

江西省植被净初级生产力的空间格局 及其对气候因素的响应*

丁庆福^{1,2} 王军邦^{2**} 齐述华³ 叶辉³ 黄玫² 徐跃通¹ 应天玉⁴ 陶健²

(¹ 山东师范大学人口资源与环境学院, 济南 250014; ² 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ³ 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022; ⁴ 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要 应用遥感-过程耦合模型(GLOPEM-CEVSA), 模拟了2000—2006年江西省陆地植被净初级生产力(NPP), 分析了其空间格局及其对气候因子的响应。本模型模拟数据与样点实测数据间呈显著的线性相关, 复相关系数为0.85 ($P < 0.001$)。在全省主要植被类型中, 常绿针叶林的NPP最高(1091.38 g C · m⁻² · a⁻¹), 其次是常绿阔叶林(846.09 g C · m⁻² · a⁻¹)、灌丛(596.62 g C · m⁻² · a⁻¹)和草地(325.50 g C · m⁻² · a⁻¹)。不同气候梯度上的NPP分布状况分析表明, 在降水低于1900 mm的地区, 随降水量增加NPP略有增加但幅度较小且波动较为剧烈; 在降水量为1900~1950 mm的地区, 降水越多NPP也越高, 且增加显著; 但在降水高于1950 mm地区, NPP则随着降水的增加而降低。在气温低于17℃的区域, 温度越高NPP也较高, 而在温度高于17℃的区域, NPP则随温度增加而降低。进一步分析低(<17.25℃)、均(17.25~18.55℃)、高(>18.55℃)3个气温区内空间上NPP与降水的关系发现, 低温区和均温区主要植被以常绿针叶林为主, NPP较高, 而高温区则以农田和灌丛为主, NPP较低且波动较大。

关键词 植被; 净初级生产力; 空间格局; 气候; 遥感-过程模型

中图分类号 X948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)3-0726-07

Spatial patterns of vegetation net primary productivity in Jiangxi Province of China in relation to climate factors. DING Qing-fu^{1,2}, WANG Jun-bang^{2**}, QI Shu-hua³, YE Hui³, HUANG Mei², XU Yue-tong¹, YING Tian-yu⁴, TAO Jian² (¹College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; ²Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; ⁴Forestry College, Northeastern Forestry University, Harbin 150040, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 726–732.

Abstract: By using GLOPEM-CEVSA model, the net primary productivity (NPP) of terrestrial vegetations in Jiangxi Province in 2000–2006 was simulated, and the spatial patterns of the NPP in relation to climate factors were analyzed. The simulated NPP had a significant linear correlation with the surveyed NPP, and the multiple correlation coefficient was 0.85 ($P < 0.001$). Among the main vegetations in the Province, evergreen needle-leaf forest had the highest NPP (1091.38 g C · m⁻² · a⁻¹), followed by evergreen broad-leaf forest (846.09 g C · m⁻² · a⁻¹), shrub (596.62 g C · m⁻² · a⁻¹), and grass (325.50 g C · m⁻² · a⁻¹). The analysis of the NPP along the climate gradient showed that in the areas with the precipitation less than 1900 mm, the NPP increased with increasing precipitation, but the increment was small and had a greater fluctuation. In the areas with the precipitation being 1900–1950 mm, the NPP increased significantly with increasing precipitation; while in the areas with the precipitation >1950 mm, the NPP decreased with increasing precipitation. In the areas with the air temperature lower than 17℃,

* 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421105)和中央高校基本科研业务费专项(DLI1CA04)资助。

** 通讯作者 E-mail: jbwang@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2012-10-13 接受日期: 2012-12-08

the NPP increased with increasing temperature; while in the areas with air temperature higher than 17 °C, the NPP decreased with increasing temperature. The further analysis on the relationships between the NPP and precipitation in the areas with lower air temperature (< 17.25 °C), medium air temperature (17.25–18.55 °C), and higher air temperature (>18.55 °C) showed that in the areas with lower and medium air temperature, the dominant vegetation was evergreen needle-leaf forest, which had higher NPP, while in the areas with higher air temperature, crop and shrub were the main vegetations, whose NPP was lower and had greater variability.

Key words: vegetation; net primary productivity (NPP); spatial pattern; climate; GLOPEM-CEVSA model.

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是植被所固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分 (方精云等, 2001), 它决定了可用来维持包括人类在内所有生物体的能量的总量, 是人类食物、织物和燃料的源泉 (Running *et al.*, 1999)。植被净初级生产力对气候间关系研究是理解陆地生态系统碳循环及其对全球气候变化响应与反馈的核心 (Bonan, 2008)。

对陆地碳循环的国内外聚焦极大地促进了植被净初级生产力模型研究。国内从初期的应用 Miami 等统计模型估算我国自然植被净初级生产力的气候生产力以来, 相继开展了引进国外遥感模型, 如 CA-SA 模型 (朴世龙和方精云, 2001)、GLO-PEM 模型 (陈利军等, 2002, 闫慧敏等, 2007), 估算分析了我国自然植被和农田的净初级生产力时空格局及其与气候、土地利用间等关系。而将生理生态过程模型和遥感模型耦合, 实现陆地生态系统碳循环的跨尺度模拟, 能够反映区域乃至全球尺度的碳收支的空间分布及动态变化, 从而增加了陆地植被 NPP 估算的可靠性和可操作性 (曹明奎和李克让, 2000; 王军邦等, 2009)。

预测表明至 20 世纪末全球气温将升高 2 ~ 7 °C, 全球降水格局会发生变化, 而这些变化很有可能改变生态系统碳循环; 文献数据分析表明, 增温和增加降水的试验通常会促进植物生长和生态系统碳通量, 降水减少产生相反效应 (Anderson-Teixeira *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2011a, 2011b)。不同模型对不同地区模拟的植被净初级生产力与气候 (主要是气温和降水) 的关系不同 (陈旭等, 2008; 王琳等, 2010; 陈福军等, 2011; Cao *et al.*, 2012)。近 30 年中国 NPP 变化与气温和降水的关系分析表明, 大部分地区 (除大兴安岭南端) NPP 与年均温呈正相关, 青藏高原和东北地区 NPP 与年降水量负相关 (陈福军等, 2011)。在不同时间尺度上, 之间的关系也不

同。龙惠玲等 (2010) 分析了不同时间尺度下内蒙古草原 NPP 与气温降水的关系, 发现以年为单位 NPP 与降水关系比较明显, 以季节为单位, 春秋季节 NPP 与气温关系密切。

江西省地处亚热带地区, 植被种类繁多, 森林覆盖率 60% 以上, 是全国森林覆盖率最高的地区之一。江西自 20 世纪 80 年代以来实施了大规模的山江湖工程, 取得了较好的成效; 建设江西省鄱阳湖生态经济区已上升为国家战略的区域性发展规划 (徐婷婷和刘跃进, 2010)。因此, 以该地区为案例区, 应用全球生产效率模型和生态系统过程耦合模型 (GLOPEM-CEVSA), 模拟分析植被净初级生产力空间分布格局及其对气候的响应, 对于在全球气候变化背景下, 在保护生态环境的同时, 为有序利用生态资源, 促进人类社会发展, 提供科学基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

江西省位于长江中下游南岸 (图 1), 界于 113°34'E—118°28'E、24°29'N—30°04'N, 地处北回归线附近, 日照充足, 气候温暖, 年平均气温在 20°C 左右 (图 3a); 江西属亚热带湿润季风气候, 春季温暖多雨, 夏季炎热湿润, 秋季凉爽少雨, 冬季寒冷干燥。无霜期长达 240 ~ 307 d。该区受季风和地貌等因素的影响, 年降水量时空分布不均, 年均 1400 ~ 1800 mm (图 3b)。该区自然条件复杂, 植被类型多样, 是亚洲东南部热带、亚热带植物区系的起源中心之一。常绿阔叶林是江西地区地带性植被, 也是该区植物群落演替的顶极群落。江西植物分布南北差异很大, 大体以 27°00'N—27°30'N 为界, 以南有较多的热带植物区系成分, 以北则掺杂有不少暖温带植物区系成分。同时, 因海拔高差而异, 形成了植被垂直带谱, 相应出现了结构、外貌和功能各不相同的森林类型。主要植被类型有亚热带常绿阔叶林、人

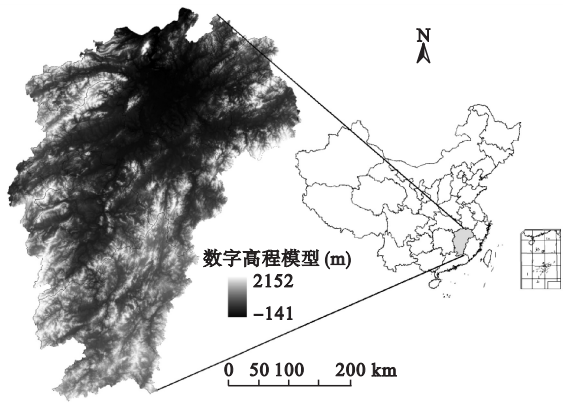


图 1 研究区位置及来自 SRTM 的数字高程模型 (DEM) 空间示意图
Fig. 1 Location of research area and the DEM from SRTM

工针叶林、针叶阔叶混交林、落叶阔叶林及常绿与落叶混交林,典型植被类型中常绿针叶林占全省面积的 37%,灌丛 30%,常绿阔叶林 5%,农田 2%,草地 1%(图 4a)。森林土壤主要有红壤、山地黄红壤、山地黄壤、山地黄棕壤类型。境内东、南、西三面环山,中间丘陵起伏,北部为鄱阳湖及其平原。

1.2 GLOPEM-CEVSA 模型

GLOPEM-CEVSA 是在陆地生态系统跨尺度模拟和新一代生态系统模型发展理念基础上(曹明奎等,2004),通过耦合基于卫星遥感的全球生产效率模型与基于植被生理生态的过程模型得到的估算 NPP 和净生态系统生产力 (NEP) 的模型;在站点尺度上实现并验证了模型 (Wang *et al.*, 2011),并应用于青海三江源区生态系统本底综合评估报告(王军邦等,2009)。

1.3 数据源及分析方法

1.3.1 数据源 GLOPEM-CEVSA 模型主要输入数据中,遥感反演的植被冠层吸收光合有效辐射比 (FPAR) 是利用 1 km 分辨率的 2000—2006 年 MODIS 数据产品 MOD15A2 (Knyazikhin *et al.*, 1999)。

气象数据是利用全国约 730 气象站点数据,进行空间差值得到时间分辨率为 8 d、空间分辨率为 1 km 的空间数据。所使用的插值方法是由澳大利亚国立大学基于利用光滑薄板样条法开发的插值软件 ANUSPLIN (Hutchinson, 2002)。数字高程模型 (DEM) 数据通过 90 m 空间分辨率的 SRTM 数据 (Rodriguez *et al.*, 2006),进行空间重采样得到 1 km 空间分辨率 DEM 数据。

1.3.2 模型验证 本研究分别利用 MODIS 数据共

享网的 NPP 产品数据 (MOD17A3) (Zhao *et al.*, 2005),及森林清查数据计算的 NPP 数据(罗天祥, 1996),其中江西省地区有 25 个样点数据,与 GLOPEM-CEVSA 模拟结果进行比较验证。

本模型的 NPP 值与森林清查样点数据线性回归结果表明(图 2),尽管复相关系数 (Adj. $R^2 = 0.16$) 较低,但二者间存在显著线性相关性 ($P = 0.028$);而 MOD17A3 则与森林清查样点数据线性关系不显著 (Adj. $R^2 = 0.03$, $P = 0.187$)。当截距为 0 时,本文模型能解释样点数据变异的 85% ($P < 0.001$);而 MOD17A3 则解释样点数据变异的 80% ($P < 0.001$)。可见,本模型对该地区森林 NPP 的模拟效果较好。

2 结果与分析

2.1 NPP 的空间格局

江西省 2000—2006 年平均年降水和年均温如图 3 所示。模拟的 NPP 空间格局与该区植被类型、水热条件地带性差异规律相一致(图 4)。NPP 区域平均值为 $817 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, NPP 最高值为 $1789 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。NPP 空间分布自鄱阳湖地区向东南西 3 个方向放射增加,中北部地区的鄱阳湖湿地 NPP 较小, $50 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下;东部地区由于水热条件较好,有较大面积的森林分布,一般在 $1200 \sim 1500 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;西部由于受气温和降水的气候控制,植被覆盖相对较高, NPP 大多 $600 \sim 1000 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

研究区主要植被类型 NPP 由高到低依次为:常绿针叶林 ($1091.38 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、常绿阔叶林 ($846.09 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、农田 (767.20) 灌丛 ($596.62 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、草地 ($325.50 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

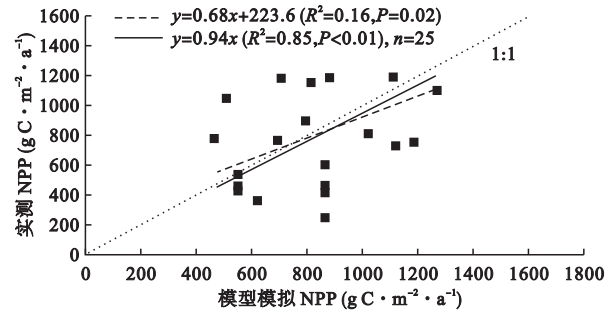


图 2 GLOPEM-CEVSA 模拟 NPP 与基于森林资源清查的 NPP 间关系分析
Fig. 2 Relationship between the modeled NPP by GLOPEM-CEVSA and the NPP from forest resource survey

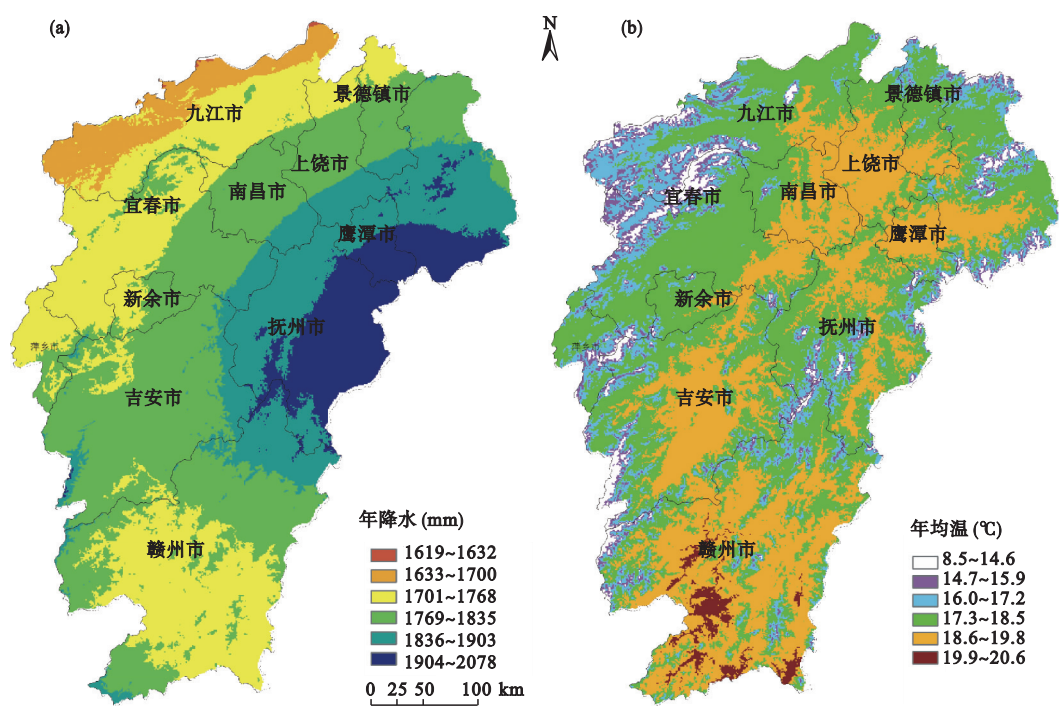


图 3 江西省 2000—2006 年年总降水 (a) 和年均温 (b) 空间分布示意图
Fig.3 Spatial pattern of the annual total precipitation (a) and the annual mean temperature (b) of Jiangxi Province in 2000–2006

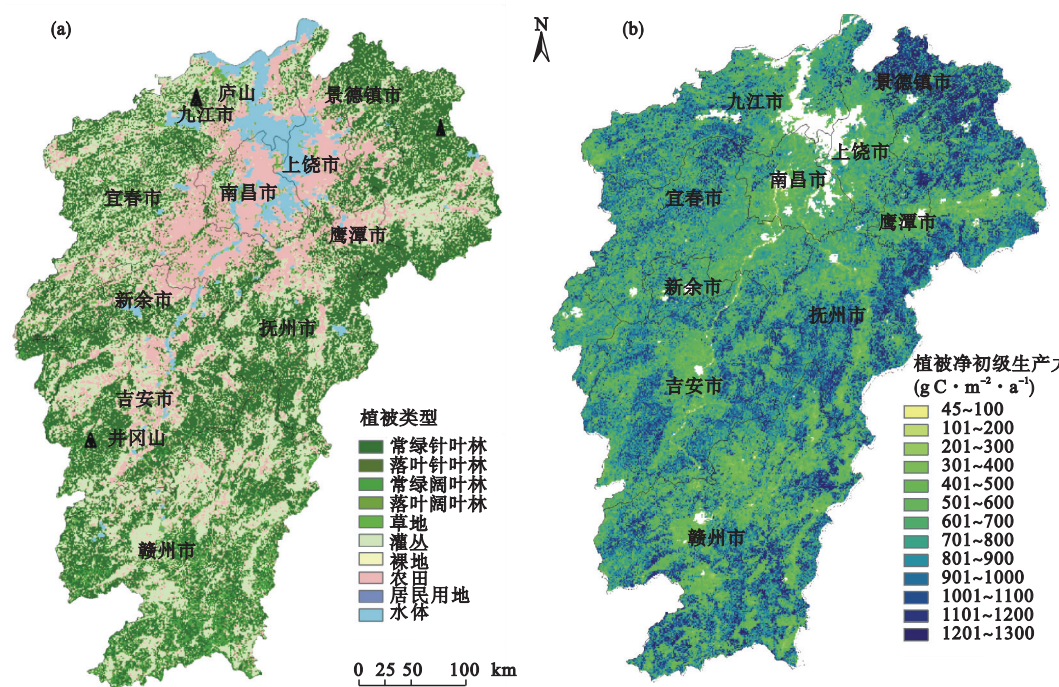


图 4 研究区植被类型 (a) 及多年平均植被净初级生产力 (b) 空间格局示意图
Fig.4 Vegetation classification map (a) and the spatial pattern of the multi-year average of net primary productivity (b)

与其他模型模拟的全国各植被类型平均 NPP 相比 (表 1),江西省主要植被平均 NPP 高于全国对应植被平均值,这可能与江西省处于亚热带的地理位置密切相关。

2.2 NPP 空间格局形成的气候因素

统计每毫米降水区间上平均 NPP 绘制出 NPP 随降水的空间变化而变化的曲线图,由图 5a 可见,降水<1770 mm 的区域 NPP 随降水的波动较大,但总体有上升趋势,在 1770 ~ 1900 mm 的区域 NPP 随降水变化相对平缓,NPP 在 690 ~ 740 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 波动,并且置信区间反应的误差范围较小;然而在降雨>1900 mm 的地区,NPP 随降水的增加明显增加,平均 NPP 最高达到 960 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,当降水>1950 mm 时,NPP 反而随降水的增加而减少,由置信区间可知其误差范围较大。

同样根据每 0.1 °C 温度区间的 NPP 绘制出 NPP 随温度变化的曲线图(图 5b),反映出 NPP 随气温的变化则呈单峰模式,即 NPP 先随气温升高而升高,在气温约为 17 °C 的地区,NPP 达到了最高值 840 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,气温超过该值的地区,气温越高的地区 NPP 反而越低。其中,年均气温在 9 ~ 17 °C 的地区,主要是庐山、三清山、井冈山等山地丘陵地区,在空间上 NPP 与气温间存在极显著线性正相关关系($y=57.10x+48.03, R^2=0.97, P<0.001$)。气温在 17 ~ 21 °C 地区,主要是赣南山地丘陵区,NPP 与气温间存在极显著的线性负相关关系($y=-124.13x+3092.5, R^2=0.95, P<0.05$)。

进一步根据该地区平均气温和标准差将该区域分为低(<17.25 °C)、均(17.25 ~ 18.55 °C)、高(>18.55 °C)3 个气温区,分析气温对 NPP 随降水变化模式的影响。其中均温区和高温区包含了江西省绝大部分地区,占全省总面积的 79%。3 个气温区域 NPP随降水变化模式与整个研究区基本一致,但以

表 1 江西省不同植被类型年均净初级生产力 (NPP) 与其他结果比较 ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 1 Comparing NPP of different vegetation types with other model results

植被类型	CEVSA (陶波, 2003)	CASA (李贵才, 2004)	GLOPEM- CEVSA (全国)	GLOPEM- CEVSA (江西省)
常绿针叶林	468	527.5	829.5	1091.38
常绿阔叶林	873	532.7	764.1	846.09
草地	348	193.9	177.9	325.50
灌丛	648	373.0	361.8	596.62
农田	648		591.3	767.20

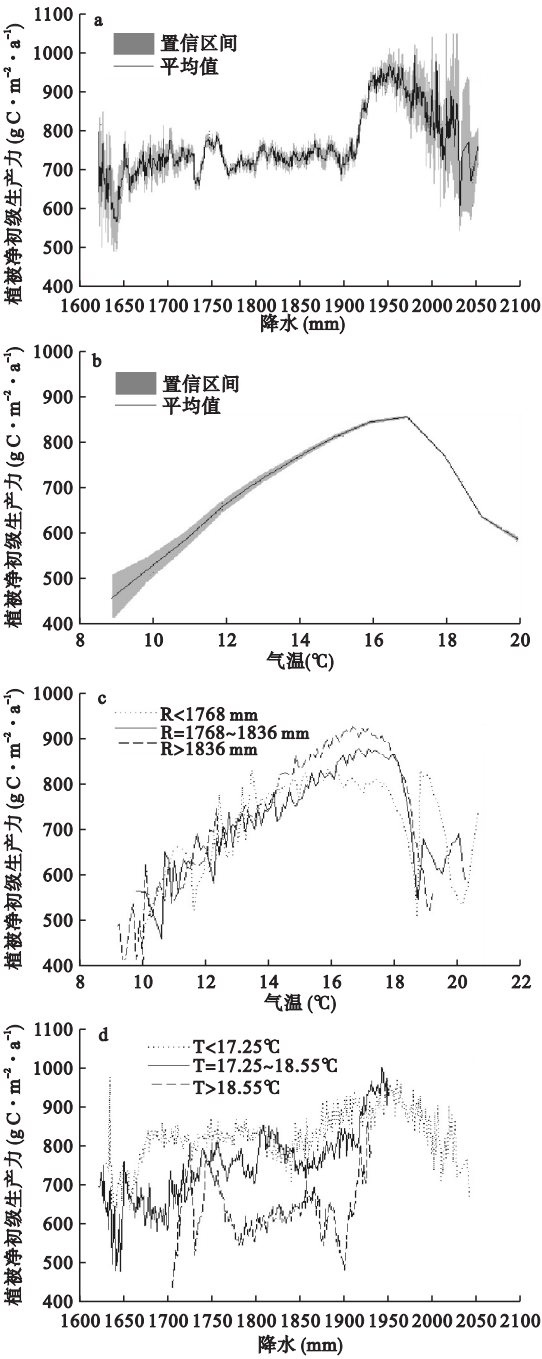


图 5 NPP 随降水梯度 (a) 和气温梯度 (b) 的变化,以及在不同降水区域 NPP 随气温的变化 (c) 和在不同气温区域 NPP 随降水的变化 (d)

Fig. 5 NPP change with the precipitation gradient (a), the temperature gradient (b), NPP change with the temperature gradient under the different precipitation area (c) and NPP change with the precipitation gradient under the different temperature area (d)

低温区 NPP 总体较高,其次是均温区,高温区 NPP 明显低于其他 2 个区(图 5c)。低温区和均温区主要植被以常绿针叶林为主,而高温区则以农田为主。

高温区 NPP 波动较大,在降水最高区域,低、均和高气温区 NPP 较为接近。

研究区平均降水 1802 ± 68 mm (标准偏差 SD 为 68 mm),按平均值 $M \pm 0.5SD$ 将研究区划分为降水少、中、多 3 个区域,然后分析每个区域内 NPP 在不同温度梯度上的变化模式,结果表明其变化模式与全省基本一致(图 5d)。在 3 个降水区域,越往温度高的地区 NPP 越高,但是超过阈值(约 17.5°C)后 NPP 开始下降。经分析年均温等于或低于区域均值的地区为地带性植被常绿针叶林,在热量条件更好的地方 NPP 更高,但这一气温区间出现一个值得注意的现象,即在低于 14°C 的地区,降水多 NPP 低,降水少 NPP 高;而高于 14°C 的地区降水多 NPP 高,降水少 NPP 低;前后差别相对较为明显。年均温为 $18.53 \sim 19.82^\circ\text{C}$ 的区域以农田和灌丛植被为主,而年均温为 $19.82 \sim 20.56^\circ\text{C}$ 的区域主要植被是灌丛;在这 2 个区域农田的 NPP 在 $624 \sim 645 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而灌丛的 NPP 在 $650 \sim 715 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;而在更高温度的后一区域,降水低于平均值的地区灌丛的 NPP 约为 $549 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,降水在区域均值范围内的区域灌丛 NPP 为 $644 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,由此可解释在高温区出现的 NPP“异常”。

3 讨论

3.1 模型的不确定性

本研究以 GLOPEM-CEVSA 模型,模拟了江西 2000—2006 年植被净初级生产力。在利用森林碳通量观测数据验证该模型时,本模型能够解释碳通量塔观测的总初级生产力季节变化的 83% 以上(Wang *et al.*, 2011)。本模型模拟的我国东北地区森林净初级生产力,与森林资源清查样方数据间呈显著线性相关,当截距不为 0 时复相关系数 R^2 为 0.253,当截距为 0 时 $R^2 = 0.899$ (赵国帅等, 2011)。说明尽管模型能够很好地模拟森林植被 NPP,但模型对以落叶针叶林为主的东北地区的模拟效果,略好于对以常绿针叶林为主的江西地区的模拟,即模型对常绿针叶林 NPP 的模拟还存在一定的不确定性。由于受云等因素的影响,基于卫星遥感的植被吸收光合有效辐射比(FPAR),可能是主要不确定性来源,进一步提高 FPAR 的数据质量应该是今后努力的一个方向。

3.2 亚热带常绿植被 NPP 空间格局形成的气候因素

植被生产力是植被结构、土壤性质和气候条件

的综合作用结果。在全球气候变化和日益加剧的人类活动,一方面改变了植被结构,另一方面影响植被生产力。在本研究中,低温区和均温区主要植被以常绿针叶林为主,而高温区则以农田为主,反映了人类活动利用水热条件相对优越的区域土地。

基于卫星遥感的 GLOPEM-CEVSA 模拟的植被 NPP 的空间分布特征反映了植被受土壤、气候等综合因素影响下现实 NPP,但其空间分布完全反映了依据气候因子计算的植被气候生产力的状况。江西植被气候生产力基本上由东、南、西 3 个方向向北呈放射性分布,随着高山、丘陵、平原地形的变化而逐渐减小;只是由于仅仅考虑气候因素的影响,其空间变异较小。

本文植被现实生产力,形成了沿降水梯度大致以 1725 和 1875 mm 降水为分界点,呈现逐渐递增的 3 个波峰分布特征(图 5a)。NPP 的气候控制主要是通过地下资源的可利用性进行调节,在全球尺度上,NPP 与降水的相关性最强,约 2000 ~ 3000 mm 的降水量(雨林的典型降水量)可产生最高的 NPP,而在极高的降水条件下 NPP 下降(蔡平等, 2005)。地处亚热带和温带的交汇地带的江西省,植被处于中生活型湿生生境下,在一定降水量范围内水分不是限制生长的因素,但降水量较高的地区 NPP 随降水量增加而下降,这可能是由于根或土壤微生物受到氧的限制,或者关键营养的淋溶损失所致(蔡平等, 2005)。

而 NPP 随气温的变化则呈单峰模式,即 NPP 先随气温升高而升高,当气温达到 17°C 时 NPP 达到了最高值 $840 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而后随气温升高而降低(图 4b),这反映了植被对气温和降水综合作用的响应。然而这不同于在全球尺度上得到的一般性认识,即除干旱生态系统(如荒漠)外 NPP 一般随着温度的增加呈指数增加(蔡平等, 2005)。包括本文中的 GLOPEM-CEVSA 模型(Wang *et al.*, 2011),多数模型均认为植物在最适温度时光合速率最高,而当温度低于或高于某值时,光合作用受到温度限制(Raich *et al.*, 1991; Melillo *et al.*, 1993; Cao *et al.*, 2004; 邴龙飞等, 2012)。在本研究,最适温度确定为 25°C ,然而,模拟的 NPP 在 17°C 时达到最高,这可能反映了在水热等气候因素及土壤等环境因素综合作用的结果。

4 结论

利用 GLOPEM-CEVSA 模型对江西植被净初级

生产力分析表明,该模型能客观地反映植被净初级生产力状况;但基于卫星遥感的 FPAR 可能是主要的模型不确定性源,需在今后进一步提高 FPAR 的数据质量。NPP 随气温的变化则呈单峰模式,即 NPP 先随气温升高而升高,当气温达到 17 °C 时 NPP 达到最高值,而后随气温升高而降低。研究结果对江西省或江西省附近区域的 NPP 与气候关系有参考意义。在以后的研究中利用月尺度的数据分析 NPP 与气温和降水的关系能更详尽探索 NPP 与气候因素的关系。

另外,江西处于亚洲季风区,该区总体上呈现出水热条件较好、NPP 值较高的规律,但农田区不明显,人类活动(耕作)改变了这种连续性规律,这为进一步研究全球气候变化和人类活动对生态系统的影响提供了基础。

参考文献

- 蔡平,马特森. 2005. 陆地生态系统生态学原理. 北京: 高等教育出版社.
- 陈旭,林宏,强振平. 2008. 中国南部样带植被 NPP 与气候的关系. 生态环境, **17**(6): 2281–2288.
- 陈利军,刘高焕,冯险峰. 2002. 遥感在植被净第一性生产力研究中的应用. 生态学杂志, **21**(2): 53–57.
- 陈福军,沈彦俊,李倩,等. 2011. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究. 地理科学, **31**(11): 1409–1414.
- 曹明奎,李克让. 2000. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展. 地球科学进展, **15**(4): 446–452.
- 曹明奎,于贵瑞,刘纪元,等. 2004. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟. 中国科学: 地球科学(增刊), **34**(2): 1–14.
- 方精云,柯金虎,唐志尧,等. 2001. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, **25**(4): 414–419.
- 罗天祥. 1996. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 北京: 中国科学院自然资源综合考察委员会.
- 陶波. 2003. 中国陆地生态系统净初级生产力与净生态系统生产力模拟研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所.
- 李贵才. 2004. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所.
- 龙慧灵,李晓兵,黄玲梅,等. 2010. 内蒙古草原生态系统净初级生产力及其与气候的关系. 植物生态学报, **34**(7): 781–791.
- 朴世龙,方精云. 2001. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. 植物生态学报, **25**(5): 603–608.
- 邴龙飞,苏红波,邵全琴,等. 2012. 近 30 年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析. 地球信息科学, **14**(1): 1–13.
- 王琳,景元书,李琨. 2010. 江苏省植被 NPP 时空特征及气候因素的影响. 生态环境学报, **19**(11): 2529–2533.
- 王军邦,刘纪远,邵全琴,等. 2009. 基于遥感-过程耦合模型的 1988—2004 年青海三江源区净初级生产力模拟. 植物生态学报, **33**(2): 254–269.
- 徐婷婷,刘跃进. 2010. 粮食大省江西的生态转型. 中国经济周刊, (3): 46–47.
- 闫慧敏,刘纪远,曹明奎. 2007. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. 地理学报, **62**(2): 171–180.
- 赵国帅,王军邦,范文义,等. 2011. 2000—2008 年中国东北地区植被净初级生产力的模拟及季节变化. 应用生态学报, **22**(3): 621–630.
- Anderson-Teixeira KJ, Delong JP, Fox AM, et al. 2011. Differential responses of production and respiration to temperature and moisture drive the carbon balance across a climatic gradient in New Mexico. *Global Change Biology*, **17**: 410–424.
- Bonan GB. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, **320**: 1444–1449.
- Cao MK, Prince SD, Small J, et al. 2004. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000. *Ecosystems*, **7**: 233–242.
- Cao XM, Xi C, An-ming B, et al. 2012. Net primary productivity (NPP) of oasis changes in trends in Xinjiang and responses to climate change analysis in 1981–2000. *International Conference on ICCE2011, AISC*, **111**: 417–424.
- Hutchinson MF. 2002. ANUSPLIN Version 4.2 User Guide.
- Knyazikhin Y, Glassy J, Privette J, et al. 1999. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15) algorithm theoretical basis document. Theoretical Basis Document, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 20771.
- Melillo JM, McGuire AD, Kicklighter DW, et al. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, **363**: 234–240.
- Raich JW, Rastetter EB, Melillo JM, et al. 1991. Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecological Applications*, **1**: 399–429.
- Rodriguez I, Crespo G, Lok S, et al. 2006. Indicators of sustainability in the system soil-plant-animal in Cuba: Technical note. *Cuban Journal of Agricultural Science*, **40**: 225–227.
- Running S, Baldocchi D, Turner D, et al. 1999. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, **70**: 108–127.
- Wang JB, Liu JY, Cao MK, et al. 2011. Modelling carbon fluxes of different forests by coupling a remote-sensing model with an ecosystem process model. *International Journal of Remote Sensing*, **32**: 6539–6567.
- Wu ZT, Koch GW, Dijkstra P, et al. 2011a. Responses of ecosystem carbon cycling to climate change treatments along an elevation gradient. *Ecosystems*, **14**: 1066–1080.
- Wu ZT, Dijkstra P, Koch GW, et al. 2011b. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, **17**: 927–942.
- Zhao MS, Heinsch FA, Nemani RR, et al. 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, **95**: 164–176.

作者简介 丁庆福,男,1987 年生,硕士生,主要从事地理信息系统研究。E-mail: 635895306@qq.com

责任编辑 王伟