北京市松山天然油松林生态系统的碳储量

朱嘉磊[1]，田 菊[1]，孙 宾[1]，金 星[1]，李 璇[1]，聂立水[1]，吴记贵[2]
(1.北京林业大学 林学院，北京 100083；2.北京松山国家级自然保护区管理处，北京 102115)

摘 要：[目的] 分析北京市松山地区天然油松林生态系统碳储量，为研究区天然油松林的碳固定和碳储量管理研究提供理论依据。[方法] 以北京市松山天然油松林生态系统为研对象，设置标准样地进行乔木。灌木。草本。凋落物调查，采集并分析 0—100 cm 土层土样，根据相关方程计算出生态系统以及各个层次的碳储量。[结果] 植物体含碳率变化在 42.39%～49.95%，0—100 cm 土壤含碳率变化在 0.26%～1.31%。天然油松生态系统碳储量为 147.24 Mg/hm^2，其中植被碳储量为 57.14 Mg/hm^2，占生态系统碳储量的 36.7%，植被各层碳储量的顺序为乔木(54.93 Mg/hm^2)＞灌木(0.45 Mg/hm^2)＞草本(0.29 Mg/hm^2)；土壤碳储量为 66.35 Mg/hm^2，占生态系统碳储量的 46.30%，分别是植被碳储量的 1.16 倍和凋落物碳储量的 2.79 倍，且随着土层深度的增加而递减；凋落物碳储量为 23.75 Mg/hm^2，占生态系统碳储量 17%。[结论] 松山地区天然乔木对植被碳储量的贡献率最大，松山地区天然油松林植被含碳率表现为：乔木＞灌木＞草本＞凋落物。

关键词：森林生态系统；碳储量；天然油松林；松山
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)05-0320-06 **中图分类号**：Q948

文献参数：朱嘉磊，田菊，孙宾，等.北京市松山天然油松林生态系统的碳储量[J].水土保持通报，2016，36(5)：320-325. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.057

Carbon Storage of Natural *Pinus Tabulaeformis* Forest in Songshan Mountain in Beijing City

ZHU Jialei[1], TIAN Ju[1], SUN Bin[1], JIN Xin[1], LI Xuan[1], NIE Lishui[1], WU Jigui[2]
(1. *College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*;
2. *Beijing Songshan Natural Reserve Administration, Beijing* 102115, *China*)

Abstract: [Objective] To study the carbon storage of natural *Pinus tabulaeformis* in order to provide theoretical basis for the management of carbon fixation and storage management in natural *P. tabulaeformis* forest in Songshan Mountain in Beijing City. [Methods] We set up standard plots in natural *P. tabulaeformis* forest, and sampled biomass of trees, shrubs, grasses and litter, and then collected soil samples at a depth of 0 to 100 cm. The correlative models were used to estimate the carbon storage of natural *P. tabulaeformis* forest ecosystem and different components. [Results] The vegetation carbon content changed from 42.39% to 49.95%, and it changed from 0.26% to 1.31% in the soil layer from 0 to 100 cm. The average carbon storage of *P. tabulaeformis* ecosystem was 147.24Mg/hm^2, and the average carbon storage in vegetation was 57.14 Mg/hm^2, accounted for 36.7% of ecosystem carbon, carbon storage in each layer of the forest were trees(54.93 Mg/hm^2)＞shrub(0.45 Mg/hm^2)＞herb(0.29 Mg/hm^2). The average soil carbon storage was 66.35 Mg/hm^2, accounting for 46.30% of ecosystem carbon and 1.16 times the vegetation and 2.79 times litter carbon storage. The soil carbon content decreases with the increase of soil depth. Litter average carbon storage was 23.75 Mg/hm^2, accounting for 17% of ecosystem carbon storage. [Conclusion] Natural forest in Songshan mountain area contributed most to vegetation carbon storage, and carbon content of natural *P. tabulaeformis* forest in Songshan mountain area vegetation follows an order of arbor＞shrub＞herb＞litter.

Keywords: **forest ecological system; carbon storage; natural *Pinus tabulaeformis* forest; Songshan mountain**

收稿日期：2016-02-23 **修回日期**：2016-03-07
资助项目：北京市教育委员会科学研究与研究生培养共建资助项目(BLCXY-201504)；松山自然保护区油松林退化修复技术研究资助
第一作者：朱嘉磊(1989—)，男(汉族)，江西省莲花县人，硕士研究生，主要研究方向为植物营养学。E-mail：zhujialei99@163.com。
通讯作者：聂立水(1963—)，男(汉族)，河北省藁城人，博士，教授，博士生导师，主要从事土壤植物营养学方面的研究。E-mail：nielishui@sohu.com。

森林生态系统是地球生物圈的重要组成部分,存储了陆地生态系统中有机碳地上部分的 80%和地下部分的 40%[1-4]。其碳储量是研究和估算森林生态系统与大气碳交换的基本参数和关键性因子[2],并成为国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)和全球环境变化国际人文因素计划(IHDP)等重大科学计划的研究主题[3]。如何准确地对森林生态系统的碳储量进行估算是一直以来备受国际科学界广泛关注的重大议题[3]

目前国内外森林生态系统碳储量的研究方法主要为微气象学法、样地清查法、箱式法[4-11]、模型模拟法、遥感技术。中国森林生态系统碳储量的主要影响因素分为自然因素和人为因素。自然因素主要包括气候、地形、地势、氮沉降[11-18]等因素,人为因素主要包括土地利用方式、森林经营管理、林分起源、人口密度等因素。近十几年来,中国学者对森林生态系统碳循环进行了大量研究[12-15],无论是全球尺度上、国家尺度[6]上、省级尺度[7,16]上的森林生态系统的碳储量计算,还是小尺度的碳格局分布,固碳能力都有大量深入调查研究。但是在林分尺度上具有生态代表性地区天然油松林森林生态系统碳储量影响因素的研究比较少。本次试验拟针对暖温带华北地区唯一一片天然油松林生态系统碳储量而展开研究,采用样地清查法,从林分起源在林分尺度上研究天然油松林碳储量,其中增加对枯落物碳储量的研究。

松山的天然油松林在华北地区颇具代表性,是华北地区唯一一片健康片植天然油松林[8,17-20]。油松作为华北地区主要的造林树种[9,19],在中国暖温带森林区具有很强的典型性[10]。因此,深入研究松山油松林生态系统碳储量旨在揭示松山油松林森林生态系统碳储量状况,准确估算该地区森林生态系统的固碳潜力及计算相应的固碳速率,做好研究基础以及提供准确的碳储量数据,也是对国务院最新出台的《关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见》当中完善森林经营管理制度,开展森林科学经营的强有力的响应。

1　研究区概况

松山自然保护区位于北京市延庆县境内,地理位置在 40°32′30″—40°33′35″N,115°30′30″—115°39′30″E,海拔 600～2 240 m,总面积 4 667 hm^2。该区属燕山山脉强烈切割的中山地带,主要岩石类型为花岗岩,极少部分为石灰岩。该区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 8.5 ℃,最高气温 39 ℃,最低气温 −27.3 ℃,年降水量 493 mm,年平均日照 2 836.3 h,无霜期 153 d。实验地区处在海拔 1 100 m 左右,本区地带性土壤为棕色森林土。植被主要有:山杏(*Prunus sibirica*)、暴马丁香(*Syinga reticulata*)、榆树(*Ulmus pumila*)、大叶白蜡(*Fraxinus rhynchophylla*)等;灌木有:青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)、雀儿舌头(*Leptopus chinensis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)等;林下草本有:披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、蓝苞风毛菊(*Saussurea pectinata*)等[20]。

2　材料和方法

2.1　样地选择和设置

于 2013 年 8—10 月在松山自然保护区天然油松老龄林进行调查采样。在天然油松老龄林集中地区,海拔 1 100 m 左右选取 3 个立地条件、植被类型相接近的样地(20 m×20 m)进行标准地调查。主要内容有:样地内进行每木检尺,每个标准样地内沿着对角线布置 5 个(2 m×2 m)的灌木样方,在标准地每个角及中间取;草本样方面积设(1 m×1 m),在每个灌木样方 4 个角取,样地详细信息见表 1,郁闭度测定方法为将样地大小和树木投影到地面面积按照比例画图到方格纸上面,然后计算树木投影面积与整体样地面积百分比例。

表 1　样地基本情况概况

样地编号	平均树高/m	平均胸径/cm	坡度	坡向	海拔/m	郁闭度	主要物种	林分起源	林龄/a
1	17.8	30.4	40	阳坡	1 050	0.8	山杏、榆树、大叶白蜡、胡枝子、雀儿舌头、披针叶苔草、油松	天然林	95
2	17.2	32.0	45	阳坡	1 100	0.8	山杏、榆树、大叶白蜡、青檀、三裂绣线菊、披针叶苔草、油松	天然林	95
3	18.5	30.7	43	阳坡	1 150	0.7	山杏、榆树、大叶白蜡、青檀、雀儿舌头、蓝苞风毛菊、油松	天然林	95

2.2 研究方法

2.2.1 *植被和凋落物碳储量的估算* 植被碳储量为生物量乘以含碳率，包括乔木、灌木及草本的碳储量之和。对样地内大于 5 cm 的油松进行每木检尺，对油松叶、枝、干、根器官采样分析含碳率。每木检尺以后计算油松林蓄积量，利用油松林蓄积量和生物量的关系[15]，计算出油松林地上部分乔木生物量，乔木生物量乘以乔木含碳率得到乔木碳储量。采用收获法测定灌木和草本生物量，将样方内的全部灌木和草本进行带根挖取，灌木按照叶、枝、根，草本按照地上部分以及地下部分采样，经过烘干、称湿重和干重等步骤。在每个草本样方内收集全部的凋落物，进行称重并取样分析。

测定植物和凋落物的含碳率试验方法参照鲍士旦著《土壤农化分析》[21]，木质样品中有机含碳率测定方法采用硫酸—重铬酸钾稀释热法测定。

2.2.2 *土壤碳储量的估算* 分别在样地内选择 3 个地段挖掘剖面，到 100 cm 为止。按照 0—10，10—20，20—40，40—60，60—100 cm 分层取样。用环刀法测定各层土壤容重，所有土壤样品风干磨细过筛以后用湿烧法测定土壤有机碳含量。

文中对土壤有机碳的估算采用土壤模型法，不同土壤有机碳密度和储量计算公式为：

$$SOC_{Di} = 10 \cdot C_i \cdot D_i \cdot E_i(1-G_i)/100$$

式中：SOC_{Di}——土壤有机碳密度（Mg/hm^2）；C_i——土壤有机碳含量（g/kg）；D_i——土壤容重（g/cm^3）；E_i——土层厚度（cm）；G_i——直径大于 2 mm的石砾所占的体积百分比（%）。

2.2.3 *生态系统碳储量的估算* 生态系统碳储量为植被碳储量、凋落物碳储量和土壤有机碳储量之和。植被及其凋落物的碳储量为生物量乘以含碳率获得。使用 Excel 2007 进行数据处理和表格制作等工作。

3 结果与分析

3.1 植被碳储量

如表 2 所示，天然油松林植被平均碳储量为 57.14 Mg/hm^2，从林分碳储量组成来看，乔木碳储量占植被碳储量的 96.58%，灌木和草本加起来不到 4%。因此很多学者研究植被碳储量时候采用乔木的碳储量加上 5%的系数得到植被碳储量的数据是有一定道理的。

天然油松林植物含碳率主要在 42.39%～49.95%。乔木不同生长器官的含碳率有所差异，整体表现为：干（47.73%）＞枝（46.74%）＞叶（45.75%）＞根（45.11%）；灌木含碳率平均为 44.60%；草本为 46.63%。

表 2 北京市松山天然油松林植被碳储量

项目		样地 1		样地 2		样地 3	
		含碳率/%	碳储量/（$Mg \cdot hm^{-2}$）	含碳率/%	碳储量/（$Mg \cdot hm^{-2}$）	含碳率/%	碳储量/（$Mg \cdot hm^{-2}$）
乔木	叶	44.31±1.37	25.95	48.25±1.23	85.64	44.68±1.08	53.21
	枝	45.62±1.58		47.23±1.45		46.68±1.43	
	干	47.65±2.64		47.91±1.11		48.32±1.28	
	根	42.39±1.15		46.99±1.56		43.96±1.44	
	合计		25.95		85.64		53.21
灌木	叶	43.36±1.53	0.01	45.53±1.55	0.52	43.65±1.48	0.16
	枝	44.26±1.68	0.03	45.63±1.62	1.25	44.86±1.52	0.32
	根	44.91±1.71	0.07	45.26±1.69	1.11	43.95±1.61	0.45
	合计		0.11		2.99		0.91
草本	地上部分	43.01	0.25	44.66	0.60	48.21	0.30
	地下部分	45.69	0.30	46.56	0.75	49.95	0.40
	合计		0.55		1.35		0.70
平均		44.56	26.61	46.51	89.98	46.55	54.82

3.2 凋落物碳储量

凋落物的碳储量介于 21.46～25.83 Mg/hm^2，平均为 23.75 Mg/hm^2，这与鲁绍伟等[22]在北京松山做油松林枯落物碳储量得到的结果 27.75 Mg/hm^2 非常接近。枯落物碳储量大，说明其分解的速率比较慢。油松枯落物主要成分为松针，因松针内富含油脂类物质，不易于林下微生物分解，再加上油松林在该地区存在的时间长，海拔 1 100 m 左右人为影响比较少，积累的凋落物多导致林下枯落物的厚度比较厚，更加不利于分解，因此凋落物的储量大。

3.3　土壤碳储量

土壤有机碳储量为 66.35 Mg/hm²(3 个样地碳储量的平均值),0—60 cm 的土壤有机碳储量为 48.63 Mg/hm²,约占整个剖面的 73%,表明上层土壤有机碳贡献率很大。在土壤剖面垂直分布上,随着采样深度的增加,土壤有机碳储量呈现递减趋势(以 10 cm为一层),这符合土壤有机质含量在垂直剖面上的分布情况。因为土壤有机质是土壤有机碳的主要来源,而有机质的来源主要决定于枯落物、微生物、动植物残体等方面,表面土壤的枯落物和动植物残体较多,微生物活动频繁,所以在土壤垂直面从上往下,土壤有机碳储量是逐渐递减的。

表 3　北京市松山天然油松林土壤碳储量

土层深度/cm	样地 1		样地 2		样地 3	
	含碳率/%	碳储量/(Mg·hm⁻²)	含碳率/%	碳储量/(Mg·hm⁻²)	含碳率/%	碳储量/(Mg·hm⁻²)
0—10	0.91	10.05±1.03	1.31	14.68±3.38	1.28	13.80±0.86
10—20	0.59	7.00±0.68	0.77	8.61±1.77	0.91	10.73±0.79
20—40	0.50	12.55±1.13	0.68	17.73±3.95	0.72	19.54±1.59
40—60	0.32	6.79±0.59	0.43	12.30±1.56	0.47	12.13±1.06
60—100	0.26	13.50±1.03	0.23	14.07±2.45	0.54	25.60±2.31
平均	0.41	49.89	1.36	67.39	0.79	81.77

3.4　森林生态系统碳储量

植被、土壤及凋落物的碳储量组成了生态系统的碳储量表(表 4),北京松山天然油松林碳储量为 147.24 Mg/hm²,其中土壤碳储量为 66.35 Mg/hm² 且比例最大,达到了 46.3%。植被和凋落物碳储量分别为 57.14 和 23.75 Mg/hm²,占总储量的 36.7% 和 17%。

显而易见,土壤碳储量是植被与凋落物碳储量的 1.16 和 2.79 倍,间接说明了土壤是森林生态系统最大的碳库。

表 4　北京市松山天然油松林生态系统碳储量

样地编号	海拔/m	植被碳储量/(Mg·hm⁻²)	比例/%	凋落物碳储量/(Mg·hm⁻²)	比例/%	土壤有机碳储量/(Mg·hm⁻²)	比例/%	生态系统碳储量/(Mg·hm⁻²)	比例/%
1	1 050	26.61	27	21.46	22	49.89	51	97.96	100
2	1 100	89.98	49	25.83	14	67.39	37	183.20	100
3	1 100	54.82	34	23.96	15	81.77	51	160.55	100
平均		57.14	36.7	23.75	17	66.35	46.3	147.24	100

4　讨论与结论

4.1　讨论

(1) 草本和植被含碳率。国内外文献[23-24]计算植被和草本的碳储量时所用的含碳率为 0.45 或 0.5,但是这样只是在大尺度的面积上估算含碳率,并没有在具体的地区进行实际分析。本文研究结果表明植被的含碳率在 42.39%～49.95%,样地平均含碳率为乔木(46.31%)＞草本(45.8%)＞灌木(44.6%),都非常接近 45%,低于马钦彦等[25]在华北地区对油松林研究得出乔木含碳率 50.0%、灌木含碳率 49.0%的研究结果,高于罗云建[26]对华北地区草本含碳率 40.0%、凋落物含碳率 39.0%的估算值。因此对植被不同类型的含碳率分析应该具体到乔木、灌木和草本,这样才能显示植被碳储量的真实水平。

(2) 植被碳储量。本文研究中,植被碳储量平均为 57.13 Mg/hm²,非常接近全国平均水平 57.07 Mg/hm²[27],高于樊登星等[16]根据北京市第 6 次森林资源清查得出松林碳密度 15.55 Mg/hm²。其主要原因是在北京第 6 次森林资源清查当中,中幼龄林面积所占比例较高且樊登星研究中忽略了林下层,再加上本次实验地区油松不是中幼林而是老龄林,从而导致了地区植被碳储量低。实验结果接近程堂仁对小陇山森林生物量研究得出油松林碳储量 62.44 Mg/hm²,接近邓蕾等[28]在宁陕县油松林密度 63.90 Mg/hm²。

(3) 土壤有机碳储量。土壤有机碳含量是土壤碳循环研究的基础,直接取决于地上、地下凋落物的输入和有机质分解,这二者与水热条件紧密相关,故土壤有机碳含量不仅与其上生长的植被关系密切,也

受制于当地的气候条件[27]。本文研究发现 3 个样地的土壤有机碳储量随着土壤深度的增加而呈现减少的趋势,这与刘伟等[14,7,29-34]人的研究结果一致。研究得出土壤有机碳储量是植被碳储量的 1.16 倍,占生态系统碳储量的 46%,这与很多学者得出相似的结论,周玉荣等[27]得出中国土壤有机碳储量是植被碳储量的 3.4 倍,王新闯等[7]得到土壤碳储量是植被碳储量的 2.99 倍。但是具体分析可以看出,周玉荣研究的尺度是建立在国家级别的尺度上,而王新闯的研究也是在吉林省级别的尺度上,本文的研究具体到北京市松山自然保护区,这与前人采用的数据精度和研究区域特征不一样,所以数据的差异有一定的出入,但是结论都是相似的。Baties[32]对全球土壤碳储量的研究表明,在 0—100 cm 的土壤碳储量中,0—50 cm所占的比例在 62%～81%。相同的结论,本文研究得到 0—60 cm 的土壤有机碳储量占 0—100 cm 有机碳储量的 73%,这与 Baties[32]所得出的结论是一致的。此外本文研究发现随着海拔的增加,样地里面有机碳储量也是增加,油松林生态系统的土壤有机碳碳储量也表现为增加的趋势,这与刘世荣等[33]的研究结果是一致的。

(4) 天然油松林生态系统平均碳储量。松山天然油松林生态系统平均碳储量为 147.24 Mg/hm^2,低于周玉荣等[27]的 258.83 Mg/hm^2 研究数据,说明中国不同森林碳储量存在巨大的地区差异,华北地区森林碳库都相对比较小[10,28-34]。与很多研究结果是一致的[25,34-37],森林各个层次对生态系统碳储量的贡献率都是:土壤>植被>凋落物[10,27]。

4.2 结 论

(1) 天然油松老龄林植被碳储量为 57.14 Mg/hm^2,土壤碳储量为 66.35 Mg/hm^2,凋落物碳储量为 23.75 Mg/hm^2,分别占生态系统的 36.7%,46.3% 和 17%,乔木对植被碳储量的贡献率最大,为 96.58%,而灌木和草本加起来不到 4%。

(2) 松山地区天然油松林植被含碳率介于 42.39%～49.95%,主要表现为:乔木>灌木>草本>凋落物。土壤有机碳在 0—100 cm 随土层厚度的加深,碳储量(以 10 cm 计算)表现为减小的趋势。

[参 考 文 献]

[1] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests [J]. Plant, Cell & Environment, 1999,22(6):715-740.

[2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science (Washington), 1994,263(5144):185-189.

[3] Brown S. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges [J]. Environmental Pollution, 2002,116(3):363-372.

[4] 毛子军. 森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展[J]. 植物生态报,2002,26(6):731-738.

[5] Businger J A, Oncley S P. Flux measurement with conditional sampling[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990,7(2):349-352.

[6] FangJingyun, Chen Anping, Peng Changhui, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001,292(5525):2320-2322.

[7] 王新闯,齐光,于大炮,等. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布[J]. 应用生态学报,2011,22(8):2013-2020.

[8] 张玉钧,刘振玉. 松山油松林群落特征分析[J]. 北京林业大学学报,1996,18(2):96-99.

[9] 吴刚,冯宗炜. 中国主要五针松群落学特征及其生物量的研究[J]. 生态学报,1995,15(3):260-267.

[10] 迟璐,王百田,曹晓阳,等. 山西中部油松生态系统碳储量研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(2):81-85.

[11] 王秀云,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.

[12] 沈文清,马钦彦,刘允芬. 森林生态系统碳收支状况研究进展[J]. 江西农业大学学报,2006,28(2):312-317.

[13] 杨洪晓,吴波,张金屯,等. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(2):172-177.

[14] 查同刚,张志强,朱金兆,等. 森林生态系统碳蓄积与碳循环[J]. 中国水土保持科学,2008,6(6):112-119.

[15] 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.

[16] 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):118-120.

[17] Gou Lihui, Nie Lishui, Sun Zhaodi, et al. Characteristics of organic carbon and its relationship with nutrients in soils derived from different parent rocks in a Pinus tabulaeformis forest ecosystem [J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2013,11(3/4):2094-2099.

[18] 陈浩,莫江明,张炜,等. 氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响[J]. 生态学报,2012,32(21):6864-6879.

[19] 徐化成,孙肇凤,郭广荣,等. 油松天然林的地理分布和种源区的划分[J]. 林业科学,1981(3):258-270.

[20] 高培鑫,聂立水,吴记贵,等. 北京松山自然保护区天然油松林土壤养分与坡位关系的研究[J]. 中国农学通报,2014,30(10):68-72.

[21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:25-38.
[22] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京松山 5 种天然纯林枯落物及土壤水文效应研究[J].内蒙古农业大学学报,2013,34(3):65-70.
[23] 王效科,冯宗炜,欧阳志云.中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J].应用生态学报,2001,12(1):13-16.
[24] 赵敏,周广胜.中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析[J].地理科学,2004,24(1):50-54.
[25] 马钦彦,陈遐林,王娟.华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J].北京林业大学学报,2002,24(5):96-100.
[26] 罗云建.华北落叶松人工林生物量碳计量参数研究[D].北京:中国林业科学研究院,2007.
[27] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J].植物生态学报,2000,24(5):518-522.
[28] 邓蕾,上官周平.秦岭宁陕县森林植被碳储量与碳密度特征[J].西北植物学报,2011,31(11):2310-2320.
[29] 刘伟,程积民,陈芙蓉,等.黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J].草地学报,2011,19(3):425-431.
[30] 武小钢,郭晋平,杨秀云,等.芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量[J].生态学报,2011,31(11):3009-3019.
[31] 杨晓梅,程积民,孟蕾,等.不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征[J].中国农学通报,2010,26(9):132-135.
[32] Baties N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science,1996,47(2):151-163.
[33] 刘世荣,王晖,栾军伟.中国森林碳储量与土壤碳过程研究进展[J].生态学报,2011,31(19):5437-5448.
[34] 崔鸿侠,肖文发,潘磊,等.神农架巴山冷杉林土壤碳储量特征[J].林业科学,2012,48(11):107-111.
[35] Sykes M T, Prentice I C. Carbon storage and climate change in Swedish forests: A comparison of static and dynamic modelling approaches[M]// Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle. Springer Berlin Heidelberg, 1996:69-78.
[36] Nabuurs G J. Significance of wood products in forest sector carbon balances[M]// Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle. Springer Berlin Heidelberg, 1996:245-256.
[37] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon[J]. Nature, 2000, 403(6767):301-304.

(上接第 319 页)

[13] 国家林业局.中华人民共和国林业行业标准 LY/T1721-2008:森林生态系统服务功能评估规范[S].北京:中国标准出版社,2008.
[14] 石小亮,张颖,毛宇飞,等.基于层次分析法的伊春林区主导产业研究[J].四川农业大学学报,2015,33(1):93-98.
[15] Turner R K, Morse-Jones S, Fisher B. Ecosystem valuation[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010,1185(1):79-101.
[16] 石小亮,张颖.森林涵养水源研究综述[J].资源开发与市场,2015,31(3):332-336.
[17] Adger W N, Moran D. Total economic value of forests in Mexico[J]. Social Science Electronic Publishing, 1995,24(5):286-296.
[18] Anderson R C, Laband D N, Hansen E N, et al. Price premiums in the mist[J]. Forest Products Journal, 2005,55(6):19-22.
[19] 石小亮,张颖,韩争伟.森林碳汇计量方法研究综述:基于北京市的选择[J].林业经济,2014,36(11):44-49.
[20] 蒲实.论我国城市自来水价格形成的理论基础[J].价格理论与实践,2008(12):39-40.
[21] 马克思.资本论:第 1 卷[M].北京:人民出版社,1976.
[22] 石小亮,张颖,单永娟.云南省森林涵养水源价值核算[J].中国林业经济,2014(4):54-56.
[23] Awkerman J A, Marshall M R, Williams A B, et al. Assessment of indirect pesticide effects on worm-eating warbler populations in a managed forest ecosystem[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2011, 30(8):1843-1851.
[24] Asah S T, Blahna D J, Ryan C M. Involving forest communities in identifying and constructing ecosystem services: Millennium assessment and place specificity[J]. Journal of Forestry, 2012,110(3):149-156.
[25] 石小亮,陈珂,鲁晨曦.中国森林碳汇服务价值评价[J].中南林业科技大学学报:社会科学版,2015,9(5):27-33.
[26] 张翼飞. CVM 研究中支付意愿问卷“内容依赖性”的实证研究:以上海城市内河生态恢复 CVM 评估为例[J].中国人口·资源与环境,2012(6):170-173.