

西安城市公园绿地生态服务功能价值估算研究

李凤霞¹, 宋昆仑², 冯晓刚¹, 李 萌¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 石家庄学院 资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050035)

摘要: 为有效提升公园绿地的服务价值, 为协助城市可持续发展提供理论依据, 以 Quick bird 高分辨率遥感影像数据、样地实测三维激光点云数据为主, 采用微分法定量描述了西安市兴庆宫公园绿地系统三维绿量及其生态服务功能与生态价值。初步形成定量分析研究方法可用于西北乃至其他生态脆弱区城市园林绿地生态系统的科学评价, 可为城市绿地生态系统规划提供科学依据, 促进城乡人居环境的可持续发展。结果表明: (1) 西安市兴庆宫公园绿地系统三维绿量较高, 为 149 602.856 m³; (2) 兴庆宫公园绿地系统各项生态服务功能由大到小依次为固碳量>释氧量>滞尘量>吸收二氧化硫量, 固碳效益贡献率最高, 对城市生态环境起到了明显的改善作用; (3) 兴庆宫公园绿地系统年固碳、释氧、滞尘、吸收二氧化硫生态服务功能总价值达到了 705 412.466 元, 其价值比例分别是 77.27%、0.08%、3.97% 和 18.68%。

关键词: 城市绿地; 三维绿量; 生态服务功能; 生态价值; 西安市

中图分类号: TU 985.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0783-08

Study on ecological value estimation of urban park green space in Xi'an

LI Fengxia¹, SONG Kunlun², FENG Xiaogang¹, Li Meng¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Resources and Environmental Sciences, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: In order to effectively enhance the service value of park green space and provide theoretical basis for assisting urban sustainable development. Based on Quick Bird high resolution remote sensing image data, as well as point cloud data measured in the sample, this paper describes the 3D green quantity, ecological service function and ecological value of the green space system in Xingqing Palace Park of Xi'an city quantitatively, by differential method. The quantitative analysis method can be used for the scientific evaluation of urban green space ecosystem in northwest of China and other ecologically fragile areas, which can provide scientific basis for urban green space ecosystem planning and promote the sustainable development of urban and rural human settlement environment. The results show that Xi'an Xingqing Palace Park has a high three-dimensional green quantity, it is 149 602.856 m³. Besides, the order of ecological service function of xingqing Palace Park's green space system is as follows, carbon sequestration>oxygen release>dust retention>sulfur dioxide absorption. And the contribution rate of carbon sequestration benefit is the highest, which has obviously improved the urban ecological environment. Meanwhile, the total value of ecological service functions of carbon sequestration, oxygen release, dust retention and sulfur dioxide absorption in xingqing Palace Park reached 705 412.466 yuan per year, with the value proportion of 77.27%, 0.08%, 3.97% and 18.68%, respectively.

Key words: urban green space; three-dimensional green quantity; ecological service function; ecological value; Xi'an city

随着城市化进程的不断加快, 城市的社会经济得到了快速发展, 城市人口高度集中, 到 2050 年, 世界城市人口预计将增加 84%^[1]。城市用地的空

间拓展是我国土地利用变化的发展趋势^[2]。占陆地面积 2% 的城市排放了 78% 的温室气体^[3], 部分研究认为城市区域产生的 CO₂ 数量更大, 占到了总

收稿日期: 2022-05-10

修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51608419); 陕西省教育厅自然科学专项基金项目(18JK0453); 陕西省自然科学基金项目(2018JM5073); 西安建筑科技大学自然科学专项基金项目(ZR19001)

第一作者: 李凤霞(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事城市生态环境及遥感。E-mail: fengxiali@xauat.edu.cn

通信作者: 宋昆仑(1987—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事智慧城市及遥感。E-mail: 843751286@qq.com

排放量的 96%~98%^[4]。

如今,城市建筑愈加密集,制约着人们生活质量的提高和城市化的进一步发展^[5-8]。随着城市环境问题越来越严重,加强城市绿地建设、改善生态环境迫在眉睫,许多国家已经制定了城市绿化的目标^[9-10]。

城市绿地是维护城市生态系统稳定的重要因素,拥有巨大的生态系统服务价值^[11]。充分掌握绿地系统的生态服务功能及其生态价值,可为绿地规划和管理打下坚实的基础^[12]。城市公园绿地面积较大,对城市生态的影响更为显著。国内外一些学者对绿地系统生态服务功能陆续开展了相关研究。首先,Holden 和 Ehrlich 于 1974 年提出生态系统服务功能(ecological service)的概念,探讨了生态服务功能的内容,以及能否用先进的科学技术来替代生态服务功能等^[13]。Hamada 等^[14]对日本名古屋的研究表明,在温度调节方面,城市绿地发挥了巨大的作用。Zoulia 等^[15]雅典城市绿地系统为例,研究指出,在缓解城市热岛效应方面,城市绿地具有不可替代的作用。

Mitchell 等^[16]对绿地的生态服务功能进行了研究,研究发现绿地对人们的身心健康具有积极的引导和促进作用。Chunyang ZHU 等^[17]的研究指出,城市绿化带降低了气温,增加了气温相对湿度,改善了空气质量,为城市规划设计人员实现城市绿地生态效应的优化设计提高数据支持。我国学者对绿地生态效益的研究起源于陈自新对园林绿化生态效益的评价,对不同地方的绿地生态服务功能价值进行了估算。张超等^[18]以南京市为例,估算了 2006—2015 年的城市绿地生态价值。杨致远等^[19]基于延安市 1999—2019 年退耕还林工程数据,对其生态服务功能进行了评估。柳云龙等^[20]以上海城市绿地数量动态变化及其空间分布状况为基础,综合运用多种生态经济学研究方法,对上海城市绿地净化服务功能价值进行了估算。

张绪良等^[21]以青岛市为例,定量计算了绿地在滞尘减噪、固碳释氧方面的生态服务价值。于洋等^[22]系统地阐述了城市绿地碳汇量的估算方法。综上所述,在习近平新时代生态文明发展理论的指导下,我国在生态环境建设、碳达峰碳中和、人居环境健康发展等方面取得了长足进步。其中,国内、国外的学者们为绿地生态服务功能价值的精确估算提供了较多的方法和较好的理论框架。

但仔细梳理之后,可以发现,国内外各项研究不仅比较独立,其中缺乏一定的关联性,而且绿地系统生态服务功能评价指标具有鲜明的地域性特点。研究表明,评价指标在城市绿地生态效益综合评价中具有十分重要的地位,它不仅与绿地率、绿化覆盖率、人均公共绿地面积等这些二维指标密切相关,而且与三维指标密不可分,比如森林三维绿量、均匀度、生物量等。因此,本研究以西安市兴庆宫公园为研究对象,基于城市公园乔木林三维绿量值,对公园绿地生态服务功能及其生态价值进行精准估算,旨在进一步提高绿地系统生态服务功能价值的估算精度,有利于督导城市公园绿地生态系统的规划,促进城乡人居环境的可持续发展,推进多学科的交叉及融合,发挥遥感技术、地理信息技术在城市环境及城乡规划研究与发展政策制定中的创新作用。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

西安市(东经 107°40′~109°49′,北纬 33°42′~34°45′)位于我国西北地区,北濒渭河,南依秦岭。主要地貌是渭河平原及秦岭山地,属暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷,夏季炎热,年平均气温 11.1~13.3℃。该研究区辖碑林、新城、未央、雁塔、灞桥、莲湖六区,面积为 822.28 km²。主城区行政区划图如图 1 所示。兴庆宫公园属于西安市碑林区,位于古城西安明城墙东面,占地面积为 52 hm²(即 780 亩),其中湖面 10 hm²(即 150 亩),绿地覆盖率达百分之五十多,是西安市著名的休闲运动公园。该公园树种丰富,主要包含雪松、杨柳、法桐、三角枫、国槐、大叶女贞、紫叶李等。兴庆宫公园的 Quickbird 遥感影像如图 2 所示。

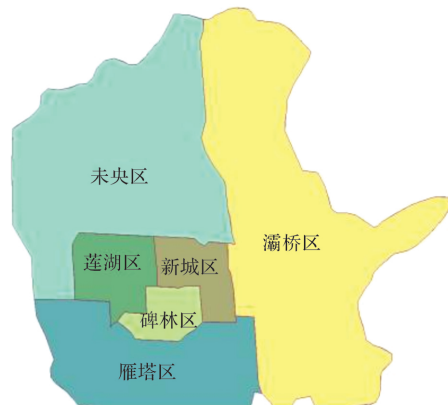


图 1 主城区行政区划图

Fig. 1 Administrative zoning map of the main city



图2 兴庆宫公园遥感影像图

Fig. 2 Remote sensing image of Xingqing Palace park

1.2 数据源与研究方法

本研究基于高分辨率遥感影像数据、三维激光点云数据、地形图数据、统计数据等。把遥感影像数据与三维激光点云数据相结合,进行高精度三维绿量测量,具体测算流程为(图3):使用三维激光扫描仪扫描单棵树的点云数据,再采用微分法估算单木三维绿量,然后应用立体量推算立体量法计算所扫描样地的三维绿量,最后依据研究区面积及单位面积三维绿量,测算研究区总三维绿量。研究样地设置为边长为20 m的正方形,要求相邻两个样地之间大于等于150 m。本研究定量解析西安兴庆宫公园绿地三维绿量及其生态效益,掌握其响应机制,以期为城市园林绿地生态系统规划提供科学依据,促进城乡人居环境的可持续发展。

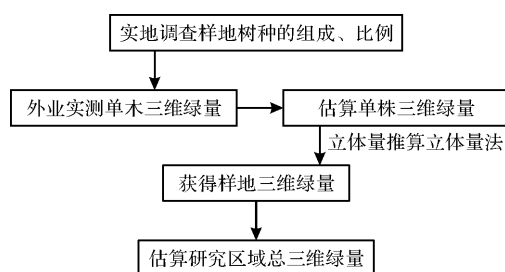


图3 三维绿量测算流程图

Fig. 3 Flow chart of calculating three dimensional green quantity

2 模型构建方法

2.1 微分法单木三维绿量模型

确定单棵树的三维点云数据的边界范围,由此可得三维激光点云数据在X、Y、Z上的最大值以及最小值,因此可得到一个边界长方体。然后依据单元格长度,把边界长方体分割成若干个微分单元格。若L、W、H分别为长方体的长、宽、

高,d为微分单元格的边长,一共有M个微分单元格,则

$$M = \frac{L \times W \times H}{d^3} \quad (1)$$

把外业扫描的三维激光点云数据分别放进单元格里,若单元格里有点云坐标,那么这个点被判定为有效格网点,并进行相应标记,逐一进行,待处理完所有的三维点云坐标之后,我们可以获取总的有效格网点,总数记为N,这样可以得到微分法估算单棵树三维绿量的模型,如下所示。

$$G = \frac{N}{M} \times V_{box} \quad (2)$$

式中:G为单棵树三维绿量值;N为有效格网点的总数;M为微分单元格的数目; V_{box} 是由所有的空间单元所形成的最小的外接长方体体积。综合公式(1)及公式(2)最终获得微分法测算单棵树三维绿量的模型^[23]为

$$G = \frac{N}{L \times W \times H} \times d^3 \times V_{box} \quad (3)$$

2.2 微分法单棵树三维绿量模型精度检验^[24]

(1)单棵树三维绿量模型拟合精度检验

该研究所用的单木三维绿量模型,在使用之前对模型做了拟合精度检验,如公式(4)所示^[25]。

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSE_p}{SST} = 1 - \frac{MSE_p}{\left(\frac{SST}{N-1} \right)} \quad (4)$$

式中: SSE_p 是单木三维绿量模型回归的平方和;p是模型拟合精度检验中自变量的个数; SSR_p 是模型拟合精度检验中残差的平方和。

$$R_p^2 = \frac{SSR_p}{SST} = 1 - \frac{SSE_p}{SST} \quad (5)$$

式中:p是单木三维绿量模型待估测个数;将p的种植作用先引入到 R_p^2 中之后,即可得到修正后的模型复相关系数。

$$R_p = \sqrt{R_p^2} - \sqrt{\frac{SSR_p}{SST}} - \sqrt{1 - \frac{SSE_p}{SST}} \quad (6)$$

式中: R_p 是单棵树三维绿量模型的复相关系数,由于因变量与自变量具有一定的复相关性,所以我们用复相关系数来测定,这样可以反映出各个自变量间的相互影响。模型拟合效果与决定系数 R_p^2 和修正后的决定系数 R_a^2 ,以及复相关系数 R_p 正相关。

(2)单棵树三维绿量模型预估精度检验

本研究基于预留的兴庆宫公园样木数据,对单棵树三维绿量模型的预估能力进行了严格检验:

$$P=1-\frac{A-E}{A}=\frac{E}{A} \quad (7)$$

式中: P 是单木三维绿量模型的预估精度; A 是样地三维绿量实测值; E 是估测值。

3 结果与分析

3.1 城市公园绿地三维绿量估算

本研究首先进行样地实地调研、外业实地扫描高精度三维激光点云数据, 兴庆宫公园乔木林外业扫描共计花费十三天的时间。

然后利用徕卡的 Cyclone 软件对三维激光点云

数据进行内业处理, 包括对点云数据的拼接处理、去噪处理, 最终获得不同树种的三维模型如图 4 所示。图 4 中, 第一行是紫叶李的三维模型, 第二行是国槐的三维模型, 第三行是大叶女贞的三维模型, 各树种三维模型精度较高。

建立好单木三维点云模型之后, 应用微分法结合程序计算出单棵树三维绿量, 再根据立体量之间互相推算的方法, 从而估算出兴庆宫公园乔木林样地三维绿量。最后, 基于样地三维绿量计算城市公园绿地总三维绿量。

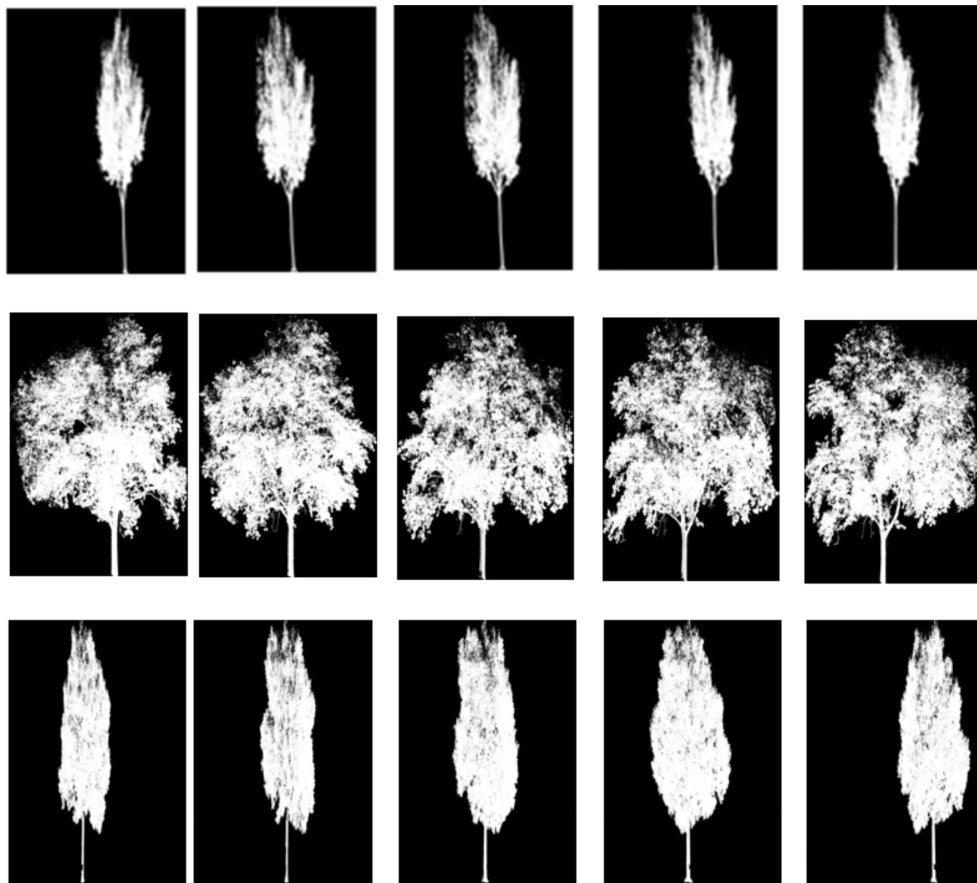


图 4 单木三维点云模型

Fig. 4 3D point cloud model of single wood

本研究使用遥感技术中常用的遥感软件——易康(Ecognition)软件, 基于兴庆宫公园高分辨率遥感影像, 首先进行多尺度分割, 然后采用面向对象的分类方法, 选择各类型样地、分类, 将兴庆宫公园进行土地利用类型分类, 结果如图 5 所示。把兴庆宫公园土地利用类型划分为乔木、建设用地、草地、水体以及裸露地, 得到兴庆宫公园土地利用类型图。接下来, 应用地理信息系统相关软件, 比如 ARCGIS, 进行各类型土地利用面积的统计与分析, 分析的结果如表 1 所示。

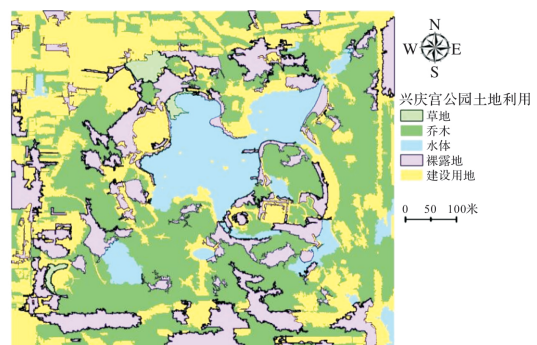


图 5 兴庆宫公园土地利用类型图

Fig. 5 Land use type map of Xingqing Palace park

所测样地的总三维绿量值与其面积相除，获取其单位面积三维绿量值。应用地理信息系统相关软件得到研究区的乔木面积，再与单位面积三维绿量相乘，最终得到研究区域的总三维绿量，

如表 2 所示。由于乔木林是森林植被三维绿量的最主要贡献者，因此本研究主要分析的是兴庆宫公园乔木林三维绿量。以后会进一步研究灌木和草地的三维绿量。

表 1 兴庆宫公园土地利用类型面积

Tab. 1 Xingqing Palace park land use type area

类型	数量	面积最小值/m ²	面积最大值/m ²	面积总和/×10 ⁴ m ²	面积平均值/m ²	标准差
乔木	38	80.3	72 631.5	19.1	5 034.4	13 460.6
草地	3	905.5	3 219.2	0.5	1 770.3	1 030.9
水体	12	174.4	43 685.4	6.0	5 002.1	11 719.7
建设用地	120	3.7	42 510.0	14.5	1 209.1	4 048.4
裸露地	51	69.3	8 379.3	9.7	1 902.2	2 051.1

表 2 西安兴庆宫公园三维绿量测算

Tab. 2 Xi'an Xingqing Palace park three-dimensional green quantity measurement

类型	有效的 样方数	样地三维 绿量值/m ³	样地的 面积/m ²	单位面积三维 绿量值/ m ³ · m ⁻²	乔木 总面积/m ²	总三维 绿量值/m ³
兴庆宫公园森林植被	6	1 876.8	24 00	0.782	191 308.0	149 602.856

由表 1 可知，兴庆宫公园的乔木面积最大，其面积总和为 19.1×10⁴ m²，草地面积比较小，仅有 0.5×10⁴ m²，建设用地面积仅次于乔木面积，同时，该公园拥有大面积水域。总体来说，乔木面积>建设用地面积>裸露地面积>水体面积>草地面积，这与实际情况相符。因为乔木在绿地系统中发挥着非常重要的作用，所占比例高，贡献最大，所以本研究用乔木面积来计算兴庆宫公园总三维绿量值。

本研究在兴庆宫公园实测的有效样方数是六个。采用立体量推算立体量的方法，计算出的样地三维绿量是 1 876.8 m³，样地面积为 2 400 m²。由表 2 可以看出，兴庆宫公园的单位面积三维绿量较高，为 0.782 m³/m²，总三维绿量为 149 602.856 m³，三维绿量值比较高，这是因为兴庆宫公园内的乔木种类丰富，高达 75 种，其中，松树是最主要的常绿乔木。另外，兴庆宫公园里的植物配置形式灵活、多样，树龄较长，高大植物较多，是西安市民的“后花园”，其产氧量高，一进入公园有一种心旷神怡的感觉。同时，兴庆宫公园物种丰富，其潜在价值很大，有待进一步挖掘。

3.2 城市公园绿地生态服务功能及其价值分析

公园绿地的生态效益主要包括固碳释氧、滞

尘减污、降温增湿、调节局部小气候等。本研究以绿地的三维绿量为基础，参考周一凡、周坚华对绿化环境效益的计算方法(表 3)^[26-27]，定量计算了西安兴庆宫公园绿地生态效益。

表 3 以三维绿量为基准的生态效益标准换算量^[30-31]

Tab. 3 Ecological benefit standard conversion amount based on three-dimensional green quantity^[30-31]

内容	单位	标准换算量
吸收 CO ₂ 量	t/a	常绿植物每年吸收 CO ₂ 量：48.5 t /1 万 m ³ 三维绿量
		落叶植物每年吸收 CO ₂ 量：26.2 t /1 万 m ³ 三维绿量
吸收 SO ₂ 量	kg/a	针阔混生林每年吸收 SO ₂ 量：30.3 kg/1 万 m ³ 三维绿量
滞尘量	t/a	针阔混生林每年滞尘量：11.0 t /1 万 m ³ 三维绿量
产 O ₂ 量	t/a	常绿植物每年产 O ₂ 量：35.2 t /1 万 m ³ 三维绿量
		落叶植物每年产 O ₂ 量：19.0 t /1 万 m ³ 三维绿量

由调研结果可知，兴庆宫公园的落叶树种和常绿树种的比例分别是 81.33%和 18.67%，依据表 3 和表 2 中的总三维绿量计算结果，定量分析西

安兴庆宫公园乔木林的固碳、释氧、滞尘等生态服务功能。再基于固碳量、吸收二氧化硫酸量、释氧量、滞尘量,参考《中国生物多样性国情研究报告》、《森林生态系统服务功能评估规范》^[28-29]估算兴庆宫公园生态服务功能价值(表4)。

表4 西安兴庆宫公园绿地生态效益及其价值

Tab. 4 Xi'an Xingqing Palace park green space ecological benefit and its value

评价指标	生态效益	生态价值/(元·a ⁻¹)
吸收 CO ₂ 量/(t·a ⁻¹)	454.246	545 095.2
吸收 SO ₂ 量/(kg·a ⁻¹)	453.297	543.956
滞尘量/(t·a ⁻¹)	164.563	27 975.710
产 O ₂ 量/(t·a ⁻¹)	329.494	131 797.6
合计		705 412.466

由表4可知,兴庆宫公园乔木林2018年固碳效益贡献率最高,为454.246 t,吸收了453.297 kg 二氧化硫酸量(SO₂),滞尘量(T. S. P.)是164.563 t,年产氧量(O₂)为329.494 t,总体来看,固碳量>释氧量>滞尘量>吸收二氧化硫酸量。兴庆宫公园绿地生态价值为705 412.466元,吸收CO₂、吸收SO₂、滞尘、产O₂价值比例分别是77.27%、0.08%、3.97%和18.68%。其中,固碳的货币值所占比重最大,为545 095.2元/a,其次是释氧的货币值,为131 797.6元/a,兴庆宫公园乔木滞尘的生态价值为27 975.710元,吸收二氧化硫的生态价值最小,为543.956元。

4 结论

本文以精确的三维绿量为基础,估算了西安市兴庆宫公园绿地生态服务功能及其价值。一方面分析了兴庆宫公园乔木林的三维绿量,另一方面实现了兴庆宫公园绿地系统生态服务功能的货币化,取得的研究成果具有较强的理论现实意义和应用价值,可为园林绿地精准管理及科学规划提供理论依据。研究结果表明:

(1)西安市兴庆宫公园绿地系统生态服务价值较大,年固碳、释氧、滞尘、吸收二氧化硫酸生态价值为705 412.466元;

(2)从兴庆宫公园绿地系统生态服务价值的构成来看,各项生态价值由大到小依次为:固碳量>释氧量>滞尘量>吸收二氧化硫酸量;

(3)兴庆宫公园绿地系统三维绿量为149 602.856 m³。进入公园,最直接的感觉是空气清新,氧气充足,被称为城市的“绿肺”。

在做城市绿地规划的时候,建议既要考虑绿地面积,又要兼顾其内部空间结构,植物种类的配置,树种的选择等,从而有效提高其绿地三维绿量,增强其生态服务功能,提高市民的幸福生活指数。

本文在估算三维绿量时,考虑到乔木林是森林植被三维绿量的最主要贡献者,没有估算灌木和草本的三维绿量,因此,本研究计算的兴庆宫公园绿地生态服务功能及其价值比实际值低,后续研究将重点放在乔灌草三种类型的总三维绿量方面。同时,今后还将进一步研究城市绿地其他方面的生态服务功能及其生态价值,比如降温增湿、杀菌、减噪等。该研究方法及其研究结果能够为公园绿地生态服务功能评价提供一定的参考,为城乡人居环境可持续发展提供数据支撑。

参考文献 References

- [1] ZHANG Biao, XIE Gaodi, ZHANG Canqiang, et al. The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China [J]. Journal of Environmental Management, 2012, (100):65-71.
- [2] 谈明洪,李秀彬,吕昌河. 20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用[J]. 中国科学(D辑). 2004,34(12): 1157-1165.
TAN Minghong, LI Xiubin, LV Changhe. Construction land expansion and its occupation of cultivated land in large and medium cities in China in the 1990s [J]. Science China (series D), 2004, 34(12): 1157-1165.
- [3] GRIMM N B, GROVE J M, PICKETT S T A, et al. 2000. Intergrated approaches to long-term studies of urban systems. BioScience, 50: 571-584
- [4] IPCC. Emission scenarios. In: Special Report on Emission Scenarios[R]. Oxford: Oxford University Press, 2000:691.
- [5] 刘柄麟,张超. 城市能源消耗碳足迹研究述评[J]. 绿色科技, 2016, 12: 68-69.

- LIU Binglin, ZHANG Chao. Review of studies on carbon footprint of urban energy consumption[J]. Journal of Green Science and Technology, 2016, 12: 68-69.
- [6] FITZSIMONS J, PEARSON C J, LAWSON C. Evaluation of land-use planning in greenbelts based on intrinsic characteristics and stakeholder values [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 106: 23-34.
- [7] 刘涛,张静. 西北地区中小城市土地多功能利用研究——以甘肃省天水市为例[J]. 宁夏师范学院学报(自然科学), 2013,34(3): 65-69.
- LIU Tao, ZHANG Jing. Multi-functional land use in small and medium-sized cities in northwest China: a case study of Tianshui City in Gansu Province [J]. Journal of Ningxia Teacher's University (Natural Science), 2013, 34(3): 65-69.
- [8] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等. 北京城市园林绿化生态效益的研究[J]. 中国园林,1998,14(1): 57.
- CHEN Zixin, SU Xuehen, LIU Shaozong, et al. Study on the ecological benefit of Urban landscaping in Beijing[J]. Chinese Landscape Architecture, 1998,14(1): 57.
- [9] JEFFREY D K, ALISSA M, RALPH J A. Integrating urbanization into landscape-level ecological assessments[J]. Ecosystems, 2001,4(1): 3-18.
- [10] HOLLING C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social system[J]. Ecosystems, 2001,4(5): 390-405.
- [11] 赵煜,赵千钧,崔胜辉,等. 城市森林生态服务价值评估研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6723-6732.
- ZHAO Yu, ZHAO Qianjun, CUI Shenghui, et al. Evaluation of urban forest ecological services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6723-6732.
- [12] 胡小飞,傅春. 南昌城市绿地系统生态调节服务功能价值动态分析[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(1): 230-237.
- HU Xiaofei, FU Chun. Dynamic analysis of ecological regulation service value of urban green space system in Nanchang[J]. ACTA AGRICULTURAE UNIVERSITATIS JIANGXIENSIS, 2014, 36(1): 230-237.
- [13] HOLDEN J P, EHRLICH P R. Human population and the global environment[J]. American Scientist, 1974, 62(3): 282-297.
- [14] HAMADA S, OHTA T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2010, 9(1): 15-24.
- [15] ZOULIA I, SANTAMOURIS M, DIMOUDI A. Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 156(1-4): 275-292.
- [16] MITCHELL R, POPHAM F. Effect of exposure to natural environment on health inequalities: An observational population study[J]. The Lancet, 2008, 372(9650): 1655-1660.
- [17] ZHU Chunyang, JI Peng, LI Shuhua. Effects of urban green belts on the air temperature, humidity and air quality[J]. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2017, 25(1): 39-55.
- [18] 张超,吴群,彭建超,等. 城市绿地生态系统服务价值估算及功能评价——以南京市为例[J]. 生态科学, 2019, 38(4): 142-149.
- ZHANG Chao, WU Qun, PENG Jianchao, et al. Calculation of the value and evaluation of the function for ecosystem services of urban green space: a case study in Nanjing [J]. Ecological Science, 2019, 38(4): 142-149.
- [19] 杨致远,刘琪璟,秦立厚,等. 延安市退耕还林工程生态效益评价[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 259-266.
- YANG Zhiyuan, LIU Qijing, QIN Lihou, et al. Ecological benefit assessment of the grain for green project in Yan'an[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022,37(1):259-266.
- [20] 柳云龙,朱建青,施振香. 上海城市绿地净化服务功能及其价值评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(5): 28-32.
- LIU Yunlong, ZHU Jianqing, SHI Zhenxiang. Purification services and their value assessment of city green space in Shanghai[J]. China Population, Resources And Environment, 2009,19(5): 28-32.
- [21] 张绪良,徐宗军,张朝晖,等. 青岛市城市绿地生态系统的环境净化服务价值[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2576-2584.

- ZHANG Xuliang, XU Zongjun, ZHANG Chaohui, et al. Environment purification service value of urban green space ecosystem in Qingdao city[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2576-2584.
- [22] 于洋,王昕歌. 面向生态系统服务功能的城市绿地碳汇量估算研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(1): 96-102.
- YU Yang, WANG Xinge. Estimation of urban green space carbon sink for ecosystem service function[J]. *Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2021, 53(1): 96-102.
- [23] 李凤霞,石辉,撒利伟,等. 微分法三维激光点云数据单木三维绿量测定研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(4): 530-535.
- LI Fengxia, SHI Hui, SA Liwei, et al. 3D green volume measurement of single tree using 3d laser point cloud data and differential method[J]. *Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2017, 49(4): 530-535.
- [24] 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.
- LI Fengxia. Research on ecological benefit evaluation system and ecological value of urban green space in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2018.
- [25] 马瑞兰. 基于RS和GIS技术的火地塘林场森林蓄积量的估测[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2011.
- MA Ruilan. Estimation of forest stock in Huoditang Forest Farm based on RS and GIS technology[D]. Yang Ling: Northwest A & F University, 2011.
- [26] 周一凡,周坚华. 基于绿化三维量的城市生态环境评价系统[J]. *中国园林*, 2001(5): 77-79.
- ZHOU Yifan, ZHOU Jianhua. Urban ecological environment evaluation system based on three-dimensional greening quantity [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2001(5): 77-79.
- [27] 周坚华. 城市生存环境绿色量值群的研究(5)——绿化三维量及其应用研究[J]. *中国园林*, 1998, 14(5): 61-63.
- ZHOU Jianhua. Study on the green quantity group of urban living environment (5): The three-dimensional greening quantity and its application [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 1998, 14(5): 61-63.
- [28] 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所. 森林生态系统服务功能评估规范: LY/T1721—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Specification for evaluation of forest ecosystem services: CAF. LY/T1721—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [29] 中国生物多样性国情研究报告编写组. 中国生物多样性国情研究报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- Chinese Biodiversity Research Report Compilation Group. A national report on biodiversity in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998.

(编辑 桂智刚)