引文格式:涂伟,包卓远,高位,等.耦合大数据与空间综合模拟的广深港第二高铁选线方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):2111-2121.DOI:10.13203/j.whugis20230474

Citation: TU Wei, BAO Zhuoyuan, GAO Wei, et al.Coupling Big Data and Synthetic Spatial Simulation for the Second Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong High-Speed Railway Alignment[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(10):2111-2121.DOI:10.13203/j.whugis20230474

耦合大数据与空间综合模拟的广深港第二高铁选线方法

涂 伟[1,2,3,4,5] 包卓远[1] 高 位[1] 方碧宸[1] 李明晓[2,3,4]
黄正东[1,4,5] 郭仁忠[1,4,5]

1 深圳大学建筑与城市规划学院,广东 深圳,518060
2 广东省城市空间信息工程重点实验室,广东 深圳,518060
3 自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室,广东 深圳,518060
4 粤港澳智慧城市联合实验室,广东 深圳,518060
5 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室,广东 深圳,518060

摘 要:粤港澳大湾区城市间的联系日益紧密,交通出行总量迅猛增长。大湾区现有的公路和铁路网络已难以支撑日益增长的出行需求。现有设施选址模型从地形、交通、人口、生态等维度设计优化目标,以生成适宜性最优的线路方案,但并未考虑重大基础设施建设对区域发展的促进作用。针对广深港第二高铁,耦合大数据与空间综合模拟模型发展基础设施选线方法。采用现有铁路网络、高速公路、人口密度、地区生产总值、地质构造、土地利用、生态保护区边界、数字高程模型、水系边界等多源地理大数据,利用叠置分析、缓冲区分析等方法生成高质量的高铁线路,发展国土-人口-经济-交通综合模拟模型,预测高铁未来发展情景。在此基础上,构建结合城市、企业和个体等多利益主体的指标体系,计算高铁建设的效益与费用,比较分析多个选线方案的优劣。实验结果表明,经过广州白云机场、广州知识城、东莞松山湖、深圳前海和香港北部都会区的北部线串联了4个城市的未来发展区域,具有充分利用既有线路、提升居民出行便利等特点。

关键词:高铁选线;设施选址;大数据;空间模拟;多利益主体;粤港澳大湾区

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-12-28

DOI:10.13203/j.whugis20230474 **文章编号**:1671-8860(2025)10-2111-11

Coupling Big Data and Synthetic Spatial Simulation for the Second Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong High-Speed Railway Alignment

TU Wei[1,2,3,4,5] *BAO Zhuoyuan*[1] *GAO Wei*[1] *FANG Bichen*[1] *LI Mingxiao*[2,3,4]
HUANG Zhengdong[1,4,5] *GUO Renzhong*[1,4,5]

1 School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
2 Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen 518060, China
3 Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Greater Bay Area, Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518060, China
4 Guangdong-Hong Kong-Macau Joint Laboratory for Smart Cities, Shenzhen 518060, China
5 State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science , Shenzhen 518060, China

Abstract: **Objectives**: The existing roads and railways in the Greater Bay Area are hard to fulfilling the growing travel demand. Current facility location models consider terrain, traffic, population, ecology, etc. to generate the suitable route schemes. They ignore the promoting effect of major infrastructure construction on regional development. For the location of major infrastructure such as high-speed railway, factors such as promoting land development, and driving the economic and social development of the region should

基金项目:国家社科基金重大项目(21&ZD107)。

第一作者:涂伟,博士,教授,主要从事时空大数据分析与优化研究。tuwei@szu.edu.cn

通信作者:黄正东,博士,教授。zdhuang@szu.edu.cn

also be taken into account. To fill this gap, we combine big data and spatial synthetic simulation model to develop an intelligent high-speed railway alignment method. **Methods:** Multi-source geographic big data such as railway network, highways, population, gross regional product, and digital elevation model are used to generate high-quality high-speed railway candidate lines. The spatial synthetic simulation model for land, population, economy and transportation is developed to predict the future development scenario of high-speed railway. Considering multi-stakeholders, including the city, enterprises and individuals, the benefits and costs of the new high-speed railway is calculated and compared. **Results:** The experimental results show that the best northern line connects the future development areas of four cities through Guangzhou Baiyun Airport, Guangzhou Knowledge City, Dongguan Songshan Lake, Shenzhen Qianhai and Hong Kong Northern Metropolitan Area. Under the influence of this high-speed railroad, the new construction land reaches 92 km^2, the additional population is 970 000 , and the additional gross domestic product is 849. 5 billion yuan, which shows a significant advantage over other alignment strategies, and the line has the characteristics of fully utilizing the existing lines and enhancing the convenience of residents' travel. Upon completion, it will significantly shorten the travelling time in the core urban area and further promote the development of the Greater Bay Area. **Conclusions:** The results not only provide data and model support for the selection of the second Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong high-speed railway line, but also provide useful reference for the location of major infrastructure in urban agglomeration.

Key words: high-speed railway alignment; facility location; big data; spatial simulation; multi-stakeholders; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

粤港澳大湾区是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,在国家发展格局中具有重要战略地位[1]。自改革开放以来,粤港澳大湾区城市化过程迅速,形成了广州、深圳和香港3个世界级都市,以及东莞、佛山等制造业基地城市。湾区城市内部的国土、人口、产业、资本和科技创新等要素逐渐跨越城市边界,不断相互作用、相互耦合、协同发展,城市间联系日益紧密,交通出行迅猛增长。然而,粤港澳大湾区现有的公路和铁路网络已难以支撑日益增长的出行需求。国家发展和改革委员会《关于粤港澳大湾区城际铁路建设规划的批复(发改基础[2020]1238号)》中明确指出:"要进一步加大城际铁路建设力度,打造轨道上的大湾区"[2]。城际铁路能够缩短出行时间,显著促进城市之间的人力资源、金融资本和科创要素的互通融合,提升城市群协同发展水平[3-4],因此,有必要建设连接广州、深圳和香港的第二条高速铁路,支撑香港融入大湾区,强化大湾区高水平协同发展。

设施选址相关研究集成地质、水文和交通等多源数据,利用空间分析方法进行交通基础设施的智能选址[5-7]。相关研究将公众需求建模为点状对象,计算若干设施度量指标,发展中值模型[8-9]、中心模型[10]和覆盖模型[11-12]等选址模型,从而合理布局若干设施,最优地满足公众需求。其中,中值模型以效益最大化为目标,最小化候选设施与需求之间的总出行成本,广泛应用于高铁站、配送中心等商业性设施的选址工作中。中心模型则最小化需求点到服务设施间的最大距离,尽量避免出现对少数需求点极端不利的选址结果,主要应用于紧急医疗救援设施、消防站选址[13]等。覆盖模型通过合理布置多个设施从而使得公众需求得到最大满足,并关注总体效用最大化,主要应用于学校、医院、银行等公共服务设施。上述模型给出若干高质量的选址方案,支撑设施选址、空间布局等空间决策。

高铁是由铁路站点和站间线路组成的复杂系统。高铁线路布置通常从线形要求、生态影响、服务功能、实施难度、经济效益及费用等方面进行多维度分析与优化[14]。针对铁路及其附属设施选址的相关研究大多采用较为传统的方法,利用地质数据、数字高程模型、遥感影像等空间数据,采用多准则评价[15]、层次分析法[16]、加权线性回归法[17]、灰色评价法[18]等,计算获得高质量的线路候选区域。文献[19]针对铁路选线中多限制因素问题建立目标决策矩阵,利用多准则方法进行求解得到最优铁路线路方案。文献[20]考虑铁路建设中自然环境的复杂影响,利用层次分析法将铁路建设中的定性与定量评价指标相结合,利用模糊综合评价法来进行铁路方案比选。考虑到线路优化的复杂性,学者们研究尝试运用人工智能的方法来提高选址优化模型求解

的计算效率。文献[21]利用多源时空数据,基于随机森林模型预测北京市的线下广告到店率,以指导线下广告的选址。文献[22]针对线状设施的覆盖问题,建立覆盖需求最大、距离最小化等多目标优化模型,设计多目标蚁群算法,显著改善了线状设施选址的质量。上述选址模型方法多关注于研究区域现状,较少考虑未来发展情景。然而,高铁、高速公路、飞机场等重要交通基础设施建设完毕投入使用后,将显著提高周边地区的通达性,减少出行时间和成本,促进土地开发,带动区域的经济与社会发展[23-26]。因此,有必要考虑交通导向的未来发展情景,进行高铁线路的智能选址。

现有设施选址模型从地形、交通、人口、生态等维度设计优化目标,生成整体上的最优线路方案。重大基础设施通常跨越多个城市,其选址影响多个城市的未来发展,需要进行多方平衡与协调,整体上的优化目标难以反映多个城市各自的收益与损失。广深港第二高铁和广州、东莞、深圳和香港四地紧密相关,不同线路选择将会显著影响城市的未来发展。因此,需要对各个城市的收益与费用进行量化评估。另外,重大基础设施涉及政府、企业和公众等多利益主体,也需要考虑多个利益主体之间的博弈与协调。

本文耦合大数据和空间综合模拟模型发展基础设施选线方法,利用交通、人口、经济、地质、土地、生态、水系等多源地理大数据,通过叠置分析、缓冲区分析等方法生成高质量的高铁候选线路,并利用国土-人口-经济-交通综合模拟模型,预测高铁的未来发展情景。结合城市、企业和个体等多利益主体的指标体系,比较分析多个选线方案的优劣,实验结果表明,经过广州中心区,东莞主城区、深圳前海自由贸易区和香港北部都会区的北部线可以最大促进区域的人口和经济发展,具有充分利用既有线路,提升居民出行便利等特点。

1　研究区域及数据

本文研究区域为粤港澳大湾区中的广州、东莞、深圳与香港特别行政区4个城市,如图1所示(本文中所有地图底图来源于标准地图服务系统,原审图号为GS(2019)4343号,行政界线无修改)。该区域地处珠江东岸,总面积约为13 000 km^2,总人口超过5 400万人,日均城际出行超过300万人次,国民生产总值(gross domestic product,GDP)约为9.8万亿元。粤港澳大湾区现有广深港高铁、广九铁路、深莞惠城际等既有线路,如图1所示,总运量600余万人次/d。现有的城际轨道交通设施已经无法满足日益增长的出行需求,需要新建广深港第二高铁,应对不断增长的出行需求,支撑粤港澳大湾区融合发展。

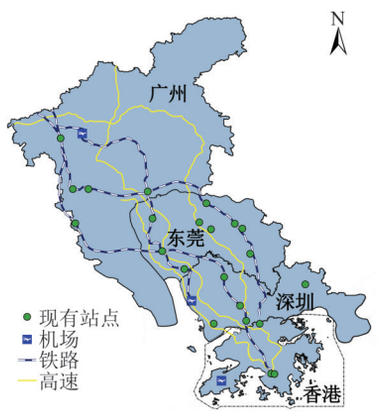


图1　广深港主要交通基础设施

Fig. 1　Main Transportation Infrastructure in Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong

研究数据包括现有铁路网络、高速公路、人口密度、地区生产总值、土地利用、数字高程模型、生态保护区、水系等多源地理大数据,如表1所示。其中,铁路网络、高速公路和水系边界从广东高分卫星遥感影像中采用图像处理和人工精化相结合的方法获得。根据高铁设计规范和城市空间规划方案,本文耦合地理大数据和国土-人口-经济-交通综合模拟模型,进行广深港第二高铁线路智能优化。

表1　本文所用数据说明

Table 1　Description of Used Data

数据名称	格式	数据来源
铁路网络	矢量数据	广东省科技资源共享服务平台
高速公路	矢量数据	广东省科技资源共享服务平台
人口密度	栅格数据	国家地球系统科学数据中心
地区生产总值	栅格数据	国家地球系统科学数据中心
土地利用	栅格数据	国家冰川冻土沙漠科学数据中心
数字高程模型	栅格数据	广东省科技资源共享服务平台
水系边界	矢量数据	广东省科技资源共享服务平台

2　基于空间综合模拟的高铁选线方法

本文提出了一种融合大数据与空间综合模拟的高铁选线方法。以多源地理数据为基础,结合叠置分析、缓冲区分析等技术生成高质量的候

选线路,并基于“国土-人口-经济-交通”综合模拟模型,预测不同选线方案下的未来发展情景。在此基础上,计算城市、企业和个体等多利益主体的效益与费用,比较分析多个高铁选线方案的优劣,从而为广深港第二高铁的选线提供数据与模型支撑。该方法包括3个主要步骤:候选站点及路线生成、空间综合模拟情景预测和候选线路综合分析评价,如图2所示。

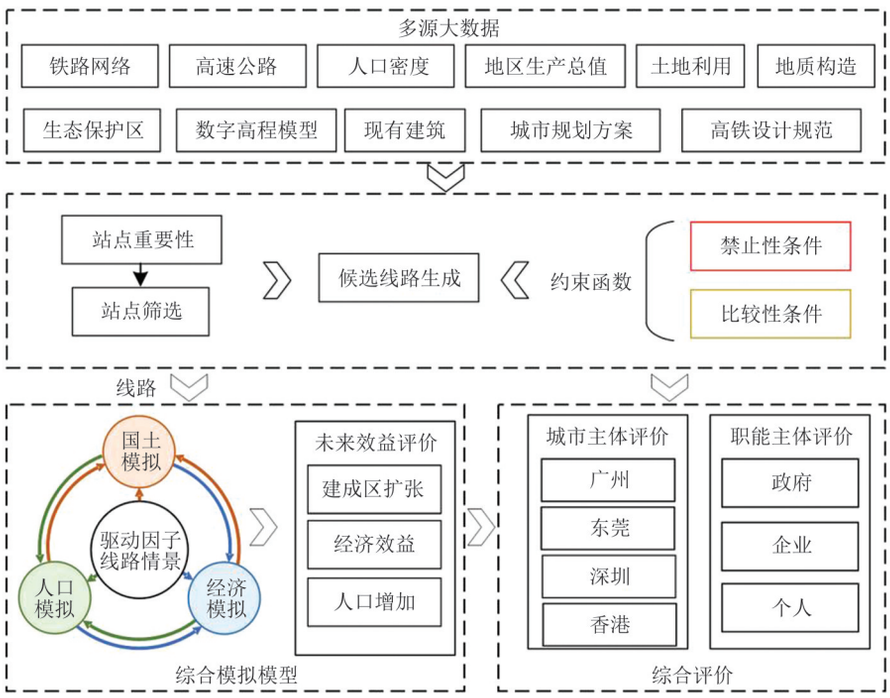


图2 耦合大数据和空间综合模拟的广深港第二高铁选线方法流程

Fig. 2 Flowchart of the Second Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong High-Speed Railway Alignment Coupling with Big Data and Integrated Spatial Simulation

2.1 候选站点选择

本文针对广深港高铁,综合考虑城市群发展要素与国家高铁线路相关法律法规,选择候选站点。将人口、经济等数据与现有站点进行叠置分析,筛选出具有较高人口密度和GDP密度区域内的现有站点作为潜在站点,包括广州北站、广州站、广州东、广州南、东莞站、长安站、虎门站,松山湖北站、深圳西、深圳北、深圳站东、福田站、红磡站等现有站点,选择具有较大人口出行需求与经济发展潜力的发展区域如南沙开发区、元朗区、北部区等作为潜在站点。此外,广州知识城区作为广深港科技创新走廊的核心区域,区域内包含众多国际顶尖知名院校与科技城,亟须将现有科教布局进行有效串联,因此也作为潜在站点。候选站点范围如图3所示。

2.2 候选线路生成

根据《高铁线路设计规范》,高铁线路建设应满足以下要求:应该绕避各类不良地质体,尽量与城市总体规划及其他交通方式、农田水利和其他工程建设相协调,符合环境保护、水土保持、土地节约及文物保护的要求,考虑既有交通走廊、高压电力线、重要地下管线、军用设施及易燃、易爆或者放射性物品等危险物品的影响。

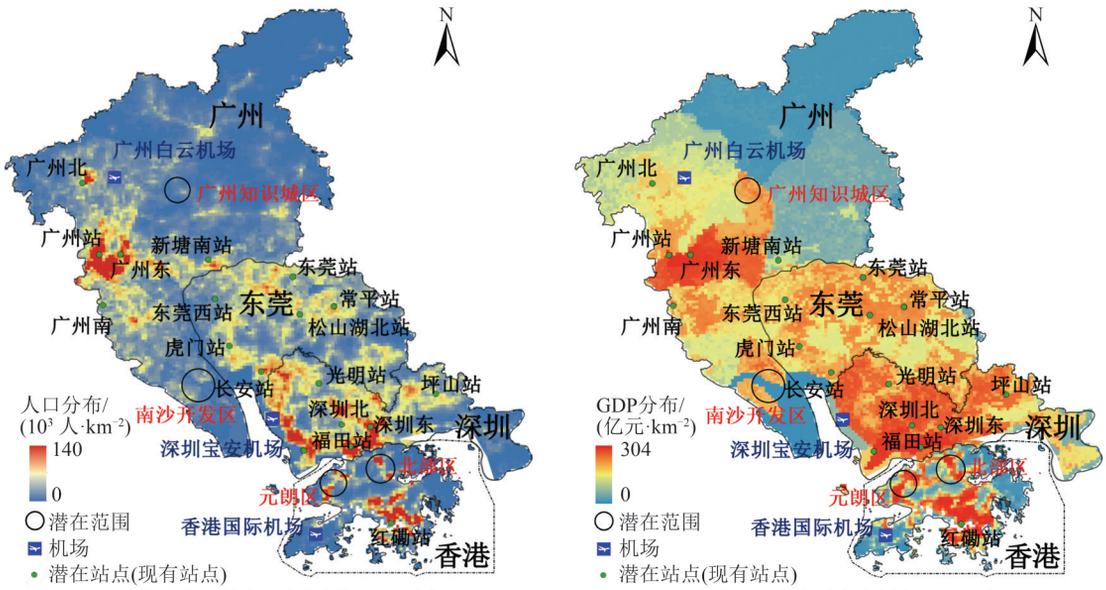
根据上述要求,通过本文生成候选站点的方法提取潜在的高铁站点,并根据高铁线路建设工程需求与生态环境保护要求,分析建设方案与研究区地质灾害风险区、生态保护区、基本农田等区域重叠情况,进行初步的线路划定。

将规范中的线路要求转化为设为禁止性条件与比较性条件,如表2所示。禁止性条件依据禁止建设高铁的条款设定,本文考虑地质构造、水源保护区与国家级生态保护区。比较性条件依据推荐铁路远离或者靠近某些设施的条款设定,考虑远离建筑物、耕地、生态保护红线,优先经过低海拔、低坡度区域。具体地,适宜性函数定义为:

$$\varphi = \min_{i \notin P} \sum_{i} c_i \tag{1}$$

$$Z = c_1 + c_2 + \cdots + c_n \tag{2}$$

式中,φ表示约束函数;Z表示比较性条件之和;P表示禁止性指标,包括禁止性条件和约束性条件及其指标,如表2所示;c_i表示比较性指标,值



(a) 现有站点和潜在站点范围与人口分布　　(b) 现有站点和潜在站点范围与GDP分布

图 3　现有站点和潜在站点范围与GDP分布及人口分布的叠加分析结果

Fig. 3　Results of Overlay Analysis of the Range of Existing Stations and Potential Stations with GDP Distribution and Population Distribution

表 2　高铁线路的禁止性条件和约束性条件及其指标

Table 2　Prohibition and Constraints and Their Indications for High-Speed Railway Route

类别	条件	数据	指标分析方法
禁止性条件	地质脆弱区域 1 000 m 内禁止建设	地质构造	利用滑坡崩塌、泥石流地质脆弱区域进行邻域分析
	水源保护区 200 m 禁止建设	水源	利用水源保护区进行邻域分析
	国家级生态保护区内 200 m 禁止建设	生态保护区	利用国家级生态保护区进行邻域分析
比较性条件	远离现有建筑	现有建筑	计算线路侵占现有建筑的总面积
	远离耕地	耕地	计算线路侵占耕地的总面积
	远离生态保护区	生态保护区	计算线路侵占生态保护区的总面积
	优先经过低高程区域	高程	计算线路高程总和
	优先经过低坡度区域	坡度	计算线路坡度总和

越小越好。基于上述条件,选择合适的线路建设单元,生成高质量的高铁线路候选方案。

2.3　空间综合模拟情景预测

高铁作为重要交通基础设施,将显著提高周边地区的通达性,减少出行时间和成本,促进土地开发,带动区域的国土、人口和经济发展[24]。本文拓展元胞自动机模型,构建国土-人口-经济-交通空间综合模拟模型,模拟预测高铁线路对城市群国土、经济、人口发展的作用。

空间综合模拟模型利用元胞自动机模拟不同情景下的城市群的国土、人口和经济发展状态[27-31]。元胞转移概率估算是空间模拟的核心。本文将交通设施建模为主要驱动因子,以生态、自然、区位等因素作为辅助驱动因子,提取特征向量,利用随机森林模型计算初始转换概率。元胞状态转换受周边邻域、随机性和限制因素的影响[32-34]。考虑元胞状态转换的邻域效应,利用邻域作用函数表示周边空间单元的影响;利用随机函数表示状态转换的随机性因素;计算总体转换概率后,通过优先分配最高概率原则确定元胞转换的类别;依据国土、人口与经济的总体规模控制元胞模拟迭代过程。

空间综合模拟模型考虑国土、人口与经济的相互作用,拓展元胞自动机模型进行综合模拟[32]。其核心思想是不断将国土、人口、经济模拟结果作为新元胞自动机的驱动因子,通过更新元胞转换概率表示国土变化对人口和经济增长、人口变化对国土和经济空间发展、经济变化对国土和人口发展的复杂影响过程。主要包括两步:(1)初始模拟。将国土、经济和人口等要素各自独立进行模拟,得到的模拟结果后重新放入到综合模拟模型的输入端,替换初始要素;(2)迭代综

合模拟。将各要素模拟结果替换更新原有的要素驱动因子。重复以上两个步骤进行迭代,直至各要素精度评价收敛,最终输出国土、人口和经济发展态势。

利用空间综合模拟模型进行高铁线路建设情景预测,包括自然发展情景和线路建设情景。自然发展情景根据区域内过去的国土、人口和经济的自然趋势进行模拟,不考虑其他基础设施建设的影响;线路情景将候选线路作为重要驱动因子,加入空间综合模拟模型中模拟未来的国土、人口和经济发展态势,重点考虑线路建设后对城市群未来发展的影响。对比自然发展情景与线路情景,分析国土、经济与人口要素发展差异,定量评估线路建设后未来可能产生的效益。

2.4 候选线路综合分析评价

结合线路生成和情景模拟获得的多维指标,利用政府、企业和个体构成的多利益主体分析法进行候选线路综合分析与评价。首先,针对利益主体偏好构建评价指标体系,量化评估高铁建设对区域发展的影响,进行多利益主体的博弈分析。其中,政府主体指标包括待拆迁建筑物面积、新增服务人口、城市用地新增面积、地区生产总值增加值、新增人口等。企业主体指标主要包括受益企业数量、高铁长度和建设成本。新建高铁线路会改善可达性,提升部分公众的出行便利程度,因此,个体相关指标包括高铁站点邻近区域的交通设施数量和道路总长度。最后,对利益指标进行综合比较分析,评估广深港第二高铁选线方案。

3 结果与分析

3.1 候选线路方案

根据上文所选择的高质量现有站点,并在潜在站点范围内增设广州南沙站、广州知识城城站、香港元朗站与北部区站作为高质量候选线站点,如图4(a)所示。保持交通通达性的候选站点共13个,包括广州站、广州东站、广州北站、新塘南站、东莞站、虎门站、长安站、深圳站、深圳北站、光明城站、深圳前海、宝安机场站和红磡站,及引领城市未来发展的广州南沙站、广州知识城站、东莞松山湖站、香港元朗站和香港北部都会区站。

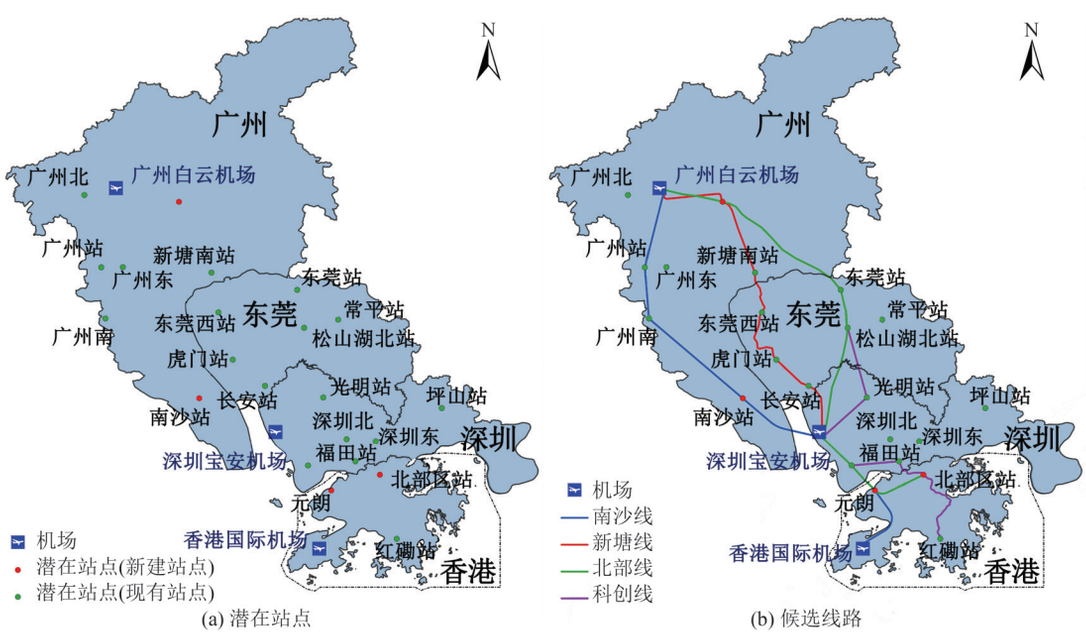


图4 广深港第二高铁的潜在站点和候选线路

Fig. 4 Potential Stations and Candidate Routes for the Second Guangzhou-Shenzhen-Hongkong High-Speed Railway

依据禁止性条件与比较性条件,进行适宜性分析,生成4条高质量候选线路,如图4(b)所示。其中,南沙线主要连接广州、深圳和香港,起点为白云机场,经过广州南沙,终点为香港国际机场,比较值Z为317。新塘线从广州白云机场出发,经过东莞西站、虎门、宝安机场、前海至香港国际机场,优先考虑距离、成本和现有交通,比较值为Z为367。北部线从广州白云机场出发,经过广州知识城、东莞松山湖、深圳前海至香港北部都会区,优先考虑现有铁路、科技创新发展规划和自由贸易区战略,比较值Z为311,为最佳值。科创线从广州白云机场出发,经过广州知识城、东莞

站、东莞松山湖、深圳西站、福田站、香港北部都会区至红磡高铁站,有效避开高海拔与高坡度区域,且距离珠江流域与生态保护区域较远,比较值Z为398。

3.2　候选线路建设情景模拟

利用粤港澳大湾区2010—2020年的国土、人口和地区生产总值数据训练空间综合模拟模型进行模型精度验证,并预测高铁线路建设的发展情景。结果表明,此空间综合模拟方法在国土模拟中总体精度和品质系数分别为90.79%和0.270,在人口和GDP模拟中,综合模拟方法的平均绝对百分比误差分别为24.41%与19.09%,均方根误差分别为11.79与3.859。

利用训练后的空间综合模型对2030年大湾区国土、经济、人口进行预测和情景分析,得到了自然发展情景和各个线路情景的数据统计结果,如表3所示。在自然发展情景下,广州、东莞、深圳和香港4个城市继续保持现有发展态势,建设用地将增至5 543 km^2,经济产值约为137 489亿元,人口数量约为6 711万人。国土开发方面,沿着城市中心建成区边界向外缓慢扩张,城市去边界化明显,在东莞与深圳广州的交界处也出现了连片的发展区域。经济与人口发展方面,出现两极分化的现象,增长主要出现在广州、深圳与香港的核心区域。高密度区域人口和经济增长越快,低密度区域人口和经济增长几乎停滞,如图5所示。

表3　自然发展情景与各线路情景要素模拟结果

Table 3　Simulation Results of Natural Development Scenario and Various Route Scenario

情景	建设用地/km^2	经济产值/亿元	人口/10^4人
自然发展情景	5 543	137 489	6 711
北部线情景	5 635	145 984	6 808
南沙线情景	5 486	138 008	6 723
新塘线情景	5 622	138 854	6 713
科创线情景	5 624	137 721	6 743

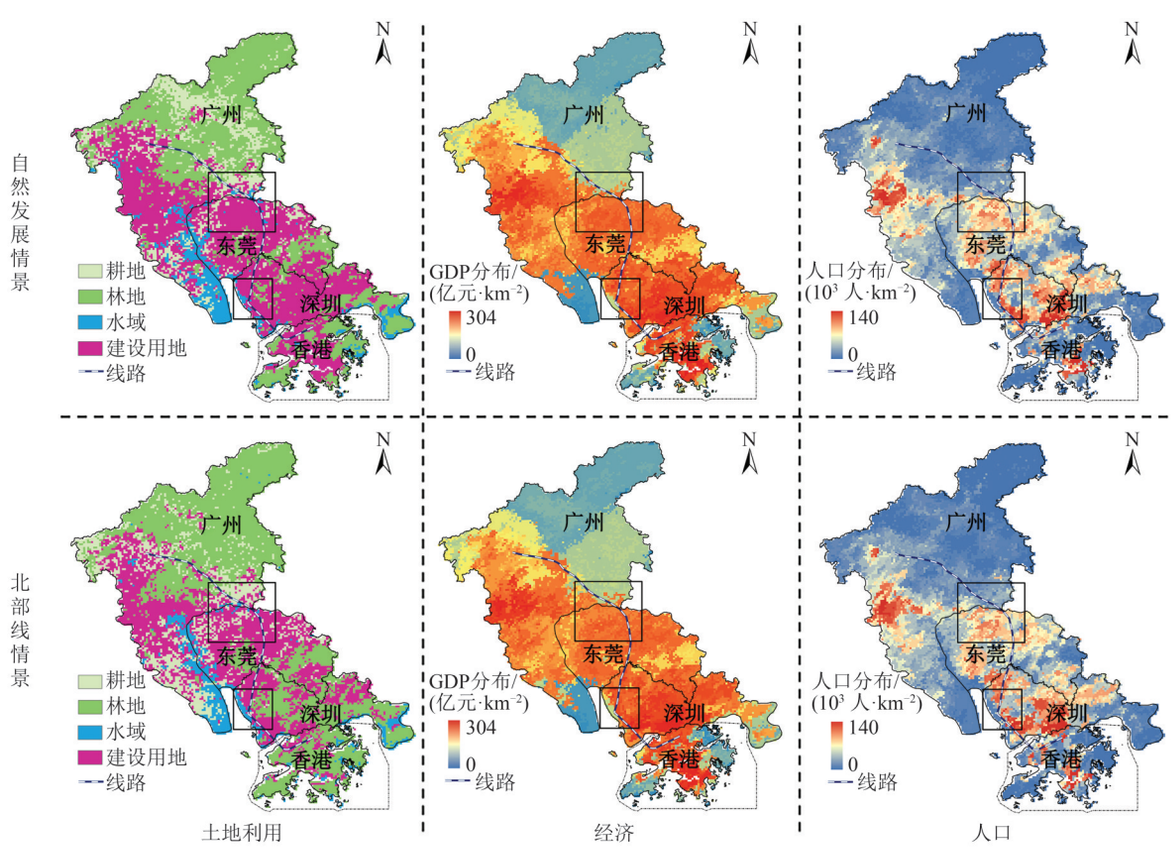


图5　自然发展情景和北部线情景预测结果

Fig. 5　Simulation Results of the Natural Development Scenario and the Northern Line Scenario

3.3　多主体综合分析评价

基于依据前述研究构建各利益主体评价指标体系,量化线路建设对区域发展的影响,对4条高质量候选线路进一步分析。其中,北部线对粤港澳大湾区的发展影响最大,多主体利益评价如表4所示。从政府角度来看,北部线遵循生态优先策略,较好支撑了4个城市的未来5~10 a空间规划案,线路经过广州新建的知识城创新中心、

东莞发展核心主城区、深圳前海自由贸易区和香港的北部都会区。该线路能够协调不同主体间的利益,促进各个城市协同发展。相较于自然发展情景,该线路可额外带来新增建设用地92 km^2,新增人口97万人,增加地区生产总值8 495亿元。线路建设总长度在4条线路中最短,为164 km,建设成本最低,侵占现有建筑也最少,为109 km^2。深圳宝安机场和松山湖之间进行高铁线路连接,缩短了深莞之间联系距离,能增加高铁线路的经济效益和服务人群数量。从个体角度来看,北部线站点覆盖交通设施5.9万个,有利于提升市民出行的可达性。总体上看,4个城市均在该线路中获得较多收益。该线路未来预计服务超过900万人的出行,加速助力大湾区的发展。

表4 北部线多主体利益评价

Table 4 Evaluation of Multi-stake Holder Evaluation for the Northern Line

线路	利益主体	指标	广州	东莞	深圳	香港	总值
北部线	政府	占用现有建筑/km^2	27.2	28.7	43.2	10.5	109.6
		新增服务人口/10^4人	334.6	174.4	55.3	238.7	803
		2030年建设用地/km^2	2 604	1 455	1 125	359	5 543
		2030年经济产值/亿元	45 149	23 507	39 496	29 337	137 489
		2030年人口/10^4人	2 694	1 283	1942	792	6 711
	企业	(获益企业/科教)/10^4个	0.2/0.1	0.3/0.3	1.2/0.8	1.1/0.3	2.8/1.5
		建设长度/km	63.6	32.6	47.8	20.3	164.3
		建设成本/亿元	260.9	131.7	195.1	81.2	668.9
	个体	覆盖交通设施	3 213	20 281	28 355	7 216	59 065
		覆盖公路里程	750.4	2 082.4	1 506.3	1 272.1	5 611.2

南沙线经过广州西站、南沙自贸区,通过海底隧道穿越东莞,经过深圳宝安机场、前海自贸区,至香港国际机场。该施工难度高,且经济效益最低。从政府角度来看,该线路新增服务人口达1 019万人,增加地区生产总值519亿元,新增人口12万人,城市用地面积相比较自然情景状态下相对减少57 km^2,且避开了东莞,不利于大湾区城市之间的协同。从企业角度来看,由于该线路需要进行海底隧道下穿建设,导致施工难度增大,建设成本高。从个体角度来看,该线路加强了珠江两岸之间的联系,缩短了出行距离,交通出行更加便捷。从城市层面要素数据综合分析上看,该高铁线路对东莞的影响较大。

新塘线充分利用既有铁路网络(东莞长安至广州新塘南为既有铁路),降低了建设成本。从政府角度来看,新塘线建设成本较低,项目建设较快,开发成本大幅降低,该线对人口、经济和城市化发展的拉动效应最弱。相较自然发展情景,新增建设用地79 km^2,增加地区生产总值1 365亿元,新增人口2万人,新增服务人口在4条线中最少,为471.7万人,经过东莞部分主要利用现有铁路承担,所以东莞市在这条线路上的开发成本降低。从企业角度来看,获益企业最多高达10.1万个,建设高难路段长度较少,与现有铁路重叠最多,经济效益也相对稳定,且项目可以快速投入使用。从个体角度来看,覆盖了最多的公路里程,达7 895.1 km,覆盖交通设施也较多,对个体出行的可达性有较好的提升。广州和香港都新增了站点,线路的服务人群增多和服务范围扩大。

科创线连接广州、东莞、深圳和香港的重点科教区域,主要绕行经过松山湖创新发展区,同时东莞松山湖北站向南联系到深圳光明科创区域,向北可以联系到新建站点广州知识城站。因此,这条线可以串联不同城市的创新发展基地,有利于各城市的产业升级与融合发展。从政府角度来看,对比基线方案,科创线可带来新增建设用地81 km^2,增加地区生产总值232亿元,新增人口32万人。新增服务人口多达814万人。从企业角度来看,该线路穿越各地科教区域,占用已有建筑用地较多,建设成本相对较高。从个体角度来看,对在科教区域范围出行的人群较为友好,相对整体出行效益一般。

综合考虑政府、企业和个体等多方利益,并着重考虑政府在选址过程中的优势地位,从4条线路的新增建设用地、新增地区生产总值、新增服务人口及覆盖交通基础设施4个层面来评估4条线路对于研究区域人口、经济以连通性所带来的影响,构建线路发展效益评估公式为:

$$S = N_A \times \omega_A + N_P \times \omega_P + N_{\mathrm{GDP}} \times \omega_{\mathrm{GDP}} + N_I \times \omega_I \tag{3}$$

式中,S为建设效益得分;N_A、N_P、N_{GDP}、N_I分别分别表示归一化后的新增建设用地、新增人口、新增地区GDP和交通基础设施覆盖个数;对应的ω_A、ω_P、ω_{GDP}、ω_I为各指标的对应系数。本文根据各指标对地区发展的重要性以及不同主体的优先级设置系数,计算得到北部线的发展效益得分最高,为0.985 5。因此,选择北部线作为新建线路,将会对区域的人口经济发展带来更为积极的作用。

4　结　语

粤港澳大湾区是国家重要发展战略,大湾区现有的公路和铁路网络已难以支撑日益增长的出行需求。本文发展了一种融合地理大数据与空间模拟的高铁选线方法,利用铁路、公路、人口密度、地形、水系等多源数据,发展国土-人口-经济-交通综合模拟模型,预测高铁未来发展情景,并构建面向多利益主体的评估体系,计算高铁建设的效益与费用,实现对多个选线方案的综合分析。

本文以大湾区广深港第二高铁的选线为例进行实验验证分析。结果表明,经过广州白云机场、广州知识城、东莞松山湖、深圳前海和香港北部都会区的北部线可为城市群高质量做出积极贡献。该线路串联了4个城市的未来发展区域,推动地区生产总值增长至145 984亿元,人口增长至6 808万人,且该线路建设总长度在4条线路中最短,为164 km,建设成本最低,线路未来预计服务超过900万人的出行,经过多个城市规划方案中的重点区域,经过广州中心区、东莞发展核心主城区、深圳前海自由贸易区和香港的北部都会区,可大幅缩短广深港核心城区通行时间,推动城市和地区之间的合作。因此,北部线能够较好地平衡广州、东莞、深圳和香港的未来发展,为城市群的融合与协同发展创造有利条件。

本文将大数据与空间综合模拟模型耦合,辅助重大交通基础设施的智能选址。地理大数据的发展赋能多维度、高分辨率的空间分析与计算,避免了人为观察和经验决策所带来的误差,为选址决策提供数据支撑。研究方案探索了集成数据驱动和模型驱动的高铁选线新途径,为重大基础设施选址决策提供参考。

参　考　文　献

[1] 刘毅,王云,杨宇,等. 粤港澳大湾区区域一体化及其互动关系[J]. 地理学报,2019,74(12):2455-2466.
LIU Yi, WANG Yun, YANG Yu, et al. Regional Integration and Interaction of the Guangdong-Hong-Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2455-2466.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于粤港澳大湾区城际铁路建设规划的批复(发改基础[2020]1238号)[EB/OL]. (2020-08-03)[2025-08-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202008/t202008041235524_ext.html.
National Development and Reform Commission. Reply on the Construction Plan of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area InterCity Railway (Development and Reform Basis [2020] No. 1238) [EB/OL]. (2020-08-03) [2025-08-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202008/t20200804_1235524_ext.html.

[3] 苏世亮,赵冲,李伯钊,等. 公共交通导向发展的研究进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(2):175-191.
SU Shiliang, ZHAO Chong, LI Bozhao, et al. Transit Oriented Development: A Review[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 175-191.

[4] GHORBANZADEH O, MOSLEM S, BLASCHKE T, et al. Sustainable Urban Transport Planning Considering Different Stakeholder Groups by an Interval-AHP Decision Support Model[J]. *Sustainability*, 2019, 11(1): 9.

[5] 汪晓春,熊峰,王振伟,等. 基于POI大数据与机器学习的养老设施规划布局:以武汉市为例[J]. 经济地理,2021,41(6):49-56.
WANG Xiaochun, XIONG Feng, WANG Zhenwei, et al. Planning and Layout of Facilities for the Elders Based on POI and Machine Learning: A Case Study of Wuhan[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(6): 49-56.

[6] BIGOTTE J F, ANTUNES A P. Social Infrastructure Planning: A Location Model and Solution Methods [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, 22(8): 570-583.

[7] FUCHS F, TRIVELLA A, CORMAN F. Enhancing the Interaction of Railway Timetabling and Line Planning with Infrastructure Awareness[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 142: 103805.

[8] 李绍琳,杜清运. 利用梯阶中值选址模型进行区域机场群布局适应性研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2012,37(8):988-991.

LI Shaolin, DU Qingyun. Suitability of Regional Multi-airports Planning by Hierarchical *P*-median Location Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 988-991.

[9] HOU J W, HOU B, SUN S Q. Spatial Optimization of Low-Impact Development Facilities Based on a *P*-Median Model and an Ant Colony Optimization[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2019, 24(12): 04019055.

[10] KARATAS M, YAKıCı E. An Iterative Solution Approach to a Multi-objective Facility Location Problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 62: 272-287.

[11] 张彤, 马帅, 沈宏. 面向公平分配的时变应急服务覆盖优化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(12): 1681-1687.
ZHANG Tong, MA Shuai, SHEN Hong. Equity-Oriented Time-Varying Emergency Management Service Coverage Optimization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1681-1687.

[12] 吴钦钦, 王珂, 樊文有, 等. 基于连续空间需求的公共图书馆最大覆盖选址方法: 以武汉市主城区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(1): 27-34.
WU Qinqin, WANG Ke, FAN Wenyou, et al. Optimizing the Public Library Location Based on Coverage Maximization of Continuous Space Demands: A Case Study of the Downtown of Wuhan City[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(1): 27-34.

[13] 林建新, 林孟婷, 王皖东, 等. 分级设施选址问题研究进展与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(7): 1121-1131.
LIN Jianxin, LIN Mengting, WANG Wandong, et al. Review of the Hierarchical Facility Location Problem[J]. *Journal of Tsinghua University*(*Science and Technology*), 2022, 62(7): 1121-1131.

[14] 王紫萌, 周建勤. 线状需求下两阶段设施选址问题[J]. 上海海事大学学报, 2020, 41(3): 60-65.
WANG Zimeng, ZHOU Jianqin. Two-Stage Facility Location Problems with Linear Demands[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2020, 41(3): 60-65.

[15] KRPAN L, VILKE S, MILKOVIÉ M. A Model of the Selection of an Optimal Railroad Route by Applying the Multiple-Criteria Analysis[J]. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2017, 24(4): 1155-1164.

[16] WU B, LU M, HUANG W, et al. A Case Study on the Construction Optimization Decision Scheme of Urban Subway Tunnel Based on the TOPSIS Method[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(11): 3488-3500.

[17] 程国柱, 周林芳. 城市轨道交通车站双层选址模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 186-192.
CHENG Guozhu, ZHOU Linfang. Bi-level Model of Urban Rail Transit Stations Location[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(3): 186-192.

[18] 冯超, 周步祥, 林楠, 等. Delphi和GAHP集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 25-29.
FENG Chao, ZHOU Buxiang, LIN Nan, et al. Application of Comprehensive Evaluation Method Integrating Delphi and GAHP in Optimal Siting of Electric Vehicle Charging Station[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(9): 25-29.

[19] 马彦祥. 多准则妥协解排序法在境外铁路选线方案应用[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(4): 1-4.
MA Yanxiang. Application of Multi-criteria Compromise Ranking Method (VIKOR) in Overseas Railway Alignment Selection[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(4): 1-4.

[20] 杨立国, 吴小萍, 刘铮, 等. 基于层次分析法及模糊综合评价法的铁路"绿色"选线方案比选[J]. 铁道标准设计, 2007(12): 20-22.
YANG Liguo, WU Xiaoping, LIU Zheng, et al. Comparison for "Green" Route Selection Based on Gradation Analysis Method and Vague Integrated Evaluation Method[J]. *Railway Standard Design*, 2007(12): 20-22.

[21] 张嘉琪, 杜开虎, 任书良, 等. 多源空间大数据场景下的家装品牌线下广告选址[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1406-1415.
ZHANG Jiaqi, DU Kaihu, REN Shuliang, et al. Site Selection of Outdoor Advertisement for Home Decoration Brands Based on Multi-source Spatial Big Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1406-1415.

[22] LI X, HE J Q, LIU X P. Ant Intelligence for Solving Optimal Path-Covering Problems with Multi-objectives[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(7): 839-857.

[23] 焦利民, 刘耀林. 可持续城市化与国土空间优化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(1): 1-11.
JIAO Limin, LIU Yaolin. Sustainable Urbanization and Territorial Spatial Optimization[J]. *Geomatics*

and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(1): 1-11.

[24] 欧阳晓, 朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 571-588.
OUYANG Xiao, ZHU Xiang. Spatio-Temporal Characteristics of Urban Land Expansion in Chinese Urban Agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 571-588.

[25] 宋友城. 顾及空间异质性和差异化演变特征的土地利用变化模拟和预测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(8): 1732-1732.
SONG Youcheng. Simulation and Prediction of Land-Use Change Taking into Account Spatial Heterogeneity and Differentiated Change Characteristics [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(8): 1732-1732.

[26] 李德仁, 张洪云, 金文杰. 新基建时代地球空间信息学的使命[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1515-1522.
LI Deren, ZHANG Hongyun, JIN Wenjie. The Mission of Geo-spatial Information Science in New Infrastructure Era[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1515-1522.

[27] TU W, GAO W, LI M X, et al. Spatial Cooperative Simulation of Land Use-Population-Economy in the Greater Bay Area, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2024, 38(2): 381-406.

[28] KAMUSOKO C, GAMBA J. Simulating Urban Growth Using a Random Forest-Cellular Automata (RF-CA) Model[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(2): 447-470.

[29] LI X, YEH A G. Neural-Network-Based Cellular Automata for Simulating Multiple Land Use Changes Using GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(4): 323-343.

[30] 唐佳, 甄峰, 席广亮. 高铁走廊区域居民城际流动支撑体系优化策略研究:以沪宁高铁为例[J]. 现代城市研究, 2020(9): 31-39.
TANG Jia, ZHEN Feng, XI Guangliang. A Study on Optimizing Strategies of Residents' Intercity Mobility Support System for Regional High Speed Rail Corridor: A Case Study of Shanghai-Nanjing High Speed Rail[J]. *Modern Urban Research*, 2020(9): 31-39.

[31] 刘耀林, 仝照民, 刘岁, 等. 土地利用优化配置建模研究进展与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1598-1614.
LIU Yaolin, TONG Zhaomin, LIU Sui, et al. Progress and Prospects of Research on Optimal Land-Use Allocation Modeling[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1598-1614.

[32] 高位, 涂伟, 李明晓, 等. 基于影响因子动态更新的都市圈国土-人口协同模拟[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(8): 1502-1511.
GAO Wei, TU Wei, LI Mingxiao, et al. Synergistic Simulation of Land and Population in Metropolitan Area with Dynamic Influence Factors[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(8): 1502-1511.

[33] YAO Y, LIU X P, LI X, et al. Simulating Urban Land-Use Changes at a Large Scale by Integrating Dynamic Land Parcel Subdivision and Vector-Based Cellular Automata[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(12): 2452-2479.

[34] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.