

## 三峡库区坡地林草植被阻止降雨径流侵蚀

黄茹<sup>1</sup>, 黄林<sup>2</sup>, 何丙辉<sup>1\*</sup>, 周立江<sup>3</sup>, 王峰<sup>3</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;  
2. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715; 3. 四川省林业调查规划院, 成都 610081)

**摘要:** 为了研究林草调控措施对坡面降雨径流侵蚀的影响及其对坡面侵蚀动力的调控效果, 该文在重庆开县选择栎树+黄花槐、传统农作、植物篱、封山育林、自然恢复、经济林以及裸地对照 7 种林草治理措施并修建标准径流小区, 通过观测产流产沙状况, 分析比较其水土流失特征。结果表明: 林草调控措施深刻影响降雨径流侵蚀动力, 并对坡耕地径流侵蚀量产生较大的影响。林草调控措施中, 均以裸地对照样地产流、产沙量最大, 而以栎树+黄花槐和植物篱措施的产流、产沙最小, 水土保持效果最为明显。以洪峰流量模数和径流深表示的坡面径流侵蚀功率与侵蚀产沙量呈正相关关系, 说明径流侵蚀功率能够较好的模拟侵蚀动力; 以径流侵蚀功率/侵蚀量表示不同林草调控措施对侵蚀结果的影响, 可以成为评价植被侵蚀动力调控效应的指标。在未来三峡库区植被恢复与生态环境建设过程中, 通过各种林草调控措施的逐步实施, 重视和发展植被的恢复与重建, 对于当地生态环境的改善和水土流失的治理具有重要的意义。

**关键词:** 降雨, 径流, 侵蚀, 林草调控措施, 侵蚀功率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.09.012

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-09-0070-07

黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区坡地林草植被阻止降雨径流侵蚀[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 70-76.  
Huang Ru, Huang Lin, He Binghui, et al. Effects of slope forest and grass vegetation on reducing rainfall-runoff erosivity in Three Gorges Reservoir Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 70-76. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

三峡库区总面积 5.24 万 km<sup>2</sup>, 区域地貌类型复杂, 是长江上游四大重点水土流失片区之一, 水土流失面积占库区总土地面积的 66.1%, 年均土壤侵蚀量高达 1.5×10<sup>8</sup> t<sup>[1]</sup>, 已成为严重危害流域生态环境和阻碍社会经济发展的一个重要因素。坡耕地作为三峡库区土壤侵蚀的主要地类, 年土壤侵蚀量达 9 450 万 t<sup>[2]</sup>, 其土层极易完全流失或形成粗骨土, 使土地生产力下降, 三峡库区面临着以水土保持为中心的生态环境建设与社会经济可持续发展的双重压力。因此, 急需探寻一种符合可持续发展原则的水土流失综合治理措施。

降雨是产生径流和土壤水蚀的先决条件, 侵蚀量和径流量的大小取决于降雨强度及降雨量, 同时土地利用方式对其也有决定性影响<sup>[3-6]</sup>。不同土地利用方式下, 植被是影响土壤侵蚀的敏感性因子, 具有治理水土流失的重要作用<sup>[7-8]</sup>。从本质上说, 因为不同类型的植被覆盖能有效降低雨滴动能, 增加土壤入渗、减少径流量与泥沙

量<sup>[9-10]</sup>, 从而改变径流侵蚀动力, 影响侵蚀的过程和结果<sup>[11-13]</sup>。陈鹏飞等对 5 种不同土地利用类型水土流失情况进行了研究, 结果表明不同土地利用类型坡地之间单位面积年产量及产沙量存在显著差异<sup>[14]</sup>。朱显谟<sup>[15]</sup>通过对黄土高原水力侵蚀区的研究也表明: 植被对水土保持具有非常直接且巨大的功效, 它不仅能保护地面, 减缓暴雨对地面的冲击强度, 免受降雨的直接打击, 并分散和调节地面径流。但是这些功效会因植被类型的不同, 具有很大差异。

为了揭示不同林草措施条件下坡面侵蚀产沙动力机制的变化规律, 本文通过野外实地观测降雨试验, 研究不同林草措施坡面降雨径流的侵蚀过程, 以及林草调控措施对坡面侵蚀产沙和侵蚀动力的影响, 进而分析侵蚀动力与侵蚀产沙的关系, 通过基于径流侵蚀功率的坡面植被降雨侵蚀动力调控指标, 揭示林草调控措施对土壤侵蚀发生发展过程和机制的影响。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验地区概况

试验地设在重庆市开县南山桥沟小流域内, 地理位置为 N30°49' 30"~31°41'30", E107°55'48"~108°54'36"。自然地理类型属渝东北平行岭谷区, 位于长江支流小江的上段, 地形南高北低, 以低山为主, 地势起伏大, 海拔高度在 280~797 m 之间; 多年平均年降水量为 1 006 mm; 无霜期 180~306 d; 气候温和, 四季分明, 具有冬暖、春早、夏热、秋凉等特点。土壤以自流井组泥、页

收稿日期: 2011-10-17 修订日期: 2012-04-10

基金项目: 国家林业局生物措施治理水土流失试点项目(04908); 国家自然科学基金(40971166); 国家科技支撑计划重点项目(2011BAD31B00)

作者简介: 黄茹(1982-), 女, 新疆人, 博士生, 研究方向为水土保持与生态修复。重庆 西南大学资源环境学院, 400715。

Email: huangru\_2008@163.com

\*通信作者: 何丙辉(1966-)男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。重庆 西南大学资源环境学院, 400716。

Email: hebinghui@yahoo.com.cn;

岩和须家河组沙岩等形成的紫色土、冷砂黄壤为主，土层浅薄，石砾含量高，土壤肥力较低，且保土蓄水功能差，水土流失严重。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与径流场设置

依据三峡库区水土流失特点以及土地条件和利用方式，2004 年选择海拔相近、坡向为半阳坡的栎树+黄花槐、传统农作、植物篱、封山育林、自然恢复和经济林 6 种治理措施，并选择裸地作为对照。其选点位置在图 1 中标出。径流场的基本情况见表 1。

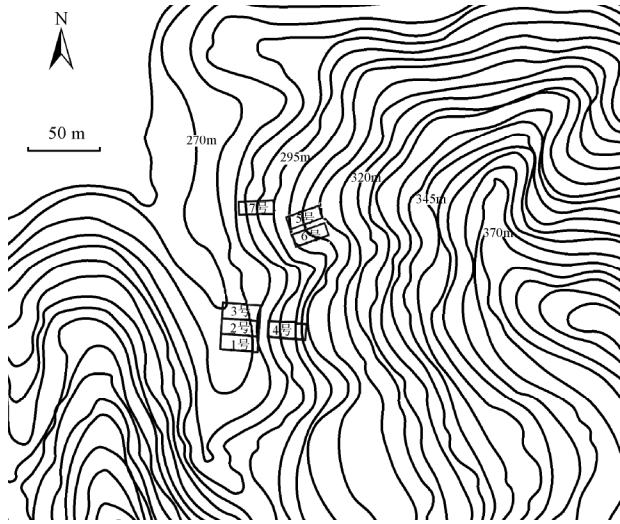


图 1 开县径流场位置示意图

Fig.1 Sketch map of flow fields location in Kai county

表 1 径流小区基本情况  
Table 1 Basic situation of runoff plots

编号	类型	位置	海拔/m	坡度/°	坡位	坡向	植被覆盖率/%	种植植物
1	栎树+黄花槐	刘家台	274	29	中坡	NW30°	95	栎树、黄花槐
2	传统农作	刘家台	274	27	中坡	NW30°	50	胡豆、甘薯、四季豆
3	植物篱	刘家台	274	25	中坡	NW30°	56	黄花菜、西瓜、白菜
4	空白对照	刘家台	278	25	中坡	NW30°		
5	封山育林地	刘家台	292	31	中坡	NW46°	87	马尾松+草地
6	自然恢复地	刘家台	292	31	中坡	NW46°	82	马尾松+草地
7	经济林	刘家台	285	31	中坡	W	68	枇杷+花生地

栎树+黄花槐：栎树、黄花槐混交，栎树株行距 2 m × 3 m，黄花槐株行距 2 m × 2 m；传统农作：轮种胡豆、甘薯、四季豆；植物篱：平行于等高线种植黄花菜，植物篱间距 0.5 m，篱间种植西瓜或白菜；封山育林：按 2 m × 3 m 的株行距种植马尾松，并封育；自然恢复：按 2 m × 3 m 的株行距种植马尾松，有人为干扰；经济林：按 3 m × 4 m 的株行距种植枇杷；裸地：无任何植物覆盖。

径流场为长方形，水平投影长 20 m，宽 5 m，投影面积 100 m<sup>2</sup>，长边顺坡垂直于等高线，短边与等高线平行。在径流场上下及两侧设置水泥板挡水墙，下端地面

设承水池，容纳径流场地表径流，集水槽位于下方挡水墙处，集水槽垂直断面为一等腰三角形，槽长 500 cm，宽 15~20 cm，中央深 20 cm，中央处向外设有直径为 8~10 cm 的出水孔，其流入的径流由这一出口经引水管导入承水池，承水池容积为 1~1.5 m<sup>3</sup>。同时，为阻止径流场上方和两侧的径流冲垮石板渗入径流场中，在其两侧和上方开挖排水沟进行保护。上方排水渠距挡水墙 50 cm 外，两侧排水渠距挡水墙 2 m，排水沟宽 50 cm，深 25 cm 左右，上方排水沟用水泥浆砌。

1.2.2 降雨量的监测

在距离径流场附近的裸地设置标准雨量筒 1 个，每次降雨后记录降雨历时、测量降雨量，并对雨量资料进行整理。

1.2.3 地表径流及泥沙质量分数的测定

每次降雨后观测地表径流量，测量存水池水量；并取泥水样，采用烘干法测定其泥沙质量分数<sup>[6]</sup>。

1.2.4 数据处理

所有数据利用 SPSS 13.0 统计软件处理，进行单因子多因素方差分析。由于本试验无重复设计，不能计算方差的齐次性，故采用 S-N-K 法对不同林草调控措施治理径流量和产沙量进行均数之间的两两比较<sup>[17]</sup>，*p*<0.05 表示差异显著；对径流侵蚀功率与侵蚀产沙量进行回归分析，并对径流侵蚀功率与林草调控措施进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 林草调控措施对坡面降雨产流特征的影响

2010 年重庆开县地区共降雨 36 次，总降雨量为 879.7 mm，其中 5~9 月份的降雨最为集中，降雨量为 691.1 mm，占全年降雨量的 78.56%。根据观测记录，试验期间径流小区共产流 12 次，每次的降雨量、降雨强度和径流深如表 2 所示。表 2 显示，尽管单次降雨不同（18.2~119 mm）及平均降雨强度不同（0.517~6.611 mm/h），但是不同林草措施下径流场的径流量绝大多数

表 2 自然降雨条件下不同林草调控措施的径流量比较

Table 2 Comparison of runoff with different biological regulating measures under natural rainfall condition

降雨日期	单次降雨量/mm	单次降雨雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	径流量/mm						
			栎树+黄花槐	经济林	植物篱	裸地对照	封山育林	传统农作	自然恢复
04-21	18.2	0.517	0.099	0.189	0.149	0.627	0.149	0.467	0.198
05-06	34.8	0.809	0.229	1.788	0.646	2.877	0.845	2.58	1.788
05-12	31.0	0.747	1.089	1.786	1.43	2.488	1.636	2.387	1.882
05-26	67.8	1.753	0.189	1.093	0.308	5.57	0.328	2.394	2.081
05-31	29.5	0.827	0.149	0.329	0.179	1.295	0.208	0.708	0.457
06-07	53.6	4.123	0.208	3.682	0.248	4.878	0.328	4.361	3.776
07-04	33.5	0.952	0.792	1.487	0.991	1.789	1.09	1.689	1.59
07-10	34.5	1.611	1.092	1.887	1.287	2.776	1.389	2.688	2.381
07-18	67.0	2.407	2.28	6.231	2.582	7.949	3.672	7.23	7.163
08-14	119.0	6.611	4.624	7.399	5.521	9.581	5.546	8.91	7.403
09-05	39.2	1.367	1.786	3.068	2.082	5.462	2.185	4.666	3.074
09-09	66.7	4.085	2.577	5.554	2.871	7.152	3.162	6.937	6.841

表现为裸地对照>传统农作>自然恢复>经济林>封山育林>植物篱>栎树+黄花槐的总体规律。通过将所采取的 6 种林草措施的径流深均值与裸地对照均值进行比较, 栎树+黄花槐、植物篱、封山育林、经济林、自然恢复和传统农作分别减少 71.18%、65.12%、60.84%、34.23%、26.33%和 14.16%的地表径流。数据显示, 林草调控措施的治理与径流的降低作用具有正相关关系。

利用 S-N-K 法对所采取的不同林草调控措施进行均值多重比较得到均衡子集(表 3), 发现不同林草调控措施对径流量的影响可以分为 4 组, I 组: 栎树+黄花槐、植物篱和封山育林; II 组: 经济林; III 组: 传统农作; II 组和 III 组之间: 自然恢复; IV 组: 裸地对照, III 组和 IV 组之间: 传统农作。其组内差异不显著, 但组间在  $P=0.05$  水平上差异显著。因此在一定程度上说明了林草调控措施治理对于水土流失的影响<sup>[18]</sup>, 即通过采取林草调控措施治理水土流失, 地表径流会因为林草措施治理而有所减少, 但有时影响不显著; 只有当所采用的植物物种类型与水土流失的搭配适当时, 林草调控措施的采取才对地表径流有显著降低作用。

表 3 S-N-K 法不同林草调控措施影响均值比较

Table 3 Comparison of mean effects by different biological regulated measures with S-N-K method

林草措施	栎树+黄花槐	植物篱	封山育林	经济林	自然恢复	传统农作	空白对照	显著水平 P
I	1.260	1.525	1.712					0.420
均衡子集 (α=0.05)				2.874	3.220			0.338
III				3.220	3.751			0.141
IV					3.751	4.370		0.088

注: 表 3 所示数据为组间均衡子集均数, 均方误差 0.766。

## 2.2 林草调控措施对坡面侵蚀产沙特征的影响

图 2 显示, 不同林草调控措施治理对坡面侵蚀产沙具有不同程度的影响, 在发生产流的 12 次自然降雨中, 通过不同林草调控措施治理的土壤流失量从大到小依次为: 对照>传统农作>自然恢复>经济林>封山育林>植物篱>栎树+黄花槐, 表明林草调控措施在一定程度上能够减少坡面侵蚀的产沙量。方差分析如表 4 所示, 不同林草调控措施对泥沙产量的影响被分为 3 组: 1 组: 栎树+黄花槐、植物篱; 2 组: 传统农作; 1 和 2 组之间: 封山育林、经济林和自然恢复; 3 组: 裸地对照。

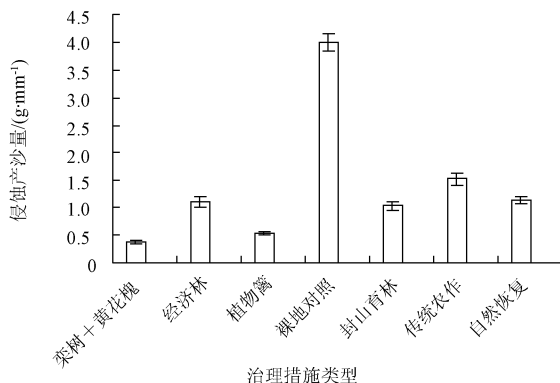


图 2 不同林草调控措施单位降雨量的产沙量

Fig.2 Sediment yield per unit of rainfall under different biological regulated measures

表 4 S-N-K 法不同林草调控措施影响均值比较

Table 4 Comparison of mean effects by different biological measure with S-N-K method

林草措施	栎树+黄花槐	植物篱	封山育林	经济林	自然恢复	传统农作	裸地对照	显著水平 P
1	0.0221	0.0292	0.0623	0.0624	0.0632			0.252
均衡子集 (α=0.05)			0.0623	0.0624	0.0632	0.0922		0.445
3							0.2001	1.000

注: 表 4 所示数据为组间均衡子集均数, 均方误差 0.003。

其组内差异不显著, 组间在  $P=0.05$  水平上差异显著, 这与径流量的比较结果比较一致。可见, 栎树+黄花槐措施保水保土效果最好, 与裸地对照相比, 其径流深均值、产沙量均值分别减少 71.18%、87.61%, 其次是植物篱类型, 径流深均值、产沙量均值分别减少 65.12%、83.46%。对三峡库区的主要水土流失策源地, 坡耕地治理采用的黄花菜植物篱建设, 可以生态与经济效益兼得, 与传统农作措施对比, 黄花菜植物篱类型的径流深均值、产沙量均值分别减少 59.36%、52.71%。

减沙效益的基本算式为: (裸地的产沙量-治理措施下的产沙量)/裸地的产沙量 $\times 100\%$ 。坡面侵蚀产沙随林草调控措施的不同而有所变化的结果说明(图 3), 当地表具有一定植被时, 植物可以通过机械阻挡和减缓径流来有效拦截坡面产生的泥沙, 当清除地表植被, 即为裸地时, 坡面侵蚀产沙量将会大大增加; 而当林草调控措施搭配合理与当地环境相适应时, 防止水土流失的作用将达到一个相对稳定的最大值。周毅等<sup>[19]</sup>的研究也证实了水土保持措施对于减沙作用差异的存在, 林草植被措施具有极强的提高土壤抗冲性的能力, 所研究的 5 个径流小区中以沙棘纯林水土保持效益最为显著, 油松林地最差。

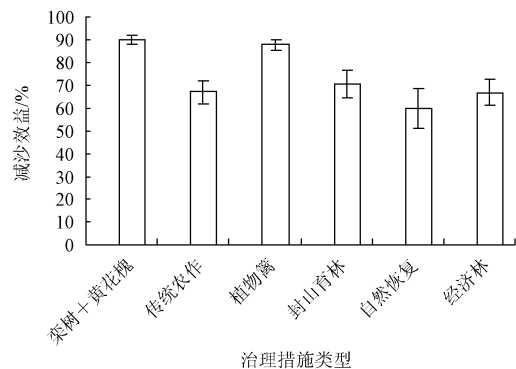


图 3 不同林草调控措施下坡面减沙效益

Fig.3 Sediment reduction effect under different biological regulated measures

## 2.3 侵蚀动力与侵蚀产沙关系

将流域次降雨径流过程的径流总量特征-径流深和径流强度特征-洪峰流量这 2 个重要侵蚀动力因素结合起来考虑, 鲁克新等<sup>[20]</sup>通过分析输沙模数与径流侵蚀功率之间的相关性, 以径流深和洪峰流量模数表示的径流侵蚀功率来模拟侵蚀动力, 提出并建立了基于径流侵蚀功率的流域次暴雨水沙响应模型, 同时利用黄土高原不同空间尺度及不同水土保持治理程度(包括坡面和流域)的实测次暴雨径流泥沙资料对其进行验证, 结果显示, 径流

侵蚀功率综合反映了降雨以及流域下垫面的时空差异对侵蚀产沙过程的影响，相对降雨侵蚀力，更直接、更敏感地反映了次降雨水蚀过程的侵蚀动力机制。

本文中选取 2010 年典型次降雨的实测最大过程流量为洪峰流量，通过计算各场降雨的径流深和相应的径流侵蚀功率，点绘次降雨径流侵蚀功率与侵蚀产沙量间的关系（图 4）。从图中点的分布情况可以看出，次降雨侵蚀产沙量随着径流侵蚀功率的增加而增大。径流侵蚀功率与侵蚀产沙量之间呈现如式（1）的回归方程：

$$M_s=260.17 \times P^{1.38} \quad R^2=0.83 \quad (1)$$

式中， $M_s$  为次降雨侵蚀产沙量，g； $P$  为径流侵蚀功率， $m^4/(s \cdot km^2)$ 。

通过分析计算，回归方程的  $F$  检验值为 58.69，且通过  $p=0.01$  的检验，具有较高的置信度，降雨径流侵蚀功率与侵蚀产沙量呈现显著相关。这主要是因为，径流既受地形、植被、土壤等影响，又对侵蚀产沙产生影响作用，地表被剥离输移的侵蚀土壤的多少很大程度上是由径流动能的大小决定的。出口处的洪水特征是降雨过程和下垫面相互作用对侵蚀产沙综合影响的反映，以径流深和洪峰流量模数表示的径流侵蚀功率反映了降雨过程中水力侵蚀动力和人类活动对水蚀引起的侵蚀产沙及搬运泥沙过程中的共同作用效果。

若单纯从径流侵蚀功率与侵蚀产沙量的回归关系上看，其基本不受地表林草调控措施类型的影响。但是，通过按照林草调控措施对侵蚀产沙量的影响划分的 3 组，将每一组作为一种类型，对不同次降雨强度下的径流侵蚀功率进行平均，分析其与林草调控措施的相关关系，结果表明，径流侵蚀功率与林草调控措施是具有负相关性的，秩相关系数为 0.65， $p=0.022$ ，具有显著相关，进一步说明，不同植被措施能够拦蓄径流，削弱洪峰流量，以径流深和洪峰流量模数表示的径流侵蚀功率因为林草调控措施治理而有所减小。姜娜等<sup>[21]</sup>通过对黄土高原六道沟小流域的谷子地、黑豆地、退耕撂荒地、荒草地和柠条地 5 种土地利用方式的水土流失特征进行分析，说明了草灌木等植被措施具有显著的水土保持作用，这与本文的结果相同。

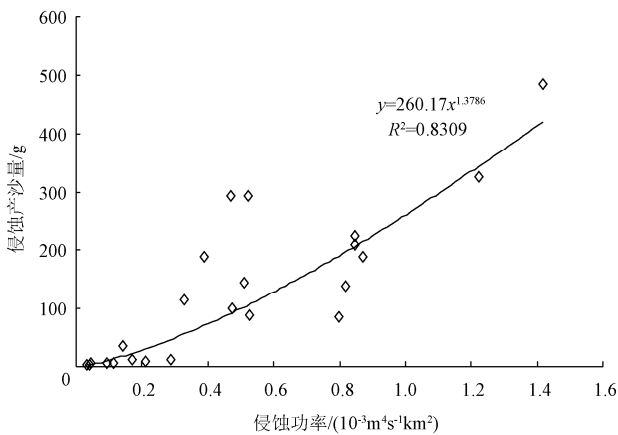


图 4 不同林草调控措施下坡面减沙效益

Fig.4 Relationship between runoff power and sediment yield under different biological regulated measures

### 2.4 林草调控措施治理坡面水蚀动力调控指标

植被保土作用系数<sup>[22]</sup>和减沙效益是 2 个常用的描述植被水土保持功效的指标，此 2 指标的计算都是以相同情况下无植被覆盖的土壤侵蚀量作为计算基础。以径流侵蚀功率/侵蚀量所表示的不同林草调控措施治理对水土流失过程的影响，与林草调控措施治理和水土流失的客观事实一致，因此，可以初步作为评价坡面植被水蚀动力调控作用的指标。

本研究中，侵蚀产沙量受植被措施和降雨的共同作用影响，为进一步揭示降雨侵蚀产沙与侵蚀动力之间的关系，以不同林草调控措施下单位侵蚀量所消耗的径流侵蚀功率来表示林草调控措施治理对侵蚀结果的影响，同时将其与传统的植被减沙效益和植被保土作用系数进行对比验证。图 5 显示，径流侵蚀功率/侵蚀量由于治理措施的采取总体呈增大趋势，且栎树+黄花槐治理措施下值最大，与上文的结果相符；保土作用系数从空白对照到有林草措施治理之间具有一个显著的增大趋势，而在自然恢复、经济林和封山育林各措施下保持相对稳定，在栎树+黄花槐治理措施下达到相对最大值；植被减沙效益与保土作用系数具有相同趋势，同样在栎树+黄花槐治理措施下减沙效益最显著。

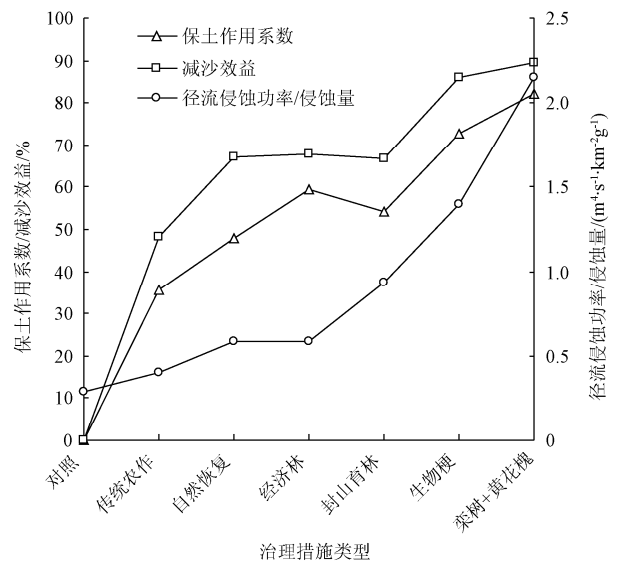


图 5 不同治理措施的径流侵蚀功率/侵蚀量与保土作用系数和减沙效益对比

Fig.5 Comparison of runoff erosion power/volume with soil conservation coefficient and sediment reduction benefits

### 3 讨论

本研究的结果显示，对三峡库区坡地采取林草调控措施治理可以降低水土流失，且各措施的治理对土壤流失的降低程度相对于其对径流的影响要大，这与林草调控措施防治水土流失的机理有关。国内外大量研究结果显示，植被防治水土流失的机理主要是植被可以通过物理机械作用阻挡水土流失<sup>[23-25]</sup>。其中，对泥沙而言，林草措施的治理主要是通过地表植被的茎秆过滤去除径流中携带的大量泥沙，同时对径流流速起到减缓作用，以

此达到降低径流对泥沙的携带能力；而对径流而言，林草措施治理是通过降低径流的流速、增加入渗时间，同时通过植被的林草化学作用改善土壤空隙状况、增加入渗量来实现的<sup>[26]</sup>。由此可以看出，各林草调控措施对土壤流失的作用是其对径流的作用更为直接有效<sup>[27]</sup>。

对于各种措施治理下水土保持效果表现不一，这与林草调控措施下植物的物种特性有关。在三峡库区开县所实施的6种林草调控措施治理中，以栎树+黄花槐的水土保持效果显著好于其他措施，其原因可能与复羽叶栎树具有速生、树冠幅大，而作为小乔木的黄花槐具有生长势强、根系发达等特点，且其林下灌草生长茂盛、盖度较大，这些特点使降雨过程的侵蚀力被层层削弱，起到了很好的保水保土作用；植物篱措施只种植了西瓜，植物篱平行于等高线，每隔0.5 m栽植黄花菜，这一措施虽然植被覆盖度不高且有人为耕作，但是横坡的植物篱黄花菜长势旺盛、根系发达，其茎秆对降雨产生的地表径流形成有效的拦截作用，起到了减小坡长、增加入渗的作用，与传统农作措施相比，植物篱对坡地的重要性得到明显体现，在水土流失过程中发挥更为关键的作用；自然恢复措施下，其植被群落处于正向演替恢复初级阶段，其乔木（马尾松）以及其林下灌木、草本的总体覆盖度相对封山育林较低，形成乔灌草立体防护体系很慢，因此在相同年限的恢复过程中，其水土保持的效果较差。

土壤侵蚀很大程度上受水流的水力学及输沙能力的影响<sup>[28-29]</sup>。以次降雨径流过程中的径流深和洪峰流量这两个重要侵蚀动力因素表示的侵蚀动力——径流侵蚀功率，其与侵蚀产沙量具有显著相关性，次降雨过程的侵蚀产沙量随侵蚀动力的增大而增大。在本研究中，径流侵蚀功率/侵蚀量相比对照裸地总体呈增加趋势，在栎树+黄花槐措施下其值最大。以径流侵蚀功率/侵蚀量表示林草调控措施治理对侵蚀过程的影响，符合林草调控措施治理与水土流失的客观事实，可以初步作为评价坡面植被水蚀动力调控作用的指标。让径流侵蚀功率作为次暴雨水沙响应模型的一个重要参数，为流域侵蚀产沙模型的建立提供了一个很有意义的研究基础。

通过对三峡库区重庆段开县所采取的林草调控措施治理的监测试验可以看出，林草调控措施治理深刻影响了降雨过程的侵蚀动力，进而影响了坡面径流侵蚀产沙。因此，在未来三峡库区植被恢复与生态环境建设过程中，通过各种林草调控措施的逐步实施，重视和发展植被修复与重建，对于改善当地的生态环境和水土流失的治理具有重要的意义。

值得一提的是，植物篱治理措施所用植物为经济植物——黄花菜，它具有一定的经济效益。中国南方地区针对灌草植物篱的相关研究显示：虽然植物篱占用了一定面积的耕地（约为5%），但它可在一定程度上有效减少土壤养分的流失，且作为绿肥还田还可以增加土壤有机质含量，对于减少化肥、改善土壤水分状况等都有一定效果，最终还可以增加作物产量<sup>[30]</sup>。从上述分析可知，植物篱在发挥生态效益的同时还可以兼具一定的经济效

益，因此具有较好的推广基础。

## 4 结 论

本文通过对不同林草调控措施治理下野外自然降雨监测结果计算分析可以看出，林草调控措施的采取，对于侵蚀动力产生了深刻的影响，而这种影响及其变化最终对坡面径流侵蚀量产生较大的影响。

1) 在重庆开县所采取的6种林草调控措施类型里，以栎树+黄花槐、植物篱、经济林与作为对照的裸地及其他林草调控措施相比，其影响显著，而自然恢复、封山育林、传统农作措施下对径流量的影响不具有显著性。

2) 对坡面侵蚀产沙的影响与对降雨径流量的影响结果相似。土壤流失量从大到小依次为：对照>传统农作>自然恢复>经济林>封山育林>植物篱>栎树+黄花槐。其中，与对照裸地相比，以栎树+黄花槐和植物篱措施的减沙作用最为显著，封山育林、经济林、自然恢复措施减沙作用次之，传统农作相比于其他措施的减沙效果较为差。

研究表明，以径流深和洪峰流量模数表示的径流侵蚀功率与侵蚀产沙量具有显著相关性，径流侵蚀功率会因为林草调控措施治理而有所减小。径流侵蚀功率/侵蚀量相比对照裸地总体呈增加趋势，且其值在栎树+黄花槐措施下最大。

### [参 考 文 献]

- [1] 董杰, 杨达源, 周彬, 等. <sup>137</sup>Cs 示踪三峡库区土壤侵蚀速率研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 1-5.  
Dong Jie, Yang Dayuan, Zhou Bin, et al. Study on soil erosion rates in the three gorges reservoir area using <sup>137</sup>Cs tracing method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 1-5. (in Chinese with English Abstract)
- [2] 王玉宽, 王安邦, 张信宝. 长江上游重点水土流失区坡耕地土壤侵蚀的<sup>137</sup>Cs法研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 77-80.  
Wang Yukuan, Wen Anbang, Zhang Xinbao. Study of soil erosion on cultivated slope land in severe soil loss regions of upper reaches of Yangtze River basin using <sup>137</sup>Cs technique[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 77-80. (in Chinese with English Abstract)
- [3] 赵护兵, 刘国彬, 吴瑞俊. 黄土丘陵区不同类型农地的养分循环平衡特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 58-64.  
Zhao Hubing, Liu Guobin, Wu Ruijun. Nutrient cycling and balance characteristics of different farmland types in the Loess Hilly Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(1): 58-64. (in Chinese with English Abstract)
- [4] 潘成忠, 上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制——以人工油松林和次生山杨林为例[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1597-1602.  
Pan Chengzhong, Shang Guan Zhouping. Generation mechanism of woodland runoff and sediment on Loess Plateau under hypo-rainfall: A case study of artificial *P.tabulaeformis* and secondary natural *P.dadidiana* stands[J].

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1597—1602. (in Chinese with English Abstract)
- [5] Zhang C B, Cheng L H, Liu Y P, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 19—26.
- [6] 赵护兵, 刘国彬, 曹清玉, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 20—25.  
Zhao Hubing, Liu Guobin, Cao Qingyu, et al. Influence of different land use types on soil erosion and nutrition care effect in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 20—25. (in Chinese with English Abstract)
- [7] Marc D, Richard H. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec(Canada)[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2009, 131(1/2): 85—97.
- [8] Braud I, Vich A I J, Zuluaga J, et al. Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modeling[J]. Journal of Hydrology, 2001, 254: 124—144.
- [9] Zhou Z C, Shanguan Z P. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 131—136.
- [10] Adelaide M. Assessing nutrient losses with soil erosion under different tillage systems and their implications on water quality[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(15/18): 1135—1140.
- [11] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401—407.  
Zhu Bingbing, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 401—407. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李鹏, 崔文斌, 郑良勇, 等. 草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(1): 55—59.  
Li Peng, Cui Wenbin, Zheng Liangyong, et al. Effects of vegetative cover on runoff hydraulic characteristics and erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(1): 55—59. (in Chinese with English Abstract)
- [13] 原翠萍, 雷廷武, 张满良, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 36—43.  
Yuan Cuiping, Lei Tingwu, Zhang manliang, et al. Sediment yields from the parallel Watersheds in the Hilly-gully Regions of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 36—43. (in Chinese with English Abstract)
- [14] 陈鹏飞, 陈丽华, 王宇, 等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型对坡地产流、产沙的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(3): 199—204.  
Chen Pengfei, Chen Lihua, Wang Yu, et al. Effect of land use pattern on runoff and sediment yield on slop lands in Loess Hilly Region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(3): 199—204. (in Chinese with English Abstract)
- [15] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素. 土壤学与水土保持/朱显谟院士论文选集[C]//西安: 陕西人民出版社, 2004, 340—356.
- [16] 贺红元, 车克钧, 傅辉恩, 等. 祁连山寺大隆林区水土流失状况的初步研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 48—56.  
He Hongyuan, Che Kejun, Fu Hui'en, et al. A preliminary study of water and soil erosion conditions in sidalong forest region in the qilian mountain areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(1): 48—56. (in Chinese with English Abstract)
- [17] 张力. SPSS 13.0 在林草统计中的应用[M]. 福建: 厦门大学出版社, 2008: 42—48.
- [18] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85—90.  
Li Guang, Huang Gaobao. Effects of rainfall intensity and land use on soil and water loss in Loess Hilly Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 85—90. (in Chinese with English abstract)
- [19] 周毅, 魏天兴, 解建强, 等. 黄土高原不同林地类型水土保持效益分析[J]. 水土保持学报, 2011, 3(25): 12—21.  
Zhou Yi, Wei Tianxing, Xie Jianqiang, et al. Different types of vegetation cover and water conservation benefits[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 3(25): 12—21. (in Chinese with English abstract)
- [20] 鲁克新, 李占斌, 李鹏, 等. 基于径流侵蚀功率的流域次暴雨输沙模型研究——以岔巴沟流域为例[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3): 31—34.  
Lu Kexin, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Prediction of watershed sediment transport for single rainstorm based on runoff erosion power[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institut, 2008, 25(3): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 36—41. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘秉正, 刘世海, 郑随定. 作物植被的保土作用及作用系数[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 32—36.  
Liu Bingzheng, Liu Shihai, Zheng Suiding. Soil conservation and coefficient of soil conservation of crops[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [23] 伍红琳, 张辉, 孙庆业. 坡面人工植物群落修复对水土流失及控磷的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 26—30.  
Wu Honglin, Zhang hui, Sun Qingye. Effect of artificial vegetation on the soil and water conservation and the control of phosphorus loss on the slope[J]. Journal of Soil and Water

- Conservation, 2011, 25(3): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张守红, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 161—167.  
Zhang Shouhong, Liu Suxia, Mo Xingguo, et al. Impacts of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Wuding River Basin, middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 161—167. (in Chinese with English abstract)
- [25] 喻定芳, 戴全厚, 王庆海, 等. 北京地区等高草篱防治坡耕地水土流失效果[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 89—96.  
Yu Dingfang, Dai Quanhong, Wang Qinghai, et al. Effects of contour grass hedges on soil and water loss of sloping cropland in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 89—96. (in Chinese with English abstract)
- [26] 蔡强国, 卜崇峰. 植物篱复合农林业技术措施效益分析[J]. 资源科学, 2004, 8(26): 26—32.  
Cai Qiangguo, Bu Chongfeng. Benefit of hedgerow agroforestry technical measure[J]. Resources Science, 2004, 8(26): 26—32. (in Chinese with English abstract)
- [27] 彭熙, 李安定, 李苇洁, 等. 不同植物篱模式下土壤物理变化及其减流减沙效应研究[J]. 土壤, 2009, 41(1): 107—111.  
Peng Xi, Li Anding, Li Weijie, et al. Changes of soil physical properties, runoff and soil erosion under different hedgerow system[J]. Soils, 2009, 41(1): 107—111. (in Chinese with English abstract)
- [28] Lei T W, Nearing M A, Haghghi K, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model[J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157—3168.
- [29] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 476—481.  
Lei Tingwu, Zhang Qingwen, Zhao Jun, et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 476—481. (in Chinese with English abstract)
- [30] 唐亚, 谢嘉穗, 陈克明, 等. 等高固氮植物篱技术在坡耕地可持续耕作中的应用[J]. 水土保持研究, 2001, 8(1): 104—109.  
Tang Ya, Xie Jiasui, Chen Keming, et al. Contour hedgerow intercropping technology and its application in the sustainable management of sloping agricultural lands in the mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2001, 8(1): 104—109. (in Chinese with English abstract)

## Effects of slope forest and grass vegetation on reducing rainfall-runoff erosivity in Three Gorges Reservoir Region

Huang Ru<sup>1,2</sup>, Huang Lin<sup>2</sup>, He Binghui<sup>1\*</sup>, Zhou Lijiang<sup>3</sup>, Wang Feng<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Key-Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing 400715, China; 2. School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Sichuan Forest Inventory and Planning Institute, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** The study on the relationship between biological regulating measures and soil and water losses, is of great significance to the soil and water conservation and the ecological reconstruction of the environment in Three Gorges Reservoir Area. Seven standard runoff plots were built on the seven natural slopes with different biological regulating measures for observing the runoff and sediment yield produced under these slope biological regulating measures (*Koeleria bipinnata* + *Cassia suffruticosa*, traditional planting, hedgerows, closed forest, natural restoration, economic forest and control plot). The results showed that the treatments of biological regulating measures affected runoff and sediment generation significantly. Runoff and sediment yield reduced rapidly with the biological regulating measures, the values in control plot were higher, but lower in *Koeleria bipinnata* + *Cassia suffruticosa* plot and hedgerows plot. Runoff erosion power was positively related with sediment yield. It was suggested that runoff erosion power can be used to better simulate erosion dynamics. The presentation of the effect of different biological regulating measures on erosion by the ratio of runoff erosion power/erosion volume reflects the existence of critical biological regulating measures, which can be used to evaluate regulatory effects of biological regulating measures on soil erosion dynamics.

**Key words:** rainfall, runoff, erosion, biological regulating measures, runoff erosion power