

基于 Budyko 假设的环境变化对流域径流影响的界定

刘艳丽^{1,2}, 王国庆^{1,2}, 金君良^{1,2}, 鲍振鑫^{1,2}, 刘翠善^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 受气候变化和人类活动的共同影响,流域环境的变化导致流域径流发生了很大的变化,对流域水资源管理提出了新的挑战。区分和界定气候变化与人类活动对流域径流的影响,对减缓和适应环境变化的有关措施和行动具有重要的科学支撑价值,也是流域水资源可持续管理中亟待解决的关键问题之一。目前基于水文模型的划分方法在年以上尺度的分析中存在均化效应和附加误差,且由于参数较多相对比较复杂,存在的不确定性因素较多。本研究基于 Budyko 假设理论建立一种区分气候变化和人类活动对流域径流影响的界定方法,并选取黄土高原三川河流域进行应用分析,通过与 VIC 模型分析结果比较研究表明,对于年以上尺度径流变化分析,该研究中建立的方法具有较好的适用性。由于气候变化和人类活动对流域径流的影响缺乏真值,该方法丰富了这一问题的研究理论,增进了对该区域环境变化影响的认识。

关键词: 气候变化; 人类活动; Budyko 假设; 径流; 界定; 三川河流域

中图分类号: P467; P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2014)06-0001-08

全球气候变化所导致的气温增高、海平面上升、极端天气和气候事件频发等,不仅影响自然生态系统和人类生存环境,而且也影响世界经济发展和社会进步。应对全球气候变化及其对水资源的影响,实现各国经济社会的可持续发展,是人类共同任务^[1]。水是大气环流和水文循环中的重要要素,是全球气候变化最直接和最重要的影响领域^[2]。气候变化改变了陆地水文循环过程,影响着水文水资源系统的结构与功能,将对人类的水资源开发利用带来重大挑战。人类活动引起水循环要素、过程、水文情势发生变化^[3]。由气候变化和人类活动共同作用下的变化环境对水文水资源的影响研究是全球变化的研究课题之一,也是人类社会和经济可持续发展必然要面临的科学挑战之一。

评价气候变化对水文循环与水资源系统影响最有效的工具之一是流域水文模型,水文模型亦是定量区分气候变化和人类活动对流域水文循环变化的主要途径之一。利用 SIMHYD 模型,王国庆等^[4]分析了在黄河中游的汾河流域气候变化和人类活动对河川径流变化的贡献率,认为气候因素和人类活动对径流的影响量分别占径流减少总量的 35.9% 和 64.1%,人类活动是汾河流域径流减少的主要因素。Wang Jia-hu 等^[5]利用 VIC 模型定量区分了黄河伊洛河流域的气候变化和人类活动对河川径流变化的贡献,结果表明气候变化对径流变化的贡献要大于人类活动,但是随着时间的推移,人类活动对径流变化的贡献率在逐渐增大。Jiang Shang-hu 等^[6]对比了多元回归分析方法、敏感性分析方法和水文模型重构 3 种方法定量分析气候变化和人类活动对河川径流变化的贡献,结果表明这 3 种方法具有一致的结果:在中国东北老哈河的分析结果显示,人类活动是 1980s 和 2000s 径流下降的主要原因,而气候变化引起了 1990s 的径流量呈现出上升趋势。

但是,基于水文模型的划分方法相对比较复杂,存在的不确定性因素较多。在年以上的尺度,已有的研

收稿日期: 2014-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB951103); 国家自然科学基金资助项目(51009094; 41330854; 41371063); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Y514007)

作者简介: 刘艳丽(1981-),女,河南泌阳人,工程师,博士,主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。

E-mail: ylliu@nhri.cn

究结果表明,给定流域的水文生态系统有其自身的规律,综合考虑了流域水热平衡的 Budyko 假设是能反映这种规律的简约形式^[7-10]。近年来在气候变化对径流的影响研究方面已有应用^[10-12],目前尚缺乏和常用水文模型效果的比较研究,因气候变化和人类活动对流域水循环的影响缺乏真值,开展多种方法的比较研究具有科学参考价值。

黄河是中国北方地区的主要水源。据资料分析,2000—2006 年与 1970—1999 年比较,黄河上中游地区降雨量减少 2.8%~9.8%,天然径流量减少 13.4%~24.7%,实测径流量的减幅达 19.0%~44.7%,水沙关系也发生很大调整,并由此给治河和水资源开发利用带来一系列新问题。黄土高原位于中国的干旱半干旱气候区,由于气候变化、人口膨胀、矿产资源的掠夺式开发等原因,该区域水资源供需矛盾突出,生态环境恶化严重。减缓和适应环境变化带来的不利影响是目前该区域水资源管理的关键之一,对气候变化和人类活动共同影响下的流域径流进行分析是该区域水资源管理的重要科学支撑。

本研究拟采用非参数 Mann-Kendall 检验识别径流变化的突变点,基于 Budyko 假设理论建立一种区分气候变化和人类活动对流域径流影响的界定方法,并选取黄土高原三川河流域进行应用分析,探讨气候变化与人类活动对径流影响的区分和界定,为该区域有效地减缓和适应环境变化提供支撑。

1 研究方法

1.1 Mann-Kendall 非参数检验方法

Mann-Kendall 法是由 H. B. Mann^[13]于 1945 年提出的非参数统计检验方法,当时主要用于检测序列的变化趋势,R. Syneyers^[14]在 Mann 的基础上作了进一步改进,使得该方法能大概识别变化趋势的起始位置。Mann-Kendall 法的计算前提是序列随机独立,概率分布等同。具体计算方法如下。

对于水文序列 x_i ,先确定所有对偶值($x_i, x_j; j > i, i = 1, 2, \dots, n-1; j = i+1, i+2, \dots, n$)中的 $x_i < x_j$ 的出现个数 p ,对于无趋势的序列, p 的数学期望值为: $E(p) = n(n-1)/4$ 。

构建 Mann-Kendall 秩次相关检验的统计量:

$$U = \frac{\tau}{[V_{ar}(\tau)]^{1/2}} \quad (1)$$

式中: $\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1$, $V_{ar}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$, n 为序列样本数。 n 增加时, U 很快收敛于标准化正态分布。

假定序列无变化趋势,当给定显著水平 α 后,可在正态分布表中查得临界值 $U_{\alpha/2}$,当 $|U| > U_{\alpha/2}$ 时,拒绝假设,即序列的趋势性显著。

Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数统计检验方法,与参数统计检验法相比,该方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,而且计算也比较简单,是目前比较常用的趋势诊断方法^[15-18]。

1.2 基于 Budyko 假设理论的环境变化对流域径流影响的界定方法

考虑到气候因子与水文循环存在密切的相互作用,而蒸发能够联系水量及能量平衡,Budyko 提出了一个形式简单的方程,其基础是认为流域为多年平均(实际)蒸散发由大气对陆面的水分供给(降水)和蒸发能力(净辐射量或潜在蒸散发量)之间的平衡所决定。它可简单地表达为:

$$E/P = f(E_p/P) = f(\Phi) \quad (2)$$

式中: E 和 P 分别是年平均蒸散发及降水; $\Phi = E_p/P$ 为干燥指数, E_p 为年平均潜在蒸散发。

M. I. Budyko^[19]假定在比较干燥的条件下存在以下关系:

$$Q/P \rightarrow 0, \quad E/P \rightarrow 1, \quad R_n/P \rightarrow \infty \quad (3)$$

在相对湿润条件下存在以下关系: $E \rightarrow R_n, \quad R_n/P \rightarrow 0$ (4)

式中: Q 为地表径流; R_n 为净辐射。

水量平衡的概念为研究流域的水文过程提供了一个框架,可为式(2)的解析提供条件,流域的水量平衡关系可用下式表示:

$$P = E + Q + \Delta D + \Delta S \quad (5)$$

式中: ΔD 为地下水蓄水; ΔS 为土壤蓄水量变化。对如5~10年的长期年径流分析,流域的 ΔD 和 ΔS 变化可忽略。

有两种方法解析方程(5),一是应用基于过程分析的模型,此类模型有大量变量如作物需水量、季节性降水量、土壤水力特性等;二是基于观测数据在满足条件(4)和(5)下涉及潜在蒸散发及作物需水量等物理变量的插分方法,如下式^[20]所示:

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + w \frac{E_p}{P}}{1 + w \frac{E_p}{P} + \left(\frac{E_p}{P}\right)^{-1}} \quad (6)$$

式中: w 为作物蓄水参数,表征作物在吸收土壤水用于蒸腾过程的参数,与不同的作物根系区深度相关。Zhang Lu^[20]的研究给出了森林和草地的参数建议值(草地 $w=2.0$,短草和庄稼地 $w=0.5$),而且在世界不同地区(多年平均降雨量35~2980 mm)、不同覆被类型(原始森林,开放的林地,雨林,桉树林,松树和针叶林,天然草地,人工草坪,庄稼地等)都有应用检验,具有一定的可靠性。

降水和潜在蒸散发的波动可导致流域水量平衡的变化。由气候变化引起的径流变化可由下式估算:

$$\Delta Q^C = \beta \Delta P + \gamma \Delta E_p \quad (7)$$

式中: ΔQ^C 为由气候变化引起的径流变化; ΔP 为降水量变化; ΔE_p 为潜在蒸散发变化; β 和 γ 分别为径流对降水变化和对潜在蒸散发变化的敏感性系数,

$$\beta = \frac{1 + 2(E_p/P) + 3w(E_p/P)}{(1 + E_p/P + w(E_p/P)^2)^2}, \quad \gamma = -\frac{1 + 2w(E_p/P)}{(1 + E_p/P + w(E_p/P)^2)^2}$$

从而人类活动对径流的贡献可通过总变化量减去人类活动影响量来得到:

$$\Delta Q^h = \Delta Q - \Delta Q^C \quad (8)$$

式中: ΔQ^C 为气候变化引起的径流变化, ΔQ^h 和 ΔQ 均有可能是正值或者负值。

$$\text{相似地,气候变化的贡献率为: } C = \frac{\Delta Q^C}{\Delta Q} \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{人类活动的贡献率为: } H = \frac{\Delta Q^h}{\Delta Q} \times 100\% \quad (10)$$

1.3 基于 VIC 模型的环境变化对流域径流影响的界定方法

可变下渗容量模型(VIC模型-Variable Infiltration Capacity)是由 Washington 大学、California 大学 Berkely 分校以及 Princeton 大学共同研制的一种基于 SVATS (Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes)的大尺度分布式水文模型^[21],它同时考虑了陆-气间水分收支和能量收支过程、次网格内地面植被类型不均匀性、土壤蓄水能力的空间分布不均匀性、基流退水的非线性和山区地形对降雨与气温的影响。自该模型建立以来在流域径流模拟、气候变化对水资源的影响、陆气耦合、流域土壤含水量的模拟等方面得到了广泛应用^[22-25]。

王国庆等^[4]提出了基于水文模型的气候变化与人类活动影响的划分方法,并给出了基于 SIMHYD 水文模型的应用研究。具体划分方法如下:人类活动时期的实测径流变量与划定的基准期值之间的差值包括两部分,即人类活动影响部分和气候变化影响部分,式(11)~(13)给出了二者对径流影响的分割分析方法。

$$\Delta W_T = W_{HR} - W_B \quad (11)$$

$$\Delta W_H = W_{HR} - W_{HN} \quad (12)$$

$$\Delta W_C = W_{HN} - W_B \quad (13)$$

式中: ΔW_T 为径流变化总量; ΔW_H 为人类活动影响量部分; ΔW_C 为气候变化影响量部分; W_B 为基准期径流量; W_{HR} 为人类活动影响时期的实测径流量; W_{HN} 为人类活动影响时期的天然径流量,该值由水文模型 SWAT

计算得到; η_H 和 η_C 分别为人类活动和气候变化对径流变化的贡献率, $\eta_H = \frac{\Delta W_H}{\Delta W_T} \times 100\%$, $\eta_C = \frac{\Delta W_C}{\Delta W_T} \times 100\%$ 。

本研究基于常用的 VIC 模型按上述划分方法建立变化环境对径流影响的界定方法,与基于 Budyko 假设理论的方法作对比研究。

2 研究区域概况

三川河是黄河中游左岸的一级支流,发源于山西省方山县东北赤尖岭,流经方山、离石、中阳、柳林四县,在柳林县石西乡上庄村入黄,全长 176.4 km,平均比降为 42.9‰,流域面积 4 161 km²。三川河流域水系呈树枝状,主要支流有北川、东川和南川。图 1 给出了三川河后大成站以上流域在黄河水系的位置。

后大成水文站是三川河流域的出口控制站,控制面积为 4 102 km²,建于 1955 年,具有较好的长序列观测水文资料,收集整理该流域内及邻近周边 30 个站点的降水资料,站点分布见图 2。

三川河流域属大陆性气候,夏季受季风和太阳辐射的影响,温度高、湿度大,冬季受冷高压控制,寒冷干燥。三川河流域地处黄土丘陵沟壑区和土石山区,上游土石山区为天然林覆盖,植被较好,土壤侵蚀轻微;中下游黄土丘陵沟壑区植被稀疏,同时,土质垂直节理发育,结构松散,因此水土流失比较严重。为防治土壤侵蚀,自 20 世纪 70 年代以来,三川河流域水利化程度显著提高,截至 1999 年,流域内共修建中小型水库 6 座,总库容达 3 470 万 m³,修建骨干工程 44 座,总控制面积 796 km²;淤地坝 1 950 座,谷坊 521 道,水窖 11 667 眼;修建梯田 37 137 ha,造林 75 891 ha,种草 1 810 ha,淤成坝地 4 544 ha。流域内的这些人类活动在一定程度上改变了下垫面条件,使流域的水文状况发生了一定的变化。

3 结果分析

对径流量的年代际变化统计结果见表 1。可见多年平均径流量呈明显的减少趋势,减少幅度较大,其中 20 世纪 60 年代和 70 年代径流量较大,1957—1979 年多年平均径流量为 2.85 亿 m³,高于多年平均值 35%;而 80 年代以来各年代径流量减少明显,1980—2010 年多年平均径流量为 1.55 亿 m³,低于多年平均值 26%,2000—2009 年多年平均径流量仅为 1.1 亿 m³,低于多年平均值 47%。采用线性回归法分析流域年径流量的变化趋势,年径流量变化过程见图 3。可见,流域年径流量呈减少趋势。

三川河流域 1957—2010 年径流量变化减少趋势显著,采用 Mann-Kendall 法对径流的突变性进行诊断(见图 4)。由图 4 可见,年径流变化的突变点在 1989 年。

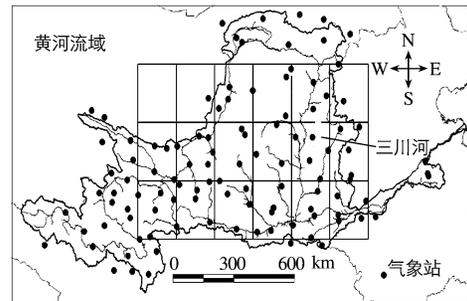


图 1 黄土高原水系及典型研究流域地理位置
Fig. 1 Drawing for drainage network of the Loess Plateau and typical catchment

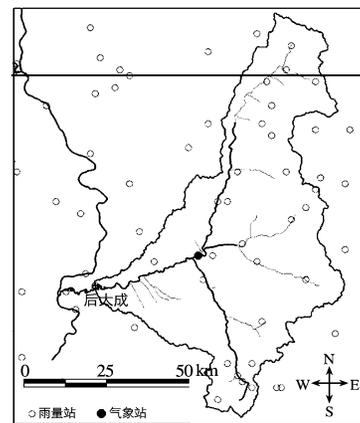


图 2 三川河流域雨量站分布
Fig. 2 Distribution of rain-gauge stations in Sanchuan River catchment

表 1 三川河流域年平均气温、降水、径流年代际变化统计

Tab. 1 Decadal variation statistics for average annual temperature, precipitation, runoff in Sanchuan River catchment

年 代	气温/ °C	气温距平/ °C	降水量/ mm	降水量距平/ %	径流量/ (亿 m ³)	径流量距平/ %
1960s	6.47	-0.45	547.3	12.9	3.12	48.3
1970s	6.31	-0.61	479.3	-1.2	2.47	17.6
1980s	6.54	-0.38	480.5	-0.9	1.91	-9.3
1990s	7.32	0.39	419.7	-13.5	1.65	-21.5
2000s	7.95	1.02	484.8	0.0	1.10	-47.7
1957—1979	6.42	-0.50	516.0	6.4	2.85	35.2
1980—2010	7.29	0.37	461.8	-4.8	1.55	-26.1
1957—2010	6.92		484.9		2.10	

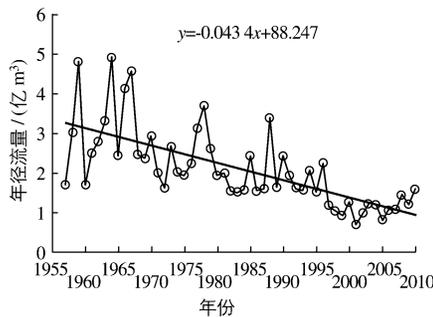


图 3 三川河流域年径流量变化

Fig. 3 Annual runoff change in Sanchuan River catchment

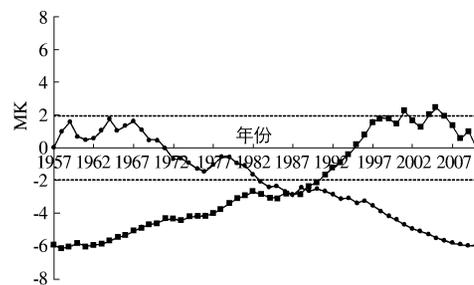


图 4 三川河流域年径流量突变点诊断(Mann-Kendall 法)

Fig. 4 Jump point detecting for annual runoff in Sanchuan River catchment by Mann-Kendall tests

应用本文建立的基于 Budyko 假设理论的界定方法对三川河流域的径流量变化进行分析见表 2, 表中亦给出了 VIC 模型的分析结果。通过比较可以看出, 应用本研究提出方法的分析结果与 VIC 模型分析结果大体相当, 其中 1970—1979 年、1990—1999 年的有一定差别。由于本文建立的基于 Budyko 假设的界定方法是根据蒸发与降水的比值来推算气候变化和人类活动影响的, 降水量的变化对其结果可能有较大影响, 从表 1 可知, 年降水量在 1970s 和 1990—1999 在 1957—2010 年整体下降的基础上有相对更大的下降趋势, 可能导致分析出的气候变化影响较大。而 VIC 模型的划分方法是通过模型率定之后进行天然流量和人工流量模拟的, 可能造成一定的均化影响, 这就使得基于 Budyko 假设的界定方法的分析结果要比 VIC 模型的分析结果偏气候因素一些(表 2)。且基于 VIC 模型分析划分方法是通过日尺度模拟来计算年径流变化的, 相对于直接在年径流尺度上计算分析的 Budyko 假设方法, 其在由日径流到年径流的演算中可能存在附加误差。

表 2 气候变化和人类活动对三川河流域径流量的影响(1)

Tab. 2 Climate change and human activity impacts on runoff in Sanchuan River catchment (1)

起止年份	实测值/ mm	总减少量/ mm	气候因素		人类因素	
			减少量/ mm	减少百分比/ %	减少量/ mm	减少百分比/ %
1957—1969	78.8	-	-	-	-	-
1970—1979	60.4	18.4	11.0/4.9	59.79/30.64	7.4/11.1	40.21/69.36
1980—1989	44.5	34.3	11.8/9.5	34.48/31.98	22.5/20.3	65.52/68.02
1990—1999	40.3	38.5	13.7/21.0	35.59/58.26	24.8/15.1	64.41/41.74
2000—2010	27.9	50.9	11.3/12.1	22.12/25.05	39.6/36.3	77.88/74.95
1970—2010	42.9	35.9	12.3/11.9	34.25/36.09	23.6/21.1	65.75/63.91

注: 表中“/”后数据为 VIC 模型分析结果。

由于气候变化和人类活动对径流影响的各自贡献并不存在真值,考虑到年径流变化的较长时间尺度过程,分析认为本文建立的基于 Budyko 假设的界定方法适用于年以上尺度的气候变化和人类活动的影响研究。

继而分析 1990 年径流突变点前后气候变化和人类活动的影响(见表 3),2000—2010 年人类因素的影响较 1990—1999 年有所提高,由于三川河流域 1999 年后水利工程、土地覆被等变化较大,该结论与流域的实际人类活动变化相符。

表 3 气候变化和人类活动对三川河流域径流量的影响(2)

Tab.3 Climate change and human activity impacts on runoff in Sanchuan River catchment (2)

起止年份	实测值/ mm	总减少量/ mm	气候因素		人类因素	
			减少量/ mm	减少百分比/ %	减少量/ mm	减少百分比/ %
1957—1989	62.8	-	-	-	-	-
1990—1999	40.3	22.5	9.8	43.56	12.7	56.44
2000—2010	26.8	36.0	4.5	12.50	31.5	87.50

4 结 语

气候变化和人类活动共同构成了影响流域径流变化的环境,而对气候变化的有效减缓和适应措施往往需要对气候变化和人类活动的影响加以区分并分别应对,因而研究气候变化和人类活动的各自影响对流域水资源可持续管理具有重要意义。目前广泛应用的是基于水文模型(如 VIC 模型)的方法,但由于缺乏真值,对气候变化和人类活动的影响界定仅通过一种方法很难判断,且水文模型的模拟方法可能在长期模拟的过程中对径流变化进行均化,在尺度转换中又有一定误差产生,在较长时间尺度径流分析时可能不具有优势。本研究基于 Budyko 假设的界定方法,通过流域水量平衡分析,以及流域蒸散发和降水相对变化情况析,比较适用于分析年以上尺度的流域径流变化。研究表明,三川河流域径流量变化中,人类活动影响整体呈上升趋势,应引起足够重视。

本研究建立的 Budyko 假设的界定方法,丰富了气候变化和人类活动区分和界定研究的理论。但由于 Budyko 假设理论的解析方式不同,其分析结果可能也不同,在进一步研究中,应探讨其不同解析结果的区别。

参 考 文 献:

- [1] 胡四一. 全球气候变化对水资源的影响及中国的应对战略——在喜马拉雅地区的气候变化、冰川和水资源议题分会上的讲话[EB/OL]. [2007-12-03]. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/ldxx/hsy/zyjh/200712/t20071206_25080.html. (HU Si-yi. Climate change impact on water resources and adaptation strategy in China-A speech on session of climate, glacier and water resources in Himalayan region[EB/OL]. [2007-12-03]. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/ldxx/hsy/zyjh/200712/t20071206_25080.html. (in Chinese))
- [2] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing. Research on hydrology and water resources impacted by climate change[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 黄锡荃. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. (HUANG Xi-quan. Hydrology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. (in Chinese))
- [4] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 851-858. (WANG Guo-qing, ZHANG Jian-yun, HE Rui-min. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 851-858. (in Chinese))
- [5] WANG J, HONG Y, GOURLEY J, et al. Quantitative assessment of climate change and human impacts on long-term hydrologic response: a case study in a sub-basin of the Yellow River, China[J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(14):

2130-2137.

- [6] JIANG S, REN L, YONG B, et al. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(16): 2492-2505.
- [7] BUDYKO M I. *Climate and life*[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [8] WANG D, 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, W00J12, doi: 10.1029/2010WR010283.
- [9] YANG Da-wen, SUN Fu-bao, LIU Zhi-yu, et al. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43: W04426, doi: 10.1029/2006WR005224.
- [10] 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 Li-juan, QIN Yu-chu, 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. (in Chinese))
- [11] ZHAO Guang-ju, MU Xing-min, TIAN Peng, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: a case study of the Wei River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27: 3852-3863. doi: 10.1002/hyp.9504.
- [12] WANG Wei-guang, SHAO Quan-xi, YANG Tao, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(8), 1158-1174. doi: 10.1002/hyp.9299.
- [13] MANN H B. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- [14] SYNEYERS R. On the statistical analysis of series of observations[Z]. Technical Note-World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1990: 192.
- [15] SVENSSON C, KUNDZEWICZ W Z, MAURER T. Trend detection in river series; 2. flood and low-flow index series[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 811-823.
- [16] KUNDZEWICZ Z, GRACZYK D, MAURER T, et al. Trend detection in river series; 1. annual maximum flow[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 797-810.
- [17] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3-4): 350-363.
- [18] YUE Sheng, WANG Chun-yuan. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series[J]. *Water Resources Management*, 2004, 18(3): 201-218.
- [19] BUDYKO M I. *The heat balance of the earth surface*[M]. Translated by STEPANOVA N A. Washington, D C: Dep of Commer, 1958: 259.
- [20] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708, doi: 10.1029/2000WR900325.
- [21] LIANG X, LETTENMAIER D P, WOOD E F. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(7): 14415-14428.
- [22] 宋星原, 余海燕, 张利平, 等. VIC陆面水文模型在白莲河流域径流模拟中的应用[J]. *水文*, 2007, 27(2): 40-44. (SONG Xing-yuan, YU Hai-yan, ZHANG Li-ping, et al. Application of VIC land surface hydrological model in flow simulation of Bailian River basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(2): 40-44. (in Chinese))
- [23] 谢正辉, 刘谦, 袁飞, 等. 基于全国50 km×50 km网格的大尺度陆面水文模型框架[J]. *水利学报*, 2004(5): 76-82. (XIE Zheng-hui, LIU Qian, YUAN Fei, et al. Macro-scale land hydrological model based on 50 km×50 km grids system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(5): 76-82. (in Chinese))
- [24] 吴志勇, 陆桂华, 张建云, 等. 基于VIC模型的逐日土壤含水量模拟[J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 359-364. (WU Zhi-yong, LU Gui-hua, ZHANG Jian-yun, et al. Simulation of daily soil moisture using VIC model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 359-364. (in Chinese))
- [25] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 黄河流域大尺度水文过程模拟研究[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(2): 5-8. (WANG Guo-qing, ZHANG Jian-yun, HE Rui-min, et al. A study of large-scale hydrological processes simulation of Yellow River basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(2): 5-8. (in Chinese))

An attribution method for catchment-scale runoff variation evaluation under environmental change based on Budyko hypothesis

LIU Yan-li^{1,2}, WANG Guo-qing^{1,2}, JIN Jun-liang^{1,2}, BAO Zhen-xin^{1,2}, LIU Cui-shan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Impacted by climate change and human activity, catchment-scale environment has changed and led to remarkable runoff variation, which poses a new challenge to water resources management. Attributing and defining the climate change and the human activity impacts on catchment runoff could scientifically support the measures and actions of environmental change mitigation and adaptation, which is also one of the urgent key problems in sustainable water resources management. In current studies, the hydrological model-based methods indicate averaging effect and additive error above annual scale, and are normally complicated with more uncertainties due to excessive parameters. Based on Budyko hypothesis, this study has presented an attribution method to assess catchment-scale runoff variation impacted by the climate change and the human activity. The Sanchuan River basin in Loess Plateau is selected as a case study. The analysis results show that the proposed method has a preferable applicability to runoff variation analysis for annual scale, compared with the application from VIC model. Because there are no true values of separated impacts from the climate change and the human activity, this method enriches the research theory for the issues, and facilitates the understanding of the impact of the regional environmental change.

Key words: climate change; human activity; Budyko hypothesis; runoff; attribution; Sanchuan River basin