

DOI: 10.20103/j.stxb.202404300973

蔡嘉瑜, 张雪葳, 吝涛, 曾志伟, 耿红凯. 多圈层城郊农田特征差异与绿色基础设施化潜力. 生态学报, 2024, 44(24): 11188-11205.

Cai J Y, Zhang X W, Lin T, Zeng Z W, Geng H K. Green infrastructuration and characteristics of suburban cropland from a zonal perspective. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11188-11205.

多圈层城郊农田特征差异与绿色基础设施化潜力

蔡嘉瑜^{1,2,3}, 张雪葳^{1,3}, 吝涛^{2,3,4,5,*}, 曾志伟^{2,4}, 耿红凯^{2,4,5}

1 福州大学 建筑与城乡规划学院, 福州 350108

2 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

3 福州大学福建省国土空间分析与模拟数字技术重点实验室, 福州 350108

4 中国科学院大学, 北京 100049

5 厦门市城市环境智慧管理重点实验室, 厦门 361021

摘要: 城郊农田的绿色基础设施 (Green Infrastructuration, GI) 化开发有助于挖掘其潜在的生态系统调节与文化服务价值, 缓解城市绿地供给不足并提高绿地暴露。研究选取西安、北京、广州和上海四个典型城市, 基于城市建成区边界, 以 1km、5km、15km 的缓冲距离向外划定近郊、中郊和远郊三个圈层, 系统分析了各圈层城郊农田的自然地理和社会经济特征, 以及不同圈层的 GI 化现状, 构建了城郊农田 GI 化潜力评价体系, 并量化了可 GI 化农田对城市绿地可得性的提升程度。研究结果显示: (1) 当前的 GI 化运营模式因城市和圈层不同而有所差异, 服务类别主要集中在体育休闲和餐饮服务; (2) 四个城市的可 GI 化农田数量和占比差异显著, 西安市城郊农田具有较高的 GI 化潜力, 且圈层间差异较小; 北京市的可 GI 化农田整体占比较低, 主要集中在近郊圈层; 广州市农田面积稀少, 但可 GI 化农田占比较高; 上海市拥有较大规模的可 GI 化农田, 且圈层间分布均衡; (3) 近郊和中郊圈层农田的 GI 化潜力被严重低估, 未来应结合基于自然的解决方案 (NbS) 准则及自评估工具合理引导农田的适地适度开发与多功能运营, 在保障农田生产功能的基础上提升生态系统服务水平, 最终促进城乡可持续发展。

关键词: 城郊农田; 绿色基础设施 (GI); 潜力评价; 空间特征; 基于自然的解决方案 (NbS)

Green infrastructuration and characteristics of suburban cropland from a zonal perspective

CAI Jiayu^{1,2,3}, ZHANG Xuewei^{1,3}, LIN Tao^{2,3,4,5,*}, ZENG Zhiwei^{2,4}, GENG Hongkai^{2,4,5}

1 School of Architecture and Urban-rural Planning, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

3 Fujian Key Laboratory of Digital Technology for Territorial Space Analysis and Simulation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Xiamen Key Laboratory of Smart Management on the Urban Environment, Xiamen 361021, China

Abstract: Green Infrastructuration (GI) of suburban cropland can help to explore its potential for ecosystem regulation and cultural service value. Additionally, it can mitigate the shortage of urban green spaces and improve green space exposure rate. In this paper, four typical cities, Xi'an, Beijing, Guangzhou and Shanghai, are selected and categorizes them into three circles: peri-suburban, mid-suburban and outer-suburban, based on the buffer distances of 1km, 5km and 15km from the built-up areas of the cities. The natural geographic and socio-economic characteristics of suburban cropland in each zone, as well as the current status of GI in the different circles, are systematically analyzed. In addition, this paper constructs an

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52308053, 42271299)

收稿日期: 2024-04-30; **采用日期:** 2024-11-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tlin@iue.ac.cn

evaluation system for the GI potential of suburban cropland and quantifies its role in the enhancement of urban green space availability. The results show that: (1) The current operation mode of GI varies by city and circle. The service categories are mainly concentrated in sports, leisure and catering services. (2) The number and percentage of suburban cropland included in urban green infrastructure varied significantly among the four cities. The cropland of Xi'an has high GI potential with minimal differences between circles; the convertible cropland in Beijing is mainly concentrated in the peri-urban area, with a low overall percentage; the convertible cropland in Guangzhou is sparse but has a high percentage; while Shanghai features extensive convertible cropland with a balanced distribution between circles. (3) The GI potential of cropland in peri-urban and mid-urban circles has been significantly underestimated. Nature-based Solutions (NbS) guidelines and self-assessment tools should be combined to rationally guide the appropriate development and multi-functional operation of cropland. The level of ecosystem services should be improved on the basis of safeguarding the production function of cropland, which will ultimately promote the sustainable development of urban and suburban areas.

Key Words: suburban cropland; green infrastructurization (GI); potential assessment; spatial characteristics; Nature-based solutions (NbS)

绿色基础设施 (Green infrastructure, GI) 是指由各种开敞空间和自然区域 (包括绿道、湿地、雨水花园、森林、乡土植被等要素) 组成的多尺度、多类型和多功能绿色网络^[1], 在应对环境和社会挑战以及实现可持续城市发展目标中发挥着关键作用^[2-3]。城市绿地作为重要的城市绿色基础设施, 在人口大量集聚的城市, 尤其是作为区域中心的国家中心城市中供给严重不足, 进而引发了诸多城市病与人群健康问题^[4-6]。农田作为自然与人类相互作用的复杂系统, 不仅是不可或缺的农业生产资料, 更为城市与乡村提供了重要的生态系统服务^[7-9]。其中, 城郊农田处于“城市-乡村”二元结构的交接地带, 在调节城市气候、促进居民绿地暴露等方面具备天然优势^[10]。然而快速城镇化导致城郊农田面临土壤污染、破碎化和土地流失等困境, 由于未能充分平衡粮食生产与经济效益, 部分区域出现盲目种植或“非粮化”的两种极端倾向, 严重威胁粮食安全与民生保障^[11-12]。

城郊农田的绿色基础设施化 (GI 化) 指在土地综合整治的宏观统一调控、保障粮食生产和耕地红线的框架下, 灵活管理城郊低生产效力的农用地, 增强其对人类贡献 (NCP) 中非物质供给, 提升城郊农田的综合效益, 缓解城市绿色基础设施供给压力, 促进城乡融合与一体化发展^[13]。当前, 已有学者围绕城郊农田 GI 化的建设可行性、规划方法以及实际效益开展理论研究和实证分析。城郊农田的 GI 化在优化绿色基础设施的构成要素^[14-15]、功能服务^[16]、空间分布^[17]等方面具备开发优势。宏观尺度上, 城郊农田作为自然生命支持系统, 可调节区域气候^[18]、维护景观与生物多样性并协调周边粮食供给^[19-20]; 中观尺度上, 城郊农田充当绿化带、走廊或绿色网络的一部分^[21], 保护和增加绿地存量并提升绿色基础设施连通性^[22]; 微观尺度上, 小规模城郊农业开发对社区经济与就业^[23-24]、人类健康^[25]、场所营造^[26]等社会效益产生了显著贡献。已有研究为城郊农田 GI 化提供了一定的研究思路与基础, 但对城郊农田 GI 化路径仍较为模糊: 首先, 由于基础设施系统跨越并连接城市、近郊、中郊、远郊和农村地区, 因此必须从不同的组织层面对城郊农田进行管理^[27], 然而当前对近郊、中郊、远郊边界划分与空间特征差异有待进一步明确。其次, 对城郊农田 GI 化研究大多停留在定性分析与描述, 亟需构建量化模型来研究城郊农田 GI 化潜力^[28]。此外, 现有研究多以单一区域为研究对象^[29-30], 而忽视了地区间资源禀赋、城镇化进程导致的农田 GI 化潜力差异^[31-33]。

基于此, 提出以下科学问题: (1) 中国典型城市城郊农田的多圈层自然地理、社会经济以及 GI 化开发现状特征是什么? (2) 城郊农田 GI 化对城市绿地可得性的提升程度如何? 基于多圈层视角研究我国典型城市的城郊农田 GI 化开发潜力将为绿色基础设施的规划建设以及农田资源的保护与高效利用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

基于地理区位代表性与城市规模典型性两个原则,本研究选取中国西安、北京、广州、上海四个国家中心城市作为研究区域(图 1)。其中,西安市是陕西省省会、特大城市及国家中心城市,位于西北地区、关中平原中部,全境面积 10096.89km²,常住人口达到 1299.59 万人。北京市为中国首都、国家中心城市、超大城市,地处中国北部、华北平原北部,全境面积 16410.00km²,常住人口达 2189.30 万人。广州市是广东省省会、国家中心城市、超大城市,位于华南地区、珠江下游,全境面积 7434.40km²,常住人口为 1873.41 万人。上海市是国家中心城市、超大城市、上海大都市圈核心城市,位于华东地区,是长江三角洲冲积平原的一部分,全市面积 6340.50km²,总人口达 2475.89 万人。

近年来四个城市均积极推进城市绿色基础设施建设,如西安市开展浐灞国家湿地公园、沣河生态景区、国家生态园林城市建设等^[34],广州市累计建成森林公园、湿地公园、口袋公园等各类公园 1360 个,2022 年北京全市森林覆盖率达到 44.80%,城市绿化覆盖率达到 49.30%^[35]。然而,由于人口与建筑的高度集中,城市绿地存在空间分布不均、人均绿地配给低等问题,尽管上海市绿地面积达 1712.00km²,公园 532 座,人均公园绿地仅有 8.80m²。此外,近年快速的经济发展和前所未有的城市化,四个城市农田保护目标的实现受到了严重的挑战。2020 年,广州市农田非粮化程度高达 86.91%^[36],西安市农田用地大量流向林地、园地和城乡建设用地,面积减少了 1601.13km²,2009 年—2018 年,北京市农田面积由 2316.00km² 减少到 2137.00km²,是全国农

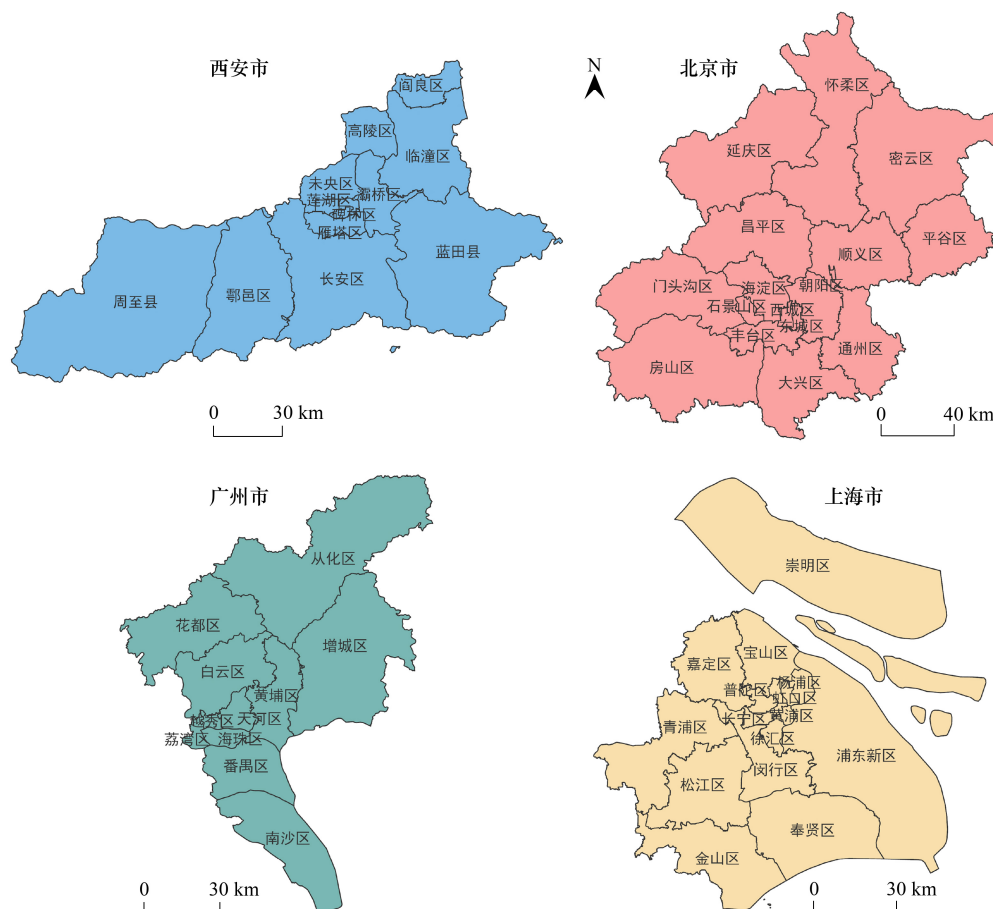


图 1 研究区地理区位

Fig.1 Geographic location of the study area

田面积减少最快的地区之一^[37]。以中国四个区域的典型城市为案例开展城郊农田的分布特征及其 GI 化潜力研究可以为我国其他城市的农田可持续发展研究提供参考与借鉴。

1.2 数据来源

使用的土地利用数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.globallandcover.com/>)的 2020 年 GlobeLand30 数据集以及欧洲航天局(ESA)提供的 10m 分辨率全球土地覆盖产品,对比中国第三次全国国土调查主要数据公报,前者在建筑用地面积值更精确,用于城市建成区的识别,后者有精度更高的农田面积,因此用于城郊圈层农田提取;DEM 数据来源于 NASA 地球科学数据网站(<https://nasadaacs.eos.nasa.gov/>)ALOS 卫星获取的 12.5m 高精度地形数据;土壤数据来源于地球资源数据云平台(www.gis5g.com);降雨量数据来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>) 1km 分辨率数据;人口数据采用 Worldpop(<https://www.worldpop.org/>)提供的 100m 全球人口数据;NPP-VIRS 夜间灯光数据来源于国家地球系统科学数据中心发布的 2022 年全球 500m 分辨率“类 NPP-VIIRS”夜间灯光数据集;GDP 数据采用 Zhao 等发布的 1km 栅格数据集^[38];基础设施 POI 数据来源于高德地图,对数据进行清洗,并按属性选取餐饮服务、道路附属设施、风景名胜等相关类别共 19 大类;路网数据来源于 OpenStreetMap(OSM)。除夜间灯光数据外,其余数据公布年份均为 2020 年。

1.3 城郊圈层提取与分析

城郊地区包括内边界和外边界,内边界位于城市建成区的边缘,外边界则延伸到仍在城市和郊区就业机会的通勤范围内的乡村景观^[39]。现有学者运用卫星遥感数据提取人工不透水面,结合指数值进行城市内边界的判别,该方法具有基础数据易获取、界定范围精确、适用性强等优点^[40-43]。由于远郊仍以农业为主,其边缘可能存在着和乡村同样的景观,往往难以用遥感影像界定^[44]。

空间可达性强调区位、距离与交通的便捷程度^[45-46],能够从微观层面反映个体行为空间和生活质量差异,进而界定城郊地区的外边界。“15 分钟”被视作出行的合理时间范围^[47-50],基于城市居民步行、骑行及公共交通三种方式的常规时速,15 分钟的旅行半径分别为 1km、5km 和 15km^[51]。研究以城市建成区为基础,以 1km、5km 和 15km 为标准,依次划定城市近郊、中郊与远郊的外边界。为了覆盖不同使用频率、用户类型、服务性质以及出行意愿下城市居民的日常出行范围,研究采用欧几里得距离而非路网距离,避免了因郊区路网覆盖不足引起的系统误差^[52-55]。提取城郊圈层的具体操作如下:(1)将土地利用中的 11 种土地覆被类别划分为绿地、农田、水体和城市建设用地类;(2)参考 Chen 等^[56]的研究方法,基于 2020 年 GlobeLand30 提取人造地表数据层城市建成区斑块,形成城郊内边界;(3)以 1km、5km 和 15km 为半径从城市建成区向外做缓冲区,并剔除超出市域范围的部分,以此为分类依据将城郊划分为近郊、中郊、远郊三个圈层。城市建成区内的绿地即为城市绿地,城郊区域则涵盖城郊绿地和城郊农田,二者共同组成了城郊绿色空间(图 2)。

基于圈层视角分析城郊农田在尺度、结构及异质性上的差异。景观格局指数是景观格局信息的高度概括,是反映景观结构组成、空间配置特征的量化指标^[57-58]。本研究选取斑块总面积等 7 个农田景观格局指数综合描述不同圈层农田的景观格局特征,运用 Fragstats 4.2 软件计算农田与绿地的景观格局指数(表 1)。

1.4 城郊农田特征分析

综合农田自身自然地理条件、周边社会经济活动水平以及与农田相关的服务运营模式,以土地斑块为单元,评价不同圈层农田的传统农业生产效力、社会 GI 需求以及农田 GI 化开发现状。

1.4.1 自然地理特征

研究选取土壤条件、坡度和起伏度等自然地理条件表征农田用于传统农业生产的效力。其中,土壤质地对农田的生产力具有重要意义,起伏度与坡度能直观反映地形起伏特征与划分地貌类型,本研究利用城市建成区边界与城郊圈层分别提取四个城市的土壤质地、起伏度与坡度数据,利用栅格计算器得出不同圈层城郊农田的起伏度与坡度平均值,分析不同城郊圈层的自然地理特征。

1.4.2 社会经济特征

研究选取夜间灯光强度、人口数量、POI 数量和 GDP 等人文特征,以表征农田斑块周边的社会经济活动

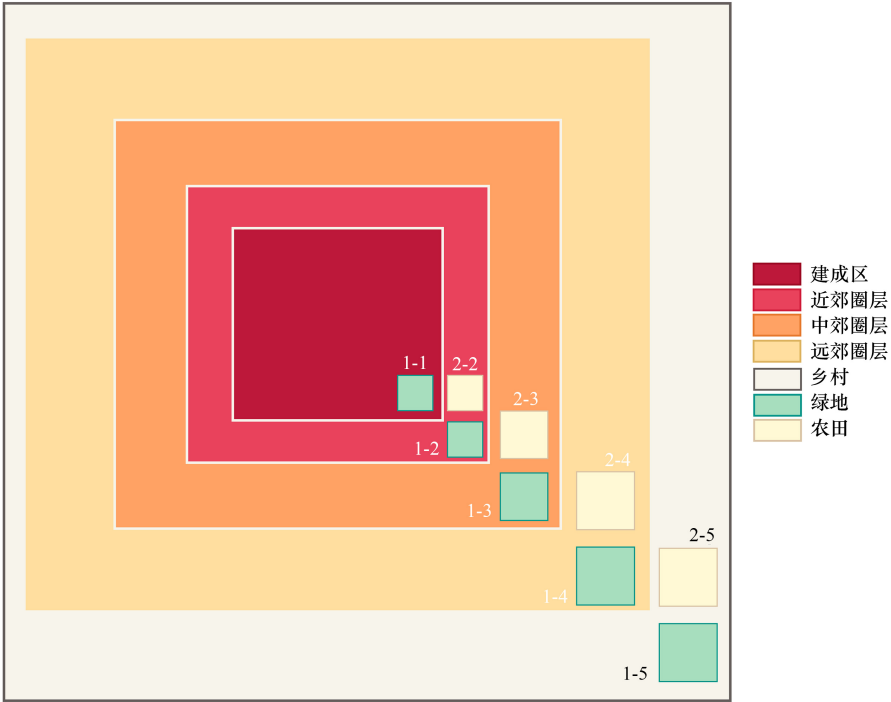


图 2 城郊圈层、农田与绿地的空间关系

Fig.2 Spatial relationship between urban and suburban circles, cropland and green space

1-1 为城市绿地,即城市绿色空间;1-2、1-3、1-4 为城郊绿地,2-2、2-3、2-4 为城郊农田,城郊绿地与城郊农田共同组成城郊绿色空间;1-5 为乡村绿地,2-5 为乡村农田,乡村绿地与乡村农田共同组成乡村绿色空间

表 1 景观格局指数计算公式及其含义

Table 1 Landscape pattern index calculation formula and its meaning

评价指标 Evaluation indicators	景观指数 Landscape indices	计算公式 Calculation formulas	含义 Index meaning
面积指标 Area indicator	斑块类型面积	$CA = \sum_{i=1}^n A_i$ 式中, A_i 表示第 i 个斑块的面积, n 表示斑块总数。	景观斑块的总面积
	斑块面积百分比	$PLAND = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \times 100\%$ 式中, A 表示景观总面积。	景观斑块的总面积占整个圈层面积的百分比
密度大小及差异 Density indicator	斑块数量	$NP = n$	景观斑块的总个数
	斑块密度	$PD = \frac{n}{A}$	反映景观破碎程度, PD 越大, 破碎程度越高
形状指标 Shape indicator	聚集指数	$AI = \left(\frac{g_{ij}}{\max \rightarrow g_{ij}} \right)$ 式中, g_{ij} 是相应景观类型的相似邻近斑块数量	反映斑块的聚集程度, AI 值越大, 聚集程度越高。
	形状指数	$LSI = \frac{e}{4 \sqrt{A}}$ 式中, e 是景观中所有斑块边界的总长度。	反映斑块离散程度, LSI 越大, 板块越离散
边缘指标 Edge indicator	边缘密度	$ED = \frac{e}{A}$	景观中边缘的分布密度, 反映景观边界的复杂程度
连通度指标 Connectivity indicator	连通性指数	$CONNECT = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ij}}{n(n-1)} \times 100$ c_{ij} 表示临界距离之内斑块类型 i 与其他斑块类型 j 的连接状况。	反映景观组分之间的功能连接性, $CONNECT$ 值越大, 连通性越好

强度,侧面反映社会对于 GI 的需求。通过提取并统计不同城郊圈层中城郊人口与 GDP 平均值,结合夜间灯光数据分析城市与城郊社会经济空间分布特征。

1.4.3 GI 化开发现状

兴趣点(Point of Interest,POI)作为表征地理空间信息数据,能帮助实现对于农田当前 GI 开发程度与运营模式的识别。研究以“农家”、“农园”、“农庄”、“农舍”、“农庭”、“农院”、“乡间”、“乡野”、“田园”为关键词,对餐饮服务、风景名胜、住宿服务、购物服务、科教文化、生活服务、体育休闲等与文化服务相关的 POI 数据进行按属性选取,依据圈层统计与农田开发运营相关的 POI 点位的分布状况与开发现状。

1.5 城郊农田 GI 化潜力评估

基于 1.4 小节中自然地理特征与社会经济特征分析结果,进一步构建基于农田坡度、起伏度、土壤质地、降雨量、人口、GDP、POI 数量以及路网密度八个指标的城郊农田 GI 潜力评价体系。研究设定传统农业生产效力低、并且周边社会 GI 需求高的农田斑块为高 GI 潜力,可优先进行 GI 开发的区域。根据专家综合打分法,参考毕伟、石龙宇、李猷等的研究工作^[59—61],对指标进行相对重要性以及贡献程度的判断并赋予相应权重。按照土地适宜性评价的原则、方法和《农用地分等规程》等相关农业资料,结合四个城市农田的实际情况,确定指标的分级标准,并采用 1~5 分的闭区间进行赋值(表 2)。

表 2 城郊农田 GI 化潜力评估指标表

Table 2 Evaluation parameters of suburban cropland GI potential

准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	权重 Weights	分级标准 Grading standards	赋值 Assignment
自然地理特征 Physical geographical features	坡度/(°)	0.105	0—3	1
			3—8	2
			8—15	3
			15—30	4
			>30	5
	起伏度/m	0.138	0—15	1
			15—30	5
			30—70	3
			70—100	4
			>100	5
	土壤质地	0.240	壤土	1
			粉土、砂质壤土	2
			粉砂质粘壤土、粘壤土、砂质粘土、壤质砂土	3
			粉砂粘土	4
			粘土	5
	降雨量/mm	0.038	>1000	1
			750—1000	2
			500—750	3
			350—500	4
			0—350	5
社会经济特征 Socioeconomic characteristics	人口数量/人	0.166	0—5	1
			5—15	2
			15—30	3
			30—45	4
			>60	5
	GDP/×100 万元	0.103	0—12.5	1
			12.5—25	2

续表

准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	权重 Weights	分级标准 Grading standards	赋值 Assignment
	POI 数量/个	0.127	25—62.5	3
			62.5—125	4
			>125	5
			0—100	1
			100—250	2
			250—500	3
			500—1000	4
	路网密度/(km/km ²)	0.083	>1000	5
			0—5	1
			5—10	2
			10—20	3
			20—35	4
			>35	5

研究将城郊农田划分为 500m 分辨率的网状栅格,并以每个栅格为单位计算八个指标值。其中,坡度、起伏度、土壤质地,采用空间匹配计算,降雨量、人口以及 GDP 采用同一栅格内汇总计算,POI 数量与路网密度参考相关研究采用栅格周边 1km 范围内的汇总计算^[62—63]。根据各因子的权重系数采用加权指数和法计算城郊农田的 GI 化潜力得分。计算公式如下:

$$G = \sum_i^n a_i w_i$$

式中, G 为综合得分, a_i 为第 i 个因子的分值; w_i 为第 i 个因子的权重; n 为参评因子数。

基于城郊农田 GI 潜力评价结果(满分 5 分),设定将潜力得分高于 2.5 分的高 GI 潜力的城郊农田全部开发,用以缓解城市 GI 供给压力,并计算 GI 后城市绿地可达性的提升程度,即绿地的供给水平提升程度,公式如下:

$$S_p = \sum_{i=1}^n G_i$$
$$P = \frac{S_p}{S_g} \times 100\%$$

式中, S_p 表示不同圈层城郊农田可 GI 化的总面积, G_i 为圈层内潜力得分大于 2.5 的农田斑块面积; P 表示城郊农田对城市绿地可获得性的提升程度, S_g 表示建成区范围内绿地的总面积。

2 结果与分析

2.1 城郊圈层提取与分析结果

西安市、北京市、广州市、上海市的建成区与不同城郊圈层土地利用分布及典型地貌特征如图 3 所示。西安市的农田主要分布在远郊圈层以内,形成了明显的“建设用地-农田-绿地”的圈层格局。北京市和广州市也呈现相似的圈层结构,但土地利用模式更为复杂。由于建成区的扩张和绿地的分布影响,农田面积较小,呈现出更为破碎的斑块状分布。北京市城郊农田主要分布在东南部,广州市的农田主要分布在南部的远郊地区以及东西部的中郊地区。上海市作为典型沿海城市,形成了“建设用地-农田-水体”的圈层格局,农田成片集中于北部崇明岛和东部的中远郊圈层区域。

以北京市的卫星影像为例,城市由建成区向远郊圈层的过渡显示了显著的土地利用变化。建成区内以高密度建筑为主,几乎没有农田,绿地主要为公园和道路绿化,属于人工景观;近郊圈与建成区的边界较模糊,绿

地以小型公园和少量农田为主;中郊圈层农田面积增大,城镇则被大片农田和林地包围,景观逐渐趋于自然;远郊圈层中,城镇规模明显减小,林地成为主要景观要素,农田呈现出条带状分布。

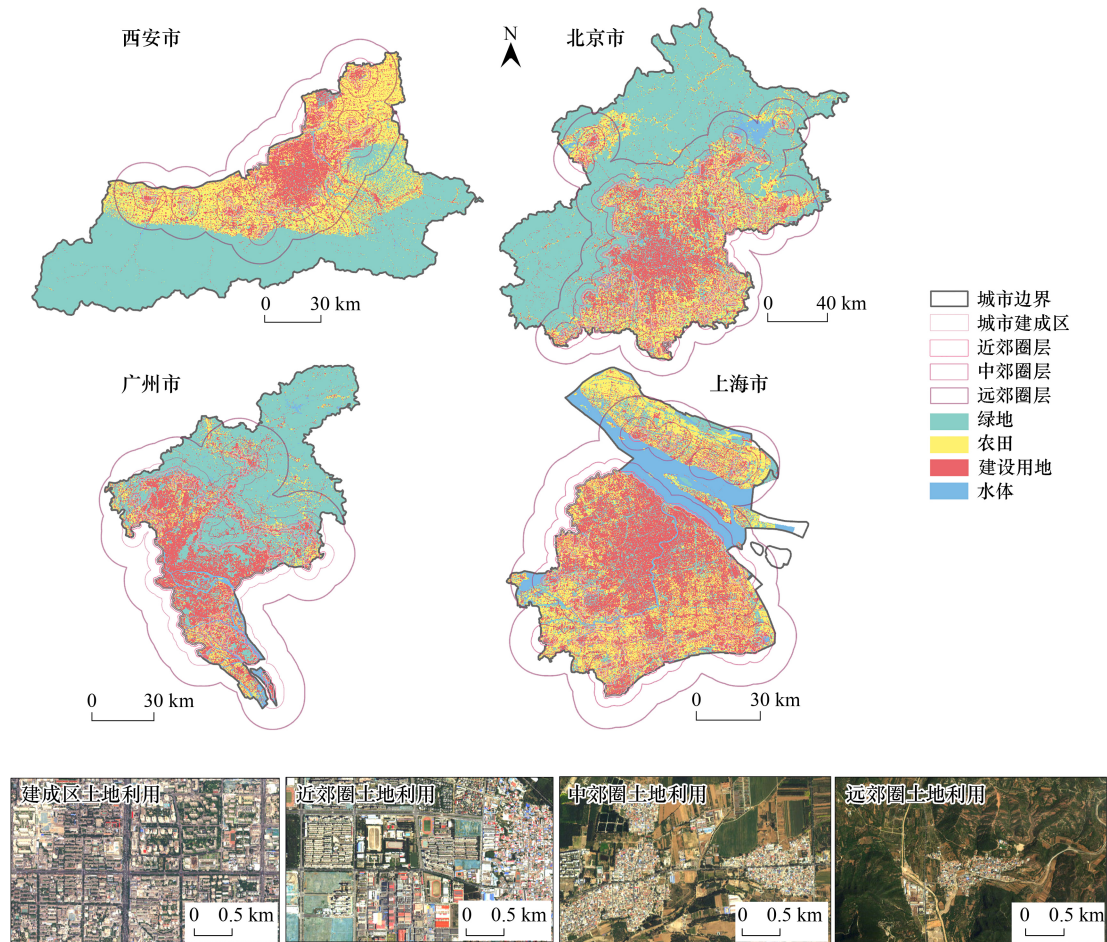


图3 城郊圈层建设用地特征

Fig.3 Characteristics of construction land in suburban areas

随着城郊圈层的扩张,四个城市的近郊、中郊、远郊圈层面积逐步增大,土地利用结构也表现出显著差异(图4)。近郊圈层中农田占比高,西安市农田面积为 274.71km^2 ,占比 $53\%.01$;上海市农田占比 42.48% ,是绿地面积的两倍;北京市的农田面积为 677.39km^2 ,与绿地面积相当;广州市的农田存量最少,仅占 17.00% 。中郊圈层的农田面积普遍较高,西安市、北京市、广州市、上海市的农田面积分别为 1907.64km^2 、 1474.60km^2 、 244.61km^2 、 945.44km^2 。远郊圈层的农田面积占比下降,北京市农田占比仅 13.86% ,广州市为 9.69% ;但西安市和上海市的远郊农田存量依然高于绿地,分别为 1601.69km^2 和 719.32km^2 ,占比 52.03% 和 30.41% 。

四个城市不同圈层城郊农田的景观格局特征如表3所示。其中,西安市中郊和远郊农田景观面积百分比高、斑块数量少,反映出较好的农田景观完整性。北京市农田景观形状复杂,边缘密度较高,尤其是近郊,显示出更为零散和不规则的土地利用特征。广州市景观连通性和聚集度较低,斑块数量较多但形状较简单,近郊圈层的聚集度仅为 24.33% ,农田破碎化程度高。上海市景观形状复杂度和边缘密度介于西安市和北京市之间,整体农田景观较为平衡。从圈层视角来看,近郊农田与城镇建成区的边缘高度交织^[64],面积小、斑块密度大、破碎化严重、景观形状简单,而中郊和远郊农田景观面积百分比高、斑块数量和密度较低、聚集度最高,景观较为连续而集中,然而连通度更低,呈片状分散。

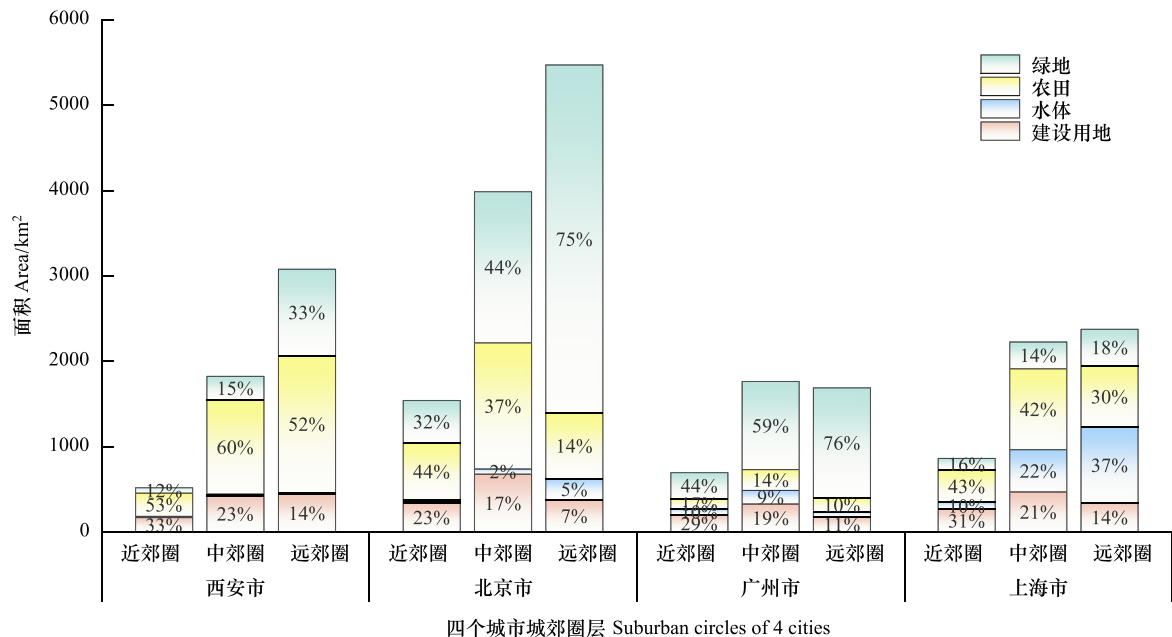


图 4 四个城市城郊圈层土地利用占比

Fig.4 Proportion of land use in suburban circles of 4 cities

表 3 四个城市不同圈层城郊农田的景观格局特征

Table 3 Landscape pattern characteristics of cropland in suburban circles of 4 cities

四个城市城郊圈层		景观指数 Landscape indices							
Suburban circles of 4 cities		CA/km ²	PLAND/%	NP/个	PD/个	AI/%	LSI	ED	CONNECT
西安市	近郊	57875	29.19	312	0.16	43.86	27.24	13.33	12.91
	中郊	168550	44.24	280	0.07	60.98	32.50	14.07	13.73
	远郊	327650	47.51	333	0.05	67.17	38.25	12.70	11.15
北京市	近郊	237250	27.71	1185	0.14	43.64	55.29	12.59	3.60
	中郊	386250	30.69	1224	0.10	50.60	61.82	12.23	3.46
	远郊	463975	25.70	1499	0.08	51.19	66.88	10.11	2.62
广州市	近郊	37100	11.14	592	0.18	24.33	29.04	6.80	6.68
	中郊	62050	12.15	805	0.16	28.37	35.84	7.02	5.85
	远郊	77875	11.45	979	0.14	28.72	39.94	6.58	4.79
上海市	近郊	136800	23.63	904	0.16	40.03	44.74	11.44	5.14
	中郊	230725	28.76	869	0.11	49.20	49.08	11.81	5.11
	远郊	301850	29.04	980	0.09	51.68	53.55	11.34	4.27

CA:斑块类型面积 Class area; PLAND:斑块面积百分比 Percent of landscape; NP: 斑块数量 Number of patches; PD: 斑块密度 Patch density; AI: 聚集指数 Aggregation index; LSI: 形状指数 Landscape shape index; ED: 边缘密度 Edge density; CONNECT: 连接性指数 Connectance

2.2 城郊农田特征分析结果

2.2.1 自然地理特征

西安市、北京市、广州市、上海市不同圈层的土壤质地、高程、坡度、以及起伏度特征如图 5 所示。西安市位于黄土高原的东南缘,远郊地区以陡峭的坡度和较大的地形起伏为特征,展现出明显的山地地貌。近郊和中郊圈层的土壤以粉砂质壤土为主,适合农业生产;远郊圈层北部为壤土和砂质壤土,尽管靠近山地的土壤非常适合农业发展,但地形限制了大规模耕作的可能性。北京市西部毗邻太行山脉,远郊为山地,而中东部为平原,平原主要分布于近郊和中郊圈层。北京市的土壤类型以砂质壤土为主,特别是东南部地区,地势平坦且适合大规模农业种植。广州市地形以丘陵和平原为主,尤其在中郊和远郊圈层,地势相对平坦,受河流水域影

响,土壤多为粘土和粘壤土,适合农田耕作,但城市扩展和绿地的入侵使农田面积受限。上海市作为沿海冲积平原,地势平坦,几乎没有山地,整体地形有利于农业和城市建设。上海的土壤类型以粘壤土为主,北部崇明区主要分布砂质粘土和砂质壤土,具备良好的农业发展条件,但地处沿海地区也受到土地盐碱化的影响。

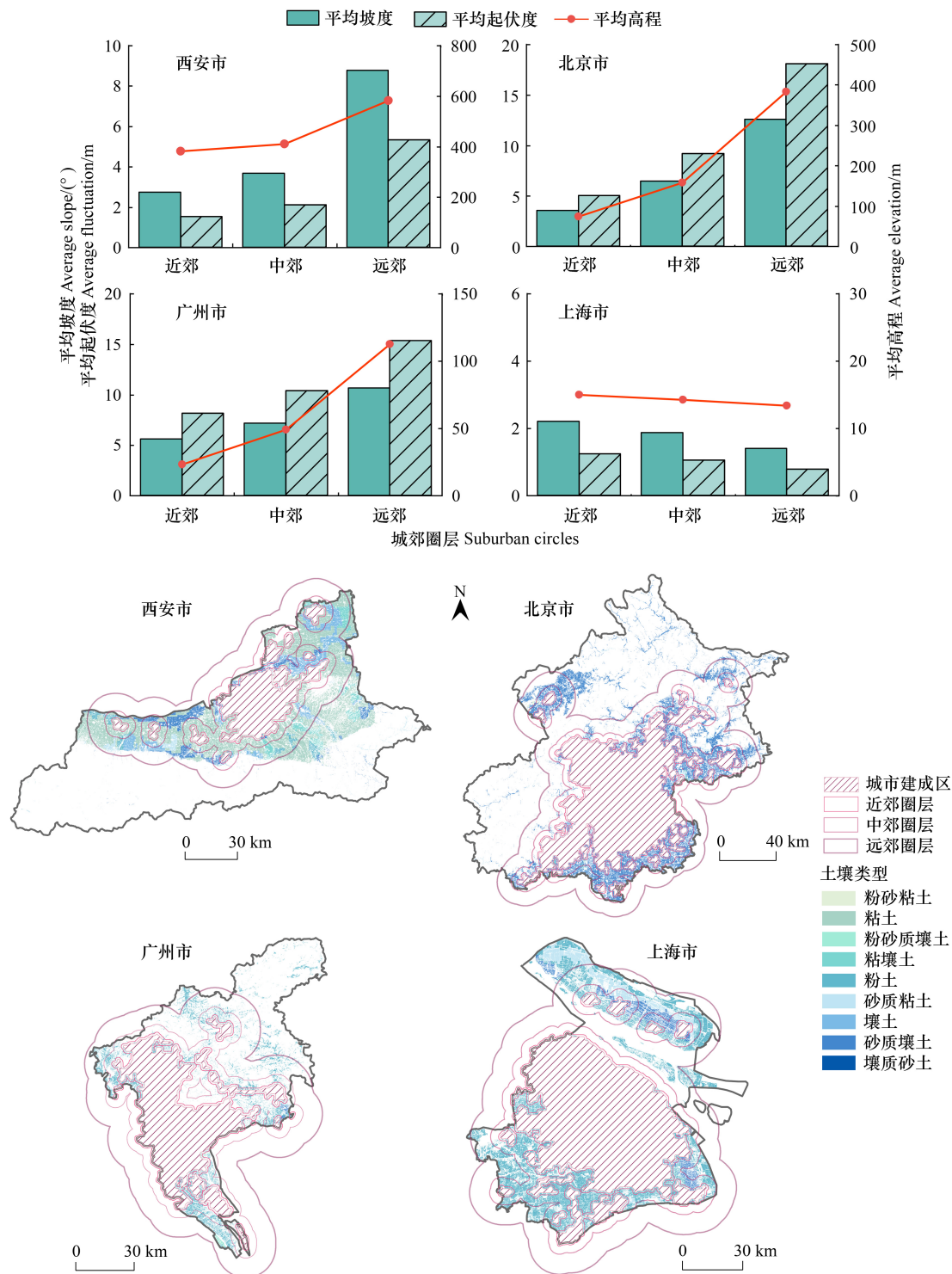


图5 四个城市不同圈层城郊农田的自然地理特征

Fig.5 Physical geographical characteristics of cropland in suburban circles of 4 cities

2.2.2 社会经济特征

西安市、北京市、广州市和上海市的不同圈层在夜间灯光、人口数量、人口密度及 GDP 数据方面表现出较为一致的特征,如图 6 所示。近郊圈层的夜间灯光最为密集,人口密度较高,经济发展较为活跃;随着距离城市中心的增加,中郊和远郊圈层的夜间灯光逐渐减弱,人口密度和经济活动也相应减少。这表明近郊圈层受

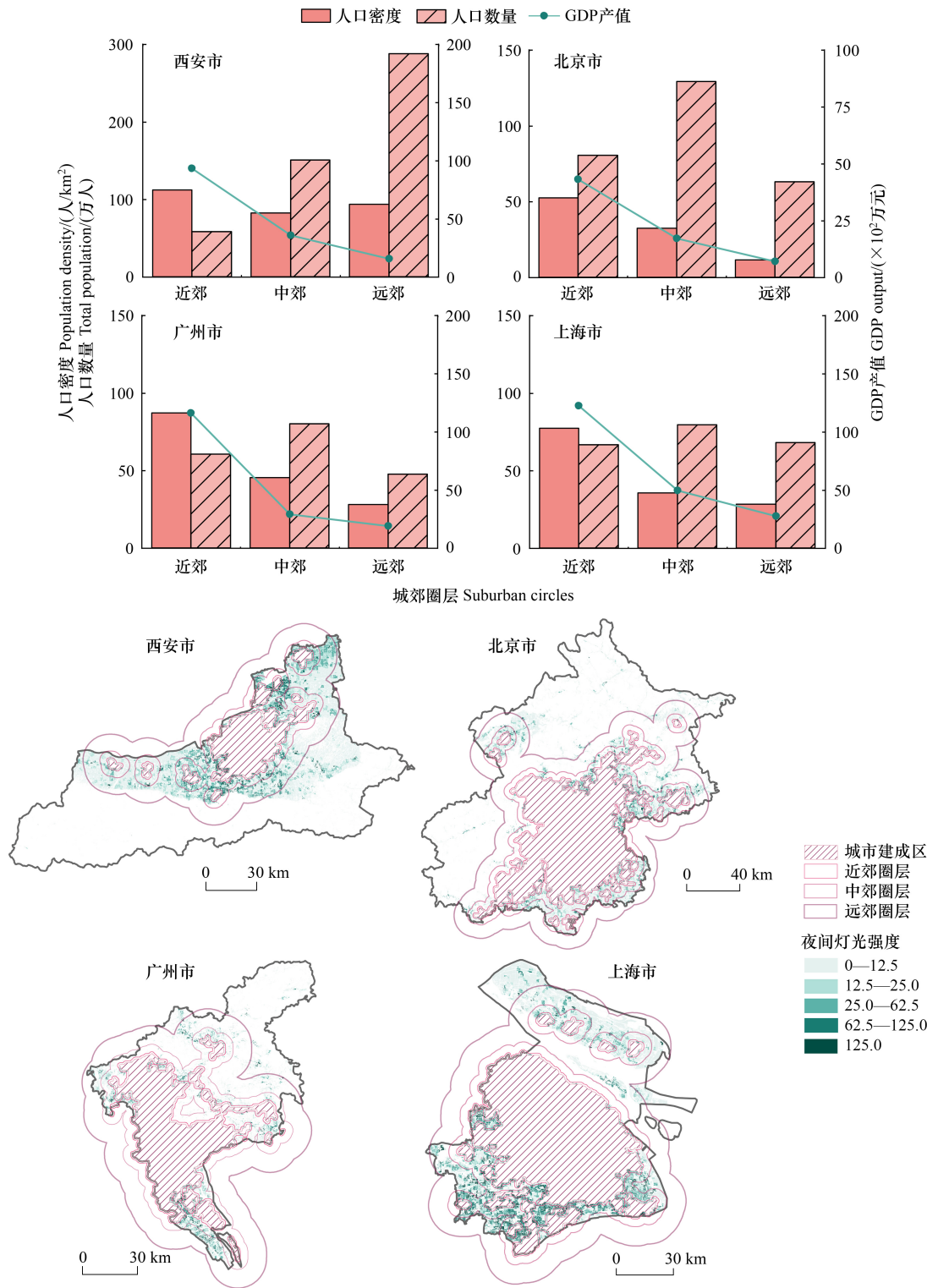


图 6 四个城市不同圈层城郊农田的社会经济特征

Fig.6 Socio-economic characteristics of cropland in suburban circles of 4 cities

到城市建成区的直接辐射影响,显示出显著的都市化特征,因此有较高的社会 GI 需求;而远郊区的农田区域人口较为稀少,经济活动频率低,夜间灯光仍呈现点状聚集,主要集中在城郊地区的村镇中心,靠近这些地区的农田仍存在一定的社会 GI 需求。此外,西安市的城郊地区人口数量和密度高于其他三个城市,这可能是由于西安的经济发展较为均衡,人口不完全集中于市区,城郊地区仍具有较强的人口吸引力。

2.2.3 GI 化开发现状

图 7 为西安、北京、广州和上海四个城市不同城郊圈层农田 GI 的现状与模式类型。当前农田的 GI 主要包含餐饮服务、住宿服务、购物服务、体育休闲服务、风景名胜服务、科教文化服务、生活服务七种服务形式。其中,与农田相关的餐饮服务、住宿服务与体育休闲服务开发利用模式主要以农家乐或农庄等综合形式为主;风景名胜服务主要针对具备景观价值的农园与田园;购物服务主要是农产品和农副产品超市;科教文化主要是幼儿园、农家体验基地、田园实验基地、民宿馆等;生活服务主要是理发、美容、养生等服务。近中远郊圈层 POI 分布呈现向外递增的趋势,POI 类别以体育休闲、餐饮服务、住宿服务、购物服务为主。在四个案例城市中,北京市的 POI 数量最多,其次为西安市和广州市。北京市的远郊农田开发程度较高,拥有 250 个餐饮服务和 848 个体育休闲的 POI 点,其中有 164 个农家乐、188 个农庄和 2170 个农家院。其次为西安市的远郊农田,有 327 个体育休闲服务点、181 个餐饮服务点以及 19 个住宿服务点。广州市的近郊圈层有 25 个购物服务 POI 点,主要以粮油超市、高粱酒、土猪肉和土鸡市场为主,为周边居民提供了便利的采购途径。上海市发展出了度假别墅、田园民宿、农家乐客栈等住宿服务模式,主要集中于中郊农田(21 个)和远郊农田(35 个)。

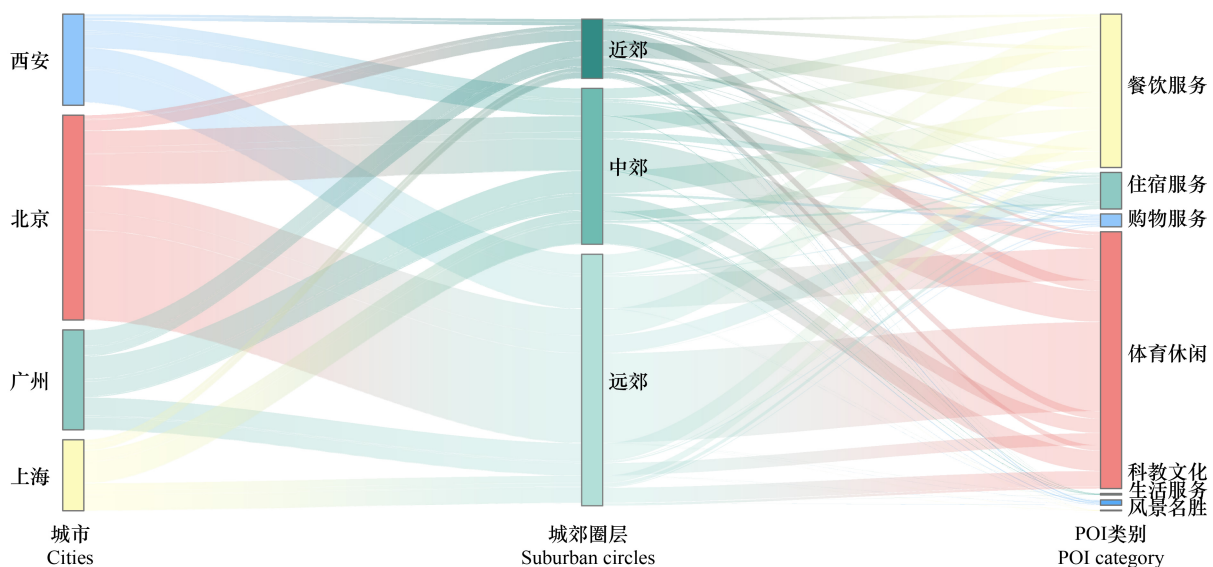


图 7 四个城市不同城郊圈层中与农田相关的 POI 点数量关系

Fig.7 Distribution and quantitative relationship of POIs related to cropland in the suburban circles of 4 cities

POI: 兴趣点 Points of interest

2.3 城郊农田 GI 化潜力评估结果

四个城市城郊农田的 GI 化潜力空间分布及不同潜力得分面积占比如图 8 所示。西安市的近、中、远郊圈层的 GI 化潜力均值分别为 3.16、2.95 和 2.80,表现出两个峰值,分别集中在 2.00—2.50 和 3.00—3.50 区间。高 GI 化潜力的区域主要分布于远郊圈层的东北部以及中郊圈层的南部。北京市的近、中、远郊圈层潜力均值分别为 2.46、2.40 和 2.25,整体开发潜力较低,得分集中于 2.25—2.50 之间。广州市的近、中、远郊圈层潜力均值分别为 2.70、2.50 和 2.36,三个圈层的峰值集中在 2.50—2.75 之间,近郊圈层中高 GI 化潜力的区域占比更大,主要分布于南部和西部。此外,北部的流溪河流域由于地形和城市开发的影响,整体景观较为破碎,但该区域的农田仍具有较高的 GI 化开发潜力。上海市近、中、远郊圈层的潜力均值分别为 2.87、2.70 和 2.60,得分

峰值集中在2.25—2.75 区间。中、远郊圈层的潜力得分更为集中,而近郊圈层得分分布较均匀,并向右偏移。上海市近郊圈层的高 GI 化潜力农田占比更大,中、远郊圈层高潜力农田则主要集中在北部。总体来看,四个城市的不同圈层潜力均值均表现出从近郊向远郊递减的趋势,即近郊圈层中高 GI 化潜力的农田占比更高。

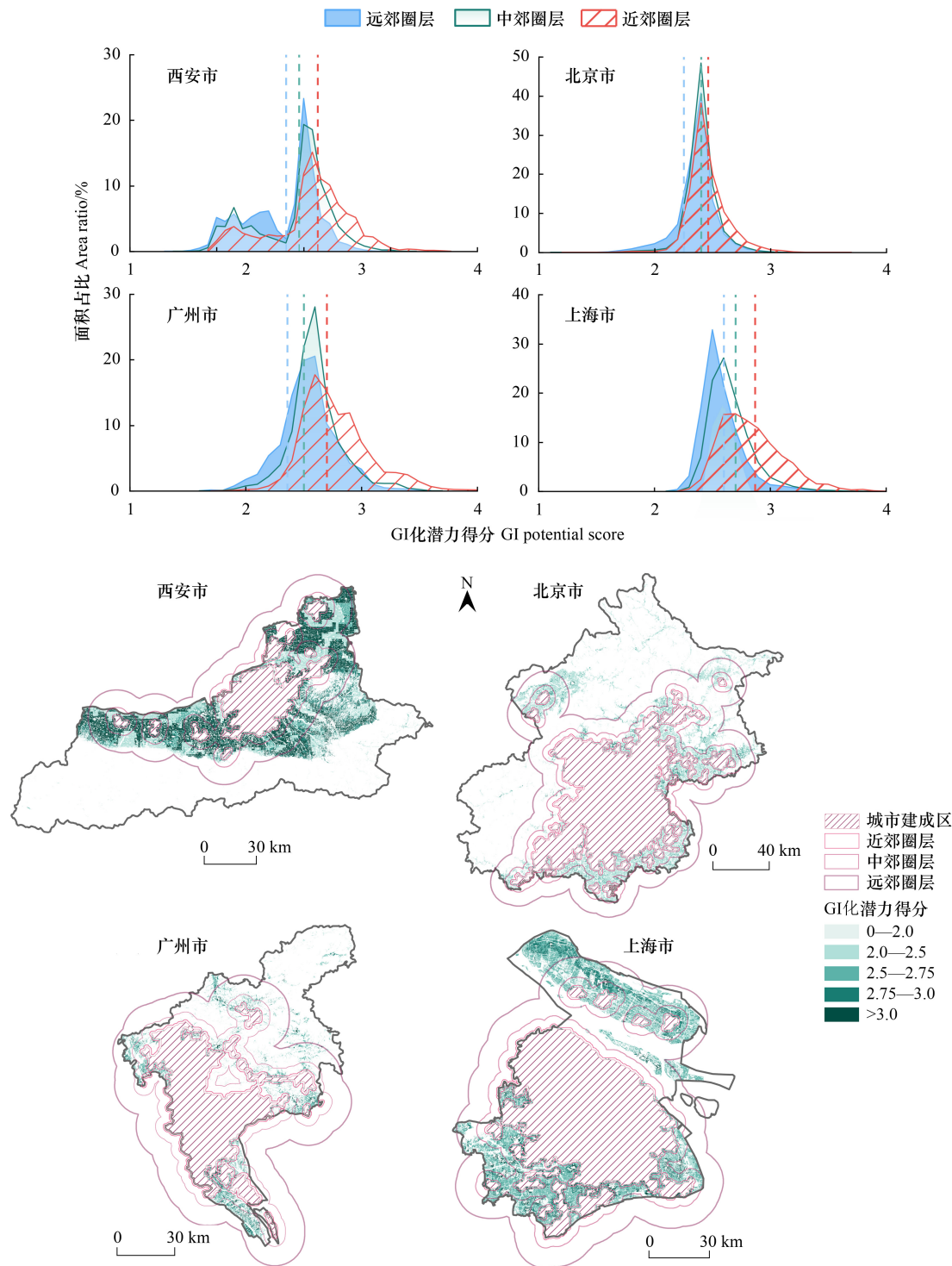


Fig.8 Distribution of GI potential of cropland in suburban circles of 4 cities
GI:绿色基础设施 Green Infrastructuration

将 GI 化潜力得分高于 2.50 分的农田视为具有较高开发潜力、应优先进行 GI 化开发的区域,西安市、北京市、广州市、上海市不同圈层的可 GI 化农田占比如图 9 所示。西安市的可 GI 化城郊农田占比高,且圈层之间的差异不大。中郊和远郊圈层拥有 979.72km² 和 1179.30km² 的可 GI 化农田存量,由于西安市城市绿地仅有 110.67km²,将三个圈层的农田 GI 化后可提升城市绿地的可得性分别为 213.58%、885.26%、1065.60%。北京市可 GI 化农田占比低且存量少。近郊圈层可 GI 化农田占比为 41.66%,面积为 282.23km²,中郊和远郊圈层可 GI 化农田占比分别为 26.47%、21.32%,面积分别为 390.37km² 和 162.65km²,可提升城市绿地的可得性分别为 17.64%、24.39%、10.16%。广州市城郊农田存量少但占比高,近郊和中郊圈层可 GI 化程度占比分别为 92.31%和 82.75%。将三个圈层可 GI 化的农田纳入后可提升城市绿地的可得性分别为 15.93%、29.57%、16.25%。上海市可 GI 化农田占比高且存量多,三个圈层可 GI 化农田面积分别为 362.57km²、872.89km²、573.71km²,可提升城市绿地的可得性分别为 46.82%、112.72%、74.09%。

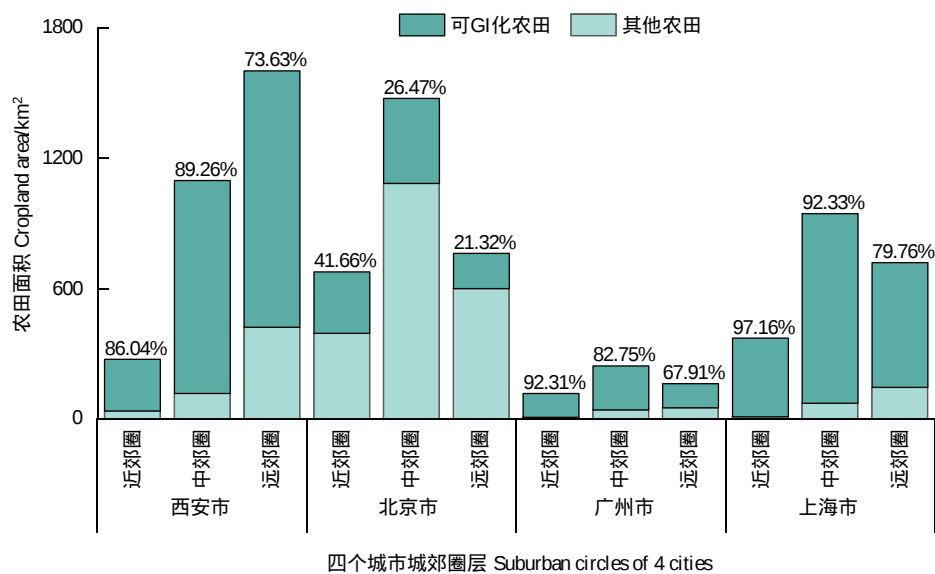


图 9 四个城市不同圈层可 GI 化农田占比

Fig.9 Percentage of GI-able cropland in suburban circles in 4 cities

3 讨论

3.1 城郊农田的划分原则与圈层特征

受到城市化效应与扩散效应的影响,近郊、中郊和远郊地区因其与建成区的距离不同,导致其发展机遇与面临的挑战各异,农田所处地理环境与社会环境呈现出梯度转变的特点^[65]。然而,目前还未有普遍适用于城郊圈层的明确定义,现有文献倾向于通过统计人口和与中心城区的距离来划分圈层^[66—67]。本研究以“15 分钟”为合理出行时间,基于三种出行方式将城郊农田划分为近郊、中郊、远郊三个圈层,借鉴于“15 分钟社区生活圈”作为营造社区生活的基本单元,其概念被广泛应用于我国公共设施配置^[46]、社区健康^[48]、交通建设^[49]等方面。“15 分钟”强调人们所能接受出行最大时间的心理极限,基于可达性衡量个体的潜在就业机会、活动空间以及交通、商业、医疗、教育等各类服务设施的使用水平,进而从微观层面反映个体行为空间和生活质量差异^[45,68]。以 15 分钟出行划分城郊农田具有较高的可实施性,一是体现城郊农田在自然地理与社会经济特征上存在明显的空间分异,其结果与张桂琴等的研究结果有相似性^[69—70];二是强调人本视角下对农田生态系统文化服务与调节服务开发潜力的关注,以人群的可达性基础衡量城郊农田的效益是对 Hernández-Morcillo、庄思冰等研究的延伸^[71—72]。

本研究选取西安、北京、广州、上海四个国家中心城市,从景观格局、自然地理、社会经济三个方面刻画了

不同圈层城郊农田的空间特征:近郊农田位于地势平坦的地区,受到城市辐射的强烈影响而人口密集且 GDP 发达,农田因镶嵌于建设用地之外,占比大但规模较小、景观破碎化程度高;中郊圈层地势较为平坦,社会经济水平弱于近郊圈层,但农田连片分布,聚集度和连通度增高;远郊圈层整体地势崎岖,人口大量流失且 GDP 严重落后,农田以条带状分布在地势稍微平坦的山谷,农田面积最大、聚集度最高而分布更为分散。不同圈层城郊农田的景观格局、自然地理与社会经济特征存在明显的空间差异,这一视角为农田的可持续发展提供了新的思路。相比以城市为单位的统一开发策略,通过分析不同圈层的差异能够更精确地制定适地适度的农田 GI 化策略,有效提升农田生态系统服务与社会经济效益,促进城乡可持续发展。

3.2 城郊农田 GI 化的可行性与合理性

本研究通过对比分析与农田相关的 POI 类别与数量刻画了不同圈层城郊农田的 GI 化开发现状:当前城郊农田以体育休闲和餐饮服务为主,已发展出农家乐、农家餐馆、农园别墅、农业科研基地等多种开发模式。近郊与中郊圈层 GI 化程度较低,模式多样但数量较少,远郊圈层的 GI 化程度则远高于近郊和中郊圈层。然而,本研究通过构建 GI 化潜力计算评价体系,量化了不同圈层城郊农田的 GI 化潜力,结果表明:近郊圈层高 GI 化潜力农田总量少但占比最高,中郊圈层高 GI 化潜力农田占比高且面积最多;远郊圈层农田 GI 化潜力的占比和存量整体水平偏低。可见,当前的近郊与中郊圈层农田的 GI 化开发受到了严重的低估。

研究结果值得重新审视当前的占补平衡、永久基本农田、严禁农田“非农化”与“非粮化”等农田保护政策。首先,近郊农田作为城市居民优先接触到的区域,农田的高占比意味着其 GI 化将来带更多的绿地暴露,总量少则意味着有必要合理评估并结合农田特征进行开发,以实现资源的高效利用。然而占补平衡政策允许城镇建设用地占用近郊农田并在其他地区补充相应数量和质量的农田,可能导致近郊农田进一步破碎化,同时补充的农田多来自远郊圈层土地开发,严重低估了占补过程中导致的 GI 化潜力损失^[73]。其次,近郊农田细碎化程度严重,小面积经营利于农户的多元化种植^[74],这意味着过度强调近郊农田的规模经营和“非粮化”是不合适的^[75-76]。

城郊农田的 GI 化强调在土地综合整治的宏观调控框架下,在严守耕地红线、保护永久基本农田的同时,提升城郊低生产效力农田的综合效益,增强农田的非物质供给和绿色基础设施供给。在未来的农田保护政策的制定过程中,应注重圈层意识,对于难以实现高产量且社会 GI 需求高的近郊和中郊农田,应避免无效率的劳动生产力和资金投入,可以适当转换开发策略,在保障农田功能的同时,适当在周边进行生态与文化服务功能的开发,合理引导农田的多功能运营,以提高农田的整体效益;而对于远郊圈层中适宜大片种植,规模经营的平田以及优质梯田的地区,则要坚决遏制农田“非粮化”,注重保障城市的粮食供给安全。

3.3 不同城市城郊农田 GI 化的基于自然解决方案(NbS)路径

四个城市的城郊农田可 GI 化潜力呈现出显著差异。西安市具有较为均衡的圈层发展,城郊区域的可 GI 化潜力极大,有助于大幅提升城市绿地暴露;北京市则受限于可 GI 化潜力农田存量较低,特别是在远郊圈层;广州市尽管农田面积较少,但高比例的可 GI 化农田中郊圈层显示出其在生态建设中的良好前景;上海市则拥有较大规模的农田可用于绿色基础设施的建设,不同圈层的提升幅度相对较为均衡,有助于显著改善城市的绿地资源分布。

NbS 作为整体性和系统性理念,目的是保护、持续性管理、修复自然或改善生态系统,以高效解决社会挑战,比如气候变化、粮食安全、社会和经济发展和生态环境退化等问题,进而提供人类福祉和生物多样性福利的行动^[77-79]。城郊农田的 GI 化被视为一种基于自然的解决方案,在未来的农田保护、开发与管理等政策制定中应纳入 NbS 的评价标准^[80]。2021 年,IUCN 提出了 NbS 实施的 8 项准则和 28 项指标,开发了基于自然的解决方案自评估工具^[81-82]。NbS 自评估工具可以根据基于城市特点拟定各项指标,对不同圈层城郊农田的开发模式进行评估与改进,确保各个城市农田 GI 化过程的科学性、合理性与包容性。未来城郊农田的 GI 化开发将强调自然生态系统的系统性与整体性,借助多圈层视角实现对农田的科学认知和高效利用,依据 NbS 理念推动农田多时序、多尺度、多维度开发,最终实现城郊农田的可持续保护与利用。

4 结论

本研究以中国四个典型城市为例,通过划定城市近郊、中郊以及远郊圈层,分析了不同圈层城郊农田的自然地理特征、社会经济特征与 GI 化开发现状。通过构建城郊农田 GI 化潜力评价体系,量化了城郊农田 GI 化潜力的空间分布特征,并评估对可 GI 化农田存量对城市绿地可得性提升的作用。研究表明,四个城市不同圈层的城郊农田存在明显的空间特征分异,GI 化现状、GI 化潜力得分以及可 GI 化农田面积与占比均存在较大差异。GI 化开发同时受到城市发展和圈层差异的影响,该视角有利于重新构建对城郊农田保护政策的认知与评价。近郊和中郊圈层农田具备较高的 GI 化潜力,然而这些潜力被严重低估。城郊农田 GI 化是一种基于自然的解决方案,未来的农田 GI 化路径离不开对 NbS 准则与自评估工具的借鉴与应用。通过兼顾保护与引导合理的城郊农田多功能开发,将有利于实现对农田生态系统文化服务价值的挖掘,达到提高绿地供给、提升农田经济效益、促进城乡融合的发展目标。

参考文献 (References):

- [1] 胡凤宁,周亮. 城市绿色基础设施降温作用及其影响因素研究进展. 生态学报,2023,43(11): 4445-4460.
- [2] Laforzezza R, Davies C, Sanesi G, Konijnendijk C. Green Infrastructure as a tool to support spatial planning in European urban regions. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2013, 6(3): 102-108.
- [3] Thomas K, Littlewood S. From green belts to green infrastructure? The evolution of a new concept in the emerging soft governance of spatial strategies. *Planning Practice & Research*, 2010, 25(2): 203-222.
- [4] Fuller R A, Gaston K J. The scaling of green space coverage in European cities. *Biology Letters*, 2009, 5(3): 352-355.
- [5] Hartig T, Kahn P H. Living in cities, naturally. *Science*, 2016, 352(6288): 938-940.
- [6] Lee J, Lim C H, Kim G S, Markandya A, Chowdhury S, Kim S J, Lee W K, Son Y. Economic viability of the national-scale forestation program: the case of success in the republic of Korea. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 40-46.
- [7] Hasan S S, Zhen L, Miah M G, Ahamed T, Samie A. Impact of land use change on ecosystem services: a review. *Environmental Development*, 2020, 34: 100527.
- [8] Morizet-Davis J, Marting Vidaurre N A, Reinmuth E, Rezaei-Chiyaneh E, Schlecht V, Schmidt S, Singh K, Vargas-Carpintero R, Wagner M, von Cossel M. Ecosystem services at the farm level—overview, synergies, trade-offs, and stakeholder analysis. *Global Challenges*, 2023, 7(7): 2200225.
- [9] 唐秀美,潘瑜春,程晋南,任艳敏. 高标准基本农田建设对耕地生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2015, 35(24): 8009-8015.
- [10] Lucertini G, Di Giustino G. Urban and peri-urban agriculture as a tool for food security and climate change mitigation and adaptation: the case of mestre. *Sustainability*, 2021, 13(11): 5999.
- [11] 朱毓莹,周浩. 基于县域尺度的耕地“非粮化”时空分异及驱动机制研究——以湖南省为例. 农业现代化研究, 2024, 45(3): 399-408.
- [12] 李莹莹,黄成林,张玉. 快速城市化背景下上海绿色空间景观格局梯度及其多样性时空动态特征分析. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1115-1124.
- [13] Sandra D, Unai P, Marie S, Berta M, Robert T T, Zsolt M, Rosemary H, Kai M C, Ivar A B, Kate A B. Assessing nature's contributions to people. *Science*, 2018, 359(6373): 270-272.
- [14] Honeck E, Sanguet A, Schlaepfer M A, Wyler N, Lehmann A. Methods for identifying green infrastructure. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(11): 1916.
- [15] 栾博,柴民伟,王鑫. 绿色基础设施研究进展. 生态学报, 2017, 37(15): 5246-5261.
- [16] Rolf W, Pauleit S, Wiggering H. A stakeholder approach, door opener for farmland and multifunctionality in urban green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 40: 73-83.
- [17] Bartesaghi Koc C, Osmond P, Peters A. Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(1): 15-35.
- [18] Jonathan A F, Navin R, Kate A B, Emily S C, James S G, Matt J, Nathaniel D M, Christine O, Deepak K R, Paul C W. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [19] Chen S, Chen H, Yang R J, Ye Y M. Linking social-ecological management and ecosystem service bundles: lessons from a peri-urban agriculture landscape. *Land Use Policy*, 2023, 131: 106697.
- [20] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [21] Timpe A, Cieszewska A, Supuka J, Tóth A. Urban agriculture goes green infrastructure. *Urban Agriculture Europe*. 2015: 126-37.
- [22] Rieke H, Rolf W, Artur S, Ana L, Luca S, Iván T, Kati H V, Emily R, Clive D, Stephan P. Advanced Urban Green Infrastructure Planning and

- Implementation-Innovative Approaches and Strategies from European Cities. Green Surge Deliverable 5.2 Technical Report, 2016.
- [23] Dunn A D. Siting green infrastructure: legal and policy solutions to alleviate urban poverty and promote healthy communities. *Environmental Affairs*, 2010, 37: 41-66.
- [24] Sroka W, Sulewski P, Mikolajczyk J, Król K. Farming under urban pressure: business models and success factors of peri-urban farms. *Agriculture*, 2023, 13(6): 1216.
- [25] La Rosa D, Barbarossa L, Privitera R, Martinico F. Agriculture and the city: a method for sustainable planning of new forms of agriculture in urban contexts. *Land Use Policy*, 2014, 41: 290-303.
- [26] Conference C G W A, Mees C, Stone E. Zoned out: the potential of urban agriculture planning to turn against its roots. *Cities and the Environment*, 2012, 5(1): 1-14.
- [27] Pearsall H, Gutierrez-Velez V H, Gilbert M R, Hoque S, Eakin H, Brondizio E S, Solecki W, Toran L, Baka J E, Behm J E, Brelsford C, Hinrichs C, Henry K A, Mennis J, Roman L A, Rosan C, South E C, Valletta R D. Advancing equitable health and well-being across urban-rural sustainable infrastructure systems. *NPJ Urban Sustainability*, 2021, 1: 26.
- [28] Nieuwenhuijsen M J. Green infrastructure and health. *Annual Review of Public Health*, 2021, 42(1): 317-328.
- [29] 王永艳, 李阳兵, 何太蓉. 平行岭谷区都市城郊耕地景观演变案例研究——以重庆市沙坪坝区为例. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(8): 1027-1035.
- [30] 李文博, 闫卓冉, 祝元丽. 黑土区城郊耕地重金属污染空间扩散机制. *环境科学*, 2023, 44(10): 5679-5688.
- [31] Raf A, Valerie D, Wouter M J A. Potential ecosystem services of urban agriculture: a review. *PeerJ Preprints* 2016, 4: 13.
- [32] Lin B B, Philpott S M, Jha S. The future of urban agriculture and biodiversity-ecosystem services: challenges and next steps. *Basic and Applied Ecology*, 2015, 16(3): 189-201.
- [33] Frank L, Lilli L, Lionella S, Axel T. *Urban agriculture europe*. Jovis Berlin, 2016.
- [34] 吴晓, 周忠学. 城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系——以西安市为例. *生态学报*, 2019, 39(24): 9211-9221.
- [35] 张鹏骞, 胡理乐, 白加德. 京津冀地区近 20 年 NDVI 时空变化特征. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 29-36.
- [36] 吴大放, 林添华, 李淑君, 何惠慧, 李致毅, 郁万敏, 梁逸璇. 广州市耕地非粮化时空演变及驱动力分析. *广东农业科学*, 2023, 50(1): 153-163.
- [37] 姜在鹏, 谢国磐, 刘璇, 张宝雷. 基于 PCA-BP 神经网络的北京市耕地面积预测. *山东师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 37(1): 44-53.
- [38] Zhao N Z, Liu Y, Cao G F, Samson E L, Zhang J Q. Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images. *GIScience & Remote Sensing*, 2017, 54(3): 407-425.
- [39] Mell I C. Green infrastructure: reflections on past, present and future Praxis. *Landscape Research*, 2017, 42(2): 135-145.
- [40] Henderson M, Yeh E T, Gong P, Elvidge C, Baugh K. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 595-609.
- [41] Li X C, Gong P, Zhou Y Y, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Xiao Y X, Xu B, Yang J, Liu X P, Cai W J, Huang H B, Wu T H, Wang X, Lin P, Li X, Chen J, He C Y, Li X, Yu L, Clinton N, Zhu Z L. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094044.
- [42] Peng J, Hu Y N, Liu Y X, Ma J, Zhao S Q. A new approach for urban-rural fringe identification: integrating impervious surface area and spatial continuous wavelet transform. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 175: 72-79.
- [43] Kew B, Lee B. Measuring sprawl across the urban rural continuum using an amalgamated sprawl index. *Sustainability*, 2013, 5(5): 1806-1828.
- [44] Buxton M. The expanding urban fringe: impacts on peri-urban areas, Melbourne, Australia. *The Security of Water, Food, Energy and Liveability of Cities*, 2014, 1: 55-70.
- [45] 靳诚, 陆玉麒, 张莉, 徐菁. 基于路网结构的旅游景点可达性分析——以南京市为例. *地理研究*, 2009, 28(1): 246-258.
- [46] 钟少颖, 杨鑫, 陈锐. 层级性公共服务设施空间可达性研究——以北京市综合性医疗设施为例. *地理研究*, 2016, 35(4): 731-744.
- [47] 孙德芳, 沈山, 武廷海. 生活圈理论视角下的县域公共服务设施配置研究——以江苏省邳州市为例. *规划师*, 2012, 28(8): 68-72.
- [48] 王兰, 李潇天, 杨晓明. 健康融入 15 分钟社区生活圈: 突发公共卫生事件下的社区应对. *规划师*, 2020, 36(6): 102-106, 120.
- [49] 吴夏安, 徐磊青. 利用 TOD 模式建设社区生活圈的可行性及关键指标分析. *城市建筑*, 2020, 17(31): 28-33.
- [50] Moreno C, Allam Z, Chabaud D, Gall C, Pratlong F. Introducing the "15-minute city": sustainability, resilience and place identity in future post-pandemic cities. *Smart Cities*, 2021, 4(1): 93-111.
- [51] Poorthuis A, Zook M. Moving the 15-minute city beyond the urban core: the role of accessibility and public transport in the Netherlands. *Journal of Transport Geography*, 2023, 110: 103629.
- [52] Steuterville R. The 15-minute neighborhood gets its 15 minutes of fame. *Congress for New Urbanism*, 2021.
- [53] 郭嵘, 李元, 黄梦石. 哈尔滨 15 分钟社区生活圈划定及步行网络优化策略. *规划师*, 2019, 35(4): 18-24.
- [54] 住房和城乡建设部关于发布国家标准《城市居住区规划设计规范》局部修订的公告第 1190 号. *工程建设标准化*, 2016(7): 30-36.
- [55] Ferrer-Ortiz C, Marquet O, Mojica L, Vich G. Barcelona under the 15-minute city lens: mapping the accessibility and proximity potential based on pedestrian travel times. *Smart Cities*, 2022, 5(1): 146-161.

- [56] Chen Y, Lin M X, Lin T, Zhang J M, Jones L, Yao X, Geng H K, Liu Y Q, Zhang G Q, Cao X, Ye H, Zhan Y L. Spatial heterogeneity of vegetation phenology caused by urbanization in China based on remote sensing. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110448.
- [57] 钱凤魁, 逢然然, 于洋, 徐欢, 韩春兰. 辽宁省不同地貌区耕地景观格局与耕地质量空间关联特征及作用机制. *中国生态农业学报*, 2023, 31(1): 113-24.
- [58] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [59] 毕玮, 党小虎, 马慧, 邓铭江, 李鹏, 曹小曙, 时鹏. “藏粮于地”视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价. *农业工程学报*, 2021, 37(7): 235-243.
- [60] 石龙宇, 冯运双, 高莉洁. 长三角县域国土空间开发适宜性评价方法研究——以长兴县为例. *生态学报*, 2020, 40(18): 6495-6504.
- [61] 李猷, 王仰麟, 彭建, 常青, 宋治清, 刘小茜. 基于景观生态的城市土地开发适宜性评价——以丹东市为例. *生态学报*, 2010, 30(8): 2141-2150.
- [62] Zhu J Y, Lu H T, Zheng T C, Rong Y J, Wang C X, Zhang W, Yan Y, Tang L N. Vitality of urban parks and its influencing factors from the perspective of recreational service supply, demand, and spatial links. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1615.
- [63] Chen M Z, Cai Y X, Guo S Y, Sun R L, Song Y, Shen X W. Evaluating implied urban nature vitality in San Francisco: an interdisciplinary approach combining census data, street view images, and social media analysis. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2024, 95: 128289.
- [64] 张俊杰. 国土空间规划背景下耕地整治路径研究——以广州市为例. *城市建设理论研究(电子版)*, 2023, 16: 10-12.
- [65] 蒋姣龙. 城乡融合格局下超大城市郊区乡村有机更新策略研究——以上海市近郊、远郊乡村为例. *上海城市规划*, 2023, 4: 62-69.
- [66] Sahana M, Ravetz J, Patel P P, Dadashpoor H, Follmann A. Where is the peri-urban? A systematic review of peri-urban research and approaches for its identification and demarcation worldwide. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1316.
- [67] Lens M C. The impact of housing vouchers on crime in US cities and suburbs. *Urban Studies*, 2014, 51(6): 1274-1289.
- [68] 范淑斌, 申悦. 基于潜在活动空间的个体时空可达性特征与影响因素研究——以上海市郊区为例. *地理科学进展*, 2022, 41(11): 2086-2098.
- [69] 张桂琴, 李建华, 赵倩倩, 侯嘉烨. 基于灯光遥感和兴趣点数据的城乡结合部空间识别——以银川市为例. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2023, 59(1): 10-16.
- [70] 周小驰, 刘咏梅, 杨海娟. 西安市城市边缘区空间识别与边界划分. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1327-1335.
- [71] Hernández-Morcillo M, Plieninger T, Bieling C. An empirical review of cultural ecosystem service indicators. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 434-444.
- [72] 庄思冰, 龚建周, 陈康林, 李江涛. 粤港澳大湾区小型公园绿地生态系统文化服务的供需匹配特征. *生态学报*, 2023, 43(14): 5714-5725.
- [73] 何青松, 蒋旭. 耕地占补面积时空变化对碳储量的影响测度——以湖北省为例. *生态学报*, 2023, 43(24): 10413-10429.
- [74] 王兴稳, 钟甯宁. 土地细碎化与农用地流转市场. *中国农村观察*, 2008(4): 29-34.
- [75] 郭贯成, 丁晨曦. 土地细碎化对粮食生产规模报酬影响的量化研究——基于江苏省盐城市、徐州市的实证数据. *自然资源学报*, 2016, 31(2): 202-214.
- [76] 谢花林, 欧阳振益, 陈倩茹. 耕地细碎化促进了耕地“非粮化”吗——基于福建丘陵区农户的微观调查. *中国土地科学*, 2022, 36(1): 47-56.
- [77] Eggermont H, Balian E, Azevedo J M N, Beumer V, Brodin T, Claudet J, Fady B, Grube M, Keune H, Lamarque P, Reuter K, Smith M, van Ham C, Weisser W W, Le Roux X. Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 2015, 24(4): 243-248.
- [78] 联合国环境规划署. 支持可持续发展的基于自然的解决方案. 内罗毕: 联合国环境规划署, 2022.
- [79] 王志芳, 简钰清, 黄志彬, 付宏鹏. 基于自然解决方案的研究视角综述及中国应用启示. *风景园林*, 2022, 29(6): 12-19.
- [80] Lin T, Cai J Y, Geng H K, Zheng Y C, Zeng Z W, Zheng Y K. Incorporating suburban cropland into urban green infrastructure: a perspective of nature-based solutions in China. *Nature-Based Solutions*, 2024, 5: 100122.
- [81] IUCN. Global Standard for Nature-based Solutions. 2020.2.
- [82] Luo M, Cai J Y, Zeng Z W, Zheng Y C, Lin T. Development and practices of nature-based solutions in China. *Nature-Based Solutions*, 2024, 5: 100109.