

矿业城市绿色空间格局演变及其生态系统服务变化研究—以徐州市为例¹

罗琳^{1,2}, 谢红彬^{1,2*}, 关钊^{1,2}, 魏平^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院、碳中和未来技术学院, 福建 福州 350117; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350117)

【摘要】: 矿业城市生态转型过程中, 城市绿色空间格局变化使得生态系统服务随之改变。以典型矿业城市—徐州为研究区域, 基于遥感影像提取 2000、2010 及 2020 年绿色空间信息, 利用景观格局指数法探究绿色空间格局演变, 对食物供给、碳储存、土壤保持及生境质量四项生态系统服务进行评估, 进而探究生态转型过程中生态系统服务的权衡及协同关系。结果表明: (1) 2000~2020 年徐州绿色空间占研究区总面积比重超过 70%, 但总体呈递减态势。一方面快速城市化导致大量绿色空间转为建设用地; 另一方面城市生态建设及废弃矿区生态修复使中心城区、贾汪建成区及采煤塌陷区等部分非绿色空间转为绿色空间。(2) 徐州市城市绿色空间景观异质性降低, 破碎化程度有一定缓解。景观形态逐渐规整并具有较好连通性。(3) 受绿色空间格局变化影响, 徐州市绿色空间的食物供给量持续提升, 土壤保持量先降后升, 碳储量与生境质量持续下降。生态系统服务水平空间上呈“四周高、中间低”特征。(4) 徐州市生态系统供给服务(食物供给)与调节服务(碳储存、土壤保持)、供给服务与支持服务(生境质量)之间呈现此消彼长的权衡关系, 而调节服务(碳储存、土壤保持)和支持服务(生境质量)之间存在相互增益的协同效应。

【关键词】: 矿业城市; 绿色空间格局; 生态系统服务; 徐州

【中图分类号】: X171.1 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2023)08-1686-12

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202308012

矿业城市作为重要的能源或资源战略保障基地, 为国民经济发展做出了巨大贡献。但是矿产资源过度开采与城市无序扩张, 给城市生态环境带来严重损害, 也将阻碍城市生态转型及绿色可持续发展。城市绿色空间是指城市范围内的所有植被包括山地、水体、旷野地等自然植被和人工植被等空间的总称[1], 是城市生态系统的重要组成部分, 在维系城市生态系统平衡、提高生态系统服务水平方面发挥着重要作用[2]。绿色空间格局特征及变化, 能对城市生态系统社会、经济与生态功能产生深刻影响[3]。城市绿色空间生态系统服务则是绿色空间提供给城市居民赖以生存的自然物质产品及生态效益。随着矿业城市转型和矿区生态修复, 矿业城市绿色空间结构也随之变化, 促使城市生态系统服务发生变化。对矿业城市绿色空间格局演变及其生态系统服务进行研究, 有利于更好地把握矿业城市转型过程生态系统变化, 了解城市生态系统服务演变趋势, 权衡及协同各种生态系统服务间相互关系, 为矿业城市可持续发展提供决策支持。

矿业城市研究起源于资源型城镇, 国外矿业资源型城镇规模较小, 且矿、城分离, 人地矛盾相对缓和, 因此对于城市整体生态及环境问题关注较少, 主要聚焦于小尺度矿区生态修复[4], 侧重棕地/矿业废弃地生态修复理论、技术与方法、政策等方面研

¹ 收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2023-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(41871208)

作者简介: 罗琳(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域可持续发展与旅游开发. E-mail: 1192609824@qq.com

* 通讯作者 E-mail: xiehongbin933@sina.com

究[5]。国内近年在生态文明建设及国土空间修复的背景下,矿业城市的生态环境问题与生态转型也得到学界广泛。研究内容涉及矿业城市采矿废弃地生态修复[6]、生态承载力与环境容量[7]、城市生态安全格局构建[8]等。在矿业城市绿色空间相关研究方面,针对矿业城市绿色基础设施网络构建[12]以及城市绿地景观格局变化及优化研究较多,但关于矿业城市生态转型过程中城市绿色空间格局变化研究较少。国内外有关城市绿色空间的探讨,多采用定性与定量相结合的研究方法,以多学科结合为研究脉络[9,10]。城市绿色空间格局量化方法主要有基于时空变化的空间分析法、景观格局指数法、网络分析法及梯度分析法等,近年来逐渐从格局分析拓展到生态系统服务评价[3]。城市绿色空间通过提供生态系统服务,在维持城市生态系统可持续性方面发挥着至关重要的作用[11,12,13],是城市生态系统研究的热点话题,积累了众多研究成果。当前城市绿色空间生态系统服务的评估主要分为两种,一种是计算生态系统服务价值量[14],另一种则是评估生态系统服务[15]。城市绿色空间生态系统服务中的供给服务、调节服务、支持服务均受到学者广泛关注[16],此外,其文化服务也逐渐引发众多学者重视[17]。与其他类型城市相比,矿业城市绿色空间变化不仅受到城市化进程深刻影响,还受矿产资源的有限性、矿业发展的周期性、转型任务的艰巨性制约。大量矿业废弃地阻碍城市建设,其修复难度大、周期长、投入资金多,修复效果滞后且缓慢,故绿色空间变化更为复杂,由此引发的生态系统服务必然存在时空差异性和特殊性。

徐州作为我国典型矿业城市,其城市发展及生态转型过程一直是学者重点关注的对象。本文以徐州为例,从“景观格局—过程—功能”角度探究矿业城市绿色空间格局的演变;从供给、调节、支持服务方面评估矿业城市绿色空间生态系统服务,并探究其权衡及协同关系。旨在了解我国矿业城市转型生态压力,探索绿色发展转型路径,为矿业城市可持续发展提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

徐州市地处江苏省西北部(116° 22' E~118° 40' E、33° 43' N~34° 58' N),土地总面积 11 258 km²,现辖 2 市、3 县、5 区,常住人口 908.39 万人。地形以平原为主,地势低平,海拔高度在 20~50 m 之间,丘陵岗地约占 10%,为鲁中南低山丘陵向南延续部分。2000~2020 年,徐州市 GDP 总量从 616.3 亿元增长到 7 319.77 亿元,人均 GDP 从 6 948 元增长到 80 673 元。徐州市煤炭资源丰富,且与鲁南、皖北、豫东煤田相毗连,是全国重要的煤炭基地。但采煤活动在城市中形成大面积的塌陷地,割裂城市生态空间,威胁社会经济和生态系统的稳定性。近年来,徐州市开展生态转型日益重视生态修复及城市环境保护,始终坚持“生态优先”原则,将大批矿区废弃地纳入城市生态空间,积极开展废弃地生态修复,使得城市森林覆盖率上升为 30%,城市生态修复取得显著成果[18]。考虑到城市总体规划发展的要求以及徐州市主要矿区生态修复工程空间分布,本文划定研究范围为徐州市区(图 1),具体为云龙区、鼓楼区、泉山区、贾汪区及铜山区,面积约 3 062 km²,总人口 344.25 万人。

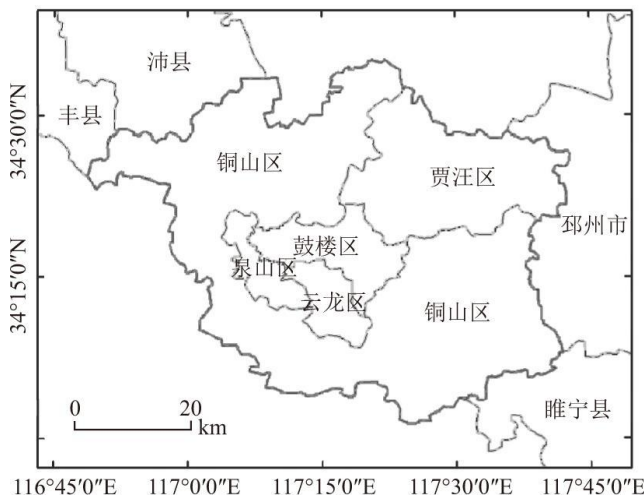


图 1 研究区地理位置及行政区划示意图

注：基于江苏省自然资源厅标准地图服务下载的的审图号为苏 S(2021)024 号的标准地图制作，底图无修改。

1.2 数据来源

根据徐州市生态转型发展历程[18],以 2000、2010、2020 年为时间节点,以 LandsatTM/OLI 影像(<http://www.gscloud.cn>, 行列号为 121/36、122/36)为基准提取 3 期徐州城市绿色空间信息。选取 6~9 月的夏季且云量较低的影像。由于研究涉及两景遥感影像,因此影像成像间隔不超过一个月为宜。(1)矢量数据为全国地理信息系统资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)1:100 万全国基础地理数据库;(2)30 m 分辨率 DEM 数据源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);(3)降水量数据为国家青藏高原科学数据中心中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集[19];土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD);(4)文本及统计资料(2000~2021 年)来源于江苏省及徐州市官方网站。

2 研究方法

2.1 分类方法

城市绿色空间目前尚无统一的分类体系,学者们主要从城市用地分类、绿色空间构成要素、土地利用分类及植被覆盖度等 4 方面构建城市绿色空间分类体系[12,13]。基于对城市绿色空间的概念内涵界定,综合考虑研究目的、研究区用地类型现状及所采用遥感影像数据的空间分辨率限制,本文采用基于土地利用/覆盖的城市绿色空间分类体系。即将徐州城市空间划分为绿色空间与非绿色空间,其中绿色空间包括林地、耕地、草地和水域;非绿色空间包括建设空间及其他。由于研究区未利用地面积较小,因此将其归于“建设用地及其他”,定义为非绿色空间。利用 ENVI 对遥感影像进行预处理后采用监督分类中神经网络分类法生成徐州城市绿色空间分类图(图 2)。经检验分类总体精度均大于 90%,满足本研究需求。

2.2 城市绿色空间格局演变研究方法

景观格局指数法通过研究城市扩张导致的绿色空间组分、结构和空间分布的变化情况,是城市绿色空间格局量化研究方法之一。基于绿色空间分类结果,使用 Fragstats 4.3 软件,采用标准法,从斑块类型水平指数(Class metrics)和景观水平指数(Landscape metrics)两个层次上选取具有代表性的、能反映城市景观格局演变及绿色空间斑块单元的景观格局指数进行分析,用 ArcGIS 软件对研究区景观格局演变进行分析。在斑块类型水平上选取斑块数(NP)、斑块密度(PD)、分维数(PAFRAC)、最大斑块指数(LPI)、斑块所占景观面积比例(PLAND)5 种景观格局指数;在景观水平上选取斑块数(NP)、斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、聚集度指数(CONTAG)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)6 种景观格局指数。

2.3 生态系统服务评估方法与模型

(1)食物供给量评估

食物供给是城市生态系统重要的供给服务之一,是人类生存和发展的基本条件。本文食物供给主要分为粮食、油料、蔬菜瓜果、肉类、奶类及水产品 6 大类。采用刘立程提出结合土地利用数据及 NDVI(归一化植被指数)数据,将 6 大类产量按照栅格 NDVI 值与耕地、林地、草地及水域总 NDVI 值的比值分配,定量表示徐州城市绿色空间的食物供给能力[20,21]。计算公式如下:

$$F = G_{sum} \times \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \quad (1)$$

式中：F 为各类食物供给量(t/hm^2);Gsum 为徐州市粮食、肉类和水产等各类食物供给的总产量(t);NDVI_i 为耕地、草地和水域等绿色空间类型栅格的 NDVI 值；NDVI_{sum} 则为徐州城市绿色空间 NDVI 值之和。

(2)碳储量评估

采取 InVEST 模型中的碳储存模块是将植被的地上、地下、枯落物和土壤碳储量相加计算区域碳储量[22]。

(3)土壤保持量评估

InVEST 模型中土壤保持模块采用通用土壤流失方程进行区域土壤保持量评估，是基于土地利用方式分别计算栅格单元潜在土壤流失量和现实土壤流失量，二者的差值即为土壤保持量[23,24]。

(4)生境质量评估

InVEST 模型生境模块是通过建立土地利用/土地覆被与威胁因子之间的联系，考虑威胁因子的影响距离、空间权重及土地受法律保护程度等因素，计算生境退化程度和生境质量。生境质量指数取值范围为 0~1,越接近 1,表示地块生态系统结构稳定，生境质量越好[25,26]。

2.4 权衡与协同关系分析

(1)相关性分析

选取相关分析探究不同生态系统服务之间的权衡协同关系[27],对 2000~2020 年研究区 4 种生态系统服务评估值进行随机点采样[28],设置 3 000 个采样点，进而分析各生态系统服务间的相关性。若相关系数为正，且在 5%的置信水平上为显著，即为相互增益的协同关系，若相关系数为负且显著，则为此消彼长的权衡关系。

(2)热点区域识别

通常而言，同一生态系统可提供不同的服务，但其提供各种服务的能力不相同。为进一步探究不同区域生态系统服务供给能力的强弱，识别各生态系统服务热点区域，并进行空间叠置。热点区即为该区域大于生态系统服务均值，I、II、III、IV 类热点区分别指该区域分别有 1、2、3、4 项生态系统服务大于均值，而非热点区则是该区域的生态系统服务均小于均值[29,30]。

3 结果分析

3.1 徐州城市绿色空间变化

2000~2020 年徐州城市绿色空间面积占总面积比重始终大于 70%(表 1),耕地始终为主要绿色空间类型，林地为主要次要类型。研究期内徐州城市绿色空间持续减少 326.09 km^2 ,占总面积比重下降 12.90%。其中，耕地面积变化幅度最大，共减少 260.99 km^2 ,其次为林地、水域，三者占总面积比重分别下降 8.52%、0.81%、0.92%;草地面积变化幅度较小。非绿色空间面积则持续增长 326.08 km^2 ,比重提升 10.64%。

2000~2020 年，在城市化进程与生态转型双重作用下，绿色空间与非绿色空间之间转移显著(表 2、图 3)。绿色空间共转出 486.38 km^2 ,共有 404.40 km^2 耕地转移为非绿色空间，空间上集中在城市建成区周围，特别是城区东北部及东南部。徐州自古有背山阻水的空间格局，加之受到近年城市西南部采煤塌陷区影响使得城市向西发展受阻，建设用地向东、东南方向扩展。同时，

贾汪区快速城镇化伴随着剧烈的人类活动，对城市生态环境和植被产生巨大影响，也推动绿色空间向非绿色空间转移。非绿色空间转为绿色空间的共有 160.30 km²，分别有 129.40 km² 转为耕地，23.58 km² 转入林地，转为水域及草地的面积分别为 6.55、0.77 km²。主要分布在市区内、贾汪区建成区内及农村居民点周围。徐州经过近 20 年生态城市建设，积极开展废弃矿区生态修复，其面临的资源枯竭及自然生态系统严重破坏等问题得到有效解决，空间绿化取得显著成效，人居环境质量持续提升。实现了从“一城煤灰半城土”到“一城青山半城湖”的转变，城市生态修复与绿色转型成果显著，成为资源型城市再生典范。

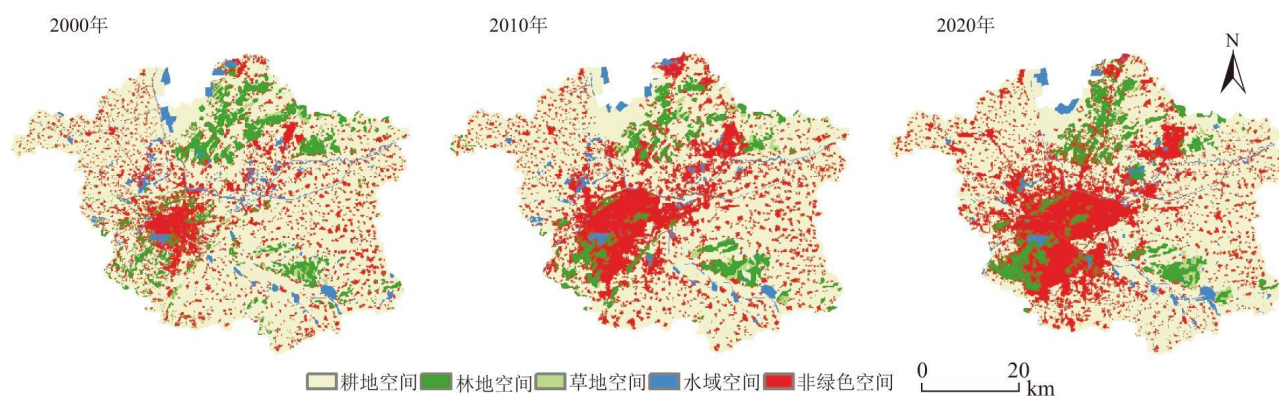


图 2 2000~2020 年徐州城市绿色空间分类图

表 1 各类型用地面积变化情况

类型	2000		2010		2020		2000~2010	2010~2020	2000~2020
	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积变化 (km ²)	面积变化 (km ²)	面积变化 (km ²)
林地空间	282.55	9.23	221.79	7.24	257.88	8.42	-60.76	36.09	-24.67
耕地空间	2081.54	67.97	1919.51	62.68	1820.56	59.45	-162.03	-98.95	-260.99
草地空间	36.48	1.19	33.73	1.1	24.35	0.79	-2.75	-9.38	-12.13
	126.78	4.14	100.74	3.29	98.49	3.22	-26.04	-2.25	-28.29

水域空间									
绿色空间	2 527.36	82.52	2 275.77	74.31	2 201.27	71.88	-251.59	-74.50	-326.09
非绿色空间	535.23	17.48	786.82	25.69	861.31	28.12	251.59	74.49	326.08

表 2 2000~2020 年徐州城市绿色空间转移矩阵(km²)

	类型	2020 年					
		耕地空间	林地空间	草地空间	水域空间	非绿色空间	总计
2000 年	耕地空间	1 552.95	73.49	12.23	38.39	404.40	2 081.47
	林地空间	76.31	145.14	9.42	1.85	49.83	282.55
	草地空间	15.18	11.26	1.65	0.24	8.15	36.48
	水域空间	46.71	4.22	0.30	51.54	23.99	126.78
	非绿色空间	129.40	23.58	0.77	6.55	374.93	535.23
	总计	1 820.56	257.70	24.37	98.58	861.31	3 062.51

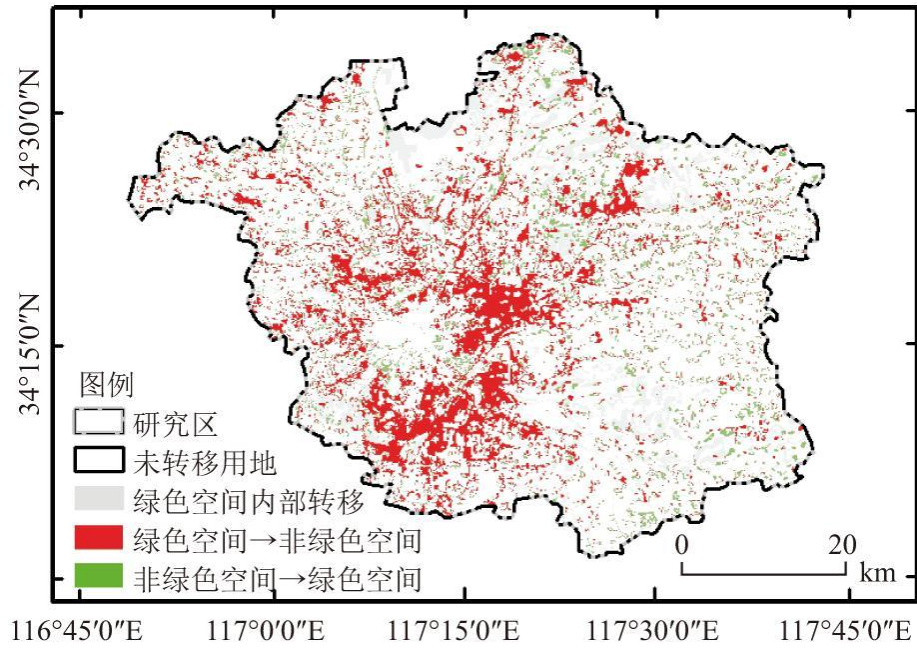


图3 2000~2020年研究区空间转移图

3.2 徐州城市绿色空间格局演变

2000、2010、2020年徐州城市空间整体景观格局指数变化情况不尽相同(表3)。总体上,景观斑块数(NP)、斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)呈现先下降后上升的变化趋势,说明人为活动对绿色空间的干扰在2000~2010年间有所降低,在2010~2020年间则有所上升,但整体上人为活动干扰减轻,景观破碎化状况有一定缓解。聚集度指数变化幅度较小,均在50%以上,呈先上升后下降的变化趋势,表明绿色空间景观具有较好的景观连通性。香农多样性指数与香农均匀度指数呈上升趋势,主要是由于城市绿色空间规模减小,而非绿色空间规模相应增加,加强了绿色空间景观各类斑块组分的相对平衡状态,从而导致景观多样性增加和均匀度上升。

2000~2020年,各类型绿色空间景观的斑块数量(NP)与斑块密度(PD)均发生显著变化(表4)。其中,林地、水域景观的斑块数量与斑块密度呈现出先降低后增加的状态,经历了由分散-集中-分散的变化过程。2010年徐州市首先以创建国家生态园林城市为目标,加快生态转型之路,城市生态修复全方位开展,因此2020年时林地斑块数量增加,斑块密度也随之提高。城市绿色空间斑块占景观面积比例(PLAND)逐渐降低,非绿色空间比例则不断上升,主要是由于徐州市处于城市化快速发展、人类活动对自然生态系统破坏加速阶段,非绿色空间面积增加,但2010~2020年间其扩展速度变缓。绿色空间各类型景观PRAFC均未超过1.5,表明其产生的边缘效应并不强,耕地、草地及水域景观受人类活动干预程度逐渐增加,斑块形状趋于复杂化,但林地受人类干扰逐步减少,植被保护与修复初见成效。耕地LPI值始终为最高,说明耕地内部连接程度相对较高,景观较集中。2000~2010年,耕地、林地与水域LPI值均下降,草地LPI值增加,非绿色空间LPI值上升;而2010~2020年,绿色空间LPI值变化表现出与上一时段迥然不同的情况。主要是由于前期徐州处于城市生态转型初期,虽在城市空间治理、土地集约利用及废弃地生态修复等方面取得一定进展,但大规模转型及生态整治是在2010年后,生态修复效果才逐渐明显。

表 3 徐州城市绿色空间整体景观格局指数变化

	斑块数 (NP)	斑块密度 (PD)	景观形状指数 (LSI)	聚集度指数 (CONTAG)	香农多样性指数 (SHDI)	香农均匀度指数 (SHEI)
2000	3 856	0.745 5	34.447 9	57.750 1	1.505 9	0.773 9
2010	2 134	0.412 7	28.451 9	57.897 3	1.520 5	0.781 4
2020	2 638	0.510 3	32.077 7	57.175 6	1.536 1	0.789 4

表 4 徐州城市绿色空间类型景观格局指数变化

年份	类型	斑块数 (NP)	斑块密度 (PD)	斑块所占景观面积比例 (PLAND)	周长面积分维数 PAFRAC	最大斑块指数 (LPI)
2000	林地空间	581	0.112 3	5.463 3	1.342 7	0.913 4
	耕地空间	422	0.081 6	40.204 1	1.324 5	37.615
	草地空间	103	0.019 9	0.705 5	1.262	0.088 9
	水域空间	519	0.100 3	2.449 3	1.283 7	0.371 9
	非绿色空间	2 217	0.428 6	10.348 9	1.261 5	2.182 7

2010	林地空间	180	0.034 8	4.268 5	1.254 4	0.365 5
	耕地空间	374	0.072 3	37.122 4	1.302 9	18.644 7
	草地空间	28	0.005 4	0.652 2	1.26	0.110 3
	水域空间	375	0.072 5	1.946 5	1.323 2	0.18
	非绿色空间	1 158	0.224	15.217 5	1.326 1	5.527 4
2020	林地空间	350	0.067 7	4.987 1	1.324 3	0.758 1
	耕地空间	303	0.058 6	35.204 6	1.387 3	23.436 2
	草地空间	20	0.003 9	0.470 7	1.361 2	0.102 8
	水域空间	404	0.078 1	1.906 4	1.434 8	0.211 6
	非绿色空间	1 506	0.291 3	16.665 4	1.405 7	8.549 5

3.3 生态系统服务时空变化

随着徐州市绿色空间格局变化，以食物供给量、碳储量、土壤保持总量和生境质量为表征的城市生态系统服务也随之变化(图 4、图 5)。2000、2010 和 2020 年徐州市绿色空间食物供给量分别为 1.34×10^6 、 4.27×10^6 和 5.18×10^6 t，单位面积食物供给量由 437.86 t/km^2 提升到 1693.02 t/km^2 ，食物供给能力不断提升。研究区西北部及东南部耕地空间水热条件好且面积较大，单位面积食物供给量较高；中部非绿色空间随城市扩张而增长，使得食物供给量较低的区域面积亦不断增加。然而随着农业技

术进步、农业机械化水平提高，单位面积食物供给量始终处于不断增加的状态，食物供给总量也持续增长。

在碳储存方面，2000、2010 和 2020 年徐州城市绿色空间碳储量分别为 3.208×10^8 、 2.861×10^8 、 2.807×10^8 t，碳储量持续降低，但下降幅度有所减缓。耕地空间碳储量始终最高，占绿色空间碳储量比例均达到 75%以上，其次为林地、水域。林地碳储量为先降后升的变化态势，耕地、草地及水域碳储量均呈持续下降趋势。2000~2020 年，研究区内林地或林地周边碳储量提升明显，特别是市区内部及西南部最为突出，说明城区绿化建设取得一定成效。同时贾汪区潘安湖湿地公园碳储量提升显著，也表明矿区生态修复取得良好效果。碳储量降低区主要分布于研究区北部林地区域和贾汪区城镇建成区。

在土壤保持方面，2000、2010 和 2020 年徐州城市绿色空间土壤保持总量分别为 4.47×10^6 、 3.88×10^6 、 7.15×10^6 t，绿色空间土壤保持总量增加，水土保持能力提升。近 10 年来林地面积增加，各类型绿色空间土壤保持力提升，使得土壤保持总量增加，表明绿色空间格局变化在一定程度上提升了城市水土保持能力。研究区东北部、西南部及东南部林地丘陵区土壤保持量较高(500 t/km^2 以上),该区域采取植物措施与工程措施、坡面与河谷沟道等相结合的治理方法[31]减少丘陵区水土流失，取得一定成效。耕地空间及非绿色空间区域土壤保持量较低，徐州市水系众多，年降水量大，土壤侵蚀主要以水力侵蚀为主，在降雨冲刷下易造成水土流失。

在生境质量方面，2000、2010 和 2020 年生境质量分别为 0.389、0.338、0.335,处于不断降低趋势，但近年来随着城市生态建设的推进，绿色空间面积增加，生境质量降低趋势有所减缓。各类型绿色空间生境质量指数均值从高到低依次为：林地>水域>草地>耕地。研究期内林地、草地及水域生境质量指数均值呈现持续降低的变化趋势，耕地则为先降后升的状态。生境质量空间分布大致呈“四周高、中间低”的格局，研究期内 65%以上区域生境质量无明显变化。徐州市区城市扩展主要方向的东北部及东南部生境质量降低，是由于非绿色空间面积迅速增加，导致该区域生境质量降低。而市区西南部及贾汪区采煤塌陷区生境质量提升明显，一方面源于城区绿化建设，另一方面则是采煤塌陷区生态修复，使得生境质量明显提升。

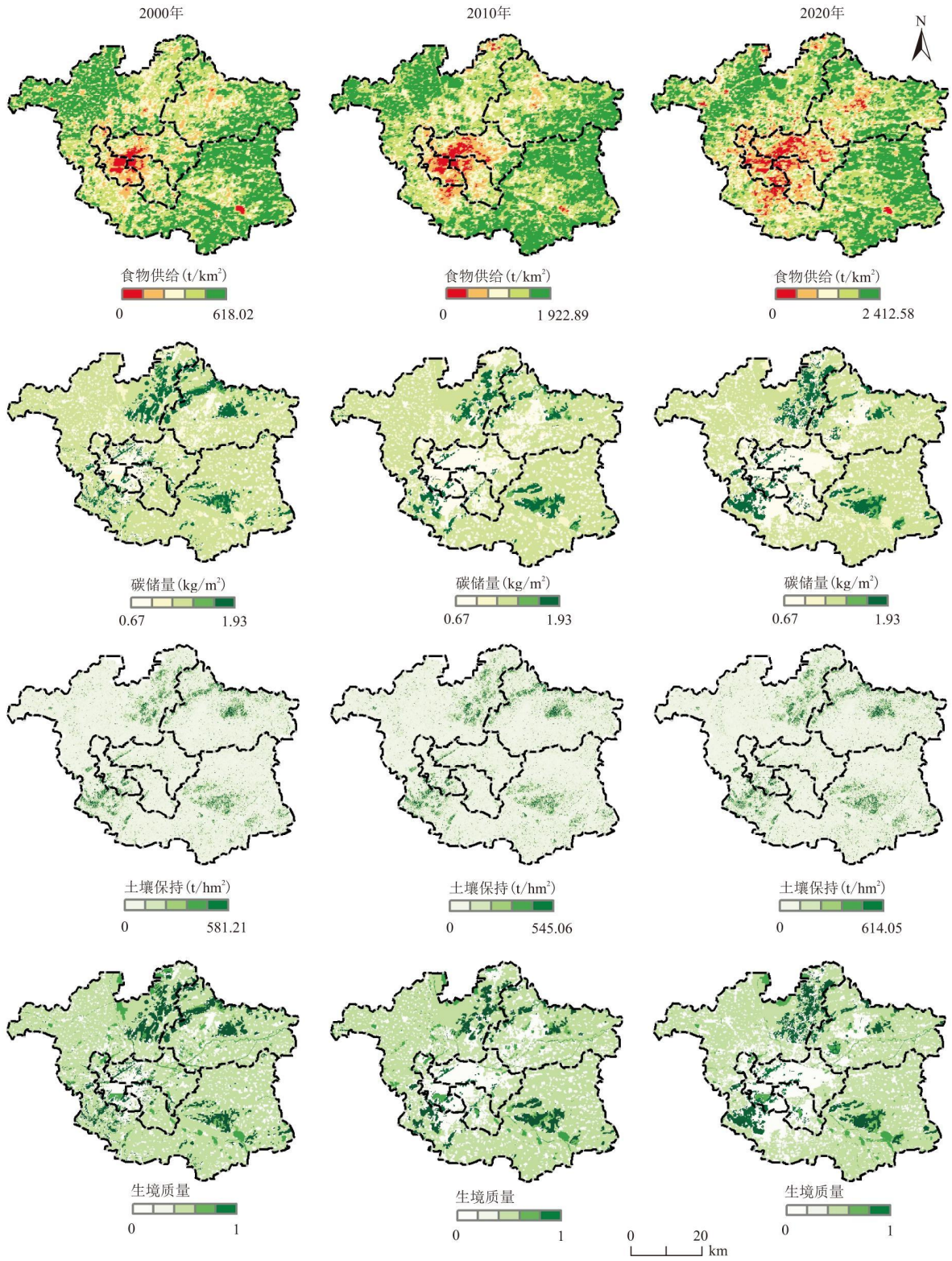


图 4 研究区生态系统服务时空分布图

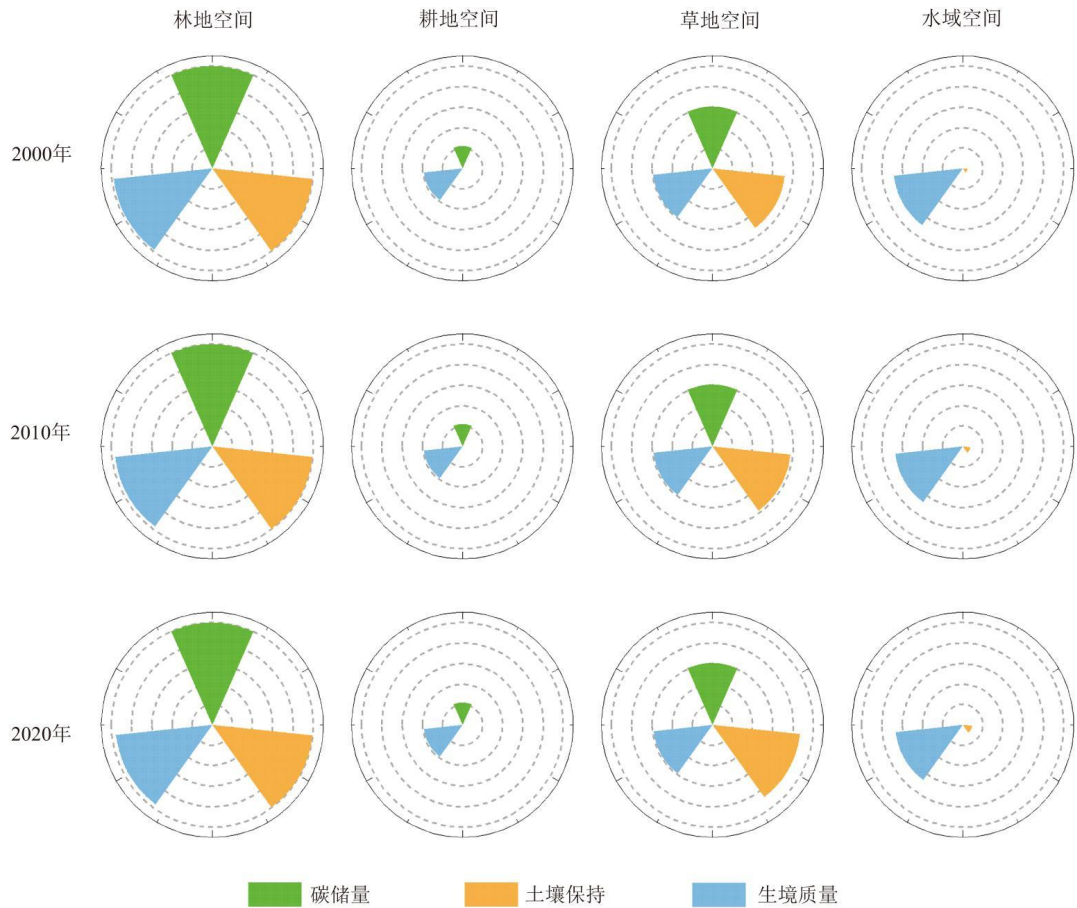


图 5 不同类型绿色空间生态系统服务玫瑰图

3.4 生态系统服务权衡协同度

(1) 生态系统服务相关性分析

2000~2020年,食物供给与碳储存、土壤保持及生境质量之间呈现显著负相关,为权衡关系,且权衡关系随时间不断增强(表5)。碳储存、土壤保持与生境质量之间为显著正相关,表现为协同关系,其中碳储存与生境质量相关系数绝对值均在0.9左右,两者协同关系较强,碳储量的增加会使得生境质量提高。即供给服务(食物供给)与调节服务(碳储存、土壤保持),供给服务与支持服务(生境质量)之间存在此消彼长的权衡关系,调节服务(碳储存、土壤保持)和支持服务(生境质量)之间是相互增益的协同关系。因此,当前城市生态修复与转型应协调平衡城市供给服务与调节服务、支持服务的权衡关系,提升生态系统服务。

表 5 2000~2020 年徐州市生态系统服务相关性

生态系统服务	食物供给			碳储存			土壤保持			生境质量		
	2000	2010	2020	2000	2010	2020	2000	2010	2020	2000	2010	2020
食物供给	1	1	1	-0.099**	-0.248**	-0.347**	-0.070**	-0.032	-0.014	-0.082**	-0.255**	-0.377**
碳储存	—	—	—	1	1	1	0.252**	0.187**	0.169**	0.905**	0.920**	0.930**
土壤保持	—	—	—	—	—	—	1	1	1	0.208**	0.150**	0.136**
生境质量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	1

注: **在 0.01 级别(双尾),相关性显著(2)热点区识别.

2000~2020 年研究区生态系统服务热点区空间分布变化较为显著(图 6)。总的来看,研究区早期主要以 I 类热点区为主,即大部分区域仅有一种生态系统服务高于均值,说明该时期生态系统服务水平较低;后期则是 III 类热点区为主,表明大部分区域有 3 种生态系统服务高于均值,生态系统服务水平有所提高。其中 IV 类热点区主要分布于林地空间,且研究期内面积不断增加,占总面积比重由 1.35% 提升到 15.77%; III 类热点区由早期主要分布于草地空间迅速扩展到耕地空间,到 2020 年时占比提升到 43.22%,在一定程度上表明研究区生态系统服务水平提升;而 I、II 类热点区面积则逐渐减少,占比分别减少了 32.44%、14.38%。非热点区主要分布在非绿色空间,且随着非绿色空间面积增长而增加,该区域生态系统服务均低于均值。因此,针对该区域应

控制建设用地扩张，提高土地集约利用效率，加快生态城市建设，实现城市绿色发展。

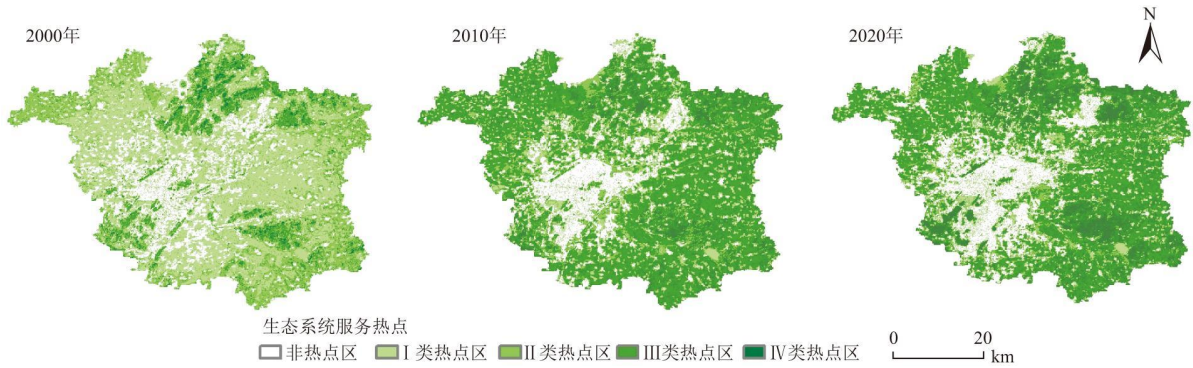


图 6 2000~2020 年研究区生态系统服务热点区空间分布

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)2000~2020 年徐州市绿色空间面积占研究区总面积比重较大，但呈逐渐递减趋势。徐州市近 20 年生态城市建设及废弃矿区生态修复使得中心城区内、贾汪区建成区内的部分非绿色空间转为绿色空间，但城市化进程亦推动大量绿色空间转化为非绿色空间。城市绿色空间景观破碎化状况有一定缓解，景观形态逐渐规整且具有较好的景观连通性。

(2)2000~2020 年，研究区城市绿色空间格局变化，使得徐州市绿色空间食物供给量不断增加，土壤保持量呈现先降后升的波动状态，而碳储量与生境质量呈逐年下降。从空间格局看，生态系统服务水平在空间上呈“四周高、中间低”格局，即四周绿色空间生态系统服务高于中部的非绿色空间。

(3)徐州市生态系统供给服务(食物供给)与调节服务(碳储存、土壤保持)、供给服务和支撑服务(生境质量)之间存在此消彼长的权衡关系，其中调节服务和支撑服务之间(生境质量)为相互增益的协同关系。在可持续发展战略背景下，矿业城市权衡好经济效益和生态效益是实现城市绿色转型的关键。

4.2 讨论

矿业城市由于人类活动扰动、矿产资源开发等导致生态环境受损，遵循“整体保护、系统修复、综合治理”的理念进行生态转型，是新时期国土空间生态修复中不可或缺的重要环节，也是推进国土空间规划的重要手段，更是矿业城市贯彻落实“绿水青山就是金山银山”的生动体现。矿业城市生态转型是由传统粗放发展模式转变为符合生态学原理及规律的发展方式[18],而矿业废弃地再利用为绿色空间是矿业城市实现转型与可持续发展的重要途径之一[32],由废弃地重点修复逐渐过渡到城市整体生态系统结构稳定性提升。研究发现，随着徐州市近年生态文明建设的开展及生态修复工程的推进，大量采煤塌陷区由非绿色空间转为绿色空间，在绿色空间格局变化影响下，徐州市食物供给量和土壤保持量提升，碳储量和生境质量降低但降低趋势减缓。2010 年后徐州市加快生态转型之路，城市生态修复全方位展开，因此到 2010~2020 年间林地面积增加且非绿色空间面积增速放缓。前人研究证实，铜山区与贾汪区植被逐渐增加，生态环境有所改善[33],徐州生态系统服务水平也有所提升[34]。但徐州近 20 年城市化进程也不断加快，建设用地向东、东南方向扩展，侵占林地与耕地空间，同时，贾汪区推动城镇化建设，使得建成区周围特别是城区东北部及东南部的绿色空间转为非绿色空间，亦与前人研究结果相符[35]。

在国土空间生态修复大背景下，矿业城市应从自身实际出发，制定科学合理的城市绿色空间规划，并坚决贯彻落实。严控

城市非绿色空间侵占耕地与林地空间等绿色空间，增强对非绿色空间的用途管制，提高土地集约利用效率，重点关注矿业城市林区建设，优化城市绿色空间格局。进一步强化城市废弃矿区生态修复，将采煤塌陷区修复列为城市绿色空间打造的重点，深度发掘采煤塌陷地所蕴含的生态效益。力争做到城市绿色空间合理配置，提高城市生态系统服务水平，为城市居民提供优质的城市生态环境，实现矿业城市绿色可持续发展。但本文亦存在如下不足：(1)仅选取景观格局指数法对绿色空间格局特征进行了分析，未在空间上表达景观格局的变化，而空间变化可进一步探究城市绿色空间格局优化，是后续应关注的方面。(2)城市绿色空间生态系统服务评估不够全面，且存在部分数据获取困难且缺失与模型局限性等问题，使得评估结果产生一定偏差，在后续研究中有待进一步完善。此外，矿业城市生态系统复杂，其绿色空间格局演变及生态系统服务的驱动机制研究也应得到关注。

参考文献:

[1]杨振山,张慧,丁悦,等.城市绿色空间研究内容与展望[J].地理科学进展,2015,34(1):18-29.YANG Z S, ZHANG H, DING Y, et al. Progress and prospect on urban green space research [J]. Progress in Geography, 2015, 34(1): 18-29.

[2]成超男,胡杨,赵鸣.城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望[J].地理科学进展,2020,39(10):1770-1782.CHENG C N, HU Y, ZHAO M. Progress and prospect of the spatiotemporal change and ecosystem services evaluation of urban green space pattern [J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1770-1782.

[3]陶宇,李锋,王如松,等.城市绿色空间格局的量化方法研究进展[J].生态学报,2013,33(8):2330-2342.TAO Y, LI F, WANG RS, et al. Research progress in the quantitative methods of urban green space patterns [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2330-2342.

[4]胡庭浩.黄淮东部地区煤炭资源型城市绿色基础设施构建研究——以徐州为例[D].徐州:中国矿业大学,2020.HU T H. Research on green infrastructure construction of coal resource - based cities in eastern Huang - Huai region [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[5] FELLETT G, MARCHIOLL, DELLE VEDOVE G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation [J]. Chemosphere, 2011, 83(9): 1262 - 1267.

[6]周涛发,张鑫,袁峰,等.矿山城市矿产资源利用的环境负效应及其防治[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2004,27(3):225-228.ZHOU T F, ZHANG X, YUAN F, et al. Negative effects of exploiting mineral resources in mining cities in Anhui Province and the prevention tactics [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2004, 27(3): 225-228.

[7]顾康康,刘景双,陈昕,等.矿业城市生态承载力动态分析[J].自然资源学报,2008,23(5):841-848.GU K K, LIU J S, CHEN X, et al. Dynamic analysis of ecological carrying capacity of a mining city [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 841-848.

[8]王回茵,李汉廷,谢苗苗,等.资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建[J].自然资源学报,2020,35(1):162-173.WANG H H, LI H T, XIE M M, et al. Construction of ecological security pattern for systematic restoration of industrial and mining land in resource-based cities [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 162-173.

[9] MISIUNE I, JULIAN J P, VETEIKIS D. Pull and push factors for use of urban green spaces and priorities for their ecosystem services: Case study of Vilnius, Lithuania [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 58: 126899-

[10] DERKZEN M L, VAN TEEFFELLEN AJA, VERBURG P H. REVIEW: Quantifying urban ecosystem services based on high-

resolution data of urban green space: An assessment for Rotterdam, the Netherlands [J] . Journal of Applied Ecology, 2015, 52(4) : 1020-1032.

[11] SONG P , KIM G , MAYER A, et al. Assessing the ecosystem services of various types of urban green spaces based on i - tree eco[J] . Sustainability, 2020, 12(4) : 1630.

[12] 张彪, 徐洁, 谢高地, 等.2000—2010年北京城市绿色空间格局动态分析[J].生态科学, 2016, 35(6): 24-33.

ZHANG B, XU J, XIE G D , et al. Analysis on the pattern changes of urban green space in Beijing from 2000 to 2010[J]. Ecological Science, 2016 , 35 (6) : 24-33.

[13] 支林蛟, 王锦, 刘敏, 等.滇中城市群绿色空间格局动态变化多尺度研究[J].西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(5) : 88-97.ZHI L J, WANG J, LIU M, et al. Multi- scale dynamic change of green spatial pattern of urban agglomeration in central Yunnan [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences) , 2021, 41(5) : 88-97.

[14] 刘庆, 李伟, 陆兆华.基于遥感与GIS的黄河三角洲绿色空间生态服务价值评估[J].生态环境学报, 2010, 19(8) : 1838-1843.LIU Q, LI W, LU Z H. Ecosystem services value assessment of green space in the Yellow River Delta based on RS and GIS[J] . Ecology and Environmental Sciences, 2010 , 19 (8) : 1838 -1843.

[15] 王丽容, 冯晓蕾, 常青, 等.基于InVEST-MCR复合模型的城市绿色空间生境网络格局构建研究[] .中国园林, 2020, 36(6) : 113-118.WANG L R, FENG X L, CHANG Q, et al. Pattern construction of habitat network for urban green space based on the compound model of InVEST and MCR[J] . Chinese Landscape Architecture ,2020, 36(6) : 113-118.

[16] 陈燕红, 蔡莞滨, 全川.基于遥感的城市绿色空间演化过程的温度效应研究——以福州主城区为例[J].生态学报, 2020, 40(7) : 2439-2449.CHEN Y H, CAI Y B, TONG C. Temperature effect under the green space evolution based on remote sensing: A case study of Fuzhou , China [J] . Acta Ecologica Sinica, 2020 , 40 (7) : 2439-2449.

[17] 李凯, 沈雯, 黄宗胜.城市绿色空间生态系统文化服务绩效评价——以贵阳市黔灵山公园为例[J].城市问题, 2019(3) : 44-50.LI K, SHEN W, HUANG Z S. Performance evaluation of culture ecosystem services of urban green space: A case study on Qianlingshan Park of Guiyang City[J] . Urban Problems, 2019 (3) : 44-50.

[18] 冯姗姗, 罗萍嘉.面向空间规划体系变革的资源型城市生态转型规划策略研究——以徐州市为例[J].上海城市规划, 2020(1) : 55-60.FENG S S , LUO P J. Planning strategies of ecological transformation of resource-based cities oriented to spatial planning system reform: A case study of Xuzhou [J] . Shanghai Urban Planning Review, 2020(1) : 55-60.

[19] 彭守璋.中国1km逐月潜在蒸散发数据集(1990-2020) [Z].国家青藏高原科学数据中心.国家青藏高原科学数据中心, 2022.

[20] 刘立程, 刘春芳, 王川, 等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例[J].地理学报, 2019, 74(9) : 1921-1937.LIU L C, LIU C F, WANG C, et al. Supply and demand matching of ecosystem services in loess hilly region: A case study of Lanzhou[J] . Acta Geographica Sinica, 2019 , 74 (9) : 1921 -1937.

[21] 刘立程.兰州市生态系统服务供需关系研究[D].兰州: 西北师范大学, 2020.LIU L C. Study on the relationship between

supply and demand of ecosystem services in Lanzhou[D] . Lanzhou : Northwest Normal University, 2020.

[22] 张云倩, 张晓祥, 陈振杰, 等.基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J].水土保持研究, 2016, 23(3) : 100- 105, 111.ZHANG Y Q, ZHANG X X, CHEN Z J, et al. Research on the spatiotemporal variation of carbon storage in coastal zone ecosystem of Jiangsu based on InVEST model [J] . Research of Soil and Water Conservation , 2016 , 23 (3) : 100- 105, 111.

[23] 李婷, 刘康, 胡胜, 等.基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价[J].长江流域资源与环境, 2014, 23(9) : 1242-1250.LI T, LIU K, HU S, et al. Soil erosion and ecological benefits evaluation of Qinling Mountains based on the invest model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23 (9) : 1242-1250.

[24] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等.三峡库区重庆段土壤保持服务时空分布格局研究[J].长江流域资源与环境, 2016, 25 (6) : 932-942.LIU R, ZHOU L L, PENG Y, et al. Spatio-temporal variations of soil conservation services in Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(6) : 932-942.

[25] 吴健生, 毛家颖, 林倩, 等.基于生境质量的城市增长边界研究——以长三角地区为例[J].地理科学, 2017, 37 (1) : 28-36.WU J S, MAO J Y, LIN Q, et al. Urban growth boundary based on the evaluation of habitat quality: Taking the Yangtze River Delta as an example [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(1) : 28-36.

[26] 夏盈, 张莹莹, 厉恩华, 等.江汉平原四湖流域生境质量时空演化及预测[J].长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1616-1626.XIA Y, ZHANG Y Y, LI E H, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in four lakes basin of Jianghan plain [J] . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(7) : 1616- 1626.

[27] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等.西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例[J].应用生态学报, 2020, 31(4) : 1278- 1288.GONG J, LIU D Q, GAO B L, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu, China [J] . Chinese Journal of Applied Ecology, 2020 , 31 (4) : 1278 - 1288.

[28] 张文静, 孙小银, 周俊.南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系[J].生态学报, 2021, 41 (20) : 8003-8015.ZHANG W J, SUN X Y, ZHOU J. Spatio-temporal dynamics of tradeoffs between crucial ecosystem services in Nansihu Lake Basin [J] . Acta Ecologica Sinica, 2021 , 41 (20) : 8003 -8015.

[29] 范逸凡, 王珂, 黄璐.乡村地区生态系统服务权衡与协同关系——以湖州市为例[J].生态学报, 2022, 42 (17) : 6875-6887.FAN Y F, WANG K, HUANG L. Trade - offs and synergies of ecosystem services in rural areas: A case study of Huzhou [J] . Acta Ecologica Sinica, 2022 , 42(17) : 6875 - 6887.

[30] 高艳丽, 李红波, 侯蕊.汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变[J].长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1619-1630.GAO Y L, LI H B, HOU R. Evolution analysis on trade - offs and synergies of ecosystem services in Hanjiang River Basin[J] .Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29 (7) : 1619-1630.

[31] 陈报章, 渠俊峰, 葛梦玉, 等.徐州市水土流失时空变化研究[J].地球信息科学学报, 2018, 20(11) : 1622-1630.CHEN B Z, QU J F, GE M Y, et al. Spatio-temporal analysis on soil erosion over Xuzhou city[J] . Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(11) : 1622-1630.

[32] 郑晓笛, 付泉川, 吴熙.资源衰退型城市“城-棕-绿”空间格局研究——以湖北省黄石市为例[J].风景园林, 2021, 28(2) :

28-33.ZHENG XD, FU Q C, WUX. Spatial pattern of “ city-browngreen" in resource-exhausted cities : A case study of Huangshi city, Hubei Province [J]. Landscape Architecture, 2021 , 28 (2) : 28-33.

[33] 徐嘉慧, 王世东.矿业城市植被覆盖度空间提取及时空分析——以徐州市为例[J].草原与草坪, 2021, 41(3) : 91-98.XU J H, WANG S D. Spatio - temporal analysis of vegetation cover in mining city-a case study of Xuzhou city[J] . Grassland and Turf, 2021 , 41(3) : 91-98.

[34] 汤姚楠, 周伟奇.废弃矿区生态修复的资源再利用价值评估——以徐州为例[J].生态学杂志, 2020, 39 (10): 3430-3441.TANG Y N , ZHOU W Q. Resource reuse valuation of ecological restoration in abandoned mining areas: A case study of Xuzhou City, Jiangsu Province, China[J] . Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10) : 3430-3441.

[35] 郎文靖, 李效顺, 卞正富, 等.徐州市区土地利用格局变化 分析及其空间扩张模拟[J].生态与农村环境学报, 2017, 33(7) : 592-599.LANG W J, LI X S , BIAN Z F, et al. Analysis of changes in land use pattern in Xuzhou city and simulation of its spatial ex-pansion[J] . Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(7) : 592-599.