

基于 MOD16 的河南省地表蒸散量时空变化特征^①

张志高¹, 邵亚军², 郭超凡¹,
蔡茂堂³, 邓童瑶¹, 郭彦辰¹, 郭可欣¹

1. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455000; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007;
3. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081

摘要: 基于 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 蒸散产品 MOD16、归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 和河南省 17 个气象站点数据资料, 运用线性趋势、相关分析和克里金插值等方法对河南省 2001—2019 年蒸散量时空变化特征、不同土地利用类型蒸散量差异及其影响因素进行了分析. 结果表明: ①2001—2019 年河南省多年平均蒸散量为 364.05 mm, 空间上呈西南部伏牛山—桐柏山—大别山等山区较高, 南阳盆地和中北部地区较低的分布特征. ②河南省年内各月间的蒸散量呈“增加—减少—增加—减少”的“双峰型”分布特征, 具有明显的季节差异, 蒸散量从大到小依次为夏季(162.59 mm)、春季(113.47 mm)、秋季(66.47 mm)、冬季(35.79 mm). ③河南省蒸散量空间分布受土地利用类型影响显著, 蒸散量从大到小依次按林地(445.57 mm)、草地(347.87 mm)、水域(341.91 mm)、耕地(340.34 mm)、城镇用地(320.49 mm)、未利用土地(279.04 mm)的顺序递减. ④近 19 年来, 河南省蒸散量以 5.968 mm/a 的倾向率呈上升趋势, 明显增加的区域主要分布在西南部伏牛山—桐柏山—大别山等高蒸散量地区. ⑤相关分析表明, 河南省蒸散量受气温和植被长势情况影响较为明显, 受降水的影响较弱.

关键词: 蒸散发; MOD16; 时空变化; NDVI; 土地利用类型; 河南省

中图分类号: P426.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)09-0128-08

On Spatial-Temporal Variation Characteristics of Evapotranspiration in Henan Province Based on MOD16 Data

ZHANG Zhigao¹, SHAO Yajun², GUO Chaofan¹,
CAI Maotang³, DENG Tongyao¹, GUO Yanchen¹, GUO Kexin¹

1. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang Henan 455000, China;

2. College of Geographic Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Based on the MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) evapotranspiration product MOD16, NDVI (normalized difference vegetation index) and climatic data of 17 meteorological stations

^① 收稿日期: 2020-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602366); 河南省高等学校青年骨干教师项目(2020GGJS188); 河南省高等学校重点科研项目(20A170001; 21A170004).

作者简介: 张志高, 博士, 副教授, 主要从事气候变化研究.

通信作者: 蔡茂堂, 博士, 助理研究员.

from 2001 to 2019 in Henan Province, the spatial-temporal variation characteristics of evapotranspiration, the change characteristics of evapotranspiration under different land use types and its influencing factors were analyzed by using linear trend, correlation analysis, and Kriging interpolation methods. The results showed that, ① the annual average evapotranspiration was 364.05 mm in Henan during 2001–2019, but the spatial distribution of evapotranspiration was very obviously different in different regions, generally, the evapotranspiration was higher in the southwest Funiu Mountains, Tongbai Mountains and Dabie Mountains, and lower in Nanyang Basin and the central and northern region. ② The monthly evapotranspiration in Henan was characterized by a “bimodal peak” distribution pattern, and can be divided into four periods: increase, decrease, increase and decrease. Seasonal variation of evapotranspiration has been approximately unimodal, which changed obviously with season: 162.59 mm in Summer, 113.47 mm in spring, 66.47 mm in autumn and 35.79 mm in winter. ③ The spatial distribution of evapotranspiration in Henan was significantly affected by land use types, the evapotranspiration decreased in the order of woodland (445.57 mm) > grassland (347.87 mm) > water area (341.91 mm) > cultivated land (340.34 mm) > urban land (320.49 mm) > unused land (279.04 mm). ④ In recent 19 years, the evapotranspiration in Henan showed an increasing trend with the tendency rate of 5.968 mm/a, and the areas with obvious increase were mainly distributed in the areas with high evapotranspiration such as Funiu Mountains, Tongbai Mountains and Dabie Mountains in the southwest. ⑤ The correlation analysis showed that the evapotranspiration in Henan was obviously affected by temperature and vegetation coverage, but less affected by precipitation.

Key words: evapotranspiration; MOD16; temporal and spatial variations; NDVI; land use type; Henan Province

蒸散发(Evapotranspiration, ET)是特定区域内植被和地面向大气输送的水汽总通量,包括地表土壤水分蒸发(evaporation, E)和植物体内水分蒸腾(Transpiration, T)的总和,它是水循环最重要的组成部分,也是连接水分运移和能量转换的重要纽带,决定了土壤—植被—大气系统中的水分和热量传输,在气候干湿状况分析、水资源管理和调配以及植被分析等方面具有重要的研究意义^[1-2]。20世纪以来全球气候显著变暖,自1860年以来,人为造成的全球变暖已经达到0.87℃^[3],全球变暖将导致大气组成成分和大气环流发生变化,改变水资源的时空分布,进而深刻影响全球水循环^[4]。因此,准确估算蒸散量,分析气象因子对蒸散量的影响,对深刻认识气候变化对水文循环的影响机理、区域水资源管理和评价,以及生态环境建设等方面具有重要的应用价值^[5-7]。地形、气候和植被等自然因素的差异使得蒸散量的估算成为地表水循环估算中的难题^[8]。传统的地表蒸散研究通常是利用Penman-Monteith模型^[9]、Rana和Katerji蒸散模型^[10]等结合站点数据,在“点”尺度上进行研究,较难获取大区域蒸散的观测与估算^[11-13]。近年来,遥感技术快速发展,以其快速、动态、经济和宏观监测等特点被广泛应用,为蒸散量计算提供了新的手段,使得大尺度陆面蒸散量研究取得重大进展^[14]。2011年美国宇航局(NASA)基于MODIS数据发布了全球陆地蒸散发产品(MOD16),已由全球通量塔数据验证,数据模拟精度可达86%^[15],同时具有连续覆盖、时空分辨率高及免费可获取等特点,因此在全球被广泛使用^[16]。国内学者对中国不同流域^[17-18]、行政区^[19-20]等不同尺度的MOD16开展了系列评估工作,证实了MOD16数据具有较高的精度,可以满足蒸散发研究的需要,并在此基础上探讨了蒸散量的时空分布特征与影响因素,取得了比较满意的效果。

河南省地处华北平原,是传统农业大省和国家粮食生产核心区,被誉为“中原粮仓”,在我国农业生产中占有举足轻重的地位。然而河南省水资源严重缺乏,人均水资源量不到全国的 $\frac{1}{5}$,水资源供需矛盾较为尖锐。由于河南省地处南北气候过渡带和山区到平原的过渡带,对气候变化的适应能力较弱,全省气象灾害频发,危害严重,加之农业基础条件薄弱,受气候变化、水资源短缺以及干旱等气象灾害影响较为严重^[21]。鉴于此,本文基于MOD16数据、归一化植被指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)和地面气象站点数据,揭示河南省地表蒸散量年际、年内和不同土地利用类型下的时空分布特征,并探讨

其与气象因子和植被覆盖度之间的关系，以期为深入理解气候变化对河南省水分循环的影响、水资源管理以及农业生产提供参考。

1 数据来源与方法

1.1 研究区域概况

河南省(31°23′—36°22′N,110°21′—116°39′E)位于黄河中下游地区，总面积 16.7 万 km²，全省北、西、南三面分别由太行山、伏牛山、桐柏山和大别山等山脉环抱，地势西高东低，中部、东部为华北平原。河南省气候自南向北由亚热带向暖温带气候逐渐过渡，四季分明，雨热同期，气象灾害频繁，全省年平均气温 10.5~16.7℃，西高东低的地势有利于携带湿润水汽的东南季风深入，带来丰沛降水，年均降水 407~1 295 mm，无霜期为 190~230 d，日照时数 1 740~2 310 h。全省地跨海河、黄河、淮河和长江 4 大水系，大小河流 1 500 多条，水资源总量年均达 403.5 亿 m³。河南省从南到北依次分布北亚热带常绿阔叶林和暖温带落叶阔叶林，植物兼有南北种类，森林覆盖率为 24.53%。

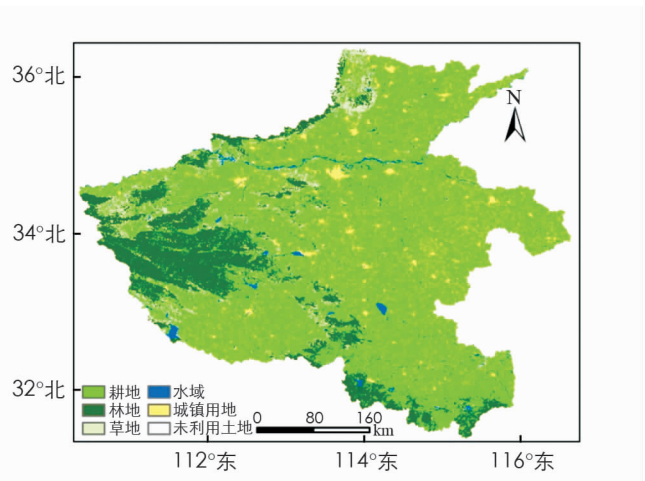
1.2 数据来源

数据来源如表 1 所示，MOD16 数据是在 Penman-Monteith 公式的基础上改进估算获得^[22]。NDVI 数据与 MOD16 ET 来自同一个网站，河南省 17 个气象站点数据来源于中国气象数据共享服务网，季节划分为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—2 月)。河南省土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心，分为耕地、林地、草地、水域、城镇用地和未利用土地等类型(图 1)。

表 1 所用数据详细信息

数据名称	数据来源	数据信息	数据用途
MOD16	美国宇航局(NASA)官方网站 http://ladweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order	产品轨道号: h27v05 产品时段: 2001—2019 空间/时间分辨率: 500 m/8 d	获取研究区地表蒸散量
NDVI	美国宇航局(NASA)官方网站 http://ladweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order	产品轨道号: h27v05 产品时段: 2001—2019 空间/时间分辨率: 250 m/16 d	获取研究区植被信息(取值范围: -1~1)
气象数据	中国气象数据共享服务网(http://cdc.Cma.Gov.cn)	安阳、新乡、三门峡、孟津、郑州、许昌、开封、西峡、南阳、宝丰、西华、驻马店、信阳、商丘、固始、桐柏和永城共 17 个站点	获取研究区气温和降水数据
土地利用数据	中国科学院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/	中国 1:100 万植被类型空间分布	获取土地利用类型

根据美国宇航局提供的卫星图像处理软件 MRT 把 HDF-EOS 格式的 ET 数据，经过一系列预处理过程，生成 GeoTiff 格式和 WGS-1984 (World Geodetic System-1984)坐标系统文件。最后，在 ArcGIS 10.0 软件中分别处理 ET 和 NDVI 数据，并利用河南省行政边界图层做掩模进行批处理，还原 ET 和 NDVI 的真实值，分别将时间分辨率为 8 d 和 16 d 合成数据生成年值数据。在 ArcGIS 10.0 软件中将气温和降水气象站点数据，通过克里金插值法生成图层，使得两者数据与 ET 数据在空间上相匹配，与 NDVI 数据一起进行相关分析，从而判断三者对河南省蒸散量的影响程度。



审图号: 豫 S(2019 年)013 号

图 1 河南省土地利用类型

1.3 研究方法

利用线性趋势法计算河南省每个栅格单元 2001—2019 年的蒸散量变化趋势, 计算公式为^[23]

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times ET - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n ET_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{1}$$

式(1) 中: S 为线性倾向率; n 为时间序列长度($n = 19$); $i = 1, \dots, n$ 分别对应 2001—2019 年; ET_i 为第 i 年的蒸散量. S 为正(负) 时, 表明近 19 年来相应像元蒸散量呈增加(减少) 趋势.

为了分析蒸散量的主要驱动因子, 利用 ArcGIS 10.0 软件中的栅格计算器工具, 采用基于年际尺度的栅格像元进行河南省蒸散量与气温、降水和 NDVI 的相关性分析, 计算公式为

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

式(2) 中: R_{xy} 为蒸散量与气温、降水和 NDVI 的相关系数; x_i 分别代表第 i 年的气温、降水量和 NDVI 值; y_i 为第 i 年的蒸散量; $\bar{x}$, $\bar{y}$ 分别为要素 x , y 的多年平均值; R_{xy} 的取值范围是 $[-1, 1]$, 系数越接近 1, 两者的相关性越高. $R_{xy} > 0$, 表示两者的关系为正相关; $R_{xy} < 0$, 表示两者的关系为负相关.

2 河南省蒸散量时空变化特征

2.1 河南省蒸散量年际变化特征

2001—2019 年河南省蒸散量年际变化如图 2 所示. 由图 2 可知, 近 19 年来河南省多年平均蒸散量为 364.05 mm. 从变化趋势来看, 近 19 年河南省年均蒸散量呈波动上升趋势, 线性拟合表明其倾向率为 5.968 mm/a.

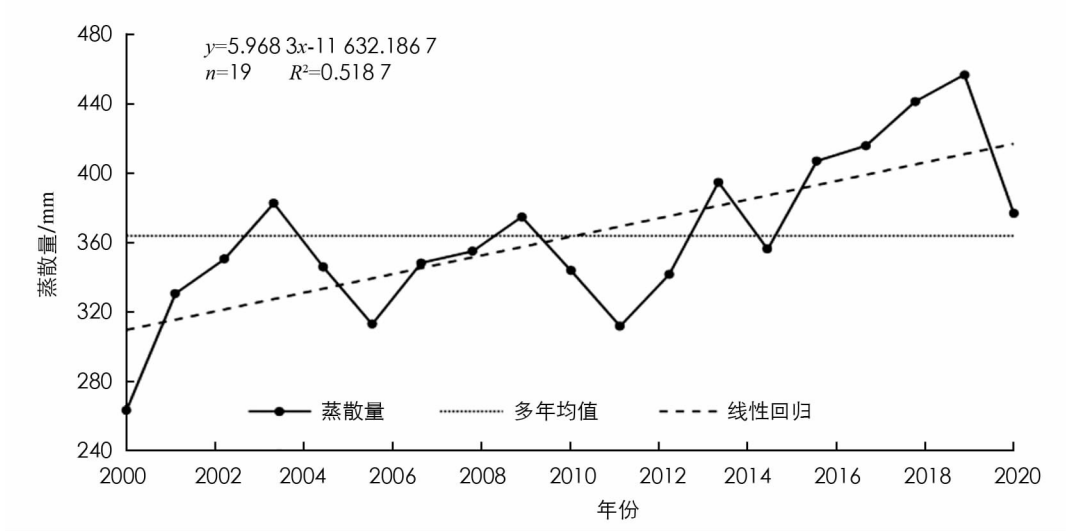


图 2 2001—2019 年河南省年蒸散量年际变化

2.2 河南省蒸散量年内变化特征

2001—2019 年河南省蒸散量年内变化如图 3 所示, 近 19 年来河南省平均月蒸散量总体呈“增加—减少—增加—减少”的趋势, 出现“双峰型”分布特征. 地表蒸散量最大值在 8 月, 达 64.62 mm; 最低值在 12 月, 仅为 10.92 mm. 1—5 月地表蒸散量快速增长, 5 月份达到一个小峰值 48.44 mm, 之后稍微下降至 6 月份的 40.12 mm, 6—8 月迅速增加至年内最大值 64.62 mm, 随后快速下降, 12 月降至年内最低 10.92 mm. 分季节来看, 蒸散量从大到小依次为夏季(162.59 mm)、春季(113.47 mm)、秋季(66.47 mm)、冬季(35.79 mm), 河南省地表蒸散量在春季和夏季增长较快, 秋季快速下降, 冬季基本不变, 这跟河南省冬小麦和夏玉米为

主的种植结构、植被覆盖、太阳辐射、气温和降水等多种因素有关. 春季开始, 全省气温回升, 降水开始增加, 冬小麦返青生长所需水分最大, 再加上人工灌溉取水的影响, 蒸散量在 5 月达到小峰值. 6 月小麦收割后蒸腾作用较弱, 地表蒸散量下降, 7—8 月气温达到年内最高, 降水也达最大值, 同时玉米生长茂盛, 蒸腾作用强, 蒸散量在 8 月达全年最高值. 秋季开始, 气温回落, 降水开始减少, 农作物和植物生长亦开始衰落, 蒸散量开始急剧减少. 冬季气温和降水为年内最低, 且植被覆盖少, 蒸散量全年最小.

2.3 河南省蒸散量空间变化特征

MOD16 采用叶面积指数间接反映随季节变化的土壤水分含量, 弱化了土壤水分作用, 因此在稀疏植被覆盖地区及沙漠区无值^[22]. 近 19 年来河南省多年平均蒸散量空间差异显著(图 4a), 多年平均蒸散量空间取值在 1.4~758.3 mm 之间, 整体上呈西南部伏牛山—桐柏山—大别山最高, 东南部较高, 西南部南阳盆地和中北部地区较低的分布特征, 该特征与河南省海拔、植被覆盖的地带性变化特征相似. 河南省西部崤山、熊耳山和伏牛山等山脉和南部桐柏山、大别山均为山地丘陵区, 海拔较高, 植被覆盖度高, 且冠层高大, 在水汽传输上具有优势^[24], 因此蒸散量较高, 平均值均在 510 mm 以上, 普遍高于 450 mm. 豫东南地区平原广阔, 降水丰沛, 加之温度较高, 丰富的水热条件使得蒸散量较大, 平均为 368.51 mm, 多数在 360 mm 以上. 河南中北部地区蒸散量较低, 因为该区多平原, 植被类型多为农作物, 同时降水和温度条件不及豫东南地区, 湿润程度较低, 因此蒸散量较少, 平均为 290 mm. 郑州—开封沿黄河一线蒸散量最低, 平均为 277.81 mm, 该处坑塘、滩涂等较多, 植被覆盖度低, 蒸散量也较低.

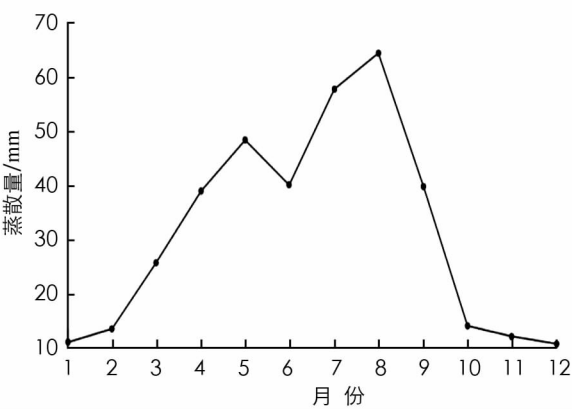
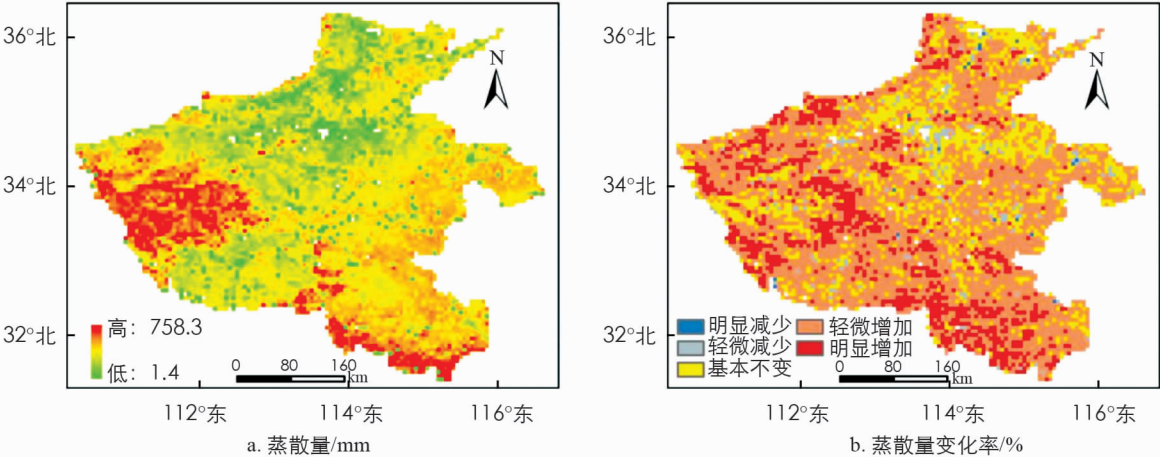


图 3 2001—2019 年河南省蒸散量年内变化



审图号: 豫 S(2019 年)013 号

图 4 河南省多年平均蒸散量和变化趋势空间分布

利用线性趋势法计算 2001—2019 年河南省蒸散量变化趋势, 并根据每个栅格单元倾向率 S 变化范围, 将河南省蒸散量变化趋势分为明显减少($S \leq -10$)、轻微减少($-10 < S < -3$)、基本不变($-3 \leq S \leq 3$)、轻微增加($3 < S < 10$)和明显增加($S \geq 10$)共 5 个等级区间(图 4b). 由图 4b 可知, 河南省大部分地区年蒸散量呈增加趋势, 增加的区域面积为 66.57%, 且以轻微增加为主(占 51.34%), 在全省广泛分布; 明显增加的区域主要分布在西南部伏牛山—桐柏山—大别山高蒸散量地区, 占比为 15.23%, 这得益于该区退耕还林和生态保护等工作, 使得区域植被和气候条件有所改善, 蒸散量因此明显增加. 河南省年蒸散量基本不变的区域面积为 30.97%, 主要分布在河南中东部和豫北部分地区. 蒸散量减少的区域面积为 2.46%, 以轻微减少为主(占 2.23%), 主要分布在河南东北部部分地区.

2.4 不同土地利用类型蒸散量变化特征

为揭示不同土地利用类型蒸散量变化特征, 基于 ArcGIS 10.0 中的区域统计功能提取不同土地利用类型的蒸散量特征(图 5). 由图 5 可知, 河南省年均蒸散量与土地利用类型密切相关, 多年平均蒸散量由大到小依次为林地(445.57 mm)、草地(347.87 mm)、水域(341.91 mm)、耕地(340.34 mm)、城镇用地(320.49 mm)、未利用土地(279.04 mm), 林地的年均蒸散量值最高, 达到 445.57 mm, 未利用土地的年均蒸散量最低, 仅为 279.04 mm, 两者相差 166.53 mm.

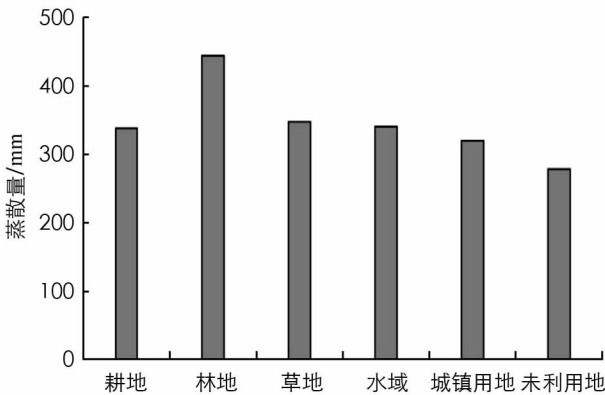


图 5 不同土地利用类型的年平均蒸散量

3 河南省蒸散量变化的影响因素分析

3.1 气温、降水和 NDVI 的线性趋势分析

2001—2019 年河南省年均温、年降水和 NDVI 变化曲线如图 6 所示. 由图 6a 可知, 近 19 年来河南省年均温在 14.36~16.30 ℃之间, 平均为 15.43 ℃, 最低为 2003 年的 14.36 ℃, 最高为 2018 年的 16.30 ℃. 河南省年降水在 549.95~1 092.51 mm/a 之间波动, 多年平均为 770.73 mm/a, 2001 年降水最少, 2003 年降水最多. 近 19 年来河南省 NDVI 平均为 0.79. 从变化趋势来看, 近 19 年来河南省年均温、NDVI 变化趋势与蒸散量变化较为相似, 均呈波动上升趋势, 倾向率分别为 0.059 9 ℃/a 和 0.001 5/a; 年降水则以 -1.334 mm/a 的倾向率呈下降趋势(图 6b).

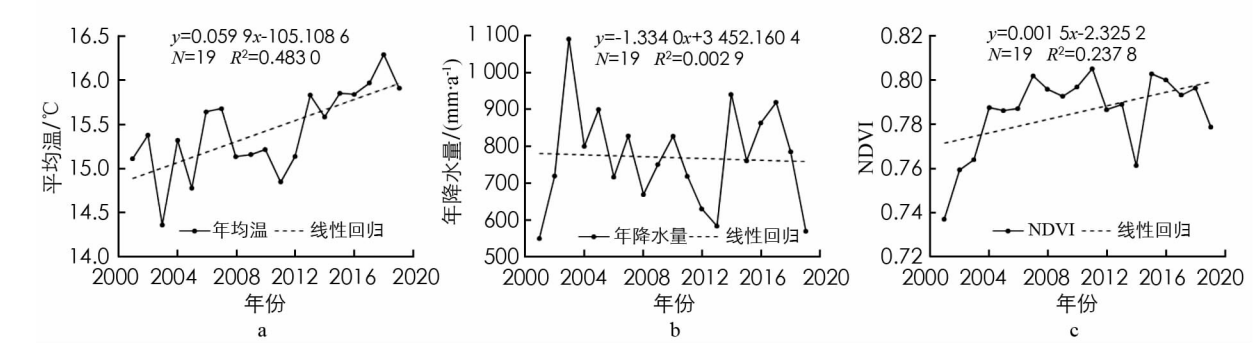


图 6 2001—2019 年河南省气温、降水和 NDVI 变化

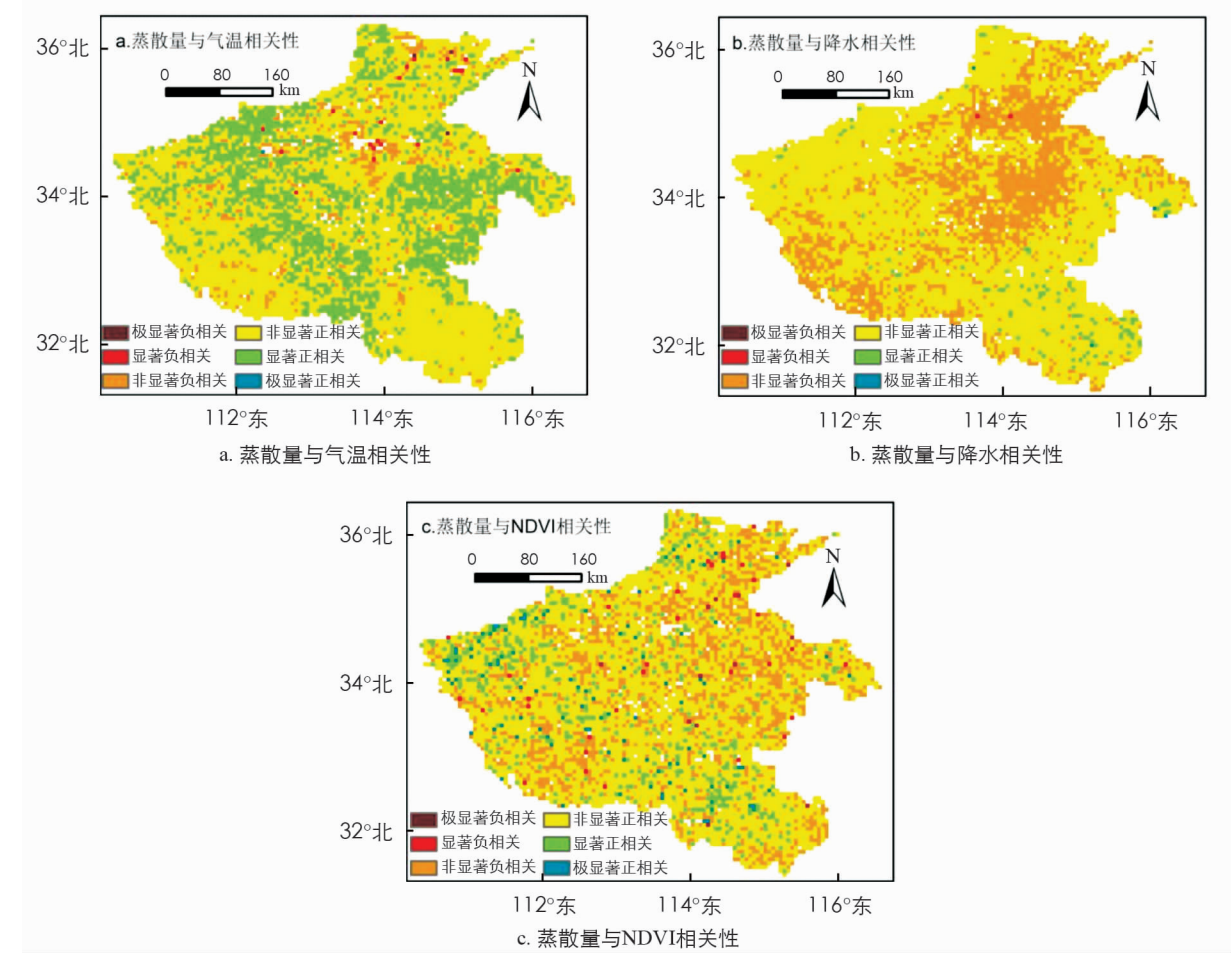
3.2 蒸散量与气象因子(气温和降水)和 NDVI 相关性分析

在年尺度上对河南省蒸散量与年均温、降水和 NDVI 进行基于像元的相关性分析, 并进行皮亚诺双侧显著性检验, 结果见表 2 和图 7. 从河南省蒸散量与气温、降水和 NDVI 相关性空间分布来看(图 7a), 河南省蒸散量与气温相关性最明显, 相关系数达 0.645, 且通过了 $p=0.01$ 水平的显著性检验, 呈极显著正相关面积占比为 3.13%, 呈显著正相关面积占比为 25.45%, 这是因为气温是影响地表蒸散过程中能量供给的关键要素之一, 气温越高, 太阳净辐射量转化为蒸散当量的比例就越高^[25]. 因此, 气温可能是河南省蒸散量变化的主要决定因子, 这与曾丽红等^[26]对松嫩平原的研究结果一致. NDVI 与蒸散量相关性非常明显, 两者相关系数为 0.513, 且通过了 $p=0.05$ 的显著性检验, 二者呈显著正相关面积占比为 8.74%, 呈极显著正相关面积占比为 1.84%, 主要分布在豫西南和豫西北等高植被覆盖度地区, 高植被覆盖度地区植被叶面积指数 LAI 较高, 故蒸散量也较高^[27]. 河南省蒸散量与降水呈正相关不太明显, 两者相关系数为 0.277, 且没有通过显著性检验, 蒸散量与降水呈极显著正相关面积占比为 0.06%, 呈显著正相关面积占比为 1.91%. 由此可知, 2001—2019 年, 河南省年均蒸散量的上升主要由气温和 NDVI 共同驱动.

表 2 蒸散量与气温、降水和 NDVI 的相关性分析

影响因素	相关系数	<i>p</i>
蒸散量—气温	0.645**	0.003
蒸散量—降水	0.277	0.250
蒸散量—NDVI	0.513*	0.025

注：**表示在 $p=0.01$ 水平(双侧)上显著相关；*表示在 $p=0.05$ 水平(双侧)上显著相关。



审图号：豫 S(2019 年 013 号)

图 7 河南省蒸散量与气象因子和 NDVI 的相关性空间分布

4 结 语

- 1) 2001—2019 年河南省年蒸散量在 263.60~456.80 mm 之间, 多年均值为 364.05 mm. 在空间分布上, 西南部伏牛山—桐柏山—大别山最高, 东南部较高, 西南部南阳盆地和中北部地区较低. 河南省年内各月蒸散量呈“增加—减少—增加—减少”的“双峰型”分布特征, 具有明显的季节差异, 从大到小依次为夏季(162.59 mm)、春季(113.47 mm)、秋季(66.47 mm)、冬季(35.79 mm).
- 2) 近 19 年来河南省蒸散量以 5.968 mm/a 的倾向率呈上升趋势, 大部分地区年蒸散量呈增加的趋势, 增加的区域面积为 66.57%, 明显增加的区域主要分布在西南部伏牛山—桐柏山—大别山等高蒸散量地区, 蒸散量减少的区域面积为 2.46%, 30.97% 的区域年蒸散量基本不变.
- 3) 河南省蒸散量空间分布受土地利用类型影响显著, 蒸散量按林地(445.57 mm)、草地(347.87 mm)、水域(341.91 mm)、耕地(340.34 mm)、城镇用地(320.49 mm)、未利用土地(279.04 mm)的顺序递减.
- 4) 河南省蒸散量与气象因子(气温、降水)和 NDVI 的相关性分析表明, 蒸散量与气温、降水和 NDVI 呈正相关, 相关系数分别为 0.645, 0.277 和 0.513. 其中, 蒸散量与气温在 $p=0.01$ 水平(双侧)上显著相

关,与NDVI在 $p=0.05$ 水平(双侧)上显著相关。河南省蒸散量受气温和植被长势情况影响较为明显,受降水影响较弱。

参考文献:

- [1] 谢正辉,陈思,秦佩华,等. 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究——进展与挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 801-813.
- [2] WANG K C, DICKINSON R E. A Review of Global Terrestrial Evapotranspiration: Observation, Modeling, Climatology, and Climatic Variability [J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2): 1-54.
- [3] IPCC. Special report on global warming of 1.5℃ [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [4] 汤秋鸿. 全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化 [J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(3): 436-438.
- [5] ZHANG R F, XU X L, LIU M X, et al. Comparing Evapotranspiration Characteristics and Environmental Controls for Three Agroforestry Ecosystems in a Subtropical Humid Karst Area [J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 1042-1050.
- [6] 梁红闪,王丹,郑江华. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 100-110.
- [7] 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.
- [8] ALLEN R G, PEREIRA L S, HOWELL T A, et al. Evapotranspiration Information Reporting: I. Factors Governing Measurement Accuracy [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 899-920.
- [9] 郭梦瑶,余敦先,张利平,等. 渭河流域潜在蒸散量变化的气候归因 [J]. 资源科学, 2020, 42(5): 907-919.
- [10] RANA G, KATERJI N. Operational Model for Direct Determination of Evapotranspiration for Well Watered Crops in Mediterranean Region [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 97(3/4): 243-253.
- [11] 张淑兰,于澎涛,王彦辉,等. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算 [J]. 地理学报, 2011, 66(3): 385-395.
- [12] 闫宇会,薛宝林,张路方,等. 基于MOD16产品的黑河流域蒸散量时空分布特征 [J]. 节水灌溉, 2019(9): 85-92.
- [13] LIAN J J, HUANG M B. Comparison of Three Remote Sensing Based Models to Estimate Evapotranspiration in an Oasis-Desert Region [J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 153-162.
- [14] 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.
- [15] 宋佳,徐长春,杨媛媛,等. 基于MODIS16的新疆干湿气候时空变化及影响因素 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 210-214, 221, 2.
- [16] DU J, SONG K S. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) Using Flux Tower Data from Panjin Coastal Wetland, Northeast China [J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(3): 420-429.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 温媛媛,赵军,王炎强,等. 基于MOD16的山西省地表蒸散发时空变化特征分析 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 255-264.
- [20] 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.
- [21] 余方琳. 1960-2016a 河南省农业气象干旱时空分异及脆弱性分析 [D]. 开封: 河南大学, 2018.
- [22] MU Q Z, ZHAO M S, RUNNING S W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [23] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等. 基于MODIS数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析 [J]. 地理研究, 2017, 36(7): 1245-1256.
- [24] 张特,刘冀,董晓华,等. 基于MOD16的渭河流域蒸散发时空分布特征 [J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 121-128.
- [25] 李林,张国胜,汪青春,等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 256-259.
- [26] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 2000年至2008年松嫩平原生长季蒸散量时空格局及影响因素分析 [J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2305-2315.
- [27] 袁国富,罗毅,邵明安,等. 塔里木河下游荒漠河岸林蒸散规律及其关键控制机制 [J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(5): 695-706.