

贵州典型森林植被群落营养元素生物 循环空间信息模型构建

李 茜^{1,2}, 杨胜天², 白晓辉², 吕 涛³, 刘瑞禄³, 杜 迪³

(1 中国环境监测总站, 北京 100012; 2 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学地理学与遥感科学学院,
环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 3 贵州省水利厅, 北京 100875)

摘要: 将生态过程模型中营养元素生物循环数值模拟、基于过程的植被生产力模型与遥感驱动的光能利用率模型相耦合, 构建森林植被营养元素生物循环空间信息模型。模型弥补了营养元素生物循环过程模型中空间分析和参数获取复杂的不足, 并在植被生产力光能利用率模型中引入营养元素胁迫的定量表达。将模型模块化, 耦合于自主开发的 EcoHAT 系统 (Eco-Hydrology Assessment Tools), 以贵州典型森林群落为研究对象, 对群落生产力和营养元素生物循环的关键过程的时空演变模式进行了模拟和研究。运用实验数据进行验证, 取得良好的效果, 可见模型计算可以较为真实地反映区域营养元素生物循环关键过程的时空格局。

关键词: 营养元素生物循环; NPP; 森林; 光能利用率模型; EcoHAT

文章编号: 1000-0585(2009)04-1047-12

1 引言

森林植被是地圈生物圈过程的重要参与者, 是生产者“储库”和生态系统能量物质转化流通的重要通道。森林生态系统营养元素循环过程是植被对养分吸收、归还、积累的动态描述, 标志着森林生态系统总的新陈代谢机能的实质, 在森林生态系统分析中是重要的参数之一^[1]。

生态系统营养元素生物循环从研究方法上可分为两大类: 实验测定法和模型模拟法。实验测定法主要运用实验方法测定特定样地的生物量、营养元素的含量等, 并通过测定结果分析生物循环的特征。国内外大部分生物循环研究都基于实验测定法^[2,3], 实验测定法精度高、方法成熟, 但存在研究对象局限、研究区域特定、研究结果不可扩展等不足。随着环境变迁研究的深入, 人类经营森林思想的转变, 以及计算机技术和系统分析研究法的引入, 使生态系统过程模型得到发展, 对森林生态系统养分循环研究从静态转向动态模拟, 极大地推动了森林养分循环的研究进程^[4]。目前较为成熟的是基于过程的森林生态系统模型, 如 FORCYCLE^[5], TREGRO^[6], FORM-SBGC^[7]等, 这些模型不仅考虑了养分物质循环、同化物的分配等过程, 还涉及到生态系统中物质循环和能量循环的各环节^[8], 广泛地应用于世界各地的生态系统生产力和养分循环模拟^[9~11]。但过程模型大都依据植被类型确定参数, 结合的空间信息十分有限, 难以在同一群落内获得植被生产力空间差

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2009-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展项目 (2005CB422207)

作者简介: 李茜 (1983-), 女, 硕士, 助理研究员。

* 通讯作者: 杨胜天, 博士, 教授, 从事水资源与水环境遥感、自然地理研究。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

异, 从而在一定程度上限制了生态系统中营养元素生物循环的空间特性表达。

遥感技术在生态系统参数反演中的应用弥补了生态过程模型的不足, 在提取生态系统生物物理参数, 估测植被生产力的研究方面取得了较大的发展, 推动了宏观生态研究的发展^[12~14]。将遥感数据驱动的植被生产力光能利用率模型与 GIS 技术相结合, 定量表达植被生产力和营养元素循环等因子的空间分异, 弥补生态系统生物循环过程模型空间分析的不足, 使遥感驱动的光能利用率模型更完善, 计算更精确。植被生产力光能利用率模型中营养元素胁迫的引入, 将植被生长、营养元素循环与土壤化学性质相结合。

在对贵州典型森林生态系统诸多的研究中, 目前对土壤的形成、理化性质、类型与特征和群落生态演化和植被保护恢复已有较深入的分析^[15~17]。但基于生物的多样性和环境的复杂性, 对土壤—植被系统营养元素的分布特征、空间变化、影响因素及其与生态环境的关系等方面的研究还比较薄弱。基于此, 本文将生态过程模型中营养元素生物循环数值模拟、基于过程的植被生产力模型与遥感驱动的光能利用率模型相耦合, 构建了森林植被营养元素生物循环空间信息模型。并以贵州典型森林群落为研究对象, 运用模型模拟了土壤化学性质、群落生产力和营养元素生物循环的关键过程, 本文重点介绍营养元素生物循环的植被部分, 限于篇幅, 土壤部分暂不做阐述。

2 模型原理及主要方程

2.1 模型原理

森林植被营养元素生物循环空间信息模型是在生态系统过程模型的基础上, 用遥感驱动的植被 NPP 光能利用率模型模拟植被生产力, 从物质循环与能量循环过程的机理入手, 综合模拟营养元素吸收、累积、归还的关键环节。模型框架如图 1 所示, 由四个子模型组成, 其中植被 NPP 子模型综合了光能利用率、温度胁迫因子, 水分胁迫因子和营养胁迫因子。营养胁迫因子的引入是对 NPP 光能利用率模型的改进; 生产力分配子模型、植被

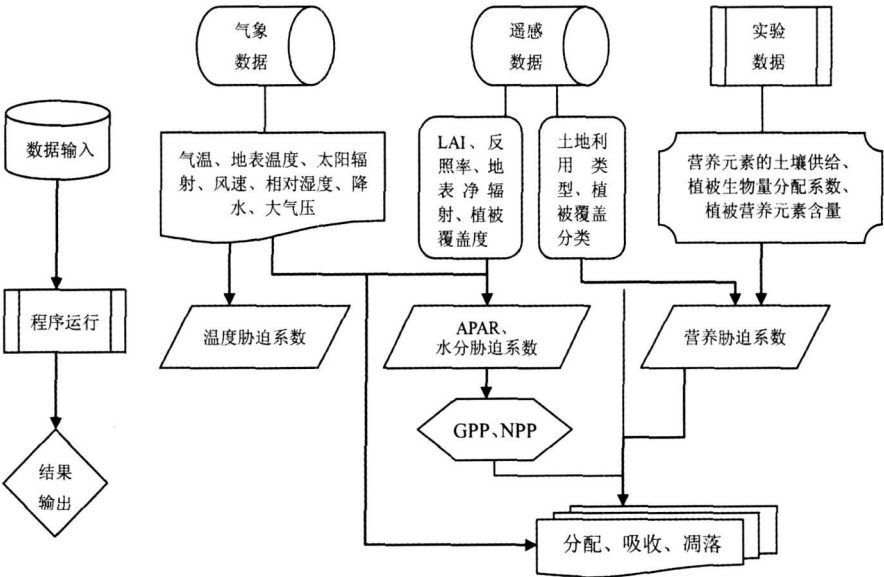


图 1 森林植被营养元素生物循环空间信息模型总体框架

Fig 1 Schematic of the forest nutrient cycling spatial model

吸收子模型、凋落物子模型的构建主要参考国外较为成熟的森林生态系统模型 FORS-VA^[18, 19]、FORNBM^[20, 21]、流域生态水文模型 SWIM 模型^[22], 并针对贵州研究区域的生境特点进行改进, 采用适合其自然条件的参数。分配子模型、凋落物子模型和吸收子模型中, 将森林植被分为叶片、枝干、根系三部分考虑, 养分循环示意图如图 2 所示。

2 2 主要方程

2 2 1 植被净第一性生产力子模型 植被净第一性生产力 NPP(gCm⁻²) 是总第一性

生产力 GPP(gCm⁻²) 与呼吸消耗量 Ra(gCm⁻²) 的差值。Ra 运用 Goward 的经验模型求取; GPP 综合考虑光强、温度、水分以及营养元素的影响) × f₃(NU)

式中, ε 为最大光能利用率 (gC MJ⁻¹)^[23]; f₁(T) 为温度对光合作用的影响 (无量纲), 由气温确定^[8]; f₂(β) 为水分对光合作用的影响 (无量纲), 由蒸发比计算^[24~26]; f₃(NU) 为营养元素对 GPP 的影响 (无量纲); 植被吸收的光和有效辐射 APAR 等于叶子拦截的光和有效辐射 IPAR, 根据 Beer 定律有^[27, 28]:

APAR = IPAR = PAR(1 - e^{-K×LAI}) (2)

式中, PAR 为入射光合有效辐射 (MJ m⁻² month⁻¹), 由太阳总辐射与光和有效辐射占总辐射的比例因子求取; K 为叶层消光系数^[27, 29]; LAI 为叶面积指数, 为使模型具有预测功能, 有遥感数据的时期, LAI 运用 TGDVI 求得^[30], 无遥感数据时, LAI 由热量与生物量所决定^[22, 31]。

营养胁迫因子 f₃(NU) 运用土壤中可利用的营养元素含量与植物生长的相关关系得到, 考虑 N、P、Ca、Mg、K 元素的营养胁迫^[18, 19]:

f₃(NU) = ∏ X_{lim} (3) X_{lim} = 1/(A_{prod} + B_{prod} × folX^α) (4)

式中, X_{lim} (X = N, P, Ca, Mg, K) 为各元素的营养胁迫因子 (无量纲), 由叶片中潜在元素含量决定^[18, 19, 32~34]; A_{prod}, B_{prod} 为系数, 与植被类型有关; ex 取值 - 3; folX 为叶片中 X 元素的潜在元素含量 (%)^[33]。

2 2 2 生产力分配子模型 植物生长季, NPP 分配到树叶部分的生产力与叶面积的增加量成比例, 由式 5 确定^[20]; 非植物生长季, NPP 分配到叶片的生产力与 NPP 成比例。

dF_B/dt = R_{LA-w} ε_{LA}/dt (5)

式中, F_B 为分配到叶片的生产力(gCm⁻²), R_{LA-w} 为单位面积 (1m²) 叶片的生物量, ε_{LA} 为叶面积的月增加量 (m²)。分配到叶片后, NPP 成比例分配到根^[20]:

dR_B/dt = K_{ra} [dNPP/dt - dF_B/dt] (6)

式中, R_B 为分配到根系的生产力(gCm⁻²), K_{ra} 为分配系数。剩余的 NPP 分配到枝。

2 2 3 凋落物子模型 林木叶片凋落与温度和植被类型有关, 落叶林设阈值温度, 常绿林成比例凋落^[20]:

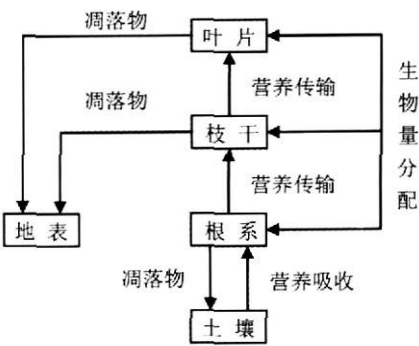


图 2 林木和灌木植被养分物质的循环示意图
Fig. 2 Nutrient cycling process of forest and shrub

$$F_{lit} = \begin{cases} a_{fh}F_B, & T_{\text{air}} > T_{fall} \quad \text{deciduous species} \\ F_B, & T_{\text{air}} < T_{fall} \quad \text{deciduous species} \\ a_{fs}F_B, & \text{ever green species} \end{cases} \tag{7}$$

式中， F_{lit} 为叶片凋落量(gCm^{-2})， a_{fh} 、 a_{fs} 分别为落叶林、常绿林的凋落系数， T_{air} 为气温($^{\circ}\text{C}$)， T_{fall} 为落叶林叶片凋落的阈值温度($^{\circ}\text{C}$)。根和枝干的凋落量与各部分生产力成比例。

2.2.4 植被吸收子模型 植物吸收的元素量是植物的生长需求量与可利用量的最小值，表达式为^[18, 20]：

$$X_{\text{uptake}} = \min(X_{\text{avail}}, X_{\text{dem}}) \tag{8}$$

式中， X_{avail} 为土壤中 X ($X = \text{N}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}$) 元素的可利用量 (gCm^{-2})，其中盐基阳离子与铵根是交换性的元素含量，硝酸根是溶液中的离子含量； X_{dem} 为植物对 X 元素的需求量，是叶片、枝干、根系各部分的生产力与营养元素浓度乘积的加和^[18, 20]：

$$X_{\text{dem}} = (1 - K_{\text{retra}}) \times folX \times F_B + X_W \times W_B + X_R \times R_B \tag{9}$$

式中， K_{retra} 为返回系数， $folX$ 为叶片中 X 元素的含量(g/g)； F_B 为植被叶片部分的生产力(gCm^{-2})； X_W 为枝干中 X 元素的含量(g/g)； W_B 为植被枝干部分的生产力(gCm^{-2})； X_R 为根系中 X 元素的含量(g/g)； R_B 为植被根系部分的生产力(gCm^{-2})。

3 研究区概况与数据获取

模型应用的区域位于贵州龙里地区，是我国典型的喀斯特地形地貌区，土壤主要为黄壤土、石灰土和水稻土。马尾松纯林群落的基岩为砂页岩，混交林为石灰岩。

在研究区布设两套 HOB0 便携式小型自动气象站和降雨自动采样器进行气象和土壤水分 30 分钟间隔的连续监测，获取了 2005 年 8 月~ 2008 年 2 月的监测数据。以典型群落类型——马尾松纯林、马尾松- 阔叶树混交林为研究对象，2007 年 4 月份，2007 年 7

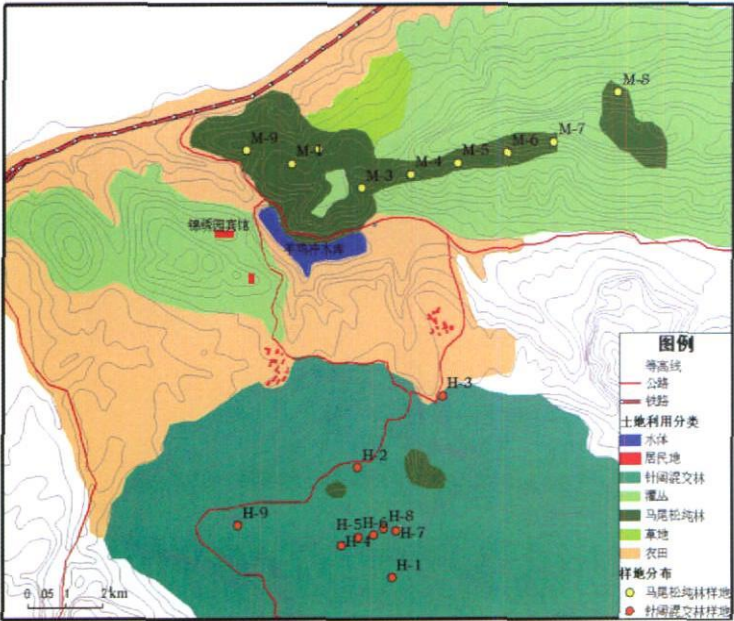


图 3 马尾松及其混交林采样点分布图

Fig 3 The distribution of sampling point in Pinus Massoniana forest and Pinus Massoniana-Hardwood mixed forest

月份两次进行野外样方调查和实验 (样地分布见图 3), 样地面积为 20m × 20m, 选择马尾松纯林样地和混交林样地各 9 个, 系统地采样、分析了各群落的生物量、营养元素含量、累积和分布特征, 为模型的参数确定和验证提供了依据。将气象数据、群落的营养元素含量等模型所需输入数据栅格化, 并将投影与遥感图像相匹配。根据研究区域的大小和遥感数据反演的需要, 选用 Landsat-5 卫星的 TM 数据作为模型的遥感数据源, 预处理主要包括遥感数据的几何纠正、大气纠正和辐射定标, 并进行了土地利用类型解译, LAI、地表反照率、地表净辐射的反演。

4 模型运行及验证

4.1 模型计算

以 IDL/ENVI 为平台, 采用面向对象的编程方法, 实现模型的功能和模拟结果的可可视化, 并将模型集成于自主研发的区域尺度的分布式生态水文模拟系统软件 EcoHAT (Eco-Hydrology Assessment Tools) 中。EcoHAT 系统包括水分循环、营养元素循环和植物生长三大组成部分, 紧密集成了参数管理工具、RS 参数反演工具、模型定制工具、GIS 分析工具, 通过区域空间网格参数的输入, 实现基于象元的模型运算, 是一个分布式生态水文过程综合模拟系统。

以月为时间步长, 将 TM 遥感数据反演数据、气象监测数据、实验数据输入模型中, 模拟了 2006 年 12 月~ 2007 年 11 月研究区域典型植被群落在月尺度上的营养元素生物循环关键过程的时空演变模式, 包括植被净第一性生产力、植被生产力的分配、凋落和植被对营养元素的吸收; 并应用实测数据和模型模拟结果分析了典型森林群落马尾松林和马尾松—阔叶树混交林的生物循环特征。

4.2 模型精度分析

将模型计算结果与实测数据对比进行精度分析。2007 年 4 月份对马尾松林及混交林样地内进行每木调查, 鉴定种类、测量株高和胸径, 运用相对生长法估算马尾松、阔叶树的生物量^[35, 36], 并通过生长锥钻取的胸径样品估算年增长量^[37], 根据林木年增长量与林木各器官营养元素的含量, 得到林分的年净积累量 (表 1)。实验测定纯林和混交林中凋落

表 1 实验测定的马尾松纯林、混交林营养元素的年累积量 (kg/hm²·a)
Tab 1 Nutrient element accumulation in Pinus Massoniana forest and mixed forest derived from the experiment

林分类型	组分	生物量	N	P	Ca	K	Mg	S	合计
马尾松纯林	树叶	671.107	5.251	0.653	3.097	3.041	0.861	1.118	14.021
	树干	3226.833	0.862	0.481	3.777	2.549	2.386	0.807	10.863
	树枝	1326.525	0.834	0.466	5.715	2.259	0.825	0.427	10.525
	树根	390.178	1.130	0.265	0.738	1.410	0.401	0.763	4.707
	合计	5958.107	8.078	1.865	13.326	9.258	4.473	3.115	40.116
混交林	树叶	173.154	4.043	0.370	2.154	1.637	0.593	0.698	9.496
	树干	3760.105	3.612	0.601	18.179	4.401	1.333	1.094	29.222
	树枝	1906.298	3.216	0.465	16.373	2.780	1.107	0.751	24.691
	树根	1748.78	4.559	0.216	3.930	2.380521	0.498	1.161	12.745
	合计	8250.183	15.430	1.652	40.636	11.199	3.533	3.704	76.153

物量和凋落物营养元素含量, 计算得到两群落的养分归还量, 并运用吸收= 存留+ 归还得到两群落年吸收量 (表 2)。

对纯林和混交林年吸收量、归还量和存留量的实验结论与模型运行结果做相对误差分析, 得到表 3。群落吸收量、归还量和存留量的平均相对误差分别为 11. 58%, 29. 58%, 24. 27%, 且对马尾松纯林的模拟精度总体较混交林高。误差产生的原因主要有: 模型为大尺度模拟, 而实验样地为点尺度分析结果; 模型是月尺度的模拟, 而实验为年尺度的估算。因此, 模型的模拟结果是可以接受的, 模型计算可以较为真实地反映区域营养元素生物循环关键过程的时空格局。

表 2 不同植被类型 NPP 年分配量、凋落量、植被年吸收量 (单位: $\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$)

Tab 2 Annual NPP allocation, litterfalls and nutrient uptake for different types of vegetation

植被类型	NPP 的 叶片分 配量	NPP 的 枝干分 配量	NPP 的 根系分 配量	植被年 凋落物量 ($\text{kg/hm}^2\cdot\text{a}$)	N 吸收 量($\text{kg/hm}^2\cdot\text{a}$)	P 吸收 量($\text{kg/hm}^2\cdot\text{a}$)	Ca 吸收 量($\text{kg/hm}^2\cdot\text{a}$)	Mg 吸 收量($\text{kg/hm}^2\cdot\text{a}$)	K 吸收 量($\text{kg/hm}^2\cdot\text{a}$)	S 吸收 量($\text{kg/hm}^2\cdot\text{a}$)
针叶林	64.27	209.78	34.72	1403.56	12.70	2.37	15.34	4.99	11.59	4.00
混交林	76.72	235.42	62.92	2353.12	37.72	3.49	32.78	5.38	19.01	6.28

表 3 马尾松纯林、混交林年吸收量、归还量和累积量的相对误差 (%)

Tab 3 Relative error of the annual retention, annual returning, annual assimilation in Pinus Massoniana forest and mixed forest

项目	林分	N	P	Ca	K	Mg	S	平均
吸收量	松纯林	2.79	1.71	2.90	7.03	0.44	13.45	4.72
	混交林	10.03	9.30	41.57	31.81	0.56	17.40	18.45
归还量	松纯林	30.32	30.34	30.29	30.35	30.30	30.28	30.32
	混交林	29.47	29.72	26.27	33.01	27.80	26.78	28.84
存留量	松纯林	11.79	5.47	9.06	3.10	2.84	34.64	11.15
	混交林	58.29	45.62	47.39	50.45	15.09	7.51	37.39

5 结果与讨论

5.1 植被 NPP 在森林植被、灌丛分配的空间特征

图 4~ 图 7 分别为 2006 年 12 月~ 2007 年 11 月龙里地区植被 NPP 在针叶林、混交林叶片、枝干、根系分配的空间分布图, 以及植被凋落物空间分布图。将整个区域的 NPP 年分配数值、年凋落量、植被年吸收量对不同植被类型进行统计 (表 2), 可以看出各植被类型 NPP 分配到叶片、枝干的均值规律为混交林> 针叶林, 可见混交林的生理代谢旺盛的器官生长速率较快, 有利于森林生态系统的养分归还。

图 8、9 分别为同期研究区植被 NPP 在叶片、枝干、根系分配的月相变化曲线, 月相变化规律符合太阳辐射和温度的变化。植被 NPP 分配到叶片、枝干、根系的值 3 月份开始增加, 8 月达到最大值, 分别为 12.74gCm^{-2} 、 36.54gCm^{-2} 、 12.74gCm^{-2} , 9 月份随着太阳辐射的降低和气温的下降, 大幅减小, 1 月份最小值为 0.55gCm^{-2} 、 1.35gCm^{-2} 、 0.40gCm^{-2} 。4~ 9 月, 由于混交林中阔叶树叶片生长速度较快, LAI 增加幅度大, 拦截的太阳辐射大于针叶林, 混交林 LAI 与叶片 NPP 均大于针叶林; 而秋季混交林中的阔叶树叶片凋落量大, LAI 与 F_B 从 10 月到冬季都小于针叶林。

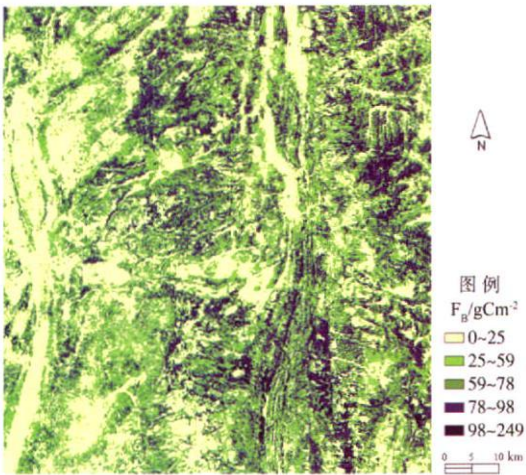


图4 龙里 NPP 在叶片分配的空间分布图
Fig. 4 Spatial distributions of forest NPP in Longli

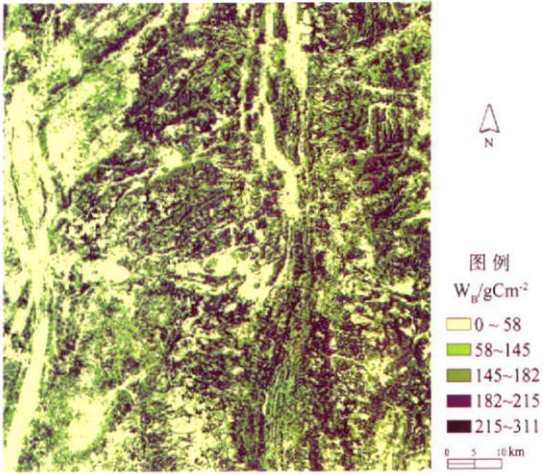


图5 龙里 NPP 在枝干分配的空间分布图
Fig. 5 Spatial distributions of wood NPP in Longli

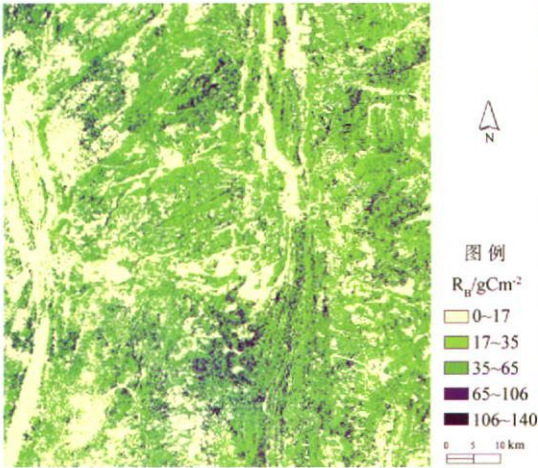


图6 龙里 NPP 在根系分配的空间分布图
Fig. 6 Spatial distributions of root NPP in Longli

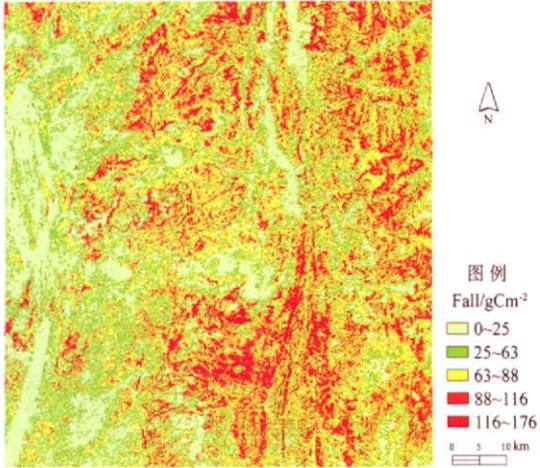


图7 龙里植被凋落物的空间分布图
Fig. 7 Spatial distributions of forest litterfalls in Longli

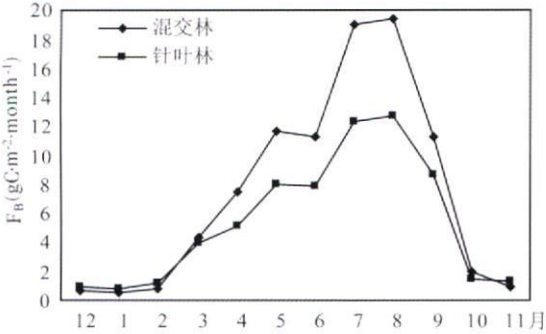


图8 不同植被类型的 F_B 月相变化曲线
Fig. 8 Monthly change of F_B for different types of vegetation

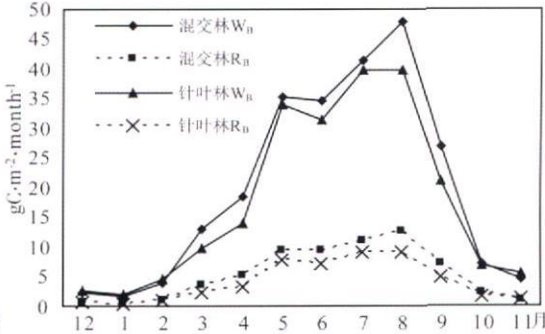


图9 不同植被类型的 W_B 、 R_B 月相变化图
Fig. 9 Monthly changes of W_B and R_B for different types of vegetation

5 2 植被凋落物量的时空分布特征

群落凋落物是生态系统养分循环的一个重要过程，对养分的归还和地力的维护都有一定的作用。植被凋落物量平均值的规律是混交林> 针叶林。群落凋落物量季节动态总趋势（由高到低）是：秋季、冬季、夏季、春季，全年凋落物总量是 3443.67kg/hm²，混交林一年的凋落总量为 2040.12kg/hm²，大出针叶林凋落物总量 45.30%。从季节规律看（图 10），混交林的凋落物量波动较大，秋季的凋落物量占年凋落总量的 75.29%，远高于针叶林的 720.49kg/hm²，而冬季、春季和夏季，针叶林的凋落物量较混交林高，四季较为平稳。

表 4 马尾松纯林、混交林凋落物层养分含量和养分年归还量 (kg/hm²·a)

Tab 4 The nutrient content in litterfalls layer and annual nutrient returning for Pinus Massoniana forest and mixed forest

项目	林分	N	P	Ca	K	Mg	S
养分含量	针叶林	3.972	0.435	2.298	1.453	0.460	1.401
	混交林	6.519	0.531	5.590	1.057	0.641	1.397
养分年归还量	针叶林	5.575	0.610	3.226	2.040	0.645	1.966
	混交林	13.230	1.083	11.403	2.157	1.309	2.851

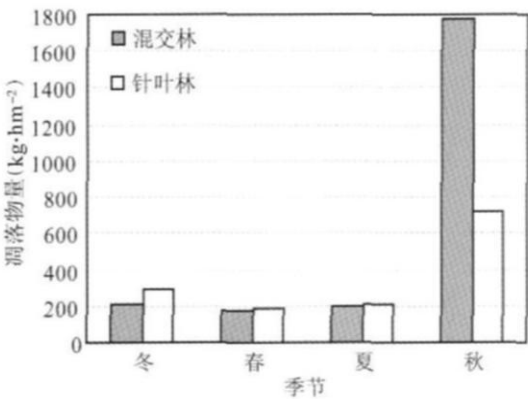


图 10 不同植被类型的凋落物季节变化图
Fig. 10 Seasonal change of litterfalls for different types of vegetation

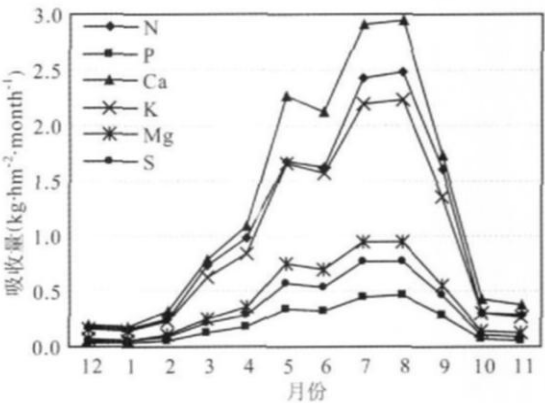


图 11 龙里 2006.12~2007.11 植被总吸收量的月相变化图
Fig. 11 Monthly change of the total nutrient uptake

凋落物归还林地的营养元素的数量水平与土壤肥力的关系较为密切，对改善林木的境条件和保持地力具有重要作用。运用 2007 年 4 月份对龙里地区马尾松林、混交林凋落物样品的营养元素含量测定，得到研究区针叶林、混交林的凋落物养分年归还量。由表 4 可以看出，针叶林、混交林凋落物营养元素含量规律性较为明显，均是 N、Ca 含量最高，Mg、P 含量最低，混交林中凋落物的营养元素含量除 P、S 两种元素略低外，其余均大于针叶林，其中 Ca、N 元素分别高出 143.21% 和 64.14%。针叶林和混交林的凋落物营养元素年归还量均值的排序为 N> Ca> S> K> Mg> P，且混交林各元素年归还量均高出针叶林，可见混交林的凋落物营养元素年归还量显著大于针叶林，有利于群落循环能力的增强和林木的生长。

5 3 植被对营养元素吸收的时空变化特征

由表 2 可看出，植被对营养元素的年吸收量为混交林> 针叶林，均是 N、Ca 最大，P 最小。混交林的年吸收总量为 104 65kg/hm²，比针叶林的年吸收量大出 105 21%，混交林中的营养元素年吸收量排序是 N> Ca> K> S> Mg> P，针叶林为 Ca> N> K> Mg> S> P。图 11 为两种植被总吸收量的月相变化图，可见植被对各营养元素吸收量的时间变化特征与植被 NPP 的季节变化规律相同，植被吸收量 3 月份呈现明显增加趋势，8 月份分别达到最大值，1 月份为最小值。从 6 种营养元素的吸收总量比较看，各月份的排序均为 N> Ca> K> S> Mg> P，其中 Ca 为树干、树枝的主要组成元素，而 N 主要累积于树叶。

5 4 森林植被群落生物循环特征

营养元素的生物循环包括植物根系从土壤中吸收各种营养元素，将一部分用于构成植物体而存留下来，同时将另一部分元素通过凋落物、分泌物及雨水淋洗归还给土壤，其平衡方程为：吸收= 存留+ 归还^[38]，本文的群落归还量只考虑凋落物归还，因此归还量数值偏低。研究针叶林、混交林的营养元素生物循环特征，运用模型运算得到的各元素年吸收量减去年归还量，得到各元素的年存留量。混交林 6 种营养元素的年归还量均大于马尾松纯林，但同时混交林各元素的吸收量比针叶林的大出更多，因此混交林各营养元素的年存留量中，除 Mg 元素外，其他各元素大于纯林的 36. 46% ~ 242. 75%。

表 5 针叶林、混交林营养元素的生物循环量 (kg/ hm². a)

Tab 5 The biologic cycling characteristic parameters of nutrient elements for Pinus Massoniana forest and mixed forest

项目	林分	N	P	Ca	K	Mg	S	合计
贮量	针叶林	49 305	11. 403	67. 113	53 626	19 898	17 276	218 621
	混交林	115 808	16 680	199 774	88 191	29 443	26 081	475 978
吸收量	针叶林	12 701	2 373	15 344	11 585	4 991	4 002	50 997
	混交林	37 724	3 490	32 780	19 006	5 375	6 277	104 650
归还量	针叶林	5 575	0 610	3 226	2 040	0 645	1 966	14 062
	混交林	13 300	1 083	11. 403	2 157	1 309	2 851	32 102
存留量	针叶林	7 126	1 763	12 118	9 545	4 346	2 036	36 935
	混交林	24 424	2 406	21. 377	16 849	4 066	3 426	72 548
吸收系数	针叶林	0 002	0 003	0 017	0 047	0 068	—	0 137
	混交林	0 004	0 002	0 008	0 050	0 004	—	0 069
循环系数	针叶林	0 439	0 257	0 210	0 176	0 129	0 491	0 276
	混交林	0 353	0 310	0 348	0 113	0 243	0 454	0 307
利用系数	针叶林	0 258	0 208	0 229	0 216	0 251	0 232	0 233
	混交林	0 326	0 209	0 164	0 216	0 183	0 241	0 220
周转期	针叶林	8 844	18 697	20 805	26 289	30 833	8 786	15 547
	混交林	8 708	15 395	17. 519	40 888	22 500	9 149	14 827

注：由于土壤数据缺少 S 元素的数据，因此吸收系数没有 S 元素的数据

吸收系数、利用系数、循环系数、周转期是生态系统营养元素生物循环的重要特征。吸收系数是指单位时间、单位面积植物的吸收量与土壤库中元素量的比率；利用系数是指

单位时间、单位面积植物体吸收某元素的量与其总贮存量的比率,反映生态系统元素存贮速率的大小。针叶林、混交林营养元素的生物循环量见表 5。混交林的吸收量较大,但由于其土壤肥力高出纯林较多,因此除 N、K 元素外,其他元素的吸收系数都小于纯林。纯林与混交林各元素的利用系数差异不大,两群落对元素的存储能力相似。

循环系数是单位时间、单位面积元素的归还量与吸收量之比,周转期是指植物体元素的总贮存量与年凋落物中元素量的比率,循环系数大,周转期短,说明该元素循环速率快,系统中存留量的比例小,利用效率高。两群落的元素循环系数以 S、N 最高,混交林循环系数整体大于针叶林 11.24%, Mg、Ca、P 元素分别高出纯林 88.32%、65.42%、20.82%,可见针叶林混交阔叶树增加了群落营养元素的循环能力,提高了土壤肥力,有利于林地生产力的维持。与其他地区的同类群落相比较,本研究中的针叶林群落各营养元素的循环系数介于 0.13~0.49,混交林介于 0.11~0.45,低于鼎湖山马尾松群落(0.41~0.84)^[39]、温带油松林群落(0.28~0.49)和温带栎林群落(0.49~0.63)^[40],这与群落所属地区的生境特点有关,频繁的营养周转也会产生一定负面效应,即凋落物分解过程中养分淋溶增加了营养元素的流失潜力,因此减小循环速率有益于贵州喀斯特地区植物群落适应多雨、潮湿的环境,减缓营养元素的流失。

6 结论

本文运用 GIS 和 RS 技术,将生态过程模型中营养元素生物循环数值模拟、基于过程的植被生产力模型与遥感驱动的光能利用率模型相耦合,构建了森林植被营养元素生物循环空间信息模型。模型在森林植被生物循环过程模型中作了如下修正:(1)应用遥感驱动的光能利用率模型大尺度、动态地模拟植被净第一性生产力;(2)营养元素生物循环中吸收、分配、凋落的模拟结果均具有空间分布信息;(3)引入营养元素胁迫的定量表达,将植被生长、营养元素循环与土壤化学性质相结合。将模型应用于西南典型植被群落,经验证模型计算可以较为真实地反映区域营养元素生物循环关键过程的时空格局。

森林植被营养元素生物循环空间信息模型的构建以土壤—植被—大气循环 (SPAC) 理论为指导,普遍适用于我国森林生态系统,可以在森林植被生产力估算、营养元素循环分析、养分、水分等环境因素对生产力影响等方面进行应用和推广,为进一步研究森林生态效益、制定营林措施等提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李俊清,牛树奎. 森林生态学. 北京:高等教育出版社,2006
- [2] Onyekwelu J C, Mosandl R, Stimm B. Productivity, site evaluation and state of nutrition of *Gmelina arborea* plantations in Oluwa and Omo forest reserves, Nigeria. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229: 214~227
- [3] 钟继洪,李淑仪,蓝佩玲. 刚果按人工林营养元素生物循环研究. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 45~62
- [4] 何斌,秦武明,余浩光,等. 不同年龄阶段马占相思 (*Acacia mangium*) 人工林营养元素的生物循环. *生态学报*, 2007, 27(12): 5158~5167
- [5] 郭起荣. FORCYTE 森林生态系统经营模拟模型. *江西林业科技*, 2000, 6: 43~46
- [6] Kramer K, Mohren G M J. Sensitivity of FORGRO to climatic change scenarios: A case study on *Betula pubescens*, *Fagus sylvatica* and *Quercus robur* in The Netherlands. *Climatic-Change*, 1996, 34(2): 231~237
- [7] Arp P A, Oja T. Sulphate/nitrate loadings on forest soils: forest biomass and nutrient cycling modelling. *Critical Loads for Nitrogen - A Workshop Report*, 1992, 41: 307~358

- [8] 孙睿,朱启疆. 陆地植被净第一性生产力的研究. 应用生态学报, 1999, 10(6): 757~ 760
- [9] 黄忠良. 运用 Century 模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响. 植物生态学报, 2000, 24(2): 175~ 179
- [10] Kirschbaum M U E, Cen W, a forest growth model with linked carbon, energy, nutrient and water cycles. Ecological Modelling, 1999, 118: 17~ 59
- [11] Tiktak A, Hans J M, Grinsven V. Review of sixteen forest-soil-atmosphere models. Ecological Modelling, 1995, 83: 35~ 53
- [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第一性生产力. 植物学报, 1996, 38(1): 35~ 39
- [13] 张佳华,符淙斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究. 测绘学报, 1999, 28(2): 129~ 132
- [14] 马耀明,王介民, Menenti M, 等. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量. 气象学报, 1999, 57(2): 180~ 187
- [15] 张百平. 贵州森林资源动态变化. 地理研究, 2003, 22(6): 725~ 729
- [16] 周运超,潘根兴. 茂兰森林生态系统对岩溶环境的适应与调节. 中国岩溶, 2001, 20(1): 47~ 52
- [17] 龙健,李娟,邓启琼,等. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究. 土壤通报, 2006, 37(4): 635 ~ 639
- [18] Arp P A, Oja T. A forest soil vegetation atmosphere model (ForSVA). I Concepts. Ecological Modelling, 1997, 95: 211~ 224
- [19] Arp P A, Oja T. A forest soil vegetation atmosphere model (ForSVA). II: Application to northern tolerant hardwoods 1997, 95: 245~ 247
- [20] Zhua Z X, Arp P A, Meng F R, *et al.* A forest nutrient cycling and biomass model (ForNBM) based on year-round, monthly weather conditions, part I: assumption, structure and processing. Ecological Modelling, 2003, 169: 347~ 360
- [21] Zhua Z X, Arp P A, Meng F R, *et al.* A forest nutrient cycling and biomass model (ForNBM) based on year-round, monthly weather conditions, part II: assumption, structure and processing. Ecological Modelling, 2003, 170: 13~ 27
- [22] Valentina Krysanova, *et al.* SWIM user manual, 2000
- [23] 朱文泉,潘耀忠,何浩,等. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, 51(6): 700~ 706
- [24] 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. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603 ~ 608
- [25] 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文, 2004
- [26] 周广胜,张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193~ 200
- [27] 张佳华,符淙斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究. 测绘学报, 1999, 28(2): 129~ 132
- [28] Monsi M, Saeki T. Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und sein Bedeutung für die Stoffproduktion Japan J. Bot. 1953, 14: 22~ 52
- [29] 张继祥,毛志泉,魏钦平,等. 美国黑核桃实生苗生态生理过程对环境因素响应的数值模拟(III): 植株冠层光合作用数理模型. 生物数学学报, 2006, 21(3): 401~ 411
- [30] 唐世浩,朱启疆,孙睿. 基于方向反射率的大尺度叶面积指数反演算法及其验证. 自然科学进展, 2006, 16(3): 331~ 337
- [31] Jones C A. G-4 Grasses and Cereals. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1985: 419
- [32] Bemier B, Brazeau M. Nutrient deficiency symptoms associated with sugar maple dieback and decline in the Quebec Appalachians. Can. J. For. Res., 1988, 18: 762~ 767
- [33] Mader D L, Thompson B W. Foliar and soil nutrients in relation to sugar maple decline. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1969, 33: 794~ 800
- [34] Driessche R V D. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. Bot. Rev., 1974, 40: 347~ 394
- [35] 丁贵杰,王鹏程,严仁发. 马尾松纸浆商品用材林生物量变化规律和模型研究. 林业科学, 1998, 34(1): 33~ 41
- [36] 冯宗炜. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999
- [37] 彭少麟. 鼎湖山马尾松种群生产量初步研究. 热带亚热带森林生态系统研究, 1989, 5: 75~ 82

- [38] Potter C S. Stemflow nutrient inputs to soil in a successional hardwood forest . Plant and Soil, 1992, 140: 249 ~ 254
- [39] 冯宗炜. 中国森林生态系统的生物量 and 生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [40] 姚瑞玲, 丁贵杰, 王胤. 不同密度马尾松人工林凋落物及养分归还量的年变化特征. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 83~ 87.

A forest nutrient cycling spatial model and its application

LI Qian^{1,2}, YANG Sheng-tian², BAI Xiao-hui², LU Tao³, LIU Ru+lu³, DU Di³

(1. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Water Conservancy Department of Guizhou Province, Guiyang 550002, China)

Abstract: Forest nutrient cycling is a crucial parameter in the analysis of forest eco-system. The paper established a forest nutrient cycling spatial model which coupled nutrient cycling process model and remote sensing model of vegetation NPP. Compared with nutrient cycling process model, the forest nutrient cycling spatial model improved the spatial analysis function and made the parameters acquirement easier. The forest nutrient cycling spatial model also complemented the nutrient limitation expression in the vegetation NPP model, which combined the vegetation growth, nutrient cycling and soil chemical property together. The model was developed using module integration technique and coupled in Ecohydrology Assessment Tools. Applying the forest nutrient cycling spatial model, the research simulates and analyzes the NPP and the patterns of nutrient bio-cycling in the typical plant community in Guizhou province. Compared with the observed data, the simulated spatial results are credible and the forest nutrient cycling model can simulate the spatio-temporal patterns of nutrient bio-cycling processes.

Key words: nutrient cycling; NPP; forest ecosystem; light efficiency model; process model; EcoHAT