

贵州省不同地貌类型区的 MOD16 蒸散发变化特征

杨江州, 周旭, 程东亚, 张继, 牛潜

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘要: 探究贵州省喀斯特山区蒸散发时空演变特征, 对该区水资源的高效利用与生态环境建设具有重要意义。基于 MOD16 产品遥感数据, 统计分析了贵州省 2000—2014 年地表蒸散发量的年际和年内时空变化状况, 并探讨了不同地貌类型蒸散发量的差异性变化特征。结果表明: (1) 2000—2014 年, 贵州省蒸散发量年际变化总体趋势不明显, 蒸散发年均值为 854.95 mm/a, 多年平均蒸散发空间分布呈现出东南高、西北低、中部居中的三级阶梯分布格局; (2) 不同地貌类型蒸散发量的月均值呈现先上升后下降的单峰变化趋势, 最高、最低分别出现在 7 月和 1 月, 各地貌逐年各月蒸散发均值与整体差异明显; (3) 从地貌类型看, 多年均值蒸散发量由大到小依次为峰丛洼地、非喀斯特地貌、岩溶槽谷、岩溶高原、岩溶断陷盆地、岩溶峡谷; (4) 未来蒸散发年际变化空间分布大致呈现东西部减少、中部增加的趋势。

关键词: MOD16; 蒸散发; 时空变化; 不同地貌类型; 贵州省

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0216-07

Spatiotemporal Change Characteristics of MOD16 Evapotranspiration in Different Geomorphic Types of Guizhou Province

YANG Jiangzhou, ZHOU Xu, CHENG Dongya, ZHANG Ji, NIU Qian

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

Abstract: The study on the temporal and spatial evolution characteristics of evapotranspiration in karst mountain area of Guizhou Province is of great significance to the efficient utilization of water resources and the construction of ecological environment. Based on the remote sensing data set of MOD16 products, the annual, interannual and intra-annual spatiotemporal changes of surface evapotranspiration in karst mountain from 2000 to 2014 were statistically analyzed to explore the differences of characteristics of evapotranspiration of different types and landforms in karst basin. The results showed that: (1) from 2000 to 2014, the amount of evapotranspiration in Guizhou mountainous area of karst annual change trend was not obvious, the average annual evapotranspiration was 854.95 mm, the spatial distribution of average evapotranspiration showed the higher values in the southeast, the lower values in northwest, the moderate values in the center, presenting three-ladder step distribution pattern; (2) the trend of monthly mean change in each basin showed a single peak change trend at first and then decreased; the highest and lowest ones appeared in July and January, respectively, and the mean and overall difference between years of evapotranspiration in different geomorphic types were obvious; (3) from the geomorphological type, the annual average evapotranspiration decreased in the order: peak cluster depressions > non karst landform > karst valley > karst plateau > karst faulted basin > karst gorge; (4) in the future, the spatial distribution of evapotranspiration will mainly present the pattern of the decreasing trend in the eastern and western regions and increasing trend in the central region.

Keywords: MOD16; evapotranspiration; spatiotemporal change characteristics; different geomorphic types; Guizhou Province

蒸散发 (evapotranspiration, ET) 是水分循环的中心环节和水热平衡的重要因素,同时也是生态环境物质转换的重要载体,其积极参与了自然界的水量循环和能量循环^[1-2]。贵州省位于中国西南喀斯特地区的腹地,是我国喀斯特发育最典型复杂的高原山区,石漠化严重,独特的自然地理与气候环境,形成了典型的以二元结构为基本特征的喀斯特山区,该区具有土壤薄瘠且分布不连续、土壤侵蚀退化严重,地表水渗漏、生态环境脆弱等特点^[3-5]。地表蒸散发是生态水分流失的主要途径,充分了解蒸散发时空格局的演变过程,准确估算地表蒸散发,对于贵州喀斯特山区水资源高效利用与生态环境建设具有重要的意义。

传统估算蒸散发大多基于站点尺度^[6-7],对于大范围区域来说,观测站点较少且分布不均匀,不能全面反映整个区域蒸散发分布。近年来,随着遥感技术的发展,利用遥感数据估算区域蒸散发量逐渐成为了一种有效途径^[8]。相继不同遥感蒸散发模型得到了发展,如基于 Penman-Monteith 公式的 VITT 模型^[9];基于能量平衡原理的 SEBAL 和 SEBS 模型^[10-11];基于 Budyko 公式的水热耦合平衡模型等^[12]。2011 年, NASA 研究团队发布的 2000—2014 年 MOD16 全球蒸散发数据产品,具有较高的时间分辨率和免费获取等优势,该数据集已得到全球通量塔数据验证,模拟精度达到 86%,在全球得到广泛应用^[13]。国内研究学者基于 MOD16 数据对淮河流域^[14]、天山山区^[15]、三江平原^[16]、陕西省^[17]、中国^[18] 等区域进行蒸散发时空变化研究。然而,大多研究集中于北方或西北干旱地区,在西南喀斯特山区应用遥感数据分析蒸散发时空演变规律研究较少。本文以贵州省为研究区域,利用 MOD16 产品遥感数据集,通过遥感技术分析,揭示 2000—2014 年蒸散发时空变化特征,以期为该区生态建设中的水资源高效利用提供科学依据。

1 研究区概况

贵州省处于世界三大喀斯特集中分布区之一的东亚片区中心,是我国喀斯特分布面积最大、发育最复杂的省区,地处东经 103°36′—109°35′,北纬 24°37′—29°13′,地势西高东低。属亚热带湿润季风气候区,气候温和,年降水量为 800~1 600 mm,境内多年平均降水量为 1 200 mm。水资源总量丰富,2014 年人均水资源占有量为 3 458 m³,但水资源开发利用率为 7.90%。根据研究区的岩性和地表形态等地质地貌特征,并参考 Tong 等^[19] 的研究将贵州省喀斯特地貌类型主要分为岩溶峡谷、岩溶断陷盆地、岩溶高原、峰丛洼地、岩溶槽谷和非喀斯特地貌(图 1)。地貌复杂多样,地势

起伏大,植被结构单一,土壤瘠薄,加之岩溶发育强烈,地表入渗系数较高,降水大部分转入地下,导致水土流失严重与地表水资源紧缺,而区域蒸散发量直接影响区域生态提升与水资源可利用总量。

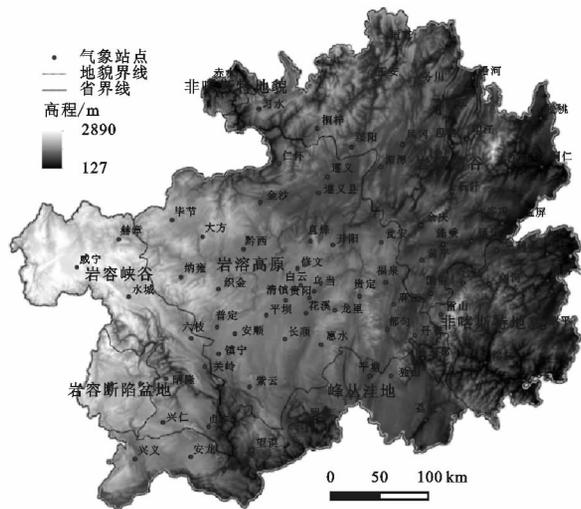


图 1 贵州省不同地貌分区和气象站点分布

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

气象数据主要来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 包含 2000—2014 年 84 个气象站点观测的降水量、蒸发量、气压、平均气温、相对湿度、风速和日照时数。蒸发皿蒸发量的观测资料采用直径 20 cm、高 10 cm 的小型蒸发皿观测数据,年、季节和月的气象资料由逐日资料累加得到,气象站点分布如图 1 所示。DEM 数字高程数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率 30 m。MOD16 是 MODIS 标准数据产品,包含蒸散发 (ET)、潜热通量 (LE)、潜在蒸散发 (PET) 和潜在潜热通量 (PLE),空间分辨率为 1 km 和 0.05°,时间分辨率为 8 d、月和年。MOD16 蒸散发数据集由蒙大拿大学密苏拉分校地球动态数值模拟研究组 (NTSG) 制作,其计算基于 Penman-Monteith 公式改进后得到^[13],计算结合了反照率、植被覆盖类型等遥感数据和气压、气温、湿度、辐射等气象数据。在 MOD16 蒸散数据产品中,蒸散发 (ET) 是实际陆面蒸散量,潜在蒸散发 (PET) 是假设水分充足的情况下蒸散的估算值,ET 和 PET 计算使用数据一样,只是计算陆面水环境参数不同。本文采用 2000—2014 年逐月的 Geo Tiff 格式的 MOD16A2 ET 与 PET 数据,空间分辨率为 1 km,轨道号是 h27v06 (<http://www.ntsug.umt.edu/project/mod16>)。利用 NASA 官网提供的 MODIS 专业转投影工具 MRT,将原始 MOD16 的 SIN 投影

HDF 数据集统一转成 WGS-1984 经纬度坐标下的 Geo-Tiff 格式图像文件,并进行轨道镶嵌、重采样等操作,最终将坐标统一为 Albers 等积投影系统。根据下载网站提供的数据使用说明,对数据进行异常值剔除和真实值还原。借助 ArcGIS 10.2 和 ENVI 5.3/IDL 软件,对 MOD16 数据进行矢量掩膜裁剪得到研究区各年、月 ET 与 PET,同时统计分析出不同地貌蒸散发数据。

2.2 研究方法

(1) MOD16 产品数据精度评价。本文利用相关系数(r)定量指标,应用小型蒸发皿校正数据与 MOD16 数据进行对比验证^[17,20-21],计算公式为:

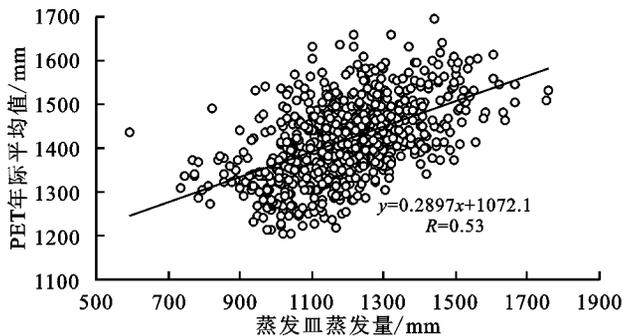
$$ET_0 = E_{20} \cdot K_P \quad (1)$$

式中:ET₀ 为潜在蒸散发量;E₂₀ 为蒸发皿的观测数据;K_P 为 PET₀ 和 E₂₀ 转换系数,在西南地区一般取值为 0.75^[20]。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}) \cdot (Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}} \quad (2)$$

式中: n 为观测个数; P_i 、 Q_i 分别为 MOD16-PET 值和小型蒸发皿校正量数据 ET₀。

(2) 蒸散发时空演变的评估指标。利用线性趋势法进行蒸散发时间趋势的分析,模拟出每个栅格的变化趋势,以单个像元时间变化特征综合反映出整个区域的时空演变格局和空间变化规律。随着时间序列的改变,蒸散发表现为序列整体的上升或下降变化趋势,呈现出空间分布格局的变化和在某时刻出现突



变或转折。蒸散发变量可以看作是时间的一元线性回归,利用最小二乘法逐像元计算蒸散发变化斜率^[14],计算公式为:

$$B = \frac{\sum_{j=1}^n ET_j t_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ET_j \sum_{j=1}^n t_j}{\sum_{j=1}^n t_j^2 - \frac{1}{n} (\sum_{j=1}^n t_j)^2} \quad (3)$$

式中: B 为某像元的趋势线斜率; t 为年份; n 为研究年段 15 (2000—2014 年)。当 B 值为正值时,表现为随时间 t 变化蒸散发呈上升趋势;反之,当 B 为负值时,随时间 t 变化植被 NPP 呈下降趋势;其绝对值越大表示研究区域蒸散发上升或下降的趋势越显著。

3 结果与分析

3.1 MOD16 蒸散数据可靠性分析

本文利用 MOD16-PET 与气象站点小型蒸发皿校正数据的相关性来验证 MOD16 蒸散数据的精度,年际平均值统计尺度和多年平均值统计尺度上进行相关性检验^[17]。年际平均值统计尺相关性验证为 2000—2014 年全省平均的年时间序列,有 15 个时间点;多年平均值统计尺度相关性验证为 2000—2014 年多年平均值组成的站点序列,有 50 个有效站点。相关性分析结果表明:PET 与蒸发皿蒸发量的年际平均值统计相关系数为 0.53,多年平均值统计相关系数为 0.66 (图 2),都通过了 0.001 的信度检验,说明 MOD16 蒸散发产品与气象站点观测的蒸发量在时间变化和空间分布上都保持了较好的一致性,能够满足贵州省地表蒸散发时空分布的研究需要。

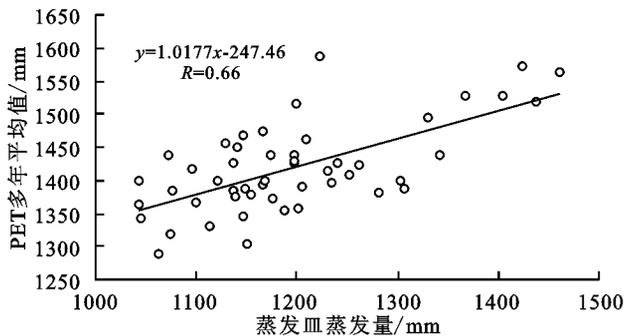


图 2 MOD16-PET 与气象站点的观测蒸散量相关系数

3.2 不同地貌类型区的逐年蒸散量变化特征

贵州省 2000—2014 年逐年蒸散发及相对变化率进行统计 (图 3),可知 15 a 贵州省逐年蒸散发值波段范围为 821.88~878.6 mm/a,多年平均蒸散发量为 854.95 mm/a。从整体上来看,年际波动不大,高于逐年均值年份有 8 a (2003 年、2004 年、2005 年、2007 年、2008 年、2009 年、2013 年、2014 年),其中 2003 年的蒸散发量最高,超出平均值 23.65 mm/a,相对变化

率达到 4.12%。低于多年平均值年份有 7 a (2000 年、2001 年、2002 年、2006 年、2010 年、2011 年、2012 年),其中 2001 年的蒸散发量最低,低于平均值 33.07 mm/a,相对变化率达到 -2.78%。分析气象数据及相关资料^[22],发现 2003 年,贵州省遭受严重的春旱和伏旱,旱情主要发生在 1—5 月和 7—8 月,西部、西南部以春旱为主,东部、东北部及南部伏旱最为严重,受旱范围广,持续时间长,气温较高,为蒸散发提供良好的条

件。而 2001 年,气候因素相对于常年来说,年均降水量为 1 108.20 mm,比多年均值偏少 7.00%,夏季月均气温低,不利于蒸散发。

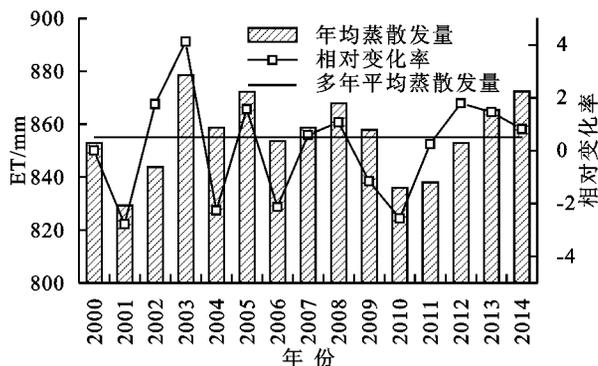


图 3 2000—2014 年贵州省蒸散发量年际变化

贵州省不同地貌区逐年蒸散发均值具有明显空间分布差异(图 4)。呈现出东南高、西北低、中部居中的三级阶梯分布格局,蒸散发为 527.71~1 299.32 mm/a。地势的高低差异,制约着水、热、光等分布差异,以及土壤、植被分布,从而影响到蒸散发,导致贵州省不同地貌分布差异明显^[23-24]。具体表现为峰丛洼地、非喀斯特地貌、熔岩槽谷的多年蒸散发均值比整体多年蒸散发均值高,大部分海拔为 500~1 200 m,是亚热带常绿阔叶林地带,植被覆盖度高,年均温在 16~18℃,年降水量达 1 200~1 600 mm,水热条件好,提供了良好地表蒸散发条件。岩溶高原的多年蒸散发均值与整体多年蒸散发均值相差不大,在地势上正处于南北两大斜坡带,一般海拔为 800~1 600 m,气温较高,年均降水量适中约 1 100 mm,从而蒸散量居中。岩溶峡谷与岩溶断陷盆地的多年蒸散发均值比整体多年蒸散发均值偏低,该区域是地势最高的山区,海拔多在 1 800~2 600 m,年均温 13~14℃,年降水量 1 000~1 100 mm,热量较低,降雨量偏少,植被覆盖率低,海拔较高,导致地表蒸散发量偏低。统计不同地貌逐年均蒸散发量(图 5),可知各地貌逐年蒸散发变化均呈现出 W 型的波动趋势,但在蒸散量值上有一定的差异,以峰丛洼地和非喀斯特地貌为例,在降雨量相差不大的情况下,峰丛洼地比非喀斯特地貌温度高,理应峰丛洼地全年蒸散发均值高于其他地貌,但有 4 a(2003 年、2004 年、2007 年、2008 年)低于非喀斯特地貌温。将得到的不同地貌类型蒸散发进行大小排序为:峰丛洼地(929.60 mm/a)>非喀斯特地貌(917.21 mm/a)>岩溶槽谷(862.55 mm/a)>岩溶高原(845.16 mm/a)>岩溶断陷盆地(747.99 mm/a)>岩溶峡谷(742.22 mm/a)。

3.3 不同地貌类型区的逐季蒸散量变化特征

受区域内海拔、降雨、温度、相对湿度、风速和日

照时数等多种因素的综合影响^[4],贵州省四季蒸散发量的空间分布差异显著(图 6)。

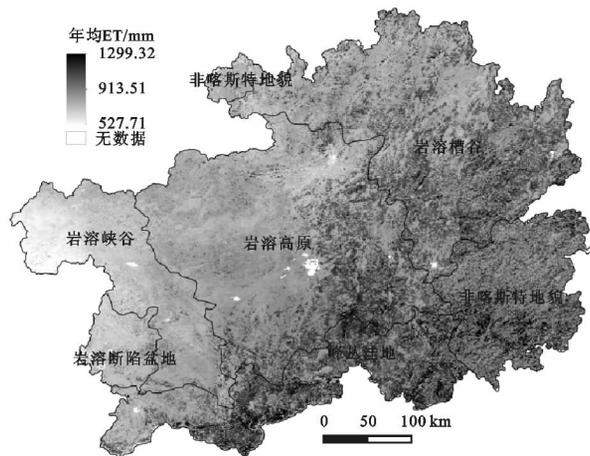


图 4 2000—2014 年贵州省不同地貌区

多年平均蒸散发空间分布

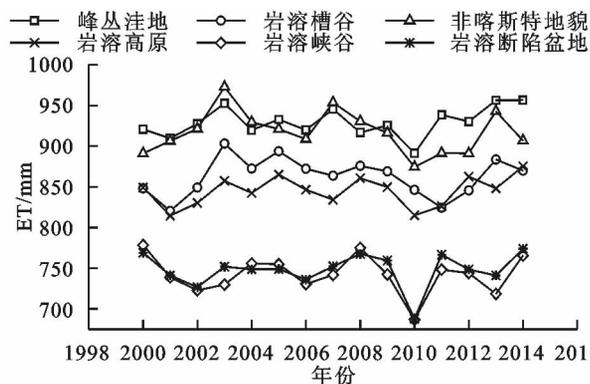


图 5 2000—2014 年贵州省不同地貌类型逐年均蒸散发量

春季(3—5月),地表蒸散发为 72.32~317.57 mm,总体呈东南向西北低降低趋势,即从贵州从江—威宁逐渐降低。贵州属于亚热带季风气候区,夏季风较弱,随着气温的回升,多阴雨天气,降水量增多,蒸散发季均值为 151.80 mm,占全年蒸散发量的 21.72%。从地貌类型来看,春季蒸散发最少集中于岩溶峡谷中北区,集中于威宁、水城和赫章县,主要该区平均海拔大于 2 000 m,属于高海拔区,植被多数为针叶林,具有高寒特性,不利于蒸发^[23]。蒸散发较高区域呈东北—西南方向的条带状分布,即兴义—普定—桐梓沿线,该分布区域与海拔关系密切,表现为海拔在 800~2 000 m 范围务川—册亨沿线与蒸散发较高分布界线相当,集中于岩溶高原。而蒸散发高值区域主要集中在贵州东南部,其中非喀斯特地貌整体蒸散发高,其原因与区域植被茂盛和地下暗河较少有关^[23-24]。

夏季(6—8月),气温高,多雨,降水量大,使得地表蒸散发量显著增加,为 207.89~590.25 mm,季均值为 284.17 mm,占全年蒸散发量的 40.66%,为一年中最高季。贵州省蒸散发夏季变化与春季变化基本一致,即从从江—威宁逐渐递减,但夏季蒸散发在各地貌区

明显升高。峰丛洼地、非喀斯特地貌和岩溶槽谷区属于夏季蒸散发高值分布区,该区域蒸散发都高于 400 mm。岩溶峡谷区蒸散发值较低,但相对于春季,该

区域的蒸散发仍然上升,数值均高于 200 mm,其原因是该区海拔较高,植被主要是高山草原和针叶林地,蒸散发相对较少。

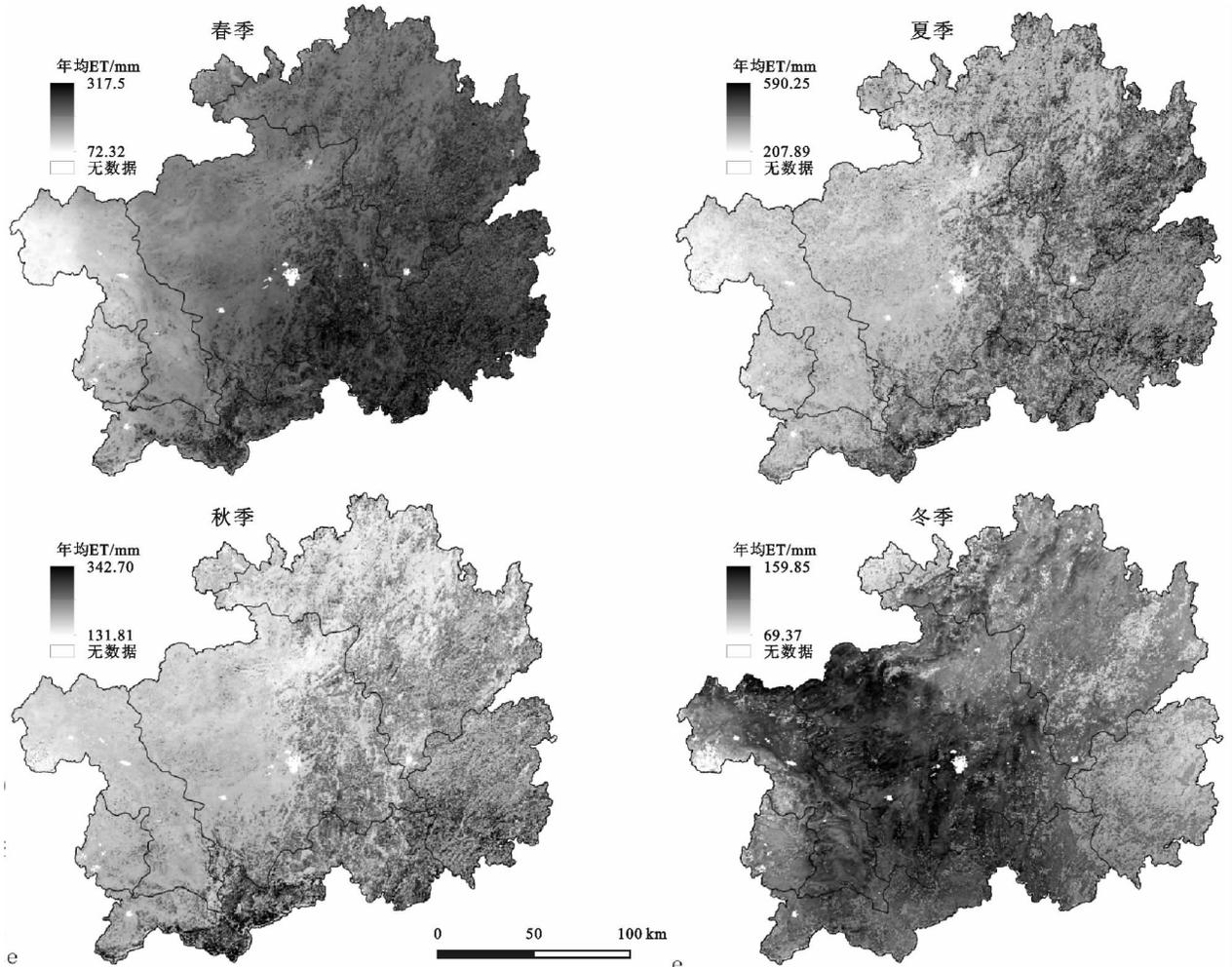


图 6 2000—2014 年贵州省不同地貌四季蒸散发空间分布

秋季(9—11月),西伯利亚冷空气开始进入,气温逐渐降低,降水量减少,蒸散发开始回落,减至 131.81~342.7 mm,整体蒸散发呈南部高北部低的趋势,季均值为 169.22 mm,占全年蒸散发量的 24.21%。秋季蒸散发量低值区主要集中在岩溶高原的东北部区域,该区域位于遵义市周边,处于黔中高原到北部大娄山区过渡地带,东部有武陵山区,西部有毕节高原,这样地形条件形成了半封闭的小型盆地,原因可能在于遵义市相对于周边地势来说,属于小型盆地,温度相对较低,不利于空气流动,致使蒸散发数值低^[25]。

冬季(12月—翌年2月),冬季风增强,降水量较少,空气干燥,气温低,蒸散发为 69.37~159.85 mm,整体蒸散发呈中西部高东部低,季均值为 93.65 mm,占全年蒸散发量的 13.41%。冬季蒸散发量高值区主要分布在岩溶高原区、岩溶峡谷和峰丛洼地,原因在于岩溶高原和岩溶峡谷该岩溶高原海拔相对较高,风速较大,更有利于蒸散发,而峰丛洼地区由于

地理位置处于贵州最南部,气温高,降水受夏季风影响略多^[26],故蒸散发量高于周边区域。总的来说,贵州省不同地貌区各季节的蒸散发量由大到小依次为夏季>秋季>春季>冬季。

3.4 不同地貌类型区的逐月蒸散量变化特征

对贵州省不同地貌 2000—2014 年内各月均蒸散发变化进行统计(图 7)。

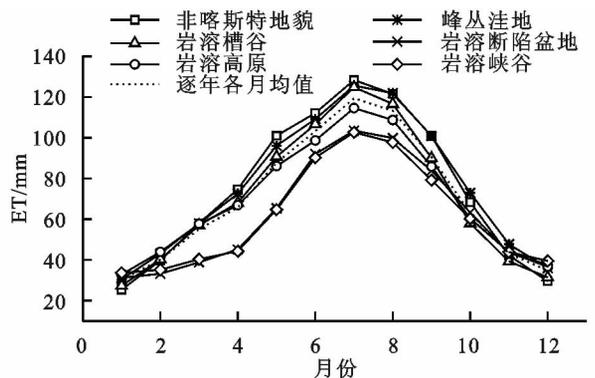


图 7 不同地貌类型月均蒸散发变化

可知 2000—2014 年逐年各月均值变化趋势呈现先上升后下降的倒 V 型变化趋势,8 月—翌年 1 月份蒸散发量持续下降期,1 月份到达最低,为 30.28 mm;2—7 月份蒸散发量持续上升期,较高蒸散发量主要集中在 5—9 月份,其 7 月份达到最高,为 119.39 mm。原因在于贵州省是典型的季风性气候,8 月—翌年 1 月份,8 月份西伯利亚冷空气开始进入,这使得气温不断降低,1 月为冷空气最强的月份,也是冬季风最强的时期,空气湿冷^[26],不利于蒸散发的条件。2—7 月份,2 月份后冷空气逐渐回撤,范围逐渐减小,7 月份为暖空气最强的月份,降水充沛,在加上白昼时间长,日照时数最多^[26],提供了有利的蒸散发条件。

从贵州省不同地貌类型来看,各地貌类型月均值与逐年各月均值变化趋势基本一致,均呈现先上升后下降的单峰变化趋势,但各月数值大小也存在差异。以逐年各月均值为参考,可分为两种:第一种倒 V 型,分别为非喀斯特地貌、峰丛洼地、岩溶槽谷和岩溶高原,表现为蒸散发从 1 月开始上升,在 7 月达到最大值后开始下降,呈现先增加后减小倒 V 型变化趋势。第 2 种为单峰型,分别为岩溶断陷盆地和岩溶峡谷,表现为蒸散发在 1—4 月缓慢上升,4—7 月迅速上升后开始下降单峰型变化趋势,其中 2—8 月明显低于其他地貌类型,其原因可能该区域海拔较高,相对其他地貌类型,气温较低,降雨量偏少,不利于蒸散发^[4,23]。

3.5 不同地貌类型区的蒸散量变化趋势分析

利用线性趋势法对贵州省的年际变化趋势进行测算(图 8),并按照实际情况趋势线斜率值的大小分为 5 级: $B < -10$ 为显著下降; $-10 \leq B < -3$ 为轻微下降; $-3 \leq B \leq 3$ 为基本不变; $3 < B \leq 10$ 为轻微上升; $B > 10$ 为显著上升^[27]。从整体来看,蒸散发年际变化空间分布大致呈现东西两侧减少,中部增加的趋势。蒸散发趋势下降的区域面积比例为 9.28%,其中又以轻微减少为主(8.75%),大部分集中于非喀斯特地貌、岩溶峡谷西部,以及岩溶槽谷东南部,其主要原因是人类活动增加,区域开发程度不断增强,土地利用格局发生深刻变化,进而影响了生态水文过程,使区域蒸发量减少^[28]。蒸散发趋势基本不变的区域占比为 77.91%,主要连片分布于岩溶断陷盆地、岩溶峡谷东南部,以及岩溶高原西部。年际蒸散发变化呈上升趋势,区域面积比例为 12.81%,集中分布于峰丛洼地与岩溶高原南部,该区域本是石漠化程度比较严重的区域,但随着近几年石漠化治理工程取得了初步成效,生态环境得到了改善,植被覆盖度增加,加强了土壤保水性^[29-30],从而提供了蒸散发水源,有利于蒸散。

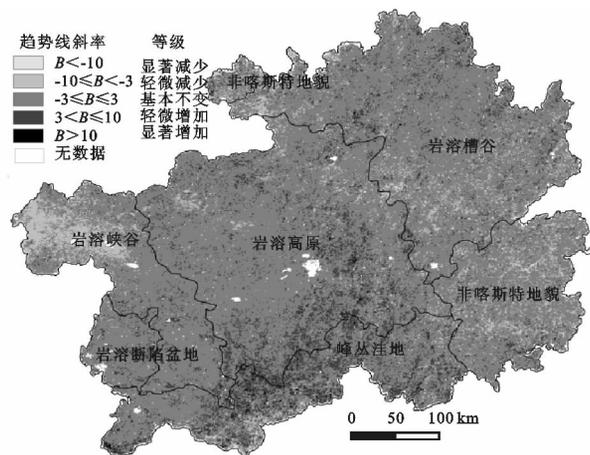


图 8 贵州省蒸散发量变化趋势分布

4 结论

(1) 2000—2014 年,贵州省蒸散发年均值为 854.95 mm/a,多年蒸散发均值具有明显空间分布差异,呈现出东南高、西北低、中部居中的三级阶梯分布格局。地势的高低差异,制约着水、热、光等分布差异,以及土壤、植被分布,从而影响到蒸散发,导致贵州省不同地貌分布差异明显。将不同地貌类型逐年蒸散发进行统计得到:峰丛洼地(929.60 mm/a) > 非喀斯特地貌(917.21 mm/a) > 岩溶槽谷(862.55 mm/a) > 岩溶高原(845.16 mm/a) > 岩溶断陷盆地(747.99 mm/a) > 岩溶峡谷(742.22 mm/a)。

(2) 受到季节变化的影响,贵州省四季蒸散发量的空间分布差异显著。春季(3—5 月),增长迅速,地表蒸散发为 72.32~317.57 mm;夏季(6—8 月),增速较高,蒸散发为 207.89~590.25 mm;秋季(9—11 月),蒸散发急剧减至 131.81~342.7 mm;冬季(12 月—翌年 2 月),蒸散发变化较为平稳,介于 69.37~159.85 mm。总体来看,年蒸散发变化趋势主要受夏季主导,冬季对年蒸散发变化趋势影响较弱。

(3) 2000—2014 年各地貌类型蒸散发量各月均值与整体逐年各月均值变化趋势基本一致。均呈现先上升后下降的倒 V 型变化趋势,2—7 月份蒸散发量为持续上升期,8 月—翌年 1 月份蒸散发量为持续下降期,最高与最低值分别出现在 7 月和 1 月。

(4) 2000—2014 年,贵州省蒸散发量年际变化趋势总体上较稳定。基本不变的区域占总面积 77.91%,蒸散发趋势上升的面积占比 12.81%,蒸散发趋势下降的面积占比 9.28%,其中轻微下降的面积占 8.75%。

参考文献:

- [1] Li Z L, Tang R, Wan Z, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation

- from remotely sensed data [J]. *Sensors*, 2009, 9(5): 3801-3853.
- [2] Tang R, Li Z L, Sun X. Temporal upscaling of instantaneous evapotranspiration: An intercomparison of four methods using eddy covariance measurements and MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138:102-118.
- [3] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(21):6353-6362.
- [4] 田雷, 杨胜天, 王玉娟. 应用遥感技术研究贵州春季蒸散发空间分异规律[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1):87-91.
- [5] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 等. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(3):320-330.
- [6] Yang Y, Anderson M C, Gao F, et al. Daily landsat-scale evapotranspiration estimation over a forested landscape in North Carolina, USA, using multi-satellite data fusion[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017, 21(2):1017-1037.
- [7] 凯丽比努尔·克热木, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜. 喀什地区 1957—2013 年潜在蒸散量变化及其影响因子[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5):247-251.
- [8] 曲迪, 范文义, 杨金明, 等. 塔河森林生态系统蒸散发的定量估算[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6):1652-1660.
- [9] Xing Z, Chow L, Meng F R, et al. validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick, Maritime, Canada [J]. *Sensors*, 2008, 8(1):412-428.
- [10] 周彦昭, 周剑, 李妍, 等. 利用 SEBAL 和改进的 SEBAL 模型估算黑河中游戈壁、绿洲的蒸散发[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(6):1526-1537.
- [11] 王蕊, 张继权, 曹永强, 等. 基于 SEBS 模型估算辽西北地区蒸散发及时空特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6):382-387.
- [12] Li C B, Zhang X L, Qi J G, et al. A case study of regional eco-hydrological characteristics in the Tao River Basin, northwestern China, based on evapotranspiration estimated by a coupled Budyko Equation-crop coefficient approach[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(11):2103-2112.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 冯飞, 姚云军, 张彦彬, 等. 基于 MOD16 产品的三江平原蒸散量时空分布特征分析[J]. *生态环境学报*, 2015(11):1858-1864.
- [17] 何慧娟, 卓静, 董金芳, 等. 基于 MOD16 监测陕西省地表蒸散变化[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(5):960-967.
- [18] 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.
- [19] Tong X, Wang K, Yue Y, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017, 54:105-113.
- [20] 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.
- [21] 廖晓芳, 钱胜, 彭彦铭, 等. 蒸发皿蒸发和潜在蒸散发对气候变化的响应[J]. *人民黄河*, 2010, 32(11):42-44.
- [22] 贵州省水利厅. 贵州省水资源公报(2000—2014)[R]. 贵阳:贵州省水利厅, 2001-2015.
- [23] 王飞宇, 占车生, 胡实, 等. 典型山地蒸散发时空变化模拟研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(2):276-287.
- [24] Kun Q, Shuigen Y, Qin Z. Evapotranspiration simulation with different scenarios analyses of Fangshan District by SWAT model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 99-105.
- [25] 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.
- [26] Huang R, Chen J, Gang H. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6):993-1023.
- [27] 赫晓慧, 梁冰洁, 郭恒亮, 等. 基于 MOD16 的北洛河流域蒸散发空间格局演变研究[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1):177-182.
- [28] Zhang Q, Xu C Y, Chen X. Reference evapotranspiration changes in China: Natural processes or human influences [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2011, 103(3/4):479-488.
- [29] 肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析[J]. *生态学杂志*, 2005, 1(5): 86-89.
- [30] 吴端耀, 罗娅, 王青, 等. 2001—2014 年贵州省林草植被覆盖度时空变化及其与气温降水变化的关系[J]. *贵州师范大学学报:自然科学版*, 2017, 35(1):1-7, 29.