

基于集对分析法的渭河中下游径流变化特征研究

李斌^{1,2}, 解建仓¹, 胡彦华², 姜仁贵¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省水利厅, 陕西 西安 710004)

摘要: 对渭河流域中下游径流的时空变化进行分析,为流域地表径流的深入研究和合理开发利用提供基础数据。利用渭河流域中下游典型水文站的实测数据,采用线性倾向法分析年径流量变化趋势,采用集对法分析径流量的空间变化特性。结果表明:20世纪70年代以来,渭河流域径流量呈现减少趋势,各站年径流量的变化趋势相似;渭河中下游各水文站年径流量空间变化上存在一定的同步性。基于集对原理的水文分析方法简单方便、结果合理,在水文水资源领域的径流空间变化特性分析研究中具有推广和应用价值。

关键词: 集对分析; 变化特性; 径流; 渭河

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0020-06

Study on characteristics of runoff change in middle and lower reaches of Weihe River based on SPA

LI Bin^{1,2}, XIE Jiancang¹, HU Yanhua², JIANG Rengui¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Department of Water Resources, Xi'an 710004, China)

Abstract: The paper analyzed the spatiotemporal characteristics of runoff in the middle and lower reaches of Weihe River basin, which could provide the basis for the depth research and rational development and utilization of water resources. It used the measuring data of typical hydrological station in the middle and lower reaches of Weihe river basin and analyzed the trend of annual runoff by using linear trend analysis, and investigated the spatial patterns of runoff by using the set pair analysis. The results showed that the runoff of Weihe River basin has presented the trend of decrease since 1970s, and the variation of annual runoff each hydrology station is similar; the variations of annual runoff in the middle and lower reaches of Weihe River has characteristics of synchronicity. The hydrological analysis method which based on set pair theory is simple and convenient, and the result is reasonable, which has promotional and application value in the study of change characteristics of runoff among the field of hydrology and water resources.

Key words: set pair analysis; variation characteristics; runoff; Weihe River

1 研究背景

近百年来,全球气候发生了显著变化,极端天气、气候事件频发广发。对于中国而言,气候变化对水资源、河川径流等产生了明显影响。分析河道径流在时间空间上的变化,对于研究径流的演变规律、合理开发利用水资源具有重要意义,国内外学者对此做了大量的研究。张建云等^[1],王金星等^[2]通过

研究发现:中国大部分江河年内径流分配十分不均匀,我国六大江河的实测年径流量总体上呈下降趋势,北方河流尤其显著;李林等^[3]、秦年秀等^[4]、赵军凯等^[5]通过研究发现长江上游、中游径流减少,下游地区径流增加;李二辉等^[6]通过研究得出黄河中上游径流量和下游径流量均呈现出减少趋势;刘二佳等^[7]、周园园等^[8]等采用多种方法分析黄河流域的窟野河、无定河的径流变化,得出窟野河、无定

收稿日期:2015-10-09; 修回日期:2015-10-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51509201、51479160、41471451); 陕西省教育厅科研计划项目(15JK1503)

作者简介:李斌(1980-),男,陕西西安人,博士研究生,高级工程师,研究方向为水利信息化。

通讯作者:解建仓(1963-),男,陕西西安人,博士后,教授,博士生导师,研究方向为水利信息化、GIS及智能决策系统。

河径流量呈持续减少趋势。黄河是中国水资源严重短缺的流域之一。作为黄河最大的支流,渭河流域水文水资源的变化引起国内学者的广泛关注。魏红义等^[9]采用 R/S 分析法对渭河流域径流序列进行了趋势分析,得出渭河流域径流具有持续下降的趋势;肖洁等^[10]研究渭河干流径流量的年际变化趋势及年内分配规律,结果发现:渭河干流的林家村、咸阳和华县等站的年径流量变化呈现极显著递减的趋势,年内径流分配规律为各阶段径流量多集中在 5-10 月;毕彩霞等^[11]采用水量平衡法定量分析气候变化和人类活动对径流量的影响,认为渭河流域径流变化主要由气候变化和人类活动引起。

水文水资源现象影响因素众多,变化极其复杂,具有很大的不确定性。我国学者赵克勤^[12]在 1989 年的全国系统理论会议上提出了集对不确定性分析方法,为不确定性分析的有关研究提供了一种新的方法,其后,很多学者把集对分析法应用于径流预测、相似流域选择、水文预测模型优劣的评估等研究中。丁小玲等^[13]应用基于集对分析法,考虑径流等级划分的模糊性和径流的年内分布特性,提出模糊化径流分级标准;王红芳等^[14]提出了基于集对原理的年径流状态时序特性分析法;郭旭宁等^[15]提出了确定供水水库群联合调度规则的集对分析新方法,并验证了采用集对分析方法确定供水水库群联合调度规则的有效性和合理性;金菊良等^[16]提出基于集对分析的水资源相似预测模型,并进行了实例研究。以上研究实例表明,集对分析法(Set Pair Analysis, SPA)在水文水资源领域的研究中有着较广泛的应用,本文以渭河流域 5 个典型水文站为研究对象,运用线性倾向法、集对分析法,分析渭河年径流量变化趋势及特性,以期为渭河流域水资源合理开发提供参考。

2 研究区概况

渭河是黄河的第一大支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,全长 818 km,流域总面积 13.48 万 km²,在陕西省宝鸡县凤阁岭乡附近进入陕西境内,是陕西人民的母亲河、生命河^[17]。渭河横贯陕西富饶的关中平原,区内有宝鸡、咸阳、西安、铜川、渭南等大中城市和杨凌农业高新技术产业示范区、闫良飞机城等。该区是陕西经济社会的支柱,在西部地区社会经济发展中也具有十分重要的战略地位和作用。研究区及典型水文站地理位置如图 1 所示。

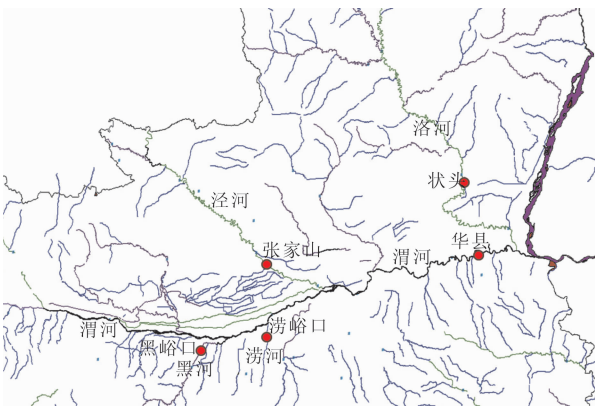


图 1 研究区在渭河流域的位置及研究区内水文站点分布

3 数据与方法

3.1 资料数据

根据渭河主流和支流的分布情况,考虑资料的可靠性,选择观测历时长、资料精度较高的水文站。本文选取渭河及支流上黑峪口、涝峪口、张家山、状头、华县 5 个水文站进行分析。黑峪口、涝峪口位于渭河右岸支流黑河、涝河;张家山、状头位于渭河左岸支流泾河、洛河;华县站位于渭河干流。5 个水文站基本资料见表 1。

表 1 渭河及支流水文站基本资料

站名	水系	控制面积/km ²	年平均径流量/亿 m ³	起止时间	时间长度/a
黑峪口	黑河	1481	5.66	1950-2008	59
涝峪口	涝河	347	1.22	1950-2008	59
张家山	泾河	43216	13.09	1950-2008	59
状头	洛河	25645	6.73	1950-2008	59
华县	渭河	106498	68.80	1950-2008	59

数据资料来自陕西省江河水库管理局刊印的《陕西省渭河流域防汛技术手册》及历年陕西省水资源公报,水文年鉴等资料。

3.2 研究方法

采用线性倾向估计法、滑动平均法、累计距平法等分析各水文站的年径流量变化趋势;采用集对分析法进行径流空间变化特性分析。

(1)线性倾向估计法。用 y_i 表示样本量为 n 的变量,用 x_i 表示所对应的时间,建立 y_i 和 x_i 之间的一元线性回归方程:

$$y_i = a + bx_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

它的含义是用一条合理的直线表示 y 与时间 x 之间的关系。系数 a, b 可以通过最小二乘法进行估计。

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3)$$

式中: $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 分别为样本 y_i 和 x_i

的算术平均值。根据式(1) 可进行序列趋势的分析。

(2) 滑动平均法。滑动平均法采用确定时间序列的平滑值来分析时间序列的变化趋势。对于样本为 n 的序列 x , 其滑动序列为:

$$y_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1}, \quad j = 1, 2, \dots, n - k + 1 \quad (4)$$

式中: k 为滑动长度, 一般取奇数, n 个数数据可以得到 $n - k + 1$ 个平滑值。经过滑动平均后, 序列中短于滑动长度的周期大大削弱, 呈现出变化趋势。

(3) 累积距平法。累积距平也是常用的由曲线直观判断变化趋势的方法。对于序列 x , 其中某时刻 t 的累积距平表示为:

$$y_t = \sum_{i=1}^t \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right), \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

将 n 个时刻的累积距平值全部算出, 绘制累积距平曲线进行趋势分析。

(4) 集对分析法。集对分析的核心是先对不确定性系统中有关联的两个集合构造集对, 再对集对某特定属性做同一性、差异性、对立性分析, 然后用联系度描述集对的同、异、反关系。

集对是指有一定联系的两个集合组成的对子。集对分析原理就是在一定的背景下, 对组成集对的两个集合 (X, Y) 的特性做同一性、差异性、对立性分析, 并用联系度表达式描述:

$$\mu_{X \sim Y} = \frac{S}{n} + \frac{F}{n}I + \frac{P}{n}J \quad (6)$$

式中: n 为集合特性的总项数; S 为同一性的个数; P 为对立性的个数; F 为差异性的个数; I 为差异不确定系数, 在 $(-1, 1)$ 区间视不同情况取值, 有时仅起差异标记作用; J 为对立系数, 在计算中 $j = -1$, 有时仅起对立标记作用。为简便, 一般令 $a = S/n$, 称为研究问题的同一度; $b = F/n$ 称为差异度; $c = P/n$ 称为对立度。式(6) 可写成:

$$\mu_{X \sim Y} = a + bI + cJ \quad (7)$$

式中: $\mu_{X \sim Y}$ 为集对 (X, Y) 之间的联系度; a, b, c 分别表示集合 X 和 Y 所呈现出的相同、相异、相反的关系, 其中, a, b, c 满足归一化条件, 且满足 $a + b + c = 1$ 。 a, b, c 集中反映出 X 和 Y 的关系结构, 表示了不确

定性关系。

河流的径流量随空间的不同而改变。集对分析法是一种不确定性分析方法, 可用于分析径流空间变化。首先将年径流量时间序列作为集合, 第一个水文站的径流量定义为集合 $X, X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 第二个水文站的径流量定义为集合 $Y, Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$, 将 X, Y 构造成集对 $H(X, Y)$ 。在此基础上, 根据元素的特征制定分类标准, 将径流量集合 X, Y 分为 3 类, 即丰, 中, 枯。根据分类标准, 对径流量集合 X, Y 各序列进行符号量化处理。接着将 X, Y 对应的符号元素进行对照, 若径流量状态处于同一级别, 符号相同, 统计其个数, 记为 S ; 若径流量状态处于相邻级别, 符号相差一级的, 定义为差异, 统计其个数记为 F ; 符号相差二级的, 定义为对立, 统计其个数记为 P 。求得联系度 $\mu_{X \sim Y}$ 。确定差异不确定系数 I ; 并将 I, J 代入式(6) 中, 求得联系度。最后, 根据联系度和联系数分析 X, Y 间的变化特征。重复上述过程, 可分析区域内水文站点径流量之间的变化关系。

4 结果分析

4.1 渭河中下游各水文站径流分析

黑峪口、涝峪口、张家山、状头、华县 5 个水文站径流量总体呈现下降的趋势, 各站年径流量的变化趋势相似。20 世纪 50、60 年代各站的径流量大于多年平均值; 70 年代各站的径流量都小于多年平均值; 80 年代各站的径流量大于多年平均值; 90 年代至今的各站径流量接近或者小于多年平均值。

图 2 为渭河中下游典型水文站年径流变化趋势。结果表明: 黑峪口多年平均径流量为 5.66 亿 m^3 , 最大值为 1983 年的 12.2 亿 m^3 , 最小值为 1997 年的 1.31 亿 m^3 ; 最大值为平均值的 2.2 倍, 最大值为最小值的 9.3 倍。涝峪口多年平均径流量为 1.22 亿 m^3 , 最大值为 1952 年的 3.55 亿 m^3 , 最小值为 1995 年的 0.24 亿 m^3 ; 最大值为平均值的 2.92 倍, 最大值为最小值的 14.7 倍。张家山站多年平均径流量为 13.09 亿 m^3 , 最大值为 1964 年的 38.82 亿 m^3 , 最小值为 1972 年的 3.22 亿 m^3 ; 最大值为平均值的 2.97 倍, 最大值为最小值的 12.7 倍。状头站多年平均径流量为 6.73 亿 m^3 , 最大值为 1964 年的 19.2 亿 m^3 , 最小值为 2006 年的 2.85 亿 m^3 ; 最大值为平均值的 2.85 倍, 最大值为最小值的 6.7 倍。渭华县站多年平均径流量为 68.80 亿 m^3 , 最大值为 1964 年的 187.6 亿 m^3 , 最小值为 1997 年的 16.83

亿 m^3 ;最大值为平均值的 2.72 倍,最大值为最小值的 11.15 倍。

黑峪口站年径流量的距平百分率在 $-77 \sim 115$; 涝峪口站年径流量的距平百分率在 $-81 \sim 182$; 张家山站年径流量的距平百分率在 $-75 \sim 197$; 状头站年径流量的距平百分率在 $-58 \sim 185$; 华县站年径流量的距平百分率在 $-76 \sim 173$ 。这些表明渭河站径流量年际变化幅度大。

4.2 径流空间的变化特性分析

分析水文变化是水文水资源系统计算、预测、评

价等工作的基础。河道的径流变化是重要的水文要素,分析径流量的变化是合理开发水资源的前提。河道径流不仅随时间变化,并且随空间位置的不同有很大差异。借助基于集对分析法分析渭河径流空间的变化特性。

4.2.1 年径流丰枯变化的分类标准 将各水文站的年径流量按从大到小排序,根据距平百分率法确定各水文站年径流量丰枯的划分标准。根据分类标准,渭河中下游河流年径流丰枯分类标准如表 2 所示,其中 x 表示年径流量。

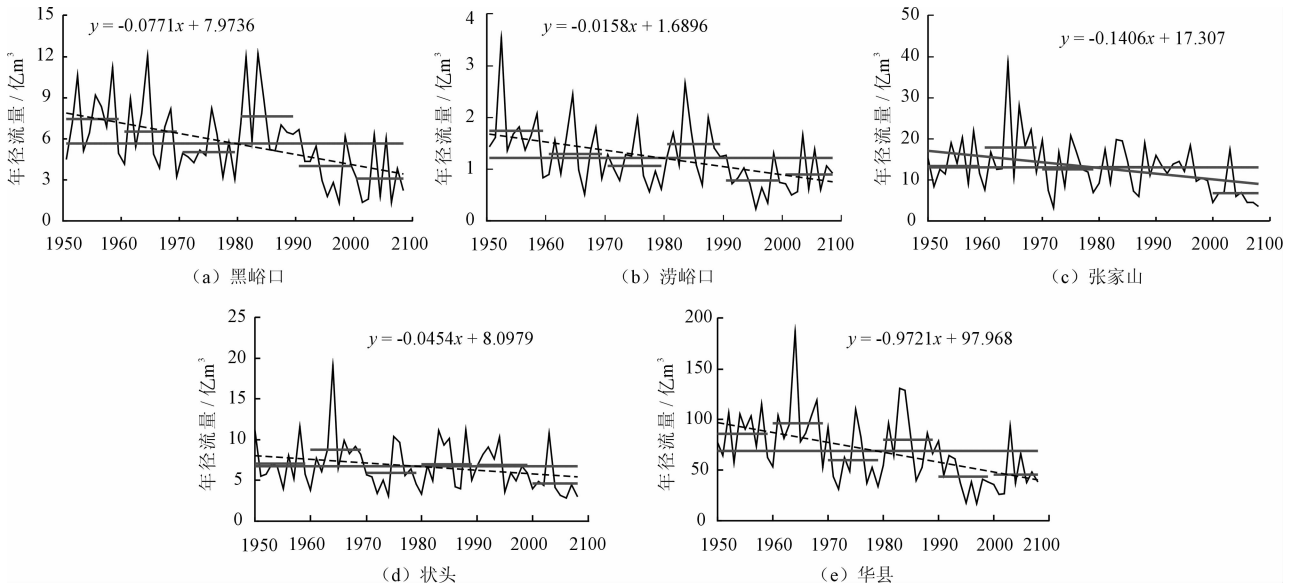


图 2 渭河中下游典型水文站年径流变化趋势

表 2 渭河中下游河流年径流丰枯分类标准 亿 m^3			
站名	枯水(I类)	中水(II类)	丰水(III类)
黑峪口	$x < 4.5277$	$4.5277 \leq x < 6.7915$	$x \geq 6.7915$
涝峪口	$x < 0.9730$	$0.9730 \leq x < 1.4595$	$x \geq 1.4595$
张家山	$x < 10.4706$	$10.4706 \leq x < 15.7058$	$x \geq 15.7058$
状 头	$x < 5.3876$	$5.3876 \leq x < 8.0815$	$x \geq 8.0815$
华 县	$x < 55.0435$	$55.0435 \leq x < 82.5653$	$x \geq 82.5653$

表 3 渭河中下游河流年径流丰枯统计			
站名	枯水(I 类)	中水(II 类)	丰水(III 类)
黑峪口	21	21	17
涝峪口	24	19	16
张家山	21	19	19
状 头	22	19	18
华 县	25	15	19

4.2.2 年径流空间的变化特性 将各水文站的年径流量组成一个集合 $Y_i(i = 1,2,3,4,5)$,每两个集合组成集对 $H(Y_i,Y_j)$ 。 $Y_1、Y_2、Y_3、Y_4、Y_5$ 分别表示黑峪口、涝峪口、张家山、状头、华县站年径流量序列。

将 5 个站的年径流量序列按照径流划分标准进行处理。落入枯水范围的,符号标记为“ I ”;落入平水范围的,符号标记为“ II ”;落入丰水范围的,符号标记为“ III ”。

渭河中下游河流年径流丰枯统计情况如表 3 所示。将对应年份符号元素进行比较统计,如果两个站的年径流量处于同一级别中,则认为是相同的,统计其个数 S ;如果年径流符号相差一个级别的,则认为是相异,统计其个数 F ;如果年径流符号相差两个级别的,则认为是相反,统计其个数 P 。经过统计分析,得到以下的联系度:

$$\mu_{Y_1 \sim Y_2} = \frac{47}{59} + \frac{12}{59}I + \frac{0}{59}J = 0.797 + 0.203I + 0.000J$$

(8)

$$\mu Y_1 \sim Y_3 = \frac{31}{59} + \frac{22}{59}I + \frac{6}{59}J = 0.525 + 0.373I + 0.102J \tag{9}$$

$$\mu Y_1 \sim Y_4 = \frac{31}{59} + \frac{18}{59}I + \frac{10}{59}J = 0.525 + 0.305I + 0.169J \tag{10}$$

$$\mu Y_1 \sim Y_5 = \frac{42}{59} + \frac{14}{59}I + \frac{3}{59}J = 0.712 + 0.237I + 0.051J \tag{11}$$

$$\mu Y_2 \sim Y_3 = \frac{29}{59} + \frac{24}{59}I + \frac{6}{59}J = 0.492 + 0.407I + 0.102J \tag{12}$$

$$\mu Y_2 \sim Y_4 = \frac{28}{59} + \frac{22}{59}I + \frac{9}{59}J = 0.475 + 0.407I + 0.153J \tag{13}$$

$$\mu Y_2 \sim Y_5 = \frac{42}{59} + \frac{14}{59}I + \frac{3}{59}J = 0.712 + 0.237I + 0.051J \tag{14}$$

$$\mu Y_3 \sim Y_4 = \frac{38}{59} + \frac{20}{59}I + \frac{1}{59}J = 0.644 + 0.339I + 0.017J \tag{15}$$

$$\mu Y_3 \sim Y_5 = \frac{41}{59} + \frac{16}{59}I + \frac{2}{59}J = 0.695 + 0.271I + 0.034J \tag{16}$$

$$\mu Y_4 \sim Y_5 = \frac{34}{59} + \frac{20}{59}I + \frac{5}{59}J = 0.576 + 0.339I + 0.085J \tag{17}$$

公式(8) ~ 式(17) 中:对于 a , 除了涝峪口和张家山、涝峪口和状头站年径流量的丰枯同步性较差外,其余各水文站年径流丰枯同步年份站总年份均大于 50%;对于 P ,除了黑峪口和状头、涝峪口状头站和年径流量的丰枯相反的年数为 10 和 9 外,其余的均小于 6。

4.2.3 年径流空间的变化特性结果分析 由均匀取值法, $I = 0, j = -1$; 计算各集对的联系数,如表 4 所示为渭河中下游各水文站年径流序列所构成集对的联系数。黑峪口、涝峪口和华县的联系数相对较高,和张家山、状头有一定的正关系。涝峪口、华县的联系数表明两者有对较高的正关系,和张家山、状头有一定的正关系。张家山站和黑峪口、涝峪口联系数小于 0.5,和状头、华县联系数字大于 0.6;状头站和黑峪口、涝峪口联系数小于 0.4,和张家山联系数大于 0.6。张家山站和状头站位于渭河左岸的支流泾河和洛河,两者年径流量的丰枯有较高的相关性;黑峪口、涝峪口位于渭河右岸支流黑河和涝河,两者年径流量的丰枯也有较高的相关性。两岸之间

的站点之间联系数小,相关性较低。原因可能是这些河流在地理环境、流域特征、地形地貌、植被覆盖、地质构造等方面有差异。渭河干流上的华县站和黑峪口、涝峪口、张家山站的联系数均为 0.661,表明华县和这 3 个站径流量的丰枯方面有较高的正关系;华县站和状头站联系数为 0.491,表明两者径流量的丰枯有一定的正关系。渭河中下游各水文站年径流量空间变化上存在一定的同步性。

表 4 渭河中下游各水文站年径流序列所构成集对的联系数

站 名	黑峪口 (Y_1)	涝峪口 (Y_2)	张家山 (Y_3)	状头 (Y_4)	华县 (Y_5)
黑峪口(Y_1)	1.000	0.797	0.423	0.356	0.661
涝峪口(Y_2)	0.797	1.000	0.390	0.322	0.661
张家山(Y_3)	0.423	0.390	1.000	0.627	0.661
状头(Y_4)	0.356	0.322	0.627	1.000	0.491
华县(Y_5)	0.661	0.661	0.661	0.491	1.000

5 结 论

本文采用 SPA 对渭河中下游黑峪口、涝峪口、张家山、状头和华县等 5 个典型水文站 59 年(1950 - 2008)的径流资料进行了分析,对径流特性进行了评价,主要结论如下:

(1)时间上,自 20 世纪世纪 70 年代以来,渭河流域径流量呈现减少趋势,各水文站年径流量的变化趋势相似,90 年代至今的各站径流量接近或者小于多年平均值。

(2)空间上,渭河中下游各水文站年径流量空间变化上存在一定的同步性,其中,华县与黑峪口、涝峪口、张家山 3 个水文站具有较高的正相关性,其相关系数为 0.661,与状头站具有一定正关系。

参考文献:

[1] 张建云,章四龙,王金星,等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2):230 - 234.

[2] 王金星,张建云,李岩,等. 近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 656 - 661.

[3] 李 林,王振宇,秦宁生,等. 长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 694 - 670.

[4] 秦年秀,姜 彤,许崇育,等. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005, 14(5):589 - 594.

- [5] 赵军凯,李九发,戴志军,等. 长江宜昌站径流变化过程分析[J]. 资源科学, 2012,34(12): 2306–2315.
- [6] 李二辉,穆兴民,赵广举,等. 1919–2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014,25(2): 155–163.
- [7] 刘二佳,张晓萍,张建军,等. 1956–2005年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013,28(7): 1159–1168.
- [8] 周园园,师长兴,杜俊,等. 无定河流域1956–2009年径流量变化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2012,27(5): 856–865.
- [9] 魏红义,李靖,王江,等. 渭河流域径流变化趋势及其影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2008,28(1): 76–80.
- [10] 肖洁,罗军刚,解建仓,等. 渭河干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2012,34(11): 32–36.
- [11] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 33–38.
- [12] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [13] 丁小玲,周建中,陈璐,等. 基于模糊集合理论和集对原理的径流丰枯分类方法[J]. 水力发电学报,2015, 34(5): 4–9.
- [14] 王红芳,王素芳,王文圣,等. 基于集对原理的年径流状态时序变化特性分析[J]. 海河水利,2007(5): 31–33+40.
- [15] 郭旭宁,胡铁松,张涛,等. 基于集对分析的供水水库群联合调度规则[J]. 系统工程理论与实践, 2014,34(6): 1510–1516.
- [16] 金菊良,魏一鸣,王文圣. 基于集对分析的水资源相似预测模型[J]. 水力发电学报,2009,28(1): 72–77.
- [17] 蒋建军,刘建林. 陕西省渭河流域重点治理项目建设管理体制研究[M]. 西安:西北大学出版社,2008.

(上接第19页)

- [12] 黄志霖,田耀武,肖文发. AGNPS模型机理与预测偏差影响因素[J]. 生态学杂志,2008,27(10): 1806–1813.
- [13] 李家科,李怀恩,李亚娇,等. 基于AnnAGNPS模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J]. 水土保持学报,2008, 22(6): 81–88.
- [14] Bingner R L, Theurer F D. AnnAGNPS Technical Processes Documentation[K]. Version USDA–ARS, 2005.
- [15] 闫胜军,闫瑞,芦三矿生,等. 黄土丘陵沟壑区岔口小流域AnnAGNPS模型数据库建立[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2013,33(2): 114–121.
- [16] 闫胜军. 岔口小流域AnnAGNPS模型验证和坡改梯生态效益分析[D]. 太谷:山西农业大学,2014.
- [17] 于怀良,杜天彪. 小流域水土流失综合防治[M]. 太原:山西科学技术出版社,1989.
- [18] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, et al. Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(3): 239–252.
- [19] Satangi A, Cox C A, Madramootoo C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St Lucia watersheds[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 241–256.
- [20] Suttles J B, Vellidis G, Bosch D D, et al. Watershed–scale simulation of sediment and nutrient loads in Georgia coastal plain streams using the Annualized AGNPS model[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(5): 1325–1335.
- [21] Yuan Y, Bingner R L. Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi delta MSEA watersheds[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5): 1183–1190.
- [22] Zema D A, Bingner R L, Denisi P, et al. Evaluation of runoff, peak flow and sediment yield for events simulated by the AnnAGNPS model in a Belgian agricultural watershed[J]. Land Degradation & Development, 2012, 23(3): 205–215.