

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.008

基于概率性 Budyko 方程的我国可利用 水资源量脆弱性评估

赵昀皓^{1,2}, 邢万秋^{1,2}, 傅健宇^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:利用概率性 Budyko 方程定量评估我国可利用水资源量空间分布情状及其相应的不确定性, 识别我国可利用水资源量高脆弱性地区。结果表明, 降水是影响可利用水资源量脆弱性的主导因素, 并且较为干旱的区域具有较低不确定性; 我国东北地区、西北地区、华北地区以及华东地区北部这一带状地区的可利用水资源量最易受到降水变化的影响, 并且在降水减少量不同(分别减少 5%、10%、15%)的情况下这种现象依然明显, 可见这些地区对降水变化呈现高度的脆弱性。

关键词:概率性 Budyko 方程; 蒸散发; 可利用水资源量; 水资源脆弱性

中图分类号:TV11; P343 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)02-0047-06

Evaluation of vulnerability of water availability in China based on probabilistic Budyko equation // ZHAO Yunhao^{1,2}, XING Wanqiu^{1,2}, FU Jianyu^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The probabilistic Budyko equation is used to quantitatively evaluate the spatial distribution of water availability in China and its corresponding uncertainty, and identify the regions with high vulnerability of water availability in China. The results show that precipitation is the dominant factor for the vulnerability of water availability, and the uncertainty is smaller in arid regions. The water availability in Northeast China, Northwest China, North China and East China are most susceptible to precipitation variability, and this phenomenon is still evident under different precipitation decreases (5%, 10% and 15%, respectively), the regions are highly vulnerable to precipitation change.

Key words: probabilistic Budyko equation; evapotranspiration; water availability; water resources vulnerability

水是最基本的自然资源和战略性的经济资源。伴随着环境的变化, 水资源可利用量的变化对水文气候条件^[1]、生态系统功能和社会经济活动^[2-3]都有着重大的影响。在这种背景下, 评估陆面可利用水资源量至关重要。由于 Budyko 水热耦合平衡方程(以下简称 Budyko 方程)^[4-6]物理机制简单、输入资料少, 能充分反映陆面长期平均蒸散发、大气对陆面的水分供给(降水量)及潜在蒸散发之间的平衡关系, 因此被广泛应用于大时间尺度上评估和预测可利用水资源量^[7-11]。

Budyko 方程最初用于大时空尺度的研究时, 没有考虑下垫面条件对曲线形态的影响, 其经验曲线形状单一, 表示了多年平均蒸发率(实际蒸散发 A_E 与降水量 P 之比)和干旱指数(潜在蒸散发 P_E 与降水量 P 之比)的关系不包含任何参数。随后, 为了刻画不同下垫面特征的流域 Budyko 曲线形状, 含参数的 Budyko 方程逐渐得到发展^[12-15]。然而, 该参数与各个流域要素间的关系十分复杂, 不同流域及气候条件下的参数仍无法明确表示^[16]。对此, Greve 等^[10]将 Budyko 方程的参数拓展成了一个集合, 延

基金项目: 国家自然科学基金(51809073)

作者简介: 赵昀皓(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: 251726772@qq.com

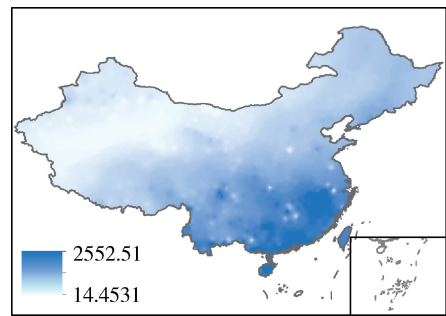
通信作者: 邢万秋, 女, 副研究员。E-mail: xingwanqiu@gmail.com

伸出了一种可利用水资源量的概率性估计方法, 这些方法可用于评估流域特征和气候条件对模型可预测性的影响。基于概率性 Budyko 方程, Singh 等^[11]提出了自下而上的方法来评估气候变化下印度可利用水资源量的脆弱性。概率性 Budyko 方程可以有效地利用观测数据来推导 Budyko 曲线的分布, 并从理论上评估不同下垫面条件和流域特征影响下水资源可利用量预测的不确定性。采用自下而上的方法与概率性 Budyko 方程相结合, 可以在未来气候存在巨大不确定性的情况下有效预估水资源可利用量的分布情况, 从而为政府管理水资源提供更广泛的思路, 而我国尚缺乏该类研究。本研究在概率性 Budyko 方程的概率性空间内, 采用自下而上的方法预测未来的可用水资源量在我国的分布情况, 并分析其相应的不确定性, 同时对可利用水资源量脆弱性较高的地区进行识别与分析。

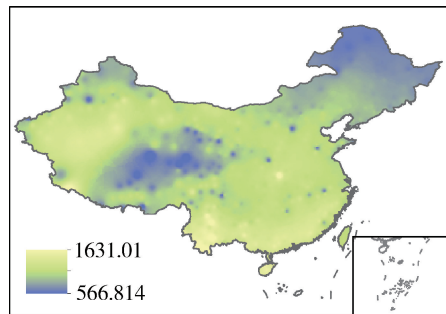
1 研究区域概况及资料

我国幅员辽阔, 地理环境和自然环境复杂多样, 下垫面包括高原、山地、丘陵、盆地和平原 5 种基本地形, 且地形起伏较大, 在同一纬度, 降水、气温等也存在较大差异, 气候类型多样, 水文条件差异较大。本次研究使用了中国气象局国家气象中心 (<http://cdc.cma.gov.cn/>) 提供的全国 602 个气象站点 1983—2004 年的逐日降水、蒸散发量、最高气温与最低气温数据, 采用基于温度的 Hargreaves 方程来估算潜在蒸散发^[17]。同时, 使用 ArcGIS 的差值及分区统计工具把历史上可用的数据集分配到中国 1 350 个市级单元, 并删除违反大气水供应和需求物理约束的地区, 最后得到了 470 个符合要求的地区 (图 1(d))。图 1 显示了 1983—2004 年多年平均降水、潜在蒸散发量、实际蒸散发量的空间分布情况, 以及筛选过后按市级单元分区的干旱指数的分布情况。由图 1 可见我国多年平均降水空间分布不均, 大体上呈现由东南沿海向西北内陆递减的趋势 (图 1(a))。潜在蒸散发量南部与西北部地区整体上偏高, 部分地区高于 1 500 mm/a (图 1(b))。实际蒸散量的分布与降水类似, 在除了新疆西北的部分地区外, 其余区域呈现出由西北向东南递增的趋势 (图 1(c))。中国西北部地区和青藏高原地区的水资源补给主要来自高山冰雪融水, 近些年该地区处于升温状态, 冰川融水补给了大量水源, 引起的实际蒸散发量可能会高于实测降水量, 说明水资源从空中流失^[18-19]。因此, 该地区的大部分不满足大气水供需条件, 不作为本文的研究区域。

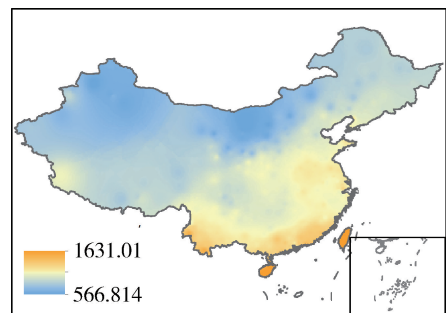
0 1 200 2 400 km



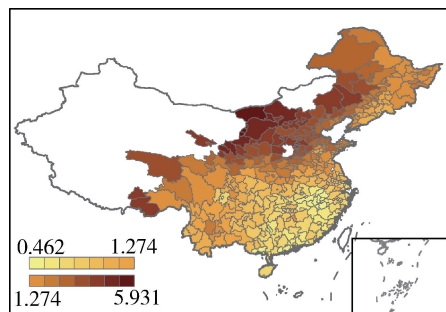
(a) 降水量 (单位: mm)



(b) 潜在蒸散发量 (单位: mm)



(c) 实际蒸散发量 (单位: mm)



(d) 干旱指数

图 1 中国多年平均气象指标空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of multi-year average meteorological data in China

2 研究方法

2.1 概率性 Budyko 方程

Budyko 方程解释了流域内蒸散发同时受到水量 (降水) 和能量 (太阳辐射, 通常以潜在蒸散发来代替) 的限制, 并对陆面蒸散发给出了如下边界条件:

在极干燥的条件下,没有多余的水分,全部的降水都会用于蒸散发^[20-22];当 $P_E/P \rightarrow \infty$ 时, $A_E/P \rightarrow 1$ 。

在极湿润的条件下,可以用于蒸散发的能量都将变为潜热;当 $P_E/P \rightarrow 0$ 时, $A_E/P_E \rightarrow 1$ 。

在此边界条件下,提出了水热耦合平衡方程一般的形式:

$$A_E/P = f(P_E/P) = f(\varphi) \quad (1)$$

式中: P 为降水量; A_E 为实际蒸散发量; P_E 为潜在蒸散发量; φ 为辐射干燥度(干旱指数), $\varphi = P_E/P$ 。

前期 Budyko 方程推导的原始曲线是完全确定的,但研究发现这并不能很好地解释下垫面等因素对曲线偏离的影响。为了刻画不同下垫面特征的流域 Budyko 曲线形状,单参数的 Budyko 方程逐渐得以发展,其中我国学者傅抱璞^[23-24]通过量纲分析以及数学推导提出的解析表达式使用最为广泛:

$$A_E/P = 1 + P_E/P - [1 + (P_E/P)^\omega]^{1/\omega} \quad (2)$$

参数 ω 通常解释为除了平均气候条件外的所有流域和气候的综合性质,包括植被、地形、土壤性质等^[21]。传统 Budyko 理论下, Budyko 空间范围内的每个点可以被分配到一个特定的 ω ,这种对应关系不能反映 Budyko 空间的非线性关系。而在概率性 Budyko 理论中,假设 ω 遵循某一初始未知的分布,通过建立参数 ω 的概率分布,构造出概率性 Budyko 方程。通过建立此分布进而对给定的潜在蒸散发率进行实际蒸散发率的一个概率性分布计算,以此来解释 Budyko 空间的非线性结构^[9]。Budyko 空间的分布是以干旱指数为条件的,实际蒸散发率取决于对其分布的选择。在此基础上,可以对不同下垫面条件但相同气候条件下水资源可利用量进行定量评估,并给出评估的不确定性。

2.2 水资源可利用量的预估

本文通过利用单位控制体积中的水量平衡对水资源的可利用量进行简化和预估,控制体积中的水量平衡可以表示为

$$dS_t/dt = P_t + \Delta G_{W_t} + \Delta Q_t - A_{E_t} \quad (3)$$

式中: S_t 为水储量; ΔG_{W_t} 为来自控制体的地下水的净流入; ΔQ_t 为在时间 t 内地表水的净流入; P_t 为时间 t 内的降水量, A_{E_t} 为时间 t 内的实际蒸散发量。水资源的可利用量由下式给出:

$$W_{A_t} = -\Delta G_{W_t} - \Delta Q_t \quad (4)$$

式中: W_{A_t} 为时间 t 内的可利用水资源量,可以表示为给定控制体的表面和地下水的净出流量。对于足够长的时间尺度,流域的水储量的净变化可以假设为0,可利用水资源量可以简化表示为

$$W_{A_t} = P_t - A_{E_t} \quad (5)$$

2.3 自下而上的方法评估水资源脆弱性

当未来气候变化未知且不确定性很大的情况下,用传统方法强制水文模型使用现有的气候变化预测,以获得未来水的可用性变化基本上是不可行的^[11]。逆向思考,对未来可能存在的气候条件(潜在蒸散发量、降水量)进行组合,可以利用公式(4)估计出不同气候条件下的蒸散比,从而得到多组相应的估计蒸散发量、蒸发能力以及降水量,再利用公式(5)进一步计算出多组对应天气下不同的水资源可利用量^[25]。

气候变化导致的水资源脆弱性是根据水资源可利用量的相对变化估计的,脆弱性指数可以由此计算:

$$I_V = \frac{\Delta W_A}{W_A} \times 100\% \quad (6)$$

式中: I_V 为脆弱性指数; W_A 为公式(5)中定义的时间 t 内的水资源可利用量; ΔW_A 为对应时段内水资源可利用量的变化量。

3 结果与分析

3.1 概率性 Budyko 方程的验证

假设每个被用于校准式(2)的小区间是独立的,把我国地区筛选过后的市级单元对应的降水量、实际蒸散发量、潜在蒸散发量代入公式,以估计每个小单元最佳的 ω 。在校准最小区域级别的 ω 后,再组合到较大的单元(按我国的行政区划划分为东北、华北、华东、华中、华南、西南、西北地区7个区间),以获得 ω 在我国不同区域的概率性分布。本文在7个区间内不假设 Budyko 曲线参数 ω 的函数形式,而是直接使用其经验分布,这样不会丢失原始数据提供的信息,同时可以使人为率定造成的误差降低到最小。参数 ω 的值分布较为分散,跨越了1.40~8.03的范围,其中1.49、1.90和3.23分别是5%、50%和95%分位数, ω 的范围比较集中在1.49~3.23的小值区域。图2显示了我国各地区数据落在 Budyko 空间上的位置。

将求得的参数序列代入每个站点利用实测值得到的干旱指数,估算得到一组基于这一系列参数值的蒸散发比,对估算的蒸散发比和实际的蒸散发比进行全国和区域范围内的交叉验证(表1)。在区域与全国尺度上基于参数分布的 A_E/P 的中值投影值与长期观测到的 A_E/P 均值偏差在0.34%~6.13%之间。中位数预测的偏差在华南地区最大为6.13%,仍在合理的范围内。

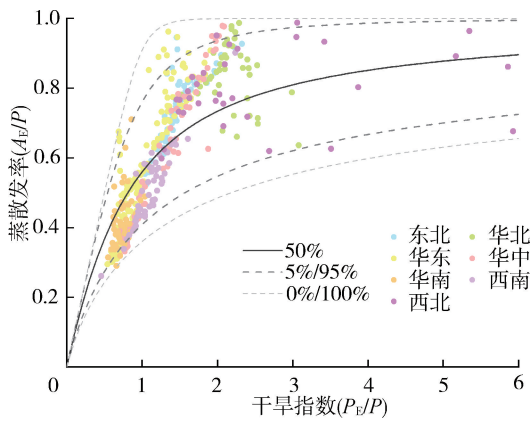


图2 7个流域数据在Budyko空间中的分布

Fig. 2 The distribution of data from seven basins in Budyko space

表1 选定地区参数 ω 的交叉验证

Table 1 Cross validation of parameter ω in selected regions

地区	干旱指数 均值	观测蒸散 率均值	预测蒸散率			误差/ %
			5%	50%	95%	
全国	1.30	0.61	0.42	0.58	0.78	5.65
东北	1.47	0.74	0.64	0.74	0.87	0.89
华北	2.17	0.84	0.65	0.86	0.97	2.36
华东	1.02	0.57	0.40	0.57	0.82	0.34
华中	1.24	0.58	0.43	0.55	0.85	5.16
华南	0.71	0.41	0.34	0.38	0.56	6.13
西南	1.11	0.51	0.43	0.50	0.60	2.26
西北	2.56	0.80	0.57	0.84	0.95	5.54

3.2 关键性气候阈值的识别

为了对未来各种气候情况下的水资源可利用量脆弱性进行估计,将对可能出现的气候情况做出一定数量以及密度的假设,以便在具体情景下推求水资源可利用量的脆弱性情况。本文在假设的天气状况原点下,对降水和潜在蒸散发量(代表温度变化)进行小幅度数值滑动,改变率在-100%到100%之间进行,以 $\pm 1\%$ 为步长得到40000组可能存在的气候组合。图3中,彩色条带代表每一个可能出现的气候条件下预测的水资源可利用量变化的中位数范围,黑色轮廓代表脆弱性指数的四分位差范围。这种探索性分析能够有效估计全国范围内不同气候条件下的可利用水资源量变化情况及其脆弱性。由此可见,温度变化和降水变化均会对水资源的脆弱性产生一定程度的影响,实际蒸散发的减少会使水资源的脆弱性增加,而降水的减少会使水资源的脆弱性减小。但相对于温度变化,降水变化对水资源的脆弱性具有更强烈的影响。图3显示,具有干旱趋势的区域具有较低的不确定性范围,反之亦然。由于降水变化在造成水资源的脆弱性变化的因素中占主导地位,本文在降水变化不同百分比的情况下,对可利用水资源量的变化情况进行了预测。图4中3

幅图依次是降水减少5%、10%、15%的情况下,经过数据筛选后得到我国470个地区水资源可利用量的变化情况。红色区域是相对脆弱性较大的地区,橙色次之,黄色再次,绿色是相对脆弱性较低的区域。在降水减少的情况下,我国东北地区、西北地区、华北地区以及华东地区北部均表现出水资源脆弱性,可利用水资源量的改变远远高于降水变化量。这些地区的水资源可利用量与降水密切相关,是最容易受到降水影响的地区,其中以西北东南部分地区、华北东部、东北西部和华东北部沿海地区所形成的条状地区受的影响最为严重。我国其余部分显示中度脆弱性,华北北部以及南方地区降水对可用水资源量的影响相对较小,可用水资源缩小的百分比基本可以维持在不超过降水降低的百分比的5%。在3种不同的降水改变的条件,均可以比较明显地得出此项结论。此外,降水减少的百分比越高,各个分区的脆弱性均表现得越为明显,这也再一次印证了降水对可利用水资源量的影响很大的结论。

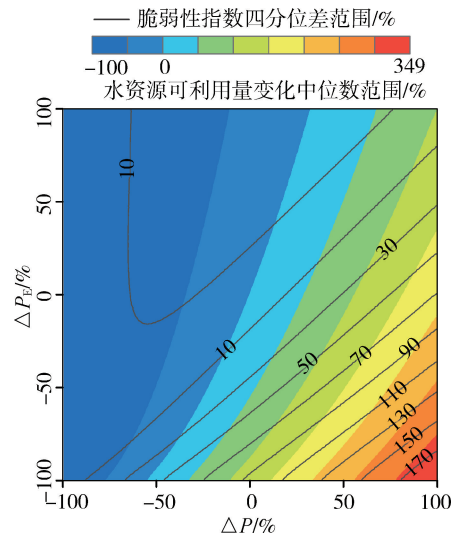


图3 中国可利用水资源量脆弱性及相应不确定性估计

Fig. 3 Water availability vulnerability and its uncertainty estimation in China

由此可见,我国东北地区、西北地区、华北地区以及华东地区北部这一条带地区的水资源可利用量最容易受到降水变化的影响,即使降水变化很小,也会导致水资源可用性急速变化,从而导致水资源对气候变化的高度脆弱性。根据地图上不同地区的颜色变化,对拥有脆弱性的地区进行挑选进而进行特别关注。在未来制定节水政策或对水资源进行调度规划时,可以重点考虑这一条状地区,加强对当地水资源的规划与管理,以免当地的经济的发展受到降水等气候变化的影响,而造成一些不必要的停滞甚至损失。

0 1 200 2 400 km

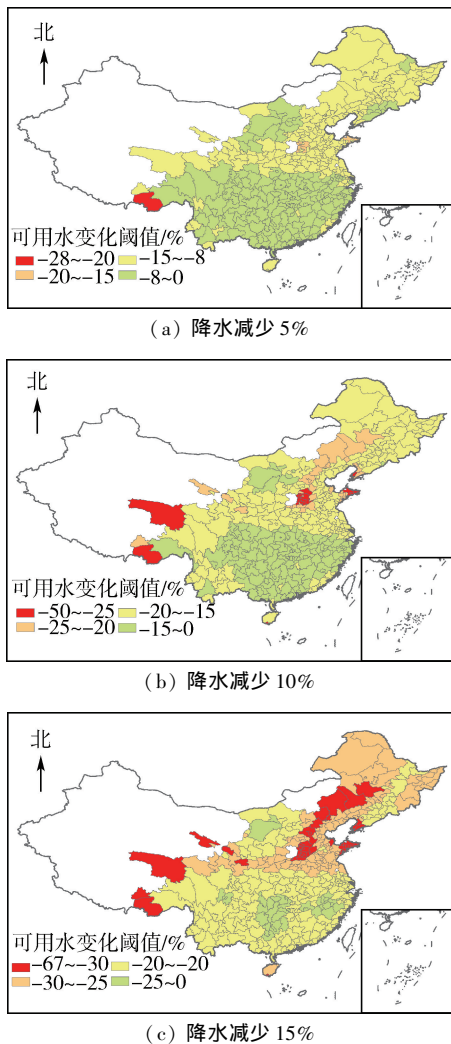


图4 降水条件改变对水资源可利用量变化的影响
Fig.4 The influence of precipitation change on the change of water availability

4 结论

a. 通过历史数据校正了 Budyko 参数 ω 的序列值,在全国以及区域水平验证了参数集合的合理性。

b. 降水是造成水资源脆弱性变化的主导性因素,且相对较为干旱的区域具有较低的不确定性,相对而言湿润地区的不确定性较大。

c. 我国东北地区、西北地区、华北地区以及华东地区北部这一条带地区最容易受到降水变化的影响,即使降水变化很小,也会导致水资源可用性的急速变化,表现出水资源对气候变化的高度脆弱性。

参考文献:

[1] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle [J]. Nature, 2002, 419:224-232.
[2] 赵钟楠,张越,黄火键,等. 基于问题导向的水生态文明

概念与内涵 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (3): 84-88. (ZHAO Zhongnan, ZHANG Yue, HUANG Huojian, et al. Concept and connotation of aquatic ecological civilization based on problem orientation [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (3): 84-88. (in Chinese))

[3] Institute of Medicine (US) Roundtable on Environmental Health Sciences, Research, and Medicine. From source water to drinking water: workshop summary [J]. Mikrobiologia, 2004, 34 (2): 350-356.
[4] 赵悦,蒋金荷,李富强. 中国水资源使用效率影响因素分析 [J]. 水利经济, 2018, 36 (1): 52-55. (ZHAO Yue, JIANG Jinhe, LI Fuqiang. Factors for water use efficiency in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36 (1): 52-55. (in Chinese))
[5] BUDYKO M I. Evaporation under natural conditions [M]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1948.
[6] BUDYKO M I. Climate and life [M]. New York: Academic Press, 1974.
[7] 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. (XUE Lianqing, YANG Fan, YANG Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (1): 1-6. (in Chinese))
[8] XU X, LIU W, SCANLON B R, et al. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40 (23): 6123-6129.
[9] 童瑞,杨尚丽,任立良,等. 黄河流域 1961—2012 年蒸发散发时空变化特征及影响因素分析 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (3): 16-21. (TONG Rui, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961—2012 and analysis of its influence factors [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (3): 16-21. (in Chinese))
[10] GREVE P, GUDMUNDSSON L, ORLOWSKY B, et al. Introducing a probabilistic Budyko framework [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42 (7): 2261-2269.
[11] SINGH R, KUMAR R. Vulnerability of water availability in India due to climate change: a bottom-up probabilistic Budyko analysis [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42 (22): 9799-9807.
[12] 陈泽峰,王卫光,李长妮,等. 基于概率 Budyko 方程的流域未来可用水资源比例预估 [J]. 中国农村水利水电, 2019 (6): 10-15. (CHEN Zengfeng, WANG Weiguang, LI Changni, et al. Estimation of future water availability ratio in the catchment based on the Probability Budyko Equation [J]. China Rural Water and

- Hydropower,2019(6):10-15. (in Chinese))
- [13] CHOUDHURY B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology,1999, 216(1/2):99-110.
- [14] 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.
- [15] WANG D, 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.
- [16] 王卫光,陆文君,邢万秋,等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护,2018,34 (2):7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):7-13. (in Chinese))
- [17] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature [J], Applied Engineering Agriculture,1985,1:96-99.
- [18] 张丁玲. 青藏高原水资源时空变化特征的研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [19] 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I):水文效应[J]. 冰川冻土,2013,35(3):513-527. (SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(I):hydrological effects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(3):513-527. (in Chinese))
- [20] 郭生练,程肇芳. 平原水网区陆面蒸发的计算[J]. 水利学报,1992(10):68-72. (GUO Shenglian, CHENG Zhaofang. Calculation of land surface evaporation in plain water network area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992(10):68-72. (in Chinese))
- [21] 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]. 水利学报,2007(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(4):409-416. (in Chinese))
- [22] 柯婷婷,束龙仓,焦莹,等. 基于傅抱璞公式的 Budyko 假说在月尺度上推导及其应用[J]. 水利水电科技进展,2011,31(4):38-40. (KE Tingting, SHU Longcang, JIAO Ying, et al. Derivation and application of Budyko framework based on Fu's equation at monthly time scale [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(4):38-40. (in Chinese))
- [23] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学,1981(1):23-31. (FU Baopu. On the calculation of land surface evaporation[J]. Atmospheric Science, 1981(1):23-31. (in Chinese))
- [24] 陈璐,杨振莹,周建中,等. 基于实时校正和组合预报的水文预报方法研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2017,36(4):73-77. (CHEN Lu, YANG Zhenying, ZHOU Jianzhong, et al. Real-Time Error Correction and Multi-Model Composition Forecast for Streamflow Forecast [J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2017, 36(4):73-77. (in Chinese))
- [25] 周琦,池飞,逢勇,等. 可利用水资源量正逆向联合计算方法[J]. 水资源保护,2016,32(5):42-46. (ZHOU Qi, CHI Fei, PANG Yong, et al. A combined forward and reverse method for available water resources calculation [J]. Water Resources Protection,2016,32(5):42-46. (in Chinese))

(收稿日期:2019-11-11 编辑:彭桃英)

(上接第 46 页)

- [11] 包红军,李致家,王莉莉. 降雨径流模拟神经网络模型及应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(5):719-722. (BAO Hongjun, LI Zhijia, WANG Lili. Rainfall-runoff modeling with artificial neural network and genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2009, 41(5):719-722. (in Chinese))
- [12] THIRUMALAI K, DEO M C. Hydrological forecasting using neural networks [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2000,5(2):180-189.
- [13] 王建群,张显扬,卢志华. 秦淮河流域数字水文模型及其应用[J]. 水利学报,2004(4):42-47. (WANG Jianqun, ZHANG Xianyang, LU Zhihua. Digital hydrological model of qinhuai river basin and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(4):42-47. (in Chinese))
- [14] 王玉德. 基于 ArcGIS 的泰森多边形法计算区域平均雨量[J]. 吉林水利,2014(6):58-60,63. (WANG Yude. Tyson polygon method based on arcgis to calculate regional average rainfall[J]. Jilin Water Resources,2014(6):58-60,63. (in Chinese))
- [15] 刘立燕. 基于 Copula 函数和神经网络模型的洪水预测[D]. 南京:南京邮电大学,2018.
- [16] 李培都,司建华,冯起,等. 疏勒河年径流量变化特征分析及模拟[J]. 水资源保护,2018,34(2):52-60. (LI Peidu, SI Jianhua, FENG Qi, et al. Analysis and simulation on annual runoff variation characteristics of Shule River [J]. Water Resources Protection,2018,34(2):52-60. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-13 编辑:王芳)