

黄土区森林植被对不同尺度坡地产流产沙的影响分析

王海龙¹, 秦富仓^{1,2}, 余新晓¹, 鲁绍伟¹

(1. 教育部水土保持与荒漠化重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 内蒙古农业大学, 呼和浩特 010019)

摘要:为进一步探讨森林植被对流域坡地不同尺度降雨产流产沙的影响, 为黄土区植被建设提供理论依据, 对蔡家川流域坡面径流小区和试验小流域降雨产流产沙进行了测定和分析。结果表明, 坡面自然更新的次生林和虎榛子灌木林较人工林有更好的涵养水源、保持水土功能; 通过灰色关联分析, 林分郁闭度和草本、枯落物生物量对坡面产流产沙影响显著。在对嵌套流域聚类分析的基础上, 相似地形地貌的子流域, 少林流域比多林流域的雨季径流深和径流系数高 2.7~2.9 倍, 且前者暴雨径流输沙量是后者 3~6 倍。

关键词: 植被; 产流产沙; 黄土区

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0182-04

Effect of Forest Vegetation on Runoff and Sediment Production in Sloping Lands at Different Scales of Loess Area

WANG Hai-long¹, QIN Fu-cang^{1,2}, YU Xin-xiao¹, LU Shao-wei¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China)

Abstract: In order to study deeply the relationship between vegetation and runoff and sediment production in sloping lands at different scales, and to provide theoretical basis for vegetation re-construction of loess area, the runoff and sediment production were observed and analyzed which produced in runoff plots of sloping lands and testing catchment in Caijiachuan watershed which lies in Jixian county of Shanxi Province in Loess area. The results showed: 1) the natural-secondary forest and *Ostryopsis davidiana* forest had better function of soil and water conservation than man-made *Robinia pseudoacacia* forest. 2) Based on gray correlation analysis to kinds of factors affecting runoff and sediment production in sloping land, the factors of stand canopy density and herb and litter biomass were the most significant ones. 3) Forested watershed and rangeland watershed with similar terrain and topographical features were selected by using the method of cluster analysis to nesting Caijiachuan watershed. It clarified that runoff depth and runoff coefficient of less forest watershed were 2.7~2.9-fold as much as those of more forest watershed. And sediment yield produced from less forest watershed by storm was 2~5-fold than those from more forest watershed.

Key words: vegetation; runoff and sediment production; loess area

1 引言

黄土高原沟壑纵横, 土体表层结构疏松易蚀, 水土流失十分严重。改善黄土区现有环境的主要方式是提高植被覆盖度。森林植被可以改良土壤涵养水源、防止水土流失。而森林植被对水文循环和侵蚀泥沙的影响具有尺度相关性。关于流域在不同尺度上的径流和侵蚀产沙, 国内已作过很多研究^[1~4]。陈军锋依据水力重力侵蚀的空间变化, 研究了小流域产沙方式的垂直分带规律^[1]; 蔡强国、肖培青、丁文峰等人^[5~7]对于坡面径流对坡面、沟谷侵蚀的影响作了大量研究。森林植被与流域径流过程的关系错综复杂^[8,9]。黄明斌等从森林流域年径流变率小、枯水季节仍有部分径流量的角度, 推断黄土高原森林植被具有很好的调洪补枯作用, 并对黄土高原森林植被对流域径流的调节作用作了定量描述^[10,11]。

为了进一步探讨森林植被与流域不同尺度的径流和侵蚀产沙之间的关系, 为黄土区天然林保护工程和防护林体系建设工程提供理论依据, 本文以黄土高原山西省西部的吉县蔡家川嵌套流域为例, 分析了径流小区尺度植被对产流产沙的影响, 并在流域地形地貌特征相似性分析及类型划分的基础上, 分析研究了流域尺度森林植被覆盖率对相似地形地貌特征流域径流及其过程的影响作用。

2 研究区概况及研究方法

2.1 试验区概况

研究区为山西省吉县蔡家川嵌套流域, 位于黄土高原西南部, 地理坐标为北纬 35°53'~36°21', 东经 110°27'~111°07'。年平均降水量为 579.5 mm, 集中于 7~9 月。属于暖温带、半湿润地区, 为落叶阔叶林与森林草原地带。土壤类型为褐土、沙壤。流域中上游植被类型主要为白桦 (*Betula*

* 收稿日期: 2006-07-02

基金项目: 国家重大技术研究计划 973 课题 (2002CB111502)

作者简介: 王海龙 (1965-), 男, 黑龙江省佳木斯人, 博士研究生, 研究方向为水土保持。

platyphylla)、山杨 (*Populus davidian*)、丁香 (*Syringa oblata*)、虎榛子 (*Ostryopsi s davidiana*) 等组成的天然次生林,中游为刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 等树种组成的人工林及天然草本植被,以及山杨、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、绣线菊 (*Spirean thunbergii*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*) 等组成的天然次生灌草植被。

蔡家川嵌套流域总面积为 40.10 km²,其主沟道为义亭河的一级支流,义亭河为黄河一级支流的昕水河支流,流域大体上为由西向东走向,流域长约 12.15 km,流域形状及各支流分布见图 1。蔡家川嵌套流域主沟道及其部分支沟有常流水。

2.2 研究方法

2.2.1 降雨量的测定

在流域的空旷地布设 8 台翻斗式自计雨量计(图 1),常年观测记录降雨量和降雨过程。

2.2.2 产沙、产流量的量取

坡面尺度侵蚀产沙和产流量采用径流小区法。设置了 7 个坡面径流小区作为对照(表 1)。

2.2.3 流域径流的测定

在 6 个小流域的出口和蔡家川嵌套流域主沟分别修建

布设了 7 个量水堰,各个量水堰的测水断面由三角形和矩形断面复合而成,降雨洪水径流量及其过程采用日产水研 62 型自计水位计记录水位,以水位-流量公式换算得出流域洪水径流量及洪水过程。

2.2.4 流域地形地貌特征及土地利用现状和林分类型调查

流域地形地貌特征和土地利用状况是根据地形图、航片判读及实地调查和计算得出,林分结构类型根据实测资料得出。各支沟及主沟的地形地貌特征和量水堰编号见表 2。

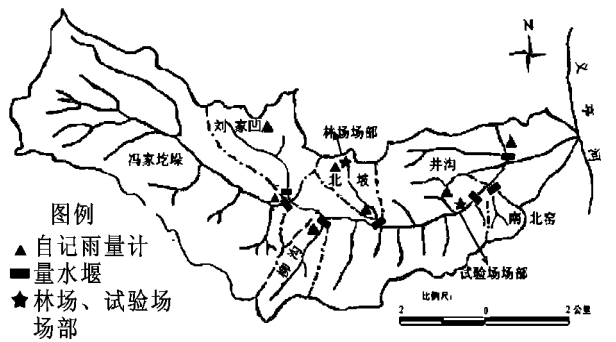


图 1 蔡家川嵌套流域主沟及其支沟分布和量水堰布设图

表 1 径流小区基本情况

小区 编号	林分 类型	主要 植被	面积	整地 方式	坡度 / °	坡向	林龄 / a	平均树 高/ m	平均胸 径/ cm	郁闭度 / %	草本盖 度/ %	密度 / hm ²	土壤容重 / (g · cm ⁻³)	土壤孔 隙/ %
1	刺槐 1	刺槐	20 × 5	水平阶	25 °	S	14	5.17	4.31	74	85	2204	1.02	48.5
2	刺槐 2	刺槐	20 × 5		23 °	NE20 °	14	6.68	7.55	60	73	1200	1.17	48.6
3	果农	苹果、谷子	20 × 10	-	20 °	W	12	3.5	-	-	-	600	-	-
4	果园	苹果	20 × 10	水平带	25 °	-	12	3.1	-	-	-	516	-	-
5	虎榛子	虎榛子	20 × 5	水平阶	23 °	WN38 °	-	2.1	-	95	60	3700	-	-
6	油松	油松	20 × 5		25 °	N	12	2.51	3.78	70	20	1800	1.18	53.7
7	天然次生林	山杨、油松、虎榛子、绣线菊和黄刺玫	20 × 5		23 °	NE32 °	-	-	-	100	100	-	1.08	49.7

注: 1. 水平阶带宽 1.5 m, 果园果树水平带宽 5 m, 似窄条水平梯田。
2. 果农果树带, 在 2002 年前带宽 2 m, 农作物耕作带坡度为 25 °, 坡长平均为 5 m; 2003 年高质量整地后, 果带宽 3.5 m, 农作物耕作带坡长为 3 m。

表 2 蔡家川嵌套流域主沟及其支沟的地形地貌特征

编号	流域 名称	流域面积 / km ²	流域长度 / km	流域宽度 / km	形状 系数	河网 密度	河流 比降
1	南北窑	0.7097	1.38	0.5420	0.3928	1.81	0.0870
2	蔡家川主沟	34.233	14.50	1.2543	0.1628	1.53	0.0194
3	北 坡	1.5029	2.18	0.7190	0.3298	3.00	0.1211
4	柳 沟	1.9327	3.00	0.6825	0.2275	4.10	0.0843
5	刘家凹	3.6173	3.30	1.0962	0.3322	0.91	0.0889
6	冯家圪垛	18.565	7.25	2.6700	0.3683	25.9	0.0705
7	井 沟	2.625	2.88	0.9130	0.3170	1.09	0.1219

3 结果与分析

3.1 坡面尺度植被对降雨径流和侵蚀产沙的影响

3.1.1 不同土地利用类型径流小区的产流量与产沙量

试验区降雨主要集中在 7 ~ 9 月份, 因此利用 2002 ~ 2003 年 7 ~ 9 月份不同土地利用类型的径流小区降雨产流产沙量的均值进行对比分析, 见图 2。

如图所示, 虎榛子灌木林和天然次生林, 场降雨径流量和泥沙产量都较其他林分少, 若以虎榛子灌木林的产流、产沙各为 1, 则天然次生林分别为 1.34 和 0.57, 刺槐 1 分别为 4.54 和 2.05, 油松林 5.98 和 4.49, 果农复合经营模式 17.14 和 3.96。

显然场降雨产流产沙量与林分的盖度和枯落物的厚度有关。如自然更新的次生林, 林分郁闭度为 1, 林下枯枝落叶丰富, 这不但可及截留降水, 而且可削弱到达地面的雨滴动能, 所以产流量和产沙量较小。而果农复合经营模式, 果树带虽整为水平阶, 但由于作物带为坡地, 由于侵蚀土体向下运移, 已形成连续坡面; 且果树栽植密度小, 林下无落叶、杂草, 所以在侵蚀性降雨, 特别是遇暴雨下, 入渗量少, 极易形成径流。与果农复合经营模式相似的果园, 有比较较好的拦蓄径流泥沙的作用, 是因为果园的果树带整地为水平带, 带宽 5 m, 似水平梯田, 带间坡地虽有产流, 但在果树带入渗, 不易形成径流。

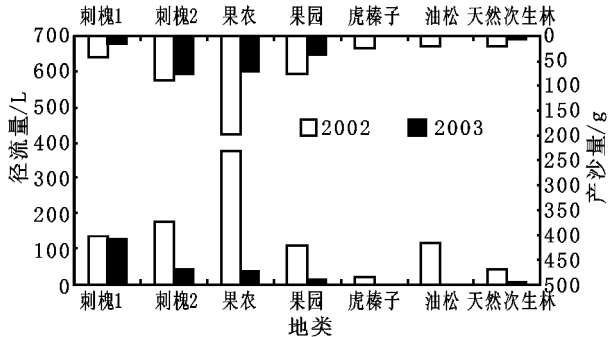


图 2 坡面径流小区不同土地利用类型产流产沙对照

比较果农复合经营模式在两年的平均场降雨产流产沙量发现,2003 年较 2002 年明显减少,其中原因在于果农复合经营模式整地质量不同(见表 1)。因此果农配置时,应以果树带为主,高质量大工程整地,这样就可起到保持水土,增加收入的双重功能。

3.1.2 影响坡面林分产流产沙的主导因子判析

影响各径流小区产流产沙量的因子除降水因子外,地形

表 3 影响坡面产流产沙的各因子灰色关联度值

母系列		子系列						
产流量 /(l·m ⁻²)	产沙量 /(g·m ⁻²)	坡度 /°	坡向	密度 (tree/hm ²)	郁闭度	草本盖度 /%	草本生物量 /(g·m ⁻²)	枯落物生物 量/(g·m ⁻²)
灰色关联度 (ij)								
产流量/(l·m ⁻²)		0.555	0.571	0.609	0.639	0.629	0.565	0.639
产沙量/(g·m ⁻²)		0.416	0.401	0.452	0.531	0.548	0.786	0.693

灰色关联度值越大,说明比较数列对参考数列影响最大。对于产流量,影响因子参数的灰色关联度大小依次为:枯落物生物量(林分郁闭度)>灌草层盖度>林分密度>坡向>草本生物量>坡度。对于产沙量,草本生物量>枯落物生物量>灌草层盖度>林分郁闭度>林分密度>坡度>坡向。

从此结果可看出,各影响因子对坡面产流和产沙的影响程度并不一致,对产流影响最大的是枯落物生物量和林分郁闭度,对产沙影响最大的是草本生物量;而坡向因子通过影响林地土壤水分而影响各林分结构因子,所以对坡面产流有重要相关性;在此分析的坡度的影响作用,并不与前人所得结论相悖,因此分析数据中各径流小区坡度值相差不大而对坡度较差。林分密度、灌草层盖度、草本和枯落物生物量等影响因子,无论对坡面产流还是产沙,其灰色关联度都大于 0.5,说明这些因子对坡面林分的水保功能影响都很大。多层次的混交林因有较高的灌草层盖度、草本和枯落物生物量,因此有较强的水保功能,这与许多研究结论是一致的^[12,13]。

3.2 流域尺度森林植被影响径流和输沙分析

3.2.1 流域地形地貌相似性分类的聚类分析

流域地形地貌特征是影响流域径流量、径流过程以及暴雨输沙的主要因素之一。现通过聚类分析来剔除流域地形地貌的影响。见表 2,选取对流域地形地貌特征起主导作用的因子如流域面积、流域长度、流域宽度、流域形状系数、河道比降、河网密度作为聚类分析的指标体系,运用 Matlab 软件对嵌套流域地形地貌相似性进行分类,结果见图 3。

聚类评价效果 $cophenet(z,y) = 0.9954$,说明该分类效果很好。取阈值为 2.5 时,刘家凹和井沟流域为一类,南北窑、北坡、柳沟 3 个流域为一类。因此,刘家凹与井沟流域在流域地貌特征条件方面最具相似性,可讨论分析流域不同土地利用及森林分布特征和林分类型对流域径流可输沙的影响。

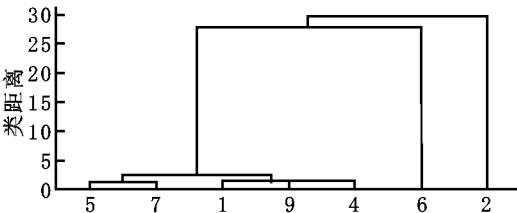


图 3 流域地貌地形特征系统聚类图

3.2.2 多林流域和少林流域的雨季径流对比分析

表 4 为刘家凹和井沟的雨季径流观测结果(包括基流量和洪峰径流量),由于刘家凹流域的森林覆盖率达 82.7%,属于典型的森林流域,径流深与径流系数均很小。大部分降水在森林植被的作用下贮藏于土壤之中,以土壤水或地下水的

因子和林分结构因子也在起着作用,且各影响因子之间又相互关联。现剔除降水因子的影响,选取不同林分的产流量和产沙量分别作为母因素集,以坡度、坡向、林分密度、林分郁闭度、灌草层盖度、草本生物量和枯落物生物量等 7 个因子为子因素集,以不同土地利用类型的径流小区在 2002~2003 年降雨产流产沙的实测数据进行灰色关联度分析,见表 3。

形式存在。而井沟流域为半农半牧小流域,森林植被覆盖率仅 15.2%,人为活动频繁,流域内受牛羊等牲畜的践踏较为强烈,天然草地退化严重,地表裸露无保护,所以产流量较大,雨季流域径流深和径流系数为刘家凹流域的 2.7~2.9 倍。这表明在小流域中,森林植被具有减少流域径流总量的作用。

表 4 不同森林覆盖率的小流域径流观测结果

观测年限	流域名称	森林覆盖率/%	降雨总量 /mm	径流总量 /m ³	径流深 /mm	径流系数 /%
2001-06-28~10-14	刘家凹	82.7	368.75	21398.53	5.9	1.6
	井沟	15.2	367.39	44321.78	16.9	4.6
2002-06-24~10-20	刘家凹	82.7	366.7	19847.78	5.5	1.5
	井沟	15.2	343.18	39587.98	15.1	4.1

3.2.3 多林流域和少林流域暴雨径流输沙对比分析

暴雨是引起流域沟道产洪的主要原因,黄土区的蔡家川嵌套流域,沟道输沙主要以悬移质为主。以刘家凹(5 号)流域和井沟(7 号)流域为对比流域,以 2003 年各沟道产洪的两场暴雨为例,见图 4、图 5,两流域沟道从第一次出现洪峰到洪峰开始降落时段内输沙量随时间的过程线。

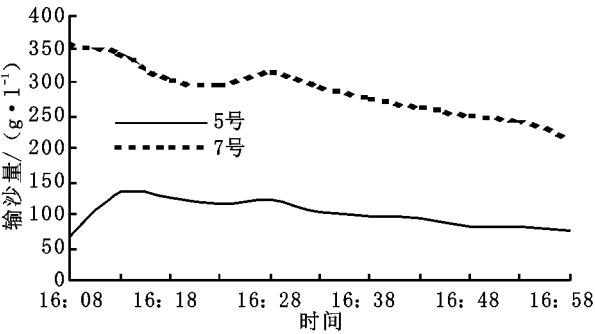


图 4 2003 年 4 月 17 日径流输沙过程线

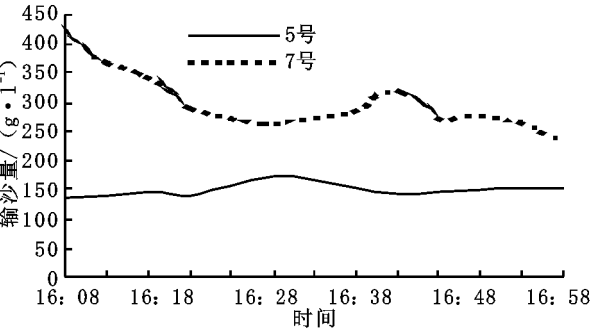


图 5 2003 年 4 月 17 日洪水过程线

图 4 是 2003 年 4 月 17 号的输沙过程线,降雨时段为

16:02~18:30,降雨量42 mm。从图中可看出,刘家凹(5号)流域在降雨11 min后即16:13出现峰值,随之开始降落。而井沟(7号)流域沟道出现峰值时间比前者提前至少5 min,且输沙过程线变化没后者平缓。图5为2003年8月25日12:15至8月26日18:30的径流输沙过程线,此次降雨量为276 mm,观测时间从26日10:10开始,显然井沟支沟输沙量峰值的出现要远早于刘家凹支沟。另外,井沟支沟径流输沙量显著高于刘家凹支沟输沙量,以最大峰值处的径流输沙量值为例,后者约是前者的3~6倍,因此,森林植被可大大降低暴雨坡面产沙量。

可见,在流域尺度上,植被对减少坡面产流产沙的作用是巨大的。在雨季径流深和径流系数上,森林流域较无林流域减少80%~95%,多林流域较少林流域减少60%~70%。同时植被可以减少降雨土壤侵蚀量,阻延径流,消减径流输沙量。

4 结论与讨论

(1)坡面径流小区尺度上,不同土地利用类型的小区场

参考文献:

- [1] 陈军锋,裴铁璠,陶向新. 河流两侧坡面非对称采伐森林对流域暴雨-径流过程的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 210-214.
- [2] 余新晓,秦永胜. 森林植被对坡地不同空间尺度侵蚀产沙影响分析[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 66-69.
- [3] 欧阳惠. 渭水流域森林和降水量的变化对径流及泥沙影响分析和GM模型[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 805-808.
- [4] 魏天兴. 黄土区小流域侵蚀泥沙来源与植被防止侵蚀作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 19-26.
- [5] 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀产沙时空分布规律试验研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 19-23.
- [6] 刘前进,蔡强国. 黄土区不同空间尺度土壤侵蚀预报模型研究[J]. 中国水土保持, 2004, (7): 13-16.
- [7] 肖培青,郑粉莉,史学建. 黄土坡面侵蚀垂直分带性及其侵蚀产沙研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 46-48.
- [8] Troendle C A. The effects of small clear cuts on water yield from the Deadhorse Watershed, Fraser, Colorado, USA [M]. Colorado State University, 1982. 75-83.
- [9] 王礼先. 森林水文研究进展[M]. 北京林业大学出版社, 1990.
- [10] 黄明斌,刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用[J]. 应用生态学报, 2002, 3(9): 1057-1060.
- [11] 黄明斌,康绍忠,李玉山. 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 411-414.
- [12] 陈云明,侯喜禄,刘文兆. 黄土丘陵半干旱区不同类型植被水土保持生态效益研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 6-9.
- [13] 张晓明,孙中峰,张学培. 晋西黄土残塬沟壑区不同林分对坡面暴雨产流产沙作用分析[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(3): 37-42.

(上接第181页)

合。潜在不稳定块体组合三维空间模式见图4和块体组合模式的赤平投影图所示。从块体分析程序可以快速、简捷对各组合块体的安全系数以及块体宽度、块体高度、块体方量、块体失稳模式、块体滑动方向做出定量的判断。

5 结论与建议

通过建立三维地形模型,并用板状的形式把各软弱结构

参考文献:

- [1] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析-原理、方法、程序[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析-原理、方法、程序[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [3] GB50287-99. 水利水电工程地质勘察规范[S].
- [4] 陈祖煜,弥宏亮,汪小刚. 边坡三维稳定分析的极限平衡法[J]. 岩土工程学报, 2001, (5): 525-529.
- [5] 《中国水力发电工程》编审委员会. 中国水力发电工程. 工程地质卷[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [6] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 1994.

降雨产流产沙差异显著,若以虎榛子灌木林的产流量、产沙量各为1,则天然次生林分别为1.34和0.57,刺槐林4.54和2.05,油松林5.98和4.49,果农复合经营模式17.14和3.96。对于果农复合经营模式,在经过高质量大工程整地后,产流产沙量明显减少,因此对于黄土区为发展区域经济和开展退耕还林还草工程,经营果农复合模式不失明智。

(2)通过对影响坡面植被产流产沙的地形因子和林分结构因子灰色关联分析,林分郁闭度和草本、枯落物生物量影响最显著,其关联度值均大于0.6;坡向、坡度因子对场降雨径流影响显著,灰色关联度值均大于0.5。

(3)流域尺度上森林植被对径流泥沙的影响中,森林植被具有减小流域雨季径流总量的作用,在雨季径流深和径流系数上,多林流域较少林流域减少60%~70%。暴雨径流输沙量,多林流域是少林流域的3~6倍,因此在黄土高原的小流域,人工造林形成的森林植被覆盖度较高的流域,降雨时坡地径流和泥沙被有效地拦蓄,从而使流域雨季径流深、径流系数和径流总量都比较小,暴雨径流输沙过程线较为平缓,输沙量少。

面植入三维模型中,可以清楚看到各软弱结构面在三维空间的展布规律,以及各弱面在三维空间的组合形式及其交切点的坐标,再运用块体分析软件,可以快速定量判定块体的在各种工况下的安全系数以及块体宽度、块体高度、块体方量、块体失稳模式、块体滑动方向。从而指导现场工作人员开挖边坡时遇到边坡失稳或可能存在失稳的迹象时,准确采取处理措施,防止边坡进一步恶化。