

# 蒋家沟流域雨季降水中氢氧同位素特征分析

郭晓军<sup>1</sup>, 苏凤洹<sup>1</sup>, 洪勇<sup>1</sup>, 邹强<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**通过分析蒋家沟流域 2001—2009 年内降雨资料,发现降雨频率服从幂指数分布,分析蒋家沟流域 2010 年雨季降水的氢氧同位素组成,得出当地大气降水线,其截距与我国大气降水线相比较小,这与研究区地处内陆干热河谷、蒸发作用强烈有关;降水中氘盈余 7 月中旬之前较大,均为正值,7 月中旬到 8 月中旬由于空气湿度相对较高,氘盈余减小,8 月中旬之后,随着空气湿度重新减小, $d$  值增大;根据次降雨采集的降水样品分析, $\delta^{18}\text{O}$  显示出明显的降水量效应,即降水量较大的降水场次内  $\delta^{18}\text{O}$  较小,在同一场降雨内, $\delta^{18}\text{O}$  也随着降雨时间的持续和降水量的增加而呈减小趋势;受山区降雨的随机性影响,蒋家沟流域内稳定同位素的高程效应较为反常,海拔越高的地方, $\delta^{18}\text{O}$  越大。

**关键词:**降水; 氢氧同位素; 大气降水线; 氘盈余; 地下水; 蒋家沟

中图分类号:P426.6;P641.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0082-04

## Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Rainy Season Precipitation in Jiangjiagou Watershed

GUO Xiao-jun<sup>1</sup>, SU Feng-huan<sup>1</sup>, HONG Yong<sup>1</sup>, ZOU Qiang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Progress, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The rainfall events occurred from 2001 to 2009 in Jiangjiagou watershed was analyzed. The rainfall frequency and cumulative frequency of rainfall before triggering of a debris flow can be fitted by power exponent distribution and logarithmic distribution, respectively. This result shows that the triggering of debris by rainfall is a random phenomenon, and subjects a random distribution. The isotopic compositions of precipitation over the Jiangjiagou watershed in the summer of 2010 are studied. Local meteoric water line is fitted as  $\delta D = 7.1086\delta^{18}\text{O} - 14.22$ . Its intercept is lower than that of Chinese meteoric water line which is related to the geographical and meteorological characteristics in this area. With the change of air humidity, the values of deuterium excess are positive before mid-July, and are much lower during mid-July and mid-August, then increase again after the mid-August. The  $\delta^{18}\text{O}$  value in an individual rainfall is lower as the rainfall increases. By the effort of the randomness of the mountain area precipitation, the stable isotopic concentration is higher as the attitude rises.

**Key words:** precipitation; hydrogen and oxygen isotopes; meteoric water line; deuterium excess; underground water; Jiangjiagou watershed

降水是流域水循环中重要的输入因子,对于泥石流流域来说,也是泥石流形成条件中最具动态性的因素<sup>[1]</sup>,对降水中稳定同位素的研究始于 20 世纪 50 年代初<sup>[2]</sup>,此后该方法迅速成为研究降水特征和流域水循环的重要手段。在流域尺度上,降水同位素组成的时空分布与降水的时空分布存在着紧密的联系。降

水是具有微观和中观尺度结构属性的降水过程形成,前者与降水深度、降水历时以及降水场次之间的时间间隔相联系,后者与降水过程中降水强度的时空分布相联系<sup>[3]</sup>。对降水中的稳定同位素和降水后土壤水中稳定同位素的时空变化进行分析,可以推断降水强度的时空分布<sup>[4-5]</sup>、研究土壤水分蒸发与入渗<sup>[6]</sup>、确定

收稿日期:2011-09-12

修回日期:2011-10-24

资助项目:国家重点基础研究(973)项目(2011CB409902);国家自然科学基金(40801009)

作者简介:郭晓军(1985—),男,山西省运城市人,实习研究员,硕士,主要研究方向为山地水文学和泥石流。Email:sblong2003@yahoo.com.cn

地下水水流路径和滞留时间<sup>[7-8]</sup>等。对于泥石流流域,还可进一步对泥石流进行产汇流、水文过程划分等,来定量研究前期降雨对泥石流的贡献<sup>[9]</sup>。虽然到目前为止,将环境同位素应用于泥石流流域的案例很少,但在未来,同位素水文学将是研究泥石流流域降雨入渗、泥石流预报的重要方法之一。

本文基于东川泥石流观测站提供的数据,对蒋家沟近 10 a 的降雨数据进行分析,研究该地区的降雨特征;对该地区 2010 年雨季降雨中同位素的特征进行分析,研究该地区降水中稳定同位素的分布特征,为环境同位素在泥石流流域水循环和泥石流研究中的应用做基础。

## 1 研究区概况

蒋家沟是长江上游金沙江支流小江右岸的一条支沟,主要支沟有门前沟、多照沟、大凹子沟、查菁沟和老蒋家沟等。主沟长 13.9 km,流域面积 48.52 km<sup>2</sup>。位于东经 103°06′,北纬 23°13′—23°17′,自东向西汇入小江,流域最高海拔 3 269 m,最低海拔 1 041 m。

流域位于滇东北高山峡谷区,是著名的泥石流多发沟,地形的显著特点是沟深坡陡,流域平均坡度为 43°,坡度在 30°~68°的土地面积占总面积的 60%以上;流域内气候干湿季分明,垂直气候带明显,每年 10 月—次年 5 月为旱季,6—9 月为雨季,暴雨中心多出现在海拔 2 500~3 000 m 的地带。从河谷到分水岭可分为 3 个区:海拔 <1 600 m 为亚热带干热河谷区,植被稀疏,是蒋家沟泥石流堆积区;海拔 1 600~2 200 m 为亚热带、暖温带半湿润区,是蒋家沟泥石流固体物质主要源区;海拔 >2 200 m 为温带湿润山岭区,植被覆盖率较高,是蒋家沟泥流水源汇流区<sup>[10]</sup>。

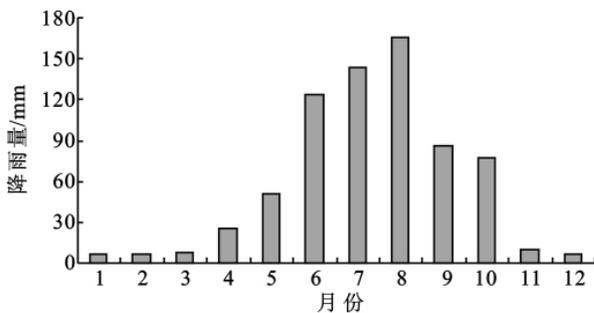


图1 蒋家沟流域降水的年内月分配

## 4 降水中同位素特征

### 4.1 当地大气降水线

流域内水最终来源于大气降水,从长期趋势来看,降水中的稳定同位素浓度是地球上水循环过程各种水体的输入信号,其同位素组分的变化会直接影响

## 2 研究方法

以降雨场次为单位在蒋家沟泥石流观测站雨量筒内采集水样,采样时间从 2005 年 9 月 8 日到 2010 年 6 月 25 日,共计 27 个样品。采集的水样装于 50 ml 塑料瓶内,密封、冷藏保存。样品的测试在中国科学院成都山地灾害与环境研究所环境同位素实验室完成。

## 3 蒋家沟降水特征分析

对中国科学院东川泥石流观测研究站提供的 2001—2009 年间降雨数据进行分析,从结果上看,蒋家沟多年平均降雨量为 657.7 mm。其中 2008 年为丰水年,2003 年、2009 年为枯水年,其余年份为平水年。该地区降雨量与泥石流暴发次数是成正相关的,2008 年降雨量最多,暴发泥石流场次也最多,为 12 次;2009 年降雨量最少,暴发泥石流场次最少,仅为 2 次。

流域降水量的年内月分配见图 1。该区冬春季的降雨很少,降水量主要集中在 6—9 月,在统计年限内,6—9 月的降水量占了全年降水的 65% 以上,是降雨径流以及泥石流的重点监测时段。在研究区间内,有 1 505 个降水日,根据国家气象局颁布的降雨强度等级划分标准(内陆部分,以 24 h 内降雨总量计),25~49.9 mm 为大雨,大于 50 mm 为暴雨。数据研究表明,该区夏季降水量多大雨和暴雨,其中大于 25 mm 的降雨场次为 36 场,其中诱发泥石流 12 场;大于 50 mm 的降雨场次为 2 场,两次降雨过程中均发生泥石流。日降雨量的频率统计服从幂指数分布(图 2)。

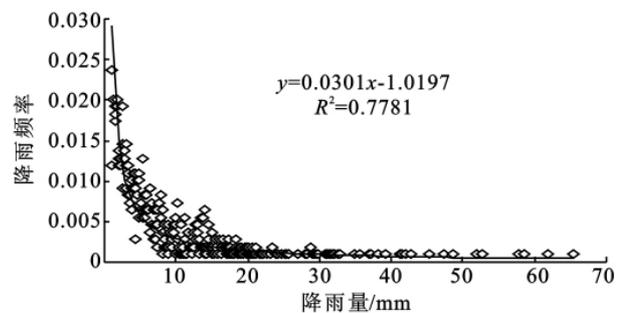


图2 降雨频率分布

地表水、土壤水以及地下水等水体中的同位素浓度的分布。而一个地区大气降水中的氢氧同位素组成大致位于一条直线上,即当地大气降水线(LMWL)。

笔者收集了 2010 年 6—9 月研究区内 27 次降水样品,并在室内进行同位素浓度测试分析。大气降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的变化范围分别为  $-143.72\text{‰}$ ~ $-32.98\text{‰}$  和

-16.71‰~-2.43‰, 平均值分别为 -96.97‰ 和 -11.57‰。次降水氢氧同位素值变化较大, 这是由于降水线方程受水汽凝结温度、水蒸汽团来源和输送方式以及降水期间的空气温度和湿度等因素影响, 而该流域的温度、空气湿度以及蒸发作用在时空上极不均匀造成的。从数据上看, 降水中  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  呈现明显的线性关系。经回归拟合获得当地的大气降水线 (LMWL) 见图 3。

如图 3 所示, 蒋家沟当地大气降水线的截距明显小于我国大气降水线(式 1)<sup>[11]</sup>。这是因为该地区地处干热河谷, 蒸发作用远较一般地区大(该地区年蒸发量 1 350~3 500 mm, 随海拔升高而减小), 夏季空气湿度低, 降雨在降落过程中经过了强烈的蒸发过程。

$$\delta D = 7.74\delta^{18}O + 1.69 \quad R^2 = 0.94 \quad (1)$$

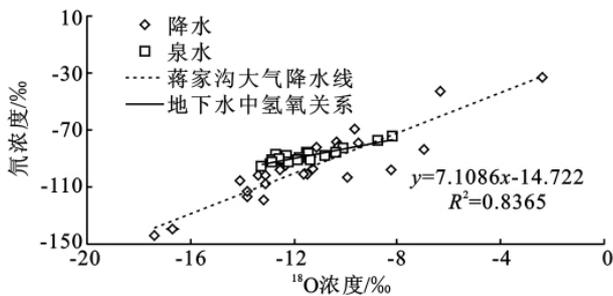


图 3 蒋家沟当地大气降水线和地下水同位素浓度分布

#### 4.2 氕盈余

区域大气降水线与全球大气降水线在斜率和截距上均有不同程度的偏移, 反映了各地大气降水形成时水汽来源及运移过程中受环境变化影响所导致的气、液两相同位素分馏不平衡程度的差异。为了量化这种差异, Dansgaard<sup>[12]</sup>提出了氕盈余( $d$ )的概念, 定义为:  $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ 。全球平均  $d$  值约为 10, 但是湿度、风速和最初蒸发时海洋表面温度的变化会引起  $d$  值的地区变化。

如图 4 所示, 在蒋家沟流域, 夏季氕盈余值  $d$  先正值后负值, 先减小再增加, 变化极为明显。由于该地区地处干热河谷, 蒸发作用强烈, 结合降雨过程, 发现从 6 月 25 日首场降雨开始到 7 月中旬, 气候干燥、空气湿度低, 降雨过程中受到非平衡蒸发影响较强, 导致氕富集,  $d$  值均为正值; 随后, 从 7 月中旬到 8 月中旬, 随着降雨逐渐频繁和雨量逐渐增加, 空气湿度相应增大,  $d$  值减小, 并且出现极小值; 到雨季后期, 随着降雨频率逐渐减小, 在干热河谷区强烈的蒸发作用下, 空气湿度重新减小, 导致  $d$  值相对增大。

#### 4.3 $\delta^{18}O$ 的空间分布与雨量效应

图 5 为同一场降雨中陈家梁子(海拔 2 322 m)、密支山(海拔 2 586 m)、蚂蚁坪(海拔 2 834 m)、王家

垭口(海拔 2 727 m)四个样品采集点在不同降雨时段中的  $\delta^{18}O$  分布。可以看出, 在同一场降雨中, 四个点的  $\delta^{18}O$  都随着降雨时间的持续和累积降雨量的增加而逐步减小, 这是因为在同一场降雨中, 云团中环境同位素相对较重的水先降落, 因此随着时间的推移, 降雨后期的环境同位素较为贫化。但根据目前的数据, 难以建立其随着降雨量累积的衰减系数。

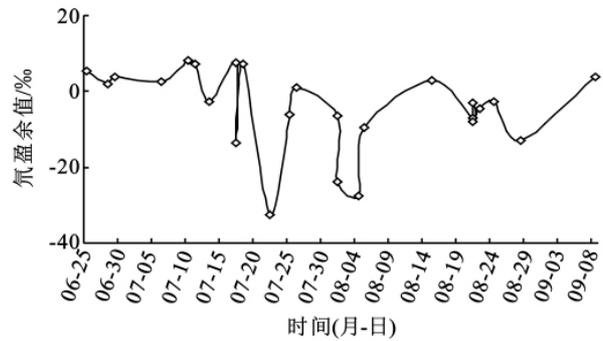


图 4 蒋家沟汛期氕盈余变化分布

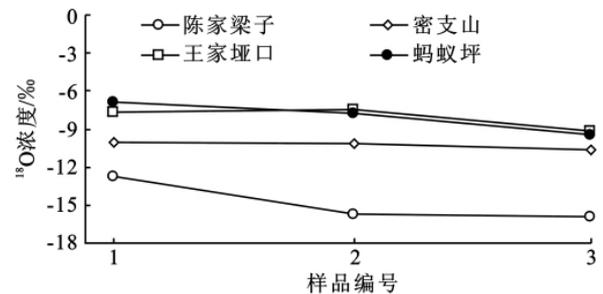


图 5 不同采集点  $\delta^{18}O$  同一场降雨中的变化

Dansgaard<sup>[12]</sup>提出, 雨水中的  $\delta^{18}O$  值与降水量呈负相关关系, 在云团的冷凝过程中, 雨水的  $\delta^{18}O$  值随形成的雨水总量越多而变得越来越小, 当降水强度不大, 降雨量较小时, 雨滴在下降过程中与尚未冷凝的云团之间发生同位素交换, 加上当地的蒸发作用, 均可造成雨水中的同位素浓度相对偏高。图 6 为蒋家沟流域的次降雨中的  $\delta^{18}O$  与降雨量的关系, 结果表明,  $\delta^{18}O$  与降雨量呈负相关变化趋势, 降水量越大, 降水中的  $\delta^{18}O$  贫化越严重, 而降水量小则呈富集趋势。这说明该地区的稳定同位素具有较为明显的降雨量效应。由于该效应的随机性, 我们难以利用图 6 中的降雨量效应公式, 这就要求我们在以后的研究中, 对于不同场次的降雨要分别采样, 才能准确研究降雨在泥石流起动和运动中的作用。

另外, 与一般的理解不同<sup>[13]</sup>, 同一场降雨中, 该地区的  $\delta^{18}O$  并非随着海拔升高而减小, 相反, 海拔最低的陈家梁子反而  $\delta^{18}O$  最低, 而海拔最高的蚂蚁坪站  $\delta^{18}O$  最高, 这可能是由该地区山区降雨的不均匀性所造成的。虽然同处蒋家沟流域, 但陈家梁子站与其他三个站分别位于两个子流域内, 即使在同一子流域内, 蚂

蚁坪等三个站的  $\delta^{18}\text{O}$  也并非随高程增加而减小,正是由于受到分水岭对山区降雨的影响,我们难以建立该地区大气降水中  $\delta^{18}\text{O}$  随高程递减的梯度。

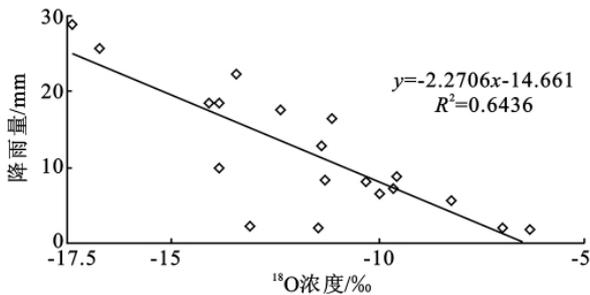


图 6 蒋家沟次降水中  $\delta^{18}\text{O}$  与次降雨量之间的关系

#### 4.4 降水对地下水的补给

表 1 为 2009 年 8 月 4 日和 2010 年 8 月 20 日全流域泉水中的同位素浓度(No. 1—No. 14 为 2009 年 8 月 4 日样品, No. 15—No. 20 为 2010 年 8 月 20 日样品),从表中可以看出,相同时间内流域内地下水中

表 1 蒋家沟流域地下水同位素浓度分布

编号	经度/(°)	纬度/(°)	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	编号	经度/(°)	纬度/(°)	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
1	103.190	26.247	-92.27	-12.17	11	103.176	26.268	-90.27	-12.17
2	103.184	26.226	-88.44	-10.78	12	103.185	26.268	-92.53	-12.83
	103.207	26.232	-91.06	-11.36	13	103.199	26.229	-91.38	-12.79
4	103.188	26.227	-89.53	-11.77	14	103.193	26.238	-92.66	-12.89
5	103.204	26.267	-91.52	-12.60	15	103.190	26.247	-85.86	-11.51
6	103.185	26.226	-87.80	-12.22	16	103.184	26.226	-77.38	-8.73
7	103.201	26.230	-90.98	-12.72	17	103.204	26.267	-74.90	-8.14
8	103.194	26.238	-92.33	-12.62	18	103.199	26.229	-87.62	-12.70
9	103.177	26.274	-95.42	-13.26	19	103.176	26.268	-82.49	-10.09
10	103.202	26.265	-90.83	-11.86	20	103.207	26.232	-86.85	-11.40

## 5 结论

(1) 蒋家沟流域的汛期降雨占全年降雨的 65% 以上,日降雨频率服从幂指数分布  $y=0.0301x^{-1.0197}$ 。

(2) 通过分析蒋家沟 2010 年降水氢氧同位素组成特征,得到蒋家沟当地大气降水线方程为  $\delta\text{D}=7.1086\delta\text{O}^{18}-14.22$ ,截距与我国大气降水线相比偏小,这与研究区地处内陆干热河谷、空气湿度低、降水过程中经过较强的不平衡蒸发有关。降水中氕盈余  $d$  值受空气湿度影响较大:七月中旬之前气候干燥, $d$  值均为正值;七月中旬到八月中旬之间,空气湿度相对较大, $d$  值减小,为负值;八月中旬之后,空气湿度重新减小, $d$  值增大。

(3) 由于山区降雨的特殊性,该地区同位素的高程效应不明显。降雨中  $\delta^{18}\text{O}$  浓度并非随着海拔升高而减小,相反,海拔最低的陈家梁子反而  $\delta^{18}\text{O}$  浓度最低,而海拔最高的蚂蚁坪站  $\delta^{18}\text{O}$  浓度最高。同一场降雨中, $\delta^{18}\text{O}$  浓度随着降雨时间的持续和累积降雨量

的增加而逐步减小;次降雨中  $\delta^{18}\text{O}$  与降雨量呈负相关变化趋势,降水量越大,降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  贫化越严重,而降水量小则  $\delta^{18}\text{O}$  呈富集趋势。

的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  浓度相对一致,随空间变化影响不大,这说明蒋家沟流域的地下水水量来源相对比较单一,主要来源于降水。

相比于空间上地下水同位素浓度分布,不同时间的地下水内同位素浓度变化较大,这一方面是受到补给地下水的降水中稳定同位素浓度有所差异的影响,另一方面则是受到不同蒸发条件的影响。从图 4 可以看出,地下水中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的关系式位于当地大地降水线左上方,相交点即为降水补给地下水时的氢氧同位素浓度,而在入渗至地下水之后,随着当地蒸发作用的影响, $\delta^{18}\text{O}$  会相应减小,氕盈余逐渐增大。即便如此,地下水的氢氧同位素浓度变化也在一定范围之内,且各点的值呈一定的线性关系。因此,如果地下水样品的时间序列足够长,可分析不同地点地下水同位素在降水之后的富集过程,进而研究蒋家沟的地下水同位素时空分布。

(4) 蒋家沟流域内地下水中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  浓度随空间变化不大,且与降雨中稳定同位素的变化有线性关系,说明蒋家沟流域的地下水水量来源相对比较单一,主要来源于降水。

#### 参考文献:

- [1] 江玉红,韦方强,徐晶,等. 泥石流区域预报中的预报降水处理[J]. 山地学报,2008,26(3):376-382.
- [2] Dansgaard W. The abundance of  $^{18}\text{O}$  in atmospheric water and water vapour[J]. Tellus,1953,5(4):461-469.
- [3] Kendall C, McDonnell J J. Isotope Tracers in Catchment Hydrology[M]. Amsterdam:Elsevier,1998.
- [4] Araguás A L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmosphere moisture[J]. Hydrol. Process,2000,14(8):1341-1355.

(下转第 90 页)

控制所致;自 2004 年起,水土保持治理效益整体呈增长趋势,说明秦岭地区各项措施已经开始发挥功效,生态效益越来越好,且稳步向良性发展,有利于该区域生态功能的改善。

(3)三种方法相结合用于水土保持生态治理效益评价中,不但可以得出一定的评价分值,还可以根据实际需要和国家规定进行评价等级划分,评价结果与实际情况相符合,证明该方法体系的科学可行性。

在今后的水保措施工作部署中,应加大力度确保坝地面积、治理面积和水土保持林面积的增加,同时也应加强其他水保措施,加快数据库建设和信息资源共享平台建设,加强秦岭生态环境保护的科学研究,加强水资源保护、生物多样性保护、水土保持和生态恢复等科研工作,实现对秦岭生态保护工作成效的动态变化趋势的科学分析和预测,可为区域水土保持措施有效开展提供科学的理论依据,有利于秦岭生态功能区水土保持治理工作的综合管理与宏观调控。

#### 参考文献:

- [1] 王筱明.生态位适宜度评价模型在退耕还林决策中的应用[J].农业工程学报,2008,23(8):113-116.
- [2] 王晓峰,张晖,董小平,等.南水北调中线工程陕西水源区生态环境质量综合评价[J].水土保持通报,2010,30(3):230-232,236.
- [3] 胡春宏,陈建国,孙雪岚,等.黄河下游河道健康状况评价与治理对策[J].水利学报,2008,39(10):1189-1196.
- [4] 张光辉,土壤侵蚀模型研究现状与展望[J].水科学进展,2002,13(5):389-396.
- [5] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York:McGraw Hill, Inc. 1980:22-71.
- [6] 王筱明.生态位适宜度评价模型在退耕还林决策中的应用[J].农业工程学报,2008,23(8):113-116.
- [7] 吴旭,王绪本,阚瑗珂,等.基于层次分析法的流域生态决策评价系统[J].成都理工大学学报:自然科学版,2011,38(2):126-131.
- [8] 厉彦玲.基于灰色聚类分析方法的生态环境质量综合评价模型[J].测绘科学,2007,32(5):77-79.
- [9] Yuan J L, Zhong L. The Dynamic Grey Radial Basis Function Prediction Model and Its Applications[C] // Proceeding of IEEE ICICIC06,2006.
- [10] 邓聚龙.灰预测与灰决策[M].修订版.武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [11] Lin Y, Liu S F. A systemic analysis with data(II)[J]. International Journal of General Systems(UK),2000,29(6):1001-1013.
- [12] 刘斌,刘思峰,翟振杰,等.GM(1,1)模型时间响应函数的最优化[J].中国管理科学,2003,11(4):54-57.
- [13] 朱明润,乔明叶,梁士奎,等.改进的TOPSIS模型在污水灌溉安全性评价中的应用[J].长江科学院院报,2010,27(8):25-28.
- [14] 方崇,苏超,黄伟军.基于信息熵大型灌区农业旱情的TOPSIS综合评价[J].中国农村水利水电,2011(5):74-76,79.
- [15] 胡良军,张晓萍,杨勤科,等.黄土高原区域水土流失评价数据库的建立[J].水利学报,2002,33(1):81-85.
- [5] Welker J M. Isotopic(<sup>18</sup>O) characteristics of weekly precipitation collected across the USA: an initial analysis with application to water source studied[J]. Hydrol. Process,2000,14(8):1449-1464.
- [6] 王仕琴,宋献方,肖国强,等.基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J].水科学进展,2009,20(4):495-501.
- [7] Soulsby C, Malcolm R, Helliwell R, et al. Isotopic hydrology of the Allta a' Mharcaidh catchment, Cairngorms, Scotland: implications for hydrological pathways and residence times[J]. Hydrol. Process,2000,14(4):747-762.
- [8] Rains M C, Mount J F. Origin of shallow ground water in an alluvial aquifer as determined by isotopic and chemical procedures[J]. Ground Water,2002,40(5):552-563.
- [9] 郭晓军.泥石流流域蒋家沟水文特性初步研究[D].成都:中科院成都山地灾害与环境研究所,2010.
- [10] 杜榕桓,康志成,陈循谦,等.云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M].重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1987.
- [11] 刘进达,赵迎昌,刘恩凯,等.中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J].勘察科学技术,1997(3):34-39.
- [12] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus,1964,16(4):436-468.
- [13] 王恒纯.同位素水文地质学概论[M].北京:地质出版社,1991.

(上接第 85 页)