1981 ~ 2000 年广东省净初级生产力的时空格局

刘海桂[1,2],唐旭利[1],周国逸[1,*],刘曙光[3]

(1. 中国科学院华南植物园,广州 510650;2. 中国科学院研究生院,北京 100049;
3. 美国地质资源调查局地球资源观测系统数据中心,美国苏福尔斯市 57198)

摘要:采用 Global production efficiency model (GLO-PEM)结果,分析了 1981 ~ 2000 年期间广东省 NPP 的时空动态,从全省、地区以及地级市 3 个空间尺度分别讨论了广东省 NPP 分布格局及动态。并对广东省 3 种典型森林类型:阔叶林、针叶林和混交林 20a NPP 的动态进行了分析。结果表明,1981 ~ 2000 年,广东省平均 NPP 为 (480 ± 407) g/(m²·a),NPP 的年间变化较大。20 世纪 80 年代早期 (980 ~ 1985),广东省 NPP 相对较低,为 (443 ± 57) g/(m²·a),80 年代后期 (986 ~ 1990) NPP 达到最大,为 (534 ± 121) g/(m²·a),90 年代前期 (991 ~ 1995) 有所降低,降至 (460 ± 89) g/(m²·a),90 年代后期 (996 ~ 2000 年) 又有一定回升,达到 (484 ± 74) g/(m²·a)。全省 NPP 分布呈现明显的地域性差异,表现为西南沿海地区 > 东南沿海地区 > 内陆地区的趋势,这主要是由 3 个地区的植被组成、水热条件以及农田的分布状况决定的。根据 1981 ~ 1985 年、1986 ~ 1990 年、1991 ~ 1995 年、1996 ~ 2000 年 4 个阶段 NPP 的动态把全省 21 个地级市划分为 3 种类型:NPP 稳定型,包括韶关、清远、河源等 12 个市;NPP 增长型,包括潮州、揭阳、汕尾、和湛江 4 个市,分别以 59、39、45、46 g/m²·5a 的速率增加;以及 NPP 下降型,包括佛山、中山、深圳、东莞、珠海 5 个市,NPP 分别以 114、113、87、75、75 g/m²·5a 的速率下降,这种下降和土地覆盖/利用方式的改变有密切关系。3 种主要森林类型阔叶林、针叶林、混交林 20a 平均 NPP 分别为 (391 ± 372) g/(m²·a)、(364 ± 390) g/(m²·a) 和 (704 ± 450) g/(m²·a),其中混交林 NPP 与阔叶林 NPP、针叶林 NPP 差异显著 ($P < 0.05$)。

关键词:净初级生产力;GLO-PEM;时空动态;广东省

文章编号:1000-0933 (2007) 10-4065-10 **中图分类号**:Q148,Q149 **文献标识码**:A

Spatial and temporal patterns of net primary productivity in the duration of 1981 — 2000 in Guangdong, China

LIU Hai-Gui[1,2], TANG Xu-Li[1], ZHOU Guo-Yi[1,*], LIU Shu-Guang[3]

1 *South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

3 *USGS Center for Earth Resources Observation and Science (EROS), Sioux Falls* 57198, *America*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (0): 4065 ~ 4074.**

Abstract: The knowledge of net primary production (NPP) dynamics at regional scale will help to understand terrestrial carbon cycling, especially with respect to land use and global climate change. Guangdong province has high plant growth potential because of plenty of light, heat, and water resources in this region. Forest coverage increased significantly from less than 30% in the early 1980s to approximately 60% in 2000 owing to the launching of the "Greening Guangdong in 10 years", a provincial afforestation and reforestation project started in 1985. Meanwhile, economy growth has been fast in

基金项目:中国科学院资源环境领域野外台站研究基金资助项目;中国科学院王宽诚科研奖金资助项目

收稿日期:2006-08-17;**修订日期**:2007-06-14

作者简介:刘海桂 (981 ~),女,青海平安县人,硕士,主要从事陆地生态系统净初级生产力模拟研究. E-mail:hgliu@scbg.ac.cn

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail:gyzhou@scib.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by Establishment of digital desk of Dinghushan and ecosystem simulation based on station scale. The fund for Field Station in Resource and Environment Fields, Chinese Academy of Sciences. The author gratefully acknowledges the support of K. C. Wong Education Foundation, HongKong

Received date: 2006-08-17; **Accepted date**: 2007-06-14

Biography: LIU Hai-Gui, Master, mainly engaged in modeling terrestrial net primary productivity. E-mail: hgliu@scbg.ac.cn

Guangdong province during the past 20 years. Long-term spatial and temporal NPP dynamics in Guangdong province are not well-known. To fill this knowledge gap, the spatial and temporal patterns of annual NPP from 1981 to 2000, derived from the global production efficiency model (GLO-PEM), were analyzed in this study. NPP patterns were compared at three spatial scales (i.e., province, region, and city) and among three major forest types (i.e., broadleaf, coniferous, and mixed). The results showed that for the entire province annual NPP varied between (360 ± 431) and (626 ± 471) g/(m^2·a), with a mean value of (480 ± 407) g/(m^2·a). NPP increased to the maximum value (534 ± 121 g/(m^2·a)) in late 1980s (986 −1990) while decreased in early 1990s (991 −1995), and then recovered slightly in late 1990s (996 −2000). NPP differed distinctly across geographic regions, with the highest in the southwest coastal region, followed by the southeast coastal region, and the lowest in the inner land region. The differences were probably caused by vegetation composition, heat and water resources, and the distribution of the cropland. NPP dynamics of 21 cities were divided into three types. NPP kept stable in 12 cities including Shaoguan, Qingyuan, and Meizhou *etc*. NPP increased in Chaozhou, Shanwei, Zhanjiang and Jieyang, and decreased significantly ($p < 0.05$) in 5 cities (i.e., Foshan, Zhongshan, Shenzhen, Dongguan and Zhuhai). The decrease of NPP in these 5 cites can partly be explained by land cover and land use changes (i.e., urbanization) driven by the economy development in the Pearl River Delta. NPP varied among the three major forest types. The mixed forest had the highest NPP, followed by the broadleaf forest and the conifer forest. Long-term mean NPP were (364 ± 390) g/(m^2·a), (391 ± 372) g/(m^2·a), and (704 ± 450) g/(m^2·a) in the conifer, the broadleaf, and the mixed forest, respectively.

Key Words: NPP; GLO-PEM; spatial and temporal dynamics; Guangdong Province

作为碳循环的重要组成部分,NPP 的研究是阐明全球变化与陆地生态系统相互作用机制的有效途径,因此,NPP 的时空动态成为联合国气候变化框架委员会(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCC)谈判的重要科学依据之一[1]。陆地生态系统与气候系统通过地面大气之间的能量平衡、水汽交换和生物地球化学循环相互影响,相互作用[2]。全球气候变化毫无疑问地对陆地生态系统产生了重要的影响,在此前提下,对全球或区域尺度 NPP 的精确估算被认为是正确了解气候变化背景下全球 C 循环动态的有效途径[3]。自国际生物圈计划(IBP)以及国际地圈生物圈计划(IGBP)开展以来,NPP 的估算方法经历了(1)气候相关模型,主要通过 NPP 与温度、降水及蒸散的回归关系估算 NPP[4];(2)半理论半经验模型,如筑后模型[5]等;(3)过程模型,如 CASA 模型[6],C-FIX 模型[7],BEPS 模型[8]等阶段。对 NPP 的估算受所采用方法的不同而存在较大的差异[9],降低模型估算结果的不确定性,提高模拟结果的精度是当前 NPP 估算至关重要的问题[9]。随着遥感技术的不断进步,基于遥感数据的 NPP 过程模型,如 GLO-PEM 模型[10,11]、CASA 模型等被认为是当前对区域乃至全球 NPP 估算最为精确的方法之一。

我国 NPP 的研究始于 20 世纪 80 年代,早期的研究多采用气候生产力模型[4,5]或半经验半理论模型[2]。何勇等[3]采用植被与大气相互作用模式(Atmosphere-Vegetation Interaction Model, AVIM)估算了我国 NPP 的空间分布。近年来,基于遥感的过程模型逐渐在 NPP 研究中得以应用,研究者们利用 CASA 模型[4]、GLO-PEM 模型[5]估算了全国的 NPP,表明了 NPP 的分布格局和季节动态。对于区域 NPP 的研究则多以气候生产力为基础[6],而较少采用基于遥感的估算方法。

广东省地跨热带和亚热带,其水热资源丰沛,是我国植物生长潜力最大的地区之一。自 20 世纪 80 年代以来,广东省积极开展绿化造林活动,成为我国“造林绿化第一省”,截止 2000 年森林覆盖率高达 57%[7]。同时,该区域又是我国人口稠密、经济发展迅速、土地利用变化剧烈的区域。对广东省净初级生产力的精确估算及其时空分布格局的了解有助于全面认识区域碳循环特征,能为正确估算广东省陆地生态系统碳汇能力和全面评估区域生态公益林建设提供科学参考。然而,目前对广东省 NPP 时空动态的了解甚少,以往的研究大多局限于研究点[8,19],在空间上缺乏连续性;对全省范围 NPP 的研究仅限于单个年份[10],在时间上缺乏连续

性。针对上述问题,本研究首次采用 8km 分辨率、长时间序列 (1981～2000 年) 的 GLO-PEM NPP 数据,分析广东省 20a 来 NPP 的时空格局,旨在全面了解广东省 NPP 的动态。

1　研究区域概况

广东省位于东经 109°45′～117°20′,北纬 20°09′～25°31′,全省地处低纬度,北回归线横贯陆地中部。地跨热带和亚热带,属东亚季风气候区南部,南临热带海洋,气候具有热带、亚热带季风海洋性气候特点。年平均温度为 21.6℃,年降水量为 1801mm,是全国水热资源丰富的地区。地势北高南低,境内山地、平原、丘陵交错,主要河流有珠江、韩江、鉴江等。陆地面积为 17.8 万 km^2,占全国陆地总面积的 1.8%,其中耕地面积 312 万 hm^2,林业用地面积 1025 万 hm^2,园地面积 84 万 hm^2。全省森林覆盖率达 57% [7]。南部为热带常绿季雨林和雨林,主要分布在粤西沿海地区;中部为南亚热带季风常绿阔叶林,主要分布在热带季雨林以北、及大埔、英德、怀集一线以南广大地区;北部南岭地区的典型植被类型为亚热带常绿阔叶林,主要分布从怀集、英德、梅县、大埔一线向北分布到本省北部一带 [1]。改革开放以来,广东省经济快速发展,并且沿海地区的经济发展速度明显高于内陆地区,而珠江三角洲地区 (包括广州、深圳、东莞、惠州、佛山、中山、珠海、江门、肇庆) 是广东省经济发展最为活跃的地区。

2　数据资料和研究方法

2.1　GLO-PEM 模型

本研究所采用的 NPP 是由 GLO-PEM 模型估算得到。GLO-PEM 模型是基于植物光合作用和自养呼吸等生态机理过程的光利用效率模型,是第一个完全由遥感模型驱动的生产力效率模型。模型的基本表达式如下 [0,11,22]:

$$NPP = GPP - Ra \sum t (S_t \times N_t) \varepsilon_g - Ra \quad (1)$$

式中,NPP 为净初级生产力 (g/(m²·a)),S_t 为 t 时刻入射的光合有效辐射 (MJ),N_t 为植被所能吸收的光合有效辐射的比例,即 FPAR,ε_g 为植被对吸收的光合有效辐射的利用效率 (g/MJ),Ra 表示自养呼吸 (g/(m²·a))。其中 ε_g:

$$\varepsilon_g = f(T_a, D, CSI) \varepsilon_g^* \quad (2)$$

式中,T_a 为空气温度 (℃),通过与 NDVI 的回归方程得到。D 为大气水气压差 (mb)。CSI (Cumulative Surface Wetness Index) 为土壤湿度累积胁迫指数。ε_g^* 为最大潜在光能利用效率 (g/MJ),受光合作用,温度等因素的影响。自养呼吸计算:

$$Ra = \left[0.53 \times \left(\frac{w}{w+50}\right) \times e^{0.5\left(\frac{Tc-Ta}{25}\right)}\right] \quad (3a)$$

$$w = 7166.1 (\rho_{\min}^{-2.6}) \quad (3b)$$

式中,w 为地上生物量 (Mg/hm²),Tc 为气候学上的平均空气温度 (℃),$\rho_{\min}$ 为可见光通道反射率的最小值。

2.2　数据来源

1981～2000 年基于 AVHRR 全球生产效率模型的 NPP 数据 (AVHRR Global Production Efficiency Model: Summed Annual Global NPP) 来源于马里兰大学网站 (http://glcf.umiacs.umd.edu/data/glopem/),其空间分辨率为 8km。本研究所采用的 2001 年广东省土地覆盖分类数据来源于中国科学院遥感所遥感科学国家重点实验室①。

2.3　数据处理和分析方法

在遥感软件 ENVI 的支持下,将矢量化的广东省行政区划图与各年 NPP 图像叠加,通过镶嵌、建立感性区、掩膜等方法获取 1981～2000 年广东省范围内的 NPP 数据,每年广东省范围内有 NPP 值的像元共 2618 个。对广东省各年 NPP 平均值的计算方法是将广东省行政区划范围内 2618 个像元值取平均值,并计算标准差。20a NPP 平均值的计算方法是首先计算了各个像元 20a 的平均值,然后计算全省范围内的 NPP 多年平均

① 见 21 世纪初中国陆地生态系统定量遥感监测数据产品.

值和标准差。为了便于分析,将整个时间序列(981 ~ 2000 年)划分为 4 个时间段:1981 ~ 1985 年、1986 ~ 1990 年、1991 ~ 1995 年、1996 ~ 2000 年,对于 4 个阶段的 NPP 平均值的计算是基于各年 NPP 平均值计算的基础上再取平均值,标准差是基于各年 NPP 平均值计算得到。

利用 GIS 软件中实现全省 NPP 分布的空间可视化,在此基础上分析广东省 NPP 的空间分布格局。以广东省 NPP 分布特征为基础,结合黄露菁等[3]根据年温划分广东省海陆气候属性的特征的方法,将广东省划分为 3 个区域:西南沿海地区,包括湛江、茂名、阳江、江门珠海;东南沿海地区,包括广州、深圳、东莞、中山、佛山、惠州、汕尾、揭阳、汕头及潮州;内陆地区,包括韶关、清远、肇庆、云浮、河源及梅州。分别计算各区域 1981 ~ 2000 年的 NPP,并比较它们之间的差异。依照广东省行政区划图中 21 个地级市的分布,分别计算各地级市逐年 NPP,通过计算各市 NPP 变化率,表明 21 个市 NPP 在近 20a 的变化趋势,分别讨论各地级市在 4 个时间段上的动态变化,并检验各市在 4 个时间段上的显著性差异。

广东省 2001 年土地覆盖/利用的现状由中国科学院遥感所遥感科学国家重点实验室制作的全国土地覆盖分类数据得到。全国土地覆盖和利用的现状分为 21 类,广东省包括其中 9 类,分别是:阔叶林,针叶林,混交林,密闭灌丛、矮林,单双稻连作田地,建筑用地,沼泽和沼泽化草甸湿地,近海及海岸湿地,水体。据报道,阔叶林、混交林和针叶林是广东省主要的 3 种森林类型,其中面积最大的为针叶林,占全省森林总面积的 49.3%[7],本文对这 3 种典型森林类型 NPP 的动态进行了比较。

3 结果与讨论

3.1 广东省 NPP 的时空分布格局

根据 GLOPEM NPP 结果,求出 1981 ~ 2000 年广东省范围内每个像元的 NPP 平均值,绘制了广东省 20aNPP 平均值的分布图和广东省土地利用分类图(图 1 ~ 图 4)。图 1 表明,广东省的 NPP 分布呈现较为明显的地域性差异,NPP 较高的地区主要是粤西地区和粤东地区,该区域的土地利用类型中,农田占较大比例。广东省绝大部份地区农业生产可 1 年 2 熟或 3 熟,因此该区域维持较高的生产力。而在粤北地区,虽然其碳储量维持较高水平,但该区域的 NPP 却相对较低,该地区主要的植被类型为亚热带常绿阔叶林。

多年(981 ~ 2000)平均 NPP 频度分布(图 5)表明,广东省的 NPP 分布呈双峰型,波峰范围分别为 836 ~ 1661 g/(m^2·a)和 1661 ~ 2619 g/(m^2·a)。在全省范围内 2618 范围内个有效像元中,约 65% 的像元分布在 900 ~ 1600 g/(m^2·a)范围内。这种双峰型的分布与广东省的地理分布密切相关,第 1 个波峰范围内 NPP 值相对较小,代表了广东省大部分地区的 NPP 分布,包括所有内陆城市及大部分东南沿海城市。第 2 个波峰 NPP 值相对较大,代表了广东省所有西南沿海城市及少数东南沿海城市 NPP 的分布。

20a 广东省 NPP 的平均值为(480 ± 407) g/(m^2·a),年间波动较大,NPP 介于(360 ± 431) ~ (626 ± 471) g/(m^2·a)(图 6a)。4 个时间段 NPP 平均值表明(图 6b),20 世纪 80 年代前期(981 ~ 1985 年)广东省 NPP 水平较低,为(443 ± 57) g/(m^2·a),在 80 年代后期(986 ~ 1990 年)有较大增长,达到 1534 ± 121 g/(m^2·a),显著高于其它 3 个时间段的水平($p < 0.0001$),但年间波动大,主要是由于 1986 年和 1989 年这两年 NPP 显著高于其它年份而引起的。90 年代前期(991 ~ 1995 年)NPP 有所降低,为(450 ± 89) g/(m^2·a),而在后期(996 ~ 2000 年)又有一定程度的恢复,达到(484 ± 74) g/(m^2·a),显著高于第 3 和第 1 时间段的水平($p < 0.0001$),这主要是由于 1998 年 NPP 相对较大。

3.2 各地区 NPP 时空动态

广东省 3 个地区平均 NPP 分别为东南沿海(642 ± 179) g/(m^2·a),西南沿海(844 ± 167) g/(m^2·a),内陆(306 ± 159) g/(m^2·a),表现出西南沿海地区 > 东南沿海地区 > 内陆地区的趋势,并且这种趋势延续在整个研究时间段(图 7)。这种空间分布格局与各区域植被组成有关。西南沿海地区主要为人工林,且以速生树种桉树、红树林等为主[4~26]。同时,西南沿海地区的桉树林等人工林多处于中幼龄阶段,因此该区域生产力较高。而内陆地区虽然森林覆盖率高达 67.5%,但该区域的森林多为成熟林或过熟林[7],其生产力远低于中幼龄的人工林,因此,该区域的 NPP 低于沿海区域。另外,3 个区域 NPP 的差异还可能受各区域水热条件差

接彩图 1 ~ 4

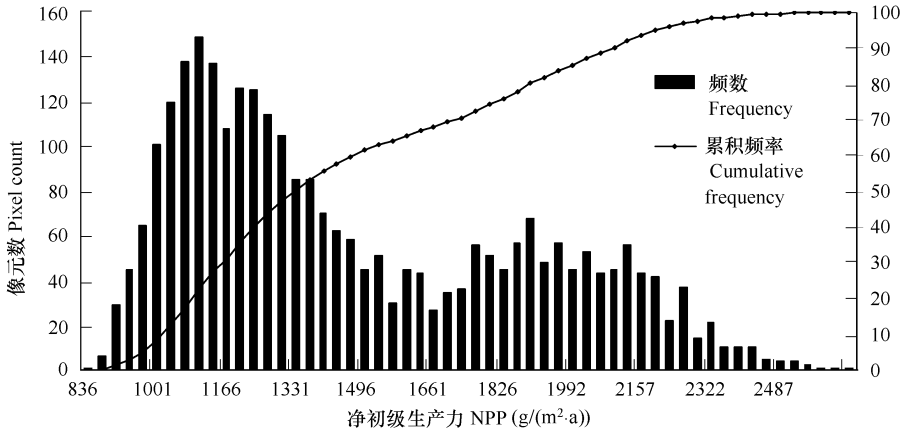

图 5　1981 ~ 2000 年广东省平均 NPP 频度分布

Fig. 5　Mean NPP frequency by pixels from 1981 to 2000 in Guangdong

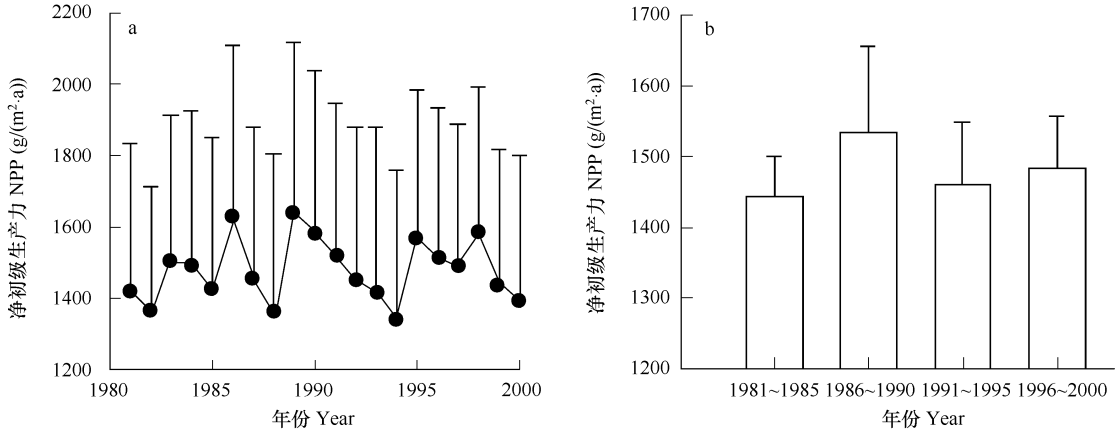

图 6　广东省 NPP 的时间动态变化

Fig. 6　Temporal dynamics of NPP in Guangdong province from 1981 to 2000

a 为 NPP 的年间动态，b 为 NPP 在 4 个时间段的动态 误差线表示标准差

a is annual NPP, and b is mean NPP in very five years; Error bars present for standard deviations of means

异及农田分布状况的影响。

3.3　各地级市的 NPP 变化规律分析

在 21 个地级市中 NPP 最大的市为湛江，20a 平均为（969 ± 128）g/（m²·a），其次为珠海，平均为（882 ± 210）g/（m²·a），NPP 较大的城市还包括阳江（946 ± 133）g/（m²·a）、江门（843 ± 129）g/（m²·a）、汕尾（780 ± 105）g/（m²·a）、揭阳（779 ± 122）g/（m²·a）、潮州（752 ± 132）g/（m²·a）等。内陆城市，如韶关、肇庆、清远 NPP 较小，分别为（136 ± 94）g/（m²·a）、（187 ± 89）g/（m²·a）和（244 ± 95）g/（m²·a）（图 3 所示）。图 4 表明了广东省 21 个市 NPP 的变化趋势，全省大部分地区 NPP 呈现增加的趋势，但除湛江（$p = 0.04$）外，其它各市 NPP 增加不显著（$p > 0.05$）。NPP 显著减小的城市包括佛山、中山、东莞和深圳（$p < 0.05$）。

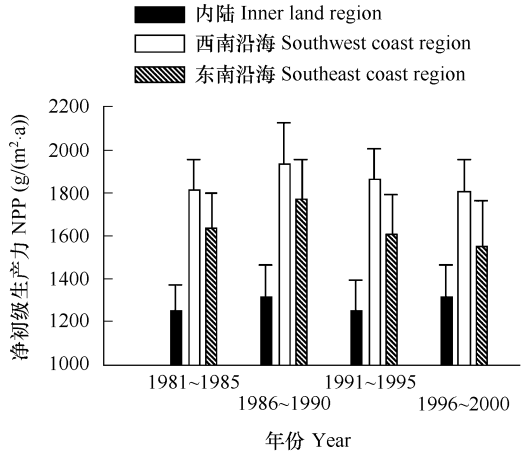

图 7　1981 ~ 2000 年 3 个地区 NPP 动态变化

Fig. 7　Variation dynamics of NPP in three regions from 1981 to 2000

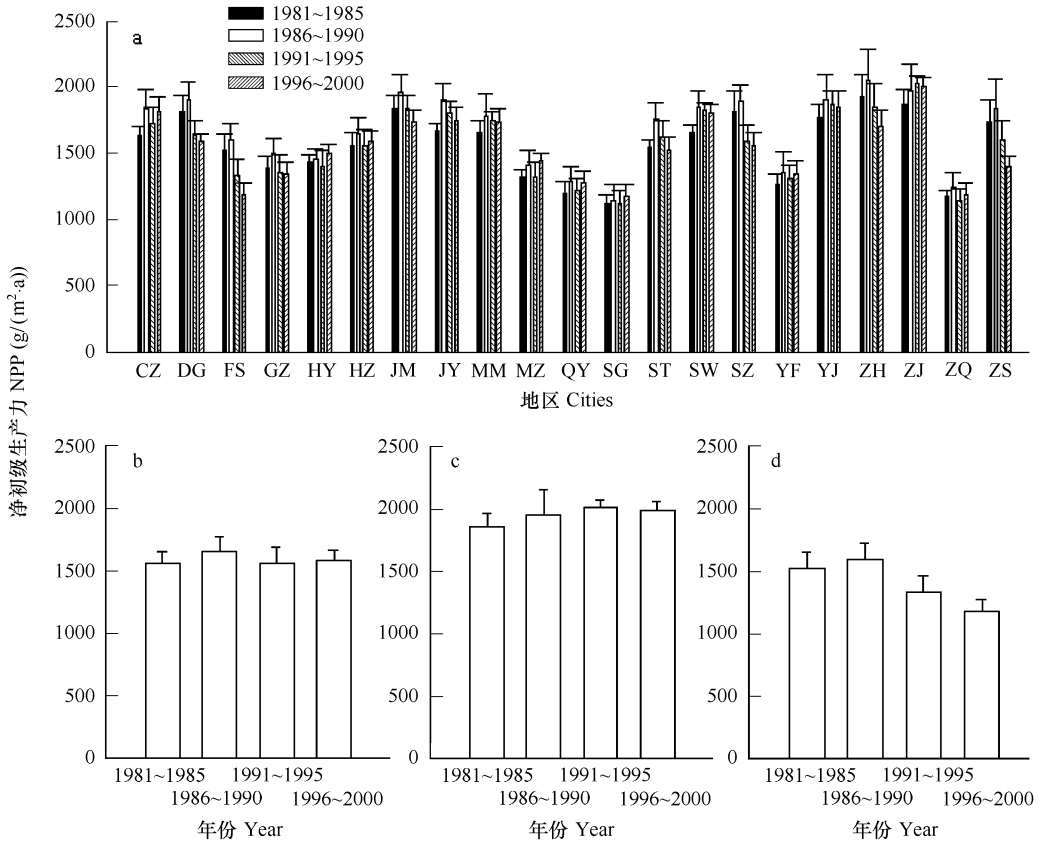

图 8　广东省各地级市的 NPP 在 4 个阶段的动态

Fig. 8　Temporal dynamics of NPP in every five years from 1981 to 2000 by cities in Guangdong Province

a 为各地级市 4 个时间段的 NPP (CZ:潮州、DG:东莞、FS:佛山、GZ:广州、HY:河源、HZ:惠州、JM:江门、JY:揭阳、MM:茂名、MZ:梅州、QY:清远、SG:韶关、ST:汕头、SW:汕尾、SZ:深圳、YF:云浮、YJ:阳江、ZH:珠海、ZJ:湛江、ZQ:肇庆,ZS:中山);b 为 NPP 稳定型,以惠州为例;c 为 NPP 增长型,以湛江为例;d 为 NPP 下降型,以佛山为例

a is mean NPP in every five years for all cities (CZ referred to as Chaozhao, DG referred to as Dongguan, FS referred to Foshan, GZ referred to Guangzhou, HY referred to Heyuan, HZ referred to Huizhou, JM referred to Jiangmen, JY referred to Jieyang, MM referred to Maoming, MZ referred to Meizhou, QY referred to Qingyuan, SG referred to Shaoguan, ST referred to Shantou, SW referred to Shanwei, SZ referred to Shenzhen, YF referred to Yunfu, YJ referred to Yangjiang, ZH referred to Zhuhai, ZJ referred to Zhanjiang, ZQ referred to Zhaoqing and ZS referred to as Zhongshan, respectively.); b shows that NPP stabled through the four periods (i. e. Huizhou); c shows that NPP increased through the four periods (i. e. Zhanjiang); d shows that NPP decreased through the four periods (i. e. Foshan)

根据广东省各地级市 4 个时间段 NPP 的动态变化(图 8a),可以大致分为稳定、增长和下降 3 种类型(图 8b、8c、8d 分别以惠州、湛江、佛山为例)。NPP 动态变化属于稳定型的城市包括:韶关、清远、梅州、江门、茂名、惠州、河源、肇庆、云浮、阳江、广州和汕头,除江门在第 4 阶段(996～2000 年)NPP 平均值显著低于第 2 阶段(985～1990 年)NPP 平均值($p=0.005$)及梅州在第 4 阶段(996～2000 年)NPP 平均值显著高于第 3 阶段(991～1995 年)NPP 平均值($p=0.046$)外,其它各市 NPP 在 4 个阶段处于相对稳定的水平($p>0.05$)。NPP 增长的城市有潮州、揭阳、汕尾和湛江,除湛江外,其它 3 个市在第 4 阶段(996～2000 年)及第 2 阶段(986～1990 年)的 NPP 均显著高于第 1 阶段(981～1985 年)($p<0.05$)。这 4 个市在 1980～2000 年间 NPP 分别以 59、39、45、46g/(m^2·5a)的速率增加。相对前 2 种类型,NPP 下降类型的动态较为复杂,全省范围内无 NPP 在 4 个阶段持续下降的城市。除湛江、河源、梅州、韶关外,其余各市的 NPP 均在 20 世纪 80 年代后期(986～1990 年)达到最大值,而在 90 年代初期(991～1995 年),除湛江以外,全省其它各市的 NPP 较前

一阶段（985 ~ 1990 年）均有所下降，部分城市的 NPP 在 90 年代后期（996 ~ 2000 年）又有一定程度增加。但佛山、东莞、中山、广州、汕头、汕尾、深圳、珠海、江门、阳江、揭阳和茂名的 NPP 在 1991 ~ 2000 年间一直呈下降的趋势，其中，佛山、中山、深圳、东莞、珠海 5 市下降的趋势更为明显，NPP 分别以 114、113、87、75、75 g/（m^2·5a）的速率降低。以佛山市为例，90 年代初期（991 ~ 1995 年）NPP 较 80 年代末（986 ~ 1990 年）下降 16.7%，差异显著（$p = 0.0023$），90 年代末期（996 ~ 2000 年）NPP 较前一阶段（991 ~ 1995 年）下降 11.3%，差异不显著（$p = 0.057$）。佛山、中山、深圳、东莞、珠海这几个城市地处珠江三角洲地区，是广东省经济快速发展的代表城市，其森林覆盖率较低。据报道佛山、中山、东莞、珠海等城市的森林覆盖率都低于 30%，同时对于珠江三角洲土地利用变化的研究[17]也表明，珠江三角洲地区在 1990 ~ 2000 期间耕地、林地和草地不断减少，城市工交用地快速增加，深圳、佛山、中山、东莞、珠海和广州的耕地减少速度最快，减幅都在 10% 以上，其利用方式转变为城市工交用地和水域用地；林地面积减少主要集中在深圳和东莞，这两个城市的工交用地分别有 46.29% 和 36.92% 来源于林地。由此可见，这些城市 NPP 的下降在很大程度上是由土地利用/覆盖变化引起的。

3.4 主要植被类型的 NPP 动态变化

广东省 3 种主要森林类型的 NPP 差异较明显，其中混交林的平均 NPP 值最大，为（704 ± 450）g/（m^2·a），显著高于其它两种森林类型 NPP 的水平（$p < 0.0001$，图 9）。阔叶林和针叶林的 NPP 差异不显著（$p > 0.05$），多年平均值分别为（391 ± 372）、（364 ± 390）g/（m^2·a）。据报道，广东省现有森林资源存在“四多四少”现象，即：中幼林多成熟林少，纯林多混交林少，针叶林多阔叶林少，单层林多复层林少的特点，在全省范围内幼龄林和中龄林的面积分别占森林总面积的 26% 和 38%[7]。一般认为森林的 NPP 随林龄的增长而降低[18~30]，在林分发育上表现出幼龄和中龄阶段 NPP 高于成熟阶段的 NPP。研究表明马尾松林生长量随年龄成 S 形变化，生长量在 0 ~ 15 龄较低，进入成熟阶段（20 ~ 40 龄）较高，而后生长量降低[31]。目前广东省大面积的针叶林马尾松和湿地松都是在“十年绿化广东（986 ~ 1995 年）”期间种植的[32]，可能还处于生长较缓慢的时期，因此其 NPP 较其它森林类型低。但不难预见，随着现有幼龄针叶林的逐渐成熟，其 NPP 将有较大的发展潜力。据报道，处于南亚热带森林演替中期阶段的混交林无论是生物量、GPP 还是 NPP 都高于处于演替初期的针叶林[33]。本研究中针叶林与混交林 NPP 之间的差异可以由两种森林类型分别处于不同演替阶段来解释。林种树种配置不合理，造成广东省现有人工林以中、幼林针叶林为主的局面[7]。因此，有必要对其进行适当的改造，以提高林分的质量，就 NPP 而言，引入阔叶树种加快针叶林向混交林演替的进程是保证区域森林 NPP 维持较高水平的有效方式。广东省现有阔叶林较少，且多处于成熟或过熟阶段，生产力相对较低，因而其 NPP 低于混交林的水平。

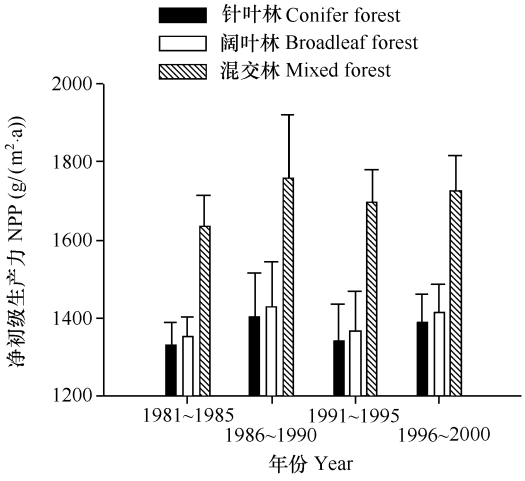

图 9 广东省 3 种主要森林类型的 NPP 动态

Fig. 9 NPP dynamics of three forest types in Guangdong Province from 1981 to 2000

4 结论

（1）1981 ~ 2000 年期间，广东省平均 NPP 为（480 ± 407）g/（m^2·a），年间变化较大。20 世纪 80 年代后期（986 ~ 1990）NPP 达到最大（（534 ± 121）g/（m^2·a））；90 年代前期（991 ~ 1995 年）有所降低，为（450 ± 89）g/（m^2·a），在 90 年代后期（996 ~ 2000 年）又有一定程度的回升，达到（484 ± 74）g/（m^2·a）。广东省多年平均 NPP 的分布呈现明显的地域性差异，总体呈现西南沿海地区 > 东南沿海地区 > 内陆地区的空间格局。

（2）广东省各地级市的 NPP 在 4 个时间段的动态大致分为稳定、增加和下降 3 种类型。其中，呈稳定型

的城市包括韶关、清远、梅州、江门、茂名、惠州、河源、肇庆、云浮和阳江、广州和汕头;NPP 增加的有潮州、揭阳、汕尾和湛江;NPP 显著下降的城市多分布在珠江三角洲地区和沿海城市,包括佛山、中山、深圳、东莞、珠海,NPP 分别以 114、113、87、75、75 g/(m^2·5a)的速率降低,这种下降和土地覆盖/利用方式的改变有密切关系。朴世龙等[4]研究表明,粤西南地区在 1982～2000 年期间 NDVI 增加显著,而珠江三角洲在此期间 NDVI 的下降趋势非常明显,这种下降与该区域快速城市化有关。

(6)广东省 3 种主要森林类型中混交林的平均 NPP 值最大,为(704±450) g/(m^2·a),显著高于阔叶林和针叶林的 NPP,分别为(391±372) g/(m^2·a)和(364±390) g/(m^2·a)。由于针叶林在全省范围内分布最广,且以中幼林为主,随着现有幼龄针叶林的逐渐成熟,其 NPP 将有较大的发展潜力。并且引入阔叶树种加快针叶林向混交林演替的进程是保证区域森林 NPP 维持较高水平的有效方式。

References:

[1] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, *et al*. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. Global Change Biology, 1999, 5 (): 1－15.

[2] Cao M K. The model research of interaction between terrestrial ecosystem and global climate change. In: Li K R, ed. Land use change, greenhouse gas discharge and terrestrial ecosystem carbon cycle. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 56－72.

[3] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, *et al*. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United State agriculture, 1982-98. Global Chinge Biology, 2002, 8: 722－735.

[4] Chen G N. Attempt to Estimate Chinese production by Maiami model. Journal of Natural Resource, 1987, 2 (): 270－278.

[5] Hou G L, You S C. Estimation of Chinese climatic productivity by chikugo model. Journal of Natural Resources, 1990, 5 (): 50－65.

[6] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al*. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7 (): 811－841.

[7] Frank V, Hendrik S, Herman E. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-fix model and Euroflux data. Remote Sensing of Enviroment, 2002, 83: 376－399

[8] Bunkei M, Masayuki T. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in EastAsia. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 58－66

[9] Cramer W, Field C B. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): introduction. Global Change Biology, 1999, 5 (): Ⅲ－Ⅳ.

[10] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach. Journal of Biogeography, 1995, 22: 815－835.

[11] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, *et al*. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach. Ecological Modelling, 1999, 122: 235－239.

[12] Zhou G S, Zhang X S. A natural vegetation NPP model. Acta Phytoecologica Sinica, 1995, 19 (): 193－200.

[13] He Y, Dong W J, Ji J J, *et al*. The net primary production simulation of terrestrial ecosystem in China by AVIM. Advances in Earth Science, 2005, 20 (): 345－349.

[14] Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25 (): 603－608.

[15] Cui L L, Shi J, Tang P, *et al*. Seasonal change of terrestrial net primary productivity in China. Progress in Geography, 2005, 24 (): 8－16.

[16] He Y L, Zhang Y P. A preliminary study on the spatial-temporal pattern of NPP in Yunnan Province. Journal of Mountain Research, 2006, 24 (): 193－201.

[17] Ren H, *et al*. Forest resource in Guangdong. In: Ren H, *et al* eds. Guangdong forest resources and its ecosystem service function. Beijing: China Environment Science Press, 2002. 55－61.

[18] Peng S L, Zhang Z P. Biomass productivity and energy use efficiency of climax vegetation on Dinghu Mountains, Guangdong, China. Science in China (Series B), 1994, 24 (): 497－502.

[19] Yang Q P, Li M G, Wang B S, *et al*. Dynamics of biomass and net primary productivity in succession of south subtropical forests in southwest Guangdong. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (2): 2136－2140.

[20] Guo Z H, Peng S L, Wang B S. Combining multitemporal NOAA-AVHRR NDVI and ground auxiliary data for estimating terrestrial net primary production in Guangdong. Acta Eclogica Sinica, 2001, 21 (): 1444－1450.

[21] Guo Z H, Li Q C. Evaluation and distribution of vegetation potential productivity in Guangdong Province. Journal of Tropical and Subtropical

Botany,1997,5(): 45 - 52.

[12] Cao M K, Prince S D, Small J, *et al*. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981 - 2000. Ecosystem, 2004,7: 233 - 242.

[13] Huang L J, Chen C M, Jian Y G. Features of oceanic and continental climate and its causes in Guangdong analysed with annual temperature variation. Acta Sientiarum Naturalium University Sunyatseni,1997,36(): 84 - 89.

[14] Zhou G Y, Yan J H. Hydrological impacts of reforestation with eucalyptus and indigenous species in southern China. Informatore Botanico Italiano, 2003,35(): 82 - 92.

[15] Zhou GY, Wei X H, Yan J H. Impacts of eucalyptus (*Eucalyptus exserta*) plantation on sediment yield in Guangdong Province, Southern China a kinetic energy approach. Catena, 2002,49,231 - 251.

[16] Chen Y S, Gan X H, Wu Z H,*et al*. The mangrove on the coast of Guangdong. Protection Forest Science and Techonology, 2001. 1: 32 - 35.

[17] Yan X P, Mao J X, Pu J. Research on the human dimensions of land use changes in the mega-urban region: a case study of the pearl river delta. Acta Geographica Sinica,2006,61(): 613 - 623

[18] Houghton R A. Aboveground forest biomass and global carbon balance. Global Change Biology,2005,11: 945 - 958.

[19] Brown S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental Pollution,2002,116: 363 - 372.

[20] Binkley D, Stape J L, Ryan M G, *et al*, Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. Ecosystems,2002,5: 58 - 67.

[21] Peng S L, Li M G, Lu Y. Preliminary study on pinus massomiana population biology production. Tropical and Subtropical Forest Ecosystem,1989, 5: 75 - 81.

[22] Yu S X, Lian J Y. Outline of the Vegetation Classification in Guangdong Province: Coniferous and Broad-Leaved Forest. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2003, 42(): 70 - 74.

[23] Peng S L, Fang W. Features of biomass and productivity dynamics in successional process of low subtropical forest. Ecological Science,1995,2: 1 - 9.

[24] Piao S L,Fang J Y. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China. Quaternary Science,2001,20(): 294 - 302.

参考文献：

[2] 曹明奎. 陆地生态系统和全球气候变化相互作用的模型研究. 见: 李克让主编. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社,2002. 56 ~ 72.

[4] 陈国南. 用迈阿密模型测算我国生产量的尝试. 自然资源学报,1987,2(): 270 ~ 278.

[5] 侯光良,游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力. 自然资源学报,1990,5(): 60 ~ 65.

[2] 周广胜,张新时. 自然植被净第一性生产力初探. 植物生态学报,1995,19(): 193 ~ 200.

[3] 何 勇,董文杰,季劲均,等. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. 地球科学进展,2005,20(): 345 ~ 349.

[4] 朴世龙,方精云,郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国净第一性生产力. 植物生态学报,2001,25(): 603 ~ 608.

[5] 崔林丽,史 军,唐娉,等. 中国陆地净初级生产力的季节变化研究. 地理科学进展,2005,24(): 8 ~ 16.

[6] 何云玲,张一平. 云南省自然植被净初级生产力的时空分布特征. 山地学报,2006,24(): 193 ~ 201.

[7] 任海,黄平,张倩媚,等. 广东省森林资源及其生态系统的服务功能. 北京：中国环境科学出版社,2002. 55 ~ 61.

[8] 彭少麟,张祝平. 鼎湖山地带性植被的生物量、生产力和能量利用效率. 中国科学(B 辑),1994,24(): 497 ~ 502.

[9] 杨清培,李鸣光,王伯荪,等. 粤西南亚热带森林演替过程中的生物量与净第一性生产力动态. 应用生态学报,2003,14(2): 2136 ~ 2140.

[10] 郭志华,彭少麟,王伯荪. 基于 GIS 和 RS 的广东陆地植被生产力及其时空格局. 生态学报,2001,21(): 1444 ~ 1450.

[11] 郭志华,李琼婵. 广东省潜在植被生产力的估算及其分布. 热带亚热带植物学报,1997,5(): 45 ~ 52.

[13] 黄露菁,陈创买,简裕庚. 由年温变化分析广东海陆气候属性特征. 中山大学学报(自然科学版),1997,36(): 84 ~ 89.

[16] 陈远生,甘先华,吴中亨,等. 广东省沿海红树林现状和发展. 防护林科技,2001,1: 32 ~ 35.

[17] 闫小培,毛蒋兴,普军. 巨型城市区域土地利用变化的人文因素分析——以珠江三角洲地区为例. 地理学报,2006,61(): 613 ~ 623.

[1] 彭少麟,李鸣光,陆阳. 鼎湖山马尾松种群生物生产量初步研究. 热带亚热带森林生态系统研究,1989,5: 75 ~ 81.

[2] 余世孝,练琚蒲. 广东省自然植被分类纲要 Ⅰ. 针叶林与阔叶林. 中山大学学报(自然科学版),2003,42(): 70 ~ 74.

[3] 彭少麟,方炜. 南亚热带森林演替过程生物量和生产力动态特征. 生态科学,1995,2: 1 ~ 9.

[4] 朴世龙,方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化. 第四纪研究,2001,21(): 294 ~ 302.

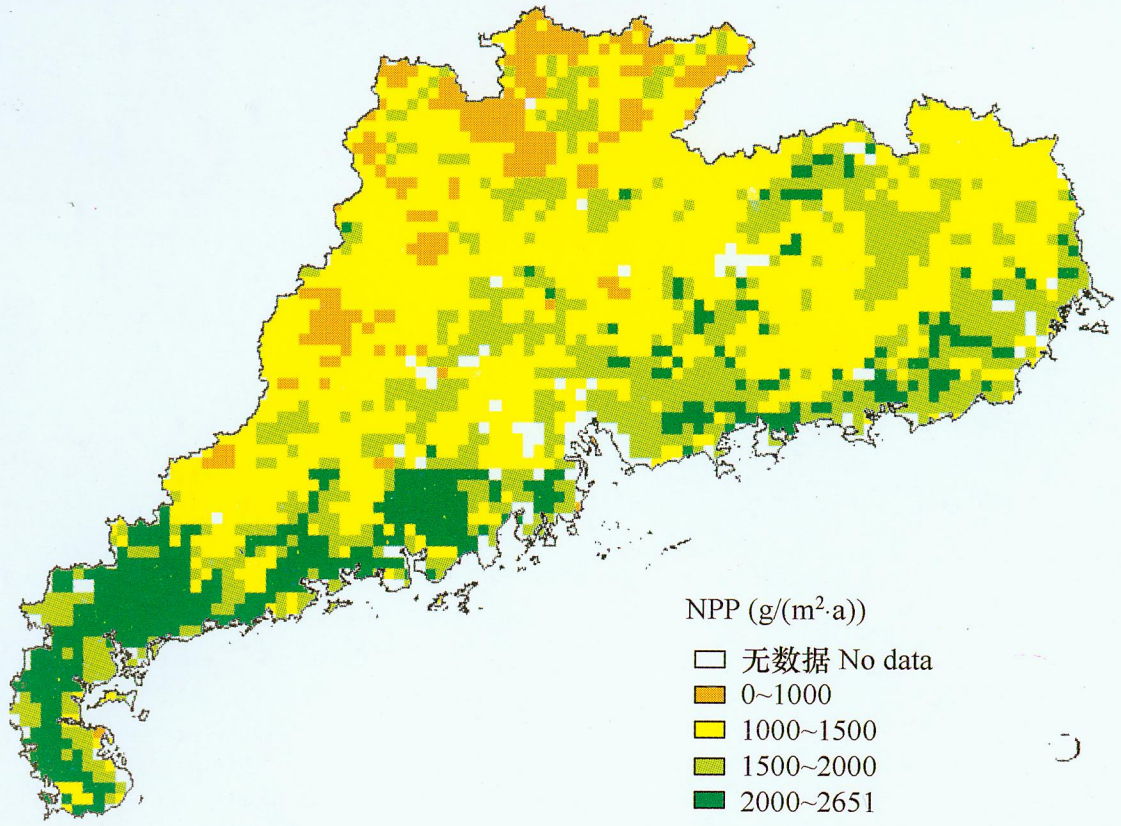

图 1　广东省 NPP 空间分布

Fig.1　Spatial patterns of NPP in Guangdong Province

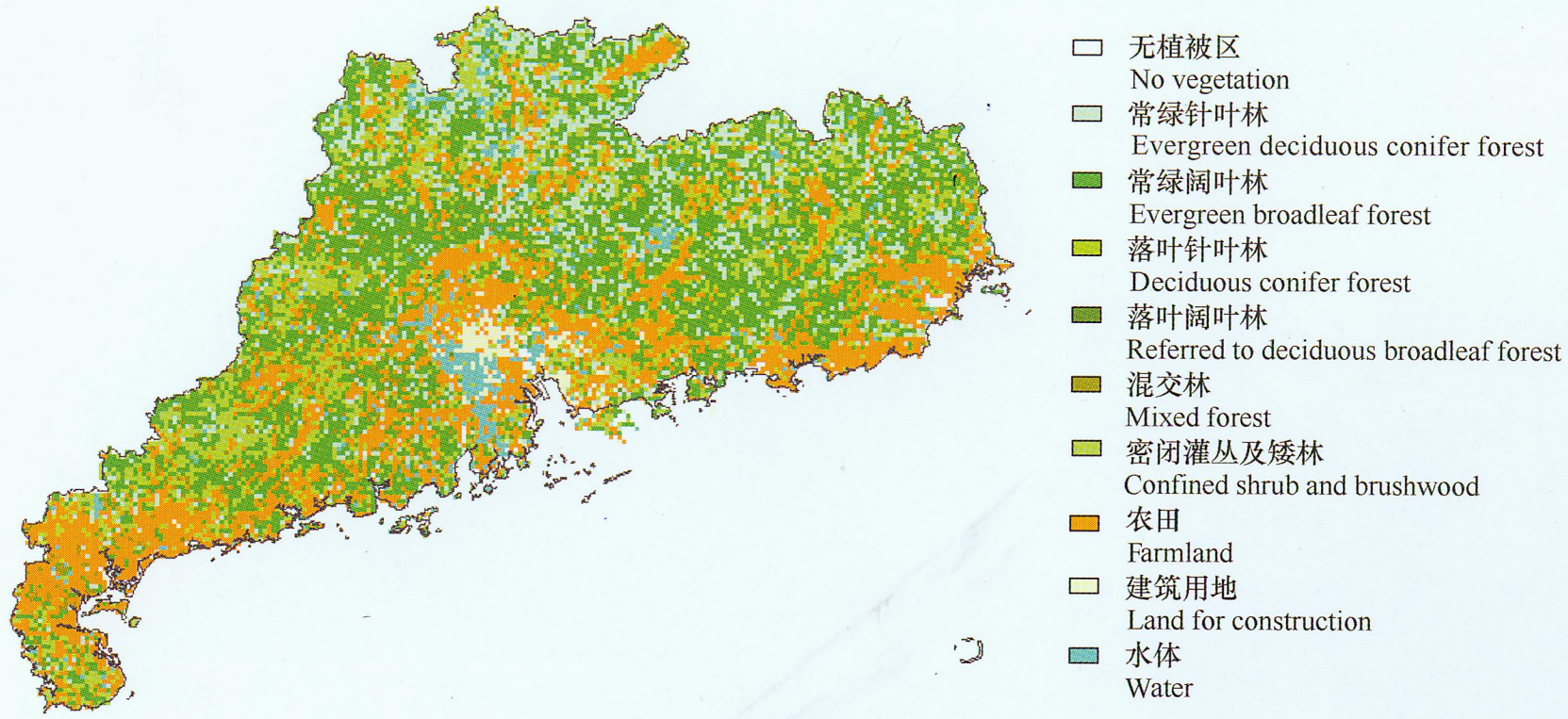

图 2　广东省土地利用分类图

Fig.2　The land use classification map of Guangdong Province

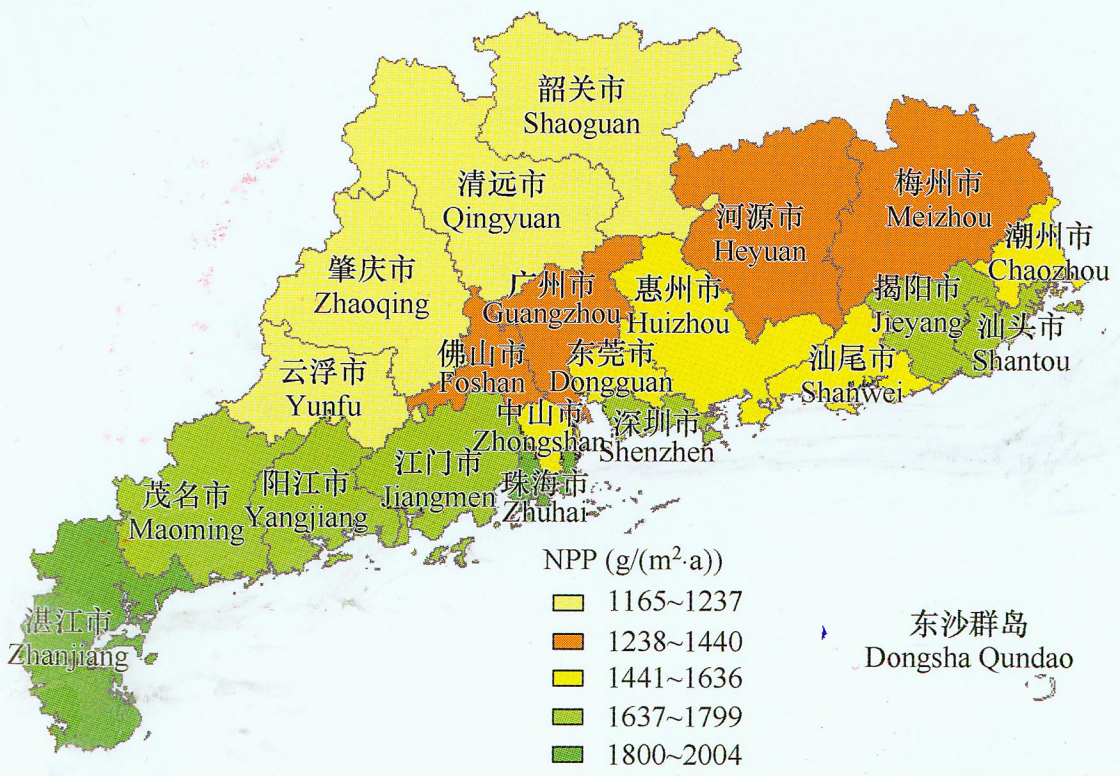

图 3　广东省各市 NPP 空间分布

Fig.3 Distribution of average NPP by city Guangdong Province

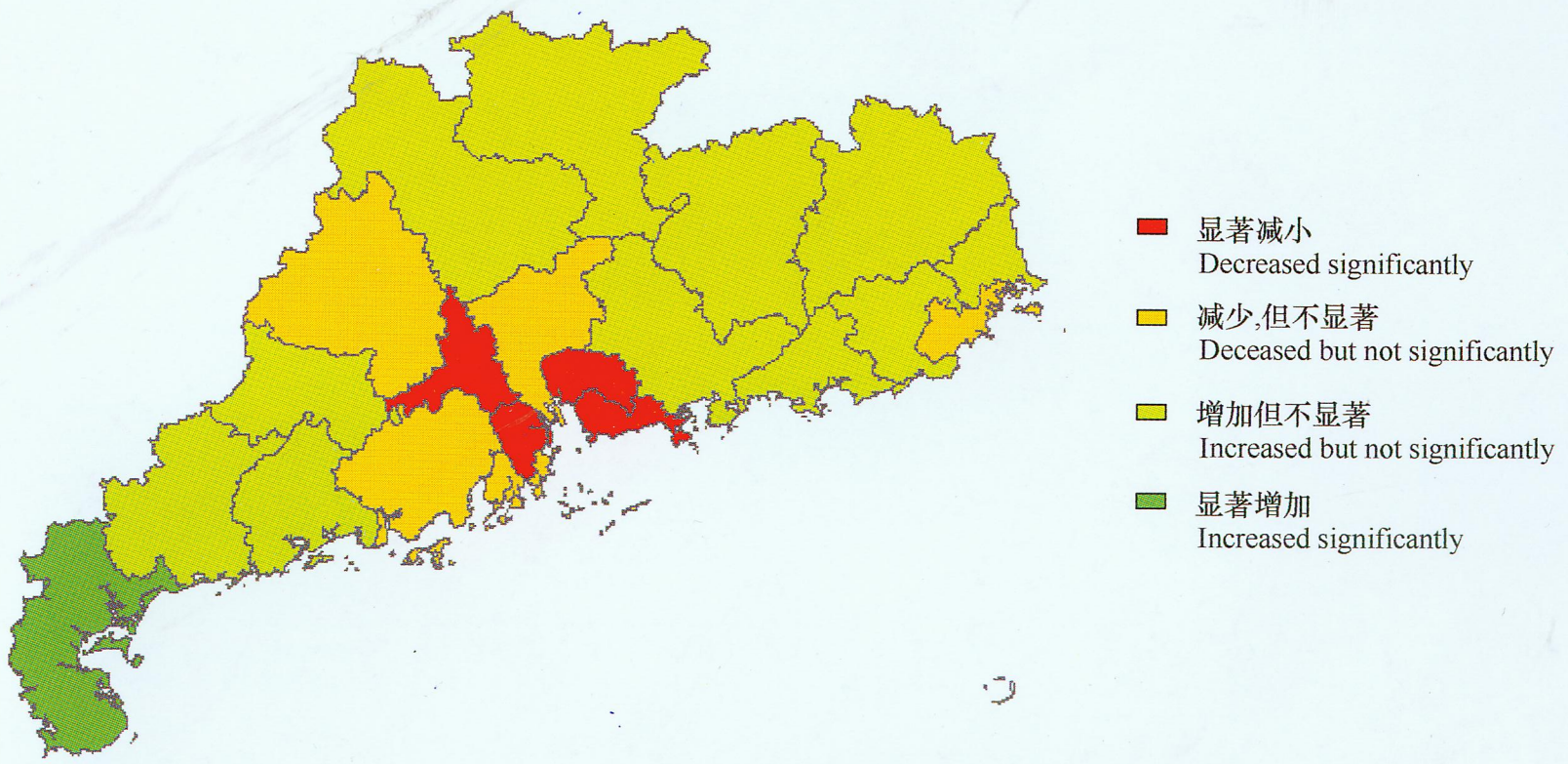

图 4　1981~2000 年间广东省各市 NPP 变化趋势

Fig.4　The trend of NPP during 1981—2000 by city, Guangdong Province