

文章编号: 1674-7054(2022)02-0166-11



海南岛森林植被 NEP 季节性时空变化 规律及气候驱动因素分析

刘应帅¹, 余 瑞¹, 郑彬彬¹, 刘嘉慧¹, 宋 奇¹, 陈荣昊¹, 严 哲²

(1. 海南大学生态与环境学院, 海口 570228; 2. 海南集思勘测规划设计有限公司, 海口 570203)

摘要: 为了探究海南岛森林净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)的时空变化以及与气候、地形等因素的关联, 本研究利用时间序列分析方法以及一元线性回归方法描述了近 20 年来不同季节 NEP 的时空变化特征, 并基于增强回归树(Boosted Regression Trees, BRT)分析气候因子和地形因子的贡献度。结果表明: (1)海南岛森林 NEP 表现出明显的季节性变化, 整体来看近 20 年 NEP 呈现不显著的下降趋势, 有机碳的变化率为 $-0.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ ($P > 0.05$); 海南岛森林在年际、干季、湿季 3 个时间尺度上均为碳汇状态, 并且湿季的碳汇强度高于干季; 空间上, 年际 NEP 和湿季 NEP 呈显著增长趋势集中在海南岛东北部, 呈显著下降趋势集中在海南岛中西部; (2)BRT 的结果显示了海拔对于 NEP 的贡献度分别为年际(45.46%), 干季(40.58%), 湿季(21.88%); (3)通过趋势相关性与多元线性回归分析, 发现 NEP 与降雨有显著趋势相关性。海南岛低海拔森林 NEP 受温度和降水的影响。在干季时, 降雨对海南岛低海拔森林 NEP 有显著的负向贡献, 贡献度为 -53% ($P < 0.05$); 在湿季时, 温度对海南岛低海拔森林 NEP 有显著的正向贡献, 贡献度为 90% ($P < 0.05$)。

关键词: 热带森林; NEP; 温度; 降水; BRT

中图分类号: S 718.51 文献标志码: A

引用格式: 刘应帅, 余瑞, 郑彬彬, 等. 海南岛森林植被 NEP 季节性时空变化规律及气候驱动因素分析 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(2): 166-176. DOI: 10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.02.008

定量描述陆地生态系统碳动态变化及影响因素对区域生态系统碳循环的研究很重要^[1-2]。而森林净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)的大小能够表征生态系统的固碳能力, 它最初由 WOODWELL 等^[3]在分析陆地生物圈源、汇问题时提出, 其生态学的含义表示为生态系统总的生产力与生态系统呼吸之差。通过 NEP 来指示生态系统的固碳状态, NEP 为正值, 说明生态系统呈现碳汇状态, 反之则为碳源。陆地生态系统一直扮演着强大的碳汇角色^[4], 而陆地碳汇其中的很大一部分位于热带森林区域。热带森林覆盖面积约占全球表面积的 10%, 其森林碳汇约占陆地总碳库的 25%, 并且占全球植被碳储存的 50%^[5-6]。

由于热区异常气候频发, 热带森林生态系统碳汇的估算对于气候的敏感性的分析研究存在较大的不确定性^[7]。IPCC 的报告指出, 气候变化会对全球大部分区域的水文循环造成影响, 进而导致区域干旱频发, 这在亚马逊地区已经得到证实^[8-10]。因此, 对关于亚马逊热带森林的干旱敏感性问题产生了一些争论。一些学者认为, 亚马逊热带森林旱季呈碳汇状态, 雨季则为碳源^[11]; 反驳者认为, 热带森林长期的维持碳汇功能, 但在遭遇干旱事件时会逆转为碳源^[8,12]。从这些争论中可以看出, 气候因素会对热带森林植被碳汇大小产生影响。因此, 对热带地区森林植被碳汇进行气候驱动因素分析极为重要。温度和降雨是影响生态系统净

收稿日期: 2021-12-22 修回日期: 2022-02-25

基金项目: 海南省地球观测重点实验室开放基金(2020LDE002); 海南大学科研启动项目(KYQD(2R)1999); 海南省自然科学基金(321RC472); 国家自然科学基金(72104065)

第一作者: 刘应帅(1996-), 男, 海南大学生态与环境学院 2019 级生态学硕士研究生. E-mail: lys20181206@outlook.com

通信作者: 余瑞(1988-), 男, 副教授, 硕导. 研究方向: 生态环境遥感. E-mail: yur@outlook.com

生产力的最主要的 2 个气候因素^[13-15], 它能够通过影响植物的光合作用和呼吸作用^[16-17], 进而影响到 NEP。当然还有其他的因素在调控, 如土地利用变化、土壤水分、CO₂ 施肥效应以及氮沉降效应等^[18-21]。例如 CO₂ 升高对生产力的潜在影响可能受到全球变暖和降水模式改变的影响, 显示出了水的可用性和温度在全球植被光合作用和呼吸作用中承担着强大的驱动因素的角色^[22]。一方面, 热带林木长期处于热稳定的环境下, 未来气温的持续升高, 很有可能导致热带树木的热不育状态^[15]; 另一方面, LIU 等^[23]的研究表明了降水阈值对于生态系统生产和呼吸的调节作用。因此, 了解热带森林生态系统净生产力对于气温和降雨的响应至关重要。当然, 也有研究表明, 地形因素会影响到气候因素, 同一块区域较高海拔的地方温度和降雨会与低海拔地方呈现不一样的模式, 植被类型也会有很大的区别^[24-25]。

本研究结合多种遥感数据产品, 首先利用时间序列分析和一元线性回归的方法, 通过季节性分解得到了 NEP 的年际趋势、年内趋势以及季节性趋势。其次基于降水的年内变化划分了干季(1-3 月), 湿季(7-9 月), 并从时空层面分析了不同季节的 NEP 变化, 以掌握 NEP 的时空动态特征, 并采用增强回归树的方法, 探索了气候因子(气温、降水)、地形因子(海拔、坡度)对于 NEP 的贡献程度, 在此基础上, 分海拔讨论不同季节 NEP 趋势和降水趋势、温度趋势的相关性, 进一步确定海

南岛森林 NEP 对气候因素的响应, 旨在为理解全球气候变化背景下区域碳循环研究提供资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 海南岛位于中国的南部, 热带北缘, 地理位置介于 108°03' ~ 111°03'E 和 18°10' ~ 20°10'N 之间。海南岛的气候类型属热带海岛季风气候, 长夏无冬, 1 年分干湿 2 季, 全年平均温度 22.5 ~ 25.6 °C, 年均降雨量 900 ~ 2 500 mm^[26-27]。海南岛拥有较高的森林覆盖度, 其中, 热带山地雨林是海南岛热带森林植被中面积最大、分布集中的垂直自然地带性的植被类型^[28], 主要分布在吊罗山、五指山、霸王岭、尖峰岭以及鹦哥岭等 600 m 以上海拔的山地。而低地森林主要分布在 600 m 以下中低海拔区域, 包括红树林、橡胶林等^[29]。

1.2 土地利用数据集及海南岛森林提取 土地利用数据集源自中国研制的 30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据 GlobalLand30^[30], 共包含 2000、2010、2020 年 3 期的土地利用数据 (<http://www.globallandcover.com/>)。基于海南岛的边界图裁出海南岛的土地利用数据集, 然后统计近 20 a 海南岛的林地区域, 绘制出稳定的林地区域图像, 即在以上 3 组土地利用数据中均为林地的区域会被提取出来, 形成稳定的林地分布图(图 1), 再将其分辨率重采样至 0.01°以匹配 NEP 数据的空间分辨率。

1.3 NEP 数据集 本研究使用的 NEP 是来自全球环境研究中心(Center for Global Environmental

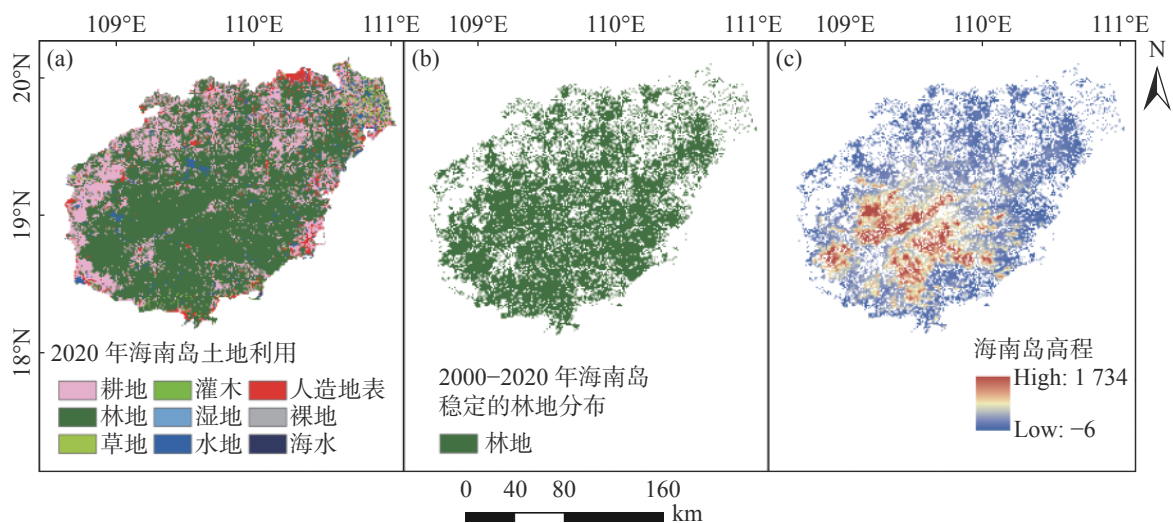


图 1 研究区概况图

(a)2020 年海南岛土地利用图; (b) 基于 3 期的土地利用提取的林地区域图; (c) 海南岛高程图。

Research, CGER), 该产品提供了 1999—2018 年空间分辨率为 0.01°, 时间分辨率为 10 d 的全球净生态系统交换 (Net Ecosystem Exchange, NEE) 数据^[31] (<https://db.cger.nies.go.jp/DL/10.17595/20200227.001.html.en>)。初始 NEE 数据格式被转换为栅格, 取相反数即为本研究所使用的 NEP 数据。全年共分为 36 幅栅格图像, 再分别将每 10 d 的 NEP 均值数据合成月尺度数据和年尺度数据。

1.4 气候因子数据集 气温和降水数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台—黄土高原科学数据中心 (<http://loess.geodata.cn>), 该数据集是根据 CRU 发布的全球 0.5° 气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集, 通过 Delta 空间降尺度方案在中国地区降尺度生成的, 并使用 496 个独立气象观测点数据进行了数据验证^[32]。

1.5 Digital Elevation Model (DEM) 数据集 DEM 数据集来自中科院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 该数据集为基于最新的 SRTM V4.1 数据经整理拼接生成的 90 m 的分省

$$TC_t = \frac{NEP_{t-6}/2 + NEP_{t-5} + \dots + NEP_t + \dots + NEP_{t+5} + NEP_{t+6}/2}{12}$$

式中: TC_t 指去除季节性效应的 NEP 趋势值; 1999—2018 共 20 年, 每年 12 个月, 合计 240 个月, t 从第 7 月开始取值。

在获取趋势因子之后, 通过下式可得到季节性因子:

$$SC_t = NEP_t - TC_t,$$

式中: SC_t 为第 t 月时算得的季节性因子。

这个季节性因子的估计也包含了每个 t 时间的随机误差因子 EC_t , 通过计算每个月季节性效应估计的平均值并在所有年份重复此序列来获取整体的季节性效应。

$$NEP_j = \frac{1}{20} \sum_{i=1999}^{2018} NEP_{ij},$$

式中: i 为年份, j 为月份, j 取 1~12, NEP_{ij} 为第 i 年第 j 月的平均 NEP, NEP_j 为 20 年的 j 月平均 NEP。

1.7 基于降雨效应的干湿季划分及趋势分析

基于像元尺度的趋势分析法能模拟研究区中每个栅格单元的变化趋势, 从而反映 NEP 变化的方向和速率。计算公式为:

数据。数据采用 WGS84 椭球投影。随后将其空间分辨率采样至 0.01°, 并基于 1.2 中提取的林地区域进一步提取林地所处的海拔高度。笔者使用 ArcGIS 中的空间分析工具根据海拔计算出坡度和坡向。

1.6 NEP 和降水的时间序列分解 针对存在季节性变化的月度 NEP, 采用季节性分解, 将其分解为趋势因子 (Trend Component, TC)、季节性因子 (Seasonal Component, SC) 和误差因子 (Error Component, EC)。TC 能准确把握数据的长期变化; SC 能捕捉到数据 1 年内的周期性变化; 而 EC 能反映那些不能被趋势或季节效应解释的变化^[33]。通过相加模型可以表示为:

$$NEP_t = TC_t + SC_t + EC_t,$$

式中: NEP_t 指每月的 NEP, TC_t 、 SC_t 、 EC_t 分别指趋势、季节性以及随机误差。

线性滤波器是估计时间序列趋势常用的方法, 最常见的线性滤波器之一是滑动平均。针对 NEP 月度数据, 选择了 12 点移动平均法, 线性滤波器如下:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times NEP_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NEP_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2},$$

式中: $Slope$ 是 NEP 逐像元线性回归方程的斜率; 代表年数, n 为时间跨度。当 $Slope > 0$ 时, NEP 呈增加趋势; 当 $Slope = 0$ 时, NEP 基本稳定, 无明显变化; 当 $Slope < 0$ 时, NEP 呈减少趋势。

1.8 基于 BRT 的相对贡献率分析 使用 BRT 来评估 1999—2018 年气候因子与地形因子对于海南岛森林 NEP 变化的相对影响程度。BRT 分析具有容纳任何数据分布的能力, 因此, 在分析过程中无需进行数据的转换。在进行 BRT 分析之前, 对森林 NEP 与气候因子以及地形因子进行皮尔逊相关分析和显著性分析。使用 R 语言中的 GBM 包进行 BRT 分析, 将 1999—2018 年平均 NEP 的逐像元数据作为响应变量, 同一时期的气候因子和地形因子作为解释变量。BRT 的本质就是 1 个加法模型, 每次建立模型是在之前建立模型损失函数的梯度下降方向。

1.9 海拔划分及趋势相关性分析 基于海南岛

森林的分布情况^[29],以 600 m 海拔为界限,将海南岛森林分为低海拔森林和高海拔森林分别研究。笔者计算了近 20 年 NEP 趋势与气候因子趋势的相关性,如下所示:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

式中: x_i 为 1999—2018 年温度或降雨的逐像元趋势, y_i 为 1999—2018 年 NEP 的逐像元趋势, 为像元数。随后对 NEP 趋势、温度趋势以及降雨趋势构建了多元线性回归模型,并以回归系数来估计各因子的贡献度,进而确定不同条件下对 NEP 影响的主导因素。

2 结果与分析

2.1 NEP 和降雨的时间序列分解

对 1999—2018 年月度 NEP 数据进行时间序列分析,发现海南岛森林 NEP 随时间的变化趋势及季节性波动。通过使用滑动平均滤波器,得到了近 20 年去除季节性影响的较为平稳的 NEP 变化趋势(图 2)。总体来看,NEP 在 20 年间变化起伏波动,在 2010 年前后出现最大趋势,而在 2016 年出现最低趋势。笔者进一步分析了 NEP 年内的季节性效应,发现年内 NEP 呈现先增后减的季节影响,1—5 月,NEP 逐渐增大,在 5 月达到最大值,随后的

6—12 月,NEP 逐渐减小。同理,可以得到降雨的年内季节性效应。1—9 月,降雨随月份逐渐增加,在 9 月达到最大值,随后的 10—12 月,降雨逐渐减少。基于此可以将海南岛 1—3 月划分为干季,7—9 月划分为湿季。

2.2 海南岛森林 NEP 的年度及季节变化

通过计算每年海南岛森林 NEP 的均值,得到 1999—2018 年逐年 NEP 的年度变化趋势图(图 3-a),整体来看 NEP 随时间呈现不显著的下行趋势,有机碳的变化率为 $-0.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ ($P > 0.05$),分段来看,前 10 年 NEP 呈现不显著的增长趋势,有机碳的变化率为 $3.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ ($P > 0.05$);后 10 年 NEP 呈现显著下降趋势,有机碳的变化率为 $-8.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ ($P < 0.05$)。近 20 年 NEP 的均值(有机碳)为 $483.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$,其中有 9 年的 NEP 高于均值。在 2010 年,NEP 达到最大值,为 $534.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ 。在 2016 年,NEP 有最小值,为 $439.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ 。

同样,在 1999—2018 年逐年干季和湿季的 NEP 趋势变化图中(图 3-b)可以看到湿季 NEP 有不显著的下行趋势,而干季 NEP 有不显著的上升趋势。湿季 NEP 的均值为 $136.76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (有机碳),其中有 11 年 NEP 超过均值,最大值出现在 2005 年,为 $156.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,最小值出现在 2015 年,为 $117.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。干季 NEP 的均值为 $102.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,仅有 9 年 NEP 超过均值,最大值出现在 2009 年,

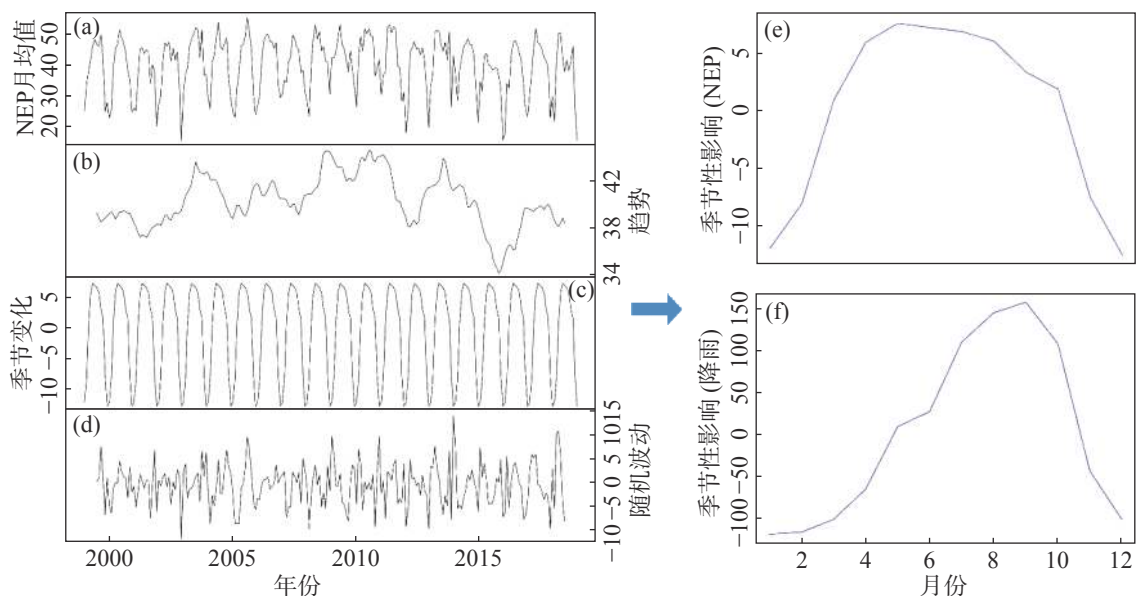


图 2 时间序列趋势图

(a)1999—2018 年 NEP 月趋势图;(b)经过时间序列分解去除季节性影响后的趋势图;(c)NEP 的季节性变化图;(d)随机误差;(e)季节性影响下 NEP 的年内变化;(f)季节性影响下降雨的年内变化。

为 $129.54 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 最小值出现在 2005 年, 为 $81.24 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. 干、湿 2 季对比, 除 2009 年干季 NEP 超过

湿季 NEP, 其余年份湿季 NEP 的值均高于干季。

2.3 海南岛森林 NEP 的空间分布及趋势变化

通过绘制全年、干季以及湿季的 NEP 空间分布图(图 4-a、b、c)来观察 NEP 在空间方位上的分布。年际的 NEP 最高值为 $825.30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}$ (有机碳), 最低值为 $-54.64 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}$, 其中 NEP 的高值集中在海南岛中部和东南部, 而在海南岛北部以及海岸线附近多为 NEP 低值聚集。此外, 大部分地区的 NEP 均大于 0。干季的 NEP 最高值为 $236.03 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 最低值为 $-69.89 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 与年际 NEP 相似, 干季 NEP 的高值多分布在海南岛中部五指山、霸王岭以及尖峰岭一带, NEP 低值则聚集在海南岛东北部。湿季 NEP 的分布较为破碎化, 高值和低值相间, 其中最高值为 $211.84 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 最低值为 $-19.74 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 湿季 NEP 最高值较干季减少了 $24.19 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 但最低值较干季增加了 $50.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

应用一元线性回归对海南岛 NEP 近 20 年的年际趋势变化进行分析, 进而绘制了 NEP 的趋势变化空间分布图(图 4-d、图 4-e、图 4-f)。年际的趋势变化如图 4 所示, NEP 呈现显著下降趋势的区域占比为 18.49%($P<0.05$), NEP 呈现显著增长

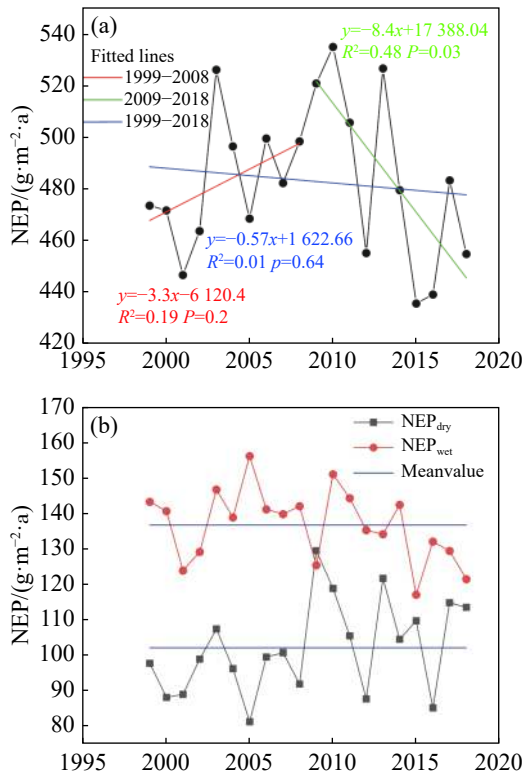


图 3 不同年份和季节下 NEP 的变化
(a)NEP 的年际变化; (b) 干季和湿季 NEP 的变化。

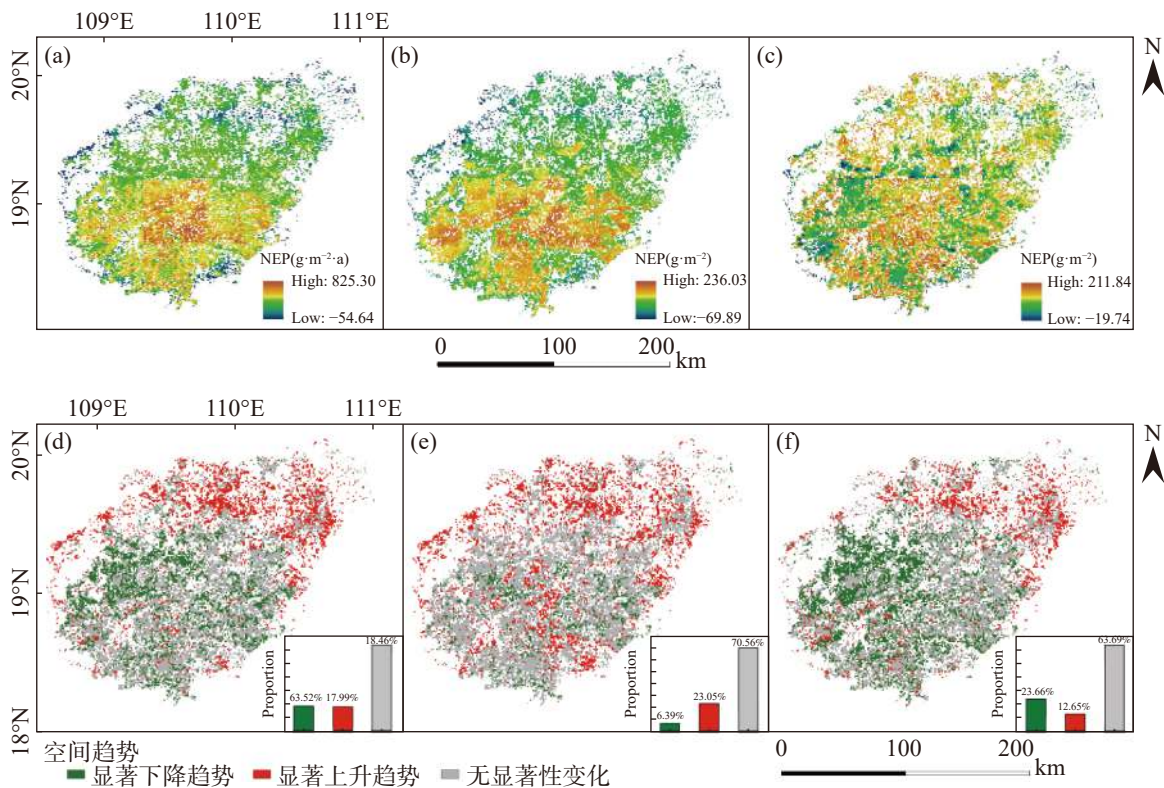


图 4 1999—2018 年 NEP 的空间分布及趋势变化

(a)、(b)、(c) 分别为年际、干季、湿季 NEP 的空间分布; (d)、(e)、(f) 分别为年际、干季、湿季 NEP 的空间趋势变化。

趋势的区域占比为 17.99% ($P < 0.05$), NEP 无显著变化的区域占比为 63.52%。从分布来看, NEP 显著增长区域主要集中在海南岛东北部, 而显著下降区域主要集中在海南岛中部。干季的趋势变化: NEP 呈现显著下降趋势的区域占比为 6.39% ($P < 0.05$), NEP 呈现显著增长趋势的区域占比为 23.05% ($P < 0.05$), NEP 无显著变化的区域占比为 70.56%。在空间分布上, 干季的 NEP 趋势变化与年际的趋势变化相似, 但是呈显著下降趋势的区域明显减少。湿季的趋势变化: NEP 呈现显著下降趋势的区域占比为 23.66% ($P < 0.05$), NEP 呈现显著增长趋势的区域占比为 12.65% ($P < 0.05$), NEP 无显著变化的区域占比为 63.69%。与年际趋势相比, 湿季的 NEP 显著增长趋势占比降低了 5.43%, 显著下降趋势占比提高了 5.17%; 与干季趋势相比, 湿季的 NEP 显著增长趋势占比降低了 10.40%, 显著下降趋势占比提高了 17.27%。

2.4 基于 BRT 的各因素贡献度分析 通过对不同季节的 NEP 与气候因子、地形因子进行皮尔逊相关分析以及显著性检验, 发现年际 NEP 与气

温、降雨、海拔以及坡度均有极显著的相关性 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 -0.53 、 -0.03 、 0.57 、 0.50 , 而与坡向无显著相关性 (图 5-a); 干季 NEP 与气温、降雨、海拔以及坡度均有极显著的相关性 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 -0.54 、 -0.07 、 0.73 、 0.66 , 而与坡向无显著相关性 (图 5-b); 湿季 NEP 与气温、降雨、海拔、坡度以及坡向均有极显著的相关性 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.07 、 -0.04 、 -0.09 、 -0.10 、 -0.03 (图 5-c)。基于以上分析, 选择气温、降雨、海拔和坡度作为自变量因子用于 BRT 分析, 以便计算各因素在不同季节对 NEP 的贡献程度。在进行参数调优后, 在 R 语言中使用 GBM 包进行 BRT 分析, 得到不同季节不同因子对 NEP 的相对贡献率。如图 6-a 所示, 对年际 NEP 影响程度最大的是海拔, 其相对贡献率为 45.46%, 其次分别为降雨、气温和坡度, 相对贡献率依次为 25.78%、16.17%、12.59%; 如图 6-b 所示, 对于干季 NEP 影响程度最大的是海拔, 其相对贡献率为 40.58%, 其次为坡度、降雨和温度, 相对贡献率依次为 28.13%、16.12%、15.17%; 如图 6-c 所示, 对

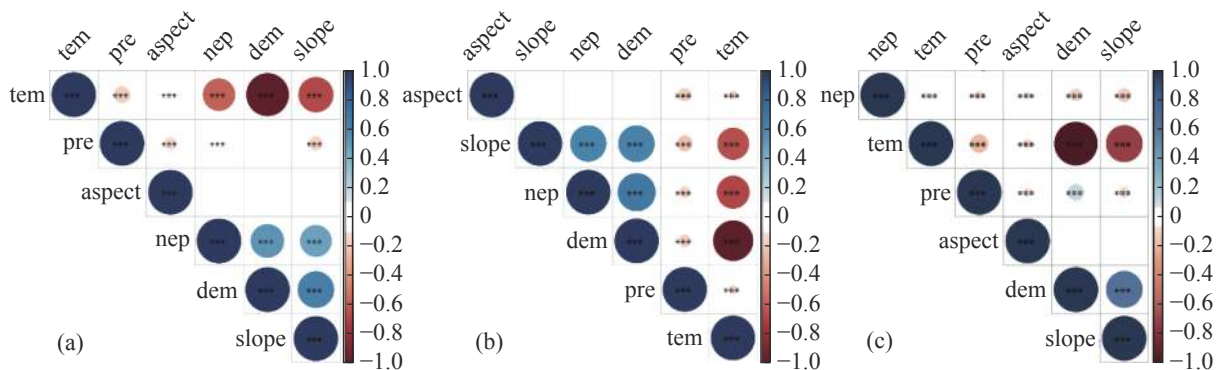


图 5 相关性热力图

pre、tem、dem、aspect、slope 分别表示降雨、温度、海拔、坡向以及坡度;
(a)、(b)、(c) 分别表示年际、干季和湿季 3 个时期。

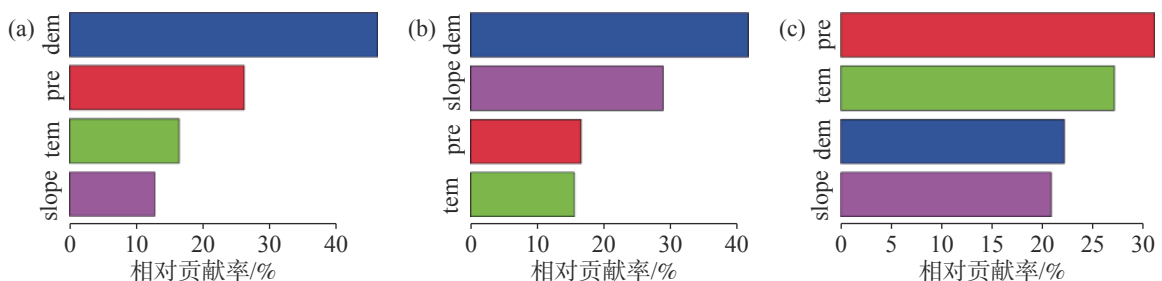


图 6 基于 BRT 的贡献度分析

pre、tem、dem、slope 分别表示降雨、温度、海拔以及坡度; (a)、(b)、(c) 分别表示年际、干季和湿季 3 个时期。

湿季 NEP 影响程度最大的是降雨,其相对贡献率为 30.75%,其次为温度,海拔和坡度,相对贡献率依次为 26.77%、21.88%、20.60%。除湿季外,海拔在年际 NEP 和干季 NEP 中扮演着重要的角色。

2.5 不同海拔区域 NEP 的驱动因子分析 为进一步说明海南岛森林 NEP 的主要影响因素,分别对高海拔区域和低海拔区域进行了 NEP 趋势和气候因子(气温、降雨)趋势的相关性分析。结果显示,在海拔 600 m 以上的森林生态系统中,全年的 NEP 趋势和湿季的 NEP 趋势与降雨趋势均有显著的负相关性,相关系数分别为 -0.11 和 -0.19 (图 7-d, 图 7-f),而干季的 NEP 趋势与降雨趋势没有显著的相关性(图 7-e)。不论是年际的 NEP 趋势还是干季、湿季的 NEP 趋势均与温度的趋势没有显著的相关性(图 7-a, 图 7-b, 图 7-c)。

海拔 600 m 以下的森林生态系统中,则呈现出十分不同的模式。年际的 NEP 趋势对于温度趋势有微弱的显著负相关性,相关系数为 -0.02 (图 8-a),对于降雨趋势有极显著的正相关性,相关系数为 0.46 (图 8-d);干季的 NEP 趋势与温度趋势没有显著的相关性(图 8-b),与降雨趋势有极显著的负相关性,相关系数为 -0.06 (图 8-e);湿季的 NEP 趋势与温度趋势、降雨趋势均有极显著的正相关关系,相关系数分别为 0.11 和 0.30 (图 8-c,f)。如图 9 所示,多元线性回归结果表明,在干季 600 m 以下的森林生态系统中,降水趋势对 NEP 趋势有显著的负贡献,贡献率为 -53% 。在湿季 600 m 以下的森林生态系统中,温度趋势对 NEP 趋势有显著的正贡献,贡献率为 90% 。

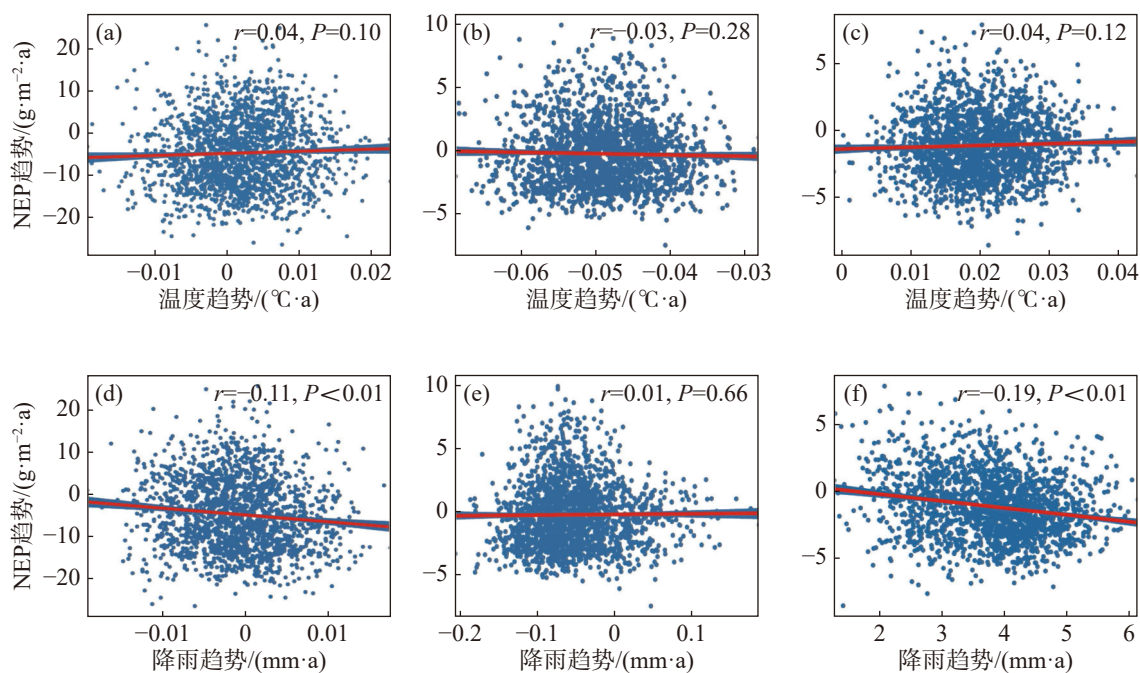
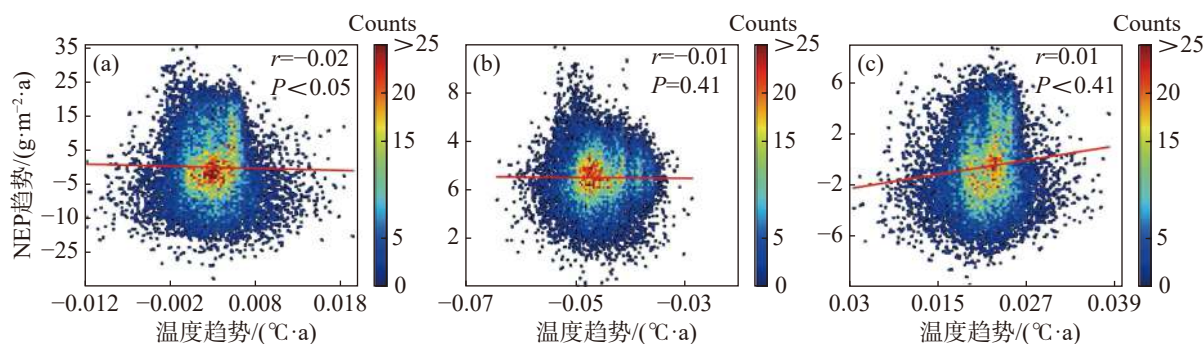


图 7 海拔 600 m 以上森林 NEP 趋势与温度、降雨趋势的相关性散点图

(a)、(b)、(c) 分别表示年际、干季、湿季与温度趋势的相关性; (d)、(e)、(f) 分别表示年际、干季、湿季与降雨趋势的相关性。



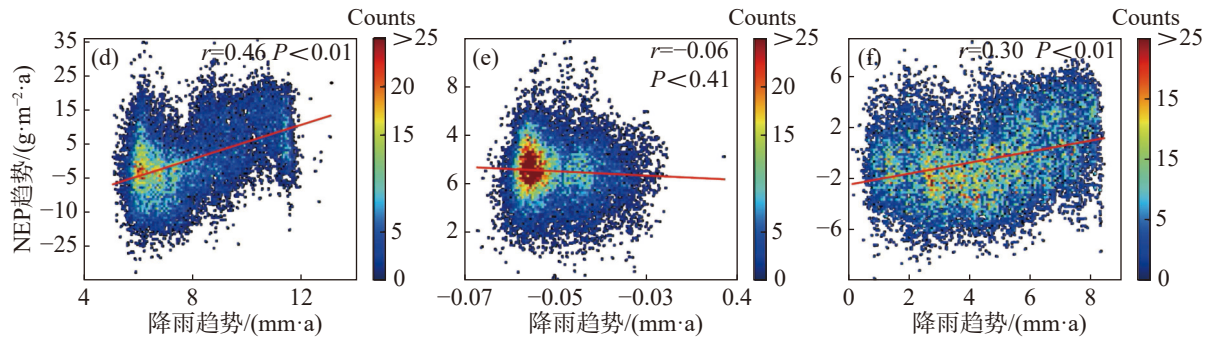


图 8 海拔 600 m 以下森林 NEP 趋势与温度、降雨趋势的相关性散点图
(a)、(b)、(c) 分别表示年际、干季、湿季与温度趋势的相关性; (d)、(e)、(f) 分别表示年际、干季、湿季与降雨趋势的相关性。

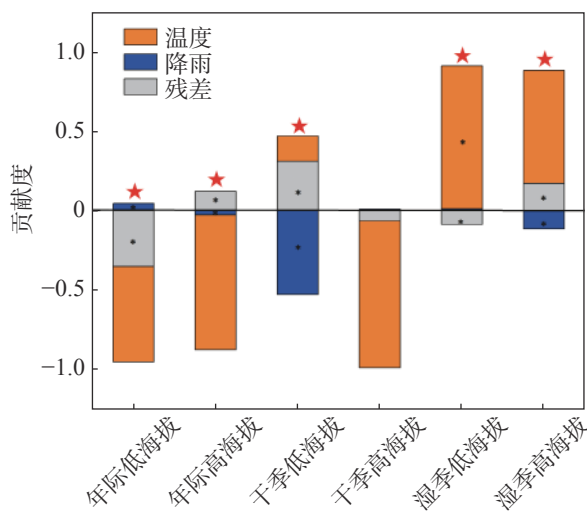


图 9 基于多元线性回归的不同时期不同海拔下气候因子的贡献度分析图

红色五角星表示方程具有显著性, 黑色星号表明回归系数或残差通过显著性 $P=0.05$ 水平检验。

3 讨论

3.1 海南岛森林稳定的碳汇功能 海南岛森林 NEP 表现出了季节性变化, 但是与亚马逊地区不同的是, 亚马逊地区在季节性变换时会存在碳动态的转变, 如碳源和碳汇的相互转换^[8, 11-12, 34-35], 而海南岛热带森林不论是从年际角度出发, 还是从干季、湿季角度出发, 均呈现稳定碳汇状态。所不同的是, 海南岛森林 NEP 在湿季时普遍要比干季高。地理位置差异所带来的气候类型差别可能是海南岛热带森林和亚马逊热带雨林呈现不同碳动态格局的原因。亚马逊地区属热带雨林气候, 长年高温多雨, 对于干旱的敏感性更高^[36]; 而海南岛则属热带海岛季风气候, 受季风影响分明显的干季和湿季。相对固定的季节模式, 使得海南岛森

林固碳动态虽有季节性变化, 但总体趋势保持稳定。更为重要的一点是, 不只是气候变化的影响, 农业扩张所带来的森林砍伐, 火灾和干旱之间的相互作用也是造成亚马逊森林碳损失的原因^[36-37]。相比而言, 海南岛的森林保存的较为完整。此外, 本研究采用基于多期土地利用遥感数据提取稳定林地的方法, 一定程度上规避了森林变化或者损失而带来的净生态系统生产力的损失。

3.2 不同海拔不同季节的 NEP 与气候因素的相关性分析 从趋势的相关性上来看, 相比气温, 降雨与 NEP 有着更为显著的相关性。但是在不同海拔下, 降雨与 NEP 的相关性表现出了相反的模式。在海拔 600 m 以下, 年际、湿季降雨趋势分别与年际、湿季 NEP 趋势呈现出显著的正相关, 但是在海拔 600 m 以上, 又呈现出截然相反的显著负相关性结果。群落结构和生态系统过程往往随海拔梯度变化^[24], 一般而言对海拔的响应都是由于温度变化所驱动, 但也不绝对, 降雨等因素也会随海拔梯度变化^[24, 38]。海拔梯度下, 海南岛降雨趋势的变化不是十分明显, 所以这种结果可能是因为群落结构发生变化。海南岛海拔 600 m 以上保存较为原始的热带山地雨林, 在年际和湿季雨量较为充沛的阶段, 随着降雨趋势的增加, 附生植物旺盛生长会导致 NEP 下降。而在低海拔区域, 由于人为干扰, 林型更为复杂, 人工林的固碳能力相较于高海拔原始林更为强大。

3.3 降水与温度的主导性分析 仅从气候因素考虑, 在旱季时, 降雨对低海拔森林 NEP 变化有显著的负向作用, 而在湿季时, 温度对低海拔森林 NEP 变化有积极作用。气温和降雨是影响生态系统生产力的主要的因素^[39], 但是随着全球变化加

速, 陆地生态系统的碳交换对于气候变化的响应和反馈仍旧存在不确定性^[40-41]。尤其在热带森林生态系统, 降雨量在年内的波动导致季节性干旱的产生, 干旱事件对热带森林生态系统树木的生长以及生态系统的功能有着严重的影响^[42]。低海拔区域更多为人工林, 以橡胶林为例, 干旱会导致其落叶甚至死亡, 光合作用受到抑制^[43]。另一方面, 旱季的降雨会增加土壤水分^[44], 进一步影响了土壤呼吸^[45]。雨季时, 温度呈现出显著的正向作用。降水的充沛使得水分并不是 NEP 的主要限制因子, 而此时的温度却有着积极的调节能力, 与 NEP 变化呈现出一致性。研究表明, 温度的升高是利于生态系统呼吸^[16]、生态系统总产量^[46]以及净碳吸收^[47]。可能在雨季时, 由于不再受到水分条件的限制, 海南岛森林植被得到较大恢复, 处于生长阶段的旺盛期, 此时温度对于整个生态系统的光合作用影响远远大于呼吸作用。

4 结 论

近 20 年海南岛森林 NEP 的年际变化波动较大, 存在明显的季节性。湿季的 NEP 高于干季的 NEP。空间上, NEP 呈显著增长趋势主要分布在海南岛东北部, 显著下降趋势主要分布在海南岛中部。不同季节 NEP 与气候因子的关系有所差异, 在干季低海拔区域, 降雨对 NEP 有显著的负向贡献, 贡献度为 -53% ($P < 0.05$); 在湿季低海拔区域, 温度对 NEP 有显著的正向贡献, 贡献度为 90% ($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] SCHIMEL D S, HOUSE J I, HIBBARD K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 2001, 414(6860): 169 - 172.
- [2] 陶波, 曹明奎, 李克让, 等. 1981-2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006(12): 1131 - 1139.
- [3] WOODWELL G M, WHITTAKER R H. Primary production in terrestrial ecosystems [J]. *American Zoologist*, 1968, 8(1): 19 - 30.
- [4] PIAO S, WANG X, WANG K, et al. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 300 - 318.
- [5] CORLETT R T. The impacts of droughts in tropical forests [J]. *Trends in Plant Science*, 2016, 21(7): 584 - 593.
- [6] BRINCK K, FISCHER R, GROENEVELD J, et al. High resolution analysis of tropical forest fragmentation and its impact on the global carbon cycle [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1 - 6.
- [7] GATTI L, GLOOR M, MILLER J, et al. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements [J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 76 - 80.
- [8] LEWIS S L, BRANDO P M, PHILLIPS O L, et al. The 2010 amazon drought [J]. *Science*, 2011, 331(6017): 554 - 554.
- [9] FENG X, PORPORATO A, RODRIGUEZ-ITURBE I. Changes in rainfall seasonality in the tropics [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 811 - 815.
- [10] 祁承经, 曹福祥, 徐永福. 简述热带森林对气候变化的响应 [J]. *林业科学*, 2010, 46(7): 136 - 139.
- [11] SALESKA S R, MILLER S D, MATROSS D M, et al. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses [J]. *Science*, 2003, 302(5650): 1554 - 1557.
- [12] PHILLIPS O L, ARAGA (~) O L E, LEWIS S L, et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest [J]. *Science*, 2009, 323(5919): 1344 - 1347.
- [13] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444 - 1449.
- [14] PARTON W, MORGAN J, SMITH D, et al. Impact of precipitation dynamics on net ecosystem productivity [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 915 - 927.
- [15] SLOT M, WINTER K. The effects of rising temperature on the ecophysiology of tropical forest trees [M]. *Tropical Tree Physiology*. Springer, Cham, 2016: 385 - 412.
- [16] GROGAN P, CHAPIN III F. Initial effects of experimental warming on above-and belowground components of net ecosystem CO₂ exchange in arctic tundra [J]. *Oecologia*, 2000, 125(4): 512 - 520.
- [17] WELTZIN J F, LOIK M E, SCHWINNING S, et al. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation [J]. *Bioscience*, 2003, 53(10): 941 - 952.
- [18] DE VRIES W, DU E, BRITTERBACH B K. Short and long-term impacts of nitrogen deposition on carbon sequestration by forest ecosystems [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 9: 90 - 104.
- [19] FERNANDEZ M M, SARDANS J, CHEVALLIER F, et al. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO₂ and temperature [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(1): 73 - 79.
- [20] LIU L, GUDMUNDSSON L, HAUSER M, et al. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):

- 1-9.
- [21] 廖立国, 谭正洪, 蒋龙, 等. 基于过程模型的泰国热带森林碳通量动态模拟解析[J]. 热带生物学报, 2021, 12(3): 279-288.
- [22] PENUELAS J, CIAIS P, CANADELL J G, et al. Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(10): 1438-1445.
- [23] LIU Z, BALLANTYNE A P, POULTER B, et al. Precipitation thresholds regulate net carbon exchange at the continental scale [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3596.
- [24] SUNDQVIST M K, SANDERS N J, WARDLE D A. Community and ecosystem responses to elevational gradients: processes, mechanisms, and insights for global change [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44: 261-280.
- [25] 巩杰, 张影, 钱彩云. 甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5121-5128.
- [26] 刘少军, 黄彦彬, 陈汇林, 等. 海南岛植被指数季节性变化及植被覆盖分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 86-88.
- [27] 罗红霞, 戴声佩, 刘恩平, 等. 2001-2014年海南岛植被覆盖时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 343-350.
- [28] 侯元兆. 中国热带森林的分布、类型和特点[J]. *世界林业研究*, 2003(3): 47-51.
- [29] 朱华, 周虹霞. 西双版纳热带雨林与海南热带雨林的比较研究[J]. *云南植物研究*, 2002(1): 1-13+16.
- [30] JUN C, BAN Y, LI S. Open access to Earth land-cover map [J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 434-434.
- [31] ZENG J, MATSUNAGA T, TAN Z H, et al. Global terrestrial carbon fluxes of 1999-2019 estimated by upscaling eddy covariance data with a random forest [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 1-11.
- [32] PENG S, DING Y, LIU W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [33] HOLMES E, WARD E. Applied time series analysis for fisheries and environmental sciences [M]. Seattle: Northwest Fisheries Science Center, 2020.
- [34] BALCH J K. Drought and fire change sink to source [J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 41-42.
- [35] 祁承经, 曹福祥, 曹受金. 热带森林碳汇或碳源之争[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6613-6623.
- [36] YANG Y, SAATCHI S S, XU L, et al. Post-drought decline of the Amazon carbon sink [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3172.
- [37] DAVIDSON E A, DE ARAUJO A C, ARTAXO P, et al. The Amazon basin in transition [J]. *Nature*, 2012, 481(7381): 321-328.
- [38] KORNER C. The use of 'altitude' in ecological research [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(11): 569-574.
- [39] WU Z, KOCH G W, DIJKSTRA P, et al. Responses of ecosystem carbon cycling to climate change treatments along an elevation gradient [J]. *Ecosystems*, 2011, 14(7): 1066-1080.
- [40] PIAO S, SITCH S, CIAIS P, et al. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2117-2132.
- [41] CAVALERI M A, REED S C, SMITH W K, et al. Urgent need for warming experiments in tropical forests [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(6): 2111-2121.
- [42] BONAL D, BURBAN B, STAHL C, et al. The response of tropical rainforests to drought—lessons from recent research and future prospects [J]. *Annals of Forest Science*, 2016, 73(1): 27-44.
- [43] 吴志祥, 陶忠良, 兰国玉, 等. 海南岛橡胶林生态系统碳通量及其影响因子研究[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(11): 2099-2108.
- [44] RISCH A C, FRANK D A. Effects of increased soil water availability on grassland ecosystem carbon dioxide fluxes [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 91-103.
- [45] ZHANG Q, PHILLIPS R P, MANZONI S, et al. Changes in photosynthesis and soil moisture drive the seasonal soil respiration-temperature hysteresis relationship [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 184-195.
- [46] SULLIVAN P F, ARENS S J, CHIMNER R A, et al. Temperature and microtopography interact to control carbon cycling in a high arctic fen [J]. *Ecosystems*, 2008, 11(1): 61-76.
- [47] OBERBAUER S F, TWEEDIE C E, WELKER J M, et al. Tundra CO₂ fluxes in response to experimental warming across latitudinal and moisture gradients [J]. *Ecological Monographs*, 2007, 77(2): 221-238.

Analysis of seasonal spatial and temporal variation patterns of forest vegetation NEP and climate drivers in Hainan Island

LIU Yingshuai¹, YU Rui¹, ZHENG Binbin¹, LIU Jiahui¹, SONG Qi¹, CHEN Ronghao¹, YAN Zhe²

(1. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570228;

2. Hainan Jisi Survey, Planning and Design Co., Ltd, Haikou, Hainan 570203, China)

Abstract: An attempt was made to analyze the spatial and temporal variation of the net ecosystem productivity (NEP) of forests in Hainan Island and its association with climate and topography. The spatial and temporal variation patterns of NEP in different seasons over the past 20 years was analyzed by using time series analysis and one-dimensional linear regression methods, and the contribution of climate and topography factors was assessed based on Boosted Regression Trees (BRT). The results showed that the NEP of the forests in Hainan Island showed significant seasonal changes, and that the overall NEP showed a non-significant decreasing trend in the last 20 years, with a rate of change of $-0.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}$ ($P > 0.05$). The forests in Hainan Island were carbon sinks at three time scales: interannual, dry season and wet season, and the intensity of carbon sinks in the wet season was higher than that in the dry season. Spatially, interannual NEP and wet-season NEP showed a significant increasing trend in the northeastern part of Hainan Island, and a significant decreasing trend in the central and western part of Hainan Island. The BRT analysis showed that the contribution of elevation to NEP was 45.46% (interannual), 40.58% (dry season), and 21.88% (wet season), respectively. The trend correlation and multiple linear regression analysis showed that NEP had significant trend correlation with precipitation. The NEP of low-elevation forests in Hainan Island was influenced by temperature and precipitation. In the dry season, precipitation had a significant negative contribution (-53% , $P < 0.05$) to the NEP of low elevation forests in Hainan Island, while in the wet season, temperature had a significant positive contribution (90% , $P < 0.05$) to the NEP of low elevation forests in Hainan Island.

Keywords: tropical forest; NEP; temperature; precipitation; BRT

(责编委:谭正洪 责任编辑:潘学峰)