

文章编号:1671-1637(2016)04-0001-13

多年冻土区公路路线选择分层目标法

汪双杰¹, 闫晓敏², 张 驰^{1,2}, 孟 良², 杨 坤²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室,
陕西 西安 710075; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了进行多年冻土区公路路线设计,以多尺度效应理论为基础,提出了基于保护冻土由粗到细、由面到带、由带到线的分层目标选线方法,构建了理论模型。结合不同地形地貌、既有工程、构造物与建筑物在不同比例尺下的表现形态,给出了分层目标法的层次划分,确定了每个层次下公路路线选择的影响因素。考虑路线节点重要度和地形地貌的影响,给出了第1层次下多年冻土区选线模型。利用公度原理给出了第2层次下平均海拔、平均坡度、年平均地温、冻土分布、融区构造和既有工程等影响因素的标度分级,并构造了第2层次下多年冻土区公路选线困难度模型。综合考虑冻土地温、冻土含冰量、冻土病害和植被覆盖带来的冻土危害,同时兼顾多年冻土区既有工程的热干扰,构建了第3层次多年冻土区公路选线可靠度模型。以青藏高原多年冻土区秀水河至雅玛尔河段为例,运用分层目标法进行了公路选线。研究结果表明:运用分层目标法确定的路线方案可以准确避让高病害率的冻土区域,避开既有工程的相互干扰,从而获得工程困难度低、可靠度高的路线方案。

关键词:道路工程;多年冻土区;公路选线;分层目标法;工程困难度;路线可靠度

中图分类号:U412.1 **文献标志码:**A

Hierarchical object method of highway route selection in permafrost region

WANG Shuang-jie¹, YAN Xiao-min², ZHANG Chi^{1,2}, MENG Liang², YANG Kun²

(1. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to design the highway route in permafrost region, the hierarchical object method to protect the permafrost from coarse to fine, from surface to belt, from band to line was proposed based on multi-scale effect theory, and the theory model was constructed. Combined with the display forms of different topographies, landforms, existing projects, structures, and buildings in different scales, the hierarchical division of hierarchical object method was given, and the influence factors of highway route selection in each level were determined. Considering the influence of route node's importance degree, topography and landform in permafrost region, the highway route selection model in the first level was given. The scale classifications of average altitude, average slope, annual average ground temperature, permafrost distribution, talik structure, and existing projects were obtained by using commensurability principle, and then the

收稿日期:2016-06-21

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01, 2014BAG05B03);交通运输部建设科技项目(2013 318 490 010);交通运输部应用基础研究项目(2014 319 812 170);中国博士后科学基金项目(2016M590915)

作者简介:汪双杰(1962-),男,安徽怀宁人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司教授级高级工程师,工学博士,从事公路设计研究。

highway route selection difficulty degree model in permafrost region was established in the second level. The permafrost hazards caused by permafrost ground temperature, permafrost ice content, permafrost disaster, and vegetation coverage were considered synthetically, and the thermal disturbance among existing projects in permafrost region was also taken into consideration, then the highway route selection reliability model in the third level was established. The permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau from Xiushui River to Yamarle River was taken as example, and the route selection was carried out by using hierarchical object method. Analysis result shows that the route plan determined by hierarchical object method can accurately avoid the permafrost region with high disease rate and evade the disturbance among existing projects, and a route plan with low engineering difficulty degree and high engineering reliability is achieved. 5 tabs, 11 figs, 35 refs.

Key words: road engineering; permafrost region; highway route selection; hierarchical object method; engineering difficulty degree; route reliability

Author resume: WANG Shuang-jie(1962-), male, senior engineer, PhD, +86-29-88320807, wangshj@ccroad.com.cn.

0 引 言

多年冻土是自然界中与温度密切相关、工程危害极大的地基土体,中国多年冻土分布面积位居世界第3,约占国土面积的22.3%。青藏高原是中国最主要的多年冻土区,占中国多年冻土区面积的70%。由于多年冻土具有高温高含冰量和环境敏感性极强等特点,使得多年冻土区工程建设具有强烈的脆弱性^[1-2]。在高速公路选线过程中,把公路建设对冻土环境的影响降到最低程度,是设计人员面临的难题。

早期国内外学者主要研究路线线位选择的影响因素。Sadek等以地质、环境影响和社区破坏评估等多种因素作为目标,开发了基于地理信息系统(Geographic Information System, GIS)的路线设计多目标评价体系^[3];AASHTO将背景敏感性设计方法(Context Sensitive Design, CSD)的设计理念融入公路设计规范,以体现公路路线设计的功能、安全、美学、交通质量等设计目标;乔平等首先从地质角度考虑,将铁路地质选线中的某些地质问题归结并建立了选线知识库^[4]。随后国内学者重点研究了青藏高原多年冻土区选线的影响因素。王国尚等在线路选线 and 设计阶段,通过选择合理的输电线路、塔基类型来避免或减少冻融灾害的产生^[2];孙永福在探明沿线多年冻土分布特征的基础上,结合冻土的工程特性合理确定了青藏铁路线路的走向方案^[5];马巍等将冻土的主动冷却路基和动态设计思路引入青藏铁路建设^[6];陈拓等分析了青藏高原多年冻土

地区铁路选线中路基工程动力稳定性问题^[7]。但以上研究仅考虑了选线的影响因素,对于可应用于该地区的公路选线方法研究较少。

21世纪以来,随着技术的进步,国内外学者纷纷引进先进技术作为线形选择的方法。Jong等建立了公路三维空间线形优化模型进行路线选择^[8];Jha等将GIS与空间线路优化技术相结合,将环境对选线的影响通过具体的计算公式进行量化处理,合理地转变为优化模型中目标函数的代价值^[9];Jong等基于细节地理信息,提出了一种同时优化三维道路线形的模型^[10];Jha等借助GIS对工程费用与环境影响费用进行统计分析,利用经济效益指标分析和决策路线方案^[11];Li等采用定性与定量相结合的手段构建了平原公路路线方案的决策指标体系,并结合模糊算法和专家经验法确定了各评价指标的权重^[12];Snidero等提出了基于遥感数据和地质图地质表面三维重建方法的工作流程^[13];Guler建立了一个革命性的公路和铁路三维路线优化辅助决策系统Quantum,可以帮助规划设计者在选线过程中综合处理复杂的工程、地质、自然环境与社会人文等问题^[14];吴华金结合实践,分别从路网规划、经济、地形地貌、地质、环境保护等13个方面,提出了山区高速公路路线走廊带的选择方法^[15];王卫东等将GIS技术引入到公路地质灾害信息管理与决策支持系统^[16];刘秀英等提出了将层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和灰色关联度分析法(Grey Relational Analysis Process, GRAP)有机结合,运用在山区高速公路路线方案比选

中^[17];许金良等通过遥感(Remote Sensing, RS)和GIS技术提取相关评价指标,对喀斯特地区生态本底进行综合评价与分析,得出对生态影响最弱的路线走廊^[18]。

就公路选线理念研究而言,国外在线形设计中融入了安全、美学、宽容性与社会经济影响等先进理念,但并未对冻土区特殊环境进行详细的研究,导致可用于多年冻土区的选线理念较少。在选线方法方面,国内外对多年冻土区选线方法研究较少,且现有方法多侧重于多目标选线优化,并未依据传统选线方法进行多层次的分析。为此,本文以青藏高原多年冻土区秀水河至雅玛尔河段为依托工程,从问题认知的角度对选线过程进行分析,以多尺度效应理论为基础,提出了公路路线选择分层目标法。

1 公路路线选择分层目标法基本理论

1.1 理论模型

按照一般的公路路线选择理论,公路路线选择是在一定约束条件下进行的寻优过程。在设计开始时,其目标往往是笼统的,非常不清晰的,然而又具有一定的层次性、约束性和相对性。只有在设计的过程中,才逐步形成较为清晰的目的。由此可见,公路设计过程,一般包含设计目标、约束条件和设计的途径或操作顺序^[19],表示为

$$T = C(P) \quad (1)$$

式中: T 为设计的目标; $C(P)$ 为设计过程集 P 的约束函数。

约束条件具有层次特点,不同的约束条件在不同的层次下表现出不同的结构、形态和细节,由此形成道路约束条件的多层次表达。公路路线的选择过程是从基本运输需求的满足到最终方案的确定,需要经过许多设计层次,设计层次从前到后其抽象度不断降低,后续层次是前一层次的精化、进化与展开,而这一过程是在不断满足不同层次约束条件下进行的,并最终得到该层次下满足设计目标的方案。上述过程可用模型表示为

$$M = \{I, P, Q, O, C, L, \varphi\} \quad (2)$$

式中: M 为公路线形选择模型; I 为输入集; Q 为状态集; O 为输出集; C 为约束集; L 为层次集; φ 为映射集。

满足一定约束的状态 $Q|C$ 经过映射转换为新约束状态的过程即为 P ,输入 I 经过设计过程 P 得到输出 O 。每个层次下一般含有多个子过程,所有的子过程最终形成设计过程,即

$$P_i = \sum_{j=1}^a P_{i,j} \quad (3)$$

式中: P_i 为第 i 层次的总设计过程; $P_{i,j}$ 为第 i 层次中的第 j 个设计过程。

设计过程 P_i 完成后,便可确定第 i 层次下的路线方案,然后在第 i 层次的基础上进行第 $i+1$ 层次的路线选择,直至完成最后一层次的路线方案。

按照上述设计过程的描述,根据公路路线选择情况,具体流程见图1, Q_i 为第 i 层次的总状态。

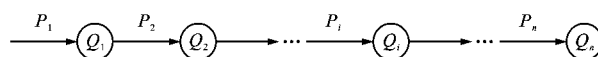


图1 公路路线设计过程的层次顺序结构

Fig. 1 Layer sequence structure of highway route design process

由上述分析可知,公路路线选择过程实际上是一个满足约束的过程,选择过程就是给定社会、经济、地理、环境等多方面的约束描述,求得满足设计要求的设计对象。路线选择是一个不断试探、选择、完善和渐进的循环反复过程,不同层次间既有顺序的逻辑性,又有相互之间的重叠性,总体表现为涉及约束的扩展和满足目标的设计过程,最终获得满足多种约束条件、多目标平衡的路线方案。在每个层次下路线选择的逻辑意义具体表达如下。给定设计约束为

$$C_i = \{C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,j}, \dots, C_{i,a}\} \quad (4)$$

式中: C_i 为第 i 层次的总约束; $C_{i,j}$ 为第 i 层次中的第 j 个约束。

假设 $Q_{i,0}$ 为第 i 层次下的初始方案,第 i 层次下的路线设计过程为

$$P_{i,j} = Q_{i,j-1} | C_{i,j-1} \xrightarrow{\varphi_{i,j}} Q_{i,j} | C_{i,j} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,j}$ 为第 i 层次下的第 j 个状态; $\varphi_{i,j}$ 为第 i 层次中的第 j 个映射。

路线从第 i 层次下的初始状态开始,先满足约束条件 $C_{i,1}$,完成第1个设计过程,以此类推,约束不断得到满足,直到完成第 i 层次下的所有子过程,确定最终解 $Q_{i,a}$ 状态。在约束满足的过程中,除了逐项的设计要求满足之外,还在于要对既有满足的项 $Q_{i,j}$ 做修改,即回溯修改,反映了路线选择是一个螺旋前进的过程。

1.2 层次划分

中国青藏高原多年冻土区基础地理数据库覆盖了从小比例尺(如1:1 000 000)到中比例尺(如1:50 000)再到大比例尺(如1:2 000)范围,从宏观、中观与微观不同层面表现了地理数据的结构、形

态和细节,参照王艳慧等的道路网多尺度数据建模方法^[20],结合卫星云图对不同比例尺下的地形地

貌、既有工程、构造物等要素细节进行层次划分,见图 2~4。

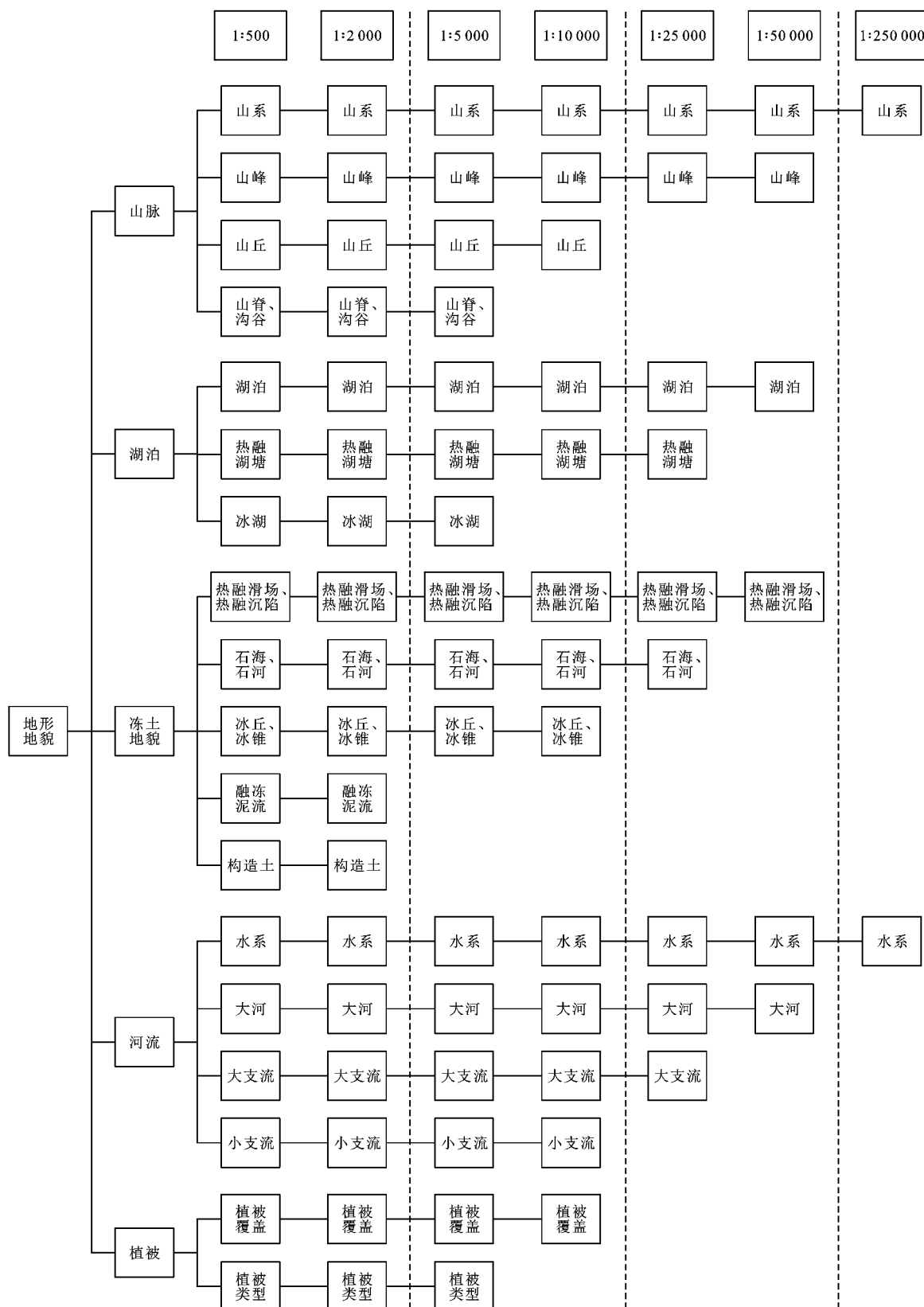


图 2 不同比例尺下地形地貌层次划分

Fig. 2 Hierarchical division of topographies and landforms in different scales

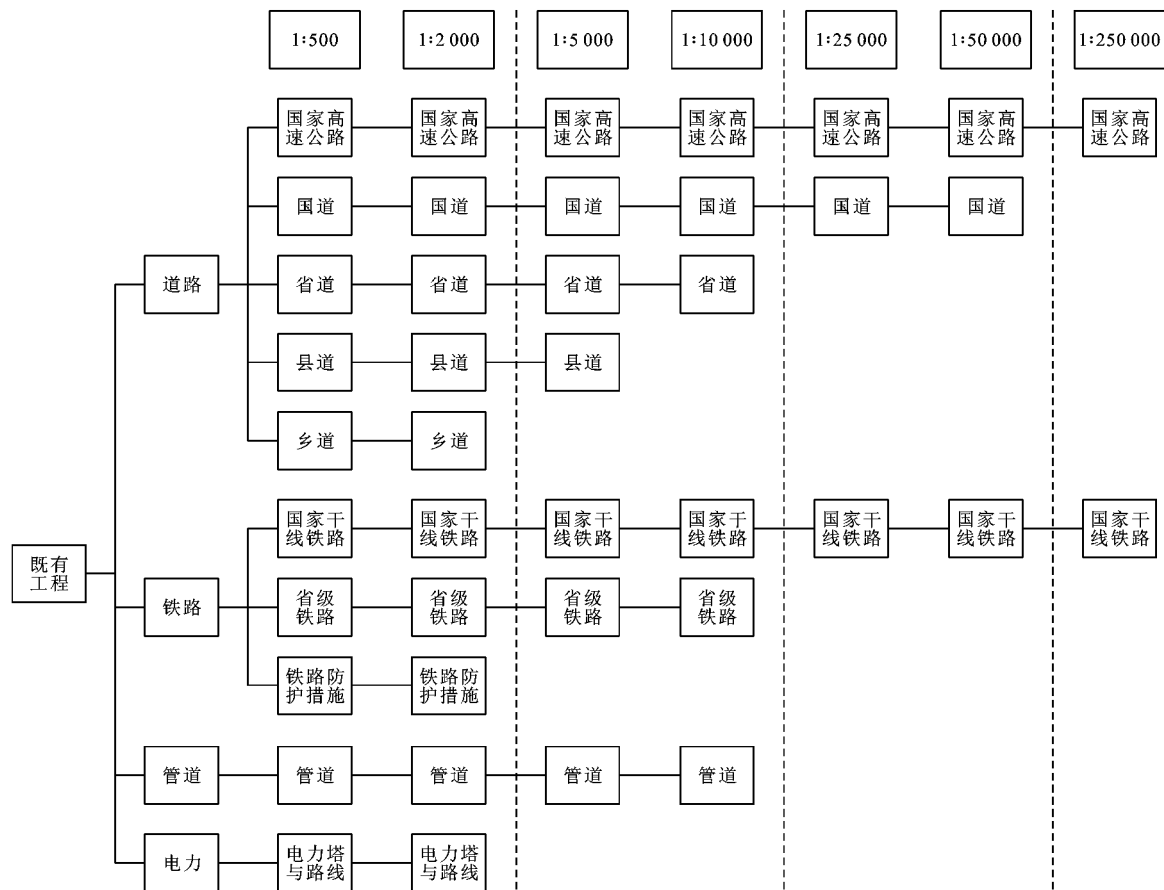


图 3 不同比例尺下既有工程层次划分

Fig. 3 Hierarchical division of existing projects in different scales

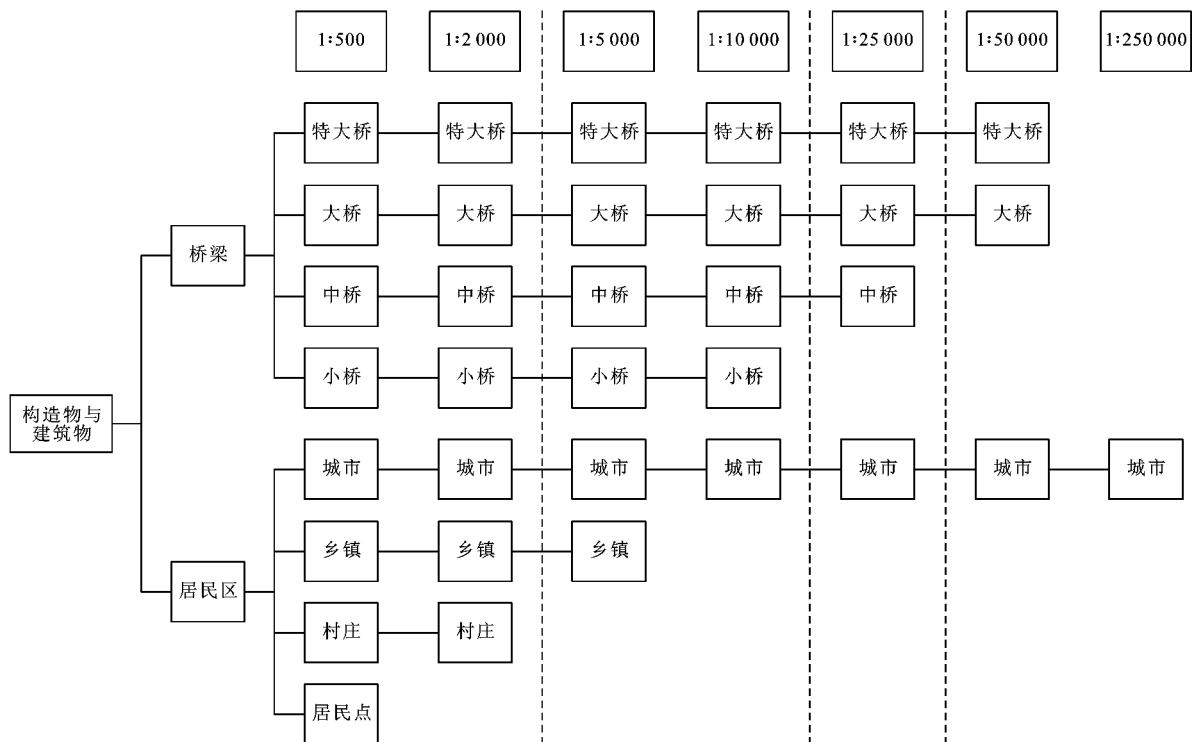


图 4 不同比例尺下构造物、建筑物层次划分

Fig. 4 Hierarchical division of structures and buildings in different scales

从多年冻土区不同比例尺地形图要素类的表示可以发现:在道路线形设计影响因素的抽象表达方面,1:250 000 的地形图只能看到大型山脉与路网主骨架,影响因素单一,若在此地理空间确定初拟线位意义较小;1:50 000 与 1:25 000 地形图可看到大型地理要素(如山脉、大河、湖泊等)与路网简单要素(如高等级道路、大桥等)为主,在该层次下可分析路线走廊带控制性条件,较适合作为第 1 层次;1:10 000 与 1:5 000 地形图可表现中型地理要素(如沟谷地貌、湖塘、支流等)与路网细节要素(如主干道路网、低等级道路、中桥、铁路等),满足走廊带的细化与初拟线位的设计需求;1:2 000 与 1:500 地形图可以表现地形地貌、既有线路工程与结构物的细节,满足线位的细化与局部线位优化比选的设计需求。以公路选线与设计的需求为基础,本文将多年冻土区选线过程分为 1:50 000、1:10 000、1:2 000 共 3 个层次进行分析。

2 多年冻土区公路路线选择分层目标法模型

本文首先确定走廊带初拟线位与走廊带内部基本线位,在此基础上进行局部线位方案的优化和比选,并进行 3 个层次路线选择模型的构建,选线流程见图 5。

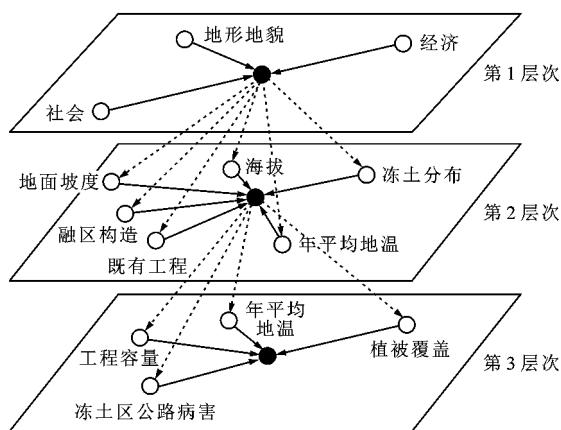


图 5 分层目标法选线流程

Fig. 5 Route selection flow of hierarchical object method

2.1 第 1 层次公路路线选择模型

第 1 层次比例尺较小,所能分辨的影响因素较为粗略,路线选择仅受到城镇分布、大型地形地貌分布以及路网主骨架的影响,同时由于多年冻土区地处偏远,城镇化发展水平很低,路网主骨架稀疏,该层次仅从 2 个方面构建路线选择约束条件:

其一为路线节点重要度,主要包括社会因素 $C_{1,1}$ 与经济因素 $C_{1,2}$;其二为地形地貌因素 $C_{1,3}$ 。依据式(5)在不断满足每个约束条件之后完成第 1 层次下的设计过程 P_1 ,得到输出结果 O_1 。具体流程见图 6。

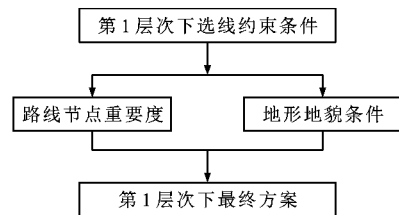


图 6 第 1 层次公路路线选择流程

Fig. 6 Highway route selection flow in first level

根据以上描述,第 1 层次下多年冻土区公路路线选择具体过程可表述如下。

(1)从社会发展角度出发考虑路线节点的重要度,选取平均人口数量代表社会发展程度,以近 m 年该地区年平均人口数量为指标,路线应选取沿线居民较多的城镇,最大程度地发挥公路带动社会发展的作用, $C_{1,1}$ 表示为

$$C_{1,1} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m H_l \quad (6)$$

式中: H_l 为第 l 年该地区的人口总数。

(2)从经济增长的角度出发考虑路线节点的重要度,综合考虑该地区近 m 年的经济收入水平,选取对当地社会进步有巨大促进作用的城镇或乡镇作为沿线控制点, $C_{1,2}$ 表示为

$$C_{1,2} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m G_l \quad (7)$$

式中: G_l 为第 l 年该地区的经济总量。

(3)走廊带选择时还应考虑路线经过的地形地貌条件,尽可能避免大型山川、河流,减少工程规模,兼顾工程经济与运营经济,在力求走廊带的短捷、顺直的前提下,采用必须跨越的特大桥或穿越的特大隧道工程,完成第 1 层次下初拟走廊带的选择。

2.2 第 2 层次公路路线选择模型

第 2 层次比例尺进一步扩大,能够分辨出冻土分布、地形地势以及既有工程线位等。路线选择受到的约束进一步细化,为了清晰地描述第 1 层次确定的走廊带内各种因素对路线的综合影响,在第 2 层次的路线选择中将走廊带划分为若干个分区并引入公路选线困难度模型,利用分区困难度的大小控制第 2 层次公路路线选择,使得路线通过一定范围内困难度相对较小的分区,具体流程见图 7。构建模型的步骤包括

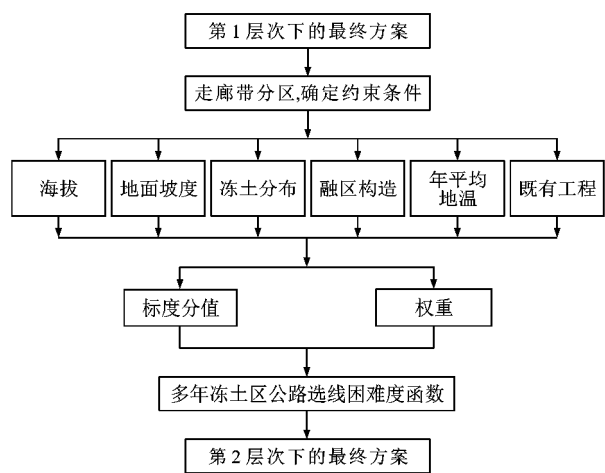


图 7 第 2 层次公路路线选择流程

Fig. 7 Highway route selection flow in second level

确定影响因素、标度分级、赋权重、构建函数。

2.2.1 确定影响因素

在道路线形设计中, C 、 P 、 φ 这 3 个元素相互联系,相互作用,构成有机的整体。结合青藏高原多年冻土区特殊的生态环境以及公路建设的实践经验,从地形地貌、冻土危害、既有工程 3 方面进行公路建设影响因素的分析,结果见表 1。

表 1 第 2 层次公路建设影响因素

Tab. 1 Highway construction influence factors in second level

影响因素	指标
地形地貌	海拔 $C_{2,1}$ 、地面坡度 $C_{2,2}$
冻土危害	冻土分布 $C_{2,3}$ 、融区构造 $C_{2,4}$ 、年平均地温 $C_{2,5}$
既有工程	既有工程 $C_{2,6}$

在地形地貌方面,青藏高原多年冻土区海拔最低为 4 137 m,最高为 5 231 m,平均约为 4 500 m,海拔

表 2 困难度各影响因素定量标度分级

Tab. 2 Quantitative scale classification of influence factors of difficulty degree

影响因素指标	不同标度分值的分级				
	0	1	3	6	10
海拔/m	(1 500,2 000]	(2 000,2 500]	(2 500,3 000]	(3 000,4 000]	(4 000,6 000)
地面坡度/(°)	(0,3]	(3,6]	(6,10]	(10,20]	(20,90)
年平均地温/℃	(-5,0,-2.0]	(-2.0,-1.0]	(-1.0,0]	(0,0.5]	(0.5,1.5)
既有工程影响距离/m	(300,600)	(200,300]	(150,200]	(65,150]	(0,65]

表 3 困难度各影响因素定性标度分级

Tab. 3 Qualitative scale classification of influence factors of difficulty degree

影响因素指标	不同标度分值的分级				
	0	1	3	6	10
冻土分布	非冻土	融区冻土	高原岛状冻土	高原连续冻土	高山冻土
融区构造	河流融区	湖泊融区	辐射融区	地热融区	人为融区

2.2.3 确定权重

评价不同输出方案状态 $Q_{i,j}$ 优劣时,影响因素

相差较大,不同的海拔对公路建设、车辆运营会产生不同程度的影响;青藏高原多年冻土区山高谷深,坡陡流急,地面坡度的分析对公路选线、养护以及构造物的建设均有重要的意义^[21]。

在冻土危害方面,多年冻土作为青藏高原特殊的自然与生态环境产物,其空间分布特征直接影响着公路线位布局与工程的稳定性;融区构造是表征冻土区河流位置的重要因素,其发育特征是分析公路线形选择的重要依据^[22];多年冻土年平均地温是冻土稳定性的基本指标,对多年冻土区公路选线具有重要的指导作用^[23],因此,冻土分布、融区构造和年平均地温是多年冻土公路工程设计和施工中必须考虑的 3 种因素。

在既有工程方面,青藏高原工程走廊带宽处不过数公里,窄处仅数百米。在这有限的范围内已经涵盖了 5 大线形工程,密集的线形工程产生的热干扰加剧了多年冻土的升温与退化^[24],增大了青藏高原多年冻土区公路路线选择的困难度,因此,综合考虑既有工程间的相互影响十分必要。

2.2.2 影响因素标度分级

确定的影响因素虽然性质不同、内容不同、量纲不同,但它们对公路建设的困难程度可按同一个标准进行分级。采用文献^[25]中的标度分级方法:无影响为 0,轻度影响为 1,中度影响为 3,严重影响为 6,极严重影响为 10。对海拔、地面坡度、年平均地温和既有工程的影响进行定量标度分级^[26-27],见表 2。对冻土分布与融区构造进行定性标度分级^[28],见表 3。

各指标有轻重之分,可以用权重来表示各评价指标的重要程度。对于必须满足的指标(设为 $C_{2,1}$),

设其权重为 $\omega_{2,1}$, 对于其他各评价指标则依据专家评分法, 依据评判矩阵逐项或逐层得出各因素的权重, 则第 2 层次权重集 ω_2 为

$$\omega_2 = \{\omega_{2,1}, \omega_{2,2}, \omega_{2,3}, \omega_{2,4}, \omega_{2,5}, \omega_{2,6}\} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^6 \omega_{2,j} = 1$$

式中: $\omega_{2,j}$ 为第 2 层次第 j 种影响因素的权重。

由于本文的研究重点是多年冻土区公路路线选择方法, 文中采用平均权重法简化处理, 下述权重也由平均权重法获得。

2.2.4 构建函数

公路选线困难程度是指在特定环境条件作用和影响下公路路线选择的难易程度, 是确定基本线位的重要依据。基于上述分析, 建立青藏高原多年冻土区公路选线困难度模型

$$Z_{2,k} = \sum_{j=1}^6 \omega_{2,j} X_{2,kj} \quad (9)$$

式中: $Z_{2,k}$ 为第 2 层次第 k 个分区的困难度; $X_{2,kj}$ 为第 2 层次第 k 个分区第 j 种影响因素的标度分值。

在进行第 2 层次公路路线选择时, 要依据走廊带各分区内困难度的大小, 尽量通过困难度相对较小的区域。

2.3 第 3 层次公路选线可靠度模型

第 3 层次是对区域地理及环境的进一步细化, 各种影响因素对公路路线方案起到了关键性作用, 因此在该层次下通过各种影响因素的细化以及约束条件的强化, 并在第 2 层次确定方案的基础上, 进一步分析冻土特性及走廊带工程容纳能力, 对局部方案进行优化、比选, 确定工程修建的可靠程度, 最终

确定路线的线位。

多年冻土区内的公路工程, 必须确保工程实体能够在各种冻土病害条件下足够稳定, 并尽可能降低对周围环境的影响, 这就要求公路选线过程中既充分考虑由冻土地温、冻土病害、植被覆盖等因素带来的危害, 同时兼顾多年冻土区既有工程间的相互热影响, 因此, 提出了多年冻土区的工程可靠度模型, 主要考虑走廊带内的冻土危险性和工程容量对公路线位布局的影响, 以此来指导公路路线选择并确定工程方案, 公路路线选择流程见图 8, 具体模型为

$$R = \eta_1 D + \eta_2 V \quad (10)$$

式中: R 为工程可靠度; D 为工程危险性; V 为工程容量; η_1 、 η_2 分别为工程危险性与工程可靠度的权重, 采用平均权重法, 即 $\eta_1 = \eta_2 = 1/2$ 。

2.3.1 冻土危险性模型

青藏公路穿越的多年冻土区, 有着苛刻的地温条件, 复杂的地质环境以及脆弱的生态系统, 会对公路线位的布设产生不同危险程度的影响, 因此, 本文建立的多年冻土区工程危险性模型包含了多年冻土区年平均地温模型 t 、冻土区公路病害模型 F 与冻土区植被覆盖影响模型 Θ , 表示为

$$D = \alpha_1 t + \alpha_2 F + \alpha_3 \Theta \quad (11)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 分别为多年冻土区年平均地温模型、冻土区公路病害模型与冻土区植被覆盖影响模型的权重, 利用平均权重法得 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$ 。

(1) 年平均地温模型

多年冻土的年平均地温与海拔、纬度之间有着密切的关系, 多年冻土的年平均地温随海拔与纬度的增加而降低; 等效纬度反映太阳对地表的辐射情

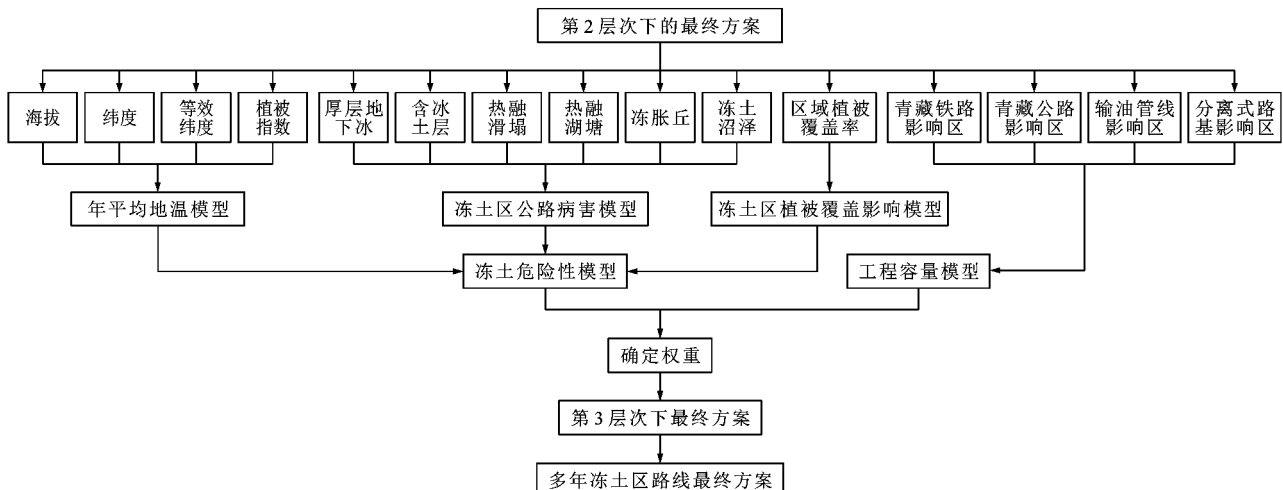


图 8 第 3 层次公路路线选择流程

Fig. 8 Highway route selection flow in third level

况,它受纬度、坡度、坡向的综合影响,可以从一定程度上反映坡向对年平均地温的影响^[29];植被能遮挡和反射太阳光的直接辐射,加上其根系可以保持水分,对冻土的发育具有保护作用,因此,在植被发育地段,冻土的年平均地温较低^[30]。

本文收集了研究区内的相关地理信息,针对纬度 $C_{3,1}$ 、海拔 $C_{3,2}$ 、等效纬度 $C_{3,3}$ 和植被指数 $C_{3,4}$ 对地温的不同影响,构建了多年冻土区年平均地温模型,为

$$t = \lambda_1 C_{3,1} + \lambda_2 C_{3,2} + \lambda_3 C_{3,3} + \lambda_4 C_{3,4} \quad (12)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 分别为纬度、海拔、等效纬度、植被指数的权重,采用平均权重法得 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1/4$ 。

(2)冻土区公路病害模型

多年冻土区地质条件复杂,发育了大片的不良地质现象,对多年冻土区公路路线选择具有巨大影响。厚层地下冰存在的地段修筑路堑、开挖边坡与地基后,会使多年冻土上限发生变化而引起路基变形,从而形成热融湖塘等公路病害,严重影响路线选择;含冰土层会引起路基沉陷、边坡失稳和不均匀冻胀等病害,严重影响到多年冻土区公路线位布局的稳定性与经济性;热融滑塌和热融湖塘会导致路基侧向积水,路基发生热融下沉、不均匀冻胀等病害,同时还会产生涵管壅塞,降低边坡稳定性,对路线选择具有极大的影响^[31];冻胀丘形成时

产生的巨大隆胀力会使路基严重变形,其融化后使得路基及其附近土体含水过高,又会产生路基冻胀等病害,从而影响路线走向;冻土沼泽地区土壤湿度大,路基土体强度低,路基路面结构的强度和稳定性差,极易发生路基沉陷,对多年冻土区路线选择具有巨大影响^[32]。

针对多年冻土区内道路病害的影响因素,即含冰土层 $C_{3,5}$ 、厚层地下冰 $C_{3,6}$ 、热融滑塌 $C_{3,7}$ 、热融湖塘 $C_{3,8}$ 、冻胀丘 $C_{3,9}$ 、冻土沼泽 $C_{3,10}$,将研究区域划分为若干个分区,建立了分区中考虑影响因子连续度和发育度的多年冻土区公路病害模型,为

$$F_k = \gamma_1 E_k + \gamma_2 W_k \quad (13)$$

$$E_k = \frac{\sum_{j=5}^{10} S_{kj}}{S_k}$$

$$W_k = \sum_{j=5}^{10} \beta_j U_{kj}$$

式中: F_k 为第 k 个分区的冻土区公路病害; E_k 为第 k 个分区中影响因素的连续度; S_{kj} 为第 k 个分区中第 j 种影响因素的面积; S_k 为第 k 个分区的总面积; W_k 为第 k 个分区中影响因素的发育度; β_j 为第 j 种影响因素的权重; U_{kj} 为第 k 个分区中第 j 种影响因素的标度分值; γ_1 、 γ_2 分别为连续度与发育度的权重,采用平均权重法得 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1/2$ 。

根据综合评价理论中的公度原理对各影响因素进行标度分级^[33],具体见表 4。

表 4 冻土病害各影响因素标度分级

Tab. 4 Scale classification of influence factors of permafrost disaster

影响因素	分级项目	不同标度分值的分级				
		0	1	3	6	10
厚层地下冰	厚度/m	(0,0.25]	(0.25,0.50]	(0.50,1.50]	(1.50,2.00]	(2.00,3.00)
含冰土层	冻土含冰量/%	0	(0,12]	(12,20]	(20,50]	(50,100)
	含水率/%	(1,10]	(10,12]	(12,14]	(14,18]	(18,100)
	最大冻深/m	(0,0.3]	(0.3,1.5]	(1.5,2.0]	(2.0,3.0]	(3.0,4.0)
热融滑塌	热融滑塌速率/(m·a ⁻¹)	(0,1.0]	(1.0,1.7]	(1.7,2.5]	(2.5,4.0]	(4.0,5.0)
热融湖塘	热侵蚀收支热量/10 ⁶ kJ	(0,1.0]	(1.0,1.5]	(1.5,2.0]	(2.0,2.5]	(2.5,4.0)
	湖边到路基距离/m	(100,600)	(50,100]	(25,50]	(10,25]	(0,10]
冻胀丘	冻胀系数/%	(0,1.0]	(1.0,3.5]	(3.5,7.0]	(7.0,12.0]	(12.0,25.0)
冻土沼泽	深度/m	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5)

(3)冻土区植被覆盖影响模型

由于青藏高原多年冻土区的高寒特性,使得其植被较为稀少,生态环境脆弱而敏感,生态区植被的破坏不仅将影响冻土的稳定性,而且会对公路工程

造成危险,因此,公路路线的选择应充分考虑冻土区植被覆盖 $C_{3,11}$ 的影响。由于归一化植被覆盖指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是表征地表植物覆盖和生长状况的重要指标,构建

了多年冻土区植被覆盖影响模型^[34],为

$$\Theta = \frac{m \sum_{l=1}^m l N_l - \sum_{l=1}^m l \sum_{l=1}^m N_l}{m \sum_{l=1}^m l^2 - (\sum_{l=1}^m l)^2} \quad (14)$$

式中: N_l 为第 l 年的最大化 NDVI 值。

2.3.2 工程容量模型

青藏高原多年冻土区工程走廊带宽度较为狭窄,布设有包括青藏公路、青藏铁路、格拉成品油管道、兰-西-拉光缆通讯工程、500 kV 输变电工程等在内的 5 大线形工程,它们会对新建道路形成一定程度的热影响。为避免由于密集的工程构造物形成的热干扰,本文以路基热影响范围为衡量标准,分析了高速公路与青藏铁路 $C_{3,12}$ 、输油管线 $C_{3,13}$ 、青藏公路 $C_{3,14}$ 与分离式路基 $C_{3,15}$ 的热影响间距^[35],结果见表 5,同时构建了工程容量模型为

$$V = \zeta_1 Y_{3,12} + \zeta_2 Y_{3,13} + \zeta_3 Y_{3,14} + \zeta_4 Y_{3,15} \quad (15)$$

式中: $Y_{3,12}$ 、 $Y_{3,13}$ 、 $Y_{3,14}$ 、 $Y_{3,15}$ 分别为区域内青藏铁路工程、输油管线、青藏公路、分离式路基的长度; ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 分别为相应变量的权重,根据各线形工程与研究区域的相对距离,求解得 $\zeta_1 = 0.18$, $\zeta_2 = 0.25$, $\zeta_3 = 0.27$, $\zeta_4 = 0.30$ 。

表 5 线形工程的路基热影响间距

Tab. 5 Subgrade thermal influence distances of linear projects

线形工程	青藏铁路	输油管线	青藏公路	分离式路基
与其他工程之间间距/m	40	55	60	65

3 应用结果分析

以青藏高原多年冻土区秀水河至雅玛尔河段为例,运用分层目标法对路线节点重要度、工程困难度和工程可靠度进行分析,逐层得到路线最终方案。

通过分析近 5 年来该路段的人口数量和经济水平,同时进一步考虑地形地貌特点,在 1:50 000 比例尺下,将秀水河、北麓河、风火山、雅玛尔河确定为第 1 层次下路线的主要控制点,第 1 层次下的路线方案见图 9,区域人口数量和经济数量图例越大,代表该路线节点越重要。

在 1:10 000 比例尺下,利用网格法对区域进行划分并得到若干网格,以单个网格单元为研究对象,利用 GIS 软件提取网格单元的海拔、坡度、冻土分布、融区构造、年平均地温、既有工程等 6 种属性数据,依据表 2 完成每个网格单元各属性的标度分级,采用式(9)计算每个网格单元的工程困难度,在第 1 层次路线方案基础上,使路线依次经过困难度

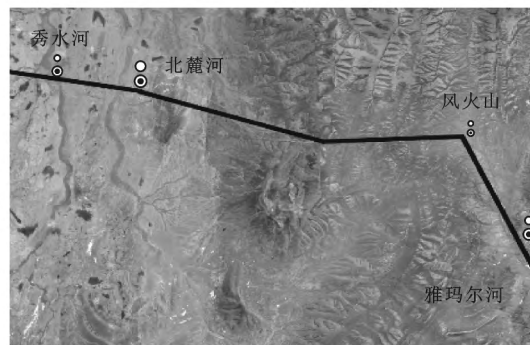


图 9 第 1 层次路线方案

Fig. 9 Route plan in first level

相对较小的网格单元,最后确定第 2 层次下的路线方案,见图 10,工程困难度数值越大代表该区域工程修建越困难。

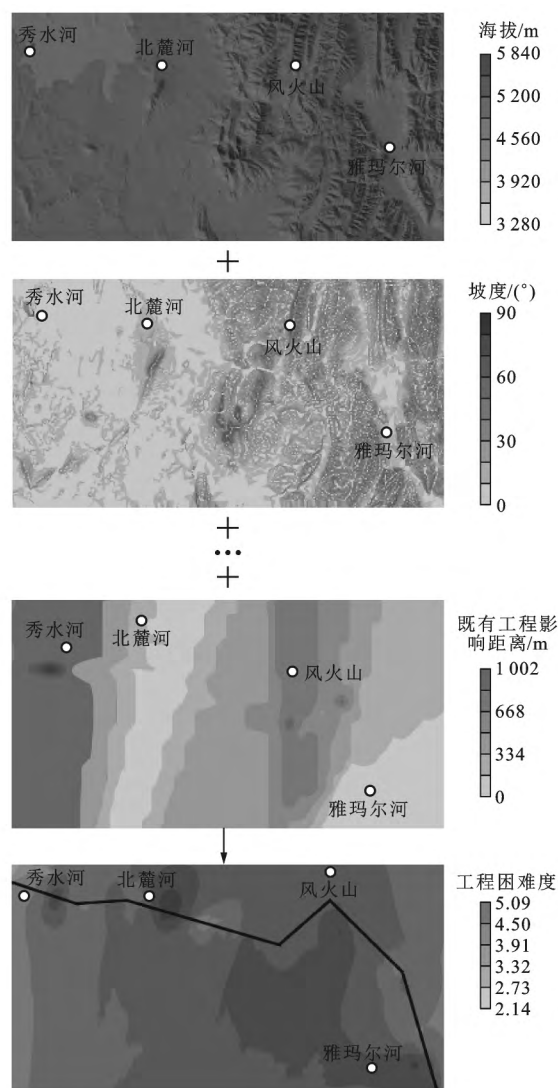


图 10 第 2 层次路线方案

Fig. 10 Route plan in second level

在 1:2 000 比例尺下,利用 GIS 进一步提取每

个网格单元的纬度、病害种类与工程容量等属性信息,采用式(10)~(15)计算得到每个网格单元工程的可靠度,在第2层次确定路线走向的基础上,使得路线依次经过可靠度相对较大的网格单元,最后确定第3层次下的路线方案,见图11,工程可靠度数值越小,代表该区域工程修建越可靠。

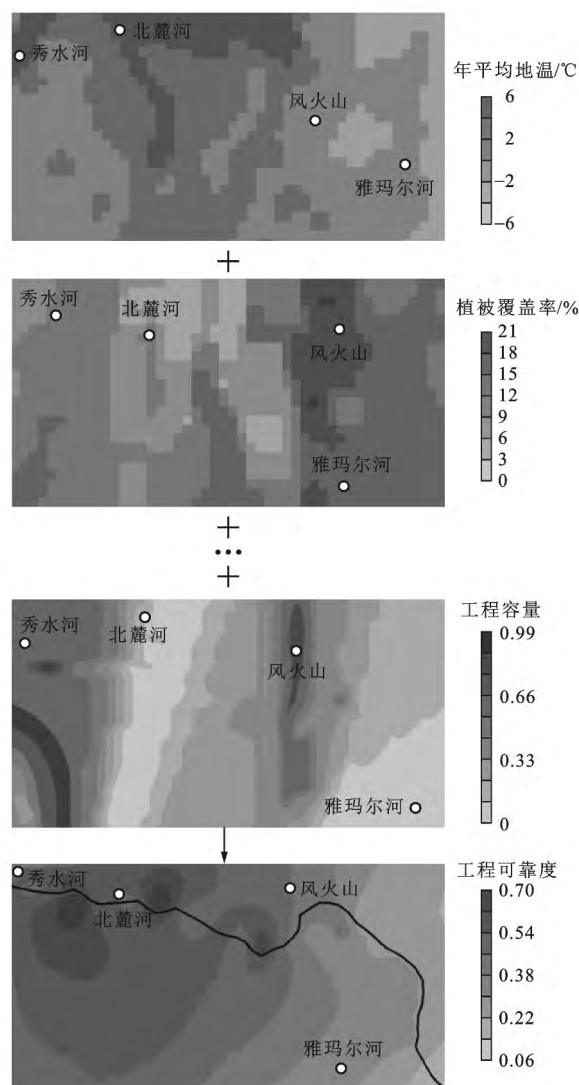


图11 第3层次路线方案

Fig. 11 Route plan in third level

综上所述,运用分层目标法获得的路线最终方案可以准确地避让高温和高病害率的冻土区域,避开既有工程间的相互干扰,从而获得一条工程困难度低、可靠度高的路线方案,为下一步的工程修建提供参考。

4 结 语

(1)在考虑多年冻土区路线选择与冻土之间相互影响的基础上,以保护冻土理念为主线,结合多尺度效应理论,提出了多年冻土区路线选择的分层目

标法并建立了理论模型,由粗到细、由面到带,再由带到线确定多年冻土区公路路线。

(2)以多尺度效应理论为基础,利用卫星云图对不同比例尺下地形地貌、既有工程、构造物与建筑物等要素细节进行了分析,给出了多年冻土区路线选择分层目标法的层次划分。

(3)结合每个层次下选线影响因素的表达特点,分析并确定了每个层次下多年冻土区路线选择的影响因素,首先建立了以社会、经济、地形地貌为主要约束条件的第1层次公路路线选择模型。结合公度原理,对平均海拔、冻土分布、年平均地温、既有工程等6种影响因素进行标度分级,进而构建了第2层次公路路线选择困难度模型。

(4)充分考虑了由冻土地温、冻土病害、植被覆盖等因素带来的冻土危害,同时兼顾多年冻土区既有工程间的相互热影响作用,以工程的可靠性为评价标准,构建了第3层次公路路线选择可靠度模型并进行了应用研究。

(5)由于本文研究重点是多年冻土区公路路线选择方法,对模型中的权重均采取了平均权重法处理,在下一阶段,应加强对模型中权重的研究,以获得更为准确的结论。

参考文献:

References:

- [1] 阮国锋,张建明,柴明堂. 气候变化情景下青藏工程走廊融沉灾害风险性区划研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 811-817.
RUAN Guo-feng, ZHANG Jian-ming, CHAI Ming-tang. Risk division of thaw settlement hazard along Qinghai-Tibet engineering corridor under climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 811-817. (in Chinese)
- [2] 王国尚,俞祁浩,郭磊,等. 多年冻土区输电线路冻融灾害防控研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 137-143.
WANG Guo-shang, YU Qi-hao, GUO Lei, et al. Prevention and control of freezing and thawing disasters in electric transmission lines constructed in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 137-143. (in Chinese)
- [3] SADEK S, KAYSI I, BEDRAN M. Geotechnical and environmental considerations in highway layout: an integrated GIS assessment approach[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2000, 2(3/4): 190-198.
- [4] 乔平,王云鹏. 铁路工程地质选线咨询系统[J]. 工程地质学报, 1994, 2(4): 77-83.
QIAO Ping, WANG Yun-peng. A computer-aided system for engineering geological location of railway direction[J]. Journal of

- Engineering Geology, 1994, 2(4): 77-83. (in Chinese)
- [5] 孙永福. 青藏铁路多年冻土工程的研究与实践[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 153-162.
- SUN Yong-fu. Permafrost engineering in the Qinghai-Tibet Railway: research and practice[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 153-162. (in Chinese)
- [6] 马 巍, 程国栋, 吴青柏. 解决青藏铁路建设中冻土工程问题的思路与思考[J]. 科技导报, 2005, 23(1): 23-28.
- MA Wei, CHENG Guo-dong, WU Qing-bai. Thoughts on solving frozen soil engineering problems in the construction of Qinghai-Tibet Railroad[J]. Science and Technology Review, 2005, 23(1): 23-28. (in Chinese)
- [7] 陈 拓, 吴志坚, 林碧苍, 等. 青藏高原多年冻土地区铁路路基工程动力稳定性分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 939-945.
- CHEN Tuo, WU Zhi-jian, LIN Bi-cang, et al. Dynamic stability analysis of railway embankment engineering in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 939-945. (in Chinese)
- [8] JONG J C, JHA M K, SCHONFELD P. Preliminary highway design with genetic algorithms and geographic information systems[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15(4): 261-271.
- [9] JHA M K, MCCALL C, SCHONFELD P. Using GIS, genetic algorithms, and visualization in highway development[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2001, 16(6): 399-414.
- [10] JONG J C, SCHONFELD P. An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(2): 107-128.
- [11] JHA M K, SCHONFELD P. A highway alignment optimization model using geographic information systems[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2004, 38(6): 455-481.
- [12] LI Li-ping, XU Guang-li, LU Xiao-li. A novel fuzzy route selection method based on multi-norm decision making[C]//IEEE. 2010 International Conference on Computer Engineering and Technology. New York: IEEE, 2010: 619-623.
- [13] SNIDERO M, AMILIBIA A, GRATACOS O, et al. The 3D reconstruction of geological structures based on remote sensing data: example from the Anaran Anticline, Lurestan Province, Zagros Fold and Thrust Belt, Iran[J]. Journal of Biological Society, 2011, 168(3): 769-782.
- [14] GULER H. Decision support system for railway track maintenance and renewal management[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2013, 27(3): 292-306.
- [15] 吴华金. 山区高速公路路线走廊带的选择与研究[J]. 公路, 2003(5): 45-52.
- WU Jin-hua. The selection and research method of the route corridor in the mountainous area[J]. Highway, 2003(5): 45-52. (in Chinese)
- [16] 王卫东, 刘武成. 基于 GIS 的公路地质灾害信息管理与决策支持系统[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2003, 34(3): 302-305.
- WANG Wei-dong, LIU Wu-cheng. Road's geological hazards information management and decision making support system research based on GIS[J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2003, 34(3): 302-305. (in Chinese)
- [17] 刘秀英, 赵明登. 一种基于 AHP-GRAP 的山区高速公路路线方案优选方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2012, 45(3): 356-360.
- LIU Xiu-ying, ZHAO Ming-deng. Research on optimization method of mountainous expressway route scheme selection based on AHP-GRAP[J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Science, 2012, 45(3): 356-360. (in Chinese)
- [18] 许金良, 田 林, 牛冬瑜. 基于 RS-GIS 的喀斯特地区公路生态选线[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 1-9.
- XU Jin-liang, TIAN Lin, NIU Dong-yu. Ecological highway route selection of Karst area based on RS-GIS[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2): 1-9. (in Chinese)
- [19] 杨宏志, 许金良. 基于约束描述的公路路线设计过程模型[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(1): 37-41.
- YANG Hong-zhi, XU Jin-liang. Highway route design process model based on constraint description[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(1): 37-41. (in Chinese)
- [20] 王艳慧, 孟 浩. 道路网多尺度表达实体和关系的本体研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 689-694.
- WANG Yan-hui, MENG Hao. Ontological analysis on entity and relation from multi-scale road representations[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(5): 689-694. (in Chinese)
- [21] 汪双杰, 霍 明, 周文锦. 青藏公路多年冻土路基病害[J]. 公路, 2004(5): 22-26.
- WANG Shuang-jie, HUO Ming, ZHOU Wen-jin. Subgrade failure of Qinghai-Tibet Highway in permafrost area[J]. Highway, 2004(5): 22-26. (in Chinese)
- [22] 陈建兵, 刘志云, 崔福庆, 等. 青藏高原工程走廊带多年冻土辨识及年平均地温预估模型[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 33-41, 56.
- CHEN Jian-bing, LIU Zhi-yun, CUI Fu-qing, et al. Permafrost identification and annual mean ground temperatures prediction model for Qinghai-Tibet engineering corridor [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 33-41, 56. (in Chinese)
- [23] 汪双杰, 刘 戈, 叶 莉, 等. 多年冻土区宽幅路基热效应防治对策研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 26-32.
- WANG Shuang-jie, LIU Ge, YE Li, et al. Research on control countermeasures of thermal effect of wide embankment in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 26-32. (in Chinese)
- [24] 王卫东, 刘武成, 程国栋, 马 巍, 等. Technical

- approaches on permafrost thermal stability for Qinghai-Tibet Railway[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2016, 1(2): 119-127.
- [25] 韩国杰. 甘肃公路自然环境评价指标及分区研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- HAN Guo-jie. Study on natural environment evaluation indicator and zoning for highway in Gansu Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [26] 王永生. 甘肃公路自然区划框架体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- WANG Yong-sheng. Study on framework system of natural zoning for highway in Gansu Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [27] 汪双杰, 陈建兵. 青藏高原多年冻土路基温度场公路空间效应的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1544-1549.
- WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing. Nonlinear analysis for dimensional effects of temperature field of highway embankment in permafrost regions on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1544-1549. (in Chinese)
- [28] 尹国安, 牛富俊, 林战举, 等. 青藏铁路沿线多年冻土分布特征及其对环境变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 772-781.
- YIN Guo-an, NIU Fu-jun, LIN Zhan-ju, et al. The distribution characteristics of permafrost along the Qinghai-Tibet Railway and their response to environmental change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 772-781. (in Chinese)
- [29] YOSHIKAWA K, HINZMAN L D, GOGINENI P. Ground temperature and permafrost mapping using an equivalent latitude elevation model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 526-532.
- [30] 吴青柏, 沈永平, 施 斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 250-255.
- WU Qing-bai, SHEN Yong-ping, SHI Bin. Relationship between frozen soil together with its water-heat process and ecological environment in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 250-255. (in Chinese)
- [31] 林战举, 牛富俊, 刘 华, 等. 青藏高原热融湖对冻土工程影响的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1394-1402.
- LIN Zhan-ju, NIU Fu-jun, LIU Hua, et al. Numerical simulation of lateral thermal process of a thaw lake and its influence on permafrost engineering on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1394-1402. (in Chinese)
- [32] 陈建兵, 汪双杰, 章金钊, 等. 青藏公路高路基病害的形成及其机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 30-35.
- CHEN Jian-bing, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao, et al. Formation and mechanism of high subgrade diseases of Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 30-35. (in Chinese)
- [33] 宋 怡, 马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89-93.
- SONG Yi, MA Ming-guo. Study on vegetation cover change in northwest China based on spot vegetation data[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 89-93. (in Chinese)
- [34] 任艳艳, 李明顺. 公路建设项目社会影响评价指标无量纲化研究[J]. 企业技术开发, 2010, 29(7): 63-65.
- REN Yan-yan, LI Ming-shun. Dimensionless research on the evaluation index of social in road construction projects[J]. Technological Development of Enterprise, 2010, 29(7): 63-65. (in Chinese)
- [35] 吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报, 2013, 58(2): 115-130.
- WU Qing-bai, NIU Fu-jun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2): 115-130. (in Chinese)