文章编号：0253-374X(2026)01-0098-09

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24285

基于地理信息系统的高速铁路大型临时设施选址模型

曾小清，邓　波，朱明昌，应沛然，李在奇

（同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室，上海 201804）

摘要：大型临时设施选址对高速铁路施工建设起着至关重要的作用，其主要为建造高速铁路生产和提供预制梁。为针对性解决传统选址工作前期勘察综合成本大、选址结果主观倾向明显且难以量化评估等问题，系统地梳理了选址因素逻辑架构，构建了多层次选址指标体系，结合ArcGIS空间解析，建立高速铁路大型临时设施选址模型。结合山东省已建成的大型临时设施实际位置进行模型验证，得到模型准确度为90%，佐证了本文选址模型的可行性与科学性。可为后续类似设施选址提供理论依据，也有助于形成高速铁路大型临时设施选址新的工作范式。

关键词：高速铁路；大型临时设施；选址模型；地理信息系统(GIS)

中图分类号：U238　　**文献标志码**：A

A GIS-Based Site Selection Model for Large Temporary Facilities of High-Speed Railways

ZENG Xiaoqing, *DENG Bo*, *ZHU Mingchang*, *YING Peiran*, *LI Zaiqi*

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The site selection of large temporary facilities plays a vital role in the construction of high-speed railways. They are mainly used to produce and provide prefabricated beams for the construction of high-speed railways. To address the limitations inherent in traditional site selection methods—specifically the high costs of preliminary surveys, excessive subjectivity, and a lack of quantifiable assessment criteria—this paper systematically identifies the logical framework of influencing factors, constructs a multi-level indicator system for site evaluation and, in combination with ArcGIS spatial analysis, develops a site selection model for large temporary facilities of high-speed railways construction. The model is verified using the locations of large temporary facilities that have been built in Shandong Province, and the model accuracy is found to be 90%, which confirms the feasibility and effectiveness of the proposed site selection model. This paper can provide a theoretical basis for the site selection of similar facilities in the future, and also help form a new working paradigm for the site selection of large temporary facilities for high-speed railways.

Keywords: high-speed railway; large temporary facilities; site selection model; geographic information system (GIS)

目前我国交通运输路网系统日益发达，铁路运输在国民经济生活中扮演着愈加重要的角色，高速铁路充当运输系统中主骨架的作用逐步凸显，高速铁路基础设施建设态势依旧稳健。由于我国幅员辽阔，地形特征表现为西高东低的阶梯状地势，同时拥有众多河流和发达水系网络，在高速铁路建设实践中，经常遭遇跨越江河及深山沟壑等复杂地形的挑战，预制梁的作用显得尤为关键。高速铁路大型预制梁场作为生产与运输预制梁的基地，承担着为沿线高速铁路的建造提供预制梁的作用；其地理位置的优劣直接与预制梁场的生产运营、成本控制、服务效率以及高速铁路建设时效性息息相关。鉴于大型预制梁场在高速铁路建设项目中定位为辅助性临时工程设施，遵循科学术语规范，本文采用“大型临时

收稿日期：2024-09-02
基金项目：上海市科委重点项目(22DZ1208500)；校企战略性合作专项(kh0160020230946)
第一作者：曾小清，教授，工学博士，主要研究方向为交通信息与控制、安保与环保技术。
E-mail：zengxq@tongji.edu.cn
通信作者：邓　波，硕士，主要研究方向为交通网络空间运筹优化。
E-mail：2233434@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

设施”进行表述。大型临时设施选址是一项复杂的系统工程，其决策过程需综合考虑多因素交互影响，如土地成本、运输网络、建设成本、需求点分布、材料供应商分布以及地质地形等，以最终满足安全生产、经济运营、高效服务、绿色生态的施工理念。现有的选址方法以专家经验和实地勘测为主，投入成本大、选址周期长、选址架构模糊，选址结果存在一定的主观倾向且难以量化评估[1]。其选址决策的质量往往只能通过后续工程建设的实际效果来验证，这通常会导致额外的经济费用，以修正前期选址决策的不合理性。

高速铁路大型临时设施的选址问题归属于离散设施选址的P—中值问题[2]，目前针对大型临时设施选址的多集中于施工建设阶段[3]和设施内部布局[4]，较少关注于地理位置且深入度有待挖掘。基于铁路专线实际项目建设背景，所归纳的征地拆迁、交通便捷等关键因素，为大型临时设施选址及其平面布局提供了重要的参考依据[5]。在选址决策方面，大型临时设施与装配式PC构件厂的考虑因素表现出高度相似性，罗倩蓉等[6]对PC构件厂的选址影响因素进行了深入探讨，并运用模糊层次分析法对相关影响因素进行了筛选。夏祥斗[7]归纳了影响大型临时设施选址的关键因素，以长安公跨铁大桥预制梁场为例，运用层次分析法与模糊综合评价算法对选址方案进行了评估与分析，但该研究在地理空间信息的挖掘与应用方面存在不足。针对铁路工程特征，文献[8]从运筹优化角度，提出基于线性调度方法，构建以成本为导向的运架匹配大型临时设施选址优化模型，在实际工程应用中的可操作性尚有待提升。国外建筑行业基于装配式理念，广泛采用预制构件，针对PC构件厂选址也进行了深入研究。结合马来西亚的实际情况，研究者在当地构建了包含15个核心标准的PC构件厂选址决策框架，并在此基础上进一步细化为47个子项标准[9]。新加坡预制混凝土工厂通过优化站点布局管理，以降低工厂二氧化碳排放[10]。在海外工程实践中，通常将空间选址标准与决策相结合，以确定最佳的预制构件厂位置[11]，同时基于专家经验的模糊群体决策也是选址重要思路[12]。研究表明，合理的PC构件厂布局不仅可降低生产运输成本[13]，也可提高预制构件生产率[14]，但与地理空间分布特征联系有待加强。

ArcGIS在大型工程设施选址中运用较为广泛，如基于ArcGIS和多因子模型对光伏电站选址进行评估[15]，结合多准则决策和GIS的斯里兰卡住宅开发土地选址分析[16]和基于ArcGIS空间分析对装配式工厂选址进行特征提取[17]。通过将ArcGIS与其他选址类方法进行融合，也是解决具体工程问题的主要研究范式，如整合ArcGIS与多标准决策（MCDM），能通过挖掘空间数据分布特征，生成适宜性地图，以解决垃圾填埋场选址问题[18]。层次分析法是评价类问题的主导方法，与地理信息系统展现出显著的协同作用，如通过AHP与GIS研究探索生物炭应用的潜在影响，提出生物炭空间分布的建设性意见[19]。针对受多重因素影响的复杂问题，采用多层次、系统化的方法来梳理影响因子，在解决实际问题时能够发挥更为显著的作用[20]，并可通过多种归一化处理技术，建立指标的定量评价体系[21]。地理信息系统具备处理多元化数据结构的强大能力，尤其在应对工程领域的复杂性问题，展现出极好的适用性；评价类方法是理论定性推理与定量分析表征的结合，特别适用于求解模糊类问题；将GIS与评价方法有机整合，能够显著提升解决问题的效率和效能[22]。

当前关于大型临时设施的研究文献，普遍倾向于从定性分析和选址原则的层面进行阐述，疏于对选址区域的地理信息空间挖掘，未形成系统的选址指标体系，缺乏新的选址范式和评估量化方法。本文系统梳理影响选址的相关因素，厘清影响因素间的逻辑架构，构建多层次选址指标体系；基于ArcGIS平台，将选址指标体系与地理空间数据进行集成，实现指标因素的空间量化表达，解析多指标共同作用下的空间关系，建立大型临时设施选址模型。并结合山东省已建大型临时设施的实际案例，验证所提指标体系和选址模型的有效性，以形成新的高速铁路大型临时设施选址工作范式。

1　多层级选址指标体系

构建多层次选址指标体系是实现选址决策科学化的重要基础。采用理论分析与工程实践相结合的研究范式，首先，运用文献综述法对科研文献数据库进行深入分析，系统梳理并统计文献中提及的影响选址决策的关键因素及其出现频次。接着，结合专家经验的德尔菲法，筛选出在工程实践过程中需重点考虑的影响因素。在此基础上，运用层次分析法（AHP）对影响因素之间的内在逻辑关系进行深入剖析，进而构建一个具有层级架构的选址指标体系框架，形成了初步的多层次选址指标体系。为确保所

构建选址指标体系的合理性及科学性,将初步形成的多层次选址指标体系提交给专家进行二次复核,专家将对指标体系的要素完整性和实际可操作性进行系统评估,结合反馈意见对选址指标体系进行二次修订与完善,并最终形成科学的多层次选址指标体系。

在当前科学研究的基础上,本文系统检索并深入分析了关于高速铁路大型临时设施选址和预制构件厂选址的相关文献。通过对文献中提及的选址指标进行频次统计分析,提炼出以下12项高频次选址指标因素:地理高程[6]、地形坡度[7]、土地类型[5]、征地拆迁复垦[17]、预制梁运输[8]、基础配套设施[1]、区域交通规划[17]、河流湖泊分布[2]、铁路网络[13]、路网密度[2]、政策法规[6]、生态保护区域[1]。为保障选址指标体系的全面性与科学性,通过问卷调查的形式,向长期从事高速铁路设计、建设的专家群体咨询选址影响因素;共5位专家参与了选址影响因素的排序、评分及增删过程。该专家群体由教授、高级工程师以及一线项目总工组成,都具有丰富的项目经验,均参与过3个以上高铁大型临建项目,其中3位曾直接参与业主单位牵头的选址评审会,2位作为设计咨询顾问提供过选址方案。在问卷调查中,排序旨在确立选址考虑因素的主次顺序,评分则用以量化各指标因素的重要性,评分范围介于1至10分,分数越高表示该因素越重要;增删环节则允许专家补充遗漏或剔除不必要的影响因素。基于德尔菲法确定选址影响因素,剔除已经通过文献综述法明确的因素,还有地质风险、原材料分布、劳动力成本、道路网络、道路拥挤程度、交通安全事故、重要保护设施、周围居民点分布,共8项。

鉴于不同选址指标间的关联性与差异性,结合高速铁路大型临时设施的具体工程特征,参照相关文献中的指标体系划分方法,对通过文献综述法和德尔菲法获得的20项指标进行了系统归纳与分类。在宏观准则层面,将选址指标因素细分为四大维度:自然属性、经济属性、交通属性及社会环境。进一步在微观指标层面,根据20项选址指标的性质或功能上的相似性,被归类至宏观维度之下,形成了系统的指标映射。据此构建一个多层级结构的选址指标体系,其中顶层为目标层,聚焦高速铁路大型临时设施选址,中间层为准则层,包含四大宏观准则因素;底层为指标层,涵盖20项细化的选址指标,具体详见表1。该多层级指标体系结构清晰,逻辑架构明确,各指标间既相互联系又各有侧重,形成了有机的整体,为后续运用ArcGIS的构建选址模型提供了理论支撑,确保了选址分析的科学性。

表1 高速铁路大型临时设施选址指标体系

Tab. 1 Site selection index system for large temporary facilities of high-speed railways

目标层	准则层	指标层
高速铁路大型临时设施选址	C1:自然属性	C11:地理高程
		C12:地形坡度
		C13:地质风险
	C2:经济属性	C21:土地类型
		C22:征地拆迁复垦
		C23:原材料分布
		C24:预制梁运输
		C25:劳动力成本
		C26:基础配套设施
	C3:交通属性	C31:区域交通规划
		C32:河流湖泊分布
		C33:铁路网络
		C34:道路网络
		C35:路网密度
		C36:道路拥挤程度
		C37:交通安全事故
	C4:社会环境	C41:政策法规
		C42:重要保护设施
		C43:生态保护区域
		C44:周围居民点分布

大型临时设施是为高速铁路建造而服务的重要临时设施,其目的是确保预制梁安全、经济、高效、绿色的生产与运输。良好的自然地理条件是实现施工安全的基础条件,其主要与地理高程、地形坡度和地质风险密切相关。工程项目的开展需严格控制在工程预算内,大型临时设施的成本支出主要包含土地租赁成本和生产经营成本。土地类型的差异以及征地拆迁范围的广度均会对土地租赁的经济成本产生显著影响;在预制梁的生产经营阶段,原材料的地理分布、预制梁的运输半径以及劳动力费用将直接映射到工程造价的构成中。此外,预制梁场的运营亦不可避免地依赖于供电设施、医疗服务等完善的基础配套设施。完备的交通基础设施构成了预制梁高效生产与物流运输的关键支撑要素。发达的河流网络、道路运输架构与远离现有邻侧铁路以及较好的道路通行性能共同为工程时效性的保障提供了必要条件,确保了原材料及预制梁的安全与便捷运输。高速铁路的建设具有一定的项目周期,大型临时设施的选址要契合当地的政策法规,同时减少对社会公众和生态环境的影响以及避免对航空、通讯、军事等重要设施的干扰。

2　ArcGIS选址模型构建

高速铁路大型临时设施主要分布于低山丘陵区域，其功能旨在为高速铁路建设提供必要的辅助支持。多层次选址指标体系可为大型临时设施选址提供选址逻辑与理论依据，而ArcGIS能够有效处理多源地理信息数据，支持多准则决策和模型构建，从而为复杂选址提供科学可靠的支持。基于ArcGIS平台将选址指标体系的定性研究定量化表征，实现选址指标因素可视化评估，解析选址指标因素间的空间相互作用关系，以建立高速铁路大型临时设施选址模型，主要过程详见图1。选址指标体系中的影响因素可进行空间图层化表达，探寻单因素作用下的选址适宜性评价，基于空间叠加分析工具，挖掘多因素共同作用下空间数据的协同性，并构建区域适宜性评价模型，最终科学确立最佳选址区域，筛选出适宜性较高区域用于大型临时设施用地建设，以有效确保高速铁路大型临时设施生产运营和调度运输安全、经济、高效、绿色运行。

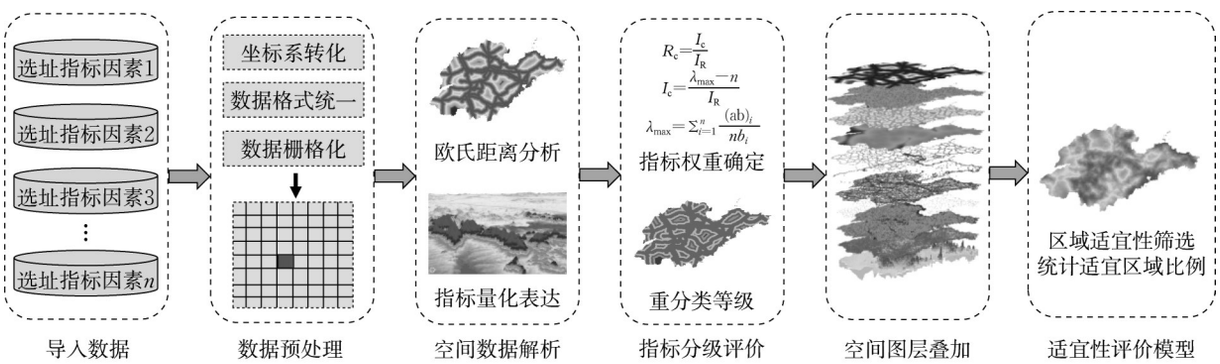

图1　高速铁路大型临时设施选址模型

Fig. 1　Site selection model for large temporary facilities of high-speed railways

2.1　数据预处理

针对高速铁路大型临时设施选址问题，根据选址指标因素，完成相关数据的收集。此处数据主要由两部分构成，一是地理信息数据收集：获取研究区域的地形地貌、地理高程、交通网络及湖泊水系等地理数据；二是社会经济数据收集：采集区域内的人口密度、土地使用情况与生态自然保护区等社会环境信息；并对所获取的数据进行数据清洗、数据栅格化及投影坐标转换等预处理操作。数据清洗环节涉及将多种地理数据格式（如.shp和.tiff文件）导入ArcGIS平台，进行数据完整性的检验，排除显著的异常数据点，并核对数据字段中的单位与格式，确保数据的一致性和准确性。数据栅格化是将矢量数据转换为栅格数据，以便后续空间建模分析，因为矢量数据是通过点、线和多边形来表示地理特征，具有清晰的边界，而栅格数据是由规则网格（像素）组成，代表地理区域的局部特性，网络分析工具多以栅格数据为底座。投影坐标转换是指将使用不同坐标系统（如地理坐标系和投影坐标系）的数据源进行坐标统一化。

2.2　空间数据解析

在完成基本的数据预处理后，进一步地，通过对各指标因素进行可视化表达与空间拓扑分析。使用DEM（数字高程模型）数据，分析区域的地形特征，提取高度、坡度、坡向等地理空间特征，坡度较小区域和合适的坡向更利于大型临时设施后期的生产运输工作，并对易发生地质灾害的局部区域进行标识，以排除潜在的安全风险。建立网络图层结构，分析土地使用类型，筛选区域内的交通网络，基于空间分析工具，计算每个栅格像元到最近数据源的欧氏距离。对关键交通线路、环境保护区等进行缓冲区分析，关注居民点分布情况，进一步扩大保护范围，以降低候选大型临时设施点对相关区域的影响。筛选出水源保护区、湿地森林等自然保护区，对敏感区域进行标记，以减小该区域作为大型临时设施用地的可能性。

2.3　指标分级评价

影响大型临时设施选址的因素众多且互相交织作用，每个选址指标的好坏都会对最终的选址模型构建产生偏移。因此，细致考量单一指标因素作用下选址的适宜性程度，即对指标进行重分类，确定不同适宜层级的指标对应范围。参照类似文献划分结构和专家经验性判断，根据适宜性程度，对所有的指标元素进行分类赋值，最高适宜区域为5分，较为适宜区域为4分，一般适宜区域为3分，较不适宜区域

为2分,最不适宜区域为1分,采用正向与负向评分规则进行表征,具体划分细则详见表2。

表2 大型临时设施选址指标适宜性水平

Tab. 2 Suitability of site selection index for large temporary facilities

选址指标	单位	最高适宜	较为适宜	一般适宜	较不适宜	最不适宜
地理高程[23]	m	<50	50~100	100~150	150~200	>200
地形坡度[1]	°	<5	5~10	10~20	20~30	>35
地质风险		安全区	低风险区	中等风险区	高风险区	极高风险区
土地类型[1]		裸地(未利用)	耕地	草地	林地	商服用地
征地拆迁复垦[7]		基本没有	存在较少	征地适中	征地较多	集体征地
原材料分布[17]	km	<50	50~100	100~150	150~200	>200
预制梁运输[2]	km	<5	5~10	10~20	20~30	>30
劳动力成本[7]		经济	较为经济	适中	较高	很高
基础配套设施[1]		完备	较为完备	适中	较少	很少
区域交通规划		契合发展规划	契合发展规划	契合发展规划	存在交通影响	存在交通影响
河流湖泊分布[17]	m	<500	500~1 000	1 000~2 000	2 000~3 000	>3 000
铁路网络[1]	km	>0.5	0.3~0.5	0.2~0.3	0.1~0.2	<0.1
道路网络[7]	km	<0.5	0.5~5	5~10	10~20	>20
路网密度[1]	km•km^{-2}	>10	7~10	4~7	1~4	<1
道路拥挤程度		非常畅通	畅通	轻度拥堵	中度拥堵	严重拥堵
交通安全事故		很少发生	较少发生	偶尔发生	经常发生	反复发生
政策法规		完全契合	完全契合	完全契合	部分契合	部分契合
重要保护设施	km	>60	45~60	25~45	10~25	<10
生态保护区域[24]	km	>50	35~50	25~35	10~25	<10
周围居民点	km	>20	15~20	10~15	5~10	<5

大型临时设施的选址是由多种指标因素共同作用的结果,故具有较大的不确定性。为了减少人为决策带来的误差和个体主观偏好,采用AHP来量化各指标因素对选址决策的影响权重[25],旨在最大程度地降低决策过程中的主观性偏差,以及减少模糊性分析的影响。指标的权重计算步骤如下:

(1)构造判断矩阵。判断矩阵是AHP中用来比较各个元素相对重要性的工具,用于确定不同准则和不同指标之间的重要程度。多层次选址指标体系架构确立后,构建判断矩阵是定量分析不同指标间权重的重要步骤,常通过1—9数字量表和两两比较法来进行构造。判断矩阵是一个方阵,矩阵中的元素代表2个比较指标之间的相对重要性,通过构造判断矩阵,可以将主观判断转化为数值形式,以便后续的计算。假设有n个指标元素需要比较,记这n个元素分别为$a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$,若因素$i(i\in n)$和因素$j(j\in n)$的重要性之比为$a_{ij}$,那么因素$j$和因素$i$的重要性之比如式(1)所示:

$$a_{ji}=\frac{1}{a_{ij}} \tag{1}$$

式中:a_{ij}取值可参考通常采用Saaty的1—9标度方法,描述指标重要性具体如表3所示,表中,n表示相对重要性,a_{ji}和a_{ij}表示判断矩阵元素。

因此判断矩阵也是对角线为1、对角线两边对称位置元素互为倒数的特殊矩阵。所构造的判断矩阵,见式(2):

表3 Saaty重要性标度方法

Tab. 3 Saaty importance scale method

a_{ij}	含义
1	元素i和元素j具有同等重要性
3	元素i比元素j稍微重要
5	元素i比元素j明显重要
7	元素i比元素j极其重要
9	元素i比元素j绝对重要
$2n, n=1, 2, 3, 4$	元素i比元素j的重要性介于$a_{ij}=2n-1$和$a_{ij}=2n+1$之间
$a_{ji}=1/n$	$n=1, 2, \cdots 9$表示两者交换次序比较

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \dfrac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \dfrac{1}{a_{13}} & \dfrac{1}{a_{23}} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dfrac{1}{a_{1n}} & \dfrac{1}{a_{2n}} & \dfrac{1}{a_{3n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

(2)判断矩阵归一化。将判断矩阵的各元素按列进行归一化,如式(3)所示:

$$\overline{a_{ij}}=\frac{a_{ji}}{\sum_{k=1}^{n}a_{kj}},\ i,j=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

(3)特征向量计算。将处理后的判断矩阵按行相加,得特征向量$\overline{\boldsymbol{b}}$,见式(4)与(5):

$$\overline{\boldsymbol{b}_i}=\sum_{ij}^{n}\overline{a_{ij}}\ i,j=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

$$\overline{\boldsymbol{b}}=\left[\overline{b_1},\ \overline{b_2},\ \overline{b_3},\cdots,\ \overline{b_n}\right]^T \tag{5}$$

(4)指标权重计算。将特征向量进行归一化处理，得到指标权重$\boldsymbol{b}_i$，见式(6)：

$$\boldsymbol{b}_i=\frac{\overline{b_i}}{\left(\overline{b_1}+\overline{b_2}+\overline{b_3}+\cdots+\overline{b_n}\right)} \tag{6}$$

(5)一致性检验。因研究问题的复杂性和评估主体的多元性，在多个评估指标重要性程度比较时，可能会出现前后层次因素相对重要性优先级异常情况。因此，为尽可能保障计算结果和分析结果的精准性，需进行一致性检验。求出一致性比率值R_c，由式(7)—(9)得出，若其值小于标准值(0.1)，即满足不等式(10)，则判断矩阵通过一致性检验，否则需要重新构建判断矩阵，直到矩阵通过一致性检验为止。

$$R_c=\frac{I_c}{I_R} \tag{7}$$

$$I_c=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{8}$$

$$\lambda_{max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{ab})_i}{n\boldsymbol{b}_i} \tag{9}$$

式中：I_c为判断矩阵一致性指标；I_R为不同阶数矩阵的一致性指标，一般查阅相关资料可得，如表4所示；λ_{max}为判断矩阵最大特征根。

$$R_c<0.1 \tag{10}$$

表4　*n*阶矩阵的随机指标

Tab. 4　Random index I_R of *n*-order matrix

n	I_R	n	I_R	n	I_R
1	0	4	0.89	7	1.36
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.52	6	1.26	9	1.46

2.4　空间图层叠加

在完成了对各单一指标因素在区域适宜性水平上的量化评定，并确立了指标间的权重分配之后，将挖掘多因素共同作用下空间数据的协同性，并构建选址适宜性评价模型。在分析区域适宜性综合评价时，不同的指标图层具有不同的量纲，为消除指标层级间不同量纲影响，需要将数据转换为统一尺度，即进行标准化处理，常见的标准化方法有线性标准化和Z-score标准化，处理细则分别见式(11)和(12)：

$$Z=\frac{X-\min(X)}{\max(X)-\min(X)} \tag{11}$$

$$Z=\frac{X-\mu}{\sigma} \tag{12}$$

式中：Z为经过标准化处理得到后的数据；X为原始数据；$\min(X)$和$\max(X)$分别为该数据样本中的最小值和最大值；μ和σ分别为均值和标准差。经过标准化处理后，结合AHP所确立的多层次选址指标体系间的权重，可将不同指标的网络拓扑图层进行叠加，分析共同作用下空间相互作用关系，以评估不同区域的选址适宜性。具体而言，基于ArcGIS的空间分析工具，在同一空间网络中，将不同指标图层进行耦合，执行加权叠加操作，图层叠加公式如式(13)所示：

$$S=w_1\cdot l_1+w_2\cdot l_2+\cdots+w_i\cdot l_i \tag{13}$$

式中：S为最终的适宜性得分；w_i为第i个图层的权重；l_i为第i个标准化后的图层值。

赋权叠加后构建的模型即为选址适宜性评价模型，反映了每个区域的不同用地适宜性水平。依据各栅格单元的综合适宜性得分可以对研究区域进行适宜性等级划分。此分类过程采用了统计分类中的自然断点法[26]，其基本原理是聚类分析，旨在确保每组内要素的范围和数量在尽可能均衡的前提下进行分类，最大化组内相似性并最小化组间差异性。通过得到的适宜性评价模型和适宜性等级划分，可直观地筛选出可行性较高的候选地块，便于实际工程选址决策。

3　实例分析及验证

目前以专家经验和工程勘探所确定的大型临时设施位置具有一定的可行性与实践性。为了验证所提模型的科学性与有效性，以山东省境内已建成的大型临时设施为研究对象，将其实际地理位置与通过本文模型得到的选址适宜性地图进行对比分析。本实验中所有数据真实可靠，用于构建ArcGIS选址模型的地理信息数据，来源于国家基础地理信息中心、全国地理信息资源目录服务系统与山东省的年鉴数据；山东省境内实际的大型临时设施，主要是指预制梁场和预制构件厂，其地理经纬度数据来源于谷歌地图和百度地图。所有数据都严格按照ArcGIS要求和标准，包括坐标系的统一和不同格式数据间的转化，为了保证选址的高精度，栅格数据分辨率为30 m，关于选址指标因子的解析与可视化评估都在ArcGIS中进行。

3.1　选址指标权重的确定

为确保模型的客观性，指标权重的科学性尤其重要。通过问卷调查的形式，邀请长期聚焦高速铁路建设施工领域的5位专家，包含教授、高级工程师

以及从事管理的项目总工,对大型临时设施选址指标的相对重要性进行打分。通过层次分析法,严格计算指标权重,在确保所有数据满足一致性指标检验的情况下,得到所有的准则层和指标层的权重,如表5所示。

表5 准则层和指标层的权重

Tab. 5 Weights of the criterion layer and indicator layer

准则层	权重	指标层	权重
C1	0.123 8	C11	0.567 9
		C12	0.333 9
		C13	0.098 2
C2	0.463 5	C21	0.207 3
		C22	0.372 3
		C23	0.076 9
		C24	0.113 8
		C25	0.171 3
		C26	0.058 4
C3	0.340 6	C31	0.046 9
		C32	0.059 0
		C33	0.274 7
		C34	0.210 3
		C35	0.163 1
		C36	0.109 8
		C37	0.136 2
C4	0.072 1	C41	0.077 2
		C42	0.306 9
		C43	0.237 8
		C44	0.378 1

通过计算与分析发现,权重倾向与工程实践逻辑上高度衔接。良好的地质条件与合适的地理高程是建造大型临时设施的重要自然地理基础,在进行大型临时设施选址勘探工作时需要特别重视。大型临时设施作为高速铁路建造的重要配套设施,经济性和便捷性是分析选址适宜的重要标准。经济性主要包含是否具有较低的土地成本和征地拆迁成本、较近的原材料分布、合适的劳动力成本以及完善的基础配套设施,其中土地成本和征地拆迁成本又是经济属性当中的首要因素。便捷性主要指预制梁的前期生产运输和后期提供服务的方便程度,需要通畅的道路条件、较好的道路可达性和较高的路网密度才能保证预制梁的生产和高速铁路建造的时效性,其中铁路网络和道路网络是评判大型临时设施选址交通属性的重要依据。大型临时设施的选址建造也与社会环境当中的公众、生态环境和重要设施相关,其中是否远离社会生产环境中的居民点和重要保护设施也是重要的评判因素。

3.2 选址适宜性分析及模型验证

将所收集到的数据导入至ArcGIS开展选址模型的构建,主要步骤有:数据预处理,主要有剔除异常值、规范单位格式、数据栅格化和统一坐标系;提取重要地理特征,如坡度走向、高程分布,标记不良地质和重要自然保护区;分析路网空间分布结构,并计算欧氏距离,布设适宜缓冲区;结合前面所确定的指标间的权重,对不同的空间图层进行加权叠加与重分类,最终得到山东省大型临时设施选址适宜性评价图,如图2所示。从图中可得知,最高适宜区域主要位于山东省境界线周围,且西南方向分布较为集中,主要原因是其具有易于临时设施建设和物流运输的条件,且远离居民活动中心,但占比只有1.86%。最低适宜区域也较少,占比4.9%,主要分布在山东省中部和东北方向,主要原因为中部泰山山脉远高于周边地势,东北方向为黄河口所在地,水系发达且为生态保护区。比例最高区域为一般适宜区,达到42.08%,散落分布在城市间的交界处,土地多以未开放用地或耕地为主。较为适宜区域也高达33.48%,仅次于一般适宜区域,主要分布在山东省的北部和西部;较不适宜区域主要位于最低适宜区域的周边,而一般适宜区域又是较不适宜和较为适宜的过渡带,具体数量分布关系如图3所示。

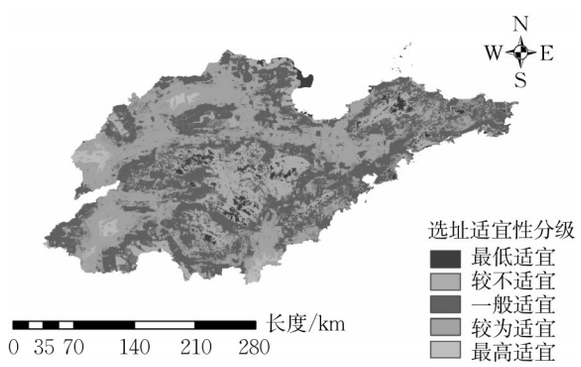

图2 山东省选址适宜性评价

Fig. 2 Site suitability evaluation of Shandong Province

为了验证所提模型的有效性与可行性,将上述所得到的山东省选址适宜性评价图与境内已建成的40个大型临时设施具体位置进行比较,探寻理论模型结果与工程实际选址的契合度。通过比较发现,有52.5%的大型临时设施的实际位置位于山东省选址适宜性评价图的较为适宜区内;有5%的大型临时设施的实际位置位于最高适宜区内;位于一般适宜区内的大型临时设施占比32.5%,较不适宜区占比7.5%,最低适宜区只有2.5%,具体数值和点位分布详见表6和图4。结果表明,通过本文模型生

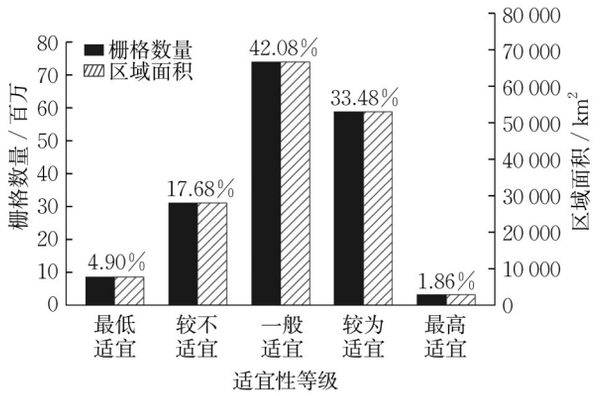

图3　山东省选址适宜性等级分布

Fig. 3　Distribution of site suitability grades in Shandong Province

成的山东省选址适宜性评价图能够较好评估实际工程位置的科学性，模型准确度高达90%，充分说明了本文方法用于大型临时设施选址的可靠性与有效性。

表6　已建大型临时设施适宜性分布统计

Tab. 6　Statistics of the suitability distribution of built large-scale temporary facilities

适宜区划分	位于区域内的设施个数	占所有设施的比重/%
最高适宜	2	5.0
较为适宜	21	52.5
一般适宜	13	32.5
较不适宜	3	7.5
最低适宜	1	2.5

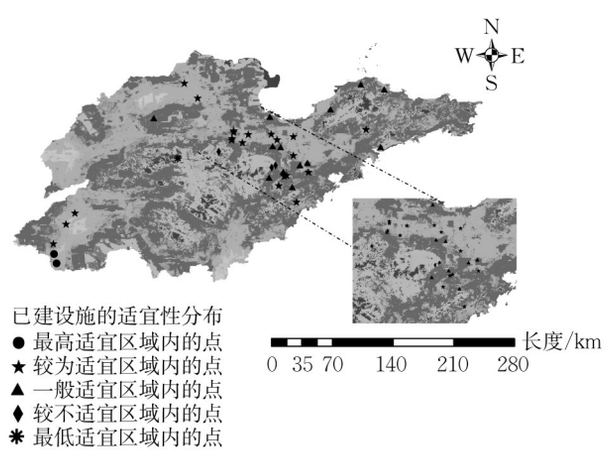

图4　已建大型临时设施的适宜性区域分布

Fig. 4　Distribution of suitability areas for built large-scale temporary facilities

4　结论与展望

针对高速铁路大型临时设施选址，现阶段指标因素错综复杂、架构不清，选址过程主观倾向、难以量化评估的问题，通过定性与定量相结合的方法，梳理影响选址主要因素与逻辑架构，构建多层次选址指标体系；基于ArcGIS平台，解析选址指标的空间特征与相互作用关系，建立大型临时设施选址模型，形成高速铁路大型临时设施选址新的工作范式。通过实例分析与验证，表明指标体系可信度高，选址模型普适性较好。由于实际选址工程中环境的多样性和指标权重计算过程的主观存在，与实现全方位覆盖与完全客观依然存在差距，未来将继续迭代选址指标丰富度和探寻更科学的权重计算方法，进一步增强模型的泛化能力，为实际工程建设提供更有效的支持。

作者贡献声明：

曾小清：论文架构指导，论文审阅与校对。

邓　波：构思研究思路，设计实验，撰写论文，投稿与修改。

朱明昌：论文指导修改。

应沛然：论文指导修改。

李在奇：论文指导修改。

参考文献：

[1] WANG S, RUAN Y, HU W. Site selection of precast concrete component factory based on PCA and GIS [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022(1): 7857647.

[2] 易明林，刘贵文，傅晏，等. 选址问题综述及PC构件厂选址[J]. 工程管理学报，2019，33(5)：30.
YI Minglin, LIU Guiwen, FU Yan, *et al*. Overview of site selection issues and site selection of PC component factories [J]. Journal of Engineering Management, 2019, 33(5): 30.

[3] 张俊存. 京雄城际铁路智能化梁场建设[J]. 铁道建筑，2020，60(5)：47.
ZHANG Juncun, Construction of intelligent beam yard for Beijing-Xiongan intercity railway [J]. Railway Construction, 2020, 60(5): 47.

[4] 赵茜. 高速铁路预制梁场选址问题研究[D]. 成都：西南交通大学，2014.
ZHAO Qian. Research on site selection of precast beam yard for high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[5] 王吉连，袁丹诚，李陆平. 客运专线铁路预制梁场选址与总体布局的实践[J]. 铁道标准设计，2008(6)：35.
WANG Jilian, YUAN Dancheng, LI Luping. Practice of site selection and general layout of railway prefabricated beam yard for passenger dedicated line[J]. Railway Standard Design, 2008 (6): 35.

[6] 罗倩蓉，董茜月，曾德珩. 基于模糊层次分析法的装配式建筑

PC构件厂选址[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(3): 111.
LUO Qianrong, DONG Xiyue, ZENG Deheng. Location of prefabricated building PC components factory based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(3): 111.

[7] 夏祥斗. 桥梁施工现场预制梁场选址与设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
XIA Xiangdou. Research on site selection and design of prefabricated beam yard in bridge construction site[D]. Heifei: Hefei University of Technology, 2008.

[8] 周国华, 陈雪玉, 魏强, 等. 基于运架匹配的铁路工程预制梁场选址模型与优化[J]. 工业工程与管理, 2024, 29(2): 130.
ZHOU Guohua, CHEN Xueyu, WEI Qiang, *et al*. Site selection model and optimization of railway prefabricated beam yard based on transport frame matching [J]. Industrial Engineering and Management, 2024, 29(2): 130.

[9] MOHAME N A A, MOHD N M N, MOHD S S A, *et al*. Validating site selection criteria for precast manufacturing plant in Malaysia [J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2014(8): 462.

[10] WU P, LOW S P. Lean management and low carbon emissions in precast concrete factories in Singapore[J]. Journal of Architectural Engineering, 2012(18): 176.

[11] AZMAN M N A, S. AHAMAD M S , KUSUMWARDANI R, *et al*. Incorporating spatial selection criteria with decision preferences in MCE-GIS-based site selection of a precast manufacturing plant [J]. Malaysian Construction Research Journal, 2017, 2: 87.

[12] ZHU L, MENG X, SHI Z, *et al*. Selection of prefabricated concrete factories′ location based on triangular fuzzy numbers and fuzzy group decision-making [C]//3rd International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA). Hong Kong:[s.n.]: 2018, 26.

[13] WANG D, LIU G, LI K, *et al*. Layout optimization model for the production planning of precast concrete building components [J]. Sustainability, 2018, 10(6): 1807.

[14] WEN J, WU L. Flow shop optimization of hybrid make-to-order and make-to-stock in precast concrete component production [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 297: 126708.

[15] 王海金, 唐若笠, 周雨诗, 等. 基于ArcGIS与多因子模型的光伏电站选址评估[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 120.
WANG Haijin, TANG Ruoli, ZHOU Yushi, *et al*. Location evaluation of photovoltaic power station based on ArcGIS and multi-factor model [J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(11): 120.

[16] WIJETHUNGAMAGE Sasha Malintha. 基于多准则决策和GIS的斯里兰卡住宅开发土地选址分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
WIJETHUNGAMAGE Sasha Malintha. Analysis of land location for residential development in Sri Lanka based on multi-criteria decision making and GIS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

[17] GUO G, WANG J, WANJIN Y, *et al*. Challenges in the green building supply chain: multi-objective planning for prefabricated factory site selection [J]. Environment, Development and Sustainability, 2024(1): 1.

[18] KANG Y O, YABAR H, MIZUNOYA T, *et al*. Optimal landfill site selection using ArcGIS multi-criteria decision-making and analytic hierarchy process for Kinshasa city [J]. Environmental Challenges, 2024, 14: 100826.

[19] PRADHAN S, LAHLOU F Z, GHIAT I, *et al*. A comprehensive decision-making approach for the application of biochar in agriculture to enhance water security: a GIS-AHP based approach[J]. Environmental Technology & Innovation, 2024, 36: 103801.

[20] 曾小清, 林海香, 王奕曾, 等. 基于事故数据的轨道交通运行安全风险辨识方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 418.
ZENG Xiaoqing, LIN Haixiang, WANG Yizeng, *et al*. Risk identification of rail transit operation safety based on accident data [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(3): 418.

[21] 张子牛, 王珍岩, 李桂花, 等. 基于层次分析法的人工鱼礁选址适宜性评价方法[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(5): 1308.
ZHANG Ziniu, WANG Zhenyan, LI Guihua, *et al*. Suitability evaluation method of artificial reef site selection based on analytic hierarchy process [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(5): 1308.

[22] ALI S, STEWART R A, SAHIN O, *et al*. Integrated GIS-AHP-based approach for off-river pumped hydro energy storage site selection[J]. Applied Energy, 2023, 337: 120914.

[23] 刘海燕, 庞小平. 利用GIS和模糊层次分析法的南极考察站选址研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(2): 249.
LIU Haiyan, PANG Xiaoping. Research on site selection of antarctic research station using GIS and fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2015, 40(2): 249.

[24] 刘国锋, 琚望静, 冶建明, 等. 基于AHP-GIS的西北干旱区聚落选址适宜性评价研究——以吐鲁番市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(8): 129.
LIU Guofeng, JU Wangjing, YE Jianming, *et al*. Study on suitability evaluation of settlement site selection in the arid region of northwest China based on AHP-GIS: a case study of Turpan City[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(8): 129.

[25] REKIK S, EL ALIMI S . Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: a case of Tunisia [J]. Energy Conversion and Management: X, 2023, 18: 100355.

[26] ABBASI M, PISHVAEE M S, BAIRAMZADEH S. Land suitability assessment for paulownia cultivation using combined GIS and Z-number DEA: a case study [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 176: 105666.