

# 武陵山区地表蒸散量时空变化特征及其对气候变化的响应

周璐<sup>1</sup>, 汤弟伟<sup>1</sup>, 刘恒<sup>1</sup>, 宋鄂平<sup>1,2</sup>, 刘小芳<sup>3</sup>

(1.湖北民族大学 林学院园艺学院, 湖北 恩施 445000; 2.鄂西生态文化旅游研究中心, 湖北 恩施 445000; 3.恩施土家族苗族自治州自然资源和规划局, 湖北 恩施 445000)

**摘 要:**蒸散发(ET)是水文过程的关键环节,研究 ET 时空变化特征及其对气候变化的响应,有助于理清区域水资源与气候变化的关系。基于 MOD16 ET 数据集和气象数据,采用 Sen 趋势分析、Hurst 指数和相关性分析等方法,分析了武陵山区 2000—2014 年 ET 的时空变化特征及气候因子对 ET 的影响。结果表明:(1) 武陵山区近 15 a ET 呈波动增加趋势;ET 月际差异明显,表现为先增后减的单峰型变化趋势。(2) ET 空间上整体呈现中部高、四周低的分布格局;不同土地利用类型 ET 大小依次为林地>草地>灌木地>耕地,低山平均 ET 最高,四季 ET 均值呈现夏季>春季>秋季>冬季。(3) ET 空间变化和趋势均处于相对稳定状态,未来 ET 增加区域与减少区域面积大致相当。(4) 各气象因子对 ET 作用大小排序为气温>风速>降水>太阳辐射>湿度,且与气温、太阳辐射和风速为正相关,与降水和湿度为负相关,气温是其主要影响因子。综上,气候变化是武陵山区 ET 波动增加的驱动因素,但各因子的影响程度和范围差异较大。

**关键词:**蒸散量; MOD16; 武陵山区; 时空变化特征; 气候变化

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0206-08

## Spatiotemporal Variation of Surface Evapotranspiration of Wuling Mountainous Area and Its Response to Climate Change During 2000—2014

ZHOU Lu<sup>1</sup>, TANG Diwei<sup>1</sup>, LIU Heng<sup>1</sup>, SONG Eping<sup>1,2</sup>, LIU Xiaofang<sup>3</sup>

(1.College of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi, Hubei 445000, China;

2.Western Hubei Ecological Culture Tourism Research Center, Enshi, Hubei 445000, China; 3.Natural

Resources and Planning Bureau of Enshi Tujia & Miao Autonomous Prefecture, Enshi, Hubei 445000, China)

**Abstract:** Evapotranspiration (ET) is a key aspect of the hydrological processes. Assessing the spatiotemporal characteristics of ET and its response to climate change can help to clarify the relationship between regional water resources and climate change. Based on the MOD16 ET dataset and meteorological data, the spatiotemporal variation characteristics of ET and the influence of climate factors on ET in the Wuling Mountainous Area from 2000 to 2014 were discussed by using the methods of Sen trend analysis, Hurst index and correlation analysis. The results showed that: (1) In the Wuling Mountainous Area, ET showed a fluctuating increase in the past 15 years; the monthly difference of ET was obvious, showing a single-peak change trend that first increased and then decreased. (2) The overall ET spatially presents a distribution pattern of high in the middle and low in the surrounding area; ET of different land use types is mainly represented by woodland > grassland > shrub land > cultivated land. The average ET of low mountain was the highest, and the order of the average ET of four seasons was summer > spring > autumn > winter. (3) The spatial variation and trend of ET are in a relatively stable state, and the area of increase and decrease of ET is roughly equal in the

收稿日期:2021-07-07

修回日期:2021-09-11

资助项目:国家自然科学基金(71663017);湖北民族大学博士启动金(4158002);湖北省大学生创新创业训练项目(S202110517081);鄂西生态文化旅游研究中心开放课题(PT072009)

第一作者:周璐(1997—),女(土家族),湖北鹤峰人,硕士研究生,研究方向为资源环境评价与管理。E-mail:1058952389@qq.com

通信作者:汤弟伟(1987—),男(土家族),湖北建始人,博士,讲师,主要从事资源环境评价与管理研究。E-mail:jstdw@163.com

future. (4) The order of the effects of meteorological factors on ET was temperature>wind speed>precipitation>solar radiation>humidity, which was positively correlated with temperature, solar radiation and wind speed, but negatively correlated with precipitation and humidity, and air temperature is the main influencing factor. In summary, climate change is a driver of increased ET fluctuations in the Wuling Mountainous Area, but the degree and extent of influence of each factor varies widely.

**Keywords:** evapotranspiration; MOD16; Wuling Mountainous Area; spatiotemporal variation; climate change

蒸散发(Evapotranspiration, ET)直接影响着区域水资源及生态状况<sup>[1-3]</sup>。武陵山区是指武陵山覆盖的区域,该区自然条件恶劣、地理环境复杂,虽然水资源丰富,但农业产业比重大、农业基础设施落后,季节性降水偏少常会引发干旱灾害<sup>[4-5]</sup>,严重影响农业生产。再者,武陵山区经济发展落后,曾为 14 个连片集中特困区域之一,灾害抵御能力弱,自然灾害对该区影响显著大于其他地区。近年来,武陵山区实施了一系列生态环境保护和恢复措施,植被覆盖条件得到改善。而下垫面物理性质的变化会引起地气间能量水分的重新分配。因此,充分认识武陵山区蒸散量及时空特征,对于该区水资源管理和生态环境建设具有重要意义。

传统的基于站点观测资料估算蒸散量难以反映区域尺度 ET 的时空分布特征,而遥感分析由于具有时效性强、覆盖范围大等优点,已成为 ET 估算最主要的方法<sup>[6-7]</sup>。国内外学者基于经验统计公式、特征空间法和能量平衡法等方法<sup>[8-9]</sup>,生产了 GLEAM<sup>[10]</sup>、GLDAS 和 MOD16 等<sup>[11]</sup>诸多 ET 遥感数据产品,其中 MOD16 具有时空分辨率和精度高等优点,在全球范围得到了广泛验证与应用<sup>[12-13]</sup>。这些研究同时也表明,不同区域 ET 时空分布及影响因子存在较大差异,如温媛媛等<sup>[8]</sup>认为山西省 ET 呈现西北低、东南高的分布特征,近 15 a 来干旱情况在加剧,这种变化趋势在空间尺度上和时间尺度上分别与降水-相对湿度、气温-降水相关性最高,且均为正相关;马建琴等<sup>[14]</sup>则利用相关性分析发现河南省 ET 与气温、降水整体呈正相关关系;黄葵<sup>[15]</sup>、蒙雨<sup>[16]</sup>等同样认为降水和气温是影响海河流域和乌江流域 ET 的重要因素,但不同土地利用类型 ET 的驱动力机制存在较大差异;郭晓彤等<sup>[17]</sup>通过研究发现淮河流域绝大部分区域 ET 表现为非气候因子驱动型,受人类活动影响较大。对于山区而言,其下垫面更加复杂,ET 对影响因子的响应机制显著不同,如气温和风速对祁连山的 ET 影响最为显著<sup>[18]</sup>;降水对滹沱河上游山区蒸散起控制作用<sup>[19]</sup>;最高温度、最高相对湿度和最低相对湿度是影响重庆丘陵区 ET 的 3 个最主要因子<sup>[20]</sup>;受气温、日照时数、风速、降水量和空气相对湿度的综合影响,天山山区和

南、北疆潜在蒸散量总体呈减少趋势<sup>[21]</sup>。

武陵山区作为国家重点生态功能区的组成部分,具有生物多样性保护和水土保持的重要功能。然而,目前未见该区 ET 的相关研究,ET 的时空特征及其对气候变化的响应机制尚不清楚。基于此,本文拟基于 MOD16 产品和同时期气象数据,揭示武陵山区 ET 时空变化特征及其对气候变化的响应,以加深对该区地表蒸散量时空变化特征和机制的理解,为该区生态系统水源涵养和保护、水资源合理利用与开发等提供参考。

## 1 研究区概况

武陵山区地处 25°52′—31°24′N,107°4′—112°2′E,包括重庆、湖北、贵州、湖南 4 省市交界地区的 71 个县(市、区),国土总面积约  $1.718 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该区域地势西北高东南低,地貌以山地为主,平均海拔在 1 000 m 左右,是第二级阶梯向第三级阶梯的过渡带。武陵山区属亚热带向暖温带过渡类型气候,年平均气温为 13~16℃,年均降水量为 1 100~1 600 mm,夏凉冬冷,雨量充足。区内森林覆盖率达 53%,植被以常绿阔叶林和落叶林为主。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源及处理

蒸散数据为 NTSG(<http://www.ntsrg.rmt.edu>)发布的 2000—2014 年 MOD16A2 数据集,遥感卫星轨道号为 h27v05 和 h27v06,时间和空间分辨率分别为月和 1 km。该数据集包含蒸散发(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发(PET)和潜在热通量(PLE),研究选用 ET 和 PET 两个数据,其中 ET 用于分析,PET 用于精度检验。首先利用 MRT 软件对数据进行镶嵌、格式转换和重投影等操作,然后进行单位换算并剔除无效值,最后利用研究区边界裁剪和月值累加获得武陵山区蒸散量逐月、逐年数据集。

2000—2014 年蒸发皿实测蒸散量数据为国家气象科学数据中心提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),同时选取研究区内及周围 49 个气象站点的气

温和降水数据,采用 Anusplin 软件进行空间插值。太阳辐射、湿度和风速数据为中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)<sup>[22]</sup>,时间和空间分辨率分别为月和 0.1°。此外,1 km 分辨率的 DEM 来自于地理空间数据云,土地数据为 2010 年 GlobeLand 30 数据。

所有数据定义相同的空间参考(UTM\_WGS\_84\_49N)和分辨率(1 km),数据处理和分析使用 Arc-GIS 和 MATLAB 完成。

## 2.2 研究方法

2.2.1 Sen 趋势与 M-K 检验 Sen 趋势可用于分析 ET 在时间序列上的变化趋势,该方法无需数据服从特定分布且不受异常值的干扰,对离散数据具有较强的规避能力<sup>[23-24]</sup>。其计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{ET_j - ET_i}{j - i}\right), 2000 \leq i < j \leq 2014 \quad (1)$$

式中: $\beta$  为 ET 变化趋势; $\beta > 0$  表明 ET 呈上升趋势, $\beta < 0$  则为下降趋势; $ET_j$  和  $ET_i$  分别为第  $j$  年和第  $i$  年的 ET 值。变化趋势的显著性通过 M-K 统计检验法判断,相关公式如下:

检验统计:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(ET_j - ET_i) \quad (2)$$

符号函数:

$$\text{sgn}(ET_j - ET_i) = \begin{cases} 1 & ET_j - ET_i > 0 \\ 0 & ET_j - ET_i = 0 \\ -1 & ET_j - ET_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

标准化统计量:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

趋势检验的方法是<sup>[25]</sup>:零假设  $H_0, \beta = 0$ , 当  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ , 拒绝零假设。 $Z_{1-\alpha/2}$  为标准正态方差; $\alpha$  为置信度水平。

2.2.2 Hurst 指数 Hurst 指数是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法,它能够依据长时间序列数据的过去趋势预测未来发展趋势<sup>[26-27]</sup>。基本原理是:

考虑一个 ET 时间序列  $\{ET(\tau)\}$ , 对于任意正整数:均值序列:

$$\overline{ET(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} ET(\tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (6)$$

累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{t=1}^{\tau} [ET(t) - \overline{ET(\tau)}] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (7)$$

极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (8)$$

标准差:

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (ET(t) - \overline{ET(\tau)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (9)$$

若存在  $R/S \propto \tau_H$ , 说明时间序列存在 Hurst 现象,  $H$  称为 Hurst 指数,  $H$  值在双对数坐标系  $[\ln \tau, \ln(R/S)]$  中用最小二乘法拟合获得。

## 3 结果与分析

### 3.1 精度检验

蒸发皿实测蒸散量是在不受水分影响的情况下测得,而 MOD16 PET 是水分供应充足时的蒸散量,两者存在内在一致性。因此,可以通过评估两者的相关性来验证 MOD16 产品的适用性。为保证气象站点蒸发皿实测蒸散量的可靠性和连续性,剔除存在异常值和不连续的气象站点后,研究共选取秭归、靖州、新化、丰都、黔江、松桃和正安 7 个站点,将小口径蒸发皿蒸散量日值数据进行处理并折算系数,获得各站点逐月蒸散量。同时,提取气象站点所在位置 MOD16 PET 值,基于“点”尺度进行精度检验。从气象站点实测蒸散量与 MOD16 PET 的相关性(图 1)可以看出,两者的相关系数达到  $R^2 = 0.82$  ( $p < 0.01$ ),具有较高的决定性,表明 MOD16 蒸散产品在武陵山区的精度满足要求,能够用于该区蒸散量的时空分布特征研究。

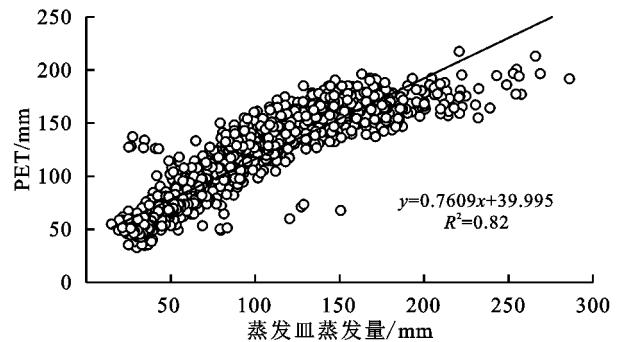


图 1 蒸发皿实测蒸散量与 MOD16 PET 的相关性

### 3.2 武陵山区蒸散量变化特征分析

3.2.1 武陵山区蒸散量的时间变化特征 武陵山区 2000—2014 年 ET 的年际变化见图 2。研究区近 15 a ET 呈波动增加趋势,其波动范围为 808.56~898.88 mm,多年均值为 858.92 mm。2001 年(808.56 mm)和 2003 年(898.87 mm)分别为 ET 最小、最大年份,极差为



90.31 mm。查阅气象资料发现,该区在 2000 年和 2001 年发生了大范围的干旱,ET 值较低。2003 年为多年降水最多年份,同时气温较高,因此 ET 高。此外,2001 年、2003 年和 2013 年 ET 相对变化率较大,分别为 -6.23%,4.44%,2.78%,表明 3 个年份 ET 波动性较明显,2001 年显著下降,2003 年和 2013 年显著上升。

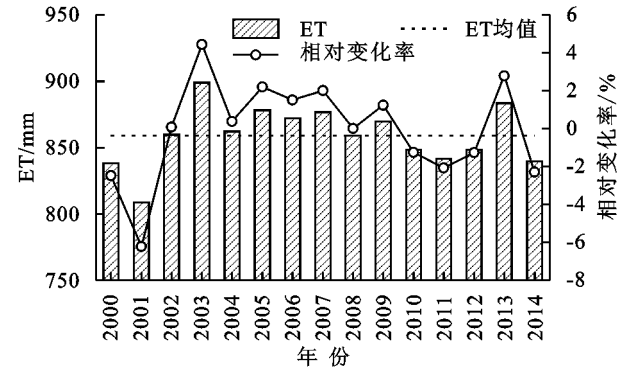


图 2 武陵山区 2000—2014 年 ET 的年际变化

武陵山区 ET 月动态表现为先增后减的单峰型变化趋势(图 3)。1—2 月气温低(4.72℃),植被处于休眠期,气温低,蒸发作用较弱,ET 较小,仅 33.35 mm;3—7 月,水热明显增多,气温和降水达到年内峰值,植被进入生长季,植被生长加速,ET 迅速增加,在 7 月达到峰值,ET 最大为 132.6 mm;8 月 ET 继续维持在较高水平;9—10 月,水热减少,太阳辐射减弱,同时植被进入成熟期,ET 下降;10 月后植被生长季结束,植被停止生长,蒸散量较小,其中 12 月为 ET 最小月份(27.36 mm)。月均 ET 与月均气温和月均降水均表现先增后减的单峰型变化趋势,其中 ET 与气温的变化特征趋于一致,表明水热因子的耦合作用是 ET 年内变化的重要影响因素。

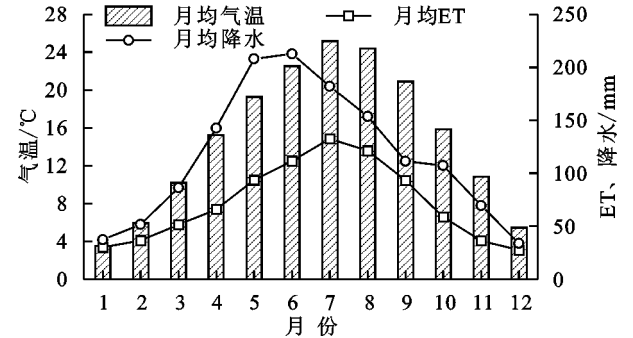


图 3 武陵山区 2000—2014 年 ET、气温和降水的月际变化

3.2.2 武陵山区蒸散量的空间变化特征 由图 4 可知,武陵山区 2000—2014 年 ET 多年均值的空间分异明显。各地 ET 多年均值范围为 497.02~1 322.55 mm,整体呈现中部高、四周低的分布格局,高值区集中在湖南的保靖、吉首、泸溪等地,低值区集中在湖北的秭归、湖南的石门东南部和重庆的丰都西北部等地。ET 的空间

分异与地表覆盖有一定联系,林地等高植被覆盖区域蒸发较为旺盛,耕地和城镇用地周围易受人类活动影响,ET 较低。武陵山区不同土地利用类型 ET 主要表现为林地(867.49 mm)>草地(865.8 mm)>灌木地(854.7 mm)>耕地(847.25 mm)。

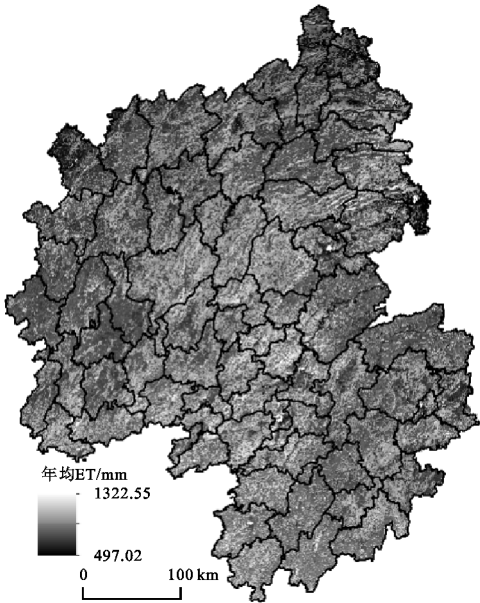


图 4 武陵山区 2000—2014 年 ET 多年均值的空间分布

高程变化引起水热条件的再分配,从而对地表蒸散量产生一定影响。根据研究区实际和地貌基本形态划分指标<sup>[28]</sup>,对武陵山区不同地貌类型 ET 进行统计。由表 1 可知,武陵山区地貌以低山和中山为主,低山平均 ET 最高,依次是中山和高山,丘陵最低。

表 1 不同地貌类型 ET 统计

高程/m	地貌类型	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	平均 ET/mm
20~200	丘陵	7429	4.32	794.39
200~500	低山	52536	30.56	875.60
500~1500	中山	105779	61.53	857.61
>1500	高山	6178	3.59	816.27

受植被生长习性和区域环境状况的影响,武陵山区 2000—2014 年四季 ET 空间分异明显,该区春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—次年 2 月)ET 的空间分布见图 5。四季 ET 均值从大到小依次为夏季(365.49 mm)>春季(211.09 mm)>秋季(188.29 mm)>冬季(94.05 mm),春季 ET 南高北低,夏季和秋季 ET 的空间分布与全区 ET 多年均值基本一致,表现为中部高、四周低,而冬季 ET 西高东低。春季气温回升使得植被开始生长,ET 介于 114.17~317.09 mm,湖北北部的秭归、巴东和重庆的丰都 ET 明显低于其他地区;夏季气温高,光照充足,太阳辐射强烈,同时伴有较多雨水,地表蒸散量旺盛,ET 介于 201.89~624.05 mm,各地 ET 较春季明显增加,中部地区尤为明显;秋季水热减少,植

被进入成熟期,ET 减少,介于 101.26~316.87 mm; 冬季气温低,植被生长停滞,蒸散量少,各地 ET 值均较小,介于 53.9~130.92 mm,空间差异相对于其他

季节减小。总体而言,四季水热条件搭配的不同使得各个季节蒸散量差异显著,而地形及植被覆盖等的不同使得同季各个区域蒸散量差异大。

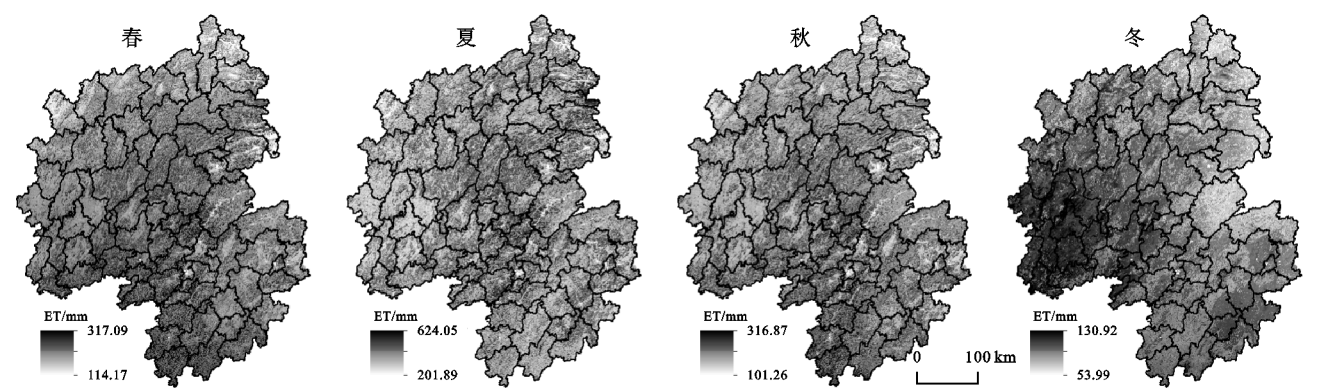


图 5 武陵山区 2000—2014 年四季 ET 的空间分布

3.2.3 武陵山区蒸散量空间变化的稳定性 基于像元尺度计算武陵山区 2000—2014 年 ET 的变异系数  $C_v$  值,分析区域蒸散量空间变化的稳定性(图 6)。ET 的  $C_v$  值范围为 0.01~0.34,均值为 0.05,表明近 15 a 武陵山区 ET 变异程度较低,空间变化处于相对稳定状态。高值集中在湖南的辰溪、溆浦、芷江、麻阳,重庆的丰都、彭水、秀山和贵州的铜仁、思南、凤冈等地,这些区域的  $C_v$  在 0.3 以上,用地类型多为耕地,植被覆盖度低,ET 变化相对剧烈。

川、酉阳、沅陵等地增加较多;下降区域占 48.05%,主要分布在区域北部和南部;其他趋势像元较少,零散分布于各地。

表 2 ET 变化趋势统计

项目	Z	变化趋势显著性	面积比例/%
$\beta > 0$	$ Z  \geq 2.58$	极显著上升	0.05
	$1.96 \leq  Z  < 2.58$	显著上升	0.57
	$0 \leq  Z  < 1.96$	不显著上升	51.04
$\beta < 0$	$ Z  \geq 2.58$	极显著下降	0.01
	$1.96 \leq  Z  < 2.58$	显著下降	0.28
	$0 \leq  Z  < 1.96$	不显著下降	48.05

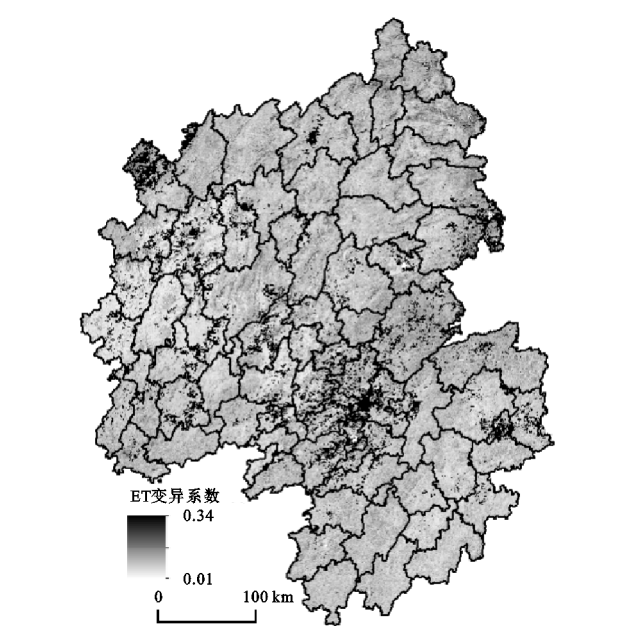


图 6 武陵山区 ET 变异系数的空间分布

3.2.4 武陵山区蒸散量空间变化的趋势 基于像元尺度计算武陵山区 2000—2014 年 ET 的  $\beta$  值并进行 M-K 检验,分析蒸散量空间变化的趋势(表 2 和图 7)。ET 的  $\beta$  值域为 -30.39~19.43,均值为 0.23,呈增长和减少趋势的区域占比分别为 51.13%,48.87%,说明研究时段武陵山区 ET 整体呈稳定趋势。ET 变化趋势多不显著(99.09%),中部地区如务

3.2.5 武陵山区蒸散量空间变化的持续性 基于像元尺度计算 Hurst 指数,分析 ET 空间变化的持续性。由图 8 可知,Hurst 指数介于 0.14~0.98,均值是 0.5,空间分布主要表现为西南高、东北和东南低。Hurst 指数小于 0.5 的比例为 49.08%,该区域 ET 空间变化特征具有反持续性,主要位于东部地区;另 50.92% 的区域 Hurst 指数大于 0.5,其空间变化特征具有持续性,在西南部和北部地区较为明显。

将趋势分析与 Hurst 指数图层叠加,分析武陵山区 ET 的未来变化趋势。由表 3 可知,ET 未来变化趋势比较混沌,各个方向的趋势占比基本相当。减少—持续趋势略明显,占比 26.21%,主要分布在区域西南部,表明该区域 ET 未来将持续减少;其次是减少—反持续,占比 25.4%,主要分布在北部和东南部,ET 未来趋势可能由减少逆转为增加;然后是增加—持续,占比 24.71%,在西南部聚集,未来 ET 将保持增加;最后是增加—反持续,占比 23.68%,多分布在中部,未来趋势可能由增加转为减少。综合来看,武陵山区未来 ET 将在 50.11% 的区域呈现增加,另 49.89% 表现为减少。



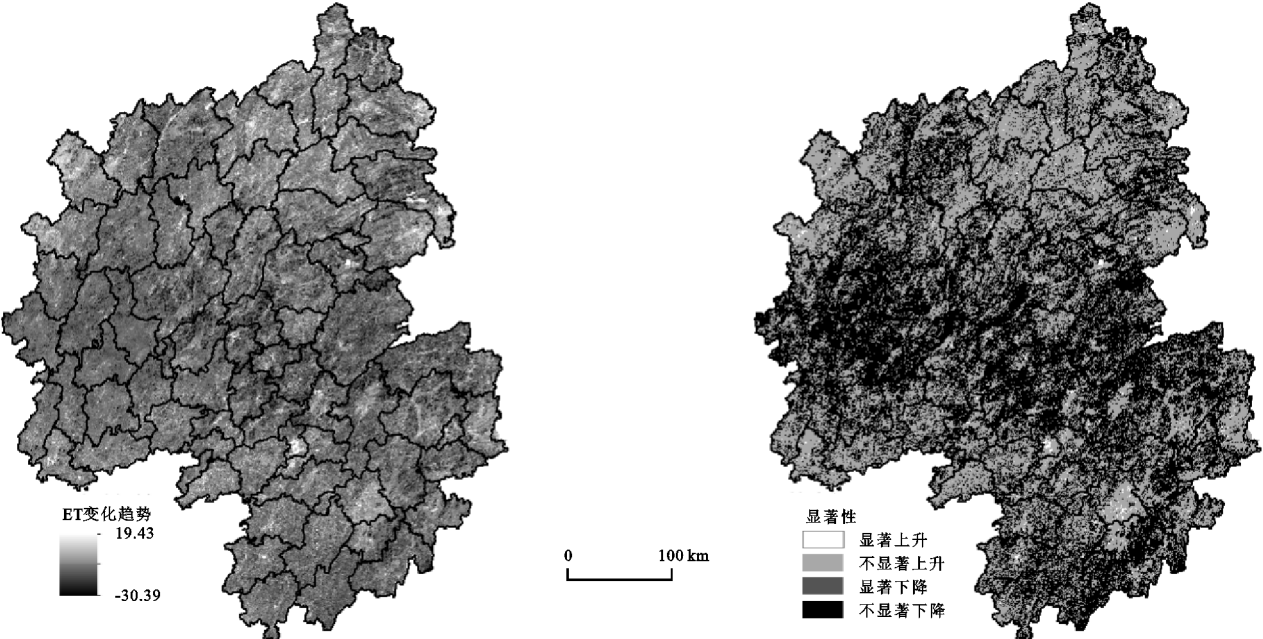


图 7 武陵山区 ET 变化趋势及显著性的空间分布

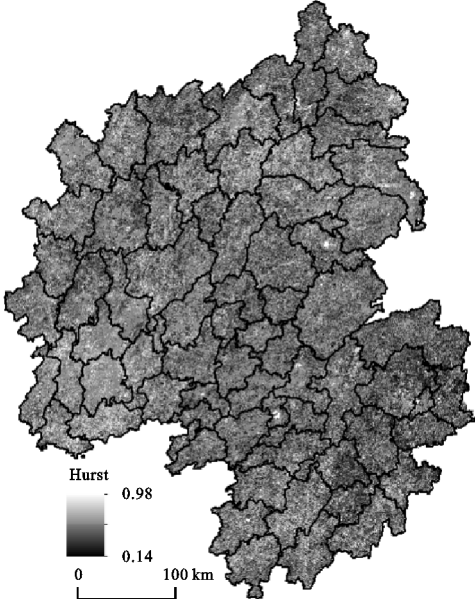


图 8 武陵山区 ET Hurst 指数空间分布

武陵山区 ET 与气温空间相关系数介于 $-0.74\sim 0.95$ ,均值为 0.23,20.28%的区域通过了显著性检验( $p<0.05$ )。在通过显著性检验区域中,显著正相关比例为 81.07%,主要集中在重庆的酉阳、石柱和湖北的利川、咸丰等地;显著负相关比例为 18.93%,主要是湖南的洞口、邵阳、慈利、石门和重庆的丰都等地(图 9A)。ET 与降水空间相关系数介于 $-0.86\sim 0.86$ ,均值为 $-0.04$ ,显著相关区域比例为 11.15%。在显著相关区域中,显著正相关为 45.21%,湖南的石门、慈利和重庆的丰都等地多显著正相关;显著负相关为 54.79%,湖南的安化、沅陵、古丈、新化、隆回和贵州的松桃、江口等地多显著负相关(图 9B)。

ET 与太阳辐射空间相关系数介于 $-0.80\sim 0.89$ ,均值为 0.1,7.53%的区域通过了显著性检验。在通过显著性检验区域中,显著正相关比例为 67.95%,主要为湖北的五峰、长阳、鹤峰和湖南的新化、冷水江、溆浦、涟源等地;显著负相关比例为 32.05%,主要为湖南的泸溪、沅陵、永顺等地(图 9C)。

表 3 ET 未来变化趋势统计

项目	Hurst 指数	未来变化趋势	面积比例/%
$\beta>0$	$0<H<0.5$	增加—反持续	23.68
	$0.5<H<1$	增加—持续	24.71
$\beta<0$	$0<H<0.5$	减少—反持续	25.40
	$0.5<H<1$	减少—持续	26.21

ET 与湿度空间相关系数介于 $-0.82\sim 0.81$ ,均值为 $-0.03$ ,显著相关区域比例为 6.19%。在显著相关区域中,显著正相关为 54.28%,湖南的保靖、凤凰和邵阳等地多显著正相关;显著负相关为 45.72%,湖南的沅陵、安化和重庆的武隆、丰都等地多显著负相关(图 9D)。

ET 与风速空间相关系数介于 $-0.87\sim 0.92$ ,均值为 0.01,11.6%的区域通过了显著性检验。在通过显著性检验区域中,显著正相关比例为 51.26%,主要为湖北的恩施、巴东和湖南的安化、溆浦、隆回等地;显著负相关比例为 48.74%,主要为湖南的泸溪、古丈、辰溪和湖北的长阳、五峰、鹤峰等地(图 9E)。

总体上看,武陵山区 ET 与气温、太阳辐射和风速的正相关面积大于负相关且相关系数均值为正,主要表现为正相关;ET 与降水和湿度的负相关面积大于正相关且相关系数均值为负,主要表现为负相关。

各气象因子与 ET 显著相关范围的面积比例依次为气温(20.28%)>风速(11.6%)>降水(11.15%)>太

阳辐射(7.53%)>湿度(6.19%),气温是武陵山区 ET 时空变化的主要气象因子。

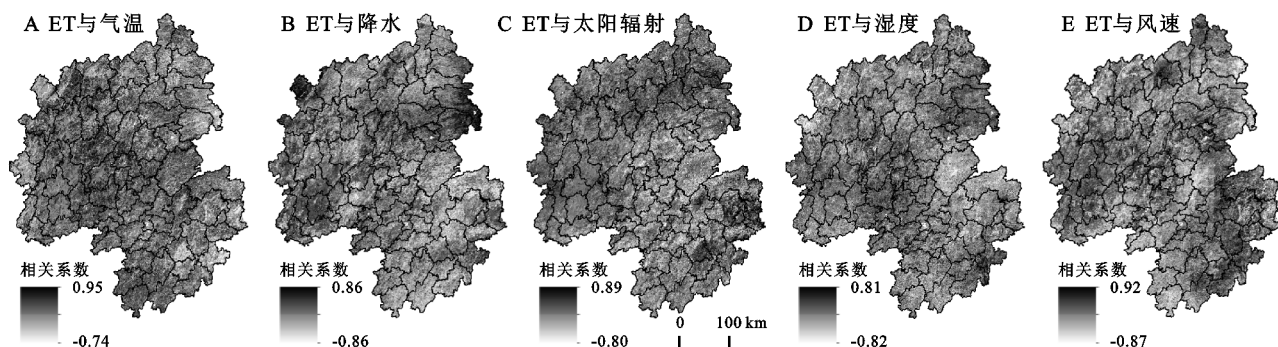


图 9 武陵山区 2000—2014 年 ET 与气象因子的关系

势,7 月达到峰值。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

武陵山区为我国亚热带森林生态系统核心区、长江流域重要的水源涵养区和生态屏障,加强其地表蒸散量的监测,对该区水土保持、水资源合理利用和旱涝灾害监测具有重要意义。近 15 a 武陵山区 ET 呈波动增加趋势,与田静等<sup>[30]</sup>研究结果一致,ET 多年均值为 858.92 mm,略高于贵州省(854.95 mm)<sup>[31]</sup>。ET 空间分布格局表现出一定规律性,中海拔和高植被覆盖地区 ET 较高,不同用地类型 ET 表现为林地>草地>灌木地>耕地,与黄葵等<sup>[15]</sup>研究结论相似。

ET 变化是多因子综合作用的结果,武陵山区地理环境复杂多变,其 ET 变化及响应机制较为复杂。研究选用气温、降水、太阳辐射、湿度和风速 5 个因子来分析 ET 与气候变化的关系,结果表明 ET 与气温、太阳辐射和风速整体正相关,但与降水和湿度整体负相关,这与詹云军<sup>[29]</sup>和崔豪<sup>[32]</sup>等研究结果相吻合。其原因在于当下垫面比较干旱时,蒸散量多受土壤水分影响,而下垫面水分充足时,温度、太阳辐射等成为蒸散量变化的最主要因素<sup>[33-34]</sup>。武陵山区近 15 a 气温呈上升趋势、降水呈下降趋势,但气候整体仍较为湿润,更多的受到热力和动力因素的影响,气温是该区 ET 时空变化的主要气象因子。值得注意的是,像元尺度、气象因子与 ET 的相关性总体显著性低,可能是土壤和植被状况对 ET 的贡献比较大,在未来的研究中需要进一步考虑。

### 4.2 结论

(1) 武陵山区近 15 a ET 呈波动增加趋势,其波动范围为 808.56~898.88 mm,多年均值为 858.92 mm。ET 月动态表现为先增后减的单峰型变化趋

(2) ET 多年均值的空间分异明显,整体呈现中部高、四周低的分布格局,各地 ET 多年均值范围为 497.02~1 322.55 mm。不同土地利用类型 ET 主要表现为林地>草地>灌木地>耕地,地貌以低山和中山为主,低山平均 ET 最高,依次是中山和高山,丘陵最低。四季 ET 均值从大到小依次为夏季>春季>秋季>冬季。

(3) ET 变异程度较低, $\beta$  值域为-30.39~19.43,均值为 0.23,空间变化和趋势均处于相对稳定状态。Hurst 指数介于 0.14~0.98,均值是 0.5,空间分布主要表现为西南高、东北和东南低。未来 ET 增加区域与减少区域面积大致相当。

(4) ET 与气温、太阳辐射和风速主要表现为正相关,与降水和湿度主要表现为负相关,各气象因子与 ET 显著相关范围的比例依次为气温>风速>降水>太阳辐射>湿度,气温是武陵山区 ET 时空变化的主要气象因子。

### 参考文献:

- [1] 刘可,杜灵通,侯静,等.2000—2014 年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律[J].草业学报,2018,27(3):1-12.
- [2] 王芳,汪左,张运,等.基于 MOD16 的安徽省地表蒸散量时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2018,27(3):523-534.
- [3] 张静,任志远.基于 MOD16 的汉江流域地表蒸散发时空特征[J].地理科学,2017,37(2):274-282.
- [4] 孙丽,王飞,李保国,等.基于多源数据的武陵山区干旱监测研究[J].农业机械学报,2014,45(1):246-252.
- [5] 孙丽,陈曦炜,宋振华,等.武陵山地区干旱时空特征分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(S1):118-125.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 田义超,梁铭忠,胡宝清.2000—2013 年北部湾海岸带蒸散量时空动态特征[J].农业机械学报,2015,46(8):146-158.
- [10] Martens B, Miralles D, Hans L, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5):1-36.
- [11] 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.
- [12] Kim H W, Hwang K, Mu Q, et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2012,16(2):229-238.
- [13] Jang K, Kang S, Lim Y, et al. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(23): 12927-12940.
- [14] 马建琴,陈阳,郝秀平,等.2001—2019 年河南省地表蒸散发时空变化及其影响因素[J].水土保持研究,2021, 28(5):1-9.
- [15] 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,2019,12(21):1888-1902.
- [16] 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.
- [17] 郭晓彤,孟丹,蒋博武,等.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[J].水文地质工程地质,2021,48(3):45-52.
- [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] 张瑞钢,莫兴国,林忠辉.滹沱河上游山区近 50 年蒸散变化及主要影响因子分析[J].地理科学,2012,32(5): 628-634.
- [20] 熊友胜,杨艳,董霄,等.重庆丘陵区参考作物蒸散量的确定及气候影响因素分析[J].灌溉排水学报,2013, 32(3):11-15.
- [21] 普宗朝,张山清,王胜兰,等.近 36 年天山山区潜在蒸散量变化特征及其与南、北疆的比较[J].干旱区研究, 2009,26(3):424-432.
- [22] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1). DOI:10.1038/s41597-020-0369-y.
- [23] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报,2013,33(24):7798-7806.
- [24] 王耀斌,赵永华,韩磊,等.2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其趋动因子[J].应用生态学报,2018,29(7):2373-2381.
- [25] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].3 版.北京:高等教育出版社,2017.
- [26] 刘宪锋,任志远,林志慧,等.2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J].地理学报,2013,68(7):897-908.
- [27] 刘恒,汤弟伟,宋鄂平,等.2000—2015 年武陵山区植被净初级生产力的时空动态特征及其驱动因子[J].水土保持研究,2020,27(6):218-225.
- [28] 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,2018,38(2):292-296.
- [29] 詹云军,章文,严岩,等.长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素分析[J].生态学报,2021,41(17):6924-6935.
- [30] 田静,苏红波,陈少辉,等.近 20 年来中国内陆地表蒸散的时空变化[J].资源科学,2012,34(7):1277-1286.
- [31] 杨江洲,周旭,程东亚,等.贵州省不同地貌类型区的 MOD16 蒸散发变化特征[J].水土保持研究,2019,26(2):216-222.
- [32] 崔豪,王丽川,王贺佳,等.三峡库区蓄水前后实际蒸散发时空变化及其与气象因子关系分析[J].水土保持研究,2021,28(4):193-202.
- [33] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等.秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析[J].生态学报,2019,39(22):8504-8515.
- [34] 王娟,何慧娟,卓静,等.基于 MODIS 数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析[J].水土保持通报,2017,37(3):264-269.