

成都市城市蓝绿系统碳储量评估及优化策略研究

Assessment and Optimization Strategy of Urban Blue-Green System Carbon Stock in Chengdu

钟彦萍 张思凝* 宋昊翔 臧家昕

ZHONG Yanping, ZHANG Sining*, SONG Haoxiang, ZANG Jiaxin

基金项目: 成都市哲学社会科学规划项目 (编号: YY2920220108); 四川省社会科学重点研究基地 (扩展) 国家公园研究中心 (编号: GJGY2022-ZC005); 国家自然科学基金青年项目 (编号: 52008345)

摘要

温室气体大量排放加剧了全球变暖, 严重威胁城市与居民的健康福祉。而城市蓝绿系统是适应与缓解气候变化, 固碳增汇的重要手段之一。以成都市中心城区为例, 基于土地利用数据, 利用 InVEST 碳储量模型与 ArcGIS 空间可视化分析工具, 对城市蓝绿系统碳储量进行评估及分区, 结果发现, 研究区总碳储量空间分布呈现出“中心低, 四周高”的特征, 低碳区域集中分布在研究区域的中部且占比最大, 碳汇潜力区沿环城生态带分布, 高碳区域零星分布在研究区域东侧。据不同碳储量的划分区域提出具有针对性的碳储量优化策略: 高碳区域应优先保护现有的蓝绿空间; 碳汇潜力区可调整和恢复现有的蓝绿空间; 低碳区域需改良和管理蓝绿空间。

Abstract

The massive emission of greenhouse gases has led to an increasing trend of global warming, seriously threatening the health and well-being of cities and their inhabitants. The urban blue-green system is one of the important means to adapt to and mitigate climate change sequester carbon and increase sinks. In this paper, we take the central city of Chengdu as an example, based on the land use data, use the InVEST carbon stock model and ArcGIS spatial visualization and analysis tools to evaluate and partition the carbon stock in the urban blue-green system, and the results found that: the spatial distribution of the total carbon stock in the study area shows the characteristics of low in the center and high in the surroundings. The low Carbon Sequestration Area is concentrated in the middle of the study area and accounts for the largest proportion, the Potential Carbon Sequestration Area is distributed along the ecological belt around the city, and the High Carbon Sequestration Area is sporadically distributed in the east side of the study area. According to the different carbon storage areas, we propose targeted carbon storage optimization strategies: High Carbon Carbon Sequestration Areas should prioritize the protection of existing blue-green spaces; Potential Carbon Sequestration Areas can adjust and restore existing blue-green spaces; Low Carbon Carbon Sequestration Areas need to improve and manage blue-green spaces.

文章亮点

1) 将城市 InVEST 模型应用于城市碳汇研究中; 2) 成都市中心城区内总碳储量空间分布呈现出“中心低, 四周高”的特征; 3) 确定成都市中心城区不同碳汇能力区域并提出针对性优化策略。

关键词

蓝绿空间; 碳储量; 固碳增汇; InVEST 模型

Keywords

Blue-green space; Carbon stock; Carbon sequestration; InVEST Model

收稿日期: 2024-03-23

修回日期: 2024-05-20

近年来，全球变暖趋势日益加剧。《2023 年全球气候状况》临时报告确认 2023 年成为有记录以来最热的一年，全球平均气温比工业化前高出 1.4℃。人为活动产生的二氧化碳排放是温室气体的主要来源，城市不断扩张不仅加剧了二氧化碳排放，也进一步加剧了城市热岛效应，对社会与居民造成了严峻威胁。中国作为全球气候治理的引领者，推进实现“双碳”目标已势在必行。

城市蓝绿系统作为城市中唯一的直接碳汇途径，其碳储量估算是评价城市绿地碳汇效益的重要手段。对城市生态系统碳储存能力的研究有助于了解城市中碳储存的实际情况，对制定合理碳储存与改善生态环境的政策具有重要指导意义。当前国内外针对城市碳储量展开了广泛的研究，但主要集中在植物种类及土壤^[1]碳储量的计算方法上，而针对城市蓝绿系统碳储量的计算研究尚待进一步完善。目前已有生物量法^[2]、样地勘测法、微气象学法^[3]等较为成熟的碳储量估算方法，但存在工程量大、计算复杂的问题。因此，本研究采用 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) 模型运算评估法，其碳储量模型适用于各类景观尺度，被当前国内学者广泛应用于流域、湿地和森林等区域的碳储量空间的分布调查及预测^[4]，对区域、省市的碳储量研究有较大贡献^[5]，相较于其他碳储量估算方法，具有可视性强、数据易获取和操作便捷等优点。

因此，本文提出如何有效优化城市蓝绿系统碳储量的研究问题，并以成都市为例，提出典型示范区的城市蓝绿系统碳储量优化策略。研究拟通过 InVEST 碳储存模型，结合土地利用数据对研究区蓝绿系统碳储量进行评估，并利用 ArcGIS 进行空间可视化分析，提出碳储量优化策略。本研究可作为开展碳储量评价与增汇研究的典型示范，为

国内外探索与完善城市蓝绿系统碳中和实现路径的同类研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川省省会成都市是中国西部地区的中心城市，属亚热带湿润季风气候。盆地地形加上大规模城市化，使得成都的热岛效应尤为显著^[6]。成都市气象台发布消息，2023 年是成都自 1953 年以来最热的一年，2024 年开年以来，全市平均气温较历史同期依旧偏高。据《成都市绿色低碳发展报告（2020）》，“十三五”时期，成都以占全省 18.7% 的碳排放承载了 24.5% 的能源消费、25% 的常住人口和 35% 的经济体量。本文以成都市中心城区（含龙泉驿区、新都区、郫都区、双流区、温江区伸入绕城高速以内的区域）为研究区域，该区域是成都市政治、经济、文化中心所在地，也是城市碳足迹的主要分布地^[7]。因此，聚焦成都中心城区的蓝绿空间规划使研究更具有代表性。

1.2 数据来源

土地利用数据来源于地球大数据科学工程共享服务系统 (<https://data.casearth.cn/>) 2020 年全球 30 m 地表覆盖精细分类产品，空间分辨率为 30 m。利用 ArcGIS 中的按掩膜提取工具，提取得到研究区域的土地利用数据，共有 11 种土地利用类型（图 1）。

为提高研究结果的准确性，各土地利用类型碳密度数据（表 1）主要参考与成都生态环境或自然条件相似的地区，并筛选了年份相近或存在引用关系的文献以减小误差。其中，大部分土地利用类型的数据来自成都^[8]、重庆^[9]、贵州^[10]等西南地区；旱作农田、灌溉农田数据参考与成都气候和农

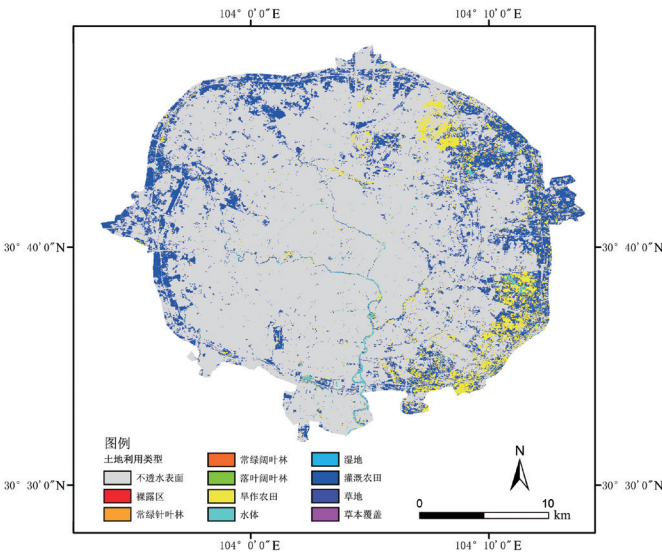


图 1 各土地利用类型分布
Fig.1 Distribution of various land use types

表 1 各土地利用类型碳密度
Tab.1 Carbon density of various land use types

土地利用类型	地上碳密度 /(t/hm ²)	地下碳密度 /(t/hm ²)	土壤碳密度 /(t/hm ²)	死亡有机质碳密度 /(t/hm ²)
旱作农田	3.64	0	33.46	13.00
草本覆盖	1.00	1.00	10.00	0
灌溉农田	5.42	1.96	146.24	0
常绿阔叶林	56.25	113.10	129.20	0
落叶阔叶林	71.59	151.10	380.40	0
常绿针叶林	41.70	214.10	179.60	0
草地	29.30	52.90	135.00	1.00
湿地	3.78	10.10	127.00	0.72
不透水表面	0	0	0	0
裸露区	1.00	10.00	1.00	0
水体	0.30	0	0	0

田情况相似的其他南方地区，如浙江^[11]；草本和裸露区数据参考 InVEST 碳数据库。

1.3 研究方法

InVEST 碳储量模型的工作原理是将地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机质碳库 4 部分的碳密度数据映射到各类别的土地利用和土地覆盖栅格^①，以得出研究区总碳储量。其计算公式为：

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$$

式中， C_{total} 为研究区域总碳储量 (t)， C_{above} 为地上碳储量 (t)， C_{below} 为地下碳储量 (t)， C_{soil} 为土壤碳储量 (t)， C_{dead} 为死亡有机质碳储量 (t)。

研究通过 InVEST 3.13.0 碳储量模型得到研究区域的碳储量结果后，利用 ArcGIS 10.8.1 对评估结果进行可视化分析。最后，基于评估结果提出碳储量优化策略。

2 碳储量评估与优化策略分析

2.1 碳储量评估

2.1.1 总碳储量评估

结合研究区土地利用数据及其不同土地利用类型的碳密度表，利用 InVEST 碳储存模型以及 ArcGIS 空间显示分析与统计分析，得到了研究区的总碳储量（表 2）、各类碳库碳储量空间分布（图 2）及总碳储量空间分布（图 3）。灌溉农田、旱作农田以及草地的碳储量远高于其他土地利用类型，土壤碳储量是土地碳汇的主要部分，且研究区域内总碳储量空间分布呈现出“中心低，四周高”的特征。

根据研究团队的国家自然科学基金青年项目（编号：52008345）所构建的成都市中心城区城市蓝绿基础设施数据库得到图 4，可知研究区蓝绿系统由城市绿地、环城生态带和水域 3 部分构成。将研究区城市蓝绿空间分布与总碳储

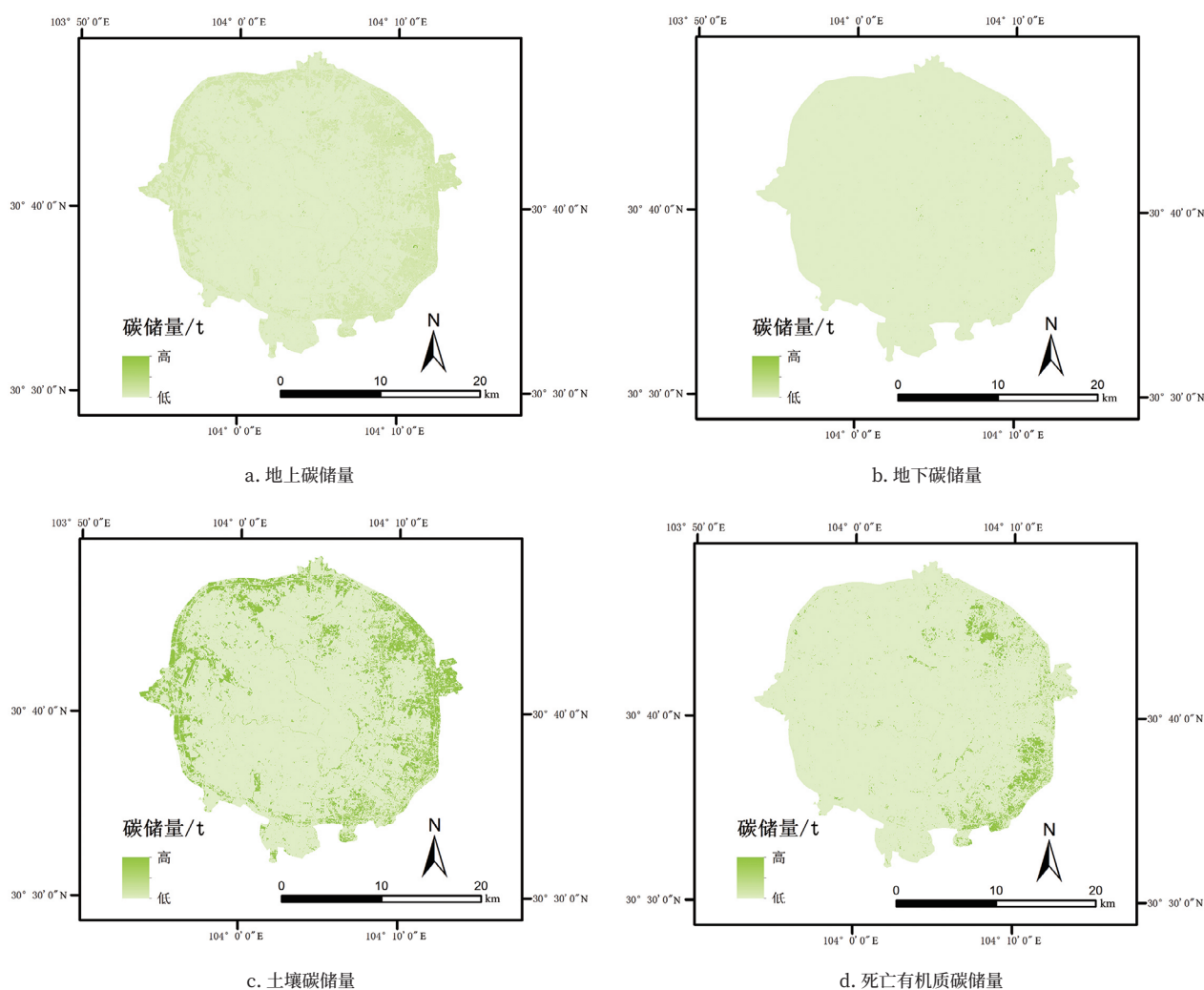


图 2 各类碳库碳储量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of carbon stock in various types of carbon pools

① 2024.InVEST 3.14.2 用户指南，来自 <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>。

量分布进行对比分析, 结合土地利用类型分布可知, 非蓝绿空间土地类型包括不透水表面和裸露区, 在研究区面积占比为 78.14%, 集中分布在研究区中部, 总碳储量仅 1.40 t。环城生态带以绿道串联高质量公园和良田而成。高质量公园包括凤凰山公园等大面积楔形绿地公园, 嵌入非蓝绿空间, 与市中心的城市绿地相接, 对内形成覆盖全城的蓝绿通廊, 对外形成绿色生态隔离空间的屏障, 具有连续性强、围合性

表 2 各土地利用类型碳储量
Tab.2 Carbon stock of various land use types

土地利用类型	地上碳储量/t	地下碳储量/t	土壤碳储量/t	死亡有机质碳储量/t	总碳储量/t
旱作农田	1 075.56	0	9 886.90	3 841.30	14 803.76
草本覆盖	0.04	0.04	0.36	0	0.44
灌溉农田	5 096.66	1 843.07	137 515.67	0	144 455.40
常绿阔叶林	55.96	112.54	128.55	0	297.05
落叶阔叶林	2.08	4.39	11.05	0	17.52
常绿针叶林	34.22	175.71	147.39	0	357.32
草地	184.07	332.33	848.11	6.28	1 370.79
湿地	0.19	0.51	6.46	0.04	7.20
不透水表面	0	0	0	0	0
裸露区	0.12	0.12	1.16	0	1.40
水体	13.39	0	0	0	13.39
总和	6 462.29	2 468.71	148 545.65	3 847.62	161 324.27

高及嵌入性强的特点。良田包含了大部分灌溉农田与旱作农田, 呈带状沿绕城高速分布。城市绿地以城市公园绿地、生产性绿地和附属绿地为主, 呈斑块或带状广泛分布在环城生态带以内, 形成了城市生态斑块和绿廊。与土地利用类型图相比, 部分城市绿地和部分农田(环城生态带以外)重合。农田类土地占研究区总面积的 20.97%, 但碳储量占研究区总碳储量的 98.72%, 可见其为研究区碳汇发挥了关键作用。林地类用地总面积占比为 0.3%, 碳储量也仅占总碳储量的 0.42%。水域空间如城市河道、沟渠等, 流经各个行政区, 湿地嵌入环城生态带, 水域的总碳储量为 20.59 t。

2.1.2 单位碳储量评估

结合研究区土地利用数据, 通过 ArcGIS 中分区统计工具得到不同土地类型的总碳储量, 在统计类型选择平均值, 得到各类土地利用类型的单位碳储量(表 3)。各土地利用类型的单位碳储量从高到低排序为落叶阔叶林、常绿针叶林、常绿阔叶林、草地、灌溉农田、湿地、旱作农田、裸露区、草本覆盖、水体、不透水表面。

林地类土地的平均单位碳储量约为 39.33 t/hm², 接近草地单位碳储量的 2 倍, 而其总碳储量却不到草地的 1/2。结合土地利用分布图分析可知, 林地面积积极小且分布零散, 导致作用范围十分有限, 未能达到很好的碳汇效果。农田类土地具有一定碳储存能力且分布面积广, 是研究区域固碳的关键部分。湿地数量较少, 水体包括府南河等跨越行政区的河流、支渠以及多个生态湖泊, 因此单位碳储量更低的水体的总碳储量反而高于湿地。不透水表面的单位碳储量最低, 但其分布面积最广, 对城市碳储存与碳汇起着严重的阻碍作用。

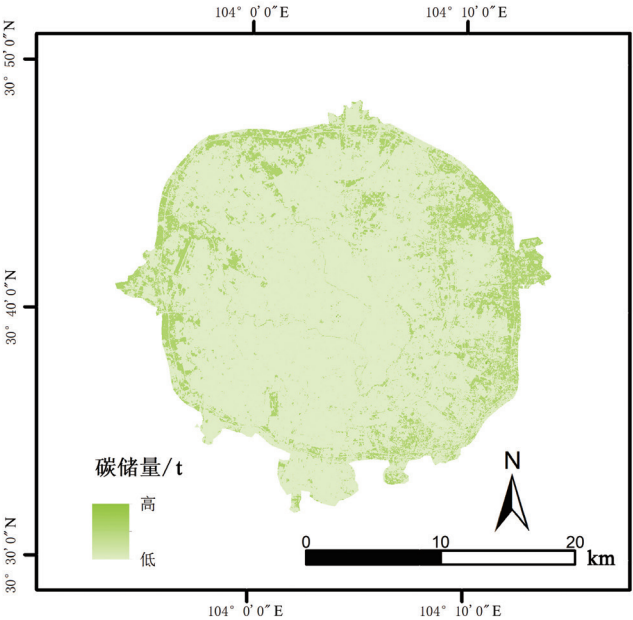


图 3 总碳储量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of total carbon stock

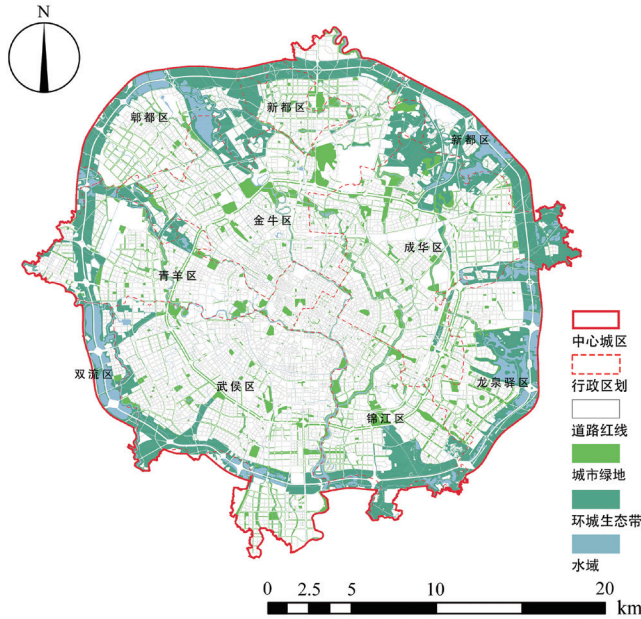


图 4 研究区蓝绿空间分布
Fig.4 Distribution of blue and green patches

2.2 研究区蓝绿系统增汇优化策略

基于单位碳储量评估结果，在 ArcGIS 中采用自然裂点分级法对碳储量进行分级，将研究区分为高碳区域（High Carbon Sequestration Area, HCSA）、低碳区域（Low Carbon Sequestration Area, LCSA）、碳汇潜力区（Potential Carbon Sequestration Area, PCSA）（图 5）。LCSA 以不透水表面为主，由于城市中心扩张，不透水表面的面积不断扩大，且其大面积分布在研究区中部。PCSA 与 HCSA 主要分布在远离中心区域的四周，一方面是因为研究区外围区域相较于中心区域的土地利用程度低，工业生产、城市建设程度更低^[12]；另一方面是因为出于抑制城市无序扩张和粘连的目的，成都打造天府绿道、天府蓝网以完善城市蓝绿空间系统，发展形成如今的环城生态区。结合蓝绿空间分布（图 4）可知，城市蓝绿空间与 PCSA 高度重合，在城市的固碳增汇中起到关键作用。

基于土地的单位碳储量数值分出的不同特征区域，提出不同的增汇优化策略：1) 对于 HCSA, 优先保护现有的蓝绿空间。此区域相对高质量的蓝绿空间在固碳增汇方面表现出卓越能力，是未来可持续发展的核心力量，在空间规划上应建立生态保护区，阻止人为干扰，同时增强管控和保护力度，减少现有蓝绿空间的资源损耗。2) 对于 PCSA, 调整和恢复现有的蓝绿空间。较大的面积和较好的连接性使蓝绿空间具备一定的固碳潜力，是当前城市固碳增汇的坚实基础，应重视既有土地的结构优化，采取生态更新、恢复和景观改善等措施调整现有的蓝绿空间，如梳理水系、引入绿地等调整手段，以提高相应能力，达到增汇目的。3) 对于 LCSA, 改良和管理蓝绿空间。此区域固碳能力极低，蓝绿

空间的质量和数量都不理想，应大量增加不同类型的蓝绿空间的覆盖面积，并改良现有的蓝绿空间。例如推进海绵城市建设，从全域的角度统筹生态本底，可提供低碳排的生产、生活载体和高碳汇的生态绿色基础设施，或优化植物的生长和配置，选择固碳能力更强的植物，能有效提升单位土地的碳储量，减少土地资源的浪费。

3 讨论

研究结果表明，城市土地利用类型对区域碳储量具有较大的影响。伍丹等^[8]对成渝经济区碳储量的分析结果显示，城市建设用地的缩减能够推动碳储量的增加。其他现有研究也证明了成都碳储量的变化主要是城市扩张带来的碳储量降低与森林面积增加带来的碳储量的提高^[13]。这与本研究“不透水表面成为城市碳汇最大阻力，林地具备卓越碳汇能力”的结论相似。

结合研究结果，除了景观空间策略外，在政策层面也应细化、强化生态保护红线的方案政策，推动区域积极建设能有效应对气候变化的高质量城市蓝绿体系^[14]；在管理层面应定期对生态服务功能进行评估测绘以支持城市蓝绿空间的保护建设^[15]，提高区域碳汇能力，加强对工业生产的监督管控，以期助力推进中国如期实现“碳达峰、碳中和”。

4 结语

本文通过 ArcGIS 以及 InVEST 模型对成都市中心城区蓝绿空间碳储量进行可视化分析，得出结论如下：1) 研究区域内总碳储量空间分布呈现出“中心低，四周高”的特征。低碳区域集中分布在研究区域的中部，占比最大；碳汇潜力

表 3 各土地利用类型单位碳储量
Tab.3 Carbon stock per hectare of various land use types

土地利用类型	单位碳储量 /(t/hm ²)
旱作农田	5.185 079
草本覆盖	0.968 364
灌溉农田	16.521 972
常绿阔叶林	28.641 069
落叶阔叶林	48.667 574
常绿针叶林	40.670 741
草地	21.915 108
湿地	11.426 700
不透水表面	0
裸露区	1.032 922
水体	0.030 724

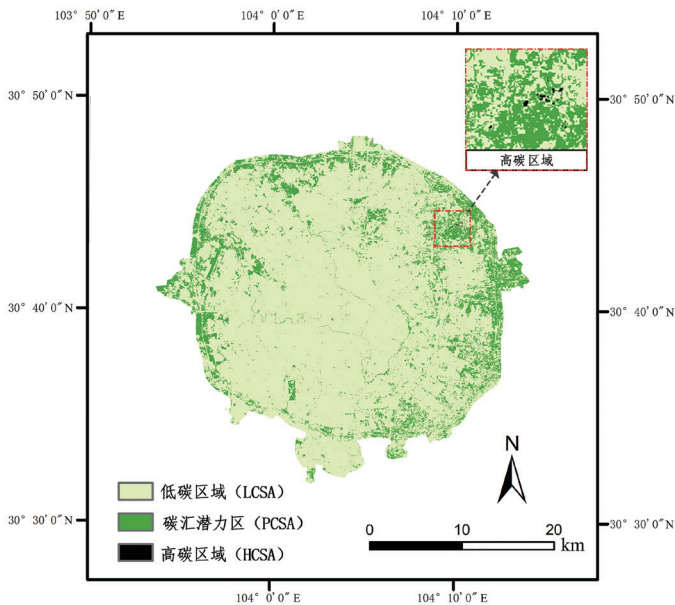


图 5 各等级单位碳储量区域分布
Fig.5 Regional distribution of carbon stocks per tier unit

区沿环城生态带分布,包括大型楔形绿地;高碳区域零星分布在研究区域东侧。2)各土地利用类型的碳储存能力由高到低为落叶阔叶林、常绿针叶林、常绿阔叶林、草地、灌溉农田、湿地、旱作农田、裸露区、草本覆盖、水体、不透水表面。其中,不透水表面分布面积最广,对研究区域低碳建设起到阻碍作用;各类林地分布面积极少,难以有效地助力成都的低碳建设;而具备一定固碳能力且分布较广的用地类型,如农田类用地,承担研究区的主要固碳功能。基于研究区域碳储量的分析结果,提出城市蓝绿空间的优化策略:高碳区域应优先保护现有的蓝绿空间;碳汇潜力区可调整和恢复现有的蓝绿空间;低碳区域需改良和管理蓝绿空间。

本研究将城市 InVEST 模型应用于城市碳汇研究中,有效解决生态系统碳汇能力定量化评估研究难以可视化和分析不足的问题,对划分城市不同碳汇能力区域,提出针对性优化策略具有指导意义。然而本研究仍存在局限性,如 InVEST 模型中的碳储量模块假定碳储量是恒定不变的,会在一定程度上降低数据精准程度,在未来的研究中应不断完善计算方法,结合实测数据与新技术方法进行校验,减少误差。此外,本研究仅基于二级土地利用类型进行土地划分,忽略了如街道、小区绿化等更细化的碳储量数据,未来可根据林分类型进一步划分,并从植物方面来统计碎片化绿地的碳储量,在细化土地利用的基础上进一步补充遗漏,从而更加精细地测算碳储量,使其更接近实际值。

注:图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1] 吕海亮.城市植被与土壤碳储量时空变化规律研究——以哈尔滨市为例[D].长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2017.
- [2] 胡砚秋,苏志尧,李佩瑗,等.林分生物量碳计量模型的比较研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(1):84-88.
- [3] 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):95-102.
- [4] 李瑾璞,夏少霞,于秀波,等.基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(7):854-861.
- [5] 赵桐,蒙古军.基于土地利用变化的成都平原经济区碳储量时空演变与情景模拟[J].山地学报,2023,41(5):648-661.
- [6] WU S, YANG H, LUO P, et al. The effects of the cooling efficiency of urban wetlands in an inland megacity: A case study of Chengdu, Southwest China[J]. Building and Environment, 2021, 204: 108128.
- [7] 廖祥,杨鑫,牛振生.成渝城市群陆地碳排放时空变化及效应研究[J].环境科学与技术,2023,46(1):211-225.
- [8] 伍丹,张晟,朱康文,等.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J].三峡生态环境监测,2022,7(2):85-96.
- [9] 虎帅,张学儒,官冬杰.基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张

的碳储量变化分析[J].水土保持研究,2018,25(3):323-331.

[10] 郜红娟,韩会庆,张朝琼,等.乌江流域贵州段 2000-2010 年土地利用变化对碳储量的影响[J].四川农业大学学报,2016,34(1):48-53,84.

[11] 邹文涛,何友均,叶兵,等.基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J].中南林业科技大学学报,2021,41(3):120-128.

[12] 彭文甫.成都市土地利用变化及驱动力分析[D].成都:四川师范大学,2005.

[13] 谢耕,吴莉萍,陈敏.基于土地利用变化的成都市碳储量时空格局演变特征分析[J].环境影响评价,2023,45(6):104-112.

[14] 张思凝.巴塞罗那城市公园发展更新与特征研究[J].广东园林,2021,43(2):29-35.

[15] ZHANG S, MUÑOZ RAMÍREZ F. Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: The case of Barcelona, Spain[J]. Cities, 2019, 92: 59-70.

作者简介:

钟彦萍/2001 年生/女/四川成都人/西南交通大学建筑学院(成都 610000)/在读硕士研究生/专业方向为风景园林规划设计

(*通信作者)张思凝/1989 年生/女/四川绵阳人/博士/西南交通大学建筑学院(成都 610000)/讲师/研究方向为风景园林规划设计/E-mail: zsnings@swjtu.edu.cn

宋昊翔/2000 年生/男/河南许昌人/西南交通大学建筑学院(成都 610000)/在读硕士研究生/专业方向为生态景观和可持续研究

臧家昕/2004 年生/男/河北秦皇岛人/西南交通大学建筑学院(成都 610000)/在读本科生/专业方向为风景园林