

渭河源区水文气象要素演变趋势及阶段性分析

姜丽红, 贾杰

(甘肃省定西水文水资源勘测局, 甘肃 定西 743000)

摘要: 研究渭河源区水文气象要素变化特征, 并进一步分析各个要素之间的相互关系, 为渭河源区水资源的合理开发利用提供科学依据与技术支持。采用坎德尔秩次相关、斯波曼秩次相关、线性趋势回归检验法对渭河源区水文气象要素变化趋势进行检验, 利用 M-K 检验法找出各要素的突变年份, 运用多元线性回归分析法分析不同阶段降雨、蒸发量对径流量的影响程度。结果表明: 近 30 年来渭河源区年降水量与四季降水量均呈不显著减少趋势, 年蒸发量与春、夏季蒸发量呈显著增加趋势, 年径流量与夏季径流量呈显著减少趋势, 冬季径流量呈不显著增加趋势。年降水量和年径流量均在 1993 年发生显著性突变, 年蒸发量在 1990 年发生显著性突变。分析得出: 1981-1993 年年径流量变化主要受降水量变化影响, 1994-2010 年径流量变化主要受蒸发量变化影响。

关键词: 渭河源区; 水文气象要素; 演变趋势; 阶段性分析

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0098-07

Evolutionary trend and stage analysis of hydrologic and meteorological elements in Weihe river source area

JIANG Lihong, JIA Jie

(Dingxi Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Gansu Province, Dingxi 743000, China)

Abstract: This paper mainly studies the variation characteristics of hydrologic and meteorological elements in the Weihe river source area, and further analyzes the relationship between the various elements. The variation trend of hydrologic and meteorological elements in the Weihe river source area was tested by using the Handel rank correlation, Barmen rank correlation, and linear trend regression test. The mutation year was found out by using the M-K test, and the influence degree of rainfall and evaporation on the runoff in the different stages was analyzed by using multiple linear regression analysis. In the past 30 years, the annual precipitation and seasonal precipitation did not show a significant decreasing trend; and the annual evaporation and the evaporation in spring and summer showed a significant increasing trend; annual runoff and the runoff in summer showed a significant decreasing trend; the runoff in winter did not show a significant increasing trend. Annual precipitation and annual runoff occurred significant mutations in 1993, and annual evaporation occurred significant mutations in 1990. The annual runoff change is mainly affected by the change of precipitation from 1981 to 1993, and the change of annual runoff is mainly affected by the change of evaporation from 1994 to 2010.

Key words: the Weihe river source area; hydrologic meteorological elements; evolutionary trend; stage analysis

1 研究背景

河川径流是水循环的重要环节, 是水量均衡的基本要素, 尤其是西北干旱区, 水资源更是区域生态环境与社会经济发展的关键因素和重要保障。水资

源是对气候变化响应最为敏感的领域, 气候变化将会加剧水文循环, 进而对水资源管理带来严峻挑战。近几十年来随着气候变化和人类活动影响的不断加强, 水资源对渭河源区经济发展与生态环境变化的制约效应日益增强。目前对渭河源区水文气象要素

收稿日期: 2017-01-31; 修回日期: 2017-03-01

作者简介: 姜丽红(1987-), 女, 甘肃会宁人, 学士, 工程师, 主要从事水文水资源的监测、评价和研究工作。

通讯作者: 贾杰(1987-), 男, 甘肃漳县人, 工程师, 主要从事水文水资源的监测、评价和研究工作。

演变趋势及阶段性分析尚未见报道,因此,研究渭河源区水文气象要素演变趋势及变化特征,分析各阶段各要素之间的影响,对渭河源区流域水资源管理与生态保护具有极为重要的意义。

2 研究区概况

清源河系渭河源头河流,发源于甘肃省渭源县南部的豁豁山,地形特征南部高、北部低,流域内有天然林分布,下垫面条件较好。流域地处内陆,属温带大陆性季风气候,流域多年平均气温约 6.1°C ^[1]。源区设渭源水文站在甘肃省渭源县张家湾村,地理坐标为东经 $104^{\circ}11'$ 、北纬 $35^{\circ}06'$,集水面积 100 km^2 ,至河口距离 6 km ;源区布设雨量站3处,分别为池沟、年家寨、渭源雨量站。渭河源区清源河流域示意图如图1。

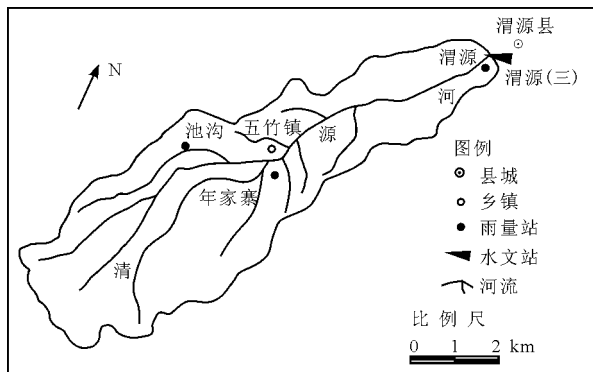


图1 渭河源区清源河流域示意图

3 数据来源与研究方法

本次研究数据来源于渭河源区渭源水文站1981–2010年月年降水、蒸发以及径流实测资料。主要采用坎德尔秩次相关、斯波曼秩次相关、线性趋势回归检验法^[2–3]对渭河源区水文气象要素变化趋势进行检验;坎德尔秩次相关、斯波曼秩次相关、线性趋势回归检验法等统计检验方法是分析水文气象数据的有效方法,当给定显著水平 α 后,查得相应的临界值,当统计值大于临界值时,水文序列变化趋势显著,当统计值小于临界值时,则趋势不显著。利用M–K检验法^[4–6]分析各要素的突变性。根据M–K检验法原理,若 UF 大于0,则表明序列呈上升趋势;若 UF 小于0,则表明呈下降趋势;若超过临界值线时,表明上升或下降趋势显著;若 UF 和 UB 两条曲线出现交点,且位于临界值之间,则交点对应的时刻就是突变开始的时刻。运用多元线性回归分析法^[7]研究了降水、蒸发量与径流量之间的相互关系。

4 结果与分析

4.1 各要素年尺度变化特征

绘制渭河源区年降水量变化过程线如图2所示。渭河源区多年平均降水量为 651.5 mm ,从20世纪80年代开始到21世纪最初10年,年降水量存在减少趋势,趋势线具有 $33.7\text{ mm}/10\text{a}$ 负倾向率^[8–9]。最大年降水量为 841.7 mm ,出现在1984年,最小年降水量为 415.0 mm ,出现在1997年。20世纪80年代多年平均降水量为 696.9 mm ,90年代多年平均降水量为 626.1 mm ,21世纪最初10年多年平均降水量为 631.4 mm ,20世纪80年代多年平均降水量大于历年多年平均值,从90年代开始多年降水量小于历年多年平均值,呈递减趋势。

绘制渭河源区年降水量累积距平曲线^[10]如图3所示。从图3可以看出:渭河源区年降水量1981–2010年变化大致可以分为3个阶段^[11]:1981–1993年源区年降水量正距平占主导地位,累积距平明显上升,年降水量呈增加趋势;1994–2002年源区年降水量负距平占主导地位,累积距平明显下降,年降水量呈减少趋势;2003–2010年源区年降水量累积距平出现波动式下降,表明最近几年年降水量仍然处于减少趋势。

绘制渭河源区年蒸发量变化过程线如图4所示。渭河源区多年平均蒸发量为 $1\,075.8\text{ mm}$,从20世纪80年代开始到21世纪最初10年,年蒸发量存在增加趋势,趋势线具有 $57.7\text{ mm}/10\text{a}$ 正倾向率。最大年蒸发量为 $1\,267.4\text{ mm}$,出现在2010年,最小年蒸发量为 914.8 mm ,出现在1984年。20世纪80年代多年平均蒸发量为 $1\,006.5\text{ mm}$,20世纪90年代多年平均蒸发量为 $1\,109.1\text{ mm}$,21世纪最初10年多年平均蒸发量为 $1\,111.8\text{ mm}$,20世纪80年代多年平均蒸发量小于历年多年平均值,从20世纪90年代开始多年平均蒸发量大于历年多年平均值,呈递增趋势。

绘制渭河源区年蒸发量累积距平曲线如图5所示。从图5可以看出:渭河源区年蒸发量1981–2010年变化大致可以分为4个阶段:1981–1994年源区年蒸发量负距平占主导地位,累积距平明显下降,年蒸发量呈减少趋势,1995–2002年源区年蒸发量正距平占主导地位,累积距平明显上升,年蒸发量呈增加趋势,2003–2008年呈减少趋势,2009–2010年再次呈增加趋势。

绘制渭河源区渭源水文站年径流量变化过程线

如图 6 所示。渭河源区渭源水文站多年平均径流量为 $2\,081 \times 10^4 \text{ m}^3$, 从 20 世纪 80 年代开始到 21 世纪最初 10 年, 年径流量存在减少趋势, 趋势线具有 $513.0 \times 10^4 \text{ m}^3/10\text{a}$ 负倾向率。最大年径流量为 $4\,480 \times 10^4 \text{ m}^3$, 出现在 1984 年, 最小年径流量为 $444.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 出现在 1997 年。20 世纪 80 年代多年平均径流量为 $2\,708 \times 10^4 \text{ m}^3$, 20 世纪 90 年代多年平均径流量为 $1\,820 \times 10^4 \text{ m}^3$, 21 世纪最初 10 年多年平均径流量为 $1\,715 \times 10^4 \text{ m}^3$, 20 世纪 80 年代多年平均径流量大于历年多年平均值, 从 90 年代开始径流量小于历年多年平均值, 呈明显递减趋势。

绘制渭河源区渭源水文站年径流量累积距平曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出: 1981 – 1993 年源区年径流量总体呈增加趋势, 1994 – 2002 年源区年径流量呈减少状态, 2003 – 2005 年源区年径流量呈增加趋势, 2006 – 2010 年源区年径流量再次呈减少状态。总体来看, 渭河源区渭源水文站年径流量大体呈现出“增加 – 减少 – 增加 – 减少”的 4 个阶段。

渭河源区年降水量、年蒸发量、年径流量趋势变化分析检验情况见表 1。从表 1 可以看出, 渭河源区年降水量呈不显著减少趋势, 年蒸发量呈显著增加趋势, 年径流量呈显著减少趋势。

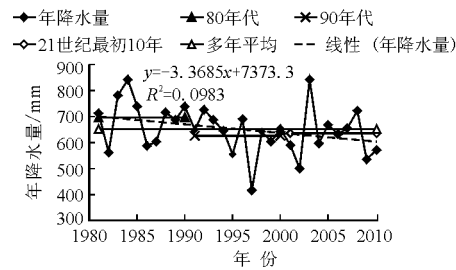


图 2 渭河源区年降水量变化过程线图

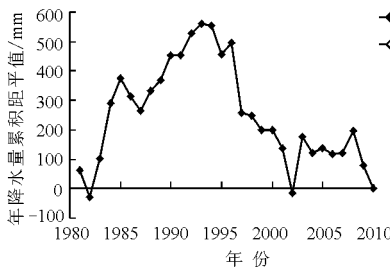


图 3 渭河源区年降水量累积距平曲线图

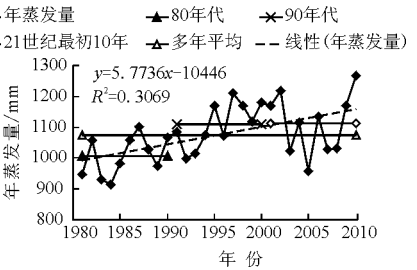


图 4 渭河源区年蒸发量变化过程线图

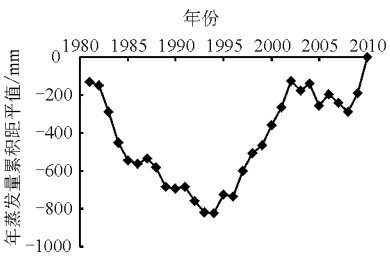


图 5 渭河源区年蒸发量累积距平曲线图

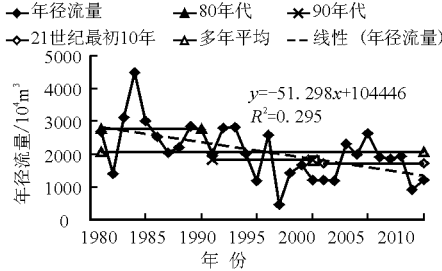


图 6 渭河源区渭源水文站年径流量变化过程线图

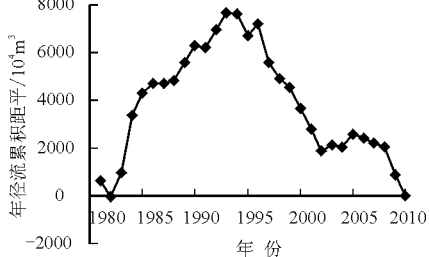


图 7 渭河源区渭源水文站年径流量累积距平曲线图

表 1 渭河源区渭源水文气象要素趋势检验

水文气象要素	趋势项检验方法($\alpha = 0.05$)			趋势程度
	坎德尔秩次相关	斯波曼秩次相关	线性回归	
	$U(\alpha/2) = 1.96$	$T(\alpha/2) = 2.01$	$T(\alpha/2) = 2.01$	
年降水量	1.95	1.86	1.75	减少、不显著
年蒸发量	3.09	3.14	3.51	增加、显著
年径流量	3.34	3.75	3.42	减少、显著

4.2 各要素季节尺度变化特征

按照 3 – 5 月为春季、6 – 8 月为夏季、9 – 11 月为秋季、12 月 – 次年 2 月为冬季进行季节划分, 研究降水、蒸发和径流量的季节变化趋势。绘制渭河源区降水量季节变化图见图 8 ~ 11。渭河源区春、夏、秋、冬四季多年平均降水量分别为 155. 6、327. 4、143. 3、20. 0 mm, 春、夏、秋、冬四季均呈减少

趋势, 趋势线倾向率分别为 -0. 84、-1. 24、-0. 37、-0. 02 mm/a, 夏季减少最快, 其次是春季、秋季、冬季。由 5 年滑动平均曲线^[12]可以看出: 春季经过 1 次波动, 在 1991 年达到波峰, 在 1996 年达到波谷。夏季经过 2 次波动, 在 1990、2001 年达到波谷, 在 1997、2007 年达到波峰。秋季经过 2 次波动, 在 1989、1998 年达到波谷, 在 1992、2007 年达到波峰。

冬季经过 2 次波动,在 1987、1999 年达到波谷,在 1993、2009 年达到波峰。

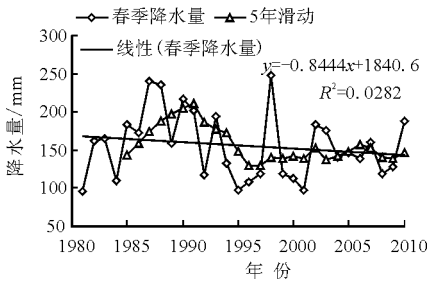


图 8 渭河源区春季降水量变化图

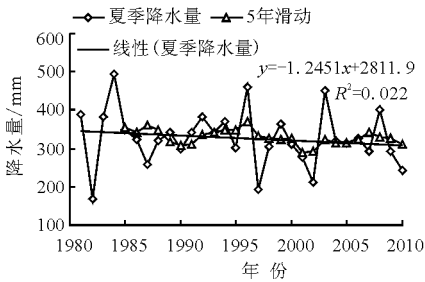


图 9 渭河源区夏季降水量变化图

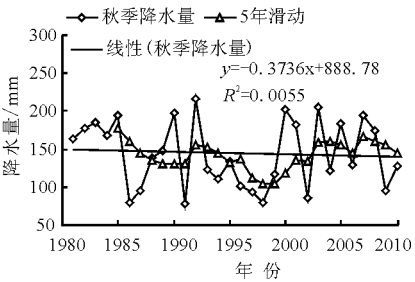


图 10 渭河源区秋季降水量变化图

渭河源区春、夏、秋、冬四季降水量趋势变化分析检验情况见表 2。从表 2 可以看出,渭河源区春、夏、秋、冬四季降水量均呈不显著减少趋势。

表 2 渭河源区季节降水量变化趋势检验

季节 尺度	趋势项检验方法($\alpha = 0.05$)			趋势 程度
	坎德尔秩次相关 $U(\alpha/2) = 1.96$	斯波曼秩次相关 $T(\alpha/2) = 2.01$	线性回归 $T(\alpha/2) = 2.01$	
春季	0.52	0.57	0.90	减少、不显著
夏季	1.41	1.30	0.79	减少、不显著
秋季	0.26	0.28	0.40	减少、不显著
冬季	0.26	0.20	0.08	减少、不显著

绘制渭河源区蒸发量季节变化图见图 12 ~ 15。渭河源区春、夏、秋、冬四季多年平均蒸发量分别为 346.7、447.8、190.1、91.1 mm,春、夏、秋、冬四季均呈增加趋势。趋势线倾向率分别为 2.20、2.61、0.518、0.449 mm/a,夏季增加最快,其次是春季、秋季、冬季。

由 5 年滑动平均曲线可以看出:春季经过 1 次波动,在 1992 年达到波谷,在 2004 年达到波峰。夏季经过 2 次波动,在 1987、1996 年达到波谷,在 1991、2002 年达到波峰。秋季经过 2 次波动,在 1991、1999 年达到波峰,在 1996、2008 年达到波谷。冬季经过 2 次波动,在 1989、1999 年达到波峰,在 1994、2009 年达到波谷。

渭河源区春、夏、秋、冬四季蒸发量趋势变化分析检验情况见表 3。从表 3 可以看出,渭河源区春、

夏季蒸发量呈显著增加趋势,秋、冬季蒸发量均呈不显著增加趋势。

表 3 渭河源区季节蒸发量变化趋势检验

季节 尺度	趋势项检验方法($\alpha = 0.05$)			趋势 程度
	坎德尔秩次相关 $U(\alpha/2) = 1.96$	斯波曼秩次相关 $T(\alpha/2) = 2.01$	线性回归 $T(\alpha/2) = 2.01$	
春季	2.69	3.09	3.24	增加、显著
夏季	2.48	2.27	2.33	增加、显著
秋季	0.70	0.75	0.76	增加、不显著
冬季	0.77	0.72	1.32	增加、不显著

绘制渭河源区径流量季节变化图(见图 16 ~ 图 19),渭河源区春、夏、秋、冬四季多年平均径流分别为 418.6、862.1、619.4、135.5 万 m^3 ,春、夏、秋季呈减少趋势,冬季呈增加趋势。趋势线倾向率分别为 -6.198、-24.54、-19.23、0.7941 万 m^3/a ,夏季减少最快,其次是秋季、春季。由 5 年滑动平均曲线可以看出:春季经过 1 次波动,在 1990 年达到波峰,在 2001 年达到波谷。夏季经过 2 次波动,在 1987、1996 年达到波峰,在 1992、2004 年达到波谷。秋季经过 2 次波动,在 1990、2000 年达到波谷,在 1993、2007 年达到波峰。冬季经过 1 次波动,在 1999 年达到波谷,在 2009 年达到波峰。

渭河源区春、夏、秋、冬四季径流趋势变化分析检验情况见表 4。从表 4 可以看出,渭河源区夏季径流呈显著减少趋势,秋季、春季径流呈减少趋势,但不显著,冬季径流呈不显著增加趋势。

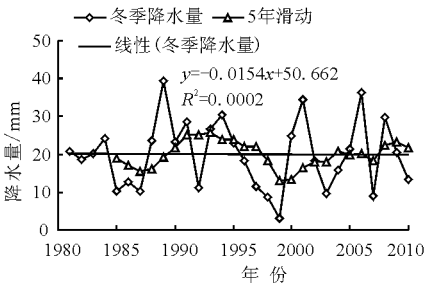


图 11 渭河源区冬季降水量变化图

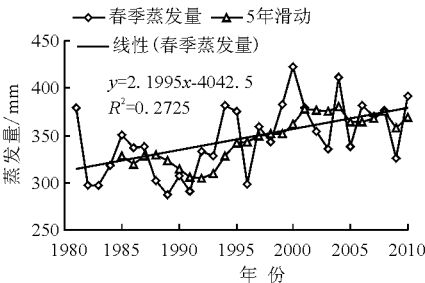


图 12 渭河源区春季蒸发量变化图

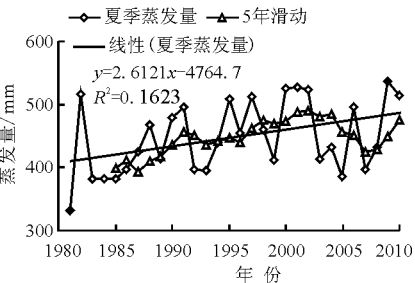


图 13 渭河源区夏季蒸发量变化图

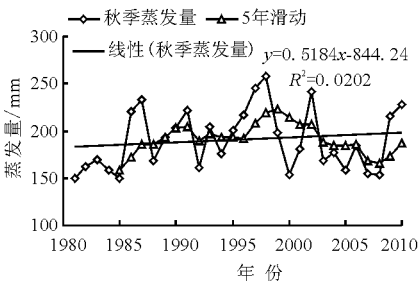


图 14 渭河源区秋季蒸发量变化图

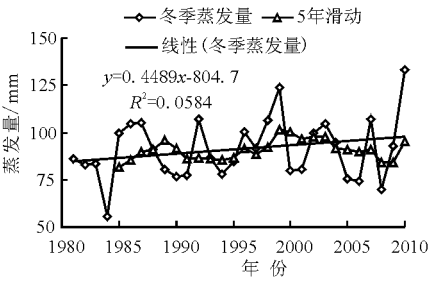


图 15 渭河源区冬季蒸发量变化图

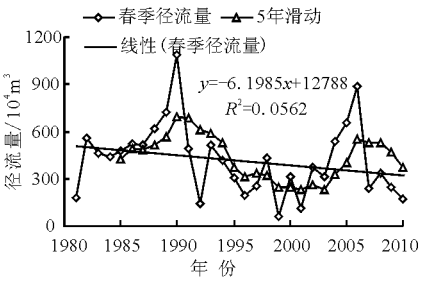


图 16 渭河源区春季径流变化图

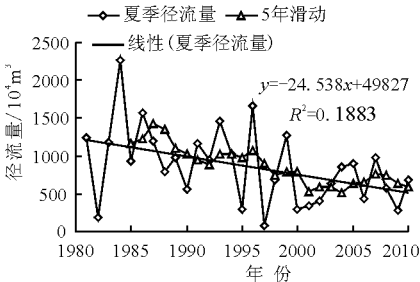


图 17 渭河源区夏季径流变化图

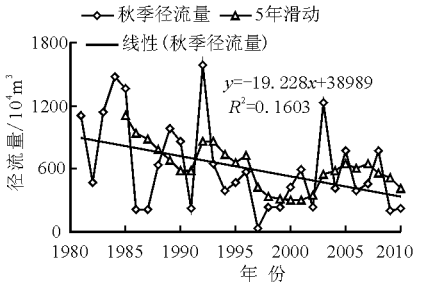


图 18 渭河源区秋季径流变化图

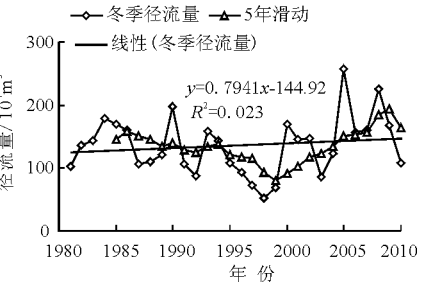


图 19 渭河源区冬季径流变化图

表 4 渭河源区径流季节变化趋势检验

季节 尺度	趋势项检验方法($\alpha = 0.05$)			趋势程度
	坎德尔秩次相关	斯波曼秩次相关	线性回归	
	$U(\alpha/2) = 1.96$	$T(\alpha/2) = 2.01$	$T(\alpha/2) = 2.01$	
春季	1.51	1.63	1.29	减少、不显著
夏季	2.16	2.43	2.55	减少、显著
秋季	1.87	1.97	2.31	减少、不显著
冬季	0.44	0.56	0.81	增加、不显著

4.3 水文气象要素突变点分析

用 M - K 趋势检验方法对渭河源区水文气象要素进行检验,进而分析其突变点。年降水量从 1984 年开始整体呈持续减少趋势,在 1993 年发生突变,并在 2002 年达到显著性减少水平。年蒸发量从 1984 年开始持续呈上升趋势,在 1990 年发生突变,

并在 1995 年达到显著性上升水平。

年径流量从 1984 年开始呈持续呈减少趋势,在 1993 年发生突变,突变点与姚玉壁等^[13]的研究结果一致,并在 1997 年达到显著性减少水平。渭河源区水文气象要素序列 M - K 值线如图 20 ~ 22。

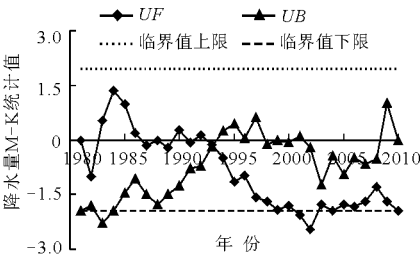


图 20 渭河源区年降水量序列 M - K 值线

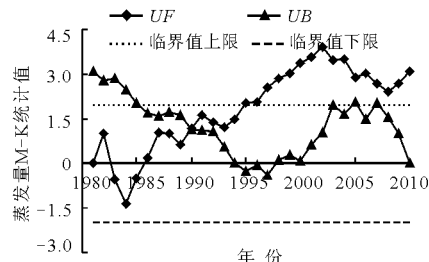


图 21 渭河源区年蒸发量序列 M - K 值线

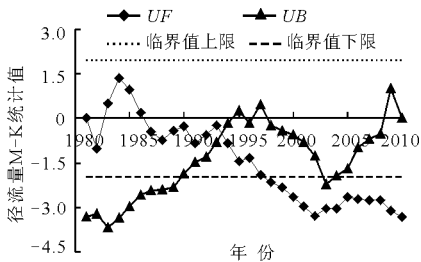


图 22 渭河源区年径流量序列 M - K 值线

4.4 各要素突变前后变化量统计

对渭河源区渭源水文站年径流量进行突变统计检验^[14],综合判断系列资料的突变情况,若统计量

大于临界值 $T(\alpha/2)$,则表明 $\alpha = 0.05$ 的显著水平下突变显著。以突变点为界,分别计算突变前后的均值及跳跃量,计算结果见表 5。从表 5 得出,渭源水

文站年径流量以 1993 年为跳跃点,表现出显著的减少跳跃性;基准期年均径流量为 $2\,671 \times 10^4 \text{ m}^3$,变化期的年均径流量为 $1\,630 \times 10^4 \text{ m}^3$,跳跃点前后年均径流量减少了 $1\,041 \times 10^4 \text{ m}^3$,相对减少了 39.0%。

表 5 渭河源区渭源水文站径流量均值跳跃性趋势 10^4 m^3						
水文要素	均值跳跃性分析($\alpha = 0.05$)					
	检验结果	显著性	跳跃点	跃前均值	跃后均值	跳跃量
	$T(\alpha /2) = 2.01$					
径流量	4.16	显著	1993 年	2671	1630	1041

根据径流量变化的阶段性,以 1981 – 1993 年为基准期,1994 – 2010 年为变化期,分析变化前后各要素的变化量。基准期多年平均降水量为 694.7 mm,变化期多年平均降水量为 618.4 mm,变化前后年均降水量减少了 76.3 mm,相对减少了 11.0%。基准期多年均蒸发量为 1 012.7 mm,变化期多年平均蒸发量为 1 124.0 mm,变化前后年均蒸发量增加了 111.3 mm,相对增加了 11.0%。

4.5 不同阶段径流量与各要素之间的关系

源区径流量主要受降水量补给,降水量减少,并

随着蒸发量增加,导致径流量减少,表现出径流量与降水量呈正相关,与蒸发量呈负相关性。

根据径流量变化的阶段性,以 1981 – 1993 年为基准期,分析变化前后径流量与降水、蒸发量之间的关系。分别以年蒸发量、年降水量为控制自变量,对年径流量与年降水量、年蒸发量进行偏相关分析检验^[15],得出具体的偏相关系数和 P 值。

径流量与降水、蒸发量的多元线性回归分析结果见表 6,从表 6 中可以看出:1981 – 2010 年蒸发量与径流量呈极显著负相关,降水量与径流量呈显著正相关,蒸发量对径流量的影响大于降水量。径流量突变前后,降水量和蒸发量对径流量的解释度增加,径流量与降水、蒸发量的相关性增加。基准期,降水量对径流量的贡献率为 59.9%,降水量与径流量呈显著相关,蒸发量对径流量的贡献率为 –32.4%;变化期,降水量对径流量的贡献率为 23.7%,蒸发量对径流量的贡献率为 –41.8%,蒸发量与径流量呈显著负相关;基准期,降水量对径流量的贡献率大于蒸发量,变化期蒸发量对径流量的贡献率大于降水量。

时间段	径流 – 降水		径流 – 蒸发		模型解释度	
	偏相关系数	贡献率/%	偏相关系数	贡献率/%	R^2	置信度(P)
1981 – 1993 年	0.67 *	59.9	–0.357	–32.4	0.764	* * *
1994 – 2010 年	0.48	23.7	–0.647 **	–41.8	0.778	* * *
1981 – 2010 年	0.489 **	33.6	0.644 ***	–51.5	0.813	* * *

5 结 论

通过以上分析,近 30 年来渭河源区水文气象要素演变趋势及阶段性研究结果表明:

(1)渭河源区年降水量与年径流量均呈减少趋势,年径流量的减少趋势大于年降水量的减少趋势,年径流量呈显著减少趋势,具有 $513.0 \times 10^4 \text{ m}^3/10\text{a}$ 负倾向率,年降水量减少趋势不显著,具有 $33.7 \text{ mm}/10\text{a}$ 负倾向率;年蒸发量呈显著增加趋势,具有 $57.7 \text{ mm}/10\text{a}$ 正倾向率。从 20 世纪 90 年代开始多年平均降水量小于历年多年平均值,蒸发量大于历年多年平均值,径流量小于多年历年平均值。

(2)渭河源区水文气象要素季节变化趋势:春、夏、秋、冬四季降水量均呈不显著减少趋势;春、夏季蒸发量呈显著增加趋势,秋、冬季蒸发量均呈不显著

增加趋势;夏季径流量呈显著减少趋势,秋季、春季径流量呈不显著减少趋势,冬季径流量呈不显著增加趋势;夏季降水量相对显著减少,蒸发量显著增加,导致夏季径流量显著减少。

(3)渭河源区年降水量、年蒸发量、年径流量均发生显著性突变,突变年份分别为 1993、1990、1993 年;年径流量突变点前后均值减少了 $1\,041 \times 10^4 \text{ m}^3$,相对减少了 39.0%;根据径流量突变点分析年降水量前后均值减少了 76.3 mm,相对减少了 11.0%,年蒸发量前后均值增加了 111.3 mm,相对增加了 11.0%。

(4)通过降水量和蒸发量对径流量的多元线性回归分析得出:1981 – 1993 年,降水量对径流量的贡献率大于蒸发量;1994 – 2010 年,蒸发量对径流量的贡献率大于降水量。

参考文献:

- [1] 杨成有,刘进琪. 甘肃江河地理名录[M]. 兰州:甘肃人民出版社,2013.
- [2] 丁 晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1988.
- [3] 潘承毅,何迎辉. 数理统计的原理与方法[M]. 上海:同济大学出版社,1992.
- [4] 苏向明,刘志辉,魏天峰,等. 新疆精河径流变化及其原因分析[J]. 水文,2016,36(5):92-96.
- [5] 黄济琛,陆宝宏,徐玲玲,等. 变化条件下常德市降水气温特征分析[J]. 水文,2016,36(5):85-91.
- [6] 莫淑红,王学风,勾 奎,等. 气候变化和人类活动对澜河流域径流形势的影响分析[J]. 水力发电学报,2016,35(9):7-17.
- [7] 黄振平. 水文统计学[M]. 南京:河海大学出版社,2003.
- [8] 牛最荣. 气候变化对祁连山区水文循环的影响研究[M]. 兰州:甘肃人民出版社,2013.
- [9] 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.
- [10] 董才文,张正栋,孟金华,等. 广东梅江中上游河段气温、降水、径流变化趋势及周期性分析[J]. 水文,2016,36(3):84-90.
- [11] 贾 杰,姜丽红. 渭河源区降水量变化特征及突变分析[J]. 甘肃水利水电技术,2017,53(2):8-10+46.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [13] 姚玉璧,张秀云,段志勇,等. 渭河源区气候变化及其对水资源的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(5):247-252.
- [14] 李文燕. 白龙江近60年水文水资源演变及变异趋势分析研究[J]. 地下水,2015,37(6):144-145.
- [15] 骆 方,黄 崑,刘红云. SPSS 数据统计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- (上接第97页)
- [6] 汪嘉杨,王文圣,李祚泳,等. 基于TS-SVM模型的水安全评价[J]. 水资源保护,2010,26(2):1-4.
- [7] 沈俊源,吴凤平,于倩雯. 基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):92-97.
- [8] 贡 力,余 涛. 集对分析法在水安全评价中的应用[J]. 中国农村水利水电,2015(1):58-62+67.
- [9] 张 明,王贵作,张寅熙. 水文相似流域最大熵优选模型研究[J]. 水利水电技术,2012,43(2):14-17.
- [10] 王子茹. 基于可变模糊集对立统一定理的水安全评价研究[J]. 人民长江,2011,42(9):1-3.
- [11] 汪嘉杨,刘 韵,李祚泳,等. 基于指标规范化概率神经网络的水安全评价模型[J]. 水力发电学报,2014,33(6):78-83.
- [12] 黄健元,金广宇,于彦博. 投影寻踪模型在行蓄洪区运用风险评价中的应用[J]. 水利经济,2016,34(5):60-63.
- [13] 崔东文. 鸡群优化算法投影寻踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):16-23.
- [14] 邵 楠,周雁舟,惠文涛,等. 基于自适应变异粒子群优化算法的测试数据生成[J]. 计算机应用研究,2015,32(3):786-789.
- [15] 王小川,史 峰,郁 磊,等. MATLAB 神经网络43个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [16] Mirjalili S, Lewis A. Autonomous particles groups for particle swarm optimization[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2014,39(6):4683-4697.