

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.02.014

基于遥感和通量观测的实际蒸散发时空变化特征

——以黄河流域水源涵养区为例

鞠琴^{1,2}, 刘小妮^{1,2}, 刘娣^{1,2}, 申同庆^{1,2}, 谷黄河^{1,2}, 王国庆^{2,3}, 余钟波^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏南京 210098;
3. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 蒸散发是地表水热平衡的关键要素, 分析蒸散发的时空分布特征及其影响因素, 对于深入理解区域水文循环与生态系统过程至关重要。基于通量观测站数据, 评估 GLEAM、MTE、GLDAS 和 AVHRR 共 4 种蒸散发产品在黄河流域水源涵养区的适用性, 利用水量平衡方法验证其在流域尺度上的精度, 并探讨实际蒸散发的影响因素。结果表明: 在站点尺度上, GLEAM 蒸散发产品精度最高; 在流域尺度上, 校正后的 GLEAM 蒸散发产品与实际蒸散发的相对误差在渭河南山支流区最小, 其次是兰州以上地区; 1982—2015 年黄河流域水源涵养区实际蒸散发整体呈增加趋势, 空间分布上自西到东逐渐增加; 不同植被类型年均蒸散发差异较大, 阔叶林的蒸散发最大(575.2 mm), 其次是农田(504.3 mm), 高山草甸的蒸散发最小(358.2 mm); 实际蒸散发变化主要受到太阳辐射与气温的影响。

关键词: 实际蒸散发; 遥感蒸散发产品; 通量观测; 影响因素; 水源涵养区; 黄河流域

中图分类号: P343; TV11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)02-0338-10

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是陆地生态系统水分和能量循环的重要组成部分, 是连接地表水循环和能量循环的纽带^[1-2]。流域的实际蒸散发是一个复杂的过程, 与所在区域的气候、土壤和植被等要素紧密相关^[3]。准确估算实际蒸散量的时空变化特征对维持生态系统的水分平衡、碳循环和土壤养分的流动等方面具有重要意义。实际蒸散发的地面观测方法主要有蒸渗仪、涡度相关法、闪烁通量仪等^[4], 精度相对较高。以涡度相关技术为核心的全球通量观测网络已积累了较为可靠的蒸散发观测序列, 但是受到成本和数据代表性的限制, 中国通量观测研究网络 ChinaFLUX 公开的观测研究站点仅为 79 个。同时, 点尺度的蒸散发数据在空间上存在一定的局限性, 很难在大范围内对蒸散发进行观测。基于水量平衡方程可以获得较准确的长时间尺度(年、多年)蒸散发, 但很难得到短时间尺度(日、月)的蒸散发。

随着遥感技术与反演算法的快速发展, 遥感产品为估算大尺度蒸散发提供了有效途径, 根据全球和区域尺度 ET 产品的计算方法可概括为 3 类^[5]: 再分析与陆面模式同化产品, 如 Global Land Data Assimilation System (GLDAS)、Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM)、Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR); 机器学习方法插值产品, 如 Model Tree Ensembles (MTE); 基于遥感蒸散发模型模拟产品, 如 MOD16。潘健^[6]评估了这 5 种蒸散发产品在黄河流域的适用性, 发现较其他产品而言, GLEAM 产品是在黄河流域表现最好的蒸散发数据; Zhu 等^[7]在点尺度上, 对 MOD16、GLEAM、AVHRR 等 5 种蒸散发产品的准确性和不确定性进行了评估, 发现不同蒸散发产品的精度存在显著差异。以上研究表明, 不同蒸散发产品被

收稿日期: 2023-08-09; 网络出版日期: 2023-11-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231123.1146.004>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3201104); 国家自然科学基金资助项目(U2240217)

作者简介: 鞠琴(1980—), 女, 江苏泰兴人, 副教授, 博士, 主要从事变化环境下水文循环响应方面的研究。

Email: juqin@hhu.edu.cn

通信作者: 余钟波, E-mail: zyu@hhu.edu.cn

认为具有较高的时效性,但由于下垫面的非均匀性,遥感蒸散发产品在研究区域的适应性差异较大^[8],而且其时空分辨率也不一致。因此,应用于不同研究区域前需要进行精度评估。受到卫星观测方式和反演算法的局限性影响,蒸散发产品具有一定的不确定性。在估算区域蒸散发时,为减少复杂的参数化过程以及对地面观测数据的依赖,其校正方法研究也是遥感蒸散发应用的一个重要方向^[9]。准确估算区域实际蒸散发一直是水循环研究中的难点^[10],需要将点尺度通量观测数据与流域尺度的水量平衡法相结合,进一步提高蒸散发遥感产品的准确性。此外,影响实际蒸散发的因素较多,大气条件与下垫面特征均会影响实际蒸散发的强度及其空间分布。

为科学认识和准确解析气候变化与不同下垫面条件下流域蒸散发变化规律及其影响因素,本文以黄河流域水源涵养区为研究区域,从站点尺度对 GLEAM、MTE、GLDAS、AVHRR 共 4 种蒸散发产品进行精度评估,优选出精度相对较好的蒸散发产品,并对其进行校正;进一步结合水量平衡法,从流域尺度上进行精度验证;探究不同土地利用类型的蒸散发变化及其影响因子的贡献程度。研究成果以期为流域生态服务评估、水资源规划与管理提供参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域水源涵养区天然径流量占黄河流域的 84%,是黄河流域的主要产流区^[11]。该区由兰州以上地区(22.25 万 km²)、渭河南山支流区(6.33 万 km²)和伊洛河流域(1.86 万 km²)组成(图 1),横跨青海、四川、甘肃、宁夏、陕西和河南 6 省区。地势西高东低,流域落差较大,下垫面条件较为复杂。黄河流域水源涵养区作为黄河流域最重要的生态功能区,生态环境较为脆弱^[12],研究黄河流域水源涵养区的蒸散发时空演变特征并对其进行归因分析,对黄河流域生态保护和缓解水资源供需矛盾意义重大。

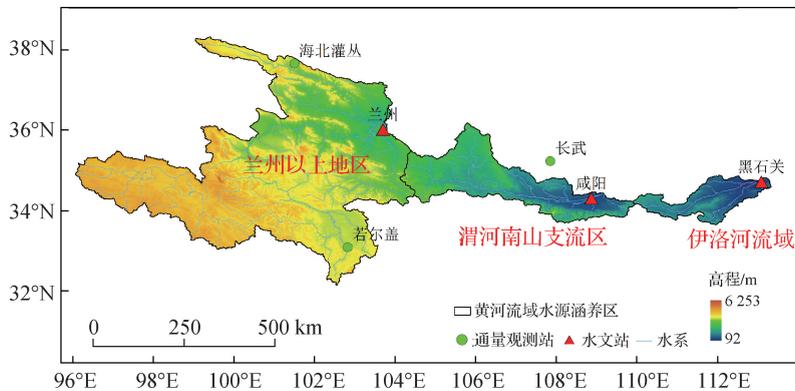


图 1 黄河流域水源涵养区

Fig. 1 Water conservation area of the Yellow River basin

1.2 数据来源

本文使用的 4 种蒸散发产品具体信息见表 1。基于涡度相关技术的通量观测方法是获取实际蒸散发相对真值的主要途径,也是目前全球使用最广泛的通量观测方法,被众多学者应用于蒸散发精度验证研究中^[13]。其中,海北灌丛(2003—2010 年)、长武(2005—2009 年)、若尔盖(2017 年)通量观测站点数据来源于中国通量观测研究网络 ChinaFLUX(<http://chinaflux.org/>),下垫面条件分别为草地、农田、湿地。采用的降水量、气温、空气比湿以及太阳辐射气象数据来源于再分析数据集 CMFD(<http://poles.tpdc.ac.cn/>),时间

序列为1979—2018年,该数据集已被证实在中国区域具有良好的适用性^[14]。归一化植被指数(NDVI)数据来源于GIMMS3g NDVI数据集,时间分辨率为15 d,空间分辨率为8 km,时间序列为1982—2015年。中国多时期土地利用遥感监测数据集来源于资源环境科学数据注册与出版系统^[15],空间分辨率为30 km。黄河流域水源涵养区的兰州站、咸阳站、黑石关站的径流数据来源于水文年鉴。本文对实际蒸散发的时空分布特征及其影响要素的分析统一研究时段为1982—2015年。

表1 全球蒸散发产品基本信息

Table 1 Basic information of global evapotranspiration products

蒸散发产品	理论基础	空间分辨率	时间分辨率	时间范围	产品类型	覆盖范围
GLEAM	Priestley-Taylor 公式	0.25° × 0.25°	日尺度	1980—2020 年	陆面模式同化	全球
GLDAS	数据同化	0.25° × 0.25°	月尺度	2000—2020 年	陆面模式同化	全球
AVHRR	改进的 P-M 公式	1° × 1°	月尺度	1982—2013 年	陆面模式同化	全球
MTE	模型树集合法	0.5° × 0.5°	月尺度	1982—2016 年	机器学习方法	全球

2 研究方法

2.1 水量平衡方法

本文主要的研究思路是将点尺度蒸散发产品评估与流域尺度的水量平衡法验证相结合。在站点尺度,选用数据时段较长的海北灌丛通量观测站点数据,通过均方根误差(E_{RMS})、相关系数(r)、纳什效率系数(E_{NS})这3种评估指标评估不同蒸散发产品的精度,选取精度较优的蒸散发产品,并基于海北灌丛、长武、若尔盖3个代表站的通量观测数据,采用Delta方法^[16]对精度较好的蒸散发产品进行校正。流域水量平衡方法被广泛应用于流域尺度的蒸散发产品精度验证^[17],计算公式如下:

$$E_{T,P-R} = P - R - \Delta S \quad (1)$$

式中: $E_{T,P-R}$ 为水量平衡法计算的蒸散发; P 为降水量; R 为年径流量; ΔS 为流域蓄水量的动态变化,在多年尺度上可以忽略不计。

2.2 影响因子的贡献程度分析方法

各影响因子对黄河流域水源涵养区实际蒸散发的贡献程度采用向量自回归(VAR)模型来定量分析。VAR模型是一种计量经济模型,常被应用于环境、水文领域^[18],可被用来研究实际蒸散发与其影响因子之间的响应关系。在构建蒸散发的VAR模型之前,首先需要对降水、气温、太阳辐射、空气比湿、风速和NDVI多个影响因子的逐月数据进行平稳性检验($P < 0.05$),移除不符合的因子;其次通过方差分析评估所选变量之间的关联性和稳定性;最后量化不同因子的贡献程度。VAR模型计算公式如下:

$$Y_t = \Phi_1 Y_{t-1} + \Phi_2 Y_{t-2} + \dots + \Phi_p Y_{t-p} + HX_t + \epsilon_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

式中: Y_t 为 k 维内生变量的列向量; p 为滞后阶数; T 为样本数量; Φ_i 为 $k \times k$ 维矩阵; H 为待估计的系数矩阵; X_t 为时间序列; ϵ_t 为 k 维扰动列向量。

3 结果与分析

3.1 不同蒸散发产品评估

在站点尺度上,考虑到通量站点观测数据的可获取性和研究结果的可靠性,本文选择下垫面特征占比较

大(草地面积占比为 60.4%)、观测时段相对较长的海北灌丛站点数据对 GLEAM、MTE、GLDAS、AVHRR 4 种蒸散发产品进行适用性评估。结果表明(表 2), 不同蒸散发产品与观测站点的相关性较好, r 均在 0.89 以上。根据 E_{NS} 精度评估结果, 将 4 种蒸散发产品的验证精度排序为 GLEAM > MTE > AVHRR > GLDAS。月尺度与季节尺度的蒸散发对比分析如图 2 所示, GLEAM、MTE 和 GLDAS 估算的蒸散发与观测值年内变化趋势较一致, 但均存在低估现象, 其中 GLEAM 蒸散发产品与站点观测数据更接近; AVHRR 蒸散发产品严重高估了夏季、秋季、冬季的蒸散量。根据 3 种精度评估指标与年内变化对比结果, GLEAM 蒸散发产品的精度明显优于其他蒸散发产品, 与杨晓甜等^[19]和陈鑫涛等^[20]的研究结论基本一致。

表 2 4 种蒸散发产品在黄河流域水源涵养区的精度评估结果

Table 2 Accuracy evaluation results of four evapotranspiration products in water conservation area of Yellow River basin

蒸散发产品	r	E_{NS}	$E_{RMS}/\%$
GLEAM	0.953	0.754	17.8
MTE	0.937	0.598	22.8
GLDAS	0.892	-0.074	37.3
AVHRR	0.901	0.365	28.7

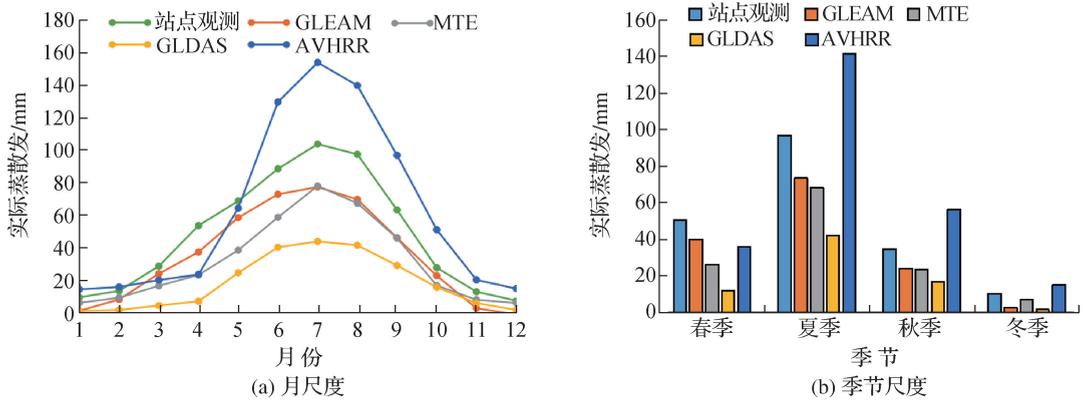


图 2 4 种蒸散发产品与观测数据对比

Fig. 2 Comparison of four evapotranspiration products with observed data

为进一步提高 GLEAM 蒸散发产品的精度, 本文采用 Delta 方法^[16]对其进行校正。选用了海北灌丛、长武、若尔盖 3 个分别代表草地、农田、湿地的通量观测站点, 得到 3 种土地利用类型对应的校正系数分别为 1.15(草地)、1.26(农田)、1.80(湿地)。按照黄河流域水源涵养区的草地(60.4%)、农田(15.1%)、湿地(0.98%)面积占比分配权重, 最终得到 GLEAM 蒸散发产品的校正系数为 1.18。

3.2 水量平衡方法精度验证

通过水量平衡方法从流域尺度上进一步评估蒸散发产品精度, 本文以 1982—2015 年为研究时段, 将黄河流域水源涵养区分为兰州以上地区、渭河南山支流区和伊洛河流域 3 个研究区域, 基于兰州、咸阳、黑石关 3 个水文站的径流数据分别计算不同研究区域的实际蒸散发($E_{T,P-R}$), 并与校正后的 GLEAM 蒸散发产品($E_{T,GLEAM}$)进行对比验证(表 3)。由表 3 可以看出, 3 个子流域的实际蒸散发多年平均相对误差均值分别为 12.1%、11.1%、14.4%。伊洛河流域的年均蒸散发最大, 其次是渭河南山支流区。由于本次研究暂未考虑动态水储量变化, 基于水量平衡方法计算的蒸散发年际变化可能存在一定的偏差, 将在后续研究中增加 GRACE 陆地水储量数据来估算区域实际蒸散发。

表3 1982—2015年 $E_{T,P-R}$ 与 $E_{T,GLEAM}$ 的多年均值
Table 3 Multi-year mean values of $E_{T,P-R}$ and $E_{T,GLEAM}$ from 1982 to 2015

子流域	$E_{T,P-R}/\text{mm}$	$E_{T,GLEAM}/\text{mm}$	年平均相对误差/%
兰州以上地区	366.1	384.7	12.2
渭河南山支流区	527.1	517.5	11.1
伊洛河流域	576.9	588.9	14.4

3.3 实际蒸散发时空分布特征

由图3(a)可知,1982—2015年黄河流域水源涵养区实际蒸散发整体呈增加趋势,年内变化为单峰型且在7月份达到峰值。黄河流域水源涵养区实际蒸散发空间分布特征如图3(b)所示,自西向东依次增加,变化范围为284.1~830.6 mm。由于研究区地理跨度较大,其经度范围为96°E—114°E,地形起伏变化明显,这可能也是空间分布存在较大差异的原因之一。兰州以上地区、渭河南山支流区、伊洛河流域的年均实际蒸散发分别为448.1、615.1、688.7 mm,主要与地理、地形、气候条件有关。兰州以上地区的西部为黄河源区,属于气温低、降水少的高寒地区,植被覆盖率相对较低,该区域的实际蒸散发较小。渭河南山支流区至伊洛河流域的地势逐渐下降,水热条件丰富,植被覆盖率相对较高,植被的蒸腾作用变强,导致蒸散发增大。进一步探究不同土地利用类型下实际蒸散发的空间分布情况,将土地利用类型分为农田、林地、草地、水域和其他地类,黄河流域水源涵养区土地利用类型面积占比及变化率见表4。不同土地利用类型对应的年均蒸散发从大到小依次为农田(497.8 mm)、林地(480.9 mm)、水域(408.6 mm)、草地(394.9 mm)、其他地类(392.2 mm)。相比于1980年,多年平均面积变化率仅为2.01%,土地利用动态变化较小,故在本文中未分析土地利用变化对蒸散发的影响。

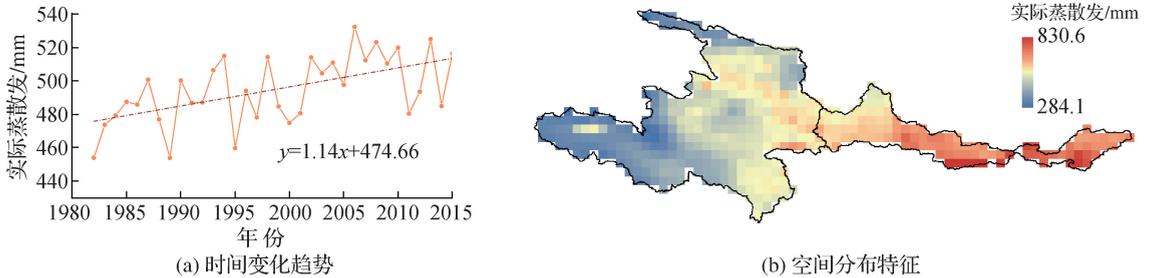


图3 黄河流域水源涵养区实际蒸散发时空特征

Fig. 3 Temporal and spatial characteristics of actual evapotranspiration in water conservation areas of the Yellow River basin

表4 1980—2015年土地利用类型面积占比及变化率
Table 4 Area proportion and change rate of land use types from 1980 to 2015

土地利用类型	1980年		2015年		面积变化率/%
	面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%	
农田	44 450.33	15.15	43 445.67	14.80	-2.26
林地	43 022.93	14.66	43 055.88	14.67	0.08
草地	178 265.83	60.74	176 959.63	60.30	-0.73
水域	4 927.46	1.68	5 119.81	1.74	3.90
其他	22 820.34	7.78	24 905.90	8.49	9.14

以往研究表明实际蒸散发与植被类型密切相关^[21], 植被对于蒸散发会有一些影响, 需要进一步对植被类型进行细分, 见图4(a)。由图4(b)可知, 不同地表覆被类型下的年均蒸散发差异比较显著, 年均蒸散发从大到小排序为阔叶林(575.2 mm)、农田(504.3 mm)、针叶林(484.2 mm)、沼泽(445.6 mm)、灌丛(434.4 mm)、草地(418.6 mm)、荒漠(445.6 mm)、高山草甸(358.2 mm)。阔叶林和农田具有较大的叶面积、较丰富的土壤水分, 且农田通常种植作物, 作物的生长需要大量的水分, 蒸散发量相对较大, 主要分布在渭河南山支流区中下游和伊洛河流域上游。而高山草甸的叶片与叶面积相对较小, 一般分布在气温较低, 相对湿度较高的高寒山区, 气象条件也不利于蒸散发的发生, 蒸散发量相对较小, 分布在兰州以上地区的黄河源区。该研究结果可以为评估生态服务系统、提高水源涵养能力等方面工作提供参考。

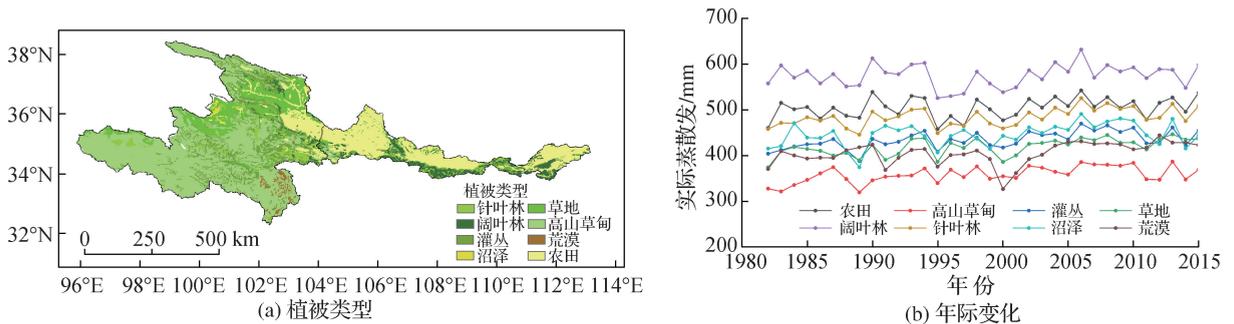


图4 不同植被类型的蒸散发变化

Fig. 4 Evapotranspiration changes of different vegetation types

3.4 实际蒸散发影响因素分析

在分析黄河流域水源涵养区实际蒸散发的影响因素时, 选取了气温、空气比湿、归一化植被指数、降水量、风速、太阳辐射作为初始影响因素。由于风速没有通过构建 VAR 模型所需要的平稳性检验, 且与实际蒸散发的相关性较差, 故不将其列为 VAR 模型的主要影响因素。1982—2015 年长时序逐网格的单因子与实际蒸散发的空间相关关系见图 5。可见, 各影响因子与实际蒸散发均呈正相关关系, 空间相关系数均在 0.4 以上, 气温、空气比湿与实际蒸散发的空间相关性较高。气温的相关性最好, 几乎整个流域的相关系数都在 0.9 以上; 其次是空气比湿, 在兰州以上地区的相关系数也超过 0.9; NDVI 在大部分网格的相关系数在 0.8 以上; 降水量与兰州以上地区的相关性相对较好, 而太阳辐射与之相反。综上所述, 气温、空气比湿、NDVI 与实际蒸散发具有较好的空间相关性, 而降水量和太阳辐射对实际蒸散发的作用存在空间差异性。

在流域尺度上, 实际蒸散发主要受到气温、空气比湿、NDVI、降水量、太阳辐射的综合影响。分析 1982—2015 年黄河流域水源涵养区实际蒸散发及其影响因子在月尺度上的相关性, 如图 6(a) 可知, 相关系数均在 0.84 以上且均呈正相关关系, 各因子之间也存在一定的关联性, 其相互关系共同影响着实际蒸散发的变化趋势。为探究各因子对流域实际蒸散发的相对贡献, 利用前期筛选过的 5 个主要影响因子来构建 VAR 模型。考虑到各因子之间的动态关系, 选择过去 12 期(1 a)的数据评估每个因子对实际蒸散发的贡献, 如图 6(b) 所示。各因子的相对贡献随着时间的推移逐渐趋于稳定, 在第 10 期基本达到平稳状态。各因子影响年际实际蒸散发变化的贡献率从大到小排序为太阳辐射(37.4%)、气温(31.3%)、空气比湿(14.4%)、NDVI(9.7%)、降水量(7.2%)。可以看出太阳辐射与气温对实际蒸散发的影响较大, 这与张晓龙^[22]分析 1979—2015 年黄河源区实际蒸散发主要受到气温与太阳辐射影响的研究结果一致。

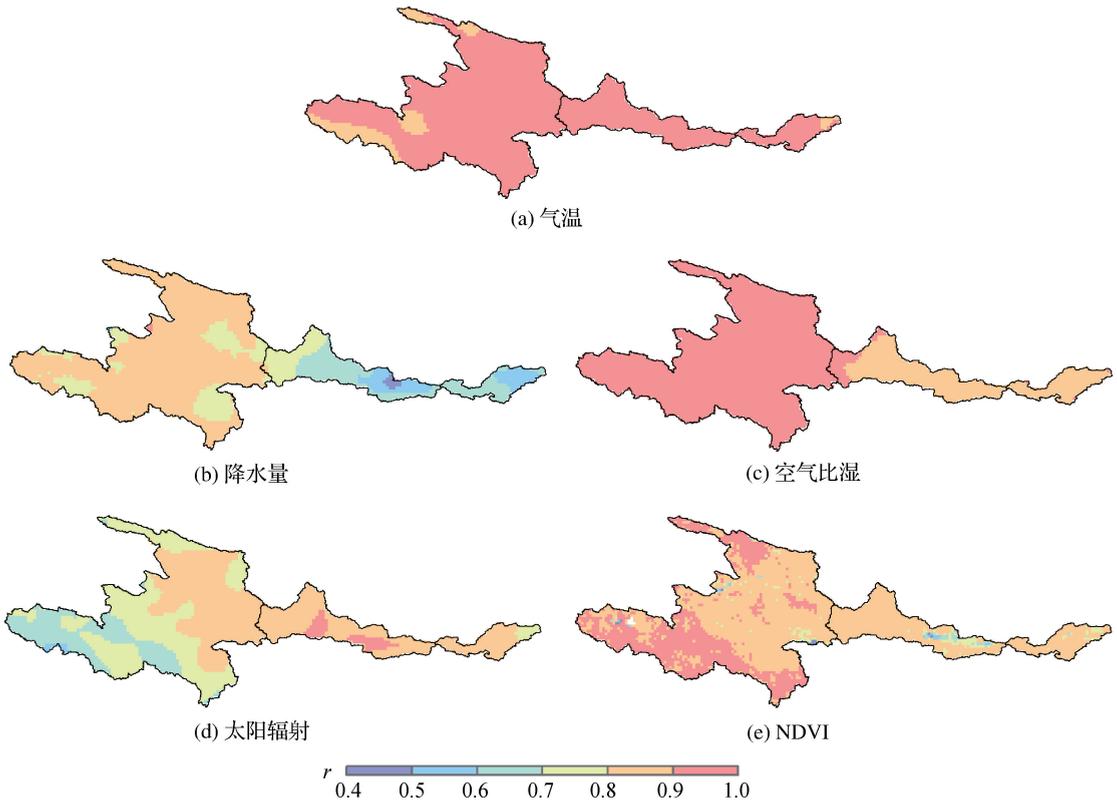


图 5 黄河流域水源涵养区实际蒸散发与影响因子的空间相关系数

Fig. 5 Spatial distribution of correlation coefficients between actual evapotranspiration and influencing factors in water conservation areas of the Yellow River basin

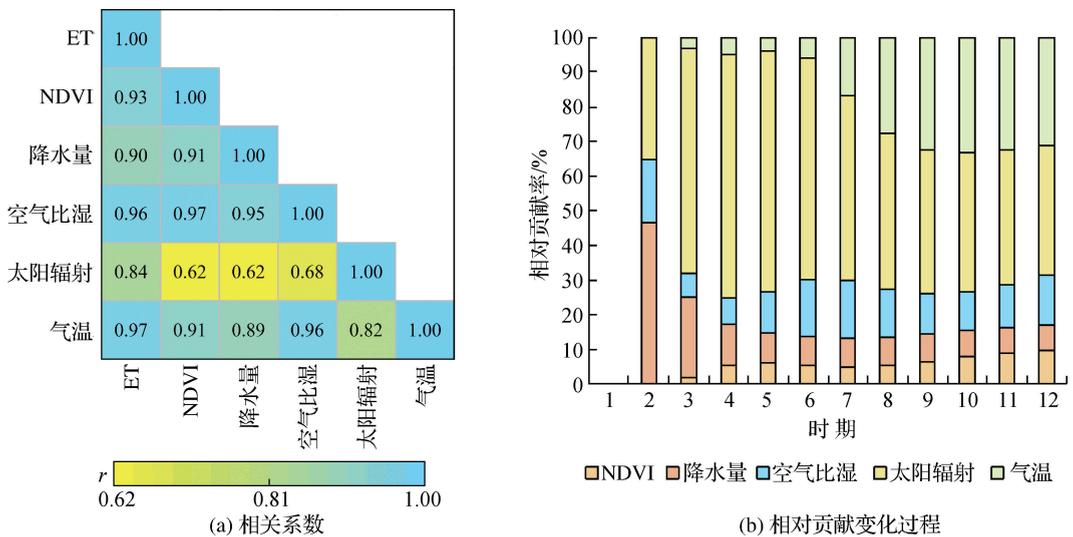


图 6 各影响因子与实际蒸散发相关性及相关贡献

Fig. 6 Correlation and relative contribution of several influencing factors to actual evapotranspiration

4 讨 论

实际蒸散发时空变化受气候、地形、植被以及人类活动等因素的共同影响,黄河流域水源涵养区地理跨度较大,地表覆盖类型复杂多样,包括草地、农田、林地等多种类型,不同下垫面的太阳辐射吸收能力、地表反射率等物理特性存在差异^[23]。现有遥感蒸散发产品已经取得了较大发展,但受卫星观测方式和反演算法的局限性,蒸散发产品具有一定的不确定性,而遥感蒸散发产品真实性检验的核心问题是遥感区域尺度相对真值的获取^[24],涡度相关仪的观测数据常被用来评估遥感产品的区域适用性。本文选用的涡度观测站点相对较少,需要增加更多代表不同下垫面的通量观测数据来提高研究结果的可靠性。提出的遥感蒸散发产品 Delta 校正方法是基于通量观测点的蒸散发与遥感产品之间的线性关系进行校正,未考虑高程、坡度、坡向等微观地形因子的影响。此外,渭河南山支流区与伊洛河流域受水利工程、水土保持等人类活动影响较大,这在一定程度上也会影响实际蒸散发的空间分布。今后需要进一步研究实际蒸散发多尺度转换函数,发展适用于非均匀下垫面的蒸散发理论方法,同时从气候变化和人类活动影响的不同层面上解析蒸散发变化过程,降低估算实际蒸散发的不确定性。

5 结 论

通过在站点尺度上对 GLEAM、MTE、GLDAS、AVHRR 共 4 种蒸散发产品进行精度评估,将蒸散发数据升尺度到流域,以水量平衡法验证精度,分析了黄河流域水源涵养区实际蒸散发的时空变化特征及其影响要素,进一步探讨了不同土地利用类型对实际蒸散发的影响。主要结论如下:

(1) 在站点尺度上,4 种蒸散发产品整体存在低估现象,GLEAM 数据与站点观测数据一致性较高,模拟精度较优;在多年尺度上,校正后的 GLEAM 数据与水量平衡蒸散发较接近,在黄河流域水源涵养区适用性良好。

(2) 1982—2015 年黄河流域水源涵养区实际蒸散发整体呈增加趋势,季节上夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,空间分布上自西向东实际蒸散发增加。各因子对实际蒸散发的影响存在空间差异性,整体来看,太阳辐射与气温对实际蒸散发的贡献率较高。

(3) 实际蒸散发与土地利用类型密切相关,不同植被类型的年蒸散发差异较大,高植被覆盖区的蒸散发较高,年均蒸散发排序为阔叶林 > 农田 > 针叶林 > 沼泽 > 灌丛 > 草地 > 荒漠 > 高山草甸。

参考文献:

- [1] 李晗,陈晗,黄津辉,等. 区域遥感双源蒸散发模型研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 87-94. (LI H, CHEN H, HUANG J H, et al. Research progress on dual-source evapotranspiration models based on regional remote sensing[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 87-94. (in Chinese))
- [2] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.
- [3] 鞠琴,高慧滨,王国庆,等. 基于能量平衡原理的潜在蒸散发模型构建[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 794-804. (JU Q, GAO H B, WANG G Q, et al. Modeling potential evapotranspiration based on energy balance[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 794-804. (in Chinese))
- [4] 武夏宁,胡铁松,王修贵,等. 区域蒸散发估算测定方法综述[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 257-262. (WU X N, HU T S, WANG X G, et al. Review of estimating and measuring regional evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 257-262. (in Chinese))
- [5] 崔泽鹏,王志慧,肖培青,等. 2000—2018 年黄河上中游地区蒸散发年际时空变化及其影响因素分析[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(4): 865-877. (CUI Z P, WANG Z H, XIAO P Q, et al. Analysis of spatio-temporal dynamics of interannual

- evapotranspiration and its influencing factors in the upper and middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2018[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, 37(4): 865-877. (in Chinese))
- [6] 潘健. 黄河流域多源蒸散发产品评估、融合及其在干旱研究中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019. (PAN J. Evaluation and fusion of multi-source evapotranspiration products in the Yellow River basin and its application in drought[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019. (in Chinese))
- [7] ZHU W B, TIAN S R, WEI J X, et al. Multi-scale evaluation of global evapotranspiration products derived from remote sensing images: accuracy and uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 611: 127982.
- [8] 叶林媛, 鲁汉, 秦淑静, 等. 长江流域 1960—2019 年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律[J]. *水科学进展*, 2022, 33(5): 718-729. (YE L Y, LU H, QIN S J, et al. Changes in pan evaporation and actual evapotranspiration of the Yangtze River basin during 1960—2019[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 718-729. (in Chinese))
- [9] 辛晓洲, 刘雅妮, 柳钦火, 等. MODIS 数据估算区域蒸散量的空间尺度误差纠正[J]. *遥感学报*, 2012, 16(2): 207-231. (XIN X Z, LIU Y N, LIU Q H, et al. Spatial-scale error correction methods for regional fluxes retrieval using MODIS data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(2): 207-231. (in Chinese))
- [10] 张珂, 鞠艳, 李致家. 金沙江流域实际蒸散发遥感重建及时空特征分析[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 182-191. (ZHANG K, JU Y, LI Z J. Satellite-based reconstruction and spatiotemporal variability analysis of actual evapotranspiration in the Jinshajiang River basin, China[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 182-191. (in Chinese))
- [11] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. *水文*, 2022, 42(2): 65. (WANG G Q. Definition of water conservation areas in the Yellow River basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2): 65. (in Chinese))
- [12] 吴金雨, 鞠琴, 刘小妮, 等. CMIP6 模式对黄河水源涵养区降水和气温模拟能力的评估[J]. *水利水运工程学报*, 2023(6): 1-12. (WU J Y, JU Q, LIU X N, et al. Assessment of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River basin using CMIP6 models[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(6): 1-12. (in Chinese))
- [13] ZHAO X L, WANG J B, YE H, et al. The Bowen ratio of an alpine grassland in three-river headwaters, Qinghai-Tibet Plateau, from 2001 to 2018[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(3): 305-318.
- [14] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 25.
- [15] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. [2023-07-06]. <http://www.resdc.cn/>. (XU X L, LIU J Y, ZHANG S W, et al. China's multi-temporal land use remote sensing monitoring dataset (CNLUCC)[DB/OL]. [2023-07-06]. <http://www.resdc.cn/>.)
- [16] 鞠琴, 刘小妮, 刘智天, 等. 淮北平原地下水埋深变化对气候变化的响应及预测[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 136-145. (JU Q, LIU X N, LIU Z T, et al. Response and prediction of groundwater depth changes to climate change in the Huaibei Plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(7): 136-145. (in Chinese))
- [17] LANDERER F W, SWENSON S C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(4): W04531.1-W04531.11.
- [18] 李艺珍, 毛建刚, 张明, 等. 基于 VAR 模型的新疆金沟河气象要素与径流关系分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 80-86. (LI Y Z, MAO J G, ZHANG M, et al. Relationship between meteorological elements and runoff in Jingou River basin of Xinjiang based on the VAR model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(5): 80-86. (in Chinese))
- [19] 杨晓甜, 张建业, 鲍振鑫, 等. 黄淮海流域实际蒸散发时空演变规律分析[J]. *水利水运工程学报*, 2022(3): 12-22. (YANG X T, ZHANG J Y, BAO Z X, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai River basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(3): 12-22. (in Chinese))
- [20] 陈鑫涛, 邓超. 多种蒸散发产品在黄河流域的评估和融合[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(5): 5-8, 57. (CHEN X T, DENG C. Evaluation and integration of multiple evapotranspiration products in the Yellow River basin[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(5): 5-8, 57. (in Chinese))
- [21] 夏婷, 王忠静, 罗琳, 等. 基于 REDRAW 模型的黄河河龙间近年蒸散发特性研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(7): 811-818. (XIA T, WANG Z J, LUO L, et al. REDRAW-based evapotranspiration characters analysis in Hekou-Longmen section of

the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(7): 811-818. (in Chinese))

- [22] 张晓龙. 基于遥感和通量观测的实际蒸散发机理研究与模型应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. (ZHANG X L. Research on the mechanism and model of actual evapotranspiration from satellite and flux observations[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [23] 陈厚兵, 陈耀亮, 宋清海, 等. 2001—2020年澜湄流域热带地区土地覆被变化对蒸散发的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 113-122. (CHEN H B, CHEN Y L, SONG Q H, et al. Effects of land cover change on evapotranspiration in the tropical Lancang-Mekong River basin from 2001 to 2020[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(22): 113-122. (in Chinese))
- [24] 张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 等. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展[J]. *遥感学报*, 2020, 24(8): 975-999. (ZHANG Y, JIA Z Z, LIU S M, et al. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(8): 975-999. (in Chinese))

Spatiotemporal variation characteristics of actual evapotranspiration based on remote sensing and flux observations: case study in the water conservation area of the Yellow River basin*

JU Qin^{1,2}, LIU Xiaoni^{1,2}, LIU Di^{1,2}, SHEN Tongqing^{1,2}, GU Huanghe^{1,2}, WANG Guoqing^{2,3}, YU Zhongbo^{1,2}

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Evapotranspiration (ET) is an important component in the surface water-heat balance, and accurate analysis of the spatiotemporal distribution characteristics of evapotranspiration and its influencing factors is crucial for understanding the hydrological cycle and ecosystem of specific regions. Based on flux observatory data from the Yellow River basin water conservation area, we evaluated the applicability of four ET products, Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM), Model Tree Ensembles (MTE), Global Land Data Assimilation System (GLDAS), and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), and applied the water balance principle to verify their accuracy at the basin scale, and to discuss the influencing factors of actual ET. Results showed that the GLEAM ET product had the highest accuracy at site scale. At basin scale, the relative errors of ETGLEAM and ETP-R were the smallest in a tributary basin of the Weihe River in the southern mountains, followed by the basin above Lanzhou. Actual ET in the water conservation area of the Yellow River basin showed an overall increasing trend during 1982—2015, and a gradual increase from the west toward the east in terms of spatial distribution. The annual average ET varied greatly among different vegetation types, with broadleaved forests showing the largest ET (575.2 mm), followed by farmland (504.3 mm), and alpine meadows showing the smallest ET (358.2 mm). Actual ET is mainly affected by solar radiation and temperature.

Key words: actual evapotranspiration; remote sensing evapotranspiration products; flux observations; influencing factors; water conservation area; Yellow River basin

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3201104) and the National Natural Science Foundation of China (No. U2240217).