

# 2000—2013年北部湾海岸带蒸散量时空动态特征\*

田义超<sup>1,2</sup> 梁铭忠<sup>1</sup> 胡宝清<sup>3</sup>

(1. 钦州学院资源与环境学院, 钦州 535000; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 广西师范学院北部湾环境演变与资源利用省部共建教育部重点实验室, 南宁 530001)

**摘要:** 基于北部湾海岸带 2000—2013 年 MOD16 蒸散发 (ET) 数据和植被类型数据, 借助于 Theil - Sen 中值趋势分析、Mann - Kendall 检验以及 Hurst 指数等数理统计方法对海岸带蒸散量的时空变化特征进行定量分析, 并在此基础上对蒸散量的未来变化趋势进行预测。结果表明: 时间尺度上, 2000—2013 年北部湾海岸带蒸散量呈波动增加趋势, 增速为 1.41 mm/a, 高于广西桂南地区, 海岸东岸蒸散量增速快于全区, 而丘陵地区和海岸西岸地区增速慢于全区。季节蒸散量由大到小排序为: 夏季 (111.88 mm)、秋季 (93.45 mm)、春季 (85.57 mm)、冬季 (47.98 mm), 分别占年内蒸散量的 33.01%、27.58%、25.25% 和 14.16%; 空间尺度上, 蒸散量自东北—西南中心线呈现海岸带西岸年均蒸散量高于海岸带东岸, 东南地带年均蒸散量达到全年最小值的态势, ET<sub>sen</sub> 趋势度介于 -50.93 ~ 51.76 mm/a, 海岸带蒸散量在空间上呈现出减小的趋势; 空间波动性上, 海岸带蒸散量的变异系数较大, 其值介于 0.02 ~ 0.39。海岸带中部以及东南部蒸散量处于高波动状态, 而海岸带西岸和西北部处于低波动状态, 其中合浦县的南流江三角洲蒸散量的波动性最大; 未来变化趋势上, 海岸带蒸散量 Hurst 指数的范围为 0.25 ~ 0.93, 平均值为 0.68, 呈现单峰右偏分布, Hurst 指数反持续序列 (7.58%) 小于持续性序列 (92.42%), 说明研究区 ET 未来变化呈持续性减小的趋势。

**关键词:** 蒸散量 时空分布 北部湾海岸带 MOD16 Theil - Sen 趋势 Hurst 指数  
**中图分类号:** P426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0146-13

## Temporal-spatial Dynamic Change Characteristics of Evapotranspiration in Beibu Gulf Coastal Zone during 2000—2013

Tian Yichao<sup>1,2</sup> Liang Mingzhong<sup>1</sup> Hu Baoqing<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Qinzhou University, Qinzhou 535000, China

2. National Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Geochemistry Institute of Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China

3. Key Laboratory of Beibu Gulf Environmental Evolution and Resources Utilization, Guangxi Normal University, Nanning 530001, China)

**Abstract:** Based on the MOD16 evapotranspiration (ET) data during the period of 2000—2013 and the vegetation type, the mathematical-statistics methods of Theil - Sen median trend, Mann - Kendall test and Hurst index were used to analyze the characteristics of temporal-spatial dynamic changes of ET and its future trend in Beibu Gulf coastal zone. The results showed regarding temporal variations, the annual ET of coastline in Beibu Gulf increased with a fluctuation rate of 1.41 mm/a in the study area from 2000 to 2013, and it was higher than that in the southern area of Guangxi. The trends of ET changing rate in east coast were faster than that of the whole region, while it was slower in the hilly areas and west coastal regions than that of the whole region. The order of increasing rate of seasonal ET was summer (111.88 mm) > autumn (93.45 mm) > spring (85.57 mm) > winter (47.98 mm), which accounted for 33.01%, 27.58%, 25.25% and 14.16% of annual ET, respectively. Regarding spatial distribution, the spatial

收稿日期: 2015-04-12 修回日期: 2015-05-31

\* 国家自然科学基金资助项目 (41361022)、广西自然科学基金资助项目 (2014GXNSFBA118221)、广西教育厅基金资助项目 (LX2014452)、广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室和北部湾海洋生物资源开发与保护重点实验室联合资助项目 (2015ZB07)

作者简介: 田义超, 讲师, 中国科学院地球化学研究所博士生, 主要从事资源环境遥感与 GIS 研究, E-mail: tianyichao1314@yeah.net

distribution of averaged annual ET in northeast-southwest centerline showed it was higher in the western coastal zone than that in the east, and the annual ET in southeast region reached minimum and the law of ET's Theil - Sen median trend was from  $-50.93 \text{ mm/a}$  to  $51.76 \text{ mm/a}$ , the spatial distribution of ET showed a decreasing trend in coastal zone. Regarding the volatility of ET, the variable coefficient of ET was larger and its value was from  $0.02 \sim 0.39$ . The ET in central and southeastern coastal zone presented a high volatility level, while the west and northwest of the coastal zone were in a low-volatility state, and the ET in Hepu County of Nanliu River Delta showed the maximum volatility. Regarding the future trend of ET, the Hurst index of ET was changed from  $0.25$  to  $0.93$ , with a mean of  $0.68$ , presented the right unimodal distribution. And the anti-sustained sequence ( $7.58\%$ ) was smaller than sustained sequence ( $92.42\%$ ), which indicated that the overall ET would take on an ongoing decreasing trend in the future.

**Key words:** Evapotranspiration Temporal-spatial variation Beibu Gulf coastal zone MOD16 Theil - Sen median trend Hurst index

## 引言

作为生命活动的物质基础,水是土壤-植被-大气系统(SPAC)中最为活跃的因子<sup>[1]</sup>。蒸散对于了解土壤水分运动、植被水分传递、植物与大气之间的水汽交换以及植被层的热量平衡具有重要的意义<sup>[2]</sup>。蒸散发(Evapotranspiration, ET)既包括从地表和植物表面的水分蒸发,也包括通过植物表面和植物体内的水分蒸腾<sup>[3]</sup>以及土壤蒸发<sup>[4]</sup>,其物理过程涉及空气近地表的湍流交换、植被与大气间的水汽与热量交换,与土壤水分运动和植被生理活动密切相关<sup>[5]</sup>。Rosenberg等<sup>[6]</sup>指出降落到地球表面的降水有70%通过蒸发或蒸散作用回到大气中,可见蒸散发在陆面水文过程中占有及其重要的分量。蒸散发与降水共同决定地表区域干湿状况,并且是估算生态需水和农业灌溉的关键因子<sup>[7]</sup>。因此,准确测算区域地表ET,对于定量认识生态需水规律、科学灌溉、旱灾监测以及生态保护和恢复都具有重要的研究意义<sup>[8]</sup>。

早期在进行蒸散发的相关研究时,主要基于气象学中的“点”尺度、样地尺度或景观尺度进行蒸散观测,如蒸发皿、蒸渗仪、波文比法、涡度相关法、土壤水量平衡法以及大口径激光闪烁仪等。但是对于较大空间尺度来说,由于地球陆地表面的非均质性以及水热传输过程中的动态性,此类仪器和观测方法很难用于监测区域或大尺度的蒸散量 $\text{ET}^{[9-10]}$ 。并且基于站点的蒸散量并不能提供蒸散发的区域分布信息。区域蒸散发的估算过去往往以水量平衡法为基础,可以得到较为全面和准确的多年平均蒸散量,然而难以得到较高时间分辨率和空间分辨率的蒸散量空间分布信息<sup>[11]</sup>。相对于传统的蒸散量估算方法,遥感方法具有空间连续和时间动态变化的特点,而且遥感数据的多光谱信息能够提供与地表

能量平衡过程和地表覆盖状况紧密相关的参数,借助于遥感手段和方法进行区域尺度非均匀下垫面的蒸散发估算,已经成为遥感应领域的重要研究方向<sup>[12]</sup>。目前在蒸散量估算上基于遥感信息的方法主要有经验法、特征空间法和能量平衡法。主要模型有基于Penman - Monteith公式的VITT模型<sup>[13]</sup>、基于Priestley - Taylor公式的三角形模型<sup>[14]</sup>以及基于能量平衡的SEBAL模型<sup>[15]</sup>、SEBS模型<sup>[16]</sup>和TSEB模型<sup>[17]</sup>等。国内外诸多学者利用MODIS遥感数据对蒸散量时空动态特征进行了研究,认为其具有与其他方法无可比拟的优势<sup>[18-21]</sup>。

北部湾海岸带作为我国西南重要的生态屏障区域,生态环境脆弱,地表植被覆盖度降低等一系列以水资源变化和植被退化等为核心的生态问题,不仅严重影响了北部湾地区人民的的生活和经济水平,而且影响着沿海地区建设新的现代化港口群、产业群和高质量宜居城市的步伐。目前国内学者对北部湾地区的植被覆盖<sup>[22]</sup>、土地利用<sup>[23]</sup>以及广西地区的蒸散量<sup>[24]</sup>进行了较多的研究,而北部湾海岸带蒸散量的时空变化过程和趋势目前尚不明确。因此,实现对北部湾经济区蒸散量的动态监测,对于评价陆海生态系统的生态环境、探寻该区域水分平衡规律、保障北部湾地区的水资源供给量以及保持水资源安全具有重要的指导意义,同时也可当地政府制定宏观决策提供理论和现实的依据。本文以2000—2013年MOD16月遥感数据集为基础,借助Theil - Sen趋势、Mann - Kendall检验以及Hurst指数等数理统计方法分别从不同时间和空间尺度上对北部湾海岸带的蒸散量变化情况定量分析,以期水资源利用、加强水资源管理、恢复植被生态和实现区域水资源可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选择北部湾海岸带为研究区,该区域地处北纬 $21^{\circ}24' \sim 22^{\circ}43'$ ,东经 $107^{\circ}27' \sim 109^{\circ}52'$ 之间,东西长约 226.77 km,南北长约 143.28 km,总面积 $32\,491.61\text{ km}^2$ ,下辖 4 市 4 县,分别为北海、钦州、防城港、东兴 4 市,浦北、上思、灵山、合浦 4 县(图 1)。该地区气候属亚热带季风气候区,具有亚热带向热带过渡性质的海洋季风气候特点。年平均气温 $22^{\circ}\text{C}$ ,绝对最高温度 $37.5^{\circ}\text{C}$ ,绝对最低温度 $-1.8^{\circ}\text{C}$ 。年均降水量 1 600 mm 左右,年均日照时数 1 800 h 左右,历年平均无霜期 332 d。

### 1.2 数据来源

数据包括 MOD16 地表蒸散数据和北部湾海岸带植被覆盖类型数据。MOD16 产品是由美国蒙大

拿大学(NTSG)制作,其反演流程如图 2 所示,此数据来源于网站(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>)。根据北部湾区域所覆盖的 2 个景(h27v06、h28v06),下载北部湾地区 2000—2013 年间的 MOD16A2 产品,该数据集空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ,时间分辨率为 1 个月,下载之后对原始 MODIS 的 HDF 数据进行数据提取、拼接和裁剪,由于 MODIS 数据产品是基于 SIN 投影的 HDF 格式,因此该数据处理过程需要借助于 MRT(MODIS Reprojection tools)软件实现原始数据的重新转换。北部湾海岸带植被覆盖类型数据来源于中国科学院地理科学与资源环境研究所资源与环境信息系统中心的全球 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 土地利用数据,得到此数据后,将其分类和合并为 8 大类(图 1),依次为:针叶林、阔叶林、混交林、灌木林、草地、湿地、农田和非植被。

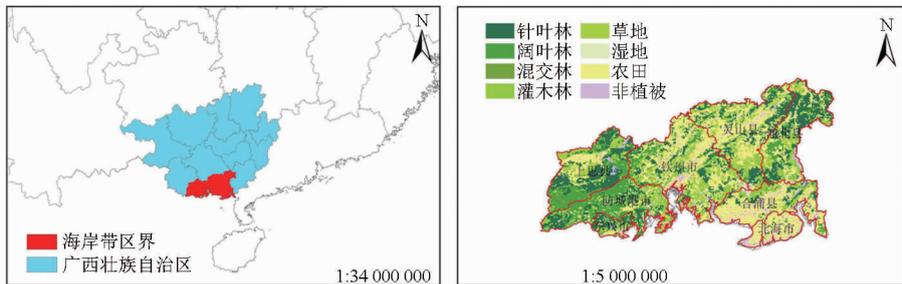


图 1 北部湾海岸带在广西区地理位置及土地利用

Fig. 1 Location of Beibu Gulf coastal zone in Guangxi Autonomous Region and its land use

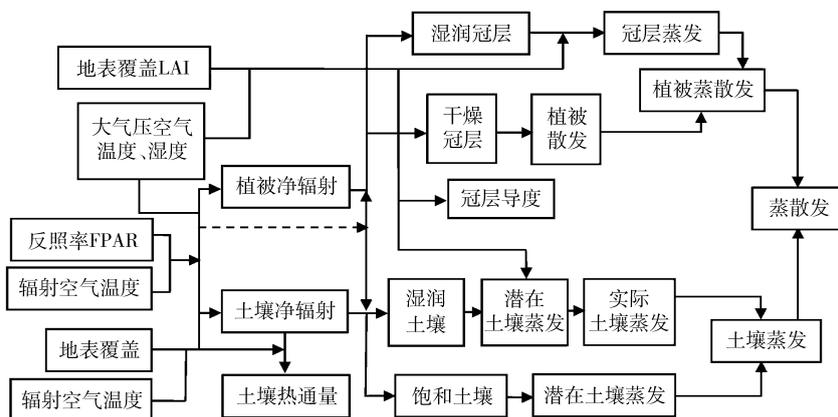


图 2 MOD16 ET 反演算法流程图<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Flow chart of MOD16 ET inversion algorithm

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 Theil - Sen 中值趋势分析与 Mann - Kendall 检验

将 Theil - Sen 中值趋势方法与 Mann - Kendall 检验方法使用到 ET 时间序列的分析当中,可以解释蒸散量 ET 长期变化的显著趋势。

Theil - Sen 趋势度( $\rho$ )计算公式为<sup>[25]</sup>

$$\rho = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad (1 < i < j < n) \quad (1)$$

式中  $x_j, x_i$ ——ET 时间序列  $i, j$ ——年份

当 $\rho < 0$ 时,表示时间序列 ET 成下降趋势,当 $\rho > 0$ 时,表示时间序列呈上升趋势,通过 Mann - Kendall 方法进行显著性检验。

Mann - Kendall 检验(MK 检验)是在气象学和水文学中比较常用的时间序列趋势检验方法之

—<sup>[26]</sup>。MK 检验能够剔除少数异常值,样本不需要遵从一定的分布,适用于非正态分布的数据。

Mann - Kendall 检验的计算公式为

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1 & (s > 0) \\ 0 & (s = 0) \\ -1 & (s < 0) \end{cases} \quad (3)$$

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

其中  $s = x_j - x_i$

式中  $Q$ ——检验统计量

$Z$ ——标准化后的检验统计量

$n$ ——样本数

当  $n > 8$  时,  $Q$  近似为正态分布,其均值和方差计算公式为

$$E(Q) = 0 \quad (5)$$

$$\text{Var}(Q) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \quad (6)$$

标准化后  $Z$  为标准正态分布,若  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ , 表示存在明显趋势变化。 $Z_{1-\alpha/2}$  为标准正态分布表在置信度水平  $\alpha$  下对应的值。本文中置信度水平  $\alpha$  为 0.05, 自由度为  $14 - 2 = 12$ 。根据研究区 14 年 ET 年均值数据,基于 Theil - Sen 中值趋势和 Mann - Kendall 检验的分析原理,借助于 Matlab 软件编程实现 ET 的逐象元栅格计算。

### 1.3.2 R/S 分析与 Hurst 指数

重新标度极差分析法 (Rescaled range analysis method, R/S 分析方法)<sup>[27]</sup> 最早是由 Hurst 在总结尼

罗河的多年水文观测资料时提出的一种分析方法,后来经过 Mandelbrot 和 Wallis 进一步补充和完善,将其发展成一种研究时间序列的分析理论,目前已在水文学、经济学、气候学、地质等领域广泛应用。

比值  $R/S \cong R(\tau)/S(\tau)$ , 若存在  $R/S \propto \tau^H$  则说明时间序列  $\{\xi(t)\}$  存在 Hurst 现象,  $H$  称为 Hurst 指数。在双对数坐标系中 ( $\ln \tau, \ln R/S$ ) 中用最小二乘法拟合式得到。不同的 Hurst 指数  $H$  的取值范围为  $0 < H < 1$ , 可以判断该时间序列是完全随机的或者存在趋势性成分,而趋势性成分表现为持续性,或者是反持续性,  $H$  一般存在以下几种情况:

(1) 若  $0.5 < H < 1$ , 表明蒸散量 ET 时间序列具有长期相关特征,过程具有持续性。

(2) 若  $H = 0.5$ , 表明蒸散量 ET 时间序列为互相独立的随机序列。

(3) 若  $0 < H < 0.5$ , 表明蒸散量 ET 时间序列数据具有反持续性,过去变量与未来趋势呈负相关,序列有突变跳跃特性。 $H$  值越接近 0, 其反持续性越强;越接近 1, 其持续性越强。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸散量精度评价

由图 3a 可知,气象站点尺度蒸散量的插值结果介于 682.73 ~ 1299.40 mm/a, 空间分布上呈现出海岸带西岸明显高于海岸带东岸的空间分布格局,这与北部湾海岸带遥感蒸散量反演空间分布格局及其结果基本吻合。由图 3b 可知,北部湾海岸带遥感反演 ET 与气象插值 ET 结果变化过程基本相似,但是站点尺度上蒸散插值结果明显低于遥感反演插值结果。为了明晰二者之间的关系,对遥感反演 ET 和气象插值结果随机抽取 50 个离散点,做出二者之间的散点图并进行相关性分析,由图 3c 可知二者相关

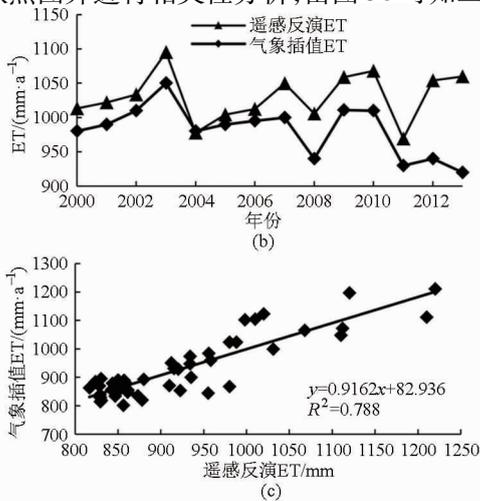
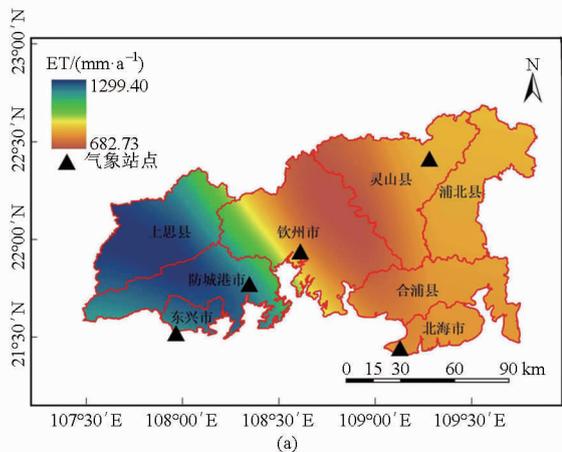


图 3 ET 站点插值结果与精度评价

Fig. 3 Interpolation of ET and its accuracy assessment

系数达到 0.788,说明该蒸散量遥感估算结果与气象站点插值结果相关性较高,故遥感反演 ET 精度总体上可以达到要求,可用于研究区的蒸散量时空动态分析。

## 2.2 蒸散量时间变化特征

### 2.2.1 蒸散量年际和月际变化特征

由图 4a 可知,2000—2013 年北部湾海岸带蒸散量介于 969.31 ~ 1 095.16 mm/a,多年平均蒸散量为 1 030.25 mm/a,高于广西桂南地区的参考作物蒸散量<sup>[24]</sup>。近 14 年来超出多年平均蒸散量的年份有 7 年,为 2002、2003、2007、2009、2010、2012、2013 年,其中 2003 年的蒸散量最高,为 1 095.16 mm/a,超出多年平均值 64.21 mm/a,而 2002 年的蒸散量超出平均值最小,仅超出平均值 2.99 mm/a,其他 5 个年份的蒸散量波动性较小;明显低于多年蒸散量的年份同样也有 7 年,为 2000、2001、2004、2005、2006、2008、2011 年,其中 2011 年的蒸散量最小,为 969.31 mm/a,低于多年平均值 60.94 mm/a,而 2001

年的蒸散量最大,为 1 021.78 mm/a,低于多年平均值 8.47 mm/a。由图 4b 可以看出多年月平均蒸散量介于 44.78 ~ 118.55 mm/a 之间,多年月平均蒸散量在年内呈现出“增加-减小-增加-减小”的 M 状,由折线图可以看出北部湾海岸带年蒸散量主要集中在 4—10 月份,其中,1 月份的蒸散量最小,仅为 44.78 mm,而 7 月份和 9 月份的蒸散量相对比较高,分别为 118.55 mm 和 118.47 mm。北部湾月蒸散量之所以呈现出 M 状,主要是由于 12 月、1 月和 2 月份北部湾地区处于冬季,气温比较低导致植被蒸散发比较小,3 月份以后,随着气温的回升,蒸散量逐渐上升,7 月和 9 月份蒸散量达到年内的最大值,加之在夏季降水量大,为该区域植被蒸散发提供了充足的条件,而 8 月份蒸散量之所以低于 7 月份和 9 月份的蒸散量,可能与 8 月份北部湾地区热带气旋天气有关,热带气旋带来大范围的降水导致植被蒸散量在 8 月份相对 7 月份和 9 月份较低,10 月份以后北部湾地区气温开始降低,因此蒸散量也随着减小。

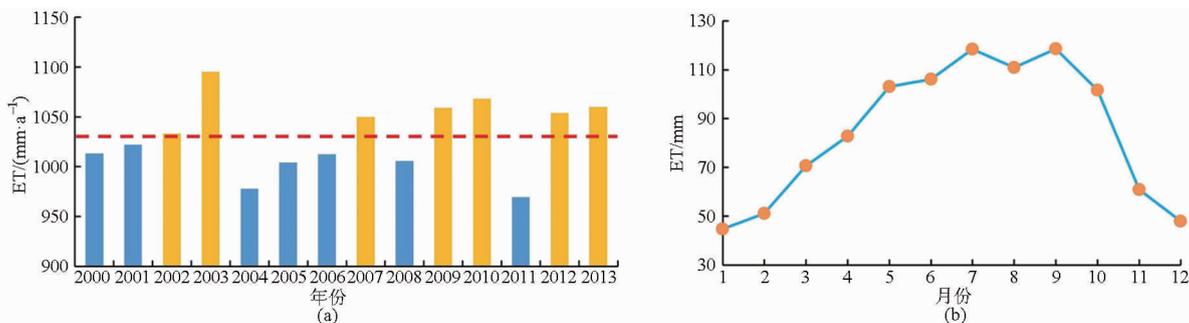


图 4 北部湾海岸带蒸散量年际和月际变化

Fig. 4 Annual and monthly variation of evapotranspiration in Beibu Gulf coastal zone

### 2.2.2 海岸带不同分区蒸散量变化趋势

为了揭示北部湾海岸带蒸散量变化趋势和过程,利用线性回归方法对北部湾每年平均 ET 进行一元线性回归分析。由图 5a 可知:2000—2013 年北部湾海岸带蒸散量呈现出在波动中增加的趋势,增速为 1.41 mm/a,通过了显著性水平为 0.01 的检验。根据北部湾海岸带陆海过渡性质以及地貌特征,将研究区划分为 3 个区域,依次为丘陵地区(包括灵山县、浦北县和上思县)、海岸东岸地区(包括合浦县和北海市)和海岸西岸地区(包括钦州市、防城港市和东兴市)。以这 3 个区域空间掩膜范围为基准,借助 GIS 中的区域统计功能对北部湾海岸带 2000—2013 年不同区域的蒸散量进行区域统计分析。由图 5b、5c、5d 可知:北部湾海岸带 3 个区域的蒸散量在 2000—2013 年期间均呈增加趋势,3 个区域蒸散量的变化规律与全区的蒸散量变化规律基本一致,只是蒸散量在不同区域的平均增加速度不均一。具体来说,海岸东岸蒸散量快于全区,而丘陵

地区和海岸西岸地区慢于全区,其中,海岸东岸、海岸西岸和丘陵地区的蒸散量年平均增加速度分别为 3.32、1.10、1.04 mm/a。

### 2.2.3 海岸带不同县域蒸散量变化特征

为了揭示北部湾海岸带蒸散量在各个区域近 14 年的变化细节,通过 ArcGIS 10.2 的区域统计功能统计不同县域蒸散量在 14 年的变化趋势(图 6)。由图 6 可知,除北部湾海岸带西岸防城港和东兴市蒸散量呈下降趋势外,其余各个县域蒸散量均呈现出增加趋势,由于陆地地表下垫面性质不均一(直接影响因素为植被覆盖状况不均一,不同区域植被增加速率不一致)导致各个县域蒸散量在空间上的增幅分布不均一。具体来说,在蒸散量增加的县域中,合浦县蒸散量增加幅度最大,增加速率为 3.61%/a,上思县蒸散量增加幅度最小,仅为 0.66%/a;而在近 14 年蒸散量减小的县域中,东兴县蒸散量减小幅度最大,达到 1.60%/a,防城港市减小幅度最小,仅为 0.10%/a。

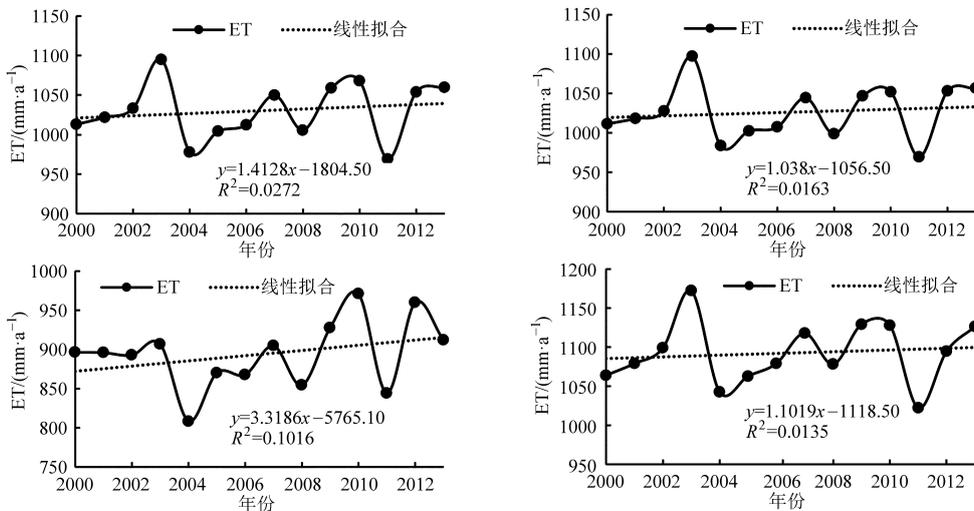


图 5 北部湾海岸带平均 ET 年变化趋势

Fig. 5 Change trend of mean ET in Beibu Gulf coastal zone

(a) 全区 (b) 丘陵地区 (c) 海岸东岸 (d) 海岸西岸

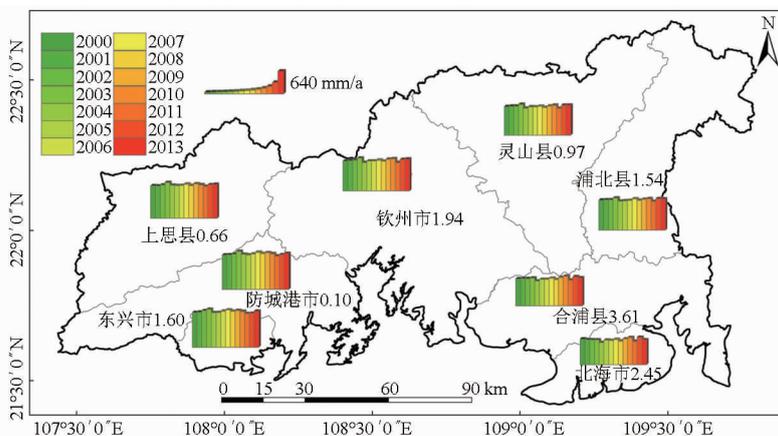


图 6 研究区各个县域 ET 年际变化情况 (%/a)

Fig. 6 Annual change of ET in each county in study area

### 2.3 蒸散量空间变化特征

#### 2.3.1 蒸散量四季变化特征

受太阳辐射、温度、降水、空气湿度、植被、季风以及地形地貌等因素的影响,北部湾海岸带蒸散量的季节分布状况如图 7 所示。由图 7 北部湾四季蒸散量可以看出,不同季节北部湾海岸带蒸散量的空间分布差异明显,四季平均蒸散量的大小排序为:夏季(6—8 月, 111.88 mm) > 秋季(9—11 月, 93.45 mm) > 春季(3—5 月, 85.57 mm) > 冬季(12—2 月, 47.98 mm)。具体来说,春季北部湾海岸带地区蒸散量介于 46.06 ~ 118.95 mm 之间,春季随着气温的回升,北部湾地区水稻进入秧苗、返青阶段,此时作物需水量逐渐增大,位于海岸带西岸的防城港市和东兴市北部地区由于地处十万大山的南麓,该地区的蒸散量在春季期间达到最大值,平均蒸散量在 101 ~ 120 mm 之间,其次浦北县的中部至南部地区蒸散量也处于 101 ~ 120 mm 之间,究其原因与浦北县的植被覆盖度比较高有关;夏季为北部湾

地区的雨量充沛季节,气温随之升高、太阳辐射比较强烈,这为地表蒸散提供了充分的条件,加之夏季水稻由拔节、抽穗到成熟期,水稻等农作物平均蒸散量达到最大值,此外,十万大山以及六万大山地区由于浓密的原始森林造成夏季植被蒸散量也比较大。夏季蒸散量介于 60.78 ~ 111.88 mm 之间,蒸散量大于 161 mm 的区域主要分布在东兴市与防城港市的交界地带、防城港市的西部以及钦州市的西北部也有零星散布,蒸散量在 141 ~ 160 mm 之间的区域则主要分布在防城港市;进入 9 月份后,北部湾地区气温逐渐降低,地表蒸散量整体处于减小趋势,局部地区出现小的波动,其值介于 43.07 ~ 166.12 mm,具体来说,北部湾海岸带西岸的十万大山地带的局部地区的蒸散量甚至超过 161 mm,最高达到 166.12 mm,这与该地区处于亚热带向热带过渡性质的海洋季风气候特点有关;冬季北部湾海岸带各个地区蒸散量达到全年的最小值,其值介于 31.95 ~ 47.98 mm 之间,蒸散量受海拔的控制作用比较明显,其中北海市和合

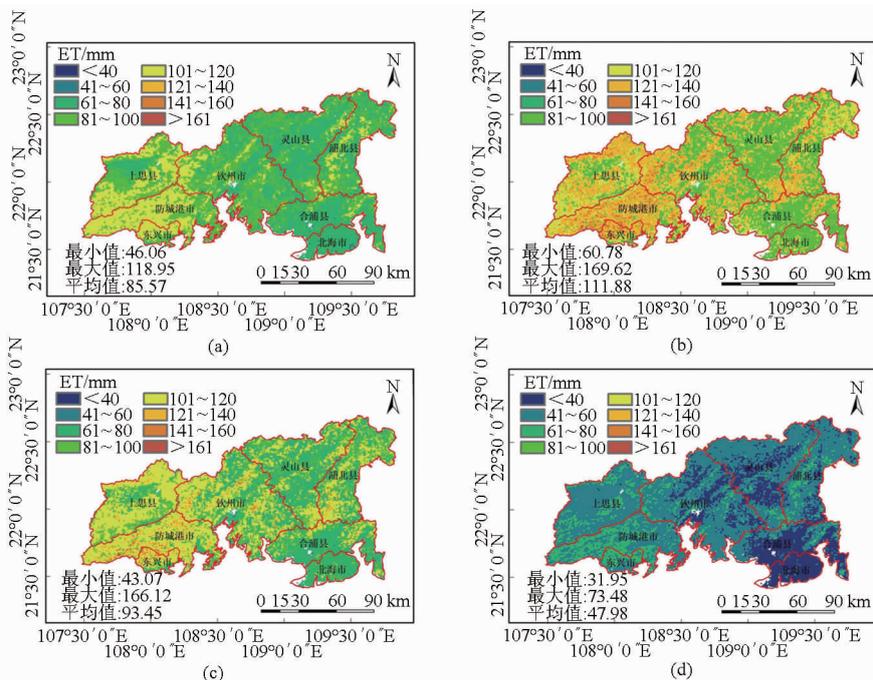


图7 研究区春、夏、秋、冬季蒸散量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of ET in spring, summer, autumn and winter in study area

(a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季

浦县南部由于海拔较低,蒸散量处于最低值,平均蒸散量小于 40 mm,而海拔较高的十万大山一带,蒸散量则大部分处于 61 ~ 80 mm 之间。总体而言,一年之内各个季节蒸散量的大小排序为:夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,多年季节蒸散量的均值分别占年内蒸散量的 33.01%、27.58%、25.25%、14.16%。

### 2.3.2 蒸散量年均值分布特征及其波动性

受地形地貌、太阳辐射、大气湿度等气象因子空间格局的共同影响,北部湾海岸带蒸散量均值表现出明显的区域性差异。由图 8a 可知:海岸带西岸多年年均蒸散量高于海岸带东岸,受山体与地形地貌双重影响,位于上思县与防城港市的十万大山地带是研究区蒸散量的高值分布区域(深蓝色区域),这是由该区域植被覆盖度高、年蒸散量大决定的,ET 多年均值介于 1 200 ~ 1 400 mm 之间,位于浦北县与灵山县的六万大山地区的蒸散量也达到 1 200 mm 以上,局部地区如防城港市的北部以及东兴市的西北部年蒸散量甚至高达 1 400 mm 以上,而位于钦州市的大部分地区以及上思县的大部分地区年蒸散量次之,其值为 1 000 ~ 1 200 mm,而灵山县以及合浦县的大部分地区蒸散量处于 800 ~ 1 000 mm 之间。由于北海市和合浦县受到人类活动(旅游景区开发和南流江三角洲生态环境退化)的影响比较剧烈,因此 ET 年均值处于区内最小值,在 600 ~ 800 mm 之间,局部地区甚至小于 600 mm。总的来说,多年蒸散量的分布规律为沿着东北—西南中心线呈现出

海岸带西岸多年年均蒸散量高于海岸带东岸,东南地带多年平均蒸散量达到全年最小值的趋势。

蒸散量的空间波动性可用变异系数  $C_V$  来度量,它反映了年均蒸散量在 14 年内的空间波动幅度。由图 8b 可知:研究区蒸散量的变异系数比较大,其值介于 0.02 ~ 0.39。北部湾海岸带蒸散量的空间分布特征为:①高波动性区域(深蓝色)主要分布于北海市和南流江河口三角洲、钦州市的中南部,合浦县的东北部以及合浦、钦州与灵山的交错地带,其中合浦县西南部的南流江三角洲蒸散量变异系数最高,说明该区域 ET 的年内波动性比较大,区域内蒸散量的分布受到人类活动的影响比较大。②低波动性区域(棕色)主要分布于上思县、防城港市与浦北县的东北部,其中浦北县的东北部蒸散量达到区内的最低值,说明该区域蒸散量的多年分布呈现出较稳定状态。③中度(浅绿色)波动性的 ET 主要分布在灵山县,其次,浦北县的中南部合浦县的中部地区也呈现出中度稳定性。综上:研究区 ET 的年内分布呈现出明显的空间分布特征,海岸带中部以及东南部蒸散量处于高波动状态,而海岸带西岸和西北部处于低波动状态,其中合浦县的南流江三角洲蒸散量的波动性最大。因此,未来应该对该区域的植被及其生态环境进行重点保护与规划。

### 2.3.3 蒸散量空间变化趋势及显著性检验

为了从整体上把握北部湾海岸带蒸散量增加和减小的规模以及蒸散量在 14 年内的动态变化趋势,

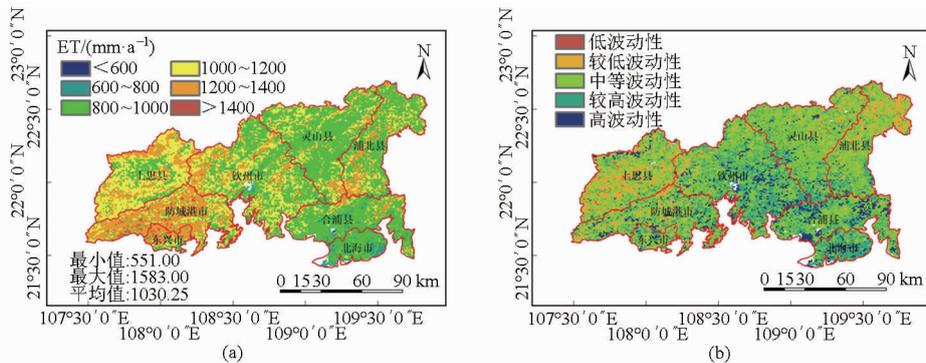


图 8 研究区 ET 平均值及标准差空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of average ET and its standard deviation in study area

(a) 平均值 (b) 标准差

基于 Theil - Sen 中值趋势分析和 Mann - Kendall 检验方法,借助于 Matlab 2013a 软件进行年蒸散量逐象元进行编程并绘制研究区象元尺度上的 ET\_sen 分布图,将 ET\_sen 趋势分布图进行 Mann - Kendall 检验,检验后蒸散量依次划分为显著减小、轻微减小、轻微增加和明显增加 4 类。

由表 1 和图 9 可知:北部湾海岸带蒸散量在空间上呈现出减小的趋势,其中 ET 显著减小的区域所占的比重为 20.52%,轻微减小区域占 36.53%,轻微增加的区域占 35.29%,明显增加的区域所占的比重最小,仅为 7.66%。由图 9a 和图 9b 可知,ET\_sen 趋势度介于 -50.93 ~ 51.76 mm/a 之间。蒸散量 ET 明显增加的区域主要集中在防城港和东兴市的交界地带、合浦县与灵山县的交错地

带以及合浦县的东北部地区;海岸带蒸散量轻微增加的区域主要分布于十万大山一带、上思县、浦北县以及钦州市的西北部地区;蒸散量轻微减小的区域主要集中在灵山县境内、浦北县和合浦县的中南部地区;显著减小的区域主要集中在钦江流域、钦州市的市区周边以及合浦县南流江流域的河口三角洲地带。

表 1 蒸散量变化趋势

Tab. 1 Change trend of ET in study area

$\rho$	Z	类型	面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%
$\rho < 0$	$ Z  > 1.96$	显著减小	3 983	20.52
$\rho < 0$	$ Z  \leq 1.96$	轻微减小	7 092	36.53
$\rho \geq 0$	$ Z  \leq 1.96$	轻微增加	6 851	35.29
$\rho > 0$	$ Z  > 1.96$	明显增加	1 487	7.66

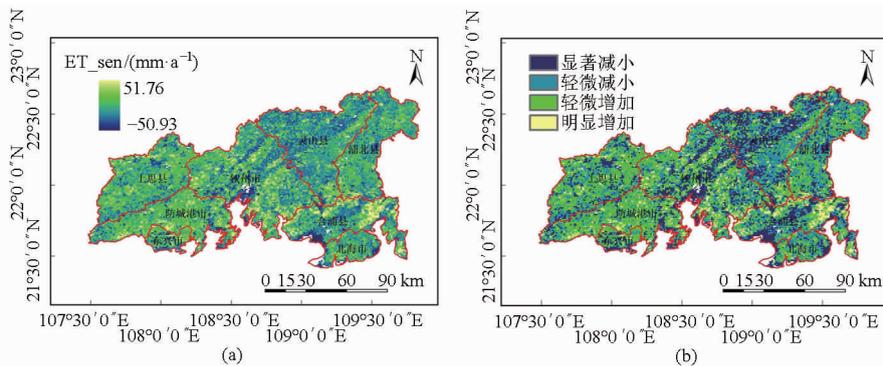


图 9 研究区蒸散量空间变化趋势及显著性检验

Fig. 9 Spatial distribution of ET\_sen and its Mann - Kendall test in study area

(a) ET\_sen 变化趋势 (b) 显著性检验

## 2.4 蒸散量未来变化趋势

根据北部湾海岸带近 14 年的 ET 蒸散量栅格图,基于 R/S 理论的分析原理,借助于 Matlab 软件,参照文献[22,27]所示公式进行编程以实现 Hurst 指数的逐象元空间计算,得到 Hurst 指数的空间分布图(图 10a),将 Hurst 指数分布情况按照 GIS 中的自然间断法进行分类,可以获得 Hurst 指数空间分级图(图 10b)以及 Hurst 指数正态分布图(图 11)。

由图 10a 可知北部湾海岸带蒸散量 Hurst 指数的范围为 0.25 ~ 0.93,平均值为 0.68,蒸散量反持续的序列仅占到研究区 ET 比重的 7.58%,持续性序列占到研究区 ET 比重的 92.42%(图 11)。从图 11b 中也可直观看出强反持续性、弱反持续性、弱持续性和强持续性的比重分别为 3.44%、4.14%、66.40% 和 26.02%。Hurst 指数正态分布图的空间分布形态呈现单峰右偏分布,即 ET 均值持续性趋势远远

大于反持续性趋势,说明研究区 ET 总体的变化趋势处于持续性的趋势。从蒸散量 Hurst 指数空间分布情况(图 10b)可知,海岸带 Hurst 指数分布的总

体趋势为:强持续性和弱持续性呈现集中连片分布态势、而强反持续与弱反持续性零星散布、海岸西岸持续性序列大于海岸东岸。

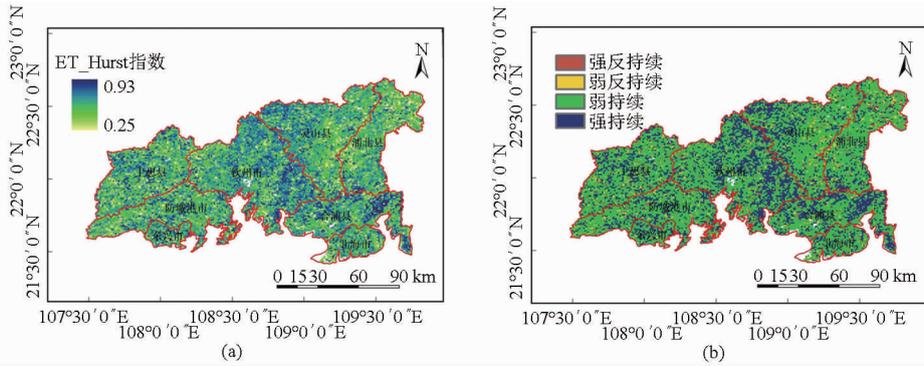


图 10 Hurst 指数和 ET 持续性特征

Fig. 10 Hurst and sustainability of inter-annual ET in study area

(a) Hurst 指数 (b) ET 持续性特征

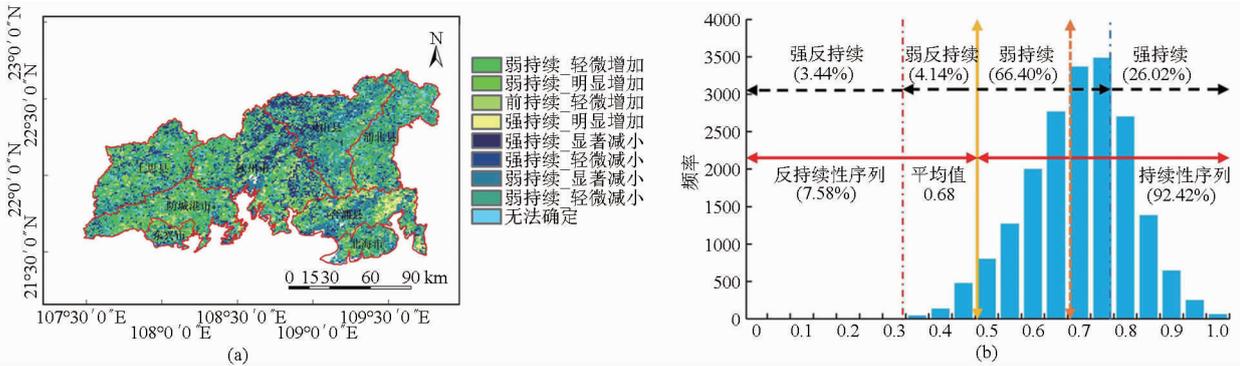


图 11 Hurst + sen 指数空间分布及指数正态分布图

Fig. 11 Spatial structure of Hurst + sen index and normal distribution plot of Hurst index

(a) Hurst + sen 指数空间分布 (b) Hurst 正态分布图

为了更加明确北部湾海岸带的蒸散量 ET 的变化趋势及其可持续性,将 ET\_sen + MK 检验值与 Hurst 指数分级结果空间叠置分析,可以获得海岸带蒸散量增加与减少趋势及其与可持续性的耦合结果(图 11a)。具体可细分为“强持续\_显著减小”、“强持续\_轻微减小”、“弱持续\_显著减小”、“弱持续\_轻微减小”、“弱持续\_轻微增加”、“弱持续\_明显增加”、“弱持续\_轻微增加”、“强持续\_明显增加”和

“未来变化趋势无法确定”9 大类。由图 11b 和表 2 可知:在空间上,研究区未来地表蒸散量持续性减小的序列所占的比重(53.38%)高于持续性增加的比重(39.03%)。其中强持续性减小的组合所占面积比重为 13.05%,主要分布于钦州市的钦江流域、钦州市的西北部和东南部、灵山县的西北部,其次,合浦县的西南部也有零星分布;弱持续性减小的组合所占的面积比重最大,为 40.33%,主要分布于灵山

表 2 蒸散量 ET 趋势以及 Hurst 指数统计特征

Tab. 2 Statistical result of ET trends and Hurst index

$\rho$	Z	H	类型	面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%
$\rho < 0$	$ Z  > 1.96$	$> 0.75$	强持续_显著减小	1 106.00	5.70
$\rho < 0$	$ Z  \leq 1.96$	$> 0.75$	强持续_轻微减小	1 427.00	7.35
$\rho < 0$	$ Z  \leq 1.96$	$0.5 < H < 0.75$	弱持续_显著减小	2 753.00	14.18
$\rho < 0$	$ Z  > 1.96$	$0.5 < H < 0.75$	弱持续_轻微减小	5 077.00	26.15
$\rho > 0$	$ Z  \leq 1.96$	$0.5 < H < 0.75$	弱持续_轻微增加	4 506.00	23.21
$\rho > 0$	$ Z  > 1.96$	$0.5 < H < 0.75$	弱持续_明显增加	554.00	2.85
$\rho > 0$	$ Z  > 1.96$	$> 0.75$	强持续_轻微增加	1 648.00	8.49
$\rho > 0$	$ Z  \leq 1.96$	$> 0.75$	强持续_明显增加	870.00	4.48
		$< 0.5$	未来变化无法确定	1 472.00	7.58

县、钦州市的南部,另外,合浦县南流江流域中心地带也有大范围分布;弱持续性增加的组合所占的面积比重为 26.06%,主要分布于研究区的西北上思县、钦州市的西北部 and 浦北县;强持续性增加的组合所占的面积比重最小,仅为 12.97%,主要分布于十万大山的南麓地带、浦北—灵山—合浦交错地带,其次,合浦县的东北部也呈现出片状分布状态。

## 2.5 不同植被类型蒸散量变化特征

不同植被类型由于其本身的生理生态特点、所处、区域降水和气温等气象因子以及地形地貌差异不一样,导致其蒸散量及其频率分布特征呈现不同的变化特征。为了揭示北部湾海岸带不同植被覆被类型蒸散特征,利用 GIS 中的区域统计功能,分别提取不同植被覆被类型的年均蒸散量变化特征。由图 12a 可知,不同植被类型的平均蒸散量存在显著差异,北部湾海岸带蒸散量与不同植被类型的关系比较紧密,总体上林地的蒸散量大,而其他地类蒸散

量小。具体来说,阔叶林、混交林和针叶林的蒸散量均值处于较高水平,分别达到 1 153.07、1 151.21、1 110.63 mm,远远超过其他植被类型的蒸散量,究其原因这是由于北部湾地区分布的十万大山和六万大山这些特殊的地貌单元为森林植被的生长提供了充足的条件,该地区的森林大部分是原始森林,土壤水分比较充沛,气候湿润,故而森林植被的蒸散量比较高;其次草地和灌木林的蒸散量也比较高,这也与广西北部湾小山丘陵地区特殊的地貌单元有关;农田的蒸散量相对较低,为 941.43 mm,而湿地的蒸散量在北部湾海岸带处于最低值,仅为 869.78 mm。图 12b 为 2000—2013 年北部湾地区各种植被类型的月平均蒸散量变化特征,总体上说,不同植被类型月蒸散量的变化过程曲线基本较一致,只是不同植被类型的月际蒸散量在年内的变幅不一致,主要差异则出现在 5—10 月份不同植被类型的分布特征不尽相同。

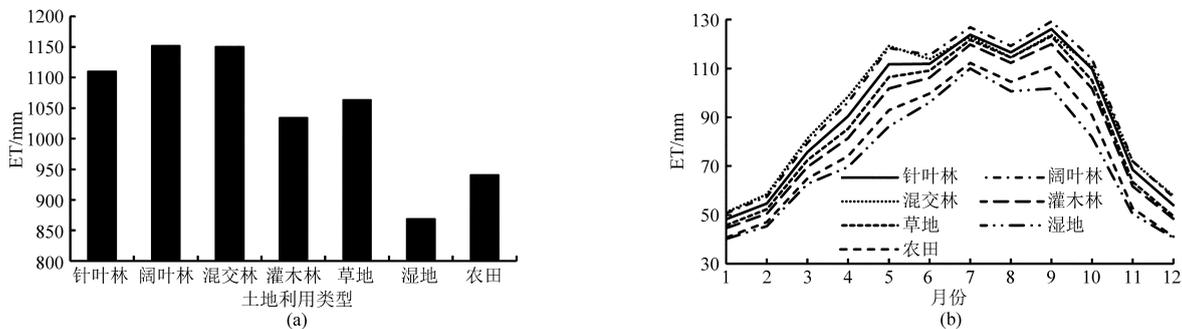


图 12 研究区不同植被类型 ET 年内变化以及月内变化

Fig. 12 Annual and monthly variation of ET among different vegetation types in study area

(a) 不同植被类型 ET 年内变化 (b) 不同植被类型 ET 月内变化

## 3 讨论

蒸散量 ET 作为生态水文学中较难估计的参数,很大程度上受土壤、植被和大气界面诸多过程的影响,影响蒸散量的变量因素较多,其中一些变量非常复杂,至今未被完全认识<sup>[28]</sup>。该研究利用遥感技术进行北部湾地区大面积的蒸散量监测与评估具有一定的优势,打破了传统方法主要基于气象学中的“点”尺度、样地尺度或景观尺度上所进行的蒸散观测,如以往广西地区的蒸散量<sup>[24]</sup>估算也是在气象站点尺度上进行估算的。利用 MODIS 卫星数据所反演的 MOD16 ET 蒸散产品相对于 AVHRR 等具有较高的空间分辨率和时间分辨率,因此在以后进行区域蒸散量研究时可以借助于该数据进行区域蒸散量的时空动态变化特征研究,尤其是对于气象站点比较少的地区(如中国西北地区、青藏高原地区等),利用传统的 Penman - Monteith 公式就略显不足,由于气象站点比较少,基

于气象站点估算出来的蒸散量再进行空间插值,其结果存在一定的误差。

由于陆面蒸散过程的复杂性,区域尺度上遥感蒸散模拟结果还存在着一定的不确定性。周蕾等<sup>[29]</sup>利用 BEPS 模型估算中国 1991—2000 年的年均蒸散量为 442.55 mm, Yao 等<sup>[30]</sup>利用改进的 Priestley - Taylor 模型计算中国 2000—2010 年的年均蒸散量为 364.9 mm,都低于本文研究结果,这可能与研究时段,研究区域以及遥感反演模型有关。另外,即使是选用相同的模型对相同区域的蒸散量进行估算,由于相关假设的不同以及控制因子的敏感性,导致模型模拟结果也具有一定的差异。该研究结果与已经发表的研究成果对比具有一致性也有矛盾性。该研究在对北部湾区域蒸散量进行未来变化趋势分析时,得出结果为北部湾地区未来蒸散量处于持续性减小趋势,这与关保多等<sup>[24]</sup>关于广西蒸散量的未来变化趋势一致,同时也与高歌等<sup>[31]</sup>关于 1956—2000 年珠江流

域蒸散发呈下降趋势研究结果一致。但是应该注意到,该研究估算区域蒸散量的平均值高于广西桂南地区蒸散量<sup>[24]</sup>和珠江流域的蒸散量<sup>[32]</sup>,这与计算尺度的差异有一定的关系,计算尺度包括时间尺度和空间尺度,因此蒸散量的平均结果不仅与研究的时段有关系,而且与研究的区域以及所处的气候区有一定的关系。

虽然本文借助一系列数理统计方法如相关分析、Theil-Sen 趋势和 MK 检验等方法对北部湾海岸带 2000—2013 年的蒸散量进行了时空动态分析,而后对北部湾蒸散量未来变化趋势进行了分析,选用的时间尺度为 14 年,虽然该尺度明显短于关保多等<sup>[24]</sup> 估估算广西蒸散量变化趋势的时间尺度(1957—2011)。但是,不同学者在运用 Hurst 指数进行不同指数未来持续性变化分析时,所选用的时间跨度以 10~12 年的尺度偏多,如张翀等<sup>[33]</sup> 和李双双等<sup>[34]</sup> 以 10 年为时间尺度运用 Hurst 指数分别对黄土高原和陕甘宁地区的植被未来变化趋势进行了分析,而刘宪锋等<sup>[35]</sup> 以 12 年为时间尺度运用 Hurst 指数对三江源的植被未来变化趋势进行了分析。该研究运用 Hurst 指数方法对北部湾近 14 年的蒸散量进行 Hurst 指数未来变化趋势分析,虽然尺度较短,但是其分析结果可信。对于区域蒸散量的影响因子方面,应该注意到影响蒸散量变化的原因中气温、降水、太阳辐射、空气湿度、风速等自然因素对蒸散量空间分布的影响也是尤为重要的。因此这些自然因素的空间分布格局势必影响到研究区蒸散量的空间结构与布局,这方面的研究该文尚未涉及。因此,下一步研究重点将从蒸散量与气候因子之间的相关关系以及偏相关关系方面入手,找出影响蒸散量变化的主要驱动因子。

## 4 结论

(1)时间尺度上,2000—2013 年北部湾海岸带蒸散量在波动中呈现增加趋势,增速为 1.41 mm/a,通过了显著性水平为 0.01 的检验,多年蒸散量介于 969.31~1 095.16 mm/a,均值为 1 030.25 mm/a,高于广西桂南地区,海岸东岸蒸散量快于全区,而丘陵地区和海岸西岸地区慢于全区。多年月平均蒸散量在年内呈现出“增加-减小-增加-减小”的 M 状。各个季节蒸散量大小排序为:夏季>秋季>春季>冬季,多年季节蒸散量的均值分别占年内蒸散量的 33.01%、27.58%、25.25%、14.16%。

(2)空间尺度上,多年蒸散量的分布规律为自东北—西南中心线呈现出海岸带西岸年均蒸散量高于海岸带东岸,东南地带年均蒸散量达到全年最小值的趋势。由 Theil-Sen 趋势分析结果可知:ET<sub>sen</sub> 趋势度介于 -50.93~51.76 mm/a,海岸带蒸散量在空间上呈现出减小的趋势,其中 ET 显著减小的区域占 20.52%,轻微减小区域占 36.53%,轻微增加区域占 35.29%,而明显增加区域占 7.66%。

(3)空间波动性上,海岸带蒸散量的变异系数较大,其值介于 0.02~0.39。ET 的年内分布呈现出明显的空间分布特征,海岸带中部以及东南部蒸散量处于高波动状态,而海岸带西岸和西北部处于低波动状态,其中合浦县的南流江三角洲蒸散量的波动性最大。

(4)未来变化趋势上,海岸带蒸散量 Hurst 的范围为 0.25~0.93,平均值为 0.68,蒸散量反持续的序列仅占 7.58%,持续性序列占 92.42%,Hurst 指数正态分布图呈现单峰右偏分布,即 ET 均值持续性趋势远大于反持续性的趋势,研究区 ET 未来变化处于持续性减小的趋势。

## 参 考 文 献

- 1 陈丹,莫兴国,林忠辉,等. 基于 MODIS 数据的无定河流域蒸散模拟[J]. 地理研究,2006,25(4): 617-623.  
Chen Dan, Mo Xingguo, Lin Zhonghui, et al. Estimation of evapotranspiration over Wuding River Basin with an eco-hydrological model and MODIS data[J]. Geographical Research, 2006, 25(4): 617-623. (in Chinese)
- 2 莫兴国. 区域蒸发研究综述[J]. 水科学进展, 1996, 7(2): 180-185.  
Mo Xingguo. Review on regional evaporation[J]. Advances in Water Science, 1996, 7(2): 180-185. (in Chinese)
- 3 Burman R, Pochop L O. Evaporation, evapotranspiration and climate data[M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 1994.
- 4 Brutsaert W H. Hydrology: an introduction[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 618.
- 5 Renzullo L, Barrett D, Marks A. Multi-sensor model-data fusion for estimation of hydrologic and energy flux parameters[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1306-1319.
- 6 Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. Microclimate: the biological environment[M]. New York: Wiley&Sons, 1983.
- 7 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. 科学通报, 2010, 55(22): 2226-2234.  
Yin Yunhe, Wu Shaohong, Dai Erfu. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971—2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(22): 2226-2234. (in Chinese)
- 8 赵军, 刘春雨, 潘竟虎, 等. 基于 MODIS 数据的甘南草原区域蒸散发量时空格局分析[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 341-346.

- Zhao Jun, Liu Chunyu, Pan Jinghu, et al. Spatial and temporal distributions of evapotranspiration in Gannan grassland based on MODIS data[J]. Resources Science, 2011, 33(2): 341–346. (in Chinese)
- 9 张淑兰, 于彭涛, 王彦辉, 等. 泾河上游实际蒸散量及其各组分的估算[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 385–395.  
Zhang Shulan, Yu Pengtao, Wang Yanhui, et al. Estimation of actual evapotranspiration and its component in the upstream of Jinghe basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 385–395. (in Chinese)
- 10 闫人华, 熊黑钢, 张芳. 夏秋季绿洲-荒漠过渡带芨芨草地蒸散及能量平衡特征研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 133–145.  
Yan Renhua, Xiong Heigang, Zhang Fang. The evapotranspiration and energy budget of an *Achnatherum splendens* grassland in the oasis-desert ecotone in Xinjiang, China, during summer and autumn[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 133–145. (in Chinese)
- 11 Wang K C, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2): 1–54.
- 12 吴炳方, 邵建华. 遥感估算蒸腾蒸发量的时空尺度推演方法及应用[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 286–292.  
Wu Bingfang, Shao Jianhua. Temporal and spatial extension of evapotranspiration estimated from remote sensing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 286–292. (in Chinese)
- 13 Morn M. Combining the Penman – Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 80(24): 87–109.
- 14 Jiang L, Islam S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(17): 2773–2776.
- 15 Bastiaanssen W. A remote sensing surface energy balance algorithm for land[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212: 198–212.
- 16 Su Z. An evaluation of two methods for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and atmosphere [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(11): 1933–1951.
- 17 Kustas W P, Norman J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two source model with radiometric temperature for partial canopy cover[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94(1): 13–29.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 吴桂平, 刘元波, 赵晓松. 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.  
Wu Guiping, Liu Yuanbo, Zhao Xiaosong. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Poyang Lake Basin using MOD16 products[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 617–627. (in Chinese)
- 21 范建忠, 李登科, 高茂盛. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1536–1543.  
Fan Jianzhong, Li Dengke, Gao Maosheng. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 products[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(9): 1536–1543. (in Chinese)
- 22 田义超, 梁铭忠. 基于 SPOT – VEGETATION 的北部湾经济区植被变化特征[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(4): 465–471.  
Tian Yichao, Liang Mingzhong. Analyzing the dynamics of the vegetation cover in the Beibu Gulf economic zone by SPOT – VEGETATION data[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(4): 465–471. (in Chinese)
- 23 关小红, 华瑾. 沿海城市快速城市化进程中土地利用变化研究——以防城港沿海区域为例[J]. 广西师范学院学报: 自然科学版, 2013, 30(1): 78–83.  
Guan Xiaohong, Hua Cui. Land use change of rapidly-urbanized coastal cities in China—taking Fangchenggang coastal area of Guangxi Province as example[J]. Journal of Guangxi Teachers Education University: Natural Science Edition, 2013, 30(1): 78–83. (in Chinese)
- 24 关保多, 代俊峰, 杜君, 等. 广西多站点参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 126–128.  
Guan Baoduo, Dai Junfeng, Du Jun, et al. Temporal and spatial variability of reference crop evaporation in Guangxi Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 126–128. (in Chinese)
- 25 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.  
Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7798–7806. (in Chinese)
- 26 Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann – Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259: 254–271.
- 27 姜磊, 季民河. 中国区域能源效率发展演变趋势的 R/S 分形分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(11): 33–37.  
Jiang Lei, Ji Minhe. Evolving trend of energy efficiency in China: an R/S fractal analysis[J]. China Population Resources and Environment, 2011, 21(11): 33–37. (in Chinese)
- 28 王春梅, 孟庆岩, 占玉林, 等. 西北干旱区农田春小麦蒸散量的空间插值方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 172–179.  
Wang Chunmei, Meng Qingyan, Zhan Yulin, et al. Spatial interpolation analysis of spring wheat evapotranspiration measurements in Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 172–179. (in Chinese)

- 29 周蕾,王绍强,陈镜明,等. 1991年至2000年中国陆地生态系统蒸散时空分布特征[J]. 资源科学,2009,31(6):962-972.  
Zhou Lei, Wang Shaoqiang, Chen Jingming, et al. The spatial-temporal characteristics of evapotranspiration of China's terrestrial ecosystems during 1991—2000[J]. Resources Science,2009, 31(6):962-972. (in Chinese)
- 30 Yao Y, Liang S, Cheng J, et al. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley-Taylor algorithm[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,171-172:187-202.
- 31 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究,2006,25(3):378-387.  
Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geographical Research,2006,25(3):378-387. (in Chinese)
- 32 李修仓,姜彤,温姗姗,等. 珠江流域实际蒸散的时空变化及影响要素分析[J]. 热带气象学报,2014,30(3):483-494.  
Li Xiucang, Jiang Tong, Wen Shanshan, et al. Spatial-temporal variation of actual evapotranspiration and its impact factors in the pearl basin, China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(3):483-494. (in Chinese)
- 33 张翀,任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. 资源科学,2011,33(11):2143-2149.  
Zhang Chong, Ren Zhiyuan. Temporal and spatial differences and its trends in vegetation cover change over the Loess Plateau [J]. Resources Science, 2011, 33(11):2143-2149. (in Chinese)
- 34 李双双,延军平,万佳. 近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(7):960-970.  
Li Shuangshuang, Yan Junping, Wan Jia. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7):960-970. (in Chinese)
- 35 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.  
Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Lin Zhihui, et al. The spatial-temporal changes of vegetation coverage in the Three-River Headwater Region in recent 12 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7):897-908. (in Chinese)
- 36 苏伟,刘睿,孙中平,等. 基于SEBAL模型的农作物NPP反演[J]. 农业机械学报,2014,45(11):272-279.  
Su Wei, Liu Rui, Sun Zhongping, et al. Crop NPP inversion using surface energy balance algorithm for land model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(11):272-279. (in Chinese)

(上接第32页)

- 12 赵学伟. 粮层阻力计算公式的分析比较[J]. 粮食储藏,2001,30(2):20-24.  
Zhao Xuewei. Analysis and comparison on resistance formulas of air-flow through grain layer[J]. Grain Storage, 2001,30(2):20-24. (in Chinese)
- 13 李健民,李长友,马兴灶. 稻谷通风阻力特性试验[J]. 广东农业科学,2012(11):191-193.  
Li Jianmin, Li Changyou, Ma Xingzao. Experimental study on ventilation resistance of paddy [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012(11):191-193. (in Chinese)
- 14 王国强,郝万军. 离散单元法及其在EDEM上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- 15 DEM-Solutions. EDEM 2.4 User Guide[M]. 北京:海基科技,2012.
- 16 刘向军,石磊,徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法的研究现状[J]. 计算力学学报,2007,2(2):166-172.  
Liu Xiangjun, Shi Lei, Xu Xuchang. Activities of dense particle-gas two-phase flow modeling in Eulerian-Lagrangian approach [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 2(2):166-172. (in Chinese)
- 17 心男. 基于EDEM-Fluent耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2013.  
Xin Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM-Fluent [D]. Changchun:Jilin University, 2013. (in Chinese)
- 18 李其铎,胡天群,俞忠,等. 颗粒物(粮食)的通风阻力试验研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2006,21(4):473-478.  
Li Qitao, Hu Tianqun, Yu Zhong, et al. Experimental study of fluid drag in granary ventilation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A, 2006,21(4):473-478. (in Chinese)
- 19 周祖镠. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社,1995.
- 20 王福林,尚家杰,刘宏新,等. EDEM颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报,2013,44(2):110-114.  
Wang Fulin, Shang Jiajie, Liu Hongxin, et al. Application of EDEM particles simulation technology on seed-metering device research[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(2):110-114. (in Chinese)
- 21 LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程[S]. 2002.
- 22 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- 23 GB 5497—1985 粮食、油料检验 水分测定法[S]. 1985.
- 24 周西华,孟乐,李诚玉,等. 圆形管道风速测定与校正方法实验[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2012,31(6):801-804.  
Zhou Xihua, Meng Le, Li Chengyu, et al. Experimental study on determination and correction method of wind speed in circular pipe[J]. Journal of Liaoning Technical University:Natural Science, 2012, 31(6):801-804. (in Chinese)