

基于森林资源清查资料的森林碳储量计量方法

邓 蕾, 上官周平

(西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 基于森林资源清查资料的森林碳储量估算是在景观、区域甚至全球尺度上评估森林碳收支的重要手段,且在陆地生态系统碳循环和全球变化研究中有着重要作用。森林植被碳储量的估计,常通过测定森林植被的生物量乘以生物量中碳元素的含量(0.45~0.55)推算而得。基于森林清查资料的森林生物量的估算方法主要有 IPCC 法, BEF 为常数的生物量转换因子法, 生物量转换因子连续函数法和生物量经验(回归)模型估计法等。概述了基于森林资源清查资料的森林植被碳储量的 4 种定量研究方法,并提出了该领域研究存在的主要问题与发展建议。分析结果表明,在今后的森林碳储量研究中,需要加强遥感技术手段的利用,增加碳通量在森林资源清查中的调查,开发适合我国实际情况的反演模型。

关键词: 森林资源清查资料; 森林生物量; 碳储量; 估算方法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2011)06-0143-05

中图分类号: Q14

Methods for Forest Carbon Storage Estimation Based on Forest Inventory Data

DENG Lei, SHANGGUAN Zhou-ping

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The forest carbon storage estimation methods based on the forest inventory data (FID) are important in assessing forest carbon budget in terms of landscape, regional, and national scales, and play an important role in studying terrestrial ecosystem carbon cycle and global changes. The vegetation carbon storage in forest ecological system is usually calculated by multiplying forest biomass of the forest ecological system with its biomass carbon content, and in the world, the coefficient commonly is 0.45~0.55. There are basically four methods for forest biomass estimation based on FID: IPCC method, a constant BEF of biomass expansion factor method, biomass expansion factor continuous function method and biomass experience (regression) model method. The quantitative methods of forest carbon storage estimation based on FID of forest vegetation were reviewed. The problems related to the methods were pointed out, and improvement proposals were put forwards for future forest carbon storage estimation methods. In forest carbon storage estimation, remote sensing techniques need to be stressed, the carbon flux in the forest inventory need to be increasingly employed and the inversion models fitted to the actual situation in China need to be developed in the future.

Keywords: forest inventory data; forest biomass; carbon storage; estimation methods

森林生态系统中植被碳储量的估计,常通过测定森林植被的生物量再乘以碳含量推算而得。因此,森林群落的生物量及其组成树种的碳含量的确定就成为评估森林生态系统碳储量的关键。我国森林生物量最早的测定是冯宗炜^[1]和李文华等^[2]于 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始进行的,现已报道的相关研究资料比较丰富,但由于不同的研究者所选的研究地

点、森林类型、研究尺度以及生物量测定方法的不同,碳储量的估算方法和结果有很大差异^[3]。此外,含量的大小也是另外一个关键因素,国际上常用的树木碳含量为 0.45~0.55^[4-8]。森林资源清查资料是以幼小至成熟的全部林木总体为对象,包括森林面积大小及生长在该面积上的林木特征两方面的资料,具有分布范围广、测量的因子容易获得、时间连续性强等

收稿日期:2011-03-10

修回日期:2011-03-23

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项“中国科学院战略性先导科技专项子课题”(XDA05060300); 国家林业公益性行业科研专项(200904056)

作者简介:邓蕾(1986—),男(汉族),河南省西平县人,博士研究生,主要从事森林碳循环研究。E-mail:denglei011124@163.com。

通信作者:上官周平(1964—),男(汉族),陕西省扶风县人,研究员,博士生导师,主要从事陆地生态系统碳循环研究。E-mail:shangguan@ms.iswc.ac.cn。

优点^[9-10]。以中国为例,1949 年以来,已进行了连续 7 次全国范围的、系统的森林清查调查,清查中设计取样点 25 万个,其资料包括各类林分的龄级、面积和蓄积量以及在各省的分布情况等^[11]。鉴于森林资源清查资料的详细程度、权威性,因此如何更有效地利用森林资源清查资料评估国家和区域尺度的森林碳储量与碳收支正日益成为人们关注的重点^[10-18]。

本研究在总结和分析现有的基于森林资源清查资料生物量估算方法的基础上,针对森林资源清查资料的特点,探讨了基于森林资源清查资料的生物量估算方法,可为今后森林植被碳储量的研究提供理论支持,对于客观反映我国森林对全球碳循环及全球气候变化的贡献,加快森林碳循环研究的国际化进程,明确中国在《京都议定书》等国际公约中的国家责任具有积极的现实意义。

1 森林生物量的估算方法

森林生物量(forest biomass)是森林在一定时空范围内生物个体或群体的有机质量,通常用干物质来表示。森林生物量包括林木的生物量(根、茎、叶、花果、种子和凋落物等的总重量)和林下植被层的生物量^[2]。为充分利用森林资源清查资料,许多学者已就森林资源清查资料与生物量的关系进行了大量的研究,并提出了一些估算区域和全球尺度森林生物量的方法。目前比较流行的是在森林蓄积量的基础上引入生物量转换因子(biomass expansion factor, BEF)的生物量转换因子法〔主要可分为 4 类: IPCC 法、BEF 为常数的生物量转换因子法^[10,19-21],生物量转换因子连续函数法^[22-24]和生物量经验(回归)模型估计法^[25-27]〕。

1.1 IPCC 法

政府间气候变化委员会(IPCC)以森林蓄积、木材密度、生物量换算因子和根茎比等为参数,建立材积源生物量模型,指导各国开展生物量估算。IPCC 法也是生物量转换因子法的一种,该方法比较稳定,像一个标准,可以通过适当的变换,在较大的范围内使用。其基本公式为:

$$B=V \times D \times \text{BEF} \times (1+R) \quad (1)$$

式中: B ——某一森林类型的总生物量; V ——某一森林类型的总蓄积量; D ——某一森林类型的木材密度; BEF ——某一森林类型的生物量转换因子; R ——根茎比。由于 D 较为详细,而 BEF 较为简单,且变化幅度较大,因此产生的计算结果在其它条件不变的情况下相差较大,应重点关注。

在使用 IPCC 公式计算生物量时,李海奎和雷渊

才^[11]使用两种方式:一是取固定的生物量转换因子 BEF ,二是对生物量转换因子 BEF 进行适当的转换。具体做法为:按其上下限等分为 5 个区间,取区间中值分别作为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林的生物量转换因子,然后通过计算出来的地上部分单位面积生物量值确定使用的根茎比,求出各个龄组的生物量,合计成树种或森林类型的总生物量,最后汇总为总的生物量,由此产生的计算结果较准确。

1.2 BEF 为常数的生物量转换因子法

BEF 为常数的生物量转换因子法是利用林分生物量与木材材积比值的平均值(为常数)乘以该森林类型的总蓄积量得到该类型森林总生物量的方法^[19,24]。研究表明,树干的生物量与其它器官的生物量存在较强的相关关系^[28],因此,用树干材积推算森林总生物量是可行的。

早在 1975 年 Sharp 等首先利用常数的 BEF 估算了美国北卡罗来纳州的森林生物量。此后,该方法陆续应用的其它地区的生物量估算,例如,热带森林生物量^[19],欧洲森林生物量^[29]和美国森林生物量^[30]。但是,进一步研究表明 BEF 不是一个常数^[31-32]。对于某一特定的森林类型而言,生物量转换因子是立木的生物量和蓄积量的集中体现,与林木年龄、林分组成、其它生物学特性和立地条件等诸多因素密切相关^[33-36],而且 BEF 为常数估算的生物量偏大^[37]。李意德^[38]对海南岛热带山地雨林林分生物量的研究表明,生物量转换因子法估算的生物量较皆伐法高出 20.4%。所以,采用常数的生物量转换因子不能准确地估算森林生物量。

1.3 生物量转换因子连续函数法

生物量转换因子连续函数法是为克服生物量转换因子法将 BEF 作为常数的不足而提出的,该方法是将单一不变生物量平均转换因子改为分龄级的转换因子,以更加准确地估算区域或国家的森林生物量^[22,39]。Schroeder 等^[14],Brown 和 Schroeder^[15]建立了 BEF 和林分材积(V)的关系:

$$\text{BEF}=aV^{-b} \quad (2)$$

式中: a, b ——均为大于 0 的常数。这种关系对于以实测资料建立的 BEF 值与材积之间的关系推广到处理大尺度的森林资源清查资料时,存在严重的数学推理问题,难以实现由样地调查到区域推算尺度的转换。

方精云等^[36]基于收集到的全国各地生物量和蓄积量的 758 组研究数据,并把中国森林类型分成 21 类,分别计算了每种森林类型的 BEF 与林分材积的经验关系:

$$BEF = a + b/V \quad (3)$$

式中: a, b ——常数。公式(4)可表示成生物量和蓄积量的简单线性关系:

$$B = aV + b \quad (4)$$

式中: a, b ——均为常数; B ——生物量。

方精云等^[36]利用倒数公式(4)所表示的 BEF 与林分材积的关系,简单地实现由样地调查向区域推算的尺度转换,并据此推算了区域尺度的森林生物量^[5]。但是,对某一树种而言,方精云等^[36]的线性关系存在样本数不足的缺陷。例如,在建立桦木、栎类、按树等树种的生物量和蓄积量的线性关系时,所用的样本数分别是 4, 3 和 4;而对于热带森林所有树种采用的样本数也仅 8 个。李海奎和雷渊才^[11]分析表明,方精云的连续函数法可以反映生物量随林龄的变化,但单位面积蓄积对生物量的影响较大,特别是对较小的使用范围(比如省级)可能并不适宜,例如,通过对江西省杉木中龄林(面积 $9.859 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 蓄积 $5.521 \times 10^7 \text{ m}^3$)进行计算表明,连续函数法测算的生物量偏大。另外,方精云等^[36]的关于生物量和蓄积的估算是一种简单的线性关系还存在着争议^[17,40]。

1.4 生物量经验(回归)模型估计法

生物量经验(回归)模型估计是利用某一树种野外生物量的实测数据,建立生物量与树高、胸径等统计回归关系模型^[11,25-27]。可以分树干量、树枝、树叶和树根部分建立相容性生物量模型,进行分量估计,也可以建立与材积相容的单木生物量回归模型^[11]。其基本公式为:

$$B_{\text{总}} = \sum V_{\text{总}} \cdot BEF \\ = \sum V_{\text{总}} \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m V_{\text{样}} \cdot \frac{B_{\text{模}}}{V_{\text{模}}} \right) / \sum_{i=1}^n V_{\text{样}} \right] \quad (5)$$

式中: $B_{\text{模}}$ ——样地模型生物量($\sum_{j=1}^m$ 样地内径阶模型生物量); $V_{\text{模}}$ ——样地模型材积($\sum_{j=1}^m$ 样地内径阶模型材积); m ——某一样地内的径阶数; n ——计算生物量的优势树种样地个数; $B_{\text{总}}$ ——某一森林类型的总生物量; $V_{\text{总}}$ ——某一森林类型的总蓄积量; $V_{\text{样}}$ ——样地内某一森林类型的蓄积,即样地调查材积。

生物量转换因子为:

$$BEF = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m V_{\text{样}} \cdot \frac{B_{\text{模}}}{V_{\text{模}}} \right) / \sum_{i=1}^n V_{\text{样}} \quad (6)$$

生物量回归模型估计法也属于生物量转换因子法的一种,是利用林分生物量与木材材积比值的平均值,乘以该森林类型的总蓄积量,得到该类型森林的总生物量的方法。不同在于生物量回归模型在估计样地模型材积和模型生物量时,需要用到各径阶林木

树高值,它的精度高低对生物量的计算结果有很大的影响。回归模型估计法充分利用了森林资源清查中林木的胸径、树高等易于获取的因子,以样地模型生物量与模型材积之比,在统计区域内进行加权平均,求出某一树种(或森林类型)的生物量转换因子,然后乘以树种的总蓄积,获得总生物量,具体计算步骤详见李海奎和雷渊才^[11]。回归模型估计法中的胸径的大小反映了林龄,树高体现了立地质量。但建立模型的原始资料的范围,往往对测算方法有影响,也就是存在模型的适用性问题^[11]。回归模型法的模型是从样地实测数据入手,通过了模型的筛选和验证,最终求得与材积相兼容的模型,也可用最新的样地样木实测数据进行检验、修正参数,可以方便地进行精度分析与区间估计。因此,该方法具有无偏、稳定、相容性等特点,能够较准确地估算生物量。

2 存在问题

(1) 森林资源清查资料的局限性。森林碳储量估算的主要误差源有森林清查时的误差、生物量测定误差以及利用 BEF 值估算区域碳库所带来的误差等。一般来说,清查时的误差较小,在中国应小于 5%^[4];生物量的野外测定可能带来一定的误差,目前尚无法进行评估;利用 BEF 值估算省区生物量时可能产生较大误差,但全国的总误差小于 3%^[41]。总的来说,不同来源的误差较为复杂,难以给出准确的估计,而且与研究的尺度关系密切。如在美国的一些州,森林蓄积量的误差仅为 1%~2%,但到了县级水平,却增加了 8 倍以上^[15];在中国,全国总蓄积量的估算误差小于 3%^[5]。

(2) 凋落物、死亡立木和倒木的生物量尚未考虑。周期性的森林资源清查是针对某一直径的活立木的生物量进行的估算,如测量树木的直径选取,美国选直径大于 10 cm,中国选取直径大于 4 cm 的林木^[15,24],尚未考虑凋落物、死亡立木和倒木。尽管关于死亡立木和倒木已有一些研究,但区域乃至全球尺度森林死亡立木和倒木的研究还未见报道,采伐基地上残留物的生物量(树桩等)研究亦较少^[42]。

(3) 基于森林资源清查资料的生物量估算中没有考虑遥感技术手段的利用。遥感技术可用于进行土地覆盖、植被变化、全球碳循环等的研究^[43-45],已成功探测针叶林和落叶阔叶林的冠层高度、面积和基部面积^[46-47],在更小的尺度上(县级),通过航天飞机上的激光脉冲设备结合 GPS 能准确测量每棵树的树冠面积和树高,提高了对地上生物量的测量精度。因此,如何利用实时遥感检测资料,结合森林资源清

查资料来实现对森林生物量的动态检测,在以上方法中尚未得到反映。

(4) 基于森林资源清查资料的生物量估算中对影响森林生物量的主导因素的考虑有待完善。森林生物量与许多生物学因素(蓄积量、林龄等)和非生物学因素密切相关,现有的 4 种方法在估算森林生物量时对于森林类型的林龄、气温和降水等许多生物和非生物学因素的协同作用重视不够,不能动态估算某一地点森林碳储量动态及其对气候变化的响应。

3 前景展望

(1) 增加森林凋落物、死亡立木和倒木碳储量的研究。普遍认为,直径小于 10 cm 的林木对森林生物量贡献很小,因而忽略对这部分生物量的测量,其实对森林生物量贡献的大小依赖于森林的演替阶段。在幼龄的阔叶林中,直径小于 10 cm 的林木占整个森林生物量的 70%^[14],森林凋落物和被动物啃食的生物量占森林生物量的 2%~7%^[14];在成熟林中,死亡立木和倒木占整个森林生物量的 10~20%^[48];在美国东部原始森林中,死亡立木和倒木以速率 c ($1 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$) 累计^[15]。

(2) 进行非森林树木的碳储量估算。森林清查中,应包含灌木林、经济林、竹林、农田防护林以及四旁绿化树种等蓄积量(生物量)的统计资料。近些年,我国这部分林木碳库是增加的,如果增加这部分的碳储量数据,我国森林的碳储量会比现有的基于森林资源清查资料的估算值大。

(3) 加强遥感技术手段的利用。充分利用遥感(RS)信息,结合地理信息系统(GIS)技术,建立基于森林资源清查资料的遥感驱动生物量模型。遥感数据(如 NDVI)为研究大尺度的植被动态及其空间分布提供了有效信息,可以利用遥感数据与森林生物量或生产力之间的关系,建立适当的模型用于森林地上与地下生物量的估算。

(4) 增加碳通量在森林资源清查中的调查,开发适合我国实际情况的反演模型(inverse model)。国外已有不少成功的模型,如 CASA 模型、Miami 模型、Chikugo 模型、CENYURY 模型等^[46,49],可以借鉴这些模型,对其改良,并进行参数调整,使其适合于我国的实际情况。此类模型不仅可以模拟现实的碳库大小和分布,也可以用于未来碳库的预测。

[参 考 文 献]

[1] 冯宗炜,张家武,邓仕坚. 杉木人工林生物产量的研究[M]. 郑州:河南科学技术出版社,1980.

- [2] 李文华,邓坤枚,李飞. 长白山主要生态系统生物量研究[J]. 森林生态系统研究,1981(2):34-50.
- [3] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态[J]. 生态学报,2008,28(3):965-974.
- [4] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292:2320-2322.
- [5] 方精云,陈安平,赵淑清,等. 中国森林生物量的估算:对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320-2322)的若干说明[J]. 植物生态学报,2002,26(2):243-249.
- [6] 赵敏,周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势[J]. 应用生态学报,2004,15(8):1468-1472.
- [7] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sink in China, 1981—2000[J]. Science in China D: Earth Science, 2007, 50(7):1341-1250.
- [8] 王秀玉,孙玉军. 森林生态系统碳储量估测方法及其研究进展[J]. 世界林业研究,2008,21(5):24-29.
- [9] Allen R B, Clinton P W, Davis M R. Cation storage and availability along a nothofagus forest development sequence in New Zealand [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1997, 27:323-330.
- [10] Turner D P, Koepper G J, Harmon M E, et al. A carbon budget for forests of the conterminous United States[J]. Ecological Applications, 1995,5:421-436.
- [11] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京:中国林业出版社,2010.
- [12] 方精云. 中国陆地生态系统的碳库[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996:109-128.
- [13] Brown S L, Schroeder P, Birdsey R. Aboveground biomass distribution of US eastern hardwood forests and the use of large trees as an indirect of forest development [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 96:37-47.
- [14] Schroeder P, Brown S L, Mo J, et al. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the US using inventory data[J]. Forest Science, 1997, 43:424-434.
- [15] Brown S L, Schroeder P, Kern J F. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 123:81-90.
- [16] 刘国华. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报,2000,20(5):733-740.
- [17] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of Chian's *Larix* forests[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169:149-157.
- [18] Luo T X, Li W H, Zhu H Z. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau[J]. Ecological Applications, 2002, 12:980-997.

- [19] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes[J]. *Science*, 1984, 223:1290-1293.
- [20] Alexeyev V, Birdsey R, Stakanov V, et al. Carbon in vegetation of Russian forests: Methods to estimate storage and geographical distribution [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 82:271-282.
- [21] Kauppi P E, Mielikinen K, Kunsela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990[J]. *Science*, 1992, 256:70-74.
- [22] Brown S, Gillespie R, Lugo A E. Biomass estimation methods for tropical forests with application to forest inventory data[J]. *Forest Science*, 1989, 36:881-902.
- [23] Birdsey R A, Plantinga A J, Heath L S. Past and prospective carbon storage in United States forests[J]. *Ecology and Management*, 1993, 59:33-40.
- [24] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Forest biomass of China: An estimation based on the biomass volume relationship[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8:1084-1091.
- [25] 胥辉, 刘伟平. 相容性生物量模型研究[J]. *福建林学院学报*, 2001, 21(1):18-23.
- [26] 王仲锋, 冯仲科. 样地林木生物量精度评定的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(S):173-176.
- [27] 刑艳秋, 王立海. 基于森林调查数据的长白山天然林森林生物量相容性模型[J]. *应用生态学报*, 2007, 1(18):1-8.
- [28] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of Biosphere[J]. *Ecological Studies and Synthesis*, 1975, 14: 339.
- [29] Kauppi P E, Mielikainen K, Kusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990[J]. *Science*, 1992, 256: 70-74.
- [30] Birdsey R A, Heath L S. Forest inventory data, models, and assumptions for monitoring carbon flux[C]// *Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect*. Soil Science Society of America, 2001:125-135.
- [31] Nilsson S, Shvidenko A, Stolbovoi V, et al. Full carbon account for Russia[R]. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2000.
- [32] Guo Z D, Fang J Y, Pan Y D, et al. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259:1225-1231.
- [33] Johnson W C, Sharpe D M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1983, 13:372-383.
- [34] Isaev A, Korovin G, Zamolod D, et al. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995,82:247-256.
- [35] Jenkins J C, Birdsey R A, Pan Y D. Biomass and NPP estimation for the Mid-Atlantic region (USA) using plot-level inventory data[J]. *Ecological Applications*, 2001,11:1174-1193.
- [36] 方精云, 刘国华, 徐高岭. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(5):497-508.
- [37] Goodale C L, Apps M J, Birdsey R A, et al. Forest carbon sinks in the northern hemisphere[J]. *Ecology*, 2002, 12:891-899.
- [38] 李意德. 海南岛热带山地雨林的森林生物量估测方法的比较分析[J]. *生态学报*, 1993, 13(4):314-320.
- [39] Brown S, Lugo A E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of Brazilian Amazon[J]. *Interciencia*, 1992,17:8-18.
- [40] 王玉辉, 周广胜, 蒋延龄, 等. 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(4):420-425.
- [41] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. *植物学报*, 2001, 43:967-973.
- [42] Brown S. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges [J]. *Environment Pollution*, 2002, 116:363-372.
- [43] Lefsky A S, Harding D, Cohen W B, et al. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA [J]. *Remote Sensing Environment*, 1999, 67:83-98.
- [44] Means J E, Acker S A, Harding D J, et al. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon[J]. *Remote Sensing Environment*, 1999, 67: 298-308.
- [45] Chen J, Chen W J, Liu J, et al. Annual carbon balance of Canadian forests during 1995—1996[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000,14(3):839-850.
- [46] Gurney K R, Law R M, Denning A S, et al. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models[J]. *Nature*, 2002, 415:626-630.
- [47] Nemani R, Running S. Land cover characterization using multi temporal Red, Near-IR, and Thermal-IR data from NOAA/AVHRR [J]. *Ecological Applications*, 1997,7(1):79-90.
- [48] Delaney M, Brown S, Lugo A E, et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of venezuela[J]. *Biotropica*, 1998,30(1):2-11.
- [49] Bousquet P, Peylin P, Ciais P, et al. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980 [J]. *Science*, 2000, 290(5495):1342-1346.