

Budyko框架下黄河流域蒸散发时空变化影响因素研究

王亚琴, 杨巍, 邢博, 罗毅

A study of influencing factors of spatio-temporal evapotranspiration variation across the Yellow River Basin under the Budyko framework

WANG Yaqin, YANG Wei, XING Bo, and LUO Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205066>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玛纳斯河流域山前平原区蒸散发时空异质性分析

Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin

席丹, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 张在勇 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 25-34

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

王周锋, 王文科, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 1-9

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205066

王亚琴, 杨巍, 邢博, 等. Budyko 框架下黄河流域蒸散发时空变化影响因素研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 23-33.
WANG Yaqin, YANG Wei, XING Bo, et al. A study of influencing factors of spatio-temporal evapotranspiration variation across the Yellow River Basin under the Budyko framework[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 23-33.

Budyko 框架下黄河流域蒸散发时空变化影响因素研究

王亚琴^{1,2,3}, 杨巍², 邢博⁴, 罗毅^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国国土勘测规划院, 北京 100035;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 蒸散发是水循环过程中的重要环节, 研究蒸散发时空变化影响因素, 有利于认识区域水资源的时空分异规律。黄河流域地处干旱半干旱地区, 水资源短缺且时空分布不均, 水问题突出。在黄河流域分析蒸散发对变化环境的响应, 揭示气候变化、植被季节性和物候变化的水文水资源效应, 对地区水资源可持续发展和规划管理等具有重要的理论意义和现实意义。基于多元自适应回归样条(MARS)非参数模型, 采用黄河流域内 30 个子流域的全球监测与模型研究组(GIMMS)制作的第三代归一化植被指数(NDVI_{3g})数据集、气象数据、土壤数据、土地利用/覆盖数据以及地形地貌数据, 在 Budyko 框架下分析了水热耦合控制参数 ω 与环境变量因子的关联性, 探讨了变化环境对流域蒸散发的影响机制。结果表明: (1) 流域水平衡关系的空间变异与流域水热耦合季节性、地形地貌空间变异性、降水的季节性特征(平均暴雨深度和降水变异系数)显著相关。(2) 年际尺度上: 流域水热的不同步性是影响流域水平衡年际分异最重要的气候季节性指数, 水热的不同步性增大, 流域的蒸散比减小, 产流增加; 降水越集中、年内变异程度越高、降水的季节性越明显, 流域蒸散比越小; 植被的季节性特征是影响流域水平衡的重要因素, 植被生长越强, 生长季长度越长, 流域的蒸散比越大, 产流系数越小。(3) 环境变量之间存在较强的自相关性, 协同演化并作用于流域蒸散发。

关键词: 蒸散发; Budyko; 气候季节性; 植被季节性; 水热耦合理论; 黄河流域

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0023-11

A study of influencing factors of spatio-temporal evapotranspiration variation across the Yellow River Basin under the Budyko framework

WANG Yaqin^{1,2,3}, YANG Wei², XING Bo⁴, LUO Yi^{1,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. China Land Survey and Planning Institute, Beijing 100035, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Evapotranspiration is an important part of water cycle, and the study of evapotranspiration is conducive to understanding the spatio-temporal variation of regional water resources. The Yellow River Basin (YRB) is located in an arid and semi-arid region, and water resources are sparse and uneven in spatio-temporal distribution, and the water issues are prominent. Analyzing the response of evapotranspiration to the changing environment in

收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-07-15

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中国科学院战略重点研究计划项目(XDA20060301); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501603)

第一作者: 王亚琴(1987-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事生态水文和遥感监测工作。E-mail: wangyq.14b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 罗毅(1966-), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要从事生态水文研究和教学工作。E-mail: luoyi@igsrr.ac.cn

the YRB and revealing the hydrologic and water resources effects of climate change, vegetation seasonality and phenological variations are of great theoretical and practical significance for the sustainable development and planning and management of regional water resources. Based on the Multivariate Adaptive Regression Splines(MARS) non-parametric model, this paper analyzes the correlation between the water-energy coupling control parameter ω and environmental variables under the Budyko framework by using the third generation normalized differential vegetation index datasets(NDVI_{3g}) developed by Global Inventory Modelling and Mapping Studies, meteorological data, soil data, land use/cover data and topographic and geomorphic data of 30 sub-basins in the YRB. The influence mechanism of changing environmental variables on evapotranspiration is discussed. The results show that (1) the spatial variation of the water balance relationship is significantly correlated with the water-energy coupling seasonality, the spatial variability of geomorphology, and the precipitation seasonality (average storm depth and coefficient of variation of precipitation). (2) On the inter-annual scale, a) the water and energy synchronicity is the most important climate seasonality that affects the inter-annual water balance: as water and energy synchronicity increases, the evapotranspiration ratio decreases and runoff yield increases; b) the more concentrated the precipitation, the higher the annual variation and the more obvious the seasonal precipitation, suggesting the smaller the evapotranspiration ratio; c) vegetation seasonality is an important factor affecting the catchment water balance: the stronger the vegetation growth and the longer the growing season, suggesting the larger the evapotranspiration ratio and the smaller the runoff yield coefficient. (3) There is a strong auto-correlation among environmental variables, which co-evolve and act on evapotranspiration.

Keywords: evapotranspiration; Budyko; climate seasonality; vegetation seasonality; water-energy coupling theory; Yellow River Basin

据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告, 1960 年以来, 全球水循环过程主要表现为大气水汽含量增加, 陆地降水模态变化、强降水事件增加的特点^[1]。在全球气候变化的影响下, 全球水循环过程加剧^[2]。同时, 由于人类活动引起的下垫面变化也对水文循环过程产生了重要影响。气候变化和人类活动的共同作用将改变水资源的时空分布^[3]。当前, 区域水文循环和水资源对变化环境的响应研究已经成为国内外水科学研究的热点之一^[4-5]。认识区域气候和流域下垫面变化与水循环过程和水资源时空分布的关联性, 对水资源管理、生态系统的可持续发展和地区经济发展具有重要的科学指导意义。

蒸散发作为水循环过程的中心环节, 是研究水循环过程的切入点^[6]。蒸散发通过联结水量平衡和能量平衡, 体现了大气系统、土壤系统和生态系统之间的相互作用^[7]。生态水文学研究中, Budyko 水热耦合平衡理论作为简单而实用的方法, 被广泛用于讨论气候-土壤-植被系统的各个分量之间相互作用对宏观水量平衡和能量平衡关系的影响^[8]。Budyko 水热耦合平衡理论方程中唯一参数反映了流域气候、植被、土壤及

地形地貌等因子的综合影响^[9-10]。植被作为下垫面条件最关键的因子, 近年来不少的研究将植被因子引入到水热耦合控制参数的解译中, 但这些研究多关注植被覆盖度、归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)或叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)^[11-14], 鲜有涉及植被季节性及植被生长季长度对流域蒸散发的影响。此外, 认识年际尺度上水热条件和植被变化对流域蒸散发的影响, 对进一步揭示变化环境下蒸散发时空变化规律具有重要意义。

黄河流域大部分地区位于干旱半干旱地区, 水资源短缺且时空分布不均。近年来, 随着植被的改善, 蒸散发增加, 径流量减小, 生态需水增加, 黄河流域的可用水资源逼近上限, 水问题突出^[15]。围绕黄河流域水循环过程和水资源问题, 国内学者们开展了大量研究, 表明气候变化和植被变化是导致水文过程和水资源变化的主要因素^[3, 5, 13, 16]。近年来, 随着黄河流域地区植被恢复和气候变化的双重影响, 植被物候发生了明显的变化, 表现为生长期提前、衰落期推迟和生长期延长等特点^[17]。在黄河流域地区研究蒸散发, 有必要进一步研究气候变化背景下, 植被物候和植被季节性变化对蒸散发的影响, 对区域水资源和生态系统的

可持续发展、水资源规划管理等提供依据。

本文基于 1982—2012 年的 GIMMS NDVI_{3g}、气象数据和径流数据, 结合 DEM 数据、土壤资料和土地利用/覆盖数据等, 构建了影响流域水热耦合平衡过程的变化环境因子指标体系, 包括地形地貌、土壤性质、气候条件及季节性特征, 并综合考虑了植被季节性和植被生长季长度等 24 个变量因子, 在此基础上分析了流域蒸散发时空变化对变化环境的响应, 以期深入了解气候变化和植被季节性和物候变化的水文水资源效应。

1 数据及研究方法

1.1 研究区概况

本文的主要研究区域为黄河中上游地区(指花园口以上部分, 面积约为 $77.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占流域面积的 97%; 以下简称黄河流域), 即黄河源头至桃花峪地区, 西起

黄河源头, 东至华北平原西部边界, 北达阴山, 南至秦岭, 东西长约 1 540 km, 南北宽约 1 100 km。地形地貌复杂, 由西向东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原 4 个地貌单元, 地势西高东低, 海拔 81 ~ 6 065 m。属大陆性气候, 东南部为半湿润气候, 中部为半干旱气候, 西北部为干旱气候。区域年平均气温约为 5.8 ℃, 呈由南向北、由东向西递减的空间格局; 多年平均降水量约为 420 mm, 由东南向西北递减; 年内分配不均匀, 主要集中在夏季, 5—10 月降水量约占全年的 70%^[16, 18-19]。根据全国生态环境 10 年变化遥感调查评估项目 2010 年的土地覆被/利用数据集, 以 2010 年数据为例, 黄河流域地表约 47.6% 的地区为草地, 林地、灌丛和农田分别占 8.4%、10.1% 和 23.8%^[20]。地表覆盖的地带性较强, 林地多分布于中游高海拔地区, 西部和西北部多分布草地(图 1)。

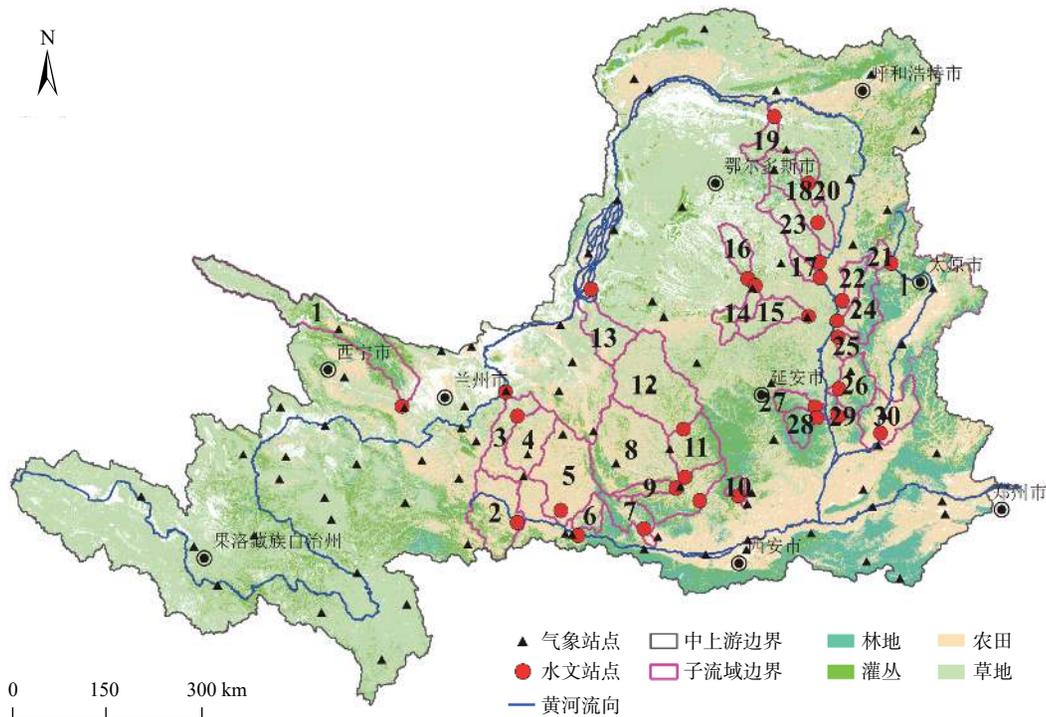


图 1 研究区位置及植被类型示意图 (2010 年)

Fig. 1 Location of the study area and vegetation types (2010)

1.2 数据来源及预处理

本文的数据主要包括:

(1) 气象数据来源于中国气象局的地面气候资料, 采用黄河流域及周边约 195 个气象站点 1982—2012 年的月值数据, 在考虑高程变异的条件下使用

ANUSPLIN 软件进行空间插值, 获得黄河流域 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 的月气象要素空间网格数据^[19]。

(2) 植被指数时间序列产品采用 GIMMS NDVI_{3g} 数据集 (<http://www.cdc.noaa.gov>), 并经非对称高斯函数 (Asymmetrical Gaussians, AG)^[21] 重建得到。

(3) 径流数据是黄河流域 30 个水文站的年径流观测数据, 来源于《中华人民共和国水文年鉴》黄河流域水文资料, 水文站及典型流域的具体位置见图 1。其中, 1991—2005 年的缺失年份由黄河水利委员会补充。

(4) 土壤数据来源于联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organisation, FAO) 构建的世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.1, HWSD) 以及南京土壤所提供的 1 : 1 000 000 中国土壤数据库。

(5) DEM 数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 数据。

(6) 土地利用数据来源于“全国生态环境十年变化

(2000 年、2010 年) 遥感调查评估”项目生产的 2010 年土地覆被/利用分类数据集^[20], 经栅格化、重采样和空间统计得到流域土地利用/覆盖结构。

1.3 研究方法

本文基于 1982—2012 年的 GIMMS NDVI_{3g}、气象数据和径流数据, 结合 DEM 数据、土壤资料和土地利用/覆盖数据等, 构建了影响流域水热耦合平衡过程的变化环境因子指标体系, 采用多元自适应回归样条 (Multivariate Adaptive Regression Splines, MARS) 模型分析了流域蒸散发时空变化对变化环境的响应。主要技术路线见图 2。

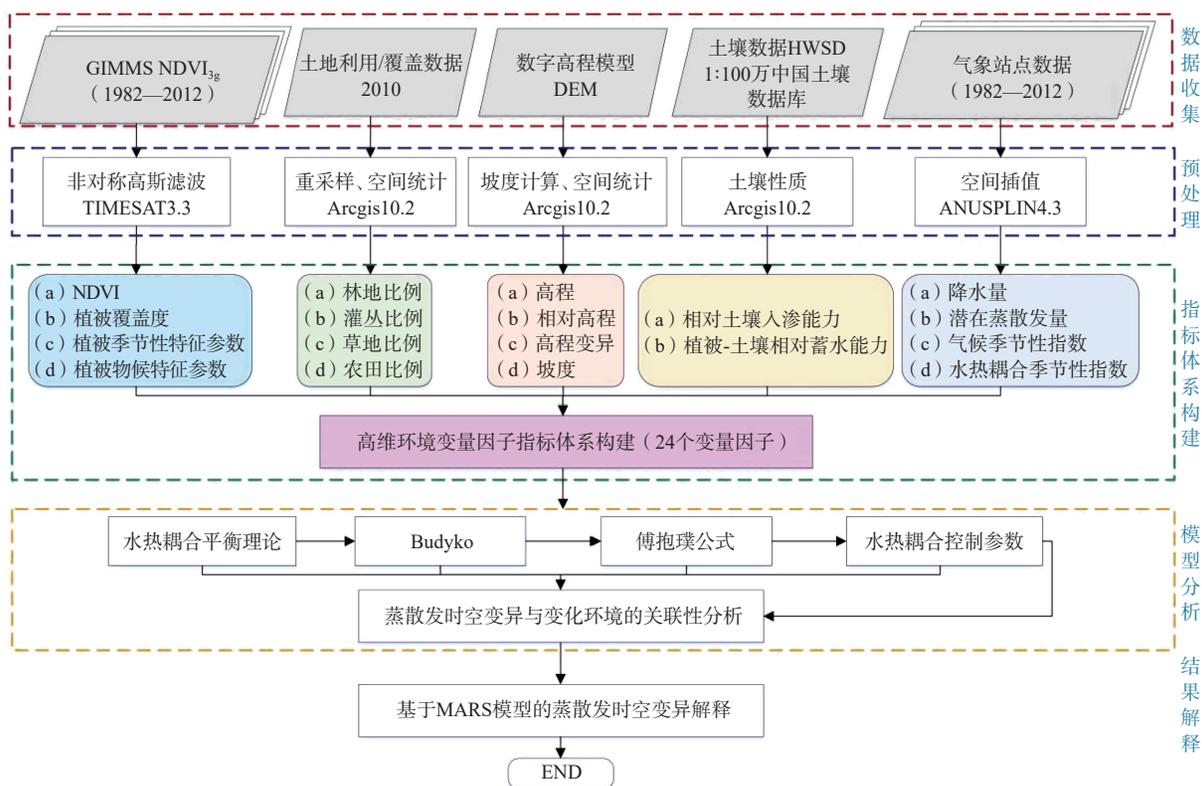


图 2 研究方法和流程

Fig. 2 Methods and the flow chart

1.3.1 水热耦合平衡理论

Budyko 理论方法既包含了气候要素对流域水平衡关系的影响, 又涵盖了表征流域特性的下垫面特征参数因子, 被广泛应用于水文循环对气候变化和人类活动的响应研究中。在 Budyko 框架下, 降水量 P 代表陆面蒸散发的水分供应状况, 能量供应条件则以潜在蒸散发 ET_0 代之^[22]。傅抱璞^[23] 根据蒸散发量随降水的变率是剩余蒸发力 ET_0-ET 和降水量 P 的函数, 而蒸

发随蒸发力的变率是剩余水量和蒸发力 ET_0 的函数, 利用量纲分析微分方法得到了根据蒸发力和降水计算陆面蒸散发量 ET 的公式:

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{ET_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{ET_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (1)$$

式中: ω ——水热耦合控制参数。

ω 代表了流域之间气候、地形地貌、植被类型和土壤等环境变化对 Budyko 曲线的影响, 体现了各环

境因子之间微观上相互作用的宏观表现。

1.3.2 基于实测资料推求水热耦合控制参数 ω

在闭合流域中, 流域水量平衡关系可表示为:

$$P = ET + Q + \Delta S \quad (2)$$

式中: Q ——流域的径流量;

ΔS ——水储量变化量。

在多年平均尺度上 ΔS 可忽略不计。在年尺度上, ΔS 主要是地下水和基流交换的结果, 不直接作用于蒸散发^[24]。因此, 在水量平衡项中并未考虑 ΔS 。在干旱地区, 年尺度上土壤水含水量变化较小, 在水量平衡项中可忽略不计。因此, 对于一个闭合流域无明显流域之间水分交换的前提下, 在年尺度上, 忽略 ΔS 是可靠的。因此, 式(2)可变为:

$$\frac{P-Q}{P} = 1 + \frac{ET_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{ET_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (3)$$

其中, P 、 Q 可通过气象观测和水文观测得到, ET_0 通过 Penman-Monteith (P-M 法)^[25-27] 计算得到, 采用逐年观测 P 、 Q 和 ET_0 推求 ω 。

1.3.3 变化环境因子指标体系构建

随着 Budyko 框架下的水热耦合平衡关系持续深入研究 and 不断发展, 用于描述和分析气候变化和植被变化对流域水热耦合控制参数影响的指标众多。如常用的植被参数因子主要包括: 植被类型^[28]、植被覆盖度^[5, 11]、NDVI^[29] 等。常用的气候条件因子主要包括潜在蒸散发和降水的季节性特征^[14]、平均暴雨深度^[10, 14]、降水集中程度^[14]、降水变异系数^[14]、降水频次^[30-31] 以及表征降水和潜在蒸散发的同步性指数^[32]。综合考虑数据的可获取性、指标的有效性和科学性, 本文共选择了 24 个变量因子构成了变化环境因子指标体系, 主要包括地形地貌、土壤条件、土地利用/覆盖结构、气候条件、植被条件和物候信息等 6 个方面共计 24 个指标因子。年际尺度上, 认为以地质年为单位的地形地貌、土壤等环境变量因子为静态变量, 共计 10 个; 而植被变化和气候变化是影响流域水热耦合控制参数 ω 年际变异的动态变量, 共计 14 个。各指标及计算方法见表 1。

表 1 变化环境因子指标体系

Table 1 List of indicators associated with the changed environment

静态变量			动态变量			
影响因素	初选表征因子	计算方法	影响因素	初选表征因子	计算方法	
地形地貌	高程/m(x_1)	DEM数据 空间统计	气候条件	水热耦合季节性指数(x_{11})	气象数据 ^[14, 18]	
	相对高程/m(x_2)			平均暴雨深度/mm(x_{12})		
	高程变异(x_3)			降水集中指数(x_{13})		
	坡度/(°)(x_4)			降水变异系数(x_{14})		
	降水季节性指数(x_{15})					
土壤条件	相对土壤入渗能力(x_5)	土壤性质 气候条件 ^[33]	植被条件	植被覆盖度(x_{16})	植被指数 时间序列 ^[21]	
	植被-土壤相对蓄水能力(x_6)			年平均NDVI(x_{17})		
土地利用/覆盖结构	林地比例(x_7)	土地利用 空间统计		非生长季NDVI(x_{18})		
	灌丛比例(x_8)			生长季NDVI最大值(x_{19})		
	草地比例(x_9)			生长季振幅(x_{20})		
	农田比例(x_{10})			生长季合成植被指数(x_{21})		
				生长季活跃累积量(x_{22})		
				生长季总累积量(x_{23})		
		物候信息		相对生长季长度(x_{24})		

1.3.4 蒸散发时空分异与变化环境的关联性分析

MARS 模型是受投影追踪法、递归分割算法和广义加性模型算法启发, 由统计学家 Friedman^[34] 首次提出。MARS 模型采用局部回归建模思想, 在数据挖掘中具有较强的泛化能力, 主要针对高维数据的非线性回归模型。自提出以来, MARS 模型被广泛应用于土地覆盖分类、地理空间分布、径流模拟等方面的研究, 并被证实具备较好的预测能力。本研究综合了多种环境变量因子, 采用 MARS 模型探测各环境变量因

子对 Budyko 水热耦合控制参数的时空分异规律的影响, 从而揭示流域蒸散发变化对气候变化和植被动态变化的响应。

2 结果

2.1 变化环境对蒸散发空间分异规律的影响

多年平均尺度上, 选择了地形地貌、土壤、植被和气候等方面共计 24 个环境变量因子。为了避免主观选择的影响和过度拟合, 24 个预测变量全部作为 MARS

模型的输入数据,并设置最小节点间隔为 6,基函数为 48(24 个变量的最小镜函数为 48),最大交互作用为 2 个变量,经过逐步前向选择变量、后向剪枝过程以及变量选择,得到模型:

$$\begin{aligned} \varpi = & 2.18 - 15 \times (1.03 - x_{14})_+ - 0.003 \times (x_3 - 224)_+ \\ & + 0.018 \times (135 - x_{12})_+ - 1.15 \times (x_{11} - 1.1)_+ \\ & + 2.52 \times (1.1 - x_{11})_+ + 24.5 \times (0.153 - x_{18})_+ \end{aligned} \quad (4)$$

最终模型的 MAE 为 0.099, RMSE 为 0.139, R^2 为 0.90。MARS 模型识别的对 ϖ 的空间变异规律有显著影响的因子及贡献率排序为: $x_{11}(100\%) > x_3(93.3\%) > x_{12}(87.8\%) > x_{14}(60.0\%) > x_{18}(\approx 0)$, 表明在多年平均尺度上,流域的水热状况、气候季节性和地形是影响 ϖ 的空间分异的主要因素。从式(4)看,植被因子的贡献率相对较低。进一步分析可知,植被与水热状况二者之间存在较高的关联性。如图 3,植被覆盖度(x_{16})随水热耦合季节性指数(x_{11})的增加呈指数衰减,这与 Eagleson^[35]提出的生态水文学理论一致,在自然状态下, Budyko 水热耦合平衡理论反映的能量平衡和水量平衡与气候、地形和植被相关,都具有一定的地带性规律。

2.2 变化环境对蒸散发年际波动的影响机制

2.2.1 ϖ 年际变化与气候和植被年际变化的关系

1982—2012 年间,典型流域中约 86.7% 的流域 ϖ 呈增大趋势,其中 46.2% 的流域(12 个流域),达到统

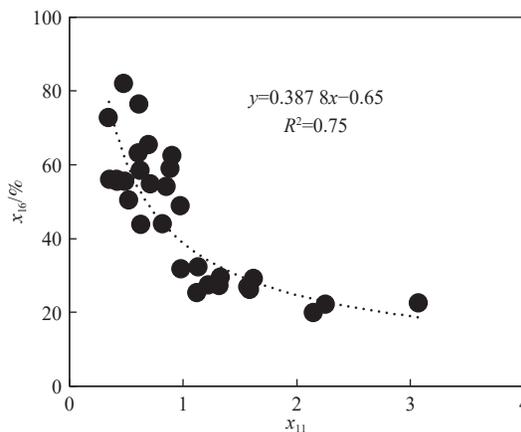


图 3 流域水热耦合季节性指数与流域植被覆盖度的关系
Fig. 3 Relationship between the water-energy coupling control parameter and vegetation coverage fraction in the watershed

计学显著水平($p < 0.05$)。 ϖ 的年际变化与植被和气候年际变化关系密切。如图 4,当非生长季 NDVI 年际变化率($\beta - x_{18}$) $< 0.013/10$ a,随着植被年际变化率增大, ϖ 的年际变化率 $\beta - \varpi$ 减小;当 x_{18} 年际变化率 $\geq 0.013/10$ a 时,随着植被年际变化率的增加, ϖ 的年际变化率增大。当降水变异系数年际变化率($\beta - x_{14}$) $< 0.047/10$ a, $\beta - \varpi$ 随 x_{14} 年际变化率增大而减小;当 $\beta - x_{14} \geq 0.047/10$ a, $\beta - \varpi$ 随 x_{14} 年际变化率增大而增大。因此,对 ϖ 年际变化的解释,需要同时考虑植被和气候变化的作用。

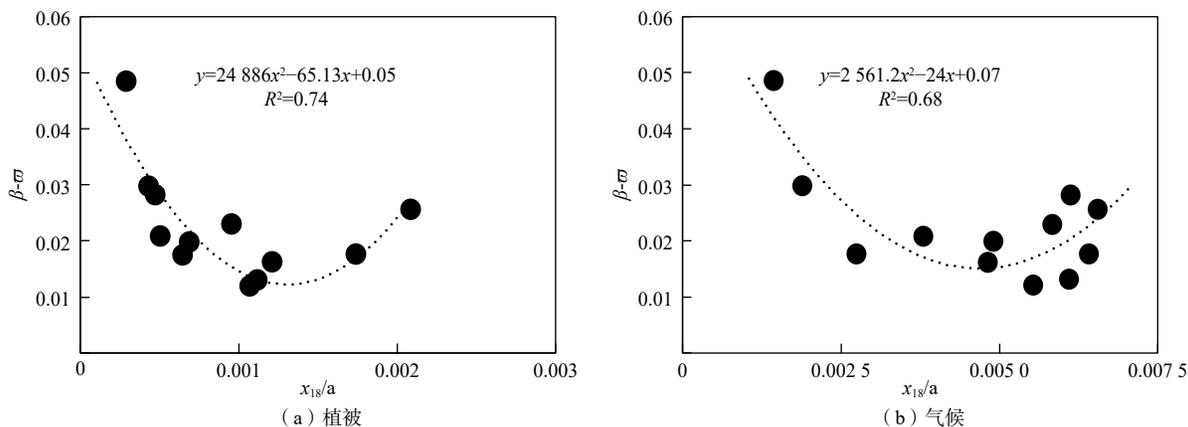


图 4 ϖ 年际变化率与植被和气候季节性年际变化率的关系
Fig. 4 Relationship between the slope of ϖ and that of vegetation seasonality and climate seasonality

2.2.2 基于 MARS 模型的蒸散发年际波动及影响机制

(1) 气候变化对蒸散发年际波动的影响

在年际尺度上,90% 的流域 ϖ 与气候季节性指数之间关系密切,但各流域之间的主导因子存在较大差异,56.7% 的流域受水热耦合季节性指数(x_{11})显著影

响,40% 的流域受平均暴雨深度(x_{12})显著影响;15% 和 25% 的流域分别受降水集中指数(x_{13})和降水变异系数(x_{14})显著影响(表 2)。相比较而言,降水季节性指数(x_{15})变化对 ϖ 年际变异影响较小,仅 6.6% 的流域存在显著影响。其中, x_{11} 、 x_{13} 和 x_{15} 与 ϖ 呈显著负相

表 2 30 个子流域的 MARS 最终模型和精度评价
Table 2 MARS final models and accuracy evaluation for 30 sub-catchments

流域号	水文站	面积/km ²	ω	MARS最终模型及节点	MAE	RMSE	R ²
1#	民和	15 342	2.56	$0.521 \times (0.861 - x_{11})_+ - 0.053 \times (x_{13} - 16.9)_+ - 103 \times (x_{20} - 0.452)_+$	0.08	0.10	0.65
2#	武山	8 080	2.53	$0.026 \times (x_{12} - 109)_+ - 95.1 \times (0.391 - x_{24})_+$	0.23	0.30	0.60
3#	靖远	5 207	3.55	$-2.57 \times (x_{14} - 0.969)_+ - 0.018 \times (92.9 - x_{12})_+$	0.15	0.18	0.65
4#	郭城驿	5 470	3.36	$-0.282 \times (x_{11} - 0.962)_+ + 0.514 \times (0.962 - x_{11})_+ - 1.96 \times (x_{14} - 1.03)_+$	0.22	0.30	0.38
5#	秦安	9 805	3.45	$-80.4 \times (0.415 - x_{24})_+ + 1.38 \times (0.653 - x_{11})_+$	0.22	0.27	0.62
6#	社棠	1846	3.70	$0.019 \times (140 - x_{12})_+ - 21.5 \times (x_{22} - 3.54)_+ - 13.6 \times (3.54 - x_{22})_+$	0.31	0.39	0.64
7#	千阳	3 505	2.86	$0.016 \times (x_{12} - 123)_+ - 21.6 \times (x_{22} - 4.57)_+ - 8.92 \times (4.57 - x_{22})_+$	0.45	0.54	0.54
8#	景村	40 281	3.25	$3.25 + 0.008 \times (x_{12} - 132)_+ - 0.015 \times (132 - x_{12})_+ - 2.76 \times (x_{14} - 1.02)_+$	0.18	0.22	0.72
9#	张河	1 506	2.96	$0.017 \times (x_{12} - 135)_+ - 0.565 \times (x_{19} - 0.573)_+$	0.28	0.35	0.45
10#	柳林	797	2.05	$0.016 \times (x_{12} - 135)_+ + 8.11 \times (0.87 - x_{14})_+$	0.49	0.62	0.41
11#	雨落坪	19 019	3.35	$0.020 \times (x_{12} - 124)_+ - 3.89 \times (x_{14} - 0.982)_+$	0.38	0.53	0.51
12#	庆阳	10 603	2.84	$-0.588 \times (x_{11} - 0.914)_+ + 2.2 \times (0.902 - x_{13})_+$	0.19	0.25	0.53
13#	郭家桥	5 216	1.80	$127 \times (3.15 - x_{11}^*)_+ \times (x_{20}^* - 0.14)_+ + 284 \times (3.15 - x_{11}^*)_+ \times (0.14 - x_{20}^*)_+$	0.12	0.15	0.70
14#	横山	2 415	2.74	$-0.191 \times (x_{11} - 0.892)_+ + 0.775 \times (0.892 - x_{11})_+ - 51.5 \times (0.327 - x_{19})_+$	0.15	0.19	0.71
15#	绥德	3 893	2.14	$0.446 \times (1.37 - x_{11})_+ + 10.7 \times (x_{19} - 0.36)_+ + 0.064 \times (18.4 - x_{13})_+$	0.10	0.12	0.83
16#	韩家峁	2 452	1.93	$0.154 \times (2.24 - x_{11})_+ + 0.004 \times (x_{12} - 93.5)_+ - 0.009 \times (93.5 - x_{12})_+ + 0.89 \times (1.24 - x_{14})_+$	0.07	0.08	0.85
17#	申家湾	1 121	2.38	$6.81 \times (x_{22} - 1.35)_+ - 0.181 \times (x_{11} - 1.02)_+$	0.16	0.21	0.56
18#	神木	7 298	2.48	$17.5 \times (x_{19} - 0.325)_+ - 46.2 \times (0.325 - x_{19})_+ - 0.262 \times (x_{11} - 1.04)_+$	0.17	0.22	0.65
19#	龙头拐	1 145	1.96	$99.7 \times (x_{18} - 0.127)_+ + 66.3 \times (0.127 - x_{18})_+$	0.19	0.24	0.36
20#	新庙	1 527	2.01	$5.36 \times (x_{23} - 3.04)_+$	0.20	0.25	0.77
21#	上静游	1 190	2.59	$0.755 \times (1.02 - x_{11})_+ - 0.096 \times (x_{13} - 18.7)_+$	0.20	0.25	0.48
22#	林家坪	1873	2.76	$1.32 \times (0.792 - x_{11})_+ - 14.7 \times (x_{13}^* - 18)_+ \times (x_{18}^* - 0.175)_+$	0.22	0.26	0.55
23#	高家川	3 253	1.64	$-0.201 \times (x_{11} - 1.83)_+ + 33.7 \times (x_{20} - 0.152)_+ + 0.004 \times (x_{12} - 121)_+$	0.09	0.11	0.76
24#	后大成	4 102	2.19	$0.655 \times (0.966 - x_{11})_+ + 38.9 \times (x_{24} - 0.421)_+ - 16.6 \times (x_{18} - 0.219)_+$	0.16	0.19	0.59
25#	裴沟	1 023	2.59	$1.04 \times (1 - x_{11})_+$	0.31	0.39	0.45
26#	大宁	3 992	3.07	$1.95 \times (x_{22} - 3.52)_+ - 0.371 \times (x_{11} - 0.55)_+$	0.19	0.26	0.48
27#	新市河	1 662	3.69	$0.011 \times (x_{12} - 130)_+ - 0.018 \times (130 - x_{12})_+ - 3.78 \times (x_{14} - 1.01)_+$	0.20	0.24	0.74
28#	大村	2 142	3.28	$-106 \times (x_{20} - 0.456)_+$	0.24	0.32	0.31
29#	吉县	436	2.63	$1.11 \times (0.797 - x_{11})_+ + 116 \times (x_{24} - 0.456)_+ + 0.006 \times (x_{12} - 119)_+$	0.30	0.37	0.62
30#	柴庄	33 800	3.09	$-5.72 \times (x_{15} - 0.795)_+ + 0.019 \times (x_{12} - 124)_+ - 2.87 \times (x_{12} - 124)_+ \times (0.342 - x_{20}^*)_+$	0.36	0.50	0.49

注: 变量 x_n^* 表示2个相互作用的变量。 $(x_n - a)_+$ 指括号内值恒正, 如果为负值, 则括号内该项为0; 其中 a 为节点值。

关系; 表明流域水热状况越不同步, 降水的季节性变化越大, 年内降水越集中, ω 减小, 从而产流比(Q/P)增大, 蒸散比(ET/P)减小。

(2) 植被变化对蒸散发年际变异的影响

在年际尺度上, 60% 的流域 ω 与植被季节性特征指数显著相关。其中, 生长季 NDVI 最大值(x_{19})、相对生长季长度(x_{24})和生长季总累积量(x_{23})与 ω 关联密切(表 2): 生长季最大值越大、相对生长季长度越长、生长季累积量越高, ω 越大, 流域的产流系数越小, 蒸散比越大。总的来说, 植被变化与 ω 年际变异之间的关系相对复杂, 与流域的土地利用结构相关。如千阳站所在的流域, 结果显示平均暴雨深度(x_{12})和生长季活跃累积量(x_{22})是影响该流域 ET 年际变异的主要因

子, 当 $x_{22} \geq 4.57$, ω 与 x_{12} ($R=0.51, p<0.05$) 和 x_{22} ($R=0.69, p<0.01$) 呈显著正相关; 当 $x_{22} < 4.57$, ω 仅与 x_{22} ($R=0.59, p<0.05$) 呈显著正相关。类似地, 在社棠站所在的流域, 当 $x_{22} < 3.54$, ω 与 x_{12} ($R=0.81; p<0.01$) 和 x_{22} ($R=0.52; p<0.05$) 显著正相关; 当 $x_{22} \geq 3.54$, ω 仅与 x_{22} ($R=-0.63; p<0.05$) 显著负相关。两个流域为毗邻流域, 可近似认为水热条件一致, 但二者土地利用结构存在明显差异, 如 7#流域农田和林地分别占 30.3% 和 34.7%, 而社棠站所在的流域分别为 57.7% 和 11.2%。这可能是导致当生长季活跃累积量大于节点值时, 生长季活跃累积量与 ω 的关系相反的原因。另外, 民和站所在的流域地表覆盖以草地为主, 生长季振幅(x_{20})呈减小趋势, 表明该流域的植被呈退化趋势。当 $x_{20} > 0.452$ 时,

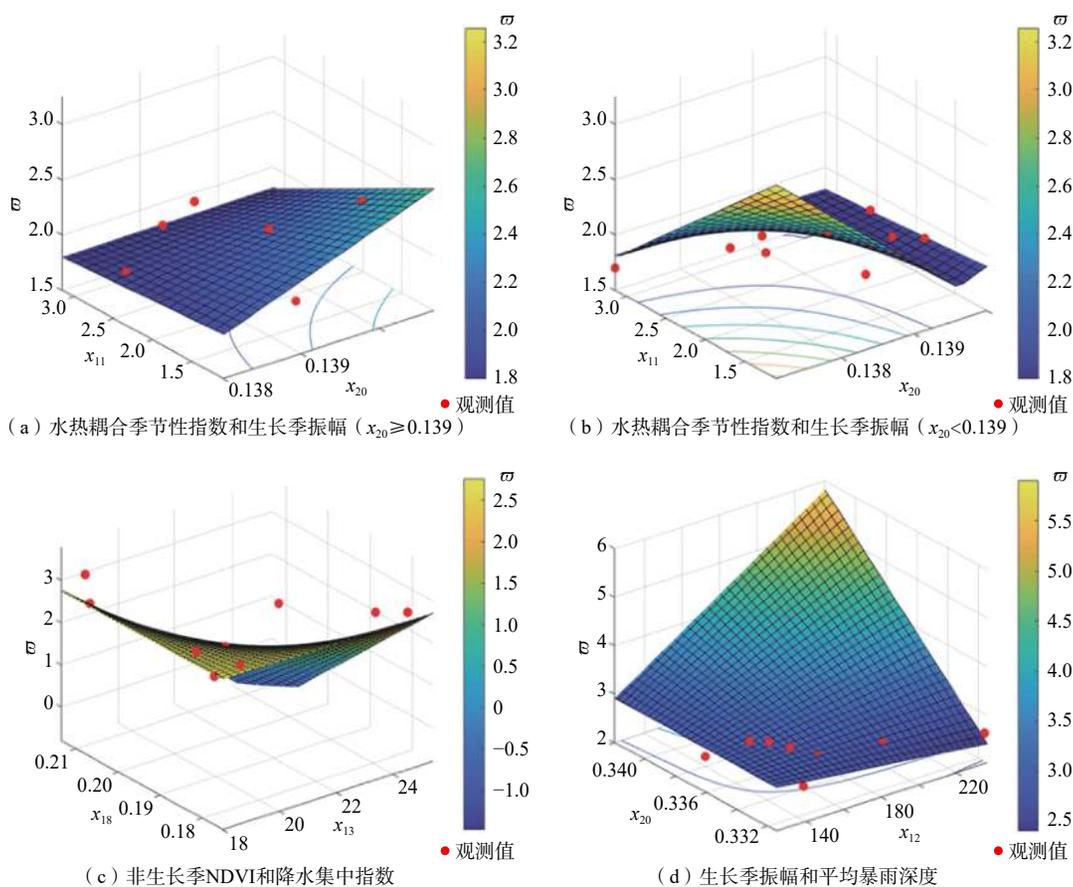


图 5 植被-气候相互作用对 ̑ 年际变异的影响

Fig. 5 Influence of vegetation-climate interaction on inter-annual variation of ̑

x_{20} 与 $\bar{\omega}$ 呈显著负相关 ($R=-0.70; p<0.05$), 表明草地的退化可能导致蒸散比增加。总的来说, 植被季节性变化对流域蒸散发具有不可忽视的作用。

(3) 气候-植被变化相互作用

在 30 个流域中共识别出 3 组气候-植被之间相互作用, 见图 5, 即郭家桥 (13#)、林家坪 (22#) 和柴庄 (30#) 等水文站所在的流域, 相互作用的气候-植被因子分别为: 水热耦合季节性指数 (x_{11}) 和生长季振幅 (x_{20})、降水集中指数 (x_{13}) 和非生长季 NDVI (x_{18})、平均暴雨深度 (x_{12}) 和生长季振幅 (x_{20}) (表 2)。

关于 MARS 最终模型的 3 组气候-植被之间的相互作用解释如下:

①对植被覆盖度相对低(约为 21.6%)的郭家桥水文站所在流域来说, 当水热耦合季节性指数 < 3.15 , 且非生长季 NDVI ≥ 0.14 时, $\bar{\omega}$ 随非生长季 NDVI 而增大, 植被的增加将导致蒸散比的增加; 反之, 当非生长季 NDVI < 0.14 时, $\bar{\omega}$ 随之减小, 植被的增加将导致蒸散比的减小。

②降水集中指数和生长季振幅: 当降水集中指数

> 18.0 , 且生长季振幅 > 0.175 时, 年内降水越集中, 植被的基准值越大, 流域的产流系数越大。

③平均暴雨深度和生长季振幅: 当平均暴雨深度 > 124 , 且生长季振幅 < 0.342 时, 随着平均暴雨深度增加和植被生长季振幅增大, $\bar{\omega}$ 随之增大, 导致流域蒸散比的增加。总的来说, 气候和植被因子之间存在高度相关性, 二者协同演化共同影响流域蒸散发。

3 讨论

本研究选择了地形地貌、土壤、植被和气候相关的 24 个环境变量因子, 分别在多年尺度和年际尺度上, 采用 MARS 模型分析了环境变量因子对 Budyko 水热耦合控制参数的时空分异规律的影响, 探讨了流域蒸散发变化对气候变化和植被动态变化的响应, 结果表明气候季节性和植被季节性是影响蒸散发时空分布的重要因素, 这与以往的研究结论一致^[13-14]。水热耦合季节性指数表征流域降水和潜在蒸散发之间的不匹配性, 研究发现流域水热状况越不同步, 降水的季节性变化越大, 年内降水越集中, 将导致蒸散发

量越小,与 Fu 等^[36]关于降水对 Budyko 曲线的影响认识一致。同时,在分析流域平均暴雨深度对流域蒸散发的影响时,发现平均暴雨深度越大,大部分流域的降水倾向于产生较多的蒸散发,产流分配较少。以往的研究认为,干旱区平均暴雨深度越大,蒸散比越大;而在湿润地区,则倾向于产生较多的径流分配,蒸散发较少^[14]。黄河流域地处干旱半干旱地区,平均暴雨深度与水热耦合控制参数 ω 之间呈正相关,较大的平均暴雨深度会导致蒸散发增加的结论是可靠的。此外,研究证实气候季节性和植被季节性变量并非独立影响流域蒸散发,环境变量之间存在高度关联性,并相互作用共同影响流域蒸散发时空分布。如在多年平均尺度上,土壤因子对 ω 的空间分异影响较小,这可能是由于土壤本身是在区域气候、植被、地形和母质条件共同作用下发育而成,它们之间存在高度相关性。这也支持了以往研究认为土壤因子可以用植被和地形因子来近似表达的观点^[13]。因此,认识环境变量之间的相互作用关系,明确环境变量因子之间的相关性,对准确理解气候和植被动态及季节性变化对流域蒸散发的影响具有重要意义。自 1982—2012 年间,黄河流域总体呈现植被改善、生长季长度延长以及水热耦合季节性下降的趋势,导致 Budyko 假设中唯一表征流域下垫面的参数 ω 有增大趋势,从而流域的蒸散比增大,降水更倾向以蒸散发的形式耗散。

4 结论

(1)流域蒸散发的空间变异与流域水热耦合季节性、地形地貌空间变异性、降水的季节性特征(平均暴雨深度和降水变异系数)显著相关。流域水热耦合季节性与植被覆盖度呈显著负相关,气候和植被变量间的高度自相关导致在多年平均尺度上,植被对 ω 空间分异的贡献偏小。

(2)年际尺度上,气候季节性变化与流域水平衡有直接关系。流域水热的不同步性是影响流域水平衡年际分异最重要的气候季节性指数,水热的不同步性增大,将导致流域的蒸散比减小,产流增加。干旱半干旱地区,降水越集中、年内变异程度越高、降水的季节性越明显, ω 越小,流域蒸散比越小。与其它降水季节性指数相反,平均暴雨深度越大, ω 越大,流域的蒸散比越大。

(3)年际尺度上,植被的季节性特征是影响流域水平衡的重要因素。植被生长越强,生长季长度越长,流域的蒸散比越大,产流系数越小。不同植被季

节性特征指数动态变化与 ω 的年际变化之间的关系相对复杂,与流域的土地覆被/利用结构相关。

(4)环境变量之间存在较强的自相关性,协同演化并作用于流域蒸散发。干旱半干旱地区,植被生长受降水限制,当流域降水增加,且降水在年内分布较均匀时,植被生长状况较好,二者共同作用流域水循环过程,导致流域蒸散比增大,产水系数减小。

参考文献 (References) :

- [1] FIELD C, BARROS V, STOCKER T, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge University Press, 2012:1-19..
- [2] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change 2013: The physical science basis, intergovernmental panel on climate change, working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5) [M]. New York: Press CU Editor, 2013.
- [3] 刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323 - 330. [LIU Changming, ZHANG Xuecheng. Causal analysis on actual water flow reduction in the mainstream of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 323 - 330. (in Chinese with English abstract)]
- [4] ZHAO Yifei, ZOU Xinqing, ZHANG Jianxiang, et al. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau Region of China, during 1961-2012[J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 196 - 206.
- [5] GAO Xuerui, SUN Miao, ZHAO Qi, et al. Actual ET modelling based on the Budyko framework and the sustainability of vegetation water use in the loess plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1550 - 1559.
- [6] 王文科. 陆域蒸散发及资源环境效应[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): I - II. [WANG Wenke. Terrestrial evapotranspiration and its effects on resources and environment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): I - II. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王周锋,王文科,李俊亭. 蒸散发水源组成与测定方法研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 1 - 9. [WANG Zhoufeng, WANG Wenke, LI Junting. A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration[J].

- [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2021, 48(3): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [8] WANG Weiguang, ZOU Shan, SHAO Quanxi, et al. The analytical derivation of multiple elasticities of runoff to climate change and catchment characteristics alteration[J]. [Journal of Hydrology](#), 2016, 541: 1042 – 1056.
- [9] DONOHUE R J, RODERICK M L, MCVICAR T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model[J]. [Journal of Hydrology](#), 2012, 436/437: 35 – 50.
- [10] LI Hongyi, SIVAPALAN M, TIAN Fuqiang, et al. Functional approach to exploring climatic and landscape controls of runoff generation: 1. Behavioral constraints on runoff volume[J]. [Water Resources Research](#), 2014, 50(12): 9300 – 9322.
- [11] YANG Dawen, SHAO Weiwei, YEH P J F, et al. Impact of vegetation coverage on regional water balance in the nonhumid regions of China[J]. [Water Resources Research](#), 2009, 45(7).
- [12] YE Sheng, LI Hongyi, LI Shuai, et al. Vegetation regulation on streamflow intra-annual variability through adaptation to climate variations[J]. [Geophysical Research Letters](#), 2015, 42(23): 10307 – 10315.
- [13] NING Tingting, LI Zhi, LIU Wenzhao. Vegetation dynamics and climate seasonality jointly control the interannual catchment water balance in the Loess Plateau under the Budyko framework[J]. [Hydrology and Earth System Sciences](#), 2017, 21(3): 1515 – 1526.
- [14] XING Wanqiu, WANG Weiguang, SHAO Quanxi, et al. Identification of dominant interactions between climatic seasonality, catchment characteristics and agricultural activities on Budyko-type equation parameter estimation[J]. [Journal of Hydrology](#), 2018, 556: 585 – 599.
- [15] FENG Xiaoming, FU Bojie, PIAO Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. [Nature Climate Change](#), 2016, 6(11): 1019 – 1022.
- [16] LIANG Wei, BAI Dan, WANG Feiyu, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. [Water Resources Research](#), 2015, 51(8): 6500 – 6519.
- [17] WANG Yaqin, LUO Yi, SHAFEEQUE M. Interpretation of vegetation phenology changes using daytime and nighttime temperatures across the Yellow River Basin, China[J]. [Science of the Total Environment](#), 2019, 693: 133553.
- [18] WANG Yaqin, LUO Yi, SHAFEEQUE M. Using a Gaussian function to describe the seasonal courses of monthly precipitation and potential evapotranspiration across the Yellow River Basin, China[J]. [Journal of Hydrometeorology](#), 2019, 20(11): 2185 – 2201.
- [19] 王亚琴, 孙林, 李洪宇等. 黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集(1980–2015)[J]. [全球变化数据学报](#), 2022, 6(1): 25 – 36. [WANG Yaqin, SUN Lin, LI Hongyu, et al. Monthly/8km grid meteorological dataset at the middle and upper reaches of the Yellow River Basin of China (1980–2015)[J]. [Journal of Global Change Data & Discovery](#), 2022, 6(1): 25 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 吴炳方, 钱金凯, 曾源, 等. 中华人民共和国土地覆被地图集(1 : 10 000 000)[M]. 北京: 中国地图出版社, 2017. [WU Bingfang, QIAN Jinkai, ZENG Yuan, et al. Land cover atlas of the People's Republic of China (1 : 10 000 000)[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [21] JONSSON P, EKLUNDH L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. [IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing](#), 2002, 40(8): 1824 – 1832.
- [22] BUDYKO M I, MILLER EEEB D H. Climate and life [M]. New York: Academic, 1974.
- [23] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. [大气科学](#), 1981, 5(1): 23 – 31. [FU Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. [Scientia Atmospherica Sinica](#), 1981, 5(1): 23 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [24] DU C, SUN F, YU Jingjie, et al. New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions[J]. [Hydrology and Earth System Sciences](#), 2015, 20: 393 – 409.
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[C]//Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture, Organization. Rome, 1998: 56.
- [26] 李云凤, 王文科, 王国庆, 等. 黄河源区潜在蒸散量估算方法适用性分析[J]. [水文地质工程地质](#), 2021, 48(3): 10 – 19. [LI Yunfeng, WANG Wenke, WANG Guoqing, et al. The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the headwater area of the Yellow River[J]. [Hydrogeology & Engineering](#)

- [Geology](#), 2021, 48(3): 10 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 等. 西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究 [J]. [水文地质工程地质](#), 2021, 48(3): 20 – 30. [YIN Xiaowei, WU Yiping, ZHAO Wenzhi, et al. Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2021, 48(3): 20 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 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.
- [29] ABATZOGLOU J T, FICKLIN D L. Climatic and physiographic controls of spatial variability in surface water balance over the contiguous United States using the Budyko relationship[J]. [Water Resources Research](#), 2017, 53(9): 7630 – 7643.
- [30] MILLY P C D. Climate, interseasonal storage of soil water, and the annual water balance[J]. [Advances in Water Resources](#), 1994, 17(1/2): 19 – 24.
- [31] SHAO Quanxi, TRAYLEN A, ZHANG Lu. Nonparametric method for estimating the effects of climatic and catchment characteristics on mean annual evapotranspiration[J]. [Water Resources Research](#), 2012, 48(3): W03517.
- [32] DE LAVENNE A, ANDRÉASSIAN V. Impact of climate seasonality on catchment yield: A parameterization for commonly-used water balance formulas[J]. [Journal of Hydrology](#), 2018, 558: 266 – 274.
- [33] 孙福宝. 基于Budyko水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007. [SUN Fubao. Study on watershed evapotranspiration based on the budyko hypothesis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [34] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. [Econometrica](#), 1991, 59(3): 637.
- [35] EAGLESON P S. Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- [36] FU Jianyu, WANG Weiguang. On the lower bound of Budyko curve: the influence of precipitation seasonality[J]. [Journal of Hydrology](#), 2019, 570: 292 – 303.

编辑: 张若琳