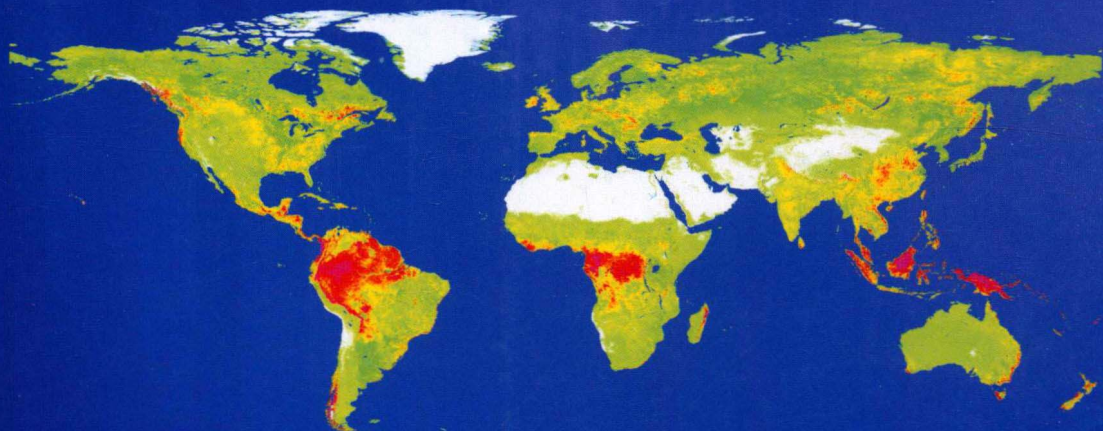


地球观测与导航技术丛书

全球陆地碳汇的遥感和 优化计算方法

陈镜明 居为民 刘荣高 等 著
李 勇 江 飞



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

地球观测与导航技术丛书

全球陆地碳汇的遥感和优化计算方法

陈镜明 居为民 刘荣高 等 著
李 勇 江 飞

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书汇集了科技部全球变化研究国家重大科学研究计划项目“全球不同区域陆地生态系统碳源汇演变驱动机制与优化计算研究”(2010CB950700)的主要研究成果。本书分四个层次介绍陆地碳循环的研究方法:①卫星遥感方法;②生态系统模型;③大气反演;④碳同化系统。这四种方法循序渐进,卫星遥感是基础,它为生态系统模型提供基础数据;生态系统模型是核心,它是研究陆地碳汇分布、发生原因和未来趋势的重要工具;大气反演则是利用大气观测浓度进一步优化生态系统模型模拟的碳通量;碳同化系统是碳循环研究的重点,它集成了生态系统模型和大气反演方法的优点,是一种更加综合、完善的碳循环优化计算技术。

本书可供遥感、生态、环境、全球变化等相关专业领域的研究人员和高校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

全球陆地碳汇的遥感和优化计算方法/陈镜明等著. —北京:科学出版社, 2015. 11

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-045959-6

I. ①全… II. ①陈… III. ①遥感技术-应用-陆地-生态系统-碳循环-研究-世界②陆地-生态系统-碳循环-最优化算法 IV. ①X511-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 241931 号

责任编辑:苗李莉 朱海燕 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:24

字数:600 000

定价:178.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段,而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑,地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项;国家有关部门高度重视这一领域的发展,国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展;工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范;国家高技术研究发展计划(863 计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题,首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前,“十一五”计划正在积极向前推进,“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下,把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书,集中发布,以整体面貌推出,当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果,又能促进领域内相关成果传播和交流,并指导未来学科的发展,同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展,科学出版社依托有关的知名专家支持,凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验,主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信,通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作,将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世,成为我国地球空间信息科学中的一个亮点,以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展!

李德仁

2009 年 10 月

前 言

人类所赖以生存的地球正在以前所未有的速度发生变化,人类自身的活动是这一变化的主要原因。人类通过开采和使用化石燃料并开发和利用土地,向大气排放了大量的温室气体。截至 2014 年,二氧化碳的总排放量已经达到每年 367 亿 t(含碳 100 亿 t)左右,大气的二氧化碳浓度已接近 400ppm(百万分之一)。大气温室气体浓度的增加是引起全球变暖和气候变化的主要原因。迄今为止,陆地和海洋分别吸收了约 1/4 的碳排放量,使得大气二氧化碳浓度的增加速度减缓了一半左右。但陆地碳吸收(碳汇)的时空分布、存在原因和未来趋势尚不清楚,仍需要进行大量的研究。

陆地碳汇与植物生长的变化密切相关,不仅受到气候和大气成分变化的影响,也受到人类活动的干扰,它发生的生物物理过程极其复杂,难以准确计算和预告,是全球碳循环研究中最不确定的因素。由于地表生态系统结构复杂、功能多样、时空多变,卫星遥感是监测陆地碳汇的重要且必不可少的手段。为了充分利用现有卫星资料提取的土地覆盖类型、植被结构参数、植被扰动(火灾、虫灾、森林砍伐等)等信息,我们开发了基于生物物理过程的生态系统机理模型,将遥感、气候和土壤资料相结合,以现有的全球通量网络的碳通量资料为数据基础,对陆地碳汇进行了中长期的模拟研究。生态系统模型是研究陆地碳汇分布、发生原因和未来趋势的重要工具,但其区域和全球尺度的结果需进行进一步的验证。大气二氧化碳浓度观测是验证区域和全球尺度陆地碳汇计算结果的重要手段,并可用大气反演方法来优化(改进)地表碳通量的时空分布。以上这些方法,在近 10~20 年得到了迅速的发展,已日趋成熟。本书重点介绍基于卫星观测资料的陆地碳汇的各种计算方法;此外,本书进一步介绍尚处于初步开发阶段的全球碳同化系统。与大气反演方法相比,碳同化系统不仅优化碳通量,也可同时优化生态系统模型参数,使得生态系统模型在同化过程中逐渐逼近真实历史状况。特别是全球尺度优化后的模型,可更精确地模拟过去和未来陆地碳汇的变化。在现阶段,碳同化系统是能够有机整合各种资料(土壤、植被、大气)进行碳循环模拟的终极手段。本书分四个层次介绍陆地碳循环的研究方法:①卫星遥感方法;②生态系统模型;③大气反演;④碳同化系统。这四种方法循序渐进,逐渐复杂,逐步综合,趋于完善,可作为从事遥感应用、生态模型系统、大气模型反演等全球变化研究的研究生、教师和科研人员的参考书。

本书集成了科技部 973 计划项目“全球不同区域陆地生态系统碳源汇演变驱动机制与优化计算研究”(项目号:2010CB950700)的主要研究成果,是集体智慧的结晶。该项目于 2010 年启动,是科技部设立的全球变化研究国家重大科学研究计划的第一批项目之一,共有 6 家单位参与,包括南京大学、中国科学院地理科学与资源研究所、北京师范大

学、中国科学院南京土壤研究所、国家气象局和国家林业局。我们衷心感谢参加该项目的
所有科研人员、团队成员和研究生为项目取得的成果所付出的努力。同时,我们也非常感
谢徐冠华院士和专家组为推动中国全球变化研究所做出的巨大努力,使我们有机会形成
研究团队,并取得本书所介绍的成果。

由于本书涉及面广、疏漏及不妥之处在所难免,欢迎学术同仁批评指正。

陈镜明

2015 年 2 月

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

前言

第 1 章 全球长时间序列叶面积指数的遥感反演	1
1.1 引言	1
1.2 基于 AVHRR 和 MODIS 数据的 LAI 反演	2
1.3 反演结果分析	8
1.4 本章小结	15
参考文献	16
第 2 章 用多角度遥感方法提取植被聚集度指数	19
2.1 引言	19
2.2 基于几何光学模型建立的聚集度指数与 NDHD 的关系	21
2.3 卫星数据处理	22
2.4 结果与讨论	29
2.5 聚集度的不确定性分析	39
2.6 本章小结	41
参考文献	41
第 3 章 林下植被反射率遥感反演	48
3.1 森林冠层与背景信息分离的重要性与应用前景	48
3.2 算法原理	50
3.3 基于 4-scale 模型提取森林背景反射率	51
3.4 森林背景反射率反演结果分析	53
3.5 本章小结	63
参考文献	64
第 4 章 全球森林冠层高度估算	69
4.1 全球森林冠层高度估算产品概述	69
4.2 全球森林平均冠层高度估算方法	71
4.3 模型估算结果分析	74
4.4 本章小结	78
参考文献	79
第 5 章 区域森林生物量估算	82
5.1 森林生物量模型估算	82
5.2 生物量估算结果分析	85
5.3 本章小结	93
参考文献	94

第 6 章 南美森林扰动分析 96

6.1 南美森林扰动监测现状..... 96

6.2 森林扰动遥感监测分析 105

6.3 南美洲森林扰动监测研究典型案例分析 111

6.4 本章小结 116

参考文献..... 116

第 7 章 陆地生态系统碳循环模拟方法..... 122

7.1 陆地生态系统碳循环模型 122

7.2 碳循环主要过程的模拟方法 123

7.3 BEPS 模型和 InTEC 模型简介 128

7.4 本章小结 135

参考文献..... 135

第 8 章 陆地生态系统模型参数优化..... 138

8.1 生态模型参数优化主要方法与数据 138

8.2 BEPS 和两叶光能利用率模型参数优化 141

8.3 本章小结 147

参考文献..... 147

第 9 章 近 30 年全球陆地碳收支变化特征及其未来趋势 150

9.1 全球陆地生态系统碳源汇研究现状及问题 150

9.2 BEPS 模型、IBIS 模型和 LPJ 模型的陆地碳收支模拟 151

9.3 1981~2012 年全球陆地生态系统碳源汇的变化特征 154

9.4 1981~2012 年全球陆地生态系统碳源汇的驱动因子及作用 156

9.5 全球陆地生态系统碳收支未来趋势预测 157

9.6 本章小结 165

参考文献..... 165

第 10 章 中国森林碳源汇的时空变化特征 167

10.1 基于清查数据的中国森林植被碳储量动态变化分析..... 167

10.2 基于森林树高遥感数据和观测数据的森林年龄制图..... 172

10.3 中国森林碳源汇的时空变化模拟分析..... 181

10.4 本章小结..... 191

参考文献..... 192

第 11 章 中国农田碳源汇分布及其驱动因子分析 195

11.1 引言..... 195

11.2 中国农田土壤碳源汇空间分布特征..... 196

11.3 中国典型区农田土壤有机碳变化及固碳速率..... 209

11.4 典型区农田土壤有机碳变化驱动力特征..... 218

11.5 本章小结..... 229

参考文献..... 230

第 12 章 中国草地生产力与碳源/汇变化	233
12.1 引言	233
12.2 研究数据及预处理	234
12.3 中国草地 NPP 时空变化特征及其与温度降水关系	235
12.4 中国草地 NEP 的空间分布特征及其影响因子分析	240
12.5 本章小结	244
参考文献	244
第 13 章 陆地生态系统碳通量大气反演的理论与方法	246
13.1 大气反演的研究进展	246
13.2 大气反演理论	246
13.3 本章小结	252
参考文献	252
第 14 章 大气 CO ₂ 浓度的观测方法和结果分析	254
14.1 引言	254
14.2 千烟洲大气 CO ₂ 浓度观测	256
14.3 千烟洲观测结果分析及讨论	261
14.4 本章小结	270
参考文献	271
第 15 章 中国化石能源消耗和工业过程 CO ₂ 排放清单研究	272
15.1 研究方法	272
15.2 结果分析与讨论	275
15.3 本章小结	286
参考文献	286
第 16 章 以北美为中心的嵌套式大气反演方法和结果	288
16.1 以北美为中心的嵌套式大气反演系统	288
16.2 全球及北美陆地生态系统碳源汇分布的反演结果	289
16.3 北美森林年龄数据对大气反演结果的影响	291
16.4 美国农业生产和消耗数据对大气反演结果的影响	292
16.5 增加 ¹³ C(¹³ CO ₂) 观测数据对大气反演结果的影响	296
16.6 本章小结	298
参考文献	299
第 17 章 以中国为中心的大气反演方法和结果	302
17.1 以中国区域为中心的嵌套式大气反演系统	302
17.2 全球反演的碳通量	308
17.3 中国区域反演的碳通量	311
17.4 CONTRAIL 飞机观测资料对中国及周边地区反演碳汇的影响	314
17.5 本章小结	320
参考文献	320

第 18 章 改进的全球碳同化系统与实现 324

18.1 引言..... 324

18.2 改进的全球碳同化系统的实现..... 324

参考文献..... 326

第 19 章 基于改进的集合卡尔曼滤波的全球碳同化系统 327

19.1 引言..... 327

19.2 模型和数据..... 328

19.3 同化方法..... 329

19.4 GCAS-EK 系统的应用和结果分析 333

19.5 本章小结..... 338

参考文献..... 338

第 20 章 基于双优化方法的全球碳同化系统 340

20.1 碳通量时空分布的研究背景..... 340

20.2 BSIM 方法的统计学描述 341

20.3 通量和参数的双优化反演模型..... 342

20.4 DOM 应用模拟实例 344

20.5 双优化嵌套全球碳同化模型系统..... 344

20.6 GCAS-DOM 的应用实例 348

20.7 本章小结..... 356

参考文献..... 357

第 21 章 基于大气反演的生态系统模型参数优化研究 359

21.1 引言..... 359

21.2 数据和方法..... 359

21.3 不同优化方案的对比研究..... 361

21.4 本章小结..... 364

参考文献..... 365

索引..... 368

后记..... 371

第1章 全球长时间序列叶面积指数的遥感反演

刘 洋 刘荣高 陈镜明

1.1 引 言

植被作为一种重要的地表下垫面类型,是地球系统的重要组成部分,通过光合、呼吸和蒸腾等生物物理过程实现土壤-植被-大气之间的物质、能量和动量交换(Ganopolski et al., 1998)。叶片是植被进行光合等生理作用的主要载体,植被叶片的定量描述对于地球系统碳、氮、水循环模拟十分关键。

植被叶片的疏密程度常用叶面积指数(leaf area index, LAI)来表征,通常被定义为单位地表面积上绿叶表面积总和的一半(Chen and Black, 1992)。在碳循环中,叶面积指数是影响冠层吸收光合有效辐射能力的关键因子,决定了冠层的光合作用能力进而影响生态系统碳循环(Myneni et al., 1989)。在水循环中,叶面积指数又通过影响下垫面的表面阻抗,改变土壤和地表水的蒸发以及冠层的截留、蓄积和蒸腾(Arora, 2002)。因此,叶面积指数是定量分析植被生长动态和生物物理过程的一个重要植被结构参数,也是大多数气候、水文、生物地球化学和生态系统模型的关键输入参数(Myneni et al., 2002)。近百年来气候变化持续发生,植被结构随着区域气候的变化发生改变,而其对气候的反馈又会影响区域和全球的气候变化(Ciais et al., 2005; Heimann and Reichstein, 2008)。获得大区域长时间序列 LAI 数据,特别是在反演中考虑植被的结构信息,可以直接观测区域和全球尺度气候变化对于植被生长状况的影响,有助于模拟陆地生态系统碳、水循环对气候变化的响应和反馈(GCOS, 2006)。

卫星遥感为获取全球范围的叶面积指数提供了一种有效途径,其中,光学遥感数据在空间覆盖和观测频率等方面有很大优势,是用于估算全球长时间序列叶面积指数最常用的数据源。自 20 世纪 70 年代以来,NOAA/AVHRR、SPOT/VEGETATION、TERRA-AQUA/MODIS、ENVISAT/MERIS 和 TERRA/MISR 等卫星传感器持续观测地球表面,获得了大量连续的地表观测数据。基于这些传感器数据,已经生成了多个叶面积指数标准产品,如基于 AVHRR 数据的 ECOCLIMAP(Masson et al., 2003)和 ISLSCP-II(1982~1990 年)(Los et al., 2000);基于 VEGETATION 数据的 CYCLOPES(1999~2007 年)(Baret et al., 2007)、GLOBCARBON(1998~2003 年)(Deng et al., 2006)和加拿大叶面积指数图(1993~2002 年)(Chen et al., 2002);基于 MODIS 数据的 MOD15(2000 年~至今)(Myneni et al., 2002)以及 MERIS LAI(2002 年~至今)(Bacour et al., 2006)和 MISR LAI(2000 年~至今)(Diner et al., 2008),并被应用于全球碳、水循环等的研究中(Zhao and Running, 2010; Leuning et al., 2008)。但是,这些叶面积指数数据产品多基于单个传感器生成,时间序列较短。并且,由于传感器本身和反演算法的差异,产品

之间存在不一致的问题,不能直接生成一个高一致性的叶面积指数长时间序列数据集。此外,目前的产品大多没有充分考虑集聚效应、冠层和林下植被区分等植被的结构信息。多种传感器数据的融合有望生成长时间序列的叶面积指数产品,弥补单一传感器的不足。

NOAA7-14 卫星上搭载的 AVHRR 提供了从 1981 年 7 月以来的全球连续观测数据,可以用于生成长时间序列数据集(Tucker et al., 2005)。但该传感器仅有红、近红外、中红外和红外波段,且传感器设计不完善,定标精度较低;由于缺乏短波红外观测,数据本身的大气校正很难完成。TERRA 和 AQUA 卫星上搭载的 MODIS 提供了 2000 年以来 36 个波段的高质量的地表观测,信息量丰富,定标精度高,可实现更精确的大气校正,为 LAI 反演提供了丰富和高质量的数据源。这两个传感器的结合有望生成 1981 年以来的长时间序列叶面积指数数据。搭载在 TERRA 卫星上的多角度传感器 MISR 提供了地表 9 个角度的观测,基于这些同时获得的不同角度的观测,可以提取植被的结构信息。然而,生成长时间序列叶面积指数还存在以下难点:①不同传感器的光谱响应函数、时空分辨率、定标和观测角度等存在很大差别,在相同的大气和地表状况下,即使相同波段 AVHRR 和 MODIS 获得的地表反射率也不一致(Gitelson and Kaufman, 1998; Trishchenko et al., 2002);②AVHRR 的数据质量低于 MODIS,而低质量的 AVHRR 数据直接采用传统基于物理模型反演的方法得到的叶面积指数质量劣于 MODIS。

本章基于 AVHRR 长时间序列观测和 MODIS 高质量观测生成全球 1981 年以来的叶面积指数数据,并在反演中利用 MISR 多角度观测考虑植被的结构信息,包括集聚效应以及森林冠层与林下植被的分离。首先基于高质量的 MODIS 观测生成叶面积指数数据;然后基于 AVHRR 和 MODIS 的重叠观测,在像元尺度上建立 AVHRR 观测和 MODIS 反演的高质量 LAI 数据之间的关系,获得 1981~2012 年全球高一致性的叶面积指数(Liu et al., 2012);在此基础上,在反演中加入像元级聚集度指数和多角度观测反演得到的森林背景反射率,实现植被结构信息的考虑。对反演结果进行空间分布、季节变化,以及植被类型合理性等分析,在全球和站点尺度进行一致性比较,并利用全球典型站点的野外测量进行验证。

1.2 基于 AVHRR 和 MODIS 数据的 LAI 反演

1.2.1 数据

采用 MODIS 地表反射率和土地覆盖数据实现 2000 年以来的 MODIS LAI 反演;利用 AVHRR NDVI 数据建立像元尺度的 AVHRR SR-MODIS LAI 关系,实现 1981 年以来的 AVHRR LAI 反演。在反演中,加入全球聚集度指数和森林背景反射率考虑植被的集聚效应,以及冠层和林下植被分离。并利用最新版本的 NASA MODIS 标准产品 MOD15A2(C5)评估算法结果。

1) AVHRR 及 MODIS 数据

基于 AVHRR 生产的 GIMMS NDVI 被广泛用于植被变化监测(Tucker et al., 2005)。该数据集对 NOAA 7、9、11、14、16 和 17 的 AVHRR 观测数据进行了定标、空缺值插值等处理,时间覆盖 1981 年 7 月~2006 年 12 月,空间分辨率为 8km,时间分辨率为

15 天。采用经纬度投影,空间范围为 $63^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$,覆盖了除南极洲外所有的大洲。另外,还提供了质量标识 Flag 来表示相应 NDVI 值的质量信息,Flag 取值 $0\sim 6$,其中,Flag 为 0 或 1 的像元 NDVI 质量较高。GIMMS NDVI 数据下载自 <https://wist.echo.nasa.gov/api/>。

MODIS 可以同时获得可见光到热红外 36 个波段、空间分辨率为 250m 至 1km 的数据,1 天内可覆盖全球绝大部分区域,并进行了精确的数据定标、定位等处理。NASA 免费提供了 2000 年 2 月 24 日以来陆地、大气、海洋等多个标准产品。其中,MOD09 为地表反射率产品,提供全球 1~7 波段消除了大气气体、气溶胶和薄卷云影响的地表方向反射率。数据时间分辨率为 8 天,空间分辨率为 500m,投影为正弦 Sinusoidal 投影。

全球土地覆盖分类产品 MCD12Q1 提供全球每年 5 种分类体系的土地覆盖分类数据,其空间分辨率为 500m。本书采用 IGBP 全球植被分类系统(Land_Cover_Type1),该系统将全球植被分为 17 类,包括 11 种自然植被类型、3 种混合地类和 3 种非植被类型。数据时间分辨率为 1 年,空间分辨率为 500m,投影为正弦 Sinusoidal 投影。

叶面积指数/光合有效辐射吸收比率产品 MOD15A2 提供全球 8 天合成、1km 分辨率陆地植被的叶面积指数数据。该产品采用三维辐射传输方程反演 LAI 和 fPAR,当算法失败时,采用基于 NDVI 的后备算法(Myneni et al., 2002)。MOD15A2 也采用正弦 Sinusoidal 投影。

上述 MODIS 数据均下载自 <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>。

为了与 GIMMS NDVI 数据进行匹配,将 2000~2012 年 MODIS 地表反射率数据 MOD09A1、叶面积指数数据 MOD15A2,以及土地覆盖数据 MCD12Q1 转换为经纬度投影,分别合成到全球范围,并利用状态标志信息对水和冰雪像元进行标识。

2) 聚集度指数

叶片光合作用与入射辐射并非线性关系,由于叶片的集聚分布而产生阴叶和阳叶,这两种叶片吸收辐射不同,光合和呼吸的速率也不同。聚集度指数描述叶片的集聚分布特征,是将遥感反演的有效叶面积指数转换为真实叶面积指数的关键参数,并且有助于提高碳循环模拟精度。基于多角度遥感观测可以提取植被的聚集度指数。TERRA/MODIS 的扫描角为 $\pm 55^{\circ}$,通过多时相成像,可获得地表多角度观测,从而获得双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)信息。MODIS BRDF/Albedo 产品 MOD43 利用 RossThick-LiSparse BRDF 模型模拟地表二向反射分布特性,选取 16 天内经过大气校正的无云 7 个陆地波段的反射率进行最小二乘拟合,获得 BRDF 模型参数和窄宽波段的黑空反照率和白空反照率。其中,MCD43A1 提供了全球 500m、16 天分辨率的 1~7 波段及 3 个宽波段($0.3\sim 0.7\mu\text{m}$, $0.7\sim 5.0\mu\text{m}$, $0.3\sim 5.0\mu\text{m}$)的 BRDF 模型参数。He 等(2012)基于 MODIS BRDF 产品生成了全球 500m 分辨率的聚集度指数。首先,基于 MODIS MCD43A1 BRDF 模型参数产品,驱动 RossThick-LiSparse 模型,模拟区域内逐个像元的 BRDF,获取热点和暗点,并利用 PLODER 的主平面观测对模拟的热点和暗点进行校正;基于校正后的热点和暗点生成角度指数 NDHD,再基于五尺度(5-scale)模型模拟的 NDHD-集聚指数关系,生成聚集度指数分布图。数据覆盖全球陆地范围,空间分辨率为 500m。图 1-1 为全球聚集度指数分布图。

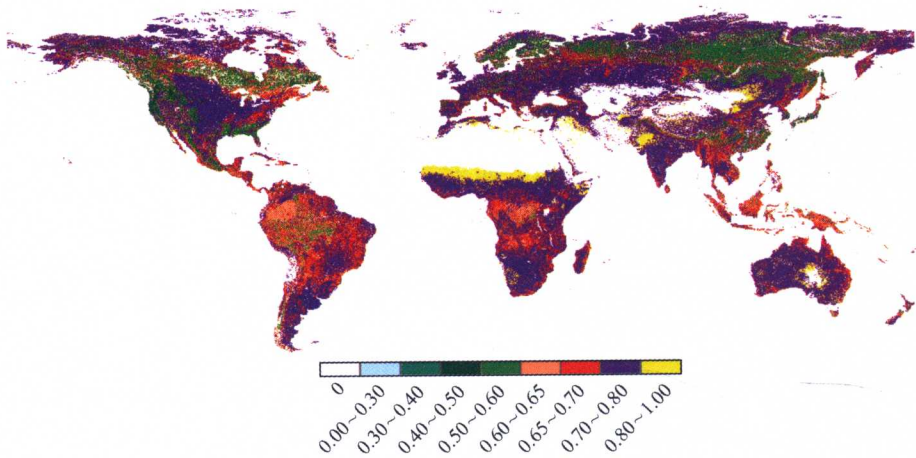


图 1-1 全球 500m 聚集度指数分布图(He et al. ,2012)

3) 森林背景反射率

大部分森林从其立体结构来讲大致可以分为森林冠层和森林背景两层,森林冠层是指乔木的树冠,森林背景指的是森林冠层下的所有物质,包括林下植被、叶片凋落物、苔藓、地衣、岩石、土壤、雪或它们的混合物(Pisek et al. , 2010)。在碳循环模拟中,由于森林生态系统的冠层和背景植被组成不同,其通过光合作用所固定的碳残留时间不同,因此其叶面积指数应分别计算。现阶段,大多数森林参数遥感反演将两者当成一层处理,不对林上冠层和森林背景进行区分。这种做法忽略了林上和林下背景的组成差异,反演结果存在很大偏差(Garrigues et al. ,2008)。实现森林冠层和林下植被的叶面积指数分离有助于提高碳循环模拟的精度。使用 TERRA/MISR(multi-angle imaging spectro radiometer)的地表方向反射数据和四尺度(4-scale)模型,反演得到了全球森林区域空间分辨率为 1.1km、2000~2010 年每天的森林背景反射率产品(Jiao et al. ,2014)。反演基于 4-scale 模型和查找表(LUT)反演技术,使用 MISR 多角度数据,得到了常绿针叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林等 4 种森林类型红光(672nm,22nm)和近红外波段(866nm,40nm)的背景反射率。为了去除 MISR 数据中的大量空缺值,对 2000~2010 年每个月里每天的反演结果进行了有效值平均,得到了全球每月的红波段和近红外波段全球森林区域背景反射率,空间分辨率为 1.1km。

1.2.2 叶面积指数反演算法

本算法通过建立像元级别 AVHRR SR-MODIS LAI 关系,用 MODIS 高质量观测约束 AVHRR 反演,生成长时间序列叶面积指数数据。算法步骤如下:①数据预处理;②利用 MODIS 地表反射率驱动 GLOBECARBON LAI 算法(Deng et al. ,2006),生成 2000~2012 年 MODIS LAI 数据;③分别统计每 8 天 MODIS LAI 和 AVHRR GIMMS SR(简单比植被指数)的均值,并建立逐个像元的 AVHRR SR-MODIS LAI 关系;④利用 GIMMS NDVI 数据基于 SR-LAI 关系反演,生成 1981~1999 年 AVHRR LAI 数据。并利用自适应三次样条曲线插值法(locally adjusted cubic-spline capping,LACC),去除云

的影响。为了保持时间序列的统一性和去除云的影响,将 AVHRR 和 MODIS 进行空间和时间重采样,通过时间和空间内有效值平均的方法,最终生成 1981~2012 年 8km、15(8)天分辨率的全球叶面积指数序列 GLOBMAP LAI。

1) 数据预处理

采用的数据具有不同时间、空间分辨率、投影方式,需要进行预处理使其具有一致的投影和空间分辨率,并进行高精度云标识和插值处理。将 2000~2012 年 MODIS 地表反射率 MOD09A1、土地覆盖数据 MCD12Q1、聚集度指数和森林背景反射率转换为经纬度投影,并分别合成到全球范围;利用 MOD09 状态标志信息对水和冰雪像元进行标识;采用基于时间序列拐点的云检测方法,实现了对 MOD09A1 地表反射率数据的高精度云检测(Liu R G and Liu Y,2013)。

2) 基于 MODIS 地表反射率反演 MODIS LAI

采用 GLOBCARBON LAI 算法(Deng et al.,2006),基于 MOD09A1 地表反射率和观测、太阳角度数据生成 2000~2012 年 MODIS LAI 时间序列数据(以下简称 MODIS LAI)。算法采用基于植被覆盖类型的简单比(simple ratio)植被指数 SR-LAI 和减小简单比(reduced simple ratio)植被指数 RSR-LAI 关系,利用 4-scale 模型和切比雪夫多项式,在模型模拟中单独考虑了 BRDF 效应。算法步骤如下:

(1) 基于 LAI 与 SR 或者 RSR 之间的模型关系(式(1-1)和式(1-2))反演得到有效叶面积指数 L_E :

$$L_E = f_{L_E-SR}(SR \cdot f_{BRDF}(\theta_v, \theta_s, \phi)) \quad (1-1)$$

$$L_E = f_{L_E-RSR} \left(SR \cdot f_{BRDF}(\theta_v, \theta_s, \phi) \cdot \left[1 - \frac{\rho_{SWIR} \cdot f_{SWIR_BRDF}(\theta_v, \theta_s, \phi) - \rho_{SWIR_min}}{\rho_{SWIR_max} - \rho_{SWIR_min}} \right] \right) \quad (1-2)$$

式中,SR 为简单比植被指数; ρ_{SWIR} 为 MODIS 5 波段(短波红外)反射率; ρ_{SWIR_max} 、 ρ_{SWIR_min} 分别为短波红外波段反射率的最大值、最小值,通过短波红外波段反射率观测数据去除 1%极值获得; f_{L_E-SR} 和 f_{L_E-RSR} 分别为有效叶面积指数 L_E 与 SR 和 RSR 在特定卫星和太阳角度(θ_v, θ_s, ϕ)下的模型关系;函数 f_{BRDF} 和 f_{SWIR_BRDF} 分别为采用 SR 和短波红外波段反射率的 BRDF 效应。

(2) 获得有效叶面积指数后,利用植被类型的经验聚集度指数加入植被的集聚效应,将其转换为真实叶面积指数 LAI(式 1-3)(Chen et al.,2005):

$$LAI = L_E / \Omega_b \quad (1-3)$$

式中, Ω_b 为特定植被类型 b 的经验聚集度指数。

反演中采用 MCD12Q1 土地覆盖分类数据,将 MCD12Q1 Type1 IGBP 全球植被分类系统中的 17 种类型归并为 6 种,包括农作物、草地及其他针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、混交林和灌丛,非植被覆盖区域未参与反演(Deng et al.,2006)(表 1-1)。植被类型的经验聚集度指数采用 Chen 等(2005)全球统计的结果:针叶林为 0.65,常绿阔叶林和落叶阔叶林为 0.67,混交林为 0.69,灌丛为 0.71,农作物、草地及其他为 0.74。

表 1-1 IGBP 土地覆盖类型及用于 LAI 反演归并后的类型(引自 Liu et al., 2007)

IGBP 分类代码	IGBP 类型	归并后类型
1	常绿针叶林	针叶林
2	常绿阔叶林	常绿阔叶林
3	落叶针叶林	针叶林
4	落叶阔叶林	落叶阔叶林
5	混交林	混交林
6	密闭灌丛	灌丛
7	开阔灌丛	灌丛
8	木质稀树草原	灌丛
9	稀树草原	农作物、草地及其他
10	草地	农作物、草地及其他
11	永久湿地	农作物、草地及其他
12	农作物	农作物、草地及其他
13	城市及建筑用地	农作物、草地及其他
14	农草混合	农作物、草地及其他
15	雪/冰	未反演
16	裸地或稀疏植被	农作物、草地及其他
17	水体	未反演

3) 像元级 AVHRR SR-MODIS LAI 关系建立

SR 与 LAI 之间呈现良好的线性关系(Chen et al., 2002),因此选用 SR 作为植被指数来建立 VI-LAI 之间的关系。利用 2000~2006 年 MODIS/AVHRR 重复覆盖、预处理后的 GIMMS NDVI 和反演生成的 MODIS LAI,采用如下步骤构建像元级别的 AVHRR SR-MODIS LAI 关系知识库:

(1) AVHRR SR 计算。利用 1981~2006 年 GIMMS NDVI 数据计算 SR:

$$SR = (1 + NDVI)/(1 - NDVI) \quad (1-4)$$

AVHRR SR 和 MODIS LAI 数据时空一致性处理。反演获得的 MODIS LAI 空间分辨率为 500m,时间分辨率为 8 天。为了与 AVHRR SR 进行时空匹配,需要对 2000~2006 年 MODIS LAI 的时/空分辨率进行转换。首先对 500m 分辨率的 MODIS LAI 重采样为 8km 分辨率,采样方法为取 8km 范围内的有效 LAI 的平均值。然后对相邻两个 8 天的 MODIS LAI 有效值做平均,只有一个有效值时取该有效值。这样,得到了 2000~2006 年 8km、16 天分辨率 MODIS LAI 数据集。

(2) 构建 MODIS LAI-AVHRR SR 数据对。对于每个像元,利用 2000~2006 年间 MODIS 和 AVHRR 重复覆盖的 AVHRR SR 和经过处理后的 8km、16 天分辨率的 MODIS LAI 数据,生成时空最优匹配的 MODIS LAI-AVHRR SR 数据对。首先,将 2000~2006 年的 AVHRR SR 文件与时间最邻近的 MODIS LAI 文件进行匹配,完成 AVHRR 和 MODIS 的时间匹配;然后,查找到时间匹配的 MODIS LAI 文件中空间最邻近的 LAI 数据,从而生成每个像元时空最佳匹配的 LAI-SR 数据对。

(3) 构建像元级的 AVHRR SR-MODIS LAI 关系知识库。根据 SR 的值,把 SR-LAI