

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.11.025

# 植被碳汇计算方法在路域生态系统的应用前景

王艳<sup>1</sup>, 王新军<sup>2</sup>, 王侗<sup>2</sup>

(1. 交通运输部节能减排项目管理中心, 北京 100029; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029)

**摘要:**通过对模型模拟法、现场实测法、遥感估算法、通量观测法四种主要的陆地生态系统植被碳汇计算方法的归纳、总结, 对比分析了四种方法的优缺点。在分析路域生态系统特点的基础上, 探讨了四种植被碳汇计算方法在路域生态系统中应用的可行性。结果表明: 四种植被碳汇计算方法在路域生态系统的应用具备一定的可行性, 但是需要根据环境特点、公路特征和研究目的进行合理选择、调整和组合。然而, 目前尚缺乏应用案例, 实证研究亟待加强。因此, 针对研究现状, 对交通行业今后的植被碳汇研究工作提出了建议, 以期为我国公路路域植被碳汇计算及相关研究提供有益的借鉴。

**关键词:** 环境工程; 路域生态系统; 碳汇; 节能减排; 交通运输

中图分类号: X828

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)11-0153-06

## Application Prospect of Calculation Method of Vegetation Carbon Sequestration in Road Ecosystem

WANG Yan<sup>1</sup>, WANG Xin-jun<sup>2</sup>, WANG Ti<sup>2</sup>

(1. Administration Center for Energy Saving and Emission Reduction Project, MOT, Beijing 100029, China;  
2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The main methods for calculating vegetation carbon sequestration in terrestrial ecosystem, including model simulation, field measurement, remote sensing estimation and flux observation, are outlined, and their advantages and disadvantages are analyzed. Based on the analysis of the characteristics of road ecosystem, the feasibility of the 4 calculation methods of vegetation carbon sequestration is discussed. The result demonstrates that application of these methods in road ecosystem is feasible, however, these methods need to be chosen, adjusted and combined properly according to environment, road characteristics and research objective. Furthermore, there is lack of application case, and case study need to be strengthened. Therefore, in view of the present situation, some suggestions of vegetation carbon sequestration research for transportation industry are put forward, so as to give some references for calculating vegetation carbon sequestration in road ecosystem and related research.

**Key words:** environmental engineering; roadside ecosystem; carbon sequestration; energy saving and emission reduction; transportation

## 0 引言

近年来, 中国交通运输能源消费快速增长, 占全社会能源消费量的比重显著上升。从全球范围来

看, 交通运输业在世界能源消费和温室气体排放中所占比重均超过 20%, 且仍呈较快上升态势, 节能减排责任重大<sup>[1]</sup>。交通运输作为国家能源消费和温室气体排放的重点行业之一, 是国家推进节能减排

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 中央公益性科研院所基本科研业务费项目(20130604)

作者简介: 王艳(1976-), 女, 河南新乡人, 硕士。(wangyan1994@hotmail.com)

工作的重要领域,节能减排任务艰巨。

发展低碳交通的途径是多种多样的,既包含技术性减碳,也包括结构性减碳和制度性减碳。然而,在推进生态文明建设的新形势下,交通行业应该两条腿走路,一是交通减排,二是植被碳汇。相关研究表明,美国国家高速公路路域植被每年约固定360万吨碳,相当于260万辆汽车一年的CO<sub>2</sub>排放量<sup>[2]</sup>。路域植被已成为重要的碳汇,能够在一定程度上抵消交通运输中碳的排放,为节能减排做出重要贡献。

随着我国高速公路建设的快速发展,生态公路建设逐步受到重视,路域人工生态系统面积也在不断扩大。2009年中国公路水路交通环境保护状况报告指出,公路环保总投资的69%用于公路绿化及生态恢复工程<sup>[3]</sup>。但是,我国公路绿化植被的碳汇能力尚不明确,无法从节能减排角度定量核算绿化工程的效益,指导绿化工程建设与养护实践。虽然国内外在自然生态系统的植被碳汇计算方面开展了很多研究,取得了丰硕的成果,然而路域植被有其自身的特点,碳储量估算不能照搬林业或农业的研究方法和成果,路域植被碳汇的相关计算方法尚待研究。

为此,本文通过对已有的植被碳汇估算方法总结、归纳,结合路域生态系统特点的分析,探讨了已有方法在路域生态系统应用的可行性,以期提出适于我国公路的绿化植被固碳量计算方法,量化植被固碳能力,评价路域生态系统碳汇效益提供有益的借鉴。

## 1 陆地生态系统植被碳汇计算方法

陆地生态系统是一个土壤-植被-大气互相作用的复杂系统,植物叶绿素在阳光作用下吸收CO<sub>2</sub>和HO<sub>2</sub>,生成CH<sub>2</sub>O和O<sub>2</sub>,形成初级生产力(GPP);同时,植物自身吸收消耗部分有机物并释放二氧化碳,剩余的有机物叫做生态系统净初级生产力(NPP)。NPP的积累形成陆地植被生物量碳库。在不考虑其他自然和人为条件影响的前提下,植被碳汇可以表示为植被净初级生产力与土壤微生物呼吸碳排放(包括凋落物的分解)之间的差值,即植被净生态系统生产力(NEP)。尽管在区域尺度上NEP不等于碳汇,但其常常作为碳汇大小的量度<sup>[4]</sup>。因而目前的很多植被碳汇计算方法也是围绕着植被生物量估算而展开。近几年,针对中国森林、草原、农田等生态系统的碳汇计算也逐渐趋于成熟。本文对陆地生态系统常见的植被碳汇计算方法进行了简要的归纳总结(见表1)。

### 1.1 模型模拟法

模型模拟法主要是指通过数学模型估算陆地生态系统的生产力和碳储量,是在区域和全球尺度上研究生态系统碳循环的重要手段。目前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。关于模型模拟法,中国学者借鉴国外经验改进了CEVSA<sup>[5-6]</sup>,CASA<sup>[7-9]</sup>,GLO-PEM<sup>[10-12]</sup>,BEPS<sup>[13-14]</sup>等多个陆地生态系统碳循环模型,同时根据中国的情况研发了AVIM2<sup>[15-16]</sup>,Agro-C<sup>[17]</sup>,FORCCHN<sup>[18]</sup>,DCTEM<sup>[19]</sup>等陆地生态系统模型,研究了陆地生态系统的净初级生产力和碳储量、气候变化和土地利用变化对中国陆地生态系统碳循环的影响等问题。

这些模型现在已经被广泛地应用于草地、农田、森林等生态系统生物量和生产力的模拟,并且对不同的生态系统类型分别建立了不同的参数和计算系统。模型一般以天或月为运行的时间步长,模型参数涉及气温、降雨量、光照等气候因子,植物本身的生物学特性、土壤特性等指标来计算生态系统的生物量和生产力。

### 1.2 现场实测法

现场调查法一般是指设立典型的样地,通过收获植被生物量、枯落物和土壤等碳库的碳储量,在连续测定的基础上可以分析生态系统各部分碳库之间的流通量,输入系统的NPP和离开系统的枯落物与土壤的碳排放速率。然而对于大面积的森林植被采用收获法测定碳汇量比较困难,一般伐倒少许树木,确定生物量与胸径或树高的回归关系,然后利用回归关系和所有树木的实测胸径或树高推算样地的生物量,而区域性的森林资源清查数据主要是木材材积量,还需要借助生物量换算因子(BEF)等方法才能将其转换为森林植被生物量<sup>[20]</sup>,再根据生物量与碳量的转换系数求林地的固碳量<sup>[21]</sup>。对于园林植被,一般根据不同植物个体的叶面与胸径、冠高或冠幅的相关关系,通过实测建立不同植株个体绿量的回归模型,应用回归模型计算绿地或地区绿量的总和<sup>[22-23]</sup>,从而在实测单株植物固定CO<sub>2</sub>碳量基础上,根据绿量即可计算出植被的固碳量。

### 1.3 遥感估算法

遥感估算法是指通过遥感手段从遥感数据中获取归一化植被指数(NDVI),在GIS技术的支持下,建立NDVI与叶面积指数及植被覆盖度等的关系,结合地面调查,推断出植被指数与生物量之间的关系进而求得生物量,然后计算碳汇储量<sup>[24]</sup>。随着遥感

技术的发展, 遥感估测植被碳汇成为较为便捷的方法, 适用于大尺度范围内的植被碳库的变化研究。近年来的研究逐渐将遥感与模型相结合, 通过遥感反演获取地面物理参数, 如地面反照率、叶面积指数、土壤湿度等, 可直接作为陆地生态系统碳循环模型的驱动变量或参量, 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<sup>[25]</sup>。

#### 1.4 通量观测法

通量观测法是指建立在气象学基础上, 通过测量近地面层的湍流状况和被测气体的浓度变化来计算被测气体的通量的方法, 是最为直接的可连续测

定 CO<sub>2</sub> 和水热通量的方法, 也是目前测算碳汇最为准确的方法。目前, 基于涡度相关技术的通量观测已经成为研究陆地生态系统碳循环与全球变化科学的重要手段, 其特点在于采用较为精密的仪器包括三维声速风速仪、闭路红外线 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪等, 直接对植被与大气之间的通量进行计算, 直接长期对陆地生态系统进行 CO<sub>2</sub> 通量测定, 同时又能为其他模型的建立和校准提供基础数据。这一方法在区域和国家通量观测研究网络 (AmeriFLUX, CarboEurope, OzFlux, Fluxnet - Canada, AsiaFlux, KoFlux 等) 中得到广泛使用<sup>[26]</sup>。

表 1 陆域生态系统植被碳汇计算方法比较

Tab. 1 Comparison of methods for calculating vegetation carbon sequestration in terrestrial ecosystem

方法名称	计算方法	优点	缺点
模型模拟法	通过数学模型估算草地、农田、森林等生态系统生物量、生产力和碳储量。	可用于通量数据的空间与时间插补、从点到面演绎全球尺度的森林碳平衡研究。	模型参数和输入数据的不确定性影响模型模拟的精度。
现场实测法	设立典型的样地, 通过收获植被生物量估算生态系统生物量, 再根据生物量与碳量的转换系数求林地的固碳量。	直接, 明确, 技术简单。适用于植被资源调查数据为基础的碳汇计算或小范围的植被碳汇计算。	现场工作量大, 耗时耗力。
遥感估算法	通过遥感解译获取植被指数 (NDVI), 结合地面调查, 推断植被指数与生物量之间的关系进而求得生物量, 然后计算碳汇储量。	节约现场调查的人力和时间成本, 适用于大尺度范围内的植被碳库研究。	结果受遥感影像精度影响较大, 存在不确定性。
通量观测法	通过测量近地面层的湍流状况和被测气体的浓度变化来计算被测气体的通量的方法。	最为直接的可连续测定 CO <sub>2</sub> 和水热通量的方法, 准确。	仪器设备价格较高, 配套设施建设要求高, 需要专业技术人员操作和定期维护。

## 2 植被碳汇计算方法应用可行性分析

### 2.1 路域生态系统的特征分析

公路具有其独特的大尺度线性特征, 绝大部分的公路都横跨多个生态系统, 所以一条公路的路域生态系统通常包括多个生态系统的综合特性, 是多种生态系统的复合体。公路工程的建设造成公路周边的土壤条件、光照状况、水分等环境因子发生改变, 形成路域小环境。同时持续的人为干扰, 引发路域植物群落内部对养分水分空间的竞争以及和外来人工绿化种的竞争, 导致路域植被群落稳定性差, 易退化。与稳定的自然生态系统相比, 路域生态系统内部分化出许多由一种或若干种植物所构成的小群落, 物种组成和群落结构具有自身特点。

正是由于公路线性以及路域生态系统的复杂性, 植被碳汇的估算较为复杂, 现有的计算方法在交通行业的应用也受到很多的限制。因此, 在方法的选

择上, 也应当根据不同的目的、不同的研究范围进行适当的选择与调整。

### 2.2 模型模拟法

众多的模型一般应用于区域或全球尺度的自然生态系统植被碳汇估算。模型参数获取需要长期的定位观测等方式获得, 而对于具有小环境特点且呈带状分布的路域生态系统而言, 模型参数的获取受到了很多限制, 如若参考自然生态系统的参数值, 可能会带来更大误差。此外, 模型的构建是基于对现实过程的简化, 在此过程中众多的假设和主观判断给模型带来了很多隐藏的误差。而且, 模型参数和输入数据的不确定性同样影响着模型模拟结果的精度<sup>[27]</sup>。因此, 就目前交通行业的现状来看, 模型模拟法不宜作为路域植被碳汇估算方法。但是, 在交通行业逐步建立起完善的交通环境监测网络基础上, 可获取路域生态系统小气候的参数时, 再对部分模型参数进行校正, 对模型进行改良, 将模型模

拟法用于验证与校核其他计算方法,提高碳汇计算精度。

### 2.3 现场实测法

目前,通过现场实测法对陆地生态系统植被固碳量的计算相对成熟,很多学者认为,以实测的方法来计算植被碳汇是误差最小的测算方法<sup>[20]</sup>。但是该方法耗时耗力,如若采用该方法对现有路网路域生态系统中的植被进行碳汇估算,由于公路里程的原因工作量将异常巨大,在短时间内很难完成。对此,在路域生态系统植被碳汇的估算中,可选择典型的路段或区域采用该方法进行计算,并与遥感估算等方法相对比和结合,进行数据的校正,提高计算精度。

### 2.4 遥感估算法

利用遥感估算植被 *NPP* 就是基于地面上不同植被类型对不同波长太阳光的反射率来区分地表的植被覆盖。公路是线性工程,长数十至数百公里,同时植被类型多样,因而遥感技术的应用大大节约了路域植被现场调查的人力和时间成本。但同时路域范围宽约为几十米,在利用遥感技术时,对遥感图像的分辨率要求较高,而高分辨率遥感影像价格也非常可观<sup>[28]</sup>,这样就增加了遥感影像的购买成本。因而在实际应用过程中,也需要考虑与现场实测法的结合,在满足计算要求的前提下,节约成本。

### 2.5 通量观测法

通量观测法是基于微气象学原理实现对监测样地的连续、长期观测,可应用于不同的生态系统碳通量的监测中,形成监测体系。但该法仪器设备价格较高,配套设施建设要求高,同时测量难度大,需要专业技术人员操作和定期维护。这些都限制了该方法在路域生态系统中的应用。因此,在现有条件下即使在路域小范围内开展监测也具有一定的难度。然而,为保证路域生态系统植被碳汇估测的准确性,在今后的科学研究中可以借鉴现有通量观测研究网络的建设经验,逐步选择典型的路域环境建立观测站点进行长期观测实验,积累相关基础数据,实现路域生态系统长期碳通量观测。

## 3 讨论与建议

综上所述,结合交通行业现状及路域生态系统的特点,对现有的几种陆地生态系统植被碳汇计算方法进行可行性分析后,结果表明:上述方法应用于路域碳汇植被碳汇估算具备一定的可行性,但是需要根据环境特点、路网特点和研究目的进行合理

选择、调整和方法组合。针对微观尺度,比如一条公路路域或某一特征段落植被碳汇的计算,可采用现场实测法,通过植被生物量和植被  $\text{CO}_2$  固定量的实测值计算出植被碳汇;针对宏观尺度路域植被碳汇的计算,可采取遥感解译估算和现场实测结合的方法计算植被碳汇。然而目前尚缺乏相关应用案例,实证研究亟待加强。

此外,当前针对园林植被固碳能力已取得了许多基础数据,但是由于公路环境因子的改变,同种绿化植物应用到公路路域上其固碳规律可能会发生变化,同时很多公路特有绿化种类的固碳规律也还处于研究空白。因此,公路路域不同绿化植物的固碳规律研究也亟待加强,进而可为大范围植被碳汇的计算提供基础数据,同时也为今后如何选择固碳能力强的植物提供依据。

总体而言,面对日益严峻的全球气候能源危机,低碳交通的理念与紧迫性日益为人们所认识,低碳交通运输体系建设已全面启动,我国低碳交通政策研究与建设均取得了积极进展。但是,发展绿色低碳交通在强调减排的同时,也不能忽视植被固碳的巨大潜能。然而,目前交通领域植被碳汇的问题一直没有引起足够的重视,相关研究与实践工作也没有开展。基于此,本文提出以下建议:

#### (1) 开展碳汇研究工作,摸清交通碳汇家底

路域生态系统中,由于绿色植物光合作用及其生长过程中对土壤碳库的输入,已成为重要的碳汇,能够在一定程度上抵消交通碳排放。但是目前我国交通行业碳汇量如何?减排贡献率如何?是否有潜力可挖?这些都是亟待回答的科学问题。因而,亟待建立适于路域生态系统的植被碳汇计算方法,开展案例研究,进而普查全国的交通碳汇家底。

#### (2) 加强基础研究工作,提高碳汇估算精确度

虽然植被碳汇研究工作在很多领域已经开展,并取得丰硕成果,但是交通领域的研究基础非常薄弱。为保证碳汇估测的准确性,在今后的科学研究中应结合全国交通环境监测网络的建设,按不同气候区域选择典型的路域环境建立观测站点进行碳通量的观测试验,为今后可能开展的碳交易提供相关基础数据。

#### (3) 加强技术开发与应用,推进试点示范建设。

加强固碳技术、植被碳汇能力提升技术的研究与应用,做好技术储备工作,以典型区域为主体开展碳汇建设试点工作。从试点工程中遴选示范工程,总结示范技术和方法,加大对成果的应用和推广

力度。

#### (4) 开展碳汇交易相关研究, 做好技术储备

密切关注和跟踪植被碳汇技术发展的国际动向, 加强行业在碳税、碳排放交易等方面的研究工作, 学习借鉴国外交通领域碳汇提升方面的先进经验, 促进国际交流与合作。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] U. S. Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Emissions and Sinks; 1990 – 2006, EPA 430 – R – 08 – 005 [R]. Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 2008.
- [2] Federal Highway Administration . Carbon Sequestration Pilot Program: Estimated Land Available for Carbon Sequestration in the National Highway System [R]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 2010.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 中国公路水路交通环境保护状况报告(2007 年度) [R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2009.
- P. R. C. Ministry of Transport. Report on the Environment Protection Status of Chinese Highway and Waterway Transport (2007) [R]. Beijing: Ministry of Transport of P. R. C., 2009.
- [4] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强 [J]. 中国科学 C 辑, 2003, 33 (6): 554 – 567.
- FANG Jing-yun, PIAO Shi-long, HE Jin-sheng, et al. China Vegetation Activity Increased in Recent 20 Years [J]. Science in China Series C, 2003, 33 (6): 554 – 567.
- [5] CAO M K, PRINCE S D, LI K R, et al. Response of Terrestrial Carbon Uptake to Climate Interannual Variability in China [J]. Global Change Biology, 2003, 9 (4): 536 – 546.
- [6] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟 [J]. 地理学报, 2003, 58 (3): 372 – 380.
- TAO Bo, LI Ke-rang, ZHAO Xue-mei, et al. Temporal and Spatial Pattern of Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58 (3): 372 – 380.
- [7] PIAO S L, FANG J Y, ZHOU L M, et al. Changes in Vegetation Net Primary Productivity from 1982 to 1999 in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19 (2). [2014 – 02 – 05]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004GB002274/pdf>.
- [8] 李刚, 辛晓平, 王道龙, 等. 改进 CASA 模型在内蒙古草地生产力估算中的应用 [J]. 生态学报, 2007, 26 (12): 2100 – 2106.
- LI Gang, XIN Xiao-ping, WANG Dao-long, et al. Application of Improved CASA Model in Productivity Evaluation of Grassland in Inner Mongolia [J] Chinese Journal of Ecology, 2007, 26 (12): 2100 – 2106.
- [9] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟 [J]. 植物生态学报, 2008, 32 (4): 786 – 797.
- ZHANG Feng, ZHOU Guang-sheng, WANG Yu-hui. Dynamics Simulation of Net Primary Productivity by a Satellite Data – driven Casa Model in Inner Mongolian Typical Steppe, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32 (4): 786 – 797.
- [10] YAN H M, LIU J Y, CAO M K, et al. Remotely-sensed Changes in Agricultural Productivity in China from the 1980s to the 1990s [J]. Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability, 2004, 5544: 319 – 327.
- [11] 刘海桂, 唐旭利, 周国逸, 等. 1981 ~ 2000 年广东省净初级生产力的时空格局 [J]. 生态学报, 2007, 27 (10): 4065 – 4074.
- LIU hai-gui, TANG Xu-li, ZHOU Guo-yi, et al. Spatial and Temporal Patterns of Net Primary Productivity in the Duration of 1981 – 2000 in Guangdong, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (10): 4065 – 4074.
- [12] 姜群鸥, 邓祥征, 战金艳, 等. 黄淮海平原耕地转移对植被碳储量的影响 [J]. 地理研究, 2008, 27 (4): 839 – 846.
- JIANG Qun-ou, DENG Xiang-zheng, ZHAN Jin-yan, et al. Impacts of Cultivated Land Conversion on the Vegetation Carbon Storage in the Huang – Huai – Hai Plain [J]. Geographical Research, 2008, 27 (4): 839 – 846.
- [13] 王秋凤, 牛栋, 于贵瑞, 等. 长白山森林生态系统 CO<sub>2</sub> 和水热通量的模拟研究 [J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34 (A02): 131 – 140.
- WANG Qiu-feng, NIU Dong, YU Gui-rui, et al. Simulation of Forest Ecosystem in Changbai Mountain CO<sub>2</sub> and Water and Heat Flux [J]. Science in China Series D, 2004, 34 (A02): 131 – 140.
- [14] FENG X, LIU G, CHEN J M, et al. Net Primary Productivity of China's Terrestrial Ecosystems from a Process Model Driven by Remote Sensing [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85 (3): 563 – 573.
- [15] JI J. A Climate-vegetation Interaction Model: Simulating Physical and Biological Processes at the Surface [J]. Journal of Biogeography, 1995, 22 (2/3): 445 – 451.

- [16] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟 [J]. 生态学报, 2006, 26 (12): 4156 - 4163.  
HUANG Mei, JI Jin-jun, CAO Ming-kui, et al. Modeling Study of Vegetation Shoot and Root Biomass in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (12): 4156 - 4163.
- [17] HUANG Y, YU Y Q, ZHANG W, et al. Agro-C: A Bio Geophysical Model for Simulating the Carbon Budget of Agro-ecosystems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149 (1): 106 - 129.
- [18] 延晓冬, 赵俊芳. 基于个体的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN 及模型验证 [J]. 生态学报, 2007, 27 (7): 2684 - 2694.  
YAN Xiao-dong, ZHAO Jun-fang. Establishing and Validation Individual-based Carbon Budget Model FORCCHN of Forest Ecosystems in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (7): 2684 - 2694.
- [19] 黄耀, 周广胜, 吴金水. 中国陆地生态系统碳收支模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
HUANG Yao, ZHOU Guang-sheng, WU Jin-shui. Chinese Terrestrial Ecosystem Carbon Budget Model [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [20] 于贵瑞, 王秋凤, 朱先进. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性 [J]. 地理科学进展, 2011, 30 (1): 103 - 113.  
YU Gui-rui, WANG Qiu-feng, ZHU Xian-jin. Methods and Uncertainties in Evaluating the Carbon Budgets of Regional Terrestrial Ecosystems [J]. Progress in Geography, 2011, 30 (1): 103 - 113.
- [21] 董恒宇, 云锦凤, 王国钟, 等. 碳汇概要 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
DONG Heng-yu, YUN Jin-feng, WANG Guo-zhong, et al. Carbon Sequestration Summary [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [22] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 等. 北京城市园林绿化生态效益的研究 (2) [J]. 中国园林, 1998, 14 (2): 51 - 54.  
CHEN Zi-xin, SU Xue-hen, LIU Shao-zong. Study on Landscape Ecological Benefits in Beijing City (2) [J]. Journal of Chinese Landscape Architecture, 1998, 14 (2): 53 - 56.
- [23] 陈自新, 苏雪痕, 张新献. 北京城市园林绿化生态效益的研究 (3) [J]. 中国园林, 1998, 14 (3): 53 - 56.  
CHEN Zi-xin, SU Xue-hen, ZHANG Xin-xian. Study on Landscape Ecological Benefits in Beijing City (3) [J]. Journal of Chinese Landscape Architecture, 1998, 14 (3): 53 - 56.
- [24] 王让会, 衣怀峰, 宁虎森, 等. 基于 NDVI 的人工植被碳储量估算 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26 (4): 399 - 404.  
WANG Rang-hui, YI Huai-feng, NING Hu-sen, et al. Carbon Storage Estimation of Artificial Vegetation Based on NDVI [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26 (4): 399 - 404.
- [25] 高艳妮, 于贵瑞, 张黎, 等. 中国陆地生态系统净初级生产力变化特征——基于过程模型和遥感模型的评估结果 [J]. 地理科学进展, 2012, 31 (1): 109 - 117.  
GAO Yan-ni, YU Gui-rui, ZHANG Li, et al. The Changes of Net Primary Productivity in Chinese Terrestrial Ecosystem: Based on Process and Parameter Models [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (1): 109 - 117.
- [26] 于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (China FLUX) 的研究进展及其发展思路 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36 (增1): 1 - 21.  
YU Gui-rui, FU Yu-ling, SUN Xiao-min, et al. Study progress and Developing Way on the Flux Network of Terrestrial Ecosystem in China (China FLUX) [J]. Science in China Series D, 2006, 36 (SI): 1 - 21.
- [27] LI H, WU J G. Uncertainty Analysis in Ecological Studies: An Overview [M] // WU J G, JONES K B, LI H, et al. Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications. Berlin: Springer Netherlands, 2006: 43 - 64.
- [28] 关磊, 李华, 苏倩, 等. 公路路域生态环境遥感监测数据源选取研究 [J]. 遥感技术与应用, 2013, 28 (2): 315 - 323.  
GUAN Lei, LI Hua, SU Qian, et al. Remote Sensing Data Selection Research for Road Ecological Environmental Monitoring [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28 (2): 315 - 323.