

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.04.010

基于 Budyko 方程的小理河流域径流响应研究

巩 瑶¹, 莫淑红¹, 李子龙², 沈 冰¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 三门峡市水利勘测设计有限责任公司, 河南 三门峡 472000)

摘要: 环境变化对径流影响是综合作用的过程, 为此定量区分气候变化和人类活动对径流变化的贡献具有一定的现实意义。本文以小理河流域的降水量、潜在蒸散发量和径流深为研究对象, 采用 Mann-Kendall 方法分析了三者的变化趋势, 运用有序聚类法和滑动 T 检验法诊断径流深序列变异点, 采用 Budyko 方程定量计算气候变化和人类活动对径流变化的影响程度。结果表明: 流域径流序列在 1998 年发生变异, 相比于 1978—1997 年的多年平均径流深, 1998—2010 年的多年平均径流深减小了 7.06mm, 其中气候因素变化使得径流深增加 6.64mm, 而大规模人类活动使径流深减小了 13.7mm。通过累积量斜率变化率比较法与 Budyko 方程定量计算结果的对比分析可知, 两者结论相近, 人类活动是导致该流域径流深减小的主要驱动因子, 证明了 Budyko 方程定量分析结果的可靠性以及在黄土高原地区的适用性。

关键词: 气候变化; 人类活动; 径流响应; Budyko 方程; 小理河流域

中图分类号: TV121

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)04-0439-08

Study on runoff response in Xiaolihe basin based on Budyko equation

GONG Yao¹, MO Shuhong¹, LI Zilong², SHEN Bing¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Sanmenxia City Water Resources Survey and Design Co. Ltd., Sanmenxia 472000, China)

Abstract: The impact of environmental changes on runoff is comprehensive, and it is necessary to quantitatively distinguish the contribution of climate changes and human activities to runoff. In this paper, the precipitation, potential evapotranspiration and runoff in Xiaolihe basin were studied. The Mann-Kendall method was used to analyze the trends of the hydrometeorological elements above, the sequential clustering method and sliding T test were used to diagnose runoff abrupt change points, and the Budyko equation was used to quantitatively calculate the impact of climate and human activities on runoff changes. The results showed that runoff in Xiaolihe basin has a abrupt change point in 1988; compared with the multi-year average runoff depth from 1978 to 1997, the annual runoff from 1998 to 2010 had a decrease of 7.06 mm, and human activities lead to a reduce of 13.7mm, while climate changes resulted in an increase of 6.64mm. By comparing the results by the method for the sloop change ratio of cumulative quantity to Budyko equation, it is proved that both conclusions are similar, that human activities are the main reason leading to the decrease in runoff in Xiaolihe basin, and that the quantitative analysis of Budyko equation in Loess Plateau region is applicable.

Key words: climate change; human activity; runoff response; Budyko equations; the Xiaolihe basin

河川径流的变化作为全球变化的重要组成部分, 其相关研究备受瞩目, 由于气候条件的不断变化

收稿日期: 2018-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679185); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0403600)

作者简介: 巩瑶, 女, 硕士生, 研究方向为旱区水文水资源。E-mail: gongyaozhang@126.com

通讯作者: 莫淑红, 女, 教授, 博士, 研究方向为旱区水文水资源。E-mail: moshuhong@xaut.edu.cn

和人类社会的加速发展,河川径流在两者的综合作用下响应显著,这也导致区域水资源时空分布发生变化^[1-3]。环境变化通常包括流域内人类活动和气候变化两部分,由于流域气候、人类活动对水文过程的综合影响,不同流域在不同年代的水文响应并不相同^[4-6],为此,定量区分气候变化和人类活动对径流变化的影响程度是非常必要的。统计和图形分析法、气候敏感性分析法和水文模型法是定量区分两大影响因子对径流量变化的影响程度的主要方法,但上述方法对水文气象及人类活动数据资料要求较高^[7]。近年来,以 Budyko 水热耦合平衡理论为基础的水量平衡方法也被广泛用于量化分析气候变化和人类活动对径流变化的影响^[8-11],相较于其他方法,该方法可直接单独估算出气候变化或人类活动对径流变化的贡献程度^[12-13]。

小理河流域地处我国西北黄土高原地区,是生态环境脆弱带以及气候变化的敏感区域。20 世纪 70 年代以来,伴随着国家一系列政策法规的出台实施,该地区生态治理、水利工程建设等人类活动不断加强,由于土地利用方式的改变,加之大量水土保持工程的建设,改变了流域下垫面条件,从而影响了流域水文循环和水资源形成过程^[14]。因此,探究变化环境下小理河流域的水文响应特征,厘清气候变化和人类活动对径流变化的分项贡献,对指导该区域水资源规划和管理具有重要意义。本文基于 Budyko 方程对降水量、潜在蒸散发量、径流量关系的描述,定量计算研究区气候变化和人类活动对其径流变化的

贡献,从而探讨该方法在黄土高原地区的适用性。

1 研究区概况及数据来源

小理河发源于陕西省横山县,是大理河的主要支流之一,位于东经 109°16′~109°51′、北纬 37°36′~37°49′之间。小理河全长 63.7 km,总流域面积约为 820.8 km²。小理河流域属黄土丘陵沟壑区,地形地貌特征为梁峁起伏,夏季气候炎热且降雨较多,冬季寒冷干燥且降雨较少。全流域以草地、耕地和林地为主要植被,大约占全流域的 96.91%,流域土壤类型主要为黄土和风沙土,其面积分别占总面积的 96.07%和 2.32%^[15]。

小理河流域出口断面控制站为李家河水文站,本研究收集了李家河水文站的径流资料;同时,收集了流域内艾好峁、大路峁台、高镇、李家峁、李孝河和李家河 6 个雨量站的降水资料,并基于 ArcGIS 平台利用泰森多边形法,将各雨量站资料加权平均作为流域降水量的基础数据。年潜在蒸散发量采用世界粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 方法计算获得。气象资料来自于中国气象局的中国气象数据共享服务平台,收集整理了距离研究区最近的横山气象站的日照时数、平均最低气温、平均最高气温、平均本站气压、平均气温、平均风速、平均水汽压和平均相对湿度 8 个气象因子的资料,上述水文气象资料时间序列均为 1978—2010 年。小理河流域水文气象站点分布如图 1 所示。

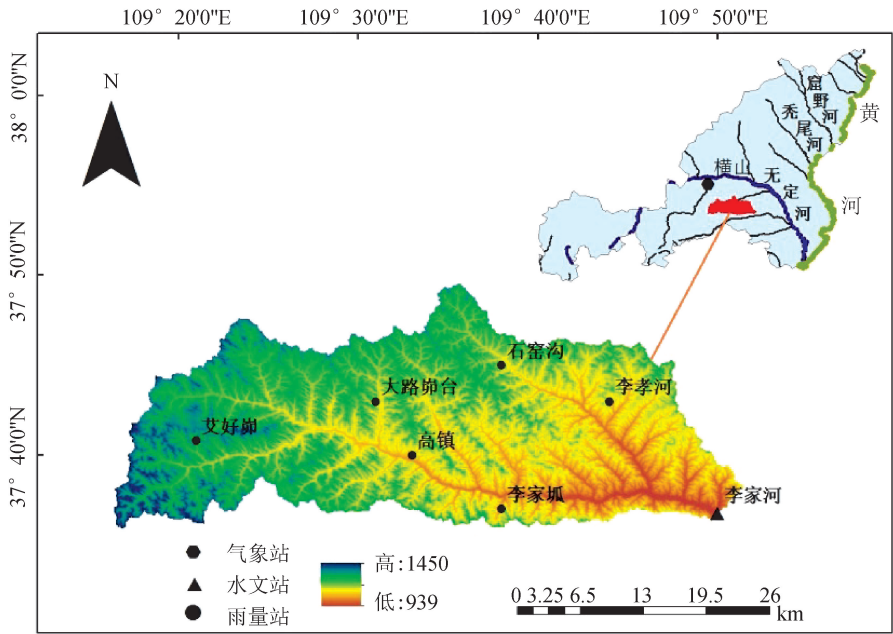


图 1 小理河流域水文气象站点分布
Fig. 1 Hydrological stations in Xiaolihe basin

2 研究方法

前苏联气候学家 Budyko 在进行全球水量和能量平衡分析时发现,地面长期平均蒸散发量主要由大气对地面的水分供给(降水量)和能量供给(净辐射量或潜在蒸散发量)之间的平衡决定。在多年尺度上,用降水量 P 代表陆面蒸散发的水分供应条件,用潜在蒸散发量 E_p 代表蒸散发的能量供应条

件,对于量 $E_p/P<1$ 的流域,能量是其蒸散发量的制约条件,而对于 $E_p/P>1$ 的流域,供水条件是其蒸散发量的限制条件,其水热耦合定量关系可用 Budyko 方程简单表达为 $E/P=f(E_p/P)=f(\varphi)^{[16]}$,其中 φ 为辐射干旱指数(简称干旱指数), E 为流域蒸发能力。对于此方程,国内外学者们经过大量的分析,提出了如表 1 所示的不同形式的表达式,其中 n 、 ω 、 w 和 ϵ 是表征下垫面特征的参数。

表 1 多种形式的 Budyko 方程表达式
Tab.1 Budyko equations

Budyko 方程表达式	参数	方程来源
$\frac{E}{P}=\left[\left(1-e^{-\frac{E_p}{P}}\right) \cdot \frac{E_p}{P} \cdot \tanh \left(\frac{E_p}{P}\right)^{-1}\right]^{0.5}$	无	[Budyko,1974]
$\frac{E}{P}=\left[1+\left(\frac{E_p}{P}\right)^{-n}\right]^{-\frac{1}{n}}$	n	[Turc, 1954; Mezentsev, 1955; Pike, 1964; Choudhury, 1999; Yang et al. , 2008]
$\frac{E}{P}=1+\frac{E_p}{P}-\left[1+\left(\frac{E_p}{P}\right)^{\omega}\right]^{\frac{1}{\omega}}$	ω	[Fu, 1981; Zhang et al. , 2004; Yang et al. , 2007]
$\frac{E}{P}=\frac{1+w \frac{E_p}{P}}{1+w \frac{E_p}{P}+\left(\frac{E_p}{P}\right)^{-1}}$	w	[Zhang et al. , 2001]
$\frac{E}{P}=\frac{1+\frac{E_p}{P}-\sqrt{\left(1+\frac{E_p}{P}\right)^2-4 \epsilon(2-\epsilon)} \frac{E_p}{P}}{2 \epsilon(2-\epsilon)}$	ϵ	[Wang et al. ,2014]

以 Wang^[17]依据相似性假设推导的 Budyko 方程表达式为参考,Budyko 曲线上下限示意图如图 2 所示。当参数 $\epsilon=1$ 时,Budyko 曲线的上限条件为:

$$\begin{cases} \frac{E}{P}=\frac{E_p}{P}, \frac{E_p}{P} \leqslant 1 \\ \frac{E}{P}=1, \frac{E_p}{P}>1 \end{cases} \quad (1)$$

当 $\epsilon=0$ 时,Budyko 曲线则达到下限,此时

$$\frac{E_p}{P}=\frac{R}{P} \quad (2)$$

式中, R 为径流深。

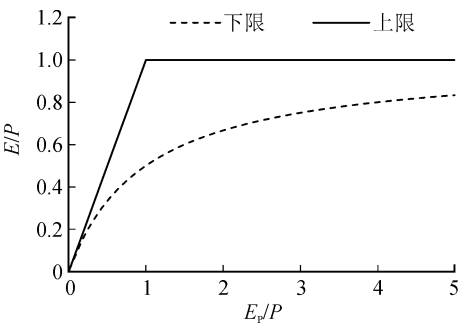


图 2 Budyko 方程曲线上下限示意图

Fig. 2 Upper and lower bounds of Budyko equation curve

Wang 指出上述几种 Budyko 方程尽管表达形式不同,但当取适当参数时,不同方程的曲线就会重合。如当 $\epsilon=0.6$ 时,Wang 的方程曲线便与无参数的 Budyko 方程曲线重叠;当 $\epsilon=(2-\sqrt{2})/2\approx0.29$ 时,Wang 的方程曲线与 Fu 的方程曲线重叠。所以上述这些 Budyko 方程仅是表达形式不同,对降水量、潜在蒸散发量和实际蒸发量的关系表现是一致的,本文采用 Wang 等推导的方程式展开分析计算。

Budyko 方程中的参数 ϵ 可以通过研究区基准期的水文序列进行率定,如图 3 所示,其中 E_{p1}/P_1 、 E_{p2}/P_2 为流域环境变化前后的干旱指数; E_1 为流域基准期的蒸发量; E_2 为变化期的蒸发量; E_2' 为仅气候变化下的流域蒸发量; P_1 为流域基准期的降水量; P_2 为变化期的流域降水量。随着时间的推移,如果流域仅干旱指数(E_p/P)发生改变,则 E/P 会随之沿着之前的 Budyko 曲线变化,因此,气候变化引起的流域径流变化沿着 Budyko 曲线移动,而直接人类活动导致的径流变化只会表现为纵向上的变化。基于以上假设, Budyko 曲线的纵向移动可以分解为两部分,即由气候变化引起的变化和直接人

类活动引起的变化。对一个流域而言,其水文状态可沿着四个方向变化,如果仅发生气候因素的变化,则经过一定时间后,状态从 A 点($E_{P1}/P_1, E_1/P_1$)会沿着 Budyko 曲线到 C 点($E_{P2}/P_2, E_2'/P_2$),气候变化导致了横向和纵向的位移,即在水平方向上从 E_{P1}/P_1 到 E_{P2}/P_2 和在垂直方向上从 E_1/P_1 到 E_2'/P_2 。如由于人类活动的干涉,人类活动对径流变化的贡献冲抵了气候因素在垂直方向上的贡献,使 A 点最终移动到 B 点($E_{P2}/P_2, E_2/P_2$),则人类活动对径流变化的贡献是 C 点到 B 点的纵向位移,即 $\frac{E_2'}{P_2} - \frac{E_2}{P_2}$ 。于是,可分别得到气候变化和人类活动对径流变化的贡献:

$$\begin{cases} \Delta R_h = P_2(\frac{E_2'}{P_2} - \frac{E_2}{P_2}) \\ \Delta R_c = \Delta R - \Delta R_h \end{cases} \quad (3)$$

式中, ΔR 为径流深变化总量; ΔR_h 为人类活动对径流深变化的贡献量; ΔR_c 为气候变化对径流深变化的贡献量。 ΔR_c 和 ΔR_h 可以是正的,也可以是负的。

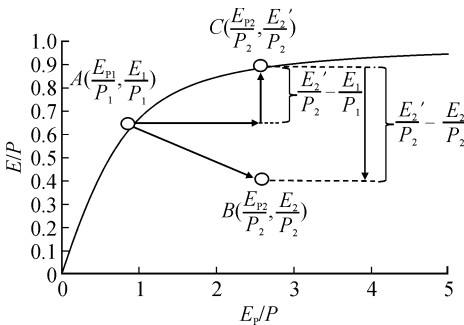


图 3 定量分解气候变化和人类活动对径流变化贡献的示意图
Fig. 3 Budyko curve and diagram showing the direct human and climate impacts on runoff

3 结果分析与讨论

3.1 水文气象要素变化趋势分析

采用 Mann-Kendall (M-K) 秩次相关检验法对小理河流域的径流深、降水量和潜在蒸散发量时间序列的变化趋势进行分析,结果如表 2 和图 4 所示。由图可知,径流深变化呈不显著下降趋势;降水量在 20 世纪 90 年代之前维持在 300~500 mm 之间,变化平稳,1995 年左右出现短暂下降,随后在本世纪初回升,呈不显著上升趋势;潜在蒸散发量对环境的响应比较敏感,所以波动起伏明显,但总的来说维持在 1000~1200 mm 左右,呈不显著下降趋势。综合小理河流域水文气象要素变化规律,气候要素中降水量和潜在蒸散发量分别有上升和下降趋势,但径流深的变化却呈下降趋势,这意味着气候变化不是

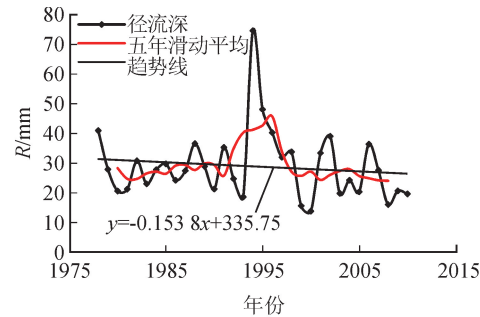
该流域径流变化唯一的影响因素,人类活动可能也是小理河流域径流深减少的重要原因,需进一步深入分析辨识气候变化和人类活动对径流变化的贡献。

表 2 小理河流域水文气象要素 M-K 趋势检验表

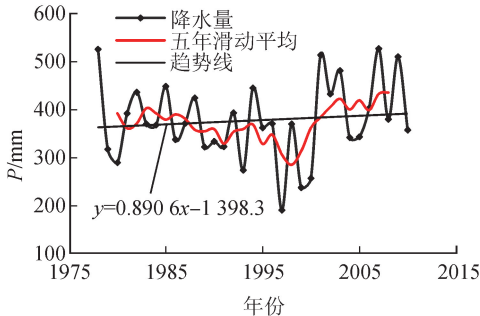
Tab. 2 Results of M-K test for hydrometeorological elements in Xiaolihe basin

水文气象要素	统计量 U	趋势性	显著性
径流深	-1.08	下降	不显著
降水量	0.59	上升	不显著
潜在蒸散发量	-0.22	下降	不显著

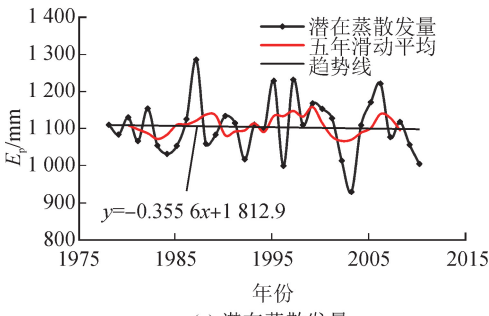
注:显著性水平 $\alpha=0.05$ 。



(a) 径流深



(b) 降水量



(c) 潜在蒸散发量

图 4 小理河流域水文气象要素变化趋势分析

Fig. 4 Change curves of hydrometeorological elements in Xiaolihe basin

3.2 径流深变化突变点的确定

有序聚类法^[18]又称最优分段法,该方法是由费歇在 1958 年提出的,其实质是求最优分割点,使同

类之间离差平方和最小,而类与类之间离差平方和最大。有序聚类法是提取水文序列突变点的一种常见方法。传统的 T 检验法是对变异点的显著性进行检验的方法,并不能用来寻找变异点。雷红富^[19]提出了既可以寻找变异点又可以检验变异点显著性的滑动 T 检验法。综合有序聚类法和滑动 T 检验法对小理河流域径流变化进行突变分析,结果如图 5 和图 6 所示,均表明小理河流域径流深序列的突变点为 1998 年。

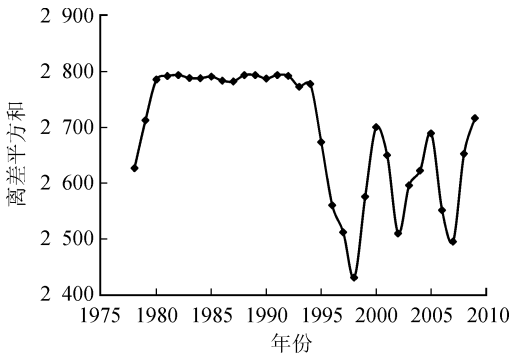


图 5 年径流有序聚类法分析曲线

Fig. 5 Sequential clustering curve of runoff

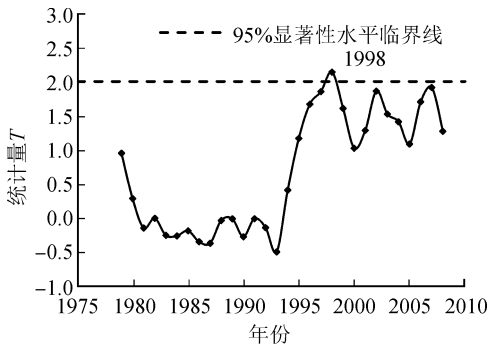


图 6 年径流滑动 T 检验分析曲线

Fig. 6 Moving T test curve of runoff

3.3 气候变化和人类活动对径流变化的贡献分析

以 1998 年为时间节点,划分 1978—1997 年为基准期,1998—2010 年为变化期,且为了满足水量平衡方程,降水量、潜在蒸散发量、径流深数据均采用 5 年滑动窗口计算处理,经率定,本文所采用的 Budyko 方程中的参数 ϵ 为 1.47。

由于 Budyko 方程中的参数 ϵ 由基准期的数据序列率定,代表 1978—1997 年的多年平均水平的 A 点(3.04,0.91)必定落在曲线上(如图 7 所示),若仅有降水量及潜在蒸散发量发生变化,A 点应沿曲线移动至 C 点(2.76,0.90),但实际情况是代表 1998—2010 年的多年水平的 B 点位于 A 点的左上方。1978—1997 年多年平均径流深为 31.76 mm,

1998—2010 多年平均径流深为 24.70 mm,相对减小了 22.23%,根据式(3)计算, ΔR_h 为 -13.70 mm, ΔR_c 为 6.64 mm。说明气候因素的变化对径流深的贡献是使径流深增加 6.64 mm,大规模的直接人类活动使径流深减小了 13.70 mm,两者的综合作用使径流深仅减小了 7.06 mm。小理河流域人类活动的影响促使径流深减小了 43.14%,而气候因素的变化对径流深的影响抵消了 20.91%,与气候变化的影响相比,人类活动是影响该流域径流变化的主要因素。

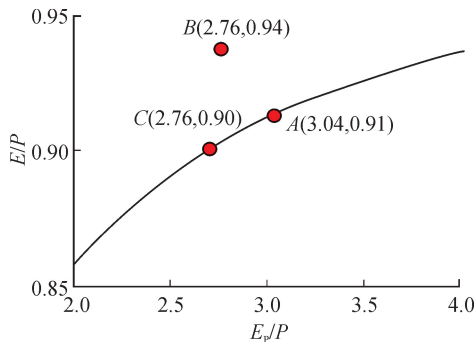


图 7 小理河流域径流变化归因分析

Fig. 7 Contribution analysis of runoff change in Xiaolihe basin

3.4 讨论

王随继^[20]提出累积量斜率变化率比较法可用于确定气候变化和人类活动对径流变化的贡献,黄生志^[21]、郭爱军^[22]等也通过实例验证了该方法可以应用在干旱半干旱地区河流径流变化及其影响因素的定量评估中。现利用累积量斜率变化率比较法定量分析小理河流域气候变化和人类活动对径流变化的贡献,与 Budyko 方程定量分析的结果进行比较,从而探讨 Budyko 方程定量分析方法在黄土高原地区的适用性及可靠性。

由径流深序列的突变点(1998 年)可以将小理河流域径流深、降水量、潜在蒸散发量的时间序列分别划分为两个不同时期,即 1978—1997 年和 1998—2010 年,求出累积径流深、降水量、潜在蒸散发量不同时期的累积量斜率,如表 3 所示,根据斜率变化率的比值可计算得出降水量和潜在蒸散发量对径流深变化的贡献分别是 -70.46% 和 5.03%,即降水量的变大促使径流深增加 70.46%,潜在蒸散发量的变小促使径流深减小 5.03%,两者的共同作用为气候变化对径流深变化的贡献,为 -65.43%,所以人类活动对径流深变化的贡献为 165.43%。此处的贡献是指各影响因素的贡献相对于径流深变化量的占比。由于 1998—2010 年的多年平均径流

深相对于 1978—1997 年减小了 7.06 mm,故可计算出气候变化使径流深增加了 4.62 mm,其中降水量使径流深增加了 4.97 mm,潜在蒸散发量使径流深减小了 0.35 mm,而人类活动使径流深减小了 11.68 mm。

表 3 小理河流域累积径流深、降水量、潜在蒸散发量的斜率变化
Tab. 3 Cumulative slope change of runoff, precipitation and potential evapotranspiration in Xiaolihe basin

水文气象要素	时期	累积量斜率	变化量	变化率/%
径流深	1978—1997	30.63		
	1998—2010	25.29	−5.34	−17.45
降水量	1978—1997	365.91		
	1998—2010	410.89	44.98	12.29
潜在蒸散发量	1978—1997	1 105.90		
	1998—2010	1 096.20	−9.70	−0.88

对比 Budyko 方程定量分析方法,两种计算方法对气候变化和人类活动的贡献量的偏差为 2.02 mm,但结果近似,即气候变化使径流深增加,而人类活动抵消了气候变化的影响,使径流深总体上减小了 7.06 mm,这两种方法均认为人类活动是导致径流深减小的主要驱动因子。

实际上,自 20 世纪 70 年代以来,国家在黄土高原地区开展了大面积、大规模的生态环境建设和水土流失综合治理措施,小理河流域采用了坡面造林、种草与修建淤地坝相结合的治理手段,其中淤地坝的减洪减沙作用比较明显,图 8 为小理河流域 1978—2010 年淤地坝的修建情况。可以看出,1998 年前后,淤地坝数量激增是导致径流减小的主要人类活动,当然,伴随着社会经济的发展,逐步开展的各项经济活动增加了过程用水,这亦是径流减小的原因所在,可见,要维护小理河流域水资源的可持续发展,需要充分合理规划各项工农业生产及水保工程建设。

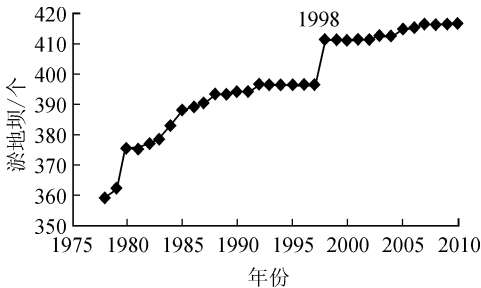


图 8 小理河流域淤地坝建设情况

Fig. 8 Warp land dams in Xiaolihe basin

目前,定量分析环境变化对径流变化的贡献时,气候因素一般仅考虑降水量,这就导致能量供给(由潜在蒸散发量表征)的作用被忽视。通过对小理河流域径流变化影响因素的研究,恰恰说明水分供应和能量供给都是气候变化过程中的重要环节,两者缺一不可。Budyko 方程兼顾了降水量和潜在蒸散发量的作用,将降水量、潜在蒸散发量、实际蒸发量之间的关系用简洁的方程式进行描述,其定量计算结果与累积量斜率变化率比较接近,从而佐证了 Budyko 方程在黄土高原地区的适用性及可靠性。

环境变化对径流变化的贡献是众多专家学者关注的热点,也是水文序列分析中的难点,Budyko 方程着眼于气象水文要素之间密切的相互关系,无疑于为水文过程对环境变化的响应和定量计算拓展了新的思路。本研究的定量分析方法基于两个假设:①如果没有人类活动的影响,当 E_p/P 改变时, E/P 也将改变,但仍然处于同一条 Budyko 曲线;②降水量和潜在蒸散发量的变化可能是自然气候变化造成的,但全球变暖、城市化、城市热岛效应、大规模灌溉等人类活动也能诱发降水量和潜在蒸散发量的变化,气候、人类活动和水文系统的关系是错综复杂的,因此,该理论中的人类活动应该是对径流变化产生影响的直接人类活动,不包含间接造成降水量和潜在蒸散发量变化的人类活动。

此外,Budyko 方程中参数 ϵ 的物理意义研究、Budyko 方程是否可以处理涉及更多变量的数据集、Budyko 方程对预测未来气候变化是否具有参考价值等仍需要更深入的探索。

4 结 论

本文利用小理河流域 1978—2010 年的降水量、潜在蒸散发量及径流深等资料,基于 Budyko 水热耦合平衡方程,考虑气候因素中水分供应和能量供给两方面对径流的影响,结合人类活动资料,分析计算了不同影响因素对小理河流域径流变化的贡献程度。

1) 分别使用有序聚类法和滑动 T 检验法对小理河流域径流深序列进行突变检验,两种方法的检验结果均表明,年径流深序列的突变发生于 1998 年。小理河流域人类活动的资料也证实了这一结论,1998 年该流域淤地坝修建数量陡然增加,剧烈的人类活动对小理河流域的下垫面环境造成了不可忽视的影响。

2) 以 1978—1997 年为基准期,率定 Budyko 方程的参数 ϵ 为 1.47。计算结果表明:1978—1997 年

多年平均径流深为 31.76mm,1998—2010 年多年平均径流深为 24.70mm,减小了 22.23%,其中人类活动的影响促使径流深减小了 13.70mm,气候因素的影响促使径流深增加了 6.64mm,因此,人类活动是导致径流深减小的主要驱动因子。

3) 利用累积量斜率变化率比较法定量分析了小理河流域气候变化和人类活动对径流深变化的影响,人类活动使径流深减小了 11.68mm,气候变化使径流深增加了 4.62mm,其中降水量使径流深增加了 4.97mm,潜在蒸散发量使径流深减小了 0.35mm。累积量斜率变化率比较法的计算结果证明了 Budyko 方程定量分析结果的可靠性以及 Budyko 方程在黄土高原地区的适用性。

参考文献:

- [1] 张鑫,蔡焕杰,尹晓楠. 基于 DFA 的无定河径流长期变化趋势及持续性研究[J]. 生态环境学报,2010,19(1):208-211.
ZHANG Xin, CAI Huanjie, YIN Xiaonan. Long-term trends and sustainability analysis of runoff in the Wuding River basin. [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(1):208-211.
- [2] 刘春蓁,刘志雨,谢正辉. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报,2004,15(4):385-393.
LIU Chunzhen, LIU Zhiyu, XIE Zhenghui. Study of trends in runoff for the Haihe river basin in recent 50 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004,15(4):385-393.
- [3] YAN R H, HUANG J C, WANG Y, et al. Modeling the combined impact of future climate and land use changes on streamflow of Xinjiang Basin, China [J]. Hydrology Research, 2016, 47(2):356-372.
- [4] 张建云,王国庆,贺瑞敏,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):153-158.
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 Science, 2009, 20(2):153-158.
- [5] SCANLOR B R, JOLLY I, SOPHODEOUS M, et al. Global impacts of conservations from natural to agricultural ecosystems on water resources: quantity versus quality [J]. Water Resources Research, 2007, 43(3): W03437.
- [6] CHANG J X, ZHANG H, WANG Y M, et al. Assessing the impact of climate variability and human activity to streamflow variation [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(4):1547-1560.
- [7] 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情势的影响分析[J]. 水力发电学报,2016,35(9):7-17.
MO Shuhong, WANG Xuefeng, GOU Kui, et al. Impacts of climate changes and human activities on annual runoff of Bahe River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(9):7-17
- [8] 李斌,李丽娟,覃驭楚,等. 基于 Budyko 假设评估洮儿河流域中上游气候变化的径流影响[J]. 资源科学,2011,33(1):70-76.
LI Bin, LI Lijuan, QIN Yuchu, et al. Impacts of climate variability on streamflow in the upper and middle reaches of the Taoer River based on the Budyko hypothesis[J]. Resources Science, 2011, 33(1):70-76.
- [9] 姚允龙,吕宪国,王蕾,等. 气候变化对挠力河径流量影响的定量分析[J]. 水科学进展,2010,21(6):765-770.
YAO Yunlong, LÜ Xianguo, WANG Lei, et al. A quantitative analysis of climate change impacts on runoff in Naoli River[J]. Advances in Water Science, 2010,21(6):765-770.
- [10] XU X Y, YANG D W, YANG H B, 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.
- [11] XU X L, LIU W, BRIDGET R S, et al. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework[J]. Geophysical Research Letters, 2013,40(23):6123-6129.
- [12] WANG D B, HEJAZI M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States [J]. Water Resources Research, 2011, 47(9):W00J12.
- [13] WANG D B, TANG Y. A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in Darwinian hydrologic models [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(13):4569-4577.
- [14] 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 Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(7):779-790.
- [15] 付金霞,郑粉莉,李媛媛. 小理河流域土地利用空间自相关格局与影响因素分析[J]. 农业机械学报,2017,48(1):128-138.
FU Jinxia, ZHENG Fenli, LI Yuanyuan. Analysis of land use spatial autocorrelation patterns and influence

factors of Xiaolihe watershed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):128-138.

[16] 郭生练,郭家力,侯雨坤,等. 基于 Budyko 假设预测长江流域未来径流量变化[J]. 水科学进展, 2015, 26(2):151-160.

GUO Shenglian, GUO Jiali, HOU Yukun, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(2):151-160.

[17] WANG D B, TANG Y. A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in darwinian hydrologic models[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(13):4569-4577.

[18] 陈远中,陆宝宏,张育德,等. 改进的有序聚类分析法提取时间序列转折点[J]. 水文, 2011, 31(1):41-44.

CHEN Yuanzhong, LU Baohong, ZHANG Yude, et al. Improvement of sequential cluster analysis method for extracting turning point of time series[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(1):41-44.

[19] 雷红富,谢平,陈广才,等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 36-40.

LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(4):36-40.

[20] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析[J]. 地理学报, 2012, 67(3):388-397.

WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3):388-397.

[21] 黄生志,黄强,王义民,等. 渭河径流年内分配变化特征及其影响因子贡献率分解[J/OL]. 地理科学进展, 2014, 33(8):1101-1108.

HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Change in runoff seasonal distribution and the decomposition of contribution rate of impacting factors in the Wei River[J/OL]. Progress in Geography, 2014, 33(8):1101-1108.

[22] 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 Aijun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, 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.

(责任编辑 周 蓓)