

长白山自然保护区生态系统碳平衡研究

张娜¹, 于贵瑞², 赵士洞², 于振良³ (1. 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100039, E-mail: zhangna@gscas.ac.cn; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 国家自然科学基金委员会, 北京 100085)

摘要:运用已建立的 EPPML 生物地球化学循环模型,对 1995 年长白山自然保护区生态系统的碳平衡状况进行了模拟。模拟结果表明,该保护区植被的年净初级生产力 [NPP (碳量)] 为 $1.332 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,以阔叶红松林和云冷杉林最高,分别为 $0.540 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.428 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这 2 种林型是长白山面积最大、生产力最高的林型,其生产力的模拟结果对整个保护区的碳循环和碳平衡影响最大,前者的准确性决定了后者的可靠性。总的来说,模拟值不仅在保护区不同植被带和气候带的相对比较中是符合常规的,而且在与相当分散的实测数据的绝对比较中也是比较准确的。该保护区的植被具有明显的碳汇功能,主要表现为植被碳量的增长,每年增长约 $1.058 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。阔叶红松林的年碳量增长最大 ($0.452 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$),云冷杉林其次 ($0.339 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)。这 2 种林型对整个保护区的碳汇功能起着至关重要的决定性作用。其它依次为:长白落叶松林、阔叶林、草甸、灌丛、高山苔原、岳桦林和高山流砾滩草类。1995 年该保护区土壤有机质的分解碳量比凋落物碳量高 $0.169 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,除草灌土壤出现有机质的积累,高山苔原和高山流砾滩土壤有机质的分解与积累处于近似平衡状态外,乔木林下土壤有机质的分解量均为凋落物量的 1.5 ~ 2.0 倍。

关键词:碳平衡;净初级生产力;碳量增长;凋落物量;土壤有机质的分解

中图分类号:X36 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)01-09-0024

Carbon Budget of Ecosystem in Changbai Mountain Natural Reserve

Zhang Na¹, Yu Guirui², Zhao Shidong², Yu Zhenliang³ (1. College of Earth Science, Graduate School, CAS, Beijing 100039, China E-mail: zhangna@gscas.ac.cn; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

Abstract: The study used EPPML, a biological geochemistry cycle model that was built, to simulate the carbon budget for ecosystems in Changbai Mountain Natural Reserve. The results indicated that the annual net primary productivity [NPP (carbon)] of the natural reserve was $1.332 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. The annual NPP of mixed broad-leaved and Korean pine forest and spruce-fir forest were maximal, $0.540 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and $0.428 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively. The area and productivity of the two stands were maximal in Changbai Mountain, therefore, the simulating productivity of the two stands most greatly affect carbon cycle and carbon budget of the natural reserve, and the veracity of the former decides the security of the latter. To sum up, not only did the simulations accord with routines in the relative comparisons between different vegetation belts and climate belts in the whole natural reserve, but also was exact in the absolute comparisons with very disperse data from field survey. Vegetations in the natural reserve had evident carbon sink functions, mainly exhibiting in the increasing of carbon, about $1.058 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. The annual carbon of mixed broad-leaved and Korean pine forest increased greatest ($0.452 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$), secondly spruce-fir forest ($0.339 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$). The two stands played crucial roles in the carbon sink for Changbai Mountain, others being Changbai larch forest, broad-leaved forest, meadow, shrub, alpine tundra, subalpine *Betula ermanii* forest and alpine grass. In 1995, the decomposing carbon of soil organic matter was $0.169 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ higher than the littering carbon in the natural reserve. There was accumulation of organic matter in the meadow soil and shrub soil. The decomposition and accumulation of soil organic matter was in the nearly balancing condition in the alpine tundra soil and alpine grass soil. The decomposition of organic matter was

基金项目:国家自然科学基金项目(39970613);中国科学院“百人计划”生态系统管理的基础生态学过程研究项目(CX10G-C00-01)。

作者简介:张娜(1973~),女,生态学博士,讲师,主要从事草地生态学、森林生态学、景观生态学和定量遥感方面的教学和科研工作。

收稿日期:2001-12-30;修订日期:2002-09-27

as one and a half time or double as litterfall in the arbor forest soil.

Key words: carbon budget; net primary productivity; increase of carbon; litterfall; decomposition of soil organic matter

目前,碳循环和碳平衡已成为全球变化研究中多个核心计划中的重要研究内容^[1].已有不少研究在全球或区域尺度上充分评价了陆地生态系统(尤其是森林生态系统)的作用,并对当前及未来的陆地碳存贮模式进行了估计^[2].与国外相比,我国碳循环和碳平衡的研究起步较晚^[3],而且一直缺乏中、大尺度的综合研究计划,大部分仍局限于某一生态系统类型,且资料的系统性和一致性都显不够.

本研究选取长白山自然保护区作为研究区,拟从时间上和空间上突破野外实测的局限,在综合应用以往研究成果的基础上,建立了一个以地理信息系统(GIS)和遥感图像作支持的景观尺度生态系统生产力过程模型(Ecosystem Productivity Process Model for Landscape, EPPML),首次模拟了长白山自然保护区的碳循环和碳平衡状况,并对不同类型生态系统在碳循环过程和碳汇功能上的差异进行了比较.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长白山自然保护区位于吉林省的东南部,自然地理位置为 127°42′55″E~128°16′48″E, 41°41′49″N~42°25′18″N,包括长白山天池北、西、西南 3 面原始森林的心脏地区.它是原始面貌保存较好的,以整个自然环境和森林生态系统为保护对象的综合性自然保护区.总面积为 190582h m²^[4]

长白山自然保护区地带性植被是温带湿润针阔混交林.随着海拔下降,雨量减少,气温升高,形成明显的植被和各种自然景观的垂直分布带,从下到上大致可分为:低山针阔混交林带[500~1100 m,以阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林为主],山地暗针叶林带[1100~1800 m,包括红松云杉(*Picea asperata*),冷杉(*Abies nephrolepis*)林亚带和岳桦(*Betula ermanii*)云冷杉林亚带],亚高山岳桦矮曲林带(1800~2100 m),高山苔原带[2100 m 以上,包括常绿矮

石楠(*Photinia serrulata* Lindl.)灌丛亚带和砾滩亚带].此外尚有夹杂在各带范围内,处于从属地位的隐域性森林植被,例如在沼泽地上生长着非地带性的长白落叶松(*Larix olgensis*)林;在红松受到破坏的地方生长着次生的山杨(*Populus davidiana*)和白桦(*Betula platyphyl- la*)林;在林间沟谷分布有草地.长白山 4 个垂直带谱以耐寒的针叶林和阔叶红松混交林占优势^[4].图 1 显示了各类植被的分布状况.

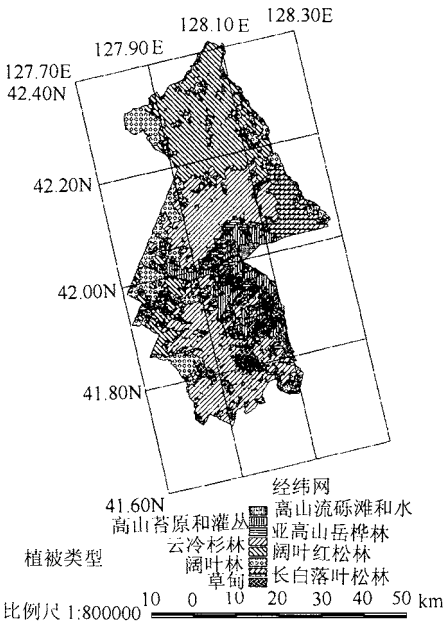


图 1 长白山自然保护区植被空间分布图

Fig.1 Vegetation map in Changbai Mountain Natural Reserve

1.2 研究方法

从生态系统物质平衡的角度来看,年净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的估计是总和一年中所有所产生组织的生产量,而无论这些组织是否被草食动物消耗或者进入凋落物库.计算 NPP 的公式为:

$$NPP = \Delta B + D_B + C_B \quad (1)$$

式(1)中,ΔB 为生物量年净增碳量;D_B 为土壤年凋落物量;C_B 为被草食动物所消耗的碳量以及因收获而移出生态系统的碳量.

植被生产力通常用植物体的干重或碳(C)量表示,两者可通过植物体的碳含量进行转换.对中纬度木本植物来说,1g干有机质中的碳含量平均约为干重的50%;对中纬度草本或农作物来说,则为45%^[5].依此确定长白山各类植被干重与碳量之间的转换关系.以下各量如无特殊说明,均用碳量来表示.

1.2.1 植被净初级生产力的模拟

以遥感图像(TM)作为数据源,获取了影响碳循环和碳平衡的重要变量叶面积指数(LAI);用计算机程序语言(Visual C++)编写了描述系统碳循环和水循环的计算机过程模型(EPPML)^[6],从中模拟包括总光合生产力(GPP)、维持呼吸量、生长呼吸量、NPP、土壤呼吸量、NEP的碳循环变量;并用GIS手段进行空间数据的处理、分析和显示.模型以天为时间尺度,在每个网格中运行并做累加,最后输出1995年长白山自然保护区碳循环变量的月平均值和年总量值.

(1)光合速率模块 长白山位于东北东部的温带森林区,基本上无C₄植物,而且林下草本植物也基本上无C₄光合型分布^[7],故在此仅考虑C₃植物的光合途径.在EPPML中考虑的影响光合作用的环境因子主要有太阳辐射、温度、土壤含水量、水汽压差和CO₂浓度等.光合作用及其生产力的形成还受植被冠层结构的影响,在EPPML中考虑了LAI、叶角分布、叶片空间分布的异质性(阳生叶和阴生叶)等冠层结构特征.

本研究运用Farquhar等人提出的叶片光合作用的生化模型^[8,9].EPPML基于羧化和电子传递2个光合作用的基本过程,也就是说叶绿体的光合速率分为受RuBP(1,5-二磷酸核酮糖)电子传递速率限制的光合作用速率(A_j)和受Rubisco(RuBP羧化/加氧酶,即ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase)活性限制的光合作用速率(A_v).Farquhar的模型不包括气孔的调节作用,EPPML将气孔导度模型与气体传输模型相结合^[10].

$$\text{对单叶: } A = \min(A_v, A_j) \quad (2)$$

式(2)中,A为叶的光合速率($\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$),为A_v和A_j的较小值.对阳生叶,A为A_{sun};对阴生叶,A为A_{shade}.A_v和A_j可用以下通式表达:

$$A = \frac{1.27}{2(g_n - g_{\min})} \cdot \left| \frac{a^{0.5}}{2}(g_n^2 - g_{\min}^2) + c^{0.5}(g_n - g_{\min}) - \frac{(2ag_n + b)d}{4a} + \frac{(2ag_{\min} + b)c^{0.5}}{4a} + \frac{4ac - b^2}{8a^{1.5}} \ln \frac{2ag_n + b + 2a^{0.5}d}{2ag_{\min} + b + 2a^{0.5}c^{0.5}} \right| \quad (3)$$

式(3)中,g_n为叶气孔导度[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$];g_{min}为日升之前或日落之后的最小气孔导度[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$],在这里,将g_{min}设为0.0.

$$\text{对 } A_v, a = (K + c_a)^2 \quad (4)$$

$$b = 2(2\Gamma + K - c_a)v_m + 2(c_a + K)R_d \quad (5)$$

$$c = (v_m - R_d)^2 \quad (6)$$

$$\text{对 } A_j, a = (2.3\Gamma + c_a)^2 \quad (7)$$

$$b = 0.4(4.3\Gamma - c_a)J + 2(c_a + 2.3\Gamma)R_d \quad (8)$$

$$c = (0.2J - R_d)^2 \quad (9)$$

对A_v和A_j,均有

$$d = (ag_n^2 + bg_n + c)^{1/2} \quad (10)$$

$$e = (b^2 - 4ac)/(8(a)^{3/2}) \quad (11)$$

式(4)~(11)中,K为酶促反应速度常数(也称米氏常数)(Pa);c_a为大气中的CO₂浓度(Pa);Γ为无暗呼吸时的CO₂补偿点(Pa);v_m为Rubisco饱和时的最大羧化速率[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$];R_d为叶暗呼吸量[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$];J为电子传递的潜在速率[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$].

$$\text{对整个冠层: } A_{\text{canopy}} = A_{\text{sun}} \times \text{LAI}_{\text{sun}} +$$

$$A_{\text{shade}} \times \text{LAI}_{\text{shade}} \quad (12)$$

式(12)中,A_{canopy}为整个冠层的光合作用强度[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$];A_{sun}为阳生叶的光合作用强度[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$];A_{shade}为阴生叶的光合作用强度[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$];LAI_{sun}为阳生叶的LAI(m²·m⁻²);LAI_{shade}为阴生叶的LAI(m²·m⁻²).

(2)净初级生产力模块 从生理生态学的

角度来看,每日 NPP 是植物每日除去呼吸消耗后所生产的有机物质;全年累积的 NPP 是一年内植物光合作用生产的有机物质扣除该期间内植物呼吸所消耗的有机质量后的剩余量^[11].

$$\text{NPP}_{\text{day}} = \text{GPP} - R_a = \text{GPP} - R_m - R_g - R_p \quad (13)$$

式(13)中, NPP_{day} 为日 NPP [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; GPP 为日总光合生产力 [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; R_a 为自氧呼吸量 [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; R_m 为日维持呼吸量 [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; R_g 为日生长呼吸量 [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; R_p 为日光呼吸量 [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 通常很小,在 EPPML 中忽略不计.

$$\text{GPP} = A_{\text{canopy}} \times \text{DAYL} \times 12.01 \times 10^{-9} \quad (14)$$

式(14)将 A_{canopy} [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 转为 GPP [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 其中 DAYL 为日照时数(s), 12.01 为碳原子的摩尔质量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

$$R_m = \sum R_{m,i} = R_{m,s} + R_{m,b} + R_{m,r} +$$

$$\text{夜晚 } R_{m,l} = \sum (M_i r_{m,i} Q_{10}^{(T - T_b)/10}) \quad (15)$$

式(15)中, i 指示不同植物组分, l 表叶, b 表枝, s 表干, r 表根; M_i 为植物各组分的碳量(对干和枝是边材量) ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); $r_{m,i}$ 为基温时植物组分 i 的维持呼吸系数 [$\text{kg} \cdot (\text{d} \cdot \text{kg})^{-1}$]; Q_{10} 为呼吸作用的温度敏感系数,也称呼吸商,本研究取值 2.34^[12,13]; T_b 为基温(设为 25 °C); T 为白天平均气温(°C).

在估算 R_g 时,植物各组分的生长呼吸系数这一参数不易获得,故常用一种简便计算方法,而不用生长呼吸系数,即先考虑 R_g 占 GPP 的比例 r ,再考虑植物组分 i 的生长呼吸量 $R_{g,i}$ 占 R_g 的比例 r_i : $R_g = r \times \text{GPP}$ (16)

$$R_{g,i} = r_i \times R_g \quad (17)$$

$$\text{年 NPP 为: } \text{NPP} = \sum \text{NPP}_{\text{day}} \quad (18)$$

1.2.2 动物消耗量的估算

动物消耗量(C_b)通常只占植被 NPP 的很小比例,除非有毁叶昆虫的大爆发.在落叶或常绿植被中,即使有 30 % 的叶子被消耗掉,它们也仅占总 NPP 的不到 3 %^[14].由于这种消耗很

难估测,在大多数的植被 NPP 计算中将其忽略不计.本研究对所有植被均假设 C_b 占 NPP 的 2 %.

1.2.3 植被年凋落物量的估算

随着海拔高度逐渐增加,长白山植被的年凋落物碳量(D_B)呈逐渐下降的趋势^[15].可用(19)表示:

$$D_B = 0.237 - 0.0000840 h \quad (R^2 = 0.852) \quad (19)$$

式(19)中, h 表海拔高度(m), D_B 的单位为 $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.由此可得整个保护区年凋落物碳量的空间分布.用可获得的云冷杉林、阔叶红松林和长白落叶松林的实测数据^[15],对模拟值进行检验,发现两者吻合得比较好.

据许广山等^[16]的研究,岳桦林、岳桦云冷杉林、长白落叶松林和阔叶红松林的枯枝落叶层蓄积量(不为碳量)分别为 $1.324 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.119 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.352 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.468 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.现用凋落物的分解比率(枯枝落叶层蓄积量与年凋落物量之比)来表示枯枝落叶层的分解程度,其中岳桦云冷杉林和长白落叶松林的凋落物分解比率在 6 以上,而阔叶红松林为 3 ~ 4^[17].用这种方法推算的岳桦云冷杉林、长白落叶松林和阔叶红松林的年凋落物量与用式(19)推算的结果也比较吻合(表 1).

1.2.4 土壤呼吸量和生态系统净生产力的模拟

在 EPPML 中,土壤呼吸量为地上和地下凋落物的分解释放量,忽略土壤微生物和动物的呼吸量.理论上,模拟土壤呼吸需要识别至少 3 个不同的层次:表层凋落物、表层土壤和较深的根区,但这涉及到一系列复杂的过程.为了简化模型,本研究不对土壤分层,不区分呼吸的类型,仅考虑土壤呼吸的总量. EPPML 的土壤呼吸模块参考 BEPS 模型^[12]:

$$R_h = a1 \times \frac{rs w}{a2 + rs w} \times \frac{a3}{a3 + rs w} \times a4^{\frac{t_{\text{soil}} - T_s}{10}} \quad (20)$$

表 1 长白山植被的年凋落物量及分解量

Table 1 Annual litterfall and decomposition carbon for various vegetations in Changbai Mountain

植被类型	来源	年凋落物平均量(C)	网格数	年凋落物总量	年凋落物分解量	分解量与凋
		/ kg•(m ² •a) ⁻¹		(C) / 10 ⁶ t•a ⁻¹	(C) / 10 ⁶ t•a ⁻¹	落量之比
高山流砾滩草类	模拟值	0.046 ± 0.014	4728	0.000196	0.000200	1.022
高山苔原	模拟值	0.060 ± 0.014	62628	0.00338	0.00366	1.083
岳桦林	模拟值	0.092 ± 0.014	47699	0.00395	0.00562	1.424
云冷杉林	模拟值	0.118 ± 0.016 (899 ~ 2010 m)	760040	0.0807	0.148	1.831
	实测值 ^[16]	0.103 (1200 m 与 1990 m 的平均)				
阔叶红松林	*	0.093	555079	0.0774	0.142	1.835
	模拟值	0.155 ± 0.009 (641 ~ 1290 m)				
	实测值 ^[16]	0.192 (740 m)				
阔叶林	*	0.183	329815	0.04245	0.0653	1.538
	模拟值	0.143 ± 0.016				
	模拟值	0.116 ± 0.022 (641 ~ 2130 m)				
长白落叶松林	模拟值	0.116 ± 0.022 (641 ~ 2130 m)	171142	0.0179	0.0348	1.948
	实测值 ^[16]	0.104 (1380 m)				
	*	0.113				
草甸	模拟值	0.095 ± 0.016	92703	0.00793	0.00659	0.832
灌丛	模拟值	0.113 ± 0.019	138531	0.0149	0.00997	0.708
总计	模拟值	0.127 ± 0.029	2162365	0.247	0.416	1.669

“ * ” 表用枯枝落叶蓄积量与凋落物分解比率推算的结果 .

式(20) 中 , Rh 为土壤呼吸量[$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] ;
 a_1 为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的最佳呼吸速率[$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] ; a_2 为土壤田间持水量的一半(m) ; a_3 为
饱和土壤含水量的一半(m) ; a_4 为土壤温度敏
感系数(2.0) ; t_{soil} 为 10cm 土层处的土壤温度
($^{\circ}\text{C}$) ; T_s 为土壤呼吸的基温(设为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) ; rs_w
为根区的平均水分含量(m) .

$$rs_w(\%) = 100 \times SW / SEW \quad (21)$$

式(21) 中 , SW 为表层土壤水分含量(m) ; SEW
为土壤有效水含量(m) .

将 rs_w 的单位由 % 转换为 m :

$$rs_w(\text{m}) = rs_w(\%) \times SW(\text{m}) / SW(\%) \quad (22)$$

最后 , 将 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 转换为 $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 得到每天总的土壤呼吸量 .

据估计 , 在植物生长期 , 各类植被覆盖下
土壤 CO_2 排放通量均表现为白天高于夜间 , 白
天约为 $3/5$, 占功能叶片净光合速率的 $10\% \sim$
 25% ; 夜间约为 $2/5$, 相当于功能叶片净光合速
率的 $10\%^{[18]}$. 据此 , 可大致区分白天和夜晚的
土壤呼吸量 :

白天土壤呼吸量 = 每天总的土壤呼吸量

× 白天土壤呼吸量所占的比例($3/5$) (23)

夜晚土壤呼吸量 = 每天总的土壤呼吸量
× 夜晚土壤呼吸量所占的比例($2/5$) (24)

土壤有机质在异养呼吸的作用下分解释放
 CO_2 , 剩余的有机质形成 NEP . NEP 包括了土壤
和凋落物层的碳库积累 .

生态系统日净生产力 $\text{NEP}_{\text{day}} = \text{NPP} - Rh$ (25)

生态系统年净生产力 $\text{NEP} = \sum \text{NEP}_{\text{day}}$ (26)

2 净初级生产力模拟结果的验证

本研究主要以文献[19]的实测数据为依据
对模拟结果进行分析和验证 , 并用其它实测数
据或模拟数据做辅助验证 . 从图 2 可见 , 年 NPP
的模拟值/ 实测值线($R^2 = 0.74$, $n = 13$) 与 $1:1$
线非常接近 , 模拟值比实测值略高 . 阔叶红松林
和云冷杉林年 NPP 的模拟值与实测值非常符
合 , 相对误差仅为 0.07% , 云冷杉林甚至仅为
 0.006% . 阔叶红松林和云冷杉林是长白山自然
保护区面积最大的林型 , 因此 , 其生产力的模拟
结果对评价 EPPML 的模拟效果最为重要 . 岳
桦林年 NPP 的实测值接近模拟值的上限 ; 草甸

年 NPP 的实测值接近模拟值的下限;长白落叶松林年 NPP 模拟值与实测值之间的相对误差较大,达到 0.5 % 以上;阔叶林年 NPP 的模拟值偏低;高山苔原和高山流砾滩草类年 NPP 的模拟值偏高.

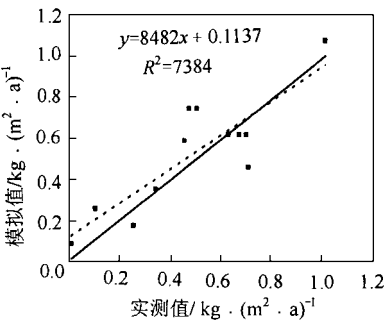


图 2 长白山植被年 NPP 模拟值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of measured and modeled annual NPP for main vegetation types in Changbai Mountain

虽然阔叶红松林的模拟结果与文献^[19]的实测值十分吻合,但由于样地的选择具有很大的主观性和随机性,往往不同样地的实测值也有很大差异.这说明,实测值只具有参考价值,由于研究尺度不同,这种比较只具有相对意义.

金昌杰^[20]对长白山阔叶红松林光温碳生产潜力的估算值为 $1.399\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 在 EPPML 的模拟结果中,阔叶红松林年 NPP 的模拟值平均为 $1.084\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 大多在 $1.355\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 以下变化;大于 $1.355\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的只是零星分布于极个别点,故基本上在以上光温碳生产潜力的估算值以下.

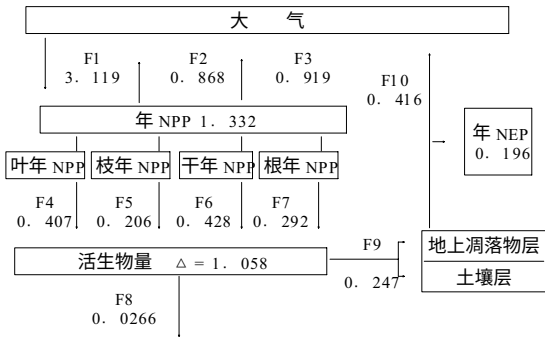
总的来说,EPPML 模拟的年 NPP 不仅在整个景观不同植被带和气候带的相对比较中是符合常规的,而且在与相当分散的实测数据的绝对比较中也是比较准确的.

3 结果与分析

3.1 植被净初级生产力的总量

长白山自然保护区植被年 NPP 总量为 $1.332 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$, 年 GPP 总量为 $3.119 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$, 用于维持呼吸和生产呼吸的有机质总量 R_m 和 R_g 分别为 $0.868 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.919 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$. 在年 NPP 中, 分别有 30.55 %、

15.47 %、32.06 % 和 21.92 % 的碳分配到叶、枝、干和根中. 年 NEP 总量为 $0.916 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3).



F1: 植被年总光合生产碳量 F2: 植被年维持呼吸碳量 F3: 植被年生长呼吸碳量 F4: 植被叶年净初级生产碳量 F5: 植被枝年净初级生产碳量 F6: 植被干年净初级生产碳量 F7: 植被根年净初级生产碳量 F8: 动物消耗的生物碳量 F9: 植被年凋落物碳量 F10: 年土壤呼吸碳量 Δ : 生态系统碳库的净增量. 图 4 ~ 图 12 中的 F1 ~ F10 含意同图 3.

图 3 长白山自然保护区生态系统碳平衡 ($10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig. 3 Carbon budget for ecosystems in Changbai Mountain Natural Reserve

在长白山自然保护区的各类植被中,以阔叶红松林的年 NPP 总量最高 ($0.540 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), 约占整个保护区的 40.58 %, 它与云冷杉林的面积总和占了整个保护区的 60.82 %, 年 NPP 总和占了整个保护区的 72.73 %. 阔叶红松林和云冷杉林的年 NEP 总量也最高, 分别为 $0.398 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.280 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$. 这 2 种林型是长白山面积最大、生产力最高的林型, 也是对碳循环和碳平衡影响最大的林型.

高山流砾滩草类的单位面积年 NPP 最低, 所占面积最小, 年 NPP 总量最低 ($0.000370 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), 仅占整个保护区的 0.028 %. 云冷杉林的面积最大 ($6.840 \text{万} \text{hm}^2$), 比阔叶红松林大 $1.845 \text{万} \text{hm}^2$, 但因后者单位面积年 NPP 可达 $1.084 \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 比前者高 $0.458 \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 结果导致阔叶红松林的年 NPP 总量比云冷杉林还要高 $0.112 \times 10^6 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$. 同理也可用于草甸 NPP 与灌丛 NPP 之间的关系上. 各类植被年 NPP 总量的大小顺序依次为: 阔叶红叶

林、云冷杉林、阔叶林、长白落叶松林、草甸、灌丛、高山苔原、岳桦林、高山流砾滩草类。

3.2 植被生物量的增长

由图 3 可见长白山自然保护区的碳平衡特征。该保护区植被有明显的碳汇功能,主要表现为植被生物量的增长。若不包括因收获移出生态系统的碳量,则植被大约每年净吸收碳量 $1.058 \times 10^6 \text{ t}$ 。这说明保护区的建立使碳以燃烧等其它形式的损失减少,而碳汇功能增强。当然还需对建立保护区前后的碳平衡状况进行比较。

图 4 ~ 图 12 分别表达了长白山自然保护区各类植被的碳平衡特征。阔叶红松林的年碳量增长最大,可达 $0.452 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,占整个保护区的 42.724 %;云冷杉林其次,约为 $0.339 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,占整个保护区的 32.024 %。这 2 种林型对保护区的碳汇功能起着决定性作用。长白落叶松林和阔叶林的年碳量增长十分近似,约为 $0.093 \sim 0.096 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。高山流砾滩草类的年碳量增长最低,不到 $0.0002 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。各类植被年碳量增长的大小顺序,即碳汇功能的强弱顺序依次为:阔叶红松林、云冷杉林、长白落叶松林、阔叶林、草甸、灌丛、高山苔原、岳桦林和高山流砾滩草类,与年 NPP 总量的大小顺序十分相似。NPP 是生态过程的重要调节者,影响着生态系统内不同营养级之间的相互作用,因此 NPP 是生态系统碳汇的主要决定者。

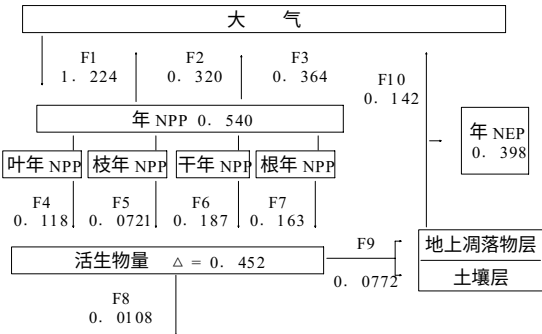


图 4 长白山自然保护区阔叶红松林碳平衡

Fig. 4 Carbon budget for mixed broad-leaved and Korean pine forest in Changbai Mountain Natural Reserve

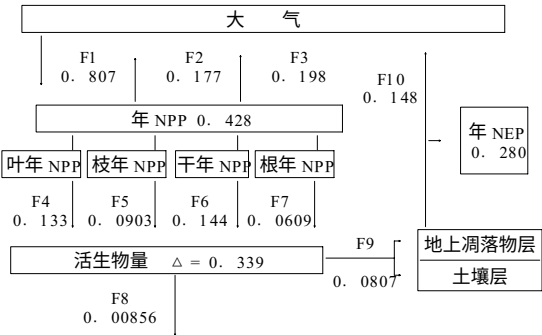


图 5 长白山自然保护区云冷杉林碳平衡

Fig. 5 Carbon budget for spruce-fir forest in Changbai Mountain Natural Reserve

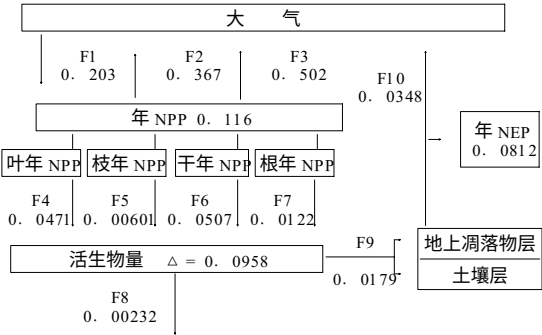


图 6 长白山自然保护区长白落叶松林碳平衡

Fig. 6 Carbon budget for Changbai larch forest in Changbai Mountain Natural Reserve

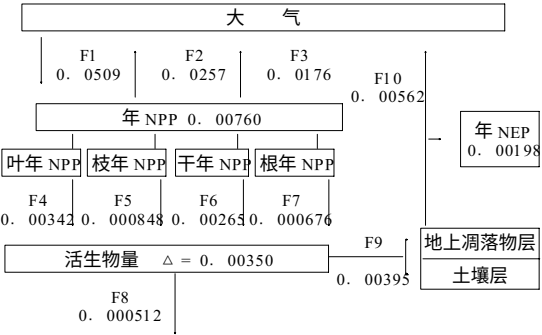


图 7 长白山自然保护区亚高山岳桦林碳平衡

Fig. 7 Carbon budget for subalpine *Betula ermanii* forest in Changbai Mountain Natural Reserve

3.3 土壤凋落物的分解与积累

长白山自然保护区每年凋落物碳量为 $0.247 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,而 1995 年凋落物分解消耗碳量却能达到 $0.416 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3),说明该年土壤有机质的积累与分解并不处于平衡状态,分解碳量比积累碳量高出 $0.169 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

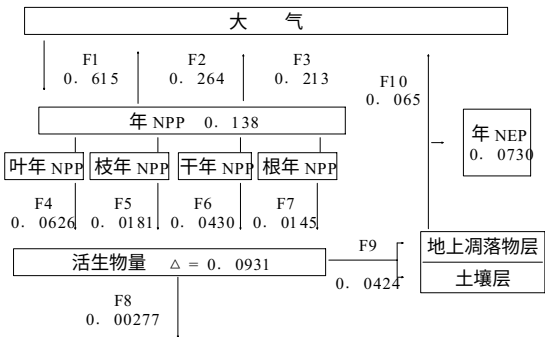


图 8 长白山自然保护区阔叶林碳平衡

Fig. 8 Carbon budget for broad-leaved forest in Changbai Mountain Natural Reserve

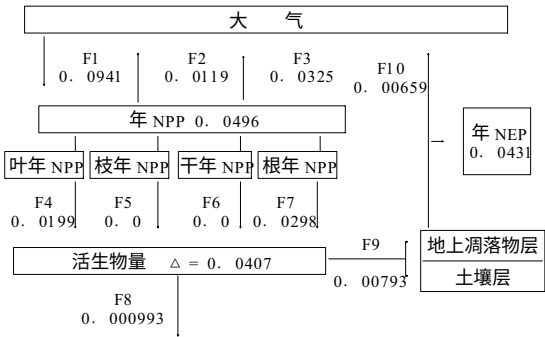


图 9 长白山自然保护区草甸碳平衡

Fig. 9 Carbon budget for meadow in Changbai Mountain Natural Reserve

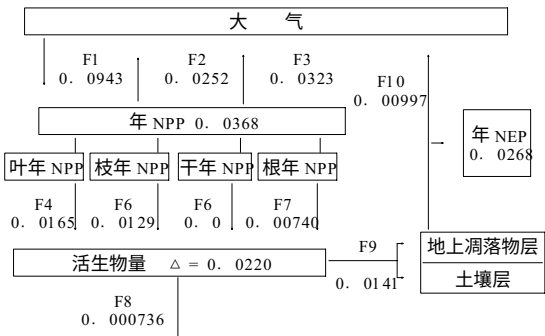


图 10 长白山自然保护区灌丛碳平衡

Fig. 10 Carbon budget for shrub in Changbai Mountain Natural Reserve

凋落物的分解和积累主要与不同植被类型的生物学和生态学特征有关,在一定程度上也依赖其总生物量及分解速率.由表 1 和图 4~图 12 可见,阔叶红松林、云冷杉林和长白落叶松

林土壤有机质的分解量为凋落物量的近 2 倍,该年的凋落物不仅被完全分解,而且还有一部分枯枝落叶层中的有机质也被分解;岳桦林和阔叶林土壤有机质的分解量约为凋落物量的 1.5 倍;高山流砾滩草类和高山苔原土壤有机质的分解与积累处于近似平衡状态,分解量略高于凋落物量,可忽略不计,该年的凋落物刚好被完全分解,枯枝落叶层的蓄积量可认为不发生变化;而草甸和灌丛土壤有机质的分解弱于积累,该年有一部分凋落物不能被分解,地表逐渐积累死地被物层.总之,乔木林下的凋落物每年都向土壤转移大量可利用态养分.

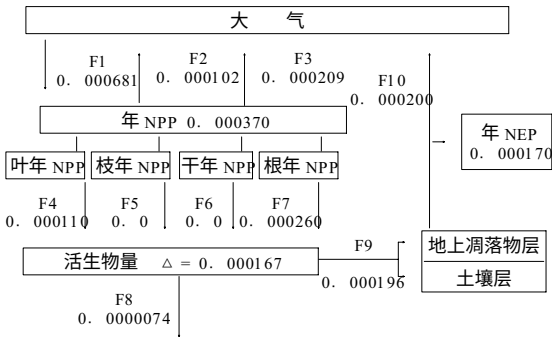


图 11 长白山自然保护区高山流砾滩草类碳平衡

Fig. 11 Carbon budget for alpine grass in Changbai Mountain Natural Reserve

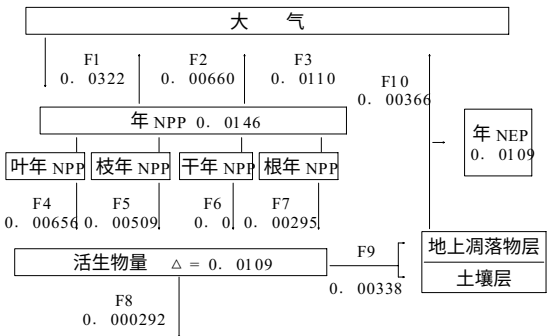


图 12 长白山自然保护区高山苔原碳平衡

Fig. 12 Carbon budget for alpine tundra in Changbai Mountain Natural Reserve

4 结论

(1) EPPML 可以比较准确地模拟长白山自然保护区景观尺度上 2 种主要森林类型(阔叶红松林和云冷杉林)的 NPP 和土壤呼吸量,因

此,能够比较准确地反映生态系统的碳库动态.这为解决当前景观和区域尺度上碳循环和碳平衡中的一些重要问题提供了有力的研究途径.

(2)长白山自然保护区植被具有明显的碳汇功能,主要表现为植被生物量的增长,这也是我国区域森林生态系统的碳平衡特征,再次肯定了我国森林生态系统的碳汇作用.其中,阔叶红松林和云冷杉林对整个保护区的碳汇功能起着至关重要的决定性作用.

(3)长白山自然保护区不同类型植被的碳循环和碳平衡特征有很大差异,主要表现在总光合生产、自氧呼吸(包括维持呼吸和生长呼吸)、净初级生产、活生物量的净增长、凋落物的分解和积累、土壤呼吸、生态系统净初级生产等生态过程中.其中,阔叶红松林和云冷杉林是长白山面积最大、生产力最高、生物量增长最多、土壤呼吸量最大的林型,也是对碳循环和碳平衡影响最大的林型,而高山流砾滩草类的影响最小.

参考文献:

- Moore B, Boone R D, Hobbie J E et al. A simple model for analysis of the role of terrestrial ecosystems in the global carbon budget. In carbon cycle modelling (ed. Bert Bolin). SCOPE 16 Chichester: John Wiley & Sons, 1981. 365 ~ 385.
- Post, Wilfred M, Peng T H et al. The global carbon cycle. American scientist, 1990, 78: 310 ~ 326.
- 徐德应, 郭泉水, 阎洪等. 气候变化对中国森林影响研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1997. 52.
- 邢劲朋. 吉林森林. 辽宁: 吉林科学技术出版社; 北京: 中国林业出版社, 1988. 350 ~ 351, 76.
- 贺庆棠. 气象学. 北京: 中国林业出版社, 1991. 77 ~ 78.
- 张娜, 于振良, 赵士洞. 长白山植被蒸腾量空间变化特征的模拟. 资源科学, 2001, 23(6): 91 ~ 96.
- 唐海萍. 中国东北样带(NECT)的 C_4 植物分布及其与环境因子的相关性. 科学通报, 1999, (4): 416.
- Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. Planta, 1980, 149: 78 ~ 90.
- Chen J M. Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation in boreal conifer stands. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1996, 34: 1353 ~ 1368.
- 于强, 谢贤群, 孙菽芬. 植物光合生产力与冠层蒸散模拟研究进展. 生态学报, 1999, 19(5): 744.
- 刘世荣, 柴一新, 蔡体久等. 兴安落叶松人工林群落生物量与净初级生产力的研究. 东北林业大学学报, 1990, 18(2): 40 ~ 46.
- Liu J, Chen J M, Cihlar J et al. A Process-Based Boreal Ecosystem Productivity Simulator Using Remote Sensing Inputs. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 162.
- Running S W, J C Coughlan. General model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. Ecological Modelling, 1988, 42: 125 ~ 154.
- 程伯容, 许广山, 丁桂芳等. 长白山北坡针叶林和阔叶红松林的凋落物和生物循环强度. 森林生态系统研究 VI. 北京: 中国林业出版社, 1992. 200 ~ 203.
- 程伯容, 许广山, 丁桂芳等. 长白山主要森林生态系统的凋落物量及养分含量. 森林生态系统研究 IV. 北京: 中国林业出版社, 1984. 19 ~ 22.
- 许广山, 张玉华, 刘春萍. 温带红松阔叶混交林的养分循环. 生态学报, 1995, 15(增刊 B 辑): 48.
- 程伯容, 丁桂芳, 许广山等. 长白山阔叶红松林的生物养分循环. 森林生态系统研究 VI. 北京: 中国林业出版社, 1992. 186.
- 刘允芬. 西藏高原农田土壤 CO_2 排放研究初报. 自然资源学报, 1998, 13(2): 181 ~ 186.
- 李文华, 邓坤枚, 李飞. 长白山主要生态系统生物生产量的研究. 森林生态系统研究 II. 北京: 中国林业出版社, 1981. 34 ~ 50.
- 金昌杰, 朱廷, 杨思河. 长白山阔叶红松林生产潜力评价研究. 生态学报, 1995, 15(增刊 B 辑): 86 ~ 92.