浙 江 农 林 大 学 学 报，2017，**34**(4)：687–694
Journal of Zhejiang A & F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2017.04.015

凯掌喀斯特小流域不同植被措施的减沙功能

李华林[1]，高华端[1]，杨　涛[1]，高儒学[1]，孙泉忠[2]

（1. 贵州大学 林学院，贵州 贵阳 550025；2. 贵州省水土保持技术咨询研究中心，贵州 贵阳 550002）

摘要：贵州位于中国西南喀斯特地区的中心，是全国水土流失最为严重的省份之一，而喀斯特地区生态环境脆弱，土层浅薄，极容易发生水土流失。为了揭示喀斯特小流域不同植被措施减沙功能，在贵州省平坝县典型喀斯特区凯掌小流域野外径流小区定位监测的基础上，根据小流域2010–2012年4个坡面径流小区的定位观测资料，采用单因素完全随机设计方法研究在水土保持林(柏树 *Cupressus funebris*)，经济林(茶树 *Camellia sinensis*)，坡耕地(玉米 *Zea mays*)和撂荒草地4种不同植被措施下径流小区的产沙特性，探索不同植被措施下径流小区产沙量的差异。结果表明：水土保持林与经济林差异不显著(P=0.754＞0.05)，与坡耕地差异显著(P=0.022＜0.05)，与撂荒地差异显著(P=0.008＜0.05)；经济林与坡耕地差异显著(P=0.046＜0.05)，撂荒地差异显著(P=0.003＜0.05)；坡耕地与撂荒地差异显著(P=0.000＜0.05)。年平均产沙量最少为撂荒地29.57 g·a^{-1}；最多为坡耕地1 436.59 g·a^{-1}；水土保持林与经济林相差不大，分别为789.12 g·a^{-1}和876.55 g·a^{-1}。不同措施减沙功能排序为：撂荒地＞水土保持林＞经济林＞坡耕地。在喀斯特地区，撂荒地减沙功能最好，而坡耕地是水土流失严重。图3表3参20

关键词：水土保持学；喀斯特；小流域；植被措施；减沙
中图分类号：S775　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-0756(2017)04-0687-08

Sediment reduction with different vegetation types for the Kaizhang small watershed in a karst area

LI Hualin[1], GAO Huaduan[1], YANG Tao[1], GAO Ruxue[1], SUN Quanzhong[2]

(1. Forestry College, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Soil and Water Conservation Technical Consulting and Research Center of Guizhou Province, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: Located in the center of the karst area in southwest China, Guizhou is one of the most serious soil erosion provinces in the westward, while ecological environment of karst area is fragile, shallow soil layer, extremely prone to soil erosion. Therefore, to reveal the function of sediment reduction with different vegetation measures for a small watershed in a karst area, fixed runoff plots for outdoor use were monitored in the Kaizhang small watershed of Pingba County, Guizhou Province. Experiment had adopted one-factor completely random design, according to fixed observations, data in four slope runoff plots of four different vegetation types [water conservation forest (cypress: *Cupressus funebris*), economic forest (tea tree: *Camellia sinensis*), sloping farmland (corn: *Zea mays*), and abandoned grassland] in the small watershed were studied from 2010 to 2012 to determine the effect of runoff on sediment characteristics as well as the sediment yield differences. Results showed significant differences for the water conservation forest and sloping farmland (P = 0.022＜0.05), the water conservation forest and abandoned farmland (P = 0.008＜0.05), the economic forest and sloping farmland (P = 0.046＜0.05), the economic forest and abandoned farmland (P = 0.003＜0.05), and sloping farmland and abandoned farmland (P = 0.000＜0.05), but there are no significant difference between the conserva-

收稿日期：2016-06-21；修回日期：2016-09-19
基金项目：贵州省专业学位研究生工作站项目(黔教研合JYSZ字[2014]003)；贵州省水利厅水利科技专项经费项目(KT201311)
作者简介：李华林，从事区域水土保持与环境研究。E-mail: 664380773@qq.com。通信作者：高华端，教授，博士，从事区域水土保持与环境研究。E-mail: gdghd110@163.com

tion forest and economic forest (P = 0.754>0.05). The average annual sediment yield was least on abandoned farmland (29.57 g·a^{-1}) and greatest on sloping farmland (1 436.59 g·a^{-1}; the average annual sediment yield in the water conservation forest (789.12 g·a^{-1}) and the economic forest (876.55 g·a^{-1}) were similar. The ranking of different measures for the sediment reduction function was: abandoned land > water conservation forest > economic forest > sloping farmland. The sediment reduction function of the abandoned grassland is best, but the soil erosion of sloping farmland is serious. [Ch, 3 fig. 3 tab. 20 ref.]

Key words: soil and water conservation; karst area; small watershed; vegetation measures; sediment reduction

喀斯特地貌是一种具有特殊物质、能量、结构和功能的生态系统[1]，其生态敏感度高，环境容量低，抗干扰能力弱，稳定性差，极易造成水土流失，基岩裸露，干旱灾害频繁发生[2]。喀斯特地区石多山多，沟坡复杂交错，生态环境差，土层薄，水土流失易发生且难治理，使喀斯特地区人地矛盾越来越严重，严重影响到当地居民的日常生活。植被是影响水土流失重要的因子[3]，进一步研究植被对喀斯特地区水土流失的影响具有重要的价值和意义。植被可以通过根系来改善土壤理化性质，从而增加土壤的抗冲性和抗蚀性，减轻土壤侵蚀；通过林冠层减少雨滴大小和动能，对降雨进行再分配，从而减轻降雨对土壤的溅蚀作用；通过枯枝落叶层阻隔降雨直接击打土壤，增加土壤表面的粗糙度，增加土壤渗透力，从而减少地表径流，减少产沙量。不同的植被措施减沙功能不同，在喀斯特地区，合理的植物措施配置对减少地表径流，减少产沙量有着重要的意义。中国于 20 世纪 90 年代才开始研究喀斯特地区水土流失，起步较晚，多以贵州喀斯特地区为研究对象。贵州省位于西南喀斯特地区的核心地带，山区坡度大，成土速度极低，土地利用方式不合理，人口的增长与经济的不协调发展，迫使居民毁林开荒，导致严重的水土流失，成为了中国水土流失最为严重的地区之一[4-7]，具有代表性。喀斯特地区水土流失具有特殊性[8]，通常以坡面为重要地表单元，并在喀斯特径流小区中进行模拟研究。影响喀斯特地区水土流失的因素主要有地质、地貌、植被、土壤、气候等[9]，但对这些因子的研究比较少，且研究深度较浅。2008 年，胡顺光[10]在贵州喀斯特生态治理区试验，利用径流小区监测方法得出：不同的植被配置方式可以得出不同的水土保持效果，其中以乔灌草三者结合最好；植被类型不同，凋落物的种类以及持水量也不同。2013 年，蒋荣等[4]和纪启芳[11]对喀斯特地区不同植被的减流减沙功能研究表明：植被的减流减沙作用是一个循序渐进的过程，且林草植被配置方式对植被的减沙作用很大，林冠和地被物在减流方面发挥主要作用，植被根系在减沙方面发挥主要作用。总体上，不同植被减流减沙作用表现为经济林>人工草地>水土保持林。周素萍等[9]和刘凤仙[12]通过龙里县羊鸡冲小流域径流小区不同时期的监测资料，研究贵州喀斯特地区不同植被措施对水土保持的影响，研究结果却不同。刘凤仙[12]研究表明：水土保持林的保持水土效果比经济林强，周素萍等[9]却得出相反的结果。综上表明：不同植被措施和配置方式对减沙功能有极显著影响，乔、灌、草三者结合的配置方式使减沙功能达到最佳。以上研究都具有一定的局限性。野外径流小区与自然情况最相近，但是难以控制试验的变量，加深了试验难度；研究区的径流小区泥沙资料年限较短；缺少对喀斯特地区退耕的撂荒地减沙功能的进行研究。本研究选择贵州省平坝县碳酸盐岩石发育土壤，以典型喀斯特地区自然的植被措施为基础，利用控制变量法，通过 30 次侵蚀性降水资料以及径流小区的泥沙资料，对不同植被措施减沙功能的研究，掌握喀斯特小流域不同植被措施减沙功能的差异，弥补了前人对撂荒地的研究空白，为喀斯特小流域水土流失的治理提供理论依据。

1 研究区概况

平坝县境内大部分为碳酸岩石，地势西高东低，裸岩出露、土壤稀薄贫瘠、地下溶洞较多，地势平坦，地层主要为三叠系(T_{la})和第四系(Q)，是贵州喀斯特地貌的代表之一，属亚热带湿润季风气候，冬无严寒，夏无酷暑，气候温和。平坝县水土保持监测点位于安顺市平坝县马场镇境内凯掌水库，26°22′00″N，106°30′00″E，距马场镇 12 km，交通便利。该监测点是贵州省水土保持监测中心建立，凯掌水库流域面积为 8.8 km^2，水土流失面积 3.6 km^2，属长江流域乌江水系，位于国家水土流失重点防治区——乌江赤水河上中游治理区，同时也属于贵州省人民政府公布的水土流失重点治理区。小流域属中亚热带湿润季风气候，多年平均降水量为 1 298.0 mm。多年平均气温为 13.0~14.2 ℃；主要植被类型为常绿阔

叶林，乔木树种以马尾松 *Pinus massoniana*，柳杉 *Cryptomeria fortunei* 等为主，土壤为碳酸盐岩石发育而来的黄壤。该监测点始建于 2008 年。主要检测设施有简易气象观测场 1 个，坡面径流小区 6 个，观测房 30 m^2 及观测便道 150 m 等；主要设备有 HOBO 小型气象站，自记雨量计，烘箱，电子天平，取样瓶，铝盒等。主要监测内容为降水、径流、泥沙等。

2　数据来源

试验的数据为 2010–2012 年侵蚀性降水发生后，在各试验径流小区采用搅拌法对泥沙进行采集，用烘干法测定产沙量；降水过程由设置在小区的自记雨量计记录。根据野外调查，1 号标准径流小区为水土保持林，栽植 2 年生的柏树 *Cupressus funebris*，植被盖度为 30%，柏树长势良好，林下植被单一，杂草逐年茂盛；2 号标准径流小区为经济林，栽植经济作物为 2 年生的茶树 *Camellia sinensis*，植被盖度为 40%，茶树长势良好，经营管理较好，林下植被稀疏；3 号标准径流小区为坡耕地，栽植玉米 *Zea mays*，植被盖度为 10%，每年耕作；4 号标准径流小区为撂荒地，坡耕地退耕 4 a 后，杂草和稀疏的小灌木长满径流小区，植被盖度为 80%；径流小区林分年龄均为 2 a。利用野外不同植被措施径流小区 1，小区 2，小区 3，小区 4 对应水土保持林、经济林、坡耕地、撂荒地的产沙量进行研究，分析不同植被类型的减沙作用。各径流小区的土壤都是由石灰岩发育而来的黄壤，土壤为团粒结构，土壤全磷为 0.61 $g\cdot kg^{-1}$，有效磷 12.30 $mg\cdot kg^{-1}$，全氮 0.72 $g\cdot kg^{-1}$，全钾 11.23 $g\cdot kg^{-1}$，速效钾 86.30 $mg\cdot kg^{-1}$，pH 6.0。小区的基本情况如表 1。

表 1　凯掌小流域径流小区基本情况

Table 1　Runoff plots of the Kaizhang small watershed

小区编号	宽/m	水平面积/㎡	坡度/(°)	坡向	坡位	土壤类型	土层厚度/cm	基岩种类	植被类型	植被盖度/%	措施类型	株行距/(m×m)	生物措施种类	林龄/a	苗木数量
1	5	100	15	西	上	黄壤	30	石灰岩	乔木	30	水土保持林	1.6×1.6	柏树	2	40
2	5	100	15	西	上	黄壤	30	石灰岩	灌木	40	经济林	0.2×0.8	茶叶	2	1 000
3	5	100	15	西	上	黄壤	30	石灰岩	农作物	10	坡耕林	0.1×0.6	玉米		1 000
4	5	100	15	西	上	黄壤	30	石灰岩	荒草地	80	撂荒地		杂草	2	

经过数据整理筛选，得出 2010–2012 年期间 30 次侵蚀性降水产沙量数据(表 2)，其中水土保持林、经济林、坡耕地均发生土壤侵蚀，而撂荒地仅发生 4 次土壤侵蚀。

3　研究方法

通过监测站的泥沙数据和降水资料，对实验观测数据进行深入挖掘和全面分析处理。主要通过径流小区侵蚀性降水最大 30 min 雨强、侵蚀性降水量和产沙量数据研究分析不同植被措施减沙功能差异，用 SPSS 18.0 软件对 2010–2012 侵蚀性降水水土流失量进行差异性比较，并用 2010–2012 年发生的侵蚀性降水量与径流小区产沙量做轴线图观察分析。

4　结果与分析

由图 1 可知：平均产沙量最少为撂荒地 29.57 $g\cdot a^{-1}$，最多为坡耕地 1 436.59 $g\cdot a^{-1}$；水土保持林与经济林相差不大，分别为 789.12 $g\cdot a^{-1}$ 和 876.55 $g\cdot a^{-1}$。撂荒地减沙效果最佳。撂荒地退耕多年，土壤未扰动，杂草种类多，枯枝落叶层较厚，植被覆盖度较高，可减少雨滴直接击打地表土层，减弱雨滴动能，减少溅蚀发生和地表径流产生，减沙效果明显。坡耕地人为扰动地表土壤，破坏土壤结构，且植被覆盖度较低，导致坡耕地径流小区表层土壤裸露于地表，降水直接击打裸露地表，地表径流产生频率较高，泥沙量增加，水土流失加剧。水土保持林和经济林减沙功

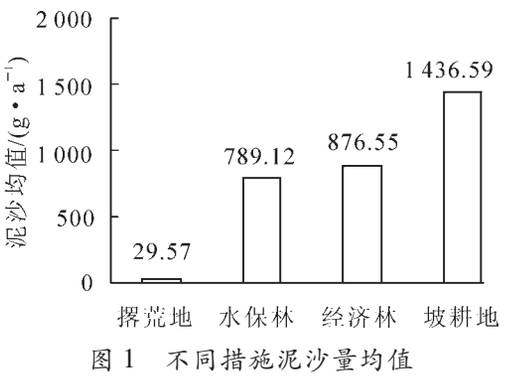

图 1　不同措施泥沙量均值

Figure 1　Average of sediment yield in different measures

表 2 2010–2012 不同措施径流小区产沙量

Table 2 Different measures of runoff sediment yield from 2010 to 2012

侵蚀性降水日期	产沙量/g			
	水土保持林	经济林	坡耕地	撂荒地
2010-06-11	1 601.23	805.30	4 322.55	0.00
2010-06-17	1 569.58	763.95	4 680.83	359.00
2010-06-25	1 885.99	982.79	4 786.53	0.00
2010-06-29	312.05	272.40	1 339.93	169.30
2010-07-20	1 229.83	722.27	3 851.45	0.00
2010-07-21	423.40	238.20	1 260.89	0.00
2010-08-08	1 382.13	396.50	3 160.25	0.00
2010-08-15	354.38	285.80	412.11	0.00
2010-09-07	795.38	826.37	1 106.88	0.00
2010-09-11	181.00	100.00	572.98	189.00
2010-09-28	122.80	87.75	310.50	0.00
2010-09-29	1 028.85	868.00	457.25	0.00
2011-05-11	1 091.43	961.00	377.25	0.00
2011-05-22	4 241.25	6 228.75	3 881.50	0.00
2011-06-05	1 546.88	1 398.00	1 044.75	0.00
2011-06-18	757.45	4 623.55	2 177.01	0.00
2011-06-21	352.38	747.37	2 129.46	0.00
2011-10-02	1 079.52	1 323.59	1 816.18	0.00
2011-10-06	244.13	329.86	254.16	0.00
2011-11-03	263.94	274.20	327.88	0.00
2012-05-14	248.15	369.67	340.00	0.00
2012-05-19	216.48	397.30	299.64	0.00
2012-05-23	318.62	481.41	530.79	0.00
2012-05-27	395.72	298.35	278.41	0.00
2012-06-07	237.33	321.55	368.05	0.00
2012-06-10	333.96	401.45	261.86	0.00
2012-06-22	192.66	324.04	300.64	0.00
2012-07-16	173.87	361.03	355.69	0.00
2012-08-21	396.75	356.50	1 131.90	0.00
2012-09-13	696.41	749.41	971.36	169.75

能相似，水土保持林与经济林树种正处于生长期，水土保持效益还没有完全发挥。与撂荒地相比，其根系还没有真正发挥改良固结土壤的作用；植被覆盖度也不高、枯枝落叶层较薄、植被的截留作用较差，因而容易形成地表径流产生水土流失；但与坡耕地相比，水土保持林与经济林对降水有一定的拦截作用，树木根系对土壤也有一定的固结作用[13]，能够改善土壤结构，发挥植被保水土保持土功能，减轻水土流失。总体而言不同措施减沙功能为撂荒地＞水土保持林＞经济林＞坡耕地。

由图 2 可知：侵蚀性降水在 31.3 mm 以下时，不同植被措施下的产沙量变化幅度较小，不同植被措施下的产沙量相差较小，产沙量也较少。降水量大于 31.3 mm 时，除了撂荒地以外，其他措施类型的产沙量变化幅度较大，坡耕地对侵蚀性降水量的变化较为敏感，变化幅度最大；经济林和水土保持林变化幅度较小，且变化差异较小。总体上，不同的植被措施产沙量对侵蚀性降水量的变化程度不一样，而同一次侵蚀性降水量下，坡耕地产沙量相对于水土保持林、经济林、撂荒地变化最大；撂荒地产生水土流失次数较少。不同植被类型产沙量都有随侵蚀性降水量增大而增大的趋势，因每一个径流小区影响产沙的因素复杂，不同场次的侵蚀性降水所产沙量呈阶梯性增长不明显。随着侵蚀性降水量的增加，4 种不同植被类型的产沙量变化趋势一致，这与年际气候环境，每一场侵蚀性降水有很大的关系，也可得出野外径流小区监测法与室内模拟侵蚀性降水产沙规律有一定的差距。在室内设计模拟水土流失实验时，应

考虑实际情况，尽量与实际环境，地形地貌、气候、人为条件一致，增加实验的真实性。

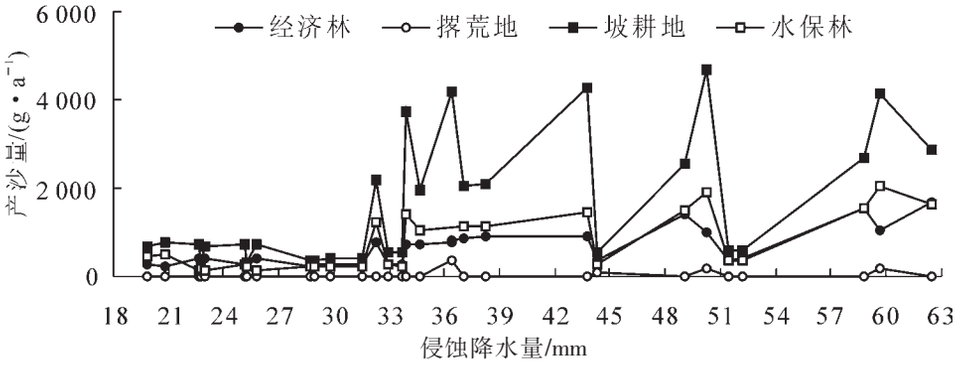

图 2　侵蚀性降水量径流小区泥沙产量

Figure 2　Erosive rainfall runoff sediment yield

贵州省“天无三日晴，地无三里平”。贵州省降水历时较长，降水多，雨量大，常为绵绵细雨，侵蚀性降水少。王万中等[14]对全国各地区的降水径流资料进行综合分析之后，得出中国降水侵蚀力指标采用 EI_{30}(E 为降水动能；I_{30} 为最大 30 min 雨强)相对最好。结合贵州气候和水文资料，I_{30} 与产沙量的关系更符合实际。由图 3 可知：I_{30} 在 18 mm·h^{-1} 以下时，不同植被类型下的产沙量较小，变化幅度较小，几乎不变化；不同植被类型之间产沙量差异较小，随着 I_{30} 的增大而产沙量几乎不变。I_{30} 在 18 mm·h^{-1} 以上时，不同植被类型(除撂荒地)随着 I_{30} 的增大而增大，且变化幅度较大，坡耕地最为敏感。总体而言，产沙量随着 I_{30} 的增加而增大，不同植被类型(除撂荒地)的变化趋势基本一致。因每次降水的地面情况复杂，年际气候条件的不同，产沙量随 I_{30} 的增加而增大线性关系不明显，同时得出侵蚀性降水量与 I_{30} 对产沙量的影响趋势基本一致，说明侵蚀性降水量与最大 30 min 雨强对水土流失都有密切的关系，也证明了王万中等的研究。撂荒地几乎都没有产生水土流失，说明撂荒地的水土保持效果最好，坡耕地最差。

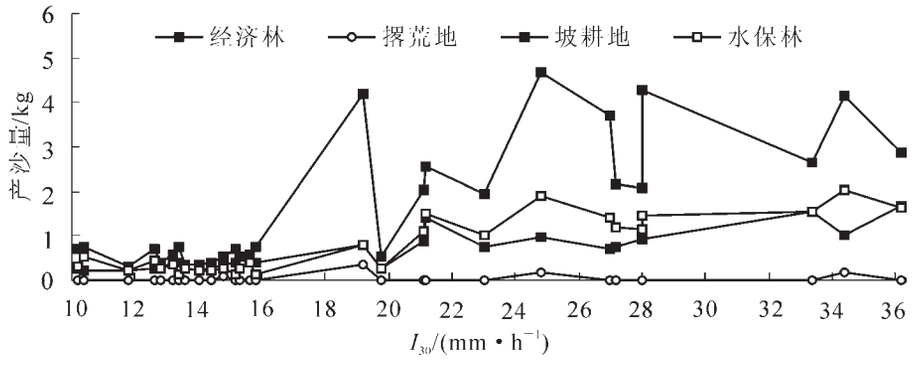

图 3　最大 30 min 雨强径流小区泥沙产量

Figure 3　I_{30} runoff sediment yield

利用 SPSS 软件对 2010–2011 年不同措施侵蚀性降水径流小区产沙量进行差异性分析。多重比较(表 3)结果表明：不同措施之间泥沙流失量存在差异性。水土保持林与经济林差异不显著(P=0.754＞0.05)，与坡耕地差异显著(P=0.022＜0.05)，与撂荒地差异显著(P=0.008＜0.05)；经济林与坡耕地差异显著(P=0.046＜0.05)，撂荒地差异显著(P=0.003＜0.05)；坡耕地与撂荒地差异显著(P=0.000＜0.05)。由此看出：水土保持林和经济林的侵蚀性降水产沙量没有明显的差别，减沙功能相近，在防治水土流失工程中，可以优先选择经济林，既可以达到生态效益，又可以获取经济效益。经济林与坡耕地、撂荒地的侵蚀性降水产沙量有明显的差别，减沙功能有差异，坡耕地减沙功能最弱，容易造成水土流失；撂荒地减沙功能最强，水土保持功能较好，因此，建议坡耕地应尽量退耕免耕，逐渐恢复植被，发挥水土保持功能，减少水土流失。坡耕地与水土保持林、撂荒地的侵蚀性降水产沙量有明显的差别，减沙功能有

差异。撂荒地与经济林的侵蚀性降水产沙量有明显的差别，减沙功能有差异。由此可见：坡耕地产沙量最多，也是泥沙来源的主要土地利用类型之一，而且坡耕地农业产量不高，经济效率不高，收入低。因此，可以通过退耕还林、退耕还草的方式减少泥沙量，同时改变传统经济模式，在坡耕地上种植经济树种，既可以增加经济收益，提高农民的经济收入，也可以减少水土流失达到双赢的目的。

表 3 侵蚀性降水水土流失多重比较结果

Table 3 Multiple comparsions of erosive rainfall

植被措施(I)	植被措施(J)	均值差值(x_I–x_J)	标准误差	显著性
水土保持林	经济林	–87.429 0	278.052 6	0.754
	坡耕地	–647.837 5*	278.052 6	0.022
	撂荒地	758.528 4*	280.439 4	0.008
经济林	水土保持林	87.429 0	278.052 6	0.754
	坡耕地	–560.408 5*	278.052 6	0.046
	撂荒地	845.957 4*	280.439 4	0.003
坡耕地	水土保持林	647.837 5*	278.052 6	0.022
	经济林	560.408 5*	278.052 6	0.046
	撂荒地	1406.365 9*	280.439 4	0.000
撂荒地	水土保持林	–758.528 4*	280.439 4	0.008
	经济林	–845.957 4*	280.439 4	0.003
	坡耕地	–1 406.365 9*	280.439 4	0.000

说明：* 表示在 0.05 水平(单侧)上显著相关。

5 结论与讨论

5.1 结论

水土保持林、经济林、坡耕地、撂荒地这 4 种不同措施下，撂荒地的减沙功能优于水土保持林、经济林、坡耕地。总体而言不同措施的减沙功能从大到小依次为撂荒地＞水土保持林＞经济林＞坡耕地。

不同的植被措施的产沙量对侵蚀性降水量的变化程度不一样。不同植被类型产沙量都随侵蚀性降水量增大而增大，不同场次的侵蚀性降水所产沙量增长不明显。总体可以看到同一次侵蚀性降水量下，坡耕地产沙量相对于水土保持林、经济林、撂荒地变化较大，而撂荒地很多次都没有产生水土流失。这也表现出撂荒地的减沙功能优于水土保持林、经济林、坡耕地，而坡耕地的减沙功能低于经济林、水土保持林。

不同植被措施下的产沙量对 I_{30} 的变化程度不相同。总体而言，产沙量随着 I_{30} 的变大而变大，每次降水下地面情况复杂，年际气候条件不同，产沙量随 I_{30} 的增加而增大，线性关系不明显。撂荒地几乎都没有产生水土流失，说明撂荒地的水土保持效果最好，最差为坡耕地。

5.2 讨论

本研究在自然条件下的径流小区中进行，反映了真实的自然环境，为喀斯特小流域的治理提供一定的理论依据。本研究的结论适用于典型喀斯特小流域不同植被类型的减沙效果研究。本试验中的撂荒地退耕年限较长，植被覆盖度较高，能起到很好的减沙效果；经济林与水土保持林减沙效果的体现，与哪些因素直接相关还有待下一步研究，因素之间怎样最优配置才能达到最佳水土保持功能也待研究。

西南喀斯特地区与黄土高原地区植被减沙功能研究[15–20]对比可知：黄土高原地区研究内容全面且丰富，且定量研究较多，而喀斯特地区研究得出结论单一，定性研究较多；黄土高原区植被可以减少结皮现象的发生，而喀斯特基本上没有结皮现象；黄土高原研究尺度较全，而喀斯特地区研究尺度小；两者都得出植被类型不同蓄水减沙效益不同，覆盖度极显著地影响产沙量的结论；撂荒随年限延长，蓄水减沙功能明显增强。因此，在以后的研究中，应该以小流域为单元进行大尺度的产沙定量研究，同时丰富研究内容，研究不同因素对产沙产生的影响。

本次试验由于受地形和实际条件的限制，径流小区每种类型没有设置重复。实测资料只有 3 a，数据量不够，观察时间序较短。不同类型植被措施下的减沙功能，是否与树种、栽植密度、栽植方式有

关？还应增加不同植被类型下的重复来进一步深入研究。本研究方法采用传统的研究方法，无法提供长时期土壤侵蚀数据。下一步应该尝试在喀斯特区采用新型监测手段(如测针法、放射性核素示踪法、模型估算等)，对泥沙的流失和运移过程进行监测。研究的尺度较小，无法宏观掌控整个流域的水土流失情况，应该扩大研究尺度，掌握喀斯特区水土流失动态。

6　参考文献

[1] 张殿发，王世杰，李瑞玲. 贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究[J]. 地理学与国土研究，2002，**18**(1)：77 – 79.
ZHANG Dianfa, WANG Shijie, LI Ruiling. Study on the eco-environmental vulnerability in Guizhou Karst Mountains [J]. *Geogr Territ Res*, 2002, **18**(1): 77 – 79.

[2] 张玉华，韩凤翔. 长江流域水土流失类型分区及防治对策探讨[J]. 人民长江，2013，**44**(10)：105 – 108.
ZHANG Yuhua, HAN Fengxiang. Type partition and control measures of soil and water loss of Yangtze River Basin [J]. *Yangtze River*, 2013, **44**(10): 105 – 108.

[3] 邓辉，何政伟，陈晔，等. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的山地环境水土流失空间特征定量分析：以四川泸定县为例[J]. 地球与环境，2013，**41**(6)：669 – 679.
DENG Hui, HE Zhengwei, CHEN Ye, *et al*. The spatial features of soil erosion in mountain environment based on GIS and RUSLE: a case study in Sichuan Luding [J]. *Earth Environ*, 2013, **41**(6): 669 – 679.

[4] 蒋荣，张兴奇，张科利，等. 喀斯特地区不同林草植被的减流减沙作用[J]. 水土保持通报，2013，**33**(1)：18 – 22.
JIANG Rong, ZHANG Xingqi, ZHANG Keli, *et al*. Runoff and sediment reduction effects under different forest and grass vegetation in a karst area [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2013, **33**(1): 18 – 22.

[5] BERTOL I, SCHICK J, BANDEIRA D H, *et al*. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: a case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil [J]. *Geoderma*, 2016, **281**: 116 – 125.

[6] 郑建，张军以，邓广山. 贵州喀斯特山区农村可持续发展模式初探[J]. 广东农业科学，2013，**40**(19)：222 – 224.
ZHENG Jian, ZHANG Junyi, DENG Guangshan. Sustainable development model of rural area in Guizhou karst mountainous area [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2013, **40**(19): 222 – 224.

[7] 伍应德. 基于生态环境的贵州喀斯特山区现代农业发展模式探讨[J]. 贵州农业科学，2013，**41**(8)：246 – 249.
WU Yingde. Discussion on modern agriculture development pattern in Guizhou karst mountainous area based on ecotope [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2013, **41**(8): 246 – 249.

[8] 刘洋. 喀斯特石漠化地区的水土流失与水土保持[J]. 科教导刊(电子版)，2013(12)：158.
LIU Yang. Rocky desertification of soil and water loss and conservation in karst areas [J]. *Guide Sci Educ*, 2013(12): 158.

[9] 周素萍，张兴奇，张科利，等. 贵州喀斯特地区不同生物措施的水土保持效果[J]. 贵州农业科学，2011，**39**(4)：117 – 120.
ZHOU Suping, ZHANG Xingqi, ZHANG Keli, *et al*. Effect of different biological measures on soil and water conservation in karst areas of Guizhou Province [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2011, **39**(4): 117 – 120.

[10] 胡顺光. 贵州喀斯特区小流域尺度生态治理的水土流失机制研究[D]. 贵阳：贵州师范大学，2008.
HU Shunguang. *Study on Water and Soil Loss Mechanism of the Ecological Rehabilitation Based on Small Watershed Scale in Guizhou Karst Region* [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2008.

[11] 纪启芳. 贵州喀斯特地区坡面不同植被的减流减沙作用[D]. 南京：南京大学，2013.
JI Qifang. *Effects of Vegetation Cover on Runoff and Sediment Reduction on Slop Land in Karst Areas of Guizhou Province* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.

[12] 刘凤仙. 贵州喀斯特地区林草措施对水土流失的影响[J]. 中国水土保持，2007(12)：38 – 39.
LIU Fengxian. Influence of tree and grass measures used in karst region of Guizhou to soil and water loss [J]. *Soil Water Conserv China*, 2007(12): 38 – 39.

[13] 周杰兴，周永江，陈思妤. 城市水土流失成因及防治措施研究[J]. 安徽农业科学，2014，**42**(21)：7169 –

7170，7174.
ZHOU Jiexing, ZHOU Yongjiang, CHEN Siyu. Study on causes and control measures of urban soil and water losses [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, **42**(21): 7169 – 7170, 7174.

[14] 王万中，焦菊英，郝小品，等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(Ⅰ)[J]. 水土保持学报，1995, **9**(4)：5 – 18.
WANG Wanzhong, JIAO Juying, HAO Xiaopin, *et al*. Study on rainfall erosivity in China [J]. *J Soil Water Conserv*, 1995, **9**(4): 5 – 18.

[15] 侯喜禄，曹清玉. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究[J]. 水土保持通报，1990，**10**(2)：33 – 40.
HOU Xilu, CAO Qingyu. Study on the benefits of plants to reduce sediment in the loess rolling gullied region of north Shaanxi [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 1990, **10**(2): 33 – 40.

[16] 严方晨，焦菊英，曹斌挺，等. 黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性：以坊塌流域为例[J]. 应用生态学报，2016，**27**(1)：64 – 72.
YAN Fangchen, JIAO Juying, CAO Binting, *et al*. Soil anti-erodibility of abandoned lands during different succession stages of plant community in hilly-gullied region of the Loess Plateau: take Fangta small watershed as an example [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(1): 64 – 72.

[17] 刘晓燕，杨胜天，金双彦，等. 黄土丘陵沟壑区大空间尺度林草植被减沙计算方法研究[J]. 水利学报，2014，**45**(2)：135 – 141.
LIU Xiaoyan, YANG Shengtian, JIN Shuangyan, *et al*. The method to evaluate the sediment reduction from forest and grass land over large area in the loess hilly area [J]. *J Hydraul Eng*, 2014, **45**(2): 135 – 141.

[18] 徐佳，刘普灵，邓瑞芬，等. 黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究[J]. 地理科学，2012，**32**(11)：1391 – 1396.
XU Jia, LIU Puling, DENG Ruifen, *et al*. Runoff and sediment reductions in the different stages of vegetation restoration on a loess slope [J]. *Sci Geogr Sinica*, 2012, **32**(11): 1391 – 1396.

[19] 赵跃中，穆兴民，严宝文，等. 黄土高原不同生长年限植被减水减沙效益整合分析[J]. 水土保持通报，2015，**35**(3)：6 – 11.
ZHAO Yuezhong, MU Xingmin, YAN Baowen, *et al*. Meta-analysis on runoff and sediment reductions of re-vegetation with different planting years on Loess Plateau [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2015, **35**(3): 6 – 11.

[20] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J]. 资源科学，2006，**28**(1)：93 – 100.
RAN Dachuan. Water and sediment variation and ecological protection measures in the middle reach of the Yellow River [J]. *Resour Sci*, 2006, **28**(1): 93 – 100.