引文格式：张昇永,张一恒,莫浩然,等. 多情景模拟下生态夹点转型与风险预警[J]. 地理空间信息, 2026, 24(6):151-155. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.06.027

多情景模拟下生态夹点转型与风险预警

——以珠海市为例

张昇永[1,2]，张一恒[3,4*]，莫浩然[4]，吴健生[1,2]

（1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室，广东 深圳 518055；
2. 北京大学城市与环境学院地表过程与模拟教育部重点实验室，北京 100871；
3. 澳门城市大学创新设计学院，澳门 999078；4. 珠海市规划设计研究院规划设计分院，广东 珠海 519000）

摘　要：在快速城市化背景下，静态生态安全格局（ecological security pattern，ESP）评估难以满足前瞻性规划需求。本研究以珠海市为例构建“预测-诊断”分析流程，动态识别未来生态修复关键区。采用斑块生成土地利用变化模拟模型（patch-generating land use simulation，PLUS）模拟2050年自然发展（business as usual，BAU）、城市发展（urban development scenario，UDS）和生态保护（rcological protection scenario，EPS）情景的土地利用；结合生态系统服务和权衡的综合评估模型（integrated valuation of dcosystem services and tradeoffs，InVEST）、形态学空间格局分析（morphological spatial pattern analysis，MSPA）和电路理论，诊断生态源地、生态夹点与障碍点的时空演变。结果表明：UDS情景下建设用地扩张致生态源地严重萎缩，夹点大量消失且廊道网络结构退化；BAU情景下夹点发生空间迁移，网络隐性退化；EPS情景下源地格局最稳定。建议对时空稳定的关键节点实施刚性保护，建立动态监测机制，并依据障碍点修复效益确定工程优先序。该分析流程为快速城市化地区前瞻性生态风险的动态预警提供了可复制的决策支持方法。

关键词：生态安全格局；多情景模拟；生态夹点与障碍点；风险漂移；动态预警；珠海市

中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）06-0151-05

Ecological Pinch Points Transformation and Risk Early Warning Under Multi-scenario Simulations: A Case Study of Zhuhai City, Guangdong Province, China

ZHANG Shengyong[1,2], ZHANG Yiheng[3,4], MO Haoran[4], WU Jiansheng[1,2]

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, China;
2. Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
3. Faculty of Innovation and Design, City University of Macau, Macau 999078, China;
4. Planning and Design Department, Zhuhai Institute of Urban Planning and Design, Zhuhai 519000, China)

Abstract: Under rapid urbanization, the static ecological security pattern (ESP) assessment is unable to meet the requirements of forward-looking planning. In this study, taking Zhuhai City, Guangdong Province, China as an example, we constructed a “prediction-diagnosis” analytical workflow to dynamically identify key areas for future ecological restoration. Firstly, we used the patch-generating land-use simulation (PLUS) model to simulate land-use in 2050 under the business as usual (BAU), urban development scenario (UDS), and ecological protection scenario (EPS). Then, we combined the integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs (InVEST) model, morphological spatial pattern analysis (MSPA), and circuit theory to diagnose the spatio-temporal evolution of ecological sources, pinch points, and barriers. The results show that in the UDS, ecological source areas shrink significantly due to the expansion of construction land, with many pinch points disappearing and the corridor network structure deteriorating. In the BAU, pinch points undergo spatial migration, causing implicit network degradation. In the EPS, the source area pattern remains the most stable. It is suggested to implement rigid protection for spatio-temporal stable key nodes, establish a dynamic monitoring mechanism, and determine the engineering priority sequence based on the restoration benefits of barriers. This analytical workflow provides a replicable decision-support method for the dynamic early warning of forward-looking ecological risks in rapid urbanization regions.

Key words: ESP, multi-scenario simulation, ecological pinch point and obstacle, risk drift, dynamic early warning, Zhuhai City

第一作者简介：张昇永（1998—），博士，研究方向为景观生态以土地利用、生态网络、地理信息数据分析，E-mail：syzhangpku@163.com。

通信作者：张一恒（1986—），博士，高级工程师，研究方向为国土空间规划、详细规划方法改革、产业园区发展、城市形态演进、城市发展战略，E-mail：U22092120284@cityu.mo。

快速城市化驱动建设用地与交通基础设施持续扩张，导致生境破碎化与生态系统服务功能退化，对区域生态安全构成长期威胁[1-3]。生态安全格局（ESP）通过“源地—阻力面—廊道—节点”框架将生态过程转译为空间网络，已成为国土空间管控的重要工具[4-5]。然而，既有研究多基于单期静态数据，难以满足规划前瞻性需求[6-8]。近年来，学界将LUCC情景模拟引入ESP研究，利用PLUS、FLUS等模型推演未来空间结构[9-13]，但多聚焦宏观结构对比，对生态夹点与障碍点等关键节点的动态响应关注不足。事实上，节点空间稳定性直接决定网络整体功能，其被占用可能导致网络结构性崩解。鉴于此，本文构建“多情景模拟—生态网络诊断”框架，以珠海市为例，系统识别不同情景下生态网络要素时空演化，重点揭示节点层面的风险转移机制，为快速城市化地区生态安全优化与动态预警提供支撑[14-16]。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

珠海市（图1）位于广东省珠江口西南岸（21°48′～22°27′N，113°03～14°19′E），总面积约1 725 km²，属于典型的亚热带季风气候区，气候温暖湿润、降水充沛，区域内河网密集、滨海生态系统类型多样。整体而言，珠海具有良好的生态基底，但随着城市化进程加快，自然岸线侵占、滨海湿地退化及农业空间破碎化等问题逐渐显现。

作为粤港澳大湾区的重要节点城市，珠海正处于城市化持续推进与生态保护需求并存的阶段，其土地利用结构变化与生态网络演变具有较强的代表性。因此，以珠海为研究对象，有助于揭示快速城市化背景下生态安全格局的动态响应机制，并为区域生态修复与空间治理提供实践参考。

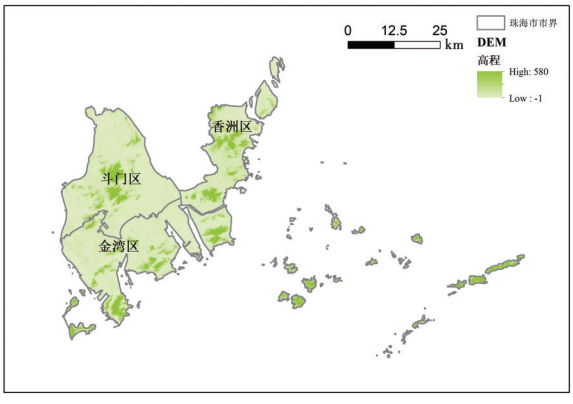


图1 珠海市的地理位置及分区边界图

审图号：GS(2019)3266

1.2 数据来源

本研究整合土地利用、自然环境、社会经济及政策约束等多源数据，以支撑多情景模拟与生态网络分析（表1）。土地利用数据采用Globeland30（30 m分辨率）2000、2010及2020年数据；自然环境因子包括DEM及其衍生的坡度、高程，以及NDVI、年均气温和年均降水数据；社会经济数据涵盖人口密度、GDP以及道路与铁路网络；政策约束数据则包括生态保护红线、永久基本农田及城镇开发边界等空间管控信息。

表1 数据集信息

数据分类	具体数据	数据格式	分辨率/ m	数据来源
空间数据	2000、2010、2020年土地利用/覆盖	栅格	30	Globeland30
	DEM（用于生成高程，坡度，坡向）	栅格	30	地理空间数据云
	NDVI，年均气温，年均降水	栅格	1 000	地理空间数据云/中科院资源环境科学数据中心
	人口密度，GDP	栅格	1 000	中科院资源环境科学数据中心
	道路网，铁路网	矢量	—	中科院资源环境科学数据中心
	河流网络		—	基于DEM提取
政策与规划数据	生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界	矢量	N/A	珠海市国土空间总体规划（2021—2035年）
	《珠海市国土空间生态修复规划》	文本/矢量	N/A	珠海市自然资源局

为保证数据的一致性与可比性，所有栅格数据统一重采样至30 m分辨率，并采用统一坐标系统进行空间对齐处理。同时，对不同数据类型进行标准化处理，以消除量纲差异对模型结果的影响。

2 研究方法

2.1 多情景土地利用模拟

为刻画不同发展路径下土地利用格局的演化趋势，本文采用PLUS模型进行情景模拟。该模型通过整合土地扩张分析策略（LEAS）与基于多随机种子的元胞自动机（CARS-CA），能够在驱动因子与转换规则共同作用下模拟斑块尺度的土地利用变化。

以2010—2020年为历史阶段，通过随机森林方法挖掘土地利用变化与驱动因子的关系，并在此基础上进行模型校准与精度验证（Kappa=0.70，OA = 0.76），表明模型具有较好的模拟能力。在此基础上，设置自然发展（BAU）、城市发展（UDS）与生态保护

（EPS）3种情景，以反映不同政策导向下的土地利用演变路径（表2）。

表2　3种情景模拟下土地利用转换成本矩阵

	自然发展情景							城市发展情景							生态保护情景						
	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g
a	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
b	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
c	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
d	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1
e	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1
f	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
g	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1

注：a、b、c、d、e、f、g分别代表耕地、森林、草地、湿地、水体、建设用地和海域。矩阵中，“1”代表允许两种地类之间进行转换，“0”则代表禁止转换。

2.2　生境质量评估

生境质量是衡量生态系统健康与物种栖息适宜性的关键指标。本文基于InVEST模型的Habitat Quality模块，对不同情景下的生境质量进行评估（表3）。该模型通过量化威胁源的空间影响及土地利用类型的敏感性，刻画生态系统受干扰程度。

结合研究区实际[17]，将耕地与建设用地识别为主要威胁源，并根据其对生态源地[18]影响距离与衰减方式进行参数设定，从而实现不同情景下生境质量的空间模拟（表4）。

表3　研究区威胁因子属性表

威胁因子	最大影响距离/km	权重	空间衰减方式
耕地	8	0.6	线性
建设用地	10	0.9	指数

表4　研究区土地利用类型对威胁因子敏感性表

土地利用类型	生境质量	耕地	建设用地
耕地	0.3	0	0.5
森林	1	0.6	0.8
草地	0.8	0.3	0.8
湿地	1	0.6	0.4
水体	1	0.7	0.8
建设用地	0.1	0.1	0.1
海域	1	1	1

2.3　生态源地识别

生态源地识别采用“生境质量—景观结构—连通性”综合筛选方法。首先，利用MSPA提取林地与草地中的核心区作为潜在生态源地[19]。其次，通过Conefor模型计算斑块连通性指标（dPC）[20-21]，筛选对整体网络具有重要贡献的斑块；最终选取同时满足面积与连通性阈值的斑块作为生态源地。

2.4　生态网络诊断与关键节点识别

基于生态源地与阻力面构建生态网络[22]。阻力面依据不同土地利用类型对生态流的阻碍程度进行赋值。在此基础上，引入电路理论，将景观看作电阻网络，通过电流密度识别生态流通路径。借助Linkage Mapper工具，进一步提取生态廊道、生态夹点及生态障碍点。其中，生态夹点对应电流密度高值区，反映关键瓶颈通道；生态障碍点则表示降低局部阻力后可显著提升连通性的区域，是优先修复的关键位置。

3　研究结果

3.1　2050年多情景土地利用变化

基于2020年以森林和水体为核心生态基底、建设用地与耕地为主导人类活动空间的现状，3种发展路径在2050年呈现出显著的转换格局差异（图2）。UDS表现为高强度的建设用地扩张，转换总面积达196.40 km²，扩张过程主要占用耕地与海域。BAU表现为建设用地温和扩张，耕地面积持续流失，水体面积虽有上升但难以抵消整体景观破碎化产生的风险。EPS的土地转换面积最小（22.90 km²），核心生态用地规模基本保持稳定，说明生态优先政策干预可显著降低景观不稳定性[9]。

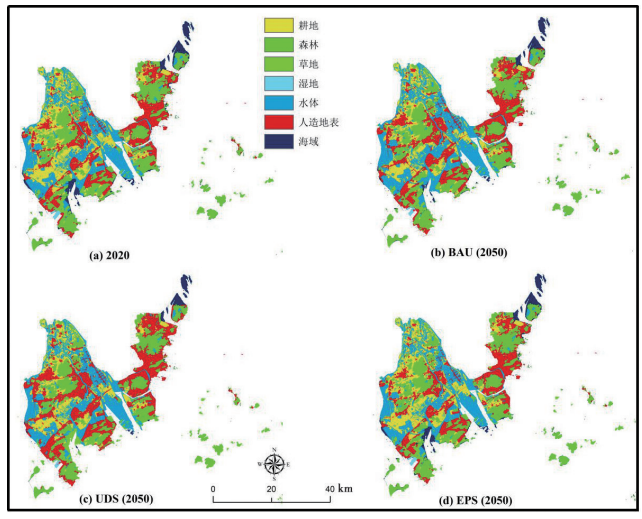


图2　珠海市2020年和多情景2050年土地利用对比

审图号：GS(2019)3266

3.2　生境质量演变与生态源地变化

生境质量空间分布整体维持中心城区低、外围生态区高的格局。至2050年，UDS与BAU的平均生境质量分别下降4.76%与4.01%，退化区域主要沿建成区与交通走廊向外扩散。EPS的平均生境质量回升0.42%，部分边缘区域质量得到改善。

如表5、图3所示，生态源地规模与空间形态随情景发生分化。UDS下生态源地面积萎缩，形状指数上升，边缘效应增强导致内部踏脚石斑块消失与景观

破碎化。BAU与EPS的源地面积相对稳定，形状指数均呈下降趋势，空间形态趋于规整与聚集。

表5 珠海市生态源地定量指标

类目	指标	2020年	2050年		
			自然发展情景	城市发展情景	生态保护情景
生态源地	面积/km²	304.24	301.25	280.98	301.50
	周长/km	1 130.75	1 202.84	1 037.63	1 189.15
	形状指数/（面积/周长）	0.269 1	0.250 4	0.270 8	0.253 5

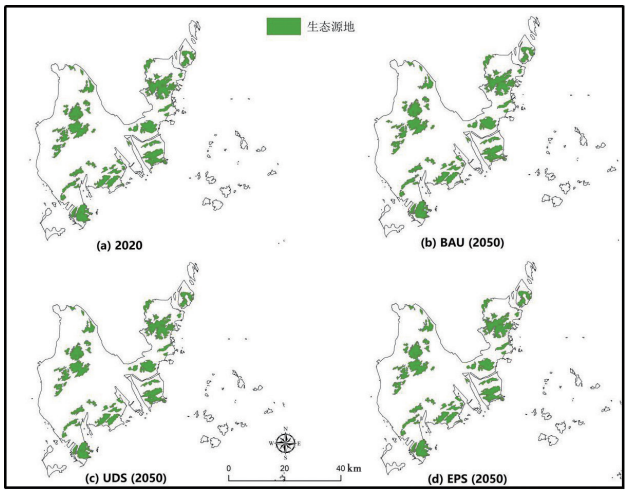


图3 不同情景下2050年珠海市生态源地的空间分布

审图号：GS(2019)3266

3.3 生态网络结构变化与功能风险诊断

3.3.1 生态廊道结构变化

结合表6分析，UDS生态廊道总长度大幅缩减19.1%，多条关键廊道被建设用地斑块直接切断，网络连通性发生结构性解体与物理熔断。BAU廊道数量与长度增加，但有效阻力值同步激增58.6%，物种迁移成本上升表明网络系统存在隐性功能退化。EPS的廊道结构数量与有效阻力指标均接近2020年现状水平，维持了网络结构韧性。

表6 珠海市生态廊道、夹点和障碍点定量指标

类目	指标	2020年	2050年		
			自然发展情景	城市发展情景	生态保护情景
生态廊道	数量	71	73	59	69
	长度	573.12	613.45	463.72	562.23
	有效阻力	474 439	752 763	386 446	495 896
生态夹点	面积/km²	0.77	0.60	0.33	0.75
	周长/km	61.77	57.19	35.47	62.18
生态障碍点	数量	33	43	40	42
	面积/km²	3.84	4.24	3.40	3.74
	周长/km	45.18	55.09	42.82	45.52

3.3.2 生态夹点演化特征

生态夹点动态演化反映生态风险转移过程。UDS夹点面积大幅减少57.1%，原有连接区出现夹点真空，导致网络通道中断。BAU夹点面积缩减并发生空间迁移，表明生态风险随城市扩张发生空间漂移与重组。EPS夹点系统规模及空间分布最为稳定。

3.3.3 生态障碍点分布响应

UDS障碍点面积减少实质是由连通廊道自身消失导致的伪改善现象。BAU障碍点数量增加，并在空间上向城市扩张热点区域集聚，预示未来修复靶区分布趋于复杂。EPS障碍点面积格局维持相对稳定。

4 讨 论

4.1 核心发现与机制探讨

多情景对比表明政策导向决定生态网络演变方向。UDS情景下生态系统退化表现为源地面积绝对缩减与廊道断裂，网络连通性发生结构性解体；BAU情景下建设用地温和扩张导致网络有效阻力大幅上升，发生隐性退化。夹点空间动态演变揭示了生态风险转移机制：UDS下夹点消失阻断生态流连接，BAU下夹点空间迁移导致生态瓶颈位置转移。

4.2 与大湾区现有研究的对比

现有研究多集中于宏观尺度的生态格局识别与生境质量分析，侧重土地利用变化或生境质量的整体响应，对生态网络关键节点的结构稳定性缺乏深入探讨。本研究将尺度下沉至“关键节点”层面，发现BAU情景下夹点空间迁移与网络阻力上升体现隐性退化，UDS情景下夹点消失引发结构性解体，EPS情景维持节点与廊道稳定性。这一发现从微观网络结构层面揭示了生态风险的“空间转移”与“阈值响应”机制，解释了渐进式生态退化现象。此外，珠海生态夹点向外围迁移的特征表明生态风险随城市扩张动态转移，验证了节点级诊断在区域生态风险预警中的有效性。

4.3 面向国土空间规划的策略响应

一是实施分级刚性保护，将时空稳定型夹点与关键廊道划入生态保护红线，线性工程穿越须强制实施等效连通性补偿。二是建立动态预警机制，针对夹点迁移区增设项目审批前的节点影响评估，实现占补平衡向占补增效升级。三是制定靶向修复清单，依据障碍点分布排定修复优先序，并将夹点稳定性与廊道阻力纳入生态绩效考核体系。

5 结 语

本研究构建了多情景生态预测诊断技术路径，运用PLUS、InVEST与电路理论等多模型耦合方法，以珠海市为例分析不同发展路径下生态安全格局时空演

变规律，诊断生态网络关键节点的演化特征与空间转移机制。结果表明：

1）政策选择对区域生态网络结构具有决定性影响。UDS导致源地缩减与廊道连通性结构性受损；BAU引发夹点空间迁移与网络隐性退化；EPS维持了源地稳定性与网络结构韧性。

2）关键节点演变具备非线性阈值特征与空间转移机制。关键瓶颈被建设用地占用将引发通道物理中断，温和扩张会导致生态风险向城市外围转移累积，网络迁移阻力成本上升。

3）面向区域国土空间规划实施，建议针对时空稳定型夹点实施刚性管控，对风险转移区建立动态中期预警机制，并基于障碍点分布特征制定修复工程优先序。本研究分析流程为快速城市化地区开展动态生态风险预警提供了量化决策依据。

此外，本研究仍存在一定局限性。当前生态阻力面的构建主要基于专家打分与静态土地利用赋值，未来可引入夜间灯光、人类活动轨迹等高精度动态数据进行修正。同时，未来的多情景模拟可进一步耦合气候变化（如海平面上升带来的海岸带挤压）与重大工程建设的叠加效应，以期为粤港澳大湾区等高密度沿海城市群提供更精准的生态风险动态预警支持。

参考文献

[1] 杨文越,叶泓妤. 基于生境质量的粤港澳大湾区生态网络识别[J]. 生态学报,2023,43(24):1-13

[2] 肖武,阮琳琳,岳文泽,等. 面向国土空间生态保护修复的多尺度成效评估体系构建[J]. 应用生态学报,2023,34(9):2566-2574

[3] 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[J]. 中国土地科学,2019,33(7):1-10

[4] 方莹,王静,黄隆杨,等. 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[J]. 自然资源学报,2020,35(1):190-203

[5] 屠越,刘敏,高婵婵,等. 大都市区生态源地识别体系构建及国土空间生态修复关键区诊断[J]. 生态学报,2022,42(17):7056-7067

[6] 覃彬桂,林伊琳,赵俊三,等. 基于InVEST模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J]. 中国环境科学,2023,43(2):809-820

[7] 闫玉玉,孙彦伟,刘敏. 基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略[J]. 应用生态学报,2022,33(12):3369-3378

[8] 翟香,兰安军,廖艳梅,等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域定量识别:以贵州省为例[J]. 水土保持究,2022,29(6):322-329

[9] 张丽,王晨旭,徐建英,等. 面向连通性提升的旱区城市生态网络优化情景:以巴彦淖尔市及其周边地区为例[J]. 生态学报,2022,42(21):8675-8689

[10] 李久林,胡大卫,储金龙,等. 基于未来情景模拟的安徽省潜山市生态网络构建与优化[J]. 应用生态学报,2023,34(6):1474-1482

[11] Xu W, Song J, Long Y, et al. Analysis and Simulation of the Driving Mechanism and Ecological Effects of Land Cover Change in the Weihe River Basin, China[J]. Journal of Environmental Management,2023,344:118320

[12] 许静,刘慧. 基于GMMOP-PLUS模型的甘肃省生态系统服务及其权衡协同关系评估与预测[J]. 中国环境科学,2023,43(11):1-15

[13] 杨雪荻,陈兴鹏,车磊,等. 融入生态安全的兰西城市群土地利用功能布局优化[J]. 生态学报,2023,43(7):2583-2593

[14] Wu, J. G. Linking Landscape, Land System and Design Approaches to Achieve Sustainability[J]. Journal of Land Use Science,2019,14(2):173-189

[15] Ma J, Mei Z, Wang X, et al. Ecological Security Pattern Construction and Multi-scenario Risk Early Warning (2020-2035) in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Land,2024,13(8):1267

[16] Yang M, He J, Shi L, et al. Integrating Policy Quantification Analysis into Ecological Security Pattern Construction: A Case Study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Ecological Indicators,2024,162:112049

[17] 柯钦华,周俏薇,庄宝怡,等. 基于生态系统服务供需平衡的粤港澳大湾区生态安全格局构建研究[J]. 生态学报,2024,44(5):1-15

[18] 刘汉仪,林媚珍,周汝波,等. 基于InVEST模型的粤港澳大湾区生境质量时空演变分析[J]. 生态科学,2021,40(3):82-91

[19] 杜佳衡,王影雪,潘悦,等. 高原河谷县域景观生态风险评价与生态安全格局构建:以云南省大理州永平县为例[J]. 生态学报,2023,43(11):1-11

[20] Zhang X M, Xie B G, Zhou K C, et al. Mapping Ecosystem Service Clusters and Exploring Their Driving Mechanisms in Karst Peak-cluster Depression Regions in China[J]. Ecological Indicators,2024,158

[21] ZhangY, HuW Y, Min M, et al. (2023). Optimization of Ecological Connectivity and Construction Of Supply-demand Network in Wuhan Metropolitan Area, China[J]. Ecological Indicators,2023,146,109799

[22] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报,2018,73(4):701-710