

清涧河流域近50年降水变化特征分析

刘慧荣, 周维博, 李云排, 舒媛媛, 董起广
(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用清涧河子长站1959-2008年实测月降水资料,对降水量年内分配的不均匀性、集中程度进行了详细的分析计算;应用Mann-Kendall检验方法分析了清涧河降水量的年际及季节变化趋势,并对降水量系列进行了突变分析。结果表明:降水量年内分配不均匀系数 C_u 年代之间变化不大,降水相对集中;降水年际变化丰枯交替周期较长;整体上年降水量呈减少趋势,在1964年和2005年共发生两次突变。

关键词: 降水; 年内分配; 年际变化; Mann-Kendall突变分析; 清涧河

中图分类号: TV121.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)05-0124-04

Analysis of variation characteristics of precipitation in Qingjian river basin during recent 50 Years

LIU Huirong, ZHOU Weibo, LI Yunpai, SHU Yuanyuan, DONG Qiguang

(School of Environment Science and Technology, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The non-uniform coefficient of distribution of years and concentration degree of the Qingjian River precipitation were calculated in great detail based on the monthly precipitation data measured at Zichang station from 1959 to 2008. The method of Mann-Kendall rank correlation is used to analyze the annual and seasonal precipitation change trend and the mutation of precipitation series. Results indicated that uneven distribution coefficients of rainfall years change little and precipitation is relative concentration; precipitation interannual variation and alternation cycle is longer than the other; the year precipitation on the whole shows a trend of decrease and has two mutations in 1964 and 2005.

Key words: precipitation; annual distribution; interannual variation; Mann-Kendall mutation analysis; Qingjian river

20世纪90年代以来,极端气候灾害频发,旱情持续加重,大多数季节性河流干枯,其原因除去全球气候变暖对降水可能产生的影响外,还与各种人为活动的直接或间接影响使得有效降水减少密切相关^[1]。降水是地球淡水资源的唯一补给来源,是影响水资源的最直接因素^[2],因此研究降水量在时间序列上的变化趋势,探索其对气候变化的敏感响应,为合理利用水资源、科学防洪调度、制定水资源长期规划和保护流域水资源等提供重要的参考价值。

1 研究区概况

清涧河是延安市第三大河流,属入黄一级支流。该流域位于东经 $109^{\circ}12' \sim 110^{\circ}24'$,北纬 $36^{\circ}39' \sim 37^{\circ}19'$ 之间。发源于子长县李家岔乡周家土岔村,流经安塞、子长、延川、延长和榆林的清涧等五县,于土岗苏亚村附近汇入黄河支流,流域面积为4 078

km^2 ,全长169.9 km。该流域属于大陆性暖温带季风半干旱气候,年平均气温为 9.5°C ,多年平均降水460.8 mm,水资源总量为1.53亿 m^3 ^[3]。

2 资料与方法

2.1 数据资料

清涧河流域有子长和延川两个雨量站,根据资料进行代表性、一致性检验分析,选取具有代表性的子长站实测年降水资料来分析该流域的降水特征。子长站位于陕西省子长县冯家屯乡湫沟台村,至河口距离110 km,集水面积913 km^2 ,设立日期1958年7月。

2.2 分析方法

2.2.1 降水年内分配分析方法 降水量年内分配特征的标度常规采用各月、各季等占年降水量的百分比和距平百分率等。分析清涧河流域降水的年内

收稿日期:2013-06-01; 修回日期:2013-06-20

作者简介:刘慧荣(1988-),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事水资源与水利工程方面的研究。

通讯作者:周维博(1956-),男,陕西乾县人,教授,博士生导师,从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学与研究工作。

分布,采用降水不均匀性系数、降水集中度和降水集中中期等指标^[4-8]。

(1) 降水不均匀性。综合反映降水年内分配不均匀性的指标采用年内分配不均匀系数 C_u ^[6,8] 来衡量。

$$C_u = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2} / \bar{R} \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R_i \quad (2)$$

式中: R_i 为年内各月降水量; \bar{R} 为年内月平均降水量。可以看出, C_u 值越大,表明各月降水量相差越悬殊,即年内分配越不均匀。

(2) 降水集中度和集中中期。降水集中度和集中中期^[4-8] 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^[7]。各个时段的方位角平均分配,按月划分,从1月到12月的方位角 θ 分别是 15° 、 45° 、 75° 、...、 345° 。

将各个时段的降水量分解为 x 和 y 两个方向上的分量为:

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

合成向量为:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

而降水集中度 D_c 和集中中期 P_c ,利用下式进行计算:

$$D_c = R / \sum_{i=1}^{12} R_i \quad (3)$$

$$P_c = \arctan(R_y / R_x) \quad (4)$$

式中: R_i 和 θ_i 为各月降水量向量的大小和方向; R_x 和 R_y 为各月向量在水平、垂直方向的分量,集中中期 P_c 的角度值在计算时要视 R_x 和 R_y 的正负号而定。

2.2.2 降水年际变化分析方法

(1) Mann - Kendall (M - K) 非参数统计法。Mann - Kendall^[9-10] (M - K) 非参数统计法是世界气象组织推荐并广泛使用的一种方法,是趋势性分析中最常用的方法,该方法更适合于水文气象等非正态分布数据。其基本原理为,首先确定序列中对偶观测值 ($i < j$, $X_i < X_j$, i, j 为序列的时序) 出现的个数 s ,用下式计算其检验统计量:

$$M = \tau / \sigma_\tau \quad (5)$$

$$\tau = \frac{4s}{n(n-1)} - 1 \quad (6)$$

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (7)$$

式中: n 为系列长度,取 $\alpha = 5\%$ 的显著水平,若 $|M| > M_{\alpha/2} = 1.96$,则时间序列有明显的趋势。 M 值为正,表明具有上升或增加趋势, M 值为负,则意味着下降或者减少趋势。

(2) M - K 突变检验。设有一时间序列为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,构造一秩序列 m_i ,表示 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的样本累计数。定义 d_k 为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq n)$$

d_k 的均值以及方差近似为:

$$E(d_k) = k(k-1)/4,$$

$$\text{Var}(d_k) = k(k-1)(2k+5)/72$$

$$(2 \leq k \leq n)$$

假设时间序列是随机独立的,定义统计量:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{Var}(d_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

给定显著性水平 α ,若 $|UF_k| > UF_{\alpha/2}$,则表明序列存在明显的变化趋势。将时间序列逆序排列,再按照式(8)计算,同时使:

$$UB_k = -UF_k (k = n+1-k) \quad (9)$$

若 $UF_k > 0$,则表明序列呈上升趋势; $UF_k < 0$,则表明序列呈下降趋势;当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著;若 UF_k 和 UB_k 这2条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻可能就是突变开始的时刻^[11]。

3 结果分析

3.1 降水量年内分配

将清涧河子长站的实测月降水资料按式(1)~式(4)进行计算,结果列于表1。其中,集中中期 P_c 用度数表示,将角度换算成月份,得出最大降水量的出现日期,绘制 C_u 、 D_c 曲线,见图1,多年月平均降水量见图2。

表1 降水量各年代年内分配统计结果

统计时段	C_u	D_c	P_c	最大降水量出现日期/(月-日)
1959-1969	1.14	0.61	175.77	06-26
1970-1979	1.19	0.64	191.69	07-12
1980-1989	1.15	0.63	198.15	07-19
1990-1999	1.19	0.61	197.39	07-18
2000-2008	1.19	0.65	169.75	06-20
多年平均	1.17	0.63	186.67	07-07

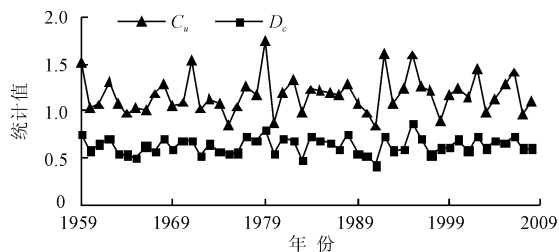


图1 降水量年内分配参数变化曲线

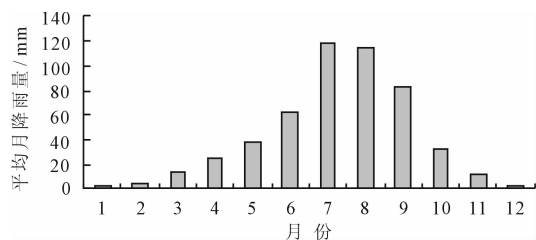


图2 多年月平均降水量图

由表1和图2可以看出,清涧河流域降水量年内分配不均匀系数 C_u 年代之间变化不太大,20世纪60年代和80年代 C_u 值偏小,年内分配比较均匀,但70年代、90年代及之后 C_u 值偏大,降水量年内分配相对集中,且 C_u 、 D_c 的变化趋势基本一致。由图2可以看出,清涧河降水量主要集中在7-9月份,占到年降水量的62.2%,而12-1月份降水量明显偏少,约为全年的1.15%。

3.2 降水量年际分配

3.2.1 降水年际变化 利用清涧河子长站各年降水量组成降水系列。绘制该流域1959-2008年降水变化过程及5年滑动平均过程,并添加变化趋势

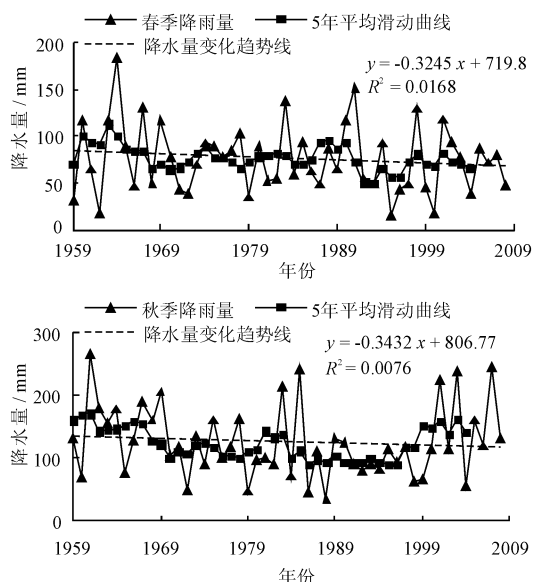


图4 四季降水量变化线

3.2.3 M-K趋势分析 根据M-K趋势检验法对清涧河1959-2008年降水量进行分析,得出全年

线(图3)。从图中可以看出,该流域多年平均降水为460.8 mm,降水年际变化丰枯交替周期较长。在1965-2001年之间降水基本处于枯水期,自此之后直到现在,清涧河流域降水一直处于丰水期。

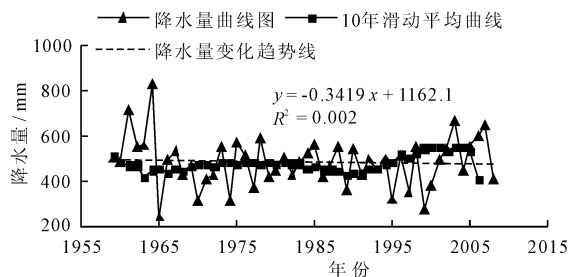
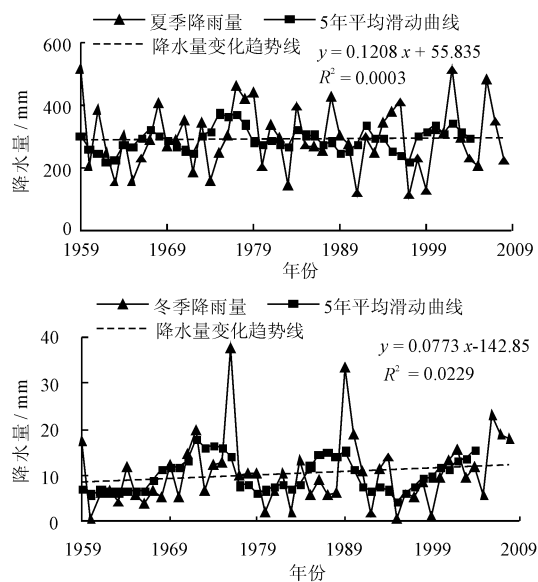


图3 年降水量变化线

3.2.2 降水季节变化 清涧河流域多年平均春夏秋冬四季降水分别为76.2、295.4、126.1、10.4 mm,分别占全年降水量的20%、58.1%、24.8%及2.1%。夏季为主要降水时期,其次为秋季,两季降水占全年降水的82.9%。由图4可以看出,该流域春季降水变化较为剧烈,但基本都在均值附近波动,震荡幅度较大。夏季降水较春季稍缓和,在整个研究时段,20世纪60年代基本都处于枯水期,此后丰枯交替频繁。秋季降水变化波动不太大,在80年代初到90年代末处于枯水期,此后至今一直处于丰水期。冬季降水变化幅度较大,70年代以前、80年代及90年代中后期一直处于枯水期,但由趋势线可以看出未来冬季降水仍有增加的趋势。



以及各个季节的变化趋势(表2),春秋季降水量呈减少趋势,夏冬季呈增加趋势,且冬季增加趋势显

著,但整体上年降水量呈减少趋势。

表 2 年平均降水量变化趋势
($\alpha = 5\%$, $M_{\alpha/2} = 1.96$) mm

时段	年平均降水量	M	变化趋势	显著性
春	76.21	-0.72	减少	否
夏	295.35	0.12	增加	否
秋	126.13	-0.84	减少	否
冬	10.38	1.44	增加	显著
全年	42.30	-0.39	减少	否

3.2.4 M-K 突变分析 将子长站近 50 年的年降水资料用 M-K 法做突变检验,结果表明,该流域年降水量处于下降趋势,在 1964 年发生突变,直到 2005 年再次发生突变,下降趋势比较缓和(图 5)。

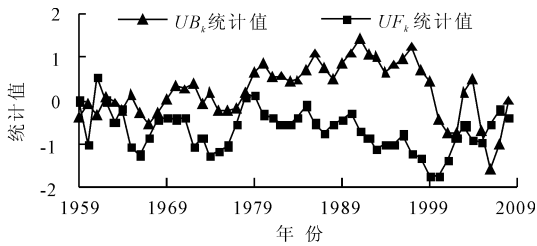


图 5 年降水量 Mann-Kendall 统计量曲线

春季降水量在 1992 年之前呈增加趋势,在 1992 年发生突变,降水量处于下降趋势(图 6)。

夏季降水量在 1967 年之前呈下降趋势,在 1967 年发生突变,降水量处于上升趋势,直到 2004 年再次发生突变,下降趋势缓和(图 7)。

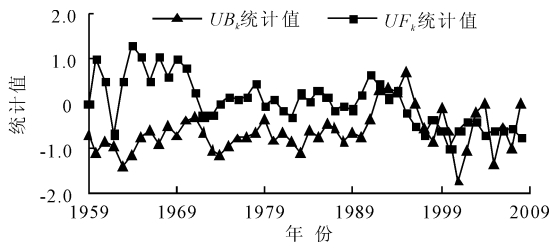


图 6 春季年降水量 Mann-Kendall 统计量曲线

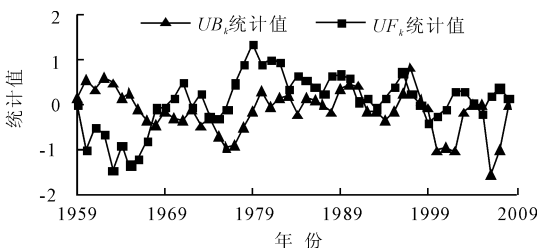


图 7 夏季年降水量 Mann-Kendall 统计量曲线

秋季降水量在 1965 年发生突变,下降趋势显著,到 1999 年下降趋势有所回升(图 8)。

冬季降水呈下降趋势,在 1970 年发生突变,降水处于上升趋势(图 9)。四季的突变点及变化趋势与全年的突变点及变化趋势不太一致,经分析推断得出,在突变点发生年份附近,可能受到较大的气候变化或者人为因素的影响。

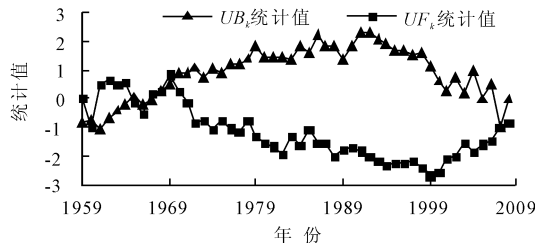


图 8 秋季降年降水量 Mann-Kendall 统计量曲线

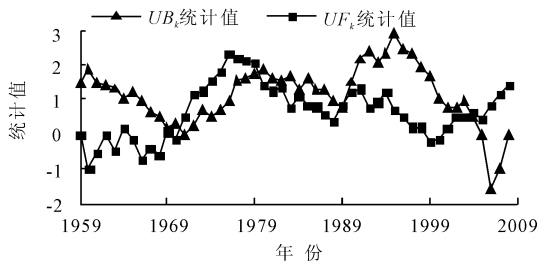


图 9 冬季降年降水量 Mann-Kendall 统计量曲线

4 结 语

(1)清涧河流域降水量年内分配不均匀系数 C_u 年代之间变化不大,20 世纪 60 和 80 年代 C_u 值偏小,年内分配比较均匀,70、90 年代及之后 C_u 值偏大,年内分配相对集中,且 C_u 、 D_c 的变化趋势基本一致。降水量主要集中在 7-9 月份,年内最大降水量出现时间在 7 月份。

(2)该流域多年平均降水为 460.8 mm,降水年际变化丰枯交替周期较长。在 1965-2001 年之间降水基本处于枯水期,自此之后直到现在,清涧河流域降水一直处于丰水期。

(3)多年平均四季降水分别占全年降水量的 20%、58.1%、24.8% 及 2.1%。春季降水变化较为剧烈,震荡幅度较大;夏季降水较春季缓和,60 年代基本处于枯水期,此后丰枯交替频繁;秋季降水在 80 年代初到 90 年代末处于枯水期,此后至今一直处于丰水期;冬季降水在 70 年代以前、80 年代及 90 年代中后期一直处于枯水期,但未来降水仍有增加的趋势。

(4)春秋季降水量呈减少趋势,但减少趋势不太显著,夏冬季呈增加趋势,且冬季增加趋势显著。整体上年降水量呈减少趋势。(下转第 130 页)

根据公式: $C(s) = C(S) + C_3$ 有:

$$0.75s^2 - 1300s + 565\,000 = 2176.75 \quad (10)$$

解方程得: $s_1 = 840.5877 \text{ m}^3$, $s_2 = 892.7456 \text{ m}^3$ 。

该水库的最佳存储决策是:①根据模型中的约束条件 $s < S$, 有 $s_2 < S$, 故 s_2 舍去。②当初始库存 $I < 840.5877$ 时, 则需要调水, 调水量为 $Q = 863 - I$; ③当初始库存 $I \geq 840.5877$ 时, 则不需要调水。

4 结 语

本文利用 (s, S) 随机性存储模型在水量分配中的应用进行了讨论, 根据此算例知:

(1) (s, S) 型存储模型是通过建立存储策略期望费用方程, 求解期望费用的极小值, 来确定最佳调水量 Q 和存储策略 s 。当库存量高于策略 s 值时, 就无需对水库蓄水; 当库存量低于 s 值时, 则需要蓄水且蓄水量为 Q ; 以此策略可方便、节约地进行调水, 减少不必要的水量损失, 可以较好的安排调水时间和调水量决策, 进而减少经济损失。

(2) 此策略可以很好地解决以下问题, 根据随机理论知: 河道断流、土地荒漠化等情况都可能会出现, 通过随机性存储模型计算, 部分水库或者生产型企业可以有计划地调水, 以备使用, 使生活生产正常有序的进行。该研究方法可以实现生产型企业、小型水库的库存优化与成本节约, 具有一定的应用价值。

(3) (s, S) 存储模型的核心是每个阶段初进行检查存储, 根据条件限制判断此阶段是否进行存储。因为水与其他物质不同, 每个阶段都要使用一定量

的水, 需要及时补充, 根据算例验证此模型在水量调度中是适用的。

(4) 本文算例较为简单, 考虑因素还不够全面。文中只对模型进行了初步应用, 能否用于更为复杂的工程实例还需要进一步进行验证。理想值与实际值会有一定的偏差, 如何使偏差最小, 对水量的需求分布测定也需要一定的方法, 需要进一步探讨。

参考文献:

- [1] 运筹学教材编写组. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 345 - 372.
- [2] 付春兰, 李庆银, 王庆斌, 等. 小浪底水库调水调沙对黄河下游河道冲淤的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 173 - 175.
- [3] 冯思静, 王道涵, 王延松. 水环境污染控制经济学方法研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 19 - 25.
- [4] 陶宇. 中小企业物流管理的现状及思考[J]. 企业经济, 2011(1): 58 - 60.
- [5] 张道宏. 多周期随机性库存控制模型与方法[J]. 西安理工大学学报, 1994, 10(2): 134 - 139.
- [6] 余兴无. 随机性存储模型与计算机模拟[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2002, 8(1): 13 - 15.
- [7] 汪涛, 朱红, 李传昭, 等. 存储模型在军用油料储备中的应用[J]. 工业工程与管理, 2004, 9(5): 119 - 122.
- [8] 张维全, 张莉. 最优控制理论在企业生产库存管理系统中的应用[J]. 工业技术经济, 1999, 18(3): 41 - 47.
- [9] 张宝生. 运筹学——经营管理决策数量方法[M]. 第二版. 北京: 石油工业出版社, 2010: 188 - 203.

(上接第 127 页)

(5) 依据 M-K 突变检验法对降水量进行突变分析, 对于全年的降水量, 在 1964 和 2005 年共发生两次突变; 而春季降水量在 1992 年发生突变, 夏季降水量在 1967 和 2004 年发生突变, 秋季降水量在 1965 年发生突变, 冬季降水在 1970 年发生突变。

参考文献:

- [1] 苏布达, 姜彤, 施雅风, 等. 1990s 长江流域降水趋势分析[J]. 湖泊科学, 2003, 15(Z1): 38 - 48.
- [2] 王群英, 龚道益. 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.
- [3] 周维博, 李云排, 舒媛媛, 等. 延安市水中长期供求规划[R]. 西安: 长安大学, 2013 - 04.
- [4] 朱业玉, 顾力龙, 工记芳, 等. 河南省汛期极端降水事件分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 495 - 499.
- [5] 汤奇成, 程天义, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中中期的初步研究[J]. 地理学报, 1982, 37(4): 383 - 393.
- [6] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 218 - 227.
- [7] 冯国章, 李瑛, 李佩成. 河川径流年内分配不均匀性的量化研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(2): 50 - 53.
- [8] 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.
- [9] 王文圣, 丁晶, 金菊良. 随机水文学[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 34 - 35.
- [10] Kendall M G, Rank Correlation Methods[M]. London, Griffin, 1975.
- [11] 刘叶玲, 翟晓丽, 郑爱勤. 关中盆地降水量变化趋势的 Mann-Kendall 分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 28 - 30 + 33.