

基于 R/S 和 Morlet 小波分析的丹河径流变化特征研究

潘国营¹, 秦永泰¹, 马亚芬¹, 吕雪茹²

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省焦作水文水资源勘测局, 河南 焦作 454002)

摘要: 为揭示丹河流域径流年内、年际变化特征, 根据山路平水文站 1955-2000 年的逐月平均流量资料, 采用基尼系数法和集中度(期)等方法对丹河径流量的年内分配进行研究; 并运用 Kendall 秩次相关检验法和 R/S 分析法对全年、汛期和非汛期的径流量变化趋势进行分析, 同时使用 Morlet 小波对各径流序列的变化主周期进行识别。结果表明: 1955-2000 年, 丹河流域径流量年内分配十分均匀, 各时期的年内分配过程主要为“复式峰”型, 最大峰值出现在 8 月份; 流域全年、汛期和非汛期 3 个径流量序列均呈显著递减趋势, 且未来递减过程都具有一定的反持续性; 丹河全年和汛期的径流序列具有相近的丰-枯交替变化周期, 包含 4、10 和 15 a 左右的变化主周期; 而非汛期径流序列存在 15 和 28 a 左右的丰-枯交替变化主周期。

关键词: 径流量; 基尼系数法; R/S 分析; Morlet 小波法; 径流变化特征; 丹河

中图分类号: TV121.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0041-05

Research on variation characteristics of runoff in Danhe river basin based on R/S and Morlet wavelet analysis

PAN Guoying¹, QIN Yongtai¹, MA Yafen¹, LÜ Xueru²

(1. Institute of Resource & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Jiaozuo Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Jiaozuo 454002, China)

Abstract: In order to reveal the variation characteristics of annual and interannual runoff in Danhe River Basin, according to the monthly average flow data in Shanluping hydrological station from 1955 to 2000, the paper used Gene coefficient and concentration degree (period) to study the Dan River runoff distribution in a year; and applied Kendall test and R/S analysis methods to analyze the annual, flood and non-flood season runoff variation trends, and used Morlet wavelet to identify these runoff sequences' various cycles. The result showed that during the period of 1955 to 2000, The allocation of annual runoff in Danhe River basin was fairly well-distributed, and the curves mainly belonged to double peak type in each period. The maximum runoff occurred in August. The runoff sequences of annual, flood season and non-flood season presented significant decreasing trend, and the future decrease process had a certain anti-sustainability. The runoff sequences in flood season and annual had similar wet-dry alternating cycles, including change main cycles of 4, 10 and 15 years; The runoff sequence in non flood season have wet-dry alternately various cycles of 15 and 28 years.

Key words: runoff; Gene coefficient; R/S analysis; Morlet wavelet model; variation characteristics of runoff; Danhe River

自 20 世纪 50 年代以来, 丹河流域降水量逐年递减, 蒸散发损失和地下水开采量不断增加, 加之该地区大规模的煤炭开采造成地表水渗漏加剧, 丹河径流量逐年减少, 严重影响了下游地区的水资源供

应^[1]。然而, 迄今为止关于丹河径流演变规律的研究尚属空白, 因此对丹河的长序列径流量资料进行研究, 探讨其周期成分和趋势变化特性, 对该流域实现人水和谐与可持续发展有重要的现实意义。

收稿日期: 2015-01-15; 修回日期: 2015-01-25

基金项目: 河南理工大学博士基金资助项目 (B2012-034)

作者简介: 潘国营 (1963-), 男, 河北衡水人, 博士, 教授, 主要从事地下水资源的开发利用、矿井水害防治方面的教学与科研工作。

通讯作者: 秦永泰 (1989-), 男, 河南三门峡人, 在读硕士研究生, 主要研究水文水资源与地下水数值模拟。

对于径流序列,由英国水文学家 Hurst 提出的 R/S 分析法非常适合水文要素时间序列长程相关持续性的分析,并能够对径流变化规律进行很好地描述^[2]。但 R/S 分析在时间序列周期分析方面尚存不足,无法对多尺度周期进行识别及快速准确地确定变化主周期。

而 20 世纪 80 年代初兴起的小波分析,能够很好地揭示各种水文序列的变化特征,尤其在多时间尺度周期识别方面有明显的优势,被多位学者应用到水文(气象)的相关研究,并取得了一定的研究成果^[3-5]。

因此,本文根据丹河流域山路平水文站 1955 - 2000 年共计 46 a 的逐月平均径流量资料,首先运用基尼系数法和集中度(期)对各时期丹河流域径流的年内变化特征进行分析;然后分别采用 Kendall 秩次相关检验法和 R/S 分析法对全年、汛期和非汛期径流的年际变化趋势及其变化持续性进行分析;最后使用 Morlet 小波对各径流序列的周期性进行分析,以期为流域的水资源合理开发利用和生态环境治理提供参考。

1 研究区概况

丹河是黄河一级支流沁河的最大支流,发源于山西省高平县赵庄乡的丹株岭,流经山西省陵川、晋城与河南省博爱、沁阳等 4 个县(市),于博爱县陈庄流入沁河。

丹河干流长 169.1 km,总流域面积 3 152 km²,主要支流有永禄河、东仓河、白水河、许河、巴公河和北石店河,其中最大的支流是白水河。干流主要的水利工程有任庄水库、东焦河水电站和青天河水库,其中青天河水库对丹水入沁水量起着重要的控制作用。丹河流域属于温带大陆性季风气候,雨热同期,多年平均降水量为 619.4 mm,主要集中于汛期。流域岩溶和断层发育,水量渗透较为严重;地形北高南低,四周高中间低;地貌形态以中山和中低山为主。

2 分析方法

2.1 基尼系数法

由于基尼系数法可以对分布的均匀度进行量化评价,因此可使用该方法对径流的年内分配特性进行分析^[6]。基尼系数法的计算步骤如下:

首先,把年内各月的多年平均径流量数值进行升序排列;其次,分别对时间(以月为单位)和升序排列的各月多年平均径流量逐月累加;再之,分别以

各月时间累计值与总时间(12个月)的比值为自变量 x ,以各月多年平均径流量累计值与年平均径流量的比值为因变量 y ,拟合出各月多年平均径流量年内分配的洛伦兹曲线,如图 1 所示。

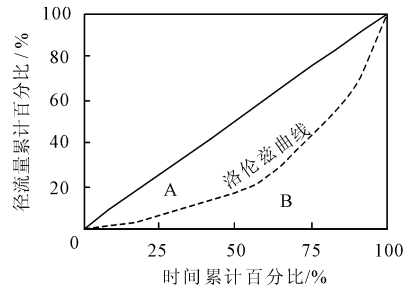


图 1 山路平水文站多年平均径流量年内分配洛伦兹曲线

最后根据洛伦兹曲线求出径流的年内分配均匀度 GI :

$$GI = S_B / (S_A + S_B) \quad (1)$$

式中: S_A 为图中区域 A 的面积; S_B 为图中区域 B 的面积。本文采用梯形面积法求解径流年内分配均匀度 GI 。均匀度 GI 介于 0 ~ 1 之间,当 GI 为 0 时,表示绝对不均匀;当 GI 为 1 时,表示绝对均匀; GI 越大,不均匀程度越小。

2.2 集中度和集中期

集中度和集中期就是将一年内各月的径流量假设为向量,即径流量的大小作为向量的长度,发生的时间作为向量的方向^[7]。本文将 1 - 12 月所占的角度区间划分为 $(0^\circ, 30^\circ)$ 、 $(30^\circ, 60^\circ)$ 、 $(60^\circ, 90^\circ)$...、 $(330^\circ, 360^\circ)$,即假定一年内每个月均占据了 30° 的角度区间。相应的,一年中 1 月至 12 月的中心方位角 θ_i 设定为 $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ \dots 345^\circ$ 。

将各月多年平均径流量分解为 x 和 y 两个方向上的分量 P_x 和 P_y ,即:

$$P_x = \sum_{i=1}^{12} P_i \cos \theta_i, P_y = \sum_{i=1}^{12} P_i \sin \theta_i \quad (2)$$

然后合成向量为:

$$P_t = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, t = 1, 2, \dots, n - 1, n \quad (3)$$

集中期和集中度分别定义为:

$$D = \arctan(P_y / P_x), C_d = P / \sum_{i=1}^{12} P_i \quad (4)$$

由式(4)可以看出,集中期大致可以确定一年中最大径流量出现的时间,而集中度则可以定量地描述一年中集中期径流量所占的比重。

2.3 Kendall 秩次相关检验法

Kendall 秩次相关检验法能够较好的对水文气象要素的整体变化趋势作出定量评价^[8],其计算公

式如下:

$$\tau = \frac{4M}{n(n-1)} - 1 \quad (5)$$

$$\text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\tau}{\sqrt{\text{Var}(\tau)}} \quad (7)$$

式中: β 为 Kendall 秩次相关系数; τ 为肯德尔统计量; M 为径流序列所有实测值中 $R_j < R_i$ ($R_j, R_i, j < i$)出现的次数总和; n 为径流量序列总长度。

在 Kendall 秩次相关检验中,当 $\beta > 0$ 时,表示径流序列呈上升趋势;当 $\beta < 0$ 时,说明径流序列呈下降趋势。当 β 的绝对值大于显著水平为 $\alpha = 0.05$ 的临界值1.96时,则径流序列变化趋势显著,且 β 的绝对值越大越显著。

2.4 R/S 分析法

R/S 分析法 (Rescaled Range Analysis, 重标极差分析法)是由英国水文学家 Hurst 提出的一种可以定量反映时间序列持续性(或长程相依性)的分析方法。其最大的特点是不需假定 R/S 测度时间序列的分布特征^[9]。根据 R/S 分析得出 Hurst 指数的大小,可以判断该时间序列是否存在趋势性成分,并表征其趋势强度。

对于一个水文序列 $\{x(t)\}$,应首先应满足:

$$R(n)/S(n) = (an)^H \quad (8)$$

式中: $R(n)/S(n)$ 为重标极差; n 为增量子序列长度; a 为常数; H 为 Hurst 指数。其具体计算过程如下:

均值序列:

$$x_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x(k), m = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

累计离差:

$$X(k, m) = \sum_{i=1}^k (x(i) - x_m) \quad (10)$$

极差序列:

$$R(m) = \max_{1 \leq k \leq m} X(k, m) - \min_{1 \leq k \leq m} X(k, m) \quad (11)$$

标准差序列:

$$S(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x(k) - x_m)^2}{m}} \quad (12)$$

重标极差序列:

$$R(m)/S(m) = (R/S)_m \quad (13)$$

如果 $(R/S)_m$ 满足(8)式,说明序列 $\{x(k)\}$ 存在 Hurst 现象,在对数坐标系中使用最小二乘法对 R/S 和 k 进行线性拟合,相应的直线斜率即为 Hurst 指数。

大量研究证明:当 $H = 0.5$ 时,时间序列是完全独立的随机序列;当 $1 > H > 0.5$ 时,表示时间序列具有持续性,其未来的变化趋势与过去一致。且 H 值越接近1,其持续性就越强。当 $0 < H < 0.5$ 时,表示时间序列具有反持续性,即未来与过去的变化趋势相反。 H 值越接近0,反持续性就越强。

2.5 小波分析法

小波分析在时域和频域上具有良好的局部化功能,能够揭示出水文时间序列多尺度变化特征,识别其中隐含的不同时间尺度的主要变化周期,并能对未来发展趋势进行预测^[10]。本文采用的复数小波 Morlet 小波定义为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) e^{ic(\frac{t-b}{a})} e^{\frac{i}{a}(\frac{t-b}{a})^2} dt \quad (14)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度因子,表示小波的周期尺度; b 为时间因子,表示时间上的平移。

$W_f(a, b)$ 能够同时反映参数 a 和 b 的特性,并随两者变化。因此,通过绘制以 b 为横坐标, a 为纵坐标的关于 $W_f(a, b)$ 的小波变换系数图,根据图中二维等值线闭合中心的正、负值和小波系数的零点,来识别径流增减特性和突变特征。再以不同时间尺度 a 为横坐标,以各尺度下的小波方差为纵坐标绘制小波方差图,并依据图中各个峰值确定径流序列的主要变化周期。

3 结果与分析

3.1 径流的年内变化特征

由图1可看出:丹河径流主要集中在汛期(6-9月),最大峰值出现在8月;1955-1990年各研究时期径流的年内分配过程基本一致,汛期主峰过后伴有明显的退水峰,为“复式峰”型;而1991-2000年径流的年内分配呈“单峰”型,这在一定程度上反映了丹河汛后径流中地下水的比重呈减少趋势。1955-1960年径流量最大,汛期的径流量占年径流量的51.2%,明显大于其他时期的同期径流量。1961-1990年,各时期径流年内分配较为均匀,汛期径流量为全年径流量的40.0%左右。1991-2000年期间,虽然汛期径流总量较小,但占全年径流量的比重达49.5%。

通过基尼系数法和集中度(期)计算结果可知:丹河1955-2000年径流集中期和集中度分别为234.4°和0.19,说明年内最大径流量发生在8月份,占全年径流量的19.0%;而同期的径流年内分配均匀度为0.92,表明丹河径流的年内分配是十分

均匀的。

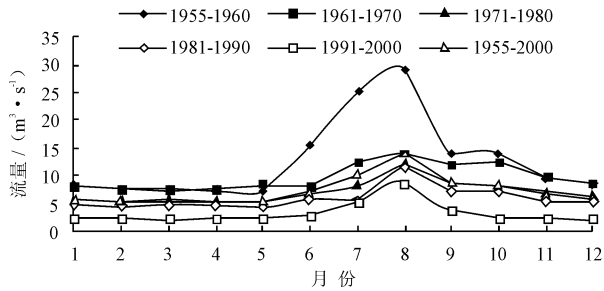


图2 山路平水文站径流量年内分配曲线

为了更好地了解丹河各个时期径流的年内分配特征,从表1可知:各个时期的均匀度都比较接近(0.91~0.94),没有大幅度的变化;集中度总体上都维持在较小的数值范围内(0.15~0.31),其中1955-1960年与1991-2000年的较大,分别为0.31和0.27,相应的集中期均发生在8月,其他时期的集中期则出现在9月。

表1 丹河径流年内分配特征统计表

| 时期 | 均匀度 GI | 集中度 C_d | 集中期 | |
|-----------|-------------|--------------|----------------|-------|
| | | | 角度/ $^{\circ}$ | 日期 |
| 1955-1960 | 0.91 | 0.31 | 22.7 | 08-13 |
| 1961-1970 | 0.93 | 0.15 | 249.4 | 09-10 |
| 1971-1980 | 0.93 | 0.15 | 243.9 | 09-04 |
| 1981-1990 | 0.92 | 0.17 | 242.7 | 09-03 |
| 1991-2000 | 0.94 | 0.27 | 220.5 | 08-11 |
| 1955-2000 | 0.92 | 0.19 | 234.4 | 08-25 |

3.2 径流的年际变化分析

从丹河全年、汛期和非汛期3个径流序列的变化趋势可以看出(见图3),各序列的变化特征是一致的:存在一定的波动性,具有相似的“峰”、“谷”特

征,并呈递减趋势。其中,全年与汛期序列的峰值发生时间相同;而非汛期序列的峰值大都较汛期(或全年)推迟一年。例如:汛期(或全年)序列于1963年存在一个峰值,非汛期序列于1964年的才出现峰值,这与地下水对该地区非汛期径流贡献较大有关。各径流量序列的最大值分别为261.91 m^3/s (1956)、193.79 m^3/s (1956)和88.60 m^3/s (1964),最小值分别为22.06 m^3/s (2000)、7.16 m^3/s (1997)和6.20 m^3/s (2000)。根据各径流序列的线性回归方程可知:年平均径流量递减速率最大,为每10 a减少28.27 m^3/s ;汛期和非汛期的径流量递减速率相对较小且两者接近,分别为每10 a减少15.05 m^3/s 和13.21 m^3/s 。为了更好地反映丹河径流变化趋势特性,采用Kendall秩次相关检验和R/S分析法对各序列变化趋势的显著性和持续性进行分析(见表2)。各序列的Kendall检验结果与线性拟合的结果相同,且相关系数 β 远远超出临界值,即各序列减少趋势显著。根据R/S分析得出各径流序列的Hurst指数均小于0.5,表明各序列的递减趋势具有一定的反持续性,其中非汛期的反持续性最强。

根据以上分析,1955-2000年丹河流域的各径流序列的变化均呈递减趋势,趋势显著,且递减过程具有反持续性。

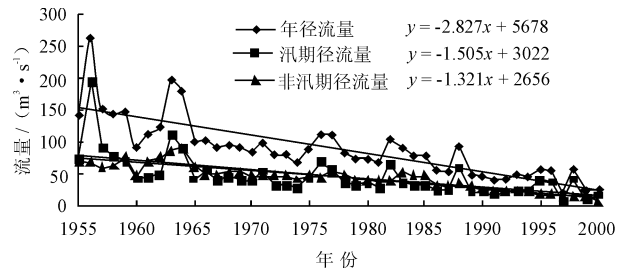


图3 山路平水文站各径流量序列线性趋势图

表2 丹河各径流量序列趋势特征统计表

| 时间序列 | 线性拟合 | | Kendall 秩次相关检验 | | | R/S | |
|--------|--------|------|----------------|------|-----|-------|------|
| | k | 趋势方向 | β | 趋势方向 | 显著性 | H | 趋势方向 |
| 全年径流量 | -2.827 | 减少 | -6.84 | 减少 | 显著 | 0.293 | 反持续性 |
| 汛期径流量 | -1.505 | 减少 | -5.65 | 减少 | 显著 | 0.348 | 反持续性 |
| 非汛期径流量 | -1.321 | 减少 | -7.51 | 减少 | 显著 | 0.194 | 反持续性 |

3.3 周期性分析

通过复数小波 Morlet 小波对丹河径流按照全年、汛期和非汛期3个不同时段的时间序列进行多时间尺度分析,即根据 Morlet 小波变换实部的时频分布图和小波方差图研究丹河径流多尺度变化特

性,并确定其变化主周期。

根据多年平均径流量小波分析结果可以得出,在长达46 a的时间序列中,年均径流量存在2~5、8~11、13~19 a 3种时间尺度的丰-枯变化震荡周期(见图4(a)),包含4、10和15 a左右的主周期

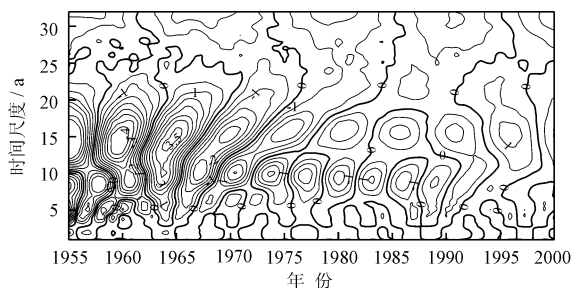
(见图 4(b))。从图 4 中还可以看出,年径流序列还可能存在较长时间尺度的周期,有待更长的径流序列来印证。从小波变换的实部时频分布情况可以看出,在 13 ~ 19 a 的震荡周期下,丹河年平均径流量于 1955 - 1957、1963 - 1968、1973 - 1978、1983 - 1998 和 1994 - 1999 年各时段偏多,其余时段径流量则偏少。

年内径流时间序列的小波分析结果表明(见图 5 和 6):汛期径流与年径流存在相同时间尺度的丰 - 枯交替变化周期,所经历的丰枯变化过程相似,且所包含的主周期也大致相同,明显具有更大时间尺度的变化主周期,需要进一步印证;而非汛期则有所

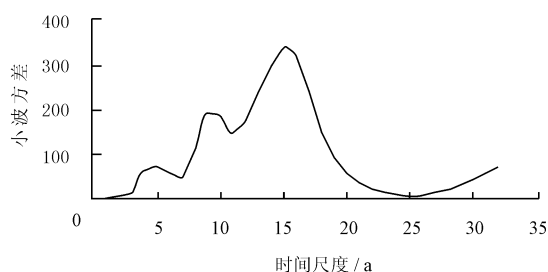
不同,其具有 2、6 ~ 17 和 21 ~ 35 a 等 3 类尺度的丰 - 枯交替变化周期,主要存在 15 和 28 a 左右的 2 个丰 - 枯交替变化主周期。

在 21 ~ 35 a 时间尺度下,非汛期径流于 1955 - 1960、1969 - 1979 及 1988 - 1997 年年间处于少水阶段,其他时段则径流量偏多。

综合以上各径流时间序列的小波分析结果可以看出,丹河年径流的周期变化特性主要由汛期径流的周期性变化所决定,两者周期特性相近,这与汛期径流量在全年径流量中所占的较大比重相关。这与有关降水量周期性研究得出的主汛期降水与年降水的周期变化较接近的结论相一致^[11]。

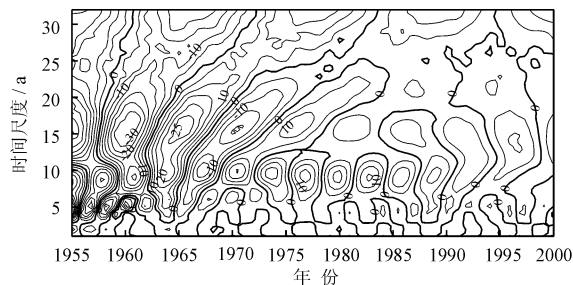


(a) 年均径流量小波变换实部分布图

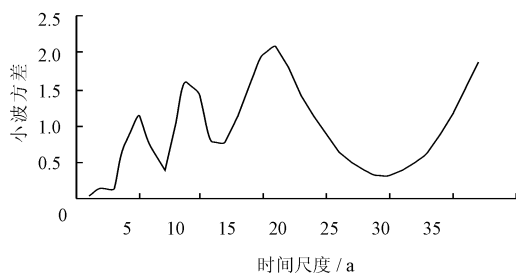


(b) 年均径流量小波方差图

图 4 山路平水文站年均径流量小波变换的实部分布图和小波方差图

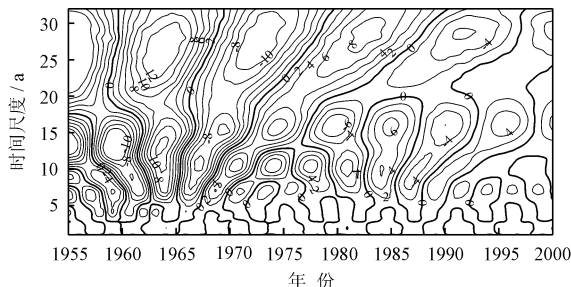


(a) 汛期平均径流量小波变换实部分布图

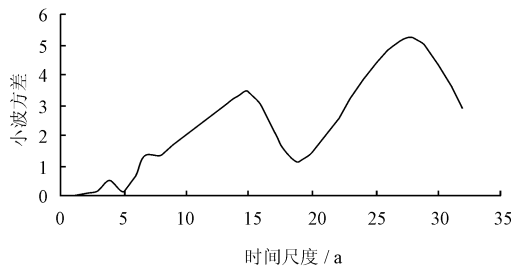


(b) 汛期平均径流量小波方差图

图 5 山路平水文站汛期平均径流量小波变换的实部分布图和小波方差图



(a) 非汛期平均径流量小波变换实部分布图



(b) 非汛期平均径流量小波方差图

图 6 山路平水文站非汛期平均径流量小波变换的实部分布图和小波方差图

4 结 语

水资源时空分布的不均匀性,以及用水矛盾日

益凸显,特别是在降水量逐年减少和水资源开发利用逐年增长的丹河流域,对该流域径流序列的变化

(下转第 50 页)

- [12] 刘刚,赵荣,刘纪平,等. 澜沧江流域降水量空间分布的克里格插值分析[J]. 测绘科学,2007,32(3):104-105+113.
- [13] 李新,程国栋,卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展,2000,15(3):260-265.
- [14] 范银贵. 空间插值方法在绘制降水量等值线中的应用[J]. 水利水电科技进展,2002,22(3):48-50.
- [15] 赵明松,程先富,张建春. 六安地区近50年来降水量的变化特征[J]. 中国农业气象,2008,29(4):397-401.
- [16] 李远平,杨太保,马建国. 大别山北坡典型区域降水年内分配不均匀性特征研究——以安徽省六安市为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(9):1148-1153.
- [17] 李远平,赵咏梅,杨太保. 基于加权马尔可夫链的六安市汛期降水预测研究[J]. 皖西学院学报,2009,25(2):92-95.
- [18] 李远平,赵咏梅,杨太保. 渭河流域汛期旱涝变化的周期性与其旱涝等级状态预测[J]. 资源科学,2009,31(6):1046-1050.
- [19] 李远平,杨太保,马建国. 渭河流域汛期降水集中度和集中期的变化特征[J]. 资源科学,2012,34(3):418-423.
- [20] 蔡福,明惠青,刘兵,等. 采用地统计学和GIS技术对东北地区不同时期降水的分析[J]. 中国农业气象,2006,27(4):296-299+304.
- [21] 周锁铨,薛根元,周丽峰,等. 基于GIS降水空间分析的逐步插值方法[J]. 气象学报,2006,64(1):100-111.
- [22] 顾万龙,王纪军,朱业玉,等. 淮河流域降水量年内分配变化规律分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(4):426-431.
- [23] 张录军,钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J]. 地球物理学报,2004,47(4):622-630.
- [24] 刘芸芸,丁一汇. 西北太平洋夏季风对中国长江流域夏季降水的影响[J]. 大气科学,2009,33(6):1225-1237.
- [25] 郭忆,毕硕本,张余庆,等. 地理地形因子对长江中下游平原降水空间分布影响的估算和分析[J]. 科学技术与工程,2013,13(29):8555-8560.
- [26] Wotling G, Bouvier C H, Danloux J, et al. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment[J]. Journal of Hydrology,2000,233(1):86-101.
- [27] 林爱兰,郑彬,谷德军,等. 2006年东亚夏季风活动特征与我国东部雨带分布[J]. 热带气象学报,2009,25(2):129-140.

(上接第45页)

特征和周期成分进行分析,对当地水资源的合理开发利用和可持续发展有重要指导意义。

本文根据丹河山路平水文站的逐月径流量资料,应用基尼系数、R/S和Morlet小波等多种方法分析了丹河流域径流的演变规律,研究结果表明:

(1)丹河流域径流量年内分配十分均匀,主要集中在汛期,各时期的年内分配过程主要为“复式峰”型,最大峰值出现在8月份;

(2)1955-2000年丹河流域全年、汛期和非汛期3个径流量序列均呈显著递减趋势,且未来递减过程都具有一定的反持续性;

(3)由于汛期径流量对全年径流量贡献较大,丹河全年和汛期的径流序列具有相近的丰-枯变化周期,包含4、10和15a左右的年际变化主周期,还可能更长尺度的周期,需要更长时间序列进行印证;而非汛期径流序列存在15和28a左右的两个丰-枯交替变化主周期。同时,本研究的结果有待其他方法进一步验证,以期提高结论的准确性和可靠程度。

参考文献:

- [1] 乔永杰,张学成. 沁河入黄水量减少原因分析[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(4):85-87.
- [2] 潘雅婧,王仰麟,彭建,等. 基于小波与R/S方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究,2012,31(5):811-820.
- [3] 张少文,丁晶,廖杰,等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2004,36(3):32-37.
- [4] 王文圣,李跃清,解苗苗,等. 长江上游主要河流年径流序列变化特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(3):70-75.
- [5] 徐东霞,章光新,尹雄锐. 近50年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展,2009,20(3):416-421.
- [6] 谢平,许斌,章树安,等. 变化环境下区域水资源变异问题研究[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [7] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6):791-795.
- [8] 肖鹏嵩,代俊峰,王娜. 广西降雨量变化趋势分析[J]. 节水灌溉,2013(2):38-40.
- [9] 燕爱玲,黄强,刘招,等. R/S法的径流时序复杂特性研究[J]. 应用科学学报,2007,25(2):214-217.
- [10] 叶茂,张鹏,王伟,等. 塔里木河流域上游三源流径流变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):10-14.
- [11] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.