

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.001

外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性

薛联青^{1,2,3}, 杨帆¹, 杨昌兵³, 张洛晨⁴, 魏光辉⁴, 陈新芳¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243000;

3. 德克萨斯大学奥斯汀分校地质学院, 美国 奥斯汀 78713-8924; 4. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 采用 Pettitt 检验法及累积距平等方法相互验证, 合理地将历史长序列划分确定为基准期 (1960—1971 年)、改变期 I (1972—1985 年) 及改变期 II (1986—2015 年)。采用基于 Budyko 假设的 Choudhury 公式和水量平衡方法, 计算分析塔里木河流域径流变化对外界气候变化和人类活动的响应敏感性及其敏感性系数的空间分布。研究表明: (a) 径流变化对人类活动的敏感性较高。(b) 降水增加对径流增加起促进作用, 而潜在蒸发和下垫面参数增加使径流减少; 自基准期到改变期 II, 径流变化对降水、潜在蒸散发和下垫面参数的敏感性系数显著增加, 在改变期 II 敏感性系数分别为 1.26、-0.26、-1.88。(c) 敏感性系数空间分布存在差异性, 流域中下游敏感性系数较上游敏感性系数高。(d) 根据径流变化的敏感性及时采取应对措施对流域水资源开发利用与调配管理具有积极作用。

关键词: 径流变化; 人类活动; Pettitt 检验; 敏感性系数; Budyko 假设; 塔里木河流域

中图分类号: TV12; P33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)01-0001-06

Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin

XUE Lianqing^{1,2,3}, YANG Fan¹, YANG Changbing³, ZHANG Luo Chen⁴,
WEI Guanghui⁴, CHEN Xinfang¹

(1. Hydrology and Water Resources College, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hohai University Wentian College, Anhui 243000, China;

3. Department of Geological Sciences, The University of Texas at Austin, Austin 78713-8924, USA;

4. Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau, Korla 841000, China)

Abstract: Quantitative assessment of the climate change and human activity to the run-off alteration is significant for the sustainable management of regional water resources. The time series of run-off from 1960 to 2015 are characterized by three periods: the baseline period (1960–1971), the changing periods I (1972–1985) and the changing period II (1986–2015) according to the trend analysis. The sensitivity and its spatial distribution of run-off alteration on climate changes and human activities are analyzed based on the water balance and the Budyko hypothesis. The results show that the streamflow alteration is most sensitive to human activities in the Tarim River Basin during the period of 1986–2015. An obvious increase of run-off sensitivity occurred on the precipitation, potential evapotranspiration and catchment parameter from the baseline period to the impact period II, and sensitivity indexes are in 1.26, -0.26 and -1.88 in changing period II, respectively. Moreover, a regional difference has been observed in the elasticity coefficient and the downstream is higher than the upstream of Tarim River. In the view of the deepening and aggravating loss of run-off due to the climatic change and anthropogenic factors, it is significant for the development and management of regional water resources by taking timely measures according to the sensitivity analysis.

Key words: run-off alteration; anthropogenic activities; Pettitt test; sensitivity analysis; Budyko hypothesis; Tarim River Basin

基金项目: 国家自然科学基金 (41371052); 水利部公益性行业科研专项 (201501059); 江苏省“青蓝”工程 ([2014]4 号); 江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修项目 (苏教师 [2015]35 号)

作者简介: 薛联青 (1973—), 女, 教授, 博士, 主要从事环境水文及生态水文研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

引用本文: 薛联青, 杨帆, 杨昌兵, 等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 1-6. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.001.

受全球气候变化和人类活动等因素的综合影响,水资源系统变得更加敏感和脆弱,以土地利用、农业灌溉、兴修水利和城镇化为主要的人类活动引起的水文效应已得到各国学者的广泛关注^[1-2]。进行气候变化和人类活动对径流影响的分析方法主要有三类^[3]:经验统计法、基于敏感性的方法和水文模型。经验统计法包括回归分析和双累积曲线法,水文模型以 SWAT、SIMHYD 和 VIC 等为主,对基础数据要求较高,模型和参数存在一定不确定性^[4]。基于敏感性的方法中,Budyko 公式综合考虑了流域的水量和能量平衡,能较好地反映流域自身规律而得到广泛应用^[5-6]。已有学者基于 Budyko 假设研究径流变化对气候变化和人类活动的敏感性,得出与水文模型模拟效果相一致的结论^[7-8]。但由于径流对气候和人类活动的敏感性存在明显的区域差异性^[9],日益加剧的人类活动对于干旱少雨、生态环境脆弱的西北干旱区河川径流的影响会更加明显,并且河川径流变化对气候变化和人类活动的敏感性以及敏感性系数的空间分布研究尚不多见。本文以典型干旱内陆河塔里木河流域为研究对象,采用 Choudhury 公式等方法,分析计算径流变化对灌溉用水和土地利用变化等人类活动的敏感性及其空间分布,以期对流域水资源优化管理及下游生态环境保护提供技术参考和依据。

1 研究区概况

塔里木河地处西北干旱区,是我国典型的以农业经济为主的内陆河^[10-12]。流域总面积 102 万 km²,地理位置介于东经 73°10′~94°05′、北纬 34°55′~43°08′^[13]之间。受远离海洋、高山阻隔和自身不产流等因素的影响,干流径流量主要由源流区冰川融雪补给^[14]。源流区天然径流经阿克苏河(径流占 73.2%)、和田河(径流占 23.2%)、叶尔羌河(径流占 3.6%),汇入干流阿拉尔站。过去 100 年来全球气温上升 0.74℃,且源流区绿洲灌溉面积近年来逐步扩大,大型水库陆续修建及畜牧业迅速发展,源流区耗水量大幅度增加,而干流区来水量逐年减少^[15]。特别是近 50 年来,强烈的人工干扰已使水资源时空布局发生了显著变化,流域生态退化、恶化,水资源的异变性已成为制约流域可持续发展的主要因素。

2 研究方法

2.1 趋势分析与突变诊断

Pettitt 检验法是一种非参数的突变检验方法,能够对计算的可能突变点进行准确的显著性检验,在水文气象序列变异点研究中得到了广泛应用^[8]。采用 Pettitt 检验法对塔河流域 1960—2015 年的降水、潜在蒸发和径流序列进行突变分析。同时,为了进一步确认未通过检验的变异点,采用累积距平法进行辅助检验,旨在确定塔河流域各水文站径流和气象站点的降水、潜在蒸散发序列的突变年份,综合分析界定气候变化和人类活动剧烈影响的合理起始点。

2.2 敏感性分析方法

给定一个闭合流域,其多年水量平衡可以近似表示为

$$P = E + R + \Delta S \tag{1}$$

式中: P ——多年平均降水量,mm; E ——实测蒸发量,mm; R ——径流深,mm; ΔS ——流域蓄水量变化,mm。

著名气象学家 Budyko(布迪科)在对全球水量平衡和能量平衡耦合分析时,发现陆面长期平均蒸散量取决于大气对陆面的水分供给(降水量)和能量供给(蒸发能力或净辐射量)之间的平衡^[16]。Budyko 假设具有普适性,该研究引起了广泛关注并催生了许多相似的理论成果,本文采用应用最为广泛的 Mezentsev-Choudhury-Yang 公式计算蒸发量^[17],其表达式如下:

$$E = \frac{PE_0}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \tag{2}$$

式中: E_0 ——潜在蒸发量,mm; n ——下垫面特性系数。

根据多年水量平衡关系 $R=f(P, E_0, n)$,流域气候变化和流域特性引起的径流变化量可近似表示为

$$dR = \frac{\partial f}{\partial P}dP + \frac{\partial f}{\partial E_0}dE_0 + \frac{\partial f}{\partial n}dn \tag{3}$$

依据敏感性系数的定义公式(式(4)),可以将流域气候变化和流域特性引起的径流变化表示成式(5)。

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dX}{X}} \tag{4}$$

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \varepsilon_n \frac{dn}{n}$$

(5)

其中

$$\varepsilon_P = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dP}{P}} \quad \varepsilon_{E_0} = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dE_0}{E_0}} \quad \varepsilon_n = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dn}{n}}$$

式中: X ——径流变化影响因素,如 P 、 E_0 和 n ; ε_P 、 ε_{E_0} 、 ε_n ——降水、潜在蒸散发和下垫面特性的敏感性系数。
令 $\varphi=E_0/P$,经简化计算,最终得到

$$\varepsilon_P = \frac{(1 + \varphi^n)^{1/n+1} - \varphi^{n+1}}{(1 + \varphi^n) [(1 + \varphi^n)^{1/n} - \varphi]}$$

(6)

$$\varepsilon_{E_0} = \frac{1}{(1 + \varphi^n) [1 - (1 + \varphi^{-n})^{1/n}]}$$

(7)

$$\varepsilon_n = \frac{\ln(1 + \varphi^n) + \varphi^n \ln(1 + \varphi^{-n})}{n(1 + \varphi^n) [1 - (1 + \varphi^{-n})^{1/n}]}$$

(8)

反映特定流域的植被、土壤、地形和气候特征系数 n 可通过反算法得出。

3 结果分析

3.1 趋势分析与突变诊断

利用上述分析方法计算可得 1960—2015 年塔里木河流域降水、潜在蒸发序列突变点检验结果。从 Pettitt 的检验结果可知,通过显著性检验($P<0.05$)的 13 个站点中,降水、潜在蒸发量的突变点集中在 1986 年或滞后于 1986 年。从降水、潜在蒸发序列的趋势图(图 1(a)(b))可以看出,降水、潜在蒸发分别呈现 0.61 mm/a、-2.99 mm/a 的变化趋势,且 1986 年前后序列均值变化显著($P<0.05$)。因此,以 1986 年作为塔里木河干流气候发生显著变化的起始年份。从径流序列的趋势图(图 1(c))看出,径流序列呈现 0.15 mm/a 的减少趋势,而 1972 年前后序列均值变化不显著($P=0.081$)。为进一步确认其变异位置,用累积距平法再次对径流资料进行检验,确定其变异位置最早位于 1972 年(见图 1(d))。因此,以 1972 年作为人类活动影响剧烈的

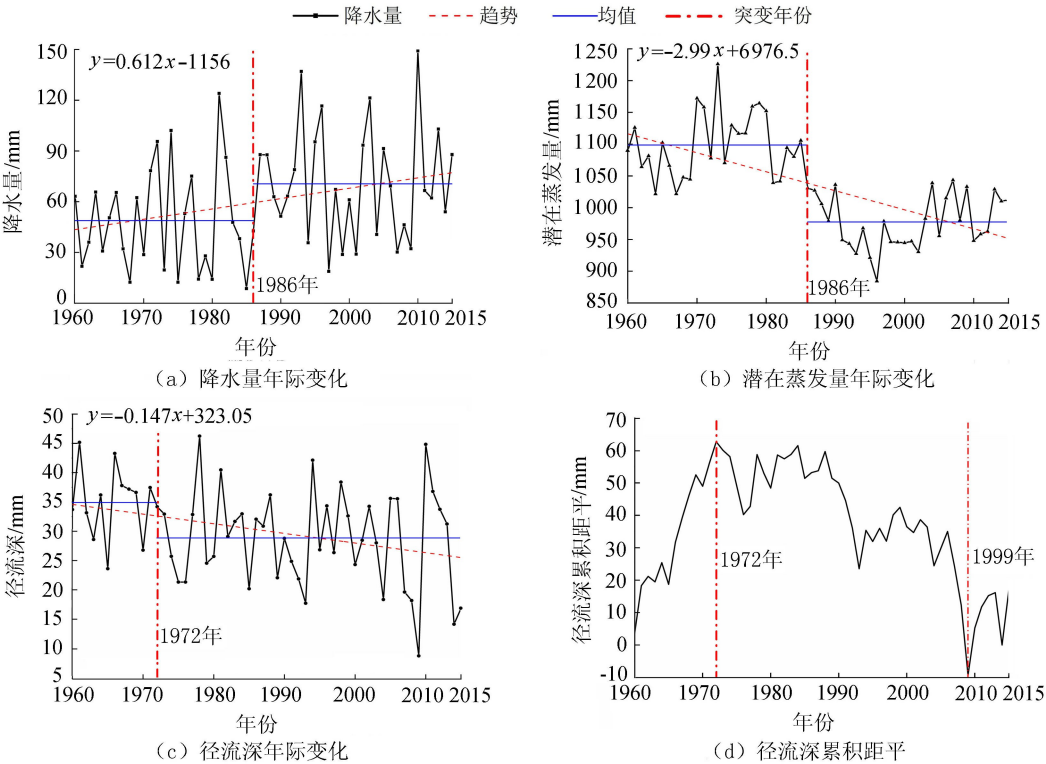


图 1 1960—2015 年塔里木河流域径流、降水和潜在蒸散发量变化

Fig.1 The trend of annual run-off, precipitation and E_0 in the Tarim River Basin from 1960 to 2015

起始年。据此对研究时段进行划分:基准期为受气候变化和人类活动影响微弱的天然状态段(1960—1971年),改变期Ⅰ为人类活动剧烈影响段(1972—1985年),改变期Ⅱ为气候变化和人类活动综合影响段(1986—2015年)。已有不少学者研究了近50年塔河流域气候变化和人类活动的突变点^[18-19],本文结论与上述结果基本一致。

3.2 径流变化对气候变化和人类活动的敏感性评估

首先结合实测径流、降水和潜在蒸散发量等数据,利用反算法计算参数值 n ,得出最优值为0.217。利用Mezentsev-Choudhury-Yang公式及公式(6)(7)(8)计算降水、潜在蒸发和下垫面敏感性系数,结果表明:自基准期以来,径流变化对降水、潜在蒸发和下垫面敏感性系数呈显著增大趋势,基准期(1960—1971年)径流变化对降水、潜在蒸发和下垫面敏感性较低,敏感性系数分别为1.06、-0.06、-0.79,即降水、潜在蒸散发或流域特性参数增加1%时,对应径流分别增加1.06%、减少0.06%和减少0.79%。在改变期Ⅰ(1972—1985年),径流变化对降水、潜在蒸散发和流域特性参数变化的敏感性系数为1.13、-0.13、-0.99。在改变期Ⅱ(1986—2015年),径流变化对降水、潜在蒸散发和流域特性参数变化的敏感性系数为1.26、-0.26、-1.88。由此可见,流域径流变化对下垫面变化的敏感性最高,其次是降水和潜在蒸散发变化;在降水和蒸散发的影响下,径流变化对降水的敏感性较高。为确定敏感性系数的变化趋势,绘制气候敏感性系数和下垫面敏感性系数随干旱指数变化的关系曲线(图2)。图2表明塔河流域实测径流变化对降水的敏感性系数集中于1.00~1.53范围,对蒸发的敏感性系数处于0.00~-0.53范围,对下垫面敏感性系数范围是-0.09~-3.03(其中负号“-”表示减少或降低)。相同下垫面条件下,当干旱指数为0~2.6时,气候和下垫面敏感性系数均显著增大;当干旱指数大于2.6时,气候敏感性系数呈微弱变化趋势,而下垫面敏感性系数仍保持明显的涨幅。由此说明在干旱地区径流变化对二者的敏感程度较高,下垫面变化引起的径流改变更为显著;而在相同干旱指数的气候区,随着参数 n 增大,气候敏感性系数和下垫面敏感性系数的值均显著增大。换言之,在同一地区,随着土地利用和植被覆盖变化的加剧,径流变化对气候变化和人类活动更为敏感。

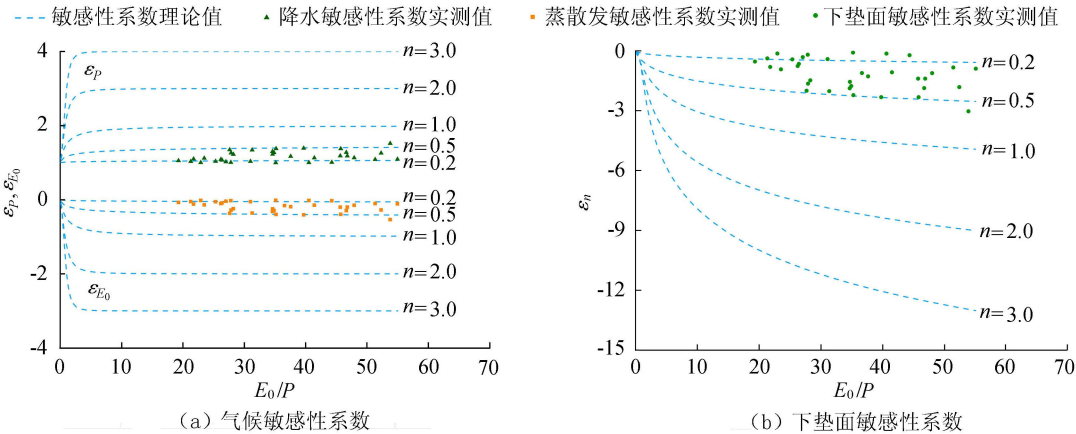


图2 随干旱指数和下垫面变化的气候敏感性系数和下垫面敏感性系数

Fig.2 Climate sensitivity and underlying surface sensitivity with the aridity index and the underlying surface parameter respectively

由敏感性系数的空间分布可知,流域尺度上径流变化对气候变化和下垫面变化的敏感性表现为明显的时空变异特征。图3显示了干旱指数分布(图3(a))和下垫面敏感性系数分布(图3(b))。从塔河流域上游到下游,干旱指数显著增加,径流对降水、潜在蒸散发和流域特性参数的敏感性逐渐增大。从基准期到改变期Ⅱ,同一地区干旱指数明显减小,但降水、潜在蒸散发和流域特性参数的敏感性显著增加。随着流域气候由暖干向暖湿转化,径流变化对降水、潜在蒸散发和下垫面变化的敏感性不但没有减小,而且呈现显著的增大趋势。

3.3 人类活动影响成因分析

塔里木河流域人类活动对径流变化的影响主要包括大面积耕地引起绿洲耗水量增加、水库修建导致蒸发渗漏损失严重等。采用1980—2008年的5期土地利用和植被覆盖数据,对比分析了6种植被类型的变化趋势。自1980年、1990年、2000年、2008年至2015年,塔里木河流域的耕地、林地和居民用地面积呈阶段性增加,2015年

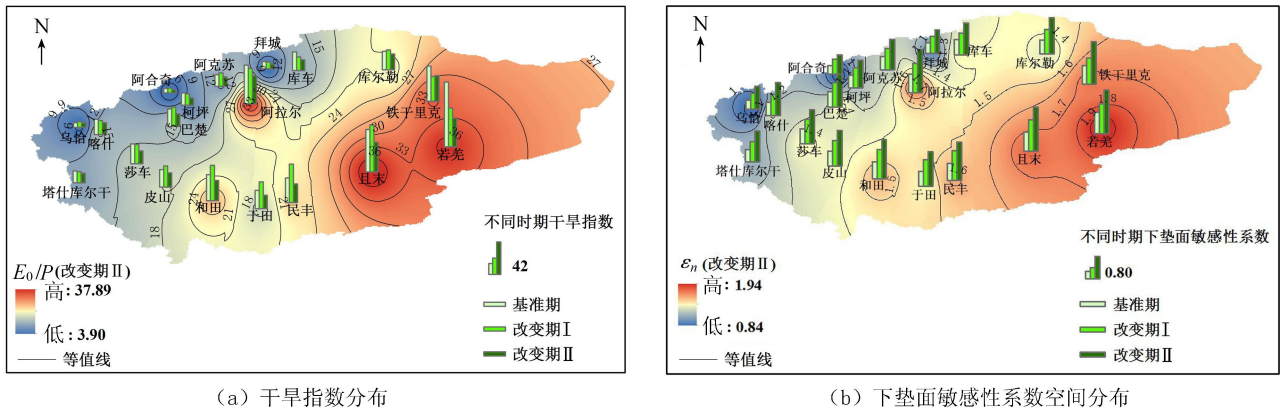


图 3 塔里木河流域不同时期干旱指数和下垫面敏感性系数空间分布

Fig.3 Spatial distributions of the aridity index and the underlying surface index in the Tarim River Basin during different periods

较 1980 年分别增加了 54.84%、19.53% 和 40.14% (表 1)。在大多数流域,参数 n 的变化与植被增加的变化趋势一致时,表明植被增加是导致径流减少的主要原因之一,而塔里木河流域参数 n 自基准期到改变期 II 呈现 0.217、0.276 和 0.372 的增加趋势,说明植被覆盖面积增加与径流减少密切相关。塔里木河地区农业经济高度依赖水资源,耕地面积扩张是灌溉引水量增加的主要原因。自基准期至改变期 II,平均绿洲耗水量依次为 $131.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $138.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $150.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而已有研究表明塔里木河三源流年内新增耕地面积与耗水量之间均具有较好的正相关关系,这从一定程度上证实了绿洲耕地面积不断扩大是导致径流减少的重要原因。

除此之外,人类活动在生产过程中修建的水库对径流变化影响剧烈。1981—2006 年,三大平原水库耗水量均呈现显著的上升趋势,并且在 1986 年前后呈现阶段性上升趋势。与之一致,孙晓娟^[20]采用水均衡估算出 1981—2006 年胜利水库、多浪水库和上游水库的年耗水率分别为 17.9%、26.9% 和 21%,年蒸发渗漏损失量高达 $6.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水库耗水量占总耗水量的比例呈阶段性下降趋势,进一步说明人类活动在其他用水领域的强度不断增加,也证实了人类活动影响剧烈的本质原因。综上分析,基于 Choudhury 公式和水量平衡法得到的塔里木河干流径流变化对气候变化和人类活动的敏感性结果符合客观事实。

4 结 语

采用 Choudhury 公式和水量平衡方法,分别从时间和空间角度分析了近 1960—2015 年塔里木河流域径流变化对外界气候变化和人类活动的响应敏感性,发现相对于气候变化而言,塔里木河流域的径流变化对人类活动的响应更为敏感;降水增加促使径流增加,而潜在蒸发和下垫面变化增加导致径流减少;自基准期到改变期 II,径流变化对降水、潜在蒸发和下垫面参数的敏感性呈增加趋势。究其原因,发现塔河流域耕地、居民用地面积在 1980—2015 年间分别增加了 51.84% 和 40.14%,绿洲耗水量和水库耗水量显著呈现阶段性增加,说明耕地面积增加、绿洲灌溉耗水及水库修建等人类活动是径流敏感性增加的主要原因。此外,径流变化的敏感性系数空间分布差异明显,流域中下游敏感系数较上游敏感系数高。因此,加强中下游地区水资源的合理开发利用、防止中下游地区生态环境进一步恶化对维护流域水资源及生态安全意义重大。

本研究对深入理解干旱区水资源演变机理、进行水资源的科学管理具有参考价值。但由于流域监测资料有限,加之模型参数物理意义有待进一步明确,径流变化归因的定量估算分析存在偏差,应进一步完善资料和方法,深入分析径流演变及成因机理。

表 1 塔里木河流域 5 期土地利用和植被覆盖变化
Table 1 Changes of the land use and vegetation coverage in the five periods of Tarim River Basin

土地利用类型	1980 年 基准期面积/ km ²	变化期的面积变化率/%			
		1990 年	2000 年	2008 年	2015 年
耕地	24 502	0	9.91	29.31	51.84
林地	10 672	0.02	29.37	23.34	19.53
草地	26 0551	-0.01	-2.62	-3.52	-4.81
水域	36 694	-0.41	1.63	0.22	0.20
居民用地	1 607	0.06	2.55	6.41	40.14
未利用土地	647 064	0	0.16	-0.07	-0.43

参考文献:

- [1] GAIN A K, WADA Y. Assessment of future water scarcity at different spatial and temporal scales of the Brahmaputra River Basin [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(4):999-1012.
- [2] 左其亭. 我国海绵城市建设中的水科学难题[J]. *水资源保护*, 2016, 32(4):21-26. (ZUO Qiting. Water science issues in sponge city construction[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(4):21-26. (in Chinese))
- [3] WANG Xixi. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: an overview [J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 71:209-218.
- [4] REN Lei, XUE Lianqing, LIU Yuanhong, et al. Study on variations in climatic variables and their influence on runoff in the Manas River Basin, China [J]. *Water*, 2017, 9(4):258, doi:10.3390/w9040258.
- [5] XU Xiangyu, YANG Dawen, YANG Haobo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510:530-540.
- [6] JIANG Cong, XIONG Lihua, WANG Dingbao, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522:326-338.
- [7] ZHAN Chesheng, ZENG Sidong, Jiang Shanshan, et al. An integrated approach for partitioning the effect of climate change and human activities on surface runoff [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(11):3843-3858.
- [8] WU Jingwen, MIAO Chiyan, ZHANG Xiaoming, et al. Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586:328-337.
- [9] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(5):605-613. (ZHANG Shulei, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960-2010[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5):605-613. (in Chinese))
- [10] 刘远洪, 薛联青, 姜凌峰. 基于修正线性矩法的流域枯水径流概率分布线型优选[J]. *水力发电*, 2015, 41(6):14-17. (LIU Yuanhong, XUE Lianqing, JIANG Lingfeng. Optimal selection of low flow frequency probability distribution fitted by trimmed L-moments [J]. *Water Power*, 2015, 41(6):14-17. (in Chinese))
- [11] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J]. *水资源保护*, 2017, 33(3):31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Changes in characteristics of environmental flow in Tarim irrigation area before and after water diversion[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(3):31-37. (in Chinese))
- [12] 王希义, 徐海量, 潘存德, 等. 2000—2014 年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量[J]. *水资源保护*, 2017, 33(4):32-39. (WANG Xiyi, XU Hailiang, PAN Cunde, et al. Study on groundwater recharge amount and suitable demand amount in lower reaches of Tarim River from 2000 to 2014[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(4):32-39. (in Chinese))
- [13] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3):1-8. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luocheng, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(3):1-8. (in Chinese))
- [14] XUE Lianqing, ZHANG Hui, YANG Changbing, et al. Quantitative assessment of hydrological alteration caused by irrigation projects in the Tarim River basin, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):4291. doi: 10.1038/s41598-017-04583-y.
- [15] XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River Basin, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):8254. doi: 10.1038/s41598-017-09215-z.
- [16] BUDYKO M I. *Climate and life* [M]. San Diego: Academic Press, 1974: 72-191.
- [17] CHOUDHURY B J. Evaluation of an equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1/2):99-110.
- [18] 陶辉, 毛伟峰, 黄金龙, 等. 塔里木河流域干湿变化与大气环流关系[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1):45-52. (TAO Hui, MAO Weiyi, HUANG Jinlong, et al. Drought and wetness variability in the Tarim River Basin and possible associations with large scale circulation [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1):45-52. (in Chinese))
- [19] 李香云, 罗岩, 王立新. 近 50a 人类活动对西北干旱区水文过程干扰研究: 以塔里木河流域为例[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2003, 24(4):93-98. (LI Xiangyun, LUO Yan, WANG Lixin. Study on the disturbance of human activities on the hydrological process in Tarim River Watershed [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2003, 24(4):93-98. (in Chinese))
- [20] 孙晓娟. 气候变化对阿克苏河流域径流量及平原水库的影响研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2010.