

# 植被对不同类型泥石流的抑制作用初探

高延超<sup>1,2,3</sup>, 李明辉<sup>1</sup>, 王东辉<sup>1</sup>, 白永建<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 成都 610081;

2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 通过对比四川省巴塘县的 118 处沟谷泥石流及 33 处坡面泥石流的植被覆盖率, 发现植被对于坡面泥石流具有较好的抑制作用, 但对沟谷泥石流作用则不明显。造成这种差别的原因在于坡面泥石流的物源主要是坡体表面侵蚀, 植被根系组成的网状锚固层可以减缓乃至消除这种侵蚀效应; 沟谷泥石流的物源主要来自沟岸崩塌, 但植被对于中厚层的崩滑体锚固能力差, 当降雨超过一定阈值后即可暴发泥石流。基于这种特点, 建议将生物工程作为坡面泥石流的主要治理手段; 对于沟谷泥石流而言, 既不能将植被覆盖率作为易发程度的判别标准, 也不宜作为综合治理中的主要环节。

**关键词:** 植被; 泥石流; 物源; 四川省巴塘县

**中图分类号:** P642.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2013)05-0291-05

## Effect of Different Types of Vegetation on the Debris Flow Control

GAO Yan-chao<sup>1,2,3</sup>, LI Ming-hui<sup>1</sup>, WANG Dong-hui<sup>1</sup>, BAI Yong-jian<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** There are 118 valley debris flows and 33 slope debris flows in Batang County, Sichuan Province, China. All the vegetation coverage of these hazards has been verified through remote sensing and field investigation. It was found that the vegetation had an effect on the slope debris flow, while there was no correlation between the vegetation and valley debris flows. This difference exists because of the material source in different types of debris flows. The main material source of the slope debris flow results from surface erosion. Vegetation roots can restrain the erosion effect. But, the main sources of valley debris flow are collapses and landslides in the valley. In this case, vegetation does not work because of the deep slip surface in most collapses and landslides. So we suggest that bioengineering should be use for mitigating the slope debris flow. For valley debris flows, the vegetation is neither an active standard nor an approach to mitigation.

**Key words:** vegetation; debris flow; material source; Batang County of Sichuan Province

泥石流是山区常见的地质灾害, 每年均会在世界范围内造成较大的人员伤亡及财产损失。2010 年 8 月 13 日强降雨过程导致汶川地震的极重灾区映秀镇、龙池镇、清平乡集中暴发了大面积泥石流灾害, 损失惨重<sup>[1]</sup>。关于泥石流影响因素的研究有很多, 总体上包括地形、地质、水文三方面, 进而细化到流域面积、补给段长度、岩性因素、主沟纵坡、堵塞程度、构造活动及降雨强度等诸多因素。植被覆盖率作为主要影响因素之一, 20 世纪 70 年代以来有诸多学者对其

进行了定性的研究与描述, 普遍的看法是植被覆盖率与泥石流暴发概率具有负相关性<sup>[2-5]</sup>。在泥石流综合防治体系建设中, 生物工程也是重要手段之一。

柳素清等<sup>[6]</sup>分析了攀西地区频发的泥石流灾害, 认为森林集中砍伐、毁林开荒、陡坡垦殖等在不同程度破坏山地自然环境, 是诱发灾害的主要原因。房明烈<sup>[7]</sup>应用 MSS 图像对成昆铁路北段植被与泥石流的分布规律进行判识, 指出山坡植被茂密或良好时泥石流发生概率低, 植被稀疏或裸露时, 泥石流暴发频率

高。李树德等<sup>[8]</sup>指出森林植被破坏促进了泥石流的暴发与形成,同时森林植被在加强水土保持的同时,对防止泥石流又有重要作用。国家林业局舟曲特大泥石流调研组于2010年阐述了森林植被对泥石流起消减的作用,认为森林植被可以涵养水源、减少地表径流、削减洪峰,同时锚固土体、增强土体的稳定性。

但与此同时,随着近年来泥石流学科研究的不断深入,越来越多的现象表明植被在泥石流形成过程中并非表现出单一的抑制削减作用。在人类活动开始破坏植被之前,泥石流就有过频繁的活动迹象,这些区域至今是泥石流活跃区<sup>[9-10]</sup>。云南东川蒋家沟大凹子、泥得坪、新厂等地发现一些老泥石流的沉积物,属于晚更新世;甘肃白龙江流域老泥石流堆积物形成于中更新世,均远早于人类300年前对区域内的森林破坏。而近年来在一些植被茂密地区,不断暴发大规模的低频泥石流。四川甘洛利子依达沟上中游森林植被茂盛,阔叶疏林覆盖面积达全流域的66.8%,次生密林达14.3%,合计全流域森林覆盖率为81.1%,部分地段树丛密集,通行困难。但在1981年7月9日一场中高山局地强降雨暴发下,中游发生滑坡崩塌多处,连同大量的树木、树根一直滑入沟底,加之强大的暴雨山洪冲蚀沟底,沟岸大量坍塌,沟床被揭,形成一次特大泥石流<sup>[11]</sup>。2004年7月5日云南德宏州发生的特大滑坡泥石流,造成死亡18人,失踪24人,直接经济损失4.8亿元,而区内植被覆盖良好,森林郁闭度高<sup>[12]</sup>。2006年7月16日四川九龙县娃娃沟发生大规模泥石流,冲毁了位于下游的某电站闸区、电站厂房和另一电站进水口,造成直接经济损失约6000万元,而娃娃沟的植被覆盖率达83%<sup>[13]</sup>。这些现象引起了学界的广泛关注,李德基<sup>[14]</sup>认为对森林植被影响泥石流程度的评价应当适当,植被稳定滑坡和崩塌土石体、防止重力侵蚀的效果很有限。陈晓清等<sup>[15]</sup>分析了近年来良好植被区内的泥石流,发现在中小强度降雨激发下,植被能够削减泥石流灾害的规模,甚至抑制泥石流灾害的发生;当降雨超过一定阈值时,植被反而增大泥石流的规模。施蕾蕾等<sup>[13]</sup>研究了娃娃沟流域内植被与泥石流活动的关系,指出流域植被对泥石流的抑制作用是有限的,不用植被类型对泥石流活动的控制作用有差异。

植被与泥石流的关系需要全面的认识,只有查清植被在不同类型泥石流中的作用,才能为泥石流防灾减灾工作提供依据。四川省巴塘县泥石流多发,灾害调查数据及植被覆盖率数据较完整。区内从高海拔极高山区到深切峡谷,植被表现出明显的垂直分带性,种类多样。因此本文以巴塘县的不同类型泥石流

为样本,分析植被与泥石流发生的关系,以期得出植被对泥石流抑制作用的程度及内在原因。

## 1 研究区概况

### 1.1 地形地貌

四川省巴塘县地处青藏高原,横断山脉北端,沙鲁里山西侧,沿金沙江中游河谷及支流峡谷展布,属典型的高山峡谷地貌。最高点为县域北中部党结真拉峰,海拔高程6060m;最低点为西南角地巫热思村金沙江边,海拔高程为2240m,相对高差达3820m。

### 1.2 地质构造

区内在大地构造上属三江构造区,横跨金沙江结合带和德格—中甸陆块两个二级构造单元,以北北西向构造、南北向构造为主体。县域内新构造运动强烈,巴塘县历史上多次发生6.0级以上地震,1870年7.5级地震的震中在巴塘附近,震中烈度10度,主要活动断裂为巴塘—莫西断裂。县境内地层岩性较复杂,广泛发育三叠系区域变质岩。

### 1.3 气象特征

巴塘县属青藏高原亚湿润气候区,据巴塘县气象局1984—2009年资料,巴塘县多年平均降雨量为503.69mm,年最大降雨量为828.8mm(1998年)。10min最大雨强14.6mm,1h最大降雨25.1mm,24h最大降雨42.3mm,局地暴雨特征明显。复杂的地质背景造就了区内脆弱的地质环境,加之人类工程活动强烈,因而地质灾害频发,尤其是泥石流已成为区内最严重的地质环境问题。

### 1.4 植被分布特征

按《巴塘县志(续编)》,巴塘县生物资源丰富,植被葱茏,种类繁多,全县森林面积80197hm<sup>2</sup>,林草覆盖面积534892.21hm<sup>2</sup>,森林覆盖率9.3%,植被覆盖率达68.91%。植被种类从低海拔干热河谷到高山依次为:海拔2200~2800m间地带生长干热河谷灌丛带;在海拔2800~2900m间地带生长落叶、阔叶、灌丛林带,主要包括栓皮栎、白桦林、红桦林、山杨林、高山柳及沙棘林;在海拔2900~3300m间地带生长针叶、阔叶混交林带,主要包括高山栎、油松、云南松、杨、桦、冷杉、云杉、乔林及杜鹃、金露梅、松茸;在海拔3400~4200m间地带生长亚高山针叶林带,主要包括有云杉、红杉、铁杉、落叶松、冷杉、高山松、云南松、白杨、虫草;在海拔4200~4500m间地带生长高山疏林灌丛带,主要包括云杉、冷杉、落叶松、高山松、云南松、桦、白杨、柏、高山栎;在海拔4500~4800m间地带生长高山草甸带,主要包括乔木科、菊科、豆科、龙胆科;海拔4800m以上的流石

滩地带,仅有少量雪莲花、凤无菊、红景天等耐寒植物生长。

## 2 植被与不同类型泥石流对应关系

### 2.1 泥石流及植被分类统计方法

巴塘县共发育有泥石流灾害点 151 处,泥石流具体分布见图 1。按照泥石流发生的地貌条件,可以将泥石流分为两类,分别为沟谷型泥石流、坡面型泥石流。沟谷型泥石流发生、运动和堆积过程在一条发育较为完整的沟谷、河谷内进行。坡面型泥石流发生、运动过程沿山坡或在山坡冲沟中进行,堆积在坡脚或冲沟出口。巴塘县泥石流灾害数据包括实地调查、资料搜集、居民调访等。巴塘县共有坡面泥石流点 33 处(图 2),沟谷泥石流点 118 处(图 3)。

文中植被覆盖率数据获取时间为 2009 年 5—9 月,为当地雨季,植被生长状况良好。所得植被覆盖率通过区内 2009 年的 SPOT 5 遥感影像数据,并结合现场调查时目视解译校正两方面进行的;根据区内植被生长情况,可分为 4 种类型,即乔木、灌木、草地、裸露地。



图 2 巴塘县党巴村坡面泥石流

### 2.2 不同类型泥石流与植被的相关性分析

由于森林在水土保持中的作用最大,故将区域内泥石流灾害点的植被生长情况按两个指标进行描述,即植被覆盖率及森林覆盖率。将覆盖率分为 0~10%,10%~20%,20%~30%、30%~40%,40%~50%,50%~60%,60%~70%,70%~80%,80%~90%,90%~100% 共 10 个等级,分别统计坡面泥石流及沟谷泥石流在相应区间内对应的灾害点个数。因坡面泥石流和沟谷泥石流总数差别较大,为了便于比较,分别将两种灾害的覆盖率分组情况进行归一化处理。以植被覆盖率、森林覆盖率的分组上限值为横坐标,对应的坡面泥石流及沟谷泥石流分组占比为纵坐标,如图 4—5 所示。

由图 4 可以看出,坡面泥石流主要集中在植被覆盖率较低的区段,植被覆盖率小于 50%的坡面泥石

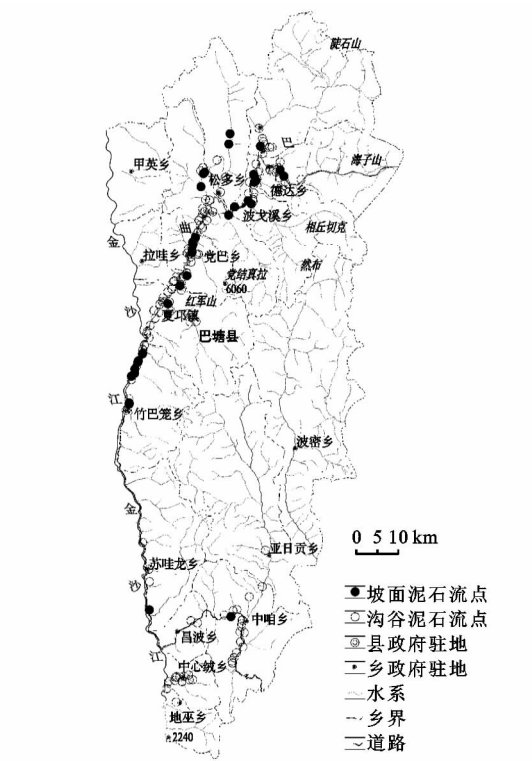


图 1 巴塘县泥石流分布图



图 3 巴塘县 G318 线布多村沟谷泥石流

流占总数的 72%。而沟谷泥石流的植被覆盖率则较为分散,在各种植被覆盖率下均有分布,而且主要集中在植被覆盖率大于 40%的沟道内,占沟道泥石流总数的 80%以上。再将坡面泥石流与沟谷泥石流的森林覆盖率进行对比(图 5),上述规律更加明显。坡面泥石流中森林覆盖率小于 10%的灾害点占总数的 70%,这表明坡面泥石流与森林覆盖率呈非常明显的负相关性。而沟道泥石流的森林覆盖率小于 10%的仅占 35%,其他区间内分布较分散。

由于无法准确评估单个泥石流点的暴发概率,所以很难将植被(森林)覆盖率与泥石流暴发频率建立一种定量的对应关系。但是可以通过这种对比得出定量的评价。简而言之,植被覆盖率尤其是森林覆盖率越差,越容易暴发坡面泥石流;沟谷泥石流则没有这种对应关系。

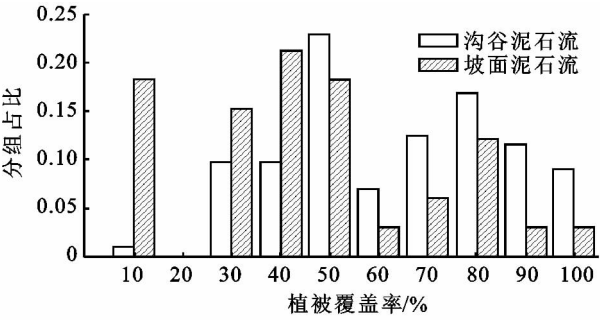


图 4 不同类型泥石流植被覆盖率对比

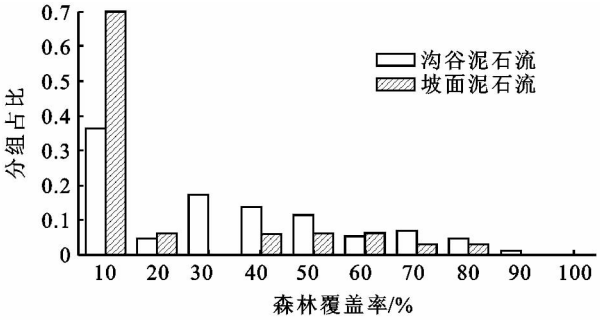


图 5 不同类型泥石流森林覆盖率对比

2.3 不同类型泥石流中植被的分布特征

由表 1 可知,在坡面泥石流中,植被生长情况普遍较差,裸露地居多,灌丛分布零散,森林稀少,而草地几乎没有。有 6 个坡面泥石流点无植被生长。沟谷泥石流植被生长情况普遍优于坡面泥石流,但仍然以裸露地居多,森林及灌丛生长较为零散均匀,草地稀少。在巴塘县全县范围内坡面泥石流植被总体分布中,裸露地占 64.39%,灌丛占 21.52%,森林占 11.97%,草地仅占 2.12%。在沟谷泥石流植被总体分布中,裸露地占 43.29%,灌丛占 28.18%,森林占 23.04%,草地仅占 5.58%。可以看出在各种植被类型中,草地的占比最少,一方面这是因为巴塘县的高山峡谷区内不利于草地生长;另一方面表明草地对于泥石流的抑制作用最差,一旦暴发泥石流,草地最先遭到破坏,转化为裸露地。而森林对泥石流的抑制作用最强,灌丛介于二者之间。

表 1 植被覆盖率百分比

泥石流分类	森林	灌丛	草地	裸露地
沟谷泥石流	23.04	28.18	5.58	43.29
坡面泥石流	11.97	21.52	2.12	64.39

通过以上的对比可以发现以下 3 点:① 植被对坡面泥石流具有较好的抑制作用;尤其是森林覆盖率与坡面泥石流表现出较高的负相关性,有 70%的坡面泥石流发生在森林覆盖率小于 10%的区域内;② 植被覆盖率与沟谷泥石流没有明显的负相关关系,泥石流既可以发生在植被覆盖率良好的沟道,也可以发生在植被覆盖率较差的沟道;③ 森林覆盖率

比植被覆盖率能够更准确地反映植被对于泥石流的抑制作用,这是因为植被中的灌丛、草地对于泥石流的控制作用较差,而采用森林覆盖率可以有效消除这种影响。

3 原因分析

3.1 植被在泥石流形成过程中的作用

植被抑制泥石流的作用主要表现为两个方面,即削减水体动力及减少土体储量。树冠之冠幅可达 2~3 m,灌木冠幅可达 1~2 m,各种林木枝叶重叠,林、灌、草被多层叠加,能截持降水,减少溅蚀;地表径流速度减缓,汇流时间延长;同时,地面枯枝落叶层具有极大的吸水性和透水性。有机质腐烂分解后形成腐殖质,改善土壤理化性质,并能增加团粒结构,提供土壤孔隙度,增加吸水能力<sup>[3]</sup>。林地土壤干容重比裸露地低,而土壤含水量前者比后者高 1.5 倍以上。各种根系死亡后,能增加土壤通透性和吸水性,因此,有植被覆盖的地方土壤含水率均高于裸露地。各类不同植被对泥石流源地水体起着不同的作用,根据蒋家沟 1984—1985 年观测资料<sup>[16]</sup>,坡面的片流量以裸露地最多,其次依次为草地、灌丛地、林地,年地表径流系数依次为裸露地(0.65)、草地(0.13)、灌丛地(0.12)和林地(0.11)。

流域内的植被具有一定的固土作用,其中以森林作用最大,灌丛次之,草被和农作物最小。据蒋家沟全流域现代植被对比分析和观测研究<sup>[17]</sup>,坡面片流泥沙流失量 70%来自裸露地,20%来自耕地,仅 10%来自草地、灌丛地和林地。植被固定土壤,主要通过其根系和枯枝落叶层起作用,地下草根密集层在 20 cm 左右,最大深度不超过 2 m;树根密集层在 1 m 左右,最大根深不超过 10 m;灌丛根系介于二者之间。树根、灌木根和草根形成地下多层网络结构,对表层土的抗蚀、抗拉强度起增强作用,能减少或抑制浅层崩塌、滑坡的形成,从而减缓坡面侵蚀。总之,植被主要通过截留雨滴,减少溅蚀,枯枝落叶层保护地表免受片蚀,减缓地表径流;根系固持土壤和有机质改善土壤理化性质等多种功能,从而减少形成泥石流的土体物质补给量。

3.2 不同类型泥石流的物源特点

坡面泥石流及沟谷泥石流对于植被抑制效应的不同响应,其机理在于不同类型泥石流松散固体物质的来源差异。泥石流松散物质来源一般分为三类,即面蚀、沟岸崩滑、沟底再搬运。对大部分泥石流来说,物源都不是单一组成的,而是由上述三类中的几种组合而成。一处坡面泥石流物源组成如果包含了面蚀、

沟岸崩滑两种,则在统计过程中该点的面蚀、沟岸崩滑各计一项,以此来统计巴塘县泥石流物源中面蚀、沟岸崩塌、沟底再搬运三种物源的不同比率。三种物源的统计总次数应大于泥石流点处。如在巴塘县的33处坡面泥石流中共有27处存在面蚀现象,即可得坡面泥石流中面蚀存在的百分比为81.82%。三种物源在坡面泥石流及沟谷泥石流的比率如图6所示。可以看出在坡面泥石流中,面蚀出现概率为81.82%,沟岸崩塌为49.70%,沟底再搬运为21.21%。在沟谷泥石流中,面蚀出现概率为33.39%,沟岸崩塌为83.90%,沟底再搬运为58.47%。这种统计方式没有考虑不同点不同物源的规模大小,但当样本较多时,物源分布频次可以近似代替物源量的分布规律。

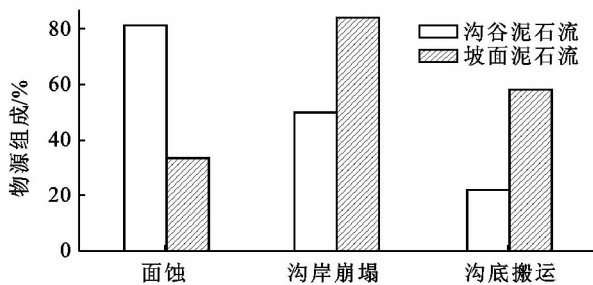


图6 不同类型泥石流物源占比

由图6可以看出,坡面泥石流中多数物源由面蚀形成;而切割较深的冲沟中存在沟岸崩滑,沟底搬运相对较少,总体而言,面蚀占坡面泥石流物源的主要组成部分。而沟谷泥石流则因流域面积较大,各种类型的物源均有分布,其中沟岸崩滑相对较多。

### 3.3 植被对不同物源的影响分析

坡面泥石流主要以浅表层的面蚀为主,暴发频率较高,单次方量较小。而植物根系层层交织,草根层、灌木根层、乔木根层组成网状锚固体,增强土体的完整性及抗侵蚀能力,加固了大量的松散土体,减少了坡面泥石流的物源量,所以坡面泥石流与植被覆盖率具有较好的负相关性。其中林木的根系较深,有的甚至深入了基岩裂隙中,在森林覆盖率高的区域,坡体表面产流很难发生。

而沟道泥石流中物源成分多样,植被对泥石流的抑制作用有限。当泥石流沟以滑坡和崩塌为主要松散碎屑物质来源时,特别是深度在3 m以上的中厚层滑坡,植物根系稀少或没有固结能力,森林起不到稳定边坡的作用。甚至可能在风载的作用下,本来只是局部失稳的坡体,会由于根系的牵扯使松散物源整体下滑,增大泥石流规模。再者植被可削减泥石流形成的水体补给量,但其作用是相对的,当雨强和雨量超过某一临界值时,植被及林下土壤的持水入渗量达到饱和,暴雨会全部变为山坡径流,并汇聚成沟谷径流,

森林就起不到削减山洪的作用。因而以暴雨山洪为动力的沟谷,尽管上游植被茂密,仍将发生泥石流。

## 4 结论

一般观点认为植被是泥石流暴发的重要影响因素之一,同时生物工程也是泥石流综合治理的重要手段。而本文通过对四川省巴塘县不同类型泥石流中植被覆盖率和森林覆盖率的对比,可以发现植被尤其是森林对于坡面泥石流具有较好的抑制作用,而对沟谷泥石流这种作用并不明显。产生这种差异的原因在于坡面泥石流的主要松散物质来源是坡体表面侵蚀,所以草根层、灌木根层、乔木根层组成的网络可以将松散土体锚固,抑制泥石流的暴发。而沟谷泥石流的物源成分较为多样,并且沟岸崩滑占比较大,而植被对于中厚层的崩滑体无法控制,从而无法对泥石流起到抑制作用。

认识到这种差异对于泥石流的防治和预警工作均具有较为深远的意义。在良好植被覆盖区,坡面泥石流发生的概率较低,故可以将生物工程作为治理坡面泥石流中的主要措施;但对沟谷泥石流而言,当流域内中厚层滑坡、强降雨耦合发生时,仍会发生大规模的低频泥石流。故不宜将植被覆盖率作为判别沟谷泥石流易发程度的参考值。沟谷泥石流治理过程中应重点稳固沟道内的松散物源,并采用格栅拦截漂木、大块石,在堆积区实施排导工程。

### 参考文献:

- [1] 李朝安,胡卸文,李冠奇,等.四川省“8·13”特大泥石流灾害成生机理与防治原则[J].水土保持研究,2012,19(2):257-263.
- [2] 陈金日.森林植被与泥石流活动[C]//中国科学院成都地理研究所.泥石流论文集.重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1981.
- [3] 柳素清.四川喜德东沟流域植被对泥石流形成的抑制作用[C]//中国科学院成都地理研究所.泥石流论文集.重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1981.
- [4] 罗德富,李木咸.泥石流与自然保护[C]//中国科学院成都地理研究所.泥石流论文集.重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1981.
- [5] 林明安,王士革,范晓岭,等.川西地区低频率泥石流的特征[J].水土保持通报,2010,30(1):227-23.
- [6] 柳素清,唐邦兴,刘世建.攀西地区人为泥石流和防治对策[J].水土保持通报,1987,7(1):27-32.
- [7] 房明烈.应用MSS图像对成昆铁路北段水系、植被与泥石流分布规律的判释[J].西南交通大学学报,1988(4):115-120.

资源配置为主线,构建了适合于三江平原灌区的多层次的农业水资源配置复杂适应系统模型,并给该模型配置了动态通信机制,增进了各主体之间的相互联系和相互协调。从而实现三江平原灌区水资源合理分配、合理使用的最终目标。本文对 2020 年三江平原灌区农业供需水做了预测,由水资源配置研究得到的 2020 年的需水量已经超过了供水量,但是地下水已经超采,所以应该把技术放在水资源控制工程的建设上。充分利用地表水,预计 2020 年过境地表水的利用率为 48%,地表径流也只才开发了 18%,还有很大的开采空间。

基于复杂适应理论的水资源配置模型的一大特点就是它通过动态通信机制将各级主体紧密联系在一起,这是以往传统的水资源配置模型所没有的。也正是这种通信机制使得该模型具有较好的层次性、系统性和整体性,可以为以后水资源配置管理决策支持系统的结构设计提供一定的参考。

参考文献:

[1] 王韶华,苏轶醒,刘昆鹏. 三江平原水资源的合理开发利用[J]. 水土保持研究,2001,8(2):30-31.

[2] 田昭一,徐海鹏. 森林破坏和泥石流形成关系的探讨[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所. 泥石流学术讨论会兰州会议文集. 成都:四川科学技术出版社,1986.

[3] 魏东岚,李永化. 青藏高原东缘第四纪泥石流沉积物地球化学分析[J]. 水土保持研究,2012,19(6):292-298.

[4] 李德基,吕儒仁,唐邦型,等. 四川甘洛利子依达沟泥石流及其防治[C]//全国泥石流防治经验交流会文集编审组. 全国泥石流防治经验交流会论文集. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1982.

[5] 高克昌,孟国才,韦方强,等. 德宏“7·5”特大滑坡泥石流

灾害分析及其对策[J]. 防灾减灾工程学报,2005,25(3):251-257.

[6] 傅春,冯尚友. 水资源持续利用(生态水利)原理的探讨[J]. 水科学进展. 2000(4):436-440.

[7] 霍兰. 隐秩序:适应性造就复杂性[M]. 上海:上海科技教育出版社,2000.

[8] 谭跃进,邓宏钟. 复杂适应系统理论及其应用研究[J]. 系统工程,2001,19(5):1-6.

[9] 张永安,李晨光. 复杂适应系统应用领域研究展望[J]. 管理评论,2010(5):121-128.

[10] Tay N S P, Lusch R F. Agent-based modeling of ambidextrous organizations: Virtualizing competitive strategy[J]. Intelligent Systems,2007,22(5):50-57.

[11] Massoud A, Dan B. Defining new markets for intelligent agents[J]. IT Professional,2000,2(4):29-35.

[12] 陈蔚珠,陈禹. 以复杂适应系统理论探析企业信息系统项目风险[J]. 复杂系统与复杂性科学,2004,1(2): 80-86.

[13] Sansores C, Pavón J. Agent Based Simulation for Social Systems: From Modeling to Implementation[M]. Current Topics in Artificial Intelligence, Springer Berlin Heidelberg,2006:79-88.

[14] 赵建世,王忠静,翁文斌. 水资源复杂适应配置系统的理论与模型[J]. 地理学报,2002,57(6):639-647.

(上接第 295 页)

[15] 李树德,岳升阳,徐海鹏. 森林植被与泥石流活动[J]. 水土保持研究,2001,8(2):30-31.

[16] 施蕾蕾,陈宁生,杨成林,等. 娃娃沟流域泥石流活动与植被关系探讨[J]. 水土保持研究,2008,15(3):96-99.

[17] 李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京:科学出版社,1997.

[18] 陈晓清,崔棚,韦方强. 良好植被区泥石流防治初探[J]. 山地学报,2006,24(3):333-339.

[19] 田连权. 亚热带山区泥石流源地的片流与泥沙[J]. 铁道工程学报,1986,12(4):115-119.

[20] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990.