

# 气候波动和土地覆盖变化对广东省植被净初级生产力的相对影响

姜春<sup>1,2,3</sup>, 吴志峰<sup>2\*</sup>, 程炯<sup>3</sup>, 李少英<sup>2</sup>, 刘庆<sup>4</sup>

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 3. 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650; 4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

**摘要:** 为深入理解人类活动对陆地生态系统的影响, 采用 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型估算广东省 2000、2005 和 2010 年实际植被净初级生产力(Net primary productivity, NPP), 并基于情景模拟法估算气候和土地覆盖类型稳定条件下的植被 NPP, 对气候波动和土地覆盖变化在植被 NPP 变化中的相对贡献进行了研究。结果表明: 太阳辐射对植被 NPP 具有显著的正向控制作用, 气温与植被 NPP 表现为显著负相关, 降水不是该区域植被生长的限制性因子; 各气候因子与植被 NPP 的相关性具有季节和区域差异性。在气候不变条件下, 土地覆盖变化整体上增加了 NPP, 对 NPP 变化的相对贡献与城市扩张格局相类似, 不同生态区存在差异性, 以珠三角区的贡献最大。总之, 气候波动对 NPP 变化的相对贡献较为复杂, 取决于气候因子的波动特征以及与 NPP 的相关性; 其它因子(城市热岛、农耕活动和园林管理等)对 NPP 变化的相对贡献存在很多不确定性, 整体上增加了 NPP。

**关键词:** 净初级生产力; 气候波动; 土地覆盖变化; CASA 模型; 广东省

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.04.006

## Relative Effects of Climatic Fluctuation and Land Cover Changes on Net Primary Productivity of Vegetation in Guangdong Province

JIANG Chun<sup>1,2,3</sup>, WU Zhi-feng<sup>2\*</sup>, CHENG Jiong<sup>3</sup>, LI Shao-ying<sup>2</sup>, LIU Qing<sup>4</sup>

(1. College of Resource and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; 4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Terrestrial net primary productivity (NPP) is an important component of the surface carbon cycle. In order to deeply understand the effects of human activities on terrestrial ecosystem, it is very necessary to evaluate the relative contributions of climatic fluctuation and land cover change to NPP variations. Based on the scenario simulation method, the CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) model was used to estimate actual vegetation NPP of Guangdong Province in the year 2000, 2005 and 2010. The relative contribution of climate fluctuation and land cover change to vegetation NPP change was also discussed. The results showed that there was significantly positive correlation between solar radiation and NPP and significantly negative correlation between temperature and NPP, precipitation is not a limiting factor in vegetation growth, the correlation between each climate factor

收稿日期: 2015-10-08 接受日期: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171446, 41401432); 广州市属高校“羊城学者”科研项目(12A002G)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41171446, 41401432), and the Project of Guangzhou Municipal Universities “Yangcheng Scholars” (Grant No. 12A002G).

作者简介: 姜春(1984~), 女, 博士, 从事景观生态、环境遥感和 GIS 应用研究。E-mail: jiangchun@soil.gd.cn

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gzuwzf@163.com

with NPP displayed seasonal and regional difference. Under the constant climate conditions, the land cover change caused an overall NPP gains and its relative contribution to NPP variations was similar to the urban expansion pattern. Regional differences existed in the four eco-regions with the largest contribution in the Pearl River Delta. Overall, the relative contribution of climatic fluctuation was more complex, which depended on the fluctuation characteristics of climate factors and their correlations with NPP; other influence factors (urban heat island, agricultural activities, gardens management and so on) existed some uncertainties and increased NPP as a whole.

**Key words:** Net primary productivity; Climatic fluctuation; Land cover change; CASA; Guangdong Province

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)指绿色植物通过光合作用把太阳能转化为有机物并扣除同期内植物自养呼吸后的剩余部分,它是生态系统中一切异养生物得以生存和繁衍的物质基础<sup>[1-2]</sup>。陆地植被 NPP 的形成、生物量的积累及其地理分布既与自身的生理特征有关,也与土壤、养分循环、气候和人类活动等有着重要联系<sup>[3-4]</sup>,相对于土壤和养分循环,气候条件和人类活动则随时空变化较大,对植被 NPP 的影响更为复杂<sup>[3]</sup>。

对植被与气候关系的研究表明,气候差异不仅导致不同植被类型的出现,而且会通过影响植被冠层结构、水分蒸腾、叶面积指数等方面对植被 NPP 的形成具有控制作用<sup>[3]</sup>。植被 NPP 对气候因子的响应程度存在区域差异,使得不同区域的主控气候因子不同<sup>[5]</sup>。人类活动对 NPP 的影响主要体现在人类的生产生活或其它改造活动对 NPP 的占用,其中,土地利用/覆盖变化是最具有人类特征的活动形式<sup>[6]</sup>。在过去的两个世纪,DeFries 等<sup>[7]</sup>认为,由于土地覆盖变化,地球生态系统的潜在光合作用能力下降了 5%。近年来,国内外在局部和全球尺度上均开展了有关 NPP 的很多研究,其中,气候变化和以城市扩张为主导的土地利用/覆盖变化对 NPP 变异的影响分析成为了研究的热点和重点<sup>[3-4,8-18]</sup>。

气候变化和人类活动是 NPP 变异的两种主要驱动力,评估不同因子的相对作用是深刻理解 NPP 变化的基本目标<sup>[18]</sup>,也能够帮助我们更好地理解人类活动对生态系统的影响<sup>[19]</sup>。目前,已有采用回归模型和情景模拟的方法评估气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对贡献。但是,由于缺少合理的评估方法,气候变化和人类活动在 NPP 的时空变异中所起的相对影响仍然存在一些不确定性<sup>[17-18]</sup>。

广东省位于中国的南部沿海,受东亚季风和境内复杂地形的影响,区域气候差异和变化显著;同时,广东省作为增长快速的经济发达区,由人类活

动导致的土地利用/覆盖变化明显,使得该区域的植被净初级生产力存在一定的时空变异性,并由此导致错综复杂的生态环境效应。基于此,本文定量评估了气候波动和土地覆盖变化在广东省 NPP 变化中的相对贡献,为深入理解人类活动对陆地生态系统的影响提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

广东省位于中国大陆的南部,西邻广西,北接湖南和江西,东连福建,南临南海,全省设有 21 个地级市,陆地面积为  $1.798 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。广东省地理坐标为  $20^\circ 09' \sim 25^\circ 31' \text{ N}$ ,  $109^\circ 45' \sim 117^\circ 20' \text{ E}$ ,北回归线横贯其中部,地跨亚热带和热带,属东亚海洋性季风气候,温暖湿润,雨量充沛,且雨热同季。1981-2010 年,全省年平均气温  $21.8^\circ \text{C}$ ,分布呈南高北低;平均年降水量 1789.3 mm,呈多中心状不均匀分布。广东省地貌形态复杂,地势北高南低,境内山地、丘陵和平原纵横交错。全省森林覆盖率达 57%,植被类型主要为亚热带常绿阔叶林、热带季雨林、沿海热带红树林及亚热带草坡等,由于受人类活动的长期影响,大部分的地带性原生植被已变成针叶林、针阔混交林或人工林,仅存在部分较稳定的次生林。

### 1.2 数据源概况与预处理

#### 1.2.1 CASA 模型所需数据源

植被 NPP 的估算模型大致有统计模型、过程模型和参数模型 3 种。统计模型参数简单,但估算结果精度低;过程模型生态机理清楚,估算结果较准确,但参数较多且难以获取;以 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型为代表的参数模型考虑了环境条件和植被自身的一些生理特征,且许多

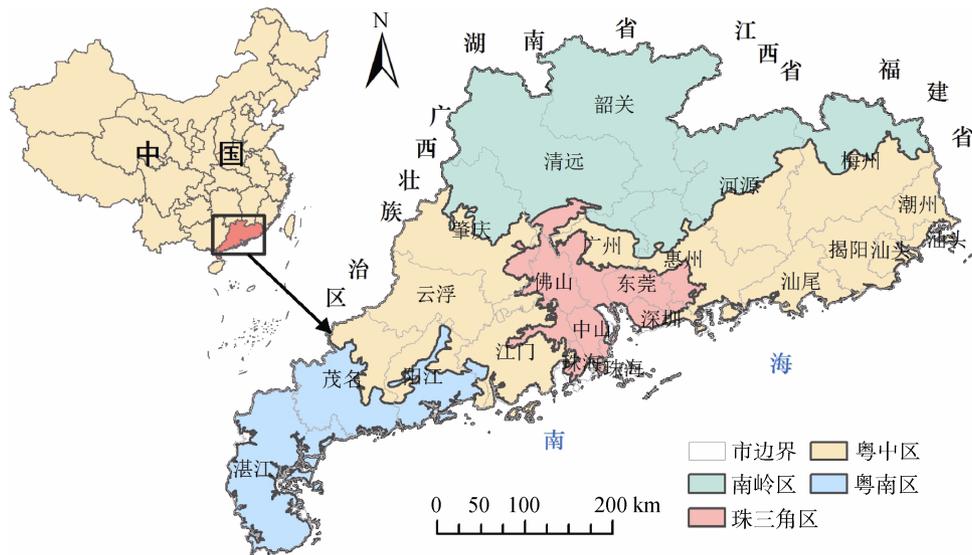


图1 研究区域位置示意图

Fig. 1 Location of studied area

植被参数可利用遥感数据获得, 在国家和省域尺度上应用较多<sup>[3]</sup>。本文采用 CASA 模型估算广东省植被 NPP, 所需数据源包括植被类型数据、土地覆盖分类数据、植被指数数据、地形数据、气象数据、农作物和森林统计数据, 数据年份均为 2000、2005 和 2010 年, 栅格数据分辨率统一处理为 250 m<sup>[19]</sup>。

植被类型数据为 1 km 分辨率中国植被功能型图, 来源于寒区旱区科学数据中心。土地覆盖分类数据采用 FAO LCCS 土地覆盖类型, 来源于中国科学院生态环境研究中心。以土地覆盖分类数据为基础, 结合植被功能型图, 合并成新的植被类型<sup>[19]</sup>。植被指数数据包括 MODIS NDVI 16 天合成产品(MOD13Q1)和 MODIS NDVI 每天产品(MODNDID), 来源于地理空间数据云, 分辨率均为 250 m。对 MOD13Q1 和 MODNDID 采用最大值合成法得到逐月 NDVI 最大值。

地形数据采用 90 m 分辨率的 SRTM 产品, 并提取纬度和经度的栅格空间分布。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网, 包括月太阳总辐射、月日照时数、月平均气温和月降雨量。通过建立太阳辐射与其影响因子(纬度、海拔和日照时数)、气温和降水与其影响因子(纬度、经度和海拔)之间的多元非线性回归模型, 获取各气象因子的栅格空间分布<sup>[19]</sup>。

农作物统计数据为各市农作物产量, 并转化为各市耕地 NPP; 林业统计数据为各市森林生长量和消耗量, 借助生物量估计回归方程获取各市森林

NPP<sup>[19]</sup>。

### 1.2.2 生态功能分区数据

根据生态系统类型和地理特征等自然条件, 广东省划分为 4 个生态区(图 1): 南岭山地丘陵常绿阔叶林生态区(南岭区)、粤中部山地丘陵常绿阔叶林生态区(粤中区)、珠江三角洲城镇与城郊农业生态区(珠三角区)和粤南部热带季雨林与雨林生态区(粤南区)。该数据来源于中国生态系统评估与生态安全数据库。

## 1.3 方法

### 1.3.1 基于 CASA 模型的 NPP 估算

CASA 模型由植被所吸收的光合有效辐射(APAR,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ )和实际光能利用率( $\epsilon$ ,  $\text{g C MJ}^{-1}$ )两个变量确定<sup>[20]</sup>。APAR 取决于光合有效辐射(PAR,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ )与植被对太阳有效辐射的吸收比例(FPAR), PAR 是太阳辐射总量(SOL,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ )与植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例(通常取 0.5)的乘积; 光能利用率指植物把所吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率, 现实条件下会受到温度和水分的影响, 可由理想条件下的最大光能利用率( $\epsilon_{\max}$ ,  $\text{g C MJ}^{-1}$ )与温度和水分胁迫因子的乘积( $T_{\epsilon} \times W_{\epsilon}$ )确定<sup>[19]</sup>, 即公式(1)。设计流程图见图 2。

$$NPP(x, t) = SOL(x, t) \times 0.5 \times FPAR(x, t) \times \epsilon_{\max} \times T_{\epsilon} \times W_{\epsilon}$$

式中,  $NPP(x, t)$ ( $\text{g C m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ )表示植被在像元  $x$

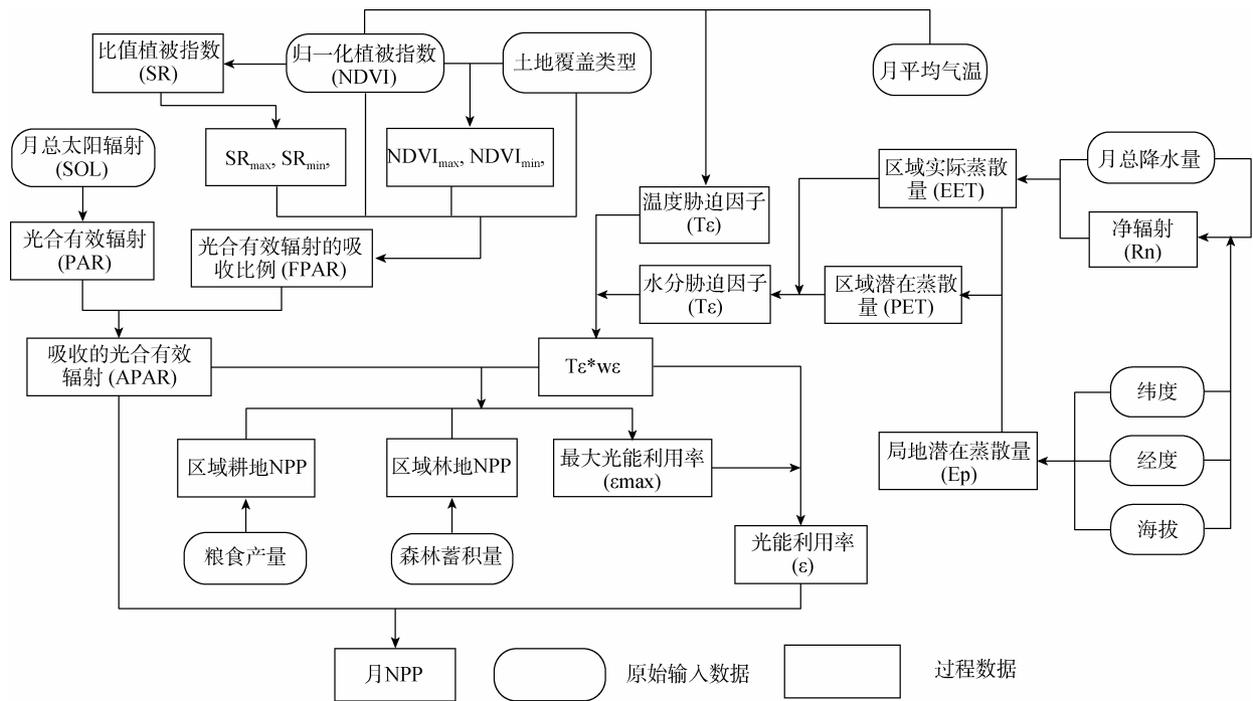


图 2 CASA 模型设计流程图

Fig. 2 Design flow chart of CASA model

位置  $t$  月份的净初级生产力。

以植被类型为基础，在一定范围内，FPAR 与 NDVI 和由 NDVI 得到的比值植被指数(SR)均存在线性关系。 $T_e$  可表示为月平均温度和各植被类型生长的最适宜温度的函数； $W_e$  可采用朱文泉等<sup>[3]</sup>改进的水分胁迫因子估算方法。 $\epsilon_{max}$  与植被类型、植被覆盖度的空间尺度和均匀性均有着密切联系，通过建立广东省各市农作物产量转化的 NPP 值与公式(1)中除  $\epsilon_{max}$  之外的其它变量的乘积之间的误差函数，根据误差最小的原则模拟出农作物的  $\epsilon_{max}$ ；分别采用朱文泉等<sup>[3]</sup>和 Pei 等<sup>[15]</sup>对各森林类型  $\epsilon_{max}$  的模拟值，将估算出的 NPP 与各市森林生长量转化的 NPP 值进行对比，结果表明：利用朱文泉等<sup>[3]</sup>和 Pei 等<sup>[15]</sup>的  $\epsilon_{max}$  的平均值估算的结果与森林资料估算出的 NPP 更接近，因此，森林类型的  $\epsilon_{max}$  采用朱文泉等<sup>[3]</sup>和 Pei 等<sup>[15]</sup>估算的  $\epsilon_{max}$  的平均值。CASA 模型的具体实现见参考文献<sup>[19]</sup>。

1.3.2 气候波动和土地覆盖变化对 NPP 的相对贡献

参考前人的研究思路<sup>[17-18,21]</sup>，采用情景模拟法分别估算了 2000-2005 年、2005-2010 年气候波动和土地覆盖变化对 NPP 变化的相对贡献。以 2000-2005 年为例，气候波动对 NPP 的相对贡献量 ( $\Delta\text{Clim.NPP}$ )表示为实际 NPP 与气候不变条件下估

算的 NPP 之间的差异；气候不变条件下估算 NPP，认为 2000-2005 年只有土地覆盖变化，用 2000 年的气候条件代替 2005 年的气候条件。土地覆盖变化对 NPP 的相对贡献量( $\Delta\text{Lucc.NPP}$ )表示为实际 NPP 与土地覆盖不变条件下估算的 NPP 之间的差异；土地覆盖不变条件下估算 NPP，认为 2000-2005 年只有气候变化，土地覆盖变化部分的 NDVI 用 2000 年的 NDVI 来代替。其它因子对 NPP 的相对贡献量( $\Delta\text{Other.NPP}$ )表示为气候和土地覆盖均不变条件下估算的 NPP 之和与变化初期和末期实际 NPP 之和之间的差异。各因子的相对贡献比例可由下式来表达。

$$\text{Contr.Clim} = \frac{|\Delta\text{Clim.NPP}|}{|\Delta\text{Clim.NPP}| + |\Delta\text{Lucc.NPP}| + |\Delta\text{Other.NPP}|} \times 100\%$$

$$\text{Contr.Lucc} = \frac{|\Delta\text{Lucc.NPP}|}{|\Delta\text{Clim.NPP}| + |\Delta\text{Lucc.NPP}| + |\Delta\text{Other.NPP}|} \times 100\%$$

$$\text{Contr.Other} = 1 - \text{Contr.Clim} - \text{Contr.Lucc}$$

1.3.3 相关分析

在 SPSS 软件中计算广东省 2000、2005 和 2010 年的平均 NPP 与太阳辐射、气温和降水 3 种气候因子的简单相关系数和偏相关系数。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同土地覆盖类型的实际植被 NPP

通过比较 NPP 模拟值与实测生物量转换得到的 NPP 值对 NPP 进行验证, 模拟值与实测值间的平均误差为 23.69%, 相关系数 R 为 0.78, 说明模拟结果可靠<sup>[19]</sup>。不同土地覆盖类型的实际年均 NPP 值存在差异(图 3), 城市用地和湿地的 NPP 值最低, 其次是未利用地、耕地和草地, 林地的 NPP 值最高。没有植被覆盖的城市用地、湿地和未利用地的 NPP 值原则上为 0, 但由于受遥感数据空间分辨率的影响, 没有植被覆盖的纯净像元极少存在<sup>[3]</sup>, 尤其是对于城市绿化率较高的广东省, 山区县村镇建设用地零散, 大面积的基塘和沼泽等湿地周边和内部均生长有植物, 加之统计误差, 使得混有植被的城市用地、湿地和未利用地具有相对较低的 NPP 值。

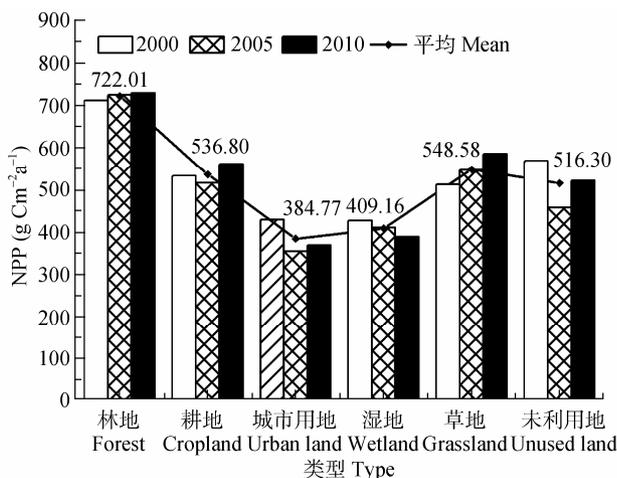


图 3 2000–2010 年广东省不同土地覆盖类型的年均 NPP

Fig. 3 Annual mean NPP of different land cover types in Guangdong from 2000 to 2010

### 2.2 气候因子与 NPP 变异的相关分析

从表 1 和表 2 可看出, 广东省植被 NPP 与太阳辐射呈显著正相关性且相关系数最大, 这与前人的研究结果一致, 太阳辐射是影响长江以南大部分地区植被 NPP 的主要因素<sup>[4]</sup>。植被 NPP 与太阳辐射具有季节相关性, 相关系数在夏季最大, 得益于夏季良好的水热组合和光照条件; 偏相关系数却在冬季最大, 除去气温和降水的影响, 植被生长可能在冬季更需要充足的太阳辐射。植被 NPP 与太阳辐射的区域相关性差异主要与各生态区的地理位置和

植被类型组成有关。

研究表明植被 NPP 随温度升高而增加<sup>[18]</sup>, 广东省植被 NPP 与气温却呈显著负相关性, 说明气温升高反而会降低植被 NPP, 主要归因于广东省地处亚热带和热带, 气温太高会加剧植物的呼吸作用和蒸腾速率, 造成植株失水及气孔关闭, 进而导致光合速率下降而不利于 NPP 的形成。植被 NPP 与气温也具有季节和区域相关性, 在季节上, 夏季较高的气温限制了植被生长, 如果没有降水和光照的影响, 气温对植被 NPP 的负向控制作用更大; 在区域上, 珠三角区和粤中区植被 NPP 与气温的负相关性较大, 说明植被生长除了与该区所处的气候带有关, 也与区域城市化程度有关, 主要受城市化带来的热环境效应的影响。

与太阳辐射和气温相比, 整体上, 广东省植被 NPP 与降水呈负相关性和正偏相关性且相关系数较小, 说明降水不是该区域植被生长的限制性因子, 并同时受到其它因子的干扰。植被 NPP 与降水的季节和区域相关性最为复杂, 在季节上, 植被 NPP 与降水在秋季和冬季呈正相关性, 在冬季却呈显著负偏相关性, 可能原因是, 冬季降水量虽少, 但连绵的阴雨天气会使植物受到光照胁迫; 在区域上, 南岭区植被 NPP 与降水呈正相关和偏相关性, 因为该区域远离沿海, 降水量相对较少, 水分是植物生长的绝对制约条件; 充足的降水一般会增加植被 NPP<sup>[18]</sup>, 但过多的降水量反而会抑制植被生长, 这在经常受强降雨影响的粤南区有所体现。

### 2.3 土地覆盖变化引起的 NPP 损失/增加

表 3 和表 4 分别为在气候不变条件下的广东省 2000–2005、2005–2010 年土地覆盖变化对应的总 NPP 变化, 通过对平均 NPP 进行面积加权而得到。土地覆盖变化对 NPP 的影响具有两面性, 高生产力的土地覆盖类型转换为低生产力的土地类型会造成 NPP 的损失, 反之, 会带来 NPP 的增加。2000–2005 年, NPP 总增加量为 0.265 Tg C (1 Tg = 10<sup>12</sup> g), NPP 总损失量为 0.172 Tg C, 净增加量为 0.093 Tg C; 2005–2010 年, NPP 总增加量为 0.22 Tg C, NPP 总损失量为 0.215 Tg C, 净增加量为 0.005 Tg C。整体上, 土地覆盖变化增加了 NPP, 2005–2010 年 NPP 增加量较 2000–2005 年减少了 94.85%, 说明气候不变条件下由土地覆盖变化造成的 NPP 损失程度加重。

表 1 广东省不同季节植被年均 NPP 与气候因子的相关关系

Table 1 Correlation of seasonal annual mean NPP and climate factors in Guangdong Province

影响因子 Impact factor	简单相关系数 Simple correlation coefficient					偏相关系数 Partial correlation coefficient				
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Full year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	全年 Full year
太阳辐射 Solar radiation	0.34**	0.44**	0.39**	0.21**	0.37**	0.36**	0.32**	0.57**	0.64**	0.56**
气温 Temperature	-0.18**	-0.52**	-0.20**	-0.15**	-0.30**	-0.24**	-0.43**	-0.59**	-0.59**	-0.53**
降水 Precipitation	-0.16**	-0.07**	0.22**	0.12**	-0.09**	0.15**	0.12**	0.07**	-0.34**	0.10**

\*\* :  $P < 0.01$ .

表 2 广东省不同生态区植被年均 NPP 与气候因子的相关关系

Table 2 Correlation of annual mean NPP in different eco-regions and climate factors in Guangdong Province

影响因子 Impact factor	简单相关系数 Simple correlation coefficient				偏相关系数 Partial correlation coefficient			
	南岭区 Nanling region	粤中区 Yuezhong region	珠三角区 Pear River Delta	粤南区 Yuenan region	南岭区 Nanling region	粤中区 Yuezhong region	珠三角区 Pear River Delta	粤南区 Yuenan region
太阳辐射 Solar radiation	0.46**	0.47**	0.37**	0.14**	0.38**	0.41**	0.57**	0.32**
气温 Temperature	-0.24**	-0.55**	-0.51**	-0.16**	-0.22**	-0.51**	-0.67**	-0.45**
降水 Precipitation	0.23**	-0.02	0.23**	-0.15**	0.32**	0.14**	-0.08	-0.21**

\*\* :  $P < 0.01$ .

2000–2005 年，整体上，林地、城市用地和湿地转换造成 NPP 的损失，耕地、草地和未利用地转换增加了 NPP。林地的 NPP 值最高，除草地外，林地向其它土地类型转换均造成 NPP 的损失。调查发现，转换为草地的林地主要为分布在粤东潮汕地区的稀疏林，转换的草地多是覆盖度较高的草丛，与覆盖度较低的稀疏林相比，草地的 NPP 值可能会更高；转换为草地的林地类型部分为常绿阔叶林，造成 NPP 的损失，由于转换面积较少，林地转换为草地整体上还是增加了 NPP。耕地被城市用地侵占造成 NPP 损失为 0.028 Tg C，受“退耕还林”政策的影响，耕地转换为林地增加了 0.181 Tg C NPP。城市用地的转换面积较小，整体上造成的 NPP 损失为 0.001 Tg C。受“三旧改造”政策的影响，向耕地转换

的城市用地主要是废弃的工业用地和居住地，这些土地类型在改造前都会有树木等植被分布，改造为耕地以后，由于耕地质量较差和生产力较低，造成 NPP 的损失。广东省具有丰富的湿地资源，湿地向城市用地转换造成的 NPP 损失为 0.009 Tg C，向林地转换增加了 0.005 Tg C NPP。向耕地转换的湿地类型主要是坑塘，如珠三角区的桑基鱼塘，通常具有较高的生物多样性和生产力，转换为耕地后，植被 NPP 略有损失。草地和未利用地转换整体上分别增加了 0.005 Tg C 和 0.068 Tg C NPP。

2005–2010 年，林地转换造成的 NPP 损失最大，其它土地覆盖类型转换整体上均带来了 NPP 的增加。地和未利用地转换造成的 NPP 损失分别为 0.05 Tg C 和 0.04 Tg C。耕地转换整体上增加了 0.063 Tg C NPP，

表 3 广东省 2000–2005 年土地覆盖变化对应的总 NPP 变化(Tg C)

Table 3 NPP change corresponding with land cover change from 2000 to 2005 in Guangdong Province

2005	2000							总和 Total
	林地 Forest	耕地 Cropland	城市用地 Urban land	湿地 Wetland	草地 Grassland	未利用地 Unused land		
林地 Forest	-	0.1814	0.0002	0.0052	0.0053	0.0678	0.2598	
耕地 Cropland	-0.0398	-	-0.0001	-0.0001	0.0001	0.0007	-0.0393	
城市用地 Urban land	-0.0272	-0.0284	-	-0.0087	-	-0.0003	-0.0646	
湿地 Wetland	-0.0016	0.0003	-	-	-	-0.0003	-0.0016	
草地 Grassland	0.0038	-0.0001	-	-	-	-	0.0038	
未利用地 Unused land	-0.0602	-0.0034	-0.0009	-0.0005	-	-	-0.065	
总和 Total	-0.1250	0.1497	-0.0008	-0.0042	0.0055	0.0679	0.0931	

其中转换为林地增加了 0.093 Tg C NPP, 转换为城市用地和湿地分别损失了 0.025 Tg C 和 0.005 Tg C NPP, 向草地和未利用地转换引起的 NPP 变化不大。城市用地转换造成的 NPP 损失最少, 仅为 0.0002 Tg C。湿地转换整体上增加了 0.011 Tg C NPP, 其中, 向耕地

转换增加的 NPP 为 0.013 Tg C, 向城市用地转换损失了 0.005 Tg C NPP。草地转换的面积较少, 整体上增加了 0.004 Tg C NPP。未利用地转换带来的 NPP 增加量是所有转换类型中最高的, 为 0.106 Tg C, 其中, 有 95.26%来自未利用地向林地的转换。

表 4 广东省 2005-2010 年土地覆盖变化对应的总 NPP 变化(Tg C)

Table 4 NPP change corresponding with land cover change from 2005 to 2010 in Guangdong Province

2010	2005						总和 Total
	林地 Forest	耕地 Cropland	城市用地 Urban land	湿地 Wetland	草地 Grassland	未利用地 Unused land	
林地 Forest	-	0.0933	-	0.0035	0.0037	0.1009	0.2014
耕地 Cropland	-0.0495	-	0.0001	0.0133	-	0.0018	-0.0343
城市用地 Urban land	-0.0826	-0.0255	-	-0.0054	0.0002	0.0028	-0.1105
湿地 Wetland	-0.0059	-0.0047	-	-	-	0.0002	-0.0104
草地 Grassland	-0.0017	0.0000	-	-	-	0.0003	-0.0014
未利用地 Unused land	-0.0396	-0.0002	-	-0.0001	0.0000	-	-0.0399
总和 Total	-0.1793	0.0629	0.0001	0.0113	0.0039	0.1059	0.0048

### 2.4 气候波动和土地覆盖变化对 NPP 变化的相对贡献

理解了广东省植被 NPP 与气候因子的相关性以及气候不变条件下土地覆盖变化引起的 NPP 损失/增加。现实条件下, 实际植被 NPP 是气候、下垫面覆盖和其它因子(城市热岛、农耕活动、园林管理等)相互作用的结果<sup>[3]</sup>。

从表 5 可看出, 与气候波动和其它因子相比, 土地覆盖变化对广东省 NPP 变化的相对贡献最小, 相对贡献比例仅在 0.2%左右。不同生态区土地覆盖变化的相对贡献存在差异, 整体上与城市扩张格局相类似, 在珠三角区贡献最大且贡献量为负值, 造成 NPP 的损失, 是区域 NPP 发生变化的重要驱动因子, 主要归因于珠三角区快速的城市扩张过程;

土地覆盖变化在其它 3 个生态区增加了 NPP 值, 其中粤南区增加最多, 南岭区和粤中区相当, 均与土地开发强度有关。

气候波动对 NPP 变化的相对贡献量为负值, 在 2000-2005 年和 2005-2010 年的相对贡献比例分别为 50.91%和 33.58%, 主要和气候因子在 2000、2005 和 2010 年的波动特征及其与 NPP 的相关性有关, 太阳辐射在 2000 年明显高于 2005 和 2010 年, 2010 年的气温高于 2000 和 2005 年。不同生态区气候波动对 NPP 变化的相对贡献差异较大, 2000-2005 年珠三角区受气候波动的强度最大, 2005-2010 年受气候波动最大的是南岭区, 表明气候波动对 NPP 变化的相对贡献较为复杂。

表 5 气候波动、土地覆盖变化和其它因子对广东省 NPP 变化的相对贡献

Table 5 Relative contribution of climatic variability, LUCC and other factors to the NPP change in Guangdong Province

	时间 Time	影响因子 Influence factor	广东省	南岭区	粤中区	珠三角区	粤南区
			Guangdong Province	Nanling region	Yuezhong region	Pear River Delta	Yuenan region
相对贡献量 Relative contribution value (g C m <sup>-2</sup> )	2000-2005	土地覆盖变化 Land cover change	0.31	0.53	0.62	-3.4	2.01
		气候波动 Climate fluctuation	-77.05	-96.79	-73.36	-73.31	-37.02
		其它因子 Other factors	73.98	81.12	82.02	3.08	81.20
	2005-2010	土地覆盖变化 Land cover change	0.06	-0.75	0.57	-1.89	2.08
		气候波动 Climate fluctuation	-12.00	-33.77	-13.90	-1.48	43.54
		其它因子 Other factors	23.68	14.77	28.16	12.78	41.44
相对贡献比例 Relative contribution ratio (%)	2000-2005	土地覆盖变化 Land cover change	0.20	0.30	0.40	4.26	1.68
		气候波动 Climate fluctuation	50.91	54.24	47.03	91.88	30.79
		其它因子 Other factors	48.88	45.46	52.57	3.87	67.54
	2005-2010	土地覆盖变化 Land cover change	0.17	1.51	1.33	11.72	2.38
		气候波动 Climate fluctuation	33.58	68.52	32.61	9.17	50.01
		其它因子 Other factors	66.26	29.96	66.07	79.11	47.60

其它因子对 NPP 变化的相对贡献指不能被土地覆盖变化和气候波动所解释的变化, 贡献量为正值, 2000–2005 年和 2005–2010 年的相对贡献比例分别为 48.88% 和 66.26%, 表明在评估人类和自然对 NPP 变化的影响中存在很多不确定性<sup>[18]</sup>。2000–2005 年, 其它因子在粤南区具有最大的相对贡献, 可能是受到了灌溉、施肥、耕作方式等农耕活动的影响; 2005–2010 年, 珠三角区受其它因子的影响最大, 可能是城市热岛、城市园林管理等因素造成。

### 3 结论和讨论

从广东省植被 NPP 与气候因子的相关分析可知, 太阳辐射对植被 NPP 具有显著的正向控制作用, 气温与植被 NPP 表现为显著负相关, 降水不是该区域植被生长的限制性因子, 各气候因子与植被 NPP 的相关性具有季节和区域差异性。在现实情况下, 任何两个变量间的相互关系总会受到其他因素的干扰, 植被 NPP 是热量、气温、水分和地表覆盖共同作用的结果, 定量评估气候波动和土地覆盖变化对 NPP 变化的相对贡献有助于深入理解各因子对 NPP 的影响作用。

在气候不变条件下, 不同土地覆盖类型间的转换会引起 NPP 的损失/增加。土地覆盖变化整体上增加了 NPP, 2000–2005 年和 2005–2010 年分别增加了 0.093 Tg C 和 0.005 Tg C NPP; 土地覆盖变化对 NPP 变化的相对贡献整体上与城市扩张格局相类似, 不同生态区存在差异性, 在珠三角区的贡献最大, 主要归因于珠三角快速的城市扩张过程。气候波动对 NPP 变化的相对贡献较为复杂, 主要归因于太阳辐射、气温和降水 3 种气候因子在 2000、2005 和 2010 年的波动特征以及与 NPP 的相关性。其它因子主要指城市热岛、农耕活动和园林管理等, 对 NPP 变化的相对贡献存在很多不确定性, 整体上是增加了 NPP。

实际植被 NPP 反映了现有地表覆盖环境和气候条件下的 NPP, 没有将气候波动和土地覆盖变化等影响因子分开来考虑。在评估气候波动和土地覆盖变化对 NPP 变化的相对贡献时, 均是基于现有下垫面覆盖环境, 在气候和地表覆盖分别不变条件下估算的 NPP, 模拟得到的土地覆盖变化对 NPP 的相对贡献量是现有土地覆盖类型间相互转换造成的 NPP 损失/增加, 更真实地反映了土地覆盖变化对 NPP 影响的两面性。一方面, 高生产力的土地覆盖类型向

低生产力的土地覆盖类型转化会造成 NPP 的损失, 如城市用地对林地和耕地等植被的侵占; 另一方面, 低生产力的土地覆盖类型向高生产力的土地覆盖类型转化会带来 NPP 的增加, 如退耕还林, 三旧改造等。因此, 分别考虑气候波动和土地覆盖变化对 NPP 的影响在人类活动对陆地生态系统和碳循环的影响进行建模方面具有潜在的应用价值<sup>[18,22]</sup>。

本研究也存在一些不确定性和不足之处。不确定性体现在 NPP 的估算精度上, 主要受限于遥感数据空间分辨率、同期野外实测资料缺乏和模型本身存在的误差。不足之处是: 为了保证植被类型的精度, 本文采用了 2000、2005 和 2010 年的土地覆盖类型数据, 因此只估算了三期 NPP 值, 只能在区域整体上探讨气候波动和土地覆盖变化对 NPP 的影响, 无法在空间像元尺度体现 NPP 与气候因子和城市化的时空关联性。目前, 随着人口和经济的增长, 城市扩张也给以珠三角区为代表的快速城市化区域带来了许多生态环境问题, 强烈干扰着植被和土壤两大陆地生态系统碳库<sup>[22]</sup>。NPP 作为生态系统状况的一个指标, 量化研究城市化对 NPP 的影响对于城市的生态环境建设具有重要意义, 在后续的研究中, 可以探讨土地发展、人口和经济增长与 NPP 的时空关联性。

### 参考文献

- [1] CROWTHER J M, OKE T R, MCNAUGHTON K G, et al. The micrometeorology of the urban forest: Discussion [J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 1989, 324(1223): 348–349. doi: 10.1098/rstb.1989.0051.
- [2] CRAMER W, KICKLIGHTER D W, BONDEAU A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results [J]. *Glob Change Biol*, 1999, 5(S1): 1–15. doi: 10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x.
- [3] ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2007, 31(3): 413–424. doi: 10.17521/cjpe.2007.0050.  
朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413–424. doi: 10.17521/cjpe.2007.0050.
- [4] GUO Z X, WANG Z M, ZHANG B, et al. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006 [J]. *Resour Sci*, 2008, 30(8): 1226–1235.  
国志兴, 王宗明, 张柏, 等. 2000 年–2006 年东北地区植被 NPP 的时

- 空特征及影响因素分析 [J]. 资源科学, 2008, 30(8): 1226–1235.
- [5] LIU C Y, DONG X F, LIU Y Y, et al. Spatial differences of net primary productivity in Gansu Province [J]. Chin Popul Resour Environ, 2014, 24(1): 163–170. doi: 10.3969/j.issn.1002-2104.2014.01.023.
- 刘春雨, 董晓峰, 刘英英, 等. 甘肃省净初级生产力时空变化特征 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 163–170. doi: 10.3969/j.issn.1002-2104.2014.01.023.
- [6] HABERL H. Human appropriation of net primary production as an environmental indicator: Implications for sustainable development [J]. Ambio, 1997, 26(3): 143–146.
- [7] DEFRIES R S, FIELD C B, FUNG I, et al. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity [J]. Glob Biogeochem Cycl, 1999, 13(3): 803–815. doi: 10.1029/1999GB900037.
- [8] SUN Z G, YANG Q, LI J L. The influence of land use and cover change on net primary productivity of middle-sized and small cities [J]. Chin Agric Sci Bull, 2012, 28(15): 291–296. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.15.055.
- 孙政国, 杨齐, 李建龙. 土地利用与土地覆盖变化对中小城市净初级生产力的影响 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(15): 291–296. doi: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.15.055.
- [9] IMHOFF M L, TUCKER C J, LAWRENCE W T, et al. The use of multisource satellite and geospatial data to study the effect of urbanization on primary productivity in the United States [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2000, 38(6): 2549–2556. doi: 10.1109/36.885202.
- [10] MILESI C, ELVIDGE C D, NEMANI R R, et al. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the Southeastern United States [J]. Remote Sens Environ, 2003, 86(3): 401–410. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00081-6.
- [11] IMHOFF M L, BOUNOUA L, DEFRIES R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States [J]. Remote Sens Environ, 2004, 89(4): 434–443. doi: 10.1016/j.rse.2003.10.015.
- [12] ZHAO M S, RUNNING S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. Science, 2010, 329(5994): 940–943. doi: 10.1126/science.1192666.
- [13] ZHANG F M, JU W M, CHEN J M, et al. Characteristics of terrestrial ecosystem primary productivity in East Asia based on remote sensing and process-based model [J]. Chin J Appl Ecol, 2012, 23(2): 307–318.
- 张方敏, 居为民, 陈镜明, 等. 基于遥感和过程模型的亚洲东部陆地生态系统初级生产力分布特征 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 307–318.
- [14] MAO D H, WANG Z M, HAN J X, et al. Spatio-temporal pattern of net primary productivity and its driven factors in Northeast China in 1982–2010 [J]. Sci Geogr Sin, 2012, 32(9): 1106–1111.
- 毛德华, 王宗明, 韩信兴, 等. 1982–2010年中国东北地区植被NPP时空格局及驱动因子分析 [J]. 地理科学, 2012, 32(9): 1106–1111.
- [15] PEI F S, LI X, LIU X P, et al. Assessing the differences in net primary productivity between pre- and post-urban land development in China [J]. Agri For Met, 2013, 171–172: 174–186. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.12.003.
- [16] TIAN G J, QIAO Z. Assessing the impact of the urbanization process on net primary productivity in China in 1989–2000 [J]. Environ Pollut, 2014, 184: 320–326. doi: 10.1016/j.envpol.2013.09.012.
- [17] EVANS J, GEERKEN R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. J Arid Environ, 2004, 57(4): 535–554. doi: 10.1016/S0140-1963(03)00121-6.
- [18] WU S H, ZHOU S L, CHEN D X, et al. Determining the contributions of urbanisation and climate change to NPP variations over the last decade in the Yangtze River Delta, China [J]. Sci Total Environ, 2014, 472: 397–406. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.128.
- [19] JIANG C, WU Z F, CHENG J, et al. Impacts of urbanization on net primary productivity in the Pearl River Delta, China [J]. Int J Plant Prod, 2015, 9(4): 581–598.
- [20] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. Glob Biogeochem Cycl, 1993, 7(4): 811–841. doi: 10.1029/93GB02725.
- [21] NIZEYIMANA E L, PETERSEN G W, IMHOFF M L, et al. Assessing the impact of land conversion to urban use on soils with different productivity levels in the USA [J]. Soil Sci Soc Amer J, 2001, 65(2): 391–402. doi: 10.2136/sssaj2001.652391x.
- [22] WU Z F, HUANG Y H, JIANG C. Soil and vegetation carbon storage and its spatial pattern analysis of Guangzhou City, China [J]. J Guangzhou Univ (Nat Sci), 2014, 13(3): 73–79.
- 吴志峰, 黄银华, 姜春. 广州市土壤与植被碳蓄积及其空间格局分析 [J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2014, 13(3): 73–79.