

开展我国陆地生态系统碳氮循环的生物地球化学遥感动态评估的思路与建议

The Strategic Suggestions on Remote Sensing - based Biogeochemical Dynamic Estimating of Carbon - Nitrogen Cycles in Terrestrial Ecosystems of China

秦小光¹ 蔡炳贵¹ 张 鹏² 王润生³ 刘东生^{1A}

(中国科学院地质与地球物理研究所¹, 中国科学院院士^{1A} 北京 100029; 中国气象局国家卫星气象中心卫星气象研究所² 北京 100081; 中国国土资源部航空物探遥感中心³ 北京 100083)

全球变暖是目前全球变化研究中一个热点问题, 温室气体被人们认为是造成全球升温的主要原因, 碳循环不仅是 IPCC、IHDP 和 IGBP 中 GCTE 等一系列国际组织和核心项目的研究内容, 并且已成为联合国气候变化框架协议、京都会议的一个重要话题。在自然界, 各种温室气体的交换主要发生在大气、海洋与陆地生态系统之间, 因此陆地生态系统的碳氮循环一直是人们的研究焦点。

一、植被碳库、土壤碳库及其影响因素是陆地生态系统碳循环研究重点

陆地生态系统中的碳库形式按生态类型分, 主要有森林、草原、湿地、耕地等几种, 其余如冻原和沙漠, 所占比例很小。多年来国内外科学家的研究重点集中在大气圈与生物圈相互作用过程中温室气体 (包括 CO₂、NO、N₂O、CH₄ 等) 源汇的过程与动态, 尤其是 CO₂ 和氮氧化物的源汇, 如农业与森林生态系统中植被对大气 CO₂ 的吸收与排放、土壤碳库的变化、稻田湿地的 N₂O、NO 和 CH₄ 排放等, 对土壤 CO₂ 的碳同位素也做了很多研究, 施用氮肥对碳汇的贡献也被人们广泛报道。人们发现, 全球平均而言, 森林土壤及其有机质层储存了森林生态系统 39 % 的碳, 其中北方、温带、热带森林的土壤碳储量分别占森林生态系统总碳量的 84 %、62.9 % 和 50 %, 其余碳素储存在植被中, 而草原生态系统中 89.4 % 的碳储存在土壤中, 农业耕地土壤中碳约占全球土壤碳储量的 8 % ~ 10 %。在我国, 近 10 年来森林生态系统中碳汇在持续增加, 而利用我国农业数据库对我国农业生态系统的估算显示土壤碳库在持续减小。

在探讨影响陆地碳汇变化的因素时, 人们发现气候变化、近期森林再生最为重要, 而 CO₂ 的增加也促进了植物的生长, 植被吸收了近一半的人类活动释放的 CO₂, 因此土地利用的改变是造成碳储量变化的重要原因, 而气候、土壤母质、地形、植被类型则是影响碳储量变化的主要自然因素。

二、研究我国陆地碳汇动态刻不容缓

在计算 CO₂ 平衡时, 人们注意到存在一个未知的陆上碳汇, 研究认为在北半球中纬度应该存在一个 1 ~ 3 PgC/a 的陆地碳汇, 但是基于不同方法估算的北半球陆地生态系统碳汇的空间分布与幅度相差很大。耕地和牧场的碳沉降一直是科学家、政府最感兴趣的对象。美国科学家研究认为, 19 世纪晚期和 20 世纪早期大气 CO₂ 浓度的增加可以归结于土地利用的变化, 特别是耕地措施和将森林改为农田, 如美国大平原和西部地区过去 70 多年的农业生产已经造成 50 % 以上的土壤有机碳分解释放回到大气。干旱地区农场由于很强的机械翻耕, 导致过去长期积累形成的土壤有机碳 (SOC) 大量氧化分解, 富含 SOC 的表层土壤也由于侵蚀而损失。近年来采用减少犁地、施肥和频繁的作物轮作明显增加了美国西部旱作农业区的土壤有机质水平, 尤其是 20 世纪后期耕作措施的改变已经把北美农田从碳的净源变成了净汇。他们强调这种陆地碳贮存移走了大气 CO₂, 有利于土壤、水和空气质量的改善, 并指出了解土壤碳库的状况和持续时间是管理土地吸收大气碳素的关键环节, 而农田和牧场占了美国 48 个州一半以上的土地, 提供了管理碳贮存资源的重要机会。2000 年在美国 New Hampshire 大学召开

的一次碳循环国际会议上,一些美国科学家通过模型估算认为,北美是最大的陆地碳库,足以抵消美国相当部份的CO₂排放量,这种观点成为后来美国政府强调其陆地碳汇效应,而不愿承担CO₂排放国际义务、不接受东京议定书的主要根据。但其它科学家的模拟结果与其差异很大,远小于他们的估算。如R. B. Myneni等分析了美国太空船1981~1999年共19年的遥感数据,发现在欧亚大陆北方森林和北美温带森林生物碳汇在增加,而加拿大一些地方北方森林碳汇在减小,每年生物碳汇量约 $0.68 \pm 0.34 \times 10^{10}$ 吨,其中近70%在欧亚大陆。北美大平原的草原是一个巨大的生态系统,美国ARS(Agricultural Research Service)科学家对其在北美碳贮存中的地位进行了评估,发现草原植被仅仅半年是吸收大气CO₂,大约 $1.7\text{gCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{Day})$,而休眠期的草原土壤仍然有生物活动并释放CO₂,数量相同或稍高于生长期。这些结果与那些认为北美是世界最大陆地碳汇的观点有所不同,这也因此成为后来京都会议的争论焦点。

2001年布什正式宣布美国不再受东京协议的约束,而将通过两个新的国家气候变化研究技术组织研究气候变化,在联邦机构层次上开展更多的研究活动。在这些行动计划中,USGCRP(the U. S. Global Change Research Program)组织开展了4个方面的重点研究:碳循环和碳贮存;痕量气体(trace gases);农业生态系统影响;天气变化与农场和区域尺度水循环。

由此可见对陆地碳汇的认识还存在一些盲点,需要对各种生态系统动态进行深入的研究,进一步发展对碳循环过程详细刻划的机理模型,同时还需要采用更先进的技术和更精确的基础观测数据。另一方面反映出查明陆地碳汇动态尤其是近年来的变化具有重要的政治意义,迫切需要我国科学家有所作为,并针对我国的实际情况寻找和估算我国的陆地碳库,提出有利于我国的碳汇形式及其动态趋势。

三、模型是当前与今后陆地碳库研究的重要手段

由于碳氮循环涉及地球多层圈间的复杂过程和许多非线性关系,作用与反馈同在,因此仅仅依靠重复的野外观测、简单的相关分析,已远远不能解决陆地生态系统碳氮循环过程的机制问题。为了描述陆地生态系统碳循环过程、模拟气候变化和人类活动对碳循环过程的影响,模型模拟成为人们采用的最重要手段,现在模型研究已成为近年来国际上最为活跃的碳循环研究领域之一。迄今为止,国际上已发展了大量的各种生态系统模型和生物地

球化学模型,主要可分为碳平衡模型、生物生理模型、生物地理模型和生物地球化学模型。不同的模型由于模拟角度、原理不同,因此侧重点也不尽相同,概括起来有以下几方面:区域或全球评价;机理与过程;以静态植被为背景研究生态系统与气候的关系;植被对气候的动态响应;植被生理特征;土壤过程。

1. 碳平衡模型 主要根据各种陆地生态系统类型的净初级生产力NPP,估算各种生态类型的碳密度,再结合分布面积,简单计算出全球陆地的碳平衡,基本不考虑各种过程的内部细节,如OBM模型。

2. 生物生理模型 主要根据植物生理特征,如光合作用、CO₂施肥效应、植被冠层蒸发、叶片气孔阻力等各种植物生理、植物物理等机理,模拟植被生长,分析区域性土地利用的气候影响,探讨植被对气候的反馈等,主要有SiB、BATS和LEAF等模型。

3. 生物地理模型 包括BIOME、DOLY、MAPSS等模型,其输出为植被类型,MAPSS还输出土壤蒸散蒸发量。BIOME是一个耦合了碳、水通量的模拟模型,研究在大尺度上控制植被结构性和功能性分布的主要驱动因子。DOLY模型是一个全球初级生产力和植被地理学模型,可用于分析植被对全球环境变化的响应。MAPSS是一个全球生物地理模型,可模拟任何地方在长期稳定气候状态条件下能够支持的潜在自然植被,其基本原理是生态系统趋向于该地土壤湿度或能量所能支持的最大叶面积,主要模拟植被类型(树、灌木、草)的分布、主要叶面形式(阔叶、针叶)、叶面生物气候(常绿、落叶)、耐热容量和植被密度(LAI),然后将这些特征组合成与一定生物量对应的植被分类。

4. 生物地球化学模型 包括较成熟的CENTURY、DNDC、NCSOIL、RothC等。这些模型的特点是利用气象、土壤、土地利用和农田管理措施为输入,对土壤有机质的产生、分解和转化等过程进行定量模拟,最后给出土壤有机碳动态、农作物产量以及CO₂、NO和N₂O等各种温室气体排放量。全球土壤有机质网络(SOMNET)是ICBP的GCTE的一个核心项目。根据对SOMNET中9个最先进模型比较表明,RothC、NCSOIL、CENTURY和SOMM 4个模型能够模拟各种土地利用类型;RothC、CENTURY、DAISY、CANDY、NCSOIL和DNDC 6个模型的模拟结果明显优于其它3个,其中以CENTURY、DNDC最有特色。

CENTURY模型是美国农业部重点支持发展的一个可以模拟草原系统、农作物系统、森林系统、森林草原系统的综合模型。其土壤有机质模型通过植物枯枝败叶、不同的土壤有机与无机库,模拟C、N、P、S流。模型以月为时间步长,模型输出为土壤有机

质动态(包括总生物碳量、 C^{13} 和 C^{14} 生物碳量、 CO_2 、氮素和土壤水份动态等)、植被动态(包括农作物吸收与返回土壤的 C、N 量,作物产量等)、动物动态(包括动物吸收和返回土壤的 C、N 量)。

DNDC 模型是美国 New Hampshire 大学发展的,主要模拟农业与森林生态系统中的碳和氮的生物地球化学循环。模型由 6 个子模型构成,分别模拟土壤气候、农作物生长、有机质分解、硝化、反硝化和发酵过程,这些过程描述了土壤有机质的产生、分解和转化,最后给出土壤有机碳含量和 CO_2 、 N_2O 、 NO 等温室气体的排放量。这个模型与其它模型相比,最大的特点就是除 CO_2 和土壤有机质外,成功模拟了氮氧化物的排放量,在氮循环模拟方面是国际上最好的模型之一。这个模型的另一个特点是以小时为计算步长,输出所有变量每天的值。其描述的土壤过程最为精细,并可以在 GIS 数据库支持下,完成对区域的动态模拟。

事实上,目前模型有向综合方向发展的趋势,几乎所有模型都在逐步集成植物生理、土壤有机质过程(包括分解、硝化、反硝化、发酵)、氮循环、水循环、森林草原等过程。如,在 TEM 最新版本中,引入了一个水平衡模型为模型提供水文输入;DNDC 也正在引入一个模拟湿地水位变化的水平衡模型;MC 模型结合了生物地理模型 MAPSS、生物地球化学模型 CENTURY 和一个新的动态火灾子模型,成为一个新的动态植被模型。其次,国外的模型大多以年、月为计算步长,只有少数模型以小时、日为计算步长,如 DNDC 模型,近年来一些以年、月为计算步长的模型也开始发展以日为计算步长的版本,如 CENTURY 模型。计算步长的改变实际是因为这些模型增加了对一些过程细节的模拟,如植物的光合作用、大气 CO_2 浓度增肥作用、土壤有机质分解作用等,这反映出陆地生态系统碳氮循环模型的发展方向之一是各种过程日益深入的精细描述。再次,氮循环研究日益受到重视。大多数模型都将氮循环模拟作为碳循环研究的重要组成部分,把土壤氮素作为影响植被生长的重要因素。

四、遥感技术是目前最受重视的碳循环宏观研究手段之一

早在 IGBP/ GAIM 的模型研究计划中,就特别重视利用遥感技术估算全球生态系统的初级净生产力 NPP。这类遥感模型主要采用 NOAA 的 AVHRR 卫星遥感图像,具有相对较长的时间序列和较高时间分辨率并覆盖全球的能力,提供了全球实际植被稳定可靠的图像。

近年来,美国对利用遥感技术研究碳循环更为重视,美国 NASA 将探测对流层 CO_2 全球分布的激

光吸收分光仪作为 2001 年重点支持的 11 项研究计划之一。NASA 的 CCIT(Carbon Cycle Initiative Team) 2001 年 5 月,召开了第三次工作组会议,总结 NASA 前两次工作会议要求的观察任务完成情况,主要要求观察大气 CO_2 浓度、陆地生物量和生产力、海气 CO_2 通量。目的是:(1) 量化全球碳源汇;(2) 弄清潜在全球碳通量的过程;(3) 预测给定未来全球气候变化条件下的碳通量。

Myneni 等研究过去 20 年来的遥感观测后发现,在高纬度地区存在着生长季节变长、年净初级生产力 NPP 加大的趋势,他们采用归一化植被指数 NDVI 方法,从 AVHRR 传感器的下午系列图像 NOAA7,9,11 和 14 波段,空间分辨率为 8km,提取了 NDVI,然后根据一种植被冠层辐射散射的三维辐射转换模型计算生成 8km 分辨率的月季 LAI 数据,结果的趋势显示,较早的春季发芽和最大 LAI 的增加是模型中植被对温度改变的响应结果。

美国 NASA 陆地生态项目支持的 BigFoot 计划开始准备直接提供 MODLand(MODIS Land Science Team) 科学产品,包括土地覆盖、叶面积 LAI(leaf area index)、光合吸收主动辐射分量 f_{apar} (fraction absorbed photosynthetic active radiation)、净初级生产力 NPP。他们利用地面测量、遥感数据、生态系统过程模型在点上再现不同的生物量。每个点上进行多年的生态系统结构和与陆地碳循环有关功能特征的观测。每个测量年提取土地覆盖、 f_{apar} 和 LAI,以将点上测量与陆地卫星 ETM+ 数据相联系。通过保证功能性重要细节、合并 BigFoot 试验点的生态面积,提供植被模式的特征。再利用这样的土地覆盖和 LAI 及提取的相应面积,将 NPP 在 $5 \times 5km$ 的试验点模型化。又采用两个独立的生态系统过程模型 Biome - BGC 和 IBIS,描述水、碳循环的环境和生态控制因素,通过野外测量数据来验证比较 MODLand 土地覆盖类型、LAI、 f_{apar} 、NPP 等数据,并定量碳容量和 NPP,考察其时空变化、NPP 与气候变量的关联,直接检验植物功能类型间的光利用效率(LUE)。

可见在陆地生态系统碳循环研究中,人们主要利用遥感技术提取宏观大尺度范围内植被动态(如叶面积指数、生物量等)来研究植被碳库的变化。近年来人们开始尝试将遥感与模型相结合,以充分发挥模型的过程机理定量化和遥感信息的宏观、动态的长处。

五、模型与遥感的结合是今后碳循环研究的趋势之一

当前国际上模型发展趋势表明,模型与遥感的结合是大势所趋。遥感技术不仅可以提高植被覆盖、土壤分布等数据的精度,而且可以实现动态实时的宏观监测。目前国际上在模型与遥感的结合方

面做了很多工作,主要是利用遥感信息提取植被类型、LAI和土地利用状况等专题信息,然后根据模型对典型植被和气候类型地点的模拟结果,推算出整个生态系统的碳循环水平,如DNDC模型在对中国水稻温室气体排放的研究中,利用遥感信息提取水稻的面积和分布信息,然后以县为单位进行统计后更新已有的GIS数据库,再用模型进行模拟评价。相比之下TEM(Terrestrial Ecosystem Model)直接采用了遥感信息提取的植被类型分布数据作为模型输入,与遥感技术的结合比较成功,但是它的时空分辨率较低,对土壤生物地球化学过程的描述也较简单。CASA过程模型以网格方式结合了全球气候、土壤、辐射和遥感植被指数数据,模拟土壤碳循环和CO₂释放的季节模式。更多的做法是分别利用遥感和模型对一个地区进行植被类型与生物量的提取和模拟,然后对比两种结果的差异。

可见大多数模型研究很少直接采用遥感信息作为模型运行的基本驱动参数。这一方面是由于二者属于不同领域,模型发展还是近年来的事,研究工作还在不断深化发展之中;其次是因为过去计算机技术的限制,即由于这种模型与遥感的结合,尤其是对逐日计算的模型而言,意味着更加庞大的计算量,故只是到了近年来计算机技术进一步发展后,才使得二者的结合成为可能。

事实上,模型与遥感的结合至少可以在以下几个方面发挥优势。

1. 提高模型区域模拟的精度。模型在对区域乃至全球的碳氮循环进行评价时,所采用的基础数据对其结果精度至关重要,而遥感图像是唯一一种能够同时获得大范围内地表动态的信息源,因此从遥感信息中提取的植被类型、空间分布及其面积可以提高模型输入数据精度,从而提高评价精度。数据精度的提高包括两个方面:一是可以减小评价单元尺寸,提高评价单元的空间分辨率,从而提高评价精度;二是利用遥感信息提取的土壤、植被的类型和分布信息比统计数据更客观。

2. 遥感信息为模型提供植被动态信息,并可以作为模型输入参数直接驱动模型运行。遥感信息获取快速方便、成本低,可以实时获取,为实时评价大区域碳循环动态提供了可能。

3. 遥感提供地上植被碳库动态信息,而模型则给出土壤、岩石碳库动态和温室气体排放动态。

六、发展有自己特色的碳氮循环生物地球化学遥感模型是赶超国际研究水平的有效途径

国内虽然碳氮循环研究起步较晚,但近年来也开展了许多卓有成效的研究工作,对各种森林、草

原和农业生态系统的CO₂、CH₄、N₂O和NO释放都作了大量的观测研究,在模型方面也有相当的进展,如周广胜和张新时的植物净生产力模型、陈育峰等人的林窗模型FOREC、李忠佩等人的双组份模型、季劲钧等人的AVIM大气植被交互作用模型、郑循华等人的水稻温室气体排放模型等等,更多的人采用了国外模型研究中国的碳氮循环。但总体上看,我国的碳氮循环研究与国际水平还有相当一段差距,机理性模型研究明显落后。随着我国碳氮循环研究的不断深入和更多的资料积累,借助国外的先进经验和研究成果,选择一些优势研究领域,发展有自己特色的碳氮循环模型将成为我国科学家今后的主要任务之一。

从目前国际上碳循环研究现状看,现在还没有一个模型能够以日(和/或小时)为时间步长、以遥感提取的动态信息为模型输入模拟土壤生物地球化学过程,实时估算碳氮循环动态。因此充分利用国内外已有研究基础,发展这样一个生物地球化学遥感模型不仅对模型的新发展,而且对实现动态实时评价我国大区域宏观碳库变化水平具有极为重要的意义。

七、我国陆地生态系统的碳循环动态变化水平亟待给予科学的评价和监测

我国陆地生态系统类型繁多、人类改造强度大、环境脆弱区分布广泛,如西北为干旱半干旱区,有大片的沙漠、戈壁和黄土区;青藏高原则是高寒环境区,这些地区的气候极为恶劣,植被以草原、干旱草原和高寒草原为主,森林分布十分有限,生态环境特别容易被破坏,是植被和土壤碳库最不稳定的地区。如,内蒙毛乌素草原在开垦成农田后仅仅5年SOC就从4.1g/kg下降到2.2k/kg;东部地区耕地已彻底改变了自然生态系统,森林砍伐和农业生产造成了自然碳库的急剧萎缩。过去50年来我国的农田已经损失了大量的土壤有机质,尤其是解放以来在东北地区的开垦,造成了土壤有机质的快速下降和温室气体的大量排放;而化肥的大量使用和农家肥的减少,已造成我国耕地的极度贫瘠。目前,沉重的人口压力已使我国不可能完全采用西方国家的单季种植、休耕等做法,但是借鉴其成功经验,建立土壤碳贮存资源管理机制,提高我国土壤有机质含量,则是完全可行的。实现我国耕地碳库的增加,首先就需要了解土壤碳库的动态,而碳氮循环的生物地球化学模型与动态遥感信息已为宏观评价我国西部生态系统碳库的动态变化提供了可能。

(删去全部参考文献中文19篇、英文71篇)

(责任编辑 肖庆山)