

珠江流域植被净初级生产力及其时空格局^{*}

王兆礼, 陈晓宏
(中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275)

摘 要: 为阐明珠江流域植被净初级生产力 (NPP) 变化的整体状况, 应用以遥感观测数据驱动的 GLO-PEM 模式模拟估计的 NPP 数据, 对珠江流域 1981~2000 年间的地表植被净初级生产力的空间分布及时间序列变化进行了综合分析。研究结果表明: ① 20 年来, 珠江流域年均 NPP 总量为 0.60 Pg C, 占中国总量的 19.42%, 单位面积的年平均 NPP 为 1328.61 g/(m²·a), 是中国平均水平的 4.12 倍; ② 从 NPP 的空间分布看, 单位面积的 NPP 以右江上游山区及珠江三角洲西南部地区等地最高, 北盘江上游山区最低; ③ 从各种植被类型来看, 以热带常绿阔叶林的平均 NPP 最大, 山地稀树灌木草原的平均 NPP 最小; ④ 受气候和土地利用变化的影响, 20 年来珠江流域植被 NPP 整体上呈现了不显著减少的趋势, 单位面积 NPP 减少了约 0.6%。

关键词: 净初级生产力; 遥感模式; GIS 时空变化; 珠江流域

中图分类号: S718.556 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 06-0106-05

植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, 简称 NPP) 表示绿色植物在单位面积、单位时间内通过光合作用将植被可吸收的太阳能转换成植物有机碳量的能力, 可以用单位面积和单位时间内转换成的碳的量表示 (g m⁻² a⁻¹)^[1-2]。NPP 作为表征植物活动的关键变量^[2], 是全球和区域碳循环与碳扰动、土地利用变化、气候变化和自然资源管理等研究工作中的重要一环^[3]。鉴于此, 国内外学者从不同角度采用不同方法对全球或区域和流域尺度的陆地植被净初级生产力进行了深入研究, 取得了丰硕的成果^[4-13]。虽然有关植被净第一性生产力及其与全球变化关系的研究很多, 但大多数研究多集中在 NPP 变化的预测; 而由于资料等原因, 对过去植被 NPP 时空变化的研究却很少^[7]。国内的研究结果表明, 近 20 年来, 中国植被净第一性生产量呈增加趋势^[7-9]; 长江流域的 NPP 整体上呈现了增加的趋势^[10], 青藏高原植被的 NPP 在波动中呈上升趋势^[11], 而中国东北部^[12]与黑河流域^[13]以减少趋势为主。

目前, 以珠江流域整体为研究对象, 探讨流域 NDV 长时间序列变化的整体状况, 并阐明植被 NPP 时空演变的研究还较少。从整体的角度看, 珠江流域植被 NPP 的增减状况如何是十分关注的问题, 但尚没有一个令人信服的综合分析。长时间序

列的精度可靠的遥感信息为回答这一问题提供了有效数据。本研究利用全遥感模式 GLO-PEM 模型模拟的数据, 对珠江流域 1981~2000 年间的地表植被净初级生产力的空间分布及时间序列变化进行综合分析, 为进一步分析流域 NPP 对气候和土地利用变化响应特征、流域碳储量和人口承载力研究奠定基础。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区范围

珠江流域处于我国南方亚热带湿润地区, 包括云南、贵州、广西、广东四省区的 35 个地市、216 个县 (市、区), 流域总面积 45.26 万 km², 占中国土地总面积的 4.71%。基于珠江流域水资源条件的区域差异性和河流体系的完整性, 并考虑到水资源分区利用特征, 把珠江流域划分为 11 个分区 (分别为 1 南盘江、2 北盘江、3 红水河、4 柳江、5 右江、6 左江及郁江、7 贺桂江、8 黔浔江及西江干流、9 北江、10 东江、11 珠江三角洲), 利用 GIS 技术获取珠江流域各分区 NPP 系列数据, 详细分析整个流域及其各分区 NPP 时空变化特征。

1.2 数据来源及其预处理

研究所使用的植被类型数据来自中国 1:400 万植被图 (中国科学院植物研究所, 1979) 和 1:100

^{*} 收稿日期: 2006-03-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50579078); 广东省自然科学基金资助项目 (04009805); 国家“985 工程”GIS 与遥感的地质应用科技创新平台资助项目 (105203200400006)
作者简介: 王兆礼 (1979 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 陈晓宏, E-mail: eecxh@mail.sysu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

万植被图（中国科学院中国植被图编辑委员会，2001）。GLO-PEM模拟数据来自马里兰大学覆盖中国的 NPP数据^[14]，数据时间跨度为 1981—2000 年，时间分辨率为 10 d，空间分辨率为 8 km×8 km。本研究的数据是在覆盖中国的 NPP数据基础上，在 ArcGIS 软件支持下，用界定好的珠江流域边界将研究区域 20° 的每月的数据切出来，在投影和时空分辨率上制作成同植被数据一致的珠江流域 NPP 数字影像，便于进行各种植被类型 NPP 的时空格局分析。

GLO-PEM 是以遥感观测为基础，根据植被对光合有效辐射的吸收和利用原理估计植被生产力的模型。其他遥感模型，如 CASA，只使用由遥感观测 PAR 吸收数据，仍依赖地面气象台站的气候数据，因此所估计的 NPP 变化空间分辨率比较低。GLO-PEM 数据被认为是相对标准的数据，因为它应用的 PAR 吸收和气候数据均来自卫星遥感观测，不仅包括各种非气候因素如病虫害和火灾影响，而且还能够对植被生产力进行高分辨率估计^[12]。

1.3 研究方法

采用线性倾向估计方法对 1981—2000 年期间各象元 NPP 值序列进行统计分析，其变化趋势是否显著通过对相关系数的显著性检验进行判断。同时还借助于 Kendall 秩次相关法来进行检验，该方法为非参数统计方法，更适合于生态、水文、气象等非正态分布的数据^[15]。

根据各象元年 NPP 值变化趋势显著性水平，将其变化趋势分为如下 7 级：I 增加极显著（ $\alpha \leq 0.01$ ）；II 增加显著（ $0.01 < \alpha \leq 0.05$ ）；III 增加不显著（ $\alpha > 0.05$ ）；IV 基本无变化；V 减少不显著（ $\alpha > 0.05$ ）；VI 减少显著（ $0.01 < \alpha \leq 0.05$ ）；VII 减少极显著（ $\alpha \leq 0.01$ ）。

各象元 NPP 变化率由下式计算：
NPP 变化率 = 直线斜率 / 均值 × 20 × 100 （1）
公式（1）中，直线斜率表示 NPP 对年份的直线斜率，即对 20 年（1981—2000）的年平均或月 NPP 值与年份之间求回归，所得的回归直线的斜率。均值为 20 年的平均年或月 NPP 值。

2 结果分析

2.1 珠江流域植被格局

依据中国 1:400 万和 1:100 万植被图，将珠江流域的植被划分为亚热带、热带常绿针叶林、矮林灌丛、稀树灌木草原、亚热带常绿阔叶林、热带常绿阔叶林、亚热带常绿阔叶落叶阔叶树混交林、栽培植被（城市植被与农业植被）等 7 类。其分

布状况具有明显的区域性特征：亚热带、热带常绿针叶林主要分布于北盘江、柳江、东江、北江上游等地；栽培植被主要分布于珠江干流沿岸与珠江三角平原等地；稀树灌木草原主要分布于南盘江、北盘江流域的山地区域。

2.2 珠江流域植被 NPP 及时空格局

根据 GLO-PEM 模型计算的结果，20 年来珠江流域植被的年均 NPP 为 0.60 Pg C，约占中国植被年均 NPP 总量的 19.42%（据估算，中国植被年净第一性生产量为 3.09 Pg C^[16]）。研究区面积为 45.26 万 km²，单位面积的平均 NPP 高达 1328.61 g/（m²·a），是中国平均水平的 4.12 倍（据中国 NPP 及总面积推算，中国植被单位面积的平均 NPP 约为 322 g/（m²·a））。可以看出，珠江流域植被生产力在中国植被生产力中占有重要地位。

从珠江流域植被年均 NPP 分布图可以看出（图略），珠江流域植被 NPP 的最小值为 708.94 g/（m²·a），其植被类型主要是分布在北盘江上游山区的山地稀疏植被和部分稀树灌木草原；最大值为 2536.35 g/（m²·a），主要是分布在右江上游山区及珠江三角洲西南部地区的热带常绿阔叶林。从整个流域来看，NPP 分布具有明显的纬向地带性的特征：随着纬度的增加，NPP 有减少的趋势。这与各区域的水热条件差异和植被类型地带性分异规律紧密相关。由于受西南季风的影响，右江、左江及郁江流域水热条件组合好，是 NPP 分布的高值区。其中尤以广西省上思县、宁明县、广东省恩平、台山与开平市等地为最，这些地区纬度低，植被多以常绿阔叶林和山地常绿针叶林为主，且植被覆盖度高，NPP 超过 2000 g/（m²·a）。而珠江源区水热条件组合稍差，再加上植被类型转变为农田，生产力水平普遍比较低，NPP 值多在 1000 g/（m²·a）以下。

为研究 1981—2000 年间珠江流域植被生产力随时间的变化趋势在空间上的差异，采用线性倾向估计方法对各象元 NPP 值 20 年序列进行统计分析，结果如表 1、2 所示。从中可以看出：①整体上来看，珠江流域东南部与西北部植被 NPP 呈增加趋势，流域中下游特别是珠江三角洲平原地区呈减少趋势；但全流域单位面积 NPP 呈不显著下降趋势。②从其 11 个分区来看，上游源区南、北盘江、北江与东江流域都呈不显著上升趋势；中下游地区植被 NPP 都呈下降趋势，其中，红水河、柳江、右江、左江及郁江、贺桂江、西江干流下降趋势不显著，而珠江三角洲地区下降趋势显著。这一结果与 DEFRIES 等人^[17]和 SIENCHIKOV 等人^[18]

的研究结论是一致的。③从各象元的变化趋势来看，珠江三角洲平原地区特别是广东省深圳、东莞、广州、佛山、中山等地，以及贵州省威宁彝族回族苗族自治县大部分地区植被 NPP呈极显著减少或显著减少趋势，共有象元数 168个，仅占总数的 2.32%；呈极显著增加或显著增加趋势的象元

数仅有 67个，占总数的 0.93%，零星地分布于上游源区南、北盘江流域；而变化趋势不明显的象元数占总数的 34.24%；呈不显著增加的象元数最多，占总数的 35.08%；呈不显著减少的象元数有 1987个，占总数的 27.43%。

表 1 1981—2000 年间珠江流域各分区平均 NPP 的变化趋势
Tab 1 Annual changes trend of average NPP in Pearl River Basin during 1981—2000

区域	NPP均值 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	直线斜率	变化率 (%)	Pearson 相关系数	Kendall秩 次相关系数	变化趋势
1南盘江	1213.34	2.87	5.21	0.28	1.36	不显著上升
2北盘江	1079.18	1.24	2.52	0.12	0.45	不显著上升
3红水河	1472.27	-2.59	-3.87	-0.16	-1.49	不显著下降
4柳江	1253.05	-1.82	-3.19	-0.11	-0.78	不显著下降
5右江	1463.36	0.61	0.91	0.04	-0.26	不显著下降
6左江及郁江	1583.32	-0.47	-0.65	-0.03	-0.65	不显著下降
7贺桂江	1160.15	-1.23	-2.33	-0.08	-0.26	不显著下降
8西江干流	1269.81	-0.35	-0.61	-0.02	-0.32	不显著下降
9北江	1195.77	2.17	4.00	0.14	0.39	不显著上升
10东江	1448.59	0.90	1.37	0.06	0.32	不显著上升
11珠江三角洲	1545.66	-8.84	-12.59	-0.43	-2.01	显著下降
12珠江流域	1328.61	-0.36	-0.60	-0.03	-0.32	不显著下降

表 2 1981—2000 年间珠江流域各象元年 NPP 的变化趋势
Tab 2 Annual changes trend of NPP of pixels in Pearl River Basin during 1981—2000

显著水平	象元数 个	百分比 (%)	NPP均值 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	最小变化率	最大变化率	平均变化率
				(%)		
极显著减少	102	1.41	1434.12	-81.75	-15.65	-41.01
显著减少	66	0.91	1601.26	-38.20	-10.57	-21.81
不显著减少	1987	27.43	1514.02	-26.00	-1.88	-6.76
无变化	2480	34.24	1308.78	-4.23	4.04	0.11
不显著增加	2541	35.08	1195.57	21.34	2.07	7.03
显著增加	57	0.79	1121.36	21.2	11.1	15.63
极显著增加	10	0.14	1033.15	24.75	18.26	20.95

2.3 珠江流域各植被类型 NPP 的时空格局

由于不同植被类型对光能的吸收和转化能力存在明显差异，再加上生态环境因子的区域性，所以在不同的植被类型之间，植被的平均 NPP 也存在一定的差异^[19]。从单位面积上的 NPP 平均水平来比较，珠江流域的各植被类型以热带常绿阔叶林的平均 NPP 最大，约为 1472.26 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，山地稀树灌木草原的平均 NPP 最小，约为 1176.18 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。灌丛和萌生矮林的平均 NPP 约为 1276.66 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，由于其分布范围较广，决定了珠江流域植被 NPP 的整体水平。

从表 3 中可以看出，在不同的植被类型中，山地稀树灌木草原、常绿针叶林的增加趋势相对比较

明显，热带常绿阔叶林及灌丛和萌生矮林的增加幅度则较小，而亚热带常绿阔叶/落叶阔叶树混交林、栽培植被则表现出下降趋势。

但从不同的年份来看，各植被类型的 NPP 变化却表现出了相似的特征。NPP 总量在 1982 年、1991 或 1992 年和 1994 年有 3 个比较明显的低谷，而在 1986 年和 1998 年则表现出两个明显的波峰。根据遥感资料可知，1982 年整个流域的植被覆盖状况普遍欠佳，再加该年是厄尔尼诺年，气温明显比往年偏低，所以 1982 年总的 NPP 也明显偏低。所有植被类型的 NPP 在 1991/1992 年都明显下降，这主要是受 1991 年 7 月 Pinatubo 火山喷发的影响^[19-20]。由于 1994 年 9—12 月份的 NDV 是插值

得到的^[14]，因此可能会对 NPP估算有些影响。1986 年的波峰则主要是因为这个年份的植被生长状况较好，太阳辐射也较高，其 NPP 总量较高。1998 年的波峰则由于受全球厄尔尼诺现象的影响，

年平均温度、年降水量、年太阳辐射均明显比其它年份高，从而使得该年的 NPP 表现出了 20 年来的最大值。

表 3 1981—2000 年间珠江流域各植被类型平均 NPP 的变化趋势
Tab. 3 Change trend of average NPP of different vegetation types in Pearl River Basin during 1981—2000

植被类型	NPP 均值	变化率	相关系数	Kendall 秩次相关系数	变化趋势
	(g·m ⁻² ·a ⁻¹)	(%)			
常绿针叶林	1237.77	1.12	0.05	0.06	不显著增加
稀树灌木草原	1176.18	4.07	0.21	0.58	不显著增加
亚热带常绿阔叶林	1183.45	1.04	0.04	-0.06	不显著增加
亚热带常绿阔叶 / 落叶阔叶树混交林	1403.32	-1.78	-0.07	-0.58	不显著减少
农业植被	1432.38	-3.37	-0.15	-0.71	不显著减少
灌丛和萌生矮林	1276.66	0.81	0.04	0.00	无变化
热带常绿阔叶林	1472.26	0.11	0.00	-0.45	不显著减少

3 结 语

根据 GLO-PEM 模型计算的结果，1981—2000 年珠江流域年均 NPP 总量为 0.60 Pg C，占中国总量的 19.42%，单位面积的年平均 NPP 为 1328.61 g/(m²·a)，是中国平均水平的 4.12 倍。表明珠江流域植被生产力在中国植被生产力中占有重要地位。但受气候和土地利用变化的影响，20 年来珠江流域的 NPP 整体上呈现了不显著减少的趋势，且存在明显的区域差异性和较大的空间异质性，东南部与西北部植被 NPP 呈增加趋势，而流域中下游特别是珠江三角洲平原地区呈较为明显的减少趋势。

论文对珠江流域 1981—2000 年间的地表植被净初级生产力的空间分布及时间序列变化作了较为详细的分析，但对于 NPP 呈现减少趋势的成因以及对未来的影响还需深入探讨，有必要结合其他因子如降雨、太阳辐射、平均气温、日较差等进一步研究流域 NPP 及碳储量对气候和土地利用变化的响应特征。

参考文献:

[1] CRAMER W, KIKKLIGHTER D W, BONDEAU A et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results [J]. Global change biology, 1999, 5: 1—15.
[2] MBOFF M L, BOUNOUA L, RICKETTS T et al. Global patterns in human consumption of net primary production [J]. Nature, 2004, 429: 870—873.
[3] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T

Primary production of the Biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281: 237—240.
[4] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算—以中国内蒙古为例 [J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300—307.
[5] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究 [J]. 地理学报, 2000, 55(1): 36—45.
[6] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603—608.
[7] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(4): 563—569.
[8] 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 [J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 8—16.
[9] 陶波, 李克让, 邵雪梅. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟 [J]. 地理学报, 2003, 58(3): 372—380.
[10] 柯金虎, 朴世龙, 方精云. 长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(6): 764—770.
[11] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 373—380.
[12] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 等. 土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响 [J]. 地理学报, 2004, 59(4): 581—591.
[13] 卢玲, 李新, FRANK V. 黑河流域植被净初级生产力的遥感估算 [J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 823—830.
[14] PRINCE S, SMALL J. AVHRR Global Production Efficiency Model, 1981—2000 [DB/OL]. College Park, Maryland: The Global Land Cover Facility, 2003. Ver.

- tion 1.0 http://www.geog.umd.edu/glopem/GLOPEM.htm#NPP_Map
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999: 69—72
- [16] CAO M K, TAO B, LI K R. Interannual Variation in Terrestrial Ecosystem Carbon Fluxes in China from 1981 to 1998 [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45 (5): 552—560
- [17] DEFRIES R S, FIELD C B, FUNG J, 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]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13: 803—815
- [18] CRISTINA M, CHRISTOPHER D E, RAMAKRISHNA R. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 401—410
- [19] SIENCHIKOV G L, KIRCHNER, I, ROBOCK A, et al. Radiative forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption [J]. *Journal of geophysical research*, 1998, 103: 13837—13847.
- [20] LUCHT W, PRENTICE I C, MYNENIR B, et al. Climatic control of the high—latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect [J]. *Science*, 2002, 296: 1687—1689

Net Primary Productivity and Its Spatio-temporal Patterns in the Pearl River Basin

WANG Zhao-li CHEN Xiao-hong

(Center for Water Resources and Environment, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: With increased study of global change, the function of vegetation has become more widely appreciated. As one of the characters of the vegetation, the net primary productivity (NPP) becomes an important approach to study the structure and function of the vegetation in terrestrial ecosystem. In this paper, NPP data sets modeled by the satellite data-driven Global Production Efficiency Model (GLO-PEM) are used to study NPP and its spatio-temporal patterns in the Pearl River Basin. To study the spatio-temporal patterns of NPP in the the Pearl River Basin, regression analysis and the Kendall test are applied. The results reveal that: (1) During the past 20 years, the total annual NPP of vegetation in the Pearl River Basin is 0.60 Pg C, accounting for 19.42% of the total country NPP. The average NPP is 1328.61 g/(m²·a), as much as 4.12 times the total country mean; (2) The difference of the spatial pattern of NPP arises from differences in habitat and the ability of vegetation to adapt to different environments. The highest average NPP per unit is 2536.35 g/(m²·a) in the mountain areas of Youjiang River, while the lowest average NPP is 709 g/(m²·a) in the mountain areas of Beipanjiang River; (3) Different vegetation has a different NPP due to differences in the utilization rates of various resources. Among all vegetation types, evergreen broad leaf forests with a NPP of 1472.26 g/(m²·a) are the most productive, while the least productive one is alpine sparse vegetation with a NPP of 1176.18 g/(m²·a); (4) Global climate change and land use change are the key factors that influence NPP in the Pearl River Basin. NPP in the Pearl River Basin has been decreasing at a rate of 0.36 g/(m²·a), corresponding to an annual decrease rate of 0.03% of the annual mean NPP.

Key words: NPP, GLO-PEM, GTS, spatio-temporal patterns, the Pearl River Basin