

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.01.038

气候变化对黄河上游流域径流影响分析

王丽娜

(新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:近年来在气候变化和人类活动的共同影响下,黄河上游地表水资源偏枯形势严峻,严重影响了我国北方地区经济的可持续发展。为研究气候变化对径流的影响,利用黄河上游14个气象站点的逐月降水、气温和潜在蒸发资料以及唐乃亥水文站和上谄水文站的径流资料,采用线性相关法和Mann-Kendall法分析了气候变化对黄河上游流域径流的影响,结果表明,研究区域降水大致呈不显著递增趋势,气温、蒸发量呈显著递增趋势,径流量呈现显著减少的趋势;径流量发生突变的时间与气象因素的一致性较差,因此,可以得出径流量不仅受气温、降水、蒸发等气候因子的影响,还受到其他因素例如土壤、植被等因素的影响。

关键词:气候变化;黄河流域;气象要素;Mann-Kendall

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)01-0182-05

Impact Analysis of Climate Change on the Upper Reaches of Yellow River Runoff

WANG Li-na

(Xinjiang Investigation, Design and Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: Due to climate change and human activities in recent years, the grim situation of insufficient surface water resources at the upstream of Yellow River is worsening, which seriously affects the sustainable development of regional economy in north China. To study the effects of climate change on the runoff, month by month precipitation, temperature and evaporation potential data of 14 weather stations at the upstream of Yellow River, as well as the runoff data of Tangnaihaid and Shangquan hydrological stations were adopted to analyze the impact of climate change on the Yellow River runoff using linear correlation method and Mann-Kendall method. The results indicate that the rainfall of the studied area is slightly increasing, while the temperature, evaporation are significantly increasing, but the runoff is significantly reduced; the timing of the runoff mutations isn't in good consistency with the meteorological factors. Therefore, it is concluded that the runoff is not only affected by the climate factors such as temperature, precipitation, evaporation, but also by other factors such as soil and vegetation.

Keywords: climate change; the Yellow River basin; meteorological elements; Mann Kendall

黄河上游发源于青藏高原腹地,属高原大陆性气候,根据1967年—2010年唐乃亥水文站资料,唐乃亥站平均径流量达 $198.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占黄河入海口同期径流量的42%,为黄河主要产流区^[1]。由于黄河流域气候寒冷、地势高并有多年的冻土和现代冰川,使得雨水、冰川融水和冻土地下冰融水成为其地表水资源的主要来源,并影响着地表水资源的长序列演变趋势以及年际波动^[2-3]。近年来在气候变化和人类活动的共同影响下,黄河上游地表水资源偏枯形势严峻,对我国北方的经济可持续发展产生

了严重的影响,世人对此关注广泛^[1]。较为统一的观点认为:黄河上游径流量是气候同下垫面综合作用的结果,径流减少的主要原因是由于气候变化,而植被破坏、土地利用、地下水位下降、冻土融化等人为和自然等因素对径流变化会有不同程度的影响^[1,4-5]。黄河水资源对我国北方农业和工业有着举足轻重的作用^[6]。

1 资料来源

本文文选用1967年—2010年唐乃亥站和上谄

站的年径流量和各月的径流数据,以及 14 个气象站(达日、贵德、共和、红原、久治、玛多、玛曲、同德、泽库、河南、临夏、临洮、民和及西宁站)1967 年—2012 年的气象资料,保证了研究资料的精确度及序列长度。水文站和气象站的分布如图 1 所示。其中气象资料由中国气象科学共享网提供,水文资料来源于

水文站,还有一些统计数据来源于黄河流域水文年鉴,这样保证了资料的准确性,全面及完整性。对于偶尔的缺测记录,进行了插补,保证资料的全面和完整性。流域蒸发采用 FAO 彭曼公式计算得到的潜在蒸散量^[7]。

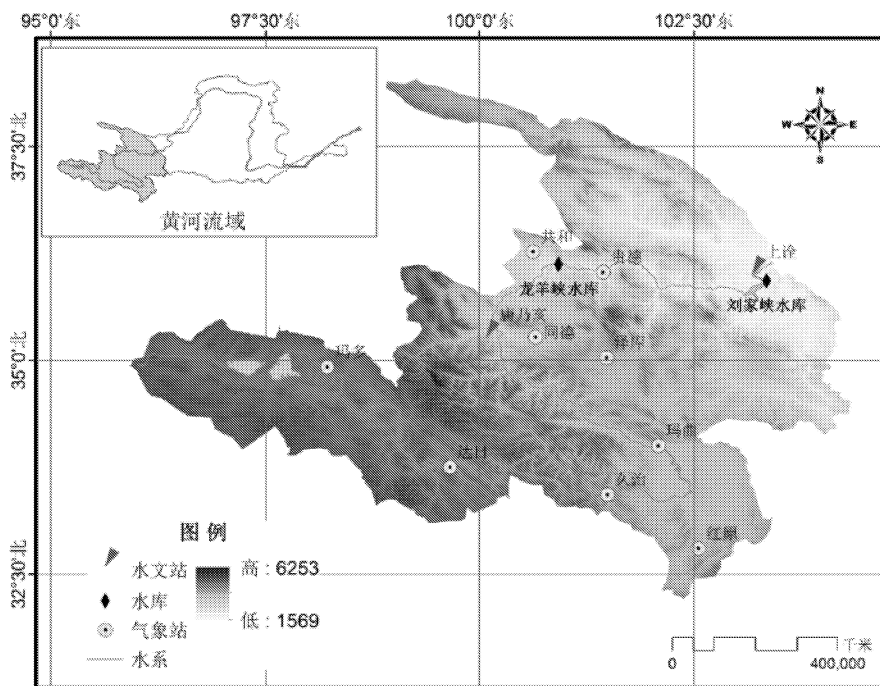


图 1 研究区域示意图

2 研究方法

径流变换通过构建统计与指标方法,能更清晰表征径流变换特征与规律。刘昌明等应用 Mann-Kendall 和 Spearman 秩次相关检验以及线性回归检验方法对黄河天然径流量进行趋势分析^[8];穆兴民等利用谐波分析法和累积距平法分析黄河天然径流量的周期性和年际变化过程^[9];郭鹏等利用 Spearman 秩次相关检验、滑动平均法、线性回归检验等方法对鄱阳湖的水沙变化趋势进行分析^[10];穆兴民等采用变点分析法、历时曲线法和双累积曲线法对河龙区间来水来沙变化进行分析^[11]。

本文采用以下几种方法研究气候变化对黄河上游径流的影响:

(1) Mann-Kendall 检验法

采用 Mann-Kendall 法对研究区域径流序列进行突变点分析。Mann-Kendall 检验法最初由 Mann^[12]与 Kendall^[13]提出,现已被广泛推荐并使用的非参数检验方法,计算简单便捷,适用于气象及水文等非正态分布的数据。

时间序列 x 具有 n 个样本量,构造序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

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

假定时间序列随机独立,定义如下统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$\text{其中 } \text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (4)$$

$$E(S_k) = k(k-1)/4 \quad (5)$$

式中: UF_k 为标准正态分布。给定置信度 α , 若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$, 说明时间序列的变化趋势显著。

按逆序将时间序列 x 排列, 再按上式计算, 同时使:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

通过分析 UF_k 和 UB_k 能进一步分析时间序列 x 的变化趋势, 而且可以判断突变点。若 $UF_k > 0$, 说明时间序列呈上升的趋势, 若 $UF_k < 0$, 则表明呈下降的趋势, 当 UF_k 曲线超过临界线时, 表明上升或下

降的趋势显著。若 UF_k 和 UB_k 两条曲线在临界直线之间出现交点,那么该交点就是突变点。

(2) 归一化曲线^[14]

水文要素值进行归一化处理,可消除水文要素值变差系数的影响。

$$\alpha = (k - 1)/C_v \quad (7)$$

$$k = X_i/X \quad (8)$$

式中: α 为水文要素归一化值; C_v 为水文要素值的变差系数; X 为多年平均值; X_i 为第 i 年的水文要素值。对不同水文要素的归一化曲线进行比较,分析随年序的变化,不同水文要素特征是否一致。

3 趋势性分析

3.1 时间序列变化分析

3.1.1 降水年时间序列变化过程

黄河上游流域平均降水量年时间序列变化可得出:1967年—2012年降水量呈递减趋势,平均降水量为 469.66 mm,其中最大降水量为 618.53 mm,出现在 1967 年;最小降水量为 388.9 mm,出现在 1969 年。年平均降水量变化倾向率为 -0.0797 mm/a,相关系数为 0.02,假设序列通过置信度 $\alpha = 0.95$ 的假设检验,查相关系数临界值表得 $\alpha = 0.05$, $n = 46$ 时 $\gamma_\alpha = 0.287$,而相关系数 $r = 0.02 < \gamma_\alpha$ 。表明原序列存在不显著的递减趋势。

3.1.2 气温年时间序列变化过程

黄河上游流域平均气温年时间序列变化可得出:黄河上游流域 1967 年—2012 年气温呈递增趋势。平均气温为 1.49℃,最高温度为 3.04℃(2010 年),最低温度为 0.24℃(1983 年)。年平均气温变化倾向率为 0.045℃/a,相关系数为 0.817, $r = 0.817 > \gamma_\alpha$ 。表明原序列存在显著的递增趋势。

3.1.3 蒸发量年时间序列变化过程

黄河上游流域平均气温年时间序列可得出:黄河上游流域 1967 年—2012 年蒸发量呈递增趋势。

平均蒸发量为 864.89 mm,最大蒸发量为 937.28 mm,出现在 2010 年,最小蒸发量为 794.98 mm,出现在 1997 年。年平均蒸发量变化倾向率为 1.3593 mm/a,相关系数为 0.545, $r = 0.545 > \gamma_\alpha$ 。表明原序列存在显著的递增趋势。

3.1.4 唐乃亥站径流时间序列变化过程

唐乃亥站作为研究区域的入口站以及龙羊峡水电站的上游进口站具有重要意义,故单独分析。

唐乃亥站年径流时间序列可得出:唐乃亥站 1967 年—2010 年流量呈递减趋势。平均径流量为 201.52×10^8 m³,其中最大径流量为 327.9×10^8 m³,出现在 1989 年;最小为 106.4×10^8 m³,出现在 2002 年。年平均径流量变化倾向率为 -1.32 m³/(s·a),相关系数为 0.302, $r = 0.302 > \gamma_\alpha$ 。表明原序列存在显著的递减趋势。

3.1.5 上迳站径流时间序列变化过程

上迳站作为研究区域的出口站单独分析。上迳站 1967 年—2010 年径流量呈递减趋势。平均径流量为 269.76×10^8 m³,其中最大径流量为 464.2×10^8 m³,出现在 1967 年;最小为 144.9×10^8 m³,出现在 2002 年。年平均径流量变化倾向率为 -2.51 m³/(s·a),相关系数为 0.464, $r = 0.464 > \gamma_\alpha$ 。表明原序列存在显著的递减趋势。

3.1.6 黄河上游流域径流、气象年际变化

黄河上游流域径流、气象年际变化统计结果见表 1,从统计结果可以看出气温的极值比最大,为 12.67,蒸发量的极值比最小,为 1.17,气温的波动程度远大于降水、蒸发及径流序列的波动。由气温降水蒸发径流的年际变化与代际变化计算可知,降水、气温及蒸发分别以 0.0416 mm/a、0.045℃/a、0.0039 mm/a 的趋势增加,径流以 2.42 m³/(s·a) 的趋势减少;径流在 90 年代减少的最剧烈,唐乃亥站和上迳站相对于 60 年代分别减少了 26.73%、28.75%,气温在 2000 年后增加的最为剧烈,相对于 60 年代增加了 188.31%,见表 2。

表 1 流域气温降水蒸发径流年际变化统计

特征参数	降水/mm	气温/℃	蒸发/mm	唐乃亥径流量/ 10 ⁸ m ³	上迳径流量/ 10 ⁸ m ³
均值	469.66	1.49	864.89	201.52	269.76
极大值	618.53(1967)	3.04(2010)	937.29(2010)	327.94(1989)	464.17(1967)
极小值	388.9(1969)	0.24(1983)	794.96(1967)	106.40(2002)	144.91(2002)
极大值与均值比值	1.32	2.04	1.08	1.63	1.72
极小值与均值比值	0.83	0.16	0.92	0.53	0.54
极值比	1.59	12.67	1.17	3.08	3.20

表 2 流域径流降水蒸发代际变化表(相对于 60 年代)

年代	降水相对 变化量 /mm	降水相对 变化率 /%	蒸发相对 变化量 /mm	蒸发相对 变化率 /%	气温相对 变化量 /°C	气温相对 变化率 /%	唐乃亥径流 相对变化量 /10 ⁸ m ³	唐乃亥径流 相对变化率 /%	上甸径流 相对变化量 /10 ⁸ m ³	上甸径流 相对变化率 /%
70 年代	-16.90	-3.47	11.01	1.31	0.14	18.18	-36.49	-15.18	-46.89	-14.06
80 年代	-11.68	-2.40	9.84	1.74	0.36	46.78	0.65	0.27	-14.98	-4.49
90 年代	-29.29	-6.01	32.06	3.83	0.72	93.51	-64.26	-26.73	-93.88	-28.15
2000 年后	-14.90	-3.06	52.53	6.51	1.45	188.31	-66.57	-27.70	-114.65	-34.38

3.2 Mann-Kendall 突变分析

应用 Mann-Kendall 法对研究区域水文气象序列进行突变点分析,累积距平验证 MK 检验的结果。取 0.05 信度的显著性水平,得到两条临界线,若 UF、UB 曲线在临界线内有交点,则是满足一定置信度的突变点。

3.2.1 降水突变分析

降水突变分析 MK 图,如图 2,从图 2 中可以看出 UF 和 UB 曲线波动变化,但在 0.05 的临界线之间无交点,说明黄河上游年降水量整体变化复杂,降水未出现突变点。

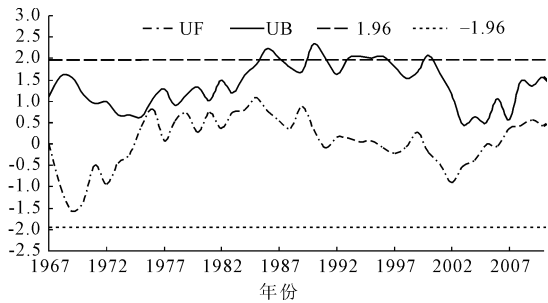


图 2 降水量突变 Mann-Kendall 曲线

3.2.2 气温突变分析

从图 3 的 UF 曲线可看出,自 1967 年—1986 年黄河上游年平均气温存在震荡降温趋势,自 1986 年以来,表现为明显的增温趋势,1998 年 UF 曲线超过了显著性水平 0.01 临界线,表明黄河上游年平均气温的增加是非常显著的。同时,在临界线之间,UF、UB 曲线有两个交点,且位置非常接近,说明在 1997 年附近平均气温可能发生了突变,经历了由偏冷向偏暖的趋势转变,进入了一个相对偏暖的时期。

3.2.3 蒸发突变分析

从蒸发量 MK 图中可以看出,UF 曲线呈上升趋势,且在 1998 年超出了 0.05 显著性临界值。在 0.05 的临界线内,UF、UB 曲线之间有一个交点,出现在 1993 年,说明黄河上游在 1993 年附近蒸发量经历了由少到多的转变。

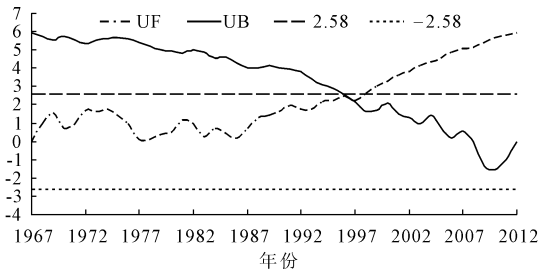


图 3 气温突变 Mann-Kendall 曲线

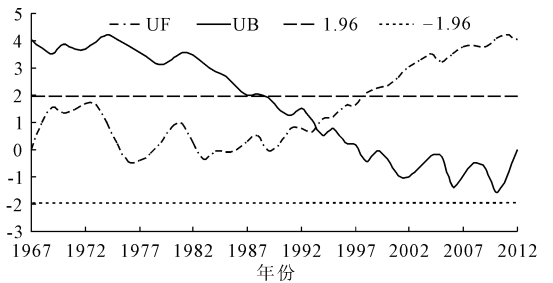


图 4 蒸发量突变 Mann-Kendall 曲线

3.2.4 唐乃亥站径流突变分析

通过 Mann-Kendall 突变检验,可以清楚的辨析唐乃亥站 1967 年—2010 年径流量的变化趋势及发生突变的年份。自 1967 年—1970 年黄河上游年径流量存在减少趋势,1970 年—1983 年以来,表现为震荡递增趋势,自 1997 年 UF 曲线超过了显著性水平 0.01 临界线,说明黄河上游年径流量存在显著的递减趋势。UF、UB 曲线在显著性水平 0.01 的临界线之间有两个交点,且位置非常接近,说明在 1989 年附近年径流量可能发生了突变,经历了由多变少的趋势。

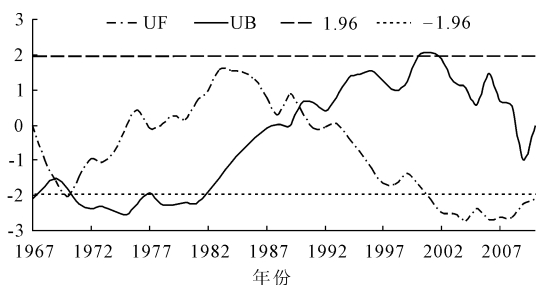


图 5 径流突变分析 Mann-Kendall 曲线

4 气候因子对径流变化的影响

4.1 相关性分析

突变前后气候因子与径流相关性对比关系见表

表 3 气候因子与径流相关系数表

蒸发分段倾向率/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)		蒸发与径流相关系数 r		气温分段倾向率/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)		气温与径流相关系数 r	
突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后
-0.0009	-0.0006	0.732	0.410	-0.0026	0.0053	0.352	0.728

4.2 归一化曲线分析

用唐乃亥站径流量与各气象因子进行归一化处理(图 6~图 8),可以看出,60年代初到 90 年代,流域蒸发量总体趋势平稳,降水量处于增加,径流量总体趋势是增加的;90 年代至 2010 年蒸发量是呈增加趋势,径流量比前期有所减少。

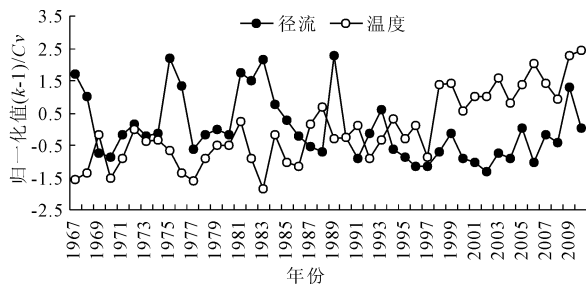


图 6 径流 - 气温归一化曲线

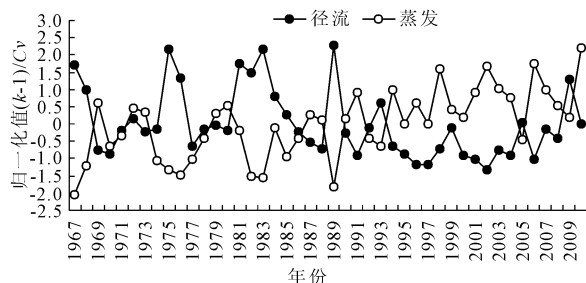


图 7 径流 - 蒸发归一化曲线

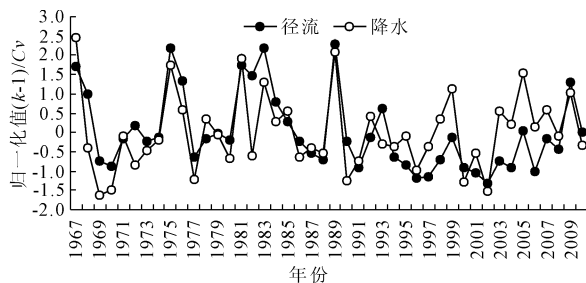


图 8 径流 - 降水归一化曲线

由 1967 年—2010 年黄河上游年降水量和年径流量进行归一化曲线分析,可以得出如下结论:降水量与径流量的变化规律十分接近,降水量偏多的阶

段,对比突变前后变化,气温与径流量的相关系数从 0.352 增加到 0.728,表明气温对流域径流量的影响大幅增加。蒸发与径流量的相关系数从 0.732 下降到 0.410,表明蒸发对流域径流量的影响大幅下降。

段与径流来水较多阶段相同,降水少的年份与枯水阶段的年份也是相同的。另外,出现最大径流量的年份同时也是最大降水量出现的年份,例如唐乃亥站 1989 年径流量为 $327.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,降水量为 50.92 mm,两者均较大,如 1969 年,出现降水量较少干旱较为严重的年份,同时也是径流量偏枯的年份。

5 结论

本文分析了黄河上游流域唐乃亥站以上的水文、气象要素的变化规律。首先,根据气象要素和径流的时间变化过程及其倾向率,判断水文序列的趋势性,然后采用 Mann-kendall 法进一步检验时间序列趋势性及是否显著,同时分析时间序列的突变点。主要结论如下:

(1) 通过研究区域降水、气温、蒸发量及水文站年径流的年际变化曲线及线性趋势线可以得出:降水大致呈不显著递增趋势;全区气温、蒸发量呈显著递增趋势;径流量呈现显著减少的趋势。

(2) 利用 Mann-kendall 法分析区域平均降水、气温、蒸发及水文站平均年径流的突变点,可以得出:气温在 1997 年发生突变;降水没有突变;蒸发量的突变点发生在 1993 年;径流的突变出现在 1989 年。与温度、降水和蒸发的突变检验结果进行对比,径流量发生突变的时间与这几个因素的一致性较差,可知径流量不仅受气温、降水、蒸发等气候因子的影响,还受到其他因素例如土壤、植被等因素的影响。

(3) 突变前,气候因子与流量的相关性:气温 < 蒸发 < 降水,说明流量的变化受降水影响最大;突变后,气候因子与流量的相关性:气温 > 降水 > 蒸发,说明气温对流量的变化影响最大。

参考文献:

- [1] 李林,汪青春,张国胜,等.黄河上游气候变化对地表水的影响[J].地理学报,2004,59(5):716-722.