

文章编号: 1674-7054(2022)04-0324-07



## 海南岛干旱的气象特征及监测指标

李伟光<sup>1,2</sup>, 张京红<sup>1,2</sup>, 刘少军<sup>2,3</sup>, 车秀芬<sup>1,2</sup>, 陈小敏<sup>1,2</sup>, 邹海平<sup>1,2</sup>

(1. 海南省气候中心, 海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203;  
3. 海南省气象科学研究所, 海口 570203)

**摘要:** 为科学制定应对干旱措施, 减轻干旱对海南生态和生产的影响, 从降水分布、干旱成因、干湿状况、水分平衡及监测指标等角度描述海南岛干旱的气象特征。结果表明, 海南岛降水时空分布不均匀: 冬春少、夏秋多, 空间上东多西少; 从干湿指数看, 11月到翌年4月气候干燥, 5月开始逐渐变湿, 8、9、10月最为湿润。地表实际蒸散发量中间山区高, 四周平原台地低。从月降水满足实际蒸散发需水量的能力来看, 海南岛的冬春季节降水充沛月比例较低, 普遍在20%以下; 南部和西部尤为严重, 监测海南岛干旱发生发展, 旱季适宜用6个月或12个月时间尺度的SPEI指数, 而雨季适宜用3个月时间尺度的SPEI指数。

**关键词:** 降水; 干旱; 湿润度; 实际蒸散发; 海南岛

**中图分类号:** S 162; S 166      **文献标志码:** A

**引用格式:** 李伟光, 张京红, 刘少军, 等. 海南岛干旱的气象特征及监测指标 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(4): 324-330. DOI: [10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.04.002](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.04.002)

海南岛地处中国最南端、南海北沿, 属热带季风性气候, 其地貌中间高、四周低, 呈环形层状分布。中部偏南的五指山、鹦哥岭等山峰最高, 四周山地、丘陵、台地、平原层层衔接, 海拔高度逐级降低。受热带季风气候和复杂地形的影响, 海南岛降水时空分布不均匀, 降水集中、强度大, 季节、年际变异大, 暴雨、干旱等气象灾害频发。在全球气候变化背景下, 大多数森林生态系统都面临着季节性的水分胁迫<sup>[1-2]</sup>。海南分布最广的热带季雨林就是受水分胁迫较重的群落类型之一。随着全球极端气候事件出现频率的改变<sup>[3-4]</sup>, 降水的年际波动幅度变大, 降水更加集中, 连续无雨日数增加, 旱季持续时间和强度均显著提高<sup>[5-6]</sup>。

干旱是最复杂的气象灾害之一, 不同地区的成因和特征不同<sup>[7]</sup>。海南岛周年气温较高, 降水时空分布不均衡, 降水成为制约生态和生产的主要

限制因子。海南岛植被丰富, 植物可周年生长, 植物气孔阻力项是影响植被蒸腾需水量的重要因素<sup>[8]</sup>, 准确估计实际蒸散发量对客观评价水分平衡、干旱发生具有重要意义。全面掌握海南岛干旱特征不仅需从降水的时空分布、降水波动等角度分析水分平衡的供给项, 还需从逐月的干燥湿润度演化<sup>[9]</sup>方面评价年内气候状况, 更需结合降水与实际蒸散发需水量判断季节、地区间水分平衡差异<sup>[8]</sup>。在干旱监测指标选择方面, 选用标准化降水蒸散指数(SPEI)<sup>[10]</sup>, 能够综合考虑时间、降水对干旱的影响, 同时发挥其时间尺度灵活、形式简单和时空可比性强等特性优势。多角度研究海南岛干旱特征、开展气象干旱监测与评估, 是科学制定应对干旱措施, 减轻干旱对区域经济社会发展负面影响的基础, 利于保障人民生活平稳, 实现区域可持续发展。本研究从降水分布、干旱成因、干湿

收稿日期: 2021-09-13

修回日期: 2022-03-25

基金项目: 海南省自然科学基金项目(421MS101); 南海气象防灾减灾重点实验室开放基金课题(SCSF202107); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J070)

第一作者: 李伟光(1981-), 男, 高级工程师. 研究方向: 气候变化及气象灾害对农业的影响. E-mail: [163great@163.com](mailto:163great@163.com)

通信作者: 陈小敏(1984-), 女, 硕士, 高级工程师. 研究方向: 农业气象灾害、农业气候资源分析. E-mail: [xiaominc2002@163.com](mailto:xiaominc2002@163.com)

状况、水分平衡及监测指标等角度描述海南岛干旱的气象特征,旨在为科学制定应对干旱措施,减轻干旱对海南生态和生产的影响,为相关决策和研究提供参考。

## 1 资料与方法

**1.1 研究资料** 本研究结合地面观测的气象数据与遥感反演的实际蒸散发量数据开展干旱特征分析。气象数据包含海南岛 18 个气象站的月平均气温、月降水量数据,时间范围为 1961—2020 年。实际蒸散发量数据是 NASA 基于 Penman-Monteith 模型算法<sup>[11-12]</sup>生成的 MOD16A2 数据集,主要使用其中的地表蒸散发量 (Evapotranspiration, ET) 产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率 8 d,时间范围为 2001—2019 年(下载网址: [http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG\\_Products/MOD16/](http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/))。

**1.2 降水等气象要素与蒸散发量数据的预处理** 首先对气象站点观测数据进行质量控制,根据站点 1—12 月缺测情况剔除缺测超 20% 以上站点资料,然后计算逐月平均气温、降水量,合成季节、年平均气温、降水量。遥感反演的月、年平均蒸散发量计算分 2 步:第 1 步计算逐月平均蒸散发量,若遇到某年某月数据缺测,则计算其余年份相应月平均蒸散发量;第 2 步将 12 个月的平均蒸散发量相加获得年平均蒸散发量。

**1.3 干湿指数的计算** 气象上常用干湿指数评价一个地区或时段的气候干湿状况。干湿指数 (Dry wet index, DWI) 采用公式 1<sup>[9]</sup> 计算。

$$DWI = \frac{P}{E_0} \quad (1)$$

式中,  $P$  为月平均降水量,单位 mm;  $E_0$  为月平均潜在蒸散发量,单位 mm,  $E_0$  采用 1998 年推荐的 FAO Penman-Menteith 公式<sup>[13]</sup> 计算。

**1.4 降水充沛月比例** 考虑到降水年际变化大,最大年降水量可能是最小值的 5 倍以上,所以在海南岛的东(琼海)、西(东方)、南(三亚)、北(海口)选择 4 个典型区域统计降水充沛月比例(降水量大于同期平均实际蒸散发量月数的比例)。

**1.5 干旱指数** 气象研究中通常采用干旱指数监测干旱事件的发生发展,发现长时间演变趋势。本研究采用 Vicente-Serrano 设计的标准化降水蒸散指数 (The Standardized Precipitation-Evapo-

transpiration Index, SPEI) 来监测海南岛干旱。

第 1 步用 Thornthwaite 法<sup>[10]</sup> 计算潜在蒸散发 PET。

第 2 步计算逐月降水与 PET 的差值。

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

第 3 步是拟合降水与 PET 差值序列的概率分布。由于逐月降水与 PET 的差值可能存在负值,所以采用了 3 个参数的 log-logistic 概率分布。log-logistic 概率分布的累积函数为:

$$F(x) = \left(1 + \frac{\alpha}{x - \gamma}\right)^{-1} \quad (3)$$

其中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  参数分别采用线性矩的方法拟合获得<sup>[10,14]</sup>。

最后,对累积概率密度进行标准化,计算 SPEI:

$$P = 1 - F(x) \quad (4)$$

$$w = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (5)$$

当  $P \leq 0.5$  时,

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (6)$$

当  $P > 0.5$  时,

$$P = 1 - P \quad (7)$$

$$SPEI = -\left(w - \frac{c_0 + c_1 + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}\right) \quad (8)$$

式中,  $c_0 = 2.515 517$ ,  $c_1 = 0.802 853$ ,  $c_2 = 0.010 328$ ,  $d_1 = 1.432 788$ ,  $d_2 = 0.189 269$ ,  $d_3 = 0.001 308$ 。

## 2 结果与分析

**2.1 海南岛降水时空分布与成因** 海南岛年均降水量 1 800 mm,是我国降水较多的区域之一。海南位于东亚季风区,受季风影响较明显,各月平均降水量呈单峰型分布(图 1)。冬季主要受东北季风影响,盛行干冷的偏北气流,气候干旱少雨,12 月至翌年 3 月降水较少,月平均降水在 50 mm 以下。春季,来自北方的冷空气势力大减,副热带高压加强北抬、西伸,与西南低压槽交替控制,天气晴好,气温上升,雨量开始增多;4 月份增至 100 mm。5 月夏季风和热带气旋开始影响后降水迅速增多,达 200 mm。夏季,主要受东南季风和来自印度洋的西南季风影响,盛行偏南暖湿气流,降水量较大;秋季热带系统仍很活跃,海南常受热带气旋正面袭击,产生强降水。8—9 月是热带气

旋影响的高峰期,雨量普遍增加到 250 mm 及以上;9 月份平均降水量最多,达到 300 mm。10 月由于热带系统的影响还在,同时北方开始有冷空气南下影响,两者共同作用使海南的降水量仍很大。一般 11 月冬季风起主导作用后雨量迅速减少,12 月到翌年 1 月达到最低值。春季雨季开始偏晚,秋季热带系统偏弱、热带气旋活动偏少,会出现春旱、秋旱。

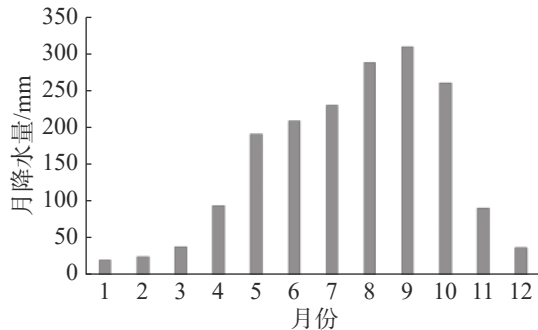


图 1 海南各月平均降水量变化

海南岛中部的五指山脉对降水空间分布影响显著,使海南岛同纬度地区降水东多西少差异悬殊。雨季东南风携带的暖湿气团沿山体迎风面爬升冷却,发生绝热降温过程,凝云致雨;在背风面回流收敛形成暖高压,发生绝热增温过程,产生干热的焚风,山体背风面雨影区干热化。来自西南孟加拉的暖湿气流经中南半岛长山山脉抬升后产生干热效应,两者叠加强化了海南岛西部的干热化,在该区域形成热带半干旱气候,孕育了脆弱的稀树草原<sup>[15-17]</sup>。此外,五指山脉阻碍台风、冷空气等天气系统,从而使某些地区降水时间加长,局地暴雨显著增加或减少。海南岛年降水量 941 ~ 2 388 mm,空间上呈环状分布,东部多于西部,山区多于平原,山区又以东南坡最多。东部多雨区 1 975 ~ 2 070 mm,多雨中心琼中年平均雨量达 2 388 mm;西部沿海地区不足 1 000 mm(东方 941 mm),仅为东部多雨区的一半(图 2)。

**2.2 海南岛干湿状况年内变化** 气象及地理上通常采用降水量与潜在蒸散发量的比值干湿指数来评价一个地区气候上的干燥湿润程度<sup>[13]</sup>。海南岛降水分布时空不均衡,为准确评价海南的干湿差异,逐月计算了干湿指数。研究发现,海南岛的气候干燥时段主要集中在 11 月到翌年 4 月(图 3)。11 月,西部的东方、昌江、乐东和三亚的大部分区

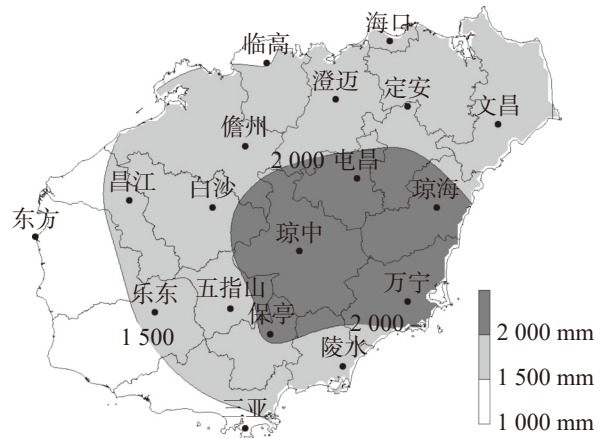


图 2 海南岛年平均降水量空间分布

域干湿指数低于 0.5,但东部干湿指数依然较高,琼中、万宁、琼海地区普遍在 1~2 之间。进入 12 月份后,海南的干燥化迅速发展,西南部区域的干湿指数迅速下降到 0.2 以下;而东部的干湿指数也降到 0.5~1,仅琼中和万宁附近部分区域依旧处于 1 以上,保持相对湿润状态。1 月份后,海南干燥区域依旧保持,并且面积有所扩大。海南岛的这种干燥状态一直持续到 3 月份,西部干湿指数维持在 0.2 以下,东部部分区域在 0.5 以上,中部和北部介于两者之间。进入 4 月份以后,伴随着降水逐渐增多,海南岛干湿指数开始迅速上升,东部、北部先后上升到 1 以上,西部干湿指数在 0.2 以下区域快速减小并消失。8、9、10 月海南岛的湿润程度达到最高。

**2.3 海南岛水分平衡变化特征** 降水与潜在蒸散发量的比值反映的是降水满足大气最大蒸发蒸腾需求的能力,但一个地区的植被是对该区域气候长期适应的结果,植物叶面上的气孔对蒸腾有巨大调节作用,实际生态需水量与潜在蒸散发有较大差异。MODIS 陆地蒸散发产品数据 (MOD16A2) 是遥感反演的实际蒸散发量产品。全球多个地区多种植被类型多种数据已经证明该产品精度较高,流域水分平衡法也证明 MOD16 模拟的海南年蒸散发量具有较高准确度,满足降水、蒸散发水分平衡分析干旱的需求<sup>[8,18]</sup>。海南岛多年平均 MOD16 蒸散发量的空间分布(图 4)与海南地形分布相似,中间山区高,四周平原台地较低。在植被覆盖度高的中部原始森林区,蒸散发量最高,年蒸散发量在 1 300 mm 以上,局部 1 500 mm 以上;四周的丘陵台地区蒸散发量稍低,为 900 ~

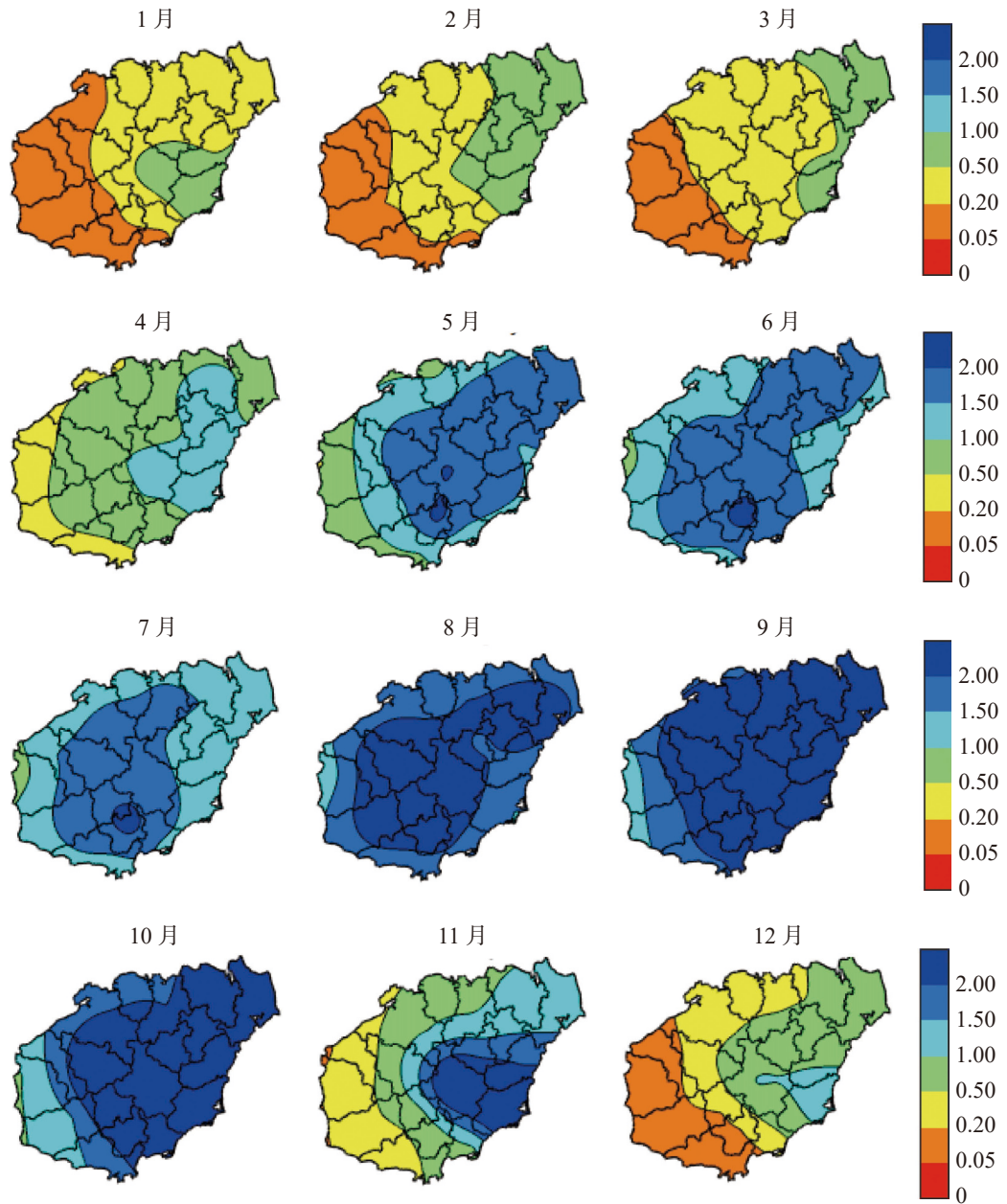


图 3 海南岛 2001—2019 年逐月干湿指数分布

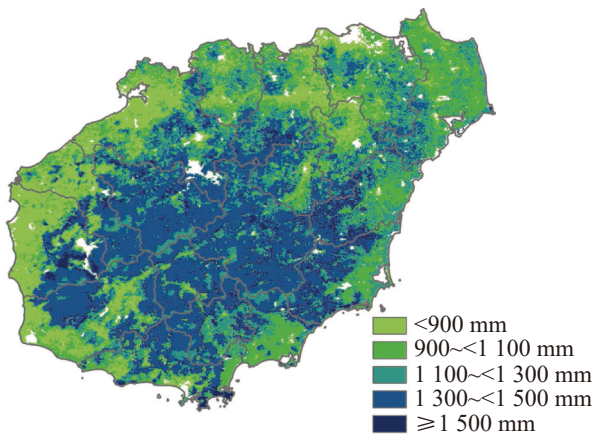


图 4 海南岛 2001—2019 年 MOD16 年蒸散发量分布图

1 100 mm; 西部植被覆盖条件稍差的区域, 年蒸散发量普遍在 900 mm 以下。从分布上来看, 蒸散发量的分布与植被的分布相似, 植被覆盖度高的区域蒸散发量大, 而植被覆盖度低的地区蒸散发量小。

降水的年际波动幅度显著大于实际蒸散发量的变化幅度。为掌握干旱事件(降水量小于实际蒸散发量)的发生频率规律, 进一步选择海南岛东(琼海)、西(东方)、南(三亚)、北(海口)4 个典型区域统计了降水充沛月(月降水量大于同期月平均蒸散发量)的比例(图 5)。海南岛的冬春季节(12 月至

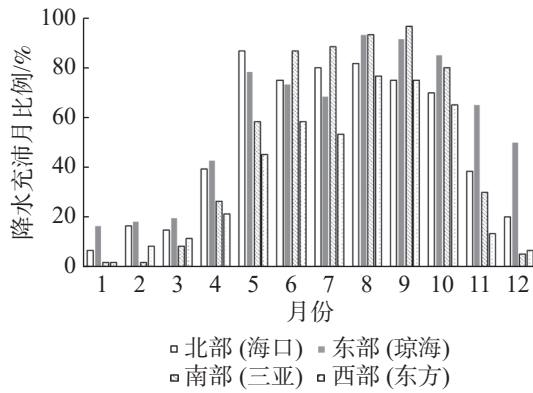


图5 海南典型区域降水充沛月份比例

翌年4月)降水充沛月比例最低,普遍在20%以下;南部和西部这种情况尤为明显。值得注意的是在2、3月份南部地区降水充沛月份比例甚至低于西部。4月份开始海南降水充沛月比例开始升高,5月份北部和东部已经进入高峰期,南部和西部大约滞后1个月。6—10月是海南岛降水充沛月比例最高的季节,北部、东部和南部地区普遍在70%以上,西部降水充沛月比例在6、7月仍偏低,8月份到达高峰。11月各地降水充沛月比例开始迅速下降,尤其是南部和西部。

**2.4 海南干旱监测指数的应用** 气象学中通常用干旱指数来监测干旱事件,SPEI指数能够反映

降水异常及温度对干旱的影响<sup>[19-20]</sup>。SPEI指数反映的是降水与潜在蒸散发差值在历史上的排位,不同时间尺度的SPEI反映不同时间长度内降水满足蒸散发的状况,既可以反映短期内土壤水分的动态变化,又可以反映长期水资源的趋势。通过分析1961—2020年海南岛不同时间尺度(3、6、12个月)的SPEI指数(图6)可以评估不同类型干旱的影响。以2004—2005年海南岛发生的全岛性特大干旱为例,说明多尺度SPEI指数在评估干旱给农业生产和经济运行带来的危害中的应用。在2004年9、10月,海南岛降水严重偏少,3个月的SPEI指数下降明显,干旱开始发生;6、12个月的SPEI指数随后也迅速下降,2005年上半年的6、12个月的SPEI指数有非常低的时段。由于海南岛冬春农业用水主要依靠水库蓄水和地下水,长时间尺度(6、12个月)的SPEI指数最能反映农业生产实际的春季旱情。多次旱情资料分析结果表明,在海南湿润的季节(5—10月),3个月的SPEI更能够反映出短期降水缺乏带来的旱灾;而在气温稍低、相对干燥的季节(11月至翌年4月),6、12个月时间尺度的SPEI值更适宜评估长期水库蓄水偏少带来的干旱危害。

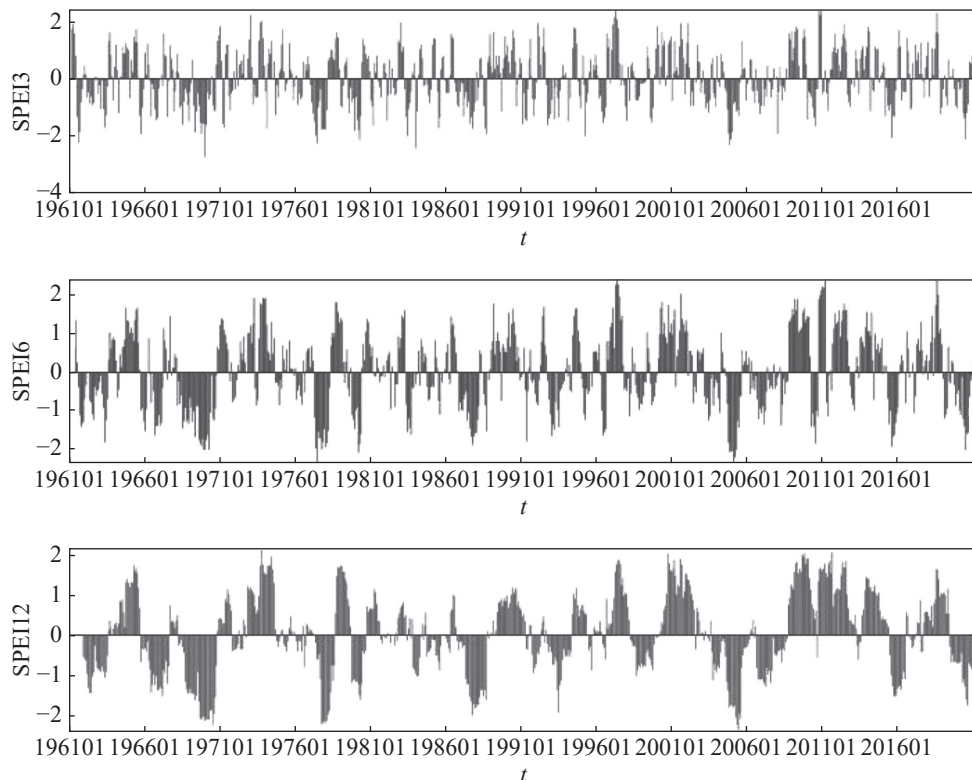


图6 1961—2020年多尺度SPEI干旱指数演化曲线

### 3 结论与讨论

海南岛位于热带季风区,季风性气候导致海南冬春季降水稀少,夏秋降水充沛。受中南部高山阻挡,海南岛东南部雨水充足、西部降水较少,降水空间分布不均匀。从气候干湿状况以及降水充沛月比例来看,海南岛11月至翌年4月气候干燥、降水满足地表蒸散发需求的能力极差,容易发生干旱;而5—10月气候湿润,降水满足蒸散发需求的比例普遍在70%以上,干旱发生的概率相对较小。在实际业务和研究中可以分别通过3、6、12个月时间尺度的SPEI指数监测雨季、旱季干旱的发生发展,评估旱灾损失。

海南岛周年平均气温较高,满足作物生长对温度的要求。虽然从全年来看海南到属于湿润区域,但受季风和地形影响,降水时空分布不均匀<sup>[21]</sup>,特别是冬夏季风转换季节,来自大陆腹地的干冷气流与来自热带海洋的暖湿空气交替侵入<sup>[22]</sup>,造成了海南岛温度与降水的不匹配,从而容易发生农业干旱。为解决季节性缺水问题,海南修建了大量水利设施<sup>[23]</sup>保障农业生产、居民生活用水;结合干旱监测与降水预报优化水库调度、合理排蓄是防洪抗旱的科学措施。

#### 参考文献:

- [1] KURSAR T, ENGELBRECHT B, BURKE A, et al. Tolerance to low leaf water status of tropical tree seedlings is related to drought performance and distribution [J]. *Functional Ecology*, 2009, 23(1): 93–102.
- [2] PHILLIPS O, ARAGAO L E, LEWIS S L, et al. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest [J]. *Science*, 2009, 323(5919): 1344–1347.
- [3] ALLEY R, MAROTZKE J, NORDHAUS W, et al. Abrupt climate change [J]. *Science*, 2003, 299(5615): 2005–2010.
- [4] THIBAUT K, BROWN J. Impact of an extreme climatic event on community assembly [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(9): 3410–3415.
- [5] MALHI Y, PHILLIPS O. Tropical forests and global atmospheric change: a synthesis [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, 2004, 359(1443): 549–555.
- [6] MALHI Y, ROBERTS J, BETTS R A, et al. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon [J]. *Science*, 2008, 319(5860): 169–172.
- [7] 李伟光, 刘少军, 侯美亭, 等. 气象与农业干旱指数研究进展[J]. *气象与环境科学*, 2021, 44(3): 76–82.
- [8] 李伟光, 刘少军, 韩静, 等. 基于遥感蒸散量的我国干旱特征研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2021, 15(3): 93–99.
- [9] 李伟光, 易雪, 车秀芬, 等. 海南岛干湿概况与干旱发生特征[J]. *气象研究与应用*, 2011, 32(S2): 53–54.
- [10] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 643–649.
- [11] MU Q, HEINSCH F, ZHAO M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data [J]. *Remote sensing of Environment*, 2007, 111: 519–536.
- [12] MU Q, ZHAO M, RUNNING S. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1781–1800.
- [13] 毛飞, 廖要明, 孙涵, 等. 干湿气候等级: GB/T 34307—2017 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会, 2017.
- [14] 李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(4): 84–90.
- [15] 廖继武, 周永章. 海南西部干旱的地理边缘解析[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 25(1): 104–108.
- [16] 李森, 刘贤万, 孙武. 雨影区对海南岛西部土地沙漠化影响的风洞实验研究[J]. *中国沙漠*, 2006(2): 165–171.
- [17] 李森, 孙武, 李凡, 等. 海南岛西部热带沙漠化土地特征与成因[J]. *地理学报*, 2005(3): 433–444.
- [18] 李伟光, 易雪, 蔡大鑫, 等. 基于MOD16蒸散量的海南岛干旱特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(5): 176–183.
- [19] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 178–182.
- [20] 张亚杰, 陈升宇, 吴胜安, 等. 基于综合气象干旱指数的海南岛干旱特征分析[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(1): 41–50.
- [21] 张春花, 吴胜安. 高温对海南岛西南部干旱影响研究[J]. *气象科技进展*, 2020, 10(4): 96–101.
- [22] 张春花, 董立就, 吴俞, 等. 海南岛中部山地地形对天气气候的影响[J]. *气象科技进展*, 2020, 10(4): 70–73.
- [23] 卢裕景, 宋炫颖, 张仁东, 等. 海南省水利基础设施空间布局规划关键问题探讨[J]. *水利规划与设计*, 2022(1): 20–22.

## Meteorological characteristics and monitoring index of drought in Hainan Island

LI Weiguang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinghong<sup>1,2</sup>, LIU Shaojun<sup>2,3</sup>, CHE Xiufen<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaomin<sup>1,2</sup>, ZOU Haiping<sup>1,2</sup>

(1. Climate Center of Hainan Province, Haikou, Hainan 570203; 2. Hainan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation in the South China Sea, Haikou, Hainan 570203; 3. Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou, Hainan 570203, China)

**Abstract:** Drought is one of the main meteorological disasters affecting ecology and production in Hainan. The meteorological drought in Hainan Island was analyzed from the perspectives of precipitation distribution, drought causes, dry and wet conditions, water balance and drought monitoring index, in order to provide a reference for relevant decision-making and research. Hainan Island is located on the north edge of the South China Sea. Affected by the tropical monsoon climate and topography, the temporal and spatial distribution of precipitation is uneven. Hainan Island has low precipitation in winter and spring, high in summer and autumn, and spatially higher in the east part than in the west part. From the dry-wet indices, it can be seen that Hainan Island is dry from November to April, and gradually becomes wet since May, and wettest in August, September and October. The actual evapotranspiration of the surface is high in the central mountain area and low in the surrounding plains and terraces. The months with the ratio of abundant precipitation to evapotranspiration are very few in winter and spring (December to April), generally below 20 %. It is particularly seriously dry in the south and west of Hainan Island. The Standardize Precipitation Evapotranspiration index (SPEI) is calculated for different timescales to determine the drought in Hainan. It is found that SPEI for a 6 or 12-months timescale in the dry season and for a 3-months timescale in the wet season can be used to determine the drought in Hainan Island to monitor the occurrence and development of drought in the Island.

**Keywords:** precipitation; drought; humidity; actual evapotranspiration; Hainan Island

(责任编辑:罗启香 责任编辑:钟云芳)