

窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966 – 2010 年 降水变化特征分析

桑非凡¹, 宋孝玉¹, 王光社², 晁智龙³, 李焱林⁴

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 3. 陕西省水文水资源勘测局,

陕西 西安 710068; 4. 黄委会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 西峰 745000)

摘 要: 分析了榆林地区窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966 – 2010 年降水变化特征及集中期, 利用 IDW 空间插值法研究降雨的时空分布规律, 并通过 Mann – Kendall 非参数检验法和滑动 t 检验法对其突变和趋势进行检验。结果表明: 榆林地区窟野河、秃尾河、佳芦河流域降水量总体稳定在 400 mm 左右, 略有下降, 降水多集中于 7 月中旬, 不同时段降水量均为自上游至下游递增。研究时段内, 年降水未发生突变, 这为当地水资源开发和生态环境改善提供了有利条件。

关键词: 降水变化特征; 集中期; IDW 空间插值法; Mann – Kendall 法; 滑动 t 检验

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0035-07

Analysis of characteristics of precipitation variation for Kuye, Tuwei and Jialu river basins from 1966 to 2010

SANG Feifan¹, SONG Xiaoyu¹, WANG Guangshe², CHAO Zhilong³, LI Yaolin⁴

(1. State Key Laboratory Base of Eco – hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi

710048, China; 2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an,

Shaanxi 710001, China; 3. Shaanxi Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Xi'an, Shaanxi 710068, China;

4. Xifeng Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Xifeng Gansu 745000, China)

Abstract: The article analyzed the concentration period and the characteristics of precipitation variation in Kuye, Tuwei and Jialu river basins of Yulin prefecture from 1966 to 2010, and used IDW (inverse distance weighted) to research the temporal and spatial distribution law, and took Mann – Kendall and moving t – test method to test its mutation and trend. The result shows that the overall precipitation of the area is about 400mm and is stability and slightly down. Precipitation was concentrated in middle July and was increased through up-stream to downstream. The annual precipitation did not take place mutation in this area which is meaningful for the development of water resources and the improvement of ecological environment.

Key words: characteristics of precipitation variation; concentrated period; inverse distance weighted; Mann-Kendall method; moving t-test

1 研究背景

近年来, 气候变化对环境、生态、农业已造成极大影响, 洪涝、干旱等自然灾害频发, 不断危害着人类的生产和生活。降水是气候变化研究的重要内容之一, 是影响水资源的直接要素^[1]。榆林地处陕西省北部,

人类活动频繁, 生态环境破坏严重, 为典型的黄土高原地区, 研究该地区的降水特征, 对其水资源的合理开发利用、预测极端降水、改善生态环境都具有重要意义。李振朝等^[2]对黄土高原地区 1951 – 2000 年气温降水的地理分布特征和气候变化特征进行分析并得到平均年降水量南多北少, 东多西少, 50 年来降水

收稿日期: 2015-08-20; 修回日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171034); 陕西省自然科学基金(重点)项目(2013JZ012); 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(2013JC18)

作者简介: 桑非凡(1991-), 男, 山西晋城人, 硕士, 主要从事水文学及水资源方面研究。

通讯作者: 宋孝玉(1971-), 女, 陕西安康人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水文学及水资源利用研究。

量总体递减的规律;焦菊英等^[3]对黄土高原 13 条流域进行次降雨空间分布不均匀性分析,得到次降雨面均匀性差,流域最大点与最小点雨量相差很大等规律;李志等^[4]基于 48 个站点的监测数据利用反距离权重插值法和 MK 法对黄土高原 1961–2009 年气象要素的时空分布进行了分析;刘慧荣等^[5]对清涧河近 50 年降水资料进行分析,得到了其变化周期及突变情况;杨轶文等^[6]、赵晓坤等^[7]、雷勇南等^[8]、苏念良等^[9]对窟野河流域降水径流等水文特性进行分析,预测了窟野河流域降水变化趋势,并分析了影响降雨的驱动因素及人类活动的影响。虽然已有学者对榆林地区降水变化特征进行了研究^[10–11],但由于其采用站点稀疏、时间序列较短,无法反映榆林地区近年来降水变化特征。本文以窟野河、秃尾河、佳芦河 3 个流域 28 个雨量站 1966–2010 年降雨数据为依据,利用 IDW 空间插值法揭示该地区降雨的时空变化规律,以期为当地水资源的合理开发与利用、生态环境保护等提供依据。

2 研究区域概况与资料来源

榆林市位于陕西省北部,在陕甘宁蒙晋五省(区)交界接壤地带,介于东经 107°28′~111°15′,北纬 36°57′~39°34′之间。地域内东西长 385 km,南北宽约 263 km,总面积 43 578 km²。地貌以长城为界,长城以北为风沙草滩区,约占辖区面积的 43%,以南为黄土丘陵沟壑区,约占辖区面积的 57%。气候属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,气温日较差大,年平均气温 10℃,多年平均降水在 400 mm 左右,无霜期短,仅为 150 d 左右。

窟野河、秃尾河、佳芦河位于榆林市东北部,流经神木、府谷、佳县、榆阳等区县,本文选取该区域 28 个雨量站 1966–2010 年逐日降雨数据,各雨量站点分布比较均匀(图 1),降雨数据系列连续、代表性好。

3 研究方法

3.1 降水空间分布规律研究方法

反距离权重插值法 IDW(inverse distance weighted)是 GIS(地理信息系统)中一种常用的空间插值方法^[12],以插值点与样本点的距离为权重进行加权平均,离插值点越近,样本点被赋予的权重就越大。设平面上分布着一系列离散点,已知其坐标为 X_i , Y_i , Z_i ($i = 1, 2, \dots, n$),根据周围离散点的值,通过距离加权值来求 Z 点值,则:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

式中: $d_i^2 = (X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2$ 。

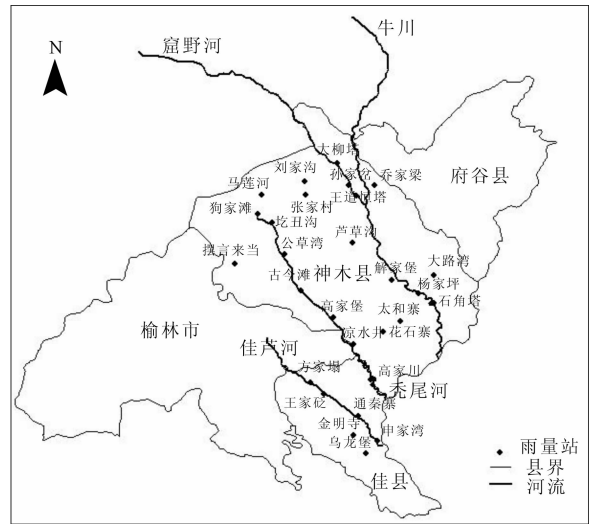


图 1 窟野河、秃尾河、佳芦河流域雨量站分布图

3.2 降水时间分配规律研究

降水年内分配规律可用集中度和集中期表示^[13]。降水集中度和集中期的计算是将一年内各个时段的降水量作为向量看待,降水量的大小为向量的长度,所处的时段为向量的方向。各个时段的方位角平均分配,按月来划分,即从 1 至 12 月的方位角分别为 0°、30°、60°、90°……330°。将每天的降水量所代表的向量分解在 x 和 y 两个方向上,分别为:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} R_i \cos \theta_i, R_y = \sum_{i=1}^{12} R_i \sin \theta_i \quad (2)$$

其合成向量为:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (3)$$

降水集中度 D_c 和集中期 P_c 由下式进行计算:

$$D_c = R / \sum_{i=1}^{12} R_i \quad (4)$$

$$P_c = \arctan(R_y / R_x) \quad (5)$$

式中: R_i 和 θ_i 为各月降水量向量;集中期 P_c 的角度值由 R_x 和 R_y 的正负号来确定。

3.3 降水趋势及突变分析方法

3.3.1 Mann-Kendall(M-K)非参数统计法^[14–18]
M-K 法是世界气象组织推荐的趋势性分析中最常用的方法,现已广泛应用于降水、气温等序列的研究。其基本原理为:对具有 n 个样本的时间序列构造一个序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, 4, \dots, n \quad (6)$$

其中:

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{当 } x_i > x_j \\ 0, & \text{当 } x_i < x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (7)$$

由此可见,秩序列 s_k 是第 i 时刻数值大于第 j 时刻数值个数的累计值。

假定时间序列随机独立,定义如下统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{D(s_k)}} \quad (8)$$

式中: $E(s_k)$ 、 $D(s_k)$ 为累计值 s_k 的数学期望和方差,其计算公式如下:

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (9)$$

$$D(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (10)$$

UF_i 服从标准正态分布,是按时间序列 x 顺序计算出的统计量序列。给定显著性水平 α ,确定置信区间临界值 U_α ,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明该序列存在明显的趋势变化。按时间序列的逆序重复上述过程,得到其逆序统计量 UB_i ,使得 $UB_k = -UF_k$,绘制 UB_k 、 UF_k 的曲线,超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。若两曲线相交且交点在临界线内,则交点对应突变开始时刻。

3.3.2 滑动 t 检验法 通过 M-K 法可初步判别突变,但确定是否突变须进一步借助其他方法,本文使用滑动 t 检验法^[19-21]。滑动 t 检验法是一种常用的检验突变的方法,一般通过考察两组样本平均值的差异显著程度来判断是否突变。

设有一样本容量为 n 的序列 X ,设置某一时刻为基准点,并取前后 n_1, n_2 长度的 2 个子序列,进行连续滑动计算,得到 t 的统计量序列,即:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (11)$$

给定显著性水平 α ,确定临界值 t_α ,若 $|t| < t_\alpha$,则可认为基准点前后 2 个序列无显著差异,否则为出现突变。

4 结果分析

4.1 降水量空间分布规律

本文通过 ArcGIS 软件中的 IDW 空间插值方法,对榆林地区窟野河、秃尾河、佳芦河流域共 28 个雨量站逐年降雨数据进行反距离权重插值,并绘制各流域不同时间段的多年平均降雨量等值线图,分别

得到 1966—1975、1976—1985、1986—1995、1996—2005、2006—2010 及 1966—2010 年共 6 个时段的降水量空间分布情况,如图 2 所示。

由图 2(a)可以看出:窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966—1975 年多年平均降水量最大值为 450.4 mm,最小值为 311.3 mm。窟野河流域降水量自上游至下游呈递减趋势,较其它两个流域偏小,但下游汇入黄河处降水量大;秃尾河、佳芦河上游降水量小,中游大部降水量大,下游较小。由降雨量等值线图还可以发现:三流域 1966—1975 年最小降水量出现在窟野河与秃尾河上游区域,最大降水量出现在秃尾河与佳芦河的中游区域,以图 2(a)中 400 mm 雨量线为分界,向北降水量逐渐减小,向南降水量逐渐增大。

由图 2(b)可以看出:窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1976—1985 年多年平均降水量最大值为 423.4 mm,最小值为 332.3 mm。窟野河上中游降水量大,下游降水量小;秃尾河及佳芦河沿河降水量小,且秃尾河上游和佳芦河中上、中下游存在降水量极小的区域。由降雨量等值线图还可以发现:3 个流域 1976—1985 年最小降水量出现在秃尾河上游区域,最大降水量出现在窟野河上游区域,以图 2(b)中 380 mm 雨量线为分界,向东北方向降水量逐渐增加,向西南降水量减少。

如图 2(c)可以看出:窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1986—1995 年平均降水量最大值为 457.6 mm,最小值为 262.3 mm。窟野河中上游偏向秃尾河方向地区降水量大,上游及下游降水量小;秃尾河从上游至下游降水量呈递增趋势,但变化不明显;佳芦河中上游降水量大,中下游小。由降雨量等值线图还可以发现:3 个流域 1986—1995 年最大降水量出现在窟野河中上游区域,最小降水量秃尾河上游区域,以图 2(c)中 380 mm 雨量线为分界,向北降水量增加,向南降水量减少。

如图 2(d)可以看出:窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1996—2005 年平均降水量最大值为 423.2 mm,最小值为 229.7 mm。窟野河中上游降水量大,下游小;秃尾河上游、中游降水量大,其他地区较小;窟野河与秃尾河下游间地区降水量大;佳芦河中游降水量小,下游降水量大。由降雨量等值线图还可以发现:3 个流域 1996—2005 年最大降水量出现在秃尾河上游区域,最小降水量出现在佳芦河中游区域,以图 2(d)中 371 mm 雨量线为分界,向北降水量增加,向南降水量减少。

如图 2(e)可以看出:窟野河、秃尾河、佳芦河流

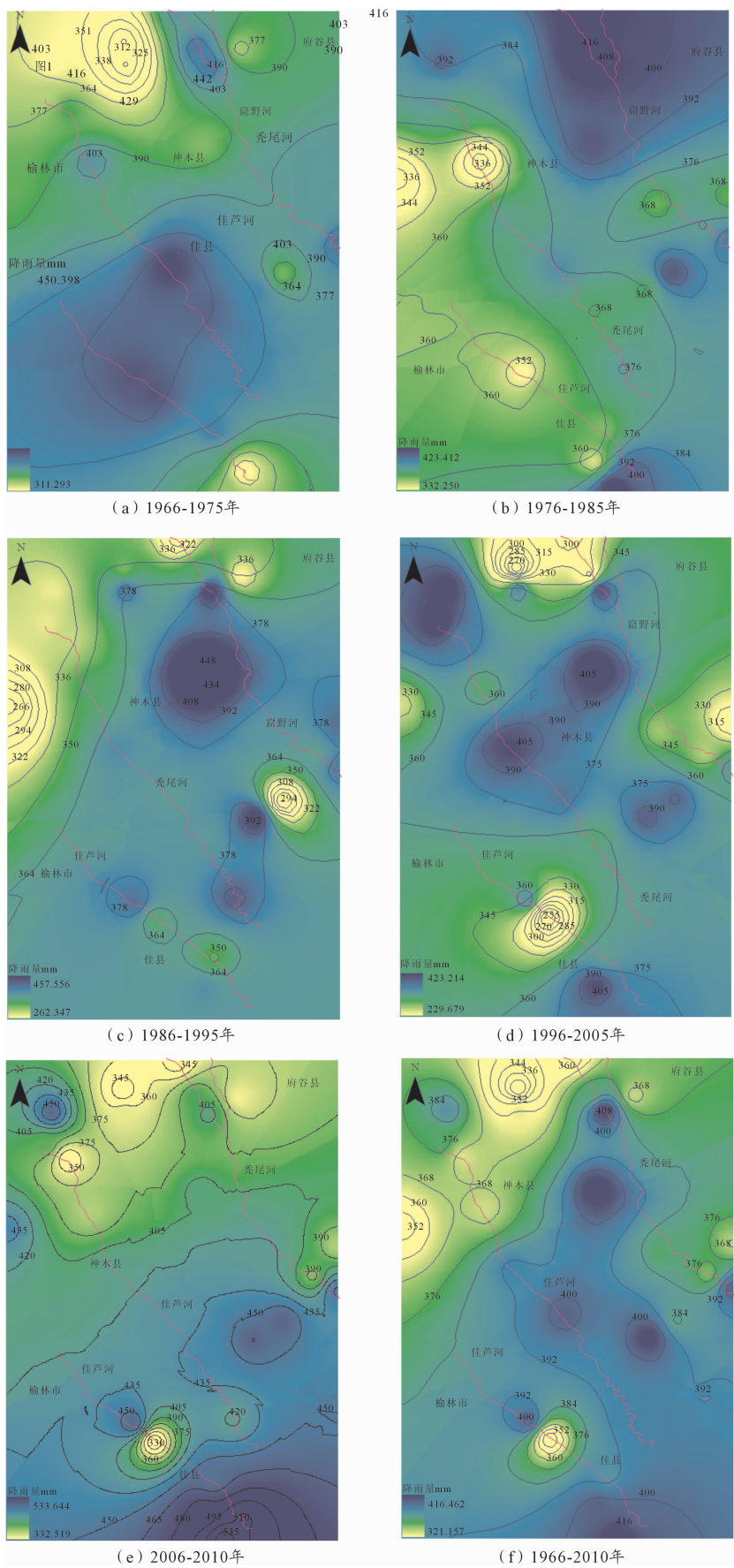


图 2 窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966 - 2010 年降水量等值线图 (单位:mm)

域 2006 – 2010 年平均降水量最大值为 533.6 mm,最小值为 332.5 mm。窟野河、秃尾河自上游至下游降水量呈递增趋势;佳芦河中游降水量小,上游及下游降水量大。由降雨量等值线图还可以发现:3 个流域 2006 – 2010 年最大降水量出现在佳芦河下游区域,最小降水量出现在秃尾河上游区域,以图 2 (e)中 384 mm 雨量线为分界,北部降水量小,南部降水量大。

如图 2(f)可以看出:窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966 – 2010 年多年平均降水量最大值为 416.5 mm,最小值为 321.2 mm,从西北到东南即 3 个流域上游至下游方向降雨量基本成递增趋势,其中窟野河上、中游降水量大,下游降水量小;秃尾河上游降水量小,中游至下游段大;佳芦河上、下游段降水量大,中游段降水量小。由降雨量等值线图还可以发现:3 个流域 1966 – 2010 年最大降水量出现在窟野河上游区域,最小降水量出现在佳芦河中游区域,以图 2(f)中 385 mm 雨量线为分界,北部降水量小,南部(除佳芦河中游段)降水量大。

综合图 2(a) ~ (f)得出:该地区多年平均降水量最大值为 414.6 mm,最小值为 319.8 mm。其中以 2006 – 2010 年的多年平均降水量最大,为 533.6 mm;以 1996 – 2005 年的多年平均降水量最小,为 229.7 mm。

窟野河、秃尾河、佳芦河流域不同时段多年平均降雨量统计结果,见表 1。

不同时段多年平均降水量值总体上佳芦河流域最大,秃尾河次之,窟野河最小。该地区多年平均降

水量在 400 mm 左右。窟野河流域 1976 – 1985、2006 – 2010 年间降水量较大,1996 – 2005 年间降水量小,较 2006 – 2010 年降低约 15%;秃尾河流域 1966 – 1975、2006 – 2010 年降水量较大,1986 – 1995 年降水量小,较 2006 – 2010 年降低约 16%;佳芦河流域 2006 – 2010 年降水量较大,1996 – 2005 年降水量小,较前者降低约 23%。该地区 2006 – 2010 年降水量较大,1986 – 2005 年降水量小,较前者降低约 16%。

由于 2006 – 2010 年该地区降水量较往年偏大,进一步对该时段降雨序列进行突变分析,检验其是否发生突变。

4.2 降水量时间分配规律

4.2.1 降水的年内分配规律 选取窟野河、秃尾河、佳芦河 3 个流域共 28 个代表性较好的雨量站,将 1966 – 2010 年各雨量站逐日降雨量资料转换为逐月降雨量,然后求得各流域逐月降雨量。利用式 (1) ~ (4)对降雨集中度和集中期进行计算,结果见表 2。

表 1 窟野河、秃尾河、佳芦河不同时段多年平均降水量统计表

年段	窟野河	秃尾河	佳芦河	全流域
1966 – 1975	387.6	402.4	405.4	398.5
1976 – 1985	391.1	367.5	372.0	376.9
1986 – 1995	364.0	352.9	367.9	361.6
1996 – 2005	342.6	379.3	356.5	359.4
2006 – 2010	395.7	419.2	463.3	426.1

表 2 窟野河、秃尾河、佳芦河流域降雨集中度与集中期计算结果表

流域	窟野河	秃尾河	佳芦河	全区域
集中度 D_c	0.66	0.65	0.60	0.64
集中期 P_c	192°26'35.3"	191°44'23.2"	191°10'42.9"	191°47'57.3"
对应日期	7 月 12 日	7 月 12 日	7 月 11 日	7 月 12 日

由表 2 可知:窟野河流域 1966 – 2010 年降水集中期为 192°26'35.3",对应日期为 7 月 12 日,集中度为 0.66;秃尾河流域降水集中期为 191°44'23.2",对应日期为 7 月 12 日,集中度为 0.65;佳芦河流域降水集中期为 191°10'42.9",对应日期为 7 月 11 日,集中度为 0.60。全区域降水集中期为 191°47'57.3",对应日期为 7 月 12 日,集中度为 0.64。整个区域计算结果基本一致。

4.2.2 降水量年际变化规律 绘制窟野河、秃尾

河、佳芦河流域 1966 – 2010 区域平均年降水量过程,如图 3。

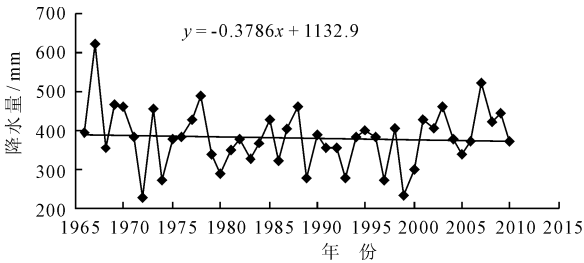


图 3 窟野河、秃尾河、佳芦河流域平均年降水量变化过程

由图 3 可知:榆林地区东北部 1966—2010 年降水量最大值为 620.6 mm (1967), 最小值为 224.8 mm (1972), 整体呈略有下降的趋势, 仅在 1965—1970、1970—1975、1995—2000 年区间出现较大变化。

4.2.3 降水趋势及突变分析 对 28 个雨量站年降水量进行 Mann—Kendall 趋势分析, 得出:该地区降水量总体呈下降趋势, 仅东南及中部少数站点呈上升趋势(图 4)。在下降趋势中东南部及西北部共 10 个站点下降显著(UF 超过显著性水平 0.05 的置信区间), 其余 11 个站点下降不显著, 而上升趋势仅两个站点显著。

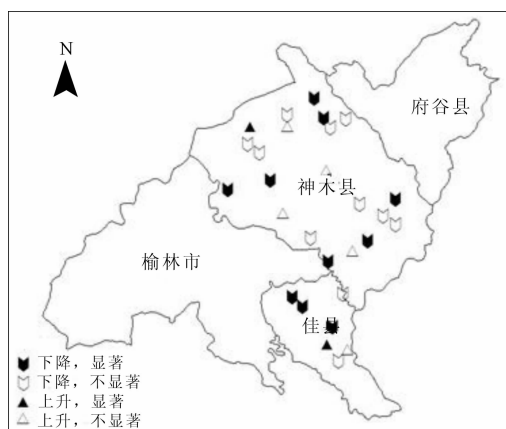


图 4 1966—2010 年窟野河、秃尾河、佳芦河流域降雨量单调趋势图

窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966—2010 年降雨量突变分析, 结果见图 5。

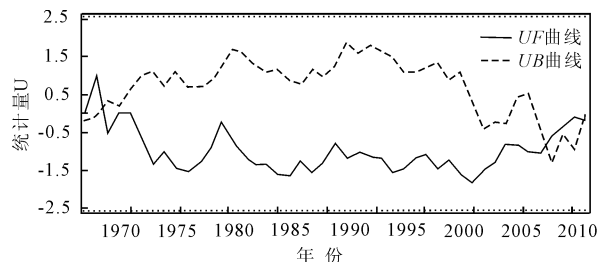


图 5 窟野河、秃尾河、佳芦河流域降雨量突变分析图

由图 5 可知, 窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966—2010 年降水量的正序列曲线 UF 未超过显著性水平 0.05 的置信区间, 因此该地区降水量下降趋势整体表现为不显著, 与趋势线方程分析结果一致。正反序列曲线 UB 与 UF 在 1967、2007 及 2010 年有 3 个交点, 可能为突变点。

因此对可能的突变点进行滑动 t 检验(图 6), 结果显示当显著性水平为 0.01, 子序列长度为 3

时, 整个研究时段内统计量 t 均未超过置信区间, 故 1966—2010 年该地区降水量未出现突变点。

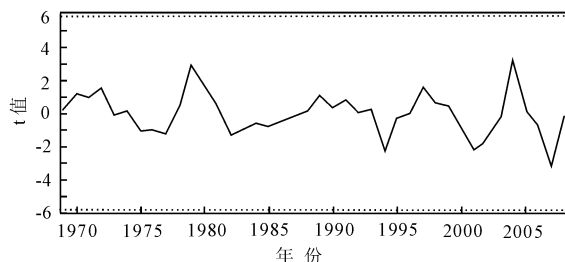


图 6 窟野河、秃尾河、佳芦河流域降雨量滑动 t 检验图

5 结 语

本文使用 ArcGIS 软件 IDW 空间插值方法对榆林市窟野河、秃尾河、佳芦河流域 1966—2010 年降水变化特征进行了分析, 计算了降雨的集中度与集中期, 并利用 Mann—Kendall 非参数检验法和滑动 t 检验法对降雨的突变和趋势进行了分析, 得到结论如下:

(1) 窟野河、秃尾河、佳芦河流域降雨多集中于 7 月份, 符合黄土高原地区降水特性; 1966—2010 年降水量总体上呈微小下降趋势, 通过数据分析结合 Mann—Kendall 法检验得知, 年降雨量下降趋势不显著。

(2) 通过 ArcGIS 反距离权重插值法分析可知: 窟野河、秃尾河、佳芦河流域不同时段降水量总体上呈现由上游至下游递增趋势, 佳芦河中游常出现降水量较小值, 2006—2010 年该地区降水量较往年偏大。由降雨量等值线图可知该地区降水量存在区域差异, 南北方向降水情况常不均匀, 存在明显的等雨量值分界线。

(3) 通过 Mann—Kendall 法检验以及滑动 t 检验可知, 在研究期间内该地区降雨未出现突变, 其中 10 个站点下降趋势显著, 2 个站点上升趋势显著。

(4) 本文对窟野河、秃尾河、佳芦河的降雨特性单独研究及联合研究结果基本一致, 表明该地区降雨分布相对均匀, 降水量变化特征如趋势、突变点、周期等差异不大, 在该地区采用水文比拟法进行降水资料移用具有一定的可行性, 为当地水资源开发和生态环境改善提供了依据。

参考文献:

- [1] 王群英, 龚道溢. 华北降水资源的变化及其与厄尔尼诺的关系[J]. 自然资源学报, 1999, 14(2): 103—108.
- [2] 李振朝, 韦志刚, 文军, 等. 近 50 年黄土高原气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3): 57—62.

[3] 焦菊英,王万忠. 黄土高原降雨空间分布的不均匀性研究. 水文,2001,21(2):20 – 24.

[4] 李志,赵西宁. 1961 – 2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析[J]. 自然资源学报,2013,28(2):287 – 299.

[5] 刘慧荣,周维博,李云排,等. 清涧河流域近 50 年降水变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(5):124 – 127 + 130.

[6] 杨轶文,杨青惠. 窟野河流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(1):57 – 60 + 64.

[7] 赵晓坤,王随继. 窟野河洪水特性及变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(4):92 – 96.

[8] 雷泳南,张晓萍,张建军,等. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J]. 生态学报,2013,33(5):1559 – 1568.

[9] 苏念良,马文进,蔡文彦,等. 窟野河水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(2):65 – 68.

[10] 刘智勇,张鑫,方睿红. 基于 DEM 的榆林市降水空间插值方法分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):227 – 234.

[11] 王小军,贺瑞敏,尚嫚廷. 榆林市降水时空变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(5):103 – 108.

[12] 汤国安,杨昕,等. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2012.

[13] 郭瑜. 河南省近 49 年来降水和气温变化特征研究[D]. 郑州:郑州大学,2012.

[14] 陆文秀,刘丙军,陈俊凡,等. 近 50a 来珠江流域降水变化趋势分析[J]. 自然资源学报,2014,29(1):80 – 90.

[15] 简虹,骆云中,谢德体. 基于 Mann – Kendall 法和小波分析的降水变化特征研究——以重庆市沙坪坝区为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(4):217 – 222.

[16] 孙东永,畅建霞,黄强,等. V/S 和 Mann – Kendall 相结合的方法在洪涝灾情分析中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(4):230 – 234.

[17] 于延胜,陈兴伟. 基于 Mann – Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究[J]. 自然资源学报,2011,26(9):1585 – 1591.

[18] 康淑媛,张勃,柳景峰,等. 基于 Mann – Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. 资源科学,2009,31(3):501 – 508.

[19] 向亮,郝立生,安月改,等. 51a 河北省降水时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理,2014,37(1):56 – 65.

[20] 李珍,姜逢清. 1961 – 2004 年新疆气候突变分析[J]. 冰川冻土,2007,29(3):351 – 359.

[21] 陈艺敏,钱永甫. 116a 长江中下游梅雨的气候特征[J]. 南京气象学院学报,2004,27(1):65 – 72.



(上接第 34 页)

[3] WMO. Water resources and climatic change: sensitivity of water resources system to climate change and variability[M]. Geneva:WMO/TO, 1987.

[4] 夏星辉,吴琼,牟新利. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(1):124 – 133.

[5] Rummukainen M, Bergstrom S, Persson G, et al. The swedish regional climate modelling programme, SWE-CLIM: A Review[J]. Ambio, 2004, 33(4 – 5):176 – 182.

[6] 姜忠峰,李畅游. 乌梁素海进出水量变化及水量平衡初步分析[J]. 人民黄河,2013,35(9):76 – 78.

[7] 王兰化. 天津市平原区深层淡水咸化 – 咸水下移问题的讨论[J]. 地质调查与研究,2004,27(3):169 – 176.

[8] 李昌峰,高俊峰,曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J]. 土壤,2002(4):191 – 196 + 205.

[9] 毛熙彦,蒙古军. 土地利用变化的水文效应研究进展[J]. 北京大学学报(自然科学版),2013,49(5):928 – 936.

[10] Roland E. Schulze. Modelling hydrological responses to land use and climate change: a southern african perspective[J]. Ambio, 2000, 29(1):12 – 22.

[11] O’Connell P E, Ewen J, O’Donnell G, et al. Is there a link between agricultural land – use management and flooding? [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(1):96 – 107.

[12] Haase D. Effects of urbanization on the water balance – A long – term trajectory[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29(4):211 – 219.