

DOI:10.11784/tdxbz202506026

# 重载列车提速下弱膨胀土铁路路基状态监测及安全评价案例分析

雷华阳<sup>1,2,3,4</sup>, 郝秦禹<sup>1</sup>, 冯双喜<sup>1,3,4</sup>, 颜志雄<sup>5</sup>, 车百林<sup>6</sup>

1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004;
3. 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350;
4. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350;
5. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100000;
6. 中国铁路武汉局集团有限公司, 武汉 430000)

**摘要:** 随着中国国家综合立体交通网建设加速推进, 列车重载和提速已经成为发展的必然趋势, 但重载列车提速下弱膨胀土铁路路基往往出现病害增多且整修频率增大的问题. 本文以某重载铁路路基病害防治工程为例, 选取了具有代表性的弱膨胀土路基病害路段 K506 和 K548, 开展了沉降、水平位移、土压力和加速度的现场监测, 分析了各监测指标的变化规律; 利用层次分析法(AHP)和反向传播(BP)神经网络建立了弱膨胀土路基安全评价模型, 系统评价了重载列车提速下既有线弱膨胀土铁路路基病害等级. 研究表明, 针对沉降变形, K506、K548 断面均呈现出蠕变变形、稳定变形和加速变形 3 阶段演化特征: 在蠕变变形阶段, 沉降变形呈现增长缓慢但持续加剧的趋势; 进入稳定变形阶段后, K506 和 K548 断面处沉降量分别保持  $8.57 \times 10^{-2}$  mm/d 和  $5.00 \times 10^{-2}$  mm/d 的恒定沉降速率进行增长; 在加速变形阶段, 沉降量骤增, 两断面平均沉降增长速率均突增. 对于水平位移, K506 断面演化规律与沉降变化规律类似, 同样呈现出 3 阶段演化特征, 但 K548 断面水平位移并没有呈现 3 阶段发展趋势, 而是随着时间的延长呈现出先增大后稳定的发展趋势. 土压力值前期增长速度快, 列车动载效应沿路基横断面呈径向衰减趋势. 对于路基振动加速度值, 两断面在监测 150 d 时的加速度值均远大于监测 30 d 时的对应值. 基于 AHP, 构建重载列车提速下的弱膨胀土铁路路基安全评价指标体系, 确定了 4 个准则层 1 级指标和 20 个 2 级指标, 其中列车荷载与降雨强度权重最大且均为 0.113 90, 排水有效性权重最小为 0.008 00. 结合 BP 神经网络方法预测了 K506 和 K548 的路基病害等级均为较严重, 与专家评价结果保持一致, 证明该方法可应用于弱膨胀土铁路路基安全评价.

**关键词:** 重载列车提速; 安全评价; 现场监测; 弱膨胀土; 反向传播神经网络; 重载铁路

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)04-0408-11

## Case Study on Condition Monitoring and Safety Evaluation of Weakly Expansive Soil Railway Subgrade Under Speed Increase of Heavy-Haul Train

Lei Huayang<sup>1,2,3,4</sup>, Hao Qinyu<sup>1</sup>, Feng Shuangxi<sup>1,3,4</sup>, Yan Zhixiong<sup>5</sup>, Che Bailin<sup>6</sup>

1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;
3. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience, China Earthquake Administration, Tianjin 300350, China; 4. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin 300350, China; 5. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100000, China; 6. China Railway Wuhan Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

收稿日期: 2025-06-12; 修回日期: 2025-09-06.

作者简介: 雷华阳(1974—), 女, 博士, 教授, leihuayang74@163.com.

通信作者: 冯双喜, shuangxi@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378363); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023G008).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52378363), the Science and Technology Research and Development Program of China State Railway Group Co., Ltd.(No. N2023G008).

**Abstract:** With the accelerated advancement of the construction of national comprehensive multi-dimensional transportation network in China, the heavy haul and speed increase of trains have become an inevitable development trend. However, under the speed increase of heavy-haul trains, the weakly expansive soil railway subgrades often face problems such as a growing number of diseases and a higher frequency of repairs. In this paper, a certain heavy-haul railway subgrade disease prevention and control project was taken as an example. The representative weakly expansive soil subgrade disease sections K506 and K548 were selected, the on-site monitoring of vertical settlement, horizontal displacement, soil pressure and acceleration was conducted, and the variation laws of each monitoring index were analyzed. By using the analytic hierarchy process (AHP) and back propagation (BP) neural network, a safety evaluation model for weakly expansive soil subgrades was established, which systematically evaluated the disease grades of existing weakly expansive soil railway subgrades under the speed increase of heavy-haul trains. Results show that regarding the settlement deformation, both sections exhibited three-stage (i.e., creeping deformation, stable deformation and accelerated deformation) evolution characteristics. At the creeping deformation stage, the settlement deformation showed a trend of slow growth but continuous intensification. At the stable deformation stage, the settlements for sections K506 and K548 increased at constant settlement growth rates of  $8.57 \times 10^{-2}$  mm/d and  $5.00 \times 10^{-2}$  mm/d, respectively. At the accelerated deformation stage, the settlement increased sharply, and the average settlement growth rates for both sections suddenly rose. As for the horizontal displacement, the evolution law was similar to that of settlement for section K506, showing three-stage evolution characteristics. However, the horizontal displacement for section K548 did not show the three-stage development trend; instead, it showed a trend of first increasing and then stabilizing with the passage of time. The value of soil pressure grew rapidly at the early stage, and the dynamic load effect of trains showed a radial attenuation trend along the subgrade cross-section. As for the subgrade vibration acceleration, the corresponding values for both sections at the end of 150 days of monitoring were much larger than those at the end of 30 days of monitoring. Based on AHP, a safety evaluation index system for weakly expansive soil railway subgrades under the speed increase of heavy-haul trains was constructed, with 4 first-level indexes in the criterion layer and 20 second-level ones. It was found that both the train load and rainfall intensity had the largest weights, i.e., 0.113 90, while the drainage effectiveness had the smallest weight of 0.008 00. Combined with the BP neural network method, it was predicted that the subgrade disease grades of sections K506 and K548 were both relatively serious. The prediction results were consistent with the expert evaluation results, indicating that the proposed method can be applied to the safety evaluation of weakly expansive soft soil railway subgrades.

**Keywords:** speed increase of heavy-haul train; safety evaluation; on-site monitoring; weakly expansive soil; back propagation (BP) neural network; heavy-haul railway

在“交通强国”战略推动下,中国国家综合立体交通网建设加速推进,货运量年均增长 2%,铁路运输技术参数显著提升,列车轴重由 21 t 增至 30 t,运行速度由 70 km/h 提升至 90 km/h<sup>[1]</sup>. 然而,在湖北、湖南等地区,广泛分布着具有显著胀缩性、裂隙发育以及低强度等不良工程特性的弱膨胀土<sup>[2-3]</sup>. 大量的工程实践表明,将这类弱膨胀土作为路基填料时,在重载列车提速运行的情况下路基病害问题屡见不鲜,如翻浆冒泥、填方边坡溜坍、路基本体沉降以及涵洞过渡段差异沉降等<sup>[4]</sup>,其中在个别区段差异沉降甚至达到了 10 cm. 这些病害导致轨道几何形位偏移严重,列车晃车现象频发,轨道整修频率相应大幅增加,严重威胁到铁路运输安全性. 目前,在既有线弱

膨胀土路基状态监测以及系统的安全评价体系方面存在明显不足,病害的发现与治理工作存在明显的滞后性. 因此,亟需开展在重载提速条件下弱膨胀土路基的动力响应分析,建立完善的安全评价体系,为保障铁路运营安全提供理论依据.

许多学者针对既有线铁路路基状态(沉降、水平位移、土压力、加速度等)开展了监测研究. 王定顺等<sup>[5]</sup>通过在既有线铁路路基现场布设测斜仪和沉降板监测路基的水平位移和沉降变形,探究了高压旋喷桩施工对既有铁路路基变形影响规律,研究发现应力释放孔和高压旋喷桩施工时可导致既有线路基上拱或沉降,既有线路基监测点最大累计上拱量为 5.95 mm,最大累计沉降量为 7.13 mm. 律文田等<sup>[6]</sup>对

秦沈铁路客运专线路桥过渡段路基进行了动应力的原位测试, 研究表明: 沿路桥过渡段线路纵向分布的动应力幅值随列车运行速度的增大呈现不同幅度的增加, 且动应力随路基深度的增加衰减较快. 高广运等<sup>[7]</sup>、陈兆玮等<sup>[8]</sup>、聂志红等<sup>[9]</sup>对秦沈客运专线路基不同时速下路基振动加速度进行了现场监测, 认为振动加速度峰值受轮轴荷载的影响大, 基本上呈线性增加趋势, 而列车长度对振动加速度的影响较小. 王子玉等<sup>[10]</sup>针对冻结期、春融期和正常期列车行驶路基振动加速度进行现场监测, 发现路基振动加速度受列车类型、行驶速度、列车编组、列车载重等因素共同影响, 列车重量对加速度幅值影响较明显.

针对铁路路基安全评价研究方面, 江雨欣等<sup>[11]</sup>基于模糊数学理论和层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、熵权法、相关性标准权重法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC), 提出一种适用于高速铁路运营安全评价指标权重确定模型——主客观权重确定模型. 引入格拉布斯(Grubbs)检验与偏好因子, 优化权重确定过程, 可在多个环节降低误差, 提高指标权重评价结果的科学可靠性. 钱王莘等<sup>[12]</sup>以灰色关联分析理论为基础, 建立 2 种关联度模型, 计算各个风险因素对安全评价项目关联度的贡献值, 发现加固范围对高速铁路的安全评价起重要的作用. 潘科等<sup>[13]</sup>以北京地铁某线路为实例, 确定了该线路及其运营子系统的风险等级, 建立了以可拓法为核心的地铁运营安全的多级可拓评价模型, 通过理论分析和实例计算表明, 该方法在地铁运营安全评价中有较好的适用性. 冯运卿等<sup>[14]</sup>从预测和结果两个角度构建了铁路安全综合评价指标体系, 运用熵权法计算了铁路安全评价指标的权重, 并认为人为因素是造成铁路行车事故的主要方面, 铁路事故损失因素占权重最高.

综上所述, 既有线铁路路基在监测分析和安全评价方面已获较多的研究成果, 但大部分学者只集中于单一指标的监测或未将安全评价与现场监测结合起来, 针对重载列车提速下既有线弱膨胀土铁路路基动力响应研究甚少, 且缺乏相应的安全评价方法. 基于此, 本文以重载列车提速下武汉某既有线重载铁路路基防治工程为依托, 选取了具有代表性的弱膨胀土路基病害断面, 开展了沉降、水平位移、土压力和加速度的多参数现场监测, 分析了既有弱膨胀土路基动力响应规律及病害演变规律, 建立了弱膨胀土路基安全评价模型, 首次利用 AHP 和误差反向传播(back propagation, BP)神经网络, 系统评价了既有线弱膨

胀土铁路路基病害安全等级, 为工程决策提供参考.

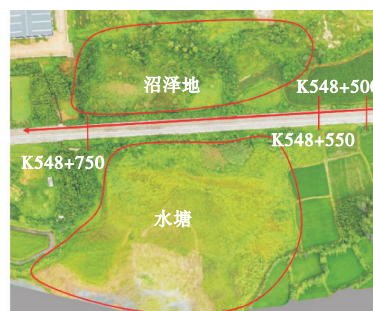
## 1 现场监测

### 1.1 工程概况

本文选取武汉某重载列车线路中典型病害区段 K506 与 K548, 分别表现为边坡溜坍和路基下沉的病害特征, 如图 1 所示. 通过现场勘察发现, K506 路堤边坡为弱膨胀土, 出现路基下沉、围墙下沉开裂及倾倒、路堤边坡失稳变形等病害. 填方边坡坡率较陡, 坡面无防护, 坡脚浆砌片石挡墙砌筑质量差, 在列车荷载及地表水下渗作用下, 坡体软化发生溜坍病害, 导致线路几何尺寸常年变化. K548 路基填料为弱膨胀土, 区段路堤坡脚外分布有水塘, 面积大于 2 000 m<sup>2</sup>, 呈现出路基整体下沉、路肩面倾斜、线路方向变化等病害特征.



(a) K506



(b) K548

图 1 地理位置示意

Fig.1 Schematic of geographical location

### 1.2 现场监测方案

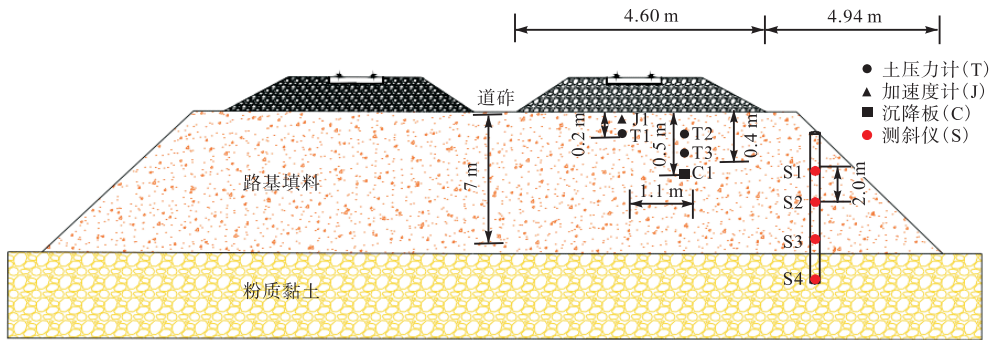
为了更好地掌握重载列车提速下弱膨胀土铁路路基状态, 从 2024 年 3—9 月(共 180 d), 在 K506 和 K548 断面埋置沉降板、测斜仪、土压力计和加速度计共 4 种监测设备, 如图 2(a)所示. 依据《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》<sup>[15]</sup>和工程监测方案, 同一断面埋置 1 块沉降板(路肩深 0.5 m 处)、1 组测斜仪(4 个, 深度分别为 2 m、4 m、6 m 和 8 m)、3

个土压力计(路肩深 0.4 m 处、0.2 m 处,路基中心深 0.2 m 处)、1 个加速度计(路基中心深 0.2 m 处),监测沉降、水平位移、土压力和加速度的动态变化,监

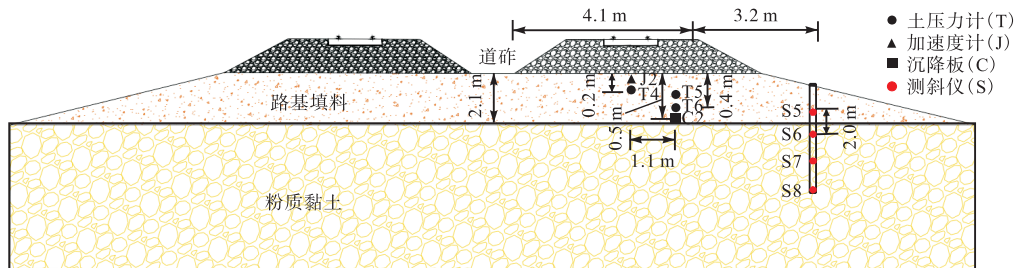
测设备布置方案如图 2(b)与(c)所示,其监测指标与监测实施方案,如表 1 所示。



(a) 监测设备



(b) K506 断面现场监测设备布置



(c) K548 断面现场监测设备布置

图 2 监测设备与布置

Fig.2 Monitoring equipment and layout

表 1 监测指标与监测实施方案

Tab.1 Monitoring indicators and monitoring implementation plans

| 监测指标 | 监测实施方案   |
|------|--|
| 沉降   | 在路肩将沉降板固定,利用水准仪对沉降板进行观测。测量精度达到 $\pm 1 \text{ mm}$ ,基点和附近水准点联测取得初始高程。首次观测对测点进行连续两次观测,取平均值作为初始值,监测频率为 1 次/d。   |
| 水平位移 | 在路基边坡 1/3 位置处设置 1 组测斜仪,偏差角小于 $2^\circ$ 。测斜管导槽方向与设计要求定准方向一致。将组装好的 CK-QXY600-30 型固定测斜仪插入埋好的测斜管中并封口,采用 CK-CTY2032 型自动采集仪进行监测,监测频率为 1 次/h,监测时间为 6 个月。            |
| 土压力  | 采用 CK-TJ22 型土压力计(量程:6 MPa,工作温度: $-20^\circ \sim 70^\circ$ ,系统总精度:小于等于满量程的 1%),利用 PVC 管引线,沿着铁路路基纵向布置长度为 10 m。利用 CK-CTY2032 型自动采集仪进行监测,监测频率为 1 次/h,监测时间为 6 个月。 |
| 加速度  | 采用 CK-YZJ908 型电压式加速度计(工作电流:0.02 A,工作电压:24 V),采用 PVC 管引线,沿着铁路路基纵向布置长度为 10 m。利用 CK-CTY2037 型动态采集仪对加速度进行监测,监测频率为 10 Hz,每天监测时长为 8 h。                             |

### 1.3 监测结果分析

#### 1.3.1 沉降

图 3 为沉降-时间变化曲线。从图 3 中可以看出,

路基沉降随着时间的延长而增大,K506 断面沉降大于 K548 断面沉降,呈现出蠕变变形(0 ~ 60 d)、稳定变形(61 ~ 130 d)和加速变形(131 ~ 180 d)3 阶段演化

特征. 在蠕变变形阶段, K506 断面平均沉降增长速率达到 0.06 mm/d, K548 断面平均沉降增长速率则为 0.04 mm/d, 沉降变形呈现增长缓慢但持续加剧的趋势. 进入稳定变形阶段后, K506 和 K548 断面处沉降分别保持  $8.57 \times 10^{-2}$  mm/d 和  $5.00 \times 10^{-2}$  mm/d 的恒定沉降增长速率进行增长. 在加速变形阶段, 沉降量骤增, K506 断面平均沉降增长速率突增 70.3%, K548 断面沉降增长速率突增 58.5%, K506 断面和 K548 断面的累计沉降分别为 16.0 mm 和 10.2 mm, 这表明 K506 断面已经发生了边坡溜坍, K548 断面出现了路基下沉病害现象. 之所以产生边坡溜坍, 是因为列车荷载和列车速度增大使得稳定状态的弱膨胀土颗粒间的摩擦力和咬合作用减弱, 土体的抗剪强度降低<sup>[16]</sup>, 导致局部岩土体的稳定性下降, 进而引发边坡溜坍. 之所以产生路基下沉, 是由于列车荷载和列车速度增大导致路基动应力幅值上升, 有效应力增大, 加速孔隙水排出及土体压缩, 路基沉降增大, 进而诱发路基下沉病害.

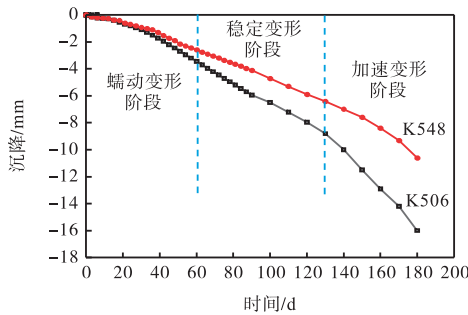


图 3 沉降-时间变化曲线  
Fig.3 Settlement-time curves

### 1.3.2 水平位移

图 4 为水平位移-时间变化曲线. 从图 4 中可以看出, K506 断面水平位移随时间延长而增大, 与沉降变化规律类似, 同样呈现出初始蠕变变形 (0 ~ 60 d)、稳定变形 (61 ~ 130 d) 和加速变形 (131 ~ 180 d) 3 阶段演化特征. K548 断面水平位移并没有呈现 3 阶段发展趋势, 而是随着时间的延长呈现出先增大后稳定的发展趋势. 对于 K506 断面而言, 在初始蠕变变形阶段, 当时间为 60 d 时, 水平位移为 3.5 mm; 在稳定变形阶段, 水平位移与时间近似呈现线性变化规律, 水平位移速率稳定在 0.062 mm/d; 在加速变形阶段, 水平位移最大可达 15.0 mm. 对于 K548 断面而言, 当时间为 60 d 时, 水平位移变化基本稳定, 最大水平位移为 3.1 mm, 水平位移变化较小, 这表明边坡整体稳定性良好. 这是因为 K506 填方边坡较陡, 由于其特殊的几何形状和结构特点, 更

容易受到振动的影响. 振动在边坡内部传播时, 可能会引起边坡土体的局部失稳, 进而导致边坡整体的水平位移增大. K548 断面水平位移并没有呈现 3 阶段发展趋势, 原因是 K548 区段边坡较为平缓, 区域内地形起伏较小 (坡率 1 : 1.4), 基底较为软弱, 病害以沉降为主, 水平位移较为稳定.

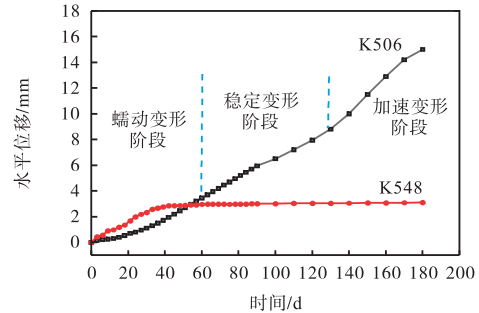


图 4 水平位移-时间变化曲线  
Fig.4 Horizontal displacement-time curves

### 1.3.3 土压力

文中分别在 K506 和 K548 断面路肩侧深 0.2 m 处、0.4 m 处和钢轨中心深 0.2 m 处布置土压力计, 获得土压力值-时间关系曲线, 如图 5 所示. 从图 5 中可以看出, 土压力值变化规律与沉降、水平位移的变化规律关联性强, 均随着时间的延长而增大并趋于稳定. 在监测初期, 土压力计与周边土体耦合, 土压力值增长速度快, 路肩区域土压力值低于路基中心处土压力值. 在监测中后期, 由于病害在竖向位移与水平位移方面的发展, 土压力值呈不稳定状态, 缓慢递增. 由于 K506 断面的填方边坡高度大于 K548 断面的填方边坡高度, K506 断面的土压力值大于 K548 断面的土压力值. 以钢轨中心深度 0.2 m 处为例, K548 断面土压力值为 10.53 kPa, K506 断面土压力值为 10.06 kPa. 之所以 K548 断面土压力值显著高于 K506 断面土压力值, 是因为边坡溜坍引发路基土体应力场重构, 滑动体形成的附加荷载导致主动土压力值增加, 且 K506 断面较大的侧向位移量进一步加剧

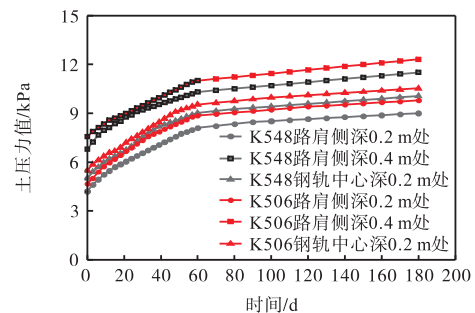


图 5 土压力值-时间变化曲线  
Fig.5 Earth pressure-time curves

了土压力值分布的不均匀性。

#### 1.3.4 加速度

图6展示了K506断面与K548断面在C80型 $2 \times 10^4$ t重载列车满载运行工况下的动态加速度响应特征。从图6中可以看出:K506断面在监测30d时加速度最大值为 $0.55 \text{ m/s}^2$ ,在监测150d时,列车经过时加速度平均值接近 $7.00 \text{ m/s}^2$ ;K548断面在监测

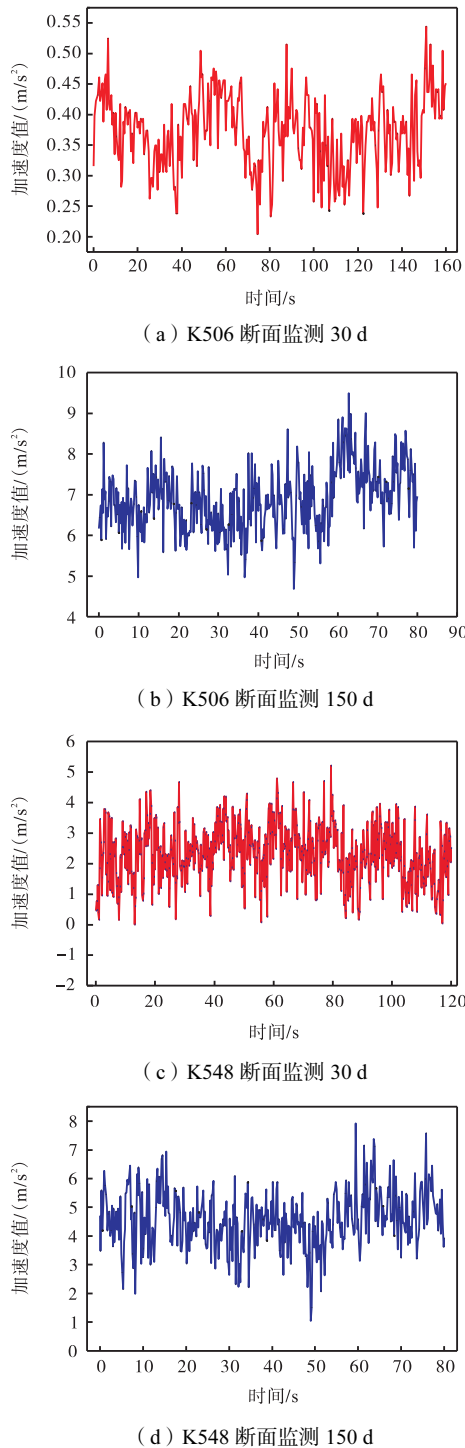


图6 K506和K548断面加速度值动态变化

Fig.6 Dynamic changes in acceleration at sections K506 and K548

30d时加速度最大值为 $5.19 \text{ m/s}^2$ ,平均值接近 $2.50 \text{ m/s}^2$ ,在监测150d时,列车经过时加速度平均值接近 $5.00 \text{ m/s}^2$ 。由于病害的逐渐发展,不均匀变形增加,轨道不平顺加剧,路基刚度增大,重载列车通过时线路与列车的相互作用和振动加剧,路基振动响应增加<sup>[17]</sup>。K506断面在沉降后期加速度平均值与最大值均显著高于K548断面的对应值,其原因为K506断面出现较大水平位移,线路连续性小方向、小垂直高度变化,导致线路在水平方向呈“蛇形”,在竖向方向呈“波浪形”,由于钢轨轨排相对于路基为刚性结构,其下部路基发生不均匀下沉变形时,相对刚性的钢轨轨排不能与路基面同步、等量变形,导致轨排只能在水平和竖向两个方向延展,从而出现连续性小方向、小垂直高度变化,因此K506断面在沉降后期加速度平均值与最大值均显著高于K548断面的对应值。

为评价振动对环境影响的程度或大小,选取振动加速度级(竖向Z振级)来衡量,振动加速度级 $V_{AL,Z}$ (单位:dB)的计算式为

$$V_{AL,Z} = 20 \lg \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为实测或计算的振动加速度有效值, $\text{m/s}^2$ ;  $\alpha_0$ 为基准加速度值, $\alpha_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

图7展示了K506断面与K548断面在C80型 $2 \times 10^4$ t重载列车满载运行工况下的动态振动加速度级特征。从图7中可以看出,K506断面竖向Z振级

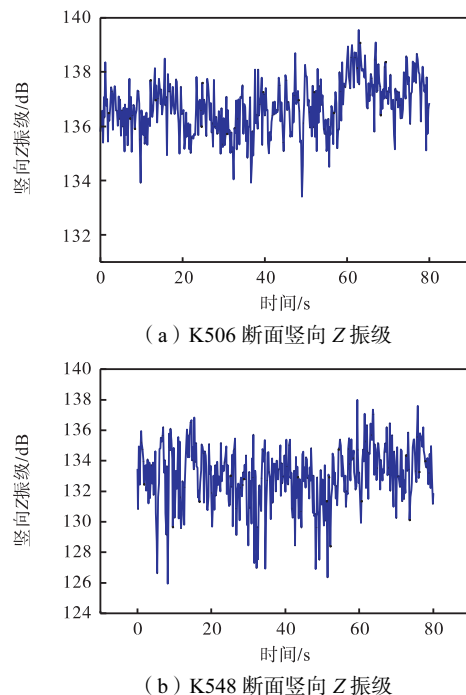


图7 K506和K548断面竖向Z振级动态变化

Fig.7 Dynamic changes in vertical (direction Z) vibration levels at sections K506 and K548

范围为 133.4 ~ 139.1 dB, K548 断面竖向 Z 振级范围为 125.9 ~ 137.9 dB. 根据城市区域竖向 Z 振级标准值, 超过 80.0 dB 会严重影响到人们正常的生活与工作. K506 断面竖向 Z 振级显著高于 K548 断面的对应值, 同时 K506 断面加速度值比 K548 断面加速度值大的结论得到了验证.

## 2 安全评价体系建立

### 2.1 评价指标体系构建

本文在全面深入分析及咨询了 8 位铁路工程领域的专业技术人员和资深专家后, 利用 AHP 建立弱

膨胀土铁路路基安全评价指标体系, 基于相关性原则、可操作原则、可量化原则和系统化原则, 构建了针对重载列车提速弱膨胀土铁路路基安全评价指标体系, 如图 8 所示. 目标层为弱膨胀土铁路路基安全评价, 准则层为地质条件、荷载与变形、降雨条件和路基结构共 4 大类, 指标层则对应具体的 2 级评价指标. 上述指标体系覆盖了弱膨胀土的材料特性(物理力学参数)、环境作用(水、热荷载)、结构响应(变形与几何稳定性), 符合《铁路特殊路基设计规范》<sup>[18]</sup>对特殊土路基的评估要求. 通过多参数耦合分析, 可全面评价路基病害等级, 为病害防治决策提供量化依据.

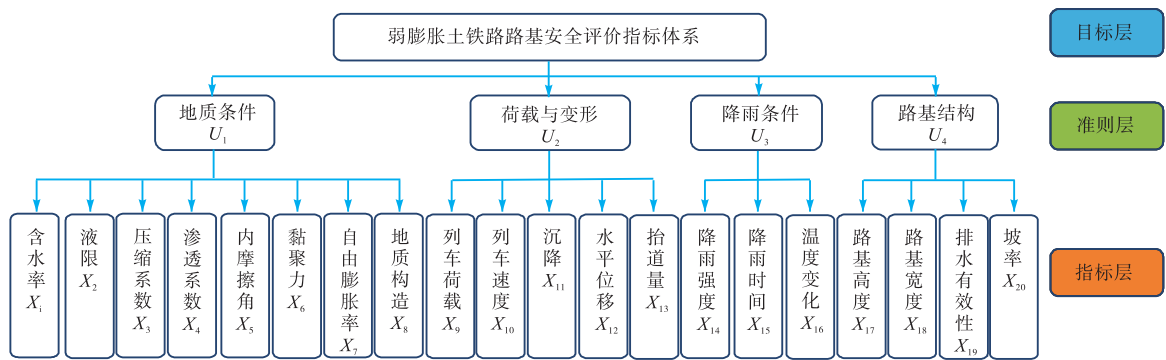


图 8 弱膨胀土铁路路基安全评价层次结构模型

Fig.8 Hierarchical structure model for safety evaluation of weakly expansive soil railway subgrade

在 2 级指标中, 依据《土工试验方法标准》<sup>[19]</sup>, 通过对现场取土进行烘干法、锥式液限仪法、固结试验、抽水试验、直剪试验等室内试验方法测得含水率、液限、压缩系数、渗透系数、内摩擦角、黏聚力、自由膨胀率; 根据现场勘察报告获取各病害区段地质构造; 列车荷载与列车速度于铁路局相关部门获取; 依据《铁路路基设计规范》<sup>[20]</sup>, 通过现场监测与布置测斜仪、全站仪等方式获取沉降、水平位移、抬道量等相关变量; 通过查询当地气象站数据获得降雨强度、降雨时间、温度变化; 通过铁路路基设计图纸获取路基参数. 用以上方法获取指标值用于 BP 神经网络输入.

根据专家打分的平均值, 从指标体系底层开始对每一项 2 级指标进行两两对比, 形成判断矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ . 在构建判断矩阵的过程中采用 1 ~ 9 标度法<sup>[21]</sup>, 使用 MATLAB 软件计算得到最大特征值  $\lambda_{max}$  和对应的特征向量  $W$ , 将特征向量归一化处理获得每个判断矩阵内考虑的指标权重. 通过对指标权重判断矩阵测算, 将一级指标层中的地质条件  $U_1$ 、荷载与变形  $U_2$ 、降雨条件  $U_3$  和路基结构  $U_4$  所占权重分别设定为 0.37、0.33、0.22 和 0.08, 其他指标权重判

断矩阵依此类推, 得到弱膨胀土铁路路基安全状态评价的 2 级评价指标  $X_1 \sim X_{20}$  相对于目标层的合成权重<sup>[22]</sup>, 如表 2 所示. 通过表 2 可以发现, 列车荷载、降雨强度权重最大且均为 0.113 90, 排水有效性权重最小为 0.008 00, 这说明了诱发铁路路基工程病害的主要原因是列车荷载增加和降雨强度增大, 因此应谨防列车超载与强降雨所带来的铁路运营风险.

表 2 2 级指标层评价指标权重

Tab.2 Weights of evaluation indexes in the second-level index layer

| 指标    | 权重       | 指标       | 权重       | 指标       | 权重       |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $X_1$ | 0.079 80 | $X_8$    | 0.039 90 | $X_{15}$ | 0.082 60 |
| $X_2$ | 0.022 80 | $X_9$    | 0.113 90 | $X_{16}$ | 0.022 60 |
| $X_3$ | 0.070 20 | $X_{10}$ | 0.017 20 | $X_{17}$ | 0.041 40 |
| $X_4$ | 0.022 80 | $X_{11}$ | 0.093 00 | $X_{18}$ | 0.023 40 |
| $X_5$ | 0.039 90 | $X_{12}$ | 0.065 10 | $X_{19}$ | 0.008 00 |
| $X_6$ | 0.039 90 | $X_{13}$ | 0.036 00 | $X_{20}$ | 0.010 40 |
| $X_7$ | 0.057 20 | $X_{14}$ | 0.113 90 |          |          |

通过式(2)和式(3), 计算一致性比率  $R_C$  值, 可验证判断矩阵的可靠程度<sup>[23]</sup>:  $R_C$  值低于 0.1 表明矩阵满足一致性要求, 权重分配恰当; 若  $R_C$  值达到或超过 0.1, 则需对矩阵进行修正.

$$I_C = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \tag{2}$$

$$R_C = I_C / I_R \quad (3)$$

式中： $I_C$  为计算一致性指标； $n$  为矩阵的阶数； $I_R$  为平均随机一致性指标。 $n$  和  $I_R$  可根据表 3 获得。通过计算，本文构建的判断矩阵  $R_C$  值均低于 0.1，即所有判断矩阵均符合一致性标准。

表 3 平均随机一致性指标  $I_R$

Tab.3 Mean random index  $I_R$

| 矩阵阶数 | $I_R$ | 矩阵阶数 | $I_R$ |
|------|-------|------|-------|
| 1    | 0     | 6    | 1.24  |
| 2    | 0     | 7    | 1.32  |
| 3    | 0.58  | 8    | 1.41  |
| 4    | 0.90  | 9    | 1.45  |
| 5    | 1.12  |      |       |

### 2.2 神经网络模型的构建

结合 BP 神经网络评价弱膨胀土铁路路基安全等级，BP 神经网络结构主要包括输入层设计、输出层设计和隐藏层设计共 3 个方面，如图 9 所示。针对输入层设计，结合层次分析指标体系，2 级指标有 20 个，因此输入层设定为 20 个节点。在进行网络输入前，需对原始数据进行归一化处理，以满足神经网络对输入格式的要求。通过 MATLAB 中 mapminmax 函数实现对原始数据的归一化处理，消除不同指标间的数量级差别，减小误差。针对于输出层设计，将安全风险等级  $B$  作为输出变量， $0 \leq B < 0.2$  视为病害不严重， $0.2 \leq B < 0.4$  视为病害一般严重， $0.4 \leq B < 0.6$  视为病害较严重， $0.6 \leq B < 0.8$  视为病害严重， $0.8 \leq B \leq 1.0$  视为病害特别严重，如表 4 所示。本文从武汉某重载铁路路基防治工程中收集了安全评价报告及项目施工报告，经过查找和筛选，共确定了 30 份样本，用其中的 20 份样本作为学习样本训练 BP 神经网络，剩下的 10 份样本作为检验样本用来检验获得的网络模型。本文由于病害工点有限、获得数据不易致使样本数量有限，但在 30 份样本中涵盖了不同病害类型（边坡溜坍）、不同环境条件（地质条件、列车荷载及路基变形、降雨条件、路基结构）及不同病害程度（不严重、一般严重、较严重、严重、特别严重）的工况，在评价中具有一定可信度。

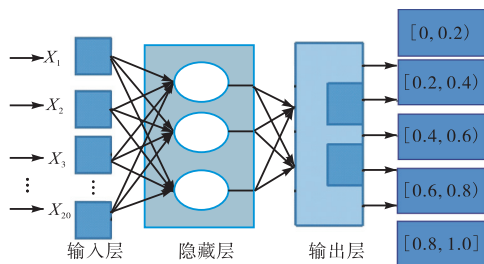


图 9 BP神经网络结构

Fig.9 Structure of BP neural network

表 4 项目安全风险评价等级

Tab.4 Project safety risk assessment levels

| 安全风险评估值范围             | 病害严重程度 |
|-----------------------|--------|
| $0 \leq B < 0.2$      | 不严重    |
| $0.2 \leq B < 0.4$    | 一般严重   |
| $0.4 \leq B < 0.6$    | 较严重    |
| $0.6 \leq B < 0.8$    | 严重     |
| $0.8 \leq B \leq 1.0$ | 特别严重   |

针对于隐藏层设计，隐藏层单元数可通过经验公式 (4) 获得<sup>[24]</sup>，即

$$h = \sqrt{p + q} + a \quad (4)$$

式中： $h$  为隐藏层单元数； $p$  为输入层单元数； $q$  为输出层单元数； $a$  为 1~10 之间的调节常数。

由于 BP 神经网络输入层、输出层节点数量分别为 20 个和 1 个，根据式 (4) 可以计算出隐藏层节点数的范围为 6~14 个，将其逐一代入 BP 神经网络求得最优模型的隐藏层节点数为 10 个。选取 log-sigmoid 函数作为激活函数 ( $y = 1/[1 + \exp(-x)]$ )，可将输入数据映射到 0~1，用来逼近非线性关系，可提高模型预测和评价精度。通过试算法，神经网络选取的学习率为 0.08，训练次数为 1000 次，规定计算迭代误差精度为  $1 \times 10^{-6}$ ，可以兼容模型的收敛速度与稳定性，防止产生“模型过拟合”现象以及控制模型参数的更新速度。

将 BP 神经网络的预测输出与实际观测的路基安全状态进行对比，评估模型的评价性能。通过将标准化处理后的样本数据进行验证，结果表明在 30 组数据中，最大误差仅为 1.773%，而平均误差则低至 0.508%，这说明模型拟合效果理想，完全满足精度要求，如图 10 所示。

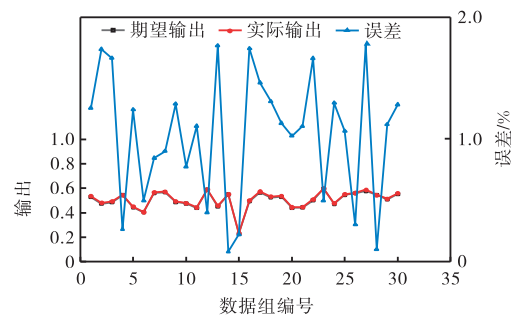


图 10 误差分析

Fig.10 Error analysis

结合 K506 和 K548 实际工况，将归一化后的数据输入神经网络模型中，使用 MATLAB 软件进行计算，结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出，K506 断面输出结果为 0.493，病害等级为较严重，与专家评估等级一致。K548 断面输出结果为 0.478，病害等级为

较严重,同样与专家评估等级一致.这表明本文提出的弱膨胀土铁路路基安全评价模型具有一定的可靠性,可为工程实践提供技术支持.

表 5 评价模型应用结果

Tab.5 Application results of evaluation model

| 断面类型 | 输出结果  | 预测病害等级 | 专家评估等级 |
|------|-------|--------|--------|
| K506 | 0.493 | 较严重    | 较严重    |
| K548 | 0.478 | 较严重    | 较严重    |

### 3 结 论

本文依托武汉某重载铁路路基病害防治工程,通过现场监测分析沉降、水平位移、土压力和加速度的变化情况,利用 AHP 和 BP 神经网络建立弱膨胀土铁路路基安全评价模型,得出以下结论.

(1) 选取的弱膨胀土铁路路基病害区段整体运行状态较差,沉降、水平位移等指标随着时间延长而增大. K506 断面与 K548 断面沉降均呈现出蠕动变形、稳定变形和加速变形 3 阶段演化特征.在加速变形阶段,沉降量骤增, K506 断面平均沉降增长速率突增 70.3%, K548 断面平均沉降增长速率突增 58.5%.对于水平位移, K506 断面与沉降变化规律类似,但 K548 断面水平位移并没有呈现 3 阶段发展趋势,而是随着时间的延长呈现出先增大后稳定的发展趋势.

(2) 土压力值随着时间的延长而增大并趋于稳定.在监测初期,土压力计与周边土体耦合,土压力值增长速度快,路肩区域土压力值低于路基中心处土压力值,在监测中后期,由于病害在竖向位移与水平位移方面的发展,土压力值呈不稳定状态,缓慢递增.由于 K506 断面的填方边坡高度大于 K548 断面的对应值, K506 断面的土压力值大于 K548 断面的土压力值. K506 断面在监测 30 d 时加速度最大值为  $0.55 \text{ m/s}^2$ ,在监测 150 d 时,列车经过时加速度平均值接近  $7.00 \text{ m/s}^2$ ; K548 断面在监测 30 d 时加速度最大值为  $5.19 \text{ m/s}^2$ ,平均值接近  $2.50 \text{ m/s}^2$ ,在监测 150 d 时,列车经过时加速度平均值接近  $5.00 \text{ m/s}^2$ .由于病害的逐渐发展,不均匀变形增加,轨道不平顺加剧,路基刚度增大,重载列车通过时线路与列车的相互作用和振动加剧,路基振动响应增加.

(3) 通过采用 AHP 和 BP 神经网络模型,构建重载列车提速下膨胀土铁路路基安全评价指标体系,确定了 4 个准则层 1 级指标和 20 个 2 级指标,分析了各指标对路基安全状态的影响程度,其中列车荷载、降雨强度权重最大且均为 0.113 90,排水有效性

权重最小为 0.008 00.通过 20 组训练集和 10 组验证集对模型进行了充分的训练与调整,最大误差仅为 1.773%,平均误差为 0.508%,拟合情况良好.在训练好的模型基础上选取实际案例,预测了 K506 和 K548 的路基病害等级均为较严重,与专家评价结果保持一致,验证了安全评价方法的准确性和可靠性.

本研究基于 AHP 和 BP 神经网络法,建立了重载列车提速下弱膨胀土铁路路基安全评价模型,其权重和模型参数适用于弱膨胀土路基填料,样本集中于膨胀土路基典型病害(如边坡溜坍、路基下沉等).在后续研究中,将进一步结合更多工程案例对模型进行优化和验证,持续完善模型架构,构建更全面的重载列车提速下弱膨胀土铁路路基安全评价体系.

### 参考文献:

- [1] 朱雨,石利刚,王健慧.面向智慧化的重载铁路发展研究[J].交通科技与经济,2021,23(4):59-64.  
Zhu Yu, Shi Ligang, Wang Jianhui. Research on the development of intelligent heavy-haul railway[J]. Transportation & Economy in Areas of Communications, 2021, 23(4): 59-64 (in Chinese).
- [2] Fredlund D G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(3): 286-321.
- [3] 刘维正,徐阳,石志国,等.湿化作用下改良膨胀土永久变形特性多级加载试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):296-305.  
Liu Weizheng, Xu Yang, Shi Zhiguo, et al. Characterization of permanent deformation of modified expansive soil under wetting effect using multi-stage dynamic triaxial test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 296-305 (in Chinese).
- [4] 周海.膨胀土(岩)地区常见铁路路基病害及整治研究[J].路基工程,2014(1):44-48.  
Zhou Hai. Study on common diseases of railway subgrade in swelling soil (rock) area and treatment[J]. Subgrade Engineering, 2014(1): 44-48 (in Chinese).
- [5] 王定顺,赵文辉,石旭东,等.高压旋喷桩施工对既有铁路路基变形影响研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(7):2500-2508.  
Wang Dingshun, Zhao Wenhui, Shi Xudong, et al. In-

- fluence of high pressure jet grouting pile construction on deformation of existing railway subgrade[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(7): 2500-2508(in Chinese).
- [6] 律文田, 王永和. 秦沈客运专线路桥过渡段路基动应力测试分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 500-504.  
Lü Wentian, Wang Yonghe. Dynamic stress analysis of subgrade-bridge transition section of Qinshen railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 500-504(in Chinese).
- [7] 高广运, 李志毅, 冯世进, 等. 秦-沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1817-1822, 1827.  
Gao Guangyun, Li Zhiyi, Feng Shijin, et al. Experimental results and numerical predictions of ground vibration induced by high-speed train running on Qin-Shen Railway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1817-1822, 1827(in Chinese).
- [8] 陈兆玮, 翟婉明. 基于列车振动的高速铁路桥墩沉降控制阈值[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(2): 136-147.  
Chen Zhaowei, Zhai Wanming. Control threshold of pier settlement in high-speed railways based on train vibrations[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2022, 22(2): 136-147(in Chinese).
- [9] 聂志红, 阮波, 李亮. 秦沈客运专线路堑段基床结构动态测试分析[J]. *振动与冲击*, 2005, 24(2): 30-32, 146.  
Nie Zhihong, Ruan Bo, Li Liang. Testing and analysis on dynamic performance of subgrade of Qinshen railway[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(2): 30-32, 146(in Chinese).
- [10] 王子玉, 凌贤长, 惠舒清. 季节冻土区铁路路基振动加速度现场监测[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(9): 1591-1598.  
Wang Ziyu, Ling Xianchang, Hui Shuqing. Field monitoring of vibration response of subgrade in a seasonally frozen region[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(9): 1591-1598(in Chinese).
- [11] 江雨欣, 郭湛, 王高磊, 等. 高速铁路运营安全评价指标权重确定模型研究[J]. *铁道技术监督*, 2021, 49(4): 32-37.  
Jiang Yuxin, Guo Zhan, Wang Gaolei, et al. A weight determination model for high-speed railway operation safety evaluation index[J]. *Railway Quality Control*, 2021, 49(4): 32-37(in Chinese).
- [12] 钱王苹, 漆泰岳, 乐弋舟, 等. 盾构隧道下穿高速铁路的安全因素分析及应用[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(11): 2282-2289.  
Qian Wangping, Qi Taiyue, Le Yizhou, et al. The analysis and application of safety factors of shield-underneath high-speed railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(11): 2282-2289(in Chinese).
- [13] 潘科, 王洪德, 石剑云. 多级可拓评价方法在地铁运营安全评价中的应用[J]. *铁道学报*, 2011, 33(5): 14-19.  
Pan Ke, Wang Hongde, Shi Jianyun. Application of multi-level extensible method to urban subway operation safety evaluation[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(5): 14-19(in Chinese).
- [14] 冯运卿, 李雪梅, 李学伟. 基于熵权法与灰色关联分析的铁路安全综合评价[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(2): 73-79.  
Feng Yunqing, Li Xuemei, Li Xuewei. Comprehensive evaluation method for the railway safety based on the entropy method and the grey relation analysis[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(2): 73-79(in Chinese).
- [15] TB 10314—2021 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2021.  
TB 10314—2021 Technical Specification for Safety Monitoring of Operating Railway Infrastructures with Adjacent Constructions[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2021(in Chinese).
- [16] Dong Haoyu, Wang Jiading, Zhang Dengfei, et al. Unstable evolution of railway slope under the rainfall-vibration joint action[J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, 21(4): 1419-1431.
- [17] 余翠英, 雷红博, 罗文俊, 等. 基于DEM-MFBD方法的有砟轨道路基不均匀沉降影响分析[J]. *土木与环*

- 境工程学报(中英文), 2023, 45(4): 10-18.
- Yu Cuiying, Lei Hongbo, Luo Wenjun, et al. Analysis of uneven subgrade settlement of ballasted track based on DEM-MFBD method[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(4): 10-18(in Chinese).
- [18] TB 10035—2018 铁路特殊路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- TB 10035—2018 Code for Design on Special Railway Earth Structure[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018(in Chinese).
- [19] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- GB/T 50123—2019 Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019(in Chinese).
- [20] TB 10001—2016 铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- TB 10001—2016 Code for Design of Railway Earth Structure[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016(in Chinese).
- [21] 雷华阳, 周 骏, 贺彩峰. 既有线重力式挡土墙综合安全评估方法研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 700-705.
- Lei Huayang, Zhou Jun, He Caifeng. Comprehensive safety assessment method for retaining wall on existing railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 700-705(in Chinese).
- [22] Saaty T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1): 9-26.
- [23] 董江龙. 基于层次分析法的环湖铁路路基安全性评价[J]. 甘肃科技, 2025, 41(1): 63-68, 74.
- Dong Jianglong. Safety evaluation of subgrade for railway sections around lake based on the analytic hierarchy process[J]. Gansu Science and Technology, 2025, 41(1): 63-68, 74(in Chinese).
- [24] 乔维德. 基于层次分析与 BP 神经网络的电梯安全评价模型[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2023, 36(2): 17-24.
- Qiao Weide. Elevator safety evaluation model based on analytic hierarchy process and BP neural network[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition), 2023, 36(2): 17-24(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)