

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.02.013

气候变化和人类活动对黄河源区径流影响的评估

周 帅¹, 王义民¹, 郭爱军¹, 李紫妍¹, 黎云云¹, 郭志辉²

(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. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了深入了解黄河源区径流变异规律, 需定量评估气候变化和人类活动对径流变化的影响。本文采用 Penman-Monteith 公式计算出流域各气象站的潜在蒸发量, 综合 Mann-Kendall 方法和累积距平方法诊断出降水和径流突变点位置, 并采用 5 种具有代表性的 Budyko 公式, 量化气候变化和人类活动对径流变化的影响。结果表明: ① 降水和径流的突变年份分别为 1985 年和 1989 年; ② 人类活动是导致径流量改变的主要因子, 占比为 67.62%; 气候变化因子次之, 占比为 32.38%。该成果可为水资源管理部门在制定流域水资源规划方案时提供参考。

关键词: 气候变化; 人类活动; Budyko 假设; 黄河源区

中图分类号: TV21 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2018)02-0205-06

Assessment on impacts of climate change and human activities on runoff in source region of the Yellow River

ZHOU Shuai¹, WANG Yimin¹, GUO Aijun¹, LI Ziyan¹, LI Yunyun¹, GUO Zhihui²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to better understand the changes of runoff in source region of the Yellow River, it is required to quantitatively evaluate the influence of climate change and human activities on runoff. The potential evapotranspiration of each meteorological station in the basin is calculated by using the Penman-Monteith formula, the Mann-Kendall method and the cumulative departure method for diagnosing the location of abrupt change of precipitation and runoff. Five representative Budyko formulas are used to quantify the impact of climate change and human activities on runoff. The results are as follows: ① The abrupt years of precipitation and runoff are 1985 and 1989, respectively; ② Human activity is the main factor leading to runoff change, accounting for about 67.62% of runoff change; followed by climate change, which accounts for about 32.38% of runoff change. The results can provide references for the water resources management department in formulating the water resources planning plan for the river basin.

Key words: climate change; human activity; Budyko hypothesis; the source region of the Yellow River

近年来, 变化环境下水文循环及水资源演变机理的研究逐渐成为热点^[1], 而气候变化和人类活动是导致环境改变的重要构成因子, 其带来的水文效应受到了广泛关注^[2-3]。目前, 径流对气候变化和人类活动响应的研究方法主要包括两类: 水文模拟法

和基于 Budyko 假设水量平衡法^[4]。水文模型虽然可对径流、泥沙、营养物等要素进行水文过程的模拟, 但模型的结构以及参数存在较大的不确定性, 使得水文模拟结果可信度降低。此外, 水文模型在率定过程中对输入数据要求较高, 且数据源精度不一,

收稿日期: 2017-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679187); 博士创新基金资助项目(310-252071605, 310-252071606); 河北省教育厅青年科学基金资助项目(QN2015253); 河北省青年科学基金资助项目(E2016402098)

作者简介: 周帅, 男, 硕士生, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: 674128185@qq.com

通讯作者: 王义民, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: wangyimin@xaut.edu.cn

往往导致模拟结果差异明显。然而,Budyko假设水量平衡法既包含了流域背景下的气候因子,又涵盖了反映流域下垫面特征的参数因子。鉴于此,Budyko假设方法是评估气候变化和人类活动对径流影响的一种理想方法^[5-6]。

近二十年来,国内外学者基于Budyko假设水量平衡法开展了大量的工作,并取得了良好的效果。Yang等^[7]采用Budyko假设方法评估了我国210个子流域的降水和蒸发对径流的影响,得出Budyko假设中的参数n呈现出东高西低、北高南低的区域特征;刘剑宇等^[8]以我国10大流域中的372个水文站点作为研究对象,采用Budyko假设方法评估气候变化和人类活动对径流的影响,结果表明,我国北方流域气象因子的弹性系数明显高于南方流域;郭生练等^[9]利用汉江、乌江流域径流观测资料,分析验证Budyko假设方法计算年径流变化的可靠性,得出降水量变化是影响径流变化的主要因素;刘艳丽^[10]等通过构建三川河流域Budyko假设模型与分布式水文模型(VIC),对比两种模型结果发现,人类活动对径流变化的影响逐渐增加。

黄河源区位于青藏高原的东北部,属于高寒半湿润气候区。随着流域沿线经济社会的快速发展,人类大量引用水资源,到20世纪80~90年代,人类引水量已占黄河全年径流量的51.7%~62.2%,导致流域年径流量逐渐减少^[11]。因此,全面而深入地探讨变化环境下水文循环及水资源演变机理,理解气候变化和人类活动对径流演变的影响具有重要意义。

故此,本文以黄河源区作为研究对象,采用Mann-Kendall方法和累积距平方法诊断出流域降水和径流序列的突变点位置,运用5种Budyko假设方法量化气候变化和人类活动对黄河源区径流变化的影响。

1 研究区域概况

黄河源区位于 $32^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E} \sim 104^{\circ}\text{E}$ 之间,流域地势起伏不平,整体呈现出西北高、东南低。海拔介于1 800~4 200 m之间,面积约为12.19万km²,占黄河流域总面积的16.2%。流域年平均产流量约为248.72亿m³,占黄河多年平均径流量的40%以上,是黄河流域的重要产流区。本文采用黄河源区12个气象站1960—2010年共51a降水和潜在蒸发资料,其中,潜在蒸发资料根据世界粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式计算得出,径流资料选取唐乃亥水文站同期实测流量值,并对所

有缺失数据进行插补延长,以此作为计算依据。黄河源区地理位置及气象站点空间分布如图1所示。

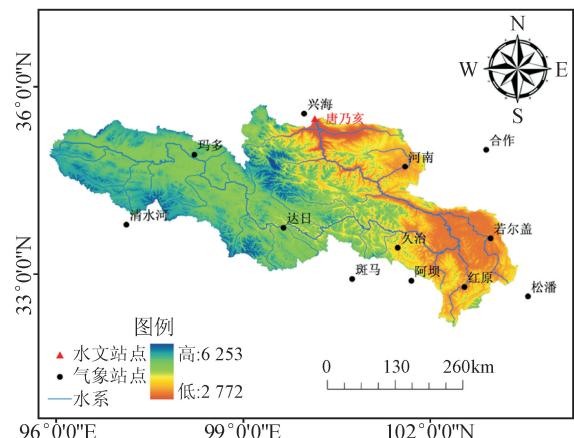


图1 研究区地理位置及气象站点空间分布图

Fig. 1 Geographical location and spatial distribution of meteorological stations in source region of Yellow River

2 研究方法

目前,针对气候变化和人类活动对径流影响的研究,不同学者采用的方法虽各不相同^[12-13],但大多通过划定基准期(无人类活动影响)和变化期(有人类活动影响),采用不同方法分析气候变化和人类活动对径流的影响。鉴于Budyko假设方法的优点,本文首先采用Mann-Kendall方法和累积距平方法分析降水和径流系列的趋势性和变异性;其次,依据径流突变年份划定基准期和变化期;最后,采用5种Budyko假设公式,定量计算出气候变化和人类活动对黄河源区径流变化的影响。针对Budyko假设中参数 ω 的取值,利用流域1960—2010年的降雨量、潜在蒸发量以及实际蒸发量等数据,采用Budyko假设公式反求得出。

2.1 Mann-Kendall方法

Mann-Kendall方法往往用于降水、径流以及蒸发等水文气象要素的突变检验^[14-15]。其优点在于所选取的样本既不必要服从特定分布,也免受少量异常值的影响,因此,非常适用于水文、气象等要素的非正态分布数据的突变检验。

设时间序列为 $\{x_k\}$ ($k=1, 2, 3, \dots, n$),构造新秩序列 $\{m_j\}$,表示为 $x_j > x_k$ ($1 \leq j \leq k$)的累积数,定义 d_k 为:

$$d_k = \sum_{j=1}^k m_j \quad (1 \leq k \leq n) \quad (1)$$

d_k 的均值和方差为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2)$$

$$Var(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (3)$$

假定时间序列具有随机性且相互独立, 定义 UF_k 统计量为:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{Var(d_k)}} \quad (4)$$

式中, UF_k 为标准正态分布, 给定显著性水平 α , 当 $|UF_k| > U_\alpha$ 时, 表明时间序列趋势变化显著, 所有统计量 UF_k 值构成一条 UF 曲线, 将此方法引入到逆序列中, 得到另一条 UB 曲线。将曲线 UF 、 UB 点绘在同一坐标系下, 若 $UF > 0$, 则意味着该序列呈上升趋势, 反之呈现下降趋势。当它们超过临界直线时, 可认为其具有显著的上升或下降趋势。若 UF 和 UB 曲线出现交点, 则交点即为突变点。

2.2 潜在蒸发量

计算流域各气象站点的潜在蒸发量最常用的模型有 Penman、Thornthwaite 以及 Penman-Monteith 等, 鉴于 Penman-Monteith 模型的优点^[16], 本文采用该模型计算流域的潜在蒸发量, 其公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

式中, ET_0 为潜在蒸发量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; Δ 为饱和水汽压与温度的斜率, $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; G 为土壤热通量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; R_n 为作物表面净辐射量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; T 为平均温度, $^\circ\text{C}$; γ 为湿度计常数, $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; U_2

表 1 基于 Budyko 假设的流域实际蒸发量计算公式

Tab. 1 Calculated formula for the actual evaporation of the basin based on the Budyko hypothesis

公式名称	公式	参数
傅抱璞	$E = P + E_0 - (P^\omega + E_0^\omega)^{1/\omega}$	ω
张橹	$E = (1 + \omega X) / (1 + \omega X + X - 1)$	ω
Mezentsev	$E = E_0 P / (P^\omega + E_0^\omega)^{1/\omega} \quad \tilde{\omega} = \omega + 0.72$	$\omega/\tilde{\omega}$
Turc-Pike(1954)	$E = (1 + X^{-2})^{-0.5}$	无
Budyko(1948)	$E/P = \{E_0/P \tanh(P/E_0) [1 - \exp(-E_0/P)]\}^{0.5}$	无

注: 表中 ω 为无量纲积分常数, 反映了区域之间的差异, 且 $\omega \in (1, \infty)$ 。

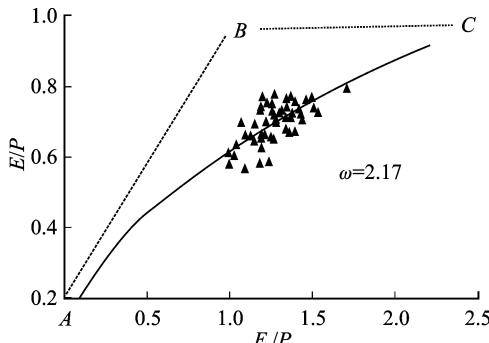


图 2 Budyko 曲线示意图
Fig. 2 Schematic diagram of Budyko curve

为地面以上 2 m 处的风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; e_s 为空气饱和水汽压, kPa ; e_a 为空气实际水汽压, kPa 。

2.3 Budyko 假设

气候因子与水文过程关系密切。1974 年著名气象学家 Budyko 在对全球水量和能量平衡分析时发现, 多年平均蒸发量依赖于降水量和蒸发能力的平衡^[17], 并指出陆面蒸发必须满足两个边界条件: ①极端湿润条件下, 潜在蒸发量全部转化为潜热(当 E_0/P 趋于 0 时, E/E_0 趋于 1, 即图 2 中直线 AB); ②极端干旱条件下, 降水全部转化为蒸发(当 E_0/P 趋于无穷时, E/P 趋于 1, 即图 2 中直线 BC)。并提出满足边界条件的一般方程为:

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E_0}{P}\right) = f(X) \quad (6)$$

式中, E 、 P 、 E_0 和 X 分别代表年实际蒸发量、降水量、潜在蒸发量和干燥指数。

Budyko 假设平衡方程可表示为:

$$\frac{E}{P} = \left\{ \frac{E_0}{P} \tanh\left(\frac{P}{E_0}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{E_0}{P}\right) \right] \right\}^{0.5} \quad (7)$$

通常把与式(7)形式类似的公式统称为 Budyko 假设, 本文采用的 5 种 Budyko 系列假设如表 1 所示。

图 2 为 Budyko 假设示意图, 由图可知, 黄河源区符合 Budyko 假设曲线, 其中, 参数 $\omega=2.17$, 这与孙福宝^[18]的研究结果相一致。

2.4 气候变化与人类活动对径流影响的估算

给定一个闭合的流域, 多年水量平衡方程可表示为:

$$P = E + Q + \Delta S \quad (8)$$

式中, P 代表年降水量; E 代表年实际蒸发量; Q 代表流域年径流量; ΔS 代表流域蓄水量变化量, 多年平均尺度上可忽略。

降水和蒸发的改变导致流域水量平衡随之变化, 降水和蒸发变化导致的径流改变可归因于气候变化, 气候变化对径流的影响可表示为:

$$\Delta Q_c = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial Q}{\partial E_0} \Delta E_0 \quad (9)$$

式中, ΔP 、 ΔE_0 、 $\partial Q/\partial P$ 、 $\partial Q/\partial E_0$ 和 ΔQ_c 分别代表流域降水改变量、蒸发改变量、径流对降水的敏感性系数、径流对蒸发的敏感性系数以及气候变化导致的径流改变量。

人类活动对径流的影响可表示为:

$$\Delta Q_H = \Delta Q - \Delta Q_c \quad (10)$$

式中, ΔQ_H 、 ΔQ_c 和 ΔQ 分别为人类活动导致的径流改变量、气候变化导致的径流改变量以及实际径流改变量。相应的, 气候变化对径流改变量的贡献率为: $\eta_c = \Delta Q_c / \Delta Q \times 100\%$; 同理, 人类活动对径流改变量的贡献率为: $\eta_H = \Delta Q_H / \Delta Q \times 100\%$ 。

3 结果与分析

3.1 降水和径流的趋势性和变异性分析

图3为降水和径流序列趋势图。由图可知, 多年平均降水量和径流量分别为545.82 mm和202.32亿m³, 且均呈现出减少趋势。其中, 1985—2010年降水量的减少量占年平均降水量的1.37%左右; 1989—2010年径流量显著减少, 较多年平均径流量减少了9.45%。

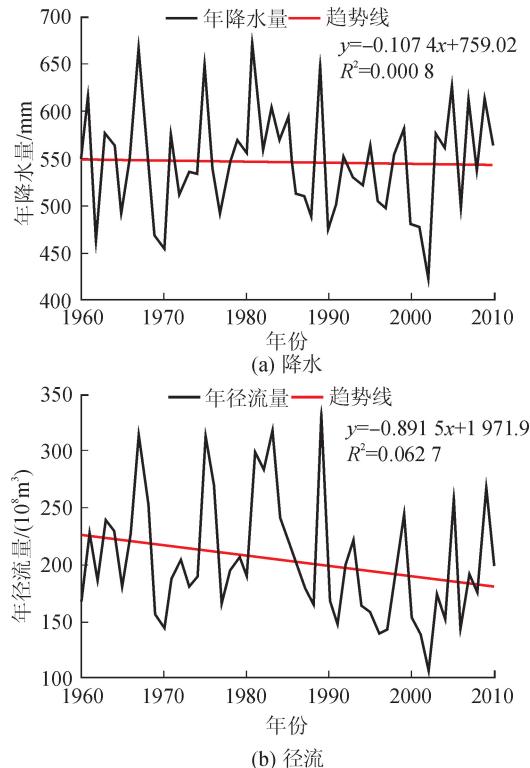


图3 降水和径流序列的趋势

Fig. 3 Trends in precipitation and runoff sequence

本文首先采用Mann-Kendall方法对流域降水和径流序列进行突变点检验, 为了进一步确定突变点位置, 辅助使用累积距平法对两个序列进行进一

步检验。图4为降水和径流序列Mann-Kendall方法和累积距平法突变检验结果。

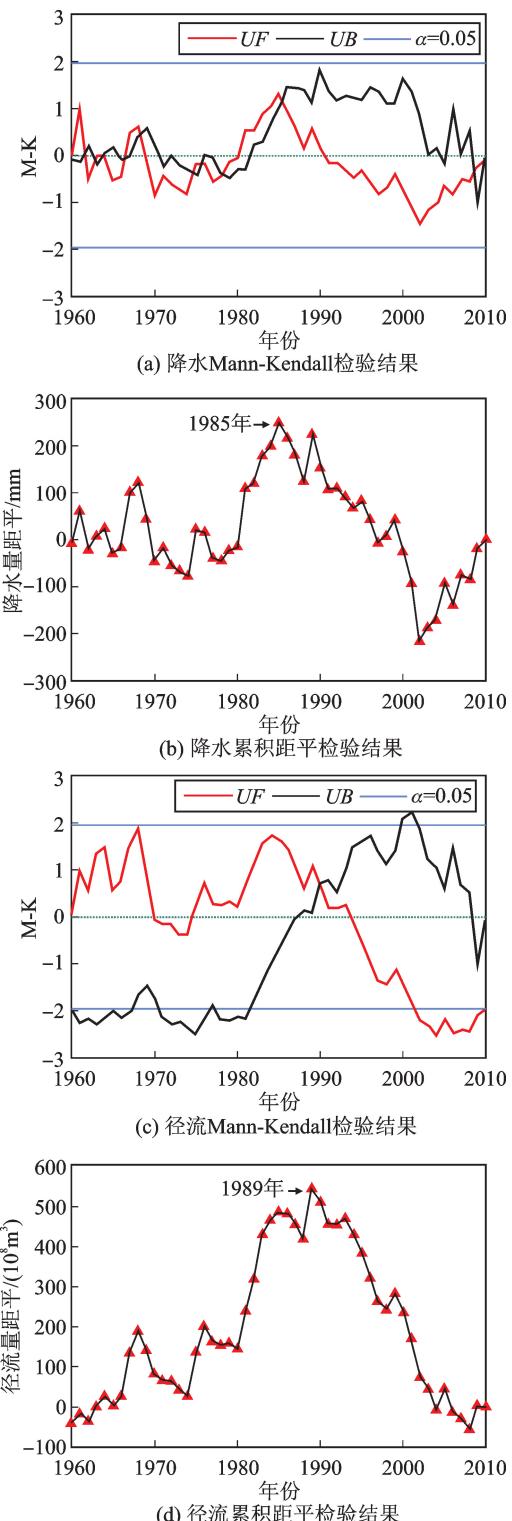


图4 降水与径流序列突变点检验结果

Fig. 4 Test results of abrupt point of precipitation and runoff sequence

由图4(a)和(b)可知, Mann-Kendall方法检验的降水突变年份分别为1963年、1965年、1968年、1976年、1978年、1985年以及2008年, 采用累积距

平方法诊断的降水突变点位置为1985年,综合降水诊断结果可知,降水突变年份为1985年。同理,由图4(c)和(d)诊断出年径流突变点位置为1989年,这也与王丽娜^[19]的结论相一致。

3.2 基于Budyko假设的气候变化和人类活动对径流的影响

依据径流突变点位置(1989年),把径流序列划分为基准期(1960—1989年)和变化期(1990—2010年)。其中,基准期多年平均降水量、蒸发量、实测径流量和干燥指数分别为551.19 mm、678.57 mm、220.54亿m³和1.23。采用5种Budyko公式定量评估气候变化与人类活动对径流的影响,计算结果与康玲玲^[20]的结果高度一致。

表2为变化期气候变化和人类活动对径流的影响结果。由表可知,变化期较基准期干燥指数增加了0.80,意味着变化期流域干旱程度增加,水资源

供给矛盾愈加突出。与此同时,气候变化和人类活动导致的径流改变量为44.24亿m³(ΔQ_c 与 ΔQ_h 之和),占多年平均径流量的21.86%左右。

傅抱璞、张橹以及Mezentsev等5种公式的计算结果表明,人类活动对径流的影响占比分别为66.67%、70.07%、71.39%、70.96%和59.02%,而气候变化对径流的影响占比分别为33.33%、29.93%、28.61%、29.04%和40.08%。考虑到模型结构的不同和参数 $\omega/\bar{\omega}$ 的有无,5种公式的计算结果高度一致。

综合5种公式定量评估气候变化和人类活动对径流影响的结果,可将变化期人类活动对径流影响的原因归纳为:①改革开放以来,经济社会快速发展,人类活动的增强导致引水量增加;②为了防止水土流失,水土保持工作迅速开展,植被覆盖度增加,径流系数减小。

表2 变化期气候变化和人类活动对径流的影响

Tab. 2 Impact of climate change and human activities on runoff in the changing period

公式名称	$Q/10^8 \text{ m}^3$	E_0/mm	P/mm	$X=E_0/P$	ω	$\Delta Q/10^8 \text{ m}^3$	$\Delta Q_h/10^8 \text{ m}^3$	$\eta_h/\%$	$\Delta Q_c/10^8 \text{ m}^3$	$\eta_c/\%$
傅抱璞	176.31	699.84	536.07	1.31	2.17	-12.31	-29.49	66.67	-14.74	33.33
张橹	176.31	699.84	536.07	1.31	2.17	-6.99	-35.87	70.07	-8.37	29.93
Mezentsev	176.31	699.84	536.07	1.31	2.89	-9.70	-32.63	71.39	-11.61	28.61
Turc-Pike	176.31	699.84	536.07	1.31	无	-12.80	-28.92	70.96	-15.32	29.04
Budyko	176.31	699.84	536.07	1.31	无	-15.15	-26.11	59.02	-18.13	40.09

4 结 论

本文以黄河源区为研究对象,首先,对降水和径流序列进行趋势性分析,找出降水和径流的变化规律。其次,采用Mann-Kendall方法和累积距平方法诊断出降水和径流序列突变点位置,并依据径流序列突变年份划分基准期和变化期。然后,运用5种Budyko公式量化气候变化和人类活动对径流的影响。最后,对引起径流变化的因子进行归因。主要结论为:

1)通过对降水和径流序列的趋势性和变异性分析得出,降水和径流均呈减少趋势,其中,径流减少趋势显著,而降水减少趋势不明显;降水和径流突变年份分别为1985年和1989年,变化期较基准期径流改变量为44.24亿m³,占多年平均径流量的21.86%左右。

2)采用5种衍生的具有代表性的Budyko公式,定量评估黄河源区气候变化和人类活动对径流的影响得出,5种公式计算结果基本保持一致,其中,人类活动是导致径流量改变的主导因素,气候变化影响较小。

参考文献:

- [1] 贾仰文,王浩,彭辉.水文学及水资源学科发展动态[J].中国水利水电科学研究院学报,2009,7(2):241-248.
JIA Yangwen, WANG Hao, PENG Hui. A review on international development trend in the field of hydrology and water resources [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, 7 (2): 241-248.
- [2] 杨飞.气候变化和人类活动对水资源的影响研究——以北洛河流域为例[D].西安:长安大学,2011.
YANG Fei. Study on the impact of climatic change and human activities on water resources—based on the Northern Luo River basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [3] 陈超,庞艳梅,潘学标,等.气候变化背景下四川省气候资源变化趋势分析[J].资源科学,2011,33(7):1310-1316.
CHEN Chao, PANG Yanmei, PAN Xuebiao, et al. Characteristics of climate resources under global climate change in Sichuan province [J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1310-1316.
- [4] 张连鹏,刘登峰,张鸿雪,等.气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J].水力发电学报,2016,35(7):

- 55-66.
- ZHANG Lianpeng, LIU Dengfeng, ZHANG Hongxue, et al. Impact of climate change and human activities on runoff variation in Beiluo River basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(7): 55-66.
- [5] 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.
- [6] 卞玉敏, 吕海深, 谈娟娟, 等. 基于Budyko假设的流域水量平衡研究 [J]. 人民长江, 2014, 45(3): 24-28.
- BIAN Yumin, LÜ Haishen, TAN Juanjuan, et al. Study on watershed water balance based on Budyko hypothesis [J]. Yangtze River, 2014, 45(3): 24-28.
- [7] YANG H, QI J, XU X, et al. The regional variation in climate elasticity and climate contribution to runoff across China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 517(1): 607-616.
- [8] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究 [J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1875-1885.
- LIU Jianyu, ZHANG Qiang, CHEN Xi, et al. Quantitative evaluations of human-and climate-induced impacts on hydrological processes of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 1875-1885.
- [9] 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.
- [10] 刘艳丽, 王国庆, 金君良, 等. 基于Budyko假设的环境变化对流域径流影响的界定 [J]. 水利水运工程学报, 2014, (6): 1-8.
- LIU Yanli, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. An attribution method for catchment-scale runoff variation evaluation under environmental change based on Budyko hypothesis [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014, (6): 1-8.
- [11] 白夏, 王义民, 戚晓明, 等. 黄河上游径流统计特征及演变规律分析 [J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 4-7.
- BAI Xia, WANG Yimin, QI Xiaoming, et al. Analysis of statistical characteristics and evolution law of runoff in the upper Yellow River [J]. Yellow River, 2016, 38(9): 4-7.
- [12] 于东平. 气候变化对青海省东部地区农业的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- YU Dongping. The effect of climate changes on agriculture in the eastern region of Qinghai province [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.
- [13] 朱良燕, 毛军军, 苗强, 等. 合肥市降水变化趋势分形特征分析与预测 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(9): 17-20.
- ZHU Liangyan, MAO Junjun, MIAO Qiang, et al. Analysis of precipitation changes trend fractal features and forecasts in Hefei [J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(9): 17-20.
- [14] 林凯荣, 何艳虎, 雷旭, 等. 深圳市1960—2009年降雨时空变化分析 [J]. 中国农村水利水电, 2013, (3): 18-23.
- LIN Kairong, HE Yanhu, LEI Xu, et al. An analysis of the temporal and spatial variation of the precipitation between 1960 and 2009 in Shenzhen City [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (3): 18-23.
- [15] 黄翠秋, 郭纯青, 代俊峰, 等. 南流江流域降水序列变化的特征分析 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 6-8.
- HUANG Cuiqiu, GUO Chunqing, DAI Junfeng, et al. Characteristics analysis of rainfall variation in Nanliujiang basin [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 6-8.
- [16] 郝振纯, 杨荣榕, 陈新美, 等. 1960—2011年长江流域潜在蒸发量的时空变化特征 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 408-419.
- HAO Zhenchun, YANG Rongrong, CHEN Xinmei, et al. Tempo-spatial patterns of the potential evaporation in the Yangtze River catchment for the period 1960—2011 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 408-419.
- [17] Budyko M I. Climate and life [M]. San Diego, CA: Academic Press, 1974.
- [18] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于Budyko假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究 [J]. 水力学报, 2007, 38(4): 409-416.
- SUN Fubao, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River basin based on Budyko hypothesis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 409-416.
- [19] 王丽娜. 气候变化对黄河上游流域径流影响分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(1): 182-192.
- WANG Lina. Impact analysis of climate change on the upper reaches of Yellow River runoff [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(1): 182-192.
- [20] 康玲玲, 余辉, 王金花, 等. 气候变化对黄河唐乃亥以上地区径流量的影响 [J]. 水力发电, 2005, 31(7): 22-24.
- KANG Lingling, YU Hui, WANG Jinhua, et al. Effect of climate variation on natural runoff in Tangnaihai and its upstream of the Yellow River [J]. Water Power, 2005, 31(7): 22-24.

(责任编辑 周 蓓)