北京山区生物多样性分析与碳储量评估

杨芝歌[1]，周 彬[2]，余新晓[1]，樊登星[1]，张 艺[1]，王 奇[3]

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室，北京 100083；
2. 北京沃尔德防灾绿化技术有限公司，北京 100044；3. 国家林业局调查规划设计院，北京 100714)

摘 要：基于森林资源二类调查数据，应用 InVEST 模型对北京山区生物多样性和碳储量进行了评估和估算，并讨论了二者之间的相互关系。结果表明，在所有森林生态类型中，单位面积生物多样性得分最高的是天然桦树林，为 0.76；得分最小是人工油松林，为 0.49。北京山区总碳储量为 49 193 742 t，总碳储量最大的是人工经济林，为 10 402 900 t；得分最小的是天然针叶林，为 423 132 t。各森林类型的单位面积平均碳储量均较高。一般来说，生物多样性较大的森林生态类型碳储量也较大，生物多样性与碳储量有一定的相关性，但并不十分明显。

关键词：北京山区；InVEST 模型；生物多样性；碳储量

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)03-0042-05 **中图分类号**：Q948，S718.5

Biodiversity Analysis and Carbon Storage Assessments in Beijing Mountainous Areas

YANG Zhi-ge[1], ZHOU Bin[2], YU Xin-xiao[1], FAN Deng-xing[1], ZHANG Yi[1], WANG Qi[3]

(1. *Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Combating Desertification of the Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, BFU, Beijing* 100083, *China*; 2. *Beijing World Hazard Preventing Technology CO., LTD., Bejing* 100044, *China*; 3. *Survey and Planning Institute of State Forestry Administration, Beijing* 100714, *China*)

Abstract: Based on the data of Beijing forest resources inventory, biodiversity and carbon storage of different forest ecosystem types in Beijing mountainous areas were evaluated by using InVEST (the integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs tool) model. The relationship between them was also discussed. Results showed that the highest biodiversity was 0.76 in natural birch, while the lowest one was 0.49 in artificial Chinese pine. The total carbon storage of Beijing mountain area was 49 193 742 t, with the highest one being 10 402 900 t in artificial economic woodland and the smallest one being 423 132 t in natural coniferous. The average carbon storage per unit area was relatively high in all of the forest types. In general, the carbon storage of one forest type is higher when the biodiversity is high. Biodiversity has a certain correlation with carbon storage, but the correlation is not very significant.

Keywords: Beijing mountainous area; InVEST model; biodiversity; carbon storage

气候变暖已严重威胁到人类的生存和发展[1]。森林生态系统作为陆地生态系统的主体[2]，是 CO_2 的重要碳库。它每年固定的碳约占整个陆地生态系统的 2/3，其碳汇功能对碳收支平衡起着不可替代的作用[3-6]。因此，明确森林生态系统的固碳能力，对合理经营和管理森林具有重要意义。

近年来，学者们针对森林生态系统碳储量、碳密度和碳汇功能进行了大量研究，取得了大量成就[7]，但大部分研究集中在全球尺度和国家尺度等大尺度上[8-9]。由于对大尺度的森林碳储量估算误差较大，目前对森林碳储量的研究愈来愈向较小尺度的区域森林生态系统方向发展[10-11]。将遥感和 GIS 技术引入碳储量研究，是碳储量研究的创新方向。本文将北京山区森林生态系统划分为 18 种类型，运用 InVEST模型对北京山区各森林生态系统的生物多样性与碳储量进行综合评估，并分析了二者的特点及其相互影响，为北京山区造林树种的选择提供参考。

1 研究区概况

北京市位于华北平原的西北部，地理坐标为北纬

收稿日期：2011-09-27 修回日期：2011-11-20
资助项目：国家林业局林业公益性行业重大科研专项项目“典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005)
作者简介：杨芝歌(1989—)，女(汉族)，江西省上饶市人，在读研究生，主要研究方向为林业生态工程、水土保持。E-mail：yang_zhige@126.com。
通信作者：余新晓(1965—)，男(汉族)，甘肃省平凉市人，教授，博士生导师，主要研究方向为森林水文、水土保持等。E-mail：yuxinxiao111@126.com。

39°28′—41°05′,东经 115°25′—117°30′。土地总面积 16 807.8 km²,其中山区面积约占 62%,平原区占 38%。西部属太行山脉,北部和东部属燕山山脉,自西、北、东三面环抱北京市,是北京市重要的生态屏障。北京市地貌类型复杂,植物多样,气候垂直差异性明显。多年平均降水量 638.8 mm,年蒸发量达 1 800～2 000 mm,属暖温带半湿润大陆性季风气候。北京山区主要优势树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、桦树(*Betula allegansis*)、栎类(*Quercus sppi*)、山杨(*Populus davidiana*)和其他阔叶树等。

2　研究方法

InVEST 模型由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会于 2007 年联合开发,旨在通过开发相应的工具及方法将自然资本更容易地纳入决策体系,使经济与自然保护目标趋于一致,并把重点放在自然资源及其所产生的一系列生态系统服务上。目前,InVEST 在美国加利福利亚内华达山脉区、安第斯山北部和中美洲南部、夏威夷群岛、坦桑尼亚东部弧形山脉区等区域都进行了研究和应用。InVEST不仅能评价生态系统目前的服务功能和价值,确认生态系统服务源自何处以及哪里是这些服务的受益者,还能预测生态服务功能及其价值在未来的变化,直接反映不同政策和规划将如何影响经济和环境等的多重方面。InVEST 模型用于快速简便地量化和价值化生态系统服务功能,从而更好地为政府及相关部门提供可靠的依据,将生态服务功能保护纳入到资源管理和可持续发展规划决策中去。本研究利用 InVEST 模型中的碳储量模块和生物多样性模块对北京山区森林资源的碳储量和生物多样性进行评估。

2.1　碳储量

森林生态系统中的碳储存大部分来自 4 类基本的碳库:土壤碳、死亡有机碳、地下部分碳和地上部分碳。土壤碳库包括土壤有机碳和矿质土壤有机碳;死亡有机碳包括枯立木、凋落物和倒木中的碳储量;地下部分碳库包括植物活的根系系统;地上部分碳库包括地表以上所有活的植被的碳储量,InVEST 碳储量模块不涉及地上碳库中极不稳定的碳(如一年生农作物),因为这些碳库相对稀少,更新太快。InVEST 模型以森林景观类型为评估单元,计算 4 大基本碳库碳储存量。

InVEST 碳储量模块计算所需数据为森林景观类型图、以森林景观类型为统计单元的 4 大碳库表。本研究收集到了北京山区森林景观类型分布图、相关植被类型的地上部分碳储存量和土壤碳调查栅格图层;地下部分碳储量可由各植被地上部分与地下部分的比值计算得到,由地上部分生物量与死亡生物量的比值和生物量碳的转换率得到死亡有机碳储量[12-14]。然而,碳模型要求以森林景观类型为统计单元统计土壤碳储量,这在缺乏土壤碳调查数据时是一种有效的方法,但在土壤碳数据可获取的情况下,根据土壤碳空间数据重新统计每种植被类型下的土壤碳是没有必要的,且降低了评估精度。因此,本研究对碳模型的计算方法进行了修改。碳储量模块中碳储量计算方法如下:

$$C_{veg}=C_{above}+C_{below}+C_{dead} \quad (1)$$

$$C=C_{veg}+C_{soil} \quad (2)$$

式中:C_{veg}——植被总碳储量(t/hm²);C_{above}——以森林景观类型为统计单元的地上部分碳储量;C_{below}——以森林景观类型为统计单元的地下部分碳储量;C_{dead}——死亡有机碳储量;C_{soil}——土壤碳储量图层数据。

2.2　生物多样性

InVEST 生物多样性模型结合景观类型敏感性和外界威胁强度得到生境质量的分布,并根据生境质量的优劣评估生物多样性。InVEST 模型假设生境质量好的地区,其生物多样性也高。生境质量的涵义实际上指的是生态系统能够提供物种生存繁衍条件的潜力。

模型需要输入的数据有土地利用/植被覆盖图、生境威胁因子图层、威胁源表(包括威胁强度、威胁距离等)和生境敏感性图层。其中,已获得的数据有铁路、道路、居民点、人口、农田(从土地利用图中提取)等矢量数据,需进行统计、格式转化等数据处理;土地利用图需要对非自然生态系统进行归并;威胁源表中的威胁强度和威胁距离综合考虑已有文献资料和专家打分;生境敏感性图层中的敏感度采用了模型推荐数据。生境质量具体评估过程如下:

首先根据敏感性表格和景观类型数据生成敏感性分布图层,然后对威胁源进行临近分析,分析每个栅格内的威胁值以及最大影响范围内各个栅格的威胁值,得到威胁强度分布图层,并计算出各威胁因子相对权重(ω)。最后,将中间结果:敏感性分布图层、威胁强度分布图层和权重值相乘得到生境退化图层和生境质量图层:

$$\text{生境质量图层}=\sum_{1}^{n}(\text{敏感性分布图层}\times \text{威胁强度分布图层}\times\text{权重值}) \quad (3)$$

对生境质量图层进行标准化得到生境退化图层:

$$\text{生境退化图层}=\text{normalized}(\text{生境质量图层}) \quad (4)$$

生境退化图层(Quality2)相当于一个生境退化—响应耦合相对得分。退化来源于威胁,而每种森林景观类型对威胁具有不同的响应,表现为敏感性。威胁强度越高,影响距离越大,森林景观类型对威胁的敏感程度越高,则生境质量越低,最后用 1 减去退化—响应耦合相对得分,得到生境质量相对得分(Quality3):

生境质量相对得分=1−生境退化图层 (5)

2.3 数据处理

(1) 地形数据来源于研究区 90 m 精度的 DEM,利用 ArcGIS 软件对 DEM 进行投影和转换,切取和填挖处理,结果如图 1 所示。

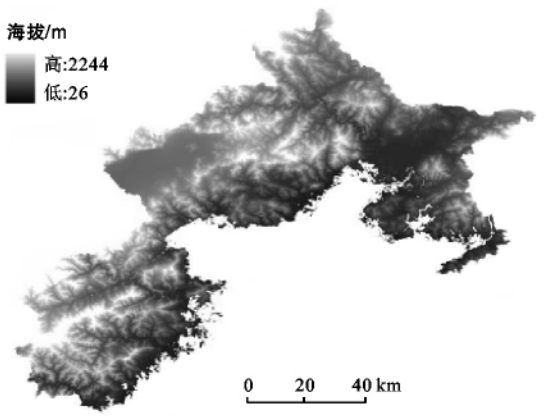


图 1 北京山区 DEM

(2) 森林景观类型区划。森林景观分布图越详细区域的碳储量估算越精确,即使是同一类型的植被种类,其林龄、健康度等不同,生存区域的海拔、降雨量、温度等不同,都显著影响着碳储量[15-16]。森林景观区划的方法非常多,根据数据来源的不同可划分为基于森林资源二类调查和遥感影像的区划方法。本研究应用遥感影像与森林资源二类调查相结合的方法对北京山区森林景观类型进行区划,将北京山区划分为 18 种森林景观类型,详细地划分了北京山区的植被类型和种类。具体分类统计结果见表 1。

(3) 地上部分碳、地下部分碳和死亡有机碳碳密度表(表 2)。根据以前研究中对每种植被实测的地上部分生物量(碳)密度与地下部分生物量(碳)密度、死亡生物量(碳)密度比值及生物量—碳转换率等研究结果,换算出地下部分碳密度和死亡有机碳密度。将模型参数表中土壤碳密度设为 0 值[12-14]。

(3) 土壤碳密度。土壤碳密度根据中国科学院北京地理科学与资源研究所提供的土壤碳调查数据(ArcGIS GRID),经裁剪得到北京山区土壤碳密度图层。

表 1 北京山区森林景观划分结果

森林类型	起源	优势树种	小班数/个	面积/hm²	面积所占比例/%
针叶纯林	天然	油松	344	4 371.59	0.91
		侧柏	912	22 256.57	4.64
	人工	油松	4 733	56 568.40	11.80
		落叶松	458	7 116.03	1.48
		侧柏	3 241	44 892.51	9.37
阔叶纯林	天然	柞树	3 356	96 898.58	20.22
		桦树	320	11 145.22	2.33
		山杨	522	11 412.58	2.38
		其他	958	21 235.44	4.43
	人工	柞树	633	11 358.37	2.37
		刺槐	1 045	11 654.77	2.43
		杨树	1 934	9 539.56	1.99
		其他	503	4 893.23	1.02
		经济林	9 170	108 471.86	22.64
混交林	天然	针叶	159	3 884.42	0.81
		阔叶	542	12 984.98	2.71
	人工	针叶	2 070	31 793.00	6.63
		阔叶	568	8 732.26	1.82

表 2 地上部分碳、地下部分碳和死亡有机碳碳密度 t/hm²

景观类型	碳密度			
	地上部分	地下部分	土壤	死亡有机
P_{01}	14.77	3.58	0	2.46
P_{02}	16.46	4.70	0	4.58
P_{03}	12.32	2.98	0	2.46
P_{04}	22.55	4.68	0	1.94
P_{05}	15.11	4.31	0	4.58
P_{06}	9.44	3.28	0	1.62
P_{07}	19.44	6.72	0	1.01
P_{08}	21.31	3.41	0	1.93
P_{09}	9.69	1.92	0	1.83
P_{10}	9.87	3.43	0	1.62
P_{11}	9.47	1.87	0	1.98
P_{12}	30.43	4.86	0	1.93
P_{13}	11.97	2.37	0	1.83
P_{14}	11.59	2.29	0	1.00
P_{15}	21.80	5.29	0	3.50
P_{16}	51.98	10.50	0	1.60
P_{17}	21.36	5.18	0	2.90
P_{18}	51.20	10.34	0	1.84

注:P_{01}为天然油松;P_{02}为天然侧柏;P_{03}为人工油松;P_{04}为人工落叶松;P_{05}为人工侧柏;P_{06}为天然柞树;P_{07}为天然桦树;P_{08}为天然山杨;P_{09}为其他阔叶;P_{10}为人工柞树;P_{11}为人工刺槐;P_{12}为人工杨树;P_{13}为其他阔叶;P_{14}为经济林;P_{15}为天然针叶;P_{15}为天然针叶;P_{16}为天然阔叶;P_{17}为人工针叶;P_{18}为人工阔叶。下同。

3 结果与分析

3.1 生物多样性评估

本研究各威胁强度得分参考了《InVEST 模型数

据准备手册》中的得分标准和相关文献,得出威胁源敏感性表。输入北京山区森林景观分布图、每种森林景观类型对干扰的敏感程度表、威胁源图层(等级公路、铁路、居民点、人口密度)、威胁源表,运行InVEST生物多样性模型,得到北京山区的生境质量图。

根据赵勃[17]的北京山区植物多样性研究,提取北京山区的物种数据,从而得到北京山区物种数分布图。植被总盖度可由森林资源二类调查数据中提取,并转化为栅格图。根据对生物多样性贡献率的大小,依据层次分析法,设置权重,得到生物多样性综合评估结果(图 2)。

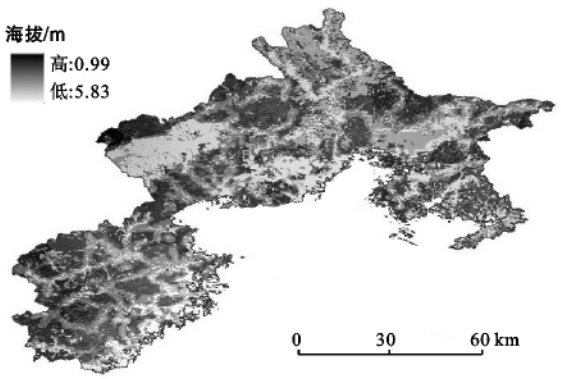


图 2　北京山区生物多样性综合评估

经 ArcGIS 对各森林景观类型进行分区统计,单位面积生物多样性得分最高的是天然桦树林,为 0.76,单位面积生物多样性得分最小为人工油松林,为 0.49;总体得分最高的是天然柞树林,为 54 775.40,最小的是天然油松林,为 2 120.59。具体结果如表 3 所示。

表 3　北京山区各类型森林景观综合得分

景观类型	最大值	平均	总量
P_{01}	0.97	0.49	2 120.59
P_{02}	0.89	0.51	11 348.40
P_{03}	0.98	0.56	31 425.10
P_{04}	0.92	0.58	4 112.95
P_{05}	0.95	0.50	22 169.80
P_{06}	0.97	0.57	54 775.40
P_{07}	0.99	0.76	8 418.09
P_{08}	0.94	0.56	6 389.03
P_{09}	0.99	0.64	13 586.60
P_{10}	0.84	0.59	6 649.89
P_{11}	0.92	0.53	6 147.15
P_{12}	0.90	0.37	3 440.72
P_{13}	0.92	0.50	2 390.94
P_{14}	0.89	0.26	28 324.50
P_{15}	0.95	0.62	2 400.65
P_{16}	0.97	0.63	8 190.91
P_{17}	0.96	0.57	17 971.90
P_{18}	0.88	0.56	4 806.85

3.2　碳储量评估

(1) 在 ArcGIS 运行 InVEST 的碳储量模型,计算得到北京山区 C_veg 碳密度。计算结果见图 3。

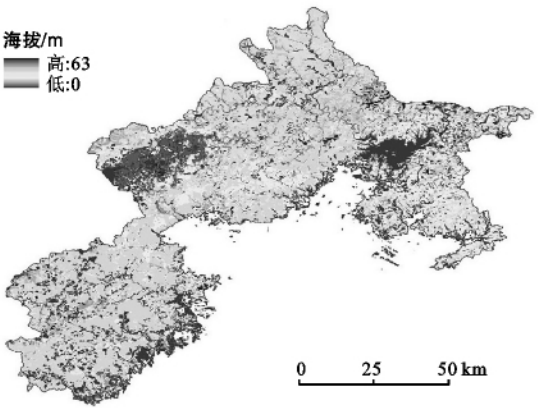


图 3　北京山区植被碳密度

(2) 利用 GIS 空间分析模块中的栅格运算工具(Raster Calculator),将植被碳密度与土壤碳密度图层相加得到北京山区森林景观的总碳密度空间格局图。北京山区森林生态系统总碳储量为 49 193 742 t,各森林类型的碳储量差异较大,在所有森林类型中,总碳储量最大的是人工经济林,为 10 402 900 t,最小的是天然针叶林,为 423 132 t;单位面积平均碳储量最大的是天然阔叶树林,为 141.33 t/hm^2,最小的是人工刺槐林,为 92.14 t/hm^2(表 4)。

表 4　北京山区各森林景观类型碳存储量

景观类型	最大值/(t·hm^{-2})	平均值/(t·hm^{-2})	总量/t
P_{01}	168.50	107.85	470 337
P_{02}	168.50	103.18	2 295 370
P_{03}	168.50	97.48	5 492 160
P_{04}	168.50	113.31	800 950
P_{05}	230.10	103.14	4 530 870
P_{06}	168.50	105.08	10 157 100
P_{07}	168.50	128.97	1 431 700
P_{08}	168.50	107.76	1 225 580
P_{09}	168.50	97.28	2 056 940
P_{10}	168.50	99.26	1 121 470
P_{11}	168.50	92.14	1 061 910
P_{12}	168.50	104.60	979 410
P_{13}	223.10	94.75	450 713
P_{14}	222.10	96.99	10 402 900
P_{15}	168.50	109.22	423 132
P_{16}	168.50	141.33	1 824 870
P_{17}	235.10	105.74	3 322 600
P_{18}	168.50	134.52	1 145 730
总量	3 269.40	1 942.60	49 193 742

3.3 生物多样性与碳储量的相互影响

各景观类型的生物多样性与碳储量平均值见图 4。由图 4 可以看出，总体来说，生物多样性较高景观类型碳储量也较高。但是也有例外情况，人工经济林的生物多样性虽然较低，但碳储量维持在一般水平，这是由于经济林以用材林为主。利用 SPASS 软件对北京山区碳储量和生物多样性进行相关分析，得出二者相关性大小为 0.453(显著性 0.059)。

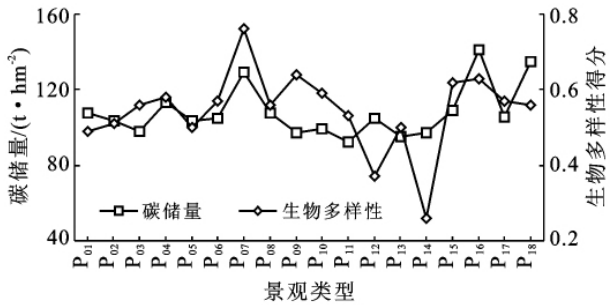


图 4 北京山区生物多样性与碳储量平均值

4 结 论

(1) InVEST 模型的引入，为碳密度、碳储量和生物多样性的估算提供了可行的方法，它独特的运行方式也为我国生态模型的研制开拓了视野。InVEST模型是在国外的数据条件下开发的，在国内应用时需要进行部分修改，在校验参数的同时更需要充分验证。目前，InVEST 第一层模型经过修改和校验能够适用于区域尺度的生态系统服务功能评估。

(2) 不同森林生态类型的单位面积生物多样性差异较大，在所有森林类型中，单位面积生物多样性得分最高的是天然桦树林，为 0.76，单位面积生物多样性得分最低的是人工油松林，为 0.49。

(3) 北京山区森林生态系统起到了重要的固碳作用，北京山区森林生态系统总碳储量为 49 193 742 t，碳密度和碳储量均受其生长环境、林型和起源的影响。各森林生态类型的总碳储量相差较大，但是单位面积平均碳储量差异不很大。总碳储量最大的是人工经济林，为 104 029 00 t，最小的是天然针叶林，为 423 132 t；单位面积平均碳储量最大的是天然阔叶树林，为 141.33 t/hm^2，最小的是人工刺槐林，为 92.14 t/hm^2。

(4) 一般来说，生物多样性较大的森林生态类型碳储量也较大。但是人工林例外，这是因为人工林由于人为因素干扰生物多样性比天然林小，但碳储量并不因此而减少。生物多样性与碳储量有一定的相关性，但并不十分明显。

[参 考 文 献]

[1] UNCCC. United Nations Climate Change Conference [EM/OL]. 2009. [2011-05-06]. http://cn.wikipedia.org/wiki/2009_United_Nations_Climate_Change_Conference.

[2] 吕妍. 干旱区人工林碳储量估算及分析：以克拉玛依人工林为例[D]. 南京：南京信息工程大学，2010.

[3] Nabuurs G J, Schelhaas M J, Mohren G M J, et al. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from l950 to 1999 [J]. Global Change Biology, 2003, 9(2): 152-160.

[4] Woodall C W, Heath L S, Smith J E. National inventories of down and dead woody material forest carbon stocks in the United States: challenges and opportunities [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(3): 221-228.

[5] Woodbury P B, Smith J E, Heathl S. Carbon sequestration in the US forest sector from 1990 to 2010[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 24l(2): 14-27.

[6] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, 123(2): 1-22.

[7] Bartel P. Soil carbon sequestration and its role in economic development: a donor perspective[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59(3): 643-644.

[8] 李克让，王绍强，曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学：D 辑，2003，33(1)：72-80.

[9] 黄从德，张健，杨万勤，等. 四川人工林生态系统碳储量特征[J]. 应用生态学报，2008，19(8)：1644-1650.

[10] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(8): 242-258.

[11] Blacklard J A, Finco M V, Helmer E H, et al. Mapping U.S. forest biomass using nationwide forest inventory data end moderate resolution information[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1658-1677.

[12] 陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究[D]. 北京：北京林业大学，2003.

[13] 樊登星，余新晓，岳永杰，等. 北京市森林碳储量及其动态变化[J]. 北京林业大学学报，2008，30(S2)：117-120.

[14] 方精云，刘国华，徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产力[J]. 生态学报，1996，16(5)：497-508.

[15] Coomes D A, Coomes R B, Allen N A, et al. Designing systems to monitor carbon stocks in forests and shrublands [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 164(3): 89-108.

[16] Raich J W, Russell A E, Kitayama K, et al. Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests[J]. Ecology, 2006, 87(1): 76-87.

[17] 赵勃. 北京山区植物多样性研究[D]. 北京：北京林业大学，2005.