

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2020. 01. 006

金沙江不同林地坡面的产流产沙特征研究*

李甜江¹, 吴云飞², 郎南军³, 刘芝芹³, 王琛³

(1. 云南省林业和草原科学院, 云南 昆明 650201; 2. 昆明理工旭日正工程咨询有限公司, 云南 昆明 650051;
3. 西南林业大学, 云南 昆明 650224)

摘要: 为解决金沙江水土流失问题, 在金沙江头塘小流域水源涵养林生态系统定位研究站内, 选择典型人工林为研究对象, 对4种典型生态恢复人工林类型(21年生云南松林、19年生旱冬瓜林、19年生银荆林和荒草地)的产流产沙特征进行研究。结果表明, 4种林地坡面的产流量、产沙量和土壤侵蚀强度都表现出相同的大小规律, 都为云南松林的最小, 其次是银荆林和旱冬瓜林, 荒草地的产流量、产沙量、土壤侵蚀强度都是最大的, 分别为云南松林的3.05倍、6.23倍、6.29倍, 说明云南松林的水土保持效果好。产流量、产沙量与降雨量都呈正相关关系, 径流系数与产沙量呈正相关关系, 即降雨在坡面产流时, 径流系数增大, 即产流量增大, 产沙量也随之增大。由此可知, 营造良好的人工林林分可以防止金沙江头塘小流域水土流失。

关键词: 产流量; 产沙量; 不同林地; 金沙江

中图分类号: S 714.6; X 171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2020) 01-0031-08

Study on Runoff and Sediment Production in the Different Forest at Jinshajiang River

LI Tian-jiang¹, WU Yun-fei², LANG Nan-jun³, LIU Zhi-qin³, WANG Chen³

(1. Yunnan Academy of Forestry and Grassland, Kunming Yunnan 650201, P. R. China;

2. Xunzheng Engineering Consulting Limited in Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650051, P. R. China;

3. Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224, P. R. China)

Abstract: In order to solve problem of soil and water loss in Jinshajiang River, locate in the ecosystem research station of Jinshajiang River Basin, four typical ecological restoration plantations were selected as the research object, 21-year-old of pure forest of *Pinus yunnanensis*, 19-year-old of pure forest of *Alnus nepalensis*, 19-year-old of pure forest of *Acacia dealbata*, and the waste-grassland, for the research on the characteristics of soil infiltration, runoff and sediment production, and the benefits of water conservation and ecological restoration. The results showed, four kinds of forest land in the runoff production, sediment production and soil erosion intensity of four kinds of forest lands exhibit the same order, which is: *Pinus yunnanensis* < *Acacia dealbata* < *Alnus nepalensis* < waste-grassland. The runoff production, sediment production and soil erosion intensity of waste-grassland is the biggest, its runoff production is 3.05 times of *Pinus yunnanensis*, its sediment production is 6.23 times of *Pinus yunnanensis* and its soil erosion intensity is 6.29 times of the smallest of *Pinus yunnanensis*. Description of the pure forest of *Pinus yunnanensis* has the most effective ecological benefit on soil and water conservation. There were positive correlation between both runoff yield, sediment yield with rainfall, there was positive correlation between runoff coefficient with sediment yield. Thus, when runoff coefficient donated large, runoff yeild increases namely, sediment yield will increases,

* 收稿日期: 2019-10-15

基金项目: 云南省林业和草原科学院创新基金项目“云南森林康养模式研究(QN2018-06)”。

第一作者简介: 李甜江(1978-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 763687798@qq.com

通讯作者简介: 吴云飞(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事环境评估及水土保持研究。E-mail: wuyunfei530000@126.com

too. So, good plantation could prevented soil and water loss in Jinshajiang River.

Key words: runoff yeild; sediment yeild; different forest; Jinshajiang River

防止土壤侵蚀及减少径流泥沙是森林重要的水文生态功能之一,不同植被类型和降雨对坡面产流产沙的影响有差别,即使同一类型的土壤,由于其利用类型不同、覆被层的植被种类不同,也都会导致土壤入渗性能有一定的差异^[1-4]。植被可以通过根系、枯落物蓄积及熟化和植被代谢产物等物理和化学的途径对土壤产生改善作用,有可能提高土壤的入渗性能,在一定程度上减少地表径流和土壤侵蚀^[5]。吴发启等^[6]发现不同措施对坡面径流及产沙量的影响不同;陈伟等^[7]在类似研究中从产流时间分析,不同水土保持技术模式的产流产沙情况均有明显的滞后性,单一的耕作措施和工程措施均能有效地减流减沙,但综合技术集成模式的水土保持效果要明显优于单一的技术模式。亢伟等^[8]研究认为在小雨强度下,不同植被配置的稳渗率大小差别较大;随着雨强的增大,不同植被配置的稳渗率大小差别变小,且随着雨强的增大各种植被配置之间累积产沙量的差异逐渐变大。随着流域大面积、高标准的生态植被恢复与重建,输沙模数呈锐减之势,可见植被恢复与重建对产流产沙的抑制有显著效应^[9]。刘伦辉等^[10]在滇中高原不同种类的植被对减流减沙作用的大小排列如下:常绿阔叶林>云南松林>次生荒草地>放牧荒草地>旱作地与裸地。杨吉华等^[11]分析9种主要人工林的水土保持功能差异,指出水土保持效益,阔叶混交林优于阔叶纯林,针阔混交林优于针叶林。

孟广涛等^[12]在滇中高原山地4种人工群落典型地段,通过径流小区观测研究,得出产流量与一场降雨的总降水量、30min最大雨强和土壤的前期含水量关系最为密切。当降雨量大、暴雨强度大时,降雨不能被土壤全部吸收和贮存,绝大部分的降水形成了径流。产沙量与降雨产生的地表径流量关系最为密切,其次是总降水量、30min最大雨强。可见高强度、大雨量、短历时的暴雨形成大量地表径流,大量产流产沙,造成水土流失,而降雨强度较小、降雨量较小、历时较长的降雨大部分被土壤所吸收,形成的地表径流较小,不易发生水土流失。刘芝芹等^[13]在金沙江干热河谷研究得到雨季降水过分集中,易形成持续大雨,导致产生大的地表径流并冲刷地表,造成水土流失,降雨强度、降雨历时明显影响径流量和产沙量。关于植被、降

雨和坡面产流关系的研究多见报道,总体来讲,降雨、径流和泥沙相互之间的关系紧密^[14-17]。天然流域中降雨入参与径流形成过程复杂、影响因素众多,是水土流失问题研究的热点与难点。

金沙江流域的水土流失问题成为生态可持续发展的瓶颈,威胁下游居民人身安全和社会经济发展。所以亟待展开对该区域降雨产流产沙特征的研究,以探究水土流失发生的规律,为金沙江流域生态恢复、长防林建设提供理论指导和积累基础资料。因此,本研究在地处金沙江下游、长江中上游、云南高原东北部会泽县的金沙江头塘小流域水源涵养林生态系统定位研究站内,选择典型生态恢复人工林为研究对象,对金沙江头塘小流域4种典型林分类型:21年生云南松(*Pinus yunnanensis*)林、19年生旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)林、19年生银荆(*Acacia dealbata*)林和荒草地的产流产沙特征进行研究。

1 研究方法

1.1 研究区概况

金沙江头塘小流域,地处长江上游、金沙江下游,云南省东北部会泽县城东郊12km处,103°24'E,26°27'N,流域面积3.98km²,属于金沙江河谷边缘切割带与滇中高原的过渡区、滇东中山高原区、准静止锋南北移动区。研究区的气候属典型的亚热带高原季风山地气候^[1],气温年内变化的特点是春季升温迅速,夏季温暖无酷暑,秋季降温剧烈,冬季温和无严寒。气温年内变化曲线为单峰型,气温变化曲线起伏不大,峰谷之间差值较小。年均晴日225d,光照均匀,年日照时数2100h,年日照百分率约42%,太阳辐射总量约5500MJ/m²;年均气温12.8℃,>10℃的有效积温3540.1℃。金沙江头塘小流域的土壤母质主要是紫色砂页岩,伴有少量玄武岩和灰黄色泥岩,所以形成的土壤主要是紫色土、红壤和棕壤,全县范围这3个土类的土地面积占总土地面积的90.8%。区有维管植物约63科,121属,137种,且人工林成为主要森林植被,主要乔、灌、草物种有:云南松、华山松(*Pinus armandii*)、旱冬瓜、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、银荆等。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨的观测方法

在金沙江头塘小流域确定研究的 4 种典型地类区域内，选择合适的位置设立一个径流场专用降雨观测点，用虹吸式自记雨量计记录 2013 年全年降雨情况，每天下午 19 点更换自记纸，遇特殊情况时按需更换。自记雨量计自动绘制降雨过程曲线，通过降雨过程曲线统计降雨场次、降雨日期、降雨时间、降雨历时（min）和降雨量（mm），由每场次的降雨量与降雨历时的比值换算得到次降雨强度（mm/h）。

1.2.2 产流量、产沙量的测定方法

当引起林地坡面产流的降雨停止后，立即用卷尺测量径流池的水位，扣除降雨量后，用体积法计算 4 种地类的坡面径流小区的产流量。

在径流池中取样前，要把径流池中的水搅拌均匀，使泥水均匀分布，并取一定体积水样，每个径流池两个重复，用置换法计算径流小区径流泥沙含量和径流场产沙量，得到不同林分降雨坡面产沙量。

置换法求泥沙含量步骤（1）将 100mL 容量瓶准确注入 100mL 清水，放在电子天平称重得清水重 W_w （精确到 0.01g）；（2）将取回的泥水样充分摇匀后准确注入同一 100mL 容量瓶至刻度，称重得泥水重 W_{ws} ；（3）每种水样重复测验 3 次，记录数据，按式①计算出泥沙质量，再换算成单位面积土壤流失量。

泥沙计算公式 $W = \gamma_s (W_{ws} - W_w) / (\gamma_s - \gamma_w)$
①。式中， γ_s 为泥沙的比重（g/cm³）； γ_w 为水的比重， $\gamma_w = 1\text{g/cm}^3$ ； W_w 为清水重（g）； W_{ws} 为泥水重（g）； W 为泥沙重（g）。

1.2.3 产流产沙特征分析

用 Excel 计算金沙江头塘小流域 4 种地类坡面的产流量、产沙量，结合降雨量情况和径流小区面积，计算降雨的径流系数和土壤侵蚀量，分析产流量、产沙量与降雨量的关联性。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

设置自记雨量计，观测得到金沙江头塘小流域 2013 年全年的降雨情况，全年降雨量为 735.4mm，与往年相比，2013 年全年降雨量稍低于多年平均降雨量（817.1mm）。2013 年的降雨分布情况见图 1。

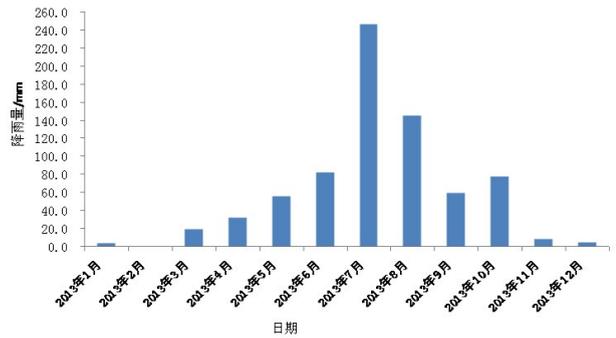


图 1 2013 年降雨分布图

Fig. 1 The rainfall distribution in the year of 2013

从图 1 可以看出，2013 年 6–10 月这 5 个月降雨量明显充沛，是全年的雨季，仅这 5 个月的降雨总量就达 611.0mm，占全年降雨量的 83.08%。2013 年 3–4 月出现春旱情况，5 月降雨开始增加，雨季大致在 5 月下旬至 6 月上旬开始，7 月降雨集中，仅 7 月份 1 个月的降雨量（246.6mm）就占全年降雨量的 33.53%，8 月降雨量也高达 145.3mm，9 月降雨量偏少，雨季于 10 月中旬左右结束。郝芳华等^[18]报道，地表径流量与降雨量不一定成完全的比例关系，但是，降雨是地表径流的重要水源来源，是影响地表径流的重要因素，降雨集中更易引起水土流失，也导致局部地区有洪涝灾害发生。观测 2013 年全年金沙江头塘小流域的降雨情况，其中有产流的降雨场次 48 场，选取其中的 19 场中雨及中雨以上等级的典型降雨在本研究中分析利用，这 19 场降雨总量为 441.8mm，占全年降雨量的 60.08%。次降雨情况见表 1。从降雨场次来看，次降雨量最大的是 7 月 19 日，日降雨量达到 51.8mm，属于暴雨；其次是 7 月 17 日的降雨量 48.1mm；6 月 16 日雨强最大，降雨强度达 20.49mm/h。

2.2 不同林地坡面产流特征

2.2.1 不同林地坡面产流量

21 年生云南松林、19 年生旱冬瓜林、19 年生银荆林和荒草地 4 种林地坡面的产流量统计结果见表 2。2013 年雨季，4 种林地坡面产流大小情况为云南松林（23.867 4t/hm²）<银荆林（39.612 5 t/hm²）<旱冬瓜林（45.421 3t/hm²）<荒草地（72.732 7t/hm²），荒草地的产流量最大，为产流最小林地云南松林的 3.05 倍。银荆林和旱冬瓜林的产流量居中，且这 2 种林地的产流量差异不大。

表1 次降雨情况表

Tab. 1 Rainfall events in Toutang small watershed in 2013

降雨场次	降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/min	平均雨强/mm·h ⁻¹	降雨等级
1	20130607	15.2	846	1.08	中雨
2	20130616	14.0	41	20.49	中雨
3	20130622	12.5	150	5.00	中雨
4	20130705	12.4	264	2.82	中雨
5	20130710	27.4	654	2.52	大雨
6	20130717	48.1	435	6.63	大雨
7	20130718	19.1	365	3.14	中雨
8	20130719	51.8	575	5.40	暴雨
9	20130720	17.0	735	1.39	中雨
10	20130722	14.1	58	14.59	中雨
11	20130727	33.2	689	2.89	大雨
12	20130803	27.1	546	2.97	大雨
13	20130815	23.4	735	1.91	中雨
14	20130817	32.8	534	3.69	大雨
15	20130824	29.5	585	3.03	大雨
16	20130902	23.3	672	2.08	中雨
17	20130904	13.5	426	1.90	中雨
18	20131001	13.9	326	2.56	中雨
19	20131003	13.5	465	1.74	中雨

注：降雨等级的划分是按农业出版社1986年10月出版的《中国农业百科全书》农业气象卷规定的划分标准，小雨为日降雨量<10.0mm，中雨为日降雨量10.0-24.9mm，大雨为日降雨量25.0-49.9mm，暴雨为日降雨量50.0-99.9mm，大暴雨为日降雨量100.0-199.9mm，特大暴雨为日降雨量≥200.0mm。

表2 不同林地坡面产流量

Tab. 2 Surface runoff production of different forest slope lands

t/hm²

降雨场次	降雨日期	立地类型			
		云南松林 (<i>Pinus yunnanensis</i>)	旱冬瓜林 (<i>Alnus nepalensis</i>)	银荆林 (<i>Acacia dealbata</i>)	荒草地
1	20130607	1.084 0	2.113 0	1.736 0	3.422 0
2	20130616	3.276 0	4.487 0	3.789 8	6.323 8
3	20130622	0.633 6	1.724 8	1.191 3	1.868 9
4	20130705	0.578 4	0.702 0	0.472 8	1.032 0
5	20130710	1.253 2	1.521 0	1.024 4	2.236 0
6	20130717	1.221 0	6.138 0	5.341 5	7.546 5
7	20130718	1.842 8	3.592 1	2.951 2	5.817 4
8	20130719	4.950 0	7.055 4	6.487 8	8.776 9
9	20130720	0.299 2	0.740 8	0.731 2	1.648 8
10	20130722	2.106 0	2.884 5	2.436 3	4.065 3
11	20130727	1.446 0	1.755 0	1.182 0	2.580 0
12	20130803	0.843 7	2.107 6	1.849 1	2.889 7
13	20130815	0.719 3	2.301 0	3.660 3	6.748 3
14	20130817	1.162 8	1.706 8	1.341 3	6.398 8
15	20130824	0.814 0	4.092 0	3.561 0	5.031 0
16	20130902	0.820 8	1.204 8	0.946 8	4.516 8
17	20130904	0.098 8	0.278 2	0.206 7	0.370 5
18	20131001	0.626 6	0.760 5	0.512 2	1.118 0
19	20131003	0.091 2	0.256 8	0.190 8	0.342 0
合计		23.867 4	45.421 3	39.612 5	72.732 7

2.2.2 不同林地坡面径流系数

根据 4 种林地坡面的产流量和降水量统计结果，计算各个林地坡面产流的径流系数，结果见表 3。结合表 2 和表 3 看出，林地坡面产流的径流系数与坡面产流量呈正相关关系，即，径流系数大，该林地坡面产流量大。4 种地类坡面的径流系数大小关系也呈现云南松林 (0.099 9) < 银荆林 (0.167 3) < 旱冬瓜林 (0.195 4) < 荒草地 (0.302 7) 的大小顺序。比较不同林地的径流系数，荒草地的径流系数是云南松林的 3.03 倍，是

银荆林的 1.81 倍，是旱冬瓜林的 1.55 倍，可见覆盖林地坡面的植被类型对径流系数的影响有明显区别，植被层对降雨截留，分散降水，且通过叶面积增加降水蒸发面积，减小径流系数，即阻止降水形成径流，这是植被层减小坡面产流产沙量，实现水土保持生态效益的重要体现。通过表 3 的分析对比可知，云南松、旱冬瓜、银荆 3 种植被类型覆盖与荒草地作对比，阻止降水形成径流的作用明显，其中云南松林的减流作用最为突出。

表 3 各林地坡面的径流系数

Tab. 3 Runoff coefficient of each forest slope land

降雨场次	降雨日期	立地类型			
		云南松林	旱冬瓜林	银荆林	荒草地
1	20130607	0.123 5	0.261 3	0.214 6	0.408 1
2	20130616	0.405 3	0.602 3	0.508 7	0.818 7
3	20130622	0.087 8	0.259 3	0.179 1	0.271 0
4	20130705	0.080 8	0.106 4	0.071 7	0.150 9
5	20130710	0.079 2	0.104 3	0.070 3	0.147 9
6	20130717	0.044 0	0.239 8	0.208 7	0.284 4
7	20130718	0.167 1	0.353 4	0.290 4	0.552 1
8	20130719	0.165 5	0.256 0	0.235 4	0.307 1
9	20130720	0.030 5	0.081 9	0.080 8	0.175 8
10	20130722	0.258 7	0.384 5	0.324 7	0.522 6
11	20130727	0.075 4	0.099 3	0.066 9	0.140 9
12	20130803	0.053 9	0.146 2	0.128 2	0.193 3
13	20130815	0.053 2	0.184 8	0.294 0	0.522 7
14	20130817	0.061 4	0.097 8	0.076 9	0.353 6
15	20130824	0.047 8	0.260 7	0.226 9	0.309 1
16	20130902	0.061 0	0.097 2	0.076 4	0.351 4
17	20130904	0.012 7	0.038 7	0.028 8	0.049 7
18	20131001	0.078 1	0.102 8	0.069 3	0.145 8
19	20131003	0.011 7	0.035 7	0.026 6	0.045 9
平均值		0.099 9	0.195 4	0.167 3	0.302 7

2.3 不同林地坡面产沙特征

2.3.1 不同林地坡面产沙量

21 年生云南松林、19 年生旱冬瓜林、19 年生银荆林和荒草地 4 种林地坡面的产沙量统计结果见表 4。2013 年全年所观测的 4 种地类坡面径流小区的产沙量大小关系为云南松林 (0.464 6g/100mL) < 银荆林 (1.219 7g/100mL) < 旱冬瓜林 (1.149 8g/100mL) < 荒草地 (2.895 7g/100mL)。4 地类坡面的产沙量的大小顺序呈现出与产流量相同的大小顺序，荒草地的径流小区产沙量高达 2.895 7g/100mL，是云南松林产沙量的 6.23 倍，同时为银

荆林和旱冬瓜林产沙量的 2.37 倍和 2.52 倍。

2.3.2 不同林地坡面土壤侵蚀强度

根据径流小区的产沙量，计算头塘小流域的 4 种林地坡面的土壤侵蚀强度，结果见表 5。荒草地的土壤侵蚀强度最大，高达 289.572 1t/km²，侵蚀强度最小的是云南松林 (46.459 7t/km²)，还不到荒草地的 1/6。比较 4 种林地的坡面土壤侵蚀强度大小，呈现的顺序是云南松林 (46.459 7t/km²) < 银荆林 (114.977 9t/km²) < 旱冬瓜林 (121.973 6t/km²) < 荒草地 (289.572 1t/km²)，具有 21 年林龄的云南松林地坡面抗侵蚀能力最强。

表4 不同林地坡面径流小区产沙量

Tab. 4 Sediment production of different forest slope lands

g/100mL

降雨场次	降雨日期	立地类型			
		云南松林	旱冬瓜林	银荆林	荒草地
1	20130607	0.019 6	0.053 8	0.040 6	0.131 3
2	20130616	0.059 8	0.115 1	0.091 5	0.243 8
3	20130622	0.011 7	0.044 6	0.029 7	0.072 4
4	20130705	0.010 8	0.018 3	0.012 1	0.040 2
5	20130710	0.023 5	0.039 9	0.027 1	0.087 4
6	20130717	0.023 1	0.162 1	0.145 1	0.296 4
7	20130718	0.035 2	0.095 6	0.082 4	0.229 5
8	20130719	0.099 0	0.189 0	0.186 1	0.347 9
9	20130720	0.005 8	0.020 0	0.021 5	0.065 7
10	20130722	0.041 4	0.078 4	0.073 5	0.162 6
11	20130727	0.028 7	0.048 0	0.036 6	0.103 7
12	20130803	0.016 9	0.058 1	0.058 6	0.116 6
13	20130815	0.014 5	0.063 8	0.118 8	0.273 6
14	20130817	0.023 7	0.047 7	0.044 5	0.260 6
15	20130824	0.016 7	0.115 0	0.120 9	0.205 8
16	20130902	0.017 0	0.034 1	0.032 9	0.185 6
17	20130904	0.002 1	0.007 9	0.007 3	0.015 3
18	20131001	0.013 3	0.020 9	0.013 5	0.043 3
19	20131003	0.001 9	0.007 4	0.006 9	0.014 2
合计		0.464 6	1.219 7	1.149 8	2.895 7

表5 不同林地坡面土壤侵蚀强度

Tab. 5 Soil erosion intensity of different forest slope lands

t/km²

降雨场次	降雨日期	立地类型			
		云南松林	旱冬瓜林	银荆林	荒草地
1	20130607	1.958 8	5.382 2	4.061 6	13.128 0
2	20130616	5.977 3	11.513 8	9.152 7	24.375 4
3	20130622	1.167 2	4.458 4	2.967 0	7.237 7
4	20130705	1.075 6	1.827 8	1.213 2	4.015 4
5	20130710	2.352 5	3.989 0	2.706 0	8.740 7
6	20130717	2.313 5	16.213 6	14.512 8	29.637 2
7	20130718	3.524 0	9.556 3	8.241 1	22.952 3
8	20130719	9.900 0	18.903 1	18.606 5	34.788 4
9	20130720	0.582 7	1.998 8	2.152 2	6.565 2
10	20130722	4.138 1	7.837 1	7.354 9	16.261 2
11	20130727	2.866 6	4.801 4	3.657 5	10.366 9
12	20130803	1.687 4	5.805 8	5.861 3	11.663 9
13	20130815	1.451 3	6.382 1	11.878 7	27.361 2
14	20130817	2.366 4	4.766 2	4.454 1	26.060 6
15	20130824	1.670 8	11.503 9	12.094 0	20.581 4
16	20130902	1.699 2	3.409 8	3.287 0	18.559 9
17	20130904	0.206 3	0.792 6	0.733 2	1.529 2
18	20131001	1.330 2	2.095 0	1.353 0	4.329 7
19	20131003	0.192 0	0.736 5	0.691 2	1.417 7
合计		46.459 7	121.973 6	114.977 9	289.572 1

2.4 不同林地的产流量、产沙量与降雨量的相关性

为进一步了解金沙江头塘小流域 4 种林地坡面的产流量、产沙量分别与降雨量的相关关系，将产流量、产沙量分别与降雨量进行相关性回归分析，得到回归方程和 R^2 值见表 6。从降雨量 (x) 的系

数可以看出，降雨量与产流量和产沙量都呈正相关关系，说明降雨量大小对产流量和产沙量都有积极影响，降雨量增大，产流量产沙量也会或多或少的增加。

表 6 不同地类降雨产流量、产沙量与降雨量的相关性关系

Tab. 6 Correlation between runoff yield and rainfall, between sediment yield and rainfall

林地类型	产流量与降雨量的相关关系		产沙量与降雨量的相关关系	
	回归方程	R^2	回归方程	R^2
云南松	$y=0.049x+0.1177$	0.2435	$y=0.001x+0.0011$	0.2683
早冬瓜	$y=0.1143x-0.2661$	0.4960	$y=0.0031x-0.0077$	0.5138
银荆	$y=0.105x-0.3559$	0.4805	$y=0.0031x-0.012$	0.5117
荒草地	$y=0.1489x+0.3668$	0.4661	$y=0.006x+0.0137$	0.4718

将金沙江头塘小流域 4 种林地坡面产沙量与径流系数进行相关性回归，得到回归方程和 R^2 值见表 7。径流系数与产沙量呈正相关关系，说明径流系数大小对产沙量有积极影响。径流系数是指降落到地表形成径流的那部分的雨水量与降雨量的比值，即径流系数大指的就是产流量大。因此，产流量增加，产沙量也会随之增加。

表 7 不同地类产沙量与径流系数的相关关系

Tab. 7 Correlation between sediment yield and runoff coefficient

林地类型	产沙量与径流系数的相关关系	
	回归方程	R^2
云南松林	$y=0.1618x+0.0083$	0.4565
早冬瓜林	$y=0.2238x+0.0205$	0.3919
银荆林	$y=0.2583x+0.0173$	0.4044
荒草地	$y=0.3414x+0.0491$	0.4323

3 结论与讨论

利用自记雨量计和坡面径流小区观测法，观测金沙江头塘小流域自然降雨条件下不同立地类型坡面的产流和产沙情况，探讨降雨对产流产沙的影响。对比不同地类产流产沙的差异可知：4 种林地坡面的径流量、产沙量和土壤侵蚀强度都表现出相同的大小规律，即都为云南松林的最小，其次是银荆林和早冬瓜林，荒草地的产流量、产沙量、土壤侵蚀强度都是最大的；产流量、产沙量与降雨量都呈正相关关系，径流系数与产沙量呈正相关关系。

降雨形成坡面产流时，径流系数增大，即产流量增大，产沙量也随之增大。

在本研究中，得出了降雨与产流成正相关关系的结论，跟大多数学者得到的研究结论一致。降雨产流是坡面降雨量与入渗量的矛盾产物，不论在林地坡面还是耕地坡面，降雨产流都为水土流失提供动力因素，植被类型、降水特性、土壤入渗能力等都直接或间接影响着产流与否和产流量的多少。耿晓东等^[19]强调我国南方红壤区的水土流失主要表现为降雨产生的径流携带大量泥沙的流失，降雨浸润表层土体后，进一步向深层入渗的能力急剧减小，导致径流量增加，侵蚀冲刷力增强，从而产沙量增加。陈杰等^[20]指出径流小区的产流量和产沙量与降雨量有较好的相关关系，即降雨量大，产流产沙量也较大，同时产沙量与产流量的大小表现出基本相一致的规律。

本研究及其前人的研究均证明植被在生态恢复与建设中占有十分重要地位。刘伦辉等^[10]指出滇中高原不同地类有较好的调节径流和减少土壤流失的作用，不同地类的坡面产沙量均随径流的增加呈线性显著增加，其中荒草地和坡耕地随产流量、产沙量增加的幅度明显高于天然次生林和灌木林。亢伟等^[8]研究认为在小雨强度下，不同植被配置的稳渗率大小差别较大；随着雨强的增大，不同植被配置的稳渗率大小差别变小，且随着雨强的增大各种植被配置之间累积产沙量的差异逐渐变大。随着流域大面积、高标准的生态植被恢复与重建，输沙模数呈锐减之势，可见植被恢复与重建对产流产沙的抑制有显著效应^[9]。

同时，结合前人关于金沙江流域产流产沙的研

究看出,本次研究头塘小流域的产流量产沙量较某些研究报道金沙江流域产沙量的结果低,可能因为试验区的植被在最近几年生长和繁殖,覆盖率比以前研究时有所增加,树木生长量和生物量增加,同时使地面枯落物层厚度增加,植物根系对土壤的改良作用和锚固作用也随树龄的增长而增加,正好印证了植被对减流减沙、保持水土有积极的生态作用。

因此,营造良好的人工林,可以对金沙江流域起到防止水土流失,涵养水源,恢复生态环境,保证流域周边经济发展的作用。

参考文献:

[1] Azooz R H, Arshad M A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage system[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 76: 143-152.

[2] Singh B, Chanasyk D S, McGill W B. Soil hydraulic properties of an Orthic Black Chernozem under long-term tillage and residue management[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 76(1): 63-71.

[3] 王勇, 杨瑞, 裴仪岱, 等. 楠杆自然保护区不同植被类型枯落物储量与持水功能[J]. 西部林业科学, 2018, 47(1): 104-109.

[4] 强大宏, 艾宁, 刘长海, 等. 陕北黄土区退耕还林后不同植被类型土壤含水量动态研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(6): 114-120.

[5] 黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(9): 119-126.

[6] 吴发启, 赵晓光, 刘秉正, 等. 耕作活动对坡耕地径流及产沙的影响[J]. 西北林学院学报, 1998, 13(2): 20-25.

[7] 陈伟, 魏永霞, 王存国. 不同水土保持技术模式的坡

耕地产流、产沙特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 27-30.

[8] 亢伟, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被配置对坡面土壤侵蚀的影响[J]. 西安理工大学学报, 2007, 2(3): 261-264.

[9] 田育新, 李锡泉, 张灿明. 植被恢复与重建过程中流域降雨及水沙变化特征研究[J]. 湖南林业科技, 2005, 32(6): 29-32.

[10] 刘伦辉, 刘文耀, 郑征. 滇中山地主要植物群落水土保持效益比较[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 36-43.

[11] 杨吉华, 柳凯生, 宫锐, 等. 山区地区森林保持水土保持效益的研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 47-52.

[12] 孟广涛, 袁春明, 方向京, 等. 滇中高原山地4种人工群落径流量和土壤流失量的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 33-36.

[13] 刘芝芹, 王克勤, 李艳梅, 等. 金沙江干热河谷坡面降雨产流特征的分析[J]. 石子河大学学报(自然科学版), 2010, 28(2): 227-231.

[14] 刘芝芹. 金沙江干热河谷坡面产流产沙规律的研究[D]. 昆明: 西南林学院, 2004.

[15] 陈奇伯. 花岗岩坡面降雨、产流、产沙相互关系的研究[J]. 水土保持科技情报, 1997(4): 34-36.

[16] 田波. 金沙江干热河谷坡面水土流失规律研究[D]. 昆明: 西南林学院, 2007.

[17] 陈奇伯, 王克勤, 刘芝芹, 等. 金沙江干热河谷封禁管护坡面的产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 217-219.

[18] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 降雨的空间不均性对模拟产流量和产沙量不确定的影响[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 446-453.

[19] 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39-43.

[20] 陈杰, 刘文兆, 张勋昌, 等. 黄土丘陵沟壑区林地水文生态效应[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 2955-2963.

(编辑: 马建忠)