DOI: 10.20103/j.stxb.202401140124

李涛,高毅华,王姣娥.西成高铁陕西段沿线土地利用和景观格局变化的梯度效应.生态学报,2025,45(4):1629-1645. Li T, Gao Y H, Wang J E.Gradient effect of changes in land use and landscape patterns along the of Shaanxi segment Xi'an-Chengdu high-speed railway line.Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):1629-1645.

西成高铁陕西段沿线土地利用和景观格局变化的梯度 效应

李 涛^{1,2},高毅华¹,王姣娥^{2,3,*}

1 陕西师范大学西北国土资源研究中心,西安 710119
 2 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室,北京 100101
 3 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049

摘要:迅速发展的高速铁路廊道正在对沿线区域土地利用和景观格局产生深远影响,科学分析高铁沿线土地利用和景观格局变 化的梯度效应,理解以高速铁路为代表的人类活动对生态系统的影响,对加强高铁规划-建设-运营过程中景观生态保护、构建 可持续高速铁路网络具有重要意义。以西成高铁陕西段两侧 10km 缓冲区为研究区,划分 1km 等间距缓冲带,基于西成高铁陕 西段建设前后(2010年和 2018年)的土地利用数据,分析缓冲区、缓冲带内土地利用和景观格局变化情况,并分段揭示高铁线 路影响的梯度效应范围。结果表明:(1)耕地、林地和草地是西成高铁陕西段沿线缓冲区内主要景观类型。高铁线路建设开通 增加了以建设用地为代表的人类活动区域。(2)高铁线路建设开通使得沿线区域景观整体异质性呈微弱增强趋势,形状则呈 规则化趋势。耕地景观斑块变得破碎且分散,但形状变得规则。建设用地破碎化程度降低,连通和聚集程度呈加强态势。(3) 高铁线路建设开通对沿线区域景观格局的影响具有显著的距离衰减梯度效应,影响范围呈现出秦岭段(1.3km)<巴山段 (1.5km)<关中平原段(2.5km)<汉中盆地段(5.6km)的分布特征,这一范围亦是研究区沿线景观生态保护的重点区域。 关键词:高速铁路;景观格局;梯度效应;距离衰减;秦岭

Gradient effect of changes in land use and landscape patterns along the of Shaanxi segment Xi'an-Chengdu high-speed railway line

LI Tao^{1,2}, GAO Yihua¹, WANG Jiaoe^{2,3,*}

1 Northwest Land and Resources Research Center, Shaanxi Normal University, Xi 'an 710119, China

2 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Analysis and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Although the socio-economic development benefits from establishment of transport infrastructures, their unreasonable construction also pose profound negative impact on ecological systems and sustainability. In China, the rapid development of high-speed railway (HSR) network has had a large impact on the changes in land use and landscape patterns along the routes. Therefore, scientific analysis of the gradient effect of the changes in the land use and landscape pattern along the high-speed railway routes, and then understanding the impacts of human activities on ecosystems represented by high-speed railroads is of great significance in enhancing landscape ecological protection and building a sustainable high-speed railway network. The Xi'an-Chengdu high-speed railway connecting the hub city of northwestern

收稿日期:2024-01-14; 网络出版日期:2024-11-06

基金项目:国家社会科学基金重大项目(20&ZD099);国家自然科学基金项目(42371189);中央高校基本科研业务费项目(24ZYYB017)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangje@igsnrr.ac.cn

China, Xi'an with the hub city of southwestern China, Chengdu was launched in December 2012 and operation started in December 2017. As China's first high-speed railway crossing the Qinling Mountains, it is highly typical to explore the disturbing impacts of this high-speed railway line on land use and landscape patterns along the route. Against this background, this study takes the 10-km buffer zone on both sides of the Xi'an-Chengdu high-speed railway as the study area, divides the 1-km equally spaced buffer zone, and analyzes the changes in land use and landscape patterns in the buffer zone and buffer zone based on land use data before and after the construction of the Xicheng high-speed railway (2010 and 2018) to reveal the gradient effect of the impacts of the high-speed railway line. The results show that: (1) Cultivated land, woodland and grassland are the main landscape types in the buffer zone along the Xicheng high-speed rail line. The opening of the HSR line construction increased the human activity area represented by construction land. (2) Under the influence of the construction and opening of high-speed rail lines, the degree of land use shows significant neighboring high-speed rail pointing and distance attenuation gradient effects, and the area with the largest increase in the degree of land use is located within 1km from the high-speed rail line, showing the trend of agglomeration under the highspeed rail pointing. (3) The impact of the opening of the high-speed rail line construction on the landscape pattern has a significant distance attenuation gradient effect. The effect zones show the distribution characteristics of Qinling section (1.3km) < Bashan section (1.5km) < Guanzhong plain section (2.5km) < Hanzhong basin section (5.6km). These effect zones are also the key area of landscape ecological protection along the study area.

Key Words: high-speed railway; landscape pattern; gradient effect; distance decay; the Qinling Mountains

开展重大交通工程的自然生态效应评估对掌握以交通工程为代表的人类活动对生态系统格局、过程和功能变化的影响具有重大意义,一直是地理学与生态学等相关学科关注的核心议题^[1-3]。公路、铁路等线性交通廊道作为景观构成的关键要素,其修建和运营直接或间接的通过影响人类活动强度,通过点-廊道-网络的综合作用引起土地利用/覆被和景观格局变化,进而影响生态过程和生态功能^[4-5]。技术经济和服务特征以及所处区位差异使得不同类型的线性交通廊道所产生的土地利用和景观生态效应也具有显著差异,学术界专门提出与道路生态学相对应的铁路生态学予以强调^[6]。高速铁路作为人类历史上的重大出行方式变革,自1964年世界上第一条高速铁路—日本东海道新干线开通以来,全球范围内的高速铁路得到了迅速发展。中国高铁虽然起步较晚,但发展迅速,截至2023年底,中国高铁运营总里程已达4.5万km,占全球总里程的比重超过60%。据《新时代交通强国铁路先行规划纲要》,到2035年,中国高铁预计通车里程将达到7万km,实现50万人口以上城市高铁通达。大规模、广覆盖、途径区域生态环境多样、点多线长的中国高铁线性廊道正在显著作用于土地利用变化和景观格局,亟需学者关注。通过分析高铁沿线土地利用和景观格局变化的梯度效应,判断高铁建设的影响范围,对加强高速铁路规划-建设-运营过程中景观生态保护、构建可持续高速铁路网络具有重要意义。

道路景观生态效应主要关注道路、交通流量以及周边环境之间的交互作用,涉及道路对土地利用和景观 格局,生态过程和功能的影响,从 20 世纪 90 年代开始逐渐受到学者的关注^[7-8]。已有研究在全球、国家和典 型区域(城市群、重要生态功能区)探讨了单一道路或道路网的景观生态效应,主要包括:(1)道路建设与运营 对土地利用和景观格局的影响研究,基于空间分析、统计以及机器学习等方法揭示和模拟预测道路建设占用 与运营引起的土地利用/覆被变化及由此产生的景观格局变化^[5,9-12]。影响域是核心,通过建立缓冲区,分析 道路/道路网的缓冲区内土地利用和景观格局的变化^[13-15],进而揭示到线性道路廊道不同距离内景观格局变 化的尺度效应或梯度效应^[16]。(2)道路建设与运营的生态效应,基于斑块-走廊-基质模型,道路对原有土地 利用景观的破碎与分割作用直接影响了周边环境的物理化学与生物过程,相关研究围绕物种多样性、重金属 积累、生态系统服务、生态风险等方面展开^[17-20]。不同道路等级、类型对于土地利用和景观格局的影响不尽 一致,大多研究认为道路对景观产生了显著的破碎作用,且随着路网等级的降低和密度的增加,破碎化程度亦 逐渐增加^[11,21-22]。与丰富的公路研究相比,少量研究探讨了铁路廊道的景观生态效应,如中老铁路对沿线整体和林地景观格局的影响范围分别为6km和8km^[23];丽香铁路廊道对沿线景观产生了显著的切割作用,且林地和草地所受影响最大,在600m缓冲区内的尺度效应最为显著^[24],在黄土高原地区,沿线1.5km范围以内是铁路建设的强干扰区,4km范围以外影响可以基本忽略^[25]。针对中国迅速发展的高速铁路廊道的研究尚不多见,多数研究利用计量经济模型探讨了高铁开通所带来的可达性和连通性提升对土地利用变化的影响^[26-28]。何丹等^[13]对全国高铁沿线20km缓冲区范围内土地利用和景观格局变化进行了分析。

已有研究普遍得出线性交通廊道的建设会带来土地利用变化和加剧景观破碎化的结论,但由于道路类型、道路生命周期阶段、沿途地理环境等的差异,具体影响范围、影响路径等亦不一样。换句话说,道路的景观 生态效应具有因时因地而异的特征。同时,与丰富的公路研究相比,关于铁路景观生态效应的研究还较 少^[29]。据此,面对中国高速铁路网快速扩张的背景,本文拟对高速铁路廊道的景观生态效应展开研究。西成 高铁连接西部两大中心城市—西安和成都,是中国"八纵八横"高铁网中京昆通道的重要组成,也是中国首条 穿越秦岭的高速铁路,具有重要的战略意义和研究典型性。本研究以西成高铁陕西段作为研究对象,研究高 铁建设前后沿线土地利用和景观格局变化,分段揭示土地利用和景观格局变化的梯度效应。本文旨在揭示跨 越典型地理区域的高速铁路对沿线土地利用和景观格局变化的特征与趋势,进一步丰富线性交通廊道景观生 态效应研究的同时,也为高速铁路的可持续规划建设提供科学参考。

1 研究区域、数据来源与研究方法

1.1 研究区域

西成高铁是连接西北、西南地区两大中心城市西安和成都的重要客运通道,在2017年12月正式通车后, 第一年便开行列车4.3万余趟,发送旅客超1720万人次。作为国家"八纵八横"中京昆主通道的重要组成,西 成高铁的建成通车进一步加强了西北与西南区域的联系,支撑西部大开发新格局的形成。西成高铁陕西段 (106°16′—108°56′E,32°49′—34°22′N)全长343.6km(其中桥梁127km,隧道189km),于2012年12月开工 建设,2017年12月正式开通运营。途径西安市区、宁陕县、佛坪县、洋县、城固县、汉中市区和宁强县,地形自 北向南途径关中平原、秦岭山区、汉中平原和大巴山区(图1)。众所周知,秦岭是中国南北地理分界线和重要 的生态安全屏障,是我国的"中央水塔",具有土壤保持、水源涵养等诸多生态功能。作为中国首条穿越秦岭 的高铁,探究西成高铁陕西段对沿线区域土地利用和景观格局的干扰特征具有突出的典型性。

1.2 数据来源

本文的数据主要涉及高铁建设前后的土地利用数据和西成高铁陕西段线路数据。本文以西成高铁建设 前后的 2010 年和 2018 年土地利用数据进行对比,土地利用数据来源于中科院资源环境科学数据中心的中国 多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)^[30],该数据集以 Landsat 遥感影像为主要信息源目视解译生成, 分辨率为 30m,将土地利用类型归为 6 个一级类(耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地)和 25 个二 级类,其中耕地数据分类精度为 95%,其他地类数据分类精度在 85%以上,符合研究需要。铁路线路通过在 GIS 中加载天地图后矢量化获取(获取时间为 2023 年 3 月),默认坐标系为 CGCS2000,进一步将矢量化后的 线路数据投影到土地利用数据所使用的坐标系(Krasovsky_1940_Albers)。

1.3 研究方法

本文整体研究思路如图 2 所示,主要包括西成高铁陕西段建设前后土地利用与景观格局变化基础分析, 并在此基础上分段揭示高铁线路建设对景观格局变化的拐点和梯度效应。

1.3.1 分段缓冲区和缓冲带划分

西成高铁陕西段途径关中平原、秦岭山区、汉中盆地和大巴山区四个自然地理条件和经济社会发展基础 具有显著差异的地区,本文将西成高铁陕西段划分为关中平原段、秦岭段、汉中盆地段和巴山段,并划定缓冲 区作为道路可能的影响域,分析缓冲区内土地利用和景观格局变化是研究道路景观生态效应的主要方法^[11]。



图 1 听无区域

Fig.1 The study area



关于缓冲区划分标准,参考已有线性铁路廊道包括普铁和高铁划定的缓冲区范围^[5,22-23],结合研究区实际情况,将高铁两侧缓冲区范围预设为10km,对4个路段试验了10级缓冲区,并通过逐级缩小缓冲区范围以找到不同分段适宜的研究尺度,进一步,将确定的缓冲区划分为10级等间距的缓冲带,对不同距离缓冲带内景观格局变化进行梯度分析。

1.3.2 土地利用和景观格局变化分析

土地利用变化使用常规的土地利用转移矩阵分析,景观格局主要通过景观格局指数展开分析,包括斑块密度(PD)、面积加权平均形状指数(SHAPE_AM)、连通性(COHESION)、香农多样性指数(SHDI)、斑块平均

面积(AREA_MN)、边缘密度(ED)等指标。各指标计算公式和含义如表1所示。

]	Formulas and meanings of landscape pattern indexes	
指标类型 Index type	指标名称 Index name	计算公式 Calculation formula	指标描述 Index description
斑块指标 Patch index	斑块密度(PD)	$PD = \frac{\sum_{j=1}^{n} N_j}{A}$ $\sum_{j=1}^{n} N_j \text{ 是某} - \frac{1}{3} \frac{1}{3$	值越大,景观破碎化程度越大
	斑块平均面积 (AREA_MN)	$AREA_MN = \frac{A}{\sum_{j=1}^{n} N_j}$ <i>A</i> 是某一景观类型面积或者景观总面积, $\sum_{j=1}^{n} N_j$ 是某一景观类型的斑块数量或者景观所有斑块数量	景观总体或某一景观类型内斑 块的平均大小。值越大,表明景 观斑块破碎化程度越低
	边缘密度(ED)	$ED = \frac{E}{A}(10,000)$ E 为景观内的斑块的边缘总长度(m);A 为景观总面积(m ²)	景观范围内单位面积上异质景 观要素斑块间的边缘长度。值 越大,异质景观斑块越多,景观 越破碎
形状指标 Shape index	面积加权平均形状 指数(SHAPE_AM)	SHAPE_AM = $\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{4\pi A_i^2}{C_i^2}\right)}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$ A _i 是某一景观类型斑块或景观内任一斑块的面积, C _i 是某一景观类型斑块或景观内任一斑块的周长	各个斑块形状指数的加权平均 值,取值范围为 [1, +∞)。值 越大,说明区域内有较多面积较 大,形状较规则的斑块,整体呈 规则、紧凑格局
	面积加权平均分维数(FRAC_AM)	$\begin{aligned} & \text{FRAC}_{AM} = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \left[\frac{2\ln(0.25 P_{ij})}{\ln(a_{ij})} \left(\frac{a_{ij}}{A} \right) \right] \\ & a_{ij} $ 是斑块 <i>ij</i> 的面积, <i>P</i> _{ij} 是斑块 <i>ij</i> 的周长, <i>m</i> 指斑块类型数目, <i>n</i> 是各类型包含的斑块数目 \end{aligned}	景观形状的复杂程度,取值范 围 ^[1-2] ,斑块形状趋于正方形 时,值趋于1,形状越复杂,值越 趋于2
聚集度指标 Aggregation index	蔓延度(CONTAG)	$\begin{aligned} \text{CONTAG} &= \left[\underbrace{\sum_{i=1}^{m} \sum_{i=1}^{m} \left[\left(P_{i}(\frac{g_{ik}}{\sum_{i=1}^{m} g_{ik}}) \right) \left(ln P_{i}(\frac{g_{ik}}{\sum_{i=1}^{m} g_{ik}}) \right) \right]}_{2lnm} \right] \times 100 \\ P_{i} \mathbb{E} \\ \mathbb{F}_{i} \mathbb{E} \\ \mathbb{E}$	反映景观的联通和延展程度,值 越大,景观物理连通性越好
	分裂度指数 (DIVISION)	DIVISION = $\left[1 - \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{a_{ij}}{A}\right)^{2}\right]$ a_{ij} 表示斑块 <i>ij</i> 的面积, <i>A</i> 表示景观总面积	表征景观破碎化程度,指数越 大,景观中斑块面积越小,景观 越复杂
	分离度指数 (SPLIT)	SPLIT = $\frac{A^2}{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} a_{ij}^2}$ $a_{ij} \neq \pi, A \neq \pi$	表征景观破碎化程度,指数越 大,景观斑块越破碎
	聚集度(AI)	$AI = \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{g_{ii}}{\max - g_{ii}} \right) P_i \times 100$ $g_{ii} = E \pm - i + \frac{1}{2} \pm i \pm $	取值范围为(0,100),指数越高, 说明同类元素在空间上越聚集

表1 景观格局指数公式及意义

Formulas a	nd meaning	of landscane	nattern	indexes

1634

/h _L

缤表			
指标类型 Index type	指标名称 Index name	计算公式 Calculation formula	指标描述 Index description
多样性指标 Diversity index	香农多样性指数 (SHDI)	SHDI = $-\sum_{i=1}^{m} P_i \ln(P_i)$ P_i 是某一景观类型的比例, <i>m</i> 是景观类型总数	反映景观异质性和均匀度,取值 范围 [0, +∞)。值越大,景观 类型越多样,分布越均匀
连接度指标 Connectivity index	连接性指数 (COHESION)	COHESION = $[1 - (\frac{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} P_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} P_{ij} \sqrt{a_{ij}}})] \times (1 - \frac{1}{\sqrt{Z}})^{-1} \times 100$ m 为景观类型数量, n 为某景观类型的斑块数量。 P_{ij} 是景观类型 i 中斑块总周长, a_{ij} 是景观类型 i 中斑块总面积, Z 是景观中斑块总 数量	表征斑块空间连通的程度,取值 范围为(0,100)。值越大,景观 斑块越聚集,连通性越强

1.3.3 梯度分析和影响范围的判定

根据随着到道路距离增加,道路对沿线景观的影响呈降低趋势的研究结论,本文对缓冲带景观格局变化 与距离进行二次函数拟合,如果拟合效果显著且存在拐点,则认为拐点即是高铁影响的距离阈值。

2 结果分析

2.1 西成高铁沿线缓冲区土地利用变化特征

西成高铁沿线缓冲区内耕地、林地和草地是主要景观类型(表 2)。其中,耕地面积占比最大,为 37%—40%;其次是草地和林地,占比分别约为 27%和 24%,草地占比略高于林地;水域和未利用地面积占比最低,合计约 2%。西成高铁建成开通后,以建设用地为代表的人类活动区域显著增加,沿线缓冲区内建设用地面积占比由高铁开通前的 7.99%增加到了开通后的 10.17%。在土地利用景观类型转移方面,高铁建设前后主要发生了耕地向建设用地和草地、林地向草地,水域向建设用地的净转移(图 3)。具体来看,耕地面积显著减小,面积减少 17350.56hm²,占比从 2010 年的 39.45%下降到了 2018 年的 36.93%,主要向建设用地净转出 14891.91hm²、草地 2512.49hm²;林地虽有建设用地净转入 649.35hm²,但是向草地净转出 1436.33hm²,面积减少 809.52hm²;水域减少 810.65hm²,主要向建设用地净转出 559.39hm²;建设用地面积增加 15006.94hm²,占比从 7.99%增加到 10.17%。草地面积也呈现微弱增加,增加 3847.98hm²,占比从 26.31%增加到 26.87%。未利用地面积亦呈微弱增加趋势,为 115.8hm²。

	Table 2 Land use structu	re of the buller zone	s along the Al an-Chengdu HSK	line, 2010—2018	
土地利用类型 land use types	2010	2018	土地利用类型 land use types	2010	2018
耕地 Crop land	39.45	36.93	水域 Water (Sea)	1.88	1.76
林地 Forest land	24.35	24.23	建设用地 Construction	7.99	10.17
草地 Grass land	26.31	26.87	未利用地 Unused land	0.02	0.04

表 2 2010—2018 年西成高铁沿线缓冲区土地利用结构/%

......

综合来看,高铁沿线以建设用地为代表的人类活动区域占比显著上升,耕地景观占比下降,林地、水域等 景观类型占比基本维持不变。空间上,沿途区域土地利用变化与地形地势特征密切相关,耕地、建设用地和水 域主要分布在关中平原和汉中盆地等地势平坦地区,林地和草地主要分布在秦岭山区和大巴山区段(图4)。 2010—2018年间,耕地转化为建设用地的斑块主要分布在关中平原和汉中盆地段,占比83%。林地转化为草 地的斑块主要分布在秦岭山区和大巴山区段较高海拔地区,占比98%左右。耕地转化为草地的斑块主要分 布在秦岭山区和大巴山区段较低海拔地区,占比为74%。水域向建设用地的转化主要分布在关中平原段,占 比达到85%。

2.2 西成高铁沿线景观格局变化的梯度效应2.2.1 整体和类型水平景观格局指数变化

本部分分别从景观整体水平和景观类型水平上分 析西成高铁建设与开通对沿线景观格局变化的梯度效 应。图5表示整体水平上景观格局指数在高铁建设与 开通前后的距离梯度分异。其中,斑块密度(PD)在西 成高铁建设前后基本保持稳定,2010年和2018年均在 为2.5个/km²左右,这就表明高铁沿线区域整体景观破 碎化程度并未因西成高铁的建设而发生明显下降或提 升,这可能与高铁线路通过秦岭和大巴山等区域对人类 活动的严格管控具有直接关系,西成高铁陕西段在规划 期通过大规模选线尽量避开自然保护区,在建设期采取 隧道、高架桥的方式和其他保护措施尽量避免分割生境 和保障鸟类及其他动物迁移。形状指数(SHAPE_AM) 有所下降,主要集中在距离高铁1km 范围内,由2010 年的 4.88 下降到 2018 年的 4.36,表明高铁线路的开通 对原有景观斑块产生了切割。同样,与高铁开通前的 2010年相比,表征景观斑块集聚连通程度的连接性指



图 3 2010—2018 年西成高铁沿线缓冲区土地利用净转移/hm² Fig.3 Net land use transfer in the buffer zone along the Xi'an-Chengdu HSR line, 2010—2018





数(COHESION)亦呈现微弱下降趋势,进一步表明西成高铁的开通对景观斑块的切割使得斑块分散程度微弱 增加。香浓多样性指数(SHDI)在10km范围内均上升,且在1km范围内上升最为显著,从2010年的1.27上 升到2018年的1.34,表明西成高铁的建设使得近距离斑块呈现出复杂趋势。综合来看,西成高铁的建设开通 使得沿线区域景观整体异质性呈微弱增强趋势,且在1km范围内干扰效应最为显著,这可能与高铁建设后耕 地、林地、水域斑块之间的转化导致异质性增强相关,形状则呈规则化趋势,这与前文土地利用程度在高铁建 设后的小幅提升的结果也是相符合的。

45 卷



图 5 2010—2018 年西成高铁沿线景观格局指数距离梯度分异 Fig.5 Distance gradient divergence of landscape pattern indexes the along the Xi'an-Chengdu HSR line, 2010—2018

参考前述西成高铁建设与开通前后土地利用变化情况,本文选择变化显著的耕地和建设用地两类景观分析类型水平层面的景观格局变化情况。从耕地景观类型来看(图6),2010—2018年,耕地斑块密度(PD)呈上升态势,表明单位面积耕地斑块数量增加,破碎化程度有所上升,这可能与西成高铁建设开通前后耕地面积减少、破碎化致耕地斑块数量增加所致。与此相对应,斑块平均面积(AREA_MN)指数均值由 2010年的 56.92hm²下降到 2018年的 49.97hm²,最大值和最大下降幅度均出现在距高铁线路 1km 处,斑块平均面积 (AREA_MN)最大值由 2010年的 122.28hm²降低到 2018年的 98.38hm²,下降幅度达到 19.55%,不难理解,高 铁线路建设后,促进耕地斑块转变为建设用地和草地,导致耕地的破碎程度增加与耕地斑块平均面积显著减少。6—10km 处耕地斑块平均面积(AREA_MN)在高铁建设前后基本维持不变,这可能与高铁建设导致的耕 地面积和斑块数量同时减少有关。此外,耕地形状指数(SHAPE_AM)和聚集度指数(AI)亦均呈现出下降态势,二者均值分别由 2010年的 4.08%、92.76%减少到 2018年的 3.72%和 92.31%,与斑块平均面积指数 (AREA_MN)一样,两指标最大值和最大下降幅度亦出现在距高铁线路 1km 处。综合来看,西成高铁的建设 使得耕地面积减少的同时,耕地景观斑块变得破碎且分散,但形状变得规则。

建设用地景观格局指数变化情况如图 7 所示,不难看出,相较于整体景观和耕地类型景观,建设用地类型 景观格局在高铁建设前后变化较为复杂。2010—2018 年,建设用地斑块密度(PD)呈下降趋势,最大值和最 大降幅出现在距高铁线路 2km 处,由 2010 年 0.53 个/km²减少到 2018 年 0.44 个/km²,直接表明单位建设用 地面积的斑块数量在小幅减少,破碎化程度降低,这与西成高铁建设后建设用地面积增加,逐渐集中连片、斑 块数量减少直接相关。进一步观察图 9 可知,建设用地斑块密度(PD)下降幅度在 7km 范围内呈现出明显的 距离衰减效应。形状指数(SHAPE_AM)呈微弱上升趋势,均值由 2010 年的 2.05 增加到了 2018 年的 2.55,表 明随着西成高铁的建设与开通,建设用地面积增加的同时,亦表现出连片规整化趋势。从斑块平均面积 (AREA_MN)和聚集度指数(AI)来看,二者亦呈现出增加态势,二者均值分别由 2010 年的 19.37hm²、92.86% 增加到了 2018 年的 26.82hm²和 93.93%。综合来看,与耕地景观类型相反,高铁建设与开通导致建设用地面积在增加的同时,破碎化程度降低,连通和聚集程度呈加强态势。



图 6 2010—2018 年西成高铁沿线耕地景观格局指数梯度分异

Fig.6 Distance gradient divergence of cultivated land landscape pattern indexes along the Xi'an-Chengdu HSR line, 2010-2018





Fig.7 Distance gradient divergence of construction land landscape pattern indexes along the Xi'an-Chengdu HSR line, 2010-2018

2.2.2 西成高铁影响景观格局指数变化的拐点识别与梯度效应范围

依据前述划分的关中平原段、秦岭段、汉中盆地段和巴山段,分段识别西成高铁对沿途区域景观格局指数 变化的拐点和影响范围。通过对关中平原段高铁线路两侧分别逐级设置 10—1km 的缓冲区范围,分析各缓 冲带 2010—2018 年景观格局指数变化量与到高铁距离的二次函数关系,进而得到各指数变化量拟合显著性 和有拐点指数情况(表3)。当设置高铁两侧缓冲区范围为4km时,有9个景观格局指数变化量与距离的二次 函数拟合结果显著,且其中有7个指数有转折点,显著高于其他缓冲区设置方案,这就表明关中平原段西成高 铁线路对景观格局变化影响的适宜尺度是400m。在此基础上,本文进一步对2010—2018 年各缓冲带景观格 局指数变化量与距离梯度进行拟合,结果如图 8 所示。与高铁线路建设前相比,斑块密度(PD)、边缘密度 (ED)、分割度(DIVISION)、分离度(SPLIT)等指数明显下降,且在距高铁线路约 2.5km 处出现拐点;与此相对 应,斑块平均面积(AREA_MN)、连接性指数(COHESION)、多样性指数(SHDI)等 3 个指数值在高铁建设后 明显增加,除斑块平均面积(AREA_MN)外,其余两指数同样在距高铁线路 2.5km 左右时出现拐点。总体上 表明在西成高铁关中平原段两侧 4km 范围内,景观格局破碎化程度降低,景观斑块之间连通性增强,高铁线 路的对景观格局的梯度效应主要体现在 2.5km 左右范围内。

相较于地势平坦且具有突出经济社会发展优势的关中平原段,受地形地貌等因素限制,秦岭段西成高铁 线路对景观格局变化影响的适宜尺度是 200m,高铁线路对景观格局的梯度效应主要在 1.3km 范围内。从表 4 可以看出,当设置秦岭段高铁两侧缓冲区范围为 2km 时,有 6 个景观格局指数变化量与距离的二次函数拟 合结果显著,且存在转折点,表明以 200m 为缓冲间隔是揭示秦岭段西成高铁对景观格局变化影响的适宜尺





Fig.8 Relationship between distance and the change of each landscape index within the 4km buffer distance of the Guanzhong Plain section

度。同时,2010—2018 年各缓冲带景观格局指数变化量与距离梯度拟合曲线显示(图 9),2010—2018 年,分割度(DIVISION)、分离度(SPLIT)两指数的值成增加态势,变化量呈"U"型趋势,且在距高铁线路 1.3km 左右时指数增加量最低;形状指数(SHAPE_AM)、分维数(FRAC_AM)、蔓延度指数(CONAG)、连接性指数(COHESION)值总体下降,变化量呈倒"U"型趋势,在距高铁 1.3km 左右时指数变化量达到最大值,表明秦岭段高铁两侧 2km 范围内,高铁建设后,沿线景观破碎化程度加强,连通性程度下降,形状变得规则,且高铁线路的对景观格局的梯度效应体现在 1.3km 范围内。

Table 3 Statistics of inflection points of landscape pattern index in different buffer zones (Guanzhong Plain section)											
指标类型	指标名称	称 不同缓冲区范围 Different buffer ranges/km									
Index type	Index name	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
斑块指标	PD	>9	>9		<0		1.9	1.9 ***	1.8	1.3	0.8
Patch index	ED	<0	<0					2.1 *	1.9	1.3	0.7
	AREA_MN	8.1	7.8	6.1	6.3	4.6	>5	0.9 ***			0.8
形状指标	SHAPE_AM		5.1		4.8	4.2	3.4	>4			
Shape index	FRAC_AM		4.8		4.8	4.5	3	<0			
聚集度指标	CONTAG				3						0.7
Aggregation index	DIVISION	5.7	5.4	5	4.8	4.2	3.3	3.1 *			
	SPLIT	4.7	4.7				3.5	2.9 *			
多样性指标 Diversity index	SHDI		>8.1					2.6*	2.3		
连接度指标 Connectivity	COHESION	3.5	4.4			4.2	3.1	2.9*			0.7
	显著个数	6	9	2	6	5	7	9	3	2	5
	拐点个数	6	6	2	5	5	6	7	3	2	5

表 3 不同缓冲区范围内景观格局指数拐点统计(关中平原段)

表中*代表显著性水平为0.05,**代表显著性水平为0.01,***代表显著性水平为0.001

Table 4	Statistics of inflecti	ion points	of landsc	ape patte	rn index i	in differer	nt buffer	zones (Qir	iling sec	tion)	
指标类型	指标名称		不同缓冲区范围 Different buffer ranges/km								
Index type	Index name	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
斑块指标	PD			<0							
Patch index	ED										
	AREA_MN			>8							
形状指标	SHAPE_AM	>9		1						1.3 ***	
Shape index	FRAC_AM			>8						1.4 *	
聚集度指标	CONTAG									0.8 *	
Aggregation index	DIVISION			2.7	2.9				1.9	1.3 ***	>0.9
	SPLIT			2.4	2.9					1.3 *	
多样性指标 Diversity index	SHDI	>10	>9	>8	<0	<0	0.9	< 0.4			0.8
连接度指标 Connectivity	COHESION			1.9	2.4					1.3 ***	
	显著个数	2	1	8	4	1	1	1	1	6	2
	拐点个数	0	0	4	3	0	1	0	1	6	1

	表 4	不同缓冲区范围内景观格局指数拐点统计(秦岭段)
4	Statistics of inflection	on points of landscape pattern index in different buffer zones (Oipling section

汉中盆地段高铁对景观格局变化影响的合适尺度是 800m,且高铁的影响范围在 5.6km 以内。当设置高铁两侧缓冲区范围为 8km 时(表 5),有 8 个景观格局指数变化量与距离的二次函数拟合结果显著,且存在转折点,表明以 200m 为缓冲带间隔是揭示汉中段高铁线路对景观格局变化影响的适宜尺度。同时,2010—2018 年各缓冲带景观格局指数变化量与距离梯度拟合曲线显示(图 10),斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、分割度(DIVISION)、多样性指数(SHDI)等指数值总体增加,变化量呈"U"型态势,且在距高铁 5.6km 左右时指数增加量最小;斑块平均面积(AREA_MN)、形状指数(SHAPE_AM)、分维数(FRAC_AM)和连通性指数(COHESION)等指数值总体下降,在距高铁 5.6km 左右时指数变化量最大。这就表明汉中段高铁两侧 8km 范围内,景观破碎化程度加强,斑块异质性增强,连通性程度下降,形状变得规则,高铁线路的对景观格局的梯度效应主要体现在 5.6km 范围内。



图 9 秦岭段 2km 缓冲距离内景观指数变化量与到高铁线路距离关系

Fig.9 Relationship between distance and the change in each landscape index within the 2km buffer distance of the Qinling section

Table 5 Statis	stics of inflection	points of	landscape	pattern in	dex in	different b	uffer zon	es(Hanzho	ong basin s	section)	
指标类型	指标名称	不同缓冲区范围 Different buffer ranges/km									
Index type	Index name	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
斑块指标	PD		2.1	4 *					1.8	1.5	0.7
Patch index	ED		5.9	5.2 *	4.7	4.2	3.4	2.7	2	1.4	0.7
	AREA_MN			4.9 *	5.2		3.5	2.8	1.9	1.4	0.7
形状指标	SHAPE_AM	6.7	5.9	5.5 *	4.9	4.3	3.6				
Shape index	FRAC_AM	6.7	5.7	5.6*	5.5	4.5	4.2				
聚集度指标	CONTAG					2.7		2.2	2.2	1.6	
Aggregation index	DIVISION	6.8	6	5.4 *	4.6	4.1	3.2		2.1		
	SPLIT										
多样性指标 Diversity index	SHDI	7	5.9	5.7 ***	5.4	>5.4	4.2	3.2	2	1.4	0.8
连接度指标 Connectivity	COHESION	7	5.5	5.5 *	5	4.6			1.8		0.7
	显著个数	5	7	8	7	7	6	4	7	5	5
	拐点个数	5	7	8	7	6	6	4	7	5	5

表 5	不同缓冲区范围内景观格局指数拐点统计 (汉中盆地段)
of inflection	noints of landscape nattern index in different huffer zones (Hand

1641



图 10 汉中段 8km 缓冲距离内景观指数变化量与到高铁线路关系 Fig.10 Relationship between distance and the change in each landscape index within the 8km buffer distance of the Hanzhong basin section

巴山段高铁对景观格局变化影响的合适尺度是 300m,且高铁的影响范围在 1.5km 范围内。设置巴山段高铁两侧缓冲区范围为 6km 和 3km 时,有 5 个景观格局指数变化量与距离的二次函数拟合结果存在转折点, 个数多于其他缓冲区范围,且缓冲区范围为 3km 时,拟合显著性更好(表 6)。这就表明 300m 缓冲带间隔是 揭示秦岭段高铁对景观格局变化影响的适宜尺度。2010—2018 年各缓冲带景观格局指数变化量与距离梯度 拟合曲线显示(图 11),分割度(DIVISION)、分离度(SPLIT)、多样性指数(SHDI)等指数值总体增加,且在距 高铁 1.5km 左右时指数增加值达到最小;形状指数(SHAPE_AM)和连接性指数(COHESION)值总体下降,在 距高铁 1.5km 左右时变化量达到最大值,总体上表明汉中段高铁两侧 3km 范围内,景观破碎化程度增加,斑

(D 1

块异质性增强,连通性程度下降,形状变得规则,高铁线路的对景观格局的梯度效应主要体现在 1.5km 范围内。

Table 6 S	tatistics of inflection	on points	or landsc	ape patte	ern Index	in differen	it buffer	zones (B	ashan sectio	n)	
指标类型	指标名称	标名称 不同缓冲区范围 Different buffer ranges/km									
Index type	Index name	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
斑块指标	PD										0.6
Patch index	ED										
	AREA_MN			6.6		5.4 *	3				
形状指标	SHAPE_AM					3.5 ***			1.4 *		0.6
Shape index	FRAC_AM					3.5 *					0.5
聚集度指标	CONTAG			4.9	5.3	<0	<0	<0		1.6	0.6
Aggregation index	DIVISION		>8.1						1.6 ***		
	SPLIT	5.6				3.8 *			1.2 ***		
多样性指标 Diversity index	SHDI	6	5.4		5.4				1.9 *	1.6	
连接度指标 Connectivity	CONHESION					3.6*			1.4 *		
	显著个数	2	2	2	2	6	2	1	5	2	4
	拐点个数	2	1	2	2	5	1	0	5	2	4

表 6 不同缓冲区范围内景观格局指数拐点统计(巴山段)

• 1 • 1*00

3 讨论

在交通基础设施规划实践中,掌握线性交通基础设施对景观生态的直接与间接影响对于推进可持续交通 基础设施规划实践与生态文明建设至关重要。学术界在道路特别是公路网的景观生态效应研究中取得了大 量成果,但围绕铁路景观生态效应的相关研究进展有限。据世界银行统计,全球铁路网超过100万 km,预计 到 2050 年,铁路里程将增加 45% [31]。遵循公路与铁路作为交通网络结构的一般属性,二者对景观生态的影 响均表现在节点(高速公路出入口、车站)、道路沿线以及道路影响域3方面。然而,由于铁路与公路技术经 济与服务特征差异,二者的景观生态影响亦具有显著差异,这主要与铁路网络的相对封闭性、与公路相比相对 较低的交通流量、铁路车流的长无车间隔特性、铁路走廊窄于公路等因素直接相关,有学者们提出了与道路生 态学(road ecology)相对应的铁路生态学(railway ecology)以突出该议题研究的必要性^[6,32]。不同于已有研究 全国尺度高铁网络沿线以及公路等其他道路类型的土地利用变化与景观格局效应,本文的创新之处在于,围 绕西成高铁陕西段为研究对象,分段揭示了高铁线路建设对沿线不同区域的景观格局变化的影响,进一步明 晰和丰富了穿越秦巴地区这一关键生态安全屏障的单一高铁走廊建设对景观格局影响及其梯度效应的非线 性特征。已有的全国高铁^[13]和中老铁路^[23]研究表明,耕地与建设用地是发生显著变化的用地景观,耕地大 面积向建设用地转化。本文对土地利用变化趋势的分析结果与上述研究基本一致。本文进一步发现西成高 铁的建设开通使得沿线区域景观整体异质性呈微弱增强趋势,对耕地和建设用地景观分别产生了破碎化与集 中化影响。究其原因,参考研究区域地势(图1)和土地利用转移空间分布(图3)可知,向建设用地景观的转 移主要集中在关中平原与汉中盆地等人口密度较高的城市区域,围绕高铁线路和站点形成土地开发集中区, 呈现出集中化效应。耕地向林地和草地的转移集中分布于秦巴山区,高铁线路的建设会在沿线形成切割作 用,使得景观的连续性降低,呈现出破碎化效应。此外,穿越秦巴山区等地形复杂区域,本身景观破碎度也相 对较高。

西成高铁陕西段是首条穿越秦岭的高速铁路,本研究表明高铁沿线区域整体景观破碎化程度并未因西成 高铁的建设而发生大幅下降或提升,这可能与高铁线路通过秦岭和大巴山等区域对人类活动的严格管控具有 直接关系。受沿线经济社会基础和地形地貌特征差异,西成高铁陕西段对沿途区域景观格局变化的梯度效应 范围呈现出秦岭段(1.3km)<巴山段(1.5km)<关中平原段(2.5km)<汉中盆地段(5.6km)的分布格局。上述



图 11 巴山段 3km 缓冲距离内景观指数变化与到高铁线路关系



影响范围是研究区沿线景观生态保护的重点区域。

4 结论

重大交通工程的自然生态效应评估一直是地理学关注的核心议题之一,对掌握以重大交通工程为代表的 人类活动对生态系统格局过程、和功能变化的影响具有重大意义^[33]。

(1)耕地、林地和草地是西成高铁沿线缓冲区内主要景观类型。西成高铁陕西段建设开通增加了以建设 用地为代表的人类活动区域。在土地景观类型转移方面,高铁建设前后主要发生了耕地向建设用地和草地、 林地向草地,水域向建设用地的净转移。

(2) 西成高铁陕西段的建设开通使得沿线区域景观整体异质性呈微弱增强趋势,形状则呈规则化趋势。 在耕地和建设用地类型景观水平上,西成高铁的建设使得耕地面积减少的同时,耕地景观斑块变得破碎且分 散,但形状变得规则。与耕地景观类型相反,西成高铁建设与开通导致建设用地面积在增加的同时,破碎化程 度降低,连通和集聚程度呈加强态势。

(3) 西成高铁陕西段对整体景观水平和类型水平景观格局的影响具有显著的距离衰减梯度效应, 西成高

铁建设开通对景观斑块形状、集聚连通程度以及类型多样性有显著影响的拐点为距高铁线路 5—7km 处,对 耕地和景观用地类型景观产生显著影响的拐点为距高铁线路约 6—7km 处。

(4) 西成高铁陕西段沿线地区社会经济条件不同, 地形地貌有差异, 高铁的影响范围亦有不同。受沿线 经济社会基础和地形地貌特征差异, 西成高铁陕西段对沿途区域景观格局变化的梯度效应范围呈现出秦岭段 (1.3km)<巴山段(1.5km)<关中平原段(2.5km)<汉中盆地段(5.6km)的分布特征。

本文缓冲区范围的确定主要参考了与本研究区域本底环境具有相似性的已有文献确定,虽然亦可揭示出 西成高铁线路建设开通对沿线景观格局的影响,但在未来的研究中,还应对此进行更有针对性的专门探讨,以 得出更为精确的结论。高铁作为封闭系统,其对沿线土地利用和景观格局的影响是多线路建设、可达性提升 引起的要素集散以及站点土地开发的综合作用结果,未来可结合更长时间序列数据进行动态变化分析。

参考文献(References):

- [1] 李涛, 王姣娥. 跨区域重大基础设施空间效应评估方法研究进展. 地理科学, 2023, 43(4): 596-605.
- [2] 王姣娥,张佩,焦敬娟. 跨区域重大基础设施空间效应评估的理论框架. 地理科学, 2023, 43(4): 575-585.
- [3] 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁. 道路生态研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(3): 447-452.
- [4] 黄孟勤,李阳兵,李明珍,陈爽,曾晨岑,张冰,夏春华.三峡库区人类活动强度与景观格局的耦合响应. 生态学报, 2022, 42(10): 3959-3973.
- [5] Xiao C W, Wang Y, Yan M Y, Chiwuikem Chiaka J. Impact of cross-border transportation corridors on changes of land use and landscape pattern: a case study of the China-Laos railway. Landscape and Urban Planning, 2024, 241: 104924.
- [6] Barrientos R, Ascensão F, Beja P, Pereira H M, Borda-de-Água L. Railway ecology vs. road ecology: similarities and differences. European Journal of Wildlife Research, 2019, 65(1): 12.
- [7] Yang S Q, Jin Z, Luo D, Feng L. Road network expansion and its impact on landscape patterns in the Dongzhi tableland of the Chinese Loess Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(12): 2549-2566.
- [8] 杨思琪,朱高儒,刘杰,徐洪磊."格局-过程-功能"视角下交通生态效应研究进展.生态环境学报,2022,31(3):634-642.
- [9] Liu S L, Cui B S, Dong S K, Yang Z F, Yang M, Holt K. Evaluating the influence of road networks on landscape and regional ecological risk—a case study in Lancang River Valley of Southwest China. Ecological Engineering, 2008, 34(2): 91-99.
- [10] Ibisch P L, Hoffmann M T, Kreft S, Pe'er G, Kati V, Biber-Freudenberger L, DellaSala D A, Vale M M, Hobson P R, Selva N. A global map of roadless areas and their conservation status. Science, 2016, 354(6318): 1423-1427.
- [11] 李双成,许月卿,周巧富,王磊.中国道路网与生态系统破碎化关系统计分析.地理科学进展,2004,23(5):78-85.
- [12] Zhao L Y, Peng Z R. LandSys: an agent-based Cellular Automata model of land use change developed for transportation analysis. Journal of Transport Geography, 2012, 25: 35-49.
- [13] 何丹,周璟,蔡建明,陈子轩.中国高铁沿线区域土地利用景观格局变化分析.生态科学, 2021, 40(4): 184-194.
- [14] 赵芳, 卢涛. 道路扩展对青藏高原东缘土地利用及景观格局的影响. 生态科学, 2017, 36(4): 146-151.
- [15] 姚小兰,周琳,吴挺勋,任明迅.海南热带雨林国家公园高速公路穿越段景观动态与生态风险评估.生态学报,2022,42(16): 6695-6703.
- [16] 于涛,包安明,刘铁,郭浩,郑国雄,陈桃.不同等级道路对玛纳斯河流域土地利用与景观格局的影响.自然资源学报,2019,34(11): 2427-2439.
- [17] Wang Y, Qu J P, Han Y S, Du L X, Wang M Y, Yang Y G, Cao G H, Tao S C, Kong Y P. Impacts of linear transport infrastructure on terrestrial vertebrate species and conservation in China. Global Ecology and Conservation, 2022, 38: e02207.
- [18] Qiu M L, Li T, Gao X C, Yin G Y, Zhou J. Effects of urbanization on Cd accumulation in agricultural soils: From the perspective of accessibility gradient. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134799.
- [19] Chen W X, Zeng Y Y, Zeng J. Impacts of traffic accessibility on ecosystem services: an integrated spatial approach. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(12): 1816-1836.
- [20] Mo W B, Wang Y, Zhang Y X, Zhuang D F. Impacts of road network expansion on landscape ecological risk in a megacity, China: a case study of

Beijing. Science of the Total Environment, 2017, 574: 1000-1011.

- [21] 杨星晨, 雷少刚, 徐军, 贺晓, 程伟. 道路对草原景观破碎化的影响研究. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 149-156.
- [22] 李倩雯, 靳甜甜, 蒋爱萍, 彭期冬, 林俊强, 张迪. 道路建设对西南地区景观格局的影响. 生态学报, 2023, 43(6): 2310-2322.
- [23] 翁凌飞, 白昊男, 沈镭. 中老铁路建设对沿线景观格局影响的尺度效应. 资源科学, 2021, 43(12): 2451-2464.
- [24] 王德智, 邱彭华, 方源敏. 丽香铁路建设对沿线景观格局影响的尺度效应及其生态风险. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2493-2503.
- [25] 张秦英, 雷泽鑫, 曹磊. 铁路建设对黄土高原景观生态格局的干扰研究. 铁道工程学报, 2021, 38(11): 97-103.
- [26] Zhang H, Li X, Liu X P, Chen Y M, Ou J P, Niu N, Jin Y H, Shi H. Will the development of a high-speed railway have impacts on land use patterns in China? Annals of the American Association of Geographers, 2019, 109(3): 979-1005.
- [27] Chen Z H, Zhou Y L, Haynes K E. Change in land use structure in urban China: Does the development of high-speed rail make a difference. Land Use Policy, 2021, 111: 104962.
- [28] He D, Chen Z X, Zhou J, Yang T, Lu L L. The heterogeneous impact of high-speed railway on urban expansion in China. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4914.
- [29] Popp J N, Boyle S P. Railway ecology: Underrepresented in science? Basic and Applied Ecology, 2017, 19: 84-93.
- [30] 徐新良,刘纪远,张树文,李仁东,颜长珍,吴世新.中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC).资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI),2018. DOI: 10.12078/2018070201.
- [31] Dulac J. Global land transport infrastructure requirements. Estimating road and railway infrastructure capacity and costs to 2050. International Energy Agency, 2013.
- [32] Borda L, Barrientos R, Beja P, Pereira H M eds. Railway ecology. Springer, Cham, 2017: 3-7.
- [33] 金凤君,陈卓.跨区域重大交通工程空间效应评估的地理学思路.地理科学,2023,43(4):586-595.