

DOI: 10.5846/stxb202103290823

毛军, 田赞, 谢军平, 赵菁, 马莉, 查天山. 北京市 4 种城市功能区森林植被涵养水源功能评价及价值估算. 生态学报, 2021, 41(22): 9020-9028.

Mao J, Tian Y, Xie J P, Zhao J, Ma L, Zha T S. Evaluation and value estimation of water conservation function of forest vegetation of four urban functional areas in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9020-9028.

北京市 4 种城市功能区森林植被涵养水源功能评价及价值估算

毛 军¹, 田 赞¹, 谢军平², 赵 菁², 马 莉², 查天山^{1,*}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 北京市园林审计工程有限公司, 北京 100012

摘要:本研究对北京市首都功能核心区、城市功能拓展区、城市发展新区和生态涵养发展区进行林分涵养水源功能评价及价值估算,旨在探究提升城市功能区森林水源涵养功能较优林分配置模式。结果表明:(1)北京市森林植被面积 2009 年为 4.00×10^5 hm^2 , 2014 年为 4.59×10^5 hm^2 , 北京市 NDVI 平均值 2009 年为 0.331, 2014 年为 0.708, 北京市森林植被面积总体呈增加趋势。北京市 2014 年林地绿化调节水量较 2009 年降低了近 1/3, 2014 年水源涵养功能价值量较 2009 年分别减少了 22.08% 和 8.24%。(2)生态涵养发展区水源涵养功能年平均能力最强 (2.88×10^8 m^3/a), 城市发展新区水源涵养功能年平均能力次之 (1.72×10^8 m^3/a), 而首都功能核心区水源涵养功能年平均能力相对最弱, 仅 1.05×10^6 m^3/a 。在针叶林、阔叶林和混交林三种林分类型中, 2014 年混交林水源涵养功能价值量较 2009 年增加 5.13%, 而阔叶林和针叶林分别减少 34.93% 和 55.55%。(3)培育纯林, 提高森林覆盖率, 对于调节水土资源和保护生态环境具有非常重要的生态意义, 而从森林水源涵养功能实物量和价值量考虑, 认为混交林比纯林具有更强的水源涵养功能和较优的经济价值。在城市特定的条件下, 建立生态与景观相协调的人工植物群落使城市土地资源的利用达到生态、社会、经济三大效益的最佳结合, 是提高城市绿地质量的关键所在。

关键词:涵养水源功能; 调节水量; 实物量; 价值估算; 森林经营

Evaluation and value estimation of water conservation function of forest vegetation of four urban functional areas in Beijing

MAO Jun¹, TIAN Yun¹, XIE Junping², ZHAO Jing², MA Li², ZHA Tianshan^{1,*}

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Landscape Design Engineering Limited, Beijing 100012, China

Abstract: In this study, an optimal forest configuration for water conservation function was explored, which this optimal forest configuration could guarantee the forest vegetation can be give full play to water and soil conservation function. The remote sensing image data in 2009 to 2014 of Beijing and the data of Beijing forest resources inventory of 2009 and 2014 were used to carry out the evaluation and value estimation of water conservation function of typical forest (coniferous, broad-leaved and mixed forests) with GIS software in this paper, where in capital function core area, urban function development area, new urban development area and ecological conservation development area in Beijing. The evaluated and estimated results show: (1) the forest vegetation area in Beijing was 4.00×10^5 hm^2 in 2009 and 4.59×10^5 hm^2 in 2014. The average Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Beijing was 0.331 in 2009 and 0.708 in 2014. The forest vegetation area in Beijing presented an overall increasing trend. The regulated water volume of forest land greening in Beijing in 2014 was

基金项目:国家重点研发计划资助(2020YFA0608100)

收稿日期:2021-03-29; 接收日期:2021-08-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianshanzha@bjfu.edu.cn

nearly 1/3 lower than that in 2009, and the value of water conservation function in 2014 was 22.08% and 8.24% lower than that in 2009, respectively. (2) The annual average capacity of water conservation in the ecological conservation development area is the strongest ($2.88 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$), followed by the annual average capacity of water conservation in the new urban development area ($1.72 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$), while the annual average capacity of water conservation in the capital core area is the weakest ($1.05 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$). Among the coniferous, broad-leaved and mixed forests, the value of water conservation function of mixed forest is increasing, and its value of this forest type increased by 5.13% in 2014 compared with that in 2009, while the value of water conservation function of broad-leaved forest and coniferous forest decreased by 34.93% and 55.55%, respectively. (3) Cultivating pure forest to increase the forest cover rate has a very important ecological significance for regulating soil and water resources and protecting ecological environment, but considering the amount and value of forest water conservation function, this study concluded that the mixed forest had stronger water conservation function and better economic value than pure forest. Under the specific conditions of the city, the artificial plant community coordinated with ecology and landscape can make the utilization of urban land resources to reach the ecological society. The best combination of the three economic benefits is the key to improve the quality of urban green space.

Key Words: water conservation function; regulating water volume; quantities; value estimation; forest management

城市绿化是生态文明建设的重要载体和表现形式,是城市生态系统初级生产者和城市生态平衡的调控者,执行若干生态功能,具有稳定、持续的生态环境效应,是现代城市建设中不可缺少的重要内容^[1-2]。城市绿化的生态环境包括净化城市环境、改善空气质量^[3]、缓解城市热岛效应^[4]、调节“小气候”^[5]、防风固沙,保持水土,减少自然灾害等生态效益^[6]。城市森林建设并非简单的植树造林,更不是单一的追求景观绿化,应根据城市各功能区自身的特殊性以及生态功能为导向实施城市绿化工作^[7]。以往研究常以公共绿地、道路绿地、单位附属绿地、居住区绿地为单元目标进行城市水源涵养功能研究^[8-9],多伴有景观倾向,而基于城市功能区开展植被配置的研究相对还较少。目前,城市区域被功能化分区后引起的城市生态系统服务功能变化尚不明确。在经济、生态与环境共同需求发展趋势下,如何科学合理、有针对性地制定城市生态管理政策对促进城市生态、社会、经济发展具有重要现实意义。

关于水资源的利用和保护一直是国内外学者开展生态研究的重要科学问题^[10-13],城市是人口高度聚集的自然区域,水资源的利用和保护显得尤为重要^[14-15]。森林植被是保护和调节水资源的重要调控层^[16],随着生态文明建设的持续推进,当前“碳中和”的生态重要性逐渐被人们高度关注,以水源涵养功能为导向的城市森林植被迫切得到更加完善、合理、高效的管理政策,以提高城市森林碳源收支平衡过程^[17]。关于提高森林生态主导功能的植被配置优化研究,先前学者得到较为系统的研究理论。喻阳华等人^[18]对赤水河上游主要森林类型水源涵养功能评价,提出低持水、中低持水、中持水和高持水等四种类型,并强调恢复森林水源涵养功能的核心是调整林冠组成和结构。侯贵荣等人^[19]对黄土高原典型林分研究结果表明单一树种纯林向多树种混交林改造能提高森林植被的水源涵养功能。孟楚等人^[20]对北京八达岭林场水源涵养林研究结果表明具有起源为天然,异龄,混交林,郁闭度在 0.6—0.8 的水源涵养林的生态功能最优。Schneider^[21]研究结果表明植被恢复方式、生长年限、土壤类型、气候条件、地形等对生态系统功能影响均较为显著。可见,先前国内外研究学者对非人口高密度聚集区域的森林植被如何发挥水源涵养功能已开展了较为全面的研究^[22],而关于城市森林水源功能的研究相对还不够全面,特别是随着社会的发展,大型城市被功能区划分后,开展城市森林对人口水资源利用和保护政策将极为重要,也具有非常重要的现实指导意义。北京市作为国际一流城市,常住人口超过两千万,可见水资源的利用和保护对北京市非常重要,而目前北京市森林水源涵养功能的分析和评估尚未得到足够的关注。

相应地,本文研究目标为:(1)以北京市 2009 年、2014 年的两期森林资源二类清查数据和 2009、2014 年

的遥感影像数据为基础,阐明 2009 年和 2014 年 4 种城市功能区典型林分面积变化的时空分布特征;(2)以森林生态系统水源涵养功能为评价目标,以森林调节水量和净化水质为评价指标,分析 2009 年和 2014 年不同功能区林分水源涵养功能变化特征;(3)计算 2009 年和 2014 年 4 种城市功能区典型林分水源涵养功能的实物量 and 价值量,评估其环境效应的发展趋势。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区北京市位于华北平原的北端($E115^{\circ}25' - 117^{\circ}30'$, $N39^{\circ}28' - 41^{\circ}05'$),城市总面积为 16807.8 km^2 ,其中山区面积为 10418 km^2 ,占总面积 62%;平原面积为 6390 km^2 ,占全市面积 38%。北京市平均海拔 43.5 m,年均温度 11.5 $^{\circ}\text{C}$,属暖温带半湿润季风型大陆性气候,年无霜期为 180—200 d,年平均降水量为 630 mm,汛期降雨约占 85%。北京市主要土壤类型有山地草甸土、山地棕壤、褐土、潮土、沼泽土、水稻土和风沙土。北京地区野生被子植物中以菊科、禾本科、豆科、蔷薇科为主,其次是百合科、莎草科、伞形科、毛茛科、十字花科和石竹科等,常见植被如蒺藜(*Tribulus terrestris* L.)、猪毛菜脚(*Salsola collina* Pall.)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)、云杉(*Picea asperata* Mast.)、臭椿(*Ailanthus altissima* Mill.)、栎树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 水源涵养功能评价指标实物量计算

根据森林生态系统服务功能评估规范(GB/T 38582—2020),本研究将北京市各功能区城市绿化水源涵养功能分为调节水量和净化水质两个主要部分,水源涵养功能的调节水量的实物量采用计算公式(1)进行计算:

$$G_{\text{调}} = 10 \times A \times (P - E - C) \quad (1)$$

式中, $G_{\text{调}}$ 为评估林分年调节水量(m^3/a); A 为林分面积(hm^2); P 为降雨量(mm/a),降雨量分别采用 2009 和 2014 年中国气象数据共享网所公布的数据; E 为林分蒸散量(mm/a); C 为地表径流量(mm/a)。水源涵养功能的净化水质的实物量采用计算公式(2)进行计算:

$$G_{\text{净}} = 10 \times A \times (P - E - C) \quad (2)$$

式中, $G_{\text{净}}$ 为评估林分年净化水质质量(m^3/a); A 、 P 、 E 、 C 单位水文意义同公式(1)。

1.2.2 水源涵养功能评价指标价值量计算

根据森林生态系统服务功能评估规范(GB/T 38582—2020),计算降雨量与林分蒸散量和地表径流量差值与林分面积相乘得到水量容积,再与水库建设单位库容投资相乘得到林分年调节水量价值,具体按照计算公式(3)计算:

$$U_{\text{调}} = G_{\text{调}} \times C_{\text{库}} \quad (3)$$

式中, $U_{\text{调}}$ 为评估林分年调节水量价值(元/a); $G_{\text{调}}$ 为林分年调节水量(m^3/a); $C_{\text{库}}$ 为水资源市场交易价格(元/ m^3),北京市居民用水价格采用 2018 年平均值 7 元 $\cdot \text{t}^{-1}$;排除水量损失后的水的净化费用得到林分净化水质价值按照计算公式(4)计算:

$$U_{\text{净}} = G_{\text{净}} \times K_{\text{水}} \quad (4)$$

式中, $U_{\text{净}}$ 为评估林分净化水质价值(元/a); $G_{\text{净}}$ 为林分年净化水质质量(m^3/a); K 为水的净化费用(元/ m^3)。

1.2.3 NDVI 提取

NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)称为归一化差值植被指数,常用于表征植被生长状况,被广泛应用在植被覆盖空间分析、变化监测等方面,NDVI 按照计算公式(5)计算:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (5)$$

式中,NIR 为近红外波段, R 为红光波段。

本文采用 Excel 2010 处理数据,ArcGIS 10.0 软件对北京市城市绿地的时空分布特征进行制图和分析,Origin 2018 软件进行北京市各区城市绿化和水源涵养功能进行制图。

1.3 数据获取来源

遥感影像来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),选取研究区植被生长季对应影像,数据见表 1。影像云量较低,满足研究需求。

表 1 研究区遥感影像信息
Table 1 Remote sensing information of the study area

遥感平台 Remote sensing platform	成像时间 Acquisition time	传感器 Sensor	行带号 Row/Path	空间分辨率 Resolution/m	云量 Cloud/%
Landsat 5	2009-9-22	TM	123/32	30	0
Landsat 5	2009-9-22	TM	123/33	30	0
Landsat 8	2014-9-4	OLI	123/32	30	0.01
Landsat 8	2014-9-4	OLI	123/33	30	0.19
Landsat 8	2014-8-26	OLI	124/32	30	0

TM 为 Landsat 5 卫星的载荷专题绘图仪(Thematic Mapper, TM), OLI 为 Landsat 8 卫星的载荷陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)

本论文所有森林资源二类清查数据来源于北京市林业勘察设计院。

2 结果与分析

2.1 2009 年至 2014 年北京市森林资源时空变化

本文根据国家统计局统计年鉴中的行政区划将北京 16 个区分为首都功能核心区(东城区和西城区)、城市功能拓展区(朝阳区、丰台区、石景山区和海淀区)、城市发展新区(房山区、通州区、顺义区、昌平区和大兴区)和生态涵养发展区(门头沟区、怀柔区、平谷区、密云区和延庆区)(表 2)。

北京市功能区分及其绿化面积统计分析结果表明,首都功能核心区(东城区和西城区)在 2009 年和 2014 年的主要林地类型均为混交林,并无纯林(针叶林和阔叶林)存在,城市功能拓展区、城市发展新区、生态涵养发展区在 2009 年和 2014 年的主要林地类型包括针叶林和阔叶林以及混交林三种。其中,朝阳区、丰台区、海淀区、房山区、通州区、昌平区、大兴区、门头沟区、怀柔区、密云区和延庆区均表现为在 2014 年的林地总面积大于 2009 年,而石景山区、顺义区和平谷区林地总面积变化趋势反之。整体上,2014 年北京市森林植被面积较 2009 年呈增加趋势。

北京市 2009 年和 2014 年 NDVI 空间分布(图 1)统计结果表明,2009 年 NDVI 平均值为 0.331,2014 年平均值为 0.708。从 2009 年和 2014 年北京市 NDVI 空间分布统计可以看出,2009 年城市用地中的植被覆盖较少,而北京市生态建设到了 2014 年时城市用地中的植被覆盖显著增加。

2.2 北京市不同功能区绿地差异

北京市 2009 年和 2014 年不同功能区绿地空间分布如图 2 所示,结果表明 2014 年总林地绿地面积($4.59\times 10^5\text{ hm}^2$)较 2009 年($4.00\times 10^5\text{ hm}^2$)显著增加了 14.59%。不同林分类型面积均有所增加,针叶林增加 35.44%,阔叶林增加 0.04%,混交林增加 32.06%。对比两期调查数据(图 2),首都功能核心区混交林面积约增加了 63.96%;城市功能拓展区针叶林面积约减少了 13.29%,而阔叶林和混交林面积分别增加了 19.19%和 6.67%,林分面积分别为阔叶林>混交林>针叶林;城市发展新区针叶林、阔叶林和混交林面积分别增加了 67.97%、2.30%和 50.43%,林分面积变化趋势表现为阔叶林>针叶林 \approx 混交林;生态涵养发展区针叶林和混交林面积分别增加了 29.20%和 24.91%,阔叶林面积减少了 3.40%,林分面积分别为阔叶林>针叶林>混交林。

从空间分布上看,在首都功能核心区中主要分布阔叶林;混交林、针叶林、阔叶林 3 种林分混合集中分布在密云区、平谷区、昌平区和怀柔区南部;顺义区、朝阳区、通州区、大兴区分布的阔叶林较为离散。

表 2 北京市不同功能区分及其绿化面积统计

Table 2 Different function divisions and greening area statistics of Beijing

功能区 Function areas	区域 District	时间 Time	针叶林 Coniferous forest/hm ²	阔叶林 Broad-leaved forest/hm ²	混交林 Mixed forests/hm ²	总和 Sum/hm ²
首都功能核心区 Capital function core area	东城区	2009	—	—	188.67	188.67
		2014	—	—	322.78	322.78
	西城区	2009	—	—	286.43	286.43
		2014	—	—	456.19	456.19
城市功能拓展区 Urban functional expansion area	朝阳区	2009	2.42×10^2	4.88×10^3	2.01×10^3	7.14×10^3
		2014	1.94×10^2	7.13×10^3	6.29×10^2	7.96×10^3
	丰台区	2009	1.16×10^3	2.65×10^3	3.18×10^3	6.99×10^3
		2014	4.11×10^2	3.12×10^3	3.78×10^3	7.31×10^3
	石景山区	2009	5.50×10^2	4.85×10^2	1.22×10^3	2.26×10^3
		2014	8.51×10^2	4.89×10^2	8.94×10^2	2.23×10^3
	海淀区	2009	2.61×10^3	6.78×10^3	3.57×10^3	1.30×10^4
		2014	2.50×10^3	6.90×10^3	5.35×10^3	1.48×10^4
	房山区	2009	1.30×10^4	1.89×10^4	7.83×10^3	3.97×10^4
		2014	1.79×10^4	2.05×10^4	1.15×10^4	4.98×10^4
	通州区	2009	26.72	1.02×10^4	4.17×10^2	1.06×10^4
		2014	40.38	1.36×10^4	1.62×10^3	1.53×10^4
城市发展新区 New urban development area	顺义区	2009	8.89×10^2	1.50×10^4	2.86×10^3	1.87×10^4
		2014	2.12×10^3	1.23×10^4	1.13×10^3	1.55×10^4
	昌平区	2009	7.81×10^3	1.89×10^4	1.37×10^4	4.04×10^4
		2014	1.63×10^4	1.64×10^4	1.76×10^4	5.04×10^4
	大兴区	2009	2.95	1.73×10^4	456.72	1.78×10^4
		2014	192.11	1.92×10^4	6.13×10^3	2.55×10^4
生态涵养发展区 Ecological conservation development area	门头沟区	2009	9.36×10^3	1.00×10^4	6.74×10^3	2.61×10^4
		2014	1.47×10^4	8.93×10^3	6.53×10^3	3.02×10^4
	怀柔区	2009	1.38×10^4	2.74×10^4	1.96×10^3	4.32×10^4
		2014	1.84×10^4	2.37×10^4	1.70×10^3	4.38×10^4
	平谷区	2009	1.23×10^4	3.83×10^4	3.05×10^3	5.36×10^4
		2014	1.43×10^4	3.15×10^4	3.63×10^3	4.94×10^4
	密云区	2009	3.15×10^4	4.17×10^4	1.61×10^4	8.94×10^4
		2014	3.61×10^4	4.34×10^4	2.22×10^4	1.02×10^5
	延庆区	2009	1.05×10^4	1.71×10^4	3.69×10^3	3.14×10^4
		2014	1.66×10^4	2.24×10^4	5.35×10^3	4.43×10^4

2.3 北京市不同功能区林地水源涵养功能特征及价值估算

2.3.1 水源涵养功能实物量

北京市各功能区水源涵养功能实物量统计如表 3 所示,北京市首都功能核心区 2014 年混交林水源涵养功能实物量($8.23 \times 10^5 \text{ m}^3$)较 2009 年($1.28 \times 10^6 \text{ m}^3$)降低 35.7%,城市功能拓展区 2014 年森林植被水源涵养功能实物量($3.09 \times 10^7 \text{ m}^3$)较 2009 年($4.81 \times 10^7 \text{ m}^3$)降低 35.81%,生态涵养发展区 2014 年森林植被水源涵养功能实物量($1.91 \times 10^8 \text{ m}^3$)较 2009 年($3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$)降低 50.57%。城市发展区森林植被在 2014 年水源涵养功能实物量($1.78 \times 10^8 \text{ m}^3$)较 2009 年($1.66 \times 10^8 \text{ m}^3$)增加 7.6%。结果还表明:生态涵养发展区($2.88 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)>城市发展新区($1.72 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)>城市功能拓展区($3.95 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$)>首都功能核心区($1.05 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$)。整体上,2014 年林地绿化调节水量为 $4.01 \times 10^8 \text{ m}^3$,较 2009 年降低了近 1/3。

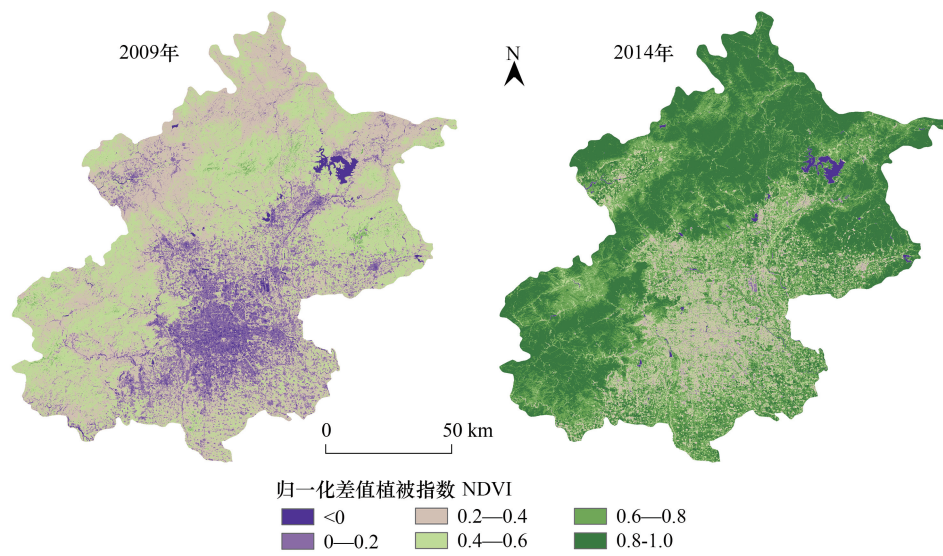


图 1 2009 年和 2014 年北京市 NDVI 空间分布

Fig.1 The spatial distribution of normalized differential vegetation index in Beijing in 2009 and 2014, respectively

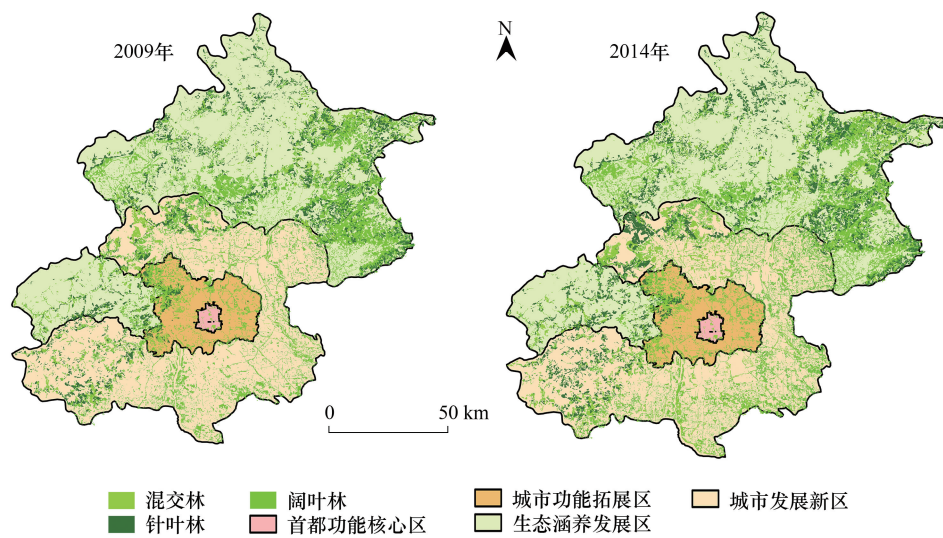


图 2 北京市不同功能区绿地空间分布

Fig.2 The green spatial distribution of different functional areas in Beijing

表 3 北京市各功能区水源涵养功能实物量统计

Table 3 Statistics of water resource conservation function in functional areas of Beijing

功能区 Function areas	评估指标 Indicators/ (m^3/a)	针叶林 Coniferous forest		阔叶林 Broad-leaved forest		混交林 Mixed forests	
		2009	2014	2009	2014	2009	2014
首都功能核心区	调节水量 净化水质					1.28×10^6	8.23×10^5
城市功能拓展区	调节水量 净化水质	0.62×10^7	0.49×10^6	2.48×10^7	1.42×10^7	1.71×10^7	1.18×10^7
城市发展新区	调节水量 净化水质	3.54×10^7	3.73×10^7	10.7×10^7	8.54×10^7	2.33×10^7	5.56×10^7
生态涵养发展区	调节水量 净化水质	12.10×10^7	3.01×10^7	19.8×10^7	11.5×10^7	6.64×10^7	4.54×10^7

2.3.2 水源涵养功能价值量

北京市各功能区水源涵养功能价值量估算结果(图3)表明,2009年各功能区涵养水源功能总价值量为:阔叶林(4.32×10^9 元/a)>针叶林(2.13×10^9 元/a)>混交林(1.42×10^9 元/a),2014年为:阔叶林(2.81×10^9 元/a)>混交林(1.49×10^9 元/a)>针叶林(9.48×10^8 元/a)。各功能区森林植被水源涵养功能价值量表现为:阔叶林(3.57×10^9 元/a)>混交林(1.45×10^9 元/a)>针叶林(1.54×10^8 元/a),各区森林植被水源涵养功能价值变化结果表明混交林水源涵养功能价值量呈增加趋势(5.13%),阔叶林和针叶林水源涵养功能价值量呈下降趋势,且针叶林降低速率(-55.55%)较阔叶林(-34.93%)快。2014年由于林地绿化调节水、净化水质而产生的价值量较2009年分别减少了22.08%和8.24%。

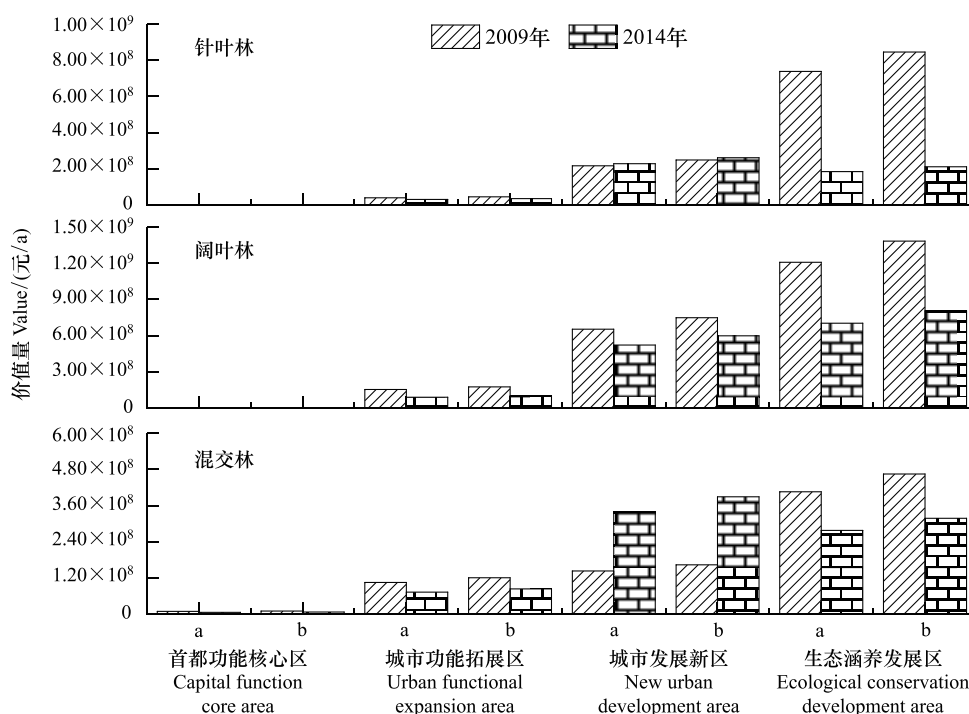


图3 北京市各功能区水源涵养功能价值量估算

Fig.3 Estimation of the value of water conservation function in Beijing's functional areas

a:调节水量的价值 b.净化水质的价值

3 讨论

本文对北京市不同功能区绿地时间分布分析,结果表明整体上2014年北京市森林植被面积较2009年呈增加趋势(表1),我们对北京市2009年和2014年NDVI进行空间分布统计分析,结果也证实了2014年(0.708)北京市森林植被面积较2009年(0.331)呈增加趋势。北京市不同功能区绿地空间分布表明四个功能区林地面积呈增加趋势(图1),且各区阔叶林面积占比最多。这与北京市林业部门正确的营林决策具有密切的关系,主要采取营造阔叶林为主,针叶林为辅。北京市森林植被面积呈增加趋势与北京市正确的城市生态规划发展也具有密切联系^[23],同时,受到人类生产活动的显著影响^[5]。随着近年社会经济的快速发展,人类活动等会影响局部地区的降雨环境因素,而城市绿化的林地可以缓解这种变化,改善人们的生活环境,以利于城市健康发展。本文研究结果表明北京市各区森林植被面积变化趋势与北方黄土高原丘陵区^[24-25]和残源区^[26]和南方土石山区^[27]营林研究建议一致。

本文结果显示北京市森林植被水源涵养功能实物量整体在2014年较2009年减少近1/3。分析原因,

首先随着北京市年降雨量整体表现为增加趋势^[28],林地水分补给来源也随之增多,林地环境得到改善,林木根系的生长、周转等活力得到显著良性调节,最终改善林分生长状况^[29-30]。第二,在气候暖干旱影响下,植被的生长和发育会受到影响。近年来北京市空气温度逐年增加造成林地蒸发散总量增加^[31]。大气—植被—土壤连续体会影响生态系统物质循环,也会制约生态系统能量流动^[32]。第三是受气候和植被变化的影响,土壤水分和土壤养分含量以及土壤微环境也会发生变化^[33-34],通过微生物影响土壤环境,土壤微生物和动物丰富度随之提高^[35],对枯枝落叶的分解活动明显提高,将会影响植被蓄积量、凋落物量、土壤有机质量和土壤物理性质^[36],最终影响森林植被林冠、枯落物和土壤作用层水源涵养机制^[37]。

本文结果表明北京市 4 个城市功能区森林植被水源涵养功能价值量呈增加趋势,而纯林与之相反,且针叶林降低速率大于阔叶林,这与实际情况相符。以往研究从森林生态系统功能的角度揭示混交林生态功能优于纯林,在森林经营中宜考虑多营造混交林的重要结论^[38],而本研究的结论从经济价值方面进一步证实森林经营应该多考虑营造混交林,这与传统的森林经营研究结论相同。本文认为提高北京市森林植被水源涵养功能,充分发挥森林植被水土保持功能,在森林管理中应重点关注 3 个方面,第一,注重森林植被类型多样化,多营造混交林提高森林生态系统稳定性;第二,充分考虑气候条件暖干旱影响下的土壤水分植被承载力,调控适宜林分密度,间接优化林分结构;第三,建立森林经营管理制度,加强营林技术,提高林分质量,抑制森林植被过早进入衰退期,提升森林植被水源涵养生态主导功能。

根据本文的分析结果,结合北京市的实际发展情况,对北京市的城市绿化建设提出以下几点相关建议:①提升城市林地绿地质量,以生态文明建设为主线,注重林地绿地的养护管理,提高资源的利益效率及环境的改善效率。②扩大混交林的种植面积,发挥林地的生态调节功能,提高其林分的稳定性,确保林地能发挥更大的社会效益及经济效益,最终为人类提供更加健康的城市生活环境。③增加北京市的城市绿化面积,美化城市人居环境。以经济发展促进生态文明建设的发展,又以良好的生态环境以及城市绿地对环境的改善作用,促进北京市的经济发展。④加强首都的生态环境保护建设的力度,完善相关的法律法规,加强对污染企业的管制,从源头控制人为因素对环境造成的破坏。⑤北京市的各个功能区的核心功能不同,适当增加首都功能核心区、城市功能拓展区、城市发展新区的林地绿化面积,以生态涵养发展区为核心,增强北京市的生态文明建设,改善北京市的环境问题。

4 结论

(1)北京市森林植被面积 2014 年($4.59 \times 10^5 \text{ hm}^2$)较 2009 年($4.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$)呈增加趋势,北京市 NDVI 平均值也表明从 2009 年(0.331)至 2014 年(0.708)北京市绿化面积显著增加。北京市 2014 年林地绿化调节水量为 $4.01 \times 10^8 \text{ m}^3$,较 2009 年降低了近 1/3,2014 年由于林地绿化调节水、净化水质而产生的价值量较 2009 年分别减少了 22.08% 和 8.24%。

(2)北京市四个城市功能区森林植被水源涵养功能表现为混交林产生的水源涵养功能价值量呈现增加趋势(5.13%),而阔叶林和针叶林产生的水源涵养功能价值量呈下降趋势,且针叶林降低速率(-55.55%)较阔叶林(-34.93%)更快。

(3)北京市的人居生态环境近年来稳步提升,经过植树造林后,北京市的生态环境、城市人居环境都有了明显提升。林地改善环境而带来的经济价值逐年增长,林地很好地发挥了涵养水源功能,也产生了相应的经济价值,总体发展趋势较好。

参考文献(References):

- [1] 王兵,马向前,郭浩,王燕,冷冷. 中国杉木林的生态系统服务价值评估. 林业科学, 2009, 45(4): 124-130.
- [2] Brantley S, Ford C R, Vose J M. Future species composition will affect forest water use after loss of eastern hemlock from southern Appalachian forests. Ecological Applications, 2013, 23(4): 777-790.
- [3] 刘胜涛,高鹏,刘潘伟,牛香,王兵. 泰山森林生态系统服务功能及其价值评估. 生态学报, 2017, 37(10): 3302-3310.

- [4] 阮俊杰. 城市公园对夏季热环境的影响——以上海市中心城区为例. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1663-1670.
- [5] 李虹. 区位因素对绿地缓解热岛效应的影响研究与实证分析. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [6] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [7] Nowak D J, Ogren T L. Variations in urban forest allergy potential among cities and land uses. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 63: 127224.
- [8] 段彦博, 雷雅凯, 吴宝军, 彭丹丹, 田国行. 郑州市绿地系统生态服务价值评价及动态研究. 生态科学, 2016, 35(2): 81-88.
- [9] 张吉祥, 郝玉梅. 杭州城市森林水土保持功能及效益评价. 安徽林业科技, 2015, 41(1): 41-43, 65-65.
- [10] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 崔艳红, 王宁, 王珊珊, 马晓至, 冯星. 晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征. 水土保持学报, 2021, 35(01): 181-187.
- [11] 马晓至, 毕华兴, 王珊珊, 崔艳红, 赵丹阳, 云慧雅, 侯贵荣. 晋西黄土区典型林分枯落物层水文生态特性研究. 水土保持学报, 2020, 34(06): 77-83+88.
- [12] Hou G R, Bi H X, Wei X, Kong L X, Wang N, Zhou Q Z. Response of soil moisture to single-rainfall events under three vegetation types in the gully region of the Loess Plateau. Sustainability, 2018, 10, 3793.
- [13] Liu Z Q, Jia G D, Yu X X. Variation of water uptake in degradation agroforestry shelterbelts on the North China Plain. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 287, 106697.
- [14] 崔松云, 李显鸿, 胡俊波, 丁冉, 邹嘉福. 不同土地利用类型对城市水源地的涵养能力分析. 中国农村水利水电, 2018, (12): 70-76.
- [15] 段琪彩, 吴灏, 王杰, 张雷. 滇中城市水源地水源涵养能力研究. 水土保持研究, 2015, 22(5): 312-315.
- [16] 刘淑丽, 李扬, 郭晋平. 森林对水源地保护与生态修复的影响研究综述. 环境生态学, 2019, 1(02): 29-34.
- [17] 蔡兆男, 成里京, 李婷婷, 郑循华, 王林, 韩圣慧, 王凯, 屈侠, 江飞, 张永雨, 朱建华, 龙上敏, 孙扬, 贾炳浩, 袁文平, 张天一, 张晴, 谢瑾博, 朱家文, 刘志强, 吴琳, 杨东旭, 魏科, 吴林, 张稳, 刘毅, 曹军骥. 碳中和目标下的若干地球系统科学和技术问题分析. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 602-613.
- [18] 喻阳华, 李光容, 皮发剑, 严令斌, 喻理飞, 黄宗胜. 赤水河上游主要森林类型水源涵养功能评价. 水土保持学报, 2015, 29(2): 150-156.
- [19] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 周巧稚, 孔凌霄, 王杰帅, 贾剑波. 黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能. 水土保持学报, 2018, 32(2): 357-363, 371-371.
- [20] 孟楚, 王琦, 郑小贤. 北京八达岭林场水源涵养林结构与功能耦合机理研究. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(3): 69-72.
- [21] Schneider F D, Morsdorf F, Schmid B, Petchey O L, Hueni A, Schimel D S, Schaepman M E. Mapping functional diversity from remotely sensed morphological and physiological forest traits. Nature Communication, 2017, 8: 1441.
- [22] Hou G R, Bi H X, Yu X X, Jia G D, Wang D D, Zhang Z Y, Liu Z Q. A vegetation configuration pattern with a high-efficiency purification ability for TN, TP, AN, AP, and COD based on comprehensive assessment results. Scientific Reports, 2019, 9: 2427.
- [23] 魏小燕, 王立斌, 哈玉玲, 苏利平, 杨军, 雒旭升. 新中国成立 70 年马克思主义生态观在宁夏水土保持工作中的应用. 中国水土保持, 2019, (10): 37-39.
- [24] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- [25] Wang X H, Wang B T, Xu X Y, Liu T, Duan Y J, Zhao Y. Spatial and temporal variations in surface soil moisture and vegetation cover in the Loess Plateau from 2000 to 2015. Ecological Indicators, 2018, 95, 320-330.
- [26] 董懿, 尹冬勤, 李渊, 严泰来, 王红说. 黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 120-131.
- [27] 曹云, 钱永兰, 孙应龙, 钱拴, 张晔萍, 延昊. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析. 生态环境学报, 2020, 29(5): 857-865.
- [28] 谢胜金, 刘永和, 姚凤欣. 1998—2015 年北京市 NDVI 时空变化及其与气候因子的响应关系. 水土保持研究, 2020, 27(3): 190-196, 202-202.
- [29] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, Frank D, Mahecha M D, Seneviratne S I, Zscheischler J, Beer B, Buchmann N, Frank D C, Papale D, Rammig A, Smith P, Thonicke K, Van Der Velde M, Vicca S, Walz A, Wattenbach M. Climate extremes and the carbon cycle. Nature, 2013, 500(7462): 287-295.
- [30] 邓磊, 朱春云, 于世川, 祁银燕, 张文辉, 杜盛, 关晋宏. 祁连山青海云杉中龄林混交度对细根形态特征的影响. 林业科学, 2020, 56(1): 191-200.
- [31] 焦毅蒙, 赵娜, 岳天祥, 邓佳音. 城市化对北京市极端气候的影响研究. 地理研究, 2020, 39(2): 461-472.
- [32] 余新晓, 朱建刚, 李铁涛, 贾国栋, 贾剑波, 王建文. 森林植被-土壤-大气连续体水分传输过程与机制. 北京: 科学出版社, 2016.
- [33] Zhu G Y, Shanguan Z P, Deng L. Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China. Catena, 2021, 200, 105181.
- [34] Wang X H, Wang B T, Xu X Y. Effects of large-scale climate anomalies on trends in seasonal precipitation over the Loess Plateau of China from 1961 to 2016. Ecological Indicators, 2019, 107, 105643.
- [35] Wang G L, Liu F, Xue S. Nitrogen addition enhanced water uptake by affecting fine root morphology and coarse root anatomy of Chinese pine seedlings. Plant and Soil, 2017, 418: 177-189.
- [36] Hou G R, Bi H X, Wang N, Cui Y H, Ma X Z, Zhao D Y, Wang S S. Optimizing the stand density of *Robinia pseudoacacia* L. forests of the Loess Plateau, China, based on response to soil water and soil nutrient. Forests, 2019, 10(8): 663.
- [37] 林荣平, 祁新华, 叶士琳. 沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制. 生态学报, 2017, 37(1): 294-304.
- [38] Hou G R, Bi H X, Huo Y M, Wei X Y, Zhu Y J, Wang X X, Liao W C. Determining the optimal vegetation coverage for controlling soil erosion in *Cynodon dactylon* grassland in North China. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118771.