

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

郭晓彤,孟丹,蒋博武,朱琳,龚建师

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

GUO Xiaotong, MENG Dan, JIANG Bowu, ZHU Lin, and GONG Jianshi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012010

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta 张晨晨,黄,何云,刘庆生,李贺,吴春生,刘高焕 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30

西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究

Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China

阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 赵富波, 孙彭成, 宋燕妮, 邱临静 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 20-30

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

黄河源区潜在蒸散量估算方法适用性分析

The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the headwater area of the Yellow River 李云凤, 王文科, 王国庆, 刘翠善, 郑昊昌, 马稚桐 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 10-19



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012010

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

郭晓形^{1,2},孟 丹^{1,2},蒋博武^{1,2},朱 琳^{1,2},龚建师³

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;2. 水资源安全北京实验室,北京 100048;
 3. 中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016)

摘要:淮河流域作为我国重要的粮食产地,其水资源利用情况具有很高的研究价值。利用 MODIS 蒸散发数据产品 (MOD16/ET)、降水和气温时序数据以及土地利用数据,探讨了淮河流域 2000—2014 年蒸散量时空变化特征及其对气候变 化、土地利用的响应。结果表明:淮河流域蒸散量在空间上表现为南高北低,蒸散量多年均值为 589.1 mm,夏季最高,冬季 最低。整体而言,淮河流域 15 年间蒸散量具有先增加后减少的趋势;趋势分析结果显示,31.4% 的地区蒸散量呈显著或极 显著减少趋势,5.4% 的地区蒸散量呈显著或极显著增加趋势,63.2% 的地区蒸散量无显著变化。从蒸散量的气候因子分区 看,52.0% 的区域表现为非气候因子驱动型,44.1% 的地区为降水驱动型,双因子驱动型和气温驱动型范围很小,面积占比 分别为 2.4%、1.5%,表明人类活动对蒸散发的影响巨大。四种植被覆盖土地利用蒸散量均值表现为林地>水田>旱地>草 地。根据 2000—2014 年土地利用转变引起蒸散量变化的统计结果,草地转变为水田时蒸散量明显增加,旱地转变为草地、林地转变为旱地后蒸散量明显减少。

关键词: MODIS;时空分布特征; 土地利用类型; 气温; 降水; 淮河流域; 蒸散发
中图分类号: P641.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)03-0045-08

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

GUO Xiaotong^{1,2}, MENG Dan^{1,2}, JIANG Bowu^{1,2}, ZHU Lin^{1,2}, GONG Jianshi³

College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
 Beijing Laboratory of Water Resources Security, Beijing 100048, China;
 Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey Bureau, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: The Huaihe River Basin is an important grain production area in China, and the utilization of water resources in the basin is of great research value. To explore the spatial-temporal characteristics of evapotranspiration (*ET*) in the Huaihe River Basin from 2000 to 2014 and its response to climate change and land use, MOD16/ET products, precipitation and temperature data, and land use data are used in this article. The results show that *ET* is high in the south and low in the north of the study area. The annual average *ET* is 589.1 mm, the seasonal change of *ET* decreases in this order: summer (257.4 mm) > spring (144.6 mm) > autumn (121.8 mm) > winter (66.3 mm). *ET* has an increasing trend at first and then a decreasing trend over the 15 years. According to the results of trend analysis, 31.4 % of the regions showed a significant or extremely significant decreasing trend

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-02-27

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190354)

第一作者: 郭晓彤(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感蒸散发方面的研究。E-mail: 2190902207@cnu.edu.cn

通讯作者: 孟丹(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感研究。Email: mengdan@cnu.edu.cn

of *ET*, 5.4% of the regions showed a significant or extremely significant increasing trend of *ET*, and 63.2% of the regions showed no significant change. Analyses of the driving climatic factors on *ET* change shows that about 52.0% of the study area was impacted by non-climatic driving factor, while 44.1% was driven by precipitation, and 2.4% and 1.5% were separately driven by the two climate factors and temperature, indicating that the *ET* change in this region is mainly affected by human activities. The average value of *ET* of the four types of vegetation coverage land use decreased in this order: woodland (639.29 mm) > paddy field (633.24 mm) > dry land (568.72 mm) > grassland (556.37 mm). According to the statistical results of *ET* of different land use types from 2000 to 2014, the conversion of grassland to paddy fields significantly increases *ET*, and the conversion of dry land to grassland and woodland to dry land significantly reduces *ET*.

Keywords: MODIS; spatio-temporal characteristics; land use types; temperature; precipitation; Huaihe River Basin; evapotranspiration

蒸散发包括植被蒸腾,土壤、水面的蒸发及截留 降水或露水的蒸发,是地表能量平衡和水量平衡的重 要组成部分,深刻影响着气候变化。蒸散发的准确估 算,监测其时空变化规律并分析其与气象因子的关联 性,对农林、水资源、气候、经济等相关领域意义重大^[1]。 区域蒸散发的研究方法有多种,主要包括野外仪器实 地测量法、基于物理机制的气象因子计算法、水文模 型模拟法以及遥感反演等。传统的蒸散发多以观测 站观测为主,得到的数据为"点"尺度,在空间上具有 较大的局限性。而遥感技术基于能量平衡原理,可得 到大区域、短周期的蒸散发量^[2]。空间上克服了传统 "点"尺度的局限性,时间上可动态、实时的根据需求 获取相应的遥感数据。

现今JRA55、GLEAM、MODIS、GLDAS等国内外 产品为蒸散发研究提供了方便。其中 MODIS 蒸散量 产品(MOD16)空间分辨率较高,通过了全球通量塔站 台的检验,受到国内外研究学者的关注。此领域的研 究主要包括蒸散发产品的精度验证^[3-4]、不同蒸散发 产品的评估^[5-6]、区域蒸散发时空分布特征^[7]、蒸散发 影响因素分析^[8-9]以及以蒸散发为参考因素对植被缺 水指数^[10]、地下水^[11]、干旱指数^[12]等的研究。在蒸散 发区域时空分布与影响因素分析方面,蒙雨等[13]运 用 MOD16 产品和气象站数据, 使用一元线性回归分 析法计算蒸散发的时间变化趋势并进行影响因素的 单相关分析,探讨了乌江流域蒸散发时空变化特征及 其影响因素;温媛媛等^[14]采用变异系数法、Theil-Sen median 趋势法研究了山西省多年实际蒸散发、潜在蒸 散发的空间分布特征与变化趋势;梁红闪等[15]在已有 趋势分析的基础上, 增添了 Mann-Kendall 和 Hurst 指 数,研究了伊犁河流域蒸散量时空变化特征及波动 性。黄葵等^[16]在单相关分析基础上,增加了偏相关和 复相关,分析海河流域蒸散发的影响因素。

当前对于蒸散发的研究主要集中于我国北部干 旱半干旱地区,而对于湿润地区的研究相对较少。淮 河流域人口密集,农业用地占比较高,是我国的重要 粮食产地,因此该地区的水土气候及水资源具有很高 的研究价值。本文基于 MOD16/ET 数据集定量分析 淮河流域 2000—2014 年蒸散量的时空变化特征,结合 时序气温、降水数据,采用相关分析方法定量探讨了 蒸散发与气候因子的驱动力关系,并分析土地利用及 其变化对区域蒸散发的影响,以期为淮河流域的水资 源合理开发利用提供科学指导。

1 研究区概况

淮河流域介于长江和黄河两流域之间,面积为 26.6×10⁴ km²。淮河流域包括淮河和沂沭泗河两大水 系。西部、西南部及东北部为山区和丘陵地带,其余 为平原,平原面积占流域总面积的 2/3(图 1)。淮河流 域地处中国南北气候过渡带,是我国南北方重要分界 线,冬春干旱少雨,夏季闷热多雨,冷暖和旱涝转变急 剧,流域多年平均降水量为 897.7 mm,年均气温为 15.1 ℃。

2 方法与数据

2.1 研究数据

本文数据主要包括 MOD16/ET、气象数据、土地 利用数据、DEM 数据、淮河流域边界数据及水系矢量 数据。MOD16全球蒸散发产品(http://files.ntsg.umt. edu)算法是基于改进的 Penman-Monteith 公式,对于无 植被覆盖区域做了空值处理。本文使用的 MOD16A2, MOD16A3 蒸散发产品时间尺度分别是月尺度及年尺 度,空间分辨率1 km×1 km,数据卫星轨道行列号为 h27v05 和 h28v05。对数据进行裁剪拼接,提取实际蒸 散发波段,投影变换为 CGCS2000,并剔除空值。

气象资料来源于国家气象科学数据中心(http://data.





cma.cn)中国地面气候资料数据集,收集了 2000-2014年的年、月、日气象数据。本文用到的气象因子 包括气温、降水量、蒸发量。因年、月值数据集缺少 蒸散发数据,故采用中国地面气象资料日值数据集 (V3.0),选取许昌、砀山、蒙城、泗洪、沐阳、灌云等 6个气象站蒸散量的日值数据累加得到月尺度蒸散量 数据,用于 MOD16A2/ET 月尺度数据的适用性分析。 选取气温、降水量作为蒸散量的主要气候影响因素, 采用 IDW 插值法对淮河流域内部及周边共计 61 个地 面气象站的年尺度和月尺度气象数据进行空间插值, 空间分辨率设置为1 km×1 km。空间化后的气象数据 与MOD16/ET 进行偏相关分析和复相关分析,用于蒸散量 的气候驱动类型研究。

本研究采用资源环境科学与数据中心(http://www. resdc.cn)提供的 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年土 地利用数据,空间分辨率为 1 km×1 km,用于分析土地 利用及其变化对区域蒸散发的影响。该数据集间隔 5 年有一期数据,考虑到相差一年土地利用类型不会 发生显著变化,所以在本研究中用 2015 年土地利用数 据替代 2014 年土地利用数据进行相关分析。根据"中 科院土地利用覆盖分类体系",将数据重分类为水田、 旱地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地等 7 种 土地利用类型,其中耕地划分成水田和旱地,可量化 不同农田类型下蒸散量分布特征。

2.2 研究方法

2.2.1 数据适用性分析

为验证 MOD16/ET 数据在本研究区的适用性,采

用相关系数(r)、均方根误差(RMSE)、平均偏差 (BIAS)和平均绝对偏差(MAE)等指标,将气象站蒸发 皿观测数据与MOD16A2/ET进行比对。

2.2.2 趋势分析

利用一元线性回归方程的斜率对淮河流域 2000—2014 年 MOD16A2/ET 数据进行基于像元尺度的趋势分析:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (i \times M_{ET_i}) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} M_{ET_i}}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2}$$
(1)

式中:n—监测时间序列的长度,本文中n=15;

*M*_{ET}——第*i*年 ET 的平均值;

θ_{slope} 像元 ET 的回归斜率值,并对回归系数 进行显著性检验。

结合基于像元尺度的趋势分析法,模拟蒸散量空间变化趋势斜率*θ*_{slope}和*P*值,并将变化趋势分为5个等级,见表1^[17]。

表 1	变化趋势等级
Table 1	Variation trend level

变化等级	极显著减少	显著减少	不显著变化	显著增加	极显著增加
条件	$\theta_{\text{slope}} < 0 \pm$ $P \leq 0.01$	$\theta_{slope} < 0 \pm 0.01 < P \le 0.05$	P>0.05	θ _{slope} >0 <u>用</u> . 0.01 <p≤0.05< td=""><td>θ_{slope}>0<u>⊟</u> P≤0.01</td></p≤0.05<>	θ _{slope} >0 <u>⊟</u> P≤0.01

2.2.3 蒸散量气候驱动分区准则

根据相关研究成果,在已有的植被覆盖变化气候 驱动^[18]和蒸散量变化气候驱动研究^[16]的基础上,结 合年尺度蒸散量与气候因子偏相关系数和复相关系数的显著性检验结果,确定淮河流域蒸散量与气候因子的驱动分区准则,见表2。

表 2 淮河流域蒸散发驱动分区准则 Table 2 Rules of regionalization for the drivers of *ET* change

		0	
专业公司来到		分区准则	
烝酿反驰列尖型	t检验(降水)	t检验(气温)	F检验
降水驱动型	$t \ge t_{0.05}$		$F \ge F_{0.05}$
气温驱动型		$t \ge t_{0.05}$	$F \ge F_{0.05}$
气温、降水驱动型	$t \le t_{0.05}$	$t \le t_{0.05}$	$F \ge F_{0.05}$
非气候因子驱动型			$F \leq F_{0.05}$

3 结果与分析

3.1 MOD16A2/ET 数据适用性分析

因气象站数据为小型蒸发皿观测的水面蒸发量, 而 MOD16A2/ET 为实际蒸散量,参考文献 [19-20] 确 定折算系数。选取江苏省的沐阳站、灌云站、泗洪 站、河南省的许昌站、安徽省沐阳站、砀山站共计 6 个气象站 2000—2004 年的观测数据对 MOD16A2/ET 进行分析。结果表明 r 值均大于 0.7, RMSE 在 19.89 ~ 42.50 mm/mon,与相关研究结论吻合^[21],证明了 MOD16A2/ET 在淮河流域的适用性较好。

3.2 淮河流域 MOD16/ET 的时空变化特征

3.2.1 蒸散量的年际变化特征

根据 2000—2014 年蒸散发统计结果, 淮河流域多 年蒸散量平均值为 589.1 mm, 标准差为 99.1 mm。该 区域蒸散发在空间上呈南高北低的分布格局(图 2)。





蒸散量最大值位于南部山区地带,北部地区蒸散 量值相对较低。根据地貌基本形态划分指标^[22]将该 地区高程分为5个区间(表3)。统计不同高程区间内的蒸散量均值,结果表明中山地区蒸散量最高,其次为平原、高山地区,丘陵和低山地区蒸散量较低。

表 3 不同地貌类型划分及其蒸散量数据统计 Table 3 Classification of different geomorphic types and *ET* data statistics

序号	高程/m	地貌类型	平均ET/mm	标准差/mm
1	≤20	平原	647.1	72.5
2	(20,200]	丘陵	571.2	84.6
3	(200,500]	低山	566.2	167.0
4	(500,1 500]	中山	683.6	142.0
5	>1 500	高山	610.1	91.7

对淮河流域 2000—2014 年整个研究区的年蒸散 量、降水量、气温进行统计(图 3),可看出 15 年中 2002— 2008 年、2010 年的蒸散值超过了多年平均值 589.1 mm。 15 年间,整体上淮河流域蒸散发具有先增加后减少的 趋势,自 2003 年达到峰值 630.53 mm 后,虽后续年份 存在蒸散发的回升情况(2005—2008 年),但整体上蒸 散发开始呈现减少趋势,其中 2011 年的蒸散量最低。 相关资料显示,2003 年淮河流域遭受洪灾,2011 年淮 河流域曾遭遇旱灾。同时,该地区年均降水为 897.7 mm, 降水充沛且年际变化较大;而气温年际变化较小,年 均气温一直保持在 15 ℃ 左右。根据相关性计算,气 温与降水量相关系数为-0.351,呈负相关,而降水量与 蒸散发的相关系数为 0.549,远高于气温与蒸散发的相





为表征蒸散量年际变化在空间上的分布特征,本 文基于像元尺度对15年间的蒸散量变化趋势进行了 拟合,见图4。结果显示15年间,31.4%的地区蒸散量 呈显著或极显著减少趋势,其中极显著减少地区占 16.6%,显著减少地区占14.8%,主要分布在西部地区 与江苏省东部地区;5.4%的地区蒸散量呈显著或极显 著增加趋势,其中极显著增加地区占1.8%,显著增加 地区占3.6%;63.2%的地区蒸散量无显著变化。 3.2.2 蒸散量的年内变化特征

以 2014 年数据为例,分析蒸散量及气候数据的月 尺度变化特征,结果如图 5 所示。数据显示 1—4 月蒸 散量逐步增加,5—6 月份有所降低。查阅相关资料, 产生这种现象主要与农作物种植周期有关,该地区农 作物类型主要以冬小麦夏玉米轮作为主,而冬小麦在 河南、安徽一带收割时段为 5 月下旬至 6 月上旬,从 而影响到地表蒸散发。7—8 月份蒸散量迅速增加, 在 8 月达到峰值,此后蒸散量逐渐降低。对照降水 量、气温的年内变化,1—12 月气温整体上呈现先上 升后下降的趋势,7 月气温最高;而年降水量呈现波动 上升,7—9 月降水量较大,基本呈现雨、热、蒸散 同期。



图 4 2000—2014 年蒸散量变化趋势空间分布 Fig. 4 Spatial distribution of *ET* variation trend from 2000 to 2014





统计 2000—2014 年蒸散量的季节分布, 春夏秋冬 四季的蒸散量均值分别为 144.6, 257.4, 121.8, 66.3 mm, 夏 季蒸散量最高, 冬季蒸散量最低。夏季充沛的降水增 加了该地区土壤水分,有研究表明陆面蒸散量以及土 壤储水量会随着降水的增加而增加,且与其关系密切^[23]。 **3.3** 气候变化对淮河流域蒸散发时空变化的影响

分别计算年尺度蒸散量与年降水量、年均气温的 偏相关系数和复相关系数。蒸散量与降水的偏相关系 数整体均值达到了0.42,正相关地区占整个研究区的92.1%; 蒸散量与气温的偏相关系数则表现为东部以正相关 为主,西部以负相关为主,整体均值为0.12,其中正相 关的地区占了总面积的68.6%。蒸散量与降水量、气 温的复相关系数均值达到了0.51,说明降水量和气温 对该地区蒸散发存在一定的影响。结合蒸散量与气 候因子偏相关系数和复相关系数的显著性检验结果, 确定了淮河流域蒸散发的气候因子驱动分区(图6)。 结果表明淮河流域蒸散发主要表现为非气候因子驱 动型,面积占比52.0%;其次为降水驱动型,面积占比44.1%, 双因子驱动型和气温驱动型范围很小,面积占比分别 为2.4%、1.5%。

结合高程对蒸散发驱动分区的分布进行讨论,其 中海拔小于 20 m 的平原地带主要以非气候因子驱动 型为主,面积占比达到 81.3%;海拔在 20~500 m 之间 的丘陵与低山地带,降水量驱动型与非气候因子驱动 型分别占比 46.9%、43.3%;海拔大于 500 m 的地区,以 非气候因子驱动型为主,面积占比为 85.2%。总体而 言,该地区降水量驱动型主要集中在西部的丘陵与低 山地带;非气候因子驱动型主要分布在东部平原,东 部地区水网密集,农用地以水田为主,人类活动对蒸 散发的影响显著。



Fig. 6 Spatial distribution of *ET* climate driven types

3.4 土地利用变化对淮河流域蒸散发时空变化的影响 研究区以旱地为主,其次为水田和建设用地,以
2000年为例,旱地、水田、建设用地、林地、水域、草
地、未利用地面积占比依次为52.66%、17.33%、14.18%、 7.07%、4.94%、3.73%、0.09%。2000—2015年间,建设 用地和水域面积增加,旱地、水田、林地、草地面积减 少,未利用地面积变化不大。

由于 MOD16/ET 数据在建设用地类型下多为空值,本研究仅统计旱地、水田、林地、草地 4 种植被类

型的蒸散量均值及总量(表4)。以2000年为例,4种 土地覆盖类型蒸散量均值由大到小依次为:林地、水 田、旱地、草地。2000年蒸散发总量的统计结果中, 旱地最多为798.36×10⁸ m³,其次为水田289.02×10⁸ m³、 林地116.63×10⁸ m³,草地最少为53.76×10⁸ m³。

表 4 淮河流域不同土地利用类型年均蒸散量统计 Table 4 Annual average *ET* of different land use types in the Huaihe River Basin

	水田		旱地		林地			草地				
年份	面积/ (10 ⁴ km ²)	均值/mm	总量/ (10 ⁸ m ³)	面积/ (10 ⁴ km ²)	均值/mm	总量/ (10 ⁸ m ³)	面积/ (10 ⁴ km ²)	均值/mm	总量/ (10 ⁸ m ³)	面积/ (10 ⁴ km ²)	均值/mm	总量/ (10 ⁸ m ³)
2000年	4.56	633.24	289.02	14.04	568.72	798.36	1.82	639.29	116.63	0.97	556.37	53.76
2005年	4.56	636.26	289.35	13.96	582.38	812.90	1.83	656.59	120.39	0.95	561.65	53.39
2010年	4.51	664.50	299.77	13.90	570.22	792.41	1.84	662.17	121.72	0.95	556.24	52.85
2014年	4.49	603.27	270.75	13.80	533.41	736.35	1.83	616.47	113.18	0.96	507.93	48.63

本研究计算了 2000—2014 年的土地利用转移矩 阵,并对每种转变的用地类型面积、蒸散量均值及总 量进行了统计。结果显示,草地转至水田蒸散量明显 增加,旱地转变为草地、林地转变为旱地的蒸散量 明显减少。总体而言,与 2000 年相比, 2014 年蒸散量 明显减少,15 年间 4 种用地类型的蒸散量总共减少 66.83×10⁸ m³。

4 结论

本文基于 MOD16/ET 数据集对淮河流域蒸散发 时空变化及影响因素进行了分析,得到以下主要结论:

(1)适用性分析表明 MOD16/ET 产品与采用蒸发 皿观测折算后的蒸散量数据的一致性较高,相关系数 均大于 0.7,均方根误差为 19.89~42.50 mm/mon。

(2)淮河流域多年平均蒸散量为 589.1 mm, 空间 上表现为南高北低;对不同高程下蒸散量的统计分析 发现该地区中山地区蒸散量最高,其次为平原、高山 地区,丘陵和低山地区蒸散量较低。时间上,15 年间 蒸散量呈先升后降的趋势,总体而言蒸散量减少;基 于像元尺度分析,31.4% 的地区蒸散量呈减少趋势, 5.4% 的地区蒸散量呈增加趋势,63.2% 的地区无显著 变化。

(3)蒸散量与降水的偏相关系数整体均值达到了 0.42,正相关地区占整个研究区的92.1%;蒸散量与气 温的偏相关系数整体均值为0.12,其中正相关的地区 占总面积的68.6%,相比于气温,淮河流域蒸散量与降 水量的相关性更高。从蒸散量的气候因子分区来看, 52.0%的区域表现为非气候因子驱动型,44.1%的地 区为降水驱动型,双因子驱动型和气温驱动型范围很 小, 面积占比分别为 2.4%、1.5%。

(4)蒸散量受土地利用类型的影响很大,呈现出 明显差异性,总体表现为林地>水田>旱地>草地。草 地转至水田蒸散量明显增加,旱地转变为草地、林地 转变为旱地的蒸散量明显减少,与2000年相比,2014 年蒸散量明显减少,15年间4种用地类型的蒸散量共 减少66.83×10⁸ m³。

本文仅探讨了气温和降水因素对淮河流域实际 蒸散发的影响驱动,实际蒸散发的影响因子还包括植 被覆盖度、光照强度、风速、相对湿度、人工灌溉等诸 多因素的影响,在不同气候区蒸散发的影响因素也存 在差别,因此多种复杂情况还需进一步讨论。此外, 本文气候因子驱动分区讨论是在年尺度数据的基础 上进行的分析,不可避免会模糊气温和降水的年内变 化,因此后续的研究中可以使用更精细的时间尺度数 据进行研究。

参考文献(References):

- ZHENG C, WANG Q. Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration in recent five decades in the arid land of Northwestern China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(25): 6124 - 6134.
- [2] 席丹,王文科,赵明,等.玛纳斯河流域山前平原区蒸 散发时空异质性分析[J].水文地质工程地质,2020, 47(2):25-34. [XI Dan, WANG Wenke, ZHAO Ming, et al. Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2):25-34. (in Chinese with English abstract)]
- [3] CHENG L Z, YANG M X, WANG X J, et al. Spatial and

temporal variations of terrestrial evapotranspiration in the upper Taohe River Basin from 2001 to 2018 based on MOD16 ET data[J]. Advances in Meteorology, 2020: 1 – 17.

- [4] AGUILAR AL, FLORES H, CRESPO G, et al. Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in Northwestern Mexico [J]. Water, 2018, 10(7): 901 – 914.
- [5] 王松,田巍,刘小莽,等.不同蒸散发产品在汉江流域的比较研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(3): 1-9. [WANG Song, TIAN Wei, LIU Xiaomang, et al. Comparisons of various evapotranspiration products in the Hanjiang River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science &Technology, 2018, 16(3): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄瑾,王文,崔巍,等.云贵地区几种潜在蒸散发产品质量评估[J].人民长江,2019,50(12):73-79.
 [HUANG Jin, WANG Wen, CUI Wei, et al. Evaluation of several evapotranspiration products over Yunnan-Guizhou region in China[J]. Yangtze River, 2019, 50(12):73-79. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等.中国西北干旱区蒸散发时 空动态特征[J].生态学报,2017,37(9):2994-3008.
 [DENG Xingyao, LIU Yang, LIU Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994 - 3008. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 马梓策, 于红博, 张巧凤. 2000-2017年锡林河流域地 表蒸散量的时空特征及其影响因素[J]. 中国农村水 利水电, 2020(3): 18 - 24. [MA Zice, YU Hongbo, ZHANG Qiaofeng. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and its influencing factors in Xilin River Basin from 2000 to 2017[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(3): 18 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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. [QIU Lisha, ZHANG Lifeng, HE Yi, et al. Spatiotemporal variations of evapotranspiration and influence factors in Qilian Mountain from 2000 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 210 217. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 薛明慧. 基于MOD16数据的河南省和山东省干旱的 时空分布特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2020, 15(2): 81 - 87. [XUE Minghui. Spatio-temporal

distribution characteristics of drought in Henan and Shandong provinces based on MOD16[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2020, 15(2): 81 - 87. (in Chinese with English abstract)]

- [11] 张高强. 乌审召盆地植被、蒸散与地下水的相互关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [ZHANG Gaoqiang. The relationships among vegetation, evapotranspiration and groundwater in the Wushenzhao Basin, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 高瑜莲,柳锦宝,柳维扬.基于混合型线性双源遥感蒸 散模型的南疆绿洲地区干旱研究[J].干旱地区农业 研究, 2019, 37(6): 231 - 237. [GAO Yulian, LIU Jinbao, LIU Weiyang, et al. Analysis of drought in the oasis of Southern Xinjiang based on the hybrid linear dual source remote sensing evapotranspiration model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 231-237. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 蒙雨,但文红,王焕.基于MOD16的乌江流域地表蒸 散发时空特征及影响因素[J].水土保持研究,2020, 27(6):139-145. [MENG Yu, DAN Wenhong, WANG Huan. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration and its affecting factors in Wujiang Basin based on MOD16[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 139 - 145. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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. [WEN Yuanyuan, ZHAO Jun, WANG Yanqiang, et al. Spatiotemporal variation characteristics of surface evapotranspiration in Shanxi Province based on MOD16[J]. Progress in Geography, 2020, 39(2):255 - 264. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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.
 [LIANG Hongshan, WANG Dan, ZHENG Jianghua. Temporal and spatial characteristics of surface evapotranspiration in the Ili River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 100 - 110. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 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. [HUANG Kui, LU Yimin, WEI Zheng, et al. Effects of land use and climate change on spatiotemporal changes of evapotranspiration in Haihe

River Basin[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(12): 1888 – 1902. (in Chinese with English abstract)

- [17] 李鑫川,徐金梦,朱玲玉,等. 2000—2016年淮河流域 叶面积指数时空变化特征[J].水土保持, 2019, 7(4): 71-79. [LI Xinchuan, XU Jinmeng, ZHU Lingyu, et al. Variations of LAI in Huaihe River Basin during 2000—2016[J]. Open Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 7(4): 71 - 79. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 孟丹,李小娟,宫辉力,等.京津冀地区NDVI变化及气候因子驱动分析[J].地球信息科学学报,2015, 17(8):1001-1007. [MENG Dan, LI Xiaojuan, GONG Huili, et al. Analysis of spatial-temporal change of NDVI and its climatic driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei metropolis circle from 2001 to 2013[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17(8): 1001 - 1007. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 褚荣浩,申双和,李萌,等.小型与E-601型蒸发皿蒸发量对比分析及其折算系数一以江苏省为例[J]. 气象科学, 2018, 38(2): 247 257. [CHU Ronghao, SHEN Shuanghe, LI Meng, et al. Comparative analysis of small and E-601 pan evaporation and its conversion coefficient: Taking Jiangsu Province as an example[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018, 38(2): 247 257. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 任芝花,黎明琴,张纬敏.小型蒸发器对E-601B蒸发器的折算系数[J].应用气象学报,2002(4):508-514.

[REN Zhihua, LI Mingqin, ZHANG Weimin. Conversion coefficient of smail evaporation pan into E-601B pan in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002(4): 508 – 514. (in Chinese with English abstract)]

- [21] 姜艳阳,王文,周正昊. MODIS MOD16蒸散发产品在中国流域的质量评估[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 517 528. [JIANG Yanyang, WANG Wen, ZHOU Zhenghao. Evaluation of MODIS MOD16 evapotranspiration product in Chinese river basins[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 517 528. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王耕,李素娟,张兴国.基于DEM的淮河源地貌形态
 类型划分[J].水土保持通报,2012,38(2):292-296.
 [WANG Geng, LI Sujuan, ZHANG Xingguo.
 Classification of geomorphic forms of Huaihe River source based on DEM[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 38(2):292-296. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王润元,杨兴国,张九林,等.陇东黄土高原土壤储水量与蒸发和气候研究[J].地球科学进展,2007(6):
 625-635. [WANG Runyuan, YANG Xingguo, ZHANG Jiulin, et al. A study of soil water and land surface evaporation and climate on Loess Plateau in the Eastern Gansu Province[J]. Advances in Earth Science, 2007(6):
 625-635. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华