

DOI: 10.5846/stxb201708031390

曹文旭, 张志强, 查同刚, 王盛萍, 郭军庭, 许行. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究. 生态学报, 2018, 38(16):

Cao W X, Zhang Z Q, Zha T G, Wang S P, Guo J T, Xu H. Exploring the effects of vegetation dynamics and climate changes on the Chaohe watershed actual evapotranspiration—Budyko Hypothesis approach. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16):

基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究

曹文旭¹, 张志强^{1,*}, 查同刚¹, 王盛萍², 郭军庭³, 许行¹

¹ 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

² 华北电力大学资源与环境研究院/区域能源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206

³ 韦仕敦大学生物学院, 加拿大 N6A 3K7

摘要: 由于参数较少且具有明确的物理学意义, 基于水热平衡理论的 Budyko 假设常用于定量分析以及评价气候变化和植被变化对实际蒸散发的影响, 对研究流域水量平衡和能量分配具有重要意义。依据位于我国北方密云水库上游的潮河流域 1961—2015 年的水文气象数据, 选取了 4 种基于 Budyko 假设的模型来研究潮河流域水热耦合平衡关系, 确定了该流域最适用模型以及模型参数最优值, 并且采用情景设置法分析了流域实际蒸散发对气候以及植被变化的响应。结果表明: (1) 与经典 Budyko 模型相比, 采用流域下垫面参数修正的 Budyko 模型计算实际蒸散发的精度更高。其中, 傅抱璞模型精度最高, 决定系数、相对误差、纳什效率系数和均方根误差分别为 0.85、4.30%、0.82 和 27.66 mm; (2) 对傅抱璞模型下垫面参数 ω 进行优化, 确定适用于潮河流域的模型参数取值为 2.54, 优化后的傅抱璞模型能够更好地反映流域实际蒸散发的变化特征; (3) 情景模拟表明, 气候变化和植被变化的共同作用导致潮河流域实际蒸散发的上升。其中, 气候变化是引起流域蒸散发变化的主要驱动因素。

关键词: 植被变化; 气候变化; 实际蒸散发; 傅抱璞模型; 潮河流域

Exploring the effects of vegetation dynamics and climate changes on the Chaohe watershed actual evapotranspiration—Budyko Hypothesis approach

CAO Wenxu¹, ZHANG Zhiqiang^{1,*}, ZHA Tonggang¹, WANG Shengping², GUO Juntong³, XU Hang¹

¹ College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² North China Electric Power University, Beijing 102206, China

³ Department of biology, Western University, London N6A 3K7, Canada

Abstract: The Budyko hypothesis, less parameters and definite physical significance, was used to quantitatively analyze the effects of climate changes and vegetation dynamics on actual evapotranspiration. It is of great significance to study the water balance and energy distribution in Chaohe watershed. We used the Budyko empirical model to verify the water-energy balance theory based on the hydrological and meteorological data from 1961 to 2015 in Chaohe watershed. The most suitable model of the basin and the optimal values for the model parameters were determined. Furthermore, we quantitatively analyzed the impacts of vegetation dynamics and climate changes on the actual evapotranspiration. Results showed that the Budyko model modified by underlying surface parameters improved the accuracy of predicting actual evapotranspiration compared to the classical Budyko models. The Fu Baopu model had the highest precision in the Chaohe watershed; the mean relative error, the Nash efficiency coefficient, and the coefficient of determination were 27.66 mm, 0.82 and 0.85,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41140011); 国家林业公益性行业科研专项 (201204102) 资助

收稿日期: 2017-08-03; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

respectively. Using the optimizing model parameter (2.54), the Fu Baopu model could better reflect the changed characteristics of the actual evapotranspiration. Finally, the scenario analysis indicated that vegetation dynamics and climate variation in Chaohe watershed played a positive role in actual evapotranspiration; climate changes are a major driver of the increase in actual evapotranspiration.

Key Words: vegetation dynamics; climate changes; actual evapotranspiration; Fu Baopu model; Chaohe watershed

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是水文循环和能量平衡的关键, 反映了流域需水和植被耗水的情况^[1]。受气候变化和人类活动影响, 流域蒸散发呈现不同程度的变化, 这些变化使流域水资源管理和利用面临严峻挑战^[2-3]。由于实际蒸散发的估算受水文资料序列长短和完整性的制约, 且在流域尺度上难以实现蒸散发的直接测定, 基于物理过程的水文模型和基于经验的统计方法被广泛应用于定量探究流域蒸散发对气候变化和人类活动响应的研究当中。刘昌明^[4]等应用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 分布式水文模型研究气候变化对黄河河源区蒸散发以及径流的影响。黄生志^[5]等应用 SVM 模型量化气候变化和人类活动对蒸散发以及径流的相对贡献。王盛萍^[6]等应用基于物理过程的 MIKESHE 模型以及情景模拟量化评价土地利用和降水变化对潮河流域水文变化的影响。由于水文模型的驱动数据较多, 且率定的参数存在不确定性, 这些模型的适用性受到一定限制。相较而言, 基于水热耦合平衡理论的 Budyko 假设为实际蒸散发的计算提供了更为简明的方法^[7-8]。流域尺度下, 实际蒸散发不仅受水分供应和能量供给条件的影响, 植被等下垫面条件也是影响蒸散发变化的重要因素。因此, 涉及流域下垫面条件的 Budyko 修正模型逐渐发展起来, 实现了 Budyko 假设的参数化, 这些修正模型也在全球范围内得到广泛验证^[9-10]。Gao^[11]等研究海河流域实际蒸散发变化趋势特征指出, 降水 (Precipitation, P) 和潜在蒸散发 (Potential Evapotranspiration, PET) 的变化共同导致了流域实际蒸散发的减少。胡珊珊^[12]等基于 Budyko 假设分析了流域实际蒸散发与降水和潜在蒸散发的响应关系。孙福宝和杨大文^[13]基于 Budyko 假设探究了导致海河流域径流减少的主要原因。此外, 流域下垫面条件受植被变化和气候变化的影响, 决定着流域的水热分配, 因此是准确估算流域实际蒸散发的关键。张槽等^[14]通过建立估算流域蒸散发的水热耦合平衡模型并对模型进行验证, 得到不同植被类型下模型下垫面参数的适用值, 以估算植被变化下流域蒸散发的变化量。周君华^[15]等应用傅抱璞模型对岷江流域实际蒸散发进行模拟, 得到模型下垫面参数在岷江流域中的取值。周小珍^[16]采用 Budyko 模型分析不同植被类型对潮白河流域水循环要素的影响, 并确定不同林草覆盖率下模型参数的取值。

气候变化和植被变化是影响流域水文过程变化的两个关键因素, 量化两者对实际蒸散发的相对贡献, 为未来气候变化及植被变化下流域水资源的应用和管理提供合理战略和措施。本文选取 4 种 Budyko 假设模型估算潮河流域实际蒸散发并对模型进行适用性评价; 采用精度较高的模型来研究流域实际蒸散发的变化特征, 即优化模型参数, 设置不同情景定量分析气候变化和植被变化对潮河流域实际蒸散发的影响, 对评价无实测流量资料地区气候及植被变化对水文过程的影响具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况与数据来源

潮河流域位于华北平原, 北京市东北部 (116°08'—117°28'E, 40°34'—41°37'N), 总面积为 4854.82 km²。该流域属于温带大陆性季风性气候, 年平均气温为 10.4℃。年均降水量约为 506 mm, 降水年内分配不均, 主要集中在夏季。多年平均径流为 60.43 mm, 流域地表水和地下水资源量分别为 3.42 亿 m³ 和 1.71 亿 m³, 多年平均水资源总量为 3.51 亿 m³。流域日照充足, 水热同期, 多年平均潜在蒸散发量为 1136.85 mm。流域以低山、中山以及丘陵为主。土壤类型以棕壤和褐土为主, 自然植被主要为落叶阔叶林和针阔叶混交林, 森林覆盖率达 80% 以上。

研究使用的流域出口—下水文站 1961—2015 年径流数据及流域内 8 个雨量站数据分别由河北水文水资源局、北京水文总站以及海河水利委员会提供。气象数据来源于中国气象数据网所提供的潮河流域内部及

周边 3 个气象站(密云站、丰宁站、承德站)的地面气候资料数据集以及辐射数据,具体包括逐日降水量、气温、风速、气压、日照时长和相对湿度(图 1)。土地利用数据是通过对于潮河流域 1979 年、1989 年、1999 年和 2009 年的 4 期 TM 遥感影像进行解译^[17],从而获得以林草植被为代表的潮河流域下垫面的变化特征。

1.2 研究方法

1.2.1 Budyko 假设

Budyko 假设指出实际蒸散发受水分供应条件(主要指降水)和能量供给条件(主要指潜在蒸散发)的共同限制,流域降水和潜在蒸散发之间存在耦合平衡关系,并提出水热耦合平衡方程的一般形式^[18]:

$$\frac{AET}{P} = f\left(\frac{PET}{P}\right) \tag{1}$$

基于公式(1)给出 Budyko 曲线^[19],即:

$$AET = \sqrt{PET \times th \frac{P}{PET}} \times P(1 - e^{-\frac{PET}{P}}) \tag{2}$$

在此假设基础,并考虑到气候—植被—土壤的相互作用,学者提出了一系列考虑下垫面因素的 Budyko 修正模型(表 1)。

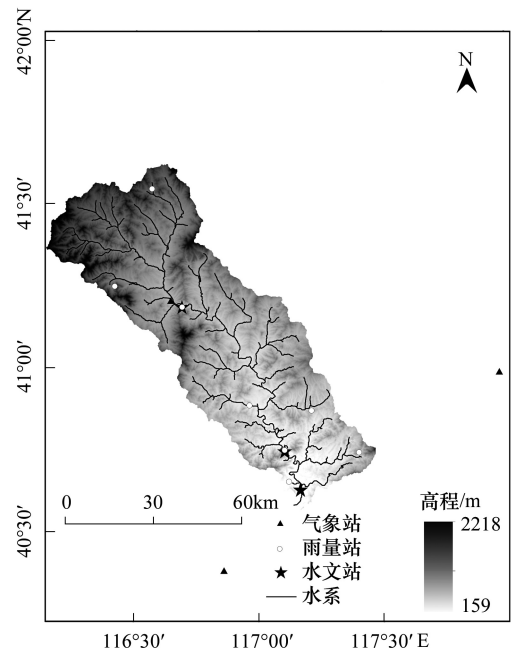


图 1 潮河流域位置图

Fig.1 Location of Chaohe Watershed

表 1 Budyko 及其修正模型的表达式

Table 1 Formulas of Budyko and its modified models

模型 Model	公式 Formula	参数 Parameter
Budyko ^[19]	$\frac{AET}{P} = \sqrt{\frac{PET}{P} \tanh \frac{P}{PET} \left[1 - \exp\left(-\frac{PET}{P}\right) \right]}$	基于辐射、降水的无参数的概念模型
Choudhury ^[20]	$\frac{AET}{P} = \frac{PET}{(P^n + PET^n) \frac{1}{n}}$	n 是与流域面积大小等因素相关的模型参数,田间 $n=2.6$,大流域 $n=1.8$
傅抱璞 ^[9]	$\frac{AET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left[1 + \left(\frac{PET}{P}\right)^\omega \right]^\frac{1}{\omega}$	ω 反映流域植被、地形等情况,参数 ω 取值由傅抱璞 ^[9] 所给出 Budyko 曲线关系图确定
张膺 ^[14]	$\frac{AET}{P} = \frac{1 + w \frac{PET}{P}}{1 + w \frac{PET}{P} + \frac{P}{PET}}$	w 是植物可利用水系数,表示不同植被蒸腾消耗土壤水分的能力。对森林流域 w 使用值为 2.0,对于草地流域 w 使用值为 0.5

1.2.2 潜在蒸散发计算方法

采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的修正 Penman-Monteith 公式计算潮河流域潜在蒸散发量,具体计算公式如下^[21]:

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \tag{3}$$

式中,PET 为潜在蒸散发量(mm/d); R_n 为太阳净辐射($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$); G 为土壤热通量($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$); T 为平均气温($^{\circ}C$); u_2 为 2 m 高处的风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压-温度斜率($kPa/^{\circ}C$); γ 为干湿表常数($kPa/^{\circ}C$)。

1.2.3 模型校准与验证

根据潮河流域多年平均径流量、降水量以及潜在蒸散发量采用傅抱璞模型进行曲线拟合得到模型下垫面

参数值,并采用试错法对模型参数 ω 进行优化,将1961—2009年为模型校准期,2010—2015年作为模型验证期;最后,依据水量平衡法计算流域实际蒸散发量对模型计算精度进行评价,即^[22]:

$$AET = P - R - \Delta W \quad (4)$$

式中, P 为多年平均流域降水量(mm); R 为多年平均径流深(mm); ΔW 为流域蓄水变化量(mm)。就年尺度而言,流域蓄水量变化可以忽略不计,因此,流域多年水量平衡方程可以写为:

$$AET = P - R \quad (5)$$

基于 ArcGIS 构建泰森多边形来计算潮河流域多年平均降雨量,具体方法如下^[23]:

$$\bar{x} = \frac{f_1 x_1 + f_2 x_2 + \cdots + f_n x_n}{f_1 + f_2 + \cdots + f_n} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n f_i x_i = \sum_{i=1}^n A_i x_i \quad (6)$$

式中, x_i 为各个雨量站点的降雨量(mm); f_i 为对应泰森多边形的面积(km^2); n 为流域内雨量站数量, F 为流域总面积(km^2); A 为雨量站权重系数。

1.3 模型评价指标

本研究采用决定系数(Coefficient of Determination, R^2)、相对误差(Mean Relative Error, MRE)、纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSE)以及方差均方根(Root Mean Squared Error, RMSE)对 Budyko 模型进行评价,各表达式如下^[24-26]:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (AET_{m,i} - \overline{AET_m})(AET_{o,i} - \overline{AET_o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (AET_{m,i} - \overline{AET_m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (AET_{o,i} - \overline{AET_o})^2}} \right\}^2 \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (AET_{m,i} - AET_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (AET_{o,i} - \overline{AET_o})^2} \quad (8)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|AET_{m,i} - AET_{o,i}|}{AET_{o,i}} \times 100 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AET_{o,i} - AET_{m,i})^2}{n}} \quad (10)$$

式中, $AET_{m,i}$ 和 $AET_{o,i}$ 分别为第 i 年模型模拟实际蒸散发量和水量平衡法计算的实际蒸散发量(mm)。

1.4 试验设计

解译潮河流域1979年、1989年、1999年和2009年4期Landsat TM遥感影像^[17],确定流域林地和草地覆盖度及变化率(表2)。为定量识别气候以及植被变化对流域实际蒸散发的贡献率,设置不同情景模拟流域水文响应(表3)。步骤1:将情景1作为基准期,分别于情景5、6、7进行比较,获得各时期气候变化和植被变化对蒸散发的综合影响;步骤2:将情景2、3、4分别于情景5、6、7进行比较,获得气候变化对流域蒸散发的影响;最后林草植被变化对蒸散发的影响分别由上述步骤差值得到。

表2 潮河流域不同时期植被变化情况

Table 2 Vegetation changes in different periods in Chaohe watershed

类型 Types	面积比例 Area proportion/%				面积变化率 Area change rate/%			
	1979	1989	1999	2009	1979—1989	1979—1999	1979—2009	1979—2009
林地 Forest land	50.46	55.84	63.79	78.02	10.67	14.23	22.31	54.63
草地 Grassland	34.55	33.40	24.55	13.28	-3.32	-26.50	-45.90	-61.56

2 结果与分析

2.1 模型适应性评价

4种基于Budyko假设的模型均能够有效模拟潮河流域实际蒸散发的变化情况,但4种模型的模拟精度存在一定的差异(表4和图2)。潮河流域实际蒸散发—降水—潜在蒸散发三者间关系符合Budyko基本曲线。相较而言,经典Budyko模型的模拟结果与实际蒸散发计算值存在较大差异,纳什效率系数最低(0.68),决定系数、相对误差和均方根误差分别为0.78、7.64%和43.44 mm,模拟值较流域实际蒸散发计算值偏高。当模型加入下垫面参数后模拟精度提高,其中傅抱璞模型对潮河流域实际蒸散发的模拟效果最好,决定系数、相对误差、纳什效率系数和均方根误差分别为0.85、4.30%、0.82和27.66 mm。傅抱璞模型能够较为合理地表示潮河流域水热耦合关系,准确地估算流域实际蒸散发。因此,本文选择傅抱璞模型对潮河流域实际蒸散发进行进一步分析。

表3 模型模拟情景设置

Table 3 Scenarios for modeling analysis

情景 Scenarios	土地利用 Land use	气候数据 Meteorological data
1	1979	1961—1979
2	1979	1980—1989
3	1979	1990—1999
4	1979	2000—2009
5	1989	1980—1989
6	1999	1990—1999
7	2009	2000—2009

表4 Budyko及其修正模型模拟精度统计

Table 4 Accuracies of estimated actual evapotranspiration by Budyko and modified models

模型 Model	模拟值/mm Analogvalue	计算值/mm Calculated value	R^2	MRE/%	NSE	RMSE/mm
Budyko	479.31	447.46	0.78	7.64	0.68	43.44
傅抱璞	450.15	447.46	0.85	4.30	0.82	27.66
张槽	423.74	447.46	0.82	5.81	0.77	34.03
Choudhury	458.71	447.46	0.83	4.31	0.81	29.68

R^2 :决定系数,Coefficient of Determination;MRE:相对误差,Mean Relative Error;NSE:纳什效率系数,Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient;RMSE:方差均方根,Root Mean Squared Error

2.2 模型下垫面参数优化

通过优化傅抱璞模型下垫面参数 ω ,提高了模型对流域实际蒸散发的模拟精度,模型能够更加准确地反映潮河流域实际蒸散发的变化情况(表5和图3)。根据潮河流域多年平均径流量、降水量以及潜在蒸散发量对模型下垫面参数 ω 进行优化,得到下垫面参数 ω 的最佳取值为2.54。在校准期和验证期,傅抱璞模型的决定系数、相对误差、纳什效率系数和均方根误差分别为0.89和0.95、3.66%和4.54%、0.88和0.74、23.79 mm和25.14 mm。下垫面参数 ω 经过优化后,模型能够更加真实地反映适用于潮河流域潮实际蒸散发的动态变化。

表5 傅抱璞模拟评价结果

Table 5 Simulation assessment of Fu Baoqu model

校准期 Calibration period						验证期 Validation period					
模拟值 Analogvalue /mm	计算值 Calculatedvalue /mm	R^2	MRE /%	NSE	RMSE /mm	模拟值 Analogvalue /mm	计算值 Calculatedvalue /mm	R^2	MRE /%	NSE	RMSE /mm
448.51	444.55	0.89	3.66	0.88	23.79	435.73	457.46	0.95	4.54	0.74	25.14

R^2 :决定系数,Coefficient of Determination;MRE:相对误差,Mean Relative Error;NSE:纳什效率系数,Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient;RMSE:方差均方根,Root Mean Squared Error

2.3 实际蒸散发对气候变化和植被变化的响应

气候变化和植被变化对潮河流域实际蒸散发的影响程度存在一定差异(表6)。与基准期相比,1961—2009年气候变化和植被变化(主要体现为林草覆盖面积的增加)均导致潮河流域蒸散发的增加,气候变化能

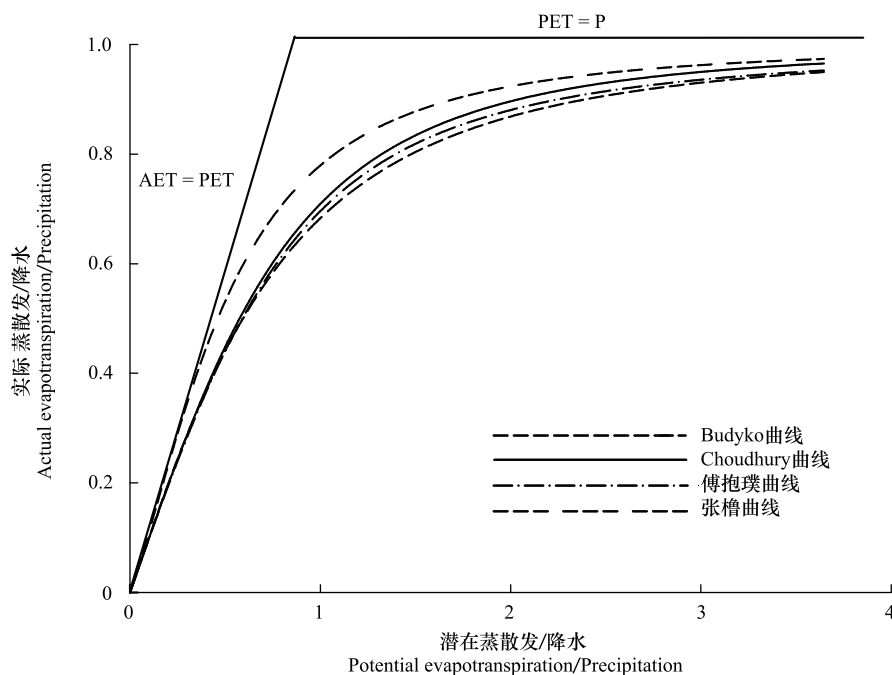


图2 潮河流域实际蒸散发-降水-潜在蒸散发关系曲线

Fig.2 Relationships among actual evapotranspiration, precipitation and potential evapotranspiration in Chaohe watershed

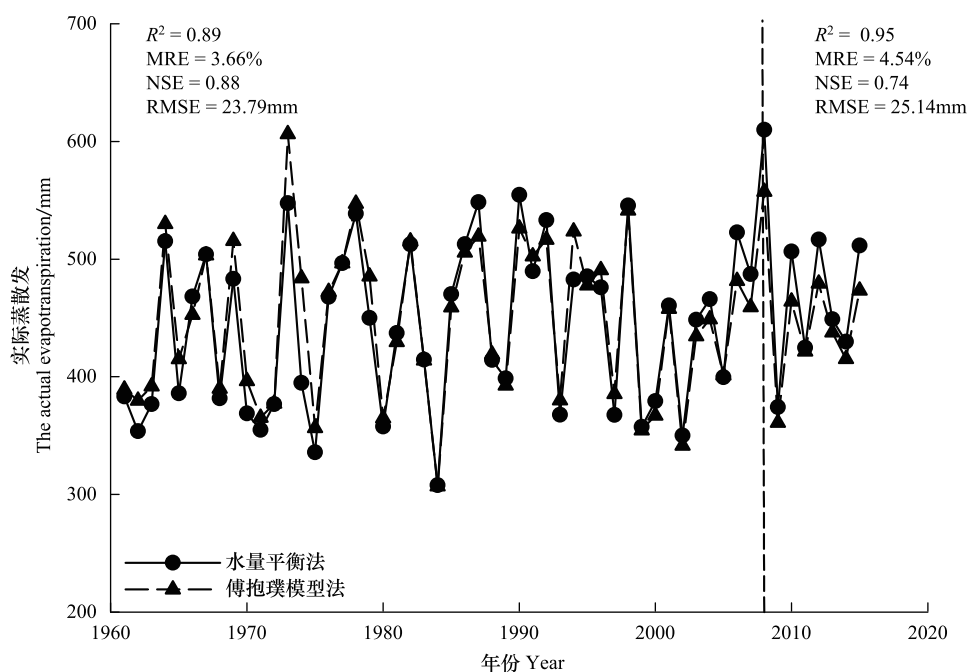


图3 傅抱璞模型对潮河流域实际蒸散发的校准和验证

Fig.3 Calibration and validation of Fu Baopu model for actual evapotranspiration in Chaohe watershed

R^2 : 决定系数, Coefficient of Determination; MRE: 相对误差, Mean Relative Error; NSE: 纳什效率系数, Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient; RMSE: 方差均方根, Root Mean Squared Error

够解释实际蒸散发增加的 80%左右,而植被变化仅占 10%—20%。1979—1989 年潮河流域实际蒸散发比基准期增加了 7.39 mm。其中,植被变化导致流域蒸散发量增加 1.11 mm,气候变化使得流域蒸散发量增加了 6.28 mm,两者分别占流域总蒸散发增加量的 15.02%和 84.98%;与 1979—1989 年相比,1989—1999 年潮河流

域实际蒸散发量增加了 25.52 mm;其中,植被变化和气候变化分别增加流域蒸散发量的 17.20%和 82.80%;到 21 世纪初期,潮河流域林草植被覆盖率达 91.3%,植被覆盖面积的增加对流域蒸散发变化的贡献上升到 20.51%。虽然流域植被面积的不断增长,对流域蒸散发变化的贡献逐渐增大,但气候变化依然是流域蒸散发量增加的主要因素。

表 6 潮河流域不同植被变化和气候变化对蒸散发影响的模拟结果
Table 6 Simulated response of actual evapotranspiration to land use and climate changes in Chaohe watershed

时段 Period	平均实际蒸散发/mm Mean actual evapotranspiration	模拟实际蒸散发/mm Simulated actual evapotranspiration	植被变化对蒸散发的影响 Contribution of vegetation cover change		气候变化对蒸散发的影响 Contribution of climate change	
			变化量/mm Variation	贡献/% Contribution	变化量/mm Variation	贡献/% Contribution
1961—1979	430.66	430.89				
1979—1989	438.05	437.17	1.11	15.02	6.28	84.98
1989—1999	463.57	458.30	4.39	17.20	21.13	82.80
1999—2009	475.27	467.60	2.4	20.51	9.3	79.49

3 讨论

3.1 Budyko 假设模型的适用性

比较 4 种 Budyko 假设模型发现,加入下垫面参数的修正模型,能够更加准确地反映流域实际蒸散发的变化特征,这主要是因为流域蒸散发不仅受供水条件和能量条件两个因素的制约,还受流域下垫面条件的制约。张丹等人^[27]基于 Budyko 假设,分析气候和植被类型变化对全国 71 个典型流域蒸散发的影响指出,加入反映流域下垫面特征的模型参数后,模型对流域蒸散发的计算精度明显提高。1961—2009 年潮河流域林草植被变化引起流域实际蒸散发改变,植被作为流域生态水文变化的综合性指标反映了气候、土壤和地形的季节性变化特征。因此,采用考虑下垫面条件的 Budyko 修正模型对潮河流域实际蒸散发进行模拟,能够更加准确地反映流域水热耦合平衡关系。就 3 种修正模型而言,Choudhury 认为模型下垫面参数取值取决于流域面积的大小^[20],而孙福宝^[28]等人则指出模型下垫面参数值存在区域差异性,而这种差异性主要由流域土壤相对入渗能力、平均坡度等下垫面因素决定,杨汉波和邵薇薇等人也得到相同结论^[8,29]。张鲁模型根据流域水量平衡数据仅给出森林和草地流域的下垫面参数的唯一取值,忽略了下垫面条件的空间异质性对实际蒸散发的影响,而傅抱璞模型中参数 ω 的确定综合考虑了地形起伏、植被、土壤等对流域降水、辐射以及气象要素空间变化的影响。因此,能够更加真实地反映流域下垫面条件对流域实际蒸散发的影响。

3.2 傅抱璞模型下垫面参数确定

傅抱璞模型下垫面参数 ω 能够反映流域下垫面特征,特别是植被变化对实际蒸散发的影响。因此,模型下垫面参数 ω 的确定是研究潮河流域实际蒸散发的关键。3 种修正模型中,傅抱璞模型对潮河流域实际蒸散发的模拟效果最好,但仍然存在一定误差,这主要是因为模型在确定下垫面参数 ω 时,假定降水、径流系数以及植被在大时间范围内相对稳定,而潮河流域从 20 世纪 60 年代开始,林草植被面积不断增加,特别是林地面积由最初的 2450.3 km²增加到 3788.7 km²,增加了 54.63%;截至 21 世纪初期,潮河流域林草植被覆盖已占整个流域的 91.30%。除此之外,潮河流域在 20 世纪 70 年代末修建了部分小水库和塘坝,并且先后实施水土保持工程,修建水平梯田以及谷坊等 57.27 km²^[17],植被的变化以及工程措施的实施对潮河流域实际蒸散发和蓄水量产生影响,因此,需要对傅抱璞模型下垫面参数 ω 进行优化,确定模型参数的最优取值($\omega = 2.54$),提高傅抱璞模型在潮河流域的适用性。

3.3 气候变化和植被变化对蒸散发的影响

情景模拟结果显示气候变化和植被变化对潮河流域的实际蒸散发均有促进作用。其中,植被变化对蒸散

发变化的贡献率较小。1979—1989 年,气候变化导致实际蒸散发增加的 84.98%,而林草覆盖变化占实际蒸散发变化的百分比只有 1.11%,表明气候变化是引起流域蒸散发增加的主要原因。1961—2015 年潮河流域降水量的减少在一定程度上削弱了实际蒸散发的上升趋势,并且流域林草植被的增加部分补偿了由气候变化(主要是降水减少)引起的对流域实际蒸散发的影响,使得气候变化对流域蒸散发的贡献率逐渐减小。从 1961 年开始潮河流域林地面积不断增加,到 2009 年林地总面积为 3788.7 km²,占整个潮河流域的 78.02%,而流域草地面积与 1961 年相比却减少了 61.56%。然而流域草地面积的减少并未导致流域实际蒸散发下降,说明潮河流域林地的实际蒸散发量占流域总蒸散发量的比例较大,这主要是因为林地覆盖面积增加使得流域降水截流蒸发、植被蒸腾作用加强,进而导致整个流域的蒸散发能力加强。此外,受水分限制时林地流域能够更好地吸收深层土壤水分以维持正常蒸散发速率,因此流域林地实际蒸散发要高于草地实际蒸散发,在植被引起的流域蒸散发变化中林地蒸散发的贡献更大。

4 结论

为了反映气候变化和植被变化对潮河流域实际蒸散发的影响,本研究比较了 4 种 Budyko 假设模型,选取傅抱璞模型进一步分析流域实际蒸散发的变化特征,通过对模型下垫面参数 ω 进行优化,更加准确地探究气候变化和植被变化对流域实际蒸散发的影响,结果表明:

(1) 基于水热耦合平衡关系,应用含有下垫面参数的 Budyko 修正模型能够更好地反映潮河流域实际蒸散发的变化情况。其中,傅抱璞模型模拟效果最高,相对误差、纳什效率系数和均方根误差分别为 4.30%、0.82 和 27.66 mm。

(2) 对傅抱璞模型下垫面参数 ω 进行优化,校准期和验证期的相关系数、纳什效率系数和相对误差均满足要求,最终确定最优取值为 2.54。傅抱璞模型经过优化后能够更加准确地反映潮河流域实际蒸散发的变化特征。

(3) 应用傅抱璞模型定量识别气候变化和植被变化对潮河流域实际蒸散发的贡献率发现,气候变化是引起流域实际蒸散发增加的主要驱动力。尽管研究期内流域林草植被覆盖面积的增加,促进了流域蒸散发的增加,对蒸散发的贡献率不断上升,但贡献率仅有 10%—20%。

参考文献 (References):

- [1] Shi Z J, Xu L H, Yang X H, Guo H, Dong L S, Song A Y, Zhang X, Shan N. Trends in reference evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the Loess Plateau, China: implications for ecological projects and agricultural production. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(1): 257-273.
- [2] Ye X C, Zhang Q, Liu J, Li X H, Xu C Y. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 494: 83-95.
- [3] Jiang C, Xiong L H, Wang D B, Liu P, Guo S L, Guo C Y. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 326-338.
- [4] 刘昌明, 李道峰, 田英, 郝芳华, 杨桂莲. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 437-445.
- [5] Huang S Z, Chang J X, Huang Q, Chen Y T, Leng G Y. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on runoff change based on the Budyko hypothesis and SVM model. *Water Resources Management*, 2016, 30(7): 2377-2390.
- [6] 王盛萍, 张志强, Sun G, Strauss P, 郭军庭, 姚安坤, 唐寅. 基于 MIKESHE 模型的潮河流域土地利用与降水变化对水文的影响评价. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 320-325.
- [7] Zhang X P, Zhang L, McVicar T R, Van Niel T G, Li L T, Li R, Yang Q K, Wei L. Modelling the impact of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2008, 22(12): 1996-2004.
- [8] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 雷慧闽. 任意时间尺度上的流域水热耦合平衡方程的推导及验证. *水利学报*, 2008, 39(5): 610-617.
- [9] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31.
- [10] 谭冠日, 王宇, 方锡林, 王永平, 张天宏, 温云红. 陆面蒸发公式的检验. *气象学报*, 1984, 42(2): 231-237.
- [11] Gao G Y, Fu B J, Wang S, Liang W, Jiang X H. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the

- Loess Plateau with the Budyko framework. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 331-342.
- [12] 胡珊珊, 张涛. 白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散量变化分析. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 67-71.
- [13] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(10): 1024-1034.
- [14] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [15] 周君华, 尹铎皓, 范云鹤, 刘铁刚. 基于 Budyko 假设的岷江流域实际蒸散模拟研究. *灌溉排水学报*, 2017, 36(1): 107-112.
- [16] 周小珍, 潘兴瑶, 朱永华, 胡亚子. 潮白河流域 1980—2013 年平均水平衡特征研究. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 649-657.
- [17] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 姚安坤, 马松增. 气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 236-243.
- [18] Budyko M I. *Climate and Life*. New York: Academic Press, 1974.
- [19] Budyko M I (1963) Evaporation under natural conditions. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem
- [20] Choudhury B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1/2): 99-110.
- [21] Allan R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage, Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- [22] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述. *生态学报*, 2008, 28(12): 6282-6291.
- [23] 王玉德. 基于 ArcGIS 的泰森多边形法计算区域平均雨量. *吉林水利*, 2014, (6): 58-60, 63-63.
- [24] Legates D R, McCabe G J Jr. Evaluating the use of “goodness - of - fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 233-241.
- [25] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [26] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [27] 张丹, 梁康, 聂茸, 顾人颖. 基于 Budyko 假设的流域蒸散发估算及其对气候与下垫面的敏感性分析. *资源科学*, 2016, 38(6): 1140-1148.
- [28] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 丛振涛, 雷志栋. 海河及西北内陆河流域的水热平衡研究. *水文*, 2007, 27(2): 7-10.
- [29] 邵薇薇, 徐翔宇, 杨大文. 基于土壤植被不同参数化方法的流域蒸散发模拟. *水文*, 2011, 31(5): 6-14.