

济南市小清河流域汛期降水时空演变规律分析

李祥松¹, 于翠松¹, 曹升乐¹, 齐春²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013)

摘要:以济南市小清河黄台桥水文站断面以上流域内7个雨量站1977-2013年的逐日降水量长序列资料为基础,采用Mann-Kendall秩次相关检验法和5a滑动平均法分析流域汛期降水量的变化趋势,利用方差谱密度图法分析汛期降水量的周期成分,用有序聚类法识别和检验汛期降水量的突变成分,并利用R/S分析法对流域汛期降水量变化趋势进行预测。结果表明:济南市小清河流域各雨量站汛期降水量时间演变趋势一致,呈增长趋势;有明显的空间分布特征,符合中国降水分布的整体格局;流域7个雨量站汛期降水量未来变化趋势均为增长。研究成果为济南市水资源可持续开发利用和海绵城市建设提供了基础依据。

关键词:逐日降雨量;汛期降水;时空演变规律;济南市小清河流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)06-0072-07

The spatial-temporal evolution law of flood season precipitation in Xiaoqing River Basin of Jinan

LI Xiangsong¹, YU Cuisong¹, CAO Shengle¹, QI Chunsan²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Province

Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China)

Abstract: Based on the long-term daily precipitation data from 7 rainfall stations in the upstream of Huanqitaiqiao hydrological station in Xiaoqing River Basin of Jinan from 1977 to 2013, the Mann-Kendall rank correlation test method, and the five-year moving average method were used for variation trends, the variance spectral density diagram method was applied for period component, the sequence clustering analysis method was used for detecting and testing mutation component, and the R/S analysis method was used to analyze the variations of flood season precipitation at the basin. The results showed that: the temporal evolution trends of flood season precipitation of different rainfall stations in Xiaoqing River Basin of Jinan were similar and had upward trends. Their spatial distributions had obvious characteristics, which conforms to the overall pattern of Chinese precipitation distribution. Future trends of flood season precipitation at all of the 7 rainfall stations were upward. This research provided basic references for the resources sustainable development and construction of sponge city in Jinan.

Key words: daily rainfall; precipitation in flood season; space-time evolution law; Xiaoqing River basin of Jinan

济南市小清河流域黄台桥水文站以上流域面积为321 km²,多年平均降水量为670.9 mm,流域内降水时空分布不均匀,历史上旱涝灾害频发。济南市在遭受洪水侵袭的同时也面临水资源的严重短缺,人均水资源占有量不足全国的1/7,水资源短缺已成为制约地区经济发展和人民生活水平提高的主要因素之一,开发利用雨洪水资源是解决上述问题的有效途径。黄国如等^[1]利用小清河流域内5个雨量

站1977-2013年的逐日降水资料分析了城市化对降水的影响,杨富程等^[2]、龚道勇等^[3]和陆志华等^[4]分别对额尔齐斯河流域、南四湖流域和松花江流域的降水时空分布规律进行了研究;刘扬等^[5]分析了近50 a中国北方不同地区的降水周期趋势;宋小燕等^[6]通过对松花江流域哈尔滨站1909-2005年长序列观测资料的分析发现,该站的降雨及径流演变具有明显的阶段性变化特征。目前缺少针对济

收稿日期:2016-05-28; 修回日期:2016-08-14

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201401003);山东低山-平原区雨洪开发技术研究与示范项目(201501054)

作者简介:李祥松(1991-),男,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事水资源开发利用方面研究。

通讯作者:于翠松(1968-),女,山东乳山人,副教授,硕士生导师,主要从事水资源开发利用方面研究。

南市小清河流域汛期降水时空演变规律的研究。因此,有必要对济南市小清河流域汛期降水变化规律和时空分布特征进行深入的分析,分析其演变成因。

1 研究资料和方法

1.1 数据来源

研究数据采用济南市小清河黄台桥断面以上流域内7个雨量站1977-2013年汛期逐日降水长序列资料,7个雨量站分别是黄台桥、刘家庄、吴家铺、邵而、东红庙、兴隆和燕子山,雨量站分布图见图1。根据7个雨量站汛期逐日降水量资料,采用算术平均法求取汛期面平均降水量序列。

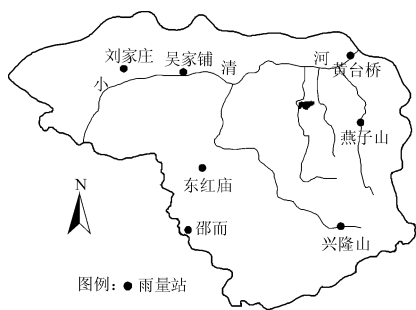


图1 流域雨量站分布图

1.2 研究方法

采用 Mann-Kendall 秩次相关检验法、方差谱密度图法、有序聚类分析法和 R/S 分析法对降水序列的趋势性、周期性、突变性进行识别和检验,对各雨量站汛期降水的未来变化趋势进行预测。

(1) Mann-Kendall 秩次相关检验法。此法应用比较广泛,在此只介绍计算思路:构造统计量 U 并求取, U 的绝对值越大,则序列变化趋势越显著。给定显著性水平 α 和对应的检验统计量 $U_{\alpha/2}$,当 U 的绝对值大于 $U_{\alpha/2}$ 时,趋势显著;反之,则不显著^[7-8]。

(2) 方差谱密度图法。该法计算思路是:用方差谱密度函数结合 Matlab 编程绘制方差谱密度图,若方差谱密度图中出现较高较陡的峰值,说明序列存在明显周期,有几个峰值就有几个周期,且峰值越高,周期越明显;反之,则序列没有显著周期^[9-11]。

(3) 有序聚类分析法。其计算步骤是:设有时间序列 $\{x_t\}, t = 1, 2, \dots, n$, 序列的突变点是 τ , 当序列突变前后的总离差平方和最小时, τ 为序列跳跃点。突变点前后各有 n_1, n_2 个序列值 ($n_1 + n_2 = n$), 将两部分序列值分别用 0、1 表示, 再将原序列值在扩展选定区域内按升序排序, 统计游程 (0 或 1 连续出现的序列) 的个数 k , 构造统计量:

$$U = \frac{k - (1 + \frac{2n_1n_2}{n})}{\sqrt{\frac{2n_1n_2(2n_1n_2 - n)}{n^2(n-1)}}} \sim N(0, 1) \quad (1)$$

给定显著性水平 α 和对应的 $U_{\alpha/2}$, 当 $|U| > U_{\alpha/2}$ 时, 突变显著; 反之, 则不显著^[12-14]。

(4) R/S 分析法。该法的计算步骤是: 考虑时间序列 $\{x_t\}, t = 1, 2, \dots, n$, 对任意正整数 $\tau > 0$ 。

$$\text{均值序列: } \bar{x}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_i, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\text{累积离差: } X_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau), 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

$$\text{极差: } R_\tau = \max X_\tau - \min X_\tau, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\text{标准差: } S_\tau = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2}, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

若比值 R/S 存在关系 $R/S = \tau^H$, 则分析的时间序列存在 Hurst 现象, 由此可以求得 Hurst 指数值, 当 Hurst 指数值等于 0.5, 则汛期降水量序列变化是随机性的; 当 $0.5 < \text{Hurst 指数值} < 1$, 则表明未来的降水量总体变化将与过去的变化趋势一致, 且 Hurst 指数值越接近 1 持续性就越强; $0 < \text{Hurst 指数值} < 0.5$, 将来的总体趋势与过去相反, Hurst 指数值越接近 0, 反持续性越强^[15-17]。

2 结果与分析

2.1 汛期降水量的时间演变特性

2.1.1 汛期降水量的变化趋势 采用滑动平均法^[3]和 Mann-Kendall 秩次相关检验法来分析流域汛期降水的变化趋势。绘制出流域面平均降水量变化曲线和 5a 滑动平均线 (图 2~4), 由汛期降水变化曲线看出流域汛期降水年际变幅较大, 汛期年降水最大值为 854.4 mm (2004 年), 最小值为 227.3 mm (2002 年), 极差为 627.1 mm, 极值比为 3.76。图 2 显示流域汛期降水量呈现线性增长趋势, 采用 Mann-Kendall 秩次相关检验法来检验趋势的显著性。

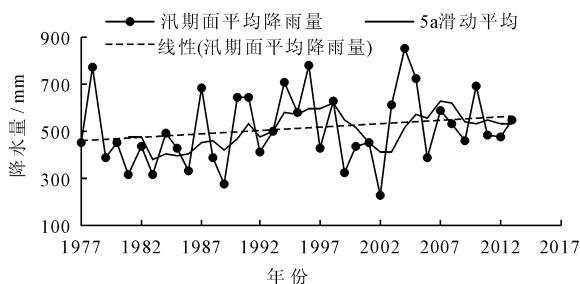


图2 流域汛期降水变化曲线

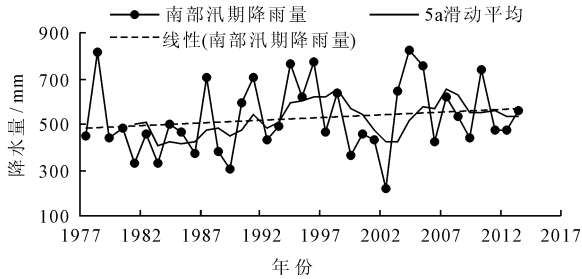


图3 南部地区汛期降水变化曲线

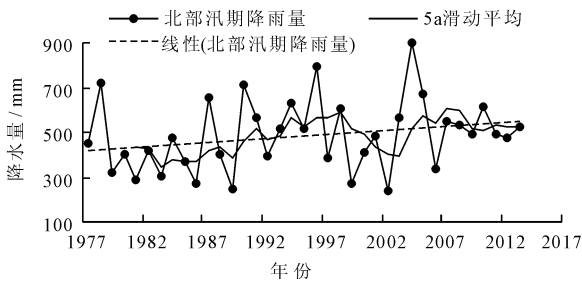


图4 北部地区汛期降水变化曲线

M-K 检验结果显示济南市小清河流域 1977 - 2013 年汛期降水有线性增长的趋势,但是没有通过置信水平 $\alpha = 95\%$ 的显著性检验,这说明流域汛期降水量增加趋势不显著,这与目前一些学者的研究结果一致^[1-18]。同时采用 M-K 检验法对流域内的南部雨量站(邵而、东红庙、兴隆和燕子山)和北部雨量站(黄台桥、刘家庄和吴家铺)1977 - 2013 年汛期降水序列的趋势性进行检验,结果见表 1。

表1 流域汛期降水量变化趋势 M-K 检验结果

| 指标 | K | τ | U | $U_{\alpha/2}$ | 趋势 | 显著性 |
|-----|-----|--------|------|----------------|----|-----|
| 全流域 | 386 | 0.159 | 1.39 | 1.96 | 增长 | 不显著 |
| 南部 | 376 | 0.129 | 1.12 | 1.96 | 增长 | 不显著 |
| 北部 | 404 | 0.213 | 1.86 | 1.96 | 增长 | 不显著 |

此外,流域汛期降水年内分布也很不均匀,37 年以来流域的最大日降水量多年平均值为 79.5 mm,占全年降水量的 15.7%;最大值为 240.5 mm (1987 年),占当年降水量的 35.2%;最小值为 34.0 mm (1986 年),占全年的 10.3%。37 年中日降水量超过 100 mm 的有 83 站次,其中有 73 站次出现在 7 月和 8 月,占总站次的 88%;根据黄台桥水文站 1977 - 2013 年降水资料分析,黄台桥汛期降水量占全年降水量的 73.3%,7 月和 8 月的降水量占汛期的 70.6%。由此可见,济南市的年降水量主要集中在汛期,而汛期的降水量又主要集中在 7 月和 8 月。

2.1.2 汛期降水量的周期变化分析 为了研究流域汛期降水的丰枯变异特性,需分析流域汛期降水

量序列的周期演变规律。利用方差谱密度法结合 Matlab 编程,绘制出流域汛期降水量序列的方差谱密度图(图 5)。由图 5 可以得出:济南市小清河流域汛期降水量序列的方差谱密度曲线图有多个峰值,但是没有较高较陡的峰值,即流域的降水序列在分析期内没有明显的周期成分。

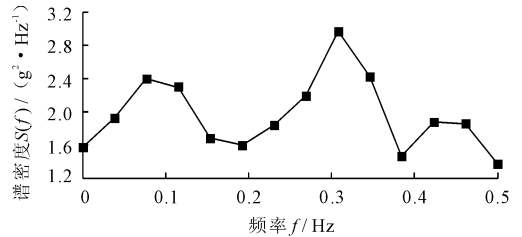


图5 流域汛期降水序列方差谱密度曲线

2.1.3 汛期降水量的阶段性与突变性分析 为了分析流域汛期降水量的阶段性变化特征,绘制了流域汛期面平均、南部地区、北部地区降水量距平累积曲线(图 6 ~ 图 8)。

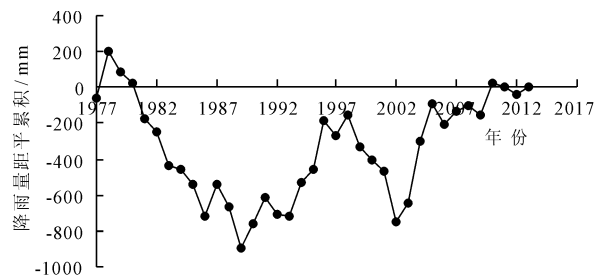


图6 流域汛期降水距平累积曲线

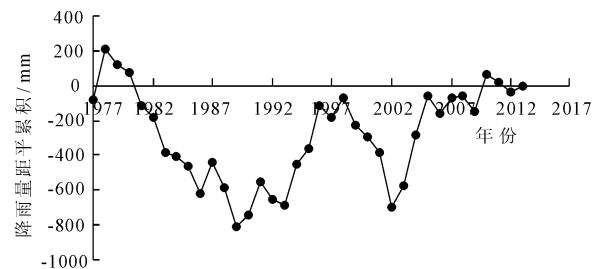


图7 南部地区汛期降水距平累积曲线

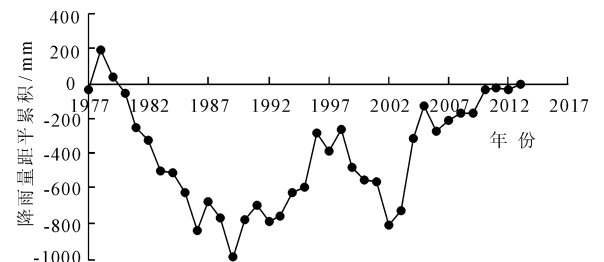


图8 北部地区汛期降水距平累积曲线

由图 6 看出,流域汛期降水量具有明显的阶段性变化特征,可分为如下几个阶段:两个显著的枯水

期,即 1979 - 1989 年和 1999 - 2002 年;两个显著的丰水期,即 1990 - 1998 年和 2003 - 2005 年;一个显著的平水期,即 2006 - 2013 年。整个分析时段内,流域汛期降水量序列出现了 1989 年和 2002 年两次突变,其中 1989 年到 1990 年流域汛期降水量由 227.9 mm 突变到 646.5 mm,距平累积曲线由下降趋势转变为上升趋势;后一次突变由 227.3 mm (2002 年)突变到 619.4 mm (2003 年),距平累积曲线同样也是下降趋势转变为上升趋势。查阅相关文献记载,1989 年和 2002 年济南市小清河流域发生了比较严重的旱灾,1990 年和 2003 年则发生了比较大的洪水,这说明这次突变分析比较合理,与历史实际情况相吻合。

采用有序聚类法对流域汛期降水量序列突变成分进行识别和检验。结果显示,流域南部地区、北部地区和面平均汛期降水量序列突变点均出现在 1989 年,其突变性均没有通过 $\alpha = 95\%$ 的显著性检验。突变性识别和检验结果见表 2。

表 2 流域汛期降水量序列突变成分识别和检验结果

| 指标 | 跳跃时间 | n_1 | n_2 | U | $U_{\alpha/2}$ | 突变性 |
|------|------|-------|-------|-------|----------------|-----|
| 全流域 | 1989 | 13 | 24 | -0.32 | 1.96 | 不显著 |
| 南部地区 | 1989 | 13 | 24 | -0.32 | 1.96 | 不显著 |
| 北部地区 | 1989 | 13 | 24 | -0.32 | 1.96 | 不显著 |

2.2 汛期降水的空间分布特性

为分析流域汛期降水空间分布的特性,将流域

的 7 个典型雨量站按照城区与郊区、南部与北部进行分区划分。其中黄台桥、东红庙和燕子山为城区雨量站,刘家庄、吴家铺、邵而和兴隆为郊区雨量站;黄台桥、刘家庄和吴家铺基本处于同一纬度且地形相似,将这三者划分为北部分区雨量站,邵而、东红庙、兴隆和燕子山为南部山区雨量站。

2.2.1 汛期降水次数的空间分布 按照中国气象局对降水强度的等级划分,分析统计出 1977 - 2013 年各雨量站、各分区不同降水强度的降水次数,结果见表 3。由表 3 看出,流域汛期降水次数在空间上的分布不均匀,总体趋势是城区多于郊区,南部多于北部。城区汛期降水总次数比郊区的多 91 次,多出 7.1%;其中小雨、中雨和暴雨这 3 个级别的降水次数城区明显多于郊区,这与其他研究者的研究成果相吻合^[1]。流域南部与北部对比分析发现,南部地区汛期降水总次数比北部的多 106 次,多出 8.5%,且除大暴雨外,其余各级别的降水次数均为南部比北部多。主要原因是流域北部是平原地形,南部是山区地带,山区地形有利于空气上升运动,容易产生较强的对流上升运动,有利于降水产生。以刘家庄和燕子山作为典型站进行对比分析,刘家庄站既是郊区雨量站又是北部雨量站,燕子山站既是城区雨量站也是南部雨量站,结果显示燕子山的降水总次数是 1 384 次,比刘家庄的 1 137 次多 247 次,多出 21.7%,且除大暴雨外,其余各级别的降水次数均比刘家庄的降水次数多。

表 3 流域各站及各分区不同强度降水次数

| 降雨等级 | 黄台桥 | 东红庙 | 燕子山 | 刘家庄 | 吴家铺 | 邵而 | 兴隆 | 城区 | 郊区 | 南部 | 北部 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 小雨 | 849 | 829 | 831 | 667 | 753 | 790 | 823 | 836 | 758 | 818 | 756 |
| 中雨 | 275 | 256 | 297 | 248 | 250 | 261 | 310 | 276 | 267 | 281 | 258 |
| 大雨 | 154 | 167 | 159 | 143 | 166 | 164 | 176 | 160 | 162 | 167 | 154 |
| 暴雨 | 74 | 71 | 85 | 64 | 66 | 77 | 76 | 77 | 71 | 77 | 68 |
| 大暴雨 | 9 | 14 | 11 | 15 | 13 | 10 | 9 | 11 | 12 | 11 | 12 |
| 特大暴雨 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 合计 | 1362 | 1338 | 1384 | 1137 | 1248 | 1302 | 1394 | 1361 | 1270 | 1355 | 1249 |

2.2.2 汛期降水量的空间分布 为了更好地研究济南市小清河流域汛期降水的空间分布特性,计算了流域 7 个雨量站 1977 - 2013 年的汛期多年平均降水量并绘制等雨量线,见图 9。流域汛期降水量多年平均值为 509.2 mm,南部地区汛期降水量多年平均值为 526.3 mm,除邵而(507.2 mm)外,其余三

个站(兴隆山、燕子山、东红庙)的汛期降水均大于流域面平均值;北部地区汛期降水量多年平均值为 486.5 mm,且各站的汛期降水量均小于流域面平均值;南部地区汛期降水多年平均值比北部地区的多 39.8 mm,多出 8.2%。此外,汛期降水量多年均值最大和最小的雨量站分别是兴隆站和刘家庄站,二

者的汛期降水量多年均值分别是 549.0 mm 和 473.4 mm, 相差 76.6 mm, 前者比后者多出 16.1%。这与降水次数分析结果是一致的。

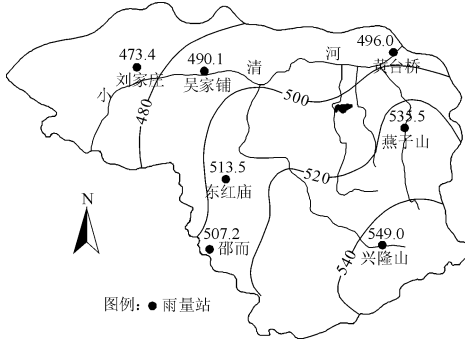


图9 各雨量站多年平均汛期降水量等值线

3 汛期降水演变成因分析和趋势预测

3.1 汛期降水演变成因分析

中国降水变化趋势整体表现为西北地区减少,

南部及东部地区增加,变化的主要原因是全球大气循环变化^[19]。济南市小清河流域位于东部地区,符合中国降水变化的整体格局。其次,下垫面条件变化会影响局地微气候,对当地降雨产生一定的影响。利用济南市1984年、1992年、2002年和2013年的卫星遥感数据,采用地理信息系统(ArcGIS)成图,得到小清河黄台桥断面以上321 km²土地利用类型图(图10~图13)和各类土地利用类型面积(见表4)。从土地利用图看出,随着城市化建设迅速发展,研究区内建设用地面积急剧增加,林地面积和农田面积迅速减少。由表4分析可知,济南市小清河流域黄台桥断面以上1984-2013年建设用地增加了106%,林地减少了39%,农田面积减少了37%,水体面积增大了188%。城市化建设增加了研究区上空大气中的积雨核,增加了蒸发量,导致空气湿度增大,对研究区上空微气候造成影响,对降水频次和雨型造成一定的影响^[20]。

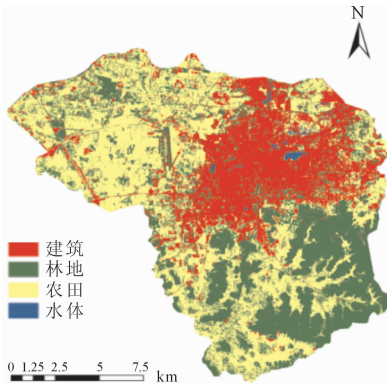


图10 1984年流域土地利用类型

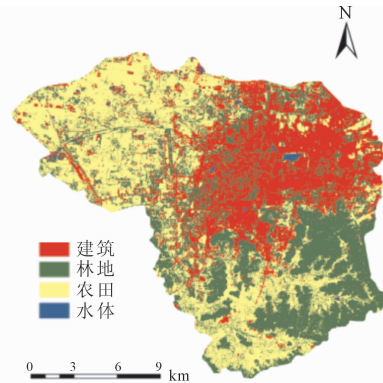


图11 1992年流域土地利用类型

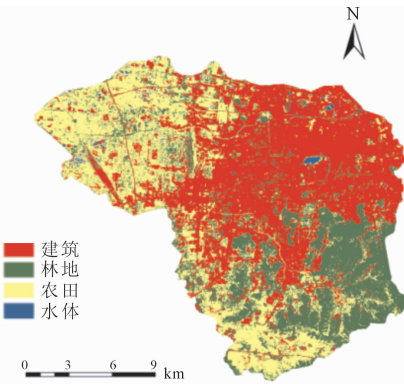


图12 2002年流域土地利用类型

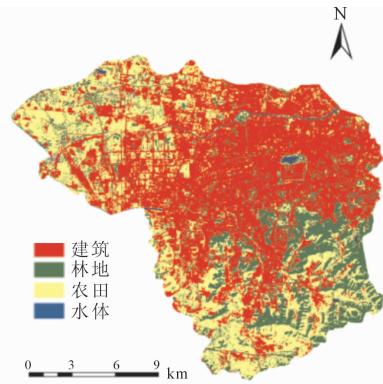


图13 2013年流域土地利用类型

表4 流域典型年土地利用情况统计表 km²

| 年份 | 建设用地 | 林地 | 农田 | 水体 |
|------|-------|-------|-------|-----|
| 1984 | 81.6 | 100.9 | 137.4 | 1.6 |
| 1992 | 96.1 | 100.2 | 123.2 | 1.8 |
| 2002 | 144.3 | 75.6 | 98.9 | 2.6 |
| 2013 | 168.3 | 61.6 | 86.9 | 4.5 |

3.2 汛期降水量趋势预测

Mann-Kendall 秩次相关分析法是对过去的降水量变化趋势进行分析,不能对降水量的变化趋势作出预测,利用基于R/S分析法计算的Hurst指数值来判断流域汛期降水序列未来的变化趋势。对流域7个雨量站和汛期面平均汛期降水量序列进行

R/S 分析,得到各雨量站和面平均汛期降水量序列的 Hurst 指数值,结果见图 14 ~ 图 21。流域各雨量站和面平均汛期降水量序列的 Hurst 指数值(表 5)均大于 0.5,这表明流域 7 个雨量站未来汛期降水量变化趋势与过去 37 年的变化趋势一致,继续保持上升趋势,7 个雨量站的未来汛期降水量增加的持

续程度为:兴隆山 > 刘家庄 > 东红庙 > 黄台桥 > 吴家铺 > 邵而 > 燕子山。此外,流域各雨量站的汛期降水量序列的 Hurst 指数值均接近 0.5,最大只有 0.686(兴隆山),说明流域汛期降水量未来的变化情况是呈微弱的增加状态,不会出现显著的增加趋势,这与前述汛期降水量变化趋势分析的结果一致。

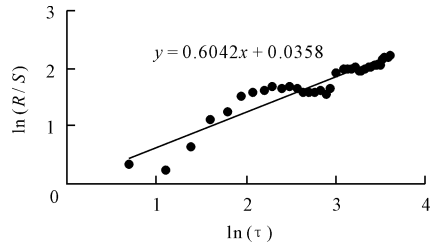


图 14 面平均 Hurst 指数拟合

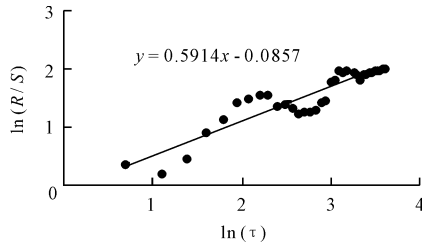


图 15 黄台桥 Hurst 指数拟合

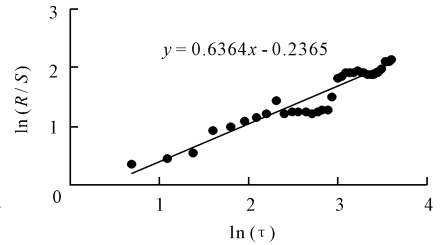


图 16 东红庙 Hurst 指数拟合

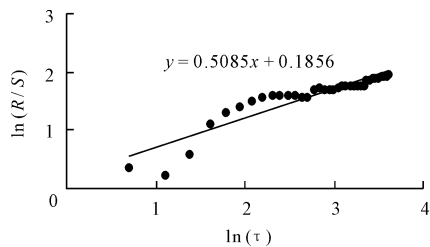


图 17 燕子山 Hurst 指数拟合

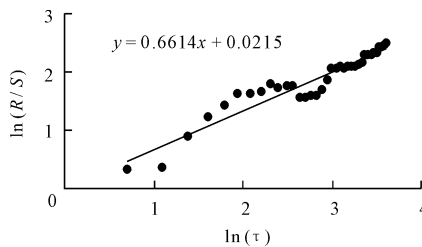


图 18 刘家庄 Hurst 指数拟合

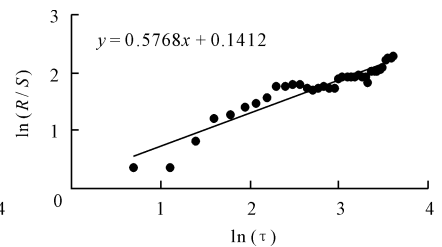


图 19 吴家铺 Hurst 指数拟合

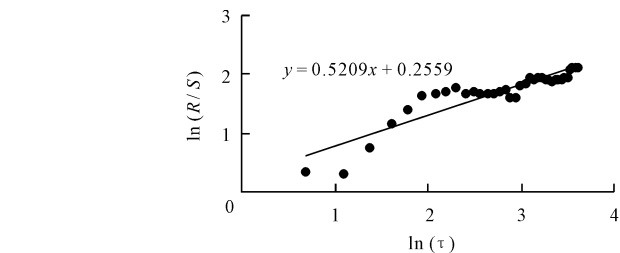


图 20 邵而 Hurst 指数拟合

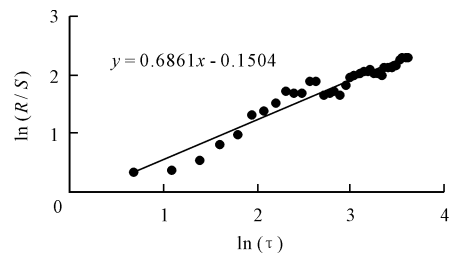


图 21 兴隆山 Hurst 指数拟合

表 5 降水量变化趋势的 Hurst 指数值

| 站名 | 黄台桥 | 刘家庄 | 吴家铺 | 邵而 | 东红庙 | 兴隆山 | 燕子山 | 面平均 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hurst 值 | 0.591 | 0.661 | 0.577 | 0.521 | 0.636 | 0.686 | 0.509 | 0.604 |

4 结论

(1) 济南市小清河流域汛期降水量有线性增长的趋势,流域汛期降水量在分析期内不存在周期和突变成分,但具有明显的阶段性变化特征,丰水年和枯水期交替出现。其中 1979 - 1989 年和 1999 - 2002 年为连续枯水年,1990 - 1998 年和 2003 - 2005 年为连续丰水年,2006 - 2013 年为连续平水年。

(2) 流域汛期降水量的空间分布情况是南部多、北部少,城区多、郊区少,降水由东南向西北方向递减。其中南部地区汛期多年平均降水量比北部地

区的多 39.8 mm,多出 8.2%,城区汛期多年平均降水量比郊区的多 10.1 mm,多出 2.0%。降水次数的空间分布情况与降雨量的空间分布一致。

(3) 流域各雨量站的汛期降水量未来的变化趋势均为增长,但增长趋势的持续程度不强。

参考文献:

- [1] 黄国如,冯杰,刘宁宁,等.城市雨洪模型及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [2] 杨富程,夏自强,黄峰,等.额尔齐斯河流域降水变化特征[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(4):432-437.

- [3] 龚道勇,王宗志,王海元,等. 南四湖流域 1964 - 2008 年汛期降水时空演变规律[J]. 中国农村水利水电, 2015 (11):48 - 54.
- [4] 陆志华,夏自强,于岚岚,等. 1958 - 2009 年松花江流域降水时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6):990 - 1000.
- [5] 刘扬,韦志刚. 近 50 年中国北方不同地区降水周期趋势的比较分析[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3):337 - 346.
- [6] 宋小燕,穆兴民,高鹏,等. 松花江流域哈尔滨站降雨径流历史演变及其驱动力分析[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2):46 - 51.
- [7] 樊毅,周芸,邹玥,等. 西南干热河谷降水蒸发变化趋势分析[J]. 人民长江, 2010, 41(1):17 - 20.
- [8] 黄蕊,徐利岗,刘俊民. 中国西北干旱区气温时空变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(13):4078 - 4089.
- [9] 王建莹,王双银,杨会龙,等. 石头河流域降雨径流变化特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6):179 - 183.
- [10] 金双彦,贾新平,蒋昕晖. 三门峡站天然年径流量周期性分析[J]. 人民黄河, 2005, 27(12):33 - 35.
- [11] 刘月,于翠松,曹升乐,等. 东阿地下水源地水质综合评价方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4):99 - 103.
- [12] 周园园,师长兴,范小黎,等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11):1361 - 1369.
- [13] 唐共地,包赢. 基于有序聚类分析法和 Mann - Kendall 法的水沙系列突变点研究[J]. 江淮水利科技, 2015 (6):35 - 37.
- [14] 陈远中,陆宝宏,张育德,等. 改进的有序聚类分析法提取时间序列转折点[J]. 水文, 2011, 31(1):41 - 44.
- [15] 冯新灵,罗隆诚,邱丽丽. 成都未来气候变化趋势的 R/S 分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1):83 - 87.
- [16] 冯新灵,罗隆诚,冯自立. 中国近 50 年降水变化趋势及突变的 Hurst 指数试验[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6):859 - 866.
- [17] 冯新灵,冯自立,罗隆诚,等. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究[J]. 干旱地区地理, 2008, 31(2):175 - 181.
- [18] 窦实. 济南市小清河流域暴雨洪水特性及主河槽水位设计分析研究[D]. 济南:山东大学, 2008.
- [19] 徐新创,张学珍,戴尔阜,等. 1961 - 2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7):1335 - 1347.
- [20] 于淑秋. 北京地区降水年际变化及其城市效应的研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(5):632 - 638.

(上接第 71 页)

试提出,其在水生态安全中的实际应用还需进一步研究,水量干涉限在水生态安全中的实际应用效果将是今后的工作重点。

参考文献:

- [1] 严立冬,岳德军,孟慧君. 城市化进程中的水生态安全问题探讨[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2007, 7(1):57 - 62.
- [2] 李媛,杨志峰,赵彦伟. 水安全内涵及其评价研究 - 以三峡库区万州为例[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(7):523 - 529.
- [3] 王启猛,朱国勋,张捷斌,等. 基于管理目标的塔里木河干流下游生态需水研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4):54 - 60.
- [4] 王西琴,刘昌明,杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展, 2002, 13(4):507 - 512.
- [5] 杨志峰,崔保山,刘静玲. 生态环境需水量评估方法与例证[J]. 中国科学(D辑), 地球科学, 2004, 34(11):1072 - 1082.
- [6] 崔瑛,张强,陈晓宏,等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4):465 - 480.
- [7] 张强,李剑锋,陈晓宏,等. 水文变异下的黄河流域生态流量[J]. 生态学报, 2011, 31(17):4826 - 4834.
- [8] 潘扎荣,阮晓红,周金金,等. 河道生态需水量研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4):89 - 94.
- [9] Arthington A H, Bunn S E, Poff L R, et al. et al. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems[J]. Ecological Applications, 2006, 16(4):1311 - 1318.
- [10] Hughes D A. Providing hydrological information and date analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers[J]. Journal of Hydrology, 2001, 241:140 - 151.
- [11] 张强,崔瑛,陈永勤. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8):1828 - 1837.
- [12] 姜德娟,王会肖,李丽娟. 生态环境需水量分类及计算方法综述[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4):369 - 378.
- [13] 范世香,刁艳芳,刘冀,等. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014:29 - 30.