

# 三峡库区典型小流域降雨因子对产流的影响分析

涂恩强<sup>1,2</sup>, 廖晓勇<sup>1</sup>, 陈治谏<sup>1</sup>, 王海明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 以三峡库区万州区陈家沟的 2 条支沟为研究对象, 通过选取十几场典型次降雨和相对应的次洪水资料, 首先对径流资料进行洪水场次的划分, 然后采用灰色关联分析法和相关关系法分析了陈家沟 2 条支沟的径流深度和洪峰流量分别对降雨特征因子的响应。结果表明, (1) 通过关联度排序, 径流深度的主导因素是降雨量  $P$  和复合因子  $PI$  (即降雨量和平均降雨强度的复合因子); (2) 对比 2 条邻近支沟的关联度排序, 降雨特征因子对径流深度、洪峰流量的灰关联度不完全相同, 但降雨特征因子对径流深度、洪峰流量的影响也具有的一些共同的趋势, 峰值降雨强度 ( $I_{60}$ ) 和降雨量的共同作用对三峡库区丘陵区的径流量的大小影响较明显, 复合因子  $PI$  对洪峰流量的贡献较大。

**关键词:** 灰关联分析; 降雨特征; 径流; 分割基流; 三峡库区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)05-0007-05

中图分类号: S157

## Effects of Rainfall on Runoff from a Small Watershed in Three Gorges Reservoir Area

TU En-qiang<sup>1,2</sup>, LIAO Xiao-yong<sup>1</sup>, CHEN Zhi-jian<sup>1</sup>, WANG Hai-ming<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Two branch gullies of Chenjiagou, Wanzhou District in the Three Gorges Reservoir area were taken as the study object and the correlation of rainfall factor with runoff depth and peak flood amount was studied by grey relational analysis and correlative relationship. The data of over 10 typical rainfall events and the data of runoff in the small watershed firstly were processed by the line cutting method of base-flow separation. Results showed that by grey relation grade, the main influencing factors of runoff depth were found to be the rainfall amount ( $P$ ), and compound factor ( $PI$ , the composite of rainfall amount and averaged rainfall intensity). In comparison of the grey relation grades for the two neighboring branch gullies, the grey relational grades of runoff depth responded to rainfall were different, but they had some common trends: the combined effect of peak rainfall intensity ( $I_{60}$ ), and rainfall had a noticeable impact on runoff in the Three Gorges Reservoir area and the main influencing factor of peak flood amount was the compound factor ( $PI$ ).

**Keywords:** grey relational analysis; rainfall characteristics; runoff; base-flow separation; Three Gorges Reservoir area

径流是流域水循环的基本环节, 在整个流域系统中是最为活跃的因素。径流的变化直接影响着防洪、灌溉、航运和发电等工程设施, 因而研究径流的产生有助于人类开发利用水资源。随着三峡工程投入使用, 库区的水资源安全和防洪任务都十分艰巨。重庆市万州区地处三峡腹心地带, 是三峡库区面积最大、

长江沿岸线最长的地区, 而陈家沟小流域是万州地区典型的紫色土丘陵区, 有必要探讨三峡库区典型小流域降水及径流的特征, 以及对降水径流关系变化的特征进行深入分析。

流域水文系统是一个十分复杂的系统, 其系统内外与环境的作用也是一个综合、复杂的过程。一个流

收稿日期: 2010-03-10

修回日期: 2010-04-09

资助项目: 中国科学院西部行动计划项目“三峡库区水土流失与面源污染控制示范”(KZCX2-XB2-07); 中国科学院成都山地所前沿项目“西南典型山区 21 世纪新山区农村发展模式研究”(1100001007); 国务院三建委办公室资助项目“三峡库区小流域水土保持观测研究与万州陈家沟小流域监测研究”; 中国科学院创新工程重大项目“重大工程生态环境效应遥感监测与评估”

作者简介: 涂恩强(1985—), 男(汉族), 四川省成都市人, 硕士研究生, 主要从事区域发展、流域生态环境研究。E-mail: teq460@163.com。

通信作者: 廖晓勇(1971—), 男(汉族), 四川省自贡市人, 博士, 副研究员, 从事土地资源开发利用、环境退化与生态恢复研究。E-mail: liaoxiong@163.com。

域的降雨过程,因其降雨形式的不同,造成径流形成的过程也各有差异<sup>[1-2]</sup>。有研究表明<sup>[3]</sup>,长江的径流量和降水量关系密切,长江绝大部分流域的径流量由降雨补给,而其变化量也主要受降雨量的多少控制。史玉虎<sup>[4]</sup>等人多年观察分析端坊溪小流域(三峡库区内)的降雨和径流,研究发现该小流域降雨年际变化是影响径流年际变化的主要因素。但是这些研究的时间尺度都是长时间的,目前还没有文献涉及到短时间尺度的降雨—径流关系。

灰色系统是指部分信息已知,部分信息未知或非确知的系统<sup>[1]</sup>。流域水文系统具有很多不确定性和复杂性,可以看成是灰色系统,因而对于流域中的水循环系统变量及其影响分析可以采用灰色系统关联分析方法。灰关联分析(GRA)是1984年邓聚龙<sup>[5]</sup>针对行为、态势和边界关系的分析提出的。GRA对于那些行为机制信息不完备、行为数据很稀少和其固有内涵又不清楚的对象之间的关系进行分析是一种行之有效的方法<sup>[6]</sup>。

灰关联分析方法对系统分析的实质是进行多个系统的多个灰离散度函数间接近度的序化分析<sup>[1]</sup>。灰关联分析具有以下特点<sup>[6]</sup>:(1) 少数据(每一序列可以少到3个数据);(2) 不必考虑数据分布;(3) 计算简便。此外,灰关联分析作为一个系统的发展变化态势的度量方法,非常适合动态的历程分析。基于以上几点,本文采用了灰色关联法判断三峡库区典型小流域次洪水总径流深和洪峰流量与降雨特征因子的关系,此外,本文还通过相关关系法分析了径流和降雨特征的关系,以及对比分析了2种方法计算的结果。径流量和降雨特征因子的资料选取自万州五桥河流域陈家沟2009年4—7月典型降雨所观测的结果。

## 1 材料与方法

### 1.1 小流域概况

戴家沟和杨家沟属于陈家沟上游的2条小支沟,陈家沟小流域位于五桥河流域内,五桥河流域地处重庆市万州区,五桥河属于长江一级支流。戴家沟、杨家沟的流域面积分别为0.68 km<sup>2</sup>和0.54 km<sup>2</sup>,主沟长分别为1 206 m和1 009 m,沟道比降分别为141.2‰和90.4‰,2个小流域中0°~5°,5°~10°,10°~20°,20°~30°,30°~40°和大于40°的坡度面积占各条支沟的面积比例如图1所示。戴家沟位于长岭镇乔家村9组,地势自东向西倾斜;杨家沟位于长岭镇乔家村5组,地势自南向北倾斜。这2个小流域地貌以浅、中丘为主,出露侏罗系沙溪庙组紫色砂泥岩地层,岩层倾角15°~30°,土壤为灰棕紫泥。流域森林覆盖率不

足22.1%,地带性森林植被为亚热带常绿阔叶林,但流域内原生植被数量少,现有植被以次生林被和灌丛草被为主,主要有马尾松、石栎、青冈、黄葛树、大叶香樟、柏木、刺槐、香椿、大叶桉等树种,林下灌丛以黄荆、马桑、毛黄栌、荚迷和胡枝子等为主,草本以野胡萝卜、白茅、蕨草、苔草和飞蓬等为主,经济树种以柑橘、梨、枇杷为主,农作物以玉米、小麦、红苕、水稻、油菜和豆类为主。流域年平均气温17℃,年平均降雨量为1 100 mm,其中4—9月降雨量占全年降雨量的79.2%。小流域内土地利用类型以耕地、林地、园地为主。

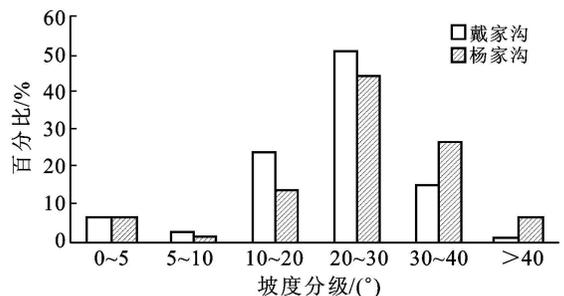


图1 戴家沟和杨家沟坡度分级

### 1.2 观测项目与方法

在戴家沟和杨家沟小流域沟口处建有支沟测流堰,并在2个流域制高点分别设置了2个雨量观测点。采用数字水位计(WXZ-1型)监测2条支沟流量的变化,采用翻斗式自记雨量计(JDZ-1)观测记录降雨量,同时在台站设有虹吸式自记雨量计,记录降雨过程并校正野外2个自记雨量计的数据。用Microsoft Excel和SPSS软件对试验数据进行整理和常规统计分析。

本文因研究次降雨的降雨特征对径流变化的影响,需要划分降雨场次和洪水场次,且前者一定与后者相对应。洪水场次的划分涉及到分割基流,基流分割的方法有图解法、数字滤波法、时间步长法、水化学法(同位素法)、水文模型法和水量平衡法。考虑到本文研究的时间尺度为小时,以及研究地小流域的水文地质条件,本文采用直线分割法<sup>[7]</sup>(即图解法)分割基流。根据经验关系计算时间 $N(h)$ ,确定地下径流始退点 $B'$ :

$$N = 0.827A^{0.2} \quad (1)$$

式中: $A$ ——站点断面以上的流域面积(km<sup>2</sup>)。根据公式(1),可以分别求出戴家沟和杨家沟的洪峰起涨点至径流退水段转折点的时间为18 h和17.5 h。

以2009年6月19—21日的降雨—径流关系为例,如图2所示,直线 $AB'$ 以下为基流,而19和20日降雨所形成的径流量为 $AB'$ 线以上和曲线 $ACB'$ 所夹面积,即径流总量 $W$ ,除以站点控制面积 $F$ ,即可得到径流深度 $R$ 。

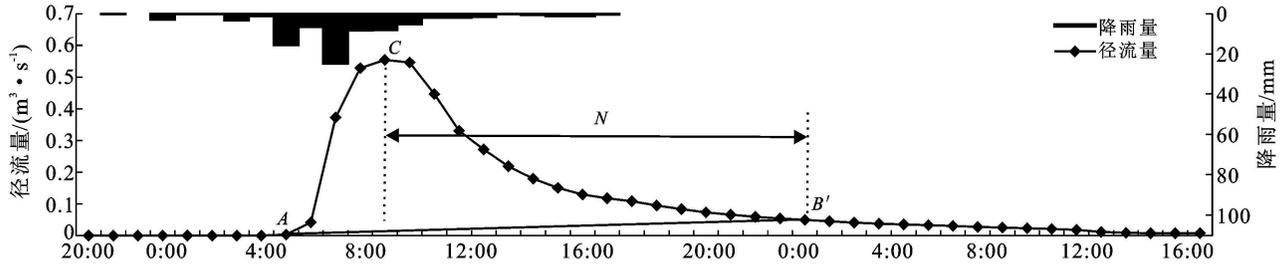


图 2 2009 06 19—21 日降雨—径流关系

1.3 研究方法

本文基于 Matlab 软件实现对小流域降雨因子对产流影响的灰关联分析<sup>[8]</sup>。灰关联分析的步骤如下<sup>[6]</sup>。

(1) 构造特征值原始数列。由于灰色关联分析方法对数据量要求不高,且数据不需要服从某个典型的概率分布,因此选取了 2009 年 4—7 月以大雨、暴雨为主的 10 场次以上降雨看作一个灰色系统(表 2)。

分别将各次降雨产生的径流深度  $R$  (mm) 和洪峰流量 ( $m^3/s$ ) 作为参考数列,各次降雨对应的降雨特征因子作为比较数列,各降雨因子依次是降雨量  $P$  (mm),降雨历时  $t$  (h),平均雨强  $I_{AVE}$  (mm/h),复合因子  $PI$  (mm·mm/h),最大 10 min 雨强  $I_{10}$  (mm/h),复合因子  $PI_{10}$  (mm·mm/h),最大 30min 雨强  $I_{30}$  (mm/h),复合因子  $PI_{30}$  (mm·mm/h),最大 60min 雨强  $I_{60}$  (mm/h),复合因子  $PI_{60}$  (mm·mm/h),雨强递减系数<sup>[9]</sup> ( $mm^3/h^3$ )。此外,还对所选的次降雨过程,进行了径流深度与降雨特征因子的相关分析。

(2) 原始数列无量纲处理。由于系统中各因素的物理意义不同,因而各数列具有不同的量纲,且有些数值的数量级也不同,为了使各因素具有可比性,保证得出正确的结果,因此,应对原始数据采取相应的变换。根据以上指标数据的特征特性,本研究选用均值化变换<sup>[10]</sup>,即用各指标的平均值去除该指标中的全部数据,得到以 1 为中心,无量纲的新数列。

(3) 灰关联系数计算。灰关联系数是点与点间比较测度。基于灰关联公理与灰关联差异信息空间,

并考虑其领域性与规范区间性,灰关联系数的计算公式如下:

$$\gamma[x_0(k), x_i(k)] = \frac{x(\min) + \zeta x(\max)}{\Delta_{oi}(k) + \zeta x(\max)} \quad (2)$$

式中:  $x(\min) = \min_i \min_k \Delta_{oi}(k)$  —— 差异信息空间中下环境参数;  $x(\max) = \max_i \max_k \Delta_{oi}(k)$  —— 差异信息空间中上环境参数;  $\zeta \in [0, 1]$  —— 分辨系数。

(4) 灰关联度计算。灰关联度是序列与序列之间的比较测度。聚集灰关联系数  $\gamma(x_0(k), x_i(k))$  在各点  $k=1, 2, \dots, n$  的值,得灰关联度算式如下:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma[x_0(k), x_i(k)] \quad (3)$$

(5) 灰关联序的排定。把关联度从小到大依次排序即为灰关联序。通过排定关联序可以看出比较序列对参考序列的影响大小排序,从而对系统内因素间的影响性质进行定量分析。

2 结果与分析

2.1 月降雨和径流特征分析

从表 1 可以看出,戴家沟和杨家沟 2 条支沟的降雨量的大小差异不是很大,而且两支沟的流域面积相差很小,但是相对应的径流量的值有些差异很大,这也许与 2 条支沟的土地利用/植被覆盖的不同造成的,从 2 支沟径流系数的差异也可以反映出 2 条支沟降雨损失的不同,但这里涉及到两支沟下垫面的差异,如植被截留、填洼(特别是 4—7 月份水田灌水区)以及地形地貌特征,其具体原因还有待进一步分析。

表 1 2009 年戴家沟和杨家沟支沟月降雨与径流深度的关系

月份	支沟名	降雨量/mm	径流系数	月份	支沟名	降雨量/mm	径流系数
4	戴家沟	113.6	0.12	6	戴家沟	215.6	0.26
	杨家沟 <sup>1</sup>	121.4	0.25		杨家沟	201.6	0.30
5	戴家沟	189.4	0.34	7 <sup>④</sup>	戴家沟	137.2	0.32
	杨家沟 <sup>1</sup>	180.6	0.27		杨家沟	129.8	0.23

注: <sup>1</sup> 缺 4 月 30 日 19:00 至 5 月 8 日杨家沟测流堰水位数据; <sup>④</sup> 7 月份降雨和水位数据截止日期为 25 日。

根据多次野外观测,在陈家沟,只有降雨达到一定程度,小流域的汇水作用才明显,测流堰的水位变

化也才明显,同时,有研究表明<sup>[11]</sup>,在三峡紫色土地区,一年中土壤侵蚀的大部分由数次雨强较大的暴雨

造成,因此,选择大的降雨,对进一步研究径流对小流域产沙的影响也有重要作用,因此本文选取了 10 场以上典型次降雨,根据降水强度分级标准<sup>[2]</sup>进行分级,降水强度大都为大雨和暴雨(表 2)。

表 2 2 支沟降水强度分级的统计

支沟	总场次	暴雨次数	大雨次数	中雨次数
戴家沟	13	9	3	1
杨家沟	10	6	3	1

## 2.2 小流域降雨因子对产流的灰关联分析

2.2.1 分辨系数  $\zeta$  的确定 分辨系数取值不同,关联系数曲线也就具有不同特征,这将影响关联度的排序,造成分析出现错误的结果。因此,本研究遵循分辨系数的取值原则<sup>[12]</sup>对分辨系数进行选择,通过分辨系数的取值准则<sup>[13]</sup>,获取具体分辨系数的值。经计算,戴家沟和杨家沟以径流深度和洪峰流量为参考数列的分辨系数取值见表 3,这样使分辨系数的取值更具有客观依据和适应性。

大多数文献对分辨系数都取 0.5,为了便于比较分辨系数取值的不同造成分析结果不同,将  $\zeta = 0.5$

和  $\zeta = 0.3$  时杨家沟径流深度和降雨特征因子的灰关联序与表 4 中作比较。

表 3 灰关联分析中分辨系数的取值

项目	参考数列	$\zeta$ 值
戴家沟	径流深度	0.2
	洪峰流量	0.2
杨家沟	径流深度	0.3
	洪峰流量	0.2

从表 4 中可以看出,分辨系数取值小时,关联度也随之变小,当  $\zeta = 0.3$  时,关联度分布区间大于  $\zeta = 0.5$  时的,几乎前者大于后者 2 倍,这表明  $\zeta = 0.3$  时可以有效地抑制  $x(\max)$  的影响。另外,分辨系数取值的不同,最主要的影响还是灰关联度的排序,从表 4 可以看出,  $\zeta$  值的不同,其灰关联序有着很大差别,降雨历时  $t$  在  $\zeta = 0.3$  时排在最后,而在  $\zeta = 0.5$  时却排在前列,如何选择  $\zeta$  对分析结果会造成很大的不同。降水历时指一场降水自始至终所经历的时间,不表征雨量和雨强的大小,因此,降水历时应该对径流的影响程度较小,而不会在所有降雨特征因子中排列靠前,所以如果选择  $\zeta = 0.5$  则会影响分析结果。

表 4 分辨系数取值不同对分析结果的影响

$\zeta$ 值	降雨特征因子对径流深度灰关联序(杨家沟)	关联度分布区间
0.3	$PI > P > PI_{60} > I_{10} > PI_{30} > I_{30} > I_{10} I_{60} I_a > PI_{10} > I_{60} > I_{AVE} > t$	[0.716 8, 0.568 1]
0.5	$P > t > PI_{60} > PI_{30} > PI_{10} > PI > I_{60} > I_{30} > I_{10} I_{60} I_a > I_{10} > I_{AVE}$	[0.783 9, 0.709 3]

### 2.2.2 灰关联度的排序

(1) 降雨特征因子对径流深度的灰关联度。表 5 是降雨特征因子对径流深度的灰关联度,对它们从大到小进行排列,即可以得到 2 支沟不同的灰关联序:在戴家沟,  $P > PI > I_{60} > I_{30} > PI_{60} > I_{10} > t > I_{AVE} > PI_{10} > PI_{30} > I_{10} I_{60} I_a$ ;在杨家沟,  $PI > P > PI_{60} > I_{10} > PI_{30} > I_{30} > I_{10} I_{60} I_a > PI_{10} > I_{60} > I_{AVE} > t$ 。

通过排定灰关联序,可以看出,在戴家沟支沟,降雨量因子  $P$  与径流深度的关联度最大,说明降雨量是与径流的发展趋势最接近的因素,即降雨量对径流系数(或径流量)大小的影响最大,降雨量是戴家沟产生径流的最重要的降雨因子;而雨强递减系数与径流深度的关联度最小,说明雨强递减系数是与戴家沟的径流发展趋势最不接近的因素。而在杨家沟,复合因子  $PI$  与径流深度的关联度最大,说明复合因子  $PI$  是与径流的发展趋势最接近的因素,即  $PI$  对径流系数(或径流量)大小的影响最大,  $PI$  是杨家沟产生径流的最重要的降雨因子;而降水历时  $t$  排在该灰关联序的最后,说

明  $t$  与杨家沟的径流的发展趋势最不接近。

由于 2 支沟地理位置接近且大小也相近,土壤类型也同为紫色土和水稻土,降雨特征因子对径流深度的影响也有一些共同的趋势。从灰关联序中,可以看出 2 支沟对径流的主导因素是降雨量  $P$  和复合因子  $PI$ ,这与三峡库区产流方式为蓄满产流有关,雨量和雨强共同作用对蓄满产流起决定作用。此外,2 支沟还有一个共同特点是,即  $PI_{60} > PI_{30} > PI_{10}$ ,虽然在戴家沟  $PI_{10} > PI_{30}$ ,但是二者的数字相差并不是很大,姚志君<sup>[14]</sup>等人将 10 min 最大雨强( $I_{10}$ )作为瞬时降雨强度,60 min 最大雨强( $I_{60}$ )作为峰值降雨强度,因此,可以认为在雨季,峰值降雨强度和降雨量的共同作用影响三峡库区丘陵区的径流量的大小较明显,这点也符合蓄满产流由雨量和雨强共同决定的特点。

但从表 5 可以发现,2 支沟的径流深度与降雨特征因子之间的灰关联度并不是很一致,说明径流深度与降雨条件有关外,还取决于下垫面的状况,同时还受前期降雨量的影响。

表 5 降雨特征因子对径流深度的关联度

项目	$P$	$t$	$I_{AVE}$	$PI$	$I_{10}$	$PI_{10}$	$I_{30}$	$PI_{30}$	$I_{60}$	$PI_{60}$	$I_{10}I_{60}I_a$
戴家沟	0.780 2	0.670 6	0.647 4	0.729 1	0.679 0	0.644 1	0.706 0	0.644 0	0.712 2	0.687 2	0.593 2
杨家沟	0.707 4	0.568 1	0.612 3	0.716 8	0.666 0	0.652 5	0.662 5	0.664 5	0.630 5	0.672 8	0.653 4

(2) 降雨特征因子对洪峰流量的灰关联度。表 6 是降雨特征因子对洪峰流量的灰关联度, 对它们从大到小进行排列, 即可以得到 2 条支沟不同的灰关联序: 在戴家沟,  $P > I_{60} > PI > PI_{60} > I_{30} > I_{AVE} > t > PI_{30} > I_{10} > PI_{10} > I_{10}I_{60}I_a$ ; 在杨家沟,  $PI > I_{30} > I_{10} > PI_{60} > I_{10}I_{60}I_a > PI_{30} > I_{60} > PI_{10} > P > I_{AVE} > t$ 。

通过对降雨特征因子对洪峰流量的灰关联度的排序, 复合因子  $PI$  对 2 支沟的洪峰流量都有明显的贡献作用, 在杨家沟表现得更加明显, 其贡献程度排

在第一的位置; 降水历时同样排在靠后的位置, 对洪峰流量的影响程度最小。

由于本研究选择的次降雨多为大雨和暴雨, 其雨型较多为突发型, 相对应的洪水过程中洪峰涨落迅速, 退水过程较长, 因此, 戴家沟的  $I_{60}$  和杨家沟的  $I_{30}$  与洪峰流量的发展趋势相接近, 但 2 支沟的最大雨强的时间不同, 也许是由于 2 支沟下垫面的不同, 造成 2 支沟的洪峰流量对不同时间的最大雨强的响应程度不一致。

表 6 降雨特征因子对洪峰流量的关联度

项目	$P$	$t$	$I_{AVE}$	$PI$	$I_{10}$	$PI_{10}$	$I_{30}$	$PI_{30}$	$I_{60}$	$PI_{60}$	$I_{10}I_{60}I_a$
戴家沟	0.726 1	0.642 2	0.648 7	0.695 2	0.633 2	0.607 1	0.654 4	0.640 2	0.708 8	0.677 1	0.539 5
杨家沟	0.644 6	0.512 9	0.611 5	0.783 3	0.724 9	0.646 3	0.728 8	0.680 9	0.673 1	0.724 3	0.697 6

### 2.3 径流深度与降雨特征因子的相关分析

由于研究样本量较少, 因而分别对径流量、径流系数和降雨特征的数据进行 Shapiro—Wilk 检验的结果表明, 大多数变量都不服从正态分布, 所以本研究采用非参数方法(Spearman 方法)进行径流深度和降雨特征因子的相关分析(表 7)。

通过表 7, 可以看出, 2 支沟的径流深度都与降雨量之间具有高度正相关关系, 这与灰关联分析的结果一致, 此外, 这 2 条支沟的径流深度也都与复合因子

$PI, PI_{60}$  具有显著的正相关关系, 但其它降雨特征因子与径流深度的关系不很显著, 如果同样排列相关系数值, 其顺序不完全一样, 究其原因, 是因为 2 种方法分析的原理不一样造成的, 相关分析法仅考虑了 2 变量之间是否存在线性关系, 而灰关联分析法则将是比较数列(降雨特征因子)与参考数列(径流系数)在各时点的差值进行求和平均得到关联度, 考虑某一因子的同时也考虑到了其它因子的影响。

表 7 降雨特性单因子指标与径流深度的相关系数

支沟	降雨量	历时	$I_{AVE}$	$PI$	$I_{10}$	$PI_{10}$	$I_{30}$	$PI_{30}$	$I_{60}$	$PI_{60}$	$I_{10}I_{60}I_a$
戴家沟	0.747**	0.319	0.335	0.610*	0.576*	0.577*	0.435	0.549	0.429	0.588*	0.401
杨家沟	0.782**	0.224	0.576	0.636*	0.430	0.539	0.511	0.527	0.576	0.648*	0.600

注: \*\* 表示在 0.01 水平上极显著; \* 表示在 0.05 水平上显著。

## 3 结论

通过对陈家沟小流域 2 条支沟的 2009 年数场降雨和径流资料的灰关联分析, 这 2 条支沟的主导因子都为降雨量和复合因子  $PI$ , 其余降雨因子对不同支沟的产流的作用都各不相同。降雨特征因子对洪峰流量的灰关联排序, 单因子  $I$  对洪峰流量的贡献程度都较大, 但其最大降雨的时间不一样。

流域对降雨具有垂向运行和侧向运行的再分配的功能<sup>[2]</sup>, 由于本研究通过测量了小流域出口断面的流量变化, 进行洪水场次的划分, 从而有针对性地分

析了降雨特征因子对本次降雨产生形成的径流量大小的影响作用。但径流形成过程是一个错综复杂的物理过程, 它取决于降雨特性和下垫面结构, 本文只是重点讨论了前者, 因而研究成果具有一定的局限性。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 夏军. 灰色系统水文学: 理论、方法及应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000: 24-27.
- [2] 黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 81-85.

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 高雪松, 邓良机, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[ J ]. 水土保持学报, 2005, 19( 2 ): 53-56.
- [ 2 ] 刘晓宏, 郝明德. 长期种植苜蓿对土壤氮素营养的作用[ J ]. 中国农业生态学报, 2001, 9( 2 ): 82-841.
- [ 3 ] 张国盛, 黄高宝, 张仁陟, 等. 种植苜蓿对黄绵土表土理化性质的影响[ J ]. 草业学报, 2003, 12( 5 ): 88-931.
- [ 4 ] 杨玉海, 蒋平安, 艾尔肯, 等. 种植苜蓿对土壤肥力的影响[ J ]. 干旱区地理, 2005, 28( 2 ): 248-251.
- [ 5 ] 曹永红, 贾志宽, 韩庆芳. 苜蓿生长年限对其产量及土壤性状的影响[ J ]. 干旱地区农业研究, 2008, 26( 3 ): 104-107.
- [ 6 ] 贾志清. 晋西北黄土丘陵沟壑区典型灌草植被土壤水分动态变化规律研究[ J ]. 水土保持通报, 2006, 26( 1 ): 10-15.
- [ 7 ] 王鑫, 刘建新, 雷蕊霞, 等. 不同种植年限苜蓿土壤熟化过程中腐殖质性质的研究[ J ]. 水土保持通报, 2008, 28( 2 ): 98-102.
- [ 8 ] 王刚, 孙广玉. 不同紫花苜蓿品种光合能力的比较[ J ]. 东北林业大学学报, 2007, 35( 4 ): 19-21.
- [ 9 ] 张庆霞, 宋乃平, 陈林, 等. 不同灌溉量对紫花苜蓿生长特性及生物量的影响[ J ]. 水土保持通报, 2009, 29( 2 ): 150-154.
- [ 10 ] 韩路, 贾志宽, 韩清芳, 等. 影响苜蓿产草量相关性状的通径分析[ J ]. 西北农业学报, 2003, 12( 1 ): 15-20.
- [ 11 ] 余家林. 农业多元试验统计[ M ]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [ 12 ] 许广波, 吕龙石. 影响田间持水量主要因子的通径分析[ J ]. 延边大学农学学报, 1997, 19( 4 ): 242-245.
- [ 13 ] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化[ J ]. 应用生态学报, 2005, 16( 3 ): 435-438.
- [ 14 ] 高雪松, 邓良机, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[ J ]. 水土保持学报, 2005, 19( 2 ): 53-58.
- [ 15 ] 韩路. 不同苜蓿品种的生产性能分析及评价[ D ]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [ 16 ] 曹致中. 优质苜蓿栽培与利用[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [ 17 ] 彭宏春. 柴达木盆地弃耕盐碱地紫花苜蓿生物量季节动态[ J ]. 草地学报, 2001, 9( 3 ): 218-222.
- [ 18 ] 刘明秀. 12 个紫花苜蓿品种在川西南湿热区的生产性能及生态适应性初步研究[ D ]. 雅安: 四川农业大学, 2005.
- [ 19 ] 刘明启, 孙建义, 王成章. 不同紫花苜蓿品种生产性能比较试验[ J ]. 中国饲料, 2004( 13 ): 18-21.

( 上接第 11 页 )

- [ 3 ] 林承坤, 吴小根. 长江径流量特性及其重要意义的研究[ J ]. 自然杂志, 1999, 21( 4 ): 200-205.
- [ 4 ] 史玉虎, 王栋, 潘磊, 等. 三峡库区典型流域降雨变化与径流的关系研究[ J ]. 水土保持学报, 2003, 17( 3 ): 118-120.
- [ 5 ] 邓聚龙. 社会—经济灰色系统的理论和方法[ J ]. 中国社会科学, 1984( 1 ): 47-60.
- [ 6 ] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[ M ]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 74-76.
- [ 7 ] 余钟波. 流域分布式水文学原理及应用[ M ]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [ 8 ] 宋新山, 邓伟, 张琳. MATLAB 在环境科学中的应用[ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 201-202.
- [ 9 ] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[ J ]. 水土保持通报, 1996, 16( 5 ): 1-20.
- [ 10 ] 雷铁拴, 郭瑞林, 王新海, 等. 灰色系统理论在农业上的应用[ M ]. 河南: 河南科学技术出版社, 1996: 18-28.
- [ 11 ] 许峰, 张光远. 三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究: 以等高植物篱为例[ J ]. 地理研究, 2000, 19( 3 ): 303-310.
- [ 12 ] 东亚斌, 段志善. 灰色关联度分辨系数的一种新的确定方法[ J ]. 西安建筑科技大学学报, 2008, 40( 4 ): 589-592.
- [ 13 ] 吕锋. 灰色系统关联度之分辨系数的研究[ J ]. 系统工程理论与实践, 1997, 17( 6 ): 49-54.
- [ 14 ] 姚治君, 廖俊国. 云南玉龙山东南坡降雨因子与土壤流失关系的研究[ J ]. 自然资源学报, 1991, 6( 1 ): 45-54.