

典型草原地区降水-径流演变趋势分析

王 军¹, 李和平¹, 鹿海员¹, 李 杰²

(1. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 烟台市汉源水务勘察设计有限公司, 山东 烟台 264006)

摘 要: 深入探究典型草原降水和径流演变趋势和规律, 对地区水资源合理配置及利用等工作具有重要意义。基于此, 根据锡林浩特市气象站和锡林河水文站实测数据, 运用 Mann-Kendall 法和线性回归法分析了典型草原地区锡林河流域 40 多年的降水、径流变化特征和演变规律; 同时, 结合降水频率, 对不同水平年降水与径流相关性进行了分析。结果表明, 两种评价方法一致认为, 降水随时间的变化呈减少趋势, 但减少趋势不显著; 径流随时间的变化亦呈减少趋势, 减少趋势较为显著。另外, 不同水平年之间, 随降水的增加, 典型草原径流增加幅度表现为平水年>丰水年>枯水年。

关键词: 降水; 径流; Mann-Kendall 法; 线性回归法; 典型草原

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2017)04-0086-05

在气候变化和人类活动影响下, 全球水循环过程也发生了变化, 表现为加速的趋势, 因而降水与流量集中且年际变化大, 这使得干旱半干旱地区水资源对气候变化响应表现特别脆弱, 主要表现为降水和河川流量减少^[1]; 另外, 这些要素变化导致了水循环模式与水资源状况发生改变, 从而使地区水资源演变和生态系统平衡受到了影响^[2-3], 水问题已成为很多国家和地区严重制约社会经济发展的重要因素^[4]。近年来, 国内外学者运用 Mann-Kendall 法、回归分析法、小波分析、滑动平均等方法对降水、径流等要素开展了演变趋势、周期变化和突变特征等研究^[5-9], 其理论成果为众多地区水资源评价、综合利用规划等起到了重要支撑作用。

草原作为最大的陆地生态系统, 在防风固沙、涵养水源、保持水土、维护生物多样性等方面发挥着十分重要的作用。但由于草原大多处于干旱半干旱地区, 近年来受全球气候变化影响, 地区水资源时空分布不均、水资源供需矛盾加剧, 生态环境呈现局部好转、整体恶化的态势^[10]。作为支撑草原生态系统健康发展的重要基础, 水资源的演变特征和趋势对影响生态系统平衡稳定至关重要。总结国内外研究文献,

深入分析草原地区降水、径流的变化特点鲜有研究和报道。基于此, 本文利用 Mann-Kendall 法^[11-12]、线性回归法^[13]等, 对我国北方典型草原境内锡林河流域近 40 多年的降水、径流的变化趋势和特征进行分析, 通过探究降水径流的变化规律和相关特性, 以期能为典型草原地区水资源合理配置及利用等工作提供参考依据。

1 研究区概况

锡林河发源于内蒙古克什克腾旗, 全长 175km, 流域总面积约为 11 172km² (见图 1)。属于温带大陆性气候, 流域范围内地势呈东南高西北低, 流域海拔在 902~1 621m 之间。土壤类型主要以栗钙土为主, 少量的黑钙土分布在流域的东部及南部。作为典型草原放牧区, 草地面积占流域总面积 90% 以上, 是流域内最主要的土地利用类型。

典型草原地区地域广、测站少的特点, 在我国干旱偏远地区普遍存在。本文降水数据来源于流域内锡林浩特市气象站 1971~2012 年逐日实测数据; 径流为锡林河水文站 1971~2011 年逐日实测数据。水文气象站点信息详见表 1。

收稿日期: 2016-03-20

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201001039); 水利部科技推广计划项目(TG1401); 中国水利水电科学研究院科研专项(MK2016J09)

作者简介: 王军(1987-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 研究方向为牧区水资源高效利用与节水灌溉技术。E-mail: slwj1988@163.com

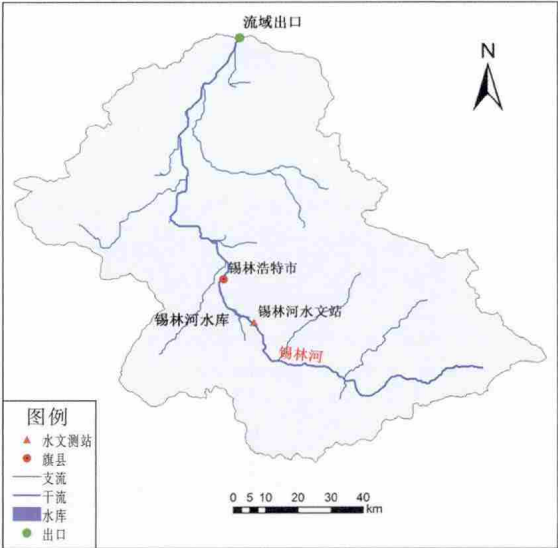


图1 锡林河流域位置

Fig.1 The location of the Xilinhe River basin

表1 水文气象站点信息

Table1 The information of the hydrometry and meteorology stations

类型	站名	经度/°	纬度/°	海拔/m
气象站	锡林浩特	116.117	43.950	1 003
水文站	锡林河	116.167	43.817	1 023

2 研究方法

2.1 Mann-Kendall 法

Mann-Kendall 法假定水文气象数据 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 为时间序列的变量, n 为时间序列的长度, 先确定所有对偶值 $(x_i, x_j, j > i)$ 中 $x_i < x_j$ 出现的个数 p , 顺序 (i, j) 的子集是 $(i=1, j=2, 3, \cdots, n), (i=2, j=3, 4, \cdots, n), \cdots, (i=n-1, j=n)$ 。对无趋势的序列, p 的数学期望 $E(p) = \frac{1}{4}(n-1)n$ 。选取统计量 Z 为

$$Z = \tau / \sqrt{\text{var}(\tau)}$$
 (1)

其中: $\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1, \text{var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$

当 n 无限增大时, 构造的统计量 Z 会趋于标准正态分布。给定原假设为无趋势, 当给定显著水平 α 后, 若 $|Z| < Z_{\alpha/2}$, 则接受原假设, 即趋势不显著; 反之则拒绝原假设, 趋势显著。

2.2 线性回归法

线性回归法用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量, 如降水量、径流量等, 用 t_i 表示所对应的时间, 建立 x_i 和 t_i 之间的一元线性回归为

$$x_i = a + bt_i + u$$
 (2)

式中: a, b 分别为回归常数和回归系数, 用最小二乘法 (OLS) 进行估计 \hat{a} 和 \hat{b} ; t_i 为样本序号; u 为样本的残差。

b 值的符号反映上升或下降的变化趋势, $b < 0$ 表示在计算的时段内呈下降趋势, $b > 0$ 表示呈现上升趋势。 b 的绝对值可以度量演变趋势上升、下降的程度。

2.3 滑动平均法

该方法可在一定程度上消除序列波动的影响, 使得序列变化的趋势性或阶段性更为直观、明显。一般依次对水文序列 α_i 中的 $2k$ 或 $2k+1$ 个连续值取平均, 求出新序列 y_i , 从而使原序列光滑, 新序列一般可表示为:

$$y_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{i=-k}^k \alpha_{t+i}$$
 (3)

选择适当的 k , 可以使原序列高频振荡平均掉, 从而使得序列的趋势更加明显。

3 研究结果分析

3.1 降水量变化趋势分析

(1) 降水量年际变化趋势

利用锡林浩特气象站降水统计资料, 流域 1971~2012 年多年平均降水量为 312mm。从降水年际变化曲线来看 (见图 2), 典型草原降水呈现平稳波动的特点; 利用 Mann-Kendall 法计算降水量统计值 $|Z|$ 为 1.35, 小于显著水平 $\alpha=0.10$ 对应的临界值 $Z_{\alpha/2}=1.64$, 统计结果显示, 这种减少趋势不显著; 利用线性回归法得到降水量倾向率为 -1.64mm/a , 并求得回归系数 b 对应的 $|t|$ 值为 1.09, 小于显著水平 $\alpha=0.10$ 对应的临界值 $t_{\alpha/2}=1.68$ (自由度 n 为 40), 结果显示降水减少的趋势亦不显著。以上两种检验结果共同表明, 流域内降水随时间变化有减少趋势, 但这种趋势不显著。

分析流域降水 5 年滑动距平变化曲线 (见图 3),

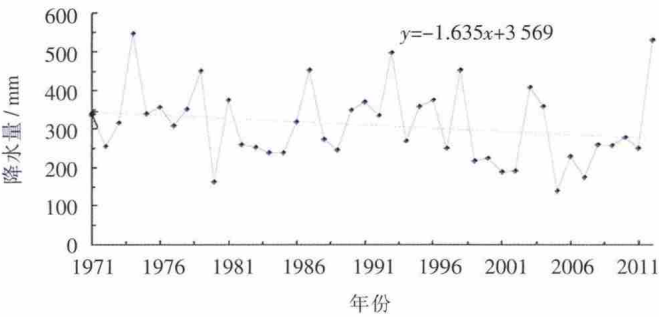


图2 锡林河流域年降水量变化

Fig2 The variation of the annual precipitation in the Xilinhe River basin

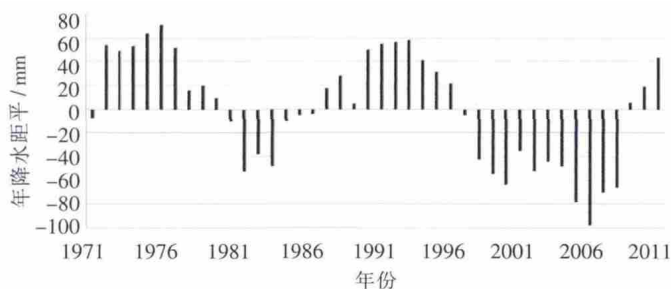


图3 锡林河流域年降水量5年滑动距平变化

Fig.3 The variation of the 5-year sliding anomaly of the annual precipitation in the Xilinhe River basin

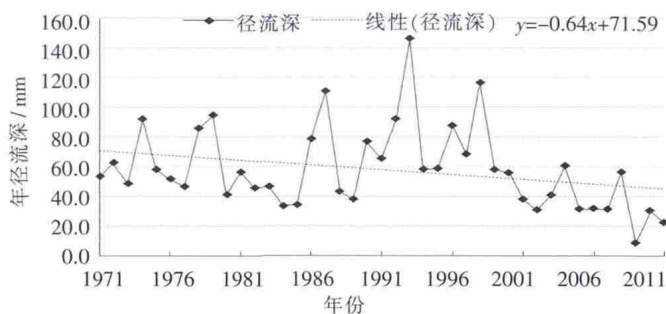


图5 锡林河年径流变化

Fig.5 The variation of the annual runoff in the Xilinhe River basin

降水量呈周期性波动,波动幅度相对稳定。丰水时期集中出现在 1972~1980 年、1991~1997 年、2010~2012 年三个时期,其余各年份均在多年平均值以下波动,尤其是 1999~2009 年成为流域降水最少时期,多年平均降水量仅为 243mm,远远低于流域平均水平。

(2) 降水量年内变化趋势

为分析流域降水量年内变化趋势,进一步了解降水随季节变化规律,利用气象站逐日降水资料得到流域年内降水变化曲线(见图4)。由此看出,降水主要发生在夏季(6~8月份),该时期累计降水量占流域全年降水的 2/3 以上;其中贡献最大的是 7 月份,月降水量占年降水总量的 30%以上。这表明“干燥少雨、降水集中”的温带大陆性气候特点在典型草原表现较为突出。

3.2 径流变化分析

(1) 径流年际变化趋势

利用锡林河水文站统计资料,流域 1971~2011 年多年平均径流深为 58.14mm,占年降水的 19%。图5是锡林河水文站观测的径流深年际变化曲线,Mann-Kendall 法计算锡林河水文站径流统计值 $|Z|$ 为 2.52,大于临界值 $Z_{0.05/2}=1.96$,通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,降低趋势显著;利用线性回归法得到径流量倾向率为 -0.64mm/a ,并求得回归系数 b 对应的 $|t|$ 值为 2.03,大于临界值 $t_{0.05/2}=2.02$ (自由度 n 为 40),通过了 $\alpha=0.05$

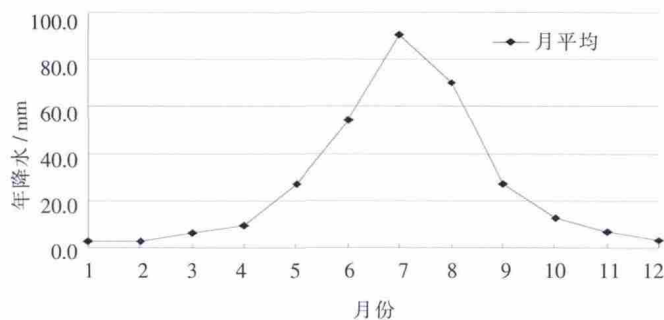


图4 锡林河流域年内降水量变化

Fig.4 The variation of the monthly precipitation in the Xilinhe River basin

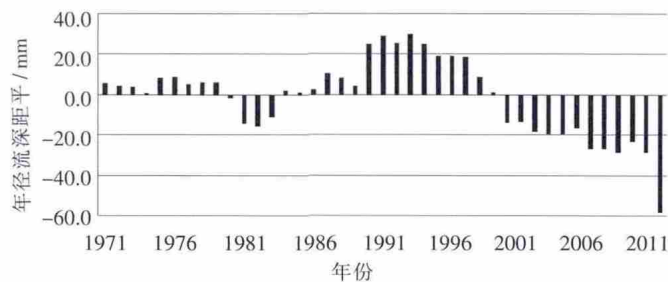


图6 锡林河径流5年滑动距平变化

Fig.6 The variation of the 5-year sliding anomaly of the annual runoff in the Xilinhe River basin

的显著性水平检验。以上两种检验结果表明,典型草原径流呈现显著的减少趋势。

分析流域径流 5 年滑动距平变化曲线(见图6), 1971~1979 年和 1984~1999 年两个时期的径流量相对较高;但进入 21 世纪之后,流域内径流呈现显著的下降趋势。结合降水年际变化趋势结果分析,降水是典型草原地表径流最主要的补给源,在减少不显著的前提下,径流却显著减少(尤其是 1993~2011 年地表径流平均减少幅度达 4.3mm/a),这种变化不一致的现象说明除了受降水干扰下,人类活动干扰对径流影响越来越突出。这种形势下,未来随着地区用水量的增加,势必会加剧地区用水紧张的局面。

(2) 径流年内变化趋势

根据锡林河水文站 1971~2011 年实测径流统计资料(见图7),锡林河年内径流分布极不均匀,春季冰雪冻土融化和夏季降水使得流域年内径流表现出“双峰型”特征。

3.3 不同水平年降水与径流相关性分析

根据《水文基本术语和符号标准》(GB/T50095-2014),降水按特丰水年($P \leq 12.5\%$)、偏丰水年($12.5\% < P \leq 37.5\%$)、平水年($37.5\% < P \leq 62.5\%$)、偏枯水年($62.5\% < P \leq 87.5\%$)和特枯水年($P > 87.5\%$)划分为五大类别。本文在此基础上,利用 P-III 型分布函数将流

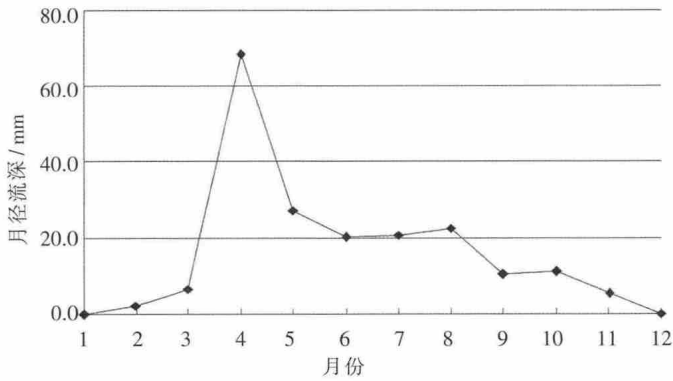


图7 锡林河流域年内径流深变化

Fig.7 The variation of the monthly runoff in the Xilinhe River basin

域气象站降水资料按丰水年 ($P \leq 37.5\%$, 降水 $> 307\text{mm}$)、平水年 ($37.5\% < P \leq 62.5\%$, $234\text{mm} < \text{降水} \leq 307\text{mm}$)和枯水年 ($P > 62.5\%$,)重新排序,得到不同水平年年降水和年径流累计回归特征曲线。

由降水-径流关系曲线可以看出(见图8),流域不同水平年径流随降水的增加变化趋势总体一致,但不同水平年径流增长幅度略有差异,具体表现为平水年 $>$ 丰水年 $>$ 枯水年,而不是“丰 $>$ 平 $>$ 枯”的顺序。结合产汇流理论分析,地表径流补给虽主要靠降水,但径流大小并非受降水单一因素决定,人类活动、气温等其它环境因素均会左右其变化特征,这也给地区水文预报、水资源规划增加了难度。

4 讨论与结论

(1)利用 Mann-Kendall 法和线性回归法,对典型草原境内锡林河流域近 40 多年降水、径流变化规律和特征进行分析。结果显示,降水近年来有减少趋势,但变化趋势不显著;通过分析降水季节变化特点,“干燥少雨、降水集中”的温带大陆性气候特点在典型草原较为突出。这在一定程度上也反映了该地区水资源补给来源的不稳定特点。

(2)地表径流的大小变化一定程度上能反映地表水资源量的多寡,根据 Mann-Kendall 法和线性回归法评价结果,典型草原地区地表径流近年来有减少的趋势,且通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,减少趋势显著。结合降水年际变化趋势结果分析,在降水减少不显著的前提下,径流却出现大幅减少(尤其是 1993~2011 年地表径流平均减少幅度达 4.3mm/a),这种变化不一致的现象说明除了受降水干扰下,人类活动干扰对径流的这种影响越来越突出。未来若没有外水补给的情

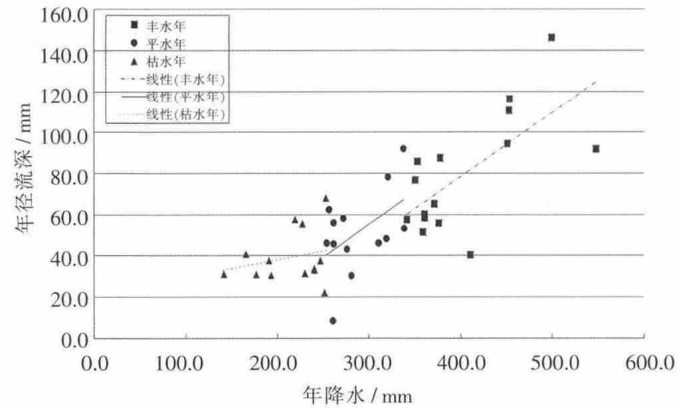


图8 不同水平年降水-径流关系曲线

Fig.8 The relationship between the precipitation and runoff in the different target years

况下,随着地区用水量的增加,势必会加剧地区用水紧张的局面。

(3)利用统计回归方法分析不同水平年降水与径流相关特征。结果显示,随降水的增多,典型草原不同水平年径流增加幅度表现为平水年 $>$ 丰水年 $>$ 枯水年,这种结果表明,典型草原地表径流变化特征和大小受降水、人类活动、气温等因素共同决定。

参考文献:

- [1] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. 中国水利, 2008, (2): 20-27. (DING Yihui. Human activity and the global climate change and its impact on water resources[J]. China Water Resources, 2008, (2): 20-27. (in Chinese))
- [2] 仇亚琴, 周祖昊, 贾仰文, 等. 三川河流域水资源演变个例研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 865-872. (QIU Yaqin, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen, et al. A case study on the evolutionary law of water resources in Sanchuan River basin [J]. Advances in Water Resources, 2006, 17 (6): 865-872. (in Chinese))
- [3] 王国庆, 王兴泽, 张建新, 等. 中国东北地区典型流域水文变化特性及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 641-646. (WANG Guoqing, WANG Xingze, ZHANG Jianyun, et al. Hydrological characteristics and its responses to climate change for typical river basin in northeastern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31 (6): 641-646. (in Chinese))
- [4] 周祖昊, 仇亚琴, 贾仰文, 等. 变化环境下渭河流域水资源演变规律分析[J]. 水文, 2009, 29(1): 22-25. (ZHOU Zuhao, QIU Yaqin, JIA Yangwen, et al. Evolution law of water resources in Weihe River basin based on dualistic water resources evolution model[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(1): 22-25. (in Chinese))
- [5] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34. (XU Zongxue, ZHANG Nan. Long-term trend of precipitation in the Yellow River basin during the past 50 years [J].

- Geographical Research, 2006,25(1):27-34.(in Chinese))
- [6] 牛最荣,赵文智,刘进琪,等.甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J].水文, 2012,32(2):78-83+87. (NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, LIU Jinqi, et al. Study on change characteristics and tendency of temperature, precipitation and runoff in Weihe River basin in Gansu [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(2):78-83+87.(in Chinese))
- [7] 张建云,王国庆,何瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展, 2009,20(2):153-157. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, HE Ruimin, et al. Variation trends of runoffs in the middle Yellow River basin and its response to climate change [J]. Advances in Water Resources, 2009,20(2):153-157. (in Chinese))
- [8] 许月卿,李双成,蔡云龙.基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J].中国科学(D 辑:地球科学),2004,34(12):1176-1183. (XU Yueqing, LI Shuangcheng, CAI Yunlong. Study on precipitation variation regularity of Hebei plain based on wavelet analysis [J]. Science in China(D: Earth Sciences), 2004,34(12):1176-1183.(in Chinese))
- [9] 贾文雄,何元庆,李宗省,等.祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析 [J]. 地理学报, 2008,63 (3):257-269. (JIA Wenxiong, HE Yuanqing, LI Zongxing, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. region [J]. Acta Geographica Sinica, 2008,63(3):257-269.(in Chinese))
- [10] 王军,李和平,赵淑银,等.锡林河流域水资源评价与开发利用潜力分析研究[J].水资源与水工程学报, 2011,22(4):95-97. (WANG Jun, LI Heping, ZHAO Shuyin, et al. Research on water resources assessment and potential of exploitation and utilization in Xilin River Basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011,22(4):95-97. (in Chinese))
- [11] Kendall M G. Rank Correlation Methods [M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [12] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008,349(3/4):350-363.
- [13] S. Weisberg (著).王静龙,梁小筠(译).应用线性回归[M].北京:中国统计出版社, 1998. (S. Weisberg, Translated by WANG Jinglong, LIANG Xiaoyun. Apply Linear Regression [M]. Beijing: China Statistics Press, 1998.(in Chinese))

Variation of Precipitation and Runoff in Typical Grassland Area

WANG Jun¹, LI Heping¹, LU Haiyuan¹, LI Jie²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, IWHR, Hohhot 010020, China;

2. Yantai Hanyuan Water Survey and Design Co., Ltd, Yantai 264006, China)

Abstract: It is important to analyze the variation of the precipitation and runoff in the typical grassland for the rational allocation and utilization of water resources. According to the data from the Xilinhot Meteorology Station and Xilinhe Hydrometry Station, the Mann-Kendall rank correlation method and linear regression method were used to analyze the variation of the precipitation and runoff in the typical grassland area of the Xilinhe River Basin over 40 years. Meanwhile, the correlation between precipitation and runoff was analyzed. The results show that there is a non-obvious decreasing trend of the precipitation, and an obvious decreasing trend of the runoff. In addition, with precipitation increasing, the rate of runoff increase shows that normal year > wet year > dry year.

Key words: precipitation; runoff; Mann-Kendall; linear regression; typical grassland

《水文》编辑部严正声明

近期,我们发现一些组织或个人盗用本刊刊名、刊号,冒充《水文》编辑部在网上征稿,向作者发送稿件录用通知并收费,影响恶劣,严重损害本刊声誉,给部分作者造成损失。

为维护本刊的合法权益,避免作者上当受骗,本刊严正声明如下:

1. 本刊刊名为“水文”,不带有“期刊”、“杂志”等附加名称;本刊由中华人民共和国水利部主管、水利部水文局主办;本刊编辑部为“水利部《水文》编辑部”,设在水利部水文局。

2. 本刊从未委托任何组织或个人代为征稿或进行广告经营等活动。

3. 作者投稿本刊采用以下两种方式: ①使用本刊投

稿系统: <http://sw.allmaga.net/ch/index.aspx>, ②邮件投稿: j.hyd@mwr.gov.cn;

《水文稿件录用函》发布唯一邮箱: dongxy@mwr.gov.cn; 其他组织或个人通过网站、邮件等形式发布的《水文》征稿及录用信息,均与本刊无关。

4. 本刊警告相关组织或个人,立即停止损害本刊声誉的侵权行为,同时本刊保留追究有关组织或个人法律责任的权利。

5. 本刊通讯地址:北京市西城区白广路二条2号,邮编:100053,联系电话:010-63203599,63203550。

水利部《水文》编辑部
2017年5月25日