

云南省自然植被净初级生产力的时空分布特征

何云玲^{1, 2}, 张一平^{1*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 基于气候生产力模型, 利用 1960 ~ 2000年 127个气象站气温、降水资料以及植被信息, 对云南省自然植被净初级生产力的时空分布特征进行了分析。结果表明: 41 a云南自然植被年均 NPP为 4.23×10^8 tDM/a, 约占全国自然植被年均 NPP总量的 11.4%; 单位面积的平均 NPP为 10.64 tDM/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 是全国平均水平的 2.8倍。云南自然植被 NPP随着纬度、经度和海拔高度的增加均呈现下降趋势, 变化总趋势为北部 <中部 <南部, 东部 <中部 <西部。云南自然植被 NPP在干季(11 ~ 4月)和雨季(5 ~ 10月)差异显著, 6 ~ 8月最大; 41 a来云南大部分地区自然植被 NPP呈现上升趋势, 20世纪 70、80年代比 60年代有所下降, 90年代有所上升。气温增加, 降水增加或不变的情况下, 滇西北和滇东北 NPP增加幅度大于其他地区, 说明这些地区气温是制约自然植被 NPP的主要因素; 气温增加, 降水减少的情况下, 几个少雨区和多雨区 NPP降低幅度大于其他地区, 表明在上述地区限制 NPP的主要因素是水分。

关键词: 自然植被; 净初级生产力(NPP); 时空分布; 气候生产力模型; 纵向岭谷区

中图分类号: Q948

文献标识码: A

植被净初级生产力 NPP作为绿色植物在单位时间和单位面积上所能累积的有机物数量 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 或 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$], 是植被自身生物学特性与外界环境因子相互作用的结果, 也是两者之间本质联系的重要标志^[1], 因此一直是生态学研究中的一个热点。NPP是评价生态系统结构与功能协调性, 以及生物圈人口承载力的重要指标^[2]; 随着全球变化的加剧及其对全球变化研究的不断深入, 植被净初级生产力在研究全球变化对生态系统的影响、响应和对策中, 成为一项不可缺少的测定指标及核心内容^[3]。

目前用于计算植被净初级生产力的模型大致可分为气候模型(统计模型, 以 Miami模型为代表)和遥感模型(包括参数模型和机理模型, 前者以 CASA模型为代表, 后者以 TEM、Century等全球模型和 BEPS等区域性模型为代表。我国现阶段所采用的

模型大多为气候模型, 遥感模型研究起步较晚, 且以农作物遥感模型为主^[3]。周广胜等(1998)指出: 在区域或全球的空间尺度上, 植被净初级生产力主要决定于光、热、水, 即太阳辐射、气温、降水资源的时空格局变化与植被净初级生产力格局过程密切相关; 植物群体在土壤和气候处于最适条件下植物所能达到的最大 NPP为植物的气候生产力。气候生产力的研究对于合理利用资源, 充分发挥生产潜力, 寻找提高植被净初级生产力途径等具有重要的指导意义^[4]。

云南省地处中国西南边陲, 位于 $21^{\circ} 8' 32'' \sim 29^{\circ} 15' 8'' \text{N}$ 和 $97^{\circ} 31' 39'' \sim 106^{\circ} 11' 47'' \text{E}$ 之间, 北回归线横贯本省南部; 地形地貌复杂, 跨越高原、山地与河谷地区, 海拔高度从 76.4 m到 6 740 m, 地势上基本西北较高, 向东南方向逐渐降低, 相对高差较大; 气候多样, 有热带、亚热带、温带等, 几乎包含了全国主

收稿日期(Received date): 2005 - 08 - 11; 改回日期(Accepted): 2005 - 12 - 01。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2003CB415101), 云南省自然科学基金重点项目(2003C0002Z)资助。[Supported by the National Key Project for Basic Research on Ecosystem Changes in Longitudinal Range-Gorge Region and Transboundary Eco-security of Southwest China (2003CB415100), the Natural Science Foundation of Yunnan Province (2003C0002Z).]

作者简介(Biography): 何云玲(1978 -), 女, 汉族, 云南人, 在读博士, 主要研究领域: 生态气候。Tel: 0871 - 5160904, E-mail: hyl@xtbg.ac.cn [He Yunling (1978 -), female, the Han nationality. Mostly field: ecological climatology.]

*通讯联系人(Corresponding author): 张一平 [Zhang Yiping], Email: yipingzh@xtbg.ac.cn; Tel: 0871 - 5160904

要的气候类型;形成了全球生物多样性最丰富的地区之一,拥有北半球的绝大多数生物群落类型和除沙漠与海洋外的各类生态系统^[5]。刘文杰等^[6]曾经对滇南西双版纳地区的 NPP 随气候变化的规律和特点做了初步估算,认为西双版纳近 40 a 植被 NPP 呈略有下降的变化趋势。本研究将选取能较好反映云南植物 NPP 分布的气候生产力模型对云南自然植被的 NPP 时空分布格局的特征和规律进行初步估算和分析,并且探讨了其对全球气候变化的响应。一方面不仅为准确评价自然植被在地区、区域乃至全国生态环境平衡和保护中的特殊地位和功能作用,另一方面也为当地政府部门采取措施维护并实现自然植被资源的持续利用和合理保护提供科学的依据。

1 研究方法

1.1 资料的收集与整理

本研究的气象数据均来自于国家气象中心气象资料室,包括全省 127 个气象站 1960~2000 年的各月平均气温、降水量,所有数据通过了均一性检验。年、干季(11~4月)、雨季(5~10月)的数据序列来自于对应各月的统计。

1.2 植被净初级生产力模型的比较与研究

1.2.1 Miam i 模型

H. Lieth 利用世界 5 大洲约 50 个地点实测 NPP 数据和与之匹配的平均气温及年均降水资料建立

$$NPP_T = 3000 / (1 + e^{1.315 - 0.119t}) \quad (1)$$

$$NPP_R = 3000 / (1 - e^{-0.000664R}) \quad (2)$$

NPP_T 及 NPP_R 分别根据年均温()及年降水量(mm)求得 ($g/m^2/a$),是一个较早建立的模型,由于仅考虑了气温和降水,后被很多学者在实际应用中加以改进。

1.2.2 Thomthwait 模型

H. Lieth 采用 Thomthwait 方法计算实际蒸散 E (mm)及与 Miam i 模型相同的 50 组生产力资料,根据最小二乘法建立

$$NPP_E = 3000 (1 - e^{-0.0009695E}) \quad (3)$$

其中 NPP_E ($g/m^2/a$)由于采用实际蒸散求得,而计算以及影响实际蒸散的参量极多,例如辐射、风速、饱和水汽压等,所以其在实际应用中受到一定限制。

1.2.3 Chikugo 模型

Uchijima 等 (1985) 利用 BP 期间 682 组森林植被资料提出^[7]

$$NPP = 0.29 \exp(-0.216(RDI)^2) \cdot R_n \quad (4)$$

其中 NPP 为自然植被净初级生产力 ($tDW/hm^2/a$), RDI 为辐射干燥度, R_n 为陆地表面所获得的净辐射量 ($kcal/(hm^2 \cdot a)$)。它是一个较好的估算 NPP 的方法,是植物生理生态学和统计、相关方法结合的产物,综合考虑诸因子的作用,是一种半经验半理论的方法。该模型在推导过程中是以土壤水分供给充分、植物生长很茂盛条件下的蒸散来计算植物净初级生产力,但仅考虑了森林资料,对广大干旱半干旱地区不适用。但是其在推导过程中应用的一些理念,至今仍被众多学者所采用,例如其利用充分成熟植被与近地气层之间水汽通量方程(相当于蒸散量)和 CO_2 的通量方程(相当于 NPP)导出如下关系

$$NPP = \frac{A_0 R_n}{d(1 + \beta)} \quad (5)$$

A_0 为与扩散条件和 CO_2 浓度有关的常数, R_n 为年净辐射量, d 为饱和差, β 为 Bowen 比。由于 d 和 β 都随气候干燥度的增大而增大,因此 NPP 将随干燥度的增大而减小。利用辐射干燥指数 $RDI = R_n / (L \times P)$,其中 L 为蒸发潜热, P 为年降水量。 RDI 是辐射能量的年净收入与蒸发掉年降水所需能量的比值,是表示气候干燥程度的一种指数。

1.2.4 北京模型

朱志辉 (1993) 认为在缺少必要的计算 A_0 的资料情况下,可把 $A_0 / [d(1 + \beta)] = f$ 看作一个整体,利用实测 NPP 和 R_n 的比值反推其 f 函数形式;因此用包括中国 46 组在内的各类植被的 751 组资料建立了一个模型^[8]

$$NPP = \begin{cases} 6.93 \exp[-0.224(RDI)^{1.82}] \cdot R_n, & \text{当 } RDI \leq 2.1 \\ 8.26 \exp[-0.498(RDI)] \cdot R_n, & \text{当 } RDI > 2.1 \end{cases} \quad (6)$$

1.2.5 综合模型

周广胜和张新时 (1995) 认为植物通过光合作用所产生的干物质中固定的太阳能是地球上生态系统中一切生命成分及其功能的基础,植被净初级生产力基本上取决于照射到植物上的太阳能及其根际层的土壤水分,因此基于 Chikugo 模型相似的推导过程,根据植物的生理生态学特点及联系能量平衡

和水量平衡方程的实际蒸散模型, 将植物群体的 NPP 和蒸腾量 (AE) 可分别表示为如下公式^[9-10]

$$NPP = \int_0^T P_N(t) dt$$
$$\approx AT_0 a_0 a_1 [(C_a - C_t) / (R_c' + R_{s,c})]$$

(7)

$$AE = \int_0^T AE_t(t) dt$$
$$\approx AR_0 b_0 b_1 [(e_a - e_a) / (r_c + r_{s,w})]$$

(8)

这两个公式充分体现了植物的生理生态学特性。各项参量的物理意义见文献。经过推导建立了适合中国大陆范围内计算植被净初级生产力的模型

$$NPP = RD \bar{I} \cdot \frac{r \cdot (1 + RD I + RD \bar{I})}{(1 + RD I) \cdot (1 + RD \bar{I})} \cdot Exp$$
$$- \sqrt{9.87 + 6.25 RD I}$$

(9)

式中 NPP 自然植被净初级生产力 ($t DM / (hm^2 \cdot a)$); r : 年降水量 (mm); Rn : 年净辐射量 (换算为蒸发量单位, mm); $Rn = RD I \cdot r \cdot L$; L : 蒸发潜热, $L = 597 - 0.57T$; T : 为年平均气温 ($^{\circ}C$)

$$RD I: \text{辐射干燥度 } RD I = (0.629 + 0.237 PER - 0.00313 PER^2)^2$$

$$PER: \text{Holdsridge 可能蒸散率 } PER = PET / r = BT \cdot 58.93 / r$$

PET : 年可能蒸散量 (mm)

BT : 年平均生物温度 ($^{\circ}C$)

$$BT = \sum t / 365 = \sum t' / 12$$

t 代表气温为 $0 \sim 30$ 的日均温, t' 为 < 30 与 > 0 的月均温。

另外, 国内不少学者利用上述模型对中国或各区域植被气候生产潜力以及未来气候变化各情景下, CO_2 倍增导致气候变化对中国植被净初级生产力的影响进行了初步探讨^[6, 11-15]。

本研究共收集到云南省 29 组实测植被群落生产力数据, 所收集到的生产力资料包括: 地点、经度、纬度、海拔高度、多年平均温度、多年平均降水、群落组成成分、主要优势种等。首先将 29 组数据中具有相同经纬度、海拔高度的样地资料进行平均, 得到 10 组不同地区的植被生产力数据, 用最常用于中国

植被气候生产力的 3 类模型对 10 个地区植被生产力进行模拟。图 1 和表 1 给出了三类模型对于云南省植被净初级生产力的模拟结果及其与实测资料的比较。可见, 在 NPP 值较小时 ($< 10 t DW / (hm^2 \cdot a)$), 模型结果大大高于实测资料; 但当在 NPP 值较大时模型结果大大低于实测资料。另外, 综合模型比其他两个模型更接近实际观察结果, 相关系数达到 0.568。为此选择综合模型作为反映云南省植被气候生产力的计算模型, 重点主要反映其 NPP 的时空变化趋势。

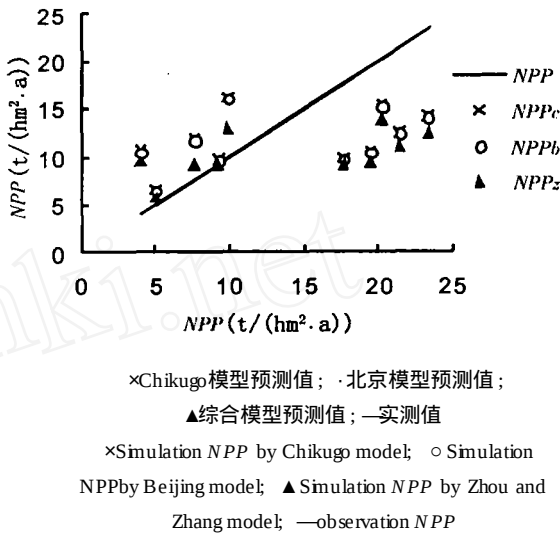


图 1 模拟与实测净第一性生产力的关系

Fig 1 Relationship between simulated net primary productivity (NPP) and observed NPP

2 植被净初级生产力及其时空分布

2.1 空间分布特征

片根据模型计算的结果, 41 a 云南省自然植被年均 NPP 为 $4.23 \times 10^8 t DM / a$ ($0.42 Pg DW / a$), 如果按照 $1gC = 2.2 g DW$ (干物质) 换算, 为 $0.19 Pg C / a$, 约占全国年均 NPP 总量 ($1.69 Pg C / a$)^[16] 的 11.4%。整个云南省面积为 $39.4 \times 10^4 km^2$, 单位面

表 1 基于植被气候生产力模型模拟的云南自然植被净初级生产力与实测生产力

Table 1 Comparison between measured data and simulate data of NPP in Yunnan ($t / (hm^2 \cdot a)$)

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	相关系数
实测值	7.64	5.03	19.50	17.70	3.98	9.31	21.45	9.93	23.39	20.30	1.0
Chikugo模型	11.89	6.52	10.58	9.89	10.68	9.81	12.59	16.21	14.29	15.42	0.449
北京模型	11.79	6.55	10.47	9.79	10.57	9.70	12.45	16.06	14.14	15.25	0.447
综合模型	9.25	5.82	9.45	9.16	9.58	9.22	11.06	12.93	12.55	13.88	0.568

积的平均 NPP 为 $10.65 \text{ tDM}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ($484.04 \text{ g C}/\text{m}^2/\text{a}$), 是全国平均水平 ($176 \text{ g C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)^[16] 的 2.8 倍。可以看出, 云南省的 NPP 在全国 NPP 中占重要地位。

图 2 显示了云南省自然植被平均 NPP 的频率分布, 可见全省各个地区的 NPP 主要分布在 $8.50 \sim 10.50 \text{ tDM}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的范围之间, 占了近 50.39% 的分布频率。说明云南大部分地区的 NPP 均高于全国平均水平, 87% 的地区 NPP 在 $8.50 \sim 14.50 \text{ tDM}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间, 只有极个别地区才低于这个水平; 因此决定了全省自然植被 NPP 的平均水平。

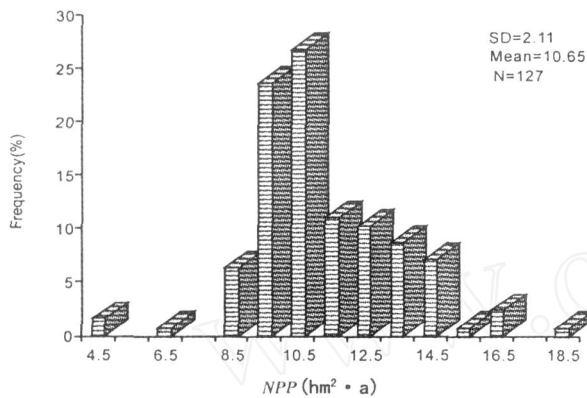


图 2 云南省植被平均 NPP 频率分布图

Fig 2 The frequency distribution of NPP in Yunnan

将云南省自然植被平均 NPP 绘制成 NPP 分布图 (图 3)。可以看出, NPP 最小值为 $4.73 \text{ tDM}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 其下垫面主要植被类型是青藏高原高寒山被区域的德钦、中甸高山云、冷杉林、蒿草灌木草甸区 (杨一光的云南自然植被区划^[17], 下同); 其次就是滇中西北部较小, 主要植被类型是高原亚热带北部常绿阔叶林地。带。 NPP 最大值为 $17.51 \text{ tDM}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (西盟地区), 主要植被类型是高原亚热带南部季风常绿阔叶林地。带; 其次滇南地区的热带季雨林、雨林区域的 NPP 值也较高 (勐腊地区)。从图 3 中值得注意的是: 在云南省北部、中部, 从东北到西南, 在相同纬度比较, 在云南东西分界区域均存在低值区, 从而形成了一条 NPP 的低值带, 其低值中心正好位于由高黎贡山、横断山等高山和怒江、澜沧江、金沙江 - 元江等高山、河谷构成的准南北向的纵向岭谷区, 并且总体上西部区域的 NPP 高于东部, 显示了纵向岭谷区的阻隔效应; 在云南南部, 地势相对变得较平缓, NPP 的经向变化有所减小; 但沿河

谷地区 (特别是澜沧江流域) 呈现出 NPP 的高值区, 显示出纵向岭谷的通道作用。

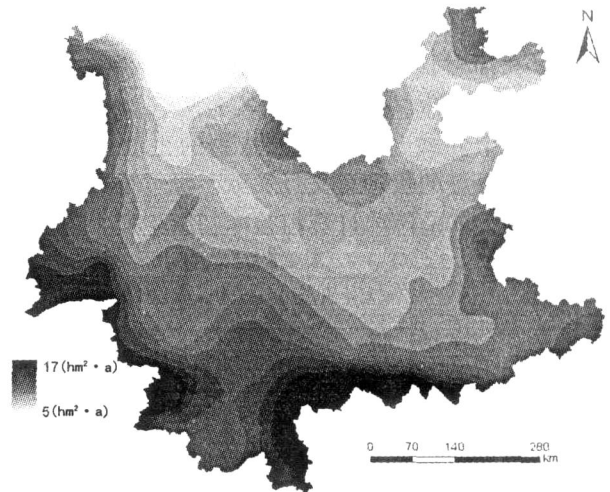


图 3 云南省植被平均 NPP 分布图

Fig 3 Distribution of average NPP in Yunnan

云南属于我国西部季风范围内, 主要受到西风环流和西南季风的影响。省内南北向的温度梯度明显, 这种温度梯度的生态地理作用是构成云南自然植被南北带状分异的热量基础。南部年均温 20°C 以上, 最冷月 15°C 左右, 在热量水平上属于热带; 其余大部分属于亚热带的热量水平, 年均温 $11 \sim 19^\circ\text{C}$ 间, 最冷月平均气温 $5 \sim 12^\circ\text{C}$ 间; 滇西北中甸、德钦以北地区属于青藏高原东南缘的高寒地区, 年均温在 5°C 以下, 最冷月在 0°C 以下。而年降水量的分布总的趋势是南多北少, 南部边沿地区年降水量在 1500 mm 以上, 滇西南山原地区约在 $1000 \sim 1500 \text{ mm}$ 间, 高原中部多在 $800 \sim 1000 \text{ mm}$ 间, 北部不到 800 mm 。降水从西向东的变化为滇西高黎贡山以西年降水量偏多, 大约在 1500 mm 以上; 往东明显降低, 大致西起保山, 东到陆良附近的北纬 25° 两侧高原, 年降水量都在 $800 \sim 1000 \text{ mm}$ 间, 再往东, 年降水量又增加到 1200 mm 左右。此外, 云南有一些明显的多雨区与少雨区, 不同地区雨量颇为悬殊。东南部以江城为中心, 包括河口、金平、绿春、江城、勐腊等地, 处于高耸山体迎东南暖湿气流和台风入侵的山前部位, 年降水量在 $1600 \sim 2200 \text{ mm}$ 间; 滇西南以西盟为中心, 包括澜沧、沧源、孟定、龙陵、潞西等地的多雨区, 位于西南暖湿气流的山前迎风坡向, 年降水量达 $1500 \sim 2800 \text{ mm}$ 之间, 其中西盟的年降水平均达到 2751.7 mm 以上。

云南北部靠近金沙江谷地的楚雄州北部和大理州东部, 由于东南季风 - 西南季风交汇区域, 气流到达这里时均已失去大量水汽, 在以元谋、宾川为中心形成一个少雨区 (年降水量在 500 ~ 700 mm 左右); 滇西北的德钦、中甸, 处于西南暖湿气候的背风区, 年降水量在 600 mm 左右, 也是少雨区。因此, 一方面可以说云南自然植被 *NPP* 的分布主要由其热量和水分的自然条件决定, 水热条件决定了地带 *NPP* 的大小, 两者间有很好的-致性, 南部主要取决于水分, 北部主要限制条件是热量, 而水热条件又主要是地形地貌和纬度决定的。另一方面, 云南自然植被 *NPP* 分布特征与整个云南的植被类型和各区域的城市化水平也有密切关系: 云南南部热带地区水热条件良好, 分布热带季雨林、雨林, 因有良好而湿润的土壤条件配合而

发育, 群落层次结构复杂, 物种丰富, *NPP* 具有较大值; 云南大部分地区处于亚热带常绿阔叶林区域, 虽然决定了云南省 *NPP* 的整体水平, 但由于这些地区开发较早, 人为活动频繁, 盆地及其边缘山地下部的常绿阔叶林现存较好者已少, 在适合常绿阔叶林发育的地区大多已为人工种植的松林所占据, 主要植被类型为位于滇中高原盆谷内的滇青冈林、元江栲林、云南松林区等; 在过去一个时期内的城市化进程的加剧对植被破坏较大, 该地区植被有部分退化为长穗高山栎和萌生灌丛、滇石栎萌生灌丛等, 影响了该地区的植被 *NPP* 大小; 云南西北部地区虽然人烟稀少, 人为活动干扰相对不大, 但由于气温较低, 处于青藏高原高寒山被区域, *NPP* 水平较低。

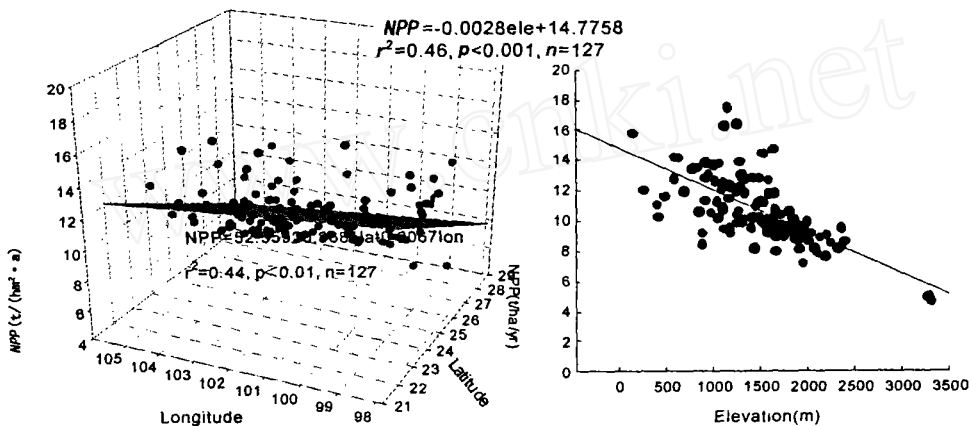
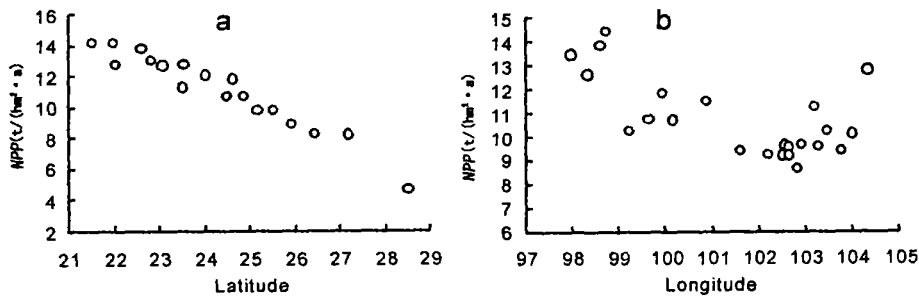


图 4 云南省植被平均 *NPP* 地理分布与经纬度和海拔的关系

Fig 4 The geographic patterns of *NPP* with latitude and longitude, and the relationship between elevation and *NPP* in Yunnan



a. 东经 99 ~ 100° 之间澜沧江流域从北向南 b. 北纬 24° 从西向东
a. from north to south within the 99 ~ 100° b. from west to east within the 24°

图 5 云南省植被平均 *NPP* 分布

Fig 5 The distribution of *NPP* in Yunnan

总的来说,云南省自然植被 NPP 随着纬度的增加和经度的增加均呈现下降趋势;另外,随着海拔高度的增加也随之下降(图 4)。

图 5 a 是沿 $99^{\circ} \sim 100^{\circ} E$ 澜沧江流域 18 个站点植被的 NPP 分布,可见植被 NPP 是从北向南逐渐升高的;图 5 b 是沿北纬 24° 从西向东 23 个站点植被的 NPP 分布,可见,植被 NPP 在西部边缘地区较高,向东有下降趋势, $101^{\circ} \sim 103^{\circ} E$ 有较小值,再往东植被 NPP 又有所增加。从图 6 可以更清楚地看出云南省自然植被 NPP 的变化总趋势:北部 < 中部 < 南部,东部 < 中部 < 西部。显示了纵向岭谷区的通道 - 阻隔效应。

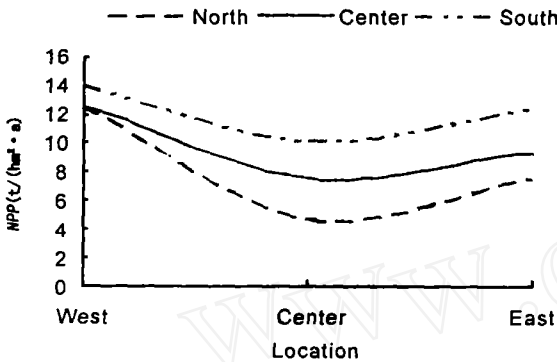


图 6 云南省植被平均 NPP 分布
Fig 6 The distribution of NPP in Yunnan

2.2 时间分布特征

为了获得 NPP 随时间变化的趋势,计算了每一地区对应的年均自然植被 NPP 值随年份变化回归分析的趋势系数,并对其显著性进行检验;结果显示在 127 个站点中有近 70.08% (89 个) 站点的 NPP 呈现上升趋势,主要因为云南大部分地区的气温除了中部个别站点外或多或少都有上升趋势,而年降水量虽然在 20 世纪 70、80 年代比 60 年代减少甚多,但 90 年代有上升倾向;所以水热结合从而导致大部分地区的 NPP 有所增加。但是大部分地区的趋势系数都未达到 0.05 的显著性检验,说明这些变化属于自然波动。

就总体而言,云南自然植被 NPP 的月变化如图 7 a 所示,云南的气候受季风影响,全年差异不大,但干季 (11 ~ 4 月) 和雨季 (5 ~ 10 月) 差异明显,因此自然植被 NPP 也表现为显著的单峰型,雨季大于干季,处于植被生长季节期间的 6 ~ 8 月最大,其余各月逐渐下降。就年变化 (图 7 b) 来说,云南大部分

地区降水在 20 世纪 70、80 年代比 60 年代明显减少,是 NPP 在这时期明显低于 60 年代的主要原因;据柯金虎等^[18] 研究表明,由于受 1991 年菲律宾 Pinatubo 火山爆发影响,我国大部分地区平流层的气溶胶大量增加,从而导致我国大部分地区 1992 年间太阳辐射显著减少,这可能是导致 1992 年云南自然植被 NPP 出现低值的主要原因。另外,由于受全球厄尔尼诺现象的影响,1998 年的平均温度、年降水量、年太阳辐射均明显高于其他年份,从而使得云南 NPP 在 1998 ~ 1999 年间呈现上升趋势。

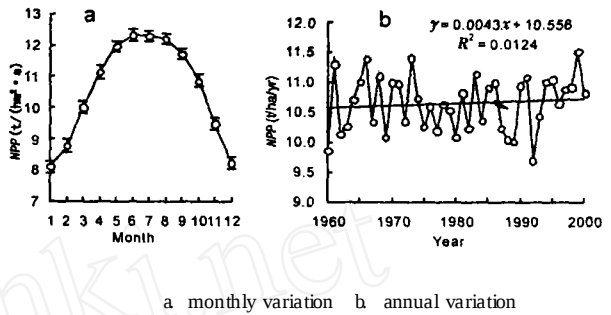
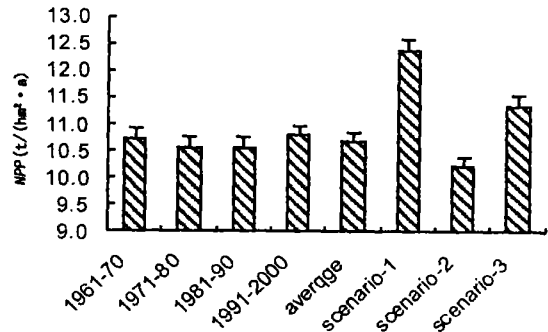


图 7 云南省植被平均 NPP 月变化与年变化
Fig 7 The temporal variation of NPP in Yunnan

3 未来气候变化下自然植被 NPP 的分析

关于根据若干大气环流模式 (GCM) 对二氧化碳浓度倍增后的中国大陆气温和降水变化的预测分析,张新时等 (1993) 将可能的一般结果归结为: 1. 年平均气温增加 $2^{\circ}C$, 年降水量增加 20%; 2. 年平均



scenario - 1 指气温增加 $2^{\circ}C$, 降水增加 20%;
scenario - 2 指气温增加 $2^{\circ}C$, 降水减少 20%;
scenario - 3 指气温增加 $2^{\circ}C$, 降水基本不变。

图 8 目前及 CO_2 浓度倍增后云南植被的 NPP
Fig 8 The NPP at present time and under doubled CO_2 concentration in Yunnan

气温增加 4°C , 年降水量增加 20%^[19]。郑元润等 (1997) 总结的一般结果可综合如下: 1. 年平均气温增加 2°C , 年降水量增加 20%; 2. 年平均气温增加 2°C , 年降水量减少 20%; 3. 年平均气温增加 2°C , 年降水量不变^[13]。根据对云南省 1960~2000 年的 41 a 气候资料的统计分析结果显示, 大部分地区虽然呈现升温趋势, 但年降水量变化趋势并不明显, 因此我们采用上述后一种气候变化预测结果作为云南省植被 *NPP* 对二氧化碳浓度倍增后未来气候变化的响应背景, 结果见图 8 所示。在年平均气温增加 2°C , 年降水量增加 20% 的情况下, 云南省植被 *NPP* 增加 0.14%~0.27% 间; 在年平均气温增加 2°C , 年降水量基本不变的情况下, 云南省植被 *NPP* 增加 0.04%~0.15% 间, 但这两种情况下位于滇西北的德钦、中甸、兰坪和滇东北的镇雄、昭通等地均呈现 *NPP* 增加幅度大于其他地区的趋势, 说明在这些地区温度是制约植被 *NPP* 大小的主要因素, 温度提高有利于植被干物质的累积, 从而提高 *NPP* 的平均水平。在温度增加 2°C , 降水减少 20% 的情况下, 云南省自然植被 *NPP* 降低 0.12%——基本不变, 位于几个少雨区 (元谋、宾川) 和多雨区 (西盟、元江、金平、龙陵、江城) 等地 *NPP* 的降低幅度大于其他地区, 表明在上述地区限制 *NPP* 的主要因素是水分, 温度升高降水减少从而加剧环境趋向变干, 不利于 *NPP* 形成。由此可见, 如果仅从气候因素来考虑, 在降水不变或增加的情况下, 全球变化将有利于云南西北、东北地区的 *NPP* 增加; 在降水减少的情况下, 全球变化将不利于云南省西南到东南边缘, 以及滇中部分少雨区的植被生长, 对这些地方的生态系统是一个严重威胁, 值得引起足够重视。

4 结果与讨论

本文基于气候生产潜力模型的计算, 结合云南省 127 个气象站点 1960~2000 年的温度、降水序列资料, 探讨了云南自然植被 *NPP* 的空间、时间分布规律及特征, 而且初步探讨了其在全球变化情况下的响应, 得出以下结论:

1. 41 a 云南自然植被年均 *NPP* 为 $4.23 \times 10^8 \text{ t DM/a}$ (0.19 Pg C/a), 约占全国自然植被年均 *NPP* 总量的 11.4%; 单位面积的平均 *NPP* 为 $10.64 \text{ t DM/(hm}^2 \cdot \text{a)}$ (484.04 g C/a) 是全国平均水平的 2.8 倍。

2. 云南自然植被 *NPP* 随着纬度、经度和海拔的增加均呈现下降趋势; 空间变化总趋势: 北部 < 中部 < 南部, 东部 < 中部 < 西部。

3. 云南自然植被 *NPP* 在雨季 (5~10 月) 明显高于干季 (11~4 月); 大部分地区 *NPP* 时间变化呈现上升趋势, 20 世纪 70、80 年代比 60 年代有所下降, 90 年代有所上升, 但是大部分趋势系数都未达到 0.05 的显著性检验。

4. 温度增加, 降水增加或不变的情况下, 滇西北和滇东北 *NPP* 增加幅度大于其他地区, 说明这些地区温度是制约植被 *NPP* 的主要因素; 温度增加, 降水减少的情况下, 几个少雨区和多雨区 *NPP* 降低幅度大于其他地区, 表明在上述地区限制 *NPP* 的主要因素是水分。

5. 在云南省北部、中部, 从东北到西南, 在云南东西分界区域存在 *NPP* 低值区, 从而形成了一条 *NPP* 的低值带, 其低值中心正好位于由高山、河谷构成的准南北向的纵向岭谷区, 并且总体上西部区域的 *NPP* 高于东部, 显示了纵向岭谷区的阻隔效应; 在云南南部, 地势相对变得较平缓, *NPP* 的经向变化有所减小; 但沿河谷地区 (特别是澜沧江流域) 呈现出 *NPP* 的高值区, 显示出纵向岭谷的通道作用。

由于我国关于植被产量的资料很少, 而且测定的对象、方法缺乏统一标准, 仍有不少学者在致力寻找能提高自然植被净初级生产力估算精度的模型和方法^[11]。本文以气候因子的组合直接体现植被功能, 一方面因为均值可以有效地体现显域性规律, 可用于 *NPP* 本身以及生态气候条件的宏观评价, 另外基于植被分布与环境变量之间, 存在着“平衡”或“准平衡”的关系的假设从较大空间和较大时间尺度上看是可以接受的; 另外一方面, 这种初步估算对于阐明自然植被 *NPP* 在不同地域的分布特征, 从而为研究地区土地人口承载能力的估算, 农业区划等具有重要参考价值, 而且亦为更好地保护、利用和开发广阔的森林、草场等自然资源提供理论依据, 特别可用于预测全球变化条件下植被净初级生产力的演变, 对人类采取适当的对策具有不容忽视的重大意义。但是利用气候生产力模型来估算自然植被净初级生产力, 不可避免存在一定局限性 (反映特定水热背景下的 *NPP* 值, 仅只考虑气温和降水影响, 忽视了土壤等其他因素的影响; 另外不能反映自然植被不同生育演替阶段的 *NPP*)。还应该指出, 二氧

化碳浓度倍增所引起的全球气候变化因地而异,本研究只是为大致了解全球环境变化对于植被的可能影响,未考虑自然植被对气候反应的滞后效应。今后既有必要加强植物生产量方面的研究工作,仍需致力寻找能提高研究地区自然植被 *NPP* 估算精度的模型和方法。

Ni Jian(2003)指出在中国范围内 *NPP* 与温度和降水的相关性较高;且 *NPP* 随纬度增加而减小,随经度增加而增加^[20];本文的研究结果与其有相同与不同之处,*NPP* 随高度、经度、纬度增加都呈现减小趋于,其原因为云南东西部之间存在有纵向岭谷区,准南北向的高山河谷,与西南季风趋于正交,导致云南省气候存在经向差异,造成云南省 *NPP* 随经向变化趋势与其他研究不同。另外,云南自然植被平均 *NPP* 虽然低于福建的平均水平 ($18 \text{ tDM}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)^[21],但明显高于长江流域的平均水平 ($5.764 \text{ tDM}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)^[18]。由于不同下垫面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,是导致自然植被 *NPP* 空间分异的重要原因。对于 *NPP* 多年变化趋势,有研究指出 *NPP* 总量与太阳辐射之间存在密切关系^[18],但也有人认为 *NPP* 对水分胁迫很敏感^[22];在本研究中研究地区日照时数近 41 a 无明显变化趋势(图略),影响 *NPP* 主要还需进一步验证。另外,很多学者指出由于人类活动所引起的全球变化对于自然植被净初级生产力的重大影响不容忽视,例如土地利用方式的改变等,是导致某些地域植被净初级生产力在时间变化趋势上呈现下降的主要原因^[23]。

致谢:本文中部分气候资料由国家气象中心气象资料室提供,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Xu Deying, Guo Quanshui, Yan Hong, et al Impacts of climate change on China forest[M]. Beijing: China Science & Technical Press, 1997. 76~86[徐德应,郭泉水,阎洪,等.气候变化对中国森林影响研究[M].北京:中国科学技术出版社,1997.76~86]
- [2] Xiao Wenfa, Xu Deying The physiological and ecological basis of forest energy utilization and yield forming[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999. 70~90[肖文发,徐德应.森林能量利用与产量形成的生理生态基础[M].北京:中国林业出版社,1999.70~90]
- [3] Hao Yongping, Chen Yufeng, Zhang Xingyou Progress in estimation of net primary productivity and its responses to climate change[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(6): 564~571[郝永萍,陈育峰,张兴有.植被净初级生产力模型估算及其对气候变化的响应研究进展[J].地球科学进展,1998,13(6):564~571]
- [4] Zhou Guangsheng, Zheng Yuanrun, Chen Siqing, et al *NPP* model of natural vegetation and its application in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(5): 2~11[周广胜,郑元润,陈四清,等.自然植被净第一性生产力模型及其应用[J].林业科学,1998,34(5):2~11]
- [5] Yang Yunbao, Zhou Xiang, Li Yinhe, et al A new survey of Yunnan province[M]. Kunming: Yunnan Public Press, 1996. 3~4[杨云宝,周祥,李银和,等.新编云南省情[M].昆明:云南人民出版社,1996.3~4]
- [6] Liu Wenjie Impact of climatic variation on net primary productivity of natural vegetation Xishuangbanna[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(4): 296~300[刘文杰.西双版纳近40年气候变化对自然植被净第一性生产力的影响[J].山地学报,2000,18(4):296~300]
- [7] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation (1) Chikugo model for evaluating primary productivity[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1985, 40: 343~352
- [8] Zhu Zhihui *NPP* estimation model of natural vegetation in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(15): 1422~1426[朱志辉.自然植被净第一性生产力估计模型[J].科学通报,1993,38(15):1422~1426]
- [9] Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi A natural vegetation *NPP* Model[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(3): 193~200[周广胜,张新时.自然植被净第一性生产力模型初探[J].植物生态学报,1995,19(3):193~200]
- [10] Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi Study on *NPP* of natural vegetation in China under global climate change[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 11~19[周广胜,张新时.全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J].植物生态学报,1996,20(1):11~19]
- [11] Zhang Xianzhou Estimation and distribution of net primary productivity in China[J]. *Natural Resources*, 1993, 2: 15~21.[张宪州.我国自然植被净第一性生产力的估算与分布[J].自然资源,1993,2:15~21]
- [12] Liu Shiong, Guo Quanshui, Wang Bin Prediction of net primary productivity of forests in China in response to climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(5): 478~483[刘世荣,郭泉水,王兵.中国森林生产力对气候变化响应的预测研究[J].生态学报,1998,18(5):478~483]
- [13] Zheng Yuanrun, Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi, et al An agricultural net primary productivity model[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9): 831~836[郑元润,周广胜,张新时,等.农业生产力模型初探[J].植物学报,1997,39(9):831~836]
- [14] Luo Tianxiang, Zhao Shidong Patterns and mathematical models of Chinese-fir productivity in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5): 403~415[罗天祥,赵士洞.中国杉木林生物生产力格局及其数学模型[J].植物生态学报,1997,21(5):403~415]
- [15] Wang Yuhui, Zhou Guangsheng, Jiang Yanling Simulation of *NPP* and evaluation of ecosystem services of *Larix gmelini* forest[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2001, 12(5): 648~652[王玉辉,周

- 广胜, 蒋延玲. 兴安落叶松林生产力模拟及其生态效益评估 [J]. 应用生态学报, 2001, 12 (5): 648 ~ 652]
- [16] Piao Shilong, Fang Jingyun. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25 (5): 603 ~ 608 [朴世龙, 方精云. 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]
- [17] Yang Yiguang. About the principles and units of vegetational regionalism in Yunnan [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1980, 2 (4): 441 ~ 450 [杨一光. 论云南自然植被区划的原则和单位 [J]. 云南植物研究, 1980, 2 (4): 441 ~ 450]
- [18] Ke Jinhu, Piao Shilong, Fang Jingyun. NPP and its spatio-temporal patterns in the Yangtze River watershed [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27 (6): 764 ~ 770 [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]
- [19] Zhang Xinshi, Yang Dianan, Ni Wenge. The potential evapotranspiration index for vegetation and vegetation-climatic classification——An introduction of main methods and PEP program [J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17 (2): 97 ~ 109 [张新时, 杨奠安, 倪文革. 植被的 PE (可能蒸散) 指标与植被 - 气候分类 (三)——几种主要方法与 PEP 程序介绍 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17 (2): 97 ~ 109]
- [20] Ni Jian. Net primary productivity in forests of China: scaling-up of national inventory data and comparison with model predictions [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176 (3): 485 ~ 495
- [21] Yan Shujun, Hong Wei, Wu Chengzhen, *et al*. Impact of climatic variation on net primary productivity of natural vegetation in Fujian in recent 41 years [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19 (6): 522 ~ 526 [闫淑君, 洪伟, 吴承祯, 等. 福建近 41 年气候变化对自然植被净第一性生产力的影响 [J]. 山地学报, 2001, 19 (6): 522 ~ 526]
- [22] Churkina G, Running SW, Schloss AL. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): the importance of water availability [J]. *Global Change Biology*, 1990, 5: 46 ~ 55.
- [23] Defries RS, Field CB, 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]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13: 803 ~ 815

A Preliminary Study on the Spatial-temporal Pattern of NPP in Yunnan Province

HE Yunling^{1, 2}, ZHANG Yiping¹

(1. Xishuangbanna Tropical Botanic Garden, CAS, Kunming 650223, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Climatic data from 1960 to 2000 in 127 stations over Yunnan province are used in a net primary productivity (NPP) model of natural vegetation, with a view to the ecophysiological feature and regional evapotranspiration model relating the water balance equation and heat balance equation, to estimate the spatial distribution and temporal change of NPP in recent 41 years in this area. The changing pattern of NPP in Yunnan province was also given under doubled CO₂ concentration. The main results follow below: during the past 41 years, the total annual NPP of vegetation in Yunnan is 4.23 10⁸ tDM/a, accounting for 11.4% of the total country NPP. The average NPP is 10.64 tDM/(hm² · a), as much as 2.8 times the total country mean. The difference of spatial pattern of NPP arises from differences in habitat and the ability of vegetation to adapt to different environments, and the NPP of vegetation in Yunnan decreases with increased latitude, longitude and elevation. Average NPP is higher in the rainy season than in dry season. The NPP value meanly has a little increase tendency under the recent 41 years. When the annual average temperature increases and the annual precipitation increases or stays unchanged, NPP in north-east and north-west may increase much than in other region. When the annual average temperature increases and the annual precipitation decreases, NPP in several rain-belt and rainless-belt may decrease acutely.

Key words: natural vegetation; net primary productivity (NPP); spatial-temporal pattern; Climatic NPP model; Longitudinal Range-Gorge Region