2001—2019 年河南省地表蒸散发时空变化及其影响因素

马建琴[1], 陈 阳[1], 郝秀平[1], 李丹丹[2]
(1.华北水利水电大学, 郑州 450045; 2.郑州大学, 郑州 450045)

摘　要:探究河南省地表实际蒸散发时空变化特征及其影响因素,为该区域的生态水源保护研究与生态需水量研究提供理论依据。基于 2001—2019 年河南省的 MOD16 ET 时序数据、MOD13 DNVI 时序数据以及河南省内部及周边 104 个气象站数据,借助于 Theil-Sen 趋势与 Mann-Kendall 检验等统计方法和单相关、偏相关以及复相关分析法,分析了研究区的地表实际蒸散发(ET)时空变化特征及其影响因素。结果表明:(1) 2001—2019 年河南省多年平均 ET 值为 509.22 mm,年际变化率波动明显,ET 年内具有强烈的季节差异性;(2) 多年平均 ET 空间分布总体呈现南高北低的格局,全省 ET 整体有上升趋势;(3) 河南省多年月平均 ET 值和 NDVI 值两者皆呈双峰型变化规律,且存在显著的正相关关系;(4) ET 与气温、降水整体均呈现正相关关系,驱动分区结果表明,河南省 ET 不同地区主要受气温或降水气象因子单一驱动影响。近 19 年来河南省蒸散发整体呈现增大趋势,且具有明显空间差异特征,NDVI、气温和降水与 ET 整体处于正相关性。

关键词:地表蒸散发(ET); 时空特征; 影响因素; MODIS; 河南省
中图分类号:P426.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005-3409(2021)05-0134-08

Temporal and Spatial Changes of Surface Evapotranspiration and Its Influencing Factors in Henan Province from 2001 to 2019

MA Jianqin[1], CHEN Yang[1], HAO Xiuping[1], LI Dandan[2]
(1.*North China University of Water Resources and Electric Power*, *Zhengzhou* 450045, *China*; 2.*Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450045, *China*)

Abstract: Exploring the characteristics of temporal and spatial changes of actual surface evapotranspiration in Henan Province and its influencing factors can provide theoretical basis for the study of ecological water source protection and ecological water demand in this area. Based on the MOD16 ET time series data, MOD13 DNVI time series data of Henan Province from 2001 to 2019, and the data of 104 weather stations in and around Henan Province, the temporal and spatial characteristics of actual evapotranspiration (ET) in the study area and its influencing factors were analyzed by using the statistical methods such as Theil-Sen trend and Mann-Kendall test, and single correlation, partial correlation and the multiple correlation analysis method. The results show that: (1) the multi-year average ET value of Henan Province from 2001 to 2019 was 509.22 mm, the inter-annual rate of change fluctuated significantly, and there were significantly seasonal differences of ET during these years; (2) the multi-year average ET spatial distribution generally showed a pattern of high in the south and low in the north; there was an overall upward trend; (3) both the multi-year average monthly ET value and NDVI value of Henan Province showed a bimodal change pattern, and there was a significantly positive correlation between them; (4) ET had a positive correlation with temperature and precipitation as a whole, and the result of driving division showed that ET of different areas in Henan Prov-

收稿日期:2020-09-28　　**修回日期**:2020-10-14
资助项目:河南省高校科技创新人才支持计划(15HASTIT046);河南省科技攻关项目(152102110095);河南省高等学校重点科研项目(15A570008)
第一作者:马建琴(1973—),女,河南郑州人,工学博士,博士生导师,研究方向为农业水资源可持续利用、区域水资源优化配置、水环境研究。E-mail:majianqin@ncwu.edu.con
通信作者:陈阳(1994—),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为农业水资源可持续利用、生态环境遥感研究。E-mail:1558900604@qq.com

ince were mainly affected by a single driving force of temperature or precipitation. In the past 19 years, the overall evapotranspiration in Henan Province had shown an increasing trend with obvious spatial differences. NDVI, temperature and precipitation were overall positively correlated with ET.

Keywords: surface evapotranspiration (ET); temporal and spatial characteristics; influencing factors; MODIS; Henan Province

地表蒸散发(Evapotranspiration, ET)指土壤蒸发和植被蒸腾的总和,是评价区域地表能量、气候变化和水分平衡的主要指标,是生态环境和水资源评估的重要环节[1]。全球约 70%的地表降水以蒸散发方式返回大气,在水循环过程中蒸散发发挥着不可轻视的作用[2],地表蒸散发不仅影响区域的降水量,同时伴随的潜热效应具有降温特征,被视为气候系统中的核心过程与连接水热循环的纽带[3]。如何准确估算区域地表蒸散发量,并掌握其与影响因素的时空变化规律,对区域生态水源涵养与保护以及水资源合理开发利用提供理论基础和科学依据。

传统的蒸发皿、蒸渗仪等虽能获取相对准确的 ET,但大多局限于站点或田间尺度,适用于"点"或中小尺度的研究,遥感数据具有覆盖范围广、时间周期短、信息量大、成本相对低,能够获取长时间序列、大尺度信息等无可替代的优越性,可动态、快速地获取长时间大尺度的非均匀地面蒸散量,已成为目前区域地表蒸散发研究热点[4-5]。MOD16 数据是由美国航空航天局(NASA)制作并免费公开发布的蒸散发成品数据集,并根据 Penman-Monteith(P-M)公式对 MOD16 数据进行了修正,得到了广泛的认可和应用[6-8]。国内外针对 ET 研究在蒸散模型估算[9-10]、精度评估验证[11-12]、与蒸散数据应用[13-14]、时空特征[15-17]与影响因子分析等[18-19]方面。张猛等[15]探讨了洞庭湖流域蒸散量时空变化,并采用回归模型分析了蒸散发与气候因子的相关性;闫俊杰等[16]对 2000—2015 年伊犁河谷草地蒸散发的影响因素进行了分析,研究表明全区 ET 不仅受海拔影响明显,且与覆盖度的空间分布总体保持一致;邱丽莎等[17]利用趋势分析及相关性分析等方法对比分析了 2000—2018 年的祁连山 ET 的时空变化特征及其主要影响因子。复相关分析综合考虑多个影响因子共同作用,偏相关分析可有效排除其他因子干扰,两者已被成为探究气候因子对蒸散发影响的有效方法。王焕等[18]基于 MOD16 ET 数据和气象数据,综合运用单相关、偏相关和复相关分析法,分析了研究区 ET 的时空变化特征及其与气候因子的关系;叶红等[19]利用趋势分析、单相关、偏相关和复相关分析法,研究了 2000—2014 年黄河源区 ET 时空变化特征,重点探讨了在不同土地利用类型下 ET 的变化规律以及其与气候因子的关系。纵观现有研究发现,学者对河南省蒸散发的时空分布特征以及影响因素的研究比较缺乏。

河南省位于华北平原的南部地区,地貌自西向东突变,气候复杂多变,特别是随着现代化快速发展以及大规模频繁的生产建设活动,地表和植被不断遭受扰动,严重的水土流失导致水土资源破坏,生态环境恶化[20]。"十三五"以来,河南省大力建设水土保持重点工程和生态文明工程,生态治理成效显著,但水资源开发利用效率低、结构性缺水问题仍然比较严重。由杨秀芹等[21]对淮河流域实际蒸散发的探索中可知:MOD16A2 数据对河南省区域的适用性、合理性。基于此,本研究以 2001—2019 年逐年 MOD16 ET 数据、MOD13 NDVI 和气象数据为基础,综合应用 Theil-Sen Median 趋势分析对河南省蒸散发的时空分布特征进行分析,结合单相关、偏相关和复相关分析探究 NDVI、气候因子对 ET 的影响,从而为该区域提高水资源的合理开发利用效率提供科学依据。

1　数据及方法

1.1　数据来源及预处理

1.1.1　遥感影像数据　本文所用的 ET 数据和 NDVI 数据分别是美国 NASA(https://search.earthdata.nasa.gov/)免费提供的 2001—2019 年的数据产品 MOD16A2 和数据产品 MOD13A1。本文选用下载的 MOD16A2/ET 数据的时间分辨率为 8 d,空间分辨率 500 m;MOD13A1/NDVI 数据的时间分辨率为 16 d,空间分辨率 500 m,遥感卫星轨道号为 h27 v05,数据格式为 HDF。首先利用 MODIS 产品批处理工具 MRT(MODIS Reprojection Tool)对产品 MOD16A 数据和 MOD13A1 数据进行批量处理;然后利用 Python软件对转换后的数据进行批量裁剪,利用 Matlab2016年对异常值剔除和数据分析,并将 ET 数据加权平均获取每月 ET 和每年 ET,而 NDVI 数据采用最大值合成法获取每月 NDVI 和加权平均获取每年 NVDI。

1.1.2　气象资料　气象数据来自中国国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/)。选取河南省内部及周边 104 个地面气象站,统计各气象站点 2001—

2019年的年平均气温(℃)、降水量(mm)气象数据作为气候因子,考虑高程对气温和降水的影响,选择使用克里金插值法对气象数据进行空间插值处理。

1.2 分析方法

1.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析 本文采用稳健的非参数化趋势度(sen)分析方法,并通过 Mann-Kendall 统计检验法对 ET 长期变化的显著趋势进行解释分析[22-23]。Sen 趋势度(p)计算公式为:

$$p=\mathrm{median}((x_j-x_i)/(j-i)) \quad 1<i<j<n \tag{1}$$

式中:x_j,x_i 为 ET 时间序列,当 p 为负时,表示时间序列 ET 呈下降趋势,当 p 为正时,时间序列 ET 表示时间序列呈上升趋势。

由于 Mann-Kendall 统计检验法具有样本数据不需要遵从一定的分布,适用于非正态分布的数据,能够剔除少数异常值等优点。因此,Mann-Kendall 统计检验法是气象学、水文学、气候学中比较常用的时间序列趋势检验方法[24-26]。Mann-Kendall 检验的公式为:

$$Q=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sign}(x_j-x_i) \tag{2}$$

$$\mathrm{sign}(x_j-x_i)=\begin{cases}1 & (x_j-x_i>0)\\ 0 & (x_j-x_i=0)\\ -1 & (x_j-x_i<0)\end{cases} \tag{3}$$

$$Z=\begin{cases}\dfrac{Q-1}{\sqrt{\mathrm{var}(Q)}} & (Q>0)\\ 0 & (Q=0)\\ \dfrac{Q+1}{\sqrt{\mathrm{var}(Q)}} & (Q<0)\end{cases} \tag{4}$$

式中:Q 为检验统计量;Z 为标准化后的检验统计量;x_j,x_i 为 ET 时间序列数据;n 为样本数,当 $n>8$ 时,Q 近似为正态分布,其均值和方差计算公式为:

$$E(Q)=0 \tag{5}$$

$$\mathrm{var}(Q)=\frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \tag{6}$$

式中:标准化后 Z 为标准正态分布,双边的趋势检验中,在给定的α置信水平上,如果 $|Z|\geqslant Z_{1-\alpha/2}$ 则原假设是不可接受的,即在α置信水平上,$|Z|$ 大于等于1.645,1.96,2.576 时,分别表示通过了信度 90%,95%和 99%的显著性检验,对于统计量 Z 大于 0 时是显著上升趋势,Z 小于 0 时是显著下降趋势。因此,基于 Theil-Sen Median trend 和 Mann-Kendall 检验分析原理,利用 MATLAB 软件编程实现对河南省 19 a 的 ET 的逐像元栅格计算分析。

1.2.2 相关性分析 基于像元尺度对河南省 ET 与 NDVI 进行相关分析研究。其中,线性相关分析的计算公式为:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x)(y_i-y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x)^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-y)^2}} \tag{7}$$

式中:x_i 为第 i 年的 ET;y_i 为第 i 年的 NDVI;x,y 分别为变量 x,y 的多年平均值;R_{xy} 代表 ET 与 NDVI 的相关系数。

在线性相关分析的基础上,偏相关分析能够排除其他影响因子的相互干扰,分析两者的相关性。因此,本文对 ET 与气温、降水量进行偏相关分析,分别探究气温和降水对河南省 ET 的影响。偏相关系数计算公式如下:

$$R_{xy,z}=\frac{R_{xy}-R_{xz}\cdot R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)(1-R_{yz}^2)}} \tag{8}$$

式中:x,y,z 分别代表 ET、气温和降水量;$R_{xy,z}$ 代表为在降水量不变情况下,ET 与气温的偏相关系数。R_{xy} 表示为 ET 与气温的线性相关系数;R_{xz} 表示为 ET 与降水量的线性相关系数;R_{yz} 表示为降水量与气温的线性相关系数。

复相关分析综合考虑气温与降水等因子对目标的共同影响。复相关系数的计算公式为:

$$R_{x,yz}=\sqrt{1-(1-R_{xy}^2)(1-R_{xz,y}^2)} \tag{9}$$

式中:$R_{x,yz}$ 为 ET 与气温、降水量的复相关系数;R_{xy} 为 ET 与气温的线性相关系数;$R_{xz,y}$ 为在气温不变情况下,ET 与降水量的偏相关系数。

基于像元尺度采用 Matlab 2016 年编程对 ET 与气候因子的单相关、偏相关和复相关进行分析,探讨了 ET 与气候因子的空间相关性。

2 结果与分析

2.1 河南省 ET 的时间变化特征

季节性差异是体现地表蒸散量年内变化的重要特征,对 2001—2019 年河南省年际及各季节 ET 及变化率进行统计分析(图 1),从整体上来看,2001—2019 年河南省 ET 四季变化的分异明显,且各季节呈现波动上升趋势,春季(3—5 月)ET 为 99.98~173.41 mm,均值为 138.37 mm,占全年 27.17%,气温逐渐回升,适量的降水量,同时农作物快速生长,因此蒸散保持较高水平;夏季(6—8 月)ET 为 158.75~282.32 mm,均值为 217.72 mm,占全年 42.75%,较高的气温、较大的降水量给蒸散发提供了良好的条件;秋季(9—11 月)ET 为 96.88~117.7 mm,均值为 95.83 mm,占全年 18.81%,主要受空气温度下降,植被逐渐凋落,蒸散量逐渐减小;冬季(12 月至次年 2

月）ET 为 41.17～64.53 mm,均值为 52.34 mm,占全年 10.28%,气温,降水量均是一年中的最低季节,因此地表蒸散显著低于其他季节;全省 ET 年均值波动较大,介于 397.54～607.2 mm,多年平均 ET 值为 509.22 mm。其中年际及四季 ET 的变化率分别为 7.06 mm/a,2.43 mm/a,4.41 mm/a,1.80 mm/a,－0.34 mm/a,从河南省 ET 的年际及四季的蒸散量和变化率来看,年际 ET 值变化主要受春季、夏季的 ET 值变化影响,而冬季的 ET 值较小且变化相对比较稳定。从整体来看,河南省整体呈阶梯上升趋势,此与河南省生态文明建设工程的实施密切相关[20]。

2.2　河南省的 ET 空间变化特征

2.2.1　多年平均 ET 空间特征　河南省 2001—2019 年多年平均 ET 空间分布见图 2,全省多年平均 ET 的范围介于 207.43～1 101.96 mm/a,将省内各市 ET 进行统计(表 1),多年 ET 均值地域分异明显,分布总体呈现南高北低的格局。显著的分异特征分布与全省省植被类型、复杂气候有直接的联系。豫东南地区地跨亚热带,降水丰富,地处平原,植被类型以耕地为主,豫西植被类型以森林为主,植被覆盖率较高,ET 主要 500～700 mm 为主;焦作北部、新乡的西北部、济源北部等属太行山的南麓和东坡,多为基岩裸露的石质山地,植被覆盖率低,降雨量少,ET 以 300～500 mm 为主。

2.2.2　NPP sen 变化趋势及显著性检验　本研究基于 Theil-Sen 趋势以及 Mann-Kendall 检验方法,使用 ENVI 5.3 软件与 Matlab 2016 软件对河南省 19 a 的 ET 进行趋势分析,并将趋势分析的结果与 MK 检验的结果进行叠加,从而揭示河南省 ET 在过去 19 a 的变化趋势及其变化过程。依据该方法将结果分为无显著上升/下降、弱显著上升/下降、显著上升/下降、极显著上升/下降 8 个等级,见表 2。由图 3 可知,河南省 ET 的 sen 趋势值介于在－28～48 mm/a,平均 sen 趋势值为 7.25 mm/a。从表 2 和图 3 可见,河南省 ET 在空间上呈现出增加的趋势(增加区域的面积>减少区域的面积),其中 ET 的上升区域所占总比重为 92.32%,其中极显著上升区域最大值为 41.57%,其次是无显著上升区域与显著上升区域分别为 21.7%,19.35%,上升区域分布广泛;下降区域所占总比重为 6.64%,其中无显著下降区域占 4.59%,主要分布郑州、新乡、焦作等地区和城市群及周边区域和沿黄河生态涵养带,下降的原因主要与该地区的城市化和工业化和城市化进程影响水平,植被受到大范围破坏,水土流失有关。整体表明河南省 ET 整体向上升趋势发展。

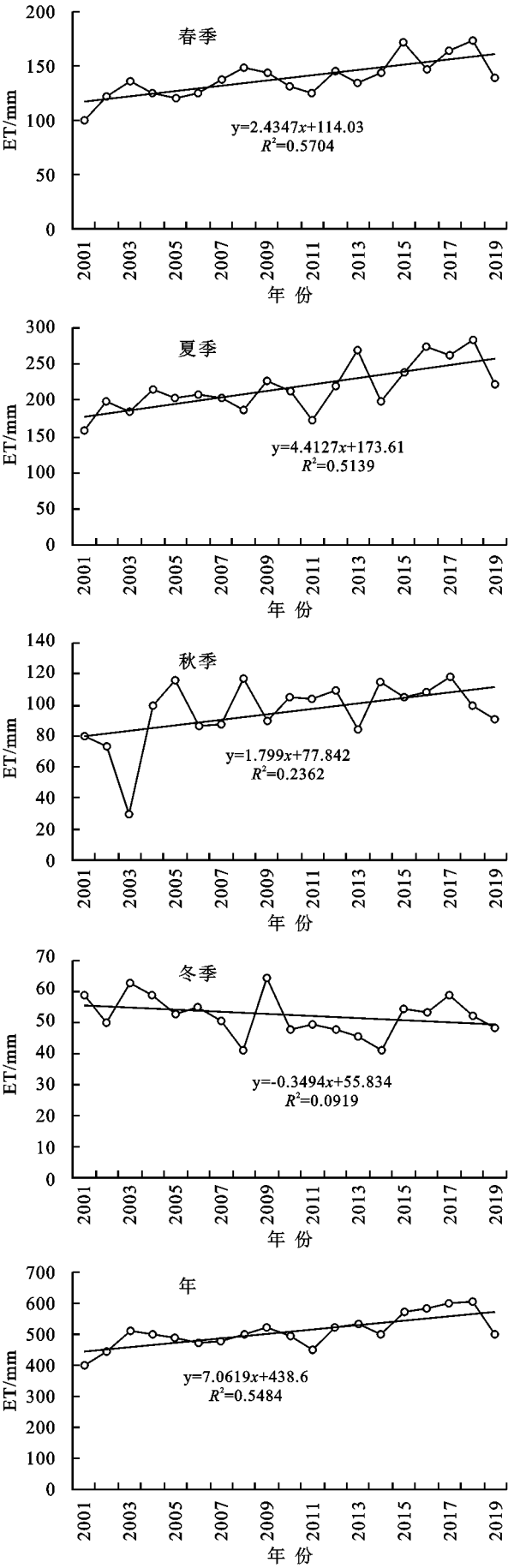

图 1　河南省季节及年际的 ET 及其变化率

表1 2001—2019年河南省各市年均ET

城市	安阳	鹤壁	焦作	济源	开封	漯河	洛阳	南阳	平顶山
ET/mm	427.52	419.46	390.27	417.43	459.76	537.43	501.50	538.91	480.92
城市	濮阳	三门峡	商丘	新乡	信阳	许昌	郑州	周口	驻马店
ET/mm	451.37	513.45	533.14	433.38	594.45	467.45	377.80	560.99	553.01

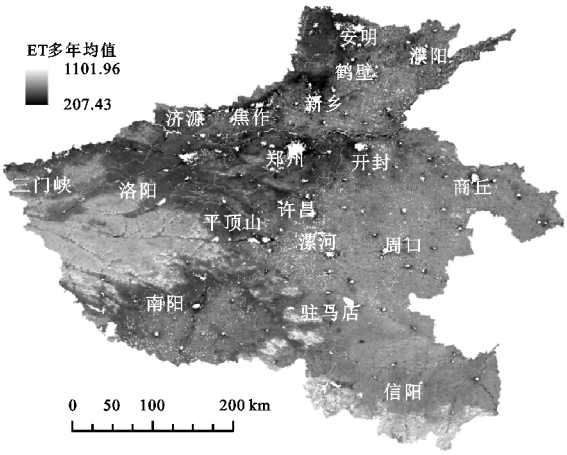

图2 河南省ET多年均值

表2 2001—2019年河南省ET变化趋势比例示意表

ET变化趋势		类型	比例/%
sen趋势	显著性水平 Z		
sen趋势小于0	$\lvert Z\rvert\leqslant 1.675$	无显著下降	4.59
sen趋势小于0	$\lvert Z\rvert>2.576$	极显著下降	0.92
sen趋势小于0	$1.96<\lvert Z\rvert\leqslant 2.576$	显著下降	0.65
sen趋势小于0	$1.675<\lvert Z\rvert\leqslant 1.96$	弱显著下降	0.48
sen趋势大于0	$1.675<\lvert Z\rvert<1.96$	弱显著上升	9.58
sen趋势大于0	$1.96<\lvert Z\rvert\leqslant 2.576$	显著上升	19.86
sen趋势大于0	$\lvert Z\rvert>2.576$	极显著上升	43.24
sen趋势大于0	$\lvert Z\rvert\leqslant 1.675$	无显著上升	20.68

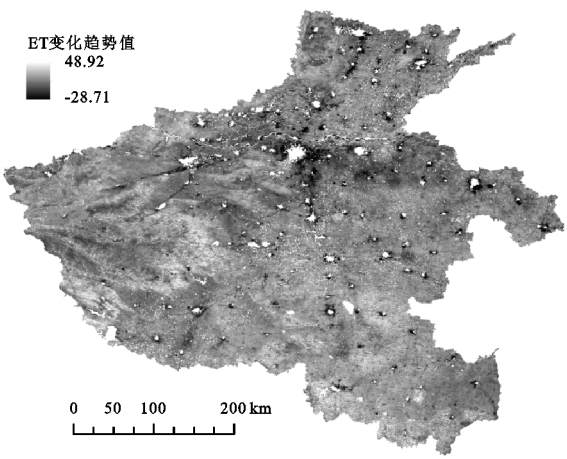

图3 2001—2019年河南省ET空间变化趋势

2.3 河南省ET与影响因素的相关分析

2.3.1 河南省ET与植被指数DNVI的相关分析 2001—2019年河南省ET和NDVI的年内变化特征对比分析见图4。由图可得，多年月平均ET值和NDVI值具有显著的一致性，其中多年月平均NDVI值为0.34～0.76，多年月平均ET值为18.01～96.4 mm，两者皆呈双峰型变化规律。其原因为河南省是典型的农业大省，省内耕地面积比重较大[21]，具体表现为：随着2—4月温度上升，植被快速生长，DNVI上升，ET也逐渐上升；5—6月是冬小麦等冬季作物丰收时期，作物的成熟和收割导致NDVI出现下降现象；7—8月夏季水热条件丰富，玉米、花生等夏季作物生长迅速，同时也是草地和森林的生长茂盛时期，植被蒸腾、土壤蒸发旺盛，使得蒸散量迅速增加，NDVI与ET均达到高峰期；9—12月温度下降，植被逐渐凋谢，NDVI与ET也随之下降；11—次年1月蒸散发变化趋势平缓，达到低值期。

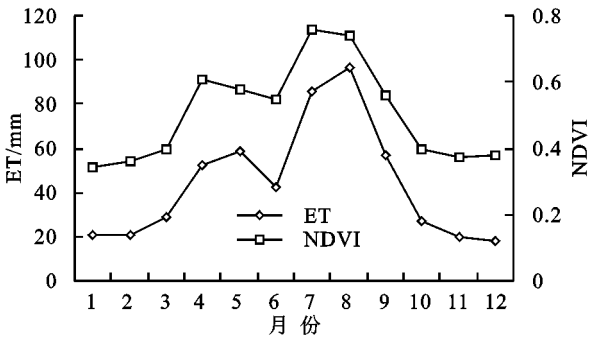

图4 ET和NDVI的年内变化分析

从空间上对ET与植被指数NDVI的相关性进行分析，其空间简单线性相关系数分布见图5。ET与NDVI的相关系数为－0.68～0.98，空间平均相关系数为0.51，ET与NDVI呈正相关区域占研究区总面积的96.53%，其中（$p<0.05$）的区域占研究区的63.21%，ET与NDVI具有显著的正相关关系。ET与NDVI的相关性的空间分异性可能与土地利用类型有直接关系，豫西，豫北地区以及南阳、信阳南部等地区以森林，草原为主，ET与NDVI相关性显著；商丘、周口等豫东地区以耕地为主，ET与NDVI相关性较弱。

2.3.2 河南省ET与气候因子的相关分析 ET的变化与区域水热变化规律密切相关，而气温和降水变化是影响区域水热分布的重要环境因素[17]，通过年际变化特征研究表明降水量和气温的变化是影响ET变化的重要气象因子。因此，选取降水和气温气候因子作为影响河南省ET的主要气候因子进行相关分析，并讨论河南省ET的驱动类型。

（1）ET与气候因子的线性相关性分析河南省ET与降水量、气温的空间简单线性相关系数分布见图6。ET与降水量的相关系数为－0.17～0.56，空间平均相关系数为0.22；与气温的相关系数为－0.26～

0.57，空间平均相关系数为 0.19，整体来说：河南省 ET 与降水量和气温均呈正相关关系。ET 与气温的正相关区域占全区域的 80.06%，呈显著正相关区域（$p<0.05$）占全研究区域为 14.79%，分布相对广泛，在周口、许昌以及豫北地区等形成连续大斑块，而 ET 与气温呈显著负相关区域（$p<0.05$）占全研究区域为 2.11%，集中分布在郑州及周边区域；ET 与降水量的正相关区域占全区域的 83.64%，呈显著正相关区域（$p<0.05$）区域占全研究区域为 15.35%，而 ET 与降水量的呈显著负相关区域（$p<0.05$）区域几乎忽略不计，其中豫南的显著正相关区域多于豫北，说明豫南的 ET 受降水影响大于豫北。

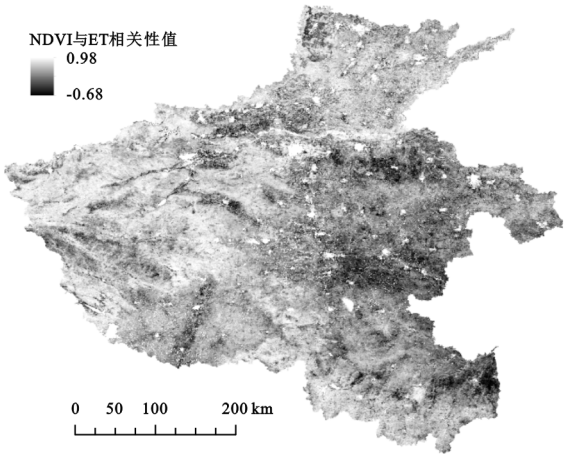

图 5　ET 和 NDVI 的相关分析

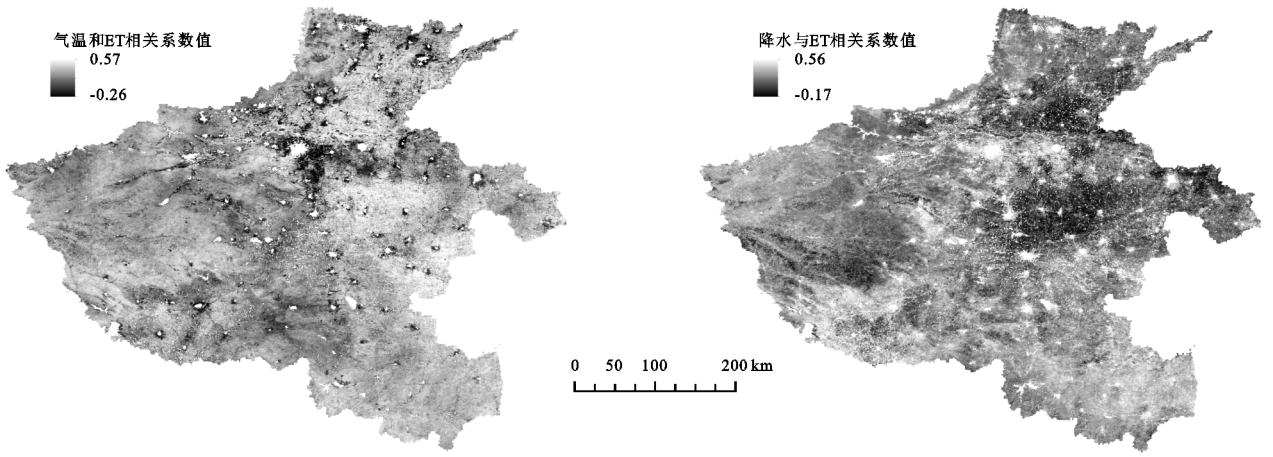

图 6　河南省 ET 与气温、降水量的线性相关系数空间分布

（2）ET 与气候因子的偏相关性分析为了排除彼此的干扰，分别针对降水量和气温展开与 ET 进行偏相关分析，见图 7。ET 与气温的偏相关系数为－0.21～0.61，平均值为 0.26，显著性水平（$p<0.05$）呈正相关区域占全区域 20.79%，主要分布广泛在新乡市、周口市等豫东北地区；ET 与降水量的偏相关系数为－0.09～0.6，平均值为 0.28，显著性水平（$p<0.05$）呈正相关区域占全区域 22.38%，主要分在南阳市、信阳市、周口市等豫东南地区。由结果可以看出，排除彼此的相关干扰，ET 与降水量、气温的相关强度均增强。显著性检验表明，全省 ET 与温度的偏相关强度区域主要分布在豫北地区，ET 与降水的偏相关强度区域主要分布在豫南地区。

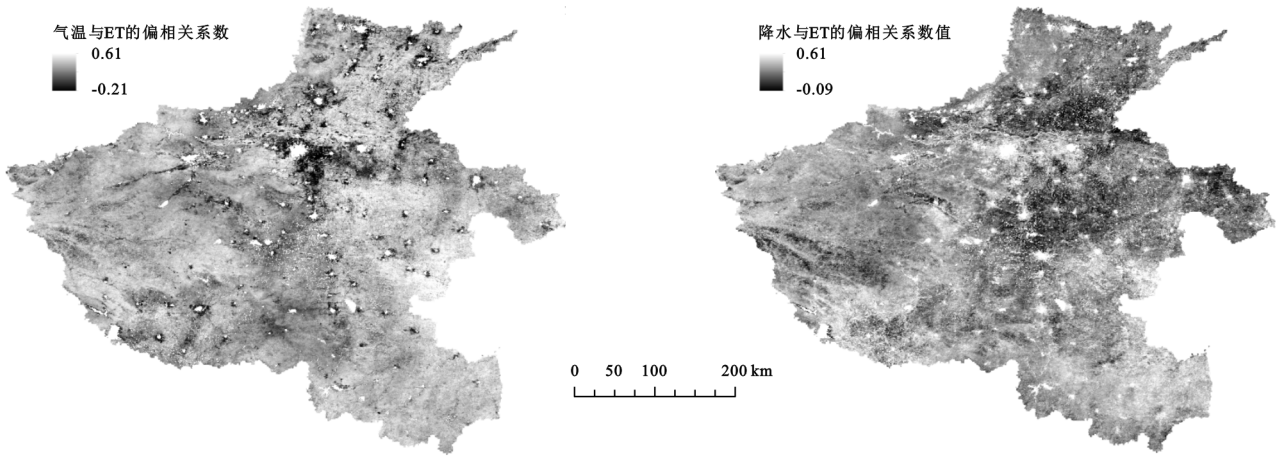

图 7　河南省 ET 与气温、降水量的偏相关系数空间分布

（3）ET 与气候因子的复相关性分析将降水量和气温对 ET 进行复相关分析，分析降水量和气温对 ET 的共同影响。河南省 ET 与气温和降水的复相关系数在 0.17～0.71，平均值为 0.44，从图 8 可以看出：河南省大部分地区 ET 与气温、降水的复相关性明显，由 F 检验结果表明，通过显著性水平（$p<0.05$）的 ET 区域为 48.3%。

3 讨论

为了进一步揭示和掌握河南省ET与气候因子的关系，基于偏相关与复相关的基础上，参考叶红等[19]的研究拟定的驱动规则(表3)，探索河南省ET的驱动机制。研究区内ET受温度、降水驱动的地区存在空间分异现象，其中受降水驱动的区域占全区域为22.37%，受降水强驱动的地区占降水驱动区域的38.69%；主要分布在南阳，信阳等豫南地区；其中受气温驱动的区域占全区域为22.52%，气温强驱动的地区占气温驱动区域的43.49%，主要分布在豫北地区；气温降水共同驱动的区域占全区域为5.54%，主要分布在信阳、驻马店和周口市等地区，气温降水共同强驱动的区域基本可以忽略。整体上，2001—2019年河南省ET驱动机制表现为气温或降水气象因子单一驱动影响，除此还存在其他因子驱动。

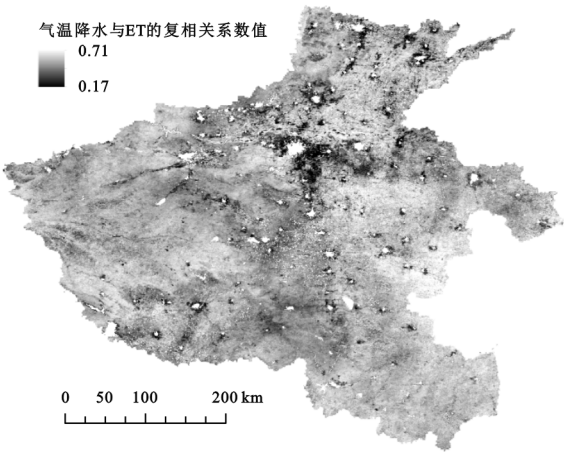

图8 河南省ET与气温降水量的复相关系数空间分布

表3 河南省ET驱动分布规则

ET驱动类型	t 检验(气温)		t 检验(降水)		F 检验	
	$a=0.05$	$a=0.01$	$a=0.05$	$a=0.01$	$a=0.05$	$a=0.01$
气温驱动	$\lvert T\rvert>t_{0.05}$				$F>f_{0.05}$	
气温强驱动		$\lvert T\rvert>t_{0.01}$				$F>f_{0.01}$
降水驱动			$\lvert T\rvert>t_{0.05}$		$F>f_{0.05}$	
降水强驱动				$\lvert T\rvert>t_{0.01}$		$F>f_{0.01}$
气温降水共同驱动	$\lvert T\rvert>t_{0.05}$		$\lvert T\rvert>t_{0.05}$		$F>f_{0.05}$	
气温降水共同强驱动		$\lvert T\rvert>t_{0.01}$		$\lvert T\rvert>t_{0.01}$		$F>f_{0.01}$
其他因子驱动	$\lvert T\rvert<t_{0.05}$		$\lvert T\rvert<t_{0.05}$		$F>f_{0.05}$	

河南省的ET时空特征具有一定的时空规律性，多年ET高值区主要分布在三门峡、驻马店，南阳与信阳南部等豫南地区；多年ET低值区主要分布在郑州、平顶山等豫西北地区，与杨秀芹等[21]研究一致。ET与NDVI的相关性较高区域主要分布在三门峡、南阳与信阳南部等豫南地区，此类地区海拔相对较高，植被类型以森林、草原为主，植被覆盖率较高，表明ET分布与海拔、植被覆盖度具有一定的联系。ET与气候因子的相关性分析结果表明全省ET与温度的显著正相关区域主要分布在豫北地区，与黄葵等[27]对海河流域南部蒸散发与温度的相关性研究结论一致，而在郑州及周边区域存在少量的负相关区域，可能受工业化和城市化进程影响，生态环境遭受破环，存在“蒸发悖论”现象[28]；而豫南地区的ET与降水量的正相关性区域强于豫北地区，这与河南地处南北过渡带，即暖温带—亚热带、湿润—半湿润季风气候有关。

本文针对2001—2019年河南省ET时空特征及其与NDVI、气温和降水两气候因子的关系进行了深入研究，但仍存在一定的局限性：(1) 选用的MOD16/ET时序数据空间分辨率为500 m×500 m，时间分辨率有8 d，其中少量的像元值为无效值，本研究以邻近时间的像元值为依据，合成各月尺度和年尺度的ET值，所以单个像元可能无法准确表现实际的ET分布。因此，在今后研究中，需选用更高分辨率的遥感数据，提高对区域细节和精度的解释能力；(2) 本研究重点探索了河南省ET与NDVI、气候因子等影响因子的关系，但ET受土地利用类型、经济因素等众多因素的影响。因此，从多个角度综合考虑对河南省ET时空变化及其影响因素是以后研究重点之一。

4 结论

(1) 2001—2019年河南省年际ET介于397.54～607.2 mm，多年平均ET值为509.22 mm，变化率波动明显，从整体来看，河南省整体呈阶梯上升趋势现象与河南省生态文明建设工程的实施密切相关；2001—2019年河南省ET年内呈现周期性波动变化趋势，具有强烈的季节差异性，四季多年ET均值从大到小排列为：夏季(217.72 mm)＞春季(138.37 mm)＞秋季(95.83 mm)＞冬季(52.34 mm)，且多年ET年际及四季的变化率分别为7.06 mm/a，2.43 mm/a，4.41 mm/a，1.80 mm/a，－0.34 mm/a，由四季、多年ET均值及四季的变化率结果表明，春季、夏

季和秋季 ET 值对年际 ET 值变化影响较大，而冬季的 ET 值较小且变化相对比较稳定。

（2）河南省 2001—2019 年多年平均 ET 空间分布总体呈现从南高北低的趋势，ET 的范围介于 207.43～1 101.96 mm/a，根据 19 a 的数据来看，豫东南地区和豫西地区植被覆盖率高，降雨量丰富，ET 主要 500～700 mm 为主；焦作北部、济源北部等豫北地区植被覆盖率低，降雨量少，ET 以 300～500 mm 为主；从河南省 ET 的 sen 趋势分析来看：值介于在－28～48 mm/a，平均 sen 趋势值为 7.247 7 mm/a，其中 ET 的上升区域所占总比重为 92.32%，下降区域仅占总比重为 6.64%，整体表明河南省 ET 整体向上升趋势发展。

（3）2001—2019 年河南省多年月平均 ET 值和 NDVI 值两者皆呈双峰型变化规律，其中多年月平均 NDVI 值为 0.34～0.76，多年月平均 ET 值为 18.01～96.4 mm，伴随 NDVI 的波动变化，多年月平均 ET 值随之波动变化，具有显著的一致性；从空间上对 ET 与植被指数 NDVI 的相关性进行分析，ET 与 NDVI 的相关系数为－0.68～0.98，空间平均相关系数为 0.51，ET 与 NDVI 呈正相关区域占研究区总面积的 96.53%，ET 与 NDVI 具有显著的正相关，从整体上看，ET 与 NDVI 的相关性与植被类型紧密相关。

（4）ET 与气候因子的相关分析表明，ET 与气温、降水整体呈正相关关系，其中豫南的 ET 受降水影响的区域大于豫北；豫北的 ET 受温度影响的区域略大于豫南。整体上，2001—2019 年河南省 ET 驱动机制表现为气温或降水气象因子单一驱动影响，除此还存在其他因子驱动。

参考文献：

[1] Zhang T, Chen Y. Analysis of dynamic spatiotemporal changes in actual evapotranspiration and its associated factors in the Pearl River Basin based on MOD16[J]. Water, 2017,9(11):832-850.

[2] 程宇琪，王雨晴，孙静萍，等.多伦县草原植被覆盖与蒸散量时空变化及其关系[J].国土资源遥感，2020，32(1)：200-208.

[3] 贺添，邵全琴.基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J].地球信息科学学报，2014，16(6)：979-988.

[4] 邬明权，杨良闯，于博，等.基于遥感与多变量概率抽样调查的作物种植面积测量[J].农业工程学报，2014，30(2)：146-152.

[5] 王万同.基于遥感技术的区域地表蒸散估算研究[D].河南开封：河南大学，2012.

[6] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(8):1781-1800.

[7] 吴桂平，刘元波，赵晓松，等.基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J].地理研究，2013，32(4)：617-627.

[8] 喻元，白建军，王建博，等.基于 MOD16 的关中地区实际蒸散发时空特征分析[J].干旱地区农业研究，2015，33(3)：245-253.

[9] 杨秀芹，王国杰，潘欣，等.基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980—2011 年地表蒸散发时空变化[J].农业工程学报，2015，31(21)：132-141.

[10] 张宇.基于 SEBS 模型的河南省麦区蒸散发估算[D].郑州：郑州大学，2019.

[11] Jang K, Kang S, Kim J, et al. Mapping evapotranspiration using MODIS and MM5 four-dimensional data assimilation[J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(3):657-673.

[12] 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.

[13] Liang S, Rui S, Xiaowen L, et al. Estimating evapotranspiration using improved fractional vegetation cover and land surface temperature space[J]. Journal of Resources and Ecology, 2011,2(3):225-231.

[14] 刘静，刘铁军，杜晓峰，等.基于 MOD16 A2 的毛乌素沙地实际蒸散量时空稳定性模拟[J].干旱地区农业研究，2020，38(2)：243-250.

[15] 张猛，曾永年，齐玥.基于 MOD16 的洞庭湖流域 2000—2014 年地表蒸散时空变化分析[J].农业工程学报，2018，34(20)：160-168，315.

[16] 闫俊杰，付秀东，赵玉，等.2001—2015 年伊犁河谷草地蒸散发时空变化分析[J].水土保持研究，2019，26(6)：184-190，197.

[17] 王焕，梅再美.贵州省地表蒸散发时空变化及其与气候因子的关系[J].水土保持研究，2020，27(5)：221-229.

[18] 邱丽莎，张立峰，何毅，等.2000—2018 年祁连山蒸散发时空变化及影响因素[J].水土保持研究，2020，27(3)：210-217.

[19] 叶红，张廷斌，易桂花，等.2000—2014 年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系[J].地理学报，2018，73(11)：2117-2134.

[20] 赵胜朝.河南省水土保持情况普查发现的问题与对策[J].中国水土保持，2014(2)：54-57.

[21] 杨秀芹，王磊，王凯.基于 MOD16 产品的淮河流域实际蒸散发时空分布[J].冰川冻土，2015，37(5)：1343-1352.

（下转第 151 页）