流域开阔地带,因而在分析中未考虑植被截留在其中的影响作用。由于流域面积较小,可认为每个小区的降雨量是相同的,但林内降雨过程因植被的不同而存在差异,这也会使林内的降雨侵蚀力、雨强等因子会与观测的结果略有差异。研究者也在对坡面产流产沙的研究中深入分析了植被在其中的影响<sup>[14,15]</sup>,因而对于降雨因子,今后还需深入考虑不同植被对降雨的影响作用。

林分结构、地形、土壤性质等相关环境因子对坡面产流产沙都有不同程度的影响,今后还可选取本研究中 10 个因子以外的相关因子进行深入分析。此外,分析表明,植被总盖度对产流产沙的影响均为最大,表明植被具有很强的水土保持功能,植被恢复仍是女儿寨小流域、武陵山区乃至长江中下游低山丘陵生态退化区改善生态环境应坚持的重要措施。

### 4 结 论

通过坡面 7 个小区产流产沙的对比,灌木林和润楠林具有良好的保水减沙效益,油桐林在林地小区中相对较差。CK 小区其年均产沙量 0.47 kg 为最低,体现了自然生态恢复在水土保持方面的巨大作用。坡耕地小区的年均产流产沙量均为最大,反衬了植被与自然生态恢复有效的控制了水土流失,增加了水土保持效应。

降雨因子与坡面小区产流产沙相关性最强的是降雨量  $P$  因子,其与 7 个小区产流产沙的相关性基本都在 0.5 以上的显著相关,其次是降雨侵蚀力  $R$  因子,最大 10 min 雨强  $I_{10}$  与产流产沙相关性最小,相关系数基本都在 0.5 以下。多元逐步回归分析表明,降雨因子与产流产沙总体上达到显著相关,对产流产沙的影响明显。

坡耕地产沙随产流的变化趋势最大,其决定系数  $R^2$  为 0.769 3,灌木林产沙随产流的变化趋势最小,其  $R^2$  仅为 0.425。

植被、地形、土壤相关因子与坡面产流产沙灰色关联度值均在 0.5 以上,说明这些因子对坡面小区的水土保持功能都有较强的影响并且影响程度不一致,植被总盖度对坡面产流产沙的影响均为最大,说明植被具有很强的水土保持功能,植被恢复仍是该区域今后改善生态环境的重要措施。

#### 参考文献:

- [1] 魏强,张秋良,代海燕,等.大青山不同植被下的地表径流和土壤侵蚀[J].北京林业大学学报,2008,30(5):111-117.
- [2] 关君蔚.水土保持原理[M].北京:中国林业出版社,1996.
- [3] Breshears D D, Whicker J J. Wind and water erosion and transport in semi-arid shrub land, grassland and forest ecosystems: Quantifying dominance of horizontal wind-driven transport[J]. Earth Surface Process Landforms, 2003, 28(11): 1189-1209.
- [4] Croke J, Hairsine P, Fogarty P. Sediment transport redistribution and storage on logged forest hillslopes in southeastern Australia[J]. Hydr. Process, 1999(13): 2705-2720.
- [5] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.
- [6] 余新晓,秦永胜.森林植被对坡地不同空间尺度侵蚀产沙的影响分析[J].水土保持研究,2001,8(4):66-70.
- [7] 王辉,王全九,邵明安.前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J].农业工程学报,2008,24(5):65-68.
- [8] 崔艳平,郑粉莉,刘雨.水文条件对紫色土坡面土壤侵蚀及养分流失的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(1):1-7.
- [9] 王建勋,郑粉莉,江忠善,等.基于 WEPP 的黄土丘陵区不同坡长条件下坡面土壤侵蚀预测[J].北京林业大学学报,2008,30(2):151-156.
- [10] 赖奕卡.坡面土壤侵蚀影响因子研究进展[J].亚热带水土保持,2008,20(1):12-16.
- [11] 漆良华,张旭东,周金星,等.湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性[J].林业科学,2007,43(4):1-8.
- [12] 李锡泉,田育新,袁正科,等.湘西山地不同植被类型的水土保持效益研究[J].水土保持研究,2003,10(2):123-126.
- [13] 周璟,张旭东,周金星,等.湘西北低山丘陵小流域降雨侵蚀力计算及其特征研究[J].生态与农村环境学报,2009,25(4):32-36.
- [14] 张晓明,余新晓,武思宏,等.黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].应用生态学报,2005,16(9):1613-1617.
- [15] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山香水河小流域地形与植被类型对降雨径流系数的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(4):31-37.