

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200145

基于 NbS 的北京市乔木林固碳能力分析

李宸宇¹ 朱建华^{1,2} 张 峰³ 李 奇¹ 田 宇¹ 肖文发^{1,2} 陈维强⁴

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 北京市林业碳汇工作办公室, 北京 100013; 4. 北京凯来美气候技术有限公司, 北京 100029)

摘要:【目的】乔木林生物物质碳汇是影响森林碳汇的重要组成部分, 是一种自然的气候解决方案, 在全球气候变化大背景下, 森林的固碳潜力一直被广泛关注, 本文以北京市为例, 分析不同的林业活动对乔木碳储量的影响。【方法】采用北京市森林资源设计调查数据, 利用 IPCC 材积源—生物量法估算北京市乔木林碳储量, 分析了 2009—2014 年北京市在森林转化、造林以及森林经营 3 种自然方案下碳储量的变化情况。【结果】(1)2009—2014 年北京市森林面积净增长 $8.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 碳储量净增量约 $1.45 \times 10^9 \text{ kg}$, 年均碳固持量为 $0.29 \times 10^9 \text{ kg/a}$ 。(2)2014 年北京市人工林总碳储量高于天然林, 且碳密度高于天然林。当前北京市森林龄级结构偏低龄化, 随着森林的自然生长, 仍有较大的碳固持潜力。在各个优势树种(组)中, 人工杨树林的固碳效率尤为突出, 远远高于其他优势树种。(3)山地森林活动强度较小, 森林经营区域占比较大, 城市森林变化剧烈, 受造林与森林转化等措施影响较大。2009—2014 年北京市由于森林转化为其他土地造成了 $1.06 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失, 造林带来了 $2.10 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持, 森林经营过程中有 $1.62 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持与 $1.21 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失, 森林经营活动的总碳储量净增量 $0.41 \times 10^9 \text{ kg}$, 避免森林转化可以带来 $1.17 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳汇。【结论】增加乔木林的固碳能力是应对气候变化的重要手段, 避免森林转化可以凭借较小的森林面积贡献较大的碳汇, 是一种低成本且效果显著的增汇方案。

关键词: 森林碳储量; 避免森林转化; 造林; 森林经营

中图分类号: S711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)06-0013-10

引文格式: 李宸宇, 朱建华, 张峰, 等. 基于 NbS 的北京市乔木林固碳能力分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13-22.
Li Chenyu, Zhu Jianhua, Zhang Feng, et al. Carbon sequestration capacity of Beijing arbor forest based on NbS [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 13-22.

Carbon sequestration capacity of Beijing arbor forest based on NbS

Li Chenyu¹ Zhu Jianhua^{1,2} Zhang Feng³ Li Qi¹ Tian Yu¹ Xiao Wenfa^{1,2} Chen Weiqiang⁴

(1. Institute of Forest Ecological Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China,
Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

3. Beijing Forestry Carbon Administration, Beijing 100013, China;

4. Beijing Glorian Climate Technology Consulting Co. Ltd, Beijing 100029, China)

Abstract: [Objective] Carbon sequestration of arbor forest biomass is an important component affecting forest carbon sink, and is a natural based climate solution. In the context of global climate change, the carbon sequestration potential of forests has been widely concerned. This paper takes Beijing as an example to analyze the influence of different forestry activities on forest carbon storage. [Method] Based on the survey data of forest resource design in Beijing, the carbon storage of tree layer forest in Beijing was estimated by

收稿日期: 2020-05-12 修回日期: 2020-08-27

基金项目: 北京市自然科学基金项目(5192020)。

第一作者: 李宸宇。主要研究方向: 生态系统服务。Email: leobaobao123@hotmail.com 地址: 100091 北京市海淀区东小府 1 号中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所。

责任作者: 朱建华, 博士, 副研究员。主要研究方向: 气候变化与森林。Email: zhucool@caf.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

IPCC volume-biomass method. The change of carbon storage under three natural schemes of deforestation, afforestation and forest management in Beijing from 2009 to 2014 was analyzed. [Result] (1) From 2009 to 2014 in Beijing, the net increase of forest area in Beijing was 8.35×10^4 ha, the net increase of carbon storage was about 1.45×10^9 kg, and the average annual carbon sequestration was 0.29×10^9 kg/year. (2) In 2014, the total carbon storage of artificial forest in Beijing was higher than that of natural forest, and the carbon density was higher than that of natural forest. The forest age structure in Beijing was getting older and with the natural growth of forest, there was still a great potential for carbon sequestration. Among the dominant tree species (groups), the carbon sequestration efficiency of artificial poplar forest was particularly prominent, which was much higher than that of other dominant tree species. (3) The intensity of mountain forest activity was small, the forest management area accounted for a large proportion, the urban forest changed violently, and was greatly affected by afforestation and deforestation. From 2009 to 2014 in Beijing, deforestation into other lands caused a carbon loss of 1.06×10^9 kg; afforestation caused a carbon sequestration of 2.10×10^9 kg; there was a carbon sequestration of 1.62×10^9 kg and a carbon loss of 1.21×10^9 kg in forest management; the net increment of total carbon storage was 0.41×10^9 kg. Avoiding deforestation can bring 1.17×10^9 kg carbon sink. [Conclusion] Increasing forest carbon sequestration capacity is an important means to cope with climate change. Avoiding deforestation can contribute a large carbon sink with a small forest area, which is a low-cost and effective solution to increase forest carbon sink.

Key words: forest carbon storage; avoiding deforestation; afforestation; forest management

为应对全球气候变化,实现《巴黎协定》中在21世纪末将全球平均气温上升幅度控制在 2°C 以内,并且努力限制在工业化前水平的 1.5°C 以内的目标,节能减排已成为世界各个国家可持续发展的必要措施。土地利用的改变对减缓碳排放有着不可忽视的作用^[1],自从REDD+机制出台以来,森林在减缓气候变化中的作用受到广泛关注^[2]。而采用基于自然的措施(森林经营、避免森林转化、造林与再造林等)应对气候变化是一项经济、高效的举措。

基于自然的气候解决方案(NbS)是一种通过不断认识和了解自然规律,采用自然力量去解决问题的方法。在2019年联合国气候行动峰会上,NbS被列为联合国应对气候变化的九大行动之一^[3]。尽管NbS这一术语是近10年才提出的,但是过去人类其实已经开展了许多类似的实践,例如通过生态工程造林、营林与再造林来吸收温室气体应对气候变化,通过种植红树林修复海岸带等,这些都是基于自然的解决路径。而针对于复杂的城市生态系统,城市林业、海绵城市等理念也都是基于自然的改善人民生活质量的解决方案^[4]。有研究对20种涉及森林、草地、农田与水体等土地利用方案的自然应对气候变化方案的能力进行分析,结果显示到2030年,天然林恢复、减少毁林、森林经营与人工造林等措施是应对气候变化最有力的解决方案^[5]。假设在全球增加10亿 hm^2 的森林,大约可以将自19世纪以来人类排放所有 CO_2 总量的2/3吸收^[6]。

当前对森林生态系统碳储量的研究方法已较

为成熟。本文以自然的气候解决方案为视角,探讨2009—2014年北京市不同优势树种(组)森林碳储量的时空动态,探讨森林转化、造林与森林经营等林业活动在短期内对北京市森林碳储量、碳固持与碳损失的影响。

1 研究方法与数据来源

1.1 森林面积及其变化

北京市行政区划矢量数据来自森林资源规划设计调查数据,DEM数据来自地理空间数据云GDEMDEM 30 m分辨率数字高程数据。森林资源基础数据均来自于北京市2009年和2014年森林资源规划设计调查,北京市森林资源规划设计调查数据为北京市全覆盖的小班区划数据,矢量图斑最小单位为小班,数据属性包括地类、林地属性、海拔、地貌、坡向、坡度、土壤厚度、土壤侵蚀、经营类型、起源、植被总覆盖、生态重要性、生态脆弱性、优势树种、树种组成、林分造林年份、林分平均年龄、龄组、林分平均胸径、林分平均树高、郁闭度、林分每公顷株数、郁闭度、自然度、群落结构以及经济林树种、灌草植被类型、散生四旁树相关信息。根据森林小班面积确定森林面积,根据优势树种(组)划分为侧柏(*Platycladus orientalis*)、落叶松(*Larix spp.*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、桦木(*Betula spp.*)、栎树(*Quercus spp.*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、杨树(*Populus spp.*)、柳树(*Salix spp.*)、其他阔叶林、阔叶混交林与针阔混交林,并确定5个林龄组(幼龄林、

中龄林、近熟林、成熟林与过熟林)及起源(人工林与天然林),本研究森林仅涉及郁闭度 ≥ 0.2 的乔木林地,不包含其他灌木林与竹林地。

由于 2009 年与 2014 年森林小班区划范围不同,因此在进行空间叠加分析前,将森林小班矢量图斑通过面转栅格进行栅格化,采用 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 网格作为基本单位,然后进行空间叠加分析,以判断森林面积的变化。选取 3 种不同的自然解决方案措施,分别为森林转化、造林与森林经营。(1)森林转化:2009 年为森林,2014 年为其他土地利用类型;(2)造林:2009 年为其他土地利用类型,2014 年为森林;(3)森林经营:2009 年与 2014 年一直为森林。

对北京市 DEM 数据进行填洼后,选取海拔高度 $> 130\text{ m}$ 的地区,划定为北京市山地森林范围,其他地区为平原森林范围。数据的处理及制图均在 ArcGIS10.4 与 Rstudio 软件中完成。

1.2 森林碳储量、碳固持与碳损失

本文只讨论乔木层生物质碳储量,包括地上和地下生物量。采用 IPCC 材积源—生物量法^[7-9]估算

各个优势树种(组)小班的乔木碳储量:

$$C_t = V \times WD \times BEF \times (1 + RSR) \times CF \tag{1}$$

式中: C_t 为小班的碳储量(10^9 kg), V 为小班的蓄积量(m^3), WD 为树木的基本木材密度(t/m^3), BEF 为生物量扩展因子(无量纲), RSR 为根茎比, CF 为树种的含碳率(%)。具体生物量、碳计量参数按照不同优势树种(组)及不同林龄组划分,参数(表 1)来源于现有文献资料收集及野外实测数据整理^[10]。

$$C_d = \frac{C_t}{S} \tag{2}$$

式中: C_d 为小班平均碳密度(t/hm^2), S 为小班的面积(hm^2)。

$$\Delta C = \frac{C_{t_2} - C_{t_1}}{t_2 - t_1} \tag{3}$$

式中: ΔC 为年固碳量(10^9 kg/a),数值大小代表了固碳能力的强弱, t_1 , t_2 , C_{t_1} , C_{t_2} 分别对应不同两个时期与该时期的碳储量。

碳损失与碳固持现象分别对应同一地点两期数据碳密度下降与碳密度上升的情况。

表 1 北京市不同森林类型碳储量计算参数表
Tab. 1 Calculation parameters of carbon storage of different forest types in Beijing

树种 Tree species	BEF					RSR					WD	CF
	幼龄林 Young forest	中龄林 Middle-aged forest	近熟林 Near-mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Overmature forest	幼龄林 Young forest	中龄林 Middle-aged forest	近熟林 Near-mature forest	成熟林 Mature forest	过熟林 Overmature forest		
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	1.847	1.497	1.233	1.245	1.535	0.218	0.233	0.329	0.384	0.365	0.478	0.510
落叶松 <i>Larix</i> spp.	1.644	1.281	1.229	1.150	1.416	0.205	0.211	0.188	0.239	0.284	0.490	0.521
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	1.811	1.519	1.468	1.351	1.571	0.247	0.264	0.196	0.234	0.238	0.360	0.521
桦木 <i>Betula</i> spp.	1.526	1.395	1.252	1.109	1.180	0.229	0.279	0.235	0.190	0.212	0.541	0.491
栎类 <i>Quercus</i> spp.	1.380	1.327	1.360	1.474	1.587	0.260	0.275	0.410	0.281	0.153	0.676	0.500
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1.386	1.386	1.386	1.386	1.386	0.257	0.257	0.257	0.257	0.257	0.441	0.501
杨树 <i>Populus</i> spp.	1.496	1.369	1.390	1.460	1.441	0.259	0.227	0.171	0.209	0.149	0.378	0.496
柳树 <i>Salix</i> spp.	1.821	1.821	1.821	1.821	1.821	0.288	0.288	0.288	0.288	0.288	0.443	0.485
其他阔叶树 Other broadleaved species	1.547	1.495	1.480	1.487	1.514	0.319	0.324	0.330	0.308	0.280	0.513	0.495
阔叶混交林 Broadleaved mixed forest	1.547	1.495	1.480	1.487	1.514	0.319	0.324	0.330	0.308	0.280	0.513	0.495
针阔混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	1.620	1.474	1.423	1.407	1.512	0.287	0.295	0.299	0.300	0.285	0.489	0.502

注: BEF 为生物量扩展因子, RSR 为根茎比, WD 为树木的基本木材密度(t/m^3), CF 为树种的含碳率。下同。Notes: BEF is the biomass expansion factor, RSR is the ratio of root to shoot, WD is basic wood density of the tree (t/m^3), and CF is the carbon content of tree. The same below.

$$C_{AR} = \frac{C_{NMI} \times A_R}{A_M} + C_R \quad (4)$$

式中: C_{AR} 为避免森林转化的碳固持估计量(10^9 kg), C_{NMI} 为实际情况下森林经营的碳储量净增量(10^9 kg), C_R 为实际情况下森林转化造成的碳损失(10^9 kg), A_R 为森林转化面积(10^4 hm^2), A_M 为森林经营的面积(10^4 hm^2).

2 结果与分析

2.1 北京市森林碳储量变化情况

2009年北京市森林面积为 32.10×10^4 hm^2 , 2014年增加至 40.45×10^4 hm^2 , 5年间净增长 8.35×10^4 hm^2 , 年均增长 1.67×10^4 hm^2/a . 2014年与2009年相比, 北京市各个区县的森林面积和生物量碳储量均有所增加。其中面积增长最多的为怀柔区, 占5年内北京市森林面积总增量的22.9%, 其次是延庆区与通州区, 分别占比13%与11.7%(图1)。

2009年北京市森林(乔木层)碳储量为 4.96×10^9 kg, 平均碳密度为 15.45 t/hm^2 ; 2014年碳储量为 6.41×10^9 kg, 平均碳密度为 15.84 t/hm^2 . 5年内碳储量净增量为 1.45×10^9 kg, 年均碳固持量为 0.29×10^9 kg/a . 北京市各区森林碳储量增长占比较高的分别是顺义区(21.8%)、大兴区(15.6%)及昌平区(10%)。由图1可知, 密云区、顺义区、平谷区、昌平区、门头沟区及北京城区森林碳储量的增量占比高于森林面积增量占比, 以上区县的森林固碳能力相

对较好。

2.2 北京市森林碳密度变化情况

对北京市森林碳密度进行空间显示(图2a和图2b)。2009年北京市森林平均碳密度为 15.45 t/hm^2 , 其中山地森林平均碳密度为 12.27 t/hm^2 , 平原森林平均碳密度为 23.49 t/hm^2 . 2014年北京市森林平均碳密度为 15.84 t/hm^2 , 其中山地 12.71 t/hm^2 . 平原 22.71 t/hm^2 . 2014年北京市森林面积较2009年有所增加, 但西北和东南部分区域出现了森林面积增加, 但碳密度下降的情况。

将平均碳密度等级分为3类: 高碳密度(> 15 t/hm^2)、中碳密度($7 \sim 15$ t/hm^2)、低碳密度(< 7 t/hm^2)。由图3可知, 北京市山地森林5年内各碳密度等级面积均有所增长, 其中低碳密度、中碳密度和高碳密度的山地森林面积分别增长占面积总增长量的20.44%、52.46%和27.10%。北京市平原森林5年内各碳密度等级面积也均有所增长, 其中低碳密度、中碳密度和高碳密度的平原森林面积分别增长64.39%、4.97%和30.64%。平原森林面积总量在各个碳密度等级的面积均低于山地森林, 但两者分布情况不同。以2014年为例, 平原地区低、中、高碳密度等级的森林面积占比分别为36.93%、17.25%和45.82%, 而山地低、中、高碳密度等级的森林面积占比分别为24.19%、48.97%和26.84%。相比而言, 山地森林主要为中碳密度森林, 而平原森林高碳密度等级的面积占比较大。

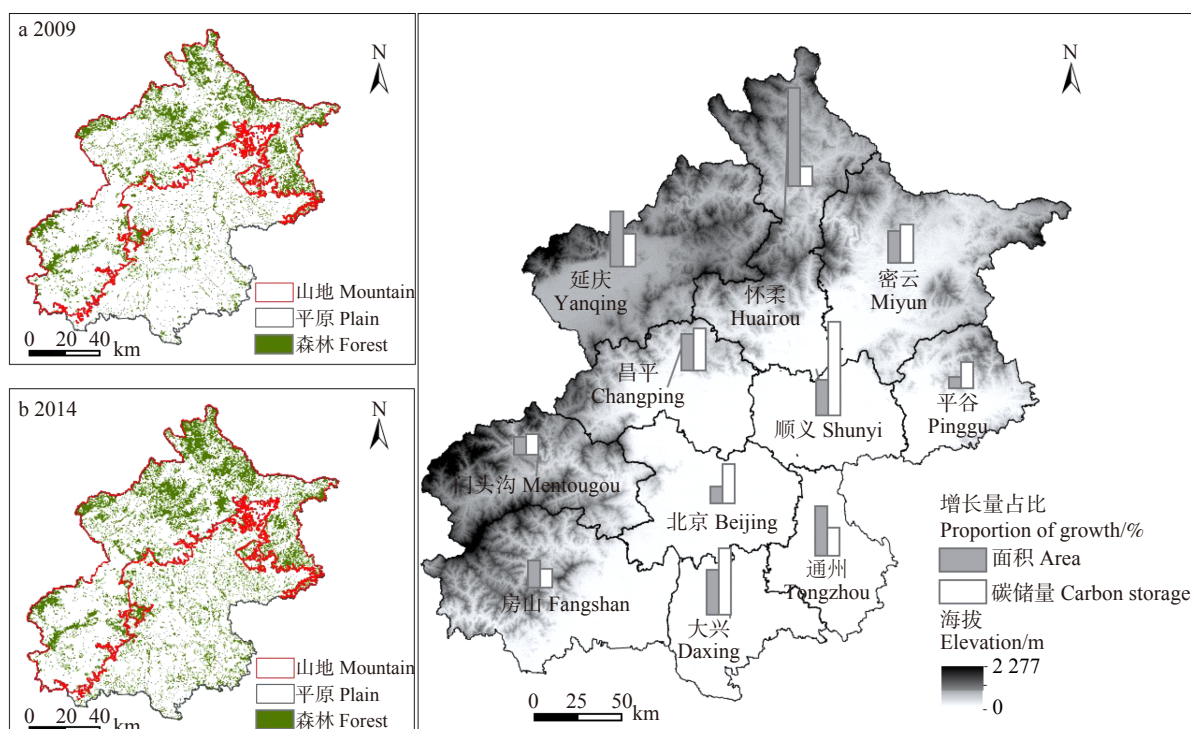


图1 北京市不同区县森林面积增长量占比及碳储量增长量占比

Fig. 1 Proportion of forest area increase and carbon storage increase in different districts in Beijing

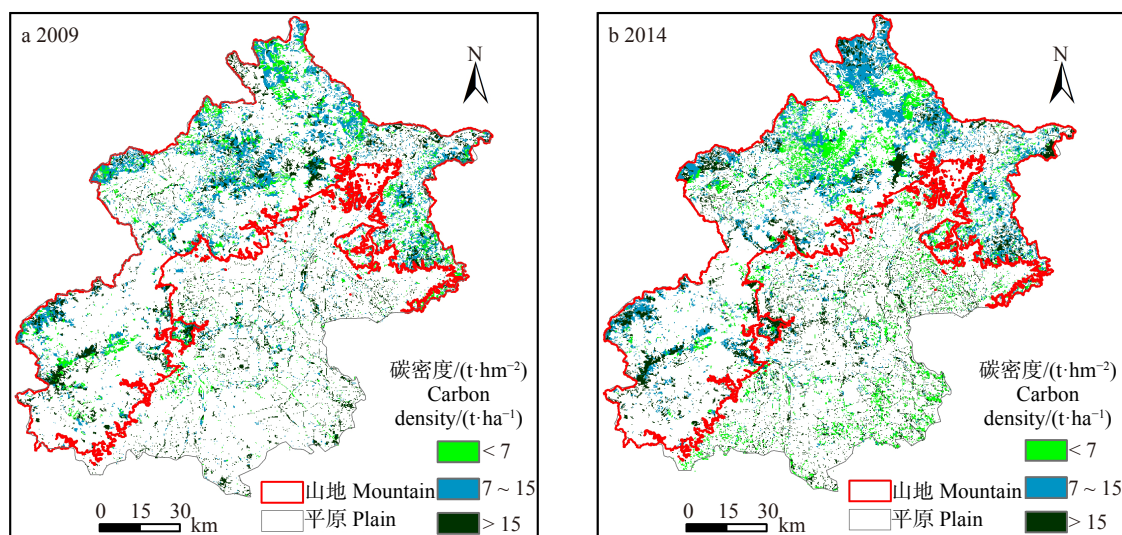


图2 北京市森林碳密度分布图

Fig. 2 Distribution map of forest carbon density in Beijing

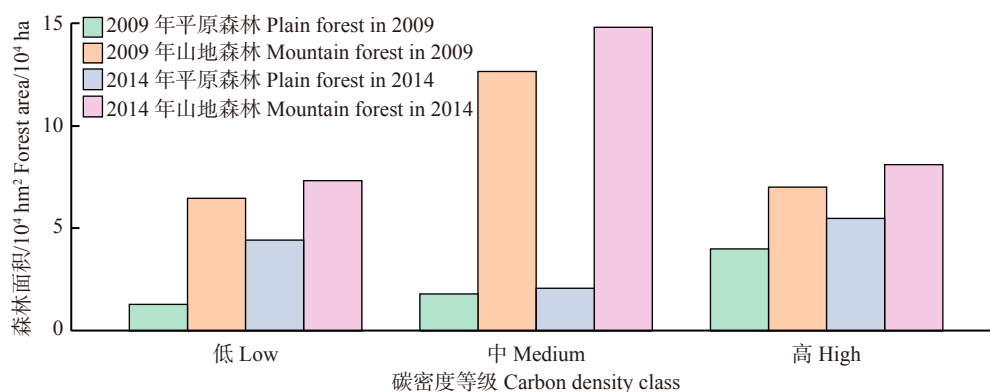


图3 不同碳密度等级森林面积统计图

Fig. 3 Statistical map of different classes of carbon density

2.3 不同起源、林龄森林面积及碳储量变化情况

北京市人工林广泛分布于山地与平原,天然林主要分布于山地,平原分布极少。对不同林龄的天然林、人工林面积、碳储量与碳密度进行分析。由表2可知,北京市森林以人工林为主,2009年和2014年人工林面积占比分别为54.86%和55.55%。总体上5年内人工林与天然林面积均有所增加,人工林面积增量为 $0.97 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$,天然林增量为 $0.70 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$,5年内总碳储量分别增加 $1.02 \times 10^9 \text{ kg}$ 与 $0.43 \times 10^9 \text{ kg}$,平均碳密度变化为 $0.15 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 与 $-0.02 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。北京市人工林碳储量和平均碳密度均有所增长,而天然林尽管碳储量保持增长,但平均碳密度并未明显增长反而下降。在人工林中,过熟林碳密度明显高于其他林龄组,但中幼龄林占比较大,且过熟林面积有轻微的减少。天然林同样中幼龄林占比较大,所有林龄组面积均有所上升,但天然林不同林龄组间碳密度差别不明显。

北京市人工林中,成熟林和过熟林平均碳密

显高于其他龄林组。由于北京市人工林当前林龄结构偏低龄化,2014年幼龄林、中龄林和近熟林总面积占比82.96%,未来随着平均林龄的增长,平均碳密度仍有较大的增长潜力,总碳储量也将进一步增加。而天然林各林龄组森林面积均在增长,但平均碳密度变化不大,对于北京市森林碳储量增长的贡献远不及人工林。

2014年北京市人工林平均碳密度为 $18.35 \text{ t}/\text{hm}^2$,天然林平均碳密度为 $12.74 \text{ t}/\text{hm}^2$,人工林平均碳密度整体高于天然林。对比全国其他省份的研究结果可知(表3),北京市森林平均碳密度远低于全国水平^[9],特别是天然林碳密度。北京市与山东省人工林碳密度高于天然林碳密度,这与全国其他地区有所不同。但二者不同之处在于山东省人工林占比非常大,高达全省森林的80.72%,天然林面积占比相对较低。而北京市人工林面积占比达到55.55%,且人工林碳密度已较接近全国平均水平,这更加突出了北京市天然林的固碳能力较低,而人工林对于北京

表 2 不同林龄人工林、天然林面积碳储量统计表

Tab. 2 Statistical table of carbon storage in plantation and natural forest area of different forest ages

起源 Origin	林龄 Stand age	2009			2014		
		面积/10 ⁴ hm ² Area/10 ⁴ ha	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁹ kg	碳密度/(t·hm ⁻²) Carbon density/ (t·ha ⁻¹)	面积/10 ⁴ hm ² Area/10 ⁴ ha	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁹ kg	碳密度/(t·hm ⁻²) Carbon density/ (t·ha ⁻¹)
人工林 Plantation	幼龄林 Young forest	6.11	0.90	14.77	9.94	1.17	11.78
	中龄林 Middle-aged forest	5.33	0.95	17.79	5.77	1.27	21.94
	近熟林 Near-mature forest	2.87	0.45	15.76	2.93	0.66	22.61
	成熟林 Mature forest	2.75	0.56	20.36	3.27	0.76	23.30
	过熟林 Overmature forest	0.57	0.24	42.15	0.56	0.27	46.97
	合计 Total	17.61	3.10	17.62	22.47	4.12	18.35
天然林 Natural forest	幼龄林 Young forest	7.76	0.90	11.64	8.10	0.87	10.80
	中龄林 Middle-aged forest	5.02	0.65	13.04	7.22	1.02	14.15
	近熟林 Near-mature forest	1.16	0.20	17.53	1.51	0.22	14.47
	成熟林 Mature forest	0.49	0.09	18.86	1.03	0.16	15.40
	过熟林 Overmature forest	0.06	0.01	13.77	0.13	0.02	13.37
	合计 Total	14.49	1.86	12.85	17.98	2.29	12.74

表 3 全国不同地区人工林、天然林森林碳密度对比

Tab. 3 Comparison of carbon density of plantations and natural forests in different regions

地区 Region	碳密度/(t·hm ⁻²) Carbon density/(t·ha ⁻¹)			年份 Year	参考文献 Reference
	人工林 Plantation	天然林 Natural forest	合计 Total		
河南 Henan	22.49	26.72	24.31	2013	[11]
陕西 Shaanxi	18.30	35.45	30.92	2004	[12]
山东 Shandong	27.89	17.56	27.24	2013	[13]
安徽 Anhui	19.04	22.60	20.81	2014	[14]
全国 Nationwide	18.90	44.63	37.28	2010	[9]
北京 Beijing	18.35	12.74	15.85	2014	本文 This study

市森林固碳更加重要。

2.4 不同优势树种（组）的碳储量与碳密度

2009—2014 年间(表 4)，北京市人工林中以油松的面积最大，而面积增长最快的是阔叶混交林，5 年间面积增长为 $0.47 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ 。人工林碳储量最高且增长速度最快的是杨树林，远超出其他优势树种(组)。2009—2014 年间，北京市杨树人工林碳储量由 $0.88 \times 10^9 \text{ kg}$ 增加至 $1.54 \times 10^9 \text{ kg}$ ，5 年内总碳储量增加 $0.66 \times 10^9 \text{ kg}$ ；平均碳密度由 29.23 t/hm^2 增加至 40.64 t/hm^2 ，年均增长 $2.28 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，2014 年人工杨树林碳密度也明显高于其他人工林优势树种(组)。

2009—2014 年，北京市天然林中栎类的面积最大，且面积增长速度最快，为 $0.62 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ ，占到天然林面积增长总量的 91.79%，总碳储量增加了 $0.38 \times 10^9 \text{ kg}$ 。多个优势树种的天然林呈现出面积减少、平均碳密度下降，面积和碳密度同时保持增长的

只有桦木和针阔混交林。整体而言，天然林面积增加对北京市森林碳储量的贡献并不明显，5 年内天然林面积增加了 $3.41 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，总碳储量仅增加 $0.41 \times 10^9 \text{ kg}$ 。与此同时，北京市人工林中杨树林面积增长总量为 $0.78 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，总碳储量却增加了 $0.66 \times 10^9 \text{ kg}$ ，比所有天然林碳储量总增量还要多。

2.5 森林转化、造林与森林经营对北京市森林碳储量的影响

通过对比 2014 年与 2009 年北京市森林分布格局，分析土地利用变化中森林的转入与转出情况，将自然的解决方案分为 3 类基本措施：森林转化、造林与森林经营。

如图 4 所示，a 表示森林转化为其他土地所造成的碳损失分布状况；b 表示造林碳固持分布状况；c 表示森林经营过程中的碳密度变化状况。值得注意的是，森林经营对碳密度的影响存在较大的空间异质性，并非全部森林经营区域的碳密度均上升，西

表 4 不同优势树种森林面积及碳储量统计表

Tab. 4 Statistical table of forest area and carbon storage of different dominant tree species

起源 Origin	优势树种 Dominant tree species	2009			2014		
		面积/10 ⁴ hm ² Area/10 ⁴ ha	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁹ kg	碳密度/(t·hm ⁻²) Carbon density/ (t·ha ⁻¹)	面积/10 ⁴ hm ² Area/10 ⁴ ha	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁹ kg	碳密度/(t·hm ⁻²) Carbon density/ (t·ha ⁻¹)
人工林 Plantation	油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	5.00	0.56	11.29	5.52	0.56	10.18
	杨树 <i>Populus</i> spp.	3.01	0.88	29.23	3.79	1.54	40.64
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	2.14	0.27	12.45	3.04	0.47	15.31
	阔叶混交林 Broadleaved mixed forest	1.96	0.36	18.33	4.33	0.80	18.35
	针阔混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	1.91	0.23	12.13	1.84	0.27	14.72
	其他阔叶林 Other broadleaved forest	1.21	0.36	29.48	1.77	0.17	9.37
	栎类 <i>Quercus</i> spp.	0.78	0.12	15.14	0.09	0.01	12.53
	落叶松 <i>Larix</i> spp.	0.75	0.14	18.70	0.62	0.11	18.22
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.63	0.09	13.80	0.85	0.10	12.26
	柳树 <i>Salix</i> spp.	0.24	0.10	41.33	0.61	0.10	15.91
天然林 Natural forest	栎类 <i>Quercus</i> spp.	5.62	0.80	14.20	8.75	1.18	13.50
	阔叶混交林 Broadleaved mixed forest	3.43	0.41	11.84	3.20	0.46	14.35
	其他阔叶林 Other broadleaved forest	1.94	0.22	11.42	1.12	0.16	14.22
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	1.18	0.11	9.39	1.94	0.14	7.01
	杨树 <i>Populus</i> spp.	0.72	0.08	11.81	0.50	0.04	9.06
	桦木 <i>Betula</i> spp.	0.60	0.11	18.78	0.67	0.13	19.24
	针阔混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	0.57	0.07	11.66	0.68	0.08	12.27
	油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	0.43	0.06	14.12	1.03	0.08	8.04

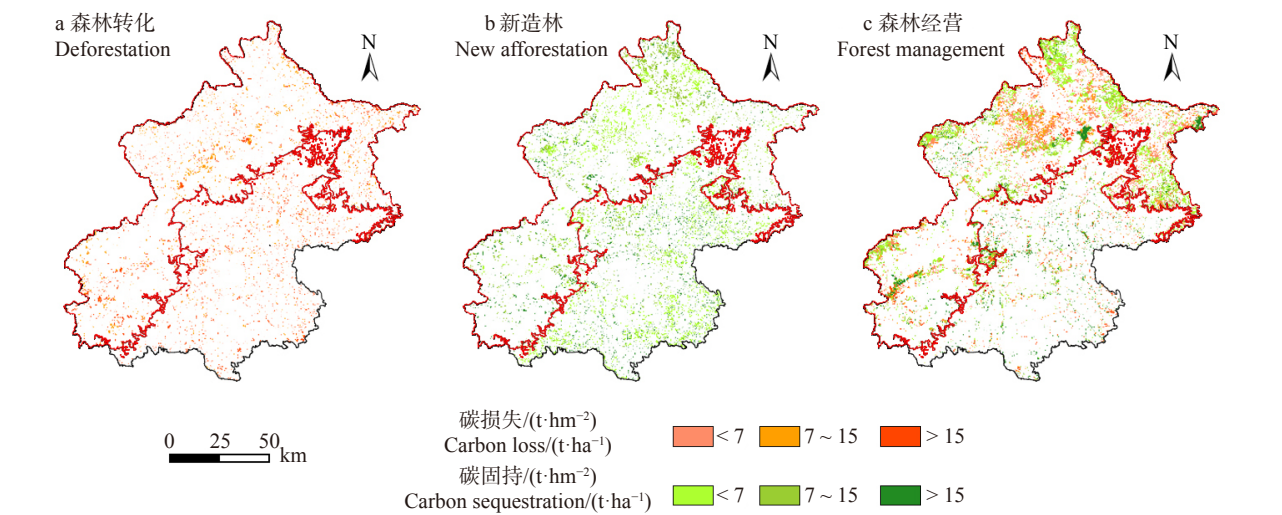
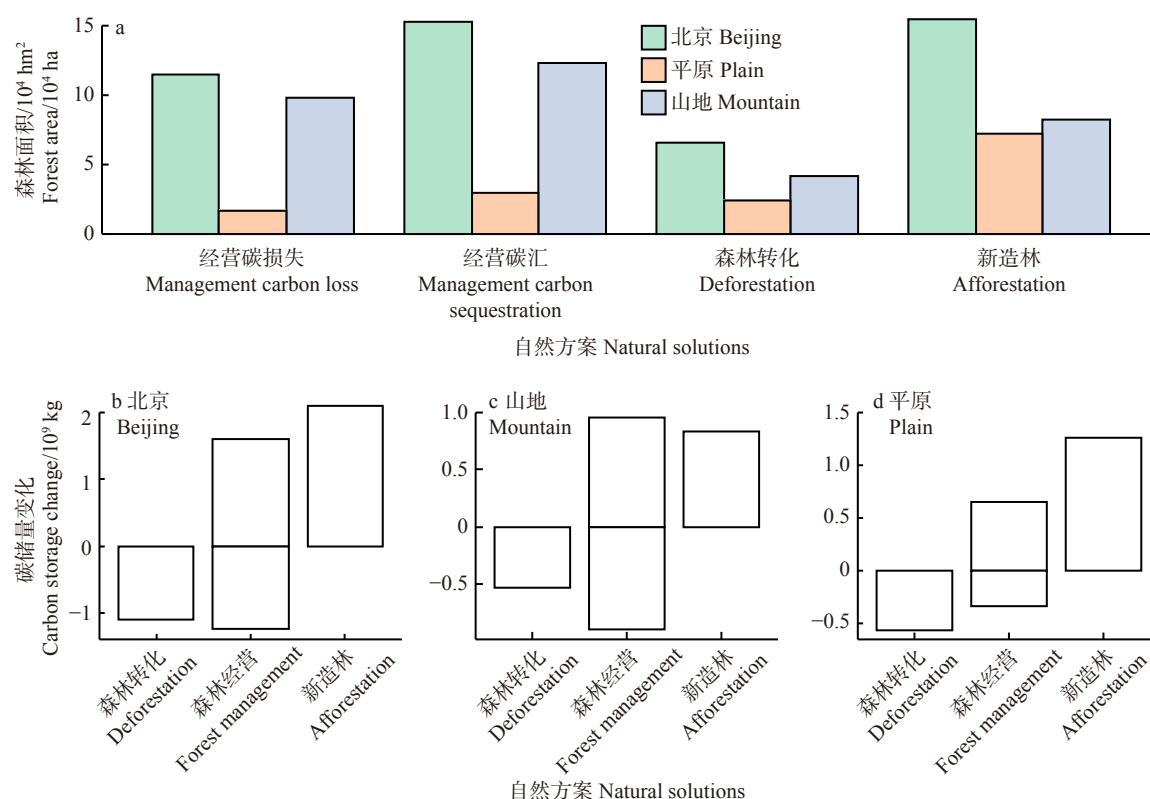


图 4 不同方案下森林碳密度变化图
Fig. 4 Variation of forest carbon density under different measures

北部山地森林出现较大区域碳密度下降情况。

2009—2014 年间北京市森林转化为其他土地的面积 $1.36 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$, 造林面积为 $3.04 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$, 森林经营面积为 $25.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (图 5)。森林经营在空间上同时存在碳固持与碳损失现象, 其中平均碳密度提高的森林经营面积为 $14.69 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 平均碳密度减小的森林经营面积为 $10.97 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。5 年内森林转化共造成了 $1.06 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失, 造林带来了 $2.10 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持, 森林经营过程中有 $1.62 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持与 $1.21 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失, 净



a. 为森林面积变化, b~d. 为不同地区碳储量变化。a represents the change of forest area, b~d represent the change of carbon storage in different areas.

图5 3种自然方案面积、碳储量变化统计图

Fig. 5 Statistical figure of total carbon storage change of three nature measures

增量为 $0.41 \times 10^9 \text{ kg}$ 。对森林经营过程中表现为碳损失的森林面积进一步分析发现, 2009 至 2014 年间平均林龄降低的森林面积占到 15.95%, 优势树种发生变化的森林面积占森林经营碳损失面积的 18.57%。上述情况可能是由于采伐或树种更新造成的结果, 但仍提示存在其他重要的因素影响森林经营过程中的平均碳密度变化。

山地森林的 3 种自然的解决方案中, 森林经营面积 $21.04 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占到全北京市森林经营面积的 81.99%; 造林面积 $8.03 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 森林转化面积仅为 $4.34 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。2009—2014 年间, 山地造林带来了 $0.83 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持, 森林转化造成了 $0.52 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失, 森林经营造成了 $0.96 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持与 $0.88 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失, 净增量为 $0.08 \times 10^9 \text{ kg}$ 。总体而言, 北京市山地森林中森林转化与造林等人为干扰活动不是很剧烈, 但是森林经营活动造成的碳损失较大, 占到 2009—2014 年北京市森林总碳损失的 38.36% (包括森林转化)。

北京市平原森林主要为人工林, 3 种自然的解决方案中造林面积占比最大, 2009—2014 年间总造林面积为 $7.17 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占到同期北京市总造林面积的 46.86%。其次为森林经营, 面积为 $4.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。森林转化面积最小, 为 $2.46 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。2009—2014 年间造林活动对北京市平原森林碳储量变化的影响

最大, 共增加了 $1.27 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持; 森林转化造成了 $0.54 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失; 森林经营造成了 $0.66 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳固持与 $0.33 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳损失, 碳储量净增量为 $0.33 \times 10^9 \text{ kg}$, 对平原地区碳储量变化影响较小。

在当前北京市森林经营的水平下, 假定 2009—2014 年间避免森林转化现象的发生, 会使北京市森林面积总量增加 $6.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 同时增加 $1.17 \times 10^9 \text{ kg}$ 的碳储量。实际情况下 2009—2014 年间由造林与森林经营带来的碳固持量分别为 $2.10 \times 10^9 \text{ kg}$ 与 $0.41 \times 10^9 \text{ kg}$ 。避免森林转化、造林和森林经营 3 种方案 5 年内对森林平均碳密度贡献分别为 17.21、13.82 与 1.59 t/hm^2 。这表明避免森林转化是当前北京市效果较好的森林固碳方案。

3 讨论与讨论

3.1 结论

2009—2014 年间, 北京市森林面积净增长 $1.67 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$, 森林生物质碳储量净增长 $1.45 \times 10^9 \text{ kg}$, 年均碳固持量为 $0.29 \times 10^9 \text{ kg/a}$ 。

北京市天然林主要分布于山地森林, 人工林同时广泛存在于山地与平原。北京市山地森林面积与碳储量总量大, 但碳密度低于平原森林。北京市人工林面积总量高于天然林, 且人工林平均碳密度明

显高于天然林,特别是人工过熟林,拥有较高的碳密度。在不同森林类型中,人工林杨树林的碳储量和平均碳密度增长最快,固碳效果尤为突出。随着林木的生长成熟,北京市森林碳储量仍有较强的增长潜力。

2009—2014年间,北京市由于森林转化造成了 1.06×10^9 kg 的碳损失,但通过造林带来了 2.10×10^9 kg 的碳固持。森林经营过程中有 1.62×10^9 kg 的碳固持与 1.21×10^9 kg 的碳损失,碳储量净增量 0.41×10^9 kg。山地森林以森林经营活动为主,森林转化和造林活动强度较低,但森林经营过程中碳损失现象严重。总体上山地森林碳储量有所增加,但平均碳密度略有降低。平原森林碳储量和平均碳密度增加明显,造林活动的贡献占据主导作用。北京市采取减少森林转化是一种十分有效的增汇措施,其次是造林。对山地森林应主要加强科学的森林经营与管理,并尽可能避免毁林;平原地区应进一步扩大造林范围,并尽可能避免森林转化的发生。

3.2 讨论

森林恢复目前仍然是应对气候变化的热点话题,如果将全球所有可造林地全部覆盖上森林,将会产生巨大的碳汇,成为迄今为止最为有效的气候变化应对措施^[15]。但是树木作为一种容易受到干扰的碳汇,在出现森林火灾、商业性采伐、开发性林地征占等干扰的情况下,较为容易从碳汇转变为碳源,这将失去森林应对气候变化的优势。

对比本文对几种自然解决方案的研究结果发现,2009—2014年间北京市平原地区造林面积只占山地造林面积的89.29%,固碳量却是山地造林的153.01%;而平原地区森林转化面积只占到山区森林转化面积的56.68%,所造成的碳损失量却是山地森林的103.84%。平原森林经营面积仅占山地森林经营面积的21.96%,但平原森林经营造成的碳储量净增量是山地森林经营412.50%。这一方面说明平原地区森林乔木林拥有较强的固碳能力,同时也表明北京市需要重点解决山地森林的经营管理问题。

综合表明,北京市平原森林面积变化相比山地森林更加剧烈,平原地区森林转化与造林对北京市森林碳储量产生了较大的影响,是北京市森林碳储量变化的主要原因。北京市山地森林的造林与森林转化活动较弱,但森林经营过程中的碳损失较大,造成北京市山地森林碳储量增长效果并不明显。

对于北京这样的国际化大都市而言,未来可造林地面积有限,城市扩张与基础建设还可能发生土地利用竞争。当造林面积趋于饱和,北京市森林碳汇的增长则只能由加强森林经营与避免森林转化来继续保持。从这个角度考虑,要使北京市森林乔木

林成为应为气候变化的有效手段,避免森林转化与加强森林经营比造林更为重要。应在大力发展造林的基础上,加大森林保护力度、提高森林经营水平,进行科学的森林生态系统管理,尽可能避免在森林经营过程中出现碳损失的现象。

由于数据限制,本文仅分析了2009—2014年间的森林转化、造林与森林经营过程,无法从较长时间段的角度来考虑土地利用类型的变化,因而可能会导致上述3种活动的面积不够准确。例如:由于森林转出的土地利用类型未知,可能会将暂时的采伐迹地划入到“森林转化”面积,而并未将其划分到“森林经营”的范畴。研究还发现,北京市森林经营过程中存在较大面积的碳损失情况,通过分析表明平均林龄的降低与优势树种(组)的变化是可能的原因,但并不是其主要因素。由于数据限制,本文未能明确北京市森林经营过程中碳损失的其他主要驱动因素。此外,2012年以来北京市实施了大规模的平原造林工程,造林过程中使用了大量的大树移植。很显然这部分移植来的生物量碳并不能全部视为这一时期内造林所形成的碳固持量,一部分是碳的空间转移的结果。因此本文可能在一定程度上高估了北京市造林实际的碳贡献。

参考文献

- [1] Roe S, Streck C, Obersteiner M, et al. Contribution of the land sector to a 1.5 °C world[J]. *Nature Climate Change*, 2009, 9(11): 817–828.
- [2] 郝婷婷. “后京都”时代 REDD+ 机制的可行性[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(6): 114–117.
Xi T T. Feasibility of the REDD+ mechanism in the Post-Kyoto times[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(6): 114–117.
- [3] 胡文娟. 应对气候危机需要自然的力量[J]. *可持续发展经济导刊*, 2019(11): 15–18.
Hu W J. Dealing with the climate crisis requires nature-based solutions[J]. *China Sustainability Tribune*, 2019(11): 15–18.
- [4] Escobedo F, Giannico V, Jim C, et al. Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: nexus or evolving metaphors?[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019(37): 3–12.
- [5] Griscom B W, Adamsa J, Ellis P W, et al. Natural climate solutions[J]. *PNAS*, 2017, 114(44): 11645–11650.
- [6] 李艳芳. 落实 NBS 的实际行动: 深度发掘林业碳汇的价值[J]. *可持续发展经济导刊*, 2019(11): 19–20.
Li Y F. Exploring the value of forestry carbon sink is an important action to implement NbS[J]. *China Sustainability Tribune*, 2019(11): 19–20.
- [7] 李海奎, 赵鹏祥, 雷渊才, 等. 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较[J]. *林业科学*, 2012, 48(5): 44–52.
Li H K, Zhao P X, Lei Y C, et al. Comparison on estimation of

- wood biomass using forest inventory[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(5): 44–52.
- [8] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: agriculture, forestry and other land use[R]. Tokyo: Institute of Global Environment Strategies, 2006.
- [9] 李奇, 朱建华, 冯源, 等. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 71–78.
- Li Q, Zhu J H, Feng Y, et al. Carbon storage and carbon sequestration potential of the forest in China[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(3): 71–78.
- [10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中国温室气体清单研究 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- National Development and Reform Commission. The People's Republic of China national greenhouse gas inventory[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [11] 贾松伟, 郭蔓蔓. 2013 年河南省乔木林植被碳储量特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 35–40.
- Jia S W, Guo M M. Carbon storage characteristics of arboreal forests vegetation of Henan Province in 2013[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 35–40.
- [12] 马琪, 刘康, 张慧. 陕西省森林植被碳储量及其空间分布[J]. *资源科学*, 2012, 34(9): 1781–1789.
- Ma Q, Liu K, Zhang H. Carbon storage by forest vegetation and its spatial distribution in Shanxi[J]. *Resources Science*, 2012, 34(9): 1781–1789.
- [13] 张春华, 居为民, 王登杰, 等. 2004–2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1739–1749.
- Zhang C H, Ju W M, Wang D J, et al. Biomass carbon stocks and economic value dynamics of forests in Shandong Province from 2004 to 2013[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1739–1749.
- [14] 王会荣, 李爱琴, 王晶晶, 等. 基于第 8 次森林资源清查数据的安徽森林碳储量特征研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(7): 78–86.
- Wang H R, Li A Q, Wang J J, et al. Characteristics of forest carbon storage in Anhui based on the 8th forest inventory data[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(7): 78–86.
- [15] Jean-Francois B, Yelena F, Garcia C, et al. The global tree restoration potential[J]. *Science*, 2019, 365: 76–79.
- (责任编辑 范 娟
责任编委 余新晓)