

DOI: 10.5846/stxb202110232992

王博娅, 刘志成. 基于改进生态绿当量的城市绿色空间要素配置优化——以北京市中心城区为例. 生态学报, 2023, 43(11): 4539-4548.

Wang B Y, Liu Z C. Optimization of urban green space element allocation based on the improved ecological green equivalent: Taking the downtown area of Beijing for example. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4539-4548.

基于改进生态绿当量的城市绿色空间要素配置优化 ——以北京市中心城区为例

王博娅, 刘志成*

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要: 生态文明背景下的新型城镇化建设着重强调生态、高效的内涵式发展来实现经济-社会-生态效益的综合增长。以北京市中心城区为研究对象, 基于改进生态绿当量进行现状绿色空间的量化评价, 采用线性规划模型进行生态系统服务最大化目标下的要素结构调整, 为各区域提供可行的实施建议。结果表明: (1) 研究区内除西城区和石景山区满足生态绿当量要求外, 其他区域均不满足。(2) 采用线性规划模型进行优化调整后, 东城区的生态绿当量满足要求, 生态系统服务水平提高了 4.23%; 朝阳区、丰台区和海淀区生态绿当量分别提高到了 0.77、0.73、0.90, 生态系统服务水平分别提高了 6.79%、10.49% 和 5.76%。(3) 朝阳、海淀、丰台等区域优先完善自然山水要素, 加强西部浅山区绿化、增补温榆河、永定河、清河、南沙河等滨河绿色空间, 大力推进两道绿化隔离带增量提质建设; 东城区着重改善大面积斑块形成生态源地。研究探究了高密度建设的中心城区绿色空间配置的量化方法和优化路径, 为北京市中心城区高质量发展提供了科学参考。

关键词: 生态系统服务; 改进生态绿当量; 线性规划模型; 要素配置

Optimization of urban green space element allocation based on the improved ecological green equivalent: Taking the downtown area of Beijing for example

WANG Boya, LIU Zhicheng*

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Under the background of ecological civilization, the construction of new-type urbanization emphasizes the ecological and efficient convolution development to realize the comprehensive growth of economic, social and ecological benefits. Taking the central urban area of Beijing as the research object, the quantitative evaluation of the current green space elements was carried out based on the improved ecological green equivalent. The linear programming model was used to adjust the factor structure under the objective of maximizing ecosystem services, and feasible implementation suggestions were provided for each region. The results showed that: (1) except for Xicheng District and Shijingshan District, the other regions did not meet the requirements of ecological green equivalent. (2) After optimizing and adjusting the linear programming model, the eco-green equivalent of Dongcheng District met the requirements, and the ecosystem service level increased by 4.23%. The ecological green equivalent in Chaoyang, Fengtai and Haidian districts increased to 0.77, 0.73 and 0.90, respectively, and the ecosystem services level increased by 6.79%, 10.49% and 5.76%, respectively. (3) Chaoyang, Haidian, Fengtai and other areas should give priority to the improvement of natural landscape elements, strengthen the afforestation of shallow mountainous areas in the west, supplement the riverside green space of Wenyu River, Yongding River, Qinghe River and Nansha River, and vigorously promote the incremental quality improvement of the two

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (BLX202002); 北京市共建项目专项资金“城乡生态环境北京实验室” (BLUREE02)

收稿日期: 2021-10-23; **网络出版日期:** 2023-02-07

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

green isolation belts; Dongcheng District focused on improving the ecological source area formed by large patches. The methods and paths of quantification and optimization of ecosystem services in high-density construction of central urban area were explored, which provided the scientific reference for high-quality development of central urban area in Beijing.

Key Words: ecosystem services; improved ecological green equivalent; linear programming model; elements configuration

传统高密度建设的中心城区大多以国民经济和社会发展需要进行土地资源配置以实现较好的经济效益和社会效益,由此忽略了生态效益,造成了严重的生态环境问题。生态文明背景下的新型城镇化建设着重强调生态、高效的内涵式发展,在中心城区采用有机更新、优化配置等方式来提高城市生态系统服务能力,促进高质量发展,创造高品质生活,实现经济-社会-生态效益的综合增长。然而提出合理的生态效益衡量标准量化评估生态现状,并在土地资源受限的中心城区实现生态补偿依然是急需解决的问题。

目前针对中心城区绿色空间的研究多集中于空间布局的可达性与公平性^[1-5]、供需平衡与价值评估^[6-9]等方面,针对生态效益的研究多集中于多维绿量测算^[10-12]、单因子效益评估^[13-17],而较缺乏从生态效益视角进行绿色空间要素的结构优化研究。生态绿当量概念是基于衡量生态补偿能力而提出的,将不同类型植物的生态补偿能力按照“效率”的不同进行换算,通过要素结构的调整达到生态贡献相同的目标,从而在一定程度上实现生态补偿^[17],该方法具有简洁、直观、可量化的特点,已被广泛应用于生态效益的评价^[18-19]、土地利用结构的调整^[20-24]等方面,然而评价和调整对象多为土地利用类型,较缺乏对不同覆被类型的绿色空间的精细化研究。因此本文引入“生态绿当量”的概念,基于中心城区发展特点和不同绿色空间覆被类型,结合线性规划模型,建立绿色空间要素配置的优化框架,针对研究区域提出定性和定量相结合的优化建议,以期为绿色空间的要素配置提供量化依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

北京市中心城区位于温榆河水系和永定河水系的冲积平原上(图1),包含东城、西城、海淀、朝阳、丰台和石景山共6区,总面积约1378km²;集中承载全国的政治中心、文化中心、国际交往中心和科技创新中心,是建设国际一流的和谐宜居之都的关键地区^[25]。近年来北京市生态环境公报显示全市整体生态环境持续向好,但中心城区问题依然严重,空气质量劣于其他区域,生态环境状况指数处于较低水平,中心城区的生态系统服务水平依然面临严峻的挑战^[26]。

1.2 数据来源

研究使用的数据如下:(1)“GF-2”号卫星高分辨率遥感影像(中国资源卫星应用中心购得),将土地覆被类型解译为密林地、疏林地、灌草地、水域、建设用地和其他共6类(图2);(2)从地理资源网获取2020年土地利用数据,重分类为城市建设用地、耕地、其他城市非建设用地共3种类型;(3)2020年北京市路网数据从公开地图(Open Street Map)获得。

2 技术路线与研究方法

2.1 技术路线

针对北京市中心城区改进“生态绿当量”进行现状评价,以提升生态系统服务能力为目标,采用线性规划模型进行要素配置调整,调整之后验证并提出优化建议,技术路线如图3所示。

2.2 “生态绿当量”及其改进

不同类型的城市绿色空间受人类干扰状态和土地使用状态的影响所提供的生态系统服务也有所不同,从生态学和植物学的角度来讲,各类绿色植物都在不同程度上发挥着类似森林生态系统的功能,而森林也具

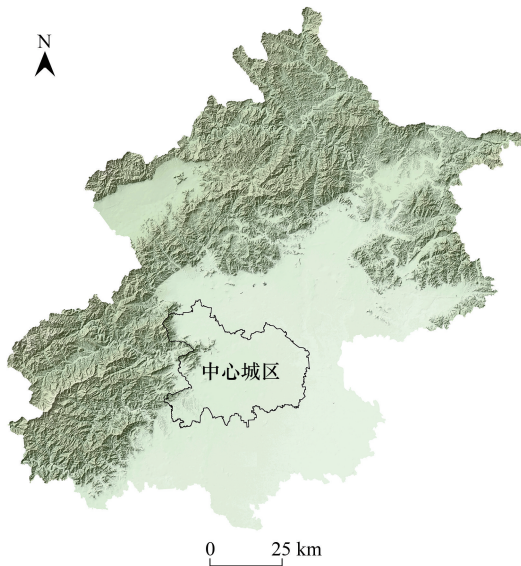


图1 研究区域区位图

Fig.1 The Location Map of Study Area

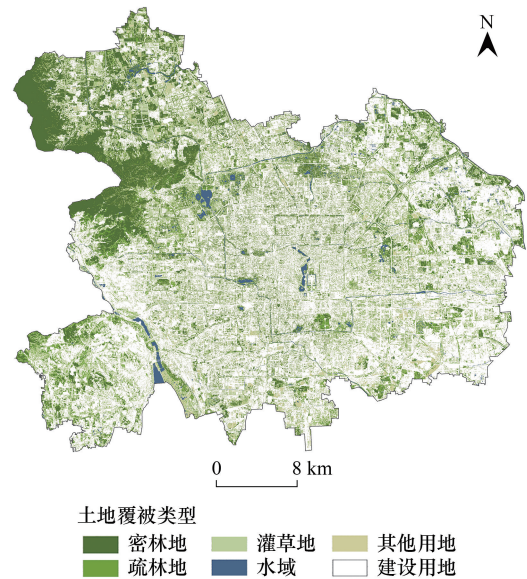


图2 北京市中心城区土地覆被类型图

Fig.2 Land cover map of central Beijing

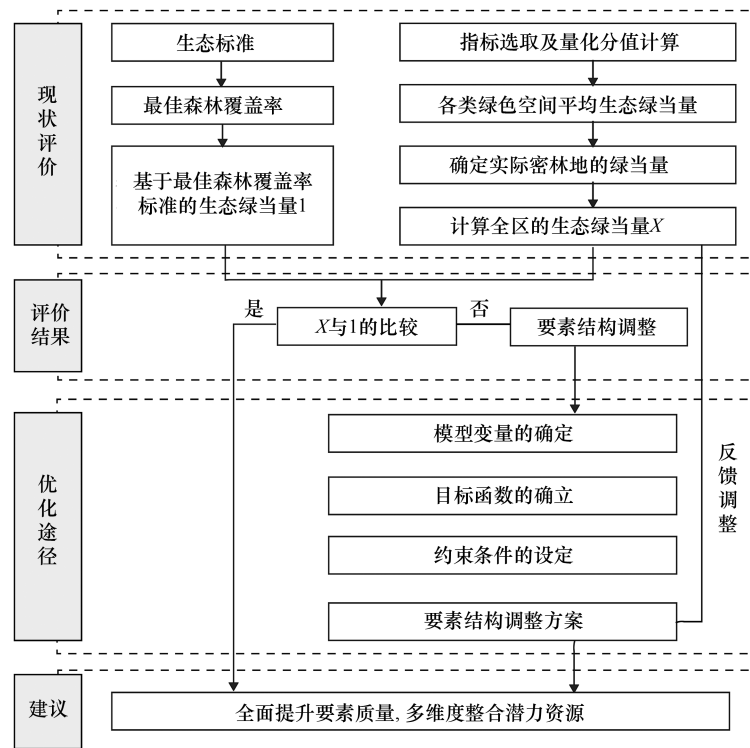


图3 技术路线图

Fig.3 Technical Route

有良好的调节、支持、供给和文化服务能力,是地球陆地生态的支柱,因此森林通常被用作标准来衡量其他绿色植被生态系统服务能力的强弱^[27]。研究选取“森林覆盖率”作为生态标准,将各类绿色空间折算为发挥同等效力的森林面积来表征生态系统的健康程度。中心城区绿色空间具有不可忽视的经济、社会和文化效益,研究综合考虑复杂因素和前人研究成果,最终将具有生态绿当量的用地具体分为以下几种类型:城市建设用

地以内的密林地、疏林地、灌草地和水域;非建设用地内的密林地、疏林地、灌草地、水域;耕地和其他共 10 种类型。

2.2.1 指标选取及量化分值计算

研究基于生态系统服务类型和城市绿色空间的功能价值,综合日本专家^[28]、赵丹等^[24]、李想等^[29]研究,根据典型性和可操作性的原则,选取固碳释氧、降温增湿、净化空气、涵养水源、削弱噪音、维持物种多样性、保育土壤、休闲游憩、防灾避险、教育功能、景观美化服务进行评估,结合中心城区生态系统服务的特点调整量化分值(表 1)。

表 1 不同绿色空间中生态系统服务水平的评价分值^[24,28,29]

Table 1 Evaluation score of ecosystem service level in different green spaces

功能 Functions	建设用地以内绿色空间 Green space in construction land					耕地 Cultivated land	非建设用地内的绿色空间 Green space in non-construction land				其他 Otherland
	密林地 Dense forest land	疏林地 Open forest land	灌草地 Shrub- grass land	水域 Water	密林地 Dense forest land		疏林地 Open forest land	灌草地 Shrub- grass land	水域 Water		
吸收二氧化碳 Carbon dioxide absorbent	4.45	3.66	2.87	2.66	4.94	8.41	7.17	5.93	4.5	0	
释放氧气 Oxygen release	4.35	2.9	1.45	2.45	2.96	10	7.56	5.12	5.1	0	
吸尘滞尘 Dust absorption and dust retention	2.98	2.18	1.38	2.81	4	7.94	6.28	4.62	6.54	0	
吸收有毒气体 Absorbing toxic gases	3.53	2.3	1.08	2.71	3.71	7.3	5.64	3.98	6.43	0	
降温增湿 Temperature reduction and humidity increase	3.25	2.34	1.44	3.71	3.89	8.41	6.73	5.05	9.32	0	
削弱噪音 Noise reduction	2.42	1.59	0.77	1.38	2.28	8.41	6.305	4.2	4.3	0	
水源涵养 Water conservation	3.46	2.83	2.19	4.2	3.13	10	8.32	6.64	10	0	
保育土壤 Soil conservation	3.57	3.34	3.11	4.17	3.88	7.02	6.64	6.26	8.08	0	
维持生物多样性 Biodiversity maintaining	2.13	1.82	1.51	2.98	2.53	10	8.03	6.06	8.65	0	
防灾避险 Disaster prevention	7.85	7.85	7.85	7.85	8.46	8.58	8.58	8.58	3.1	0	
景观美化 Landscaping	9.74	9.74	9.74	9.74	7	10	10	10	9.89	0	
休闲游憩 Leisure and recreation	9.12	9.12	9.12	9.12	4.7	9.58	9.58	9.58	7.86	0	
教育功能 Educational function	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	0	
合计 Total	64.47	57.29	50.13	61.4	59.1	113.27	98.455	83.64	91.39	0	

(1) 根据各项服务类型的内涵,统一服务类型名称。“大气组成改善-1”即“吸收二氧化碳”,“大气组成改善-2”即“释放氧气”,“大气净化-1”即净化空气中的“吸尘滞尘”,“大气净化-2”即为净化空气中的“吸收有毒气体”,“气候缓和”即“降温增湿”,“防噪声”即“削弱噪音”,“生物相保护”即“维持生物多样性”,“防止土砂崩溃”“防止表面侵蚀”“防止地面下沉”和“污染物净化”合并为“保育土壤”,“提供避难地”即“防灾避险”,“维持景观”即“景观美化”,“维持娱乐空间”即“休闲游憩”,而对于“洪水防止、水质净化、防止发生灾害、防止有害动植物”等功能在城市中心城区的比重较小,本文不予研究。对于中心城区中作用较大的“教育功能”服务,本文采取李想等^[28]对北京市绿地系统文化服务功能评估的结果,通过标准转化后统一核算。

(2) 考虑城市人工环境、用地中的硬质铺装、设施等对绿色空间服务能力的影响,“防灾避险”“景观美化”“休闲游憩”按相对偏差的最高值计算,其它服务类型按照相对偏差的最低值计算。其次,根据是否为城市建设用地进行生态效益等因子的分值调整,若为城市建设用地则以“城市绿地”的评分为基础依据进行比例折算,反之则参考现有值。

(3) 中心城区绿色空间服务水平根据不同覆盖类型将评分按比例调整。“密林地”按照“自然林地”的比例调整,“疏林地”按照“人工林地”和“自然草地”结合的比例调整,“灌草地”按照“自然草地”的比例调整,“耕地”按照“普通旱田”的比例调整,“水域”按照“水域”的比例调整。

2.2.2 改进后各类绿色空间的平均生态绿当量

选取生态系统服务能力最强的非建设用地内的密林地的服务能力作为标准 1 进行换算,其中耕地需要进行生长期系数的调整^[27],文化服务基于薛明皋等^[30]研究,选取可达性作为修正因子以便于体现中心城区各行政区绿色空间文化服务的真实供给水平。可达性调节因子公式如下:

$$C = R_i / \bar{R}$$

式中 R_i 表示六个区中路网密度, $\bar{R}$ 表示中心城区路网密度。最终获得各类型绿色空间的平均生态绿当量(表 2)。

表 2 不同区域的改进生态绿当量

Table 2 Improved ecological green equivalents in different areas

功能 Functions	建设用地以内绿色空间				耕地 Cultivated land	非建设用地内的绿色空间				其他 Otherland
	Green space in construction land					Green space in non-construction land				
	密林地	疏林地	灌草地	水域		密林地	疏林地	灌草地	水域	
	Dense forest land	Open forest land	Shrub- grass land	Water		Dense forest land	Open forest land	Shrub- grass land	Water	
城六区 Central urban area	0.57	0.51	0.44	0.54	0.26	1.00	0.87	0.74	0.81	0.00
东城区 Dongcheng district	0.67	0.63	0.58	0.65	0.29	1.00	0.90	0.81	0.80	0.00
西城区 Xicheng district	0.66	0.61	0.56	0.64	0.29	1.00	0.90	0.80	0.80	0.00
海淀区 Haidian district	0.56	0.50	0.44	0.54	0.26	1.00	0.87	0.74	0.81	0.00
朝阳区 Chaoyang district	0.57	0.51	0.44	0.54	0.26	1.00	0.87	0.74	0.81	0.00
丰台区 Fengtai district	0.54	0.47	0.40	0.51	0.25	1.00	0.86	0.72	0.81	0.00
石景山区 Shijingshan district	0.56	0.49	0.43	0.53	0.25	1.00	0.86	0.73	0.81	0.00

2.2.3 确定最佳森林覆盖率

由于地形地貌、土壤降水等自然地理条件的不同,各区域的最佳森林覆盖率也不相同。本文从生态防护优先保障的角度出发,采用宫渊波等^[31]的研究方法,结合北京市相关的土壤及降水数据来计算最佳森林覆盖率 R ,作为区域的生态标准。公式为:

$$R = (J \times S_i) / (W \times S_{\text{总}}) \times 100\%$$

式中, J 为研究区一年内日最大降水量(t/hm^2),北京地区取值为 $1700 \text{ t}/\text{hm}^2$; $S_i = S_{\text{总}} - S_{\text{建筑}} - S_{\text{水域}}$ (hm^2), $S_{\text{总}}$ 为区域土地总面积 hm^2 ; W 为森林土壤单位面积饱和蓄水能力(t/hm^2),北京地区取值为 $2500 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。

2.2.4 计算全区的生态绿当量

(1) 按照最佳森林覆盖率 R 计算得到城市理想森林面积为 $S_{\text{林}}$:

$$S_{\text{林}} = S_{\text{总}} \times R$$

(2) 根据最佳森林覆盖面积得出的区域林地实际生态绿当量 $x_{\text{林}}$:

$$x = \sum_{i=1}^n \left[\frac{S_i \times ES_i}{S_{\text{林}}} \times 100\% \right], n = 1, 2, 3, \dots$$

其中, S_i 为 i 类用地的面积, ES_i 为绿当量, i 代表用地类型, ($i = 1, 2, 3, \dots$)。

计算结果与 1 进行比较,如果大于 1,则满足要求;如果小于 1,则不满足要求。

2.3 基于线性规划的要素配置优化方法

线性规划模型是根据一定的优化目标确定目标函数,在各种相互关联的多变量约束条件下,对目标函数求解,从而得到最优解的数学规划方法,是实现资源优化配置的有效方法,现多应用于土地结构优化中^[32]。其基本方程表达式为:

$$\begin{aligned}\max Z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq (=, \geq) b_i, b_i \geq 0, (i = 1, 2, \dots, n, \text{ 并且 } m < n) \\ x &\geq 0, j = 1, 2, \dots, n\end{aligned}$$

$\max Z$ 为目标函数, c_j 为生态绿当量系数, 变量 x_j 为决策变量即各绿色空间类型面积。 a_{ij} 为约束系数, b_i 为资源限制量, m 为阶数, 表述约束方程个数; n 为维数, 表示决策变量个数。

本文将线性规划模型引入到城市绿色空间各类型要素的结构调整中, 通过合理的设置变量, 构建科学合理的模型, 实现绿色空间要素配置的优化。

2.3.1 模型变量的确定

根据北京市中心城区绿色空间的现状, 并结合实际情况, 考虑变量方案的可操作性后, 共设置了 10 个变量: 城市建设用地内密林地面积 X_1 、疏林地面积 X_2 、灌草地的面积 X_3 、水域的面积 X_4 ; 耕地 X_5 ; 非建设用地内的密林地面积 X_6 、疏林地面积 X_7 、灌草地面积 X_8 、水域面积 X_9 ; 其他用地面积 X_{10} 。面积单位统一为 hm^2 (此处的 x_j 即等同于上述公式的 x_j)。

2.3.2 目标函数的建立

结合北京市中心城区的自然、经济和社会发展情况, 以尽量满足生态绿当量和生态系统服务最大化为目标, 建立目标函数, 将相关影响因素作为约束条件, 来探讨绿色空间要素配置的优化方案。目标函数为:

$$F(X) = \max Z = E_{m_1} X_1 + E_{m_2} X_2 + E_{m_3} X_3 + E_{m_4} X_4 + E_{m_5} X_5 + E_{m_6} X_6 + E_{m_7} X_7 + E_{m_8} X_8 + E_{m_9} X_9 + E_{m_{10}} X_{10}$$

式中, E_{m_i} 表示不同区域中不同生态系统服务的分值。

2.3.3 约束条件的设定

约束条件主要是对目标函数起约束限制作用的, 本文参照重要法规文件, 根据北京市中心城区的绿色空间特点和国家政策, 结合生态系统服务的综合考虑, 设置的约束条件如下:

(1) 绿色空间总面积约束: 研究区位于北京市中心城区, 处于高密度建成区内, 绿色空间总量几乎很难增加, 同时本文从生态系统服务综合效益的角度出发进行绿色空间要素配置的优化, 因此界定绿色空间总面积与土地覆被总量保持一致且不改变。

(2) 约束条件为森林覆盖率: 根据《北京市“十四五”时期土地资源保护利用规划》中森林覆盖率平原地区不低于 32% 的指标, 界定研究区内密林地和疏林地总面积指标; 根据各分区规划中森林覆盖率指标细化不同行政区划的指标约束, 东城、西城不低于 31.95%, 朝阳、丰台不低于 35%, 海淀区不低于 37%, 石景山区不低于 33%。

(3) 约束条件为水域、耕地: 根据《北京市“十四五”时期土地资源保护利用规划》, 落实最严格的耕地和水源保护制度, 保持现有耕地、水域不减少。

(4) 约束条件为林地、灌草之比: 根据国家生态园林城市建设标准中规定, 建成区绿化覆盖面积中乔、灌木所占比率不小于 70%, 结合研究区实际情况并为保证景观类型多样性, 研究按照林地 (密林地与疏林地 30% 之和) 与灌草 (疏林地 70% 与灌草地之和) 的比例为 7:3 计算。

(5) 变量非负约束条件: 所有变量取值都不能小于 0。

通过 Lingo 软件对上述目标函数求一组解, 进行修正, 得到优化方案。

3 结果分析

3.1 生态绿当量的评价结果

基于改进后的生态绿当量评价城六区和各分区的生态效益, 结果如表 3 所示, 其中西城区、石景山区的生态绿当量分别为 1.04 和 1.20, 均大于 1, 即满足生态绿当量的需求; 中心城区整体、东城、海淀、朝阳、丰台仍不

满足需求。

表 3 研究区内各行政区的生态绿当量结果

Table 3 Results of ecological green equivalent in each administrative region of the study area

	中心城区 Central urban area	东城区 Dongcheng district	西城区 Xicheng district	海淀区 Haidian district	朝阳区 Chaoyang district	丰台区 Fengtai district	石景山区 Shijingshan district
生态绿当量 Ecological green equivalent	0.79	0.97	1.04	0.85	0.78	0.62	1.20

综合分析各区生态绿当量的计算结果,可以看出北京市中心城区的绿色空间分布不均衡,各区的绿色空间建设质量也有差异。其中石景山依托西北浅山区大面积密林地使全区的生态质量有所保障;西城区拥有全区最大的路网密度,绿色空间的文化服务突出,对整体生态系统服务水平的提升有巨大的促进作用,西苑三海大面积的集中绿地,对区域具有较好的生态补偿作用。东部的朝阳区、南部的丰台区,绿色空间总量基础较好,但生态系统服务功能较弱的灌草地占比较大,同时丰台路网密度较低,文化服务水平低于其他区域;位于核心位置的东城区虽然拥有较大的路网密度,但绿色空间总量不足,且以灌草地和疏林地为主要覆被类型,导致生态系统服务能力偏低,不满足要求;海淀区拥有大量的密林地作为区域的生态源地,对区域生态系统的稳定具有良好的支撑作用,然而生态绿当量仍不满足需求,究其原因是建设用地疏林地、灌草地占比较大,影响整体生态系统服务水平。

3.2 要素配置的优化方案

在生态系统服务最大化的目标下,对中心城区、东城区、海淀区、朝阳区、丰台区采用线性规划模型进行了要素配置的优化方案,优化结果如表 4 所示。

表 4 绿色空间要素数量优化前后对比表

Table 4 Comparative table of green space elements before and after optimization

		中心城区	东城区	海淀区	朝阳区	丰台区
建设用地以内绿色空间	密林地	13786.98	428.89	4443.16	4625.75	3170.06
Green space in construction land	疏林地	-3186.23	-212.68	-469.78	-2038.73	-242.29
	灌草地	-10600.75	-216.22	-3973.38	-2587.02	-2927.77
	水域	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
耕地 Cultivated land		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
非建设用地内的绿色空间	密林地	232.15	0.00	1385.08	499.01	871.79
Green space in non-construction land	疏林地	296.86	0.00	-334.41	-118.39	-221.89
	灌草地	-529.02	0.00	-1050.67	-380.62	-649.91
	水域	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	其他	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合计 Total		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
生态系统服务变化百分率		4.76%	4.23%	5.76%	6.79%	10.49%
Percentage of ecosystem services change						

“-”表示用地减少量,表中绿色空间变化量单位均为 hm^2

北京市中心城区在生态系统服务最大化的目标下,将建设用地内部的 3186.23hm^2 疏林地和 10600.75hm^2 灌草地调整为密林地,集中分布于一道绿化隔离地区;建设用地以外,将 529.02hm^2 的灌草地调整为 232.15hm^2 的密林地和 296.86hm^2 的疏林地,主要分布于二道绿化隔离地区,生态绿当量从 0.79 提高至 0.83,生态系统服务水平提高了 4.80%。这是落实《北京市“十四五”时期土地资源保护利用规划》中优化绿化隔离地区用地结构,腾退建设用地,维护保障绿色空间格局的有效举措。

东城区在生态系统服务最大化的目标下,将 212.68hm^2 的疏林地和 216.22hm^2 的灌草地调整为密林地,可使生态绿当量由 0.97 提高到 1.01,满足生态绿当量的要求。综合分析,疏林地调整区域集中分布在南部的天

坛公园、龙潭公园等大斑块,灌草地调整区域则主要分布于宅间和路侧等附属绿地,通过增补乔木最终使生态系统服务水平提高了 4.23%。

朝阳区建设用地内增加 4626.75hm²的密林地,减少 2038.73hm²的疏林地和 2587.02hm²的灌草地;在非建设用地中,增加 499.01hm²的密林地,减少了 118.39hm²的疏林地和 380.62hm²的灌草地,优化后生态绿当量由 0.72 提高到了 0.77,生态系统服务提高了 6.79%。调整区域集中分布于北部的温榆河绿色生态景观带、六条楔形生态空间以及朝阳段两道绿化隔离地区的公园环,通过加大“生态修复、城市修补”力度,高质量建设绿色空间。

丰台区建设用地内增加 3170.06hm²的密林地,减少了 242.29hm²的疏林地和 2927.77hm²的灌草地;在非建设用地中,增加了 871.79hm²的密林地,减少了 221.89hm²的疏林地和 649.91hm²的灌草地,优化后生态绿当量由 0.62 提高到了 0.73,最终生态系统服务提高了 10.49%。通过加强河西地区浅山带山体裸露区的生态修复,构建永定河滨河绿色生态走廊,大力推进第二道绿化隔离地区的郊野公园建设,增强文化服务能力,提高绿色空间的生态系统服务水平。

综合考虑海淀区西北部山区作为中心城区生态源地的作用,在要素优化调整过程中,将生态源地不减少作为第一原则,最终在海淀区建设用地内增加 4443.16hm²密林地,减少 469.78hm²疏林地和 3973.38hm²灌草地;在建设用地以外增加 1385.08hm²密林地,减少 334.41hm²疏林地和 1050.67hm²灌草地,生态绿当量从 0.85 提升至 0.90,生态系统服务提高了 5.76%。通过加强山区林地抚育,推进低效林改造,建设西山生态屏障;增补南沙河、清河滨河绿色空间,提高绿色空间生态系统服务水平。

综上分析,中心城区绿色空间的生态系统服务受文化服务和调节服务的影响较大,其中东城区、西城区的生态系统服务主要以文化服务为主,虽然绿色空间总量较少,但具有独特的文化服务能力,生态系统服务水平整体处于较好的水平。石景山区和海淀区作为中心城区的生态源地,密林地占比较高,海淀区受总体建设强度的影响仍需进行相应的要素结构调整以提高生态系统服务水平。朝阳区和丰台区现状生态绿当量不满足要求,但均具有良好的绿色空间基底,通过合理调整要素比例可以有效提升生态系统服务水平。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文充分挖掘城市绿色空间的生态系统服务功能,引入“生态绿当量”的概念作为城市绿色空间的数量评价指标,采用可达性因子改进量化指标,以“最佳森林覆盖率”为生态标准,定量分析研究区内绿色空间的规模问题。有以下结论:

(1) 研究结果显示西城区、石景山区生态绿当量分别为 1.04、1.20,满足要求;朝阳区、丰台区、东城区和海淀区生态绿当量分别为 0.72、0.62、0.97 和 0.85,不满足要求。

(2) 采用线性规划模型结合城市建设的约束条件对城市绿色空间的要素数量结构进行优化调整,寻求综合效益最大时各类型绿色空间的适合比例。最终调整后:东城区的生态绿当量提高到了 1.01,满足要求,生态系统服务水平分别提高了 4.23%;朝阳区、丰台区和海淀区生态绿当量分别提高到了 0.77、0.73、0.90,生态系统服务水平分别提高了 6.79%、10.49%和 5.76%。因此合理调整要素数量结构是提高绿色空间综合效益的重要手段。

(3) 进一步结合各分区规划,将数量指标落实到空间分布上,东城区着重调整大面积斑块形成较好的生态源地,其次改造宅间和路侧等附属绿地提高生态系统服务水平;朝阳、海淀、丰台等区域优先完善自然山水要素,加强西部浅山区绿化、增补温榆河、永定河、清河、南沙河等滨河绿色空间;此外两道绿化隔离带对于中心城区生态系统服务的提升具有重要作用,需大力推进两道绿化隔离带增量提质建设。

4.2 讨论

众多研究指出,在一定的地域范围内,随着森林覆盖率的增加,森林生态系统服务能力随之增强,当覆盖

率达到一定程度后,其服务能力便不再增加;当覆盖率为定值时,森林自身质量的改善、经营管理方式的提升可以显著提高其服务能力,因此全面提升绿色空间要素质量,是保证生态健康系统稳定的基础。研究综合考虑生态系统服务水平,通过改进“生态绿当量”进行现状评价,采用线性规划模型,在满足城市发展需求的前提下,通过调整要素配置来提升生态系统服务水平,最终提出定性和定量相结合的优化建议,这与陈自新等在上世纪末期进行的《北京城市园林绿化生态效益的研究》^[33]中不同的植被类型具有差别较大的生态服务能力结果一致。

城市绿色空间受人工系统和自然系统的双重影响,同时具有系统性、嵌套性、复合性、多样性等特点^[34],在一定空间范围内,不同类型的绿色空间在数量上表现为此消彼长的关系,且数量的变化受制于空间供给能力的大小,单纯采用线性规划模型进行要素配置的定量优化,较难实现更综合全面的反映多重因素下城市绿色空间的动态演化过程,本文仅从生态效益发挥的视角考虑优化方案,是为了强化生态系统服务导向下绿色空间的要素配置优化。未来的研究中还需进一步结合系统动力学和多目标规划等手段充分进行要素配置的模拟和优化,以期获得更综合的优化方案。

参考文献 (References):

- [1] 王子琳,李志刚,程哈蓓.中国大城市公园绿地可达性的公平性研究——以武汉市中心城区为例.地理科学进展,2022,41(4): 621-635.
- [2] 徐宇曦,陈一欣,苏杰,尹海伟,程龙,曾辉.环境正义视角下公园绿地空间配置公平性评价——以南京市主城区为例.应用生态学报,2022,33(6): 1589-1598.
- [3] 颜金珊,祝薇,王保盛,唐立娜.转型中工业城市的公园绿地社会公平性研究——以东莞市东城街道为例.生态学报,2021,41(22): 8921-8930.
- [4] 牛爽,汤晓敏.高密度城区公园绿地配置公平性测度研究——以上海黄浦区为例.中国园林,2021,37(10): 100-105.
- [5] 杨文越,李昕,陈慧灵,曹小曙.基于多出行模式两步移动搜索法的广州多尺度绿地可达性与公平性研究.生态学报,2021,41(15): 6064-6074.
- [6] 王子尧,高宇,王向荣.北京中心城区城市公园使用状况与影响因素量化研究.北京规划建设,2020,(2): 88-93.
- [7] 刘影,张小勇,徐铭嘉,郭美萱,彭安琪,余传婷,殷炜达.供需协同视角下公园绿地空间分异特征研究——以北京市朝阳区为例.城市发展研究,2022,29(2): 12-19.
- [8] 王忙忙,王云才.平衡还是匹配?生态智慧引导下的公园绿地供需关系多情景分析与优化.中国园林,2021,37(7): 37-42.
- [9] 肖华斌,何心雨,王玥,王洁宁,姜芊孜.城市绿地与居民健康福祉相关性研究进展——基于生态系统服务供需匹配视角.生态学报,2021,41(12): 5045-5053.
- [10] 杨鑫,高雯雯,李莎,李冠衡.基于遥感影像估算的北京中心城区碳储量与气候环境关联性研究.风景园林,2022,29(5): 31-37.
- [11] 赵庆,章驰,胡柔璇,许东先,钱万惠,魏玉晗,唐洪辉.珠海市城区风景游憩林三维绿量与林下游憩空间量特征.浙江农林大学学报,2021,38(3): 534-540.
- [12] 李凤霞.西安城市绿地生态效益评价体系及价值估算研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [13] 石铁矛,李沛颖,汤煜.碳中和背景下城市碳汇功能及提升策略——以沈阳核心区为例.中国园林,2022,38(3): 78-83.
- [14] 于天飞,夏恩龙.基于碳中和愿景的绿地碳汇价值实现过程研究.自然保护地,2022,2(1): 74-81.
- [15] 王行,王月容,段敏杰.北京城市副中心绿地降温增湿效应评价.北京农学院学报,2022,37(1): 103-110.
- [16] 焦敏,周伟奇,钱雨果,王佳,郑重,胡潇方,王伟民.斑块面积对城市绿地降温效应的影响研究进展.生态学报,2021,41(23): 9154-9163.
- [17] 韩沐汶,庄逐舟,马超,吴涔,马雪,石云.基于生态绿当量的生态移民区生态效益评价——以盐池县移民区为例.水土保持研究,2014,21(6): 211-217.
- [18] 董孟龙.基于NPP和生态绿当量的黄土高原土地利用生态效益研究[D].西安:长安大学,2018.
- [19] 胡蒙蒙,张军民,徐丽萍,唐湘玲,王玲.基于生态绿当量的玛纳斯河流域土地利用生态效益研究.干旱区研究,2016,33(5): 996-1002.
- [20] Chen X, Wang K L, Zhou W J, Li H B, Ashraf M A. Optimization of land use at Mt. Yuelu scenic area: an analysis using the ecological green equivalent. Earth Sciences Research Journal, 2016, 20(1): N1-N5.

- [21] 李雪明, 张永福, 顾峰, 周斌. 基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以阿克苏市为例. 黑龙江大学工程学报, 2019, 10(4): 57-63.
- [22] 徐杰, 龚萍, 金良. 基于生态绿当量的呼和浩特市土地利用结构优化评价与分析. 生态经济, 2019, 35(1): 196-201.
- [23] 胡蒙蒙, 张军民, 徐丽萍, 唐湘玲, 王玲. 基于生态绿当量的玛纳斯河流域土地利用优化. 石河子大学学报: 自然科学版, 2015, 33(6): 709-715.
- [24] 赵丹, 李锋, 王如松. 基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例. 生态学报, 2011, 31(20): 6242-6250.
- [25] 北京市规划和国土资源管理委员会. 北京城市总体规划(2016年—2035年). (2017-09-29). http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/cqgh/201907/t20190701_100008.html.
- [26] 北京市生态环境局. 2020年北京市生态环境状况公报. (2021-5-13). <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/10985106/2021110818014254063.pdf>.
- [27] 刘艳芳, 明冬萍, 杨建宇. 基于生态绿当量的土地利用结构优化. 武汉大学学报: 信息科学版, 2002, 27(5): 493-498, 515-515.
- [28] 毛文永. 生态环境影响评价概论. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [29] 李想, 雷硕, 冯骥, 温亚利. 北京市绿地生态系统文化服务功能价值评估. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 33-39.
- [30] 薛明皋, 邢路, 王晓艳. 中国土地生态系统服务当量因子空间修正及价值评估. 中国土地科学, 2018, 32(9): 81-88.
- [31] 宫渊波, 张健, 陈林武. 四川盆地低山丘陵区县级最佳防护效益森林覆盖率定量研究. 四川农业大学学报, 1996, 14(2): 231-236.
- [32] 邓聚龙. 多维灰色规划. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989.
- [33] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 古润泽. 北京城市园林绿化生态效益的研究(6). 中国园林, 1998, 14(6): 53-56.
- [34] 王博娅. 生态系统服务导向下北京市中心城区绿色空间的现状及优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.