# 大黑河流域蒸散发的时空变化及其 影响因素

#### 杨雅惠

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年2月11日; 录用日期: 2025年3月4日; 发布日期: 2025年3月13日

#### 摘要

本研究基于MOD16A2遥感数据及气象观测资料,系统分析了2001~2022年内蒙古大黑河流域蒸散发 (ET)的时空变化特征及其驱动机制。通过Sen斜率估计、Mann-Kendall趋势检验、BFAST突变检测、Hurst 指数及Sobol敏感性分析等方法,揭示了ET的时空分异规律及其主控因子。结果表明: (1) 2001~2022 年,大黑河流域ET呈显著波动上升趋势,多年平均值为255.82 mm/a,年际波动幅度达191.2 mm; ET 呈现明显季节性差异,夏季最高(140.2 mm/a),冬季最低(19.02 mm/a),且夏季增长速率最快(3.55 mm/a)。BFAST算法检测到ET在2007年发生突变,突变后增速由2.10 mm/a升至5.56 mm/a,可能与 生态修复工程及气候变化相关。(2) 空间上,ET高值区集中于中部山区及水域,低值区位于西南部低海 拔及北部高海拔区域;86.25%的区域ET呈显著增加趋势,主要分布于流域东部及西南部。(3) Hurst指 数表明,89.71%的区域未来ET变化可能呈现反持续性,与历史趋势相反。(4) 驱动因子分析显示,降水 (一阶效应47.6%)和气温(29.9%)是ET变化的主要驱动因素,风速次之,而日照时数与土壤湿度影响微 弱。研究表明,大黑河流域ET的时空分异受气候变化与生态修复措施的双重调控,研究结果可为干旱半 干旱地区水资源优化管理及生态恢复提供科学依据。

#### 关键词

大黑河流域, 蒸散发, 时空变化, 驱动因子

## Temporal and Spatial Variations of Evapotranspiration and Its Influencing Factors in the Dahei River Basin

#### Yahui Yang

College of Geographic Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Feb. 11<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 4<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 13<sup>th</sup>, 2025

#### Abstract

This study systematically analyzed the temporal and spatial characteristics of evapotranspiration (ET) and its driving mechanism in the Dahei River Basin of Inner Mongolia from 2001 to 2022 based on MOD16A2 remote sensing data and meteorological observations. The temporal and spatial variability of ET and its main controlling factors were revealed by Sen slope estimation, Mann-Kendall trend test, BFAST mutation detection, Hurst index and Sobol sensitivity analysis. The results showed that: (1) from 2001 to 2022, the ET in the Dahei River Basin showed a significant fluctuating upward trend, with a multi-year average value of 255.82 mm/a and an interannual fluctuation of 191.2 mm; the ET showed obvious seasonal differences, with the highest in the summer (140.2 mm/a) and the lowest in the winter (19.02 mm/a), and with the fastest growth rate in the summer (3.55 mm/a). The BFAST algorithm detected a mutation in ET in 2007, and the growth rate increased from 2.10 to 5.56 mm/a after the mutation, which may be related to the ecological restoration project and climate change. (2) Spatially, the high value area of ET was concentrated in the central mountainous area and watershed, and the low value area was located in the southwestern lowelevation and northern high-elevation areas; 86.25% of the area showed a significant increasing trend of ET, which was mainly distributed in the eastern and southwestern parts of the watershed. (3) The Hurst index showed that 89.71% of the regions may show anti-persistence in the future ET change, which is opposite to the historical trend. (4) Driving factor analysis showed that precipitation (47.6% of first-order effect) and air temperature (29.9%) were the main drivers of ET change. followed by wind speed, while sunshine hours and soil moisture had weak effects. The study showed that the temporal and spatial variability of ET in the Dahei River Basin was regulated by both climate change and ecological restoration measures, and the results of the study can provide a scientific basis for the optimal management of water resources and ecological restoration in arid and semi-arid regions.

#### **Keywords**

Dahei River Basin, ET, Temporal and Spatial Variability, Driving Factors

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

## 1. 引言

蒸散发(Evapotranspiration, ET)是指地表水分通过蒸发和植物蒸腾进入大气的过程,作为陆气水循环 和地表能量平衡的重要组成部分,在全球水循环中发挥着关键作用[1]-[3],尤其在干旱和半干旱地区,ET 不仅调控水热交换过程,还直接影响区域水资源的可用性和生态系统稳定性。近年来,受气候变化和人 类活动的影响,水资源短缺和生态环境问题日益突出,使得 ET 的定量研究和时空格局分析愈发重要。准 确解析 ET 的时空变化特征对于优化水资源管理、提高流域水分利用效率,维护生态系统健康具有重要 意义。传统的蒸散发 ET 监测主要依赖于单点观测仪器(如涡度相关系统、称重式蒸渗仪和蒸发皿等)进行 计算。然而,这类方法虽然在小尺度上具有较高精度,但其空间代表性较弱,难以有效刻画区域尺度乃 至全球尺度的蒸散发特征[4]。此外,点尺度的 ET 观测往往受限于观测站点的稀疏分布、数据获取成本 较高,以及长期观测难以维持等问题,使其难以满足大范围、长时间序列 ET 研究的需求。近年来,遥感 技术凭借其覆盖范围广、时效性强和周期性等优势,是区域乃至全球尺度蒸散发估算的主要手段。基于 散发研究得以实现[5][6]。目前,国内外遥感反演 ET 的研究主要集中在区域尺度蒸散发遥感估算方法的 改进和遥感数据产品的开发[7],其中,较为经典的遥感 ET 估算方法包括地表能量平衡模型(Surface Energy Balance System, SEBS)[8]、(Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL)[9]以及 Penman-Monteith 公式(P-M 公式)[10]等,这些方法利用不同的物理机制和遥感参数,如地表温度、植被指数、气象数据等, 进行 ET 的反演计算,并广泛应用于不同区域和生态系统中。

在遥感 ET 产品方面,随着遥感技术的发展,多个高时空分辨率的蒸散发数据集已被开发并用于全球 或区域尺度的水资源管理与生态监测。例如,AVHRR-NOAA 蒸散发产品[11]提供了基于 NOAA 卫星的 长时间序列 ET 数据,适用于全球气候变化研究、LSA-SAFMSG/ET 产品[12]主要依托 MSG 卫星的观测 数据,为欧洲及非洲地区提供高时间分辨率的 ET 估算、而 MOD16/ET 则是当前应用最广泛的全球陆地 蒸散数据集之一[13] [14]。其中,MOD16 蒸散发产品由美国国家航空航天局(NASA)于 2011 年发布,基 于 Penman-Monteith 方程(P-M 方程)和中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据构建而成。该产品利用 MODIS 获取的地表植被参数(如叶面积指数、植被覆盖度等)以及气象再分析数据(如辐射、风速、湿度等)进行 ET 反演,并在全球范围内得到广泛应用[15]。MOD16 数据集的精度已通过全球通量观测塔(FLUXNET)数据 验证,整体模拟精度达到 86% [15],能够较为准确地反映不同生态系统的蒸散发过程。目前,该数据集 被广泛用于水资源评估、生态系统碳循环研究及全球气候变化影响评估[16]-[18]。

大黑河流域位于内蒙古自治区,是典型的生态脆弱干旱半干旱地区,因其特殊的地理、气候和土壤 条件,加之长期的过度耕种,该区域已成为中国水土流失和土地退化最严重的区域之一。自1999年起, 国家启动了一系列大规模生态修复工程,包括退耕还林(草)、荒山造林等措施,这些生态修复策略在改善 这一地区的植被覆盖的同时,也对区域蒸散发(ET)的时空变化产生了深远影响。然而,目前关于这些修 复措施如何影响 ET 的具体性质、程度及其作用机制仍缺乏系统研究。在干旱半干旱气候条件下,水资源 的有效管理对于农业生产和生态安全至关重要。本研究旨在深入分析退耕还草政策背景下 ET 的时空变 化及其驱动因子,以量化生态修复措施对区域 ET 的影响。通过收集和分析该区域的遥感数据、气象数据 及生态水文数据,探索自然条件与人类活动对地表蒸散量的影响。深入理解区域蒸散发的时空变化特征, 将有助于科学分配水资源、加强生态系统水源保护,并提高水资源的利用效率,为区域水资源管理和生 态恢复提供理论依据。本研究利用 MODSI 数据,结合多种时间序列分析方法,系统探讨了内蒙古地区 ET 的时空变化特征及其驱动机制。在分析方法上,本研究采用了创新的时间序列分析技术,不仅探讨了 ET 的长期趋势,还识别了季节性变化和年际波动的模式。首先,通过 Sen 斜率估计法和 Mann-Kendall 趋 势检验,对 ET 的时间序列进行定量评估,以检测 ET 变化的显著性及其统计学趋势。其次,引入 Breaks for Additive Seasonal and Trend (BFAST)算法,以识别 ET 时间序列中的突变点,深入揭示生态修复及气 候变化对 ET 动态的影响,为理解 ET 变化提供了新的分析视角。此外,为了预测未来 ET 变化趋势,本 研究计算了 Hurst 指数,以衡量 ET 时间序列的长期自相关性,从而为水资源管理和生态修复策略的制定 提供科学依据。同时,本研究通过敏感性分析探讨了 ET 对关键气象变量(如温度、降水、风速等)的响应 关系,进一步揭示了气候变化对 ET 的潜在影响。为确保 ET 估算的高精度和可靠性,研究过程中结合了 多种验证手段,以提升结果的可信度。

本研究的结果不仅为内蒙古地区 ET 的时空变化提供了新的科学证据,还为该地区乃至类似生态环 境下的水资源管理、生态恢复与可持续发展提供了重要的决策支持。

#### 2. 材料与方法

#### 2.1. 研究区概况

大黑河流域是黄河一级支流,位于内蒙古自治区内,其源头位于内蒙古自治区乌兰察布市卓资县十

八台镇北营子村(E112°49'18.8", N40°47'29.8"),由东北向西南流经贯穿内蒙古卓资县、呼和浩特市赛罕区、 玉泉区、土默特左旗和托克托县等地,最终在托克托县河口村(E111°09'44.7", N40°13'35.8")。大黑河干流 全长 238 km,流域总面积 18,441 km<sup>2</sup>,河源高程 1686.5 m,河口高程 986.7 m,整体呈北高南低的地势特 征(见图 1)。地形结构表现为由山区向平原呈台阶式下降,北部以山地和丘陵地貌为主,而南部逐渐过渡 为河谷平原,地形起伏较大,影响了区域水文过程的空间分布。大黑河流域属于中温带半干旱大陆性气 候,气候干旱,降水时空分布不均。多年平均气温 6.2℃,年均降水量 394.7 mm,主要集中在夏季(6~8 月),降水变率较大,易受极端气候事件影响。流域多年平均径流深 27.0 mm,受降水变率及蒸散发(ET) 影响显著,水资源供需矛盾较为突出。



图 1. 研究区概况图

#### 2.2. 数据来源

本研究采用 MOD16A2 全球陆地蒸散发产品,该数据集由 Monteith 等人基于 Penman-Monteith 公式 计算全球陆地表面蒸散量而形成,广泛应用于全球及区域尺度的蒸散发研究。MOD16 产品主要包括实际 地表蒸散发(ET)、潜在地表蒸散发(PET)、潜热通量(LE)和潜在热通量(PLE),空间分辨率为 500 m,时间 分辨率包括 8 日合成(MOD16A2)和年合成(MOD16A3)。本研究基于 Google Earth Engine (GEE)平台计算 MOD16 产品的月尺度 ET 数据,以提高数据处理效率并确保时空一致性。气象数据来源于中国气象数据 网(<u>https://data.cma.cn/</u>),包含 2001~2022 年内蒙古气象站点的逐日观测数据,数据类型包括:包括逐日最 高、最低温度、风速、降水、相对湿度、日照时数。

#### 2.3. 研究方法

#### 2.3.1. Theil-Sen 趋势和 Mann-Kendall 检验

Sen 斜率[19]和非参数 Mann-Kendall [20]显著性检验是分析时间序列数据长期趋势的重要方法。Sen

斜率用于计算时间序列数据的趋势变化量,可以识别线性趋势,从而推断数据的未来变化。而 Mann-Kendall (M-K)检验用于检测时间序列数据中的趋势变化是否显著,特别是评估是否存在上升或下降趋势。 在本研究中,Sen 斜率是分析 ET 时间序列数据趋势变化的指标,其计算方法如下:

$$S_{ET} = \text{median} \frac{ET_j - ET_i}{j - i}, 2000 \le i \le j \le 2022$$

其中, median 表示中值函数, *ET<sub>i</sub>*和 *ET<sub>i</sub>*分别表示 *j*和 *i*的时间序列中 *ET*的数据值。其中正的 *S<sub>ET</sub>*表示增加的趋势, 而负的 *S<sub>ET</sub>*表示减少的趋势。Mann-Kendall 检验统计量的计算过程如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sign(ET_{j} - ET_{i})$$
$$sign(ET_{j} - ET_{i}) = \begin{cases} +1ET_{j} - ET_{i} > 0\\ 0ET_{j} - ET_{i} = 0\\ -1ET_{j} - ET_{i} < 0 \end{cases}$$

当 n ≥ 10 时, S 近似遵循标准正态分布,检验统计量 Z 用于趋势检测:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, S > 0\\ 0, S = 0\\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, S < 0 \end{cases}$$

其中 Var 表示方差。显著性检验采用  $\alpha = 0.05$  的显著性水平,表明当|Z| < 1.96时,趋势变化被认为不显著。

#### 2.3.2. BFAST 算法

BFAST 算法是由 J. Verbesselt [21]人在 2010 年提出,它通过迭代时间序列分析的方法,将时间序列 数据分解为季节组分、趋势组分和残差组分[22]。该算法尤其适用于半干旱地区的遥感影像时间序列的分 析,在这些地区,BFAST 算法能有效地识别时间序列中的突变现象。本研究利用 BFAST 突变监测长时 间序列中发生突变的具体年份。

#### 2.3.3. 赫斯特(Hurst)指数

Hurst 指数[23]是一种评估时间序列持续性和长期相关性的有效方法。通过 Hurst 指数值(H)的大小, ET 序列的未来持续性可以确定如下:如果 0.5 < H < 1,表示时间序列具有持续性,即未来的变化将与过 去的趋势保持一致。如果 H=0.5,说明时间序列缺乏持续性,代表一个没有长期相关性的随机序列。如 果 0 < H < 0.5,则说明时间序列表现出反持续性,表明未来的变化将与过去的趋势相反。将 Sen 斜率与 Hurst 指数结合使用,有助于了解 ET 未来可能出现的变化情况。

#### 2.3.4. 敏感性分析

敏感性分析涉及地球科学各个方面的科学领域,涵盖了地质、气象、气候、海洋、地理等多个子领域。Sobol 敏感性分析模型[24]是一种基于方差分解的全局敏感性分析方法,用于评估模型输入参数对输出结果的影响程度。它由俄罗斯数学家 Ilya M. Sobol 提出,广泛应用于复杂模型的参数敏感性分析,尤其是在不确定性量化领域。在地学研究中,敏感性分析是一种重要的数值模拟工具,用于评估模型中参数和输入数据对模拟结果的影响程度。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 大黑河流域 ET 时空变化特征

#### 3.1.1. 大黑河流域 ET 年际变化

2001~2022年,大黑河流域的多年平均蒸散发(ET)呈现显著的空间分异特征(见图 2)。从空间分布来 看,流域西南部 ET 显著低于中部和东部区域,而 ET 值最高的区域位于流域中部,多年平均 ET 值最高 可达 500 mm/a。结合高程与水系分布分析可见,西南部低海拔地区及北部高海拔山区 ET 值较低,多年 平均 ET 仅为 61.87 mm/a,相较之下,中部山区、水域及东南部相对较高海拔地区的 ET 值较大,说明 ET 的空间分布与地形地貌存在一定相关性。2001~2022年,大黑河流域的年际 ET 波动较大,呈现周期性波 动上升的趋势(见图 3),其年际 ET 值介于 155.02 mm~346.22 mm 之间,多年平均值为 255.82 mm/a。整



Figure 2. Spatial distribution of multi-year average ET in the Dahei River Basin 图 2. 大黑河流域多年平均 ET 空间分布



Figure 3. Interannual change in ET in the Dahei River Basin, 2001~2022 图 3. 2001~2022 年大黑河流域 ET 年际变化

体而言,不同年份之间的年际 ET存在显著差异,其中 11个年份的 ET 低于多年平均值,另 11个年份则 超过平均水平。在个别年份中,2013年 ET 最高,达到 346.22 mm/a,其次为 2021年的 331.39 mm/a;相 反,2001年 ET 最低,仅为 155.02 mm/a,其次为 2007年的 196.15 mm/a,年际 ET 的最大振幅达 191.2 mm,反映出该区域 ET 的年际变化较为剧烈。从趋势上看,2001~2004年及 2015~2019年,ET 呈现明显 的增加趋势,而多年 ET 整体表现为波动性上升。这一趋势与大黑河流域生态保护和建设工程的实施密 切相关,如退耕还林(草)政策、植被恢复等措施,可能对 ET 的增长产生了重要影响。

#### 3.1.2. 大黑河流域季节 ET 变化

2001~2022年,大黑河流域的蒸散发(ET)表现出明显的季节性变化特征。根据植被生长习性及区域环境状况,本研究将 3~5月划分为春季,6~8月划分为夏季,9~11月划分为秋季,12月至次年 2月划分为冬季,以探讨 ET 的季节变化及其时空分异规律。研究结果表明,大黑河流域 ET 的季节性特征与区域气温、降水及日照时数的变化高度一致,其中夏季 ET 最高,冬季最低。四个季节的多年平均 ET 值(见图 4)从大到小依次为:夏季(140.21 mm/a)>秋季(55.52 mm/a)>春季(42.49 mm/a)>冬季(19.02 mm/a),显示出明显的季节性分布模式。进一步分析发现,春季、夏季、秋季和冬季的 ET 增长斜率分别为 0.77、3.55、0.58、0.39、均呈上升趋势,但增幅存在差异。冬季增长最不显著,并表现出间隔两年先上升后下降的周期性变化,而夏季增长最为显著,反映出夏季蒸散发受温度、降水和植被生长的强烈驱动。时间序列分析显示,春季和夏季的 ET 在 2001~2002 年出现突增,而同期秋季和冬季的 ET 则呈现相反趋势,表现为下降,这可能与该时期的气候异常或土地利用变化相关。此外,春季和秋季的 ET 增长趋势较为平稳,整体呈稳定上升趋势,并受气温和风速的影响最为显著,表明两季节的 ET 变化主要受气象因子调控,而非植被生长过程的直接驱动。



**Figure 4.** Temporal characteristics of four-season ET in the Dahei River Basin, 2001~2022 图 4. 2001~2022 年大黑河流域四季 ET 时间特征

2001~2022 年,大黑河流域各季节的蒸散发(ET)呈现明显的空间分异特征(图 5)。春季 ET 均值介于 7.63~77.10 mm/a 之间,高值区域主要分布在山区,而平原地区的蒸散量相对较低;夏季 ET 均值范围较 大,介于 34.75~350.80 mm/a 之间,其中中部山区 ET 最高,水域次之,平原地区最低;秋季 ET 均值介 于 13.41~80.75 mm/a 之间,空间分布特征与夏季类似,高值区域主要集中在山区及河流流经区域;冬季 ET 均值介于 5.59~35.99 mm/a 之间,但空间分布特征与春季相反,高值主要分布在低海拔地区,而山区由于气温较低,蒸散效率明显降低(见图 5)。

蒸散发在各季节均表现出显著的波动特征,但其主导影响因子存在一定差异。冬季 ET 最低的主要原因在于低温、少雨、太阳辐射弱,且植被进入休眠期,蒸腾作用极弱甚至停止,ET 主要依赖于土壤层的水分蒸发。此外,冬季土壤冻结的影响进一步抑制了蒸散发过程。春季随着气温回升、降水增加和太阳辐射增强,植物进入生长初期,蒸腾作用增强,而土壤蒸发也逐步增加,成为该季节 ET 上升的主要驱动因子。夏季 ET 最强,主要受高温、充沛降水和强太阳辐射的影响,此时植物进入快速生长期,水分蒸腾显著增强,同时土壤蒸发达到峰值,是全年 ET 最高的时期。秋季 ET 的主要影响因子为气温逐步降低、降水减少和太阳辐射减弱,随着植被进入凋萎阶段,植被和土壤的蒸散发强度也随之下降[25]。

整体来看,大黑河流域各季节的 ET 在时间和空间上均表现出显著的分异特征,其中中央山地和水体 区域的 ET 最高, ET 的释放在夏季最强,其次为春季和秋季,冬季最弱。大黑河流域不同季节蒸散发的 时空变化不仅反映了植被一土壤一大气之间的水热交换过程,也直接影响该地区的水热平衡,是决定区 域水循环的关键因子之一。



Figure 5. Seasonal ET distribution in the Dahei River Basin, 2001~2022 图 5. 2001~2022 年大黑河流域四季 ET 分布

#### 3.1.3. 大黑河流域时间演变特征

对 2001~2022 年大黑河流域蒸散发(ET)的突变特征分析(见图 6)结果表明, ET 时间序列的突变点发 生在 2007 年左右。为了进一步探究突变点前后 ET 的变化趋势,将研究时段划分为 2001~2007 年(第一阶 段)和 2008~2022 年(第二阶段)。

分析结果显示,在 2001~2007 年,大黑河流域 ET 以 2.10 mm/a 的速率缓慢上升,趋势不显著;而在 2008~2022 年, ET 的上升速率显著加快,达到 5.56 mm/a,表明该阶段 ET 呈现明显的增长趋势。ET 在 2021 年达到极值,最高值为 331.39 mm。这一突变可能受到气候变化、降水增加、生态恢复措施(如退耕 还林还草)等因素的共同影响,导致区域 ET 在突变点后快速增加。



Figure 6. Characterization of BFAST mutations in ET in the Dahei River Basin, 2001~2022 图 6. 2001~2022 年大黑河流域 ET 的 BFAST 突变特征

#### 3.2. ET 的空间变化趋势

2001~2022 年大黑河流域 ET 变化趋势的显著性空间分布如图所示(见图 7)。分析结果表明,大黑河流域 ET 的变化趋势具有明显的空间异质性。从整体来看,ET 呈增加趋势的地区占总区域面积的 86.25%,分布范围较广,覆盖整个研究区,其中呈显著增加趋势的区域占 85.90%,主要集中在西南部及东部地区。相比之下,ET 呈下降趋势的区域占 13.74%,主要分布于研究区的中部和西北部,其中呈显著下降趋势的区域占 12.69%,主要位于中部和北部。这种空间分异特征可能受到多种因素的影响,如气候变化、植被覆盖变化、土地利用方式调整以及水资源调控措施等。总体而言,大黑河流域 ET 的上升趋势占据主导地位,反映出研究区在过去二十余年间,生态恢复、气候变暖及降水变化可能促进了 ET 的增加。

#### 3.3. ET 的未来变化趋势(Hurst)

2001~2022 年大黑河流域 ET 的持续性变化特征分析(见图 8)表明, ET 的 Hurst 指数范围主要介于 0.15~0.82 之间,其空间分布存在显著的区域差异。根据 Hurst 指数的等级划分,大黑河流域未来 ET 变化 趋势呈现持续性和反持续性并存的模式。

研究结果显示,大部分地区 ET 表现出反持续性变化特征,占研究区总面积的 89.71%,广泛分布于整个流域。这表明,流域大部分区域的 ET 未来变化趋势将与过去相反,即若过去呈上升趋势,未来可能下降,反之亦然。而具有持续性变化特征的区域占比 10.28%,主要分布在平原地区,表明这些区域 ET

未来的变化趋势与过去一致,表现出较强的长期记忆效应。这种空间差异可能受到地形条件、植被覆盖变化、土壤湿度、气候变化等因素的影响,特别是在水热条件较为稳定的平原地区,ET的变化趋势更具延续性,而在气候波动较大或生态系统动态变化剧烈的区域,ET更容易表现出反持续性特征。



**Figure 7.** Spatial distribution of significance of ET trends in the Dahei River Basin, 2001~2022 图 7. 2001~2022 年大黑河流域 ET 变化趋势显著性的空间分布



Figure 8. Hurst index and future trends in the Dahei River Basin, 2001~2022 图 8. 2001~2022 年大黑河流域 Hurst 指数及未来变化趋势

#### 3.4. 驱动因子分析

#### 3.4.1. 模型精度验证

将降水、风速、温度、日照时数、土壤湿度 5 个变量进行敏感性分析,训练集表现 R<sup>2</sup>: 0.942, MAE: 2.66, MSE: 16.16 训练集表现非常好, R<sup>2</sup>接近 1, MAE 和 MSE 都比较小,这说明模型在训练集上拟合

度很高。测试集表现 R<sup>2</sup>: 0.585, MAE: 8.19, MSE: 162.29, 测试集的 R<sup>2</sup> 降至 0.585, MSE 上升到 162.29 (比训练集大了一个数量级), 这说明模型可能存在一定程度的过拟合: 它在训练集上学到的规律, 并不能 完美地泛化到测试集上。

使用交叉验证(Cross-Validation)来更稳定地评估模型性能,并防止过拟合。

#### 3.4.2. Sobol 灵敏度分析

Sobol 分析给出以下结果(见表 1) (5 个变量的顺序对应[降水 Pre,风速 Wind,温度 TM,日照时数 RZ,土壤湿度 SM]):

下面分别解释这两个指标:

1) 一阶效应指数(S<sub>i</sub>)

$$S_{i} = \frac{V_{i}}{Var(f(X))}$$

一阶效应代表"单个变量在不考虑它与其他变量交互时,对输出(ET)方差所作的贡献"。

Table 1. Results of sensitivity analysis 表 1. 敏感性分析结果

变量	Pre	Wind	TM	RZ	SM
$\mathbf{S}_i$	0.4764	0.0919	0.2991	0.0101	0.0119
ST	0.5370	0.1384	0.3923	0.0270	0.0300

Pre (降水)为 0.4764,说明当只考虑降水本身的变化时,可解释大约 47.6%的模型输出方差。Wind (风速)的 Si = 0.0919,说明仅考虑风速自身时,可解释约 9.2%的模型输出方差。TM (气温)的 Si = 0.2991,约 29.9%的输出方差与气温变化直接相关。RZ (日照时数)为 0.0101,贡献度只有 1%左右,主效应很小。SM (土壤湿度)为 0.0119,也只有约 1.2%,主效应也很小。

从一阶效应看, Pre (降水)和 TM (气温)的主效应比较大, Wind 次之, 而 RZ 和 SM 对蒸散直接贡献 度相对较低。

2) 总效应指数(ST)

$$S_{T_i} = \frac{V_i + \sum j \neq iV_{ij} + \sum j < k \neq iV_{ijk} + \cdots}{Var(f(X))}$$

总效应包含"该变量单独对输出的影响+该变量与其他变量的交互对输出的影响"。

Pre (降水)的 ST = 0.5370,说明包括与其他变量交互在内,它对蒸散的总体贡献是 53.7%。与一阶 47.6%相比,说明还有约 6%左右的方差来自降水和其他变量的交互。Wind (风速)的 ST = 0.1384,和 Si 的 差距(≈4.6%)说明风速与其他变量也有一些小的交互效应。TM (气温)的 ST = 0.3923,和 Si (0.2991)相比,高出约 9.3%,说明气温也有一定程度的交互效应。RZ (日照时数)和 SM 的 ST 分别为 0.0270 和 0.0300,都很小,说明它们本身对蒸散的直接贡献和交互贡献都不大。

综合来看:降水是影响预测 ET 的最主要变量。其次是气温。其次市风速。日照时数和土壤湿度不仅 主效应很小,总效应也很小,对 ET 的预测影响可以忽略或相对较低。

#### 4. 结论

本研究基于 MOD16A2/A3 遥感数据,结合气象站点观测数据,系统分析了 2001~2022 年内蒙古大黑 河流域蒸散发(ET)的时空变化特征及其驱动机制。研究结果表明,大黑河流域 ET 呈现显著的时空分异特

征,并受气候变化和人类活动的共同影响。

从时间变化来看,2001~2022年,大黑河流域ET整体呈波动上升趋势,多年平均ET为255.82mm/a, 年际波动范围为155.02~346.22mm。ET具有显著的季节性特征,夏季ET最高,冬季最低,且夏季ET 增长趋势最为显著。通过BFAST突变检测,识别出ET在2007年左右发生突变,突变后ET的上升速率 显著加快,表明该时期可能受到气候变化或生态工程(如退耕还林、生态修复)的影响。Hurst指数分析显 示,大黑河流域ET未来变化趋势以反持续性为主,即未来ET变化可能与过去趋势相反,这一趋势对水 资源管理和生态修复策略的制定具有重要参考价值。

从空间分布来看,大黑河流域 ET 呈现明显的空间异质性,其中中部山区和水域 ET 值较高,而西南部低海拔及北部高海拔地区 ET 值较低。2001~2022 年间,86.25%的区域 ET 呈增加趋势,其中85.90%的区域增加趋势显著,主要分布在西南部及东部地区。ET 的空间分布与地形、植被覆盖和水系分布密切相关,表明地形和土地利用类型对 ET 的空间格局具有重要影响。

驱动因子分析表明,降水、气温和风速是影响大黑河流域 ET 的主要控制因子。Sobol 敏感性分析结 果显示,降水对 ET 的贡献最大(一阶效应指数 0.4764,总效应指数 0.5370),其次是气温(一阶效应指数 0.2991,总效应指数 0.3923),风速的影响相对较小,但仍具有显著贡献。日照时数和土壤湿度的直接影 响较弱,表明在干旱半干旱地区,水分和热量条件是 ET 变化的主导因素。

综上所述,大黑河流域 ET 的时空变化受到自然因素和人类活动的双重驱动。气候变化导致的降水和 气温变化是 ET 变化的主要驱动因子,而退耕还林(草)等生态修复工程对 ET 的长期趋势也产生了重要影 响。本研究结果为大黑河流域水资源的合理利用和生态保护提供了科学依据,同时也为干旱半干旱地区 ET 变化机制研究提供了参考。未来研究应进一步结合土地利用变化、生态工程及水资源调控等因素,深 入探讨 ET 变化的复杂驱动机制,以提高对区域水循环过程的理解。

#### 5. 讨论

1) 气候因子的主导作用:本研究发现降水(Pre)和气温(TM)是 ET 变化的主要驱动因子,一阶效应贡献分别达 47.6%和 29.9%,这与 Mu 等(2007)基于 MOD16 的全球 ET 研究以及 Shukla 和 Mintz (1982)关于陆气水热耦合的理论一致,进一步印证了气候变量在半干旱地区 ET 动态中的核心地位。

2) 季节性分异规律: ET 的夏季峰值与冬季低谷特征与区域水热条件高度相关,与 Yang 等(2012)在 华北灌区的发现一致,表明植被生长季的蒸腾增强和土壤水分可利用性是季节性差异的关键机制。

3) 低敏感性因子的普适性:日照时数(RZ)与土壤湿度(SM)对 ET 的贡献度较低(均<2%),这与科尔沁 沙地研究中水分限制主导 ET 的结论[4]相呼应,反映了半干旱区 ET 对水分条件的强依赖性。

尽管 MOD16 数据具有较高时间分辨率,但其 500 m 空间分辨率可能弱化地形复杂区(如山区)的 ET 异质性。ET 空间分异与高程相关,但未量化坡度、坡向等地形参数的作用。引入地形湿度指数(TWI)或 太阳辐射模型,可进一步揭示地形 - 水文 - ET 的耦合机制。

#### 参考文献

- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., *et al.* (2010) Recent Decline in the Global Land Evapotranspiration Trend Due to Limited Moisture Supply. *Nature*, 467, 951-954. https://doi.org/10.1038/nature09396
- Shukla, J. and Mintz, Y. (1982) Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate. *Science*, 215, 1498-1501. <u>https://doi.org/10.1126/science.215.4539.1498</u>
- [3] Sharma, V., Kilic, A. and Irmak, S. (2016) Impact of Scale/Resolution on Evapotranspiration from Landsat and MODIS Images. Water Resources Research, 52, 1800-1819. <u>https://doi.org/10.1002/2015wr017772</u>
- [4] 张圣微, 张鹏, 张睿, 等. 科尔沁沙地典型区生长季蒸散发估算及其变化特征[J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 768-778.

- [5] Yang, Y., Shang, S. and Jiang, L. (2012) Remote Sensing Temporal and Spatial Patterns of Evapotranspiration and the Responses to Water Management in a Large Irrigation District of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 112-122. <u>https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.011</u>
- [6] Ma, Z., Ray, R.L. and He, Y. (2018) Assessing the Spatiotemporal Distributions of Evapotranspiration in the Three Gorges Reservoir Region of China Using Remote Sensing Data. *Journal of Mountain Science*, 15, 2676-2692. https://doi.org/10.1007/s11629-018-5180-2
- [7] 黄葵, 卢毅敏, 魏征, 等. 土地利用和气候变化对海河流域蒸散发时空变化的影响[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1888-1902.
- [8] Xu, T., Liang, S. and Liu, S. (2011) Estimating Turbulent Fluxes through Assimilation of Geostationary Operational Environmental Satellites Data Using Ensemble Kalman Filter. *Journal of Geophysical Research*, **116**, D09109. https://doi.org/10.1029/2010jd015150
- [9] Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., *et al.* (1998) A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*, 212, 213-229. https://doi.org/10.1016/s0022-1694(98)00254-6
- [10] Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q. and Running, S.W. (2007) Regional Evaporation Estimates from Flux Tower and MODIS Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, **106**, 285-304. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.007</u>
- [11] Cherchali, S., Amram, O. and Flouzat, G. (2000) Retrieval of Temporal Profiles of Reflectances from Simulated and Real NOAA-AVHRR Data over Heterogeneous Landscapes. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 753-775. <u>https://doi.org/10.1080/014311600210551</u>
- [12] Barrios, J.M., Arboleda, A. and Gellens-Meulenberghs, F. (2020) The LSA-SAF ET Product: An Operational Service of Sub-Daily Estimation of Evapotranspiration in Near-Real Time across Europe, Africa and Eastern South America (No. EGU2020-18108). Copernicus Meetings.
- [13] Jia, L., Xi, G., Liu, S., Huang, C., Yan, Y. and Liu, G. (2009) Regional Estimation of Daily to Annual Regional Evapotranspiration with MODIS Data in the Yellow River Delta Wetland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1775-1787. <u>https://doi.org/10.5194/hess-13-1775-2009</u>
- [14] Mu, Q., Zhao, M. and Running, S.W. (2011) Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, **115**, 1781-1800. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019</u>
- [15] Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M. and Running, S.W. (2007) Development of a Global Evapotranspiration Algorithm Based on MODIS and Global Meteorology Data. *Remote Sensing of Environment*, **111**, 519-536. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015
- [16] Ramoelo, A., Majozi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A. and Dzikiti, S. (2014) Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) Using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6, 7406-7423. <u>https://doi.org/10.3390/rs6087406</u>
- [17] Tang, R., Shao, K., Li, Z., Wu, H., Tang, B., Zhou, G., et al. (2015) Multiscale Validation of the 8-Day MOD16 Evapotranspiration Product Using Flux Data Collected in China. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8, 1478-1486. <u>https://doi.org/10.1109/jstars.2015.2420105</u>
- [18] 王永锋,靖娟利,马炳鑫. 滇黔桂岩溶区 ET 时空特征及气候因子驱动[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 235-243.
- [19] Sen, P.K. (1968) Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379-1389. <u>https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934</u>
- [20] He, J., Shi, X. and Fu, Y. (2021) Identifying Vegetation Restoration Effectiveness and Driving Factors on Different Micro-Topographic Types of Hilly Loess Plateau: From the Perspective of Ecological Resilience. *Journal of Environmental Management*, 289, Article ID: 112562. <u>https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112562</u>
- [21] Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G. and Culvenor, D. (2010) Detecting Trend and Seasonal Changes in Satellite Image Time Series. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 106-115. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.014</u>
- [22] Fang, X., Zhu, Q., Ren, L., Chen, H., Wang, K. and Peng, C. (2018) Large-Scale Detection of Vegetation Dynamics and Their Potential Drivers Using MODIS Images and BFAST: A Case Study in Quebec, Canada. *Remote Sensing of Envi*ronment, 206, 391-402. <u>https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.017</u>
- [23] 努尔沙吾列提·达开,任嘉伟. 1961-2020 年新疆地区干旱演变时空特征分析[J].节水灌溉, 2024(2): 9-16.
- [24] Sobol, I.M. (1993) Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Model Math. Mathematical Modelling and Computational Experiments, 4, 407-414.
- [25] 宫宇,杨鹏年,杨一飞,单劲松,王永平,王永鹏,周龙.近 20 年渭干河流域蒸散发量演变特征与灌溉效率评价 [J].节水灌溉,2025(2):62-70.