DOI: 10.5846/stxb202003290741
马世发,劳春华,江海燕.基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟——以粤港澳大湾区为例.生态学报,2021,41(9):3441-3448.
Ma S F, Lao C H, Jiang H Y.Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.Acta Ecologica Sinica,2021,41(9):3441-3448.

基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟
——以粤港澳大湾区为例

马世发[1],劳春华[2,*],江海燕[1]
1 广东工业大学建筑与城市规划学院, 广州 510090
2 广东工业大学管理学院, 广州 510520

摘要:国土空间生态修复分区有助于推动生态修复工作的整体性和系统性。利用国土空间生态安全格局理论进行生态修复分区是一种较为经典的模式,但现有分区技术方案对高强度人类活动导致的土地利用景观变化考虑不足,不能很好的适应城市群尺度国土空间生态安全格局的塑造需求。设计了一种基于情景模拟的国土空间生态修复分区方案,该框架首先通过耦合空间马尔科夫链与元胞自动机模型模拟城镇化发展末期的土地利用景观格局;然后利用"生态源地-生态廊道-生态网络"理论构建国土空间生态安全格局基本骨架;最后根据最小累积阻力模型划分出生态修复关键区、调节区和双修区等类型。粤港澳大湾区案例研究表明:(1)土地利用景观变化对生态修复分区方案影响较大,不同景观格局导致的分区规模差异可达国土空间的 10%左右;(2)国土空间生态修复分区需要充分考虑高强度人类活动对景观格局变化的潜在影响,进而使得生态修复分区政策更有利于国土空间生态安全格局塑造目标的实现。研究构建的国土空间生态修复分区技术方案可进一步深化生态安全格局理论在国土空间规划应用上的认知。

关键词:生态安全格局;生态修复;人地耦合系统;情景模拟;粤港澳大湾区

Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

MA Shifa[1], LAO Chunhua[2,*], JIANG Haiyan[1]
1 *School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510090, *China*
2 *School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510520, *China*

Abstract: Ecological restoration zoning of territorial space could help to promote the integrity and systematicity of ecological restoration work. Using ecological security pattern theory to carry out ecological restoration zoning is a classically technical model, but the existing zoning schemes do not consider the landscape changes of land use caused by high-intensity human activities, which is not conducive to shaping the territorially ecological security pattern at the urban agglomeration scale. To this end, this paper designs a zoning scheme for ecological restoration of territorial space based on scenario simulation, and takes Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area as an example for verification. The framework firstly simulates the land use landscape pattern at the end of urbanization by coupling the spatial Markov chain and the cellular automaton model; then uses the "ecological source-ecological corridor-ecological network" theory to construct the basic framework of territorially ecological security pattern. Finally, the minimum cumulative resistance model of ecological process was used to

基金项目:国家自然科学基金项目(41901311,41901312);广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515011225,2020A1515010677)
收稿日期:2020-03-29; **网络出版日期**:2021-03-08
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chanverlao@gdut.edu.cn

identify the key areas of ecological restoration, ecological regulation and double repair. The research shows that: (1) patterns of land use change has a greater impact on the scheme of ecological restoration zoning, and the difference in the size of the zoning area caused by different landscape patterns can be up to about 10% of the territorial space. (2) The potential impact on the pattern change due to the human activities should be well considered for the ecological restoration zoning, which in turn makes the ecological restoration policy more conducive to regulating the ecological security pattern of territorial space. The technical framework planned for ecological restoration of territorial space in this research can further promote the ecological security theory in the application of territorially spatial planning.

Key Words: ecological security pattern; ecological restoration; coupled human and natural systems; scenario simulation; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area (GBA)

自工业革命以来,高强度人类活动产生的影响已经远远超过了地球自然变化本身[1],足以开创“人类世”地质新年代[2]。“人类世”的到来意味着国土空间受人类活动影响的范围越来越广,程度也越来越深[3]。然而,如果不能对发展产生的各种生态环境问题进行修复,则“人类世”也可能会很快终结[4]。生态修复命题由来已久[5],只不过在大开发时期没有受到足够重视[6]。当前,生态修复已成为全球共识[7],也是空间规划领域关注的热点和焦点问题之一[8]。实际上,中国很早就推动了生态修复工作,如 1979 年开展的“三北防护林”建设,1998 年实行的“退耕还林”等等。2012 年以来,对山水林田湖草海生态系统实施整体性和系统性修复已成为新时代国土空间治理的一项重要任务[9-10]。

目前,国际上已形成了一些比较先进的生态修复理论和技术[11],我国在一些典型生态环境要素治理,如矿山废弃[12]、湿地退化[13]、土壤污染[14]、土地沙化[15]等方面也积累了丰富的理论成果和实践经验。然而,聚焦单个点状(如矿山等)或线性(如河流等)的工程型修复易忽视大尺度生态系统与人类活动的耦合集成,生态修复成效可能存在空间不均衡[16-17]。因此,谋划国土空间生态修复分区以统筹协调各类生态修复工程则变得十分重要。只有将生态修复工程“点”和“线”与国土空间生态修复分区政策“面”有机结合和优化调配,才能从根本上推动国土空间山水林田湖草的整体保护、系统修复和综合治理[18-19]。

国土空间生态修复分区本质上是一种空间政策表达,其目的在于维护国土空间生态系统健康和安全,最终实现区域可持续发展[20],即如何布局生态修复取决于国土空间生态安全格局的塑造需求[21]。因此,从生态安全格局构建和实现角度进行国土空间生态修复分区是当前主流技术模式[22-25]。然而,现有研究大多采用现状土地利用景观作为模型输入,尚未考虑高强度人类活动对景观格局变化的潜在影响,难以更好地适应城市群尺度国土空间生态修复的施政需求。为此,以人地系统耦合的国土空间重塑理论为基础[26],采用景观生态学过程耦合与空间集成的科学模式[27],以粤港澳大湾区城市群为案例,论证基于生态安全格局塑造情景模拟的国土空间生态修复分区方案可行性,进一步深化生态安全格局理论在国土空间生态修复分区应用上的认知。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区(简称“大湾区”)由广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆九市和香港、澳门两个特别行政区组成(图 1),陆地总面积约 56000 km^2。2019 年末,区内总人口达 7000 万人,GDP 逾 10 万亿元,是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,也是继美国纽约、旧金山和日本东京湾后的世界第四大湾区,在国家社会经济发展大局中具有十分重要的地位。大湾区作为中国改革开放的前沿阵地,在过去 40 多年里取得了飞速发展,城市群建设规模急剧增长,但也产生了一系列生态环境问题[28]。面向“两个百年”的高质量与高水平发展目标,积极开展生态修复对大湾区可持续发展意义重大。

1.2　数据来源及预处理

研究涉及到的数据主要包括 1995 年和 2015 年大湾区 Landsat 卫星影像,以及数字高程、交通网络和行政区划等地理数据。卫星影像和数字高程数据来自地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/);交通网络则采用 Open Street Map 共享数据(https://www.openstreetmap.org/)。卫星影像按耕地、林草、水域和建设 4 种主要景观类型进行计算机解译和人工目视局部修正,总体分类精度约在 87%左右,满足国土空间景观变化模拟需求。

1.3　研究方法

1.3.1　总体思路与框架

高强度人类活动可迫使区域景观格局发生剧烈变化,直接表现则是建设用地增长迅速和自然生态用地流失严重[29]。因此,模拟城镇化发展可准确把握人类活动边界,有利于设计出更加优化的国土空间生态安全格局,同时也有利于国土空间生态安全格局塑造目标的实现[30]。总体技术框架如图 2 所示:首先,从发展现状(当前城镇化所处阶段)、发展潜力(资源环境承载约束)和发展动力(社会经济发展需求)3 个维度综合分析未来大湾区各个城市建设用地规模[31];然后,在生态红线保护和永久基本农田保护等政策管控约束下利用土地利用变化模型模拟城市群未来空间形态[32];最后,以城市群土地利用变化模拟结果作为景观输入,利用"生态源地-生态廊道-生态网络"模式设计国土空间生态安全格局基本骨架[33],并通过生态阻力模型识别出国土空间生态修复优先度,进而划分出相应的政策区以引导生态工程修复低品质国土空间。

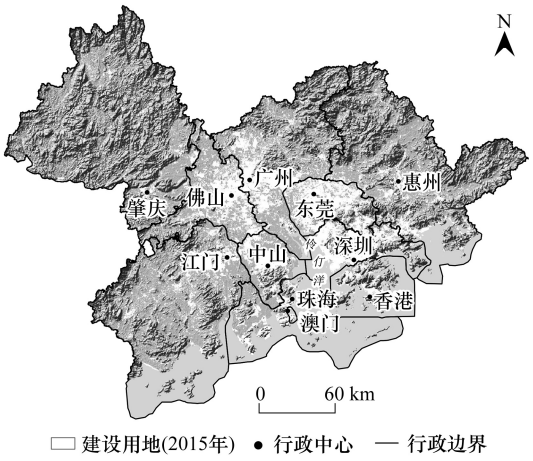

图 1　粤港澳大湾区地形、行政区划及城市群空间格局

Fig.1　Landform, administrative division and urban agglomeration pattern of GBA in 2015

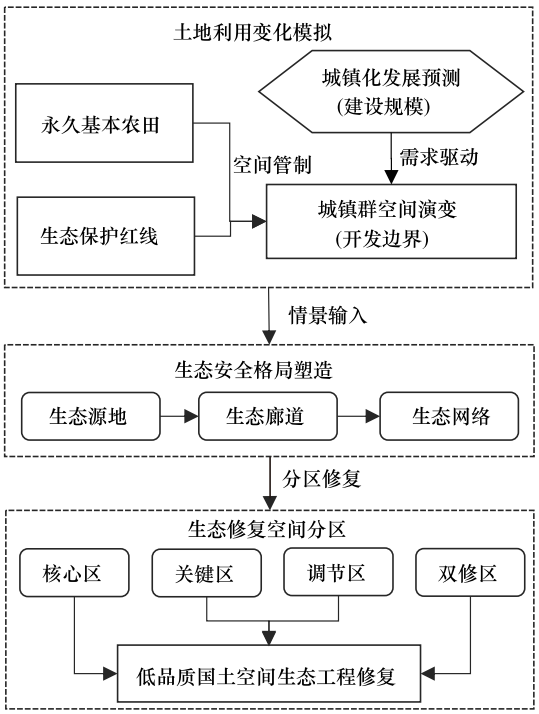

图 2　总体思路与技术框架

Fig.2　Flowchart of ecological restoration zoning

1.3.2　城市群空间演变模拟

城镇化发展是驱动土地利用变化最为核心的动力,也是改变区域景观格局最为直接的人地系统耦合方式[34]。城市群的发展是一种非常复杂的地理过程,需要多模型耦合才能进行有效地模拟[35]。本文拟采用空间马尔科夫链(Spatial Markov Chain, SMC)与地理加权回归元胞自动机(Geographic Weighted Regression based Cellular Automata, GWR-CA)耦合模型模拟大湾区的发展,其原理如下:

$$Q_n^{t+1} = Q_n^t + \alpha \times \beta^{\bar{n}} \times (Q_n^t - Q_n^{t-1}),\ Q_n^{t+1} \leqslant Q_n^{\max} \tag{1}$$

$$U_{nc}^{t+1} = f(Q_n^{t+1},\ S_c, \Omega_c^{\Delta t}, \Psi_c) \tag{2}$$

其中:式(1)为城市群各城市建设用地规模需求预测的 SMC 模型,式(2)为空间格局协同演变模拟的 GWR-CA 模型。Q_n^{t+1} 为 $t+1$ 时刻城市 n 的建设用地规模,其与该城市上一时段的转移量 $Q_n^t - Q_n^{t-1}$ 相关,但城市群还

需考虑群体间的相互作用,即周边城市 $\bar{n}$ 对预测城市 n 的辐射带动效用,辐射系数 $\beta^{\bar{n}}$ 可以根据 $t-1$ 到 t 时刻城市 $\bar{n}(\bar{n} \neq n)$ 的增长规模反距离加权后与城市 n 的增长规模进行比值确定; Q_n^{t+1} 的预测除了考虑自身发展惯性和群体辐射带动外,还需要考虑城镇化发展规律如 S 型城镇化过程的约束,即越接近城镇化末期,城镇增量应越小,即 $\alpha(\alpha \in [0, 1])$ 的取值应越小。例如,深圳、东莞目前已逼近可开发空间极限,后续大规模增长几无可能,但可以将这种增长需求辐射到周边区域加以体现(如深汕合作区、南沙新区等);总体来看,任何城市的发展都不能超过其最大潜力规模 $Q_n^{\max}$,如不得侵占永久基本农田和生态保护红线范围内的区域。U_{nc}^{t+1} 为判断 $t+1$ 时刻城市 n 的空间单元 c 是否被城镇化,其由函数 f 根据一系列作用因子迭代而成; S_c 是空间单元 c 的适宜性,需综合考虑地形地貌、交通状况和离城市中心距离等条件,可以根据历史变化过程用 GWR 模型回归得到; Ω_c^{t+1} 是空间单元 c 在 CA 模型迭代过程中的邻域相互作用(如 Moore 邻域等); Δt 是 CA 模型的迭代时间或次数; Ψ_c 是开发政策限定或激励性条件,如生态保护区域不能被开发,海岸带优先开发等。

1.3.3 生态源地、生态廊道及生态阻力面分析

从空间结构来看,生态源地是维持国土空间生态安全的核心区域,生态廊道则是为促进生态系统物质与能量流动的连通性通道,而生态网络则是“源”和“廊”在空间上的集结。根据国土空间生态安全格局塑造需求,本文将大湾区具有特定生态功能或生态脆弱或生态特殊区域纳入生态源地。具体而言,就是将相对高差达到 100m 的山体和面积大于 1km^{2}的大型水体全部纳入生态源地。然后,将珠江流域各主要干流和支流(如东江流域、北江流域和西江流域等)及其缓冲区(支流 200m,干流 1000m)作为大湾区天然重要生态廊道。

国土空间生态安全格局理论通过点、线、网模式形成基本生态骨架,显然网中的薄弱环节就是推动生态修复的关键所在。根据物种生存基本法则,其在“源”之间迁移一般都会选择生境最适宜的方向扩散,换言之即迁徙阻力最小的方向。因此,越是生态累积阻力越小的区域理应得到优先修复。只有对这些区域优先开展生态修复,才能更好的推动国土空间生态安全格局塑造目标的实现。本研究采用最小累计阻力模型(Minimal Cumulative Resistance,MCR)分析生态网中各个区域的生态阻力[36],并根据阻力大小识别生态修复次序,其原理如下:

$$\mathrm{MCR} = f(\min \sum_s^c D_{cs} \times R_c),\ R_c = K_c \times T_c \tag{3}$$

其中: MCR 为最小累积阻力值; D_{cs} 表示空间单元 $c(c=1,2,\cdots,C)$ 到源 $s(s=1,2,\cdots,S)$ 的距离; R_c 表示空间单元对生态过程扩散的阻力系数,通常为景观类型阻力 K_c 和调节因子 T_c 的合成,如平原耕地和山坡耕地的阻力系数自然不一样; f 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。参考方莹等研究成果[23],将耕地、林草、水域和建设用地景观阻力系数经验值分别设置为 100,0,50 和 1000,再与地理调节因子(如 0-1 标准化的地形起伏度)合成后作为 MCR 模型的景观阻力系数。

2 结果与分析

2.1 城市群空间演变模拟

利用 SMC 预测的大湾区 2050 年城市群规模结构如表 1 所示。从该表可以看出,大湾区今后 35 年的建设用地规模增速最多只与过去 20 年历史时期相当,说明大湾区今后不会再走大规模扩张式道路,但就每个城市而言情况各不相同。例如,东部湾区的深圳、东莞、香港等城市按经典马尔科夫(MC)方案预测开发强度(为开发规模/潜力规模的比值)几乎接近 1,但空间马尔科夫(SMC)用辐射将发展需求传递到其他城市后,其开发强度只维持在 0.9 左右;西部湾区如广州、中山和珠海等海岸带均设有开发区,城市增长规模还有进一步加强的态势,但也只在 0.6 左右,远低于东部湾区的 0.9;边缘城市如惠州、江门、肇庆等尽管空间开发潜力较大,但因社会经济发展需求动力不足,开发强度预期在 0.2 左右。总体来看,空间马尔科夫模型预测结果符合大湾区发展预期,可作为有效参数输入到 GWR-CA 模型。

表 1　大湾区 2050 年建设用地规模

Table 1　Quantity of built-up lands in GBA from 1995 to 2050

城市 Cities	1995 年规模 Area of built-up lands in 1995	2015 年规模 Area of built-up lands in 2015	潜力规模 Maximum area of built-up lands	2050 年规模预测 Area of built-up lands for 2050		2050 年开发强度预测 Development intensity for 2050	
				MC	SMC	MC	SMC
广州	844.38	1668.51	5047.56	2492.64	3035.25	0.49	0.60
深圳	652.32	1084.23	1434.96	1434.96	1291.5	1.00	0.90
珠海	212.85	439.74	1140.75	666.63	640.98	0.58	0.56
佛山	556.92	1305.81	3276.63	2054.7	1851.48	0.63	0.57
惠州	550.71	962.28	6248.16	1373.85	1420.29	0.22	0.23
东莞	593.64	1363.05	2031.93	2031.93	1678.23	1.00	0.83
中山	200.7	554.4	1473.66	908.10	908.10	0.62	0.62
江门	557.28	1013.85	6549.03	1470.42	1494.63	0.22	0.23
肇庆	248.22	573.03	6892.02	897.84	998.73	0.13	0.14
香港	252.09	293.67	442.80	335.25	398.52	0.76	0.90
澳门	14.04	24.12	26.10	26.10	23.49	1.00	0.90
总规模 Total	4683.15	9282.69	34563.6	13692.42	13741.20	0.40	0.40

MC:马尔科夫链 Markov Chain;SMC:空间马尔科夫链 Spatial Markov Chain

利用 GWR-CA 模型模拟得到大湾区 2050 年土地利用景观格局如图 3 所示。从图中可以看出,2050 年大湾区并没有出现整体连片开发情形,反之,各城市之间依然保留了大量的农田和生态用地;新增建设用地主要出现在西部湾区和湾区边缘一些欠发达城市。由于规划目标调控完全可以重构城市已有的空间发展规律(如广州南沙新区开发等),故 CA 常规的模拟一段历史变化过程的精度检验方式必然存在局限性,不能很好地评估 GWR-CA 模型对大湾区 2050 年模拟格局的可信度。鉴于此,主要采用 2019 年现状遥感影并结合当前各市城市总体规划进行定性分析。根据《粤港澳大湾区发展规划纲要》以及各城市的空间发展战略,伶仃洋海岸带沿线是今后大湾区融合发展的热点区域,如深圳前海、东莞长安、广州南沙、中山翠亨、珠海横琴等开发区均环绕分布,本文的模拟结果则很好的体现了这一趋势。此外,随着湾区一体化发展的强势推动,外围边缘城市应是今后城市扩张的热点。例如,肇庆东北部区域当前已经开始大规模基础设施建设,城市道路网骨架基本成型(可参看谷歌地球提供的最新高分辨率影像),而模拟结果也基本吻合这一发展态势。总体来看,大湾区 2050 年土地利用景观变化模拟情景具有较高的可信度,可为国土空间生态安全格局塑造情景模拟提供可靠的景观变化输入。

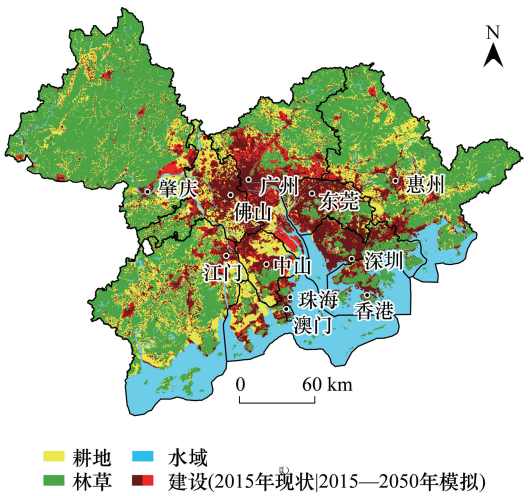

图 3　2015—2050 年大湾区城市群空间格局演变模拟

Fig.3　urban growth simulation of GBA from 2015 to 2050

2.2　国土空间生态修复分区

根据大湾区 2050 年土地利用变化情景,利用 MCR 模型计算得到生态阻力值,然后利用几何间隔法进行初分级,并对分级结果进行人工微调直到每个分区在空间上呈现连片特征。通过定量与定性相结合,最终划分出生态修复核心区、关键区、调节区和双修区等类型(图 4)。其中,核心区主要包括生态源地和生态廊道,是国土空间生态安全网络的基本骨架,其修复应以保护和保育为主,重点实施提质性生态修复工程;关键区则是生态源地之间维持物种生存和迁徙的重点地带。如果该区域内国土空间生态品质较低则应优先修复,修复

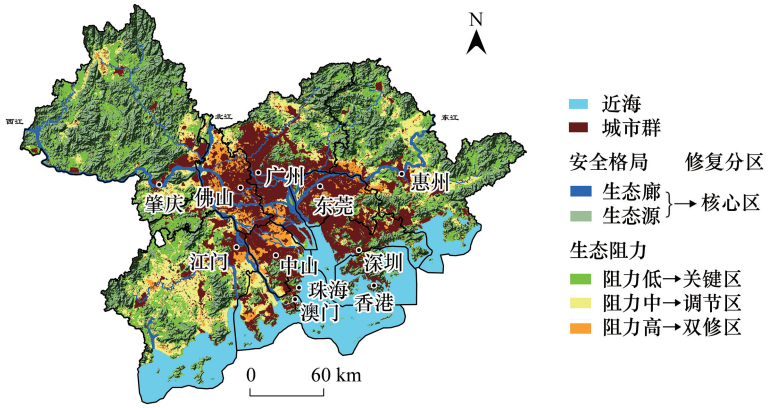

图 4 大湾区国土空间生态修复分区方案

Fig.4 Ecological restoration zoning of GBA

方式以山、水、林、草、海生态复原为主;调节区是城市群与生态源之间的过渡性地带,往往以农业生产为主,可结合农业现代化建设开展综合性整治修复;双修区则是城市群及其发展的前沿地带,宜纳入到城市双修(指生态修复、城市修补)模式中统筹开展。

3 讨论

国土空间生态修复的核心目标是保障生态安全格局塑造目标的实现。因此,以国土空间生态安全格局构建为切入点进行生态修复分区是一种可行的技术方案。国土空间生态安全格局构建通常采用 MCR 模型分析国土空间生态迁移阻力,生态源地之间最小累积阻力形成的连通性通道可以视为潜在的生态廊道,而进一步结合阻力大小可识别出生态修复的优先次序。MCR 模型的核心参数是土地利用景观格局,显然直接根据土地利用现状景观分析最小累积阻力面必然存在一定的局限性,因为高强度人类活动可能会导致土地利用景观发生显著变化。如果依旧采用现状景观作为输入,其构建的生态安全格局在塑造过程中可能易受高强度人类活动扰动而难以实现。为论证土地利用景观变化对生态安全格局塑造的重要性,本文对现状和模拟景观产生的生态阻力面进行了对比。从图 5 可知,不同景观输入产生了不同生态阻力面,高阻力面和低阻阻力面变化最为显著。具体而言,高、中、低生态阻力面积占比分别从 2015 年的 17.43%,20.59%和 61.98%变为 2050 年的 27.43%,21.91 和 50.66%。由此可见,城市群尺度的国土空间生态安全格局塑造必须要考虑高强度人类活动的扰动,利用情景模拟设计具有前瞻性的国土空间生态修复分区方案十分必要。

国土空间生态修复是一个系统性的工程,既要针对关键“点(如矿山等)”和“线(如河流等)”实施工程性修复,又要在国土空间“面”上进行统筹协调。“点-线-面”相结合的生态修复治理体系是科学开展国土空间生态修复的重要策略。本文主要分析了从国土空间生态安全格局塑造情景角度进行生态修复分区的可行性和必要性,但面向国土空间规划应用依然还存在以下几个方面的不足:一是还需要结合低品质国土生态空间问题诊断来验证本文分区方案的合理性,如实际生态修复的“点、线”工程分布是否与分区政策导向相匹配;二是 MCR 模型采用经验系数不能分析精细化的生态阻力面,如何结合多源地理空间大数据探索更加精细化的生态阻力过程还需要进一步探讨。

4 结论

国土空间生态安全格局描绘了一幅优化的生态管控网,科学的界定了高强度人类活动与自然生态保护的空间关系。土地利用变化作为高强度人类活动的直接表现形式,其直接影响着国土空间生态安全格局塑造目

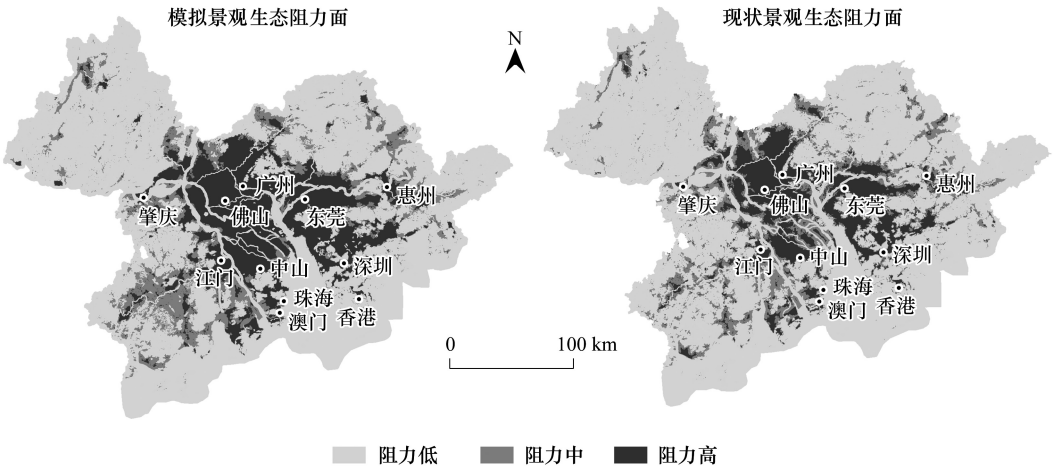

图 5　模拟景观与现状景观生态阻力面比较

Fig.5　Comparison of ecological resistance surface between simulated and current landscape

标的实现。为了弥补传统国土空间生态修复分区对土地利用景观变化考虑的不足,本文提出了一种基于生态安全格局塑造情景模拟的国土空间生态修复分区技术方案,并以粤港澳大湾区城市群为案例进行了应用验证。结果表明:(1)土地利用景观变化对生态修复分区方案影响较大,不同土地利用景观输入导致的分区差异可达国土空间 10%左右;(2)国土空间生态修复分区需要充分考虑高强度人类活动的扰动,进而使得生态修复分区更有利于国土空间生态安全格局塑造目标的实现。

参考文献(References):

[1] Klein Goldewijk K, Beusen A, Van Drecht G, De Vos M. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(1): 73-86.

[2] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene. Nature, 2015, 519(7542): 171-180.

[3] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, Hackmann H, Lee Y T, Mokhele K, Ostrom E, Raivio K, Rockström J, Schellnhuber H J, Whyte A. Earth system science for global sustainability: grand challenges. Science, 2010, 330(6006): 916-917.

[4] Steffen W, Persson Å, Deutsch L, Zalasiewicz J, Williams M, Richardson K, Crumley C, Paul C, Folke C, Gordon L, Molina M, Ramanathan V, Rockström J, Scheffer M, Schellnhuber H J, Svedin U. The Anthropocene: from global change to planetary stewardship. AMBIO, 2011, 40(7): 739.

[5] Jackson L L, Lopoukhine N, Hillyard D. Ecological restoration: a definition and comments. Restoration Ecology, 1995, 3(2): 71-75.

[6] 易行, 白彩全, 梁龙武, 赵子聪, 宋伟轩, 张妍. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展. 自然资源学报, 2020, 35(1): 37-52.

[7] Suding K, Higgs E, Palmer M, Callicott J B, Anderson C B, Baker M, Gutrich J J, Hondula K L, LaFevor M C, Larson B M H, Randall A, Ruhl J B, Schwartz K Z S. Committing to ecological restoration. Science, 2015, 348(6235): 638-640.

[8] 俞孔坚. 基于自然, 让自然做功: 国土空间规划与生态修复之本.景观设计学, 2020, 8(1): 6-9.

[9] 高世昌. 国土空间生态修复的理论与方法. 中国土地, 2018, (12): 40-43.

[10] 白中科, 周伟, 王金满, 赵中秋, 曹银贵, 周妍. 试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理. 中国土地科学, 2019, 33(2): 1-11.

[11] 付战勇, 马一丁, 罗明, 陆兆华. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展. 生态学报, 2019, 39(23): 9008-9021.

[12] 关军洪, 郝培尧, 董丽, 李雄. 矿山废弃地生态修复研究进展. 生态科学, 2017, 36(2): 193-200.

[13] 成玉宁, 袁旸洋, 成实. 人工引导下的湿地公园生态修复. 中国园林, 2014, 30(4): 5-10.

[14] 陈保冬, 赵方杰, 张莘, 伍松林, 乔敏, 欧阳纬莹, 朱永官. 土壤生物与土壤污染研究前沿与展望. 生态学报, 2015, 35(20): 6604-6613.

[15] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析——以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例. 生态学报, 2016, 36(22): 7045-7048.

[16] 王军, 应凌霄, 钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考. 自然资源学报, 2020, 35(1): 26-36.

[17] 朱振肖, 王夏晖, 饶胜, 张箫, 李翠华, 李春红, 李迪华, 牟雪洁. 国土空间生态保护修复分区方法研究——以承德市为例. 环境生态学,

2020, 2(2/3): 1-7.
[18] 成金华, 尤喆. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(2): 1-6.
[19] 罗明, 于恩逸, 周妍, 应凌霄, 王军, 吴钢. 山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略. 生态学报, 2019, 39(23): 8692-8701.
[20] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10.
[21] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
[22] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 李艺博, 李金融. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
[23] 方莹, 王静, 黄隆杨, 翟天林. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203.
[24] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复. 生态学报, 2019, 39(23): 8725-8732.
[25] 王回茴, 李汉廷, 谢苗苗, 许萌, 李少玲, 白中科. 资源型城市工矿用地系统修复的生态安全格局构建. 自然资源学报, 2020, 35(1): 162-173.
[26] 曹小曙. 基于人地耦合系统的国土空间重塑. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2051-2059.
[27] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. 自然资源学报, 2020, 35(1): 3-13.
[28] 甘琳, 陈颖彪, 吴志峰, 千庆兰, 郑子豪. 近 20 年粤港澳大湾区生态敏感性变化. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2453-2462.
[29] 傅伯杰, 刘焱序. 系统认知土地资源的理论与方法. 科学通报, 2019, 64(21): 2172-2179.
[30] 傅伯杰. 土地资源系统认知与国土生态安全格局. 中国土地, 2019, (12): 9-11.
[31] 王亚飞, 樊杰, 周侃. 基于“双评价”集成的国土空间地域功能优化分区. 地理研究, 2019, 38(10): 2415-2429.
[32] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
[33] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175.
[34] Chen G Z, Li X, Liu X P, Chen Y M, Liang X, Leng J Y, Xu X C, Liao W L, Qiu Y A, Wu Q L, Huang K N. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. Nature Communications, 2020, 11(1): 537.
[35] 彭书时, 朴世龙, 于家烁, 刘永稳, 汪涛, 朱高峰, 董金玮, 缪驰远. 地理系统模型研究进展. 地理科学进展, 2018, 37(1): 109-120.
[36] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771-784.