

# 突变级数法在多年冻土区公路路基稳定性评价中的应用

——以G213国道祁连段为例

李华坦, 白建科, 王雁鹤, 庞文龙, 王 鹏, 徐马强, 张 震, 周 霖

中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁

收稿日期: 2022年6月10日; 录用日期: 2022年6月20日; 发布日期: 2022年6月29日

## 摘 要

多年冻土区公路路基稳定性问题一直是理论和实践研究的热点, 本文拟采用突变级数法对青海省G213国道祁连段公路路基稳定性进行评价。依据39组土工试验数据, 从黏聚力、内摩擦角、压缩系数、天然密度、孔隙比、含水率、渗透系数等7个底层控制指标出发, 综合考虑各控制指标对岩土体工程地质性质的影响。结果显示, 突变级数的大小可以表示岩土体的工程性质等级, 岩土体的力学性质、物理性质和渗透系数对岩土体工程性质敏感程度不同, 岩土体的力学性质和物理性质对岩土体的工程性质影响较大, 渗透系数影响较小。

## 关键词

突变级数法, 工程地质, 多年冻土区, G213国道

# Application of Catastrophe Progression Method in the Stability Evaluation of Subgrade in Permafrost Area

—A Case Study of G213 National Highway in Qilian, Qinghai Province

Huatan Li, Jianke Bai, Yanhe Wang, Wenlong Pang, Peng Wang, Maqiang Xu, Zhen Zhang, Lin Zhou

Xining Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Xining Qinghai

Received: Jun. 10<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2022

文章引用: 李华坦, 白建科, 王雁鹤, 庞文龙, 王鹏, 徐马强, 张震, 周霖. 突变级数法在多年冻土区公路路基稳定性评价中的应用[J]. 土木工程, 2022, 11(6): 835-842. DOI: 10.12677/hjce.2022.116090

## Abstract

The stability of highway subgrade in permafrost areas has always been a hot topic of theoretical and practical research. In this paper, the catastrophe progression method is proposed to evaluate the subgrade stability of the G213 National Highway in Qilian, Qinghai Province. Based on 39 sets of geotechnical test data, starting from 7 bottom control indexes such as cohesion, internal friction angle, compressibility, natural density, void ratio, water content, and permeability coefficient, we comprehensively consider the impact of each control index on the geotechnical properties of geotechnical engineering. The results show that the catastrophe progression method can represent the engineering property level. The mechanical properties, physical properties, and permeability coefficient of soil mass are sensitive to different grades of engineering properties of soil mass. The mechanical properties and physical properties of soil have a great influence on its engineering property grade, while the permeability coefficient has little influence.

## Keywords

Catastrophe Progression Method, Engineering Geology, Permafrost Area, G213 National Highway

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冻土区一般指地球上岩土体温度在  $0^{\circ}\text{C}$  以下, 含有冰或不含冰的地区、地带。依据冻土存在时间长短, 冻土分为短时冻土、季节冻土和多年冻土[1] [2]。由于多年冻土具有复杂多变性, 影响其特性的因素较多, 国内外学者多从冻土环境特征、冻土工程地质特征等方面进行评价。国外多利用多年冻土区环境-复杂空间函数热动力模型评价集冻土热稳定性和地面敏感性[3] [4] [5]。国内学者杨永鹏等[6]在分析大兴安岭地区多年冻土分布特征及冻土工程地质特点的基础上, 对土体的冻胀和融沉导致的建筑物基础的危害进行研究。牛富俊等[7]对青藏铁路北麓河试验段进行工程地质评价, 实验结果表明该试验段综合评价为不良和极差冻土工程地质地段。李永强等[8]结合青藏铁路沿线多年冻土区的 15 个地形地貌分区, 在青藏铁路多年冻土区选择了 70 个典型断面进行了地质勘查, 研究了各区的工程地质特征并对其工程地质类型进行了评价。张波等[9]从分析影响冻土工程地质条件特征的两大因素(冻土热稳定性和自然环境条件)出发, 采用突变级数法建立了可量化的冻土工程地质评价模型并划定评价等级。

本文引入突变级数法对国道 G213 祁连段工程地质条件进行评价研究。上世纪 60 年代中期开始, 以 R. Thom 的工作为先导, 逐步形成了现在称为突变理论(也译为灾变理论)的一些数学内容。突变理论以系统势函数为研究对象, 运用稳定性理论、奇点理论等数学理论研究系统势函数的突变波形和分叉集, 确定系统所属状态。对判别对象进行评价时, 首先进行多层次的主次矛盾分级, 然后由总评价指标到下层评价指标进行逐层分解, 直到实验结果为可以计量的定量指标为止。发展这种理论的目的是为了对一个光滑系统中可能出现的突然变化做出适当的、主要是定性的数学描述[10] [11]。同时依据指标的补偿性, 以“互补”或非互补的方式获得其突变级数。

突变级数多层次分析法最大的区别是没有对指标进行人为权重划分, 但权衡了各评价指标的相对重

要性, 定性与定量结合, 从而减少一般模糊评价方法的主观性, 方法简易准确, 又不失科学性和合理性, 在生态环境、金属工业等领域已取得了很好的应用[12] [13]。

## 2. 突变级数评价法的基本原理

### 2.1. 评价指标的无量纲化

底层指标不同的取值范围及量纲阻碍了指标的量化比较, 因此需对其进行无量纲化处理, 使其转变为分布在[0, 1]之间的无量纲可比较数据。依据指标大小对系统作用的影响可将底层指标分为正向指标(指标越大越好)与反向指标(指标越小越好)。正、反向指标的无量纲化处理可分别按以下两式完成[14] [15]。

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

$$x''_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中:  $x_i$  为评价指标的第  $i$  个初始值;  $x'_i$ 、 $x''_i$  分别为正向、反向评价指标的标准化值, 也称隶属度值;  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  为评价指标的最大值和最小值。

### 2.2. 归一公式即突变级数的推导

假设突变系统的势函数为  $f(x)$ , 对该势函数进行一阶求导得到  $f'(x)$ , 令  $f'(x)=0$ , 即可得到有临界点组成平衡曲面; 对  $f(x)$  进行二阶求导, 并令  $f''(x)=0$ , 即可得到奇点集方程。联立  $f'(x)=0$  和  $f''(x)=0$ , 即可得到分歧方程。当各控制变量满足分歧点集方程时, 系统就会发生突变。通过分解形式的分歧方程即可导出对应突变模型的归一化公式。

### 2.3. 突变级数的计算

首先根据控制变量和评价对象之间的联系, 利用归一化公式将控制变量进行无量纲化处理, 而后依据控制指标层控制变量的数目, 选定相对应的突变模型。当各层控制变量之间不可相互替代, 即不可相互弥补不足, 满足非互补原则, 按“大中取小”的标准取值; 当各系统控制变量指标之间有前提条件就可以相互补充其时, 满足互补原则, 按“平均值”的标准, 最终向上逐层计算得到评价对象的突变级数[16]。

## 3. 研究区概况及突变级数的应用

G213 国道是在中国西北、西南地区的一条国道, 经过内蒙古、甘肃、青海、四川、云南 5 个省份, 其中青海省祁连段长度为 333.4 公里。行政区划位于青海省海西蒙古族藏族自治州及海北藏族自治州管辖, 其中北部为祁连县、南部为天峻县及刚察县, 位于青海湖西北部、柴达木盆地东缘。最高海拔 5076 m, 最低海拔 2356 m, 相对高差近 2700 m, 平均海拔 4000 m 以上。

取样点选沿 G213 国道两侧路基土等间距取样, 取样点位见图 1, 取样深度和取样方法标准依据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001), 实验标准按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)。根据实验数据结果总计得到 39 组有效数据, 由于数据量较大, 文中仅列出前 20 组数据(如下表 1)。

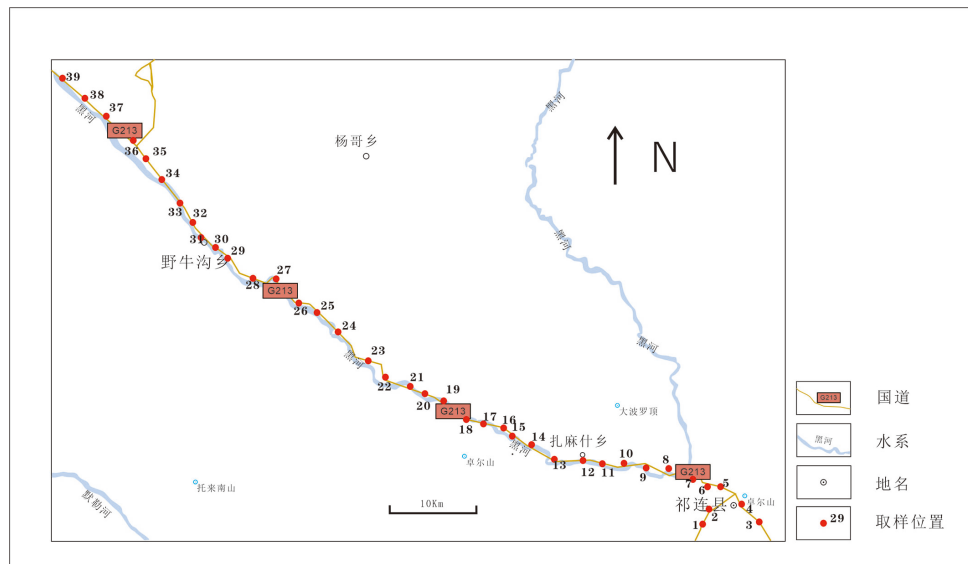
### 3.1. 评价指标的选定

根据突变级数法的评判要求对各指标的分解, 本文将影响路基工程地质特征评价的控制变量分为三个层次土的物理性质指标、土的力学性质指标和土的渗透性指标。土的力学性质指标为: 黏聚力  $c$ 、内

摩擦角  $\varphi$  和压缩系数  $E_s$ ；土的物理性质指标包括：密度  $\rho$ 、孔隙比  $e$ 、含水率  $w$ ；渗透系数  $K_{20}$ 。结合突变级数法的评价体系要求，最终冻土工程地质评价模型如图 2 所示。

**Table 1.** Summary of geotechnical test data and results  
**表 1.** 土工试验数据结果汇总

序号	$w$ %	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$e$	$E_s$ MPa	$C$ kPa	$\varphi$	$K_{20}$ cm/s	定名
1	23.9	1.54	1.172	2.44	7.40	23.6	$1.16 \times 10^{-4}$	粉土
2	9.9	1.38	1.15	6.94	24.3	27.6	$5.12 \times 10^{-4}$	粉土
3	23.3	1.28	1.62	1.70	20.6	27.0	$2.26 \times 10^{-3}$	粉质黏土
4	21.2	1.49	1.196	2.36	17.6	25.1	$4.36 \times 10^{-4}$	粉土
5	21.8	1.51	1.186	3.58	15.6	26.2	$6.99 \times 10^{-4}$	中砂
6	11.3	1.44	1.071	3.5	4.6	31.2	$6.47 \times 10^{-4}$	粉砂
7	9.2	1.39	1.105	3.03	11.7	31.4	$1.16 \times 10^{-3}$	粉砂
8	11.3	1.31	1.294	2.70	25.2	25.9	$4.56 \times 10^{-4}$	粉土
9	15.4	1.44	1.148	2.28	9.5	30.9	$9.90 \times 10^{-4}$	粉砂
10	17.0	1.37	1.306	6.55	4.2	29.2	$7.56 \times 10^{-4}$	粉土
11	16.4	1.35	1.319	3.92	18.4	31.3	$1.12 \times 10^{-3}$	粉砂
12	18.4	1.18	1.709	2.00	6.6	28.3	$8.30 \times 10^{-4}$	粉土
13	12.8	1.78	0.705	5.75	10	32.1	$3.50 \times 10^{-4}$	砾砂
14	30.8	1.66	1.12	2.29	4.3	30.4	$2.28 \times 10^{-4}$	砾砂
15	16.4	1.39	1.244	5.00	4.9	32.9	$8.86 \times 10^{-4}$	砾砂
16	13.8	1.26	1.421	2.12	22.9	28.5	$1.32 \times 10^{-3}$	粉砂
17	9.4	1.23	1.393	3.86	7.0	28.7	$7.01 \times 10^{-4}$	粉砂
18	19.4	1.28	1.509	1.83	5.2	29.8	$2.12 \times 10^{-4}$	粉砂
19	18.2	1.27	1.513	1.71	11.8	28.9	$6.51 \times 10^{-4}$	粉砂
20	17.0	1.51	1.084	3.36	17.1	27.0	$1.68 \times 10^{-4}$	粉砂



**Figure 1.** Distribution of sampling points  
**图 1.** 取样点位分布图

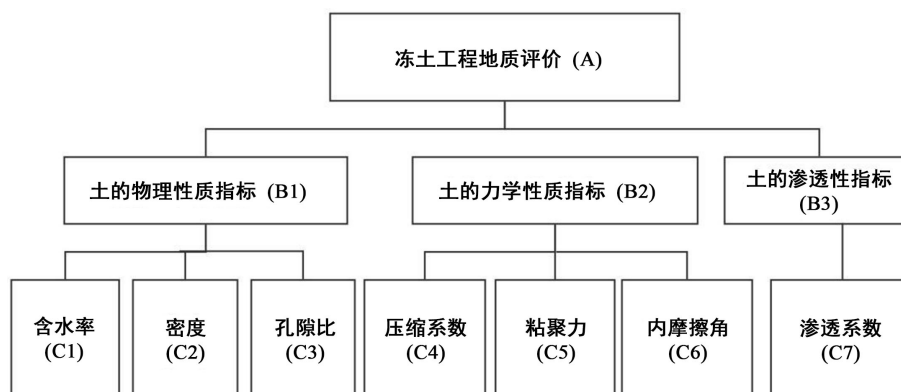


Figure 2. Index system of frozen soil geological evaluation model

图 2. 冻土工程地质评价模型指标体系

首先需对各底层指标做无量纲化处理, 以使得各指标具备相同的评价水平。依据评价指标对于块体的作用关系分为正向指标与反向指标, 认为正向指标越大则对路基稳定性贡献越大, 反向指标则相反。对于定量指标含水率  $w$  (C1)、孔隙比  $e$  (C3) 和渗透系数  $K_{20}$  (C7), 指标越大对路基稳定性影响越不利, 故采用式(2)无量纲化处理; 密度  $\rho$  (C2)、压缩系数  $E_s$  (C4)、黏聚力  $c$  (C4) 和内摩擦角  $\varphi$  (C5) 指标越大对路基稳定性贡献越大, 故采用式(1)无量纲化处理, 结果见表 2。

Table 2. Dimensionless treatment results of bottom index

表 2. 底层指标无量纲化处理结果

编号	无量纲化						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
1	0.279	0.607	0.535	0.106	0.114	0.295	0.000
2	0.748	0.344	0.557	0.543	0.718	0.598	0.123
3	0.299	0.180	0.089	0.034	0.586	0.553	0.667
4	0.369	0.525	0.511	0.098	0.479	0.409	0.100
5	0.349	0.557	0.521	0.217	0.407	0.492	0.181
6	0.701	0.443	0.635	0.209	0.014	0.871	0.165
7	0.772	0.361	0.602	0.163	0.268	0.886	0.325
8	0.701	0.230	0.413	0.131	0.750	0.470	0.106
9	0.564	0.443	0.559	0.090	0.189	0.848	0.272
10	0.510	0.328	0.401	0.505	0.000	0.720	0.199
11	0.530	0.295	0.388	0.250	0.507	0.879	0.312
12	0.463	0.016	0.000	0.063	0.086	0.652	0.222
13	0.651	1.000	1.000	0.428	0.207	0.939	0.073
14	0.047	0.803	0.587	0.091	0.004	0.811	0.035
15	0.530	0.361	0.463	0.355	0.025	1.000	0.240
16	0.617	0.148	0.287	0.075	0.668	0.667	0.375
17	0.765	0.098	0.315	0.244	0.100	0.682	0.182
18	0.430	0.180	0.199	0.047	0.036	0.765	0.030
19	0.470	0.164	0.195	0.035	0.271	0.697	0.166
20	0.510	0.557	0.623	0.195	0.461	0.553	0.016

### 3.2. 突变级数的计算

依据图2所建立的突变评价模型，C1、C2与C3构成燕尾突变模型，C4、C5与C6构成燕尾突变模型，C7折迭突变，B1、B2与B3构成燕尾突变模型，然后综合评价边坡稳定状态A，以编号1土样为例对该过程进行说明。

对C1、C2、C3有：

$x_{c1} = (0.279)^{1/2} = 0.528$ ， $x_{c2} = (0.607)^{1/3} = 0.846$ ， $x_{c3} = (0.535)^{1/4} = 0.855$ ，含水率、密度和孔隙比三组数据直接可以通过相关公式计算得到，按照“互补”原则计算上层数据，得到

$$B_1 = (0.528 + 0.846 + 0.855) / 3 = 0.743。$$

同理，对C4、C5、C6有：

$x_{c4} = (0.106)^{1/2} = 0.325$ ， $x_{c5} = (0.114)^{1/3} = 0.485$ ， $x_{c6} = (0.295)^{1/4} = 0.737$ ，压缩模量、黏聚力和内摩擦角三组数据，按照“互补”原则计算上层数据，得到： $B_2 = (0.325 + 0.485 + 0.737) / 3 = 0.516$ 。

对渗透系数C7构成折迭突变，依据归一化公式可求得 $B_3 = x_{c7} = (0)^{1/2} = 0$ 。

同样对B1、B2、B3采用归一化公式的蝴蝶突变，经计算可得， $x_{B1} = (0.743)^{1/2} = 0.862$ ， $x_{B2} = (0.516)^{1/3} = 0.802$ ， $x_{B3} = (0)^{1/4} = 0$ ，依据“互补”原则，可求得 $A = (0.862 + 0.802 + 0) / 3 = 0.555$ 。同理可以计算出其他取样点的总突变级数，数据汇总见表3。

Table 3. Total catastrophe level of frozen soil engineering geological model

表3. 冻土工程地质评价模型总突变级数表

编号	总突变级数	编号	总突变级数	编号	总突变级数	编号	总突变级数
1	0.555	11	0.876	21	0.732	31	0.901
2	0.871	12	0.732	22	0.817	32	0.810
3	0.850	13	0.865	23	0.849	33	0.885
4	0.825	14	0.752	24	0.776	34	0.860
5	0.852	15	0.854	25	0.814	35	0.876
6	0.844	16	0.864	26	0.845	36	0.860
7	0.884	17	0.832	27	0.838	37	0.831
8	0.836	18	0.743	28	0.869	38	0.806
9	0.863	19	0.810	29	0.806	39	0.921
10	0.830	20	0.794	30	0.767		

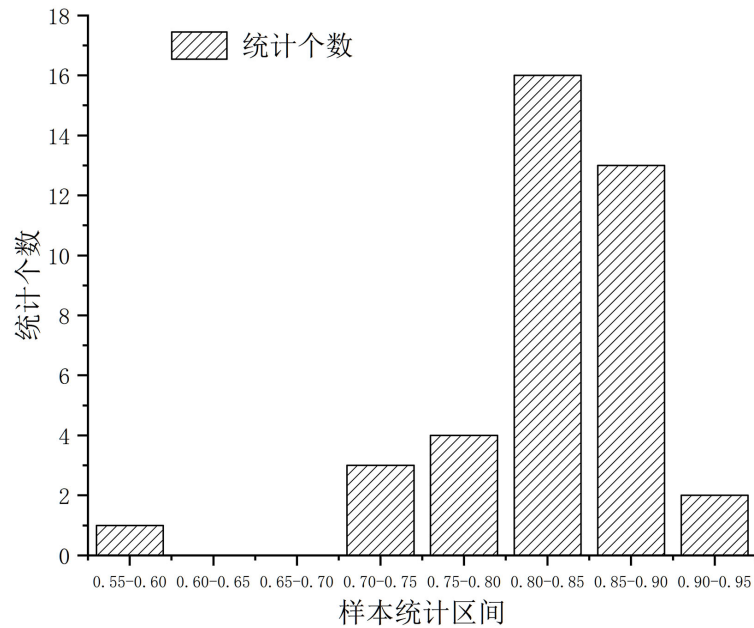
### 3.3. 结果分析

土工实验结果显示，粉砂为15组试样、粉土为15组试样，粉质黏土为2组，砾砂为3组，中砂为3组，细砂为1组试样。其中，粉砂和粉土总计30个，占比分别为38.5%，说明G213国道两侧路基土体以粉土和粉砂为主。

突变级数表中数据显示，最大值为0.921，最小值为0.555，平均值为0.826，按照0.05区间间隔总计分为8个，对总突变级数进行统计，即0.55~0.60、0.60~0.65……0.90~0.95。统计见下图3。

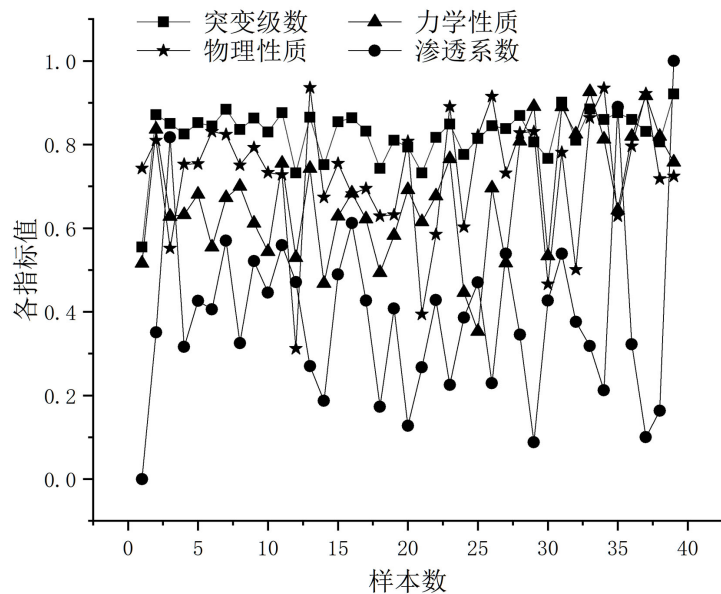
其中，0.80~0.85区间内数量为16个，0.85~0.90数量个数为13个，总计29个，占比为74.4%，与土工实验结果相一致。另外统计粉土、粉砂的黏聚力和内摩擦角，其平均值分别为16.5 Kpa和28.3，压缩模量为28.02 Mpa。





**Figure 3.** Interval statistics of total catastrophe series of frozen soil sampling points  
**图 3.** 冻土取样点总突变级数区间统计图

冻土突变级数和控制指标关系如图 4，突变级数计算结果曲线和物理性质、力学性质以及渗透系数的变化趋势基本一致，突变级数的大小可以表示岩土体的工程性质等级。文中对各控制变量与突变级数的关系进行了相关性计算，计算结果表明，相关性大小依次为力学性质、物理性质、渗透系数。因此，得出如下结论：岩土体各控制变量对岩土体工程性质敏感程度不同，根据本次实验采样土工试验来说，岩土体的力学性质和物理性质对岩土体的工程性质影响较大，渗透系数影响较小。



**Figure 4.** Relationship between catastrophe progression and control index of frozen soil

**图 4.** 冻土突变级数和控制指标关系

## 4. 结论

1) 本文引入了一种多年冻土区公路路基稳定性评判方法——突变级数法, 该方法由模糊数学引出, 避开了对指标采用“权重”的主观性, 又权衡了各评判指标的相对重要性, 从岩土体力学性质、物理性质和渗透性三个方面出发, 以黏聚力、内摩擦角、压缩系数、密度、含水率、孔隙比、渗透系数 6 个控制性定量指标为出发点, 由归一化公式对目标进行无量纲化处理, 较为综合地反映了各类因素对岩土体工程地质的特性评价, 减少了人为赋值的干扰。

2) 突变级数的大小可以表示岩土体的工程性质等级, 岩土体各控制变量对岩土体工程性质敏感程度不同, 岩土体的力学性质和物理性质对岩土体的工程性质影响较大, 对其渗透系数影响较小, 突变级数法的岩土体工程地质评价方法结果准确, 具有广泛的使用前景和良好的实用价值。

## 基金项目

中国地质调查局地质调查项目“青海省冰川冻土冻融灾害调查”(DD20211570)。

## 参考文献

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 金会军, 王绍令, 俞祁浩, 等. 青藏工程走廊冻土环境工程地质区划及评价[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 66-71.
- [3] Harris, C. (1983) Comparison of the Climate and Geomorphic Method of Predicting Permafrost Distribution in West Yukon Territory. *Proceeding of the 4th International Conference on Permafrost*, 450-455.
- [4] Ye, G.S. (1983) Theoretical Questions in Modeling Cryogenic Landscape. *Proceeding of the 4th International Conference on Permafrost*, 315-319.
- [5] Wu, Q.B., Zhu, Y.L. and Liu, Y.Z. (2002) Evaluation Model of Permafrost Thermal Stability and Thawing Sensibility under Engineering Activity. *Cold regions Science and Technology*, **34**, 19-30.  
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00047-7)
- [6] 杨永鹏, 程东幸, 伏慧霞. 东北大兴安岭多年冻土区工程地质特征及评价[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 657-662.
- [7] 牛富俊, 张建国, 张钊. 青藏铁路北麓河试验段冻土工程地质特征及评价[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 264-269.
- [8] 李永强, 韩利民. 青藏铁路多年冻土工程地质特征及其评价[J]. 工程地质学报, 2008(2): 245-249.
- [9] 张波, 盛煜, 陈继, 李静. 祁连山柴木铁路沿线多年冻土区工程地质特征及评价[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 381-387.
- [10] 凌复华. 突变理论——历史、现状和展望[J]. 力学进展, 1984, 14(4): 389-404.
- [11] 凌复华. 突变理论及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987: 123-130.
- [12] 陈云峰, 孙殿义, 陆根法. 突变级数法在生态适宜度评价中的应用——以镇江新区为例[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2587-2593.
- [13] 潘岳. 铝电解-阳极效应过程的蝴蝶突变模型[J]. 金属学报, 1990, 26(5): 86-91.
- [14] 肖明. 地下洞室隐式锚杆柱单元的三维弹塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 19-26.
- [15] 杜崧, 肖明, 陈俊涛. 洞室块体危险性分析的突变级数评价法研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2578-2588.
- [16] 梁桂兰, 等. 突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1895-1899.