

基于 GIS 和 RS 的广东陆地植被生产力及其时空格局

郭志华¹, 彭少麟^{2*}, 王伯荪³

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中国科学院华南植物研究所, 广州 0 510650; 3. 中山大学生物系, 广州, 510275)

摘要:在 GIS 和 RS 工具支持下, 利用多时相遥感数据 NOAA-AVHRR NDVI 和地面气象数据研究了广东陆地植被净第一性生产力及其时空分布。结果表明: 广东陆地植被净第一性生产力的遥感估算值与实测值接近, 效果较好; 广东陆地植被净第一性生产力介于 $0 \sim 1568.9 \text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间, 年平均净第一性生产力约为 $753.2(\pm 277.0) \text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 全省陆地生态系统每年约固定碳 $1.34 \times 10^{14} \text{g}$ 。广东陆地植被净第一性生产力的地区差异显著, 反映了广东陆地植被因受人类活动影响而比较破碎的特点; 同样, 广东陆地植被净第一性生产力的年变化显著, 夏半年约为冬半年的 4 倍以上, 这主要与该地区气温和水分条件的季节变化有关; 即使是常绿阔叶林, 其年净第一性生产力也有明显差异, 且年变化显著。

关键词:净第一性生产力; 时空格局; NOAA-AVHRR NDVI; 地理信息系统; 广东

Combining multitemporal NOAA-AVHRR NDVI and ground auxiliary data for estimating terrestrial net primary production in Guangdong

GUO Zhi-Hua¹, PENG Shao-Lin², WANG Bo-Sun² (1. *The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing, 100091, China*; 2. *South China Institute of Botany, Chinese Academy of Guangzhou 510650, China*; 3. *Department of Biology, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1444~1449.

Abstract: With the aid of the ARC/INFO 7. 2. 1 and ERMapper 5. 5, using the ground meteorological data and multitemporal NOAA-AVHRR NDVI data, based on the estimations of PAR absorbed by vegetation and the light utilization efficiency of vegetation, we estimated the net primary production (NPP) in Guangdong province, China, which mainly lies in subtropical and tropical monsoon climate zones. The results showed that: ① The assessed values of NPP were consistent with the values of NPP in the same regions before, so the above method for the estimation of NPP was effectual and reliable. ② The annual NPP in Guangdong varied from 0 to $1568.9 \text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and the average NPP in the whole region was $753.2(\pm 277.0) \text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, so the terrestrial vegetation in Guangdong could assimilate $1.34 \times 10^{14} \text{g/a}$ or so carbon. ③ The zonal variations of mean NPP in Guangdong were very obvious, this indicated the feature of 'broken' vegetation in Guangdong; and the seasonal variations of the NPP in Guangdong were very remarkable, too. The mean NPP in summer was more than 4 times higher than that in winter, the main reason was the seasonal swings in temperature and precipitation in this region. ④ Different subtypes of the evergreen

基金项目: 国家自然科学基金重大基金(批准号: 39899370)、中国科学院“九五”重大研究(批准号: KZ951-B1-110)和广东省自然科学基金重大基金(批准号: 980952)资助项目

* 通讯联系人

收稿日期: 2000-03-24; 修订日期: 2000-05-22

作者简介: 郭志华(1965-), 男, 四川仁寿县人, 博士, 副研究员。主要从事 3S 技术在生态学中的应用研究。

beadleaf forests did not have the same NPP. All the evergreen broadleaf forests shown large seasonal changes of NPP.

Key words: net primary production; multitemporal NOAA-AVHRR NDVI; geographic information system; Guangdong Province

文章编号: 1000-0933(2001)09-1444-06 中图分类号: P98, Q948 文献标识码: A

区域乃至全球植被净第一性生产力(NPP)的有效估测从来就是植被生态学的重要研究内容,同时也是卫星遥感的一项重要应用^[1];并且,基于此的农作物估产极具价值^[2]。

Tucker 等对大气 CO₂ 浓度与归一化差植被指数(NDVI)动态关系的研究为利用遥感数据研究自然植被生产力奠定了基础^[3]。

估计全球陆地 NPP 的方法有两类:一是利用植被图,根据局部的 NPP 值,通过插值来计算;另一类是在生物圈水平上的建模。模型又分为统计模型、参数模型和过程模型 3 种,其中参数模型在精度和简单实用性方面效果较好^[4]。过程模型的典型代表是广泛使用的 TEM 模型^[5,6],该模型利用气候、海拔、土壤、植被和水分有效性等因子来估算 NPP 及氮固定等。

在利用参数模型进行 NPP 估算时,有的直接利用 NDVI 数据,建立 \sum NDVI 与 NPP 的之间的线性或非线性模型来进行计算^[1,7~12]。Rasmussen 在对 Senegal 草地 NPP 的估算中,利用土壤和植被信息,以及 GIS 插值工具根据各观测点的数据生成了环境和气候的空间表面,最后利用多元线性回归分析技术,建立了 NPP 与 NDVI 的积分、树木盖度和平均表面温度的关系模型,提高了对 NPP 的估算精度^[13]。

参数模型估算 NPP 的另一途径是在利用遥感数据估算植被吸收的光合有效辐射(APAR)的基础上,通过估算光利用率(ϵ)(将吸收的 PAR 转换为有机碳的效率,又称转换效率 Conversion efficiency)来实现的^[1]。

NPP 与 APAR、 ϵ 的关系就是 Monteith 方程^[14]:

$$NPP = \epsilon \cdot \int APAR \quad (1)$$

利用上述关系,Paruelo 等估算了美国中部大草原的 NPP^[14];Field 等成功地估计了全球陆地和海洋的 NPP^[15];Potter 等结合 CASA 生物圈模型估测了美国和加拿大在 1987 和 1988 年的 NPP^[16],虽然 Fan 等^[16]认为包括 Potter^[17]在内的全球生态系统模型都不能获得 NPP 的可靠估计。

本研究在利用遥感数据和地面气象数据估算广东植被吸收的光合有效辐射(APAR)及其光利用率(ϵ)的基础上,进一步研究了广东陆地植被生产力及其时空格局。

1 数据与方法

1.1 数据

本文所用的 NOAA-AVHRR NDVI 数据由美国地质调查局(USGS)提供,为 1992 年 4 月~1993 年 3 月间 12 个月的最大值合成 NDVI,地面几何分辨率为 1km^[18]。USGS 免费提供的全球 1km NDVI 数据(网址为: <http://edc.usgs.gov/>)已被广泛应用于大尺度的陆地植被生态学研究^[1]。最大值合成法可以最大程度地减少不良天气等对遥感数据的影响^[1]。

地面气象数据从广东省气象局获得,为 NDVI 同一时期的全省 31 个气象站的气温和降水等^[18]。

1.2 方法

首先利用地面气象数据计算广东 31 个气象站点在研究时期内各月的光合有效辐射(PAR),再用 GIS 插值工具计算广东省陆地各月的 PAR;之后,利用 Potter 提出的公式^[17]和遥感数据计算广东陆地植被对 PAR 的吸收系数 f_{PAR} ,然后根据 $APAR = f_{PAR} \cdot PAR$ 计算广东陆地植被 APAR^[18]。广东植被光利用率(ϵ)的计算同样在 GIS 和 RS 等工具的支持下,所用数据为同一时期的地面气象数据和多时相 AVHRR NDVI,方法有明确数据^[17]和 Field 等^[15,19]提出和使用的公式。 ϵ 的计算公式为: $\epsilon(x, t) = f_1(x, t) \cdot f_2(x, t) \cdot f_w(x, t) \cdot \epsilon^*$,其中 $\epsilon(x, t)$ 表示时间为 t 月象元 x 处植被的光利用率, $f_1(x, t)$ 和 $f_2(x, t)$ 表示气温对植物

光利用率的影响, $f_w(x, t)$ 表示水分因子对植物光利用率的影响, ϵ^* 表示最大光利用率^[20]。在上述研究基础之上, 再利用公式(1)计算广东陆地植被生产力。

GIS 方面的工作在软件 ARC/INFO7.2.1(for NT)下实现, 数字图象处理和分析在软件 RMapper 5.5a(for WIN95)下进行, 统计分析在 SAS 软件下进行。

本文在对各种类型植被 NPP 的分析时, 均取 ≥ 9 个象元($\geq 9\text{km}^2$)来代表该类型植被。研究子区根据文献^[21, 22]和野外调查来选定。

2 结果与讨论

2.1 净第一性生产力 NPP

计算结果表明: 在 1992 年 4 月~1993 年 3 月期间, 广东陆地植被净第一性生产力 NPP 介于 0~1568.9gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)之间(图版 I)。全省植被年平均生产力约为 753.2(± 277.0)gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)。全省大陆约有 177358 个象元, 计面积约 17.7358 万 km^2 。按此计算, 全省植被每年约固定 1.34×10^{14} gC。

黑石顶和鼎湖山常绿阔叶林区的 NPP 分别为 1099.5(± 36.6)gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)和 1196.4(± 41.3)gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$), 与该地区过去的实测值(分别为 1332.5gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)(细根生产量按占 NPP 的 45%记)和 1046.8gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)相比^[22, 23], 黑石顶常绿阔叶林 NPP 的遥感估算值比实测值低 17.5%; 鼎湖山常绿阔叶林 NPP 的遥感估算值比实测值高 12.5%。总体看, 虽然估算值与实测值有一定差异, 但还是比较接近。产生差异的原因可能是: 鼎湖山常绿阔叶林的实测 NPP 是通过测量植被的光合能力和叶面积指数来实现, 而黑石顶常绿阔叶林的实测 NPP 是用年轮的方法得出, 因此, 实测值均代表常绿阔叶林的多年平均值, 且取样地面积远小于 1km^2 ; 而遥感估算值是基于遥感数据在 1km^2 的空间大小上得出的当年值。

2.2 NPP 的时空变化

2.2.1 空间变化 广东陆地植被 APAR 的区域变化很大^[18], 且生产力的区域差异也很大(图版 I)。广东陆地植被 NPP 的最高值(1568.9gC/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$))出现在阳江林场($21^\circ 38' \text{N}$, $111^\circ 39' \text{E}$), 植被类型为人工桉林。广东植被 NPP 的高值区(大于 $1200\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)多出现在粤中及粤西部分地区。潮汕平原大部、罗定盆地、南雄盆地、雷州半岛北部大部分地区、连州西北部石灰岩地区等地的 NPP 较低, 多小于 $600\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 受工业化和城市化进程影响, 广大的珠江三角洲地区的 NPP 很低, 多小于 $300\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 大的水库(如新丰江水库、枫树坝水库)和河流(珠江)附近的 NPP 更低(图版 I)。

为进一步说明广东植被生产力的空间分异规律, 在广东省等角双标准纬线圈锥投影的投影平面上, 从濠江县西北部作到粤东部饶平县的剖面线, 以 5×5 象元(即 25km^2)的大小取滑动平均值及其变异系数 CV, 得图 1。从图 1 可以看出, 剖面线经过地区植被 NPP 的空间分异很大, 但大致可分为以下几种类型: ① NPP 滑动平均值曲线的起伏较小、同时其变异系数较小, 表明该地区植被的 NPP 在 25km^2 及更大的空间范围内的变化都不大, 如雷州半岛北部、电白及潮汕北部部分地区; ② NPP 滑动平均值曲线的起伏较大、同时其变异系数较小, 表明该地区植被的 NPP 虽在大于 25km^2 的空间范围内变化大, 但在 25km^2 范围内的变化却较小, 如阳东、恩平和东莞等地的部分地区; ③ NPP 滑动平均值曲线的起伏较大、同时其变异系数也较大, 表明该地区植被的 NPP 在 25km^2 及更大空间范围内的变化都很大, 珠江三角洲及其附近地区为该类型的典型代表; ④ NPP 滑动平均值曲线的起伏较小、但同时其变异系数却较大, 表明该地区植被的 NPP 在 25km^2 的范围内的变化较小, 但却在更大的空间范围内变化很大, 如惠州西部小部分地区。

3.2.2 年变化 广东植被 NPP 的年变化显著(图 2)。夏半年(1992 年 4 月~1992 年 10 月)的平均 NPP 约为 $93.5\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{Mon})$, 而冬半年(1992 年 11 月~1993 年 3 月)的平均 NPP 约为 $22.0\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{Mon})$, 夏半年约为冬半年的 4.25 倍。NPP 的年变化呈明显的双峰型, 全年以 10 月最高(158.4 ± 73.3), 其次为 7 月(132.4 ± 68.4)。8 月(104.3 ± 56.8)和 9 月(107.4 ± 49.1)是一个明显的低值期。5 月(66.6 ± 46.8)和 6 月(66.3 ± 46.0)相差不大。全年以 3 月(7.8 ± 6.7)为最低。

不同经纬度地区, 植被 NPP 的年变化见图 3。从图中可以看出, 在各经纬度带内, 多表现为 10 月份最高。115~117E 例外, 在该区, 7 月的 NPP($160.3\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{Mon})$)均高于 10 月的 NPP($140.3\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{Mon})$)。在整个广东大陆及不同经纬度范围内, 植被 NPP 的年变化均表现为不同程度的双峰型, 这是由

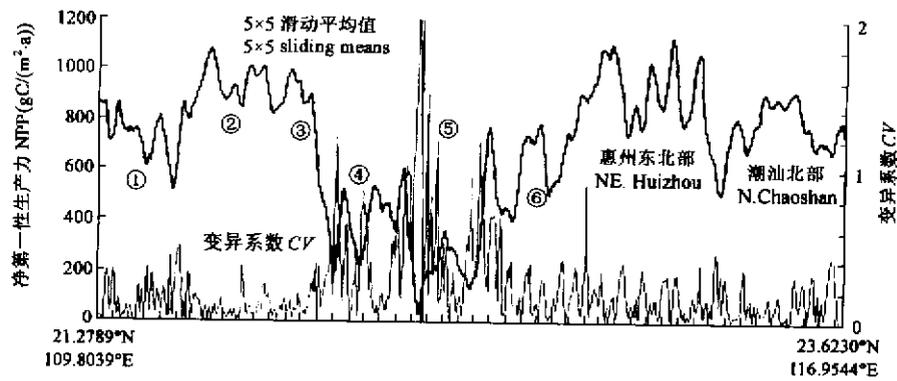


图1 广东东部近海地区植被 NPP(gC/(m²·a))及其变异系数 CV

Fig. 1 The traverse of the net primary production(gC/(m²·a))and the CV of the east coastal Guangdong Province
①雷州半岛北部 N. Leizhou Pen ②电白 Dianbai ③阳东 Yangdong ④恩平 Enping ⑤珠江三角洲 Pearl River Delta ⑥东莞 Dongguan

于云、雾等不良天气的影响而导致的估算误差,还是植被自身的性质,其中原因有待进一步研究。实际上,在南亚热带湿润地区,树木的年轮在一年有两个环的事实就反映了该地区植物在一年中可以有二个生长高峰,并且这也是正常的现象。

2.3 不同类型植被的 NPP

各植被类型研究子区的选取及其代码见文献^[18]。主要有:原生常绿阔叶林 Ea(黑石顶 I,车八岭 I、丰溪 II),长势较好的次生常绿阔叶林 Eb(从化平头顶 IV、广州帽峰山 V 和南昆山 VI),长势良好的人工常绿阔叶林 Ec(湛江桉林 VII、阳江林场桉林 VII),竹林 Ed(广宁 IX),针叶树成熟林 Ca(黑石顶、鼎湖山),针叶树幼林 Cb(白云山),灌丛 S(阳山东山、罗定苹塘),草丛 G(罗定黎少),农业生态系统 AE(中山、南雄盆地、潮汕平原),城市生太系统 CE(广州和韶关)。

在选中的研究区内,各大植被类型的净第一性生产力 NPP 介于 179.0~1354.0gC/(m²·a)之间,平均为 848.6gC/(m²·a)。平均值的多重比较表明:对于 NPP,除广宁竹林 Ed 与针叶树成熟林 Ca 之间、灌丛 S

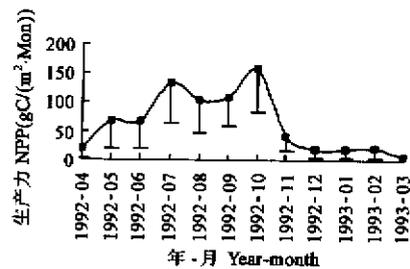


图2 广东省植被 NPP(gC/(m²·Mon))的年变化(±标准差)
Fig. 2 Seasonal changes of mean NPP(gC/(m²·Mon)) in Guangdong Province (±se)

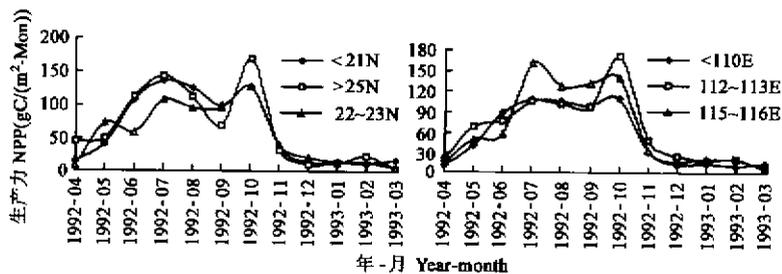


图3 广东植被在不同经纬度范围内平均 NPP 的年变化(gC/(m²·Mon))
Fig. 3 Seasonal variations of mean NPP in differential zones in Guangdong Province

和草丛 G 之间、以及草丛 G 和农业生态系统 AE 之间无显著差异外,其余各大类型之间均差异显著($P < 0.05$)。长势良好的人工常绿阔叶林 Ec(桉林)的 NPP 最高,约为 $1354(\pm 114.2)\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,余下依次为长势较好的次生常绿阔叶林 Ed(1187.5 ± 104.2)、原生常绿阔叶林 Ea(1108.5 ± 50.6)、竹林 Ed(953.7 ± 29.5)和针叶树成熟林 Ca(927.2 ± 98.9)、针叶树幼林 Cb(665.2 ± 60.7)、灌丛 S(577.7 ± 34.4)和草丛 G (513.8 ± 55.1)、农业生态系统 AE(451.5 ± 144.4),城市生态系统的 NPP 最低,约为 $179.0(\pm 152.2)\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (图 5A)。

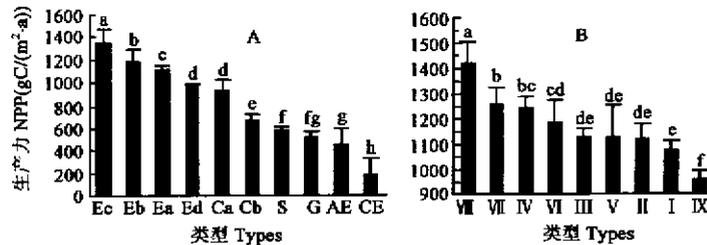


图 4 各类型植被平均 NPP 之比较($\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)(+标准差)

Fig. 4 Mean NPP of different vegetations($\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)(+se)

A: 各大类, B: 常绿阔叶林; 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$) A; Different types, B; Different evergreen broad-leaf forests. Different letters indicate significant differences($p < 0.05$)

对于常绿阔叶林,在选中的研究区内,阳江林场桉林 VII 的 NPP 最高,约为 $1415.7(\pm 92.9)\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,广宁竹林 IX 的 NPP 最低,约为 $953.7(\pm 39.5)$ 。选中的 3 处原生常绿阔叶林(I, II, III),其 NPP 之间无显著差异($1073.3 \sim 1127.9\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$),但均显著低于长势良好的人工常绿阔叶林(VII, VIII),并且一些长势较好的次生常绿阔叶林(IV, 1245.1)的 NPP 也显著高于原生常绿阔叶林($p < 0.05$)(图 5B)。这些均证明了原生常绿阔叶林的 NPP 并不是最高,人工林和长势好的次生常绿阔叶林也完全可能具有与之相当、甚至更高的 NPP。

广东虽主要位于亚热带湿润季风气候区,但其常绿阔叶林的生产力仍有显著年变化。一年中,冬半年的生产力很低。多数常绿阔叶林的生产力一年有两个高峰期,分别是 10 月份和 7 月份。此外,长势较好的次生常绿阔叶林 Eb(平头顶、帽峰山和南昆山)6 月份的生产力较 5、7 月份低,其中原因有待进一步研究。其它各地的常绿阔叶林,净第一性生产力多在 8、9 月份明显降低。

3 小结

(1) 广东陆地植被净第一性生产力的遥感估算值与实测值较一致,效果较好。因此,利用多时相卫星遥感数据 AVHRR NDVI 和地面辅助数据,通过估算植被吸收的光合有效辐射和光利用率来估算植被的净第一性生产力的方法是可行、有效的。

(2) 广东陆地植被的生产力介于 $0 \sim 1568.9\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间,年平均净第一性生产力约为 $753.2(\pm 277.0)\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,这样,全省陆地生态系统每年约固定碳 $1.34 \times 10^{14}\text{g}$ 。

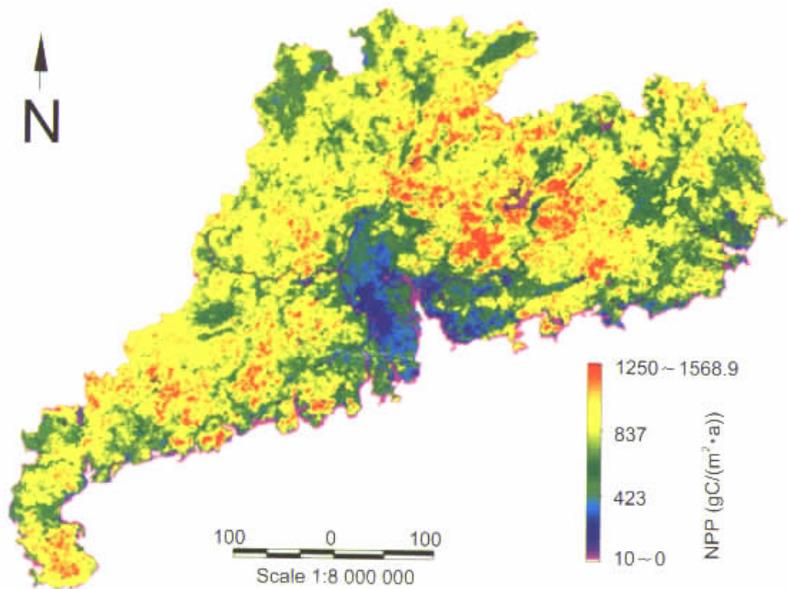
(3) 广东陆地植被 NPP 的时空变化十分显著;即使是常绿阔叶林,其 NPP 也不尽相同,并且年变化显著。

参考文献

- [1] 彭少麟,郭志华,王伯荪. RS 和 GIS 在植被生态学中的应用及其前景. 生态学杂志, 1999, 18(5): 52~64.
- [2] Hayes M J and Decker W L. Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *Int J Remote Sens*, 1996, 17(16): 3198~3200.
- [3] Tucker C J, Fung I Y, Keeling C D, et al. Relationship between atmospheric CO_2 variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature*, 1986, 319: 195~199.

- [4] Ruimy A and Saugier B. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *J Geophysical Research*, 1994, **97**:18515~18521.
- [5] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, **363**:234~240.
- [6] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*, 1998, **396**:664~667.
- [7] Running S W and Nenani R R. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulate photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sens Environ*, 1988, **24**:347~367.
- [8] Box E O, Holben B N and Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*, 1989, **80**:71~89.
- [9] Running S W. Estimating terrestrial primary productivity by combining remote sensing and ecosystem simulation. In: Hobbs R J and Mooney H, ed. *A Remote Sensing of Biosphere Functioning*. Springer-Verlag, 1990. 65~86.
- [10] Diallo O, Diouf A, Hanan N P, *et al.* AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987~1988. *Int J Remote Sens*, 1991, **12**(6):1259~1279.
- [11] Prince S D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sabelian grasslands 1981~1988. *Int J Remote Sens*, 1991, **12**(6):1301~1311.
- [12] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 遥感资料估算中国的净第一性生产力. *植物学报*, 1996, **38**(1):35~39.
- [13] Rasmussen M S. Developing simple, operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information; part 1. Assessment of net primary production. *Int J Remote Sens*, 1998, **19**(1):97~117.
- [14] Paruelo J M, Epsis H E, Lauenroth W K, *et al.* ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1997, **78**(3):953~958.
- [15] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, *et al.* Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, 1998, **281**:237~240.
- [16] Holland E a, Brown S, Potter C S, *et al.* North American carbon sink. *Science*, 1999, **283**:1815a.
- [17] 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.
- [18] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪, 等. GIS 和 RS 支持下广东省植被吸收 PAR 的估算及其时空分布. *生态学报*, 1999, **19**(4):441~447.
- [19] Field C B, Randerson J T, and Malmstrom C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sens Environ*, 1995, **51**:74~88.
- [20] 《广东省自然保护区》编委会. 广东省自然保护区. 广州: 广东旅游出版社, 1997. 1~374.
- [21] 中国科学院华南植物所. 广东省植被类型图(1:500 000). 北京: 学术期刊出版社, 1989.
- [22] 陈章和, 王伯荪, 张宏达. 南亚热带常绿阔叶林的生产力. 广州: 广东高教出版社, 1996. 124~135.
- [23] 彭少麟, 张祝平. 鼎湖山地带性植被生物量、生产力和光能利用率. *中国科学(B 辑)*, 1994, **24**(5):497.

郭志华,等:基于GIS和RS的广东陆地植被生产力及其时空格局
GUO Zhi-Hua, *et al*: Combining multitemporal NOAA-AVHRR NDVI and ground auxiliary
data for estimating terrestrial net primary production in Guangdong Plate 1



广东植被 NPP (gC/(m²·a))
The terrestrial net primary production in Guangdong Province