

# 滇黔桂岩溶区 ET 时空特征及气候因子驱动

王永锋<sup>1,2</sup>, 靖娟利<sup>1,2</sup>, 马炳鑫<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 2. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 基于滇黔桂岩溶区 2000—2014 年 MOD16 ET 产品和同期 72 个气象站点数据, 运用趋势分析法、Hurst 指数、偏相关分析法和复相关分析法, 探究地表蒸散发时空变化特征及其气候因子驱动。结果表明: (1) 年际 ET 呈不显著增加趋势 ( $p > 0.05$ ), 距平相对变化率年际差异较大; 年内 ET 呈单峰变化趋势, 7 月份达到最大值; 不同生态地理区 ET 具有差异性。 (2) ET 多年均值总体呈西北部低、东南部高的空间分布格局; 季节 ET 均值差异显著, 夏季 ET 最强, 冬季最弱。 (3) 年际 ET 变化趋势以不显著变化为主, 呈增加趋势的区域面积略大于呈减少趋势的区域面积; Hurst 指数大于 0.5 的持续性区域占比 91.41%, ET 变化趋势以持续性为主导; 不同植被类型 ET 均值及变化趋势具有差异性。 (4) 不同生态地理区 ET 与降水和温度的偏相关系数波动较大, 温度对 ET 的影响大于降水; ET 与降水和气温的复相关系数总体呈不显著正相关, 复相关系数值在空间上呈西北高、东南低的分布格局; ET 受气候因子驱动的地区主要表现为气温驱动。 综上, 揭示了滇黔桂岩溶区 ET 时空变化特征, 明确了 ET 变化的主要气候驱动类型。

**关键词:** 滇黔桂岩溶区; 蒸散发; 趋势分析; Hurst 指数; 相关分析

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)05-0235-09

## Spatiotemporal Characteristics of Evapotranspiration and Its Driving Climate Factors in the Karst Areas of Yunnan-Guizhou-Guangxi

WANG Yongfeng<sup>1,2</sup>, JING Juanli<sup>1,2</sup>, MA Bingxin<sup>1</sup>

(1. *Guilin University of Technology, Guangxi, Guilin 541004, China*;

2. *Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guangxi, Guilin 541004, China*)

**Abstract:** The spatiotemporal variation characteristics of evapotranspiration and its driving climate factors in the karst areas of Yunnan-Guizhou-Guangxi were investigated based on the MOD16 ET products and 72 meteorological stations from 2000 to 2014 by using trend analysis, Hurst index, partial correlation analysis and complex correlation analysis methods. The results showed that: (1) the annual ET showed an insignificant increasing trend ( $p > 0.05$ ), and the relative change rate of anomaly was significantly different between years; the monthly ET showed a unimodal trend and reached to the maximum value in July; values of ET were different among eco-geographical regions; (2) the spatial distribution of annual mean ET was low in the northwest and high in the southeast; the seasonal mean ET was significantly different, with the strongest level in summer and the weakest level in winter; (3) the variation trend of interannual ET was mainly insignificant, and the area with increasing trend was slightly greater than that with decreasing trend; the region where Hurst index was greater than 0.5 accounted for 91.41%, and therefore the variation trend of ET was dominated by persistence; the mean values and variation trends of ET in different types of vegetation were different; (4) the partial correlation coefficients between ET and precipitation and temperature fluctuated greatly among eco-geographical regions, and the influence of temperature on ET was greater than that of precipitation; the complex correlation coefficient between ET and precipitation and temperature was insignificantly positive, and the spatial distribution of coefficient was high in northwest and low in southeast; the climate-driven region of ET was predominantly temperature-driven in the study area. In summary, the spatial

收稿日期: 2021-08-20

修回日期: 2021-09-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(42161028); 广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA297160); 广西空间信息与测绘重点实验室资助项目(16-380-25-08)

第一作者: 王永锋(1977—), 男, 陕西合阳人, 实验师, 硕士, 主要从事环境遥感方面的研究。E-mail: 6605004@glut.edu.cn

通信作者: 靖娟利(1977—), 女, 陕西长安人, 副教授, 硕士, 主要从事资源环境遥感方面的研究。E-mail: 2003080@glut.edu.cn

and temporal variation characteristics of ET in karst region of Yunnan-Guizhou-Guangxi were revealed, and the main climate driving types of ET changes were clarified.

**Keywords:** karst areas of Yunnan-Guizhou-Guangxi; evapotranspiration; trend analysis; Hurst index; correlation analysis

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是植被及地面向大气输送的水汽总通量, 包括地表土壤水分的蒸发和植物体内水分的蒸腾<sup>[1]</sup>, 它决定着土壤—植被—大气系统中能量和水分传输<sup>[2-3]</sup>。全球陆地大约 60% 的降水都会以蒸散的形式返回大气中, 在降水量较少的干旱地区甚至达到 90%<sup>[4-5]</sup>, 可见蒸散发在全球水分循环和能量平衡过程中起着关键作用<sup>[6]</sup>。在气候变化背景下, 滇黔桂岩溶区由于其特殊的地质环境背景, 加上人类活动的干扰, 旱涝灾害频繁发生; 这意味着该区水量平衡关系发生了变化, 而蒸散发对水量平衡具有重要作用<sup>[7-8]</sup>。因此, 准确掌握滇黔桂岩溶区蒸散发量, 并探索其与气候因子的关系, 对区域水资源合理开发利用、旱涝监测和预警等研究具有重要意义。

传统基于观测站的蒸发方法只能反映站点周围的蒸散发情况, 不足以反映区域蒸散发的实际情况<sup>[9]</sup>。遥感技术可以提供丰富的地表参数信息, 具有快捷、经济、宏观等特点, 为准确估算区域尺度蒸散发提供了有效途径<sup>[10]</sup>。2011 年美国 NASA 团队基于 Penman-Monteith 模型和 MODIS 数据, 在 ET 的反演算法上取得重大成果, 并发布了全球陆地蒸散数据产品 MOD16, 该数据集已通过全球通量塔数据验证, 模拟精度达到 86%<sup>[11-12]</sup>, 在全球得到广泛应用<sup>[13-15]</sup>。

滇黔桂岩溶区属于我国西南岩溶区核心地带, 自然环境复杂多变, 生态环境脆弱。近年来, 国内学者相继对该区地表蒸散发进行研究。以往研究表明, 西南地区 ET 整体上表现出随着纬度的降低而增加的特征, 从西北高原地区向东南沿海区逐步增加, 不同季节 ET 空间分布差异较为明显<sup>[16]</sup>; 基于 Penman-Monteith-Leuning 遥感模型的 ET 估算结果显示, 桂西北岩溶区季节 ET 变化显著, 年际 ET 空间分布不仅受降水的空间分布影响较大, 还与人类活动和土地利用类型有关<sup>[17]</sup>; 贵州省 ET 总体呈西低东高、南高北低态势, ET 年内变化呈单峰型, ET 季节变化空间差异非常显著, ET 年际变化呈弱增加趋势, 呈东、西部减少、中部增加趋势, 不同岩溶地貌类型 ET 具有差异性<sup>[18-19]</sup>; ET 与同期气温和降水量呈正相关关系, 与同期日照时数以正相关为主, 降水量是贵州省 ET 年内变化影响最大的气候因子<sup>[20]</sup>。

目前, 学者们对滇黔桂岩溶区 ET 的研究多集中在局部区域, 以滇黔桂岩溶区为整体, 同时考虑生态

地理分区探讨 ET 时空变化及其与气候因子关系的研究尚不多见。因此, 本文以 MOD16 ET 数据为基础, 结合同期气象站点数据、生态地理分区数据、植被类型数据, 探讨滇黔桂岩溶区 ET 时空变化特征及气候因子的驱动机制, 并进一步分析不同生态地理区、不同植被类型 ET 变化的差异性。研究结果可为滇黔桂岩溶区水资源合理开发利用、旱涝灾害成因认识、生态环境保护等方面提供科学依据。

## 1 研究区概况

滇黔桂岩溶区地理位置为 97.07°—112.45°E, 20.72°—29.40°N, 分布在我国云南、贵州、广西 3 省(区), 属于西南岩溶区核心地带(图 1)。地势总体呈西高东低的分布格局, 海拔在 0~5 948 m 波动。位于热带、亚热带季风气候区, 水热资源充足, 年均气温大约介于 6~24℃, 年均降水量介于 430~2 015 mm, 降水量和气温总体呈从西北向东南递增的趋势。研究区内碳酸盐岩大面积出露, 具有地上地下双层水文地质结构, 土壤瘠薄、持水性差; 植被具有石生、旱生、喜钙等特点, 以矮小灌木居多, 一旦遭到破坏就可能出现石漠化, 属于全球变化的敏感地带。根据温度带、干湿分区和生态地貌类型将研究区划分为 7 个生态地理区: 云南高原(I)、川西藏东高山深谷(II)、滇中南亚高山谷地(III)、滇南中山谷地(IV)、贵州高原(V)、南岭山地(VI)和广西低山平原(VII), 其空间分布见图 1。

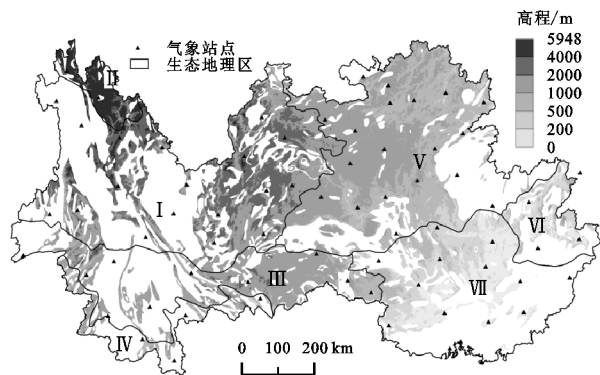


图 1 研究区地理位置、生态地理分区及气象站点空间分布

## 2 数据及研究方法

### 2.1 数据来源及预处理

本研究选用 2000—2014 年的 MOD16A3 和

MOD16A2 产品,时间分辨率分别为年和月,空间分辨率均为 1 km,轨道号为 h26v06, h27v06 和 h28v06,数据来源于美国蒙大拿大学(<https://www.ntsug.umt.edu/>)。利用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对原始 HDF 进行拼接,并将正弦曲线(Sinusoidal)投影转为等积圆锥(Albers Equal Area Conic)投影,输出为 GeoTiff 格式;然后在 ArcGIS 平台中进行无效值去除、真值恢复,并根据研究区行政界进行裁剪,获取 1 km 分辨率的年和月 ET 数据集。

2000—2014 年逐月气象数据来源于国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>),包括滇黔桂地区 72 个地面气象站点(图 1),主要包括降水量(mm)和月均气温(℃)数据,采用 IDW 插值法进行气象数据空间插值。

结合研究区实际情况,将 1:100 万植被类型数据重分类为针叶林、阔叶林、灌木林、草丛、草甸、高山植被和栽培植被。空间分辨率为 90 m 的 SRTM DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)。中国 1:400 万可溶岩分布图来源于中国科学院岩溶地质研究所。中国 1:600 万生态地理分区数据和 1:100 万植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

## 2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 趋势检验方法<sup>[21-22]</sup>,已成为长时间序列数据趋势分析的重要方法。运用该方法对滇黔桂岩溶区 2000—2014 年 ET 进行趋势分析和显著性检验,判断近 15 a 来 ET 变化趋势及其显著性。当趋势度  $\beta > 0$  时,表示 ET 时间序列呈上升趋势,反之则呈下降趋势;变化趋势的显著性用 Mann-Kendall 方法中统计量  $Z$  进行检验,在给定置信水平  $\alpha$  下,如果  $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ,表示 ET 时间序列在  $\alpha$  水平下变化趋势显著;本文选择  $\alpha = 0.05$ ,  $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。

2.2.2 Hurst 指数 基于重标极差分析法(Rescaled Range Analysis Method, R/S)的 Hurst 指数,由英国水文学家 Hurst 在研究尼罗河水文问题时提出,后经 Mandelbrot 对理论补充和完善<sup>[23-24]</sup>。Hurst 指数  $H$  值域范围为(0,1),当  $H = 0.5$  时,表明序列不具有持续性,对过去的趋势没有依赖性;当  $H > 0.5$  时,意味着未来的变化情况与过去一致,即持续性;而  $0 < H < 0.5$  时,意味着未来的变化情况与过去相反,即反持续性。

2.2.3 相关分析法 气候变化是影响区域水热分布的重要环境因素,以气温和降水量表现最为明显<sup>[25]</sup>。基于偏相关分析法探究降水量或气温对滇黔桂岩溶

区 ET 的影响,并采用  $t$  检验进行显著性检验。复相关分析是综合考虑降水量和气温对 ET 的共同影响,并采用  $F$  检验进行显著性检验。偏相关分析和复相关分析的详细计算过程参考文献<sup>[26]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 滇黔桂岩溶区 ET 时间变化特征

3.1.1 ET 年际和年内变化特征 2000—2014 年滇黔桂岩溶区年际 ET 呈不显著增加趋势( $p > 0.05$ ),变化率为 0.2252 mm/a;年际 ET 在 818.44~866.16 mm 波动,多年 ET 均值为 846.91 mm,距平相对变化率年际差异较大(图 2A)。研究时段内,年际 ET 超过多年均值的年份有 2000 年、2003 年、2005 年、2007 年、2008 年、2012 年、2013 年和 2014 年,其中 2003 年 ET 最高,为 866.16 mm,超出多年均值 19.25 mm,2012 年 ET 超出多年均值最小,仅为 2.24 mm;其余年份年际 ET 均低于多年均值,其中 2010 年 ET 最小,为 818.44 mm,低于多年均值 28.47 mm,而 2009 年 ET 值仅低于多年均值 0.40 mm。以上分析表明,滇黔桂岩溶区近 15 a 的 ET 变化趋势呈现出明显的阶段性,2000—2010 年 ET 呈波动减小趋势,2010 年以后呈增加趋势。2010 年 ET 为近 15 a 最低值,主要与 2009—2010 年西南地区大旱致使植被破坏密切相关。

滇黔桂岩溶区年内 ET 呈单峰变化趋势,ET 多年月均值介于 36.40~112.42 mm,均值为 70.57 mm(图 2B)。ET 年内变化特征与气候条件密切相关,研究区 3 月份开始,随着气温的回升 ET 逐渐上升;7 月份水热条件充足,ET 达到年内的最大值,8 月份开始 ET 呈逐渐下降趋势,10 月份以后随着气温降低,蒸散量也随着减小;12 月—次年 2 月份,研究区处于冬季,ET 达到全年最低值。

3.1.2 不同生态地理区 ET 年际变化特征 不同生态地理区年均 ET 差异显著,其中滇南中山谷地(Ⅳ)ET 最高,大致在 1 100 mm 左右波动;川西藏东高山深谷(Ⅱ)ET 最小,大约在 490~580 mm 波动,云南高原(Ⅰ)ET 为次低,其值介于 630~720 mm;其他分区 ET 大约在 850~1 050 mm 波动(图 3)。近 15 a 来,各生态地理区 ET 变化趋势具有一定差异性,滇南中山谷地(Ⅳ)年际 ET 增加趋势显著( $p < 0.05$ ),变化速率为 2.25 mm/a;川西藏东高山深谷(Ⅱ)年际 ET 减少趋势显著( $p < 0.05$ ),变化速率为 3.09 mm/a;其他生态地理区 ET 变化趋势均未通过 0.05 显著性检验。



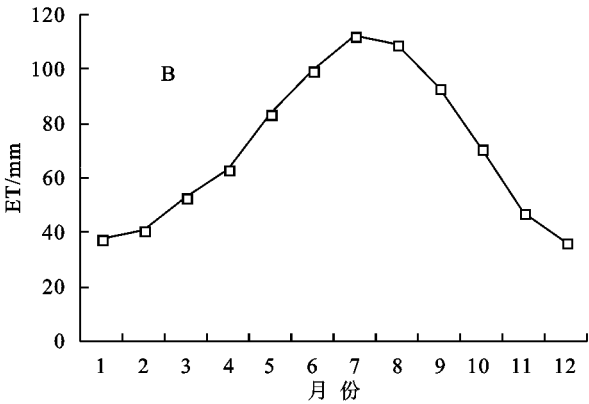
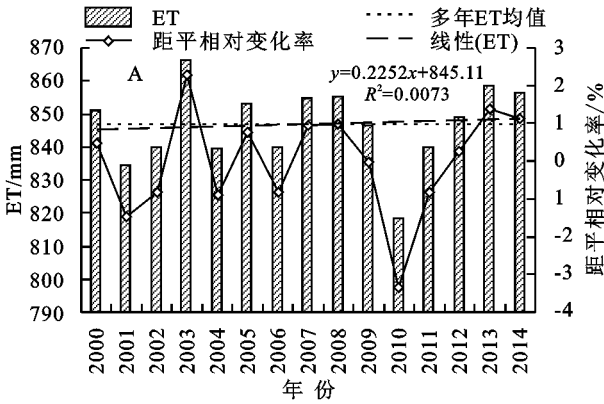


图 2 年际(A)和年内(B) ET 变化特征

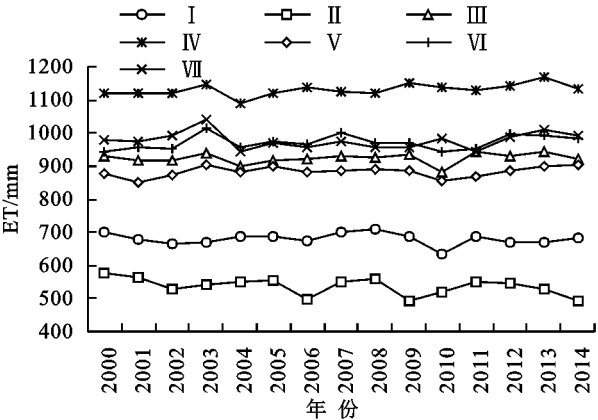


图 3 不同生态地理区年际 ET 变化特征

以上分析可知,不同生态地理区年际 ET 变化特征具有差异性。究其原因主要是不同生态地理区 ET 的大小是植被、土壤、气候、地貌等因子的综合体现。滇南中山谷地(Ⅳ)ET 最高,其位于边缘热带湿润地区,海拔介于 1 000~2 000 m,地形起伏不大,植被类型主要以阔叶林为主,植被蒸腾作用较强。川西藏东高山深谷(Ⅱ)处于滇黔桂岩溶区的西北部地区,属于高原温带湿润一半湿润地区,海拔高、地形起伏大,植被类型以针叶林为主,植被蒸腾作用相对较弱。

3.2 滇黔桂岩溶区 ET 空间变化特征

3.2.1 ET 年际及季节均值空间分布特征 受气候、植被类型、地形地貌等因子的影响,滇黔桂岩溶区年际 ET 均值空间分布表现出明显的区域差异性(图 4)。多年平均 ET 小于 600 mm 的低值区主要位于云南高原和川西藏东高山深谷地区;贵州高原西北部

和广西低山平原中部地区 ET 在 800~1 000 mm 波动;滇中东南亚高山谷地中部和西部、广西低山平原大部分地区 ET 在 1 000~1 200 mm 波动变化;ET 大于 1 200 mm 的高值区集中分布在滇南中山谷地。结合研究区高程分布情况进一步分析发现,ET 低值区(<600 mm)集中分布在海拔大于 2 000 m 的地区,而 ET 高值区(>1 200 mm)主要分布在海拔为 500~1 000 m 的地区,表明研究区 ET 的大小与高程空间分布密切相关。

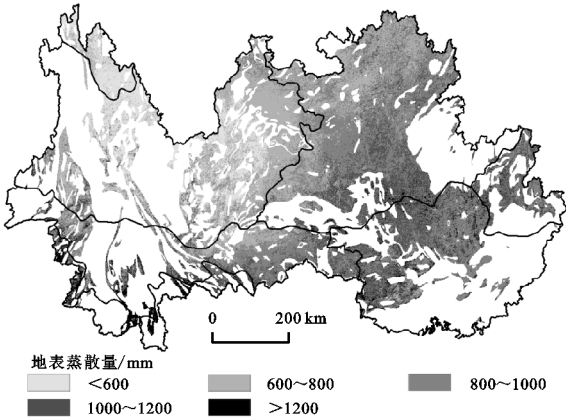


图 4 年际 ET 均值空间分布特征

和云南高原部分地区 ET 介于 600~800 mm;贵州高原

为了研究滇黔桂岩溶区 2000—2014 年季节 ET 的变化分异规律,将研究区 3—5 月划归为春季,6—8 月划归为夏季,9—11 月划归为秋季,12 月一次年 2 月划归为冬季。从图 5 可以看出,季节 ET 表现出显著空间差异性,其从大到小排序依次为:夏季(320.84 mm)>秋季(211.08 mm)>春季(200.17 mm)>冬季(114.63 mm)。

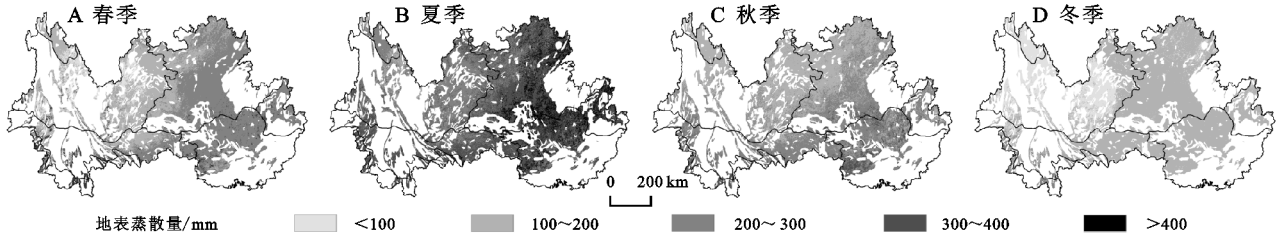
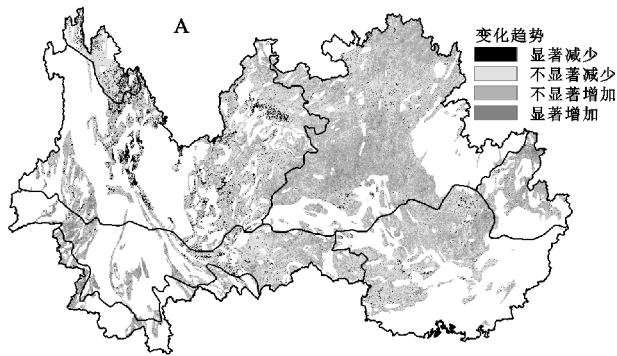


图 5 季节 ET 均值空间分布特征

春季,ET 均值介于 35.17~463.63 mm,广西低山平原、南岭山地、贵州高原中部和滇中南亚高山谷地东南部 ET 在 200 mm 以上,贵州高原西部、云南高原和川西藏东高山深谷地区 ET 在 200 mm 以下。夏季,ET 均值在 94.35~585.63 mm 波动,整体较春季有较大上升,广西低山平原、南岭山地和贵州高原 ET 值在 300 mm 以上,云南高原和川西藏东高山深谷地区 ET 值介于 200~300 mm,云南高原北部和川西藏东高山深谷北部和南部局部地区 ET 小于 200 mm。秋季,ET 均值介于 72.94~471.63 mm,整体较夏季有所下降,ET 大于 300 mm 的高值区集中分布在广西低山平原西南部和滇南中山谷地,云南高原和川西藏东高山深谷地区 ET 低于 200 mm。冬季,ET 均值为全年最低,其值介于 10.35~276.59 mm,广西低山平原、贵州高原和滇中南亚高山谷地 ET 在 100~200 mm 之间,而云南高原和川西藏东高山深谷地区 ET 低于 100 mm。

季节 ET 变化差异显著,其主要影响因子也各有差异。冬季,水热条件配置较差,植被生长受限,ET 值在四季中最小;春季,随着气温逐渐上升,降水量逐渐增加,植被开始进入生长季,蒸腾作用增强,ET 逐渐升高;进入夏季,水热条件配置达到最优,ET 达到最大;秋季气温开始逐步下降,降水量减少,ET 相较于夏季相对减弱。总体而言,滇黔桂岩溶区季节 ET 空间分布异质性显著,夏季 ET 最强,春秋季次之,冬季最弱。



3.2.2 ET 年际变化趋势及其持续性 为了进一步了解滇黔桂地区 2000—2014 年 ET 年际变化趋势,基于 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验方法逐像元计算 ET 的年际变化趋势  $\beta$ ,并判断当  $\alpha=0.05$ ,  $Z=1.96$  时,ET 变化趋势的显著性。计算结果显示,趋势度  $\beta$  介于 -40.40~56.17,统计量  $Z$  介于 -4.45~4.65。根据  $\beta$  和  $Z$  组合,将 ET 变化趋势分为以下 4 类:显著减少( $\beta<0$ ,  $|Z|>1.96$ )、不显著减少( $\beta<0$ ,  $|Z|\leq 1.96$ )、不显著增加( $\beta>0$ ,  $|Z|\leq 1.96$ )和显著增加( $\beta>0$ ,  $|Z|>1.96$ )。

年际 ET 变化趋势计算结果表明,ET 变化趋势存在显著的空间差异(图 6A)。呈增加趋势的区域占比(50.79%)略高于呈减少趋势的区域占比(49.21%);其中,呈显著增加趋势的区域占比 5.28%,主要分布在南岭山地、广西低山平原、贵州高原南部、云南高原西部、滇中南亚高山谷地和滇南中山谷地地带;呈显著减少趋势的区域占比 4.99%,集中分布在云南高原和川西藏东高山深谷地区、广西低山平原也有片状分布。云南高原和川西藏东高山深谷地区地势高,全年气温较低,不利于地表的蒸散发;广西低山平原 ET 显著减少的区域主要与城市建设和人类活动影响密切相关;而 ET 显著增加的区域主要与国家和地方政府的生态恢复政策有关,对石漠化地区植被恢复起到了积极作用,增加了植被覆盖率,从而增加地表蒸散发量。

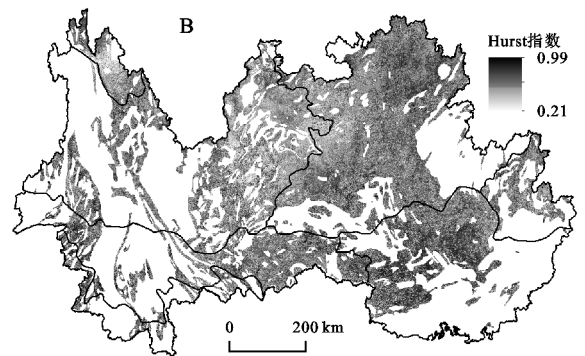


图 6 年际 ET 变化趋势(A)和 Hurst 指数(B)空间分布

基于滇黔桂岩溶区 2000—2014 年 ET 数据,逐像元计算 Hurst 指数,得到年际 ET 变化趋势的持续性空间分布图(图 6B)。计算结果显示 Hurst 指数值介于 0.21~0.99,均值为 0.68。Hurst 指数  $H<0.5$  的反持续性区域仅占 8.86%, $H>0.5$  的持续性区域占比为 91.14%,其中  $H>0.75$  的强持续性分布区占比 30.97%。ET 变化趋势的持续性区域远大于反持续性区域,表明整个研究区 ET 变化趋势处于持续状态。图 6B 显示,Hurst 指数总体上呈中间低、四周高的空间分布格局;低值区集中分布在云南高原和贵州

高原接壤地区,川西藏东高山深谷地区也有连片分布;而高值区域在研究区其他区域均有连片分布。因此,反持续性区域的植被变化应受到重点关注。

3.2.3 不同植被类型 ET 年际变化特征 受地形地貌、气候、土壤等因子影响,不同植被类型 ET 具有差异性。滇黔桂岩溶区不同植被类型 ET 从大到小排序为(图 7A):阔叶林(965.14 mm)>灌木林(885.19 mm)>草丛(846.88 mm)>栽培植被(827.47 mm)>针叶林(793.76 mm)>草甸(641.60 mm)>高山植被(601.61 mm)。不同植被类型在研究区的占比排序

为:灌木林(33.01%)>栽培植被(27.78%)>草丛(17.37%)>针叶林(15.02%)>阔叶林(4.52%)>草甸(2.14%)>高山植被(0.16%)。进一步对比发现,不同植被类型 ET 分布规律与其对应的占比排列不具有统一性,其原因主要有以下几点:阔叶林面积虽然仅占 4.52%,但其主要分布在广西低山平原、南岭山地、贵州高原、滇中南亚高山谷地和滇南中山谷地等水热条件相对较好的区域,因此相较于其他植被类型而言,其 ET 比较大;针叶林占比为 15.02%,其 ET 在 310.81~1 442.25 mm 波动,广泛分布在研究区,水热条件差异较大,因而整体 ET 较低;灌木林是研究区主要植被类型之一,在贵州、云南和广西分布面积占比分别为 40.98%,29.94%和 29.08%,地表土壤相对于阔叶林分布区瘠薄,保水能力较差,其 ET 小

于阔叶林;栽培植被区土壤条件良好,人工灌溉可以有效补给表层土壤水分,其 ET 稍低于灌木林;草丛分布区在贵州、云南和广西的占比分别为 54.19%,27.85%和 17.96%,云南高原、川西藏东高山深谷和贵州高原水热条件相对较差,植被蒸腾作用相对较弱。

研究时段内,不同植被类型多年 ET 均值变化趋势具有一定差异性(图 7B)。其中,阔叶林、灌木林和草丛 ET 均呈波动增加趋势,其他植被类型 ET 均呈波动减小趋势,变化趋势均未通过  $p<0.05$  显著性检验。除高山植被外,其他植被类型 ET 最小值均出现在 2010 年,ET 变化趋势表现出明显的阶段性,2000—2010 年呈波动减小趋势,2010 年以后呈增加趋势,这与研究区 2009 年秋至 2010 年春的干旱有一定相关性。

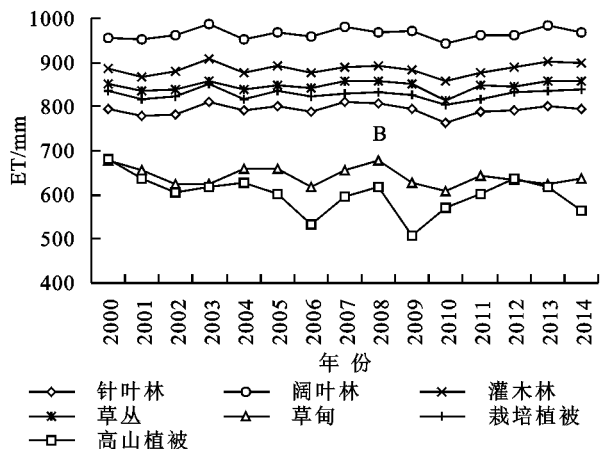
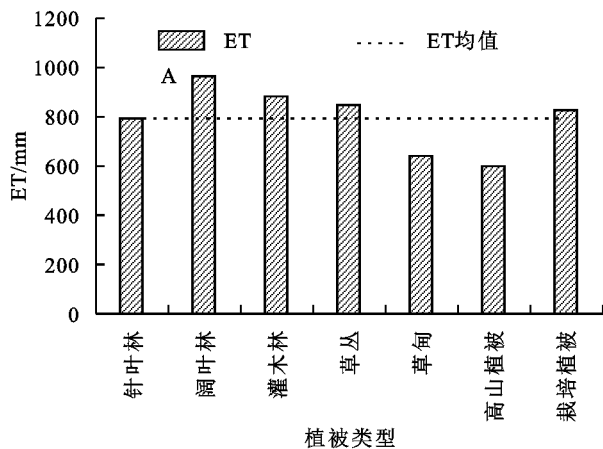


图 7 不同植被类型 ET 均值和年际变化特征

### 3.3 滇黔桂岩溶区 ET 与气候因子的关系分析

3.3.1 ET 与气候因子的偏相关分析 滇黔桂岩溶区 ET 与降水量的偏相关系数空间分布差异显著(图 8A);正相关的区域占比 53.02%,主要分布在云南高原、贵州高原和广西低山平原,其中呈显著正相关( $t>0.05$ )的区域占比 5.59%,集中分布在毕节地区、昭通市、六盘水市、曲靖市、贵阳市、大理白族自治州等地区;呈负相关的区域占比为 46.98%,主要分布在贵州高原西南部、广西低山平原北部、滇中南亚高山谷地、云南高原和川西藏东高山深谷地区,呈显著负相关( $t>0.05$ )的地区占比仅为 2.41%,零星分布于黔西南布依族苗族自治州、文山壮族苗族自治州、迪庆藏族自治州等地区。

研究区 ET 与气温的偏相关系数总体呈东部和西南部以正相关为主、中部和西北部以负相关为主的空间分布格局(图 8B)。呈正相关的地区(42.73%)略少于呈负相关的地区(57.27%),表明研究区 ET 与气温以负相关为主。其中,呈显著负相关( $t>0.05$ )的区域占比 15.23%,集中分布在云南高原中部、贵州高原中部、滇中

南亚高山谷地和川西藏东高山深谷地区;而呈显著正相关( $t>0.05$ )的地区仅占 3.87%,主要分布在贵州高原东部、广西低山平原中部以及滇南中山谷地。

进一步统计分析发现,ET 与降水量和气温在不同生态地理区的偏相关系数差异显著(表 1),统计结果显示 ET 与降水量的偏相关系数总体上小于其与气温的偏相关系数。当气温一定的情况下,川西藏东高山深谷(Ⅱ)、滇中南亚高山谷地(Ⅲ)和岭南山地(Ⅵ)ET 与降水量呈不显著负相关,说明这些地区降水量的增加会降低气温,减小植被蒸腾作用;而当降水量一定的情况下,云南高原(Ⅰ)、川西藏东高山深谷(Ⅱ)以及滇中南亚高山谷地(Ⅲ)ET 与气温呈负相关,当气温升高会引发干旱,对植被生长具有一定的抑制作用,从而不利于 ET 的增加。

以上分析表明,滇黔桂岩溶区 ET 与降水量和气温的偏相关关系总体以不显著为主导,ET 与降水量和气温的偏相关系数通过  $t>0.05$  显著性检验的区域占比分别为 8.01%和 19.10%,说明气温对 ET 的影响大于降水量。



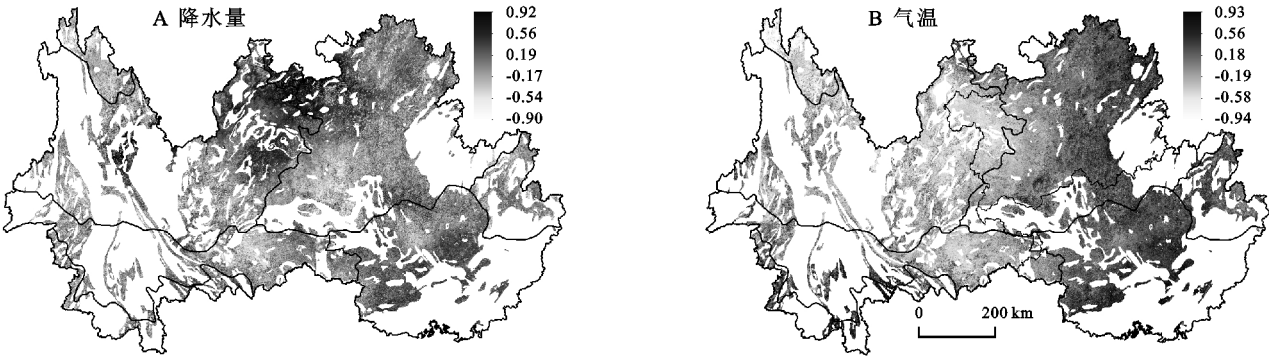


图8 年际 ET 与降水量和气温偏相关系数空间分布

表 1 不同生态地理区 ET 与降水量和气温的偏相关系数							
参数	I	II	III	IV	V	VI	VII
降水	0.09	-0.25	-0.08	0.00	0.03	-0.09	0.12
气温	-0.39	-0.60*	-0.20	0.18	0.03	0.15	0.22

注: \* 表示通过  $t>0.05$  显著性检验。

3.3.2 ET 变化的气候因子驱动分区 年际 ET 与降水量和气温的复相关系数介于 0~0.98(图 9A),复

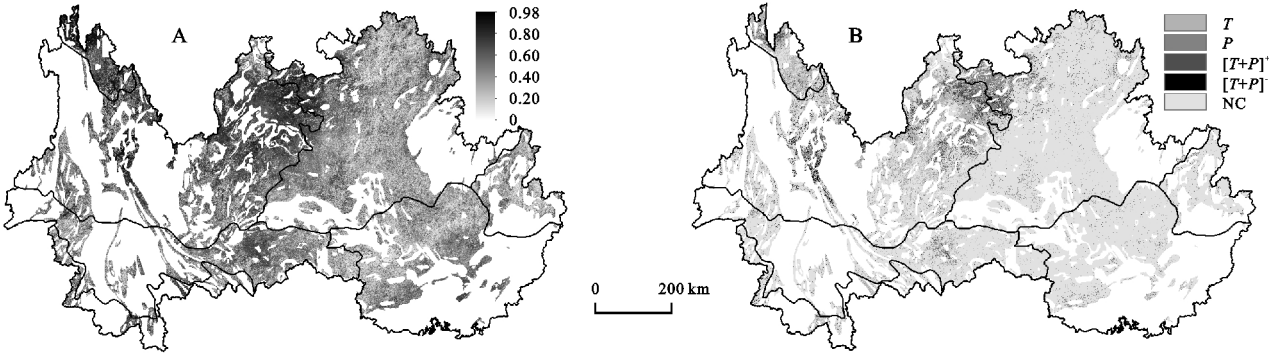


图9 年际 ET 与降水量和气温的复相关系数(A)和气候因子驱动分区(B)空间分布

气候因子是区域水热空间分布存在差异性的重要影响因素,为了进一步揭示滇黔桂岩溶区 ET 的气候因子驱动机理,在偏相关与复相关分析的基础上,结合研究区实际情况,参考徐光来等<sup>[27]</sup>研究制定研究区气候驱动准则(表 2)。

ET 与气候因子驱动类型空间分布见图 9B,其中气温驱动型主要分布在云南高原和川西藏东高山深谷,占比 11.85%;降水驱动型主要分布在云南高原的大理白族自治州和贵州高原,占比 3.33%;气温降水强驱动型主要散布在云南高原东北部和川西藏东高山深谷北部,占比为 2.37%;气温降水弱驱动型主要零星分布在云南高原北部地区,占比仅为 1.90%;非气候因子驱动型占比为 80.55%。不同生态地理区 ET 气候因子驱动统计见图 10,其中川西藏东高山深谷(II)以气温驱动为主,占该生态地理区总面积的 50%,其次为非气候因子驱动,占比 39%;其他生态地理区均以非气候因子驱动为主。以上分析说明,2000—2014 年滇黔桂岩溶区 ET 变化驱动力表现为非气候因子驱动。

相关系数高值区集中分布在云南高原、川西藏东高山深谷和滇中南亚高山谷地,复相关显著性水平达到 0.05 的区域占比 18.90%。

进一步统计分析发现,不同生态地理区复相关系数在 0.33~0.66 波动;其中,川西藏东高山深谷 ET 与降水量和气温的复相关系数最高,其次是云南高原,最低值出现在南岭山地。

表 2 ET 气候驱动准则

ET 变化驱动类型	分区准则		
	$r_{ET-P,T}$	$r_{ET-T,P}$	$r_{ET-PT}$
非气候因子驱动型(NC)			$F \leq F_{0.05}$
气温降水弱驱动型( $(T+P)^-$ )	$ t  \leq t_{0.05}$	$ t  \leq t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
气温驱动型(T)		$ t  > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$
降水驱动型(P)	$ t  > t_{0.05}$		$F > F_{0.05}$
气温降水强驱动型( $(T+P)^+$ )	$ t  > t_{0.05}$	$ t  > t_{0.05}$	$F > F_{0.05}$

注: P, 降水量; T, 气温。  $r_{ET-P,T}$  表示 ET 与降水量的偏相关系数,  $r_{ET-T,P}$  表示 ET 与气温的偏相关系数,  $r_{ET-PT}$  为 ET 与降水量和气温的复相关系数。  $t_{0.05}$  和  $F_{0.05}$  分别为 t 检验和 F 检验的 0.05 显著性水平。

4 讨论

2000—2014 年滇黔桂岩溶区年际 ET 呈不显著增加趋势,年内 ET 变化呈单峰分布,表现出明显的季节变化特征,此结论与钟昊哲等<sup>[17]</sup>基于 Penman-Monteith-Leuning 遥感模型对西南喀斯特区域蒸散发估算结果一致。但与李汇文<sup>[16]</sup>用 CRU4.0 及 GLDAS Noah 2.1 数据集,采用随机森林算法反演的 1966—2016 年中国西南

实际蒸散发数据时空变化特征具有一定差异性;究其原因主要与 ET 分析采用的数据源、数据空间分辨率、分析时段、研究区域等因素有关。

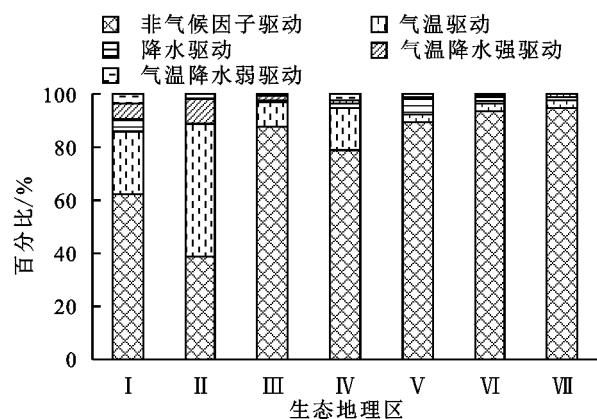


图 10 不同生态地理区 ET 气候因子驱动

滇黔桂岩溶区 ET 的气候因子驱动主要表现为气温驱动型,占比 11.85%,非气候因子驱动型占比为 80.55%,因此,ET 变化总体表现为非气候因子驱动。此结论与王焕和梅再美<sup>[20]</sup>对贵州省 ET 变化的驱动力分区有一定差异,其分析表明贵州省 ET 的气候因子驱动表现为降水驱动型。通过对比发现,王焕和梅再美<sup>[20]</sup>主要分析年内 ET 与同期气候因子的偏相关和复相关关系,并参考叶红等<sup>[25]</sup>气候驱动分区准则;而本文主要分析年际 ET 与同期气候因子的偏相关和复相关关系,气候驱动分区准则参考徐光来等<sup>[27]</sup>方法。

蒸散发是水文循环的重要组成部分,气候因子是影响区域水热分布的重要环境因子。已有研究表明温度、风速、降水、相对湿度、太阳辐射等气候因子对蒸散发具有重要影响,不同地区、不同时段,影响蒸散发的主要因子不同<sup>[28]</sup>。本文仅讨论了降水量和气温对滇黔桂岩溶区蒸散发的影响,未能考虑风速、相对湿度、太阳辐射等气候因子的影响作用,在后续的研究中将深入分析以上气候因子与 ET 的相关性,并进一步开展气候因子对 ET 的相对重要性分区研究。

## 5 结论

(1) 2000—2014 年滇黔桂岩溶区年际 ET 总体呈不显著增加趋势,ET 年内分布呈单峰型分布,ET 在 7 月份最大,12 月份最小。不同生态地理区 ET 年际变化差异显著,滇南中山谷地 ET 最高,川西藏东高山深谷 ET 最小。

(2) 多年 ET 均值空间差异显著,总体呈西北低、东南高的空间分布格局;ET 季节变化表现出显著的差异性。近 15 a 来,ET 年际变化呈增加趋势的区域略多于呈减少趋势的区域。Hurst 指数  $H > 0.5$  的持续性区域占比为 91.14%,表明研究区 ET 变化

趋势处于持续状态。不同植被类型 ET 大小具有差异性,但年际波动基本一致。

(3) ET 与降水量以正相关为主,而与气温以负相关为主;显著性统计结果表明气温对 ET 的影响大于降水量。ET 受气温驱动的区域占比 11.85%,受非气候因子驱动的区域占比为 80.55%,不同生态地理区驱动类型具有差异性。

## 参考文献:

- [1] 王桐,唐荣林,李召良,等.遥感反演蒸散发的日尺度扩展方法研究进展[J].遥感学报,2019,23(5):813-830.
- [2] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. Reviews of Geophysics, 2011,50(2):93-102.
- [3] 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.
- [4] 张巧凤,刘桂香,于红博,等.锡林郭勒草原蒸散发月季动态及相关因子分析[J].水土保持研究,2017,24(3):164-169.
- [5] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, et al. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation [J]. Agricultural Water Management, 2011,98(6):921-929.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Mahmood R, Hubbard K G. Simulating sensitivity of soil moisture and evapotranspiration under heterogeneous soils and land uses[J]. Journal of hydrology, 2003, 280(1-4):72-90.
- [9] Yin Y H, Wu S H, Zhao D S, et al. Modeled effects of climate change on actual evapotranspiration on the different eco-geographical regions in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013,23(2):195-207.
- [10] Chen Y, Xia J Z, Liang S L, et al. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2014,140:279-293.
- [11] 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.
- [12] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. Development



of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,111(4):519-536.

[13] Ramoelo A, Majozi N, Mathieu R, et al. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African Savanna[J]. South Africa Remote Sensing, 2014,6(8):942-945.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 李汇文,王世杰,白晓永,等.西南近 50 年实际蒸散发反演及其时空演变[J].生态学报,2018,38(24):8835-8848.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1):107-122.

[22] Abdul Aziz O I, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006,319(1):282-294.

[23] 王桂钢,周可法,孙莉,等.近 10 a 新疆地区植被动态与 R/S 分析[J].遥感技术与应用,2010,25(1):84-90.

[24] Mandelbrot B B. Statistical methodology for nonperiodic cycles: from the covariance to R/S analysis [J]. Annals of Economic and Social Measurement, 1972,1(3):259-290.

[25] 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.

[26] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2017.

[27] 徐光来,李爱娟,徐晓华,等.中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动[J].植物生态学报, 2021,45(3):213-223.

[28] 李晓媛,于德永.蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J].干旱区研究,2020,37(1):29-39.



(上接第 234 页)

[18] 凡姚申,陈沈良,谷国传.海岛景观生态风险演变研究:以舟山朱家尖岛为例[J].海洋通报,2016,35(1):1-10.

[19] 池源,石洪华,丰爱平.典型海岛景观生态网络构建:以崇明岛为例[J].海洋环境科学,2015,34(3):433-440.

[20] 潘竟虎,刘晓.疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J].生态学杂志,2016,35(3):791-799.

[21] 刘世梁,刘琦,张兆苓,等.云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析[J].生态学报,2014,34(13):3728-3734.

[22] 许妍,高俊峰,高永年.基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价[J].湖泊科学,2011,23(4):642-648.

[23] 刘纪远,张增祥,庄大方,等.20 世纪 90 年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J].地理研究,2003, 22(1):1-12.

[24] 李丽娟,郑红星.华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析:以潮白河为例[J].地理学报,2000,55(3):309-317.

[25] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.

[26] 张雅洲,谢小平.基于 RS 和 GIS 的南四湖生态风险评价[J].生态学报,2015,35(5):1371-1377.

[27] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.