

# 基于城市发展情景模拟的陕西杨凌地区生态安全格局构建

## Development of an Ecological Security Framework in the Yangling District of Shaanxi Province, Utilizing Urban Development Scenario Simulation

李晗悦 樊俊喜\* 杨欢 王旭辉 丁尚雯 林子敏 都鹏飞 张佳婧 尹呈瀚

LI Hanyue FAN Junxi\* YANG Huan WANG Xuhui DING Shangwen LIN Zimin DU Pengfei ZHANG Jiajing YIN Chenghan

(西北农林科技大学风景园林艺术学院, 杨凌 712100)

(College of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 712100)

文章编号: 1000-0283(2025)07-0079-10

DOI: 10.12193/j.laing.2025.07.0079.009

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-03-20

修回日期: 2025-05-10

### 摘要

生态安全格局在快速城市化与农业现代化背景下对维持农业高新技术产业示范区生态安全和改善人居环境有重要意义。以杨凌地区2002-2022年土地利用数据为基础,综合运用PLUS-InVEST—电路理论耦合模型,分析土地利用演变情况,模拟2032年城市发展情景下的土地利用格局,构建2022年和2032年生态安全格局。研究表明:杨凌地区耕地为主导地类,与城镇建设用地相互转化频繁,综合土地利用动态度波动小;基于PLUS模型预测显示,2032年各地类发展稳定,城市发展情景下呈现东建西耕格局;2022-2032年城市发展情景下生态源地面积增加129.07 hm<sup>2</sup>,廊道数量增加40条且新增于东南部、生态夹点面积减少85.05 hm<sup>2</sup>,生态障碍点面积增加292.5 hm<sup>2</sup>,根据现状及未来情景提出“多廊多核”空间结构优化建议。为杨凌及西北干旱半干旱中小城镇的生态保护、土地利用规划和城市建设提供科学依据。

### 关键词

风景园林; 城市发展情景模拟; 电路理论; 生态安全格局; 杨凌地区; 生态廊道; 生态修复

### Abstract

Against the backdrop of rapid urbanization and agricultural modernization, the concept of ecological security is of great significance for maintaining ecological balance and enhancing human settlement in the demonstration districts of agricultural high-tech industries. Based on the land use data of the Yangling District from 2002 to 2022, we utilized the Plus-InVEST circuit theoretical coupling model to analyze the evolution of land use, simulate the land use pattern under an urban development scenario in 2032, and construct the ecological security patterns in 2022 and 2032. The results showed that cultivated land was the dominant land type in the Yangling district, which was frequently transformed into urban construction land, and the dynamic attitude of comprehensive land use fluctuated little. The PLUS model forecast indicated that the development of all districts would remain stable in 2032, with an urban development scenario characterized by construction in the east and cultivation in the west. From 2022 to 2032, under the urban development scenario, the area of ecological source would increase by 129.07 hm<sup>2</sup>, the number of corridors would increase by 40 and be added in the southeast, the area of ecological bottleneck would decrease by 85.05 hm<sup>2</sup>, and the area of ecological obstacle points would increase by 292.5 hm<sup>2</sup>. We proposed an optimization proposal for the composite structure of “multiple corridors and multiple cores” based on the current situation and future scenarios. This study provided a scientific basis for ecological protection, land use planning, and urban construction of Yangling and other small and semi-arid towns in northwest China.

### Keywords

landscape architecture; urban development scenario simulation; Circuit Theory; ecological security pattern; Yangling District; ecological corridor; ecological restoration

### 李晗悦

2000年生/女/新疆石河子人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划设计

### 樊俊喜

1976年生/男/宁夏石嘴山人/硕士/副教授/研究方向为风景园林规划设计及其对城市声环境作用机理研究

### 杨欢

1989年生/女/陕西西安人/博士/副教授/研究方向为文化景观保护、乡村规划与可持续发展、空间形态优化

\*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: fanjunxi@nwsuaf.edu.cn

在快速城市化进程背景下,土地利用类型的转化是自然环境与人类活动相互作用的最直观体现,生态空间被侵占,生态功能用地丧失等生态问题加剧<sup>[1]</sup>。通过对景观格局

的演变和生态安全格局构建研究,可以揭示维持生态系统稳定与平衡的重要环节<sup>[2]</sup>,为制定针对性的生态保护措施提供科学依据。生态安全格局通过优化景观要素的空间配

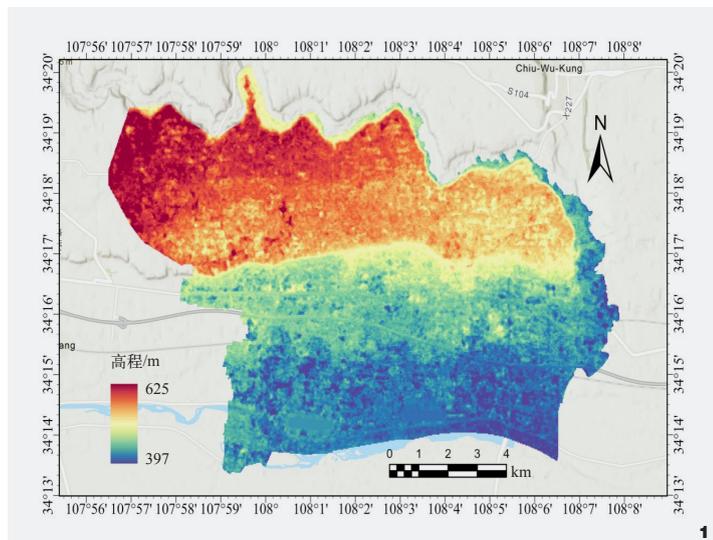


图1 研究区域地理位置  
Fig. 1 Geographic location of the study district

置,提升生态系统的稳定性和服务功能,增强生态系统对外部干扰的抵抗能力。

生态安全格局是景观格局与生态过程之间相互作用的重要部分,国外学者对生态安全格局的研究开始较早,2000年美国首次提及生态安全的概念<sup>[3]</sup>。研究内容在全球尺度上聚焦于面对全球气候变化和生物多样性丧失的挑战为维持生态系统稳定构建生态网络<sup>[4]</sup>、针对海洋生态安全评估沿海地区生态风险<sup>[5]</sup>;在区域与城市尺度聚焦于区域生态安全<sup>[6]</sup>和城市生态基础设施构建<sup>[7]</sup>;在城市街区尺度聚焦于生态廊道的跨区域协同保护<sup>[8]</sup>。国内学者研究内容在区域生态安全格局包括构建国家生态安全骨架的“三区四带”生态安全屏障规划<sup>[9]</sup>及城市群生态廊道建设<sup>[10]</sup>;城市生态安全格局聚焦于城市化进程与生态保护矛盾之间的平衡<sup>[11]</sup>和安全格局诊断,识别生态保护关键区域<sup>[12]</sup>。微观尺度应用于城镇片区生态廊道的识别<sup>[13]</sup>。研究方法上,国内外学者在生态安全格局研究中目前已形成“生态源地识别—生态阻力面构建—生态廊道提取”主流范式<sup>[14]</sup>,生态源地是具有较高生态质量的区域,目前对于生态源地提取有直接识别林地、草地、水体法<sup>[15]</sup>,生态系统服务质量—连通性综合评价法<sup>[16]</sup>。对于阻力面构建则综合考虑区域内人为自然因素的影响,借助熵权法、CRITIC法进行权重叠加。生态廊道提取方法常用斑块重力模型、最小累积阻力模型和电路理论<sup>[17]</sup>等,其中电路理论对廊道及节点重要性判别研究更具优势。目前景观格局与生态安全格局研究多集中于长三角及

珠三角等经济发达区域<sup>[18-19]</sup>,并且研究侧重于大尺度区域,对于西北地区尤其农业型城市研究尚少,基于注重西部地区生态环境保护修复和高质量经济发展的背景,平衡城市开发和生态保护是杨凌地区可持续发展的重要议题。

学者多从土地利用和景观格局入手,评价区域生态健康。城市化进程的加快和农业现代化的推进使杨凌地区的土地利用格局发生了显著变化,本研究以杨凌地区2002-2022年近20年间三期土地利用数据作为基础分析区域历史土地利用格局变化,模拟预测2032年土地利用空间分布及生态风险,构建2022年和2032年生态安全格局,为杨凌地区及西北干旱半干旱中小城镇在生态保护、土地利用规划、城市建设等方面提供参考和借鉴。

## 1 研究区域概况与数据来源

### 1.1 研究区域概况

杨凌地区位于陕西咸阳关中平原中部,是全国首个国家级农业高新技术产业示范区,总面积13 500 hm<sup>2</sup>。地势北高南低,属大陆季风性半湿润气候,南临渭河,北临漳水河,东临漆水河,第一产业为农林牧渔业(图1)。

### 1.2 数据来源

本研究采用的2002年、2012年、2022年三期土地利用数据源于全球30 m土地覆盖变化监测数据(GLC\_FCS30D),结合遥感影像校正,参考国家标准《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017),将研究区分为6大地类。人口密度、GDP、土壤类型数据源于资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),距各级道路、城镇中心距离数据源于OpenStreetMap(<http://www.openstreetmap.org>),气温和降雨数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),高程数据源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。运用ArcGIS pro进行投影栅格、掩膜提取,重采样为30×30栅格数据,所有数据均采用CGCS2000 3 Degree GK CM 108E坐标系。

## 2 研究方法

### 2.1 城市发展情景模拟

PLUS模型耦合土地扩张分析策略和多类型随机斑块种子的元胞自动机模拟土地覆被和土地利用<sup>[20]</sup>,弥补元胞自动机驱动力因素简单化假设的局限<sup>[21]</sup>。首先根据用地扩张分析策略与随机森林算法基

于2002年、2012年数据分析土地利用扩张及驱动力, 确定各类用地的发展概率及驱动因素对各类用地扩张的贡献度权重。结合既有相关研究并考虑数据可获取性, 排除冗余因子, 经检验研究区域6种土地利用类型与所选取驱动因子构建的模型均通过Homer-Lemeshow 检验 ( $p < 0.05$ ), 所选驱动因子对因变量解释能力可达到统计学意义水平, 选取自然因素(高程、坡度、土壤类型、年均降水量、年均气温、距水系距离)、社会与经济因素(GDP、人口密度、距城镇中心、高速公路、一级道路、二级道路、三级道路、铁路距离)共15种驱动因子。基于2002-2022年的土地利用数据, 利用马尔可夫链(Markov Chain)预测2032年杨凌地区各土地利用类型的需求量。结合发展概率情况, 通过随机种子和阈值递减机制模拟未来土地利用斑块生成, 邻域权重反映邻域土地利用类型影响。计算方法见公式(1)<sup>[22]</sup>:

$$P_i = \frac{A_i - A_n}{A_x - A_n} \quad (1)$$

式中,  $P_i$ 是第*i*类土地类型邻域权重,  $A_i$ 为第*i*类土地利用扩张面积,  $A_n$ 为各类土地利用最小扩张面积,  $A_x$ 为各类土地利用最大扩张面积, 本研究参考前人研究<sup>[23]</sup>及研究区域实际情况各类土地权重见表1。

以2002年、2012年数据预测2022年数据, 并与2022年实际数据进行精确度对比, 研究得到Kappa系数为0.772, 总体精度为0.933, 结果有效。本研究以相等时间跨度模拟2032年杨凌地区土地利用类型空间分布, 根据实际状况和文献统计设置城市发展情景。为保证结果的客观性, 不约束城镇建设用地的扩张, 不同地类转移成本矩阵如表2, 其中1代表原有地类可转为新地类, 0代表原有地类限制转换。

## 2.2 生态源地识别和阻力面构建

### 2.2.1 生态源地识别

生态系统中相对稳定、生态功能较强且生态风险低的区域为生态源地<sup>[24-25]</sup>, 生态源地是构建生态安全格局的基础, 本研究关注生态系统服务价值, 使用InVEST模型选择生境质量、水土保持、碳储量、水源涵养、粮食供给和文化服务6大服务叠加后评估, 将生态系统服务价值位于前25%的区域设置为前景, 通过MSPA方法识别出核心区, 并进行连通性计算, 确定距离阈值为6 km, 连通概率为0.5, 选取可能连通性指数(PC)和整体连通性指数(IC)计算斑块连通性, 结合生态风险评价结果。考虑生态系统服务价值高区、生态风险低区、连通性高区, 考虑杨凌地区自然环境条件和生态源地承载力, 为避免生态源地破碎化, 选取面积>5 hm<sup>2</sup>的核心区斑块识别为生态源地。

### 2.2.2 生态阻力面构建

生物在不同生境斑块间迁徙所需克服的阻力为生态阻力, 阻力值越大表明生物迁徙

和能量物质流动所需克服的阻力越大, 通过对于生态阻力空间分布可视化, 便于选取迁徙时的最短路径。本研究根据前人相关研究<sup>[16]</sup>及本研究区域特点, 考虑人为驱动因素、自然驱动因素、生态系统服务价值和景观生态风险经过筛选去除影响较小和重复作用因素, 通过CRITIC方法对各因素加权并叠加计算得到综合阻力面。

### 2.3 基于电路理论的廊道提取及节点识别

电路理论将生物运动和基因流类比为电路中具有迁徙分散随机性的电荷游走, 不同阻力值的异质性景观类比为具有节点或电阻的电路, 通过电流模拟景观中基因流预测生物迁徙选择某一路径的概率, 从而识别出多条沟通生态源地的线性或带状低阻力生态廊道<sup>[26]</sup>。本研究基于电路理论将两生态源地之间最小成本路径作为电阻迭代运算得到最大电流的生态廊道; 生态夹点是景观生态连通性的关键点, 为电流高密度集中区域<sup>[12]</sup>, 利用Pinchpoint Mapper工具以all-to-one模式, 经过多次实验成本加权距离为1 000 m, 选择电流

表1 土地利用类型邻域权重  
Tab. 1 Land use type neighborhood weight

类型 Type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	城镇建设用地 Urban construction land	水体 Water body	未利用地 Unutilized land
权重	0.796	0.145	0.052	0.526	0.174	0.100

表2 土地利用类型转移成本矩阵  
Tab. 2 Land use type transfer cost matrix

2022年 \ 2032年	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	城镇建设用地 Urban construction land	水体 Water body	未利用地 Unutilized land
耕地	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	0	0	1
草地	1	1	1	1	1	1
城镇建设用地	1	1	1	1	0	1
水体	0	0	1	0	1	1
未利用地	1	1	1	1	1	1

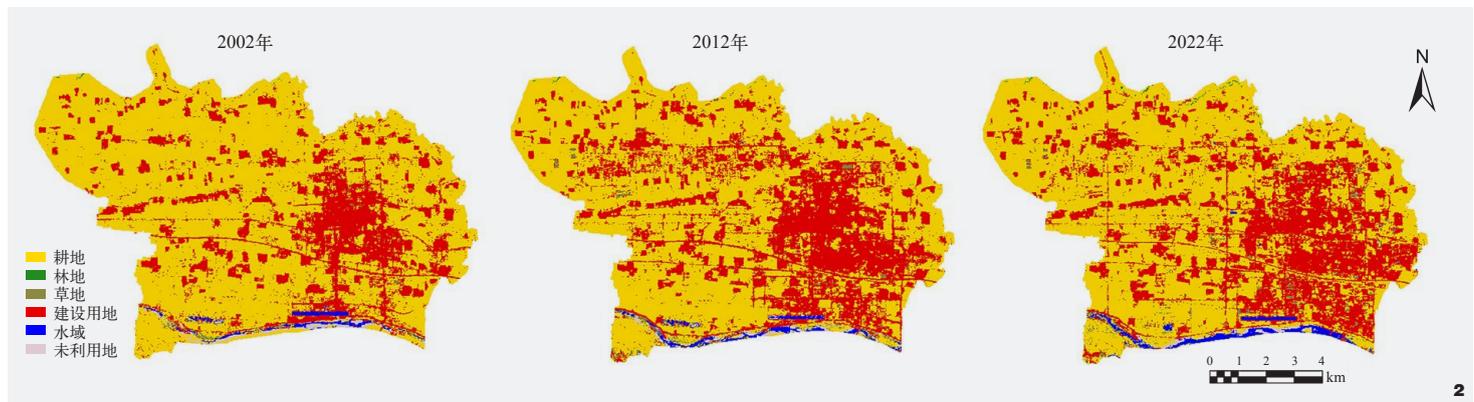


图2 2002-2022年研究区土地利用分布图  
Fig. 2 Land use distribution map of study district from 2002 to 2022

密度高值区且去除面积过小区域作为生态夹点；生态障碍点是生物在生境斑块间运动受到阻碍的区域，修复此类区域可增加景观连通性，利用Barrier Mapper工具，设置为Maximum模式，搜索半径最大值100 m，最小值50 m，以50 m、100 m、200 m为步长使用移动窗口法搜索，经多次阈值迭代计算选择50 m梯度为迭代半径识别研究区域障碍点。

### 3 研究结果

#### 3.1 土地利用演变格局及预测

##### 3.1.1 2002-2022年土地利用演变格局

2002-2022年土地利用类型空间分布如图2和表3，研究区域20年间主要呈现“东南城镇化，西北农业化”分布格局，20年间耕地始终占主导地位；草地和林地分布不集中；城镇建设用地面积为上升趋势；水体集中于南侧；未利用地先减少后稳定。研究区域土地利用转移情况如图3，2002年到2012年土地利用总转出面积为2 303.07 hm<sup>2</sup>，转出面积从高到低依次为耕地>城镇建设用地>未利用地>水体>草地>林地；2012年到2022年土地利用总转出面积为2 116.34 hm<sup>2</sup>，较上一阶段有所减少，转出面积排序情况为耕地>

城镇建设用地>草地>未利用地>水体>林地；2002-2022年间土地利用转移总转出面积为2 825.04 hm<sup>2</sup>，均大于前两个10年跨度的增长量，这一阶段转出面积最大的地类仍是耕地，面积为2 064.78 hm<sup>2</sup>，其中转为城镇建设用地面积占比最大，为87.24%，值得关注的是研究阶段末期较初期林地面积增加约5倍。

##### 3.1.2 2032年城市发展情景土地利用预测

基于2002年、2012年基础数据，使用PLUS模型预测2022年土地利用，与实际土地利用数据比较并计算检验，模型模拟达到理想精度（表4），通过Markov-CARS模拟杨凌地区城市发展情景2032年土地利用数据，结果见图4和表5。2032年各地类发展稳定，空

表3 2002-2022年土地利用类型面积表  
Tab. 3 Land use type area table from 2002 to 2022

土地利用类型 Type of land use	面积及比例 Area and proportion					
	2002年		2012年		2022年	
	面积 /hm <sup>2</sup>	比例 /%	面积 /hm <sup>2</sup>	比例 /%	面积 /hm <sup>2</sup>	比例 /%
耕地	10 160.15	74.86	8 827.71	65.04	8 695.45	64.06
林地	2.80	0.02	3.18	0.02	14.60	0.11
草地	61.10	0.45	154.13	1.14	183.46	1.35
城镇建设用地	3 139.12	23.13	4 369.01	32.19	4 407.87	32.48
水体	119.50	0.88	140.14	1.03	205.17	1.51
未利用地	90.22	0.66	78.72	0.58	66.88	0.49

表4 2022年土地利用实际栅格与模拟栅格对比  
Tab. 4 Comparison of actual land use grid with simulated land use grid in 2022

类型 Type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	城镇建设用地 Urban construction land	水体 Water body	未利用地 Unutilized land
实际栅格 / 像元	115 254	194	2 428	58 291	2 718	877
模拟栅格 / 像元	104 870	164	2 260	63 324	2 542	1 033
准确率 / %	90.99	84.54	93.08	92.05	93.52	84.90

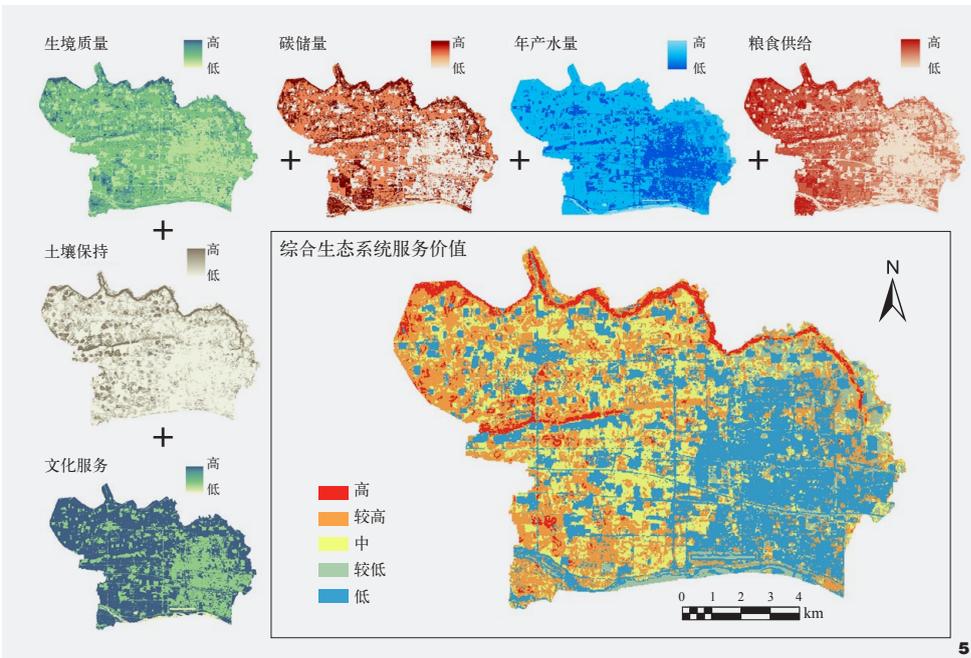
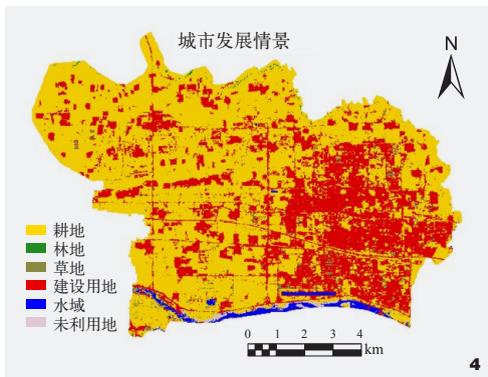
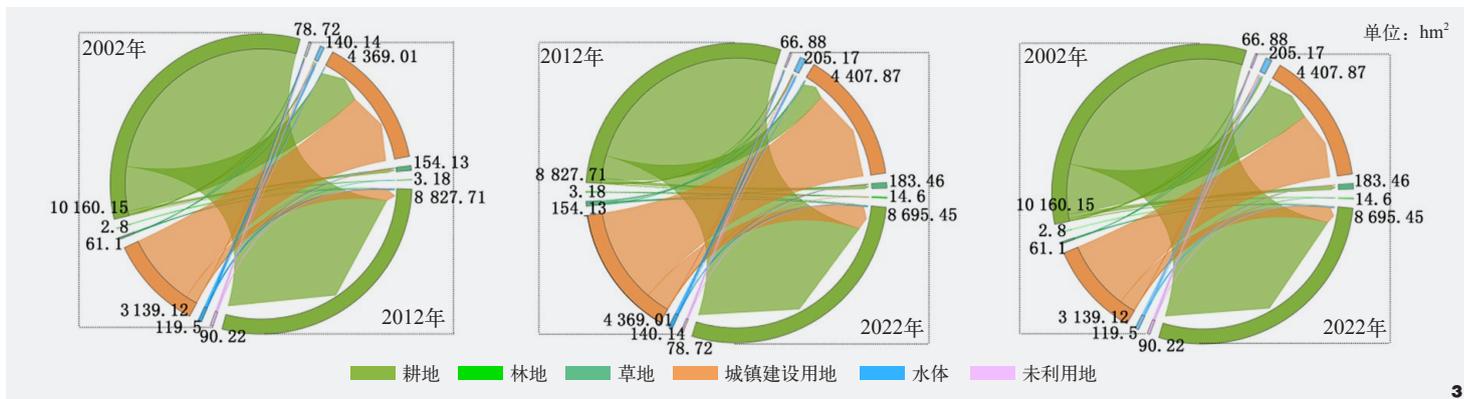


图3 2002-2022年研究区土地利用转移弦图  
Fig. 3 Land use transfer string map of study district from 2002 to 2022

图4 2032年城市发展情景杨凌地区土地利用格局分布  
Fig. 4 Distribution of land use pattern in Yangling District under urban development scenarios in 2032

图5 2022年各项生态系统服务价值叠加计算空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of the calculated value of various ecosystem services in 2022

表5 2032年城市发展情景下各地类面积  
Tab. 5 Land use area in urban development scenario in 2032

类型 Type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	城镇建设用地 Urban construction land	水体 Water body	未利用地 Unutilized land
面积 /hm <sup>2</sup>	8 577.25	17.34	189.54	4 492.12	225.69	67.96

间呈现东部偏城镇建设用地，西部偏耕地的“东建西耕”格局，耕地和城镇建设用地仍占主导地位，林地和草地多以飞地形式出现，水体集中于南部渭河北侧，未利用地减少。城市发展情景下，耕地面积减少，城镇建设用地面积上升，其他地类较稳定，生态用地

较2022年增加。

### 3.2 生态源地与阻力面积识别结果

#### 3.2.1 杨凌地区生态源地识别结果

基于城市发展情景和现状生态安全格局，选取杨凌地区生态系统服务价值高且

连通性强的核心斑块作为生态源地，兼顾生态网络的功能完整和斑块连通性，首先通过InVEST模型计算叠加得到综合生态系统服务价值(图5)，MSPA方法识别出核心区后筛选dPC和dIC前50%的斑块作为现状生态源地。通过对2022年生态源地与元胞自动机所预测的2032年土地利用类型空间分布中的林地、草地和水体叠加筛选得到2032年城市发展情景下生态源地(图6)。

杨凌地区生态系统服务价值高区多分布在研究区域北部边界，这部分生态源地多为

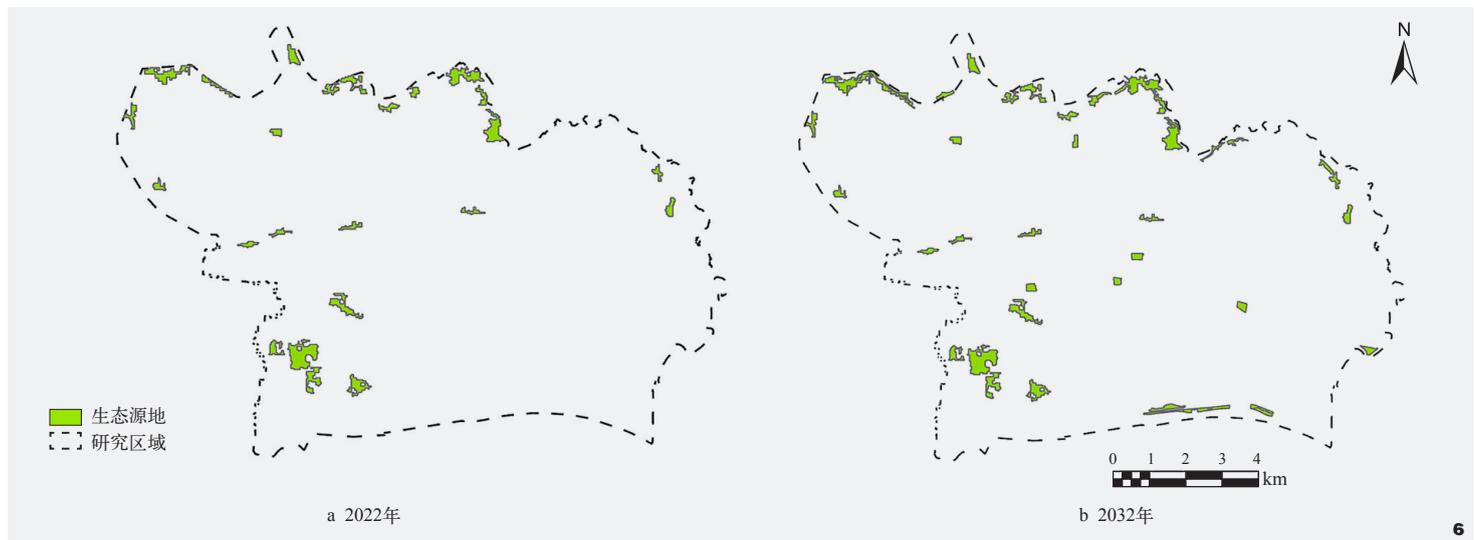


图6 2022年、2032年研究区生态源地空间分布  
Fig. 6 Spatial distribution of ecological source areas of study district in 2022 and 2032

源下的林地和草地。研究区域中部斑块较小、南部和东南部斑块缺失，北部源地数量较多但破碎化程度高于中、南部，中部和南部景观连通性较低，东南部受到城镇建设用地扩张影响生态源地受干扰程度高，斑块稳定性较弱。

2022年共识别生态源地24个，总面积288.99 hm<sup>2</sup>，占杨凌地区总面积2.14%，主要分布在杨凌地区北部五泉镇生态林地及现代农业示范园区，中部规模较小，最大斑块分布在区域西南部且被较小斑块包围。不同源地之间景观连通性差异较大，西南部最大斑块dPC值和dIC值分别达到28.15和28.02，为连通性最佳斑块，而最东部斑块dPC值和dIC

值分别为3.23和3.17，研究区域东南部生态用地较少且景观连通性低，多为城镇建设用地和耕地，未出现生态源地。2032年生态源地在2022年综合考虑识别出的生态源地基础上增加了林地、草地和水体斑块，共识别斑块35个，总面积为418.06 hm<sup>2</sup>，较2022年增加129.07 hm<sup>2</sup>，占总面积3.09%，较2022年上升0.95%，2032年纳入水体生态源地，从而在研究区域南侧渭河湿地出现生态源地斑块，使得研究区域景观连通性提升。

### 3.2.2 阻力面识别结果

各驱动因素权重计算结果和2022年阻力面见表6和图7，研究区域阻力值整体呈现东

南高西北低布局，高值区域为主要城市区域，低值区域为耕地林地聚集区域，考虑城镇化建设的影响，2032年城市发展情景下阻力面在2022年基础上每个栅格增量为1%，城市发展要求交通路网更加密集，不透水面面积增加，利于生物栖息度降低，综合生态阻力上升。

## 3.3 生态安全格局构建与分析

### 3.3.1 生态廊道、生态夹点和生态障碍点识别结果

基于电路理论经过计算得到生态廊道如图8。根据廊道电流密度划分为关键廊道、重要廊道、潜在廊道三级，2022年共识别出生态廊道58条，廊道整体网状分布集中于中部和西北部，其中关键廊道28条，分布于

表6 各驱动因素权重计算结果  
Tab. 6 Calculation results of weights for each driving factor

驱动因素 Driving factor	坡度 Slope	高程 Elevation	归一化植被 指数 NDVI	距水体距离 Distance from water body	距道路距离 Distance from road	距城镇中心距离 Distance from the town center	人口密度 Population density	国民生产 总值 GDP	生态系统服 务价值 Ecosystem service value	生态风险 Ecological risk
权重	0.058	0.099	0.11	0.135	0.102	0.116	0.092	0.098	0.107	0.083
权重	0.116	0.092	0.098	0.107	0.083	0.116	0.092	0.098	0.107	0.083

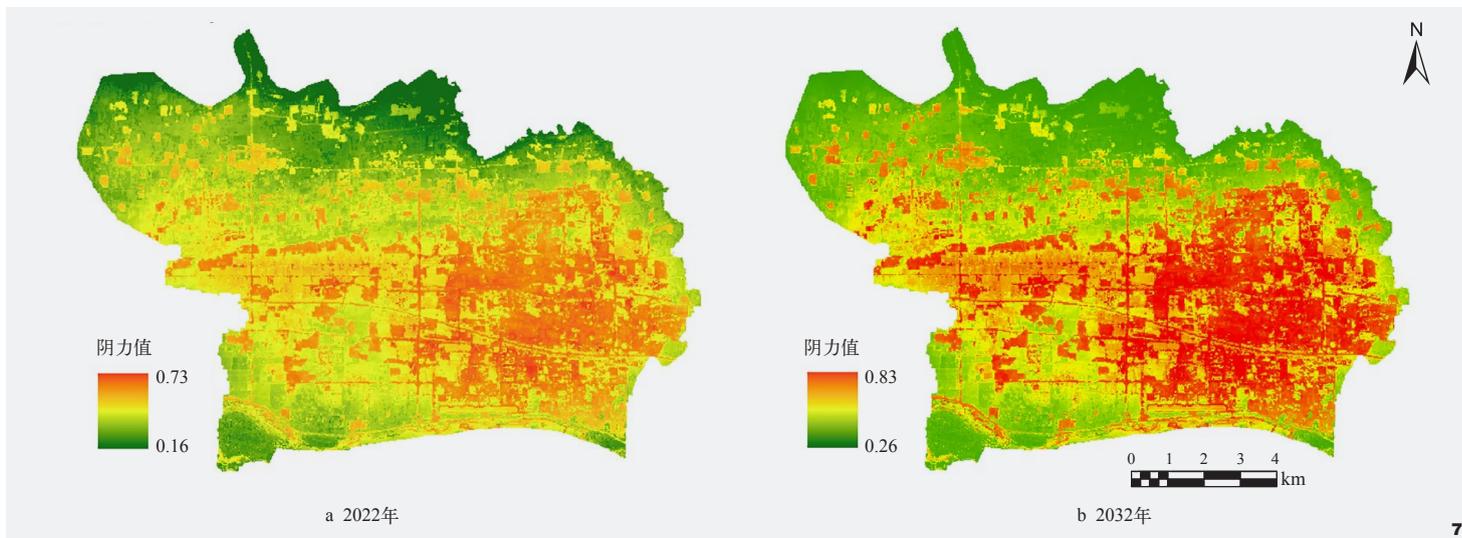


图7 研究区阻力面空间分布  
Fig. 7 Spatial distribution of resistance surface of study district

研究区域北部边界，多经过林地连接生态源地，廊道长度较短但密集度高；重要廊道22条，分布于研究区域中部偏西南侧，将中部研究区域网状连接，沟通东西两侧及西南部生态源地；潜在廊道9条，集中分布在南侧，廊道长度较长，廊道穿过的土地利用类型空间分布复杂，源地之间距离较远，连通性较弱，生物迁徙及能量流动所需克服阻力大，潜在廊道间缺少踏脚石以修复和提升连通性。2032年识别生态廊道98条，关键廊道8条，仍然集中于研究区域北部塬下边界处，廊道较短且呈现向西北收缩聚拢分布特征，此区域生态系统服务价值较高，为生态源地间的物种迁徙提供良好带状空间；重要廊道61条，集中在研究区域西北部，所连接的生态源地面积较小，廊道长度较为均衡，但在西南部出现较长廊道沟通中南部分；潜在廊道29条，由于2032年生态源地选取时加入林地、草地、水体斑块，区域内整体连通性提升，但城镇集中分布于东南侧，这一区域生态廊道阻力值相对较高。对比2022年生态廊

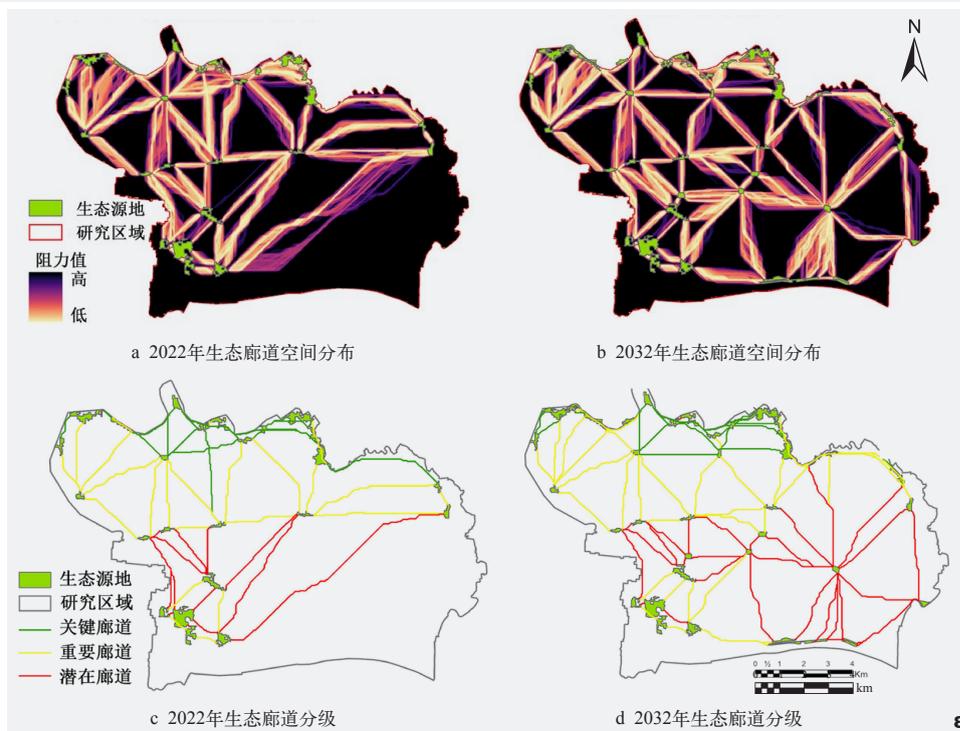


图8 研究区生态廊道空间分布及分级  
Fig. 8 Spatial distribution and classification of ecological corridors of study district

道，2032年由于生态源地的增加，生态廊道增加40条，新增廊道主要位于东南侧，廊道穿过的土地利用类型建设用地较多，由于城镇中和南部渭河流域北侧出现新生态源地，作为生态踏脚石使得东南部分的生态网络连

通性得以提升。

生态夹点与生态源地和关键廊道分布特征相似，见图9-a、图9-b。2022年生态夹点面积共计138.15 hm<sup>2</sup>，空间分布不均，在杨凌地区北部较为集中，且数量多，多为生态源

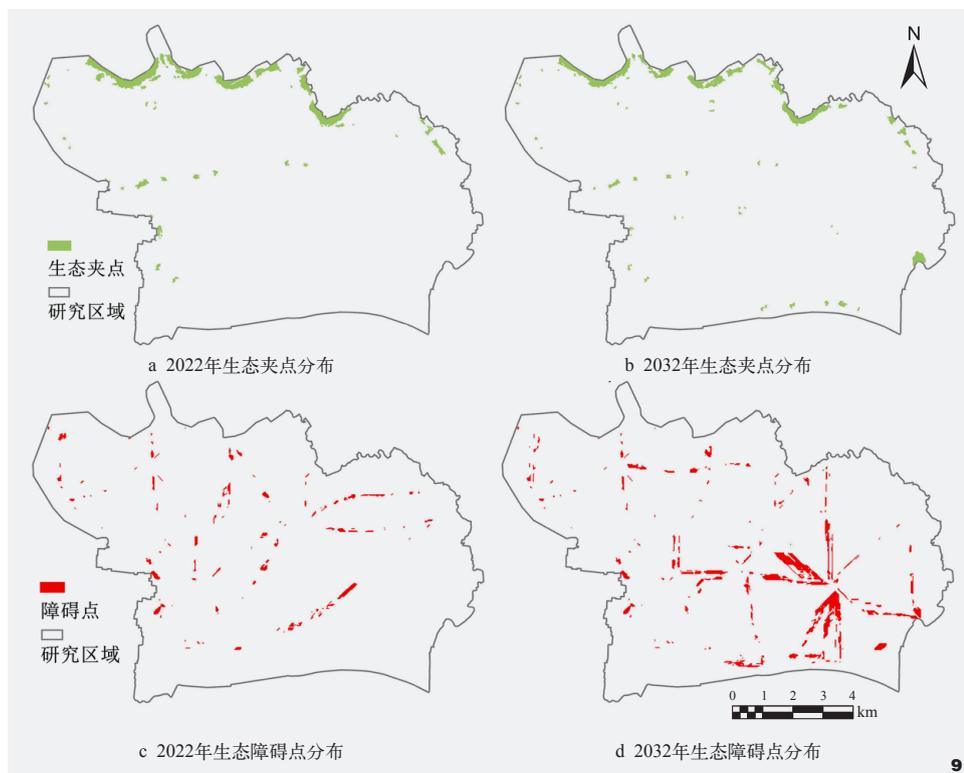


图9 研究区生态夹点和生态障碍点空间分布  
Fig. 9 Spatial distribution of ecological pinchpoints and barrier point of study district

地和关键廊道区域，生态夹点多穿过林地，对生态连通性和物种迁徙作用重要，但此区域景观破碎化较为严重，生态风险较高。中部生态夹点面积较小，东西横向沟通作用强，且对于沟通南北之间的物质能量流动有重要作用。2032年生态夹点面积共计53.1 hm<sup>2</sup>，空间分布仍集中于北部，但相较2022年生态夹点面积减少了61.56%，且北部连续生态夹点斑块面积有所降低，尤其在研究区域东北部出现新夹点斑块，但仍具有破碎性。中部生态夹点较为稳定，未出现大幅增减情况。而在研究区域南侧靠近渭河流域北岸部分用地中，新增生态夹点面积较小且排列规则。可见城市发展情景且重点保护东南部生态用地情况下，生态空间连通性和生态系统稳定性得以提升，生态安全格局良好仍有修复空间。

生态障碍点是在生态廊道中阻力值显著增高的区域，对于生态源地间连通性有显著影响，本研究通过Barrier Mapper工具对研究区域的累积电流恢复值计算，需要修复的生态障碍点见图9-c和图9-d，2022年共识别出生态障碍点146.97 hm<sup>2</sup>，生态障碍点较生态夹点分布更为分散，主要分布在耕地和城镇建设用地，人类活动强度较高，对于物种迁徙和能量流动造成一定干扰。2032年城市发展情景识别生态障碍点共439.47 hm<sup>2</sup>，在研究区域东部面积显著提升，城镇建设用地占主导地位，城市扩张导致生态系统之间沟通阻力上升，且生态障碍点集中分布于林地和水体之间沟通的生态廊道处，长度较长，电流密度大。为保护和恢复生态系统健康及生态安全格局，需要对生态障碍点所在区域采取有效

的生态管理措施，以降低生态阻力，加强生态系统连通性和流动性。

### 3.3.2 杨凌地区生态安全格局修复与保护

结合杨凌地区2022年景观生态风险及城市发展情景2032年生态格局，为保证生态风险不再增加及生态格局安全稳定，需要从生态源地、生态廊道、生态夹点和生态障碍点并与绿地系统规划协同策略(图10)。针对源地保护，提出三级管控机制：核心区禁止开发活动，缓冲区限制建设强度，外围区通过耕地轮作补贴实施生态补偿。同时，在源地间500~800 m间隔带布局直径≥30 m的生态湿地，形成生物迁徙踏脚石网络，构成五泉镇生态林区、渭河湿地核心区及现代农业示范园生态隔离带三大战略源地；针对廊道修复，关键廊道是跨区域物种迁徙通道，加强乔灌草复层结构及水源涵养林建设，部分生态风险较高区域设置物种通道和微地形改造，重要廊道是区域生态服务廊道，种植连续郁闭度≥0.6的乔木带，潜力廊道作为局地生物迁徙通道设置灌木篱墙及枯木保留；生态夹点实施分类强化与保护兼顾措施，对于廊道交汇型夹点设置生态滞留点并多层次种植食源植物，在两种生态系统界面的生境过渡型夹点设置优势种更替的渐变式隔离带，人为干扰型夹点建设林带并发展有机农业，减小生态阻力；生态障碍点以改进和清除为主，研究区域东南部因建设用地造成的障碍点，通过合理城市规划和土地利用调整，拆除或改造部分低效建筑用地开辟生态通道，降低生态阻力，推进城市蓝绿空间营造，北部自然因素形成的生态障碍点，地形复杂区域，通过生态工程措施改造，促进生态流通，农村居民点分散形成的生态障碍点进行居民点集约化调整，优化农村空间结构并提

高城镇居民绿地覆盖率。

绿地系统协同策略构建杨凌地区生态安全格局，形成“多廊多核”空间结构(图11)：中心城区依托城市公园构成服务圈，北部边界整合郊野绿地形成生态屏障，重点建设城镇建设用和生态用地之间廊道，建立生态廊道界面过渡带，在建成区与生态空间交界处设置20~50 m缓冲带，种植本土乔木树群抗污染树种。在社区尺度新增单点面积0.3~0.5 hm<sup>2</sup>的口袋公园形成多核点状结构加强生物栖息环境适宜度。生态源地增加绿地面积、优化绿地布局，增强生态功能，在重要源地和林地周边建设缓冲绿地；生态廊道建设与绿地系统结合打造绿色生态廊道，河流和道路两侧规划连续绿化带；生态夹点区域通过本土植被种植恢复连通性；生态障碍点区域在中心城区面积较大，城镇建设用地密集区规划小型绿地斑块，增强生态连通性。

#### 4 讨论

土地利用动态变化是影响景观格局改变的重要因素，生态用地提升对景观格局稳定发展有促进作用，由于土地利用数据、预测模型、时间跨度差异等因素，研究结果会有所差异。研究区域在20年间耕地、建设用地面积始终领先，耕地转化为建设用地面积较大，这与匡文慧等<sup>[27]</sup>对于中国2015-2020年土地利用变化空间特征研究结果相吻合，耕地转为其他用地与城镇化进程相关，随社会经济发展，传统农业向现代农业转变要求经济生态协同发展。

基于PLUS—电路理论耦合模型模拟未来情景土地利用格局及生态安全格局、评估研究区域景观生态风险可为决策者在优化土地利用结构、加强生态保护、推动产业升级方面提出建议。城市发展情景下建设用地扩张占用耕地、草地，重视经济快速发展而忽视生态保护，这与王韧等<sup>[22]</sup>研究结果大致相符。2032年受城市扩张影响，研究区域东南部生态阻力上升，区域潜在廊道脆弱性高，易受人为因素干扰，需加强廊道修复并合理调整潜在廊道景观结构以保证其生境质量恢复，提升区域生态环境对自然因素或人为因素干扰的抵御力与承载力，陈振等<sup>[28]</sup>在研究中得出相似结论。基于分析，提倡在保证经济稳步发展的前提下加强林地和草地的建设，改善区域内绿地系统相对缺失且破碎化程度较高的现状，在农业现代化进程中，耕地资源保护与生态空间优化的协同发展对农业高新技术产业示范区至关重要。不同于普通农业区，“农科城”属性使其面临农业科研用地扩张、城乡融合度高的挑战，传统蔓延式城市扩张易降低生态斑块间连通性。建议构建“多廊多核”空间结构，通过加强生态保护、优化土地利用

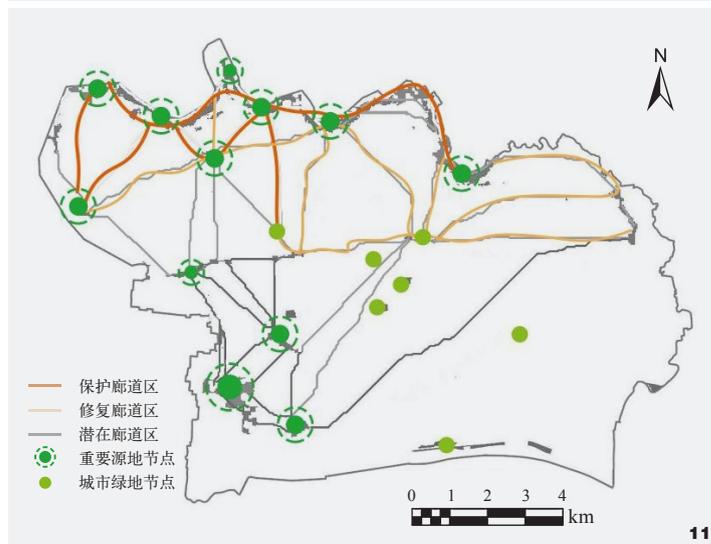
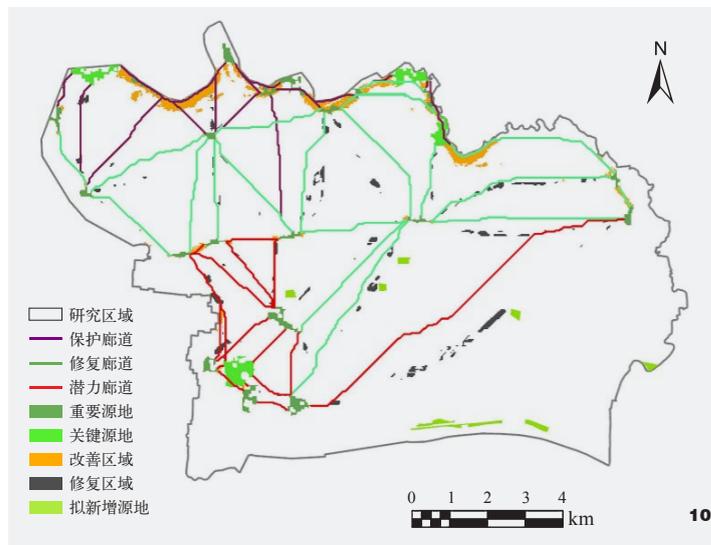


图10 研究区生态安全格局  
Fig. 10 Ecological security pattern of study district

图11 “多廊多核”空间结构  
Fig. 11 “Multiple corridors and multiple coress” spatial structure

结构，城市和郊野绿地同步建设形成双环生态屏障，修复城镇建设用和生态用地之间廊道并加强城镇内部点状绿地建设，增强生态连通性，形成“农业科研—生态安全—城镇发展”三位一体的空间格局。基于电路理论的生态安全格局优化，为农业示范区提供引导城市合理扩张，避免对生态敏感区域的破坏的规划范式。

本研究的方法组合基于土地利用数据，利用PLUS模型分析及预测土地利用景观格局，InVEST模型识别生态系统服务价值及电路理论构建生态安全格局，适应性广泛，容错机制完善<sup>[29]</sup>。但仍存在局限性：

驱动因子数据获取困难,无法全面还原土地利用变化因素;PLUS模型模拟基于现状土地利用数据,难以根据政策倾斜和城市发展重心精确预测未来城市景观格局发展态势。针对研究区域下一步的研究方向是提高研究区域相关数据的精度,结合城市发展政策提出落地性措施。

## 5 结论

(1) 近20年土地利用呈现耕地主导与城镇化扩张并存的动态特征,耕地与建设用地间频繁转化导致景观格局复杂化与破碎化加剧,斑块密度增加但连通性下降,生态系统稳定性下降,城市发展情景下2032年整体呈现东建西耕格局。

(2) 2022-2032年,生态源地数量和面积均增加,但分布不均匀,稳定性有待提升,随城市发展,生态阻力值上升,分布格局东部主要城区高于西部五泉镇和揉谷镇。2022-2032年生态廊道数量增多,分布变化明显;生态夹点在2032年面积减少且出现新夹点;生态障碍点在2032年面积增大且分布集中于城镇建设用地和林地-水体交界处廊道。

(3) 杨凌地区应实施差异化生态修复保护措施,建立生态源地管控机制,按级别强化生态廊道建设,分类保护生态夹点,消除生态障碍点。构建“多廊多核”空间结构,提升区域生态安全水平,未来需强化城市集约化开发,修复北部高破碎化区域,提升生态连通性,实现生态可持续发展。

注:文中图表均由作者绘制。

## 参考文献

- [1] 卓健,翟端强,毛衍云. 闽三角城市群景观生态风险时空演变分析[J]. 风景园林, 2024, 31(09): 111-119.
- [2] 朱青,蔡永立. 基于“风险—健康—服务”的生态安全评价框架构建及模拟预测——以淮河流域为例[J]. 自然资源学报, 2024, 39(11): 2676-2690.
- [3] ZHOU Y, YAO J, LI P Y, et al. Multilevel Green Space Ecological Network Collaborative Optimization From the Perspective of Scale Effect[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112562.
- [4] OLOWOYEYE T, ABEGUNRIN G, SOJKA M, et al. Are Agroecosystem Services Under Threat? Examining the Influence of Climate Externalities on Ecosystem Stability[J]. Atmosphere, 2024, 15(12): 1-22.
- [5] XU M L, MATSUSHIMA H. Multi-dimensional Landscape Ecological Risk Assessment and Its Drivers in Coastal Areas[J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168183.
- [6] KLAR N, HERRMANN M, HENNING-HAHN M, et al. Between Ecological Theory and Planning Practice: (Re-) Connecting Forest Patches for the Wildcat in Lower Saxony, Germany[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(04): 376-384.
- [7] KESHTKAR M, MOBARGHAEI N, SAYAHNIA R, et al. Landscape Ecological Security Response to Urban Growth in Southern Zagros Biome, Iran[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110577.
- [8] VERWEIJ E E, CARLOS P, ASSISJC. Identifying Urban Hotspots of Potential Bird and Pedestrian Encounters Through Corridor Overlap[J]. Urban Ecosystems, 2025, 28(02): 73.
- [9] 苏香燕,周妍,张成鹏,等. 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程空间布局与生物多样性保护需求的关联性分析[J]. 生态学报, 2025(11): 1-11.
- [10] 马小宾,章锦河,孙怡,等. 长江经济带旅游生态安全时空格局及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(05): 376-388.
- [11] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划, 2010, 34(02): 19-24.
- [12] 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(01): 190-203.
- [13] 丁金华,江大庆,钱晶. 城市扩张情景下苏南水网景观生态风险评价与生态安全格局构建——以苏州白蚬湖片区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(09): 2059-2070.
- [14] 康世磊,岳邦端. 风景园林规划中的格局-过程关系理论研究综述[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(01): 139-143.
- [15] ZHAO J Y, LI Z Y, WU J, et al. Ecological Spatial Network Optimization of Carbon Sink Patches for Enhanced Carbon Sink in Wuhan Metropolitan Area, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 165: 112177.
- [16] 叶洁楠,黄亦周,贾舒皓,等. 基于MSPA和MCR模型的贺兰山生态安全网络评价与优化[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1-12[2025-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20241009.1750.002.html>
- [17] 孟德惠,孙迺,吴远翔,等. 机器学习在生态安全领域中的应用综述[J]. 生态学报, 2025, 45(03): 1503-1517.
- [18] 魏胜蓉,何婷婷,付迎春,等. 珠三角国家森林城市群生态安全格局变化与空间优化识别[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8094-8109.
- [19] 刘琪琪,刘媛媛,唐晓岚. 国土空间视角下长三角城市群自然保护地连通性评估与生态修复重点区域识别[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1-10[2025-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20250319.1705.012.html>
- [20] ARORA A, PANDEY M, MISHRA V N, et al. Comparative Evaluation of Geospatial Scenario-Based Land Change Simulation Models Using Landscape Metrics[J]. Ecological Indicators, 2021, 128: 107810.
- [21] MASALVAD K S, PATIL C, VARDHAN A R, et al. Predicting Land Use Changes and Ecosystem Service Impacts with CA-Markov and Machine Learning Techniques[J]. Environment, Development and Sustainability, 2025.
- [22] 王韧,王嘉睿,颜建军,等. 基于遗传算法-PLUS模型的黄河流域景观生态脆弱性多情景模拟[J]. 生态学报, 2025, 45(02): 567-585.
- [23] 陈秋计,谢米米,南丹丹,等. 基于PLUS-InVEST模型的咸阳市生态系统碳储量时空演变与预测[J/OL]. 自然资源遥感, 1-11[2025-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.P.20241211.1325.016.html>
- [24] 邹珮雯,徐昉. 生态安全格局构建及景观生态风险预测——以赛罕乌拉国家级自然保护区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9981-9993.
- [25] GHOSH S, CHATTERJEE N D, DINDA S. Urban Ecological Security Assessment and Forecasting Using Integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov Models: A Case Study on Kolkata Metropolitan Area, India[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 68: 102773.
- [26] 赵耀,龙彬,张菁. 区域尺度下的传统村落景观安全格局构建与保护策略研究——以云南腾冲为例[J]. 中国园林, 2023, 39(09): 67-73.
- [27] 匡文慧,张树文,杜国明,等. 2015-2020年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析[J]. 地理学报, 2022, 77(05): 1056-1071.
- [28] 陈振,郭杰,张雪薇,等. 耦合景观生态安全格局的南京市“三生”空间多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2024, 31(04): 383-394.
- [29] 刘小玉,李士杰,何海洋,等. 基于InVEST和PLUS模型下的土地利用变化及生境质量演变分析:以汉中盆地为例[J]. 西北地质, 2024, 57(04): 271-284.