

# 贵州省地表蒸散发时空变化及其与气候因子的关系

王 焕, 梅再美

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

**摘 要:**探究贵州省地表蒸散发(ET)时空特征及气候变化对其的影响,对理解气候变化和水资源的关系具有重要的意义。基于 2000—2014 年的 MOD16A2/ET 产品和气象站数据,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。研究表明:(1) 蒸发皿观测值折算所得的实测 ET 与 MOD16/A2ET 呈强相关( $R=0.80$ ),能满足 ET 相关研究的需要;(2) ET 具有明显的空间异质性,由西北向东南,ET 逐渐变大,ET 与海拔区间呈负相关;(3) 研究时段内,ET 的年际波动增加速度较缓,ET 的年内变化呈单峰型,7 月为高峰;(4) ET 与同期气温和降水量在整个研究区呈正相关关系,与同期日照时数呈正相关的区域大于呈负相关的区域。降水量是对贵州省 ET 年内变化影响最大的气候因子,驱动力分析表明贵州省 ET 的主要驱动类型为降水量强驱动型和降水量驱动型。

**关键词:**地表蒸散发(ET); 时空特征; 气候因子; MOD16; 贵州省

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0221-09

## Spatiotemporal Changes of Evapotranspiration and Their Relationship with Climate Factors in Guizhou Province

WANG Huan, MEI Zaimei

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** To explore the spatiotemporal characteristics of surface evapotranspiration (ET) and the influence of climate change on these characteristics is of great significance to understand the relationship between climate change and water resources. Based on the data of MOD16A2/ET products and meteorological stations from 2000 to 2014, single correlation, partial correlation and complex correlation analysis were comprehensively used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of ET in the study area and their relationship with climate factors. The results show that: (1) the measured ET converted from the observed value of evaporating dish is strongly correlated with MOD16/A2ET ( $R=0.80$ ), which can meet the needs of ET related research; (2) ET has obvious spatial heterogeneity; from northwest to southeast, ET gradually increases, and ET is negatively correlated with elevation interval; (3) during the study period, the fluctuation of inter-annual variation of ET increases slowly, and the ET shows a periodic unimodal trend and peaks in July; (4) there is a positive correlation between ET and the temperature and precipitation in the whole study area, and the area with a positive correlation with the duration of sunshine in the same period is larger than the area with a negative correlation; precipitation is the climate factor that has the greatest influence on ET variation in Guizhou Province. The driving force analysis shows that the main driving types of ET in Guizhou Province are precipitation-strong-drive and precipitation-drive.

**Keywords:** evapotranspiration; spatiotemporal characteristics; climatic factors; MOD16; Guizhou Province

地表蒸散发(Evapotranspiration, ET)是指地表土壤和植被向大气传输的水汽总通量<sup>[1-3]</sup>,包括地表

植被蒸腾、土壤蒸发和水面蒸发<sup>[4-5]</sup>,是全球气候变化和水文循环的重要参数<sup>[6]</sup>,影响着地表过程中地、气

收稿日期:2020-04-17

修回日期:2020-04-28

资助项目:贵州省科技计划项目“贵州省山地特色休闲养生旅游资源开发与服务企业行动计划”(黔科合平台人才[2017]5720)

第一作者:王焕(1993—),女,贵州省毕节人,硕士,主要从事自然资源开发与规划相关研究。E-mail:2325605282@qq.com

通信作者:梅再美(1961—),男(土家族),贵州省贵阳人,教授,主要从事自然资源开发与规划及环境保护与治理相关研究。E-mail:meiminggui@qq.com

系统的相互作用<sup>[7-9]</sup>。ET 的影响因素<sup>[10-11]</sup>主要包括热力因素(气温、太阳辐射、日照时数等)、水分因素(降水量、相对湿度等)和动力因素(风速等)。如何能精准估算 ET, 分析其时空分布特征及气候因子对 ET 的影响, 对促进区域水资源的科学分配、提高水资源的开发利用效率等具有重要意义。

蒸发皿、径流计、蒸渗仪、涡度相关、波文比、通量塔、大孔径闪烁仪等仪器虽然能够获取相对准确的均匀下垫面的 ET, 但大多局限于站点或田间尺度, 难以反映 ET 的空间异质性<sup>[12]</sup>。遥感数据以其快速、覆盖范围广、周期性等优势, 使长时间序列、大区域尺度的蒸散发研究成为可能, 已成为目前大区域地表蒸散发研究的主要手段<sup>[13-16]</sup>。估算 ET 的遥感数据主要包括具有高空间分辨率的 Landsat 和 ASTER 数据, 具有高时间分辨率的 MODIS 和 NOAA AVHRR 数据, 以及能够穿云透雨、不受天气限制的微波遥感数据<sup>[12]</sup>。全球陆地蒸散发产品 MODIS MOD16/ET 通过了全球通量塔站台的检验, 在全球得到了广泛应用<sup>[17-21]</sup>。国内外对于 ET 的研究主要集中在模型估算<sup>[22-24]</sup>、精度验证<sup>[25-26]</sup>、时空特征<sup>[27-29]</sup>及影响因素分析<sup>[10, 30]</sup>等方面。刘健等<sup>[10]</sup>采用统计学方法分析了鄱阳湖流域站点尺度上实际蒸发量的时间变化特征, 结合变化趋势探究了实际蒸发量的影响因素; 王鹏涛等<sup>[31]</sup>采用基于像元的单相关分析法探讨了黄土高原区蒸散发的时空变化特征及其影响因素; 叶红等<sup>[32]</sup>以 MODIS ET 产品为数据源分析了黄河源区地表蒸散发的时空变化特征, 并引入单相关、偏相关和复相关分析, 重点探讨了 ET 与气候因子的关系; 黄葵等<sup>[6]</sup>基于 MOD16/ET 定量分析了海河流域 ET 的时空变化特征, 综合运用单相关、偏相关和复相关分析, 定量探索了 ET 与气候因子的驱动力关系。引入可有效排除其他因子干扰的偏相关分析和综合考虑多个因子共同作用的复相关分析, 已经成为探究气候因子对蒸散发影响的有效方法。杨江州等<sup>[33]</sup>基于 MOD16 分析了贵州省不同地貌类型区蒸散发的时空变化特征。蒋翼等<sup>[34]</sup>分析了 2000—2014 年贵州省实际蒸散发和潜在蒸散发的时空变化特征及不同土地覆被类型下的实际蒸散发特征。目前, 学者对贵州省蒸散发的研究多集中于时空分布特征, 而关于气候因子对蒸散发的影响方面的研究尚不多见。

贵州省位于中国西南喀斯特地区, 虽然水资源总量丰富, 但基岩裸露率高且水土流失严重<sup>[35]</sup>, 故生态环境脆弱、水资源开发利用难度大, 结构性缺水问题日益突

出。基于此, 本文选取 2000—2014 年贵州省 MOD16A2/ET 产品、省内及周边 34 个气象站点的气象数据, 分析贵州省 ET 的时空变化特征, 结合单相关、偏相关和复相关分析探究各气候因子对 ET 的影响, 对理解贵州省水资源和气候变化的关系具有重要的意义。

## 1 研究区概况

贵州省地处中国西南地区 24°37′—29°13′N, 103°36′—109°35′E, 总面积约 176 200 km<sup>2</sup>, 包括贵阳、遵义、铜仁、毕节、六盘水和安顺 6 个地级市以及黔东南、黔南和黔西南 3 个少数民族自治州。地貌以岩溶高原、岩溶槽谷、岩溶峡谷、断陷盆地、峰丛洼地和非喀斯特地貌为主<sup>[33]</sup>, 海拔 127~2 890 m, 平均海拔为 1 100 m 左右, 地势西高东低。研究区内河流、湖泊发育, 主要有八大水系, 分属珠江和长江两大流域。贵州省 90% 以上的区域为林地、耕地和草地, 气候类型属于亚热带湿润季风气候。2000—2014 年贵州省 17 个气象站点数据统计表明, 月均气温 5.27~24.50℃, 月均日照时数 52.64~160.34 h, 月均降水量 21.11~221.74 mm, 5—8 月降水量比较集中, 占全年降水量的 60% 以上。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源及预处理

2.1.1 遥感影像数据 MOD16 产品是指 Monteith 等<sup>[36]</sup>基于 Penman-Monteith 模型计算全球陆地表面蒸散发量而形成的数据集, 包括 MOD16A2 和 MOD16A3 两个子数据集, 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率有 8 d、月和年 3 种尺度, 涵盖时间段为 2000—2014 年。本文选用在 NTSG(<http://www.ntsg.rmt.edu/>)下载的 2000—2014 年 MOD16A2/ET 数据, 时间分辨率为月, 遥感卫星轨道号为 h27v06, 数据格式为 HDF。数据格式转换、重投影和影像镶嵌等预处理工作在专业软件 MRT 中进行, 异常值剔除和数据分析利用 IDL 语言进行。

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据在“地理空间数据云”(<http://www.gscloud.cn/>)下载, 空间分辨率为 30 m。首先在 ENVI5.3 软件中, 根据数据说明对原始影像进行预处理, 主要包括坏值和无值处理、镶嵌、裁剪等; 然后利用 ArcGIS 10.2 将其空间分辨率重采样为 1 km。

2.1.2 气象数据 本研究使用的气象数据为 2000—2014 年贵州省内部及周边 34 个地面气象站的气温(℃)、日照时数(h)、降水量(mm)、相对湿度(%)、风

速(m/s),时间分辨率为月,下载地址为中国国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。参考叶红等<sup>[32]</sup>的相关研究,采用 Kriging 插值法对气温、降水量和日照时数进行空间插值处理,并重采样其空间分辨率为 1 km。位于贵州省西部的威宁和位于贵州东部的铜仁 2 个站点作为插值验证点,另外的

32 个站点数据用于空间插值。气温、降水量和日照时数 3 个气象因子采用 Kriging 插值法在研究区的精度验证如图 1 所示, $R^2$  为 0.77~0.99,均值为 0.95,说明在研究区采用 Kriging 插值法对气温、降水量和日照时数进行空间插值的结果较为理想,能满足后续研究的需要。

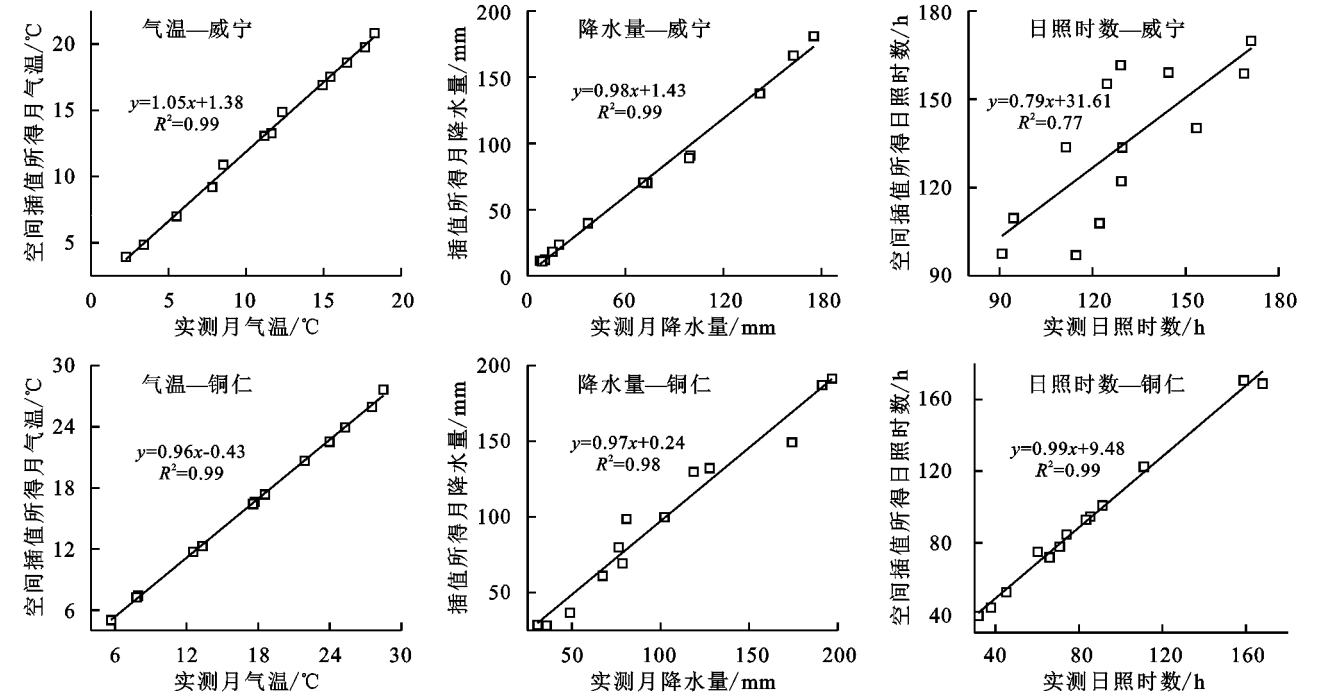


图 1 气象数据空间插值的精度验证

2.2 研究方法

2.2.1 单相关分析 采用简单线性相关系数分别对贵州省 ET 与各气候因子(气温、日照时数、降水量、相对湿度和风速)的相关性进行研究,计算公式<sup>[32]</sup>如下:

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

式中: $n$  为样本个数; $R$  为简单线性相关系数; $x_i$  与  $y_i$  分别是  $x, y$  两个因子的第  $i$  个样本值; $\bar{x}$  与  $\bar{y}$  分别为两个因子所有样本的平均值。

2.2.2 偏相关分析 探究气温或降水量对 ET 的影响,通过分析 ET 与气温、ET 与降水量之间的偏相关程度,可以排除降水量或气温的干扰<sup>[37]</sup>,偏相关系数的计算公式如下:

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

式中: $x, y, z$  分别为 ET、降水量和气温; $R_{xy,z}$  为在气温不变的情况下;ET 与降水量的偏相关系数; $R_{xy}, R_{xz}, R_{yz}$  分别表示 ET 与降水量、ET 与气温、气温与降水量的简单线性相关系数。参考王永财等<sup>[38]</sup>的研究,偏相关分

析的显著性检验选用经典的  $t$  检验法。  
2.2.3 复相关分析 引入复相关系数<sup>[39]</sup>可以综合考虑气温和降水量等多因子对 ET 的共同影响,计算公式如下:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)} \tag{3}$$

式中: $R_{x,yz}$  为 ET 与降水量和气温的复相关系数; $R_{xy}$  为 ET 与降水量的简单线性相关系数; $R_{xz,y}$  为在降水量不变的情况下;ET 与气温的偏相关系数。参考王永财等<sup>[38]</sup>的研究,复相关分析的显著性检验选用 F 检验法。

基于像元尺度进行 ET 与气候因子的单相关、偏相关和复相关分析,探讨了 ET 与气候因子的空间相关性。

3 结果与分析

3.1 贵州省 MOD16/A2ET 的精度验证

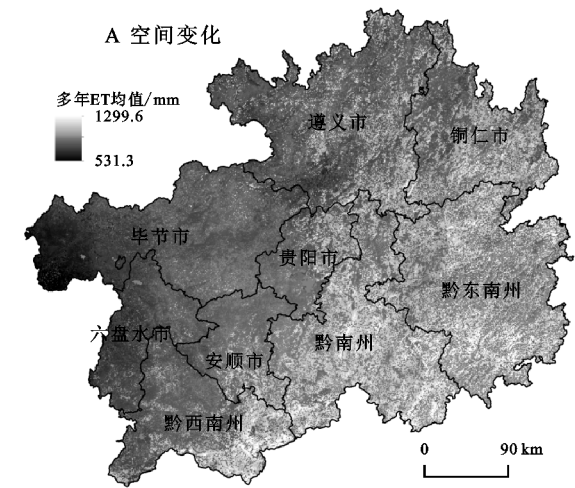
为了说明 MOD16/A2ET 在贵州省地表 ET 时空反演的适用性,通过实测年均 ET 与 MOD16/A2 产品反演的年均 ET 的简单线性相关系数进行精度验证。张鑫等<sup>[40]</sup>的相关研究表明,中国西南地区实测 ET 值月值是小型蒸发皿测得的 ET 值的 0.65~

0.85倍,平均为 0.75 倍。因此,本文将所能获取的研究区内空间上均匀分布的 8 个站点内小型蒸发皿测的月 ET 值乘以 0.75 所得的数据计为实测月 ET,然后将实测月 ET 合成实测年 ET;其中毕节、贵阳和遵义 3 个站点的小型蒸发皿观测时间段为 2002—2014 年,安顺、都匀、凯里、思南和兴仁 5 个站点的小型蒸发皿观测时间段为 2009—2014 年。MOD16/A2ET 为以站点为中心 3 km 为半径的圆形缓冲区内的年 ET 均值。结果表明(表 1):实测值与反演值的相关系数  $R$  为 0.77~0.83,平均值为 0.80,表明 MOD16/A2 产品反演的 ET 值与站点实测蒸散发量在时空分布上保持较高的一致性,研究区内 MOD16/A2ET 数据精度满足要求,可用于地表蒸散发的相关研究。

表 1 MOD16 ET 年值的精度验证

站点名称	毕节	贵阳	遵义	安顺	都匀	凯里	思南	兴仁
$R$	0.82	0.80	0.83	0.80	0.78	0.79	0.81	0.78

注:毕节、贵阳和遵义 3 个站点的时段为 2002—2014 年,安顺、都匀、凯里、思南和兴仁 5 个站点的时段为 2009—2014 年。



3.2 贵州省 ET 的空间变化特征

2000—2014 年贵州省 ET 多年 ET 均值的空间分布见图 2。由图 2A 可知,多年 ET 均值为 531.3~1 299.6 mm,平均值为 855.90 mm;多年 ET 均值地域分异明显,由西北向东南逐渐变小,最强 ET 位于贵州省南部。研究区内各市(州)单元之间 ET 差异显著,从小到大依次为:六盘水市(753.29 mm)<毕节市(759.85 mm)<遵义市(821.56 mm)<安顺市(847.53 mm)<贵阳市(849.10 mm)<黔西南州(860.18 mm)<铜仁市(874.32 mm)<黔东南州(928.08 mm)<黔南州(939.67 mm)。贵州省平均海拔为 1 108 m,通过手动分类法,将贵州省分为 1~10 个海拔区间( $\leq 550$  m,550~700 m,700~850 m,850~1 000 m,1 000~1 150 m,1 150~1 300 m,1 300~1 500 m,1 500~1 700 m,1 700~2 000 m, $\geq 2 000$  m),分区统计表明海拔越高的区域多年 ET 均值越小,即地表蒸散发的强弱程度与高程分布有一定的负相关性。

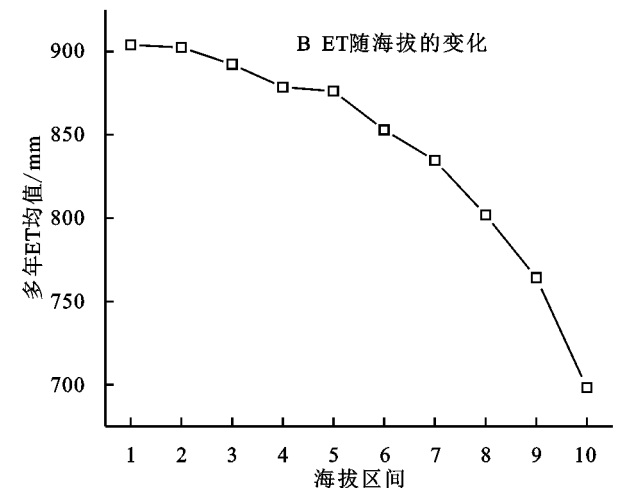


图 2 贵州省 ET 空间(A)和海拔(B)分布

3.3 贵州省 ET 及气候因子的时间变化特征

(1) 年际变化特征。图 3A 为 2000—2014 年贵州省 ET 及气候因子的年际变化。2000—2014 年贵州省年际 ET 值为 822.28~879.19 mm,多年平均 ET 值为 855.90 mm;贵州省在 2003—2010 年 ET 表现为波动减少,2001—2003 年和 2010—2014 年间 ET 表现为波动增加,研究时段内贵州省 ET 总体上呈缓慢增加趋势;贵州省 ET 年最大值出现在 2003 年、2014 年次之,而 ET 年最小值出现在 2010 年。单相关分析(表 2)表明,研究时段内,贵州省 ET 与降水量、相对湿度、气温、日照时数、风速的相关系数分别为 0.18,−0.01,0.10,−0.15,0.22,说明在年际变化上 ET 与各气候因子的相关性均不显著。

(2) 年内变化特征。图 3B 为 2000—2014 年贵州省 ET 及气候因子的年内变化。贵州省多年月平均 ET 值为 33.11~126.41 mm,其变化规律呈单峰型,高峰出现在 7 月。ET 月均值的低值区出现在 11 月一次年 1 月,且波动变化不明显;2—7 月为 ET 的上升区,7—11 月为 ET 的下降区。单相关分析(表 2)表明,研究时段内 ET 与降水量、相对湿度、气温、日照时数、风速的相关系数分别为 0.92,−0.18,0.81,0.71,0.17,说明在年内变化上 ET 与降水量、气温和日照时数均呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与相对湿度和风速的相关性均不显著。这表明贵州省 ET 的年内变化与该区域水热变化同期,降水量、气温和日照时数是引起 ET 变化的重要气候因子。



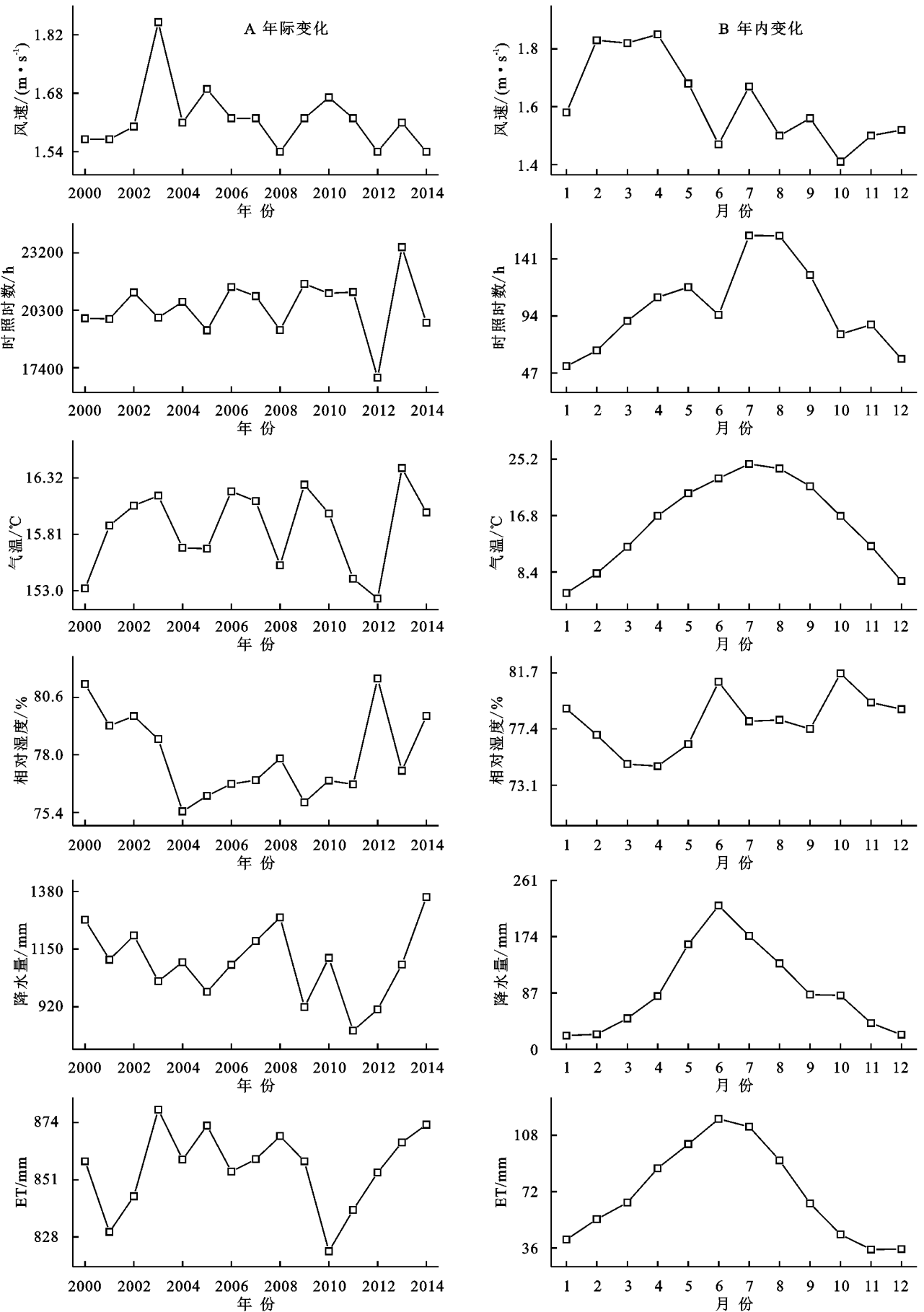


图 3 2000—2014 年贵州省 ET 及气候因子的年际(A)和年内(B)变化

表 2 MOD16 ET 与气候因子的简单线性相关系数(R)

项目	时间尺度	降水量/mm	相对湿度/%	气温/℃	日照时数/h	风速/(m·s <sup>-1</sup> )
ET(mm)	年际相关系数 R	0.18	0.01	0.10	-0.15	0.22
	年内相关系数 R	0.92**	-0.18	0.81**	0.71**	0.17

注：\* \* 表示显著性  $p<0.01$ (双尾),极显著相关。

3.4 贵州省 ET 与气候因子的关系分析

气候变化是影响区域水热分布的重要环境因素,气温和日照时数表征热力条件,降水量和相对湿度表征水分条件,平均风速表征动力条件。年内变化特征(图 3B)表明贵州省 ET 的年内变化与该区域水热变化规律密切相关,降水量、气温和日照时数的变化是影响 ET 变化的重要气象因子,因此本文选用水分条件(降水量)和热力条件(气温、日照时数)作为影响贵州省 ET 的主要气候因子进行相关分析,以便讨论贵州省 ET 的驱动类型。

3.4.1 ET 与气候因子的简单相关性分析 贵州省 ET 与降水量、气温和日照时数的空间简单线性相关系数分布见图 4。由图 4 可知,ET 与降水量的相关系数为 0.72~0.98,空间平均相关系数为 0.89;与气温的相关系数为 0.63~0.95,空间平均相关系数为

0.79;与日照时数的相关系数为-0.33~0.86,空间平均相关系数为 0.61。研究区 ET 与降水量和气温均呈正相关关系,ET 与日照时数相关关系以正相关为主,小部分区域为负相关。空间分异性分析表明,ET 与降水量的相关系数在空间上差异最小,ET 与日照时数的相关系数在空间上差异最大。ET 与降水量在整个研究区均呈显著正相关( $p<0.01$ );ET 与气温呈显著正相关( $p<0.01$ )的区域占研究区总面积的 95.53%,另外的 4.47%呈正相关,零散分布于贵阳市、遵义市、铜仁市、黔东南州和黔南州;ET 与日照时数呈显著正相关( $p<0.01$ )的区域占研究区总面积的 18.28%,在毕节市、安顺市和黔西南州分布比较集中,而遵义市分布则比较零散;呈正相关的区域占 79.21%,另外的 2.58%呈弱负相关,集中分布在毕节市西部。

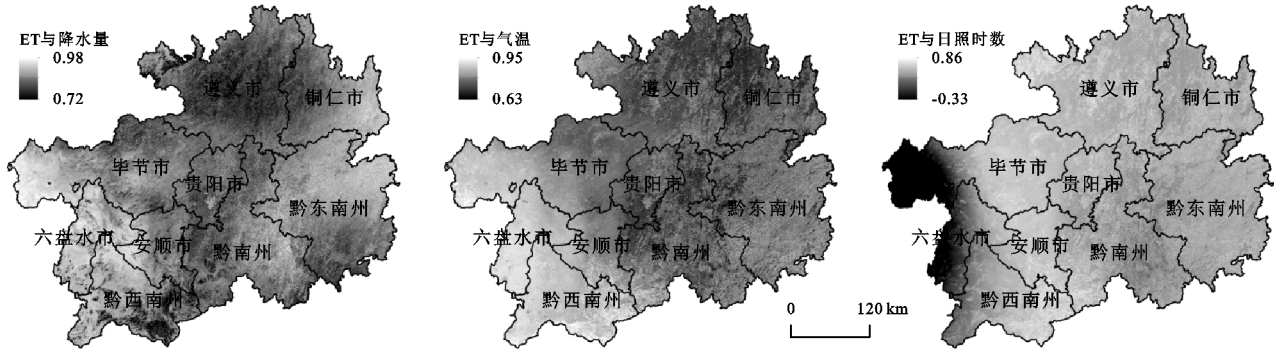


图 4 贵州省 ET 与降水量、气温和日照时数的简单线性相关系数空间分布

3.4.2 ET 与气候因子的偏相关性分析 简单相关性分析表明,贵州省降水量和气温对 ET 的影响远大于日照时数对 ET 的影响,故本文选择降水量和气温进行与 ET 的偏相关分析和复相关分析。贵州省 ET 与降水量、气温的空间偏相关系数分布见图 5。

由图 5A 可知,ET 与降水量的偏相关系数为 0.10~0.92,平均值为 0.69,均呈正相关关系。显著性水平( $\alpha=0.05$ )的双侧 t 检验表明,ET 与降水量的偏向关系系数通过显著性检验的区域( $t\geq t_{0.01}$ )在铜仁市、黔东南州、黔南州、黔西南州和六盘水其均有集中连片分布,总面积 95 910 km<sup>2</sup>,占降水量偏向关系数呈正相关区域的 54.47%;通过显著性检验的区域( $t\geq t_{0.05}$ )在遵义市分布最集中,总面积 68 173 km<sup>2</sup>,占降水量偏向关系数呈正相关区域的 31.72%。

由图 5B 可知,ET 与气温的偏相关系数为-0.57~0.87,平均值为 0.13,整体呈正相关关系的区域大于呈负

相关关系的区域,偏相关性呈正相关的区域主要分布在贵州省西、西南和东南部,总面积为 109 650 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 62.27%,中部和北部主要呈负相关关系,总面积为 66 423 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 37.73%。贵州省 ET 与气温的偏向关系系数通过显著性检验的区域( $t\geq t_{0.01}$ )主要分布在黔西南州的南部边缘地区,总面积为 1 822 km<sup>2</sup>,仅占气温偏相关系数呈正相关区域的 1.66%;通过显著性检验的区域( $t\geq t_{0.05}$ )主要在六盘水市南部和黔西南州集中分布,总面积 11 169 km<sup>2</sup>,占降水量偏相关系数呈正相关区域的 10.19%。

在空间差异性上,ET 与气温的偏相关系数大于 ET 与降水量的偏相关系数。显著性检验表明,贵州省 ET 与降水量的偏相关显著性要明显强于气温,表明降水量对贵州省 ET 的影响比气温大。

3.4.3 ET 与气候因子的复相关性分析 贵州省 ET 与降水量和气温的空间复相关系数分布见图 6,复相

关系数为 0.76~0.99,空间均值为 0.90,高值区主要分布在贵州省西部的六盘水市和黔西南州,低值区主要分布在贵州省北部的遵义市。F 检验结果表明,通

过显著性检验的区域( $F > F_{0.05}$ )总面积为 80 km<sup>2</sup>,仅占研究区总面积 0.05%;研究区其余的 99.95%区域均通过显著性检验( $F > F_{0.01}$ )。

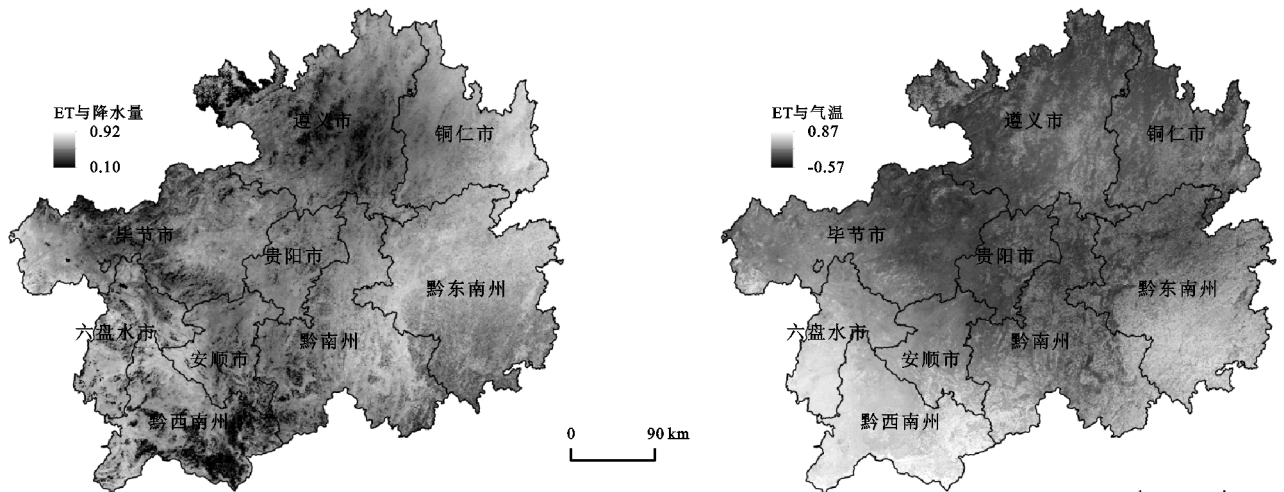


图 5 贵州省 ET 与降水量和气温的偏相关系数空间分布

A ET与降水量和气温的复相关系数

B ET的驱动力空间分布

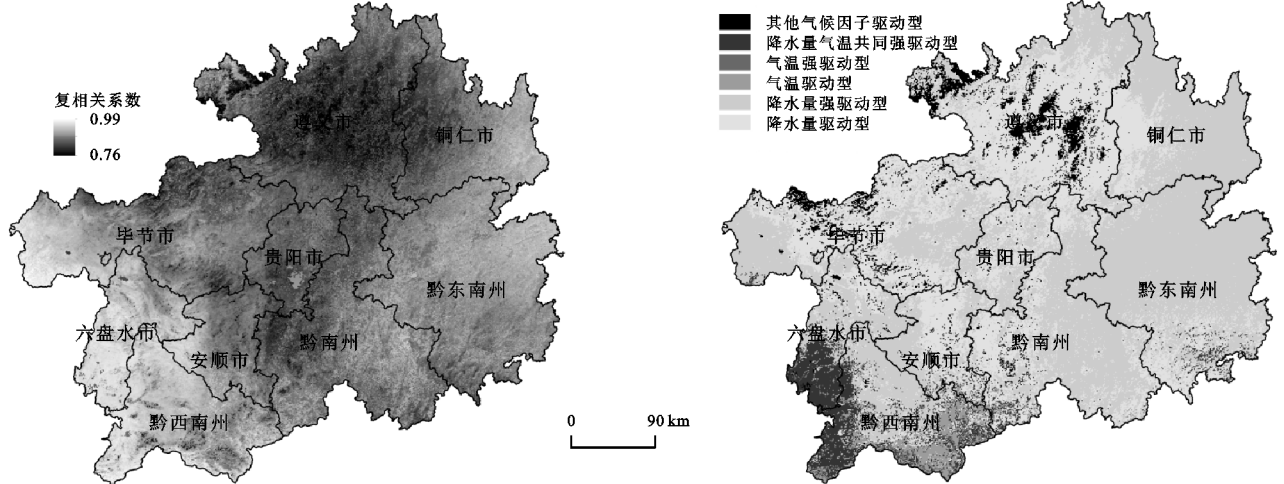


图 6 贵州省 ET 与降水量和气温的复相关系数与驱动分区空间分布

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

大量相关研究<sup>[6,10,32]</sup>表明,区域水热的时空分布与各气候因子紧密相关,为深入理解降水量和气温对贵州省 ET 的影响,基于偏相关和复相关分析,参考叶红等<sup>[32]</sup>的研究拟定的贵州省 ET 的驱动规则见表 3。

图 6B 为 2000—2014 年贵州省 ET 的驱动分区图,贵州省 ET 受气候因子驱动的地区主要表现为降水量强驱动,面积为 89 849 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 51.03%,主要分布在贵州省东部的黔东南州和东北方向的铜仁市,另外的 7 个市(州)则分布相对零散;其次为降水量驱动型,面积为 64 570 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 36.67%,主要分布在贵州省北部的遵义市以及毕节市、安顺市、黔南州一带;降水量气温共同驱动型的面

积为 9 121 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 5.18%,集中分布在黔西南州的南部边缘;其他因子驱动型的面积为 8 663 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 4.92%;气温驱动型、气温强驱动型和降水量气温共同强驱动型的面积分别为 2 644 km<sup>2</sup>,684 km<sup>2</sup>,542 km<sup>2</sup>,分别占研究区总面积的 1.50%,0.39%和 0.31%。贵州省 87.70%的区域属降水量强驱动型或降水量驱动型,表明研究时段内降水量是贵州省 ET 年内变化的主要驱动因子,即降水量的增加是 ET 增强的主要原因。

降水量是对 ET 影响最大的气候因子,且与 ET 以正相关为主,这与前人研究一致<sup>[6,31-32]</sup>。气温和日照时数对 ET 影响较大,也以正相关为主,与部分研究一致<sup>[10,32]</sup>,而王鹏涛<sup>[31]</sup>等在陕甘宁黄土高原区的研究则认为气温和日照时数对 ET 的影响以负相关为主,黄葵等<sup>[6]</sup>在海河流域的研究也表明气温与 ET 呈负相关。这



可能是因为贵州省属亚热带湿润季风气候,是湿润地区,阔叶林分布广泛,属于能量控制型蒸散发,黄土高原区和海河流域均属于温带气候类型,降水量较少,气温和日照时数较大的情况下不利于阔叶林的生长,地表覆被类型多为草地和针叶林。许多研究表明风速与 ET 有显著正相关关系<sup>[10,31,41]</sup>,而本文中风速与

ET 虽呈正相关关系(表 2),但相关性极小,说明风速对 ET 的影响基本可以忽略,这与前人研究<sup>[10,31,41]</sup>明显不同。贵州省位于云贵高原,海拔 127~2 890 m,地表起伏较大,山地和丘陵广泛分布,平均风速仅为 1.60 m/s(图 3A),故与充足的水分和热力条件相比,微弱的动力条件对 ET 的影响并不显著。

表 3 贵州省 ET 驱动分区规则

驱动类型	t 检验(降水量)		t 检验(气温)		F 检验	
	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
降水量驱动型	$ t >t_{0.05}$				$F>F_{0.05}$	
降水量强驱动型	$ t >t_{0.01}$				$F>F_{0.01}$	
气温驱动型			$ t >t_{0.05}$		$F>F_{0.05}$	
气温强驱动型			$ t >t_{0.01}$		$F>F_{0.01}$	
降水量气温共同驱动型	$ t >t_{0.05}$		$ t >t_{0.05}$		$F>F_{0.05}$	
降水量气温共同强驱动型	$ t >t_{0.01}$		$ t >t_{0.01}$		$F>F_{0.01}$	
其他气候因子驱动型					$F>F_{0.05}$	

4.2 结 论

本文基于 MOD16/A2ET 产品,在精度验证的基础上,结合气象数据,分析了 2000—2014 年贵州省 ET 的时空变化特征,通过单相关、偏相关和复相关分析探究了气候因子对 ET 的影响,并对 ET 的年内变化进行了驱动类型分析。主要结论如下:(1) 空间上,ET 呈由西北向东南增加的变化特征,随着海拔的增加 ET 逐渐减小;(2) 时间上,从 2000—2014 年贵州省 ET 整体上表现为波动缓慢增加,年内 ET 呈单峰变化,高峰出现在 7 月,与该区域气温、降水量和日照时数呈强正相关关系;(3) 贵州省 87.70%的区域属降水量强驱动型或降水量驱动型,表明研究时段内降水量是贵州省 ET 年内变化的主要驱动因子。

参考文献:

[1] 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.

[2] Shukla J, Mintz Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate[J]. *Science*, 1982,215(4539):1498-1501.

[3] Sharma V, Kilic A, Irmak S. Impact of scale/resolution on evapotranspiration from Landsat and MODIS images [J]. *Water Resources Research*, 2016,52(3):1800-1819.

[4] 邓兴耀,姚俊强,刘志辉,等.2000—2014 年天山山区蒸散发时空动态特征[J].*水土保持研究*,2017,24(4):266-273.

[5] 周倜,彭志晴,辛晓洲,等.非均匀地表蒸散发遥感研究综述[J].*遥感学报*,2016,20(2):257-277.

[6] 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.

[7] Nishida K, Nemani R R, Glassy J M, et al. Development of an evapotranspiration index from Aqua/MODIS for monitoring surface moisture status[J]. *Iee Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003,41(2):493-501.

[8] Dong Q, Zhan C, Wang H, et al. A review on evapotranspiration data assimilation based on hydrological models[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016,26(2):230-242.

[9] 位贺杰,张艳芳,朱妮,等.基于 MOD16 数据的渭河流域地表实际蒸散发时空特征[J].*中国沙漠*,2015,35(2):414-422.

[10] 刘健,张奇,许崇育,等.近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素[J].*长江流域资源与环境*,2010,19(2):139-145.

[11] 王莺,张雷,王劲松.洮河流域土地利用覆被变化的水文过程响应[J].*冰川冻土*,2016,38(1):200-210.

[12] 李艳,黄春林,卢玲,等.蒸散发遥感估算方法的研究进展[J].*兰州大学学报:自然科学版*,2014,50(6):765-772.

[13] 何慧娟,卓静,董金芳,等.基于 MOD16 监测陕西省地表蒸散发变化[J].*干旱区地理*,2015,38(5):960-967.

[14] 王万同.基于遥感技术的区域地表蒸散发估算研究:以伊洛河流域为例[D].河南开封:河南大学,2012.

[15] 张晓涛,康绍忠,王鹏新,等.估算区域蒸发蒸腾量的遥感模型对比分析[J].*农业工程学报*,2006,22(7):6-13.

[16] 张长春,魏加华,王光谦,等.区域蒸发量的遥感研究现状及发展趋势[J].*水土保持学报*,2004,18(2):174-177,182.

[17] Du J, Song K S. Validation of Global Evapotranspira-



- tion Product (MOD16) Using Flux Tower Data from Panjin Coastal Wetland, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(3):420-429.
- [18] Tang R, Shao K, Li Z L, et al. Multiscale validation of the 8-day MOD16 evapotranspiration product using flux data collected in China[J]. Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2015, 8(4):1478-1486.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 张晓玉,范亚云,热孜宛古丽·麦麦提依明,等.基于 SEBS 模型的干旱区流域蒸散发估算探究[J].干旱区地理,2018,41(3):508-517.
- [23] 钟昊哲,徐宪立,张荣飞,等.基于 Penman-Monteith-Leuning 遥感模型的西南喀斯特区域蒸散发估算[J].应用生态学报,2018,29(5):1617-1625.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Ruhoff A L, Paz A R, Aragao L E O C, et al. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin[J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(8):1658-1676.
- [27] 阮宏威,于静洁.1992—2015 年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化[J].地理学报,2019,74(7):1292-1304.
- [28] 钟巧,焦黎,李稚,等.博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J].干旱区地理,2019,42(1):103-112.
- [29] 王芳,汪左,张运,等.基于 MOD16 的安徽省地表蒸散发量时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2018, 27(3):523-534.
- [30] 闫俊杰,吕光辉,徐海量,等.2000—2014 年塔里木河干流的植被覆盖与蒸散发时空变化及其关系[J].水土保持通报,2018,38(3):248-255.
- [31] 王鹏涛,延军平,蒋冲,等.2000—2012 年陕甘宁黄土高原区地表蒸散时空分布及影响因素[J].中国沙漠, 2016,36(2):499-507.
- [32] 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.
- [33] 杨江州,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.
- [34] 蒋翼,周忠发,张勇荣,等.喀斯特山区蒸散发的时空变异特征分析:以贵州省为例[J].水利水电技术,2019,50(9):53-61.
- [35] 周忠发,田涟祎,殷超,等.人为干预下喀斯特峰丛盆地区不同土地利用类型的土壤理化性质[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2017,35(4):1-6,30.
- [36] Monteith J L. Evaporation and environment[J]. Symposia of the Society for Experimental Biology, 1965,19(19):205.
- [37] Smith A A, Welch C, Staden T A. Assessing the seasonality and uncertainty in evapotranspiration partitioning using a tracer-aided model[J]. Journal of Hydrology, 2018,560:595-613.
- [38] 王永财,孙艳玲,王中良.1998—2011 年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].资源科学,2014,36(3):594-602.
- [39] 王景才,郭佳香,徐蛟,等.近 55 年淮河中上游流域气候要素多时间尺度演变特征及关联性分析[J].地理科学,2017,37(4):611-619.
- [40] 张鑫,庄文化,李洪宇,等.中国西南地区蒸发皿系数  $K_p$  研究[J].灌溉排水学报,2016,35(9):109-112.
- [41] 王素萍.近 40 a 江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因素分析[J].中国沙漠,2009,29(5):960-965.