

加拿大森林碳收支与土壤碳动态研究进展介绍

北方森林系统 (Boreal Forest Biome) 占地球表面的 6-13%，占全球植物生物量的 5-22%，占全球土壤有机质的 12-13%，占全球地表凋落物的 14-15%，占全球净初级生产力 NPP 的约 5-8%，因此，对全球碳循环的影响十分重要。同时，与气候变化有关 CO₂ 的增加在高纬度地区最大，特别是内陆地区，所以在气候变暖与北方森林系统中有机土壤中 CO₂ 的释放之间存在相互作用。因此，美国和加拿大十分重视对北方森林系统的研究，并建立了多个试验研究网络，开展了多层次的合作研究。在这种背景下，加拿大在森林系统碳循环方面的研究，一直与国际保持着同步水平。

一、加拿大森林生态系统碳收支

1.1 加拿大土壤信息系统

1972 年起，作为加拿大土地资源网络 (Canadian Land Resource Network) 的一部分，ECORC 的加拿大信息系统 (Canadian Soil Information System, CanSIS) 在加拿大农业和农业食品部 (Agriculture and Agri-Food Canada) 的支持下开始建设加拿大国家土壤数据库 (National Soil Database, NSDB)。目前的数据库包括加拿大全国的土壤、景观和气候数据，由以下 6 部分组成：

(1) 国家生态区划 (National Ecological Framework) (包括生态带 EcoZones, 生态区 EcoRegions, 和生态行政区 EcoDistricts), 比例尺 1: 100 万 - 1:3000 万；

(2) 加拿大土壤图 (Soil Map of Canada) 和土地潜力数据库 (Land Potential DataBase, LPDB), 比例尺 1: 500 万；

(3) 农业资源区划 (Agroecological Resource Areas, ARAs), 比例尺 1: 200 万, 提供气候、经济、作物和土地景观属性数据；

(4) 加拿大土壤景观 (Soil Landscapes of Canada, SLC), 比例尺 1: 100 万；

(5) 加拿大土地目录 (Canada Land Inventory, CLI), 比例尺 1: 25 万, 提供农业、森林、野生动物、观光休闲、有蹄动物的承载力数据；

(6) 土壤调查数据 (Detailed Soil Surveys), 比例尺 1:2 万 - 1:25 万。

在 1:100 万加拿大土壤景观基础上，1997 年北方森林中心 (NFC) 为了研究加拿大的碳循环过程，建立了加拿大土壤剖面数据库 (Soil Profile Database)。数据库收集了 1469 个土壤剖面 (超过 7000 个以上的土层) 数据，包括土壤剖面描述、土层厚度、有机碳或有机质、地点经纬度、植被等信息。

1.2 森林生态系统碳储量计算

目前利用 3 种方法在多边形和地区 2 个尺度上计算了加拿大土壤表层 (0-30cm) 和整个土壤剖面库中的碳储量，分析了土壤碳库的空间变异。这三种计算方法为：

(1) 基于研究数据进行计算，包括国际地圈-生物圈项目 (IGBP) 的全球变化和陆地生态系统计划确认的高纬度北方森林样带研究 (BFTCS) 的土壤数据和国家尺度的土壤剖面数据；

(2) 基于专家根据土壤性质进行估计所得的加拿大土壤有机碳数据库 (CSOCD) ;

(3) 基于加拿大森林部分的碳收支模型 (CBM-CFS2) 。

这3种方法计算的加拿大土壤表层碳密度范围是 1.4 - 7.7 kg C/m², 剖面土壤碳密度范围是 6.2 - 27.4 kg C/m², 其空间变化趋势一致, 但CBM-CFS2 模型计算的数值高于田间观测数据和CSOCD土壤碳估计值, 原因是模型中土壤碳库加入了森林地表凋落物库, 占土壤碳库 4~12%。

二、加拿大森林生态系统碳循环模型

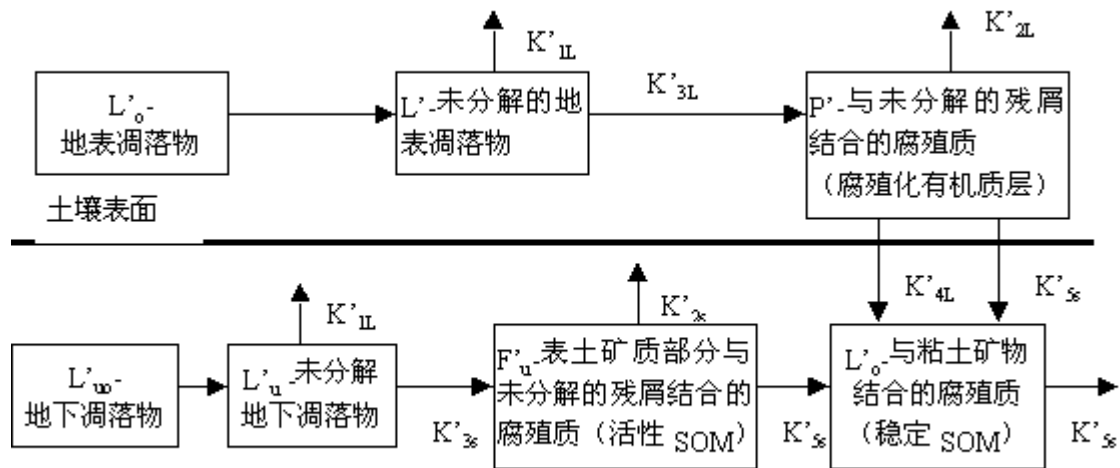
2.1 土壤碳模型

土壤有机质动态模型 SOMM (Soil Organic Matter Model) 包括 3 个组份: 未分解的凋落物、部分腐殖化的有机物、与表土矿质部分结合的腐殖质, 考虑了凋落物的分解和矿化、地表腐殖化的凋落物的矿化与养释放过程。3 个组份的分解受 3 种不同的生物群落控制, 特别是凋落物的分解主要受土壤动物和真菌的影响, 表现为 3 种不同的矿化过程和速率。SOMM 是一个微分方程的组合, 微分方程中的系数受土壤温度、土壤湿度、凋落物 N 和灰分含量、表层土壤 C/N 的控制。这些系数来自控制条件试验所得的数据。

表 1 SOMM 与 CENTURY 的比较

	CENTURY	SOMM
时间尺度	十年 ~ 世纪	月 ~ 世纪
模拟对象	草地系统	森林系统
土壤	同质	异质
分解过程	生物化学/动力学	功能学/形态学
模型 C 组分	由 C/N 比定义的生物化学概念组分	L (未分解的凋落物) F (部分腐殖化的有机物) H (表土矿质部分结合的腐殖质)
分解生物	包括微生物生物量库,	没有土壤动物库 没有微生物生物量库、土壤动物控制了 C 的分解

ROMUL (Raw Humus, mOder and MUL1) 这是在 SOMM 的基础上发展的模型, 其流程图如下:

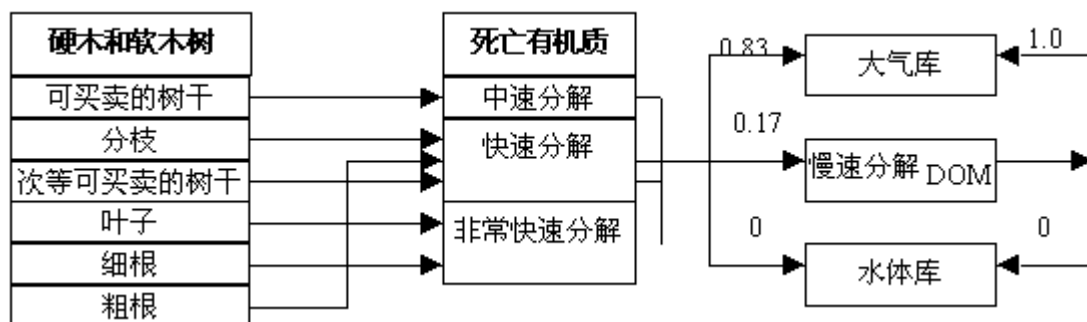


ROMUL 中的主要假设是伴随森林土壤中有有机质 (SOM) 分解过程中 3 种腐殖质形态--粗腐殖质 (raw humus)、中度熟化腐殖质 (moder humus)、高度熟化腐殖质 (mull humus), 模型中存在一个连续的有机质分解生物的变化; 森林土壤微生物生物量库分解速率大, 对 SOM 分解过程影响很小, 不予考虑; 土壤有机质分解生物的组成和数量与有机碎屑的生物化学性质以及土壤水热条件有关, 与 SOMM 模型不同的是, 有机碎屑被分为地上部和地下部 2 个部分; 养分的释放速率与有机质的矿化相同; 细菌和 Arthropoda 产生的 C/N 为 15, 线蚓科 Lumbricidae 产生的 C/N 为 8; 土壤有机碳的淋溶和扩散没有考虑。

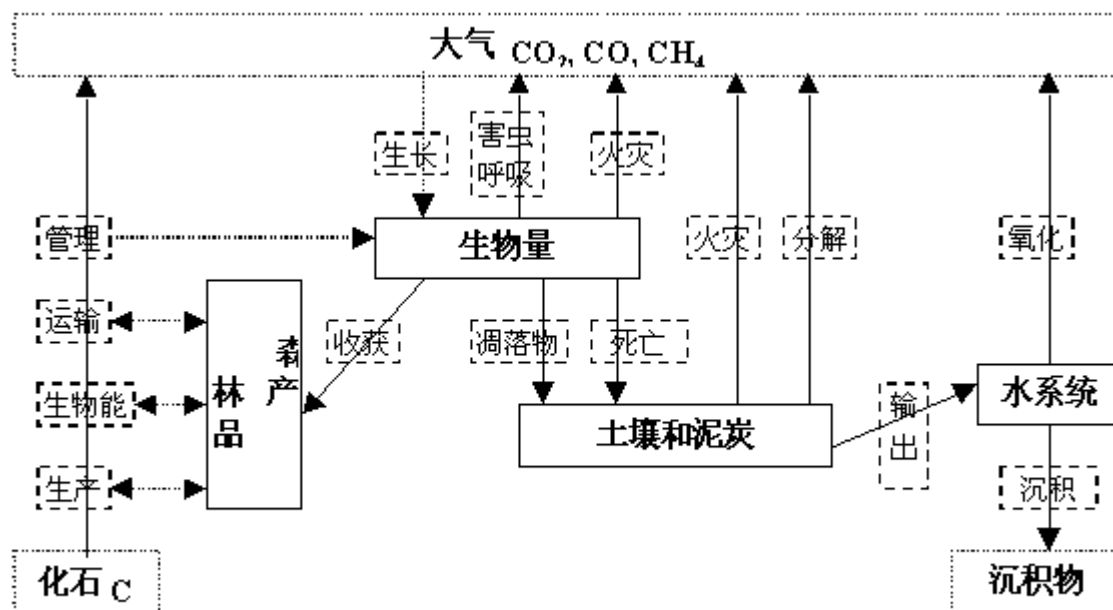
2.2 基于树木生长的森林碳收支模型

加拿大目前的森林碳收支状况有 2 个观点。一个是多伦多大学 Prof J. M. Chen 的小汇观点, 他的研究组建立了基于遥感叶面积指数的森林水文和碳循环模型 (BEPS), 模型运算时间尺度为天, 其结果得到 CO₂ 通量测定塔的观测数据的支持; 另一个是太平洋森林研究中心 Prof. M. J. Apps 的源观点 (火灾干扰下), 他的研究组是加拿大国内最大的森林动态研究组, 建立了基于森林生长动态的森林碳循环模型 (CBM-CFS2), 模型运算时间尺度为年, 其结构相对前者比较复杂, 包括了火灾、害虫等干扰过程, 其结果是建立在长期试验数据的基础上。

CBM-CFS2 (the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector) 是描述加拿大森林生态系统碳库和碳通量以及森林产量的模型。是在第一阶段加拿大森林碳收支项目 (1992 年结束) 的基础上, 对 CBM-CFS1 模型的改进。模型中将生物量分为 12 个子库:



模型流程图如下图所示。在国家尺度上，模型考虑了火灾和害虫对森林生长动态的影响。树木水平的碳动态与森林生物量和土壤 C 库含量、生长和分解速率、以及碳的传输速率有关；种群水平的碳动态与树木的年龄分布以及年度干扰面积有关。CBM-CFS2 首先将加拿大分为不同的生态 - 气候区，包括 11 个生态省（西北、东北、亚北极、寒温带、中温带、草地、山脉、内陆山脉、太平洋山脉、亚北极山脉和北极）457 个生态系统类型。然后建立了不同植被类型的面积和 C 含量数据库（>12000 个记录）历史上（1920 - 1989）森林干扰数据库、以及干扰影响、气候和树木生长数据库，其中在干扰方面，考虑了 7 种类型：野火、害虫引起的死亡、皆伐原木、皆伐原木 + 焚烧、野火后的抢救性砍伐原木、虫灾后抢救性砍伐原木、间伐。最后模型从初始状态开始模拟森林生态系统碳库的变化以及伴随的 C 通量。



2.3 森林生态系统碳通量的预测模型

加拿大遥感中心 (Ottawa)、Albert 大学可再生资源系与美国的橡树岭国家实验室、Alaska 大学、New Hampshire 大学、NASA 阿莫斯研究中心合作对比研究了 9 个生态系统过程模型（从模型运算尺度上分：小时尺度 3 个、日尺度 5 个、月尺度 1 个），用于预测森林生态系统 CO₂ 通量，并用 150 年的加拿大森林中系统和地表 CO₂ 通量、涡流协方差、NPP、NEP、植物呼吸、分解等测定值进行验证。模型模拟的年净生态系统生产力 NEP 范围从 -11gC/m²（弱 CO₂ 源）~85gC/m²（中等 CO₂ 汇）。模型预测的年 CO₂ 汇量比涡流协方差方法测定的值大。在小时和月尺度上，模型预测值与涡流协方差方法测定值相相似，但在亚年尺度上，差异较大。对日尺度的 CO₂ 交换和蒸散量的预测而言，小时尺度的模型和数据比日尺度好；而对月和年尺度的预测，模型的时间运算尺度和复杂性作用很小。这九个模型为：

- (1) BEPS: Boreal Ecosystem Productivity Simulator (加拿大);
- (2) BIOME-BGC: Biogeochemical Cycles;
- (3) CLASS: Canadian Land Surface Scheme(加拿大);
- (4) Ecosys: (加拿大);

(5) FORFLUX;

(6) LoTEC: Local Terrestrial Ecosystem Carbon;

(7) NASA-CASA;

(8) SPAM: Spruce and Moss Model;

(9) TEC: Terrestrial Ecosystem Model.

表 2 9 个模型的特征 (1)

模型	时间尺度	树生物量库	苔藓库	冠层结构	区分阴/阳叶	光合作用方法
BEPS	1 天	4	无	大叶	否	Farquhar
BIOME-BGC	1 天	4	无	大叶	否	Farquhar
CLASS	30 分钟	6	无	大叶	是	Farquhar
Ecosys	1 小时	8	8	10 层	是	Farquhar
FORFLUX	1 小时	3	无	10 层	是	Farquhar
LoTEC	1 小时(冠层)/ 1 天	4	无	大叶	否	Farquhar
NASA-CASA	1 小时	3	1	无	否	无
SPAM	12 小时 (植物) 1 天 (土壤/凋落物)	3	1	大叶	否	f(叶片 N, PPF, T, CO ₂)
TEM	1 月	1	无	大叶	否	f(PPRD, T, 植物 N, CO ₂ , SWP)

续表 2 9 个模型的特征 (2)

模型	气孔导度	苔藓光合作用	树木维持呼吸	树木生长呼吸
BEPS	f(T, VPD, PPRD, SWP)	无	f(生物量 N, T)	0.25G 植物
BIOME-BGC	f(T, VPD, PPRD, SWP)	无	f(生物量 N, T)	0.47G 植物
CLASS	Ball-Berry 模型	f(树木 PG)	f(生物量 N,	0.47G 植物

			T)	
Ecosys	Ball-Berry 模型	Farquhar	f(生物量 N, T)	0.49G 植物 (叶根) 0.49G 植物 (木质)
FORFLUX	Ball-Berry 模型	无	f(T)	0.25G 植物
LoTEC	Ball-Berry 模型	无	f(生物量 N, T)	0.24G 植物 (叶根) 0.33G 植物 (木质)
NASA-CASA	无	无	无	无植物
SPAM	f(VPD)	f(苔藓 N, PPFD, T, WEPS)	f(叶片 C, 根 N, 木质量, T)	包括所有的呼吸
TEM	f(AET/PET, CO2)	无	f(生物量 N)	0.25G 植物

续表 2 9 个模型的特征 (3)

模型	树木 NPP	苔藓 NPP	SOM 库	凋落物库	动力学
BEPS	C 平衡	无	4	2	一级
BIOME-BGC	C 平衡	无	1	1	一级
CLASS	C 平衡	无	4	3	一级
Ecosys	C 平衡	C 平衡	2	2	微生物动力学
FORFLUX	C 平衡	无	0	0	无
LoTEC	C 平衡	无	2 活性 1 惰性	2	一级
NASA-CASA	f(EPAR, e, T, SWP, VPD)	f(1-EPAR, e, T, SWP, VPD)	4	5	一级
SPAM	C 平衡	C 平衡	4	每年 50 份	一级修正
TEM	C 平衡	无	1	SOM 部分	一级

三、土壤碳循环研究

在研究加拿大气候和森林相互作用方面,加拿大从 90 年代开展了对森林碳库动态的模型研究,如 FORCYTE 和 CBM-CFS。在建立模型过程中,发现缺乏很多过程的信息,特别是缺乏土壤碳分解过程在森林类型和时间尺度方面的数据。土壤有机质分解过程和矿化过程与很多因素有关,如气候气象条件、有机质的性质、凋落物的养分含量和物理性质、土壤分解动物和微生物的种群以及土壤养分状况等。美国自然科学基金启动了一个 10 年期的项目,研究 28 个点的凋落物的分解过程并用以验证模型的预测值。但这些地点主要代表草地、沙漠、暖温带森林和热带森林系统,1991 年起,加拿大在绿色气候变化项目以及气候变化和生态系统过程项目的支持下,与美国研究网络合作,选择了 21 个系统(18 个旱地和 3 个湿地系统),

建立了加拿大国内分解试验网络 (the Canadian Intersite Decomposition Experiment, CIDET)。试验中采用了代表加拿大所有生态区的 12 种凋落物，每种凋落物采集 10 公斤；同时，采用了 26 种凋落物进行独立的分解试验研究，通过网袋法测定凋落物 3 种组分（快速分解的可溶性 C、慢速分解的结构性 C 和惰性的木质素 C）的分解速率：残留 C = 可溶性 C $e^{-K_f T}$ + 结构性 C $e^{-K_s T}$ + 木质素 C $e^{-K_m T}$ 。通过试验数据，分析了气候条件、小气候条件、凋落物性质、土壤水文条件对凋落物长期分解的影响。这些研究工作及其获得的结果，对于进一步修正和完善森林碳模型中关于土壤有机碳的动态模拟提供了非常有益的帮助。

来源：国家计委气候办 2003 年 2 月