

# 气候因素对蒋家沟泥石流输沙量的影响分析研究

田冰<sup>1,2</sup>, 王裕宜<sup>3</sup>

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024; 3. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041)

**摘 要:**根据云南小江流域蒋家沟泥石流 1965—2007 年的观测资料与会泽气象站 1961—2005 年的气象资料,采用相关分析法,详细分析了蒋家沟泥石流输沙量与气候因素特别是降雨的相关性。分析结果表明:蒋家沟泥石流输沙量与年降水量、年极端降水量和夏季极端降水量呈现出很好的正相关关系,分别通过了  $\alpha=0.01$ ,  $\alpha=0.05$  的置信度检验,随着降水量以及极端强降水的增加,泥石流输沙量都表现出增加的趋势。尽管随着夏季气温的增加会影响泥石流形成的土源条件的含水量,但因为降水因素的对泥石流启动的影响要远远大于气温因素,因此在以变暖、变湿为特征的小江流域气候变化的背景下,泥石流输沙量呈现出增加的态势。

**关键词:**相关分析; 泥石流; 输沙量; 气候变化

中图分类号: P642.23; P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0218-05

## Research for the Influence of Climatic Factors on Sediment Runoff of Debris Flow in Jiangjia Ravine

TIAN Bing<sup>1,2</sup>, WANG Yuyi<sup>3</sup>

(1. College of Resources & Environmental Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on the observation data of debris flow in Jiangjia Ravine from 1965 to 2007 and the climatological data in Huize meteorological observation station from 1961 to 2005, the correlation between debris flow sediment runoff and climatic factor was analyzed using correlation analysis method. The results showed that there was a positive correlation between the sediment runoff of Jiangjia Gully debris flow and annual rainfall, annual extreme rainfall, and summer extreme rainfall. The correlation coefficient passed the confidence level ( $\alpha=0.01$ ,  $\alpha=0.05$ ). The sediment runoff increased with the increase of rainfall. However, the increase in summer temperature will affect the soil moisture of the formation of debris flow. But the effect of rainfall has larger influence than the temperature. Therefore, under the background of climate change characterized as the warming and wetting, the sediment runoff of debris flow shows the increasing trend.

**Keywords:** correlation analysis; debris flow; sediment runoff; climate change

气候变化的影响是全方位、多尺度、多层次的,正面和负面影响并存,但它的负面影响更受关注。全球气候变暖,极端异常气候事件频率的增加<sup>[1-2]</sup>,造成了全球水土流失与生态环境的恶化,这些已经危及到人类的生存空间。长江流域是全球气候变化区域响应的重要地区之一<sup>[3]</sup>,而长江上游金沙江下游的小江流域是降雨型泥石流灾害频繁暴发的典型区域<sup>[4]</sup>,该区域气候因子的年内和年际变化对泥石流暴发的规模

和频率具有重要的影响。陡峭的地形、丰富的松散固体物质、充沛降水是泥石流发生的 3 大条件。在特定的区域内,如果未发生大的地质活动,形成泥石流的陡峭地形、丰富的松散固体物质在一定时段内不会变化,降水就成为泥石流形成的最活跃因素。为了将泥石流灾害所造成的损失减轻到最小,研究气候因子变化对泥石流活动的影响,提前做好年际间的防御工作,这是一种重要的防灾减灾途径。

位于小江流域右岸的蒋家沟是典型的降雨型泥石流沟,其特殊的地质和地貌条件,使得该流域坡面和沟道泥石流源地的产沙、产流临界雨量、雨强均较低,在一年中可暴发数十次泥石流。在全球变暖的大背景下,该区域气候也呈现出变暖、变湿的趋势,特别是 20 世纪 90 年代以来,气温升高,降水显著增加,强降水事件出现的频率也呈现出增加的趋势,这些气候变化导致泥石流暴发的频率增加,规模增大。在地形条件和松散固体物质来源没有大的改变的前提下,该沟泥石流发生、发展的规模和频率主要受降雨的周期性、季节性和突发性等因素的控制和制约<sup>[5-6]</sup>。本文根据小江流域会泽站 1961—2005 年气象数据以及蒋家沟流域 1965—2007 年泥石流输沙资料<sup>[7-8]</sup>,对由于气候因子变化引起的泥石流活动的影响进行详细分析,以期找到泥石流活动在气候变化大背景下的变化规律,以便为当地的生产实践活动提供理论指导和依据。

1 数据来源及处理方法

由于蒋家沟流域(1982—2004 年)的降水资料观测困难,完整性较差,而云南会泽站(1961—2005 年)的国家气象资料数据时间系列长,完整性好,且蒋家沟泥石流的形成区和会泽站处于同一高度的雨区。本文拟采用云南会泽站的气象资料研究蒋家沟流域泥石流活动对气候因子的响应,但由于两地在地理位置上有一定的距离,因此将蒋家沟流域平均降水资料(1982—2004 年)和会泽站的同期降水资料进行相关性分析。

相关性分析<sup>[9]</sup>是研究两个变量间线性关系的程度,用相关系数  $r$  来描述,计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

对相关系数  $r$  的统计检验时计算统计量  $t^{[10]}$ :

$$t = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2)$$

式中: $x, y$ ——随机变量; $\bar{x}$ ——变量  $x$  的均值; $\bar{y}$ ——变量  $y$  的均值; $r$ —— $x, y$  两个随机变量的相关系数; $n$ ——样本数; $t$  服从  $n-2$  个自由度的  $t$  分布。

如果变量  $Y$  与  $X$  间是统计关系,  $-1 < r < 1$ 。  $X, Y$  变化的方向一致,则称为正相关,  $r > 0$ ;  $X, Y$  变化的方向相反,则称为负相关,  $r < 0$ ; 当  $|r| \geq 0.8$  时,为高度相关;当  $0.5 \leq |r| < 0.8$ , 为中度相关;  $0.3 \leq |r| < 0.5$ , 为低度相关;  $|r| < 0.3$ , 关系极弱,一般认为不相关。

将 23 a(1982—2004 年)间的蒋家沟 5 个观测站的平均降水数据和会泽站降水数据,进行了相关分析。由分析结果可知,蒋家沟流域平均降水与会泽站降水相关系数为 0.813,为高度相关,另外,从图 1 也可以看出,两站在 1982—2004 年的降水变化趋势基本一致,因此本文采用会泽站的降水资料进行有关分析。

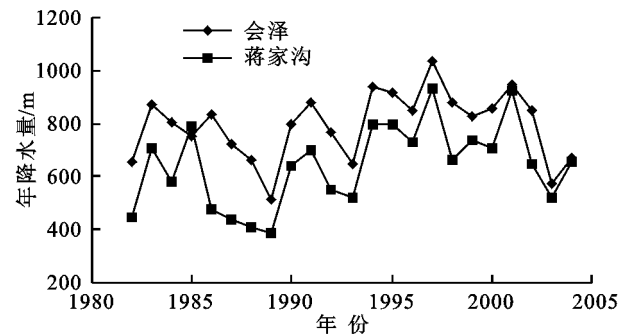


图 1 1982—2004 年蒋家沟流域平均降水量与会泽降水量比较曲线

2 泥石流输沙量与降水量的关系

泥石流的输沙量不仅反映了泥石流形成区的独立环境特征和泥石流的搬运能力,也反映了泥石流规模的大小。

2.1 泥石流输沙量与年降水量、季节降水量的相关分析

在同一条泥石流沟中,流域内的物质条件、沟床条件在一定时间内是相对稳定的,而降雨条件的时空变化对泥石流的产生及形成规模的大小都有很大的关系。本文采用相关分析法,对多年平均降水量和各季节降水量和泥石流输沙量进行相关性分析,各降水要素与泥石流输沙量的相关系数如表 1 所示。

表 1 蒋家沟泥石流年输沙量与会泽站降水因素的相关系数

| 项 目  | 年降<br>水量 | 春季<br>降水量 | 夏季<br>降水量 | 秋季<br>降水量 | 冬季<br>降水量 |
|------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 相关系数 | 0.540**  | 0.044     | 0.475*    | 0.330     | 0.147     |

注:\*\*代表通过 0.01( $p=99\%$ )置信度检验,\*代表通过 0.05( $p=95\%$ )置信度检验,下同。

从表 1 可以看出,在各降水要素中,年降水量与年输沙量的相关系数最大,为 0.540,达到  $\alpha=0.01$  检验,这说明年降水量在泥石流输沙量中起到了重要作用,虽然蒋家沟暴雨型泥石流多在雨季暴发,但是旱季降水量的多少在某种程度上可以改变土体的湿润程度,相对增加了泥石流暴发前的前期降水量。其次是夏季降水量,这主要因为:一是夏季降水量占到全年降水量的比重最大;二是由于降水型泥石流大多在夏季发生,所以其相关系数较大。而春季降水量在全年降水量中的比重最小,其相关性相对也是最差的。

由图 2 可以看出,蒋家沟流域泥石流输沙量与降水量变化趋势在个别年份上有所差别,大多数年份都是同步的。蒋家沟泥石流输沙量在 1968 年开始减少,在 1972—1982 年有几次小的波动,1982 年后又呈现出增加的趋势,之后一直是波动式上升,到 2000 年后开始下降。这与会泽的降水趋势基本一致,泥石流输沙量大的年份也恰好是降水量多的年份,如 1997 年泥石流输沙总量为 657 万  $\text{m}^3$ ,是多年平均值的近 3 倍,降水量为 1 034.4 mm,也比多年平均降水多出了 200 mm。而在输沙量少的年份,也正是降水量较少的年份,如 1969 年。这说明了蒋家沟流域泥石流规模大小的主要驱动因素是大气降水,随着降水量的增加,输沙量呈现出增加的趋势(图 3)。

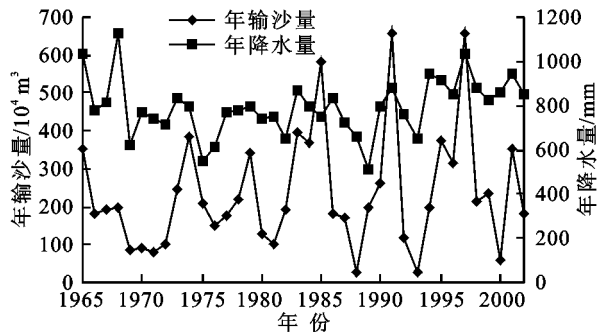


图 2 1965—2002 年年降水量与输沙量对应关系

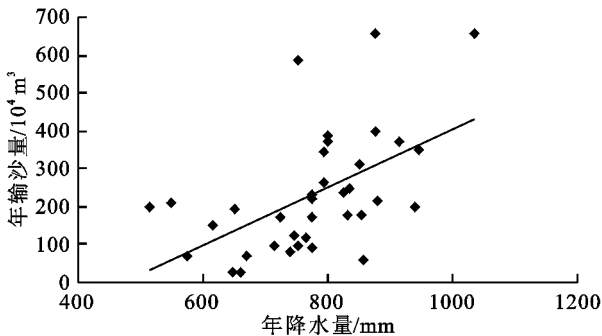


图 3 年降水量与输沙量关系

2.2 泥石流输沙量与极端强降水的相关分析

近些年来,全球气候变暖背景下的极端降水事件的变化引起了广泛关注,有关学者的研究表明长江上游金沙江水系的极端强降水量呈现显著增加趋势<sup>[11]</sup>,这与一些相关研究分析的小江流域极端强降水量在 1961—2002 年显著增加的结论相一致<sup>[12]</sup>。小江流域降水的年内和年际变率大,随着气候变暖导致印度洋海洋温度增加,夏季风的水循环进一步加快,降水时空分布可能更加不均匀,本流域处于乌蒙山西坡,呈东西走向,东高(最高点为 3 269 m)西低(最低点为 1 042 m),正对着印度洋夏季风的前进方向,为迎风多雨区。夏季常常会产生中尺度对流云团,这些云团生命史很短,但会产生局地强对流降水天气<sup>[11]</sup>。这些都有可能致极端气候事件的发生,它们对流域内泥石

流暴发的规模和频率,都会产生重要的影响。

对于不同的地区,极端强降水事件是不能完全用全国统一固定的日降水量简单定义的。因此在云南会泽站的极端强降水事件的选取上,采用百分位的方法,把第 95 个百分位值作为极端值的阈值,当该站的某日的降水量超过该阈值,就称之为极端降水事件<sup>[13-14]</sup>。通过对会泽站 1961—2002 年逐日降水资料的统计汇总,得出该站的极端强降水事件的阈值为 13.6 mm。本文以小江流域会泽站 1961—2002 年发生的年强降水事件和夏季强降水事件,分析它们对泥石流输沙量大小的敏感程度。极端强降水要素与泥石流输沙的相关系数如表 2 所示。

表 2 蒋家沟泥石流年输沙量与会泽站强降水因素的相关系数

| 项 目  | 年极端<br>降水量 | 年极端<br>降水天数 | 夏季极端<br>降水量 | 夏季极端<br>降水天数 |
|------|------------|-------------|-------------|--------------|
| 相关系数 | 0.387*     | 0.301       | 0.375*      | 0.270        |

从表 2 可以看出,在极端强降水的要素中,年极端降水量和年极端降水事件发生的天数与年输沙量的相关系数较大,其中年极端降水量通过了  $\alpha=0.05$  的置信度检验,这说明年极端降水在泥石流输沙量中起到了一定的作用。

由图 4—5 可以看出,蒋家沟流域泥石流输沙量与极端降水量变化趋势在 1961—2002 年表现基本一致。这主要因为该流域的年极端降水占到全年降水的 57.2%,而且蒋家沟流域的暴雨中心都出现在 2 500~3 000 m 地带,正好与泥石流形成区同位,根据蒋家沟流域 1995—1997 年 43 场泥石流输沙观测数据和降水资料的统计分析,表明由强降水引发泥石流的输沙量占到输沙总量的近 40%<sup>[15]</sup>,所以年极端降水量大的年份,蒋家沟泥石流输沙量也呈现出增加的趋势,而年极端降水少的时段内,泥石流的规模也较小。

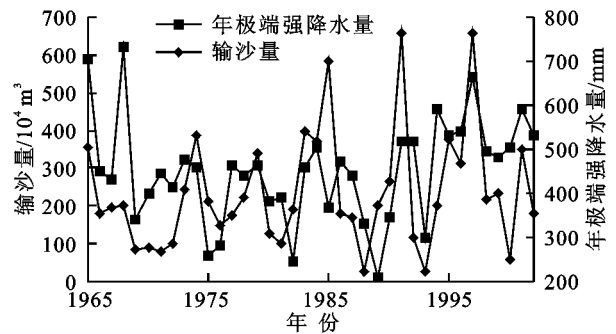


图 4 1965—2002 年极端强降水量与输沙量对应关系

夏季正是泥石流暴发最集中的季节,而小江流域的夏季极端降水量以及降水天数均占到了全年极端降水的 65% 以上,因此夏季极端强降水量的多寡对泥石流灾害的暴发规模的大小也起着极为重要的作

用。从表 2 中可以看出,在夏季极端降水要素中,夏季极端降水量和夏季极端降水事件发生的天数与年输沙量的相关系数较大,其中夏季极端降水量通过了 $\alpha=0.05$ 的置信度检验。从图 6 中可以看出,随着夏季极端降水量的增加,输沙量也呈增加趋势。

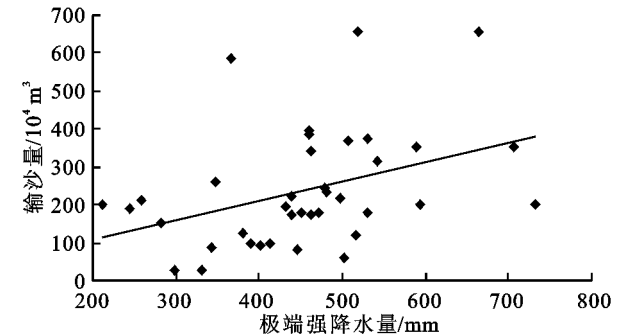


图 5 极端降水量与输沙量关系

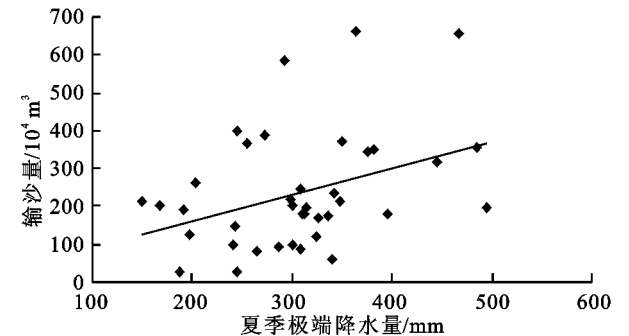


图 6 夏季极端降水量与输沙量关系

2.3 泥石流输沙量与温度的相关分析

流域内气温变化作为热量指标对泥石流的影响主要表现在:(1) 影响流域的蒸发量,从而影响了泥石流形成的土源条件——固体物质的土壤含水量程度;(2) 改变流域高山区降水形态;(3) 改变流域下垫面与近地面层空气之间的温差从而形成流域小气候,从而对泥石流形成的降水条件产生影响。

近几十年的观测资料显示,小江流域气温呈明显的上升趋势,本文选取流域 1970—2002 年的多年平均气温和各季节平均气温,分析它们在泥石流活动中的贡献。其单因素相关系数如表 3 所示。

表 3 蒋家沟泥石流年输沙量与会泽站气温因素的相关系数

| 项 目  | 年均温    | 春季<br>气温 | 夏季<br>气温 | 秋季<br>气温 | 冬季<br>气温 |
|------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 相关系数 | -0.232 | -0.177   | -0.368*  | -0.034   | -0.118   |

由表 3 可以看出,气温要素与输沙量呈负相关关系。其中夏季气温与年输沙量的相关系数较大,并且通过了 $\alpha=0.05$ 的置信度检验,其次是年均温,其他各季节均温的相关性都较小。这主要因为夏季温度较高,对流域内蒸散发以及物质风化都能产生一定的影响,而该流域暴雨型泥石流大多数都形成于夏季,因此其相关性也比其他季节的好。由图 7 可以看出,

随着夏季温度的升高,输沙量表现为减少的趋势。这主要因为温度升高,流域的蒸发量增大,影响了土体表层,但仅仅是对很薄的表层有抑制作用,在某种程度上影响了泥石流形成所需土源—固体物质的土壤含水量程度,从而对泥石流规模有一定程度的影响,特别是以前期降水型为主的暴雨型泥石流<sup>[13]</sup>。

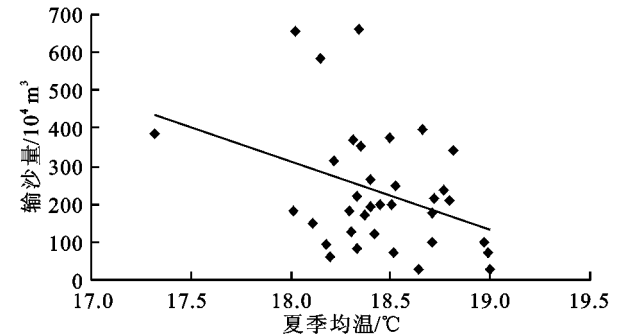


图 7 夏季均温与输沙量关系

由图 8 可以看出,输沙量与降水、气温之间为明显的非线性关系,在温度不变的情况下,输沙量随降水量的增加表现增加的趋势,而在降水量不变的情况下,输沙量随夏季温度的升高,总体趋势显示为小幅减小,但是在降水量和温度都增加的情况下,输沙量呈现出增加趋势。

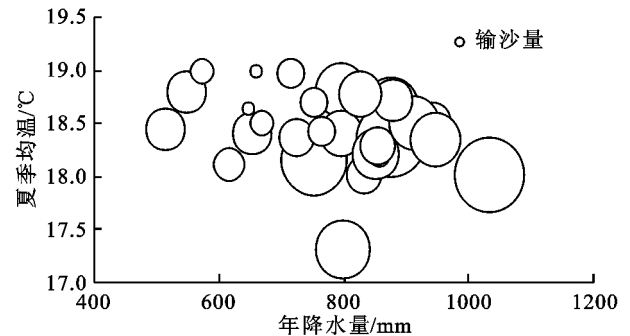


图 8 小江流域夏季均温、降水量与输沙量的相关关系

3 结 论

(1) 蒋家沟泥石流输沙量与年降水量的相关性最好,系数为 0.540,通过了 $\alpha=0.01$ 的置信度检验,这是因为蒋家沟暴雨型泥石流虽然多在雨季暴发,但是旱季降水量的多少在某种程度上可以改变土体的湿润程度,相对增加了泥石流暴发前的前期降水量,其次是夏季降水量,说明降水量在泥石流输沙量中起到了重要作用。而在极端降水中,泥石流输沙量与年极端降水量和夏季极端降水量的关系都比较密切,均通过了 $\alpha=0.05$ 的置信度检验,随着降水量的增加,输沙量也表现为增加的趋势。

(2) 泥石流输沙量与气温因素则呈现出负相关关系,其中与夏季气温的相关性较好,随着夏季气温的增加,输沙量呈现为减少的趋势,主要是因为温度

升高,流域的蒸发量增大,影响了土体表层,但仅仅是对很薄的表层有抑制作用,在某种程度上影响了泥石流形成所需土源——固体物质的土壤含水量程度,从而对泥石流规模的大小产生一定程度的影响。

(3) 泥石流输沙量与降水、气温之间表现为明显的非线性关系,在温度不变的情况下,输沙量随降水量的增加基本表现增加的趋势,而在降水量不变的情况下,输沙量随夏季温度的升高,总体趋势小幅减小,在降水量和温度都增加的情况下,输沙量呈现增加趋势,降水因素的影响要远远大于气温要素。

致谢:作者深深地感到本项研究无论是 38 年的气象观测资料的获得,还是近 48 年泥石流侵蚀输沙量的观测资料的获得,都凝聚着二代人长期野外工作的艰辛。在此作者对国家气象观测站与中国科学院东川泥石流观测研究站的老同仁们表示最诚挚的敬意和感谢。

#### 参考文献:

- [1] 苏布达,姜彤.长江流域降水极值时间序列的分布特征[J].湖泊科学,2008,20(1):123-128.
- [2] 张小玲,陶诗言,卫捷.20 世纪长江流域 3 次全流域灾害性洪水事件的气象成因分析[J].气候与环境研究,2006,11(6):669-682.
- [3] Plummer N, Salinger M J, Nicholls N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century [J]. Climatic Change,1999,42(1):183-202.
- [4] 任洪玉,赵健.长江上游滑坡泥石流灾害现状与预警系统建设探讨[C]//中国科学技术协会.2007 年中国科学技术协会年会论文集,2007.
- [5] 田冰,王裕宜.基于功率谱分析的蒋家沟泥石流侵蚀输沙量准周期的探讨[J].水土保持研究,2012,19(4):244-246.
- [6] 王裕宜,李昌志,洪勇.暴雨泥石流输沙年际变率的旋回性研究:以云南东川蒋家沟泥石流为例[J].自然灾害学报,2000,9(4):99-533.
- [7] 康志成,崔鹏,韦方强,等.中国科学院东川泥石流观测研究站观测试验资料集(1961—1984)[Z].北京:科学出版社,2006.
- [8] 康志成,崔鹏,韦方强,等.中国科学院东川泥石流观测研究站观测试验资料集(1995—2000)[Z].北京:科学出版社,2007.
- [9] 张超,杨秉康.计量地理学基础[M].2 版.北京:高等教育出版社,1991.
- [10] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].3 版.北京:气象出版社,2004.
- [11] 苏布达,姜彤,任国玉,等.长江流域 1960—2004 年极端强降水时空变化趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):9-14.
- [12] 王裕宜,詹钱登,田冰,等.极端强降水变化与泥石流侵蚀输沙特征相关性分析:以长江上游小江流域蒋家沟泥石流为例[J].水土保持通报,2009,29(3):165-169.
- [13] 王志福,钱永甫.中国极端降水事件的频数和强度特征[J].水科学进展,2009,20(1):1-9.
- [14] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(S1):1-10.
- [15] 田冰,王裕宜,洪勇.泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系:以云南省蒋家沟为例[J].水土保持通报,2008,28(2):71-75.

(上接第 217 页)

- [13] 赵安周,李英俊,卫海燕,等.西安市城市化与城市生态环境耦合协调发展研究[J].水土保持研究,2012,19(6):152-156.
- [14] 仇方道.县域可持续发展综合评价研究[J].经济地理,2003,23(3):319-322.
- [15] 褚玉楠.内蒙古鄂尔多斯市可持续发展水平的评价研究[J].内蒙古农业大学学报:社会科学版,2010,12(1):43-46.
- [16] 鹿晨昱,马忠,张子龙,等.基于元指标理论的庆阳区域可持续发展研究[J].生态科学,2012,31(1):62-68.
- [17] 洪开荣,浣晓旭,孙倩.中部地区资源—环境—经济—社会协调发展的定量评价与比较分析[J].经济地理,2013,33(12):16-23.
- [18] 曹斌,林剑艺,崔胜辉.可持续发展评价指标体系研究综述[J].环境科学与技术,2010,33(3):99-105.
- [19] 张琳,薛冰,鹿晨昱,等.基于 AHP 与 GIS 的城市可持续性测度与空间比较研究:以东北地区 35 市(州)为例[J].水土保持研究,2013,20(2):86-91.
- [20] 李艳,曾珍香,武优西,等.经济—环境系统协调发展评价方法研究及应用[J].系统工程理论与实践,2003(5):54-58.
- [21] 石培基,杨银峰,吴燕芳.基于复合系统的城市可持续发展协调性评价模型[J].统计与决策,2010(14):36-38.