

文章编号:1671-1637(2016)04-0112-10

多年冻土区公路病害模糊专家预测方法

汪双杰¹, 熊 丽², 张 驰^{1,2}, 穆 柯¹, 金 龙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:为了预测多年冻土区新建公路病害路段,辅助设计者在设计阶段进行合理设计,以模糊专家系统为基础提出了多年冻土区公路病害预测方法。以病害度为分析指标,以青藏公路某一路段作为研究对象,定性分析了道路病害的影响因子。根据实际病害数据,将青藏公路调查路段的病害度分为 3 级。结合青藏公路多年年平均地温、含冰量、冻胀率等病害数据,建立了多年冻土区公路病害路段识别的模糊专家系统。运用 MATLAB 中的 Fuzzy Logic Toolbox 工具,将各种影响因子作为输入变量,对 10 组多年冻土区等距路段进行了病害度计算,并运用 SPSS 软件对计算病害度与实际病害度进行对比分析。分析结果表明:随着年平均地温、含冰量、冻胀率的增大,道路病害率上升;计算病害度与实际病害度相关性达到 0.751。可见,运用模糊专家系统对多年冻土区公路病害路段预测具有良好效果。

关键词:道路工程;青藏公路;多年冻土区;公路病害预测;模糊专家系统

中图分类号:U418.6 **文献标志码:**A

Fuzzy expert prediction method for highway diseases in permafrost region

WANG Shuang-jie¹, XIONG Li², ZHANG Chi^{1,2}, MU Ke¹, JIN Long¹

(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 predict the disease sections of newly-built highway in permafrost region and assist the decision-makers to carry on the reasonable design at design stage, a highway disease prediction method in permafrost region was proposed based on fuzzy expert system. The disease degree was used as analysis index, a road section of the Qinghai-Tibet Highway was selected as research object, and the influence factors of road disease were qualitative analyzed. The disease degrees of Qinghai-Tibet Highway were divided into 3 levels according to actual disease data. Combined with the years of disease data of annual average ground temperature, ice content and frozen-heave factor of Qinghai-Tibet Highway, the fuzzy expert system for identifying disease sections in permafrost region was built. A variety of influence factors were used as input variables, and the disease degrees of the 10 equidistance road sections in permafrost region were calculated by using the Fuzzy Logic Toolbox of MATLAB. The calculated disease degree and the actual disease degree were compared and analyzed by using SPSS software. Analysis result shows

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: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。

that the road disease degree increases with the increase of annual average ground temperature, ice content and frozen-heave factor, the relevance between the calculated disease degree and the actual disease degree is 0.751, so, the application of fuzzy expert system in the prediction of highway diseases in permafrost region has a beneficial effect. 8 tabs, 19 figs, 27 refs.

Key words: road engineering; Qinghai-Tibet Highway; permafrost region; highway disease prediction; fuzzy expert system

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

0 引言

青藏公路格尔木至拉萨段接近 550 km, 穿越多年冻土区, 地质条件极为复杂, 生态环境十分脆弱, 由多年冻土问题造成的病害极其严重^[1]。由于沿线各区域年平均地温、含冰量和冻胀率不同, 公路沿线病害率差别很大^[2-4], 因此, 对多年冻土区公路沿线道路病害进行预测和排序, 能辅助决策者发现潜在病害路段, 提高道路安全水平和资金利用效能。

公路病害路段的预测方法一直是道路工程领域关注的热点问题, 国内外学者在此领域也进行了广泛的研究。Sousa 等利用贝叶斯网络法分析了隧道施工的风险^[5]; Agarwal 等提出了层次分析法来识别新建道路危险路段^[6]; Meidav 利用电阻率成像技术调查分析了多年冻土地下冰的分布特征和厚度变化^[7]; Lin 等利用数字高程模型中数据源和分辨率对水土保持能力进行了评估^[8]; Faybishenko 利用模糊概率理论对不确定性水平衡进行了计算^[9]; Chutia 等利用模糊评判理论对各种环境、地质因素进行了评估^[10-11]; 周伟等利用 GIS 的信息处理和空间叠加功能, 实现了对特定区域地质病害空间分布的预测^[12]; 骈龙江采用系统分析和模糊综合评判的方法, 建立了冻融病害系统的模糊数学预报模型^[13]; 刘保国等利用模糊网络分析法对公路山岭隧道施工风险进行分析, 建立了公路山岭隧道施工风险评价指标体系^[14]; 李颜利用雷达探测 ARMA 功率谱识别算法对青藏铁路施工路段测温孔的情况和铁道路肩的地下冻土空洞病害进行了分析识别, 成功地将探地雷达运用于冻土路基检测^[15]。目前, 这些方法在冻土区病害研究中的不足主要表现在以下 2 个方面: 层次分析法、电阻成像、GIS 等技术在预测病害时无法反映出评判对象的不确定性, 虽然 Faybishenko 等学者利用了模糊综合评判的方法评估了环境等影响因素^[9-11], 但却未将其应用于道路病害预测领域; 多年冻土区病害的分析研究均基于

大量已发生病害数据的调查统计, 具有明显的区域性限制和统计的主观随意性, 且缺乏对多年冻土区公路病害性进行预测的方法研究, 因此, 有待完善。

针对上述研究存在的不足, 综合考虑多年冻土特性及道路病害程度的模糊性, 本文将模糊专家系统理论用于预测道路病害, 考虑多年冻土区病害产生的关键要素, 建立模糊专家系统来预测公路病害路段, 摒弃了病害统计资料随意性等弊端, 实现对多年冻土区新建公路的病害性预测。本文首先简单介绍了模糊专家系统中 Mamdani 模糊推理模型的组成和算法的基本原理, 之后借用 SPSS 数据分析软件定量分析了青藏公路某一路段内病害数据, 确定多年冻土区公路病害产生的决定性因素, 接着运用模糊专家系统相关理论构建了基于冻土影响因素划分的多年冻土区公路病害路段预测的模糊专家系统, 最后用青藏公路某一路段进行了实例验证。

1 模糊专家系统基本原理

道路地质因素和冻土病害的大量经验性专家知识具有模糊性和不完全性^[16], 无法用来建立准确的数学模型, 其推理过程不仅有符号推理, 而且还要进行数值计算, 精确的推理环境是不存在的, 基于模糊推理的专家系统通过将专家经验和模糊数学相结合, 将隶属函数的概念引入到专家系统的模糊知识表示中, 同时将专家经验转化为模糊推理的规则库, 从而实现快速的模糊推理并具有较强的学习能力^[17-19]。

模糊专家系统的核心为 Mamdani 模糊推理模型, 见图 1, 模型由模糊生成器、模糊规则库、模糊推理机与反模糊化器 4 部分组成。

模糊生成器是以专家知识确定模糊隶属度函数, 将输入变量模糊化。常用的隶属度函数有 S 形函数、 π 形函数、三角形和梯形函数等, 一般来说, 三角形和梯形函数就足以表达专家知识了, 并且还能极大简化计算过程。梯形隶属度函数见

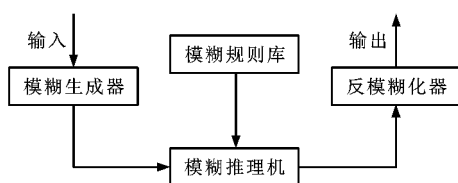


图 1 Mamdani 模糊推理模型

Fig. 1 Mamdani fuzzy reasoning model

图 2, 表示为

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a, b, c, d 均为实数; $\mu(x)$ 为输入变量 x 的隶属度。

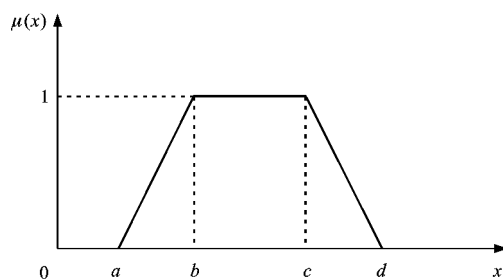


图 2 梯形隶属度函数

Fig. 2 Trapezoidal membership function

模糊推理机采用 Mamdani 模糊推理方法, 即关系生成算法取为 \min 运算, 推理合成算法取为 $\max\text{-}\min$ 复合运算。

反模糊化器采用质心法反模糊化, 取模糊隶属度函数与横坐标围成面积的质心为代表点, 计算输出范围内整个离散采集点的质心

$$Z = \frac{\int \mu(x) x dx}{\int \mu(x) dx} \quad (2)$$

式中: Z 为整个离散采集点的质心。

最后按照最大隶属度原则取隶属度最大的模糊子集输出。

2 多年冻土区道路病害影响指标分析

多年冻土区道路热融滑塌、厚层地下冰融化等造成的裂缝与不均匀沉降等在很大程度上取决于冻土区的年平均地温 T 、含冰量 W 和冻胀率 X ^[20-21]。当路线所处的多年冻土区年平均地温较高时, 会导致厚层地下冰融化, 易造成热融滑塌等病害^[22-23], 进而引起路基的不均匀沉降变形, 严重时可导致路

基一侧沉陷(图 3), 故在一定范围内, 年平均地温越高, 冻土稳定性越差, 导致的道路病害越严重。多年冻土区含冰量普遍偏大, 含冰量越高, 造成的道路病害越严重^[24], 是形成路面病害的基本内因, 对公路建筑物的稳定性有较大影响(图 4), 尤其当环境温度较高时, 多年冻土上限明显下降, 导致路基产生显著不均匀沉降, 厚层地下冰的长期强度和允许荷载趋于零, 对于不容易绕避的大范围分布的厚层地下冰, 由于对温度变化最为敏感, 人为扰动和路基开挖将使其快速融化, 给公路路基的施工和维护造成巨大困难。季节性冻土与融化层土的冻胀类型是形成冻胀、冰锥的主要评价标准^[25], 在其上修建的公路易出现波浪、拥包等病害(图 5)。可见, 年平均地温、含冰量和冻胀率是评价道路病害的主要指标。



(a) 整幅路基沉陷



(b) 左侧路基沉陷



(c) 右侧路基沉陷

图 3 路基沉陷

Fig. 3 Roadbed subsidences



(a) 路面轻度网裂



(b) 路面中度网裂



(c) 路面重度网裂

图 4 路面网裂

Fig. 4 Pavement reticular cracks

结合青藏公路多年年平均地温、含冰量、冻胀率和病害(包括路基病害和路面病害)等数据,借用 SPSS 数据分析软件定量统计分析了年平均地温、含冰量和冻胀率与道路病害之间关系。在进行道路病害数据统计时,以年平均地温、含冰量和冻胀率等划分的冻土类型为病害统计依据,具体划分情况见表 1。由于不同影响指标对公路建设造成的危害难以精确衡量,故本文将路基、路面的病害程度依据专家经验划分为 3 个等级,1 为弱病害,2 为中度病害,3 为重度病害^[26]。经过 SPSS 数据分析软件处理,最后得到不同病害程度与影响指标之间的关系见图 6~8。

从图 6 可以看出:当 $T < -2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,道路平均病害率仅为 17%;当 $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < -1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,平均病害率增大为 21%;当 $T \geq -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,平均病害



(a) 波浪



(b) 拥包



(c) 车辙

图 5 波浪、拥包、车辙

Fig. 5 Wave, froth and rut

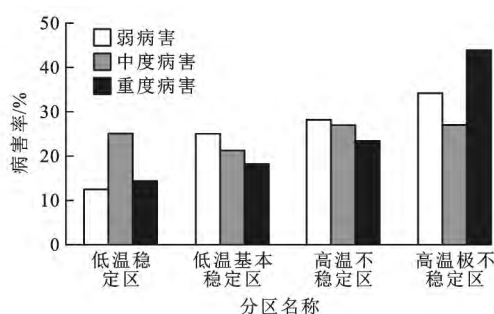


图 6 病害率与年平均地温关系

Fig. 6 Relationship between disease rate and annual average ground temperature

率增大为 35%,其重度病害的病害率达到了 44%,是低温稳定区的 3 倍。可见,年平均地温对道路病害的影响很大,不论是哪一等级的病害,其均在高温极不稳定区出现峰值,即冻土区年平均地温越高,道路病害率越大。

表 1 影响因子划分

Tab. 1 Division of influence factors

年平均地温	分区范围/℃	$T < -2.0$	$-2.0 \leq T < -1.0$	$-1.0 \leq T < -0.5$	$T \geq -0.5$
	分区名称	低温稳定区	低温基本稳定区	高温不稳定区	高温极不稳定区
含冰量	分区范围/%	$1 \leq W < 12$	$12 \leq W < 20$	$20 \leq W < 50$	$W \geq 50$
	分区名称	少冰冻土区	多冰冻土区	饱冰冻土区	含土冰层区
冻胀率	分区范围/%	$X < 1.0$	$1.0 \leq X < 3.5$	$3.5 \leq X < 6.0$	$6.0 \leq X < 12.0$
	分区名称	不冻胀土区	弱冻胀土区	冻胀土区	强冻胀土区

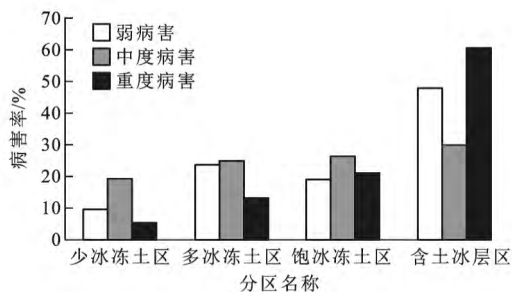


图 7 病害率与含冰量关系

Fig. 7 Relationship between disease rate and ice content

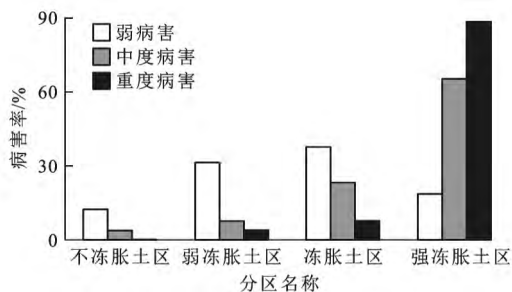


图 8 病害率与冻胀率关系

Fig. 8 Relationship between disease rate and frozen-heave factor

从图 7 可以看出:当 $1\% \leq W < 12\%$ 时,道路发生弱病害的概率为 10%,发生中度病害的概率为 19%,发生重度病害的概率为 5%;当 $12\% \leq W < 20\%$ 时,道路发生弱病害的概率为 24%,发生中度病害的概率为 25%,发生重度病害的概率为 13%;随着含冰量的增加,弱病害、中度病害和重度病害的病害率均逐渐增大,当含冰量达到含土冰层以后,随着含冰量的增加,各个等级病害的病害率增幅明显加大;当 $W \geq 50\%$ 时,道路发生弱病害、中度病害、重度病害的概率分别达到了 48%、30%、61%。可见,随着含冰量的增加,道路病害率明显增大。

从图 8 可以看出:当 $X < 1.0\%$ 时,道路发生弱病害的概率为 13%,发生中度病害的概率为 4%,发生重度病害的概率为 0;当 $1.0\% \leq X < 3.5\%$ 时,道路发生弱病害的概率为 31%,发生中度病害的概率为 8%,发生重度病害的概率为 4%;当 $6.0\% \leq X <$

12.0% 时,各个等级病害的病害率增幅明显加大,道路发生弱病害的概率为 19%,发生中度病害的概率为 65%,发生重度病害的概率为 88%。可见,随着冻胀率的增加,道路病害率明显增大。

综上所述,年平均地温、含冰量和冻胀率是造成道路病害的主要因素,且随着年平均地温、含冰量和冻胀率的增大,道路病害率也增大。

3 基于模糊专家系统的冻土区道路病害路段识别模型

3.1 输入输出模糊化

取得年平均地温、含冰量和冻胀率 3 个影响因素的输入值,确定输入值对应于相应模糊集的程度。输出为冻土区某路段的病害度。参考南卓铜等对冻土的分类^[2,27],综合考虑现有病害数据与各个影响指标之间的关系,利用专家经验,得出了输入值与输出值的等级划分与取值范围,具体见表 2~5。

表 2 年平均地温等级与范围

Tab. 2 Grades and ranges of annual average ground temperature

模糊值		取值范围/℃	取值范围(标准化)
低	L	$[-6, -3]$	$[0, 0.50]$
中	M	$[-4, -1]$	$[0.33, 0.83]$
高	H	$[-2, 0]$	$[0.67, 1.00]$

表 3 含冰量等级与范围

Tab. 3 Grades and ranges of ice content

模糊值		取值范围/%	取值范围(标准化)
低	L	$[0, 20]$	$[0, 0.40]$
中	M	$[12, 25]$	$[0.24, 0.60]$
高	H	$[22, 50]$	$[0.44, 1.00]$

表 4 冻胀率等级与范围

Tab. 4 Grades and ranges of frozen-heave factor

模糊值		取值范围/%	取值范围(标准化)
低	L	$[0, 5]$	$[0, 0.32]$
中	M	$[2, 12]$	$[0.14, 0.86]$
高	H	$[6, 14]$	$[0.43, 1.00]$

表 5 病害度等级与范围
Tab. 5 Grades and ranges of disease degree

模糊值		取值范围
极小	VS	[0,0.30]
小	S	[0,0.40]
较小	RS	[0.25,0.45]
中	M	[0.30,0.70]
较大	RB	[0.55,0.75]
大	B	[0.60,1.00]
极大	VB	[0.70,1.00]

3.2 确定模糊集

以年平均地温、含冰量、冻胀率为 3 个输入变量,冻土区公路路段病害度为输出变量,采用梯形隶属度函数的形式,按表 2~4 设计所有语言变量的模糊集,见图 9~11。

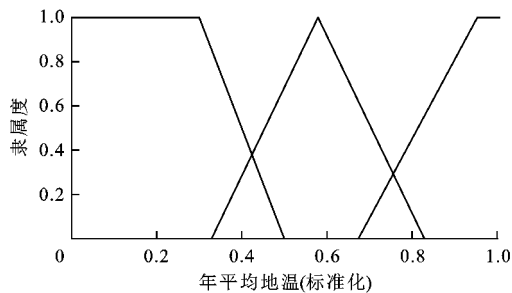


图 9 年平均地温的模糊集
Fig. 9 Fuzzy sets of annual average ground temperature

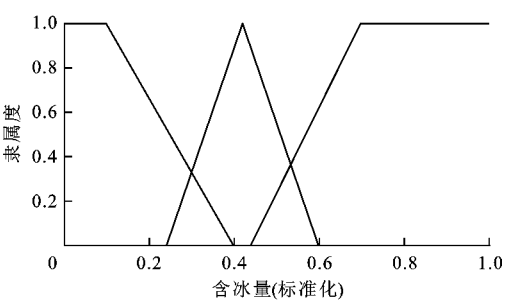


图 10 含冰量的模糊集
Fig. 10 Fuzzy sets of ice content

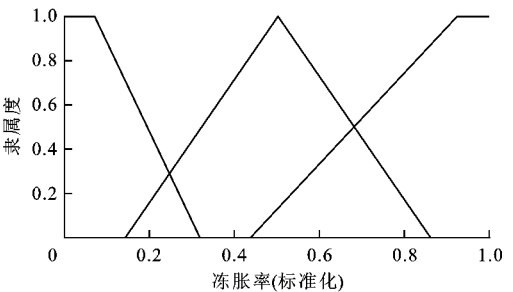


图 11 冻胀率的模糊集
Fig. 11 Fuzzy sets of frozen-heave factor

3.3 抽取并构造模糊规则

通过向专家咨询定义过的输入与输出,得出表 6 的 27 条模糊规则,如规则 1 表示为:当输入的年平均地温、含冰量、冻胀率的值均为低时,系统将会判断病害度极小,输出 VS。考虑本文 3 个输入和 1 个输出,为了方便读者理解模糊规则,采用立方体的形式表示,见图 12。

表 6 模糊规则
Tab. 6 Fuzzy rules

规则	T	W	X	D	规则	T	W	X	D	规则	T	W	X	D
1	L	L	L	VS	10	M	L	L	VS	19	H	L	L	VS
2	L	M	L	VS	11	M	M	L	S	20	H	M	L	M
3	L	H	L	VS	12	M	H	L	RS	21	H	H	L	RB
4	L	L	M	VS	13	M	L	M	VS	22	H	L	M	S
5	L	M	M	S	14	M	M	M	M	23	H	M	M	B
6	L	H	M	S	15	M	H	M	M	24	H	H	M	VB
7	L	L	H	S	16	M	L	H	RS	25	H	L	H	M
8	L	M	H	S	17	M	M	H	M	26	H	M	H	B
9	L	H	H	RS	18	M	H	H	RB	27	H	H	H	VB

3.4 建立冻土区公路病害路段识别专家系统

在定义模糊集和模糊规则后,利用 MATLAB 的 Fuzzy Logic Toolbox 的模糊逻辑开发工具建立冻土区公路病害路段病害度识别专家系统。图 13 为模糊专家系统的规则推理过程,可以通过拖动图中虚线来确定标准化后的年平均地温 T' 、含冰量

W' 与冻胀率 X' 的数值,便可以直接得到相应病害度 D 。病害度越大,表示该路段的病害越严重。

图 14~16 为模糊专家系统以病害度为输出的三维效果。利用模糊专家系统,道路设计人员与相关管理部门在道路未投入使用之前便可判断出道路潜在的严重病害路段,以便采取相关措施进行预处

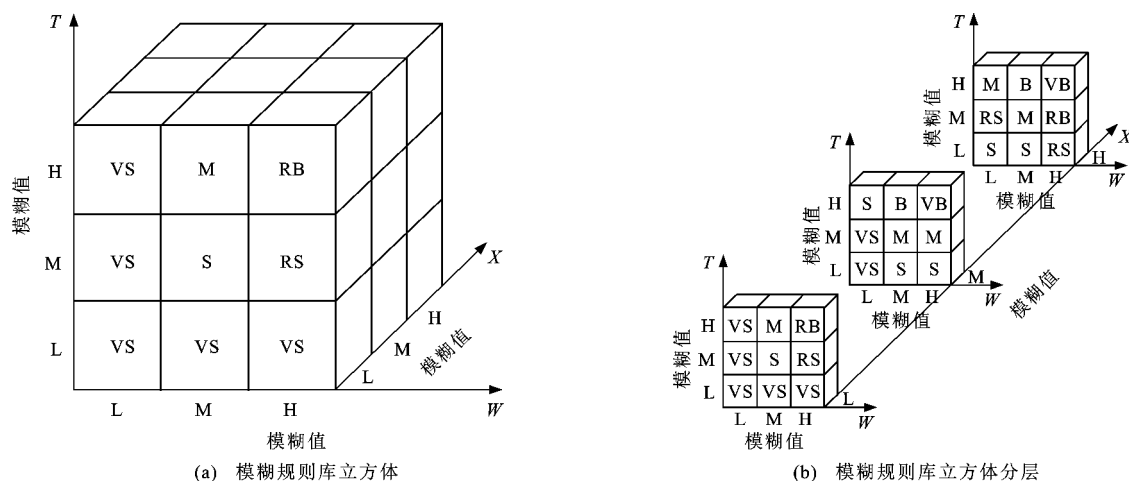


图 12 模糊规则库

Fig. 12 Fuzzy rule base

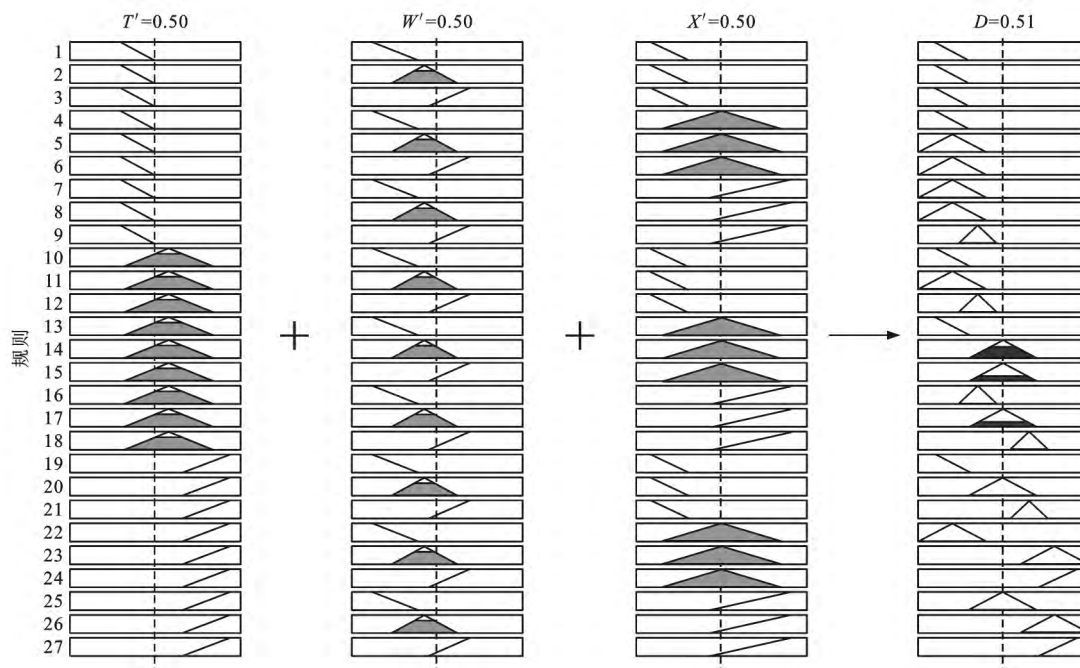


图 13 模糊专家系统推理过程

Fig. 13 Reasoning process of fuzzy expert system

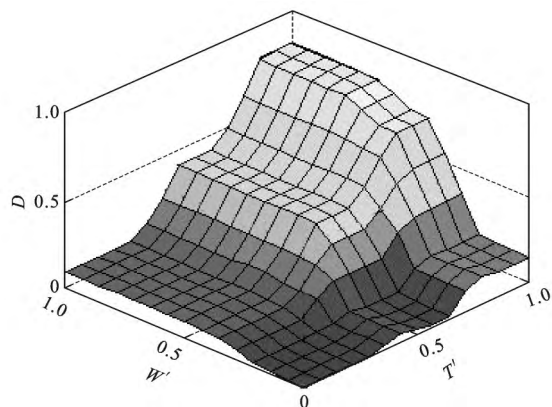
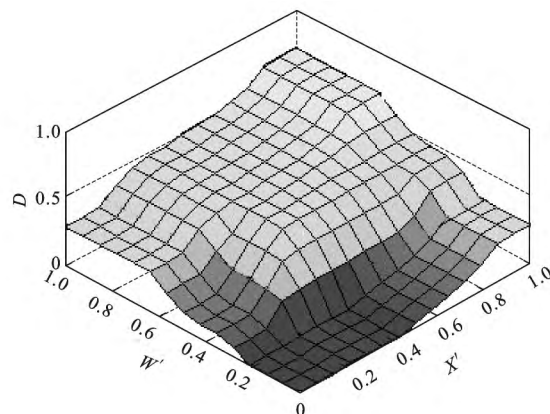
理,提高道路的安全性。

4 实例验证

选取具有典型冻土病害的青藏公路 K279~K329 路段进行实证分析(图 17),依次将研究路段划分为 10 个等距路段,分别编号为 1~10,运用模糊专家系统,对其病害度进行计算、排序,并与实际的病害度作对比。路段路线翻越风火山,地形条件较为复杂(图 18),在翻越风火山处路线最高布设海拔为 4 950 m,路段冬季积雪严重,年平均地温相比其他路段较低。另外,研究路段冻土类型分布多,有融区、少冰冻土、多冰冻土、富冰-饱冰冻土、饱冰-含

土冰层等,冻土类型复杂多变,各个路段冻土类型差异较大。为方便比较,对病害率进行标度处理,记病害率为 100% 的路段病害度为 1,病害率为 0 的路段病害度为 0,采用线性内插法计算其他病害率相应的病害度。按照本文方法,计算 10 个路段的年平均地温、含冰量和冻胀率,见表 7。进一步采用本文方法,代入模糊专家系统进行计算,系统计算病害度与实际病害度对比见图 19。

分别统计图 19 中的每个路段对应的实际病害度,并运用 SPSS 数据分析软件的回归分析算法进行分析,建立了实际病害度 Y 与系统计算病害度 D 的关系模型为

图14 D, W' 与 T' 的关系Fig. 14 Relationship among D, W' and T' 图16 D, W' 与 X' 的关系Fig. 16 Relationship among D, W' and X'

$$Y = 0.6236D + 0.2558 \quad (3)$$

从关系模型可以看出,运用多年冻土区公路病害路段模糊专家系统计算得出的路段病害度与实际路段发生的病害进行回归分析,结果见表8,得出的决定系数 $R^2 = 0.751$,比较接近1,在误差允许范围内,说明模糊专家系统计算结果与实际病害率情况拟合程度好。可见,运用多年冻土区公路病害路段模糊专家系统对公路病害进行识别的方法可靠、有效。

5 结 语

(1)定性分析了多年冻土区道路病害产生的原

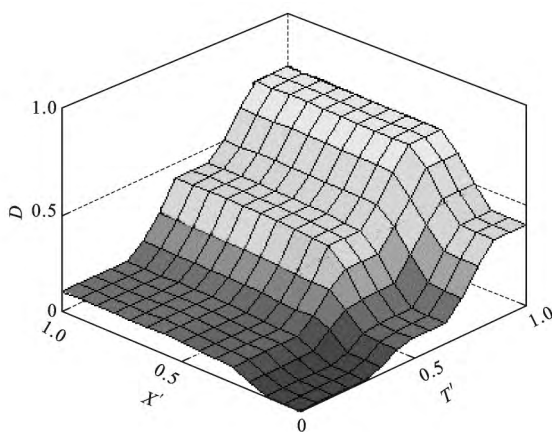
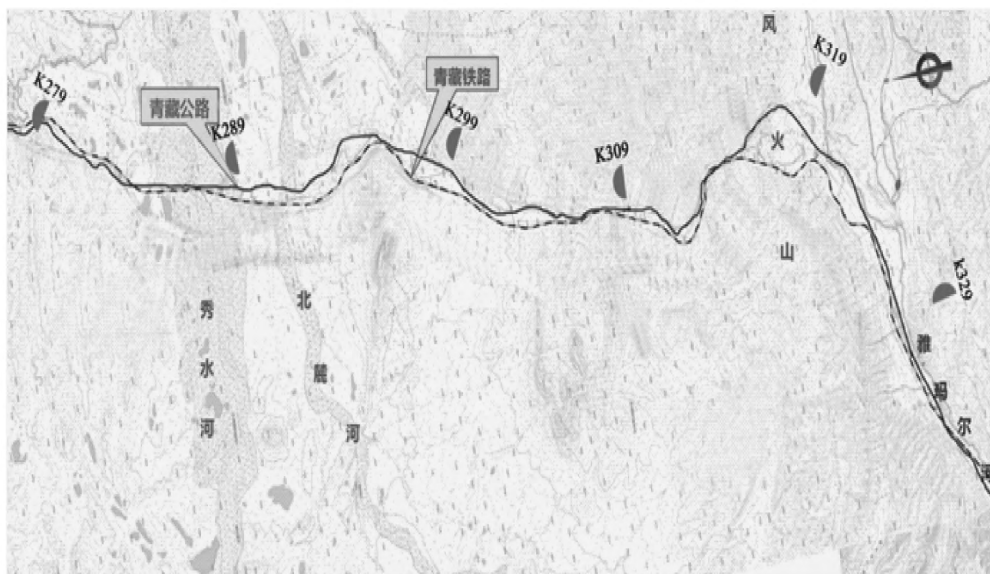
图15 D, X' 与 T' 的关系Fig. 15 Relationship among D, X' and T' 

图17 青藏公路研究路段

Fig. 17 Research section of Qinghai-Tibet Highway

因,结合实际病害数据,利用 SPSS 数据分析软件确定了多年冻土区病害主要影响因素为年平均地温、含冰量、冻胀率。

(2)选取青藏公路某一路段内所有病害数据进行处理分析,分别构造了年平均地温、含冰量、冻胀率的模糊集和隶属度函数,并通过专家咨询的方法



图 18 风火山路段

Fig. 18 Road section of Fenghuo Mountain

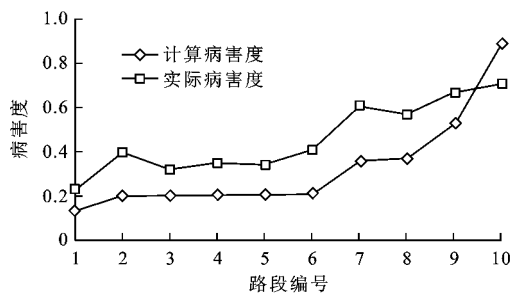


图 19 计算病害度与实际病害度关系

Fig. 19 Relationship between calculated disease degree and actual disease degree

表 7 研究路段指标

Tab. 7 Indexes of research sections

路段编号	$T/^{\circ}\text{C}$	$W/\%$	$X/\%$
1	-5	12.6	2.2
2	-5	19.0	4.8
3	-5	20.0	7.2
4	-4	17.2	4.9
5	-4	18.4	4.3
6	-3	21.5	4.3
7	-4	39.4	12.5
8	-3	15.9	5.3
9	-2	27.4	8.2
10	-1	31.8	7.3

表 8 关系模型分析结果

Tab. 8 Analysis result of relational model

R	R^2	标准估计的误差
0.867	0.751	0.121 668

建立了多年冻土区公路病害路段识别的模糊规则库,运用 MATLAB 的 Fuzzy Logic Toolbox 工具构建了多年冻土区公路病害路段识别模糊专家系统,对道路路段病害度进行识别。

(3)公路路段病害度排序结果可以帮助决策者确定可能发生严重病害的路段,以采取预防或处理的措施,进而提高道路的安全性和经济性。

(4)本文在分析病害路段影响因素时仅考虑了

几个比较重要的地质影响因素,忽略了工程容量因素与人为活动等对病害的影响,在下一步研究中,要综合考虑地质和工程容量、人为因素的影响,使结论更符合实际。

参考文献:

References:

- [1] 潘卫东,朱元林,吴亚平,等. 青藏高原多年冻土地区不良冻土现象对铁路建设的影响[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2002,38(1):127-131.
PAN Wei-dong, ZHU Yuan-lin, WU Ya-ping, et al. The effect of harmful features related to frozen ground on railway construction in permafrost area of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2002, 38(1): 127-131. (in Chinese)
- [2] 南卓铜,李述训,刘永智. 基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用[J]. 冰川冻土, 2002,24(2):142-148.
NAN Zhuo-tong, LI Shu-xun, LIU Yong-zhi. Mean annual ground temperature distribution on the Tibetan Plateau: permafrost distribution mapping and further application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 142-148. (in Chinese)
- [3] 程 佳,赵相卿,杨晓明. 青藏铁路多年冻土区典型土样冻胀率特性研究[J]. 冰川冻土, 2011,33(4):863-866.
CHENG Jia, ZHAO Xiang-qing, YANG Xiao-ming. Research of frost-heaving ratio of typical soil samples from permafrost regions of Golmud-Lhasa Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 863-866. (in Chinese)
- [4] 霍 明,汪双杰,章金钊,等. 含水率和温度对高含冰量冻土力学性质的影响[J]. 水利学报, 2010,41(10):1165-1172.
HUO Ming, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao, et al. Experimental study on influences of water content and temperature on mechanical properties of ice-rich frozen soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1165-1172. (in Chinese)
- [5] SOUSA R L, EINSTEIN H H. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian networks: Porto Metro case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27(1): 86-100.
- [6] AGARWAL P K, PATIL P K, MEHAR R. A methodology for ranking road safety hazardous locations using analytical hierarchy process[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 104: 1030-1037.
- [7] MEIDAV T. Application of electrical resistivity and gravimetry in deep geothermal exploration[J]. Geothermics, 1970, 2(1): 303-310.
- [8] LIN Sheng-pan, JING Chang-wei, COLES N A. Evaluating DEM source and resolution uncertainties in the soil and water assessment tool[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(1): 209-221.
- [9] FAYBISHENKO B. Fuzzy-probabilistic calculations of water-

- balance uncertainty[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(6): 939-952.
- [10] CHUTIA R. Environmental risk modelling under probability-normal interval-valued fuzzy number[J]. Fuzzy Information and Engineering, 2013, 5(3): 359-371.
- [11] FENG Li-hua, LUO Gao-yuan. Practical study on the fuzzy risk of flood disasters[J]. Acta Applicandae Mathematicae, 2009, 106(3): 421-432.
- [12] 周伟,袁春,李江风. 基于GIS的地质灾害预测:以清江流域为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(4): 77-82. ZHOU Wei, YUAN Chun, LI Jiang-feng. Forecasting of geological hazard based on GIS: a case study of Qingjiang River valley[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(4): 77-82. (in Chinese)
- [13] 骈龙江. 寒区岩土工程冻融灾害机理及预报模型研究[D]. 西安:西安科技大学, 2006. PIAN Long-jiang. Study on mechanics and forecast model of geotechnical engineering freezing-melting hazard in cold region[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] 刘保国,沈铭龙,马强. 模糊网络分析法在公路山岭隧道施工风险分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 2861-2869. LIU Bao-guo, SHEN Ming-long, MA Qiang. Application of fuzzy analytic network process in risk analysis for construction of highway mountain tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2861-2869. (in Chinese)
- [15] 李颜. 路基冻土病害地质雷达探测 ARMA 功率谱识别算法研究及应用[D]. 长沙:中南大学, 2009. LI Yan. Studies and applies on geology radar detection ARMA power spectrum identification algorithm for roadbed frozen ground disease[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [16] PELLEGRINO O. Road context evaluated by means of fuzzy interval[J]. Cognition Technology and Work, 2011, 13(1): 67-79.
- [17] FAYBISHENKO B. Fuzzy-probabilistic calculations of water-balance uncertainty[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(6): 939-952.
- [18] KAUFMANN A, GUPTA M M. Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications[J]. Harvard Law Review, 1991, 43(43): 2744-2751.
- [19] 阳林,郝艳捧,李立涅,等. 架空输电线路覆冰状态评估模糊专家系统[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3028-3035. YANG Lin, HAO Yan-peng, LI Li-cheng, et al. Fuzzy expert system for condition assessment of overhead transmission line icing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3028-3035. (in Chinese)
- [20] 穆彦虎,马巍,牛富俊,等. 多年冻土区道路工程病害类型及特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 259-267. MU Yan-hu, MA Wei, NIU Fu-jun, et al. Study on geotechnical hazards to roadway engineering in permafrost regions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3): 259-267. (in Chinese)
- [21] 边疆,寇丽娜,绽蓓蕾. 青藏高原多年冻土区冻害类型及防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 129-133. BIAN Jiang, KOU Li-na, ZHAN Bei-lei. The classification of frozen hazards and protecting approach of permafrost region in Tibetan Plateau permafrost region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 129-133. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 银英姿. 内蒙古季节冻土区地基土冻胀性研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(9): 3840-3841, 3847. YIN Ying-zi. Study on the froze-expand performance of the soil in construction ground in seasonal frost region of Inner Mongolia[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(9): 3840-3841, 3847. (in Chinese)
- [24] 郑波,张建明,马小杰,等. 高温、高含冰量冻土压缩变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3063-3069. ZHENG Bo, ZHANG Jian-ming, MA Xiao-jie, et al. Study on compression deformation of warm and ice-enriched frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3063-3069. (in Chinese)
- [25] 钟敏辉,王少斌. 季节性冻土路基冻胀性分析及治理措施[J]. 铁道建筑, 2009(4): 96-98. ZHONG Min-hui, WANG Shao-bin. The seasonal frozen subgrade frost heave analysis and control measures[J]. Railway Engineering, 2009(4): 96-98. (in Chinese)
- [26] NELSON F E, ANISIMOV O A, SHIKLOMANOV N I. Climate change and hazard zonation in the Circum-Arctic permafrost regions[J]. Natural Hazards, 2002, 26(3): 203-225.
- [27] 程国栋. 大比例尺多年冻土含冰量图的编制原则[J]. 冰川冻土, 1981, 3(3): 53-57. CHENG Guo-dong. Principle of compiling ice content maps at large scales[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(3): 53-57. (in Chinese)