

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180004

刘丽芳,王中根,姜爱华,等.近50年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):22-27,56.
LIU L F, WANG Z G, JIANG A H, et al. Analysis of rainfall-runoff relationship variation characteristics in Sanchuan watershed in Jinan city over recent 50 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 22-27, 56. (in Chinese)

近50年济南三川流域降雨-径流关系变化分析

刘丽芳¹,王中根¹,姜爱华²,梁康¹,刘晓洁¹

(1.中国科学院地理科学与资源研究所,陆地水循环及地表过程重点实验室,北京100101;2.济南市城乡水务局,济南250099)

摘要:受气候变化和人类活动的影响,济南市三川流域(锦绣川、锦阳川、锦云川)降雨-径流关系发生显著变化,影响到济南市城市供水和保泉工程有效实施。利用1964-2011年近50年系列资料,采用滑动偏相关系数等方法,探讨三川流域降雨-径流关系变化规律,分析引起变化的内在机制与驱动因素。结果显示:受气候变化的影响,三川流域降水具有显著增加趋势;受水土保持、社会经济取水等人类活动的影响,三川流域径流具有不显著的减少趋势。流域降雨-径流关系的突变点发生在1988年前后,通过1988-2011年与1964-1987年系列对比分析,流域平均降水量增加12.57%、入库径流减少8.85%。结合实地调查和水利普查数据分析,在三川流域降雨-径流关系变化中人类活动(蓄供水工程修建和水土保持措施实施等)占主导地位。气候变化对径流影响为正效应,人类活动为负效应。

关键词:降雨-径流关系;变化;气候变化;人类活动;三川流域

中图分类号:TV122 文献标志码:A 文章编号:1672-1683(2018)01-0022-06

Analysis of rainfall runoff relationship variation characteristics in Sanchuan watershed in Jinan city over recent 50 years

LIU Lifang¹, WANG Zhonggen¹, JIANG Aihua², LIANG Kang¹, LIU Xiaojie¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Jinan Municipal Water Resources Bureau, Jinan 250099, China)

Abstract: The rainfall runoff relationship in Sanchuan watershed has changed significantly due to the climate change and intensive human activities. The variation of rainfall runoff relationship threatens the urban water supply and spring protection work in Jinan city. In this paper, we investigated the variation patterns and analyzed the internal mechanism and driving factors that caused the variation of rainfall runoff relationship in the past fifty years (1964-2011). The Mann-Kendall test, cumulative anomaly, and sliding partial correlation coefficient methods were used for characteristics analysis. The analysis results indicated that the rainfall increased significantly due to the climate change. However, the runoff decreased insignificantly in the past fifty years due to human activities such as soil and water conservation and water consumption for social and economic purposes. The change point of rainfall runoff relationship occurred in 1988. The annual rainfall in 1988-2011 increased by 12.57% and the annual runoff decreased by 8.85% as compared to those prior to the change point (in 1964-1987). The human activities including water storage and supply projects and soil and water conservation practices were the main factors impacting the rainfall runoff relationship in Sanchuan watershed. The analysis demonstrated that the climate change and human activities had opposite effects on the rainfall runoff relationship in Sanchuan watershed.

Key words: rainfall runoff relationship; variation; climate change; human activity; Sanchuan watershed

收稿日期:2017-06-06 修回日期:2017-09-19 网络出版时间:2017-12-26
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1018.020.html>

基金项目:国家自然科学基金(41330529;41271048);济南市城乡水务局项目(济水发[2013]378号)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41330529;41271048); Jinan City and Rural Water Bureau Project(济水发[2013]378号)

作者简介:刘丽芳(1981-),女,重庆人,博士,主要从事水循环模拟方面研究。E-mail:liulifang198160@163.com

通讯作者:王中根(1973-),男,河南人,研究员,博士,主要从事水循环模拟和水资源管理方面研究。E-mail:wangzg@igsrr.ac.cn

流域降雨-径流关系是水文学研究的难点和热点问题。科学研究表明,气候变化和人类活动改变了水循环中降雨、入渗、蒸发、径流等各个环节^[1-5],是影响流域降雨-径流关系的主要因素^[6-13]。研究变化环境下降雨-径流关系的演变规律能够为流域水资源管理、生态环境保护提供科学依据和技术支撑。

三川流域位于济南市南部山区,是济南市的生态屏障、重要风景区和市内泉域的主要补给区,流域内卧虎山水库和锦绣川水库担负着济南市40万居民的供水任务^[14],三川流域的降雨和径流情况对济南市社会经济可持续发展具有举足轻重的作用。新中国成立后,济南市城乡水务局在三川流域进行了一系列水资源开发和保护活动^[15],流域内土地利用状况^[16-17]、气候条件^[18]和卧虎山水库入库径流^[15]都发生了变化,目前开展气候变化和人类活动对三川流域降雨-径流关系影响的研究十分必要。

本文选取三川流域1964-2011年降水、气象以及流域出口卧虎山水库入库径流资料,分析降雨-径流关系的变化及原因。研究成果可为流域水资源管理、生态环境保护以及区域可持续发展提供科学依据和技术支撑。

1 研究区概况

三川流域(锦绣川、锦阳川、锦云川)位于山东省济南市,流域面积557 km²,属黄河流域,流域具体位置见图1。三川流域属大陆性季风气候,年平均气温为13.4℃,年平均降水量709 mm,其中夏季降水占全年降水量的64%。流域内河流按水文特征分属山区型河流,三川之水在仲宫镇汇合后入卧虎山水库,卧虎山水库多年平均入库径流深115 mm;受气候变化和人类活动影响,部分河道存在季节性断流。流域内植被覆盖度高,现有林地、草地和农用地面积分别占流域总面积的22.9%、24.2%和37%。

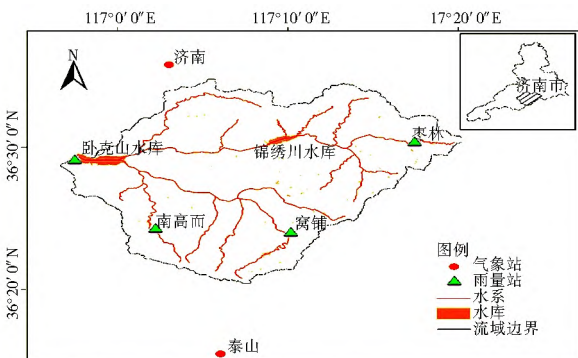


图1 三川流域地理位置与水文气象站点分布

Fig. 1 Location of Sanchuan watershed and distribution of the hydrological and meteorological stations

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究收集整理了1964-2011年流域内4个雨量站的日降水观测数据、卧虎山水库月入库径流数据,以及流域周边济南、泰山2个气象站的逐日气象资料(包括日最高气温、最低气温、相对湿度、10 m处风速、日照时数)。雨量站和气象站的位置见图1。另外,收集了三川流域1980年、1995年、2000年、2005年和2010年五期土地利用图(1:10万)、1981-2012年遥感反演叶面积指数、2011年济南市水利普查数据(包括水库、抽水井、水窖等的相关数据),以及2009-2013年《济南市水资源公报》(包括卧虎山水库上游的月降雨、水资源量等数据)。

雨量资料和入库径流资料来源于济南市水文局,水利普查数据和统计数据来源于济南市城乡水务局,气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网,土地利用数据来源于中国1:10万比例尺土地利用现状遥感监测数据库,遥感反演叶面积指数来源于马里兰大学数据共享中心(<http://glcf.umd.edu>)。

2.2 研究方法

分别采用 Mann-Kendall 检验法^[19-20]和累积距平法^[21]判断降水、潜在蒸散发和径流长期变化趋势和突变点。采用郭爱军等(2015)^[13]提出的滑动偏相关系数法判断降雨-径流关系的突变点。降雨-径流滑动偏相关系数序列 $p_{r(t_0)}$ 计算公式如下:

$$p_{r(t_0)} = \frac{r_{R,P}(t_0) - r_{R,PE}(t_0) \times r_{P,PE}(t_0)}{\sqrt{(1 - r_{R,P}(t_0)^2) \times (1 - r_{P,PE}(t_0)^2)}} \quad (1)$$

式中: $r_{R,P}(t_0)$ 为降雨-径流滑动相关系数序列; $r_{R,PE}(t_0)$ 为潜在蒸发-径流滑动相关系数序列; $r_{P,PE}(t_0)$ 为潜在蒸发-降雨滑动相关系数序列。其中 $r_{R,P}(t_0)$ 计算公式为:

$$r_{R,P}(t_0) = \frac{\sum_{t=t_0-N}^{t_0+N} [R(t) - \bar{R}(t_0)][P(t) - P(t_0)]}{\sqrt{\sum_{t=t_0-N}^{t_0+N} [R(t) - \bar{R}(t_0)]^2 \sum_{t=t_0-N}^{t_0+N} [P(t) - P(t_0)]^2}} \quad (2)$$

式中: $R(t)$ 表示径流序列; $P(t)$ 表示降雨序列; N 取5,滑动窗口的大小为 $2N + 1 = 11$,滑动相关值记在窗口的第6年,即公式中的 t_0 年; $R(t_0)$ 、 $P(t_0)$ 分别为滑动窗口期内径流和降雨的平均值。 $r_{R,PE}(t_0)$ 与 $r_{P,PE}(t_0)$ 计算过程与 $r_{R,P}(t_0)$ 计算过程相似。

3 结果与分析

3.1 水循环要素变化分析

3.1.1 降水量年际变化

利用4个雨量站实测年降水资料,应用泰森多

边形法得到流域面平均降水量。三川流域 1964–2011 年平均降水量为 709 mm, 最大值为 1 243 mm, 出现在 1964 年, 最小值为 394 mm, 出现在 1989 年, 降水年际变差系数为 0.27。流域 1964–2011 年降水逐年变化及其线性趋势如图 2(a) 所示。趋势性分析表明, 1964–2011 年三川流域内降水显著增加 ($Z=2.11$, 通过 95% 信度的 MK 检验), 这与徐宗学等(2007)^[18] 的研究一致, 线性倾向估计表明, 流域年降水量上升速率为 3.34 mm/a。降水累积距平变化见图 2(b), 从图中可知: 1964–1989 年降水累积距平在波动中减小, 1989–2011 年降水累积距平在波动中增加, 即降水突变点发生在 1989 年。

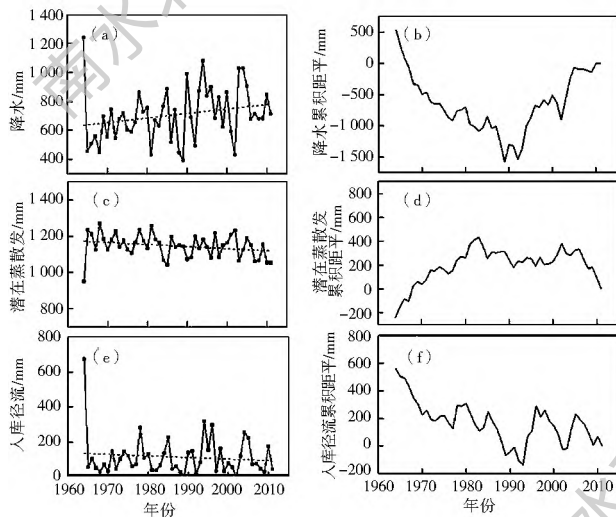


图 2 三川流域 1964–2011 年逐年水文气象要素与累积距平变化

Fig. 2 The variations and cumulative anomaly curves of hydro-meteorological factors in Sanchuan watershed from 1964 to 2011

3.1.2 潜在蒸散发年际变化

以流域中心点潜在蒸散发代表流域潜在蒸散发。采用世界粮农组织 (FAO) 1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式^[22] 估算济南和泰山站的潜在蒸散发, 并采用反距离平方方法插值到流域中心。1964–2011 年三川流域多年平均潜在蒸散发为 1 143 mm, 年潜在蒸散发最大值 1 268 mm 出现在 1968 年, 最小值 950 mm 出现于 1964 年。流域潜在蒸散发的逐年变化及其线性趋势 (图 2(c)) 显示 1964–2011 年间三川流域潜在蒸散发呈不显著下降趋势 ($Z=-1.84$), 下降速率为 -1.15 mm/a。流域潜在蒸散发的逐年累积距平变化表明, 流域参考作物蒸散发突变点发生在 1983 年 (图 2(d))。

3.1.3 入库径流量年际变化

卧虎山水库 1964–2011 年多年平均入库径流深为 115 mm, 最大值为 675 mm, 出现在 1964 年,

最小值为 6 mm, 出现在 1989 年。水库入库径流也呈现出显著减少趋势 ($Z=-0.04$), 其减少速率为 0.89 mm/a (图 2(e))。水库入库径流累积距平变化显示, 径流突变点发生在 1992 年 (图 2(f))。

综合三川流域降水、潜在蒸散发和卧虎山水库入库径流的年际变化, 可知: (1) 降水量呈显著增加趋势, 潜在蒸散发和入库径流呈不显著减少趋势; (2) 降水、潜在蒸散发和入库径流的突变时间不一致, 与降水、潜在蒸散发相比, 入库径流变化的突变时间有所滞后; (3) 降水、潜在蒸散发和入库径流的变化趋势、幅度和突变时间的不一致性表明, 入库径流变化不仅与气候变化有关, 还受人类活动影响。

3.2 降雨-径流关系变化分析

3.2.1 降雨-径流关系变异诊断

计算得到的三川流域降雨-径流滑动偏相关系数序列见图 3。由图可知: 降雨-径流滑动偏相关系数序列的变点有 3 个, 分别出现在 1970 年 (偏相关系数为 0.70, $\alpha=0.025$)、1988 年 (偏相关系数为 0.47, $\alpha=0.174$)、2000 年 (偏相关系数为 0.64, $\alpha=0.049$), 其中 1988 年偏相关系数最小, 且在 $\alpha=0.05$ 置信度水平下, 滑动窗口内降雨-径流系列相关性不显著, 因此取 1988 年为三川流域降雨-径流关系突变点。

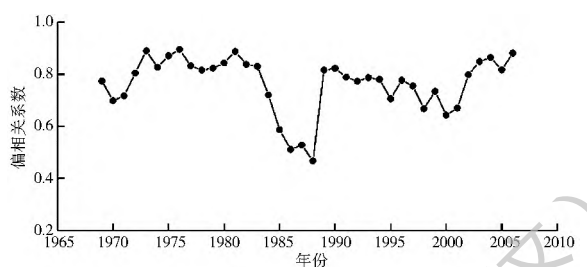


图 3 三川流域降雨-径流关系变异诊断

Fig. 3 Variation detection of rainfall-runoff relationship in Sanchuan watershed

3.2.2 变异前后降雨、径流年内分配变化

降雨-径流关系变异前后降水和入库径流的年内分配见图 4。由图 4 可知: 与 1964–1987 年相比, 1988–2011 年降水在 4 月有所减少, 5 月、6 月和 8 月有所增加, 入库径流在 7 月显著减少, 8 月显著增加。

3.2.3 变异前后降水、径流累积分布变化

降雨-径流关系变异前后降水、入库径流的累积分布见图 5, 从图 5 中可以发现: 1988–2011 年降水量累积分布相对 1964–1987 年明显右移, 降水增加, 然而入库径流量的累积分布变化不大。三川流域 1964–1987 年、1988–2011 年降水量均值分别

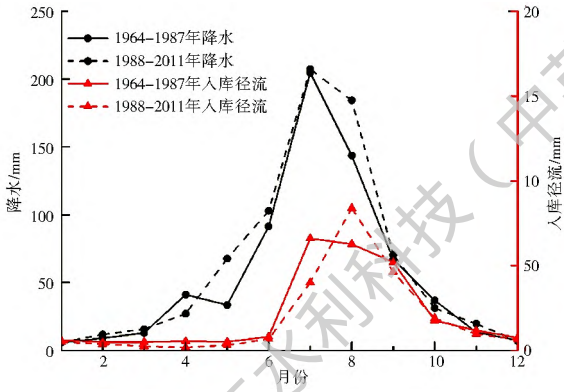


图4 三川流域降雨-径流关系变异前后降雨、入库径流年内分配变化

Fig. 4 Annual rainfall and runoff distribution before and after change of rainfall runoff relationship in Sanchuan watershed

为 666.8 mm、750.6 mm, 1988-2011 年降水量相对 1964-1987 年增加 12.57%; 1964-1987 年、1988-2011 年入库径流量均值分别为 119.8 mm、109.2 mm, 1988-2011 年入库径流相对 1964-1987 年减小 8.85%。

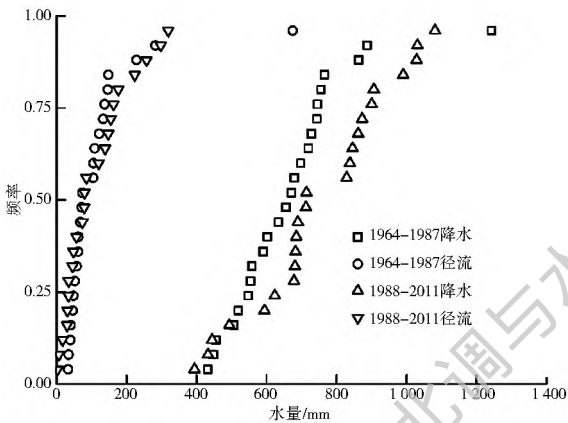


图5 降水径流关系变异前后降水、入库径流的累积分布变化
Fig. 5 Cumulative distribution of rainfall and runoff before and after change of rainfall runoff relationship in Sanchuan watershed

3.2.4 变异前后降雨-径流关系变化

图 6 为三川流域 1964-1987 年、1988-2011 年两个时段的降雨-径流相关图, 采用幂函数进行降雨-径流关系的拟合, 两个时段的降雨-径流关系拟合公式分别如下:

$$Y_1 = 9.7628 \times 10^{-8} X_1^{3.1801} \quad (R^2 = 0.94 \quad n = 24) \quad (3)$$

$$Y_2 = 1 \times 10^{-9} X_2^{3.7547} \quad (R^2 = 0.78 \quad n = 24) \quad (4)$$

式中: X_1 、 X_2 为年降水量 (mm); Y_1 、 Y_2 为年径流深 (mm); n 为样本数。

从图 6 可知: 1988-2011 年降雨-径流趋势线位于 1964-1987 年降雨-径流趋势线右侧, 表明相同降水条件下卧虎山水库入库径流在该阶段有所减少。根据式(3)、式(4), 分别计算 1964-1987 年和

1988-2011 年不同级别年降水量的产流量(见表 1)。从表 1 可知: (1) 降雨-径流关系突变后, 当年降水量小于 400 mm 时, 卧虎山入库径流很小; (2) 当年降水量在 400~1200 mm 之间变动时, 卧虎山水库入库径流减少比例在 68%~40% 之间变动, 且随着降水量的增加, 入库径流减少的比例越小; (3) 当年降雨量等于 1988-2011 年多年平均降水量 751 mm 时, 降雨-径流关系变化后卧虎山水库入库径流减少约 73 mm。

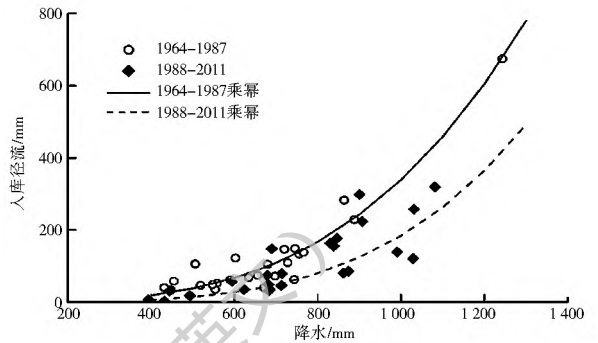


图6 降水径流关系变异前后降雨-径流相关关系变化
Fig. 6 Relationship between rainfall and runoff before and after change of rainfall runoff relationship in Sanchuan watershed

表 1 不同时段降雨-径流关系下的径流计算结果

Tab. 1 The calculated runoff before and after change of rainfall runoff relationship

年降雨量 / mm	年入库径流量 / mm		径流量变化 (%)
	1964-1987 年	1988-2011 年	
400	18.39	5.89	-67.98
500	37.38	13.61	-63.60
600	66.76	26.99	-59.58
700	108.99	48.14	-55.83
751	135.73	62.37	-54.05
800	166.65	79.48	-52.31
900	242.37	123.68	-48.97
1000	338.84	183.70	-45.79
1100	458.81	262.73	-42.74
1200	605.07	364.25	-39.80

3.3 降雨-径流关系变化归因分析

1964-2011 年三川流域降水量呈显著增加趋势, 卧虎山水库入库径流却有所减少, 降雨-径流关系发生变异, 这与流域内的人类活动有关。影响流域降雨-径流关系的人类活动包括修建水库、抽水井、塘坝、水窖(池)、植树造林等^[23-24]。

2011 年水利普查结果显示: (1) 三川流域内现存水库 25 座(见表 2), 其中卧虎山水库上游已经建成水库的总库容为 0.57 亿 m^3 , 达多年平均径流量

(1.01 亿 m^3) 的 56.44%，其中中型水库锦绣川水库修建于 1970 年。(2) 抽水井 1.04 万眼，年总取水量 142.8 万 m^3 ，为多年平均径流量的 1.4%；塘坝 127 处，水窖(池)984 处，蓄水总容积 292.2 万 m^3 ，为多年平均径流量的 2.9%。从水利普查结果可知：(1) 相对抽水井、塘坝、水窖(池)，水库对流域降雨-径流关系的影响更大；(2) 修建锦绣川水库的时间与三川流域降雨-径流关系第一次变化的时间一致。

实地调研还发现，1988 年锦绣川水库开始向济南市供水，多年平均供水量约 0.2 亿 m^3 ，为多年平均径流量的 20.0%；这一时间与三川流域降雨-径流关系突变的时间一致。通过水利普查和实地调研数据可知：修建水利工程、流域外调水是影响三川流域降雨-径流关系主要原因之一。

表 2 三川流域水库列表

Tab. 2 List of reservoirs in Sanchuan watershed

名称	修建时间	类型	名称	修建时间	类型
龙湾水库	1958	小二型水库	川道水库	1969	小二型水库
积米峪水库	1958	小二型水库	榆科水库	1964	小一型水库
枣林水库	1968	小二型水库	黄巢水库	1981	小一型水库
白炭窑水库	1973	小一型水库	大南沟水库	1964	小二型水库
葫芦峪水库	1973	小二型水库	柏树崖 1 水库	1958	小二型水库
藕池水库	1972	小二型水库	柏树崖 2 水库	1973	小二型水库
下罗伽水库	1995	小二型水库	亓城水库	1957	小二型水库
下降甘水库	1972	小二型水库	出泉沟水库	1976	小二型水库
园子台水库	1958	小二型水库	八大岭水库	1958	小一型水库
吴家沟水库	1957	小二型水库	泉泸水库	1958	小二型水库
大会水库	1985	小二型水库	卧虎山水库	1960	大型水库
龙门水库	1958	小二型水库	锦绣川水库	1970	中型水库
桃科水库	1965	小二型水库			

图 7(a) 显示 1980–2010 年三川流域各土地利用类型覆盖面积随时间的变化，由图可知各土地利用类型覆盖面积在 30 年时间内变化不大。图 7(b) 显示 1981–2012 年三川流域遥感反演获取的最大叶面积指数随时间的变化，由图可以看出：(1) 三川流域最大叶面积指数在 1981–1990 年间随时间的增加而增加，在 1990–2000 年间剧烈波动，在 2000 年后比较稳定，波动不大；(2) 2000–2012 年平均最大叶面积指数是 1981–1989 年的 1.57 倍。三川流域各土地利用类型覆盖面积和最大叶面积指数的变化结果表明：(1) 1980–2012 年间三川流域实施了大量有利于叶面积指数增加的水土保持措施；(2) 最大叶面积指数开始稳定的时间与降雨-径流关系第三次变化的时间相近，这说明实施水土保持措施也

是三川流域降雨-径流关系发生变化的重要原因。

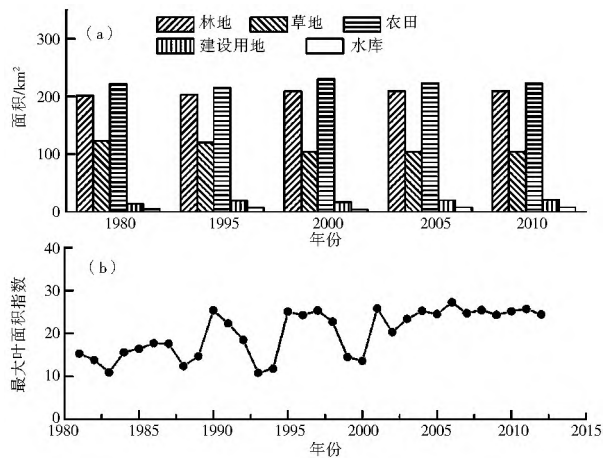


图 7 三川流域植被覆盖随时间的变化

Fig. 7 The change of vegetation cover in Sanchuan watershed

4 结论

选取三川流域 1964–2011 年降水、蒸发以及卧虎山水库入库径流等资料，采用 Mann-Kendall 检验法、累积距平法和滑动偏相关系数法等进行了流域降雨-径流关系的变化分析，并结合实地调研和水利普查数据对引起其变化的原因进行了探讨。主要结论如下。

(1) 1964–2011 年三川流域年降雨量呈现显著增加趋势，尤其 1989 年以后。在降雨量增加的同时，流域潜在蒸散发和卧虎山入库径流呈减少趋势。入库径流变化的突变点为 1992 年，滞后于降雨量的突变点。说明卧虎山入库径流与降雨的变化在时间上不同步，并存在相反的趋势。

(2) 三川流域降雨-径流关系在 1988 年出现变化的拐点。之后，流域降雨年内分布发生了改变，其中 4 月有所减少、5 月–6 月和 8 月有所增加，降雨量累积分布相对变异前明显右移，平均降雨量增加 12.57%；实测入库径流在 7 月显著减少，入库径流累积分布变化不大，平均入库径流量减小 8.85%；当年降水量小于 400 mm 时，卧虎山入库径流很小。

(3) 结合实际调查发现，三川流域降雨-径流关系的变化与修建水库、向济南市供水、实施水土保持措施等有关，其中锦绣川水库向济南市供水对流域降雨-径流关系影响最大。总体上，卧虎山入库径流的变化受气候变化和人类活动的双重影响，其中人类活动的减水效应要高于气候变化的增水效应。

参考文献(References):

- [1] 刘昌明, 刘小莽, 郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学对社会的影响, 2008(2): 21-27. (LIU C M, LIU X

- M, ZHENG H X. Discussion on the influence of climate change on hydrology and water resources[J]. *Science Impact on Society*, 2008(2): 21-27. (in Chinese)
- [2] PIAO S L, CIAIS P, HU ANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43. DOI: 10.1038/nature09364.
- [3] 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 Y H. Human activity and the global climate change and its impact on water resources[J]. *China Water Resources*, 2008(2): 20-27. (in Chinese))
- [4] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2): 278-285. (DONG L H, XIONG L H, YU K X, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 278-285. (in Chinese)) DOI: CNKI: 32.1309. P. 20120224. 2005. 020.
- [5] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))
- [6] 孙宁, 李秀彬, 冉圣洪, 等. 潮河上游降水-径流关系演变及人类活动的影响分析[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 41-47. (SUN N, LI X B, RAN S H, et al. The changes of rainfall-runoff relationship and the impacts of human activities in the upper Chao Watershed[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(5): 41-47. (in Chinese))
- [7] 夏军, 乔云峰, 宋献方, 等. 岔巴沟流域不同下垫面对降雨-径流关系影响规律分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 70-76. (XIA J, QIAO Y F, SONG X F, et al. Analysis about effect rules of underlying surface change to the relationship between rainfall and runoff in the Chabagou catchment[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 70-76. (in Chinese))
- [8] 刘士余, 章俊霞, 罗志军, 等. 近50年赣西北大坑小流域径流对降雨的响应[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 19-22. (LIU S Y, ZHANG J X, LU O Z J, et al. Response of runoff to rainfall in Dakeng small watershed in Northwestern Jiangxi province over the last 50 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(1): 19-22. (in Chinese))
- [9] HU S S, LIU C M, ZHENG H X, et al. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(5): 895-905. DOI: 10.1007/s11442-012-0971-9.
- [10] 吕乐婷, 彭秋志, 廖剑宇, 等. 近50年东江流域降雨径流变化趋势研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 514-520. (LYU L T, PENG Q Z, LIAO J Y, et al. Fluctuation and trends in precipitation and runoff in the Dongjiang River Basin over 50 years[J]. *Resources Science*, 2013, 35(3): 514-520. (in Chinese))
- [11] 杨默远, 桑燕芳, 王中根, 等. 潮河流域降水-径流关系变化及驱动因子识别[J]. *地理研究*, 2014, 33(9): 1658-1667. (YANG M Y, SANG Y F, WANG Z G, et al. Variation of rainfall-runoff relationship and the driving factors identification in the Chaohe River Basin[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(9): 1658-1667. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlyj201409007.
- [12] 何艳虎, 陈晓宏, 林凯荣, 等. 东江流域近50年径流系数时空变化特征[J]. *地理研究*, 2014, 33(6): 1049-1058. (HE Y H, CHEN X H, LIN Kai-rong, et al. Temporal and spatial characteristics of runoff coefficient variations in the Dongjiang Basin during 1964-2012[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1049-1058. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlyj201406010.
- [13] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 165-171. (GUO A J, CHANG J X, WANG Y M, et al. Variation characteristics of rainfall-runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe river basin in nearly 50 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(14): 165-171. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.14.023.
- [14] 张升东, 徐征和, 孔珂. 基于模糊优选方法的卧虎山流域水量分配方案研究[J]. *中国农村水利水电*, 2012(5): 6-10. (ZHANG S D, XU Z H, KONG K. Research on water allocation based on the fuzzy optimization method in Wohushan basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(5): 6-10. (in Chinese))
- [15] 杨姗姗, 徐征和, 孔珂, 等. 基于SWAT模型的卧虎山水库流域径流模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2013(5): 11-19. (YANG S S, XU Z H, KONG K, et al. A flow simulation based on SWAT model in Wohushan reservoir basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(5): 11-19. (in Chinese))
- [16] 李晓印. 济南市南部山区生态环境遥感监测与分析评价[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009. (LI X Y. Ecological environment monitoring using remote sensing and its analysis and evaluation of south mountainous district in Jinan city[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2009. (in Chinese))
- [17] 魏耀武. 济南南部山区土地利用/覆盖变化及情景预测研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2014. (WEI Y W. Study on land use/cover change and its scenarios simulation in the southern mountainous areas of Jinan[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2014. (in Chinese))
- [18] 徐宗学, 孟翠玲, 赵芳芳. 山东省近40a来的气温和降水变化趋势分析[J]. *气象科学*, 2007, 27(4): 387-393. (XU Z X, MENG C L, ZHAO F F. Long-term trend analysis for temperature and precipitation in Shandong province[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2007, 27(4): 387-393. (in Chinese))
- [19] MANN H B. Nonparametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259. DOI: 10.2307/1907187.
- [20] KENDALL M. Rank correlation measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [21] RAN L S, WANG S J, FAN X L. Channel change at Toudaoguai station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 231-247. DOI: 10.1007/s11442-010-0231-9.

- 究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 769-775. (LI H Y, WANG J. The snowmelt runoff model applied in the upper Heihe River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 769-775. (in Chinese))
- [19] 李晶, 刘时银, 魏俊峰, 等. 塔里木河源区托什干河流域积雪动态及融雪径流模拟与预估[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1508-1516. (LI J, LIU S Y, WEI J F, et al. Snow cover dynamics and snowmelt runoff modeling in the Toxkan River basin, source region of the Tarim River, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1508-1516. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0181.
- [20] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. SRM 融雪径流模型在乌鲁木齐河源区的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 41-48. (HUAI B J, LI Z Q, SUN M P, et al. Snowmelt runoff model applied in the headwaters region of Urumqi River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 41-48. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.01.010.
- [21] 赵军, 黄永生, 宋闲庆, 等. SRM 融雪径流模型在疏勒河流域上游的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 72-80. (ZHAO J, HUANG Y S, SONG G Q, et al. Application of snowmelt runoff model in upper stream of Shule river basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(1): 72-80. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.01.014.
- [22] HE Z H, PARA JKA J, TIAN F Q. Estimating degree day factors from MODIS for snowmelt runoff modeling[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18: 4773-4789. DOI: 10.5194/hess-18-4773-2014.
- [23] 侯慧姝, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 252-256. (HOU H S, YANG H Y. A general introduction to MODIS snow products and its researching application[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 252-256. (in Chinese))
- [24] MARTINEC J, RANGO A, ROBERTS R. The snowmelt runoff model (SRM) user's manual (updated edition 1998, Version 4.0) [M]. Berne: University of Berne, 1998.
- [25] JONATHAN K, WOONSUP C, ANKE K. Snowmelt runoff modeling: Limitations and potential for mitigating water disputes[J]. Journal of Hydrology, 2012, 430-431: 179-181. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.043.
- [26] MOHSIN J B, MUHAMMAD B. Application of snowmelt runoff model for water resource management[J]. Hydrological Processes, 2011, 25: 3735-3747. DOI: 10.1002/hyp.8099.
- [27] 苑希民, 李鸿雁, 刘树坤, 等. 神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (YUAN X M, LI H Y, LIU S K, et al. Application of neural network and genetic algorithm in water science[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))

(上接第27页)

- [22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Food and Agriculture Organization Press, 1998: 23-27, 97-134.
- [23] 李子君, 李秀彬. 水利水保措施对潮河流域年径流量的影响——基于经验统计模型的评估[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 958-968. (LI Z J, LI X B. Impacts of engineering measures for water conservancy on annual runoff in the Chaohe River Basin based on an empirical statistical model[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(9): 958-968. (in Chinese))
- [24] 刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 7-12. (LIU C M, LI Y Z, LIU X M, et al. Impact of vegetation change on water transformation in the middle yellow river[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 7-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.002.

(上接第41页)

- [21] DU AN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology, 158(3-4): 265-284. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.
- [22] 陈喜, 张志才, 程勤波. 饱和非饱和水流数值模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 115-119. (CHEN X, ZHANG Z C, CHENG Q B. Numerical modeling saturated and unsaturated groundwater flow[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 115-119. (in Chinese))
- [23] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007(4): 649-655. (WANG Z G, XIA J, LIU C M, et al. Comments on sensitivity analysis and calibration of distributed hydrological model[J]. Journal of Natural Resources, 2007(4): 649-655. (in Chinese))
- [24] BABU R G, BABU G R, KUMAR H H. Estimation of crop water requirement, effective rainfall and irrigation water requirement for vegetable crops using CROPWAT[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2015, 8(1): 15-20. DOI: 10.15740/HAS/IJAE/8.1/15-20.
- [25] 凌敏华, 陈喜, 程勤波, 等. 地表水与地下水耦合模型研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 04: 79-84. (LING M H, CHEN X, CHENG Q B, et al. Advances in coupled surface water and groundwater models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 04: 79-84. DOI: 10.3880/j.issn.1006-9647.2010.04.019 (in Chinese))
- [26] 黄远洋. 平原区地下水动态变化对地表水文过程影响的模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. (HUANG Y Y. Research on modeling effects of groundwater dynamic on surface water processes[D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))