

文章编号:1671-1637(2016)04-0014-12

青藏高原多年冻土区公路智能选线方法

张 驰^{1,2}, 杨 坤², 汪双杰¹, 杨宏志², 邵广军¹

(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:为解决传统公路选线方法难以完全考虑青藏高原多年冻土区复杂地理环境的问题,将地理信息系统(GIS)的空间数据分析技术与智能进化算法引入到多年冻土区的公路选线过程中。利用GIS进行青藏高原多年冻土区的空间数据挖掘,从冻土病害影响因子的连续度和发育度方面考虑多年冻土区微地貌对公路选线的影响,建立了冻土病害危险度计算模型。利用面向对象技术开发组件式GIS,应用于青藏高原多年冻土区,完成了对多年冻土区复杂地理信息的分析和提取。构建了线位优化遗传算法,确立了自适应的迭代策略,借助粒子群算法,建立了基于遗传算法的路线优化模型。以青藏高原西大滩至昆仑山口路线走廊带某路段为例,进行了公路智能选线研究,经算法多次迭代后,得到了最优的线位方案。研究表明:在实际环境数据试验中,遗传算法在迭代至第60代左右时得到危险度最低的优选方案,其综合危险度稳定在3.75左右。可见,青藏高原多年冻土区公路智能选线方法能够结合各类冻土病害的危险程度,为公路线位布局指明冻土病害影响较小的区域,有效兼顾了“主动保护多年冻土,确保路基稳定,生态环境友好,布局经济合理”等要求,可作为多年冻土区公路路线设计的参考方法。

关键词:道路工程;多年冻土区;青藏高原;智能选线;地理信息系统;遗传算法

中图分类号:U412.1 **文献标志码:**A

Highway intelligent route selection method in permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau

ZHANG Chi^{1,2}, YANG Kun², WANG Shuang-jie¹, YANG Hong-zhi², SHAO Guang-jun¹

(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: To solve the problem that traditional highway route selection method can not fully consider the complex geographical environment in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau, the spatial data analysis technology of geographic information system (GIS) and intelligent evolutionary algorithm were introduced into the highway route selection process in permafrost region. The spatial data mining in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau was finished by using GIS, the influence of the microtopography of the permafrost region on highway route selection was considered from the continuity degree and development degree of the influence factors of frozen soil diseases, and the risk degree calculation model of frozen soil disease was established. The component GIS was developed by using object-oriented components technology,

收稿日期:2016-06-21

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01);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:张 驰(1981-),男,四川宜宾人,长安大学副教授,工学博士,从事选线理论与道路仿真研究。

and then applied in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau, so the analysis and extraction of complex geographic information in the permafrost region were completed. The route optimization genetic algorithm and the adaptive iterative method were established, and with the aid of particle swarm algorithm, the route optimization model was set up based on the genetic algorithm. A road section of the route corridor of Qinghai-Tibet Plateau between Xidatan and Kunlun Mountains pass was selected as an example, and the highway intelligent route selection was researched, and the final route position scheme was obtained. Analysis result shows that in the experiment based on real environmental data, the optimal scheme with the least of risk degree is obtained after about 60th iteration, and the risk degree is stable at about 3.75. So the intelligent route selection method in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau can combine the risk of all kinds of frozen soil diseases, and specify the area with less impact of frozen soil disease for highway layout. The optimized scheme effectively takes into account the “initiative protecting permafrost, ensuring the stability of roadbed, friendly ecological environment, economic-reasonable layout” requirements, and can be used as the reference method for highway route design in the permafrost region. 14 tabs, 12 figs, 28 refs.

Key words: road engineering; permafrost region; Qinghai-Tibet Plateau; intelligent route selection; geographic information system; genetic algorithm

Author resume: ZHANG Chi(1981-), male, associate professor, PhD, +86-29-62630061, zhangchi@chd.edu.cn.

0 引 言

青藏高原多年冻土区的公路选线是一项系统工程,设计过程中需要充分考虑厚层地下冰、热融湖塘、冻土沼泽、风吹雪等病害对道路的影响。部分影响因子相互制约,如何处理不同领域的要求,得到最佳的公路路线设计方案是设计人员面临的重要课题。目前,在实际工程中采用的基于设计人员工作经验和专家审议的经验试凑法,不仅耗时过长,而且容易遗漏优秀方案,对于有着复杂地理环境的多年冻土区,这种方法更加难以适应公路选线的要求,需要一种新的智能选线方法来快速、全面地处理大量的多年冻土区地理属性数据。

在国外研究中,Sadek 等开发了基于完整 GIS 框架的线位设计多目标评价决策辅助工具,其目标是在综合地形、几何设计、地质、岩土边坡稳定性、环境影响和社区破坏评估等多项因素的情况下,进行线位设计的多目标分析和评价^[1];Jong 等在分析了现有优化方法不足的基础上,首次引入了遗传算法来进行道路的优化^[2];Kang 等将遗传算法融入 GIS 平台,结合地理信息进行公路线形优化^[3];Kazemi 等引入粒子群算法,提出了使用并行处理的粒子群算法求解公路线形最优解的方法^[4]。

在国内研究方面,20 世纪 70 年代开始,同济大

学、西安公路交通大学开始研发公路线形优化程序系统,取得了一定的成果。易思蓉等提出利用梯度投影法进行平面优化的思路,随后通过对其进一步的完善和发展,提出了基于虚拟环境的铁路选线系统^[5];许金良等通过建立可行域,利用遗传编码、交叉、变异等遗传操作实现路线的优化,提出了基于遗传算法的公路纵断面优化方法^[6];马庆雷通过在可行域范围内选择最优解,提出了公路平面优化方法^[7];高华通过对路线的平面和纵断面进行遗传运算优化,建立了适合公路选线优化设计的多目标决策体系,并对线路进行综合评价^[8];阮沈勇等将信息量模型与 GIS 系统结合,讨论了地质灾害区划方法^[9];王平等应用图斑合并方法,改进了自然灾害的区划^[10];杨宏志等通过对公路路线优化目标的研究,提出了基于 GIS 与遗传算法的公路线形优化方法^[11]。

多年来,尽管国内外学者针对冻土区道路地质病害与普通地区公路选线开展了大量研究工作,针对沿线水文地质与冻土微地貌等情况提出了走廊带选择的理论原则,但其区划仅停留在这些环境参数本身,对路线选择的指导作用有限,且其总结的选线原则多局限于定性分析,使得设计人员在选线时过分依赖于自身经验,在实际运用时具有较大的局限性,常常顾此失彼。另外,现有基于 GIS 的危险度区划方法和基于 GIS 与遗传算法的道路优化算法

仅集中于优化方法的研究,缺乏全面完整的算法用于优化方法的实现。

相比之下,将 GIS 技术与遗传算法应用于青藏高原多年冻土区公路选线的方法一方面可利用 GIS 的空间数据挖掘技术为多年冻土区提供空间环境信息支持,另一方面可以利用遗传算法的自组织与自学习特性解决处理诸如冻土分布制约、生态环境影响等不确定因素,由于现有遗传算法存在前期进化易早熟和后期进化速度慢的缺点,可采用粒子群算法辅助迭代选择以克服相应的问题。为此,本文提出基于 GIS 与遗传算法的青藏高原多年冻土区公路智能选线方法,从冻土病害影响因子的连续度和发育度 2 个方面考虑了冻土区微地貌对拟建走廊带的影响,建立了冻土病害的危险度评判方法,通过空间数据分析技术提供路线设计的空间环境信息支持平台,建立了基于遗传算法和粒子群算法的路线优化模型,实现冻土区公路可行域方案的自动优化,为路线设计提供初始参考方案。

1 青藏高原多年冻土区公路病害影响因素分析

多年冻土环境是青藏高原地区公路路线设计首先面临的一大挑战,该地区地质条件极为复杂,生态十分脆弱,地形、地质和环境条件的多样性和复杂性问题十分突出,尤其是厚层地下冰、热融滑塌、冻土沼泽、冻胀丘等微地貌造成的道路工程病害特别严重。下面分别对不同影响因素的相关作用机理进行分析。

1.1 厚层地下冰

厚层地下冰一般存在于多年冻土上限附近的细粒土中,由于公路修建中容易破坏冻土的热平衡^[12],因此,厚度较大的厚层地下冰可能引起如下严重的病害。

(1)开挖路堑时将地下冰层暴露在大气中或人为减少了土层厚度,容易引起地下冰融化,造成热融翻浆,导致路面病害。

(2)在修筑沥青路面时,在具备较强吸热性的黑色路面下,多年冻土上限下降,使厚层地下冰区域产生较大的热融沉陷,导致路面坎坷不平及破坏。

1.2 热融滑塌

热融滑塌发生在冻土斜坡地区,主要原因是地下冰层融化导致的覆土层塌落^[13]。冻土区公路修建中的土方调配,容易使得路基边坡以下的冰层与外部环境接触,产生热融滑塌^[14],对公路工程的影

响如下。

(1)对路基工程而言,如对热融滑塌治理不力,会在路基侧向形成积水,导致路基发生热融下沉与不均匀冻胀等病害。

(2)对桥涵、边坡等而言,热融滑塌会产生涵管壅塞,降低边坡不稳定性,长期下去滑塌体甚至可能掩埋工程体。

1.3 冻胀丘

冻胀丘是由于地下水在薄弱地带的冻结膨胀使地表产生的变形隆起^[15],在青藏高原主要以季节性河滩-河床型为主^[16],对路基的影响如下。

(1)对路基的挤压或顶托破坏。

(2)为冻胀提供水源条件,融化后使得路基及其附近土体含水过高,产生路基冻胀。

1.4 冻土沼泽

冻土沼泽发生在具有多年冻土的高寒区域,由于冻土表层被冻裂、分割,部分冻土发生消融而形成。冻土沼泽地区土壤湿度过大,容易降低路基土体强度,影响路基路面结构的强度和稳定性,主要表现为如下。

(1)过大的路基土体含水率使得土壤黏聚力下降,基质吸力减小,整体结构的抗剪强度降低。

(2)冻土沼泽区域附近的公路路基易发生路基沉陷,加剧路基变形,影响整体稳定性。

2 危险度计算模型

2.1 目标函数的确定

面对冻土区微地貌造成的道路病害,本文对道路病害的影响因子进行了定量分析,提出了一种以危险度为衡量标准,综合考虑冻土影响因子连续度和发育度的评判方法。冻土影响因子连续度是指冻土病害在路线穿越区域的分布连续程度;冻土影响因子发育度是指冻土病害在路线穿越区域的发育程度。

以路线走廊带中心线为导向,以 3 km 为单位长度对走廊带进行分区,每个计算单元中的危险度函数、影响因子连续度函数与影响因子发育度函数分别为

$$I_i = C_i \gamma_1 + D_i \gamma_2 \quad (1)$$

$$C_i = \frac{\alpha_1 n_{ij}}{n_i} + \frac{\alpha_2}{S_i} \sum_{j=1}^4 S_{ij} \quad (2)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^4 \beta_j U_j \quad (3)$$

式中: I_i 为第 i 个计算单元的危险度; C_i 为第 i 个计

算单元的影响因子连续度; D_i 为第 i 个计算单元的影响因子发育度; γ_1, γ_2 分别为连续度、发育度权重; n_{ij} 为第 i 个计算单元中第 j 个影响因子的数量; n_i 为第 i 个计算单元中的影响因子总数; S_{ij} 为第 i 个计算单元中第 j 个影响因子的面积; S_i 为第 i 个计算单元的总面积; α_1 为影响因子的数量权重; α_2 为影响因子的面积权重; β_j 为第 j 个影响因子的发育度函数权重; U_j 为第 j 个影响因子的标度分值。

2.2 目标函数权重的确定

2.2.1 层次分析法的应用

采用层次分析法确定式(1)~(3)中的权重,具体步骤如下。

Step 1: 构造判断矩阵

建立层次结构模型,对准则层的各个指标进行两两比较,得出指标间的相对重要性,并采用 1-9 标度法构造判断矩阵。判断矩阵的一般形式见表 1。

表 1 判断矩阵的一般形式

Tab. 1 General form of judgment matrix

指标	T_1	T_2	...	T_n	...	T_N
T_1	t_{11}	t_{12}	...	t_{1n}	...	t_{1N}
T_2	t_{21}	t_{22}	...	t_{2n}	...	t_{2N}
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots
T_m	t_{m2}	t_{m2}	...	t_{mn}	...	t_{mN}
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots	\vdots
T_N	t_{N1}	t_{N1}	...	t_{Nn}	\vdots	t_{NN}

表 1 中: N 为准则层中的指标总数; T_m, T_n 分别为准则层中第 m, n 个指标; t_{mn} 为指标 T_m 与指标 T_n 相比,相对于指标 T_n 的重要性,取值由 1-9 标度法确定。

Step 2: 计算各层次上各因素的相对权重

根据判断矩阵,采用方根法分别计算各因素的特征向量和最大特征值

$$\begin{cases} M_m = \prod_{n=1}^N t_{mn} \\ \bar{W}_m = \sqrt[N]{M_m} \\ W_m = \bar{W}_m / \sum_{m=1}^N \bar{W}_m \\ \mathbf{W} = (W_1, W_2, \dots, W_N)^T \\ \lambda_{\max} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(\sum_{n=1}^N t_{mn} W_m \right) / W_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: M_m 为判断矩阵中第 m 个指标所在行的行元素乘积; W_m 是对 \bar{W}_m 归一化处理后的相对权重; \mathbf{W} 为特征向量; λ_{\max} 为最大特征值。

Step 3: 计算一致性指标

为保证得到的权重合理,需要对每一个判断矩阵进行一致性检验,以观察其是否具有满意的一致性,否则,应修改判断矩阵,直到满足一致性要求为止,计算公式为

$$\begin{cases} K = \frac{\lambda_{\max} - E}{E - 1} \\ G = \frac{K}{R} \end{cases} \quad (5)$$

式中: K 为一致性指标; G 为随机一致性比率; E 为判断矩阵的阶数; R 为判断矩阵阶数对应的随机一致性指标,取值见表 2。

表 2 随机一致性指标取值

Tab. 2 Values of random coincidence index

E	1	2	3	4
R	0	0	0.580	0.900

2.2.2 确定危险度函数的权重

本文采用层次分析法计算危险度函数的权重,步骤如下。

Step 1: 构造判断矩阵

以危害度为目标层,以影响因子连续度 C 与影响因子发育度 D 为准则层 1,比较准则层 1 中各影响因子的相对重要性,运用 1-9 标度法,构造判断矩阵,见表 3。

表 3 准则层 1 中各因素的判断矩阵

Tab. 3 Judgment matrix of factors in criterion layer 1

指标	C	D
C	1.0	0.5
D	2.0	1.0

Step 2: 计算准则层 1 中各因素的相对权重

根据准则层 1 的判断矩阵,应用式(4),计算各因素的相对权重,见表 4,得到准则层 1 中判断矩阵的特征向量与最大特征值分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= (0.333, 0.667)^T \\ \lambda_{\max} &= 3.552 \end{aligned}$$

表 4 准则层 1 中各因素的相对权重

Tab. 4 Relative weights of factors in criterion layer 1

指标	M_m	\bar{W}_m	W_m
C	0.500	0.707	0.333
D	2.000	1.414	0.667

Step 3: 计算一致性指标

应用式(5),检验表 3 中判断矩阵的一致性,则有 $K = 1.552$ 。由于二阶判断矩阵本身具有一致性,其 R 值只是形式上的,且这里 $R = 0$,故取 $G = 0 < 0.1$,满足一致性检验。

由以上计算,得危险度函数中的权重见表 5。

表 5 危险度函数中的权重

Tab. 5 Weights of risk degree function

γ_1	γ_2	合计
0.333	0.667	1.000

2.2.3 确定影响因子连续度函数权重

本文采用层次分析法计算影响因子连续度函数的权重,步骤如下。

Step 1:构造判断矩阵

以影响因子连续度为目标层,构建准则层 2,包含 B_1 和 B_2 两个指标,分别为

$$\begin{cases} B_1 = \frac{n_{ij}}{n_i} \\ B_2 = \frac{\sum_{j=1}^4 S_{ij}}{S_i} \end{cases}$$

运用 1-9 标度法,构造判断矩阵,见表 6。

表 6 准则层 2 中各因素的判断矩阵

Tab. 6 Judgment matrix of factors in criterion layer 2

指标	B_1	B_2
B_1	1.000	0.333
B_2	3.000	1.000

Step 2:计算准则层 2 中各因素的相对权重

根据准则层 2 的判断矩阵,应用式(4),计算各因素的相对权重,见表 7。

表 7 准则层 2 中各因素的相对权重

Tab. 7 Relative weights of factors in criterion layer 2

指标	M_m	\bar{W}_m	W_m
B_1	0.333	0.577	0.250
B_2	3.000	1.732	0.750

准则层 2 中判断矩阵的特征向量与最大特征值分别为

$$\begin{aligned} W &= (0.250, 0.750)^T \\ \lambda_{\max} &= 4.089 \end{aligned}$$

Step 3:计算一致性指标

应用式(5),检验表 6 中判断矩阵的一致性,则有 $K=2.089$ 。由于同样是二阶判断矩阵,且 $R=0$,故取 $G=0 < 0.1$,满足一致性检验。

由以上计算,得影响因子连续度函数中的权重见表 8。

表 8 连续度函数中的权重

Tab. 8 Weights of continuity degree function

α_1	α_2	合计
0.250	0.750	1.000

2.2.4 确定影响因子发育度函数权重

采用层次分析法计算影响因子发育度函数的权重,步骤如下。

Step 1:构造判断矩阵

以影响因子发育度为目标层,以厚层地下冰、热融滑塌、冻胀丘与冻土沼泽($A_1 \sim A_4$)为准则层 3,运用 1-9 标度法,构造判断矩阵,见表 9。

表 9 准则层 3 中各因素的判断矩阵

Tab. 9 Judgment matrix of factors in criterion layer 3

指标	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	1.000	3.000	2.000	3.000
A_2	0.333	1.000	2.000	1.000
A_3	0.500	0.500	1.000	2.000
A_4	0.333	1.000	0.500	1.000

Step 2:计算准则层 3 中各因素的相对权重

根据准则层 3 的判断矩阵,应用式(4),计算各因素的相对权重,见表 10,得到准则层 3 中判断矩阵的特征向量与最大特征值分别为

$$\begin{aligned} W &= (0.464, 0.203, 0.189, 0.144)^T \\ \lambda_{\max} &= 4.200 \end{aligned}$$

表 10 准则层 3 中各因素的相对权重

Tab. 10 Relative weights of factors in criterion layer 3

指标	M_m	\bar{W}_m	W_m
A_1	18.000	2.060	0.464
A_2	0.667	0.904	0.203
A_3	0.500	0.841	0.189
A_4	0.167	0.639	0.144

Step 3:计算一致性指标

应用式(5),检验表 9 中判断矩阵的一致性,则有 $K=0.068$ 。由于 $R=0.9$,故 $G=0.076 < 0.1$,满足一致性检验。

由以上计算,得影响因子发育度函数的权重见表 11。

表 11 发育度函数中的权重

Tab. 11 Weights of development degree function

β_1	β_2	β_3	β_4
0.464	0.203	0.189	0.144

2.3 影响因子的标度分值

在影响因子发育度的计算中,需要对冻土病害进行强度分级。根据对道路工程危害程度的大小将冻土病害分为 5 个等级,其影响因子标度分值分别为 0、1、2、3、4。不同的标度分值所对应的冻土病害程度分级见表 12。

表 12 不同的标度分值所对应的冻土病害分级
Tab.12 Scale classification of frozen soil disease corresponding to different scales scores

影响因子	分级项目	不同标度分值的分级				
		0	1	2	3	4
A ₁	含水率/%	(0,10]	(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)
A ₂	融化下沉系数/%	(0,1]	(1,5]	(5,10]	(10,25]	(25,30)
A ₃	冻胀率/%	(0,1.0]	(1.0,3.5]	(3.5,7.0]	(7.0,12.0]	(12.0,25.0)
A ₄	深度/m	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5)

2.4 路线方案总危险度计算

确定各个计算单元内的危险度后,整个路线方案的总危险度 I 为

$$I = \sum_{i=1}^L I_i \quad (6)$$

式中: L 为设计方案所包含的计算单元总数。

3 空间地理信息支持

针对青藏高原多年冻土区的环境特点,采用 ArcGIS 作为地理信息处理平台,借助其强大的空间分析、信息存储、数据表示和管理能力,分析多年冻土的分布位置、物理性质与融沉特性等特征,为该区域的公路选线提供地理信息支持。

3.1 地理地质知识库支持

青藏高原多年冻土区公路智能选线过程中,优化算法需要从 GIS 获取地质知识,以指导路线进一

步优化。按优化算法所需的空間环境知识特征,可分为以下几类。

(1)目标几何特征,指路线方案穿越区域各类目标的几何属性,如缓冲区占地面积与已有道路的关系等。

(2)空间分布状态,指路线影响区域内各类目标的地理分布规律^[17],如植被分布、生态保护区的区划等,可用于评价生态保护程度。

(3)空间关联关系,指路线本身与所经区域目标的相邻、相交与包含等关系,如路线与所经城市的关联关系^[18]。

(4)空间演变规则,指路线缓冲区内危险地质带或空间目标随时间的变化规律,辅助判断路线经过时产生的危险度^[19]。

图 1 为利用 GIS 的地理地质知识库支持进行风险度评判的流程。

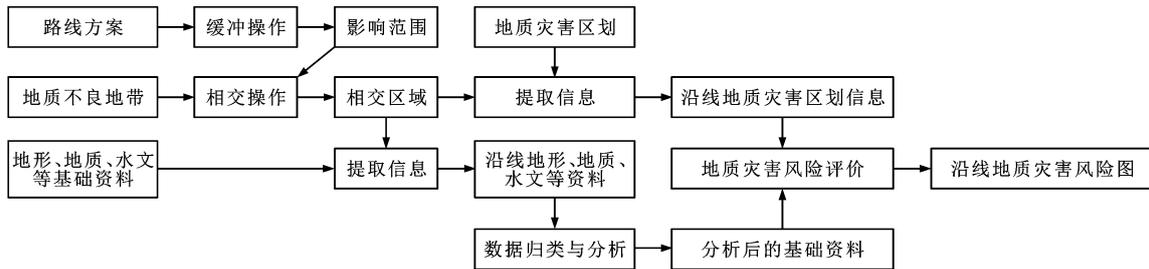


图 1 风险度评判流程

Fig.1 Assessment flow of risk degree

3.2 地理地质数据分析

为了全面掌握路线所经区域的冻土特征,需要对以道路中心线为主体的缓冲区进行缓冲分析。根据与附近环境相互影响效果的差异,分为静态缓冲带分析与动态缓冲带分析 2 种类型^[20]。当设计路线与周围物体仅因距离产生影响差异时,可建立与设计中心线等距离的一条路宽带,获得道路的用地范围及该段道路路幅范围内各个所需数据层的信息,称为静态缓冲带分析。当设计路线与周围物体随距离不同而产生不同幅度的差异或迭代关系时,

如冻土分布中的过渡区域,可根据其对公路的影响程度动态确定缓冲区域,称为动态缓冲带分析。

3.2.1 静态缓冲带分析

静态缓冲带分析有以下情况:一是针对青藏高原多年冻土区内分布的居民点、村庄、城镇等点目标,以目标为圆心,采用相对大小半径的圆,分析其可能的影响范围;二是针对青藏高原多年冻土区内的河流、道路、管线等线目标,将目标设定为中心轴线,采用与目标规定距离的平行带状多边形,分析不同线目标的缓冲区域;三是针对青藏高原多年冻土

区内的连续不良地质区域,由于其不规则的面状目标,采用类似线目标的做法,将面状不规则区域的边

界双向拓宽一定距离得到新的多边形区域。3种静态缓冲分析结果见图2。

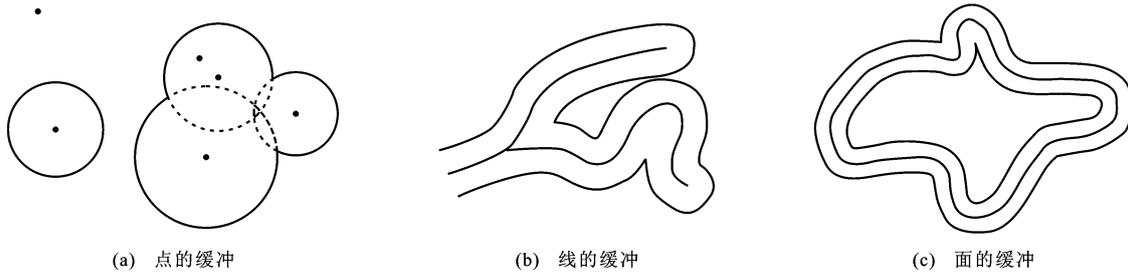


图2 静态缓冲分析结果

Fig. 2 Static buffer analysis result

在青藏高原多年冻土区的公路选线中,主要将静态缓冲分析功能应用到完全处于多年冻土环境中的河流、公路等线状因素图层中,根据影响距离差异生成缓冲区图层。

3.2.2 动态缓冲带分析

对于跨越冻土区与融区的公路路段,由于静态分析生成的缓冲区空间属性不一致,有必要引入动态缓冲分析。动态缓冲分析主要考察物体对周围空间的作用变化,其表现形式主要有线性衰减、二次形式衰减与指数衰减3种类别。

由于青藏高原气候影响,多年冻土区域边界附近的属性变化不是简单的线性隔离,而是以指数形式逐步衰退,见图3,由此完成对多年冻土区冻土分布数据的动态缓冲分析,分析结果见图4。影响度与距离的关系表示为

$$\begin{cases} F = f^{1-H} \\ H = V_0/V_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: F 为物体对周围空间的影响度; f 为缓冲带分析中空间实体的综合规模指数; H 为实际环境中某点与该物体位置的距离比例; V_0 为物体能够作用到的最远长度; V_1 为在物体最大影响距离内某点与该物体的实际距离。

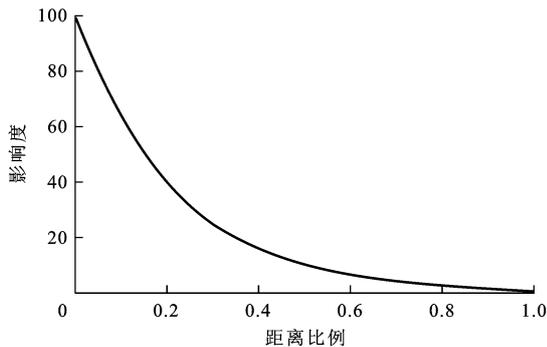


图3 指数衰减影响度曲线

Fig. 3 Influence degree curve of exponential attenuation

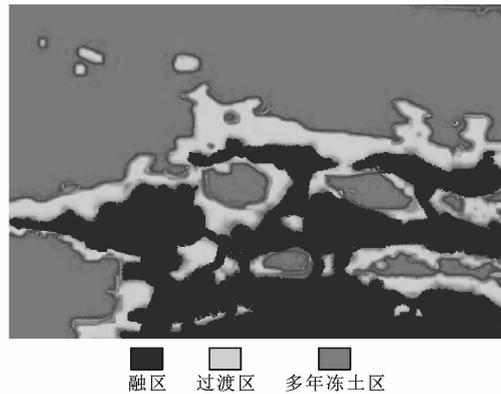


图4 多年冻土区动态缓冲分析结果

Fig. 4 Dynamic buffer analysis result of permafrost region

3.2.3 实际数据试验

在多年冻土区的选线应用中,通过向GIS输入路线经过的地理区域,根据存储在地理信息数据库中的数据,建立不同地块间的拓扑关系,生成相应的缓冲分析结果^[21],并根据目标区域的控件属性,得到相应缓冲区域的危险度属性表。数据试验结果见图5。

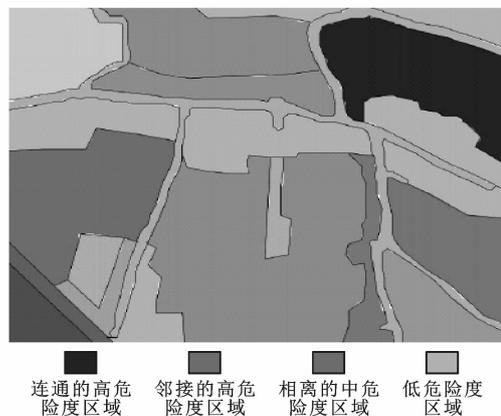


图5 实际数据试验缓冲分析结果

Fig. 5 Buffer analysis result of actual experimental data

3.3 支持智能选线

由GIS提供的地理信息支持最终需要应用在

智能选线的遗传迭代过程中,用于辅助判定子代的优劣以及是否符合危险度的控制条件。

3.3.1 GIS 信息判定子代的优劣

由于周围地理环境中目标的几何知识、分布规律与关联规则各不相同,因此,遗传算法产生的子代也具有不同的地质环境,根据地理地质知识库中地质风险评价规则和生态影响评价规则可以较好地判定各个子代的优劣以及各个路线缓冲区内的地质危险度及对周围的作用程度,从而判定算法是否在某一时代时中断迭代。

3.3.2 GIS 信息判定子代的存留

由于遗传算法中采用了精英算法进行选择操作,因而每一次选择都将淘汰一部分不符合危险度要求的子代,选取尽可能优秀的子代进入下一次迭代^[22]。GIS 在精英选择过程中可提供子代在目标区域的各项属性值,如土壤性质、土地利用、土地权属、地质条件和坡度特征等供算法完成对子代的筛选。表 13 为编号分别为 1、2、3 的地块中缓冲区所占用区域的部分属性值与总危险度。经过 GIS 处理后的目标区域,其危险度区划结果见图 6。

表 13 地块属性值与总危险度

Tab. 13 Block attribute values and total risk degrees

地块编号	面积 S/m ²	周长 Z/m	SZ ⁻²	总危险度
1	50 000	913.00	0.059 98	5.2
2	3 520	241.31	0.060 45	4.8
3	12 415	452.74	0.060 57	4.4

4 公路路线方案设计

4.1 公路路线平面模型

为便于获取设计参数,采用图 7 的公路平面线形模型模拟公路的空间布局。在坐标系 xOy 中,假设点 $P(x_p, y_p)$ 和点 $Q(x_q, y_q)$ 分别为路线的起点与终点, PQ 为路线起终点的连线。在路线较为平坦、不考虑回头曲线的条件下,用垂切线 μ ($\mu=1, 2, \dots, \eta$) 等分线段 PQ , 并与 PQ 连线交于点 O_μ , 即将线段 PQ 划分为 $\eta+1$ 等分, 路线与垂切线交于点 P_μ , 则平面线形优化可看作是在对应区域内搜寻路线交点 P_μ 点集的过程。

引入 2 个坐标系:第 1 坐标系为大地坐标系,以正北方向为 x 轴,正东方向为 y 轴;第 2 坐标系为一维坐标系,以各个垂切线与线段 PQ 的交点 O_μ 为坐标原点,垂切线左上方为正,右下方为负。由于大地坐标系有 x, y 两个值,不利于后面的优化计算,故取交点 P_μ 与 PQ 连线的距离 Φ_μ 作

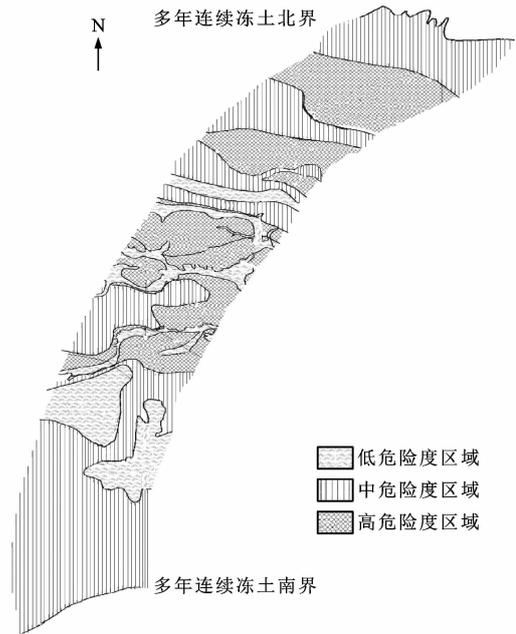


图 6 青藏高原多年冻土区危险度识别结果

Fig. 6 Risk degree identification result of permafrost region result of Qinghai-Tibet Plateau

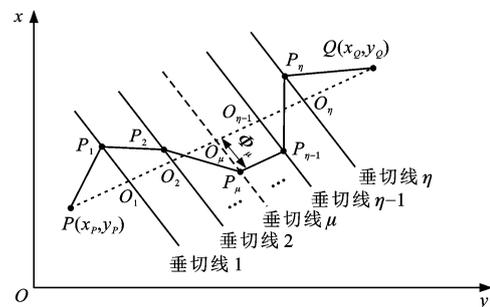


图 7 公路平面线形模型

Fig. 7 Highway plane alignment model

为临时决策变量^[23]。坐标系原点的坐标为 (x_{O_μ}, y_{O_μ}) , 计算公式为

$$\begin{cases} x_{O_\mu} = x_p + \frac{\mu}{\eta+1}(x_q - x_p) \\ y_{O_\mu} = y_p + \frac{\mu}{\eta+1}(y_q - y_p) \end{cases} \quad (8)$$

由于 Φ_μ 为确定平面线形的临时决策变量,故应确定其取值范围。以矩形块状区域为例,其最大值与最小值分别为 (x_{max}, y_{max}) 、 (x_{min}, y_{min}) 。设垂切线与大地坐标系的正北向夹角为 θ , 则 θ 可表示为

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_q - y_p}{x_q - x_p}\right) + 90^\circ \quad (9)$$

由式(9)可知, θ 的取值范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$ 。设 Φ_{L_μ} 和 Φ_{U_μ} 分别为 Φ_μ 的最小值和最大值, 则由 θ 的 4 种取值得到对应的 Φ_{L_μ} 和 Φ_{U_μ} 分别为

$$\Phi_{1,\mu} = \begin{cases} x_{\min} - x_{O_\mu} & \theta = 0^\circ \text{ 或 } \theta = 180^\circ \\ \max \left\{ \frac{x_{\min} - x_{O_\mu}}{\cos(\theta)}, \frac{y_{\min} - y_{O_\mu}}{\sin(\theta)} \right\} & 0^\circ < \theta < 90^\circ \\ y_{\min} - y_{O_\mu} & \theta = 90^\circ \\ \max \left\{ \frac{x_{\max} - x_{O_\mu}}{\cos(\theta)}, \frac{y_{\min} - y_{O_\mu}}{\sin(\theta)} \right\} & 90^\circ < \theta < 180^\circ \end{cases} \quad (10)$$

$$\Phi_{U,\mu} = \begin{cases} x_{\max} - x_{O_\mu} & \theta = 0^\circ \text{ 或 } \theta = 180^\circ \\ \min \left\{ \frac{x_{\max} - x_{O_\mu}}{\cos(\theta)}, \frac{y_{\max} - y_{O_\mu}}{\sin(\theta)} \right\} & 0^\circ < \theta < 90^\circ \\ y_{\max} - y_{O_\mu} & \theta = 90^\circ \\ \min \left\{ \frac{x_{\min} - x_{O_\mu}}{\cos(\theta)}, \frac{y_{\max} - y_{O_\mu}}{\sin(\theta)} \right\} & 90^\circ < \theta < 180^\circ \end{cases} \quad (11)$$

为获得统一的、在大地坐标系下的交点坐标集，记 P_μ 的全局坐标为 (x_{P_μ}, y_{P_μ}) ，其转换公式为

$$\begin{cases} x_{P_\mu} = x_{O_\mu} + \Phi_\mu \cos(\theta) \\ y_{P_\mu} = y_{O_\mu} + \Phi_\mu \sin(\theta) \end{cases} \quad (12)$$

依次连接各条垂切线上的交点 P_μ ，即得到路线方案的初步导线模型，后续可为之适合合适的平曲线要素。需要指出的是，在选线阶段，缓和曲线对整体线位影响较小^[23]，故对其不做详述。

4.2 线位优化遗传算法

尽管遗传算法已被应用于很多实际问题，但前期进化易早熟和后期进化速度缓慢是其最大的缺点^[24]，因此，本文提出 2 种策略来对遗传算法进行优化，以应对路线优化的需要：一是采用自适应方法，帮助遗传算子的重构，保证种群的多样性；二是结合粒子群算法，改善迭代循环的局部收敛能力。

4.2.1 基因编码

ξ 为染色体， g_1, g_2, \dots, g_η 为基因，采用浮点编码方式，表示为

$$\xi = (g_1, g_2, \dots, g_\eta) = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_\eta) \quad (13)$$

4.2.2 产生初始种群

为了能够在尽可能大的范围内寻找优化目标，并且保持种群的多样性，假设在产生初始种群时，没有任何先验知识，初始种群交点的起始位置位于线段 PQ 上^[24]，则初始时的染色体为

$$\xi = (0, 0, \dots, 0) \quad (14)$$

4.2.3 引入自适应度的选择策略

选择用来确定重组和交叉的个体，为了保证进化方向不会偏离问题研究的方向，引入了自适应度的方法，通过定义用于调整进化倾向与迭代速度的收敛指标-代间差异度和种群进化的离散度^[25]，控制遗传迭代的过程，减少迭代的盲目性，保证了对进化方向的

控制，有效克服了过早收敛的现象。

4.2.4 构造粒子群遗传算法

为了在局部优化中获得更优秀的线形，将粒子群算法与遗传算法进行融合，构造粒子群遗传算法 PSO-GA^[26-27]，并以此方法对路线优化问题进行有益的尝试，执行局部搜索功能，以弥补遗传算法后期进化缓慢的缺点，并克服局部收敛的问题^[28]。算法流程见图 8。

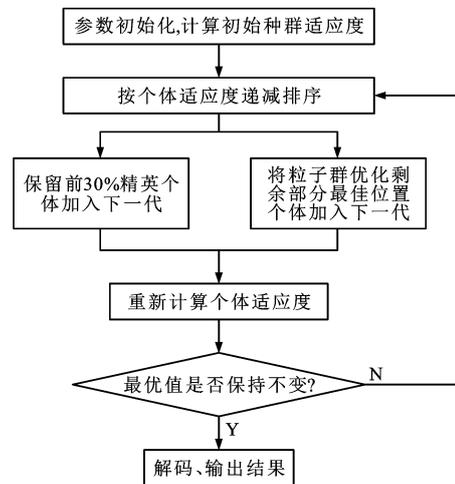


图 8 PSO-GA 优化算法流程

Fig. 8 Flow of PSO-GA optimization algorithm

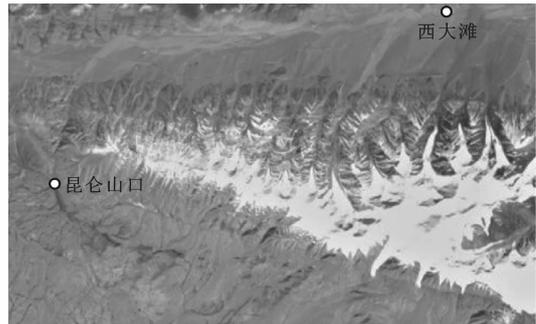


图 9 西大滩至昆仑山口地形

Fig. 9 Topography between Xidatan and Kunlun Mountains pass

5 实例验证

选取青藏高原西大滩至昆仑山口路线走廊带某路段作为实例研究区域，运用青藏高原多年冻土区智能线位选择方法进行公路线位设计，在经过算法多次迭代后得到了最终的线位方案。

西大滩至昆仑山口路线走廊带长度约为 30 km，平均海拔为 4 426.65 m，平均坡度为 3.47°，年平均地温为 -2℃ ~ -1℃，主要分布富冰冻土，属于青藏高原多年冻土区。青藏高原多年冻土区公路选线流程见图 10。

首先，在西大滩至昆仑山口走廊带内选取一段

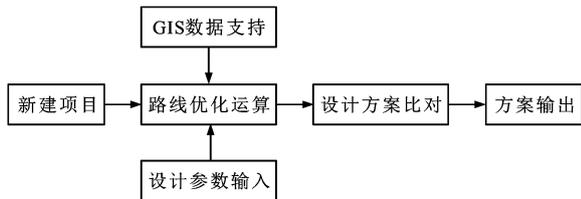


图 10 公路选线流程

Fig. 10 Flow of highway route selection

长度为 3 km 的计算单元,分别计算单元内厚层地下冰、热融滑塌、冻胀丘与冻土沼泽等影响因素的连续度和发育度,得到整个计算单元的危险度,为后续计算提供数据基础。

然后,将计算单元的相关数据图层导入 GIS,包括地形图、土地利用图、地质危险性分级图、水系河流分布图、起终点与控制点图层等,获取目标区域的地理地质情况,包括多年冻土区内地质灾害的分布及其对路线布设可能的影响范围,并根据本文方法设定线位优化算法的相关参数。数据试验的遗传参数设置为:初始条件下共 50 条路线,共进行 120 次迭代,拟定交点数为 35 个,取交叉概率为 0.5,选择概率为 0.1,路线走廊带长度为 3 km。

最后,根据获取的地理信息,在设定的路线参数控制下进行路线的迭代设计,采用危险度指标筛选生成的子代结果,并将路线优化终止条件下的最优解集作为推荐方案输出,显示各推荐方案相关属性值,包括路线参数的安全和环境属性信息等。

实际数据试验的运行指标见表 14,试验结果如下。

表 14 运行指标

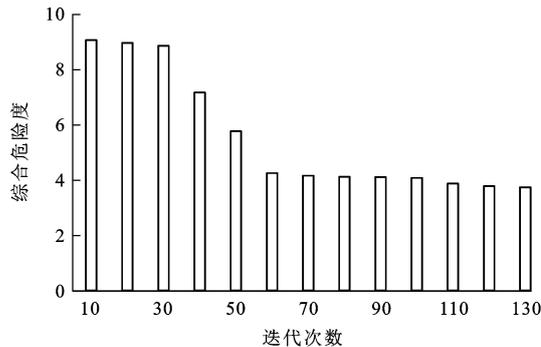
Tab. 14 Operation indexes

GIS 版本	开发语言	计算单元数据大小/MB	收敛迭代次数	收敛时间/s
ArcGIS10.2	VB.NET	175	60	1 284

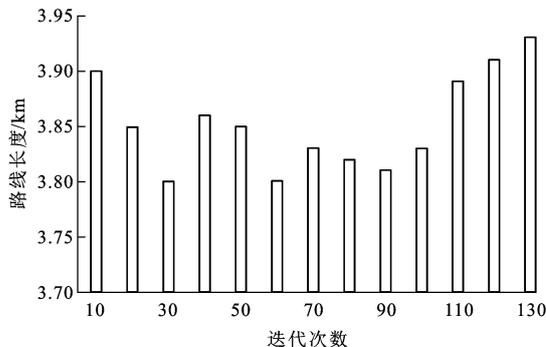
(1)优化算法对约束条件的考虑主要通过危险度模型来体现,优化模型能自动由高危危险度区转向低危险度区,因此,优化时仅考虑半径约束,可通过惩罚函数法避免不满足规范要求的小半径出现。

(2)在初始种群为 50 个、遗传代数 120 代的条件下进行线位的迭代设计,一般情况下,优化算法在 60 代左右就可以收敛,危险度趋于稳定,且稳定在 3.75 左右。结果表明,系统能够依据设计速度的不同,选择不同的最优方案。迭代结果见图 11。

(3)系统选择的最优方案是危险度最低的路线,图 12 为局部方案的路线迭代设计结果。



(a) 子代综合危险度



(b) 子代路线长度

图 11 迭代结果

Fig. 11 Iteration results

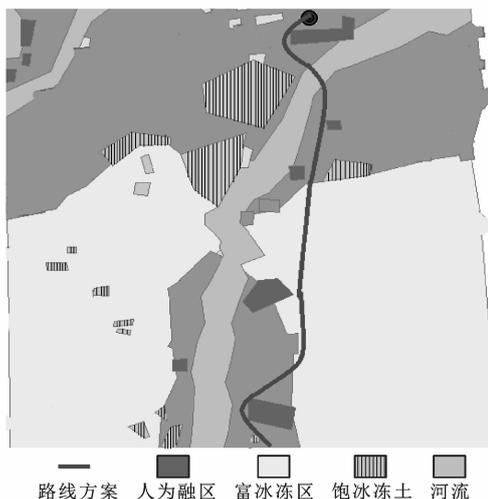


图 12 路线设计结果

Fig. 12 Route design result

6 结 语

(1)基于 GIS 的智能选线策略,可为青藏高原多年冻土区复杂地理环境下的路线方案选择提供高效快捷的新方法,提高青藏高原多年冻土区公路路线设计的质量,确保达到“主动保护多年冻土、确保路基稳定、生态环境友好、布局经济合理”等要求。

(2)GIS 的空间数据挖掘技术,对于发现多年冻土路线选线区域中的隐含知识具有重要作用,能够

提高空间数据挖掘的深度,更好地评价公路与地质、生态等的关系。试验结果表明,方法具备良好的寻优性能,能更快地收敛到最优解,且性能稳定,可为后续的工程项目积累相关经验。

(3)在优化算法上,构造了粒子群遗传算法,算法不仅综合了遗传算法和粒子群优化算法的优点,而且一定程度上克服了遗传算法固有的缺陷,实例数据试验表明,算法在 50 个初始种群下,迭代至第 60 代左右时即可得到危险度最低的优选方案,其综合危险度稳定在 3.75 左右。

(4)本文提出的目标函数是基于对青藏高原多年冻土区公路工程危险度做出的量化考评,对于实际工程而言,需要考虑的方面还有很多,应进一步研究多目标的优化算法,提高工程设计质量。

参 考 文 献 :

References :

- [1] SADEK S, KAYSI I, BEDRAN M. Geotechnical and environmental considerations in highway layouts: an integrated GIS assessment approach[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2000, 2(3/4): 190-198.
- [2] 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.
- [3] KANG M W, JHA M K, SCHONFELD P. Applicability of highway alignment optimization models[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 21(1): 257-286.
- [4] KAZEMI S F, SHAFABI Y. An integrated model of parallel processing and PSO algorithm for solving optimum highway alignment problem[C]//IEEE. 27th European Conference on Modelling and Simulation. New York: IEEE, 2013: 551-557.
- [5] 易思蓉,张家玲,邓域才.生成线路初始平面的自动优化方法[J].西南交通大学学报,2002,37(1):1-5.
YI Si-rong, ZHANG Jia-ling, DENG Yu-cai. An automatic optimization method for designing the initial horizontal alignment of new railway lines[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2002, 37(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 许金良,王海君,杨少伟.基于遗传算法的公路纵断面优化[J].交通运输工程学报,2003,3(2):48-52.
XU Jin-liang, WANG Hai-jun, YANG Shao-wei. Optimization of highway profile based on genetic algorithms[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(2): 48-52. (in Chinese)
- [7] 马庆雷.基于遗传算法的公路平面优化[J].中国公路学报,2006,19(1):42-46.
MA Qing-lei. Optimization of highway plane based on genetic algorithm[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(1): 42-46. (in Chinese)
- [8] 高 华.基于遗传算法和多目标决策体系的公路选线整体优化[D].长沙:中南大学,2007.
GAO Hua. The overall optimization of highway line selection based on genetic algorithm and multi-objective decision system[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [9] 阮沈勇,黄润秋.基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J].成都理工学院学报,2001,28(1):89-92.
RUAN Shen-yong, HUANG Run-qiu. Application of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(1): 89-92. (in Chinese)
- [10] 王 平,史培军.自下而上进行区域自然灾害综合区划的方法研究——以湖南省为案例[J].自然灾害学报,1999,8(3):54-60.
WANG Ping, SHI Pei-jun. The research of regional natural disaster regionalization with the "bottom-up" methods—a case study of Hunan Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1999, 8(3): 54-60. (in Chinese)
- [11] 杨宏志,卢 瑜.公路路线智能优化方法研究[J].交通信息与安全,2009,27(5):77-80,84.
YANG Hong-zhi, LU Yu. Intelligent optimization method of highway alignment[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2009, 27(5): 77-80, 84. (in Chinese)
- [12] 苑 福.多年冻土地区厚层地下冰对铁路的危害与防治[J].路基工程,1992(6):14-17.
YUAN Fu. Damage and control of thick layer underground ice to railway in permafrost regions[J]. *Subgrade Engineering*, 1992(6): 14-17. (in Chinese)
- [13] 程国栋.厚层地下冰的形成过程[J].中国科学:B辑,1982(3):281-288.
CHENG Guo-dong. The formation process of thick layer underground ice[J]. *Science China: Series B*, 1982(3): 281-288. (in Chinese)
- [14] 牛富俊,程国栋,赖远明,等.青藏高原多年冻土区热融滑塌型斜坡失稳研究[J].岩土工程学报,2004,26(3):402-406.
NIU Fu-jun, CHENG Guo-dong, LAI Yuan-ming, et al. Instability study on thaw slumping in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(3): 402-406. (in Chinese)
- [15] RAUTIAINEN K, PARKKINEN T, LEMMETYINEN J, et al. SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180: 346-360.
- [16] 王 平.青藏铁路多年冻土区冻胀丘发展特征及其对路基稳定性的影响[J].铁道标准设计,2013(5):1-4.
WANG Ping. Development features of frost mound in permafrost region and their influence on subgrade stability along Qinghai-Tibet Railway[J]. *Railway Standard Design*, 2013(5): 1-4. (in Chinese)
- [17] ZHOU Wan-fang, BECK B F, ADAMS A L. Application of

- matrix analysis in delineating sinkhole risk areas along highway (I-70 near Frederic, Maryland)[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(7): 834-842.
- [18] KAO Y C, CHEN M H, HUANG Y T. A hybrid algorithm based on ACO and PSO for capacitated vehicle routing problems[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 2012(1024-123X): 1-17.
- [19] 谢翠明. 基于 GIS 的公路地质灾害区域危险性评价与预测[D]. 长沙:中南大学,2008.
- XIE Cui-ming. Evaluation and prediction of regional risk of highway geological hazards based on GIS[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [20] 黄杏元,徐寿成. GIS 动态缓冲带分析模型及其应用[J]. *中国图象图形学报*,1998,3(10):871-873.
- HUANG Xing-yuan, XU Shou-cheng. GIS-based dynamic buffer analysis model and its applications[J]. *Journal of Image and Graphics*, 1998, 3(10): 871-873. (in Chinese)
- [21] 郑 镝. 青藏高原腹地多年冻土区典型地质灾害研究[D]. 北京:中国地质大学,2009.
- ZHENG Di. The study on the typical geological hazards at permafrost areas in the center of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese)
- [22] CHANG P C, HUANG W H, TING C J. A hybrid genetic-immune algorithm with improved lifespan and elite antigen for flow-shop scheduling problems[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(17): 5207-5230.
- [23] 涂圣文,苏 州. 基于 GIS 和遗传-粒子群的公路智能选线方法[J]. *长安大学学报:自然科学版*,2010,30(4):39-45.
- TU Sheng-wen, SU Zhou. Intelligent route selection of highway alignments based on GIS and hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2010, 30(4): 39-45. (in Chinese)
- [24] 杨宏志,韩跃杰,李 芬,等. 基于 GIS 和遗传算法的公路智能选线[J]. *长安大学学报:自然科学版*,2009,29(3):48-53.
- YANG Hong-zhi, HAN Yue-jie, LI Fen, et al. Highway intelligent alignment selection based on GIS and genetic algorithms[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2009, 29(3): 48-53. (in Chinese)
- [25] 秦广军. 遗传算法的改进研究与应用[D]. 郑州:郑州大学,2006.
- QIN Guang-jun. Improved research and application of genetic algorithm[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006. (in Chinese)
- [26] LUKES Z, RAIDA Z. Multi-objective optimization of wire antennas: genetic algorithms versus particle swarm optimization[J]. *Radioengineering*, 2005, 14(4): 91-97.
- [27] ALTUN A A. A combination of genetic algorithm, particle swarm optimization and neural network for palmprint recognition[J]. *Neural Computing and Applications*, 2013, 22(1): 27-33.
- [28] 蔡茵迪. 改进遗传算法在车辆路径问题中的研究应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- CAI Di-di. Improved genetic algorithm to solve the vehicle routing problem[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)