

文章编号: 1000-0240(2012)04-0877-07

青藏铁路路基稳定性模型的 GIS 集成 工作环境应用研究

郭建文¹, 付卫平^{1, 2}, 刘 丰^{1, 2}

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了发挥 GIS 在青藏铁路冻土路基稳定性研究中有力的支持作用, 在已经建成的青藏铁路数字路基 GIS 平台的基础上, 探讨了一种基于过程集成模式的模型与 GIS 集成方法, 研究建立专业冻土路基模型与 GIS 平台集成的可视化“模型 GIS 集成工作环境”, 研究重点为专业冻土路基稳定性模型模块在此“模型 GIS 集成工作环境”中的集成技术手段、模型管理模式以及模型调用模式. 作为研究成果, 实现了一个实用原型系统.

关键词: 青藏铁路; 路基稳定性; 模型 GIS 集成工作环境; GIS

中图分类号: U213.1⁺⁴ **文献标识码:** A

0 引言

青藏铁路是世界上海拔最高的铁路, 铁路穿越多年冻土区长度达 632 km^[1-2]. 长期的工程实践表明, 青藏铁路成败的关键在路基工程, 而路基工程的关键是如何解决冻土工程问题^[3]. 针对多年冻土区铁路路基稳定性的研究对青藏铁路运营维护具有十分重要的作用, 国内冻土工程领域专家围绕青藏铁路与多年冻土相互作用这个研究热点开展了大量的研究工作, 并针对具体的工程措施取得了初步的成果, 对通风管路基、块石/碎石路基、热棒路基等都分别建立了专业的数值分析与模拟模型. 另外, 也有研究人员利用水热相变传导模型对青藏高原冻土分布情况进行了情景预测^[4], 以及用概率预报方法对冻土层活动情况进行预测^[5-6]. 这些成果对研究与理解冻土路基的稳定性问题以及对青藏铁路的运营维护都有重要意义, 因而, 如何高效管理与使用这些研究成果具有明显的研究意义.

在路基稳定性专业分析模型或预测模型中都需要充分的空间数据支持, 例如温度、含冰量、土壤类型数据等, 才能正常运行, 而以计算机技术为核

心的 GIS 系统, 则以其在空间数据的获取、管理、处理、分析和显示方面的突出特点, 成为支持冻土路基稳定性研究工作的首选基础工作平台.

在青藏铁路路基稳定性研究的前期工作中, 已经在空间数据及技术支撑平台方面做了很多工作, 除了对青藏铁路涉及到的水文、地质、植被、钻孔数据等大量空间数据进行了数字化及建库管理工作外^[7], 还建立了具有可扩展性的青藏铁路数字路基系统基础 GIS 工作平台, 并在此平台基础上, 结合了在路基状态远程实时监测、CAD 设计数据集成、数据三维可视化等方面的研究工作, 建立了青藏铁路数字路基系统^[8-11]. 但在青藏铁路数字路基系统中, 由于当时受进度要求、人员等条件限制, 在专业冻土路基模型与 GIS 平台的集成方面仅做了功能有限的松散集成, 在功能、灵活性方面局限性较大, 没能充分发挥 GIS 系统在空间数据管理方面有力的支持作用. 本研究旨在前期青藏铁路数字路基系统工作成果的基础上, 开展更深入的“模型 GIS 集成工作环境”(MGIWE)的研究, 以便使专业模型与 GIS 基础平台能够高效集成, 充分发挥 GIS 对专业模型的支持作用, 有利于冻土科研工作者及铁路

收稿日期: 2011-10-27; 修订日期: 2012-01-06

基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)项目(29O82BC23); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB026106)资助

作者简介: 郭建文(1970—), 男, 甘肃酒泉人, 副研究员, 2006 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 现主要从事 GIS 应用研究. E-mail: guojw@lzb.ac.cn

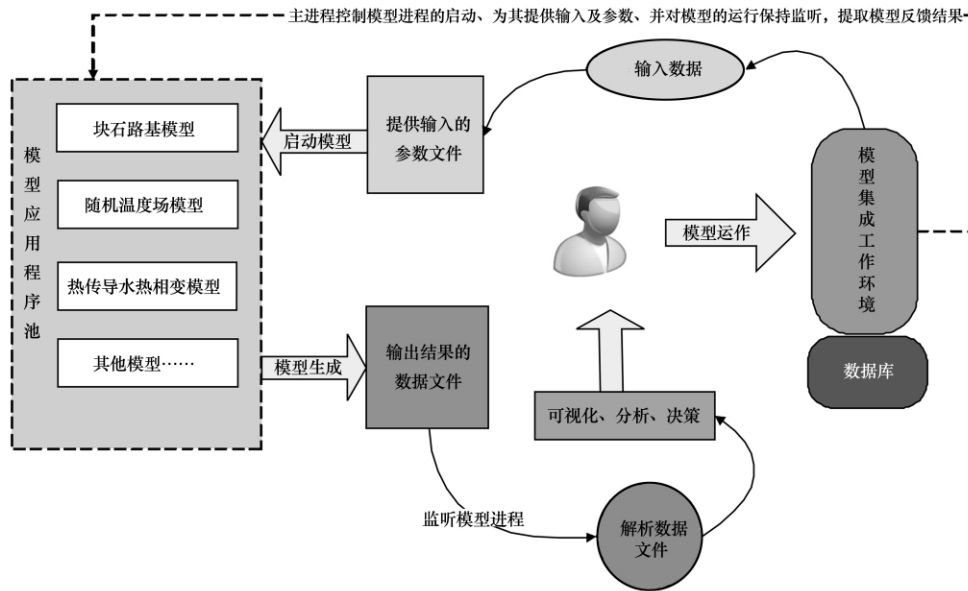


图 1 MGIWE 主流程示意图
 Fig. 1 Main flow diagram of the MGIWE

管理人员更好、更方便地应用专业模型来进行科研工作，并有利于发挥各模型的优势，对研究工作起到有力的促进作用。

1 MGIWE 方案介绍

MGIWE 的系统研发工作主要包括向模型提供运行环境、数据支持、可视化与 GIS 空间分析支持等方面，系统流程图如图 1 所示。

1.1 基于过程的 MGIWE

模型集成方式分为两种主要的类型，即结构 (scheme) 集成和过程 (process) 集成^[12]，结构集成是耦合度极高的整合方式，而过程集成则是一种相对松散的耦合模式，模型与系统，或者模型相互之

间的交互通过输入与输出接口来实现。针对现有的专业冻土路基模型开发语言多样，复杂度较高，同时也有成熟的可执行模型软件，因此，采用过程集成的方法将各种模型整合到同一个 GIS 平台系统中较为现实。

MGIWE 系统框架中最重要的部分就是模型驱动向导，模型驱动向导可以理解为控制模型运行、为模型提供输入驱动、同时获取模型运行结果的软件管理模块。以热传导水热相变模型为例，如图 2 所示，热传导水热相变模型的运行需要钻孔分层的初始温度、土壤层温度值文本文件作为输入，同时模型运行完毕后生成温度预测值文本文件作为输出，用户在基于 GIS 的主工作界面上选择钻孔与要

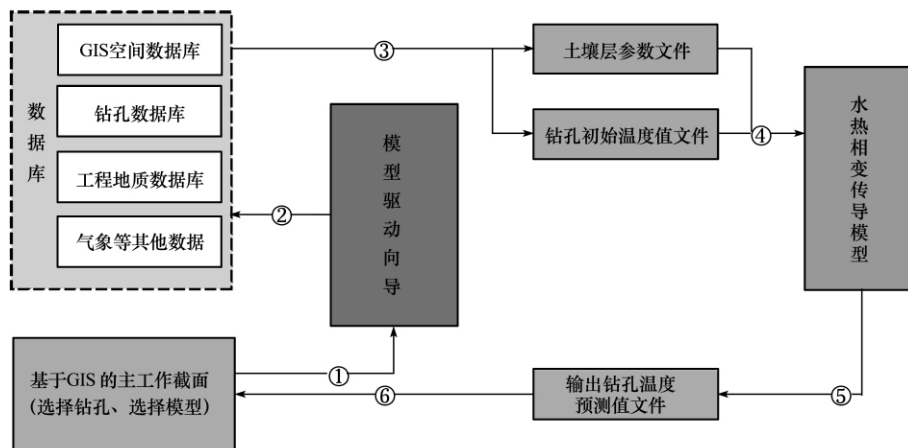


图 2 模型驱动向导工作原理
 Fig. 2 Principle of the model driving wizard

运行的模型之后(假定选择的是水热相变传导模型),此时,模型驱动向导则根据水热相变传导模型的参数接口规范,从数据库中读取钻孔温度信息、土壤水文信息等,生成土壤层参数文件和钻孔初始温度值文件,然后模型驱动向导启动模型可执行性文件,加载模型运行界面,此时,模型自动读取刚刚生成的土壤层参数文件与钻孔初始温度值文件作为输入,在用户操作完模型输入或输出的其它选项后,模型开始运行,运行完毕后,生成钻孔温度预测值文本文件,此时,软件框架主进程捕获到模型进程的结束消息,并读取模型生成的结果文件,将其解析出来,进行可视化分析与后期应用处理。

通过这种模式,专业冻土路基模型与 GIS 平台通过模型驱动向导有机高效地整合在一起,使模型用户可以只需将注意力放在选择合适的模型并指定模型的运算区域(位置),MGIWE 就会自动为模型准备好其运行所需要的数据,并对输出结果进行可视化处理,有效地将模型用户从费时费力的烦琐数据准备工作中解脱出来,可以集中精力于对模型运行结果的分析上。

1.2 模型介绍

冻土经验模型可以应用在大尺度研究方面,但由于其没有考虑研究目标的物理机理,所以不能模拟冻土的水、热及温度场变化,而冻土物理模型则可以模拟出这种变化。在青藏铁路的相关研究中,研究人员在冻土状态模拟和预测的物理模型方面进行了深入的研究,对普通冻土、通风管路基、块石护坡路基、碎石路基等建立了不同的专业物理分析模型,部分模型已经得到实际应用和检验,并且已经编写好了模型可执行软件,具备集成条件,MGIWE 中初步选择了以下模型进行系统集成应用:

(1) 热传导水热相变传导模型^[13-14]:原始模型采用 Fortran 语言编写,后来原作者在 Visual C#.net 2003 开发环境下重新改写并编译为动态库,并定义了相应的模块接口。

(2) 路基随机温度场模型^[15]:原模型采用 Fortran 语言编写。

(3) 块石路基温度场模型^[16-17]:原模型采用 Fortran 语言编写。

1.3 GIS 对模型的支持

地理信息系统能够直观的表达带有空间位置属性的对象,能够方便快捷的管理与维护标准化的空间数据,同时提供丰富的数据处理、空间分析等技

术手段。模型集成工作环境采用 GIS 空间数据库来存储和管理大量矢量与栅格数据,包括铁路、钻孔分布、冻土分布、地形、卫星影像等大量空间数据,对数据的管理实现了规范化的管理。借助 GIS 二次开发组件,系统可以实现对空间数据的高效并发访问与管理,用户可以在直观的地图可视化界面上查看铁路、钻孔、冻土等研究对象的空间和属性信息,同时可以进行直观的数据比较与空间分析等操作。如图 3 所示,GIS 为模型提供数据管理支持,为模型提供钻孔、土壤类型、冻土分布等空间数据的访问接口与数据管理功能。同时 GIS 也可实现模型数据的地图显示、图形渲染、专题图显示等可视化功能,在用户友好的地图窗口上,用户可以完成模型的启动、运行与结果的显示。此外,GIS 也可以为模型后续的扩展应用提供有效支持。

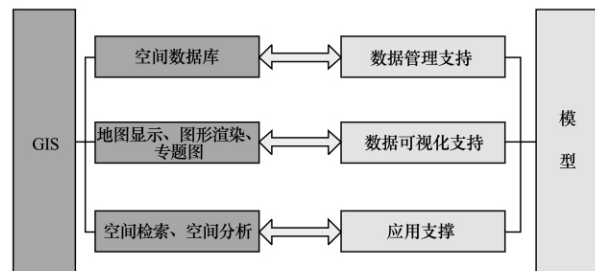


图 3 GIS 对模型的支持

Fig. 3 How do GIS support the models

2 系统设计与实现

2.1 主要研发工具

研究开发过程中采用到的主要工具及开发平台如下:

(1) ArcGIS Engine: 一组跨平台的嵌入式 ArcObjects,它是 ArcGIS 软件产品的底层组件,用来构建定制的 GIS 和桌面制图应用程序。借助 ArcGIS Engine,用户可以方便快速的开发基于 GIS 的软件应用,定制具有空间可视化能力和空间分析功能的软件模块。

(2) ArcSDE: ArcGIS 的空间数据引擎,它是在关系数据库管理系统(RDBMS)中存储和管理多用户空间数据库的通路。它需要与关系数据库(Microsoft SQL Server、Oracle、IBM DB2 等数据库)配合使用,具有强大的空间数据存储和管理能力。

(3) Visual Studio 2008: 一套通用软件开发平台,此平台所采用的主力编程语言为 C#,该平台具备强大的开发能力,能够开发通用大型应用软

件, 同时也能很好的与 ArcGIS Engine 二次开发组件、ArcSDE 空间数据引擎以及 Microsoft SQL Server 结合起来, 开发基于 GIS 的应用软件平台.

2.2 MGIWE 体系结构及实现方法

MGIWE 系统主要由数据管理模块、GIS 功能模块、模型驱动向导以及模型构成, 系统的接口如图 4 所示.

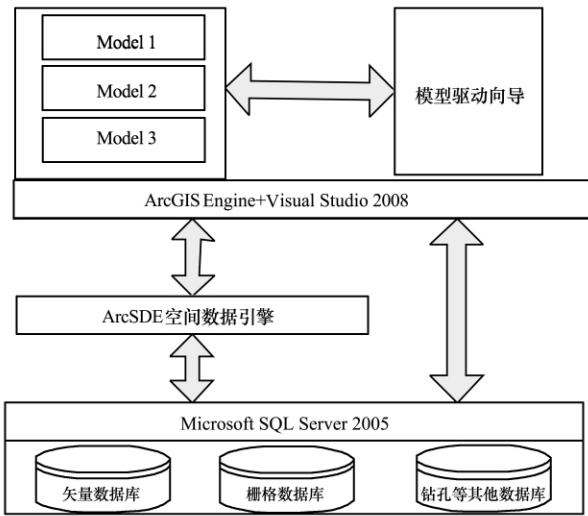


图 4 MGIWE 体系架构

Fig. 4 Framework of the MGIWE

首先对模型程序进行了 .NET 环境下的封装与调试, 提取模型的 IO(输入/输出)接口, 解析参数文件, 将模型重新封装为可执行文件. 然后, 在 VS2008 .NET 开发平台上用 C# 开发 MGIWE 系统框架. 数据库在已有青藏铁路 GIS 系统的基础上进行了一定的扩充与升级, 升级之后的空间数据引擎版本为 ArcGIS SDE 9.2, 关系数据库版本为 Microsoft SQL Server 2005, GIS 功能部分采用 ArcGIS Engine 9.3 组件来支持.

2.3 空间数据管理的实现

系统中涉及到的空间数据全部采用空间数据库

来管理, 包括青藏铁路沿线的基础地形、道路、河流、高程 DEM、冻土分布、土壤类型、钻孔分布等矢量与空间数据, 将全部矢量数据和栅格数据定义好统一的投影坐标系后导入空间数据库. 在系统开发 GIS 功能的过程中, 通过 ArcGIS Engine 组件的空间数据读写接口, 实现对空间数据库的远程访问与数据操作.

2.4 GIS 功能的实现

采用 ArcGIS Engine 开发 GIS 系统, 与传统的底层开发及应用软件的二次开发相比, 具有开发成本低、开发效率高、更具专业性和灵活性等优点. ArcGIS Engine 组件可用于建立自定义独立地理信息系统(GIS) 应用程序, 支持多种应用程序接口(Application Program Interfaces, APIs), 拥有许多高级 GIS 功能. MGIWE 采用了该组件开发了图层管理、空间查询、空间分析、模型结果的专题图显示等 GIS 特色功能.

2.5 模型驱动向导的实现

模型驱动向导构造关键是构造一个模型驱动向导类, 在模型向导类中获取用户输入和系统输入参数(系统输入参数包括从空间数据库中的读取的数据、背景数据等), 按照模型进程的参数文件规范, 生成对应的参数文件, 然后主进程启动模型进程, 模型进程开始运行, 主进程进入等待状态, 待模型运行完毕后, 主进程获得模型进程结束的消息后开始提取模型进程生成的结果文件中的内容, 对模型结果数据作后续处理, 包括可视化、对比、空间分析等. 模型驱动向导的实现原理如图 5 所示.

模型子进程的启动和对模型子进程结束的消息捕获依靠 System.Diagnostics.Process 类实现:

```
//声明模型进程类
ProcessStartInfo pModelInfo = new ProcessStartInfo();
//定义模型进程类的可执行性文件目录与文件
```

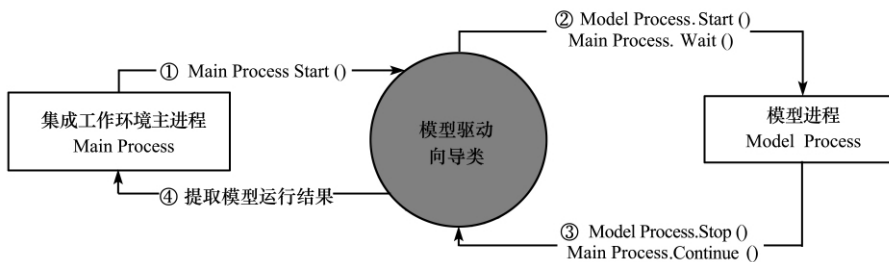


图 5 模型驱动向导的工作机理

Fig. 5 Mechanism of the model driving wizard

名

```

pModelInfo. WorkingDirectory = Environ-
ment. CurrentDirectory + "\\Models\\Model1";
pModelInfo. FileName=" modell. exe";
//启动模型进程
Process pModel=Process. Start(pInfo);
//等待程序装载完成
pModel. WaitForInputIdle();
//等待进行程退出
pModel. WaitForExit();

```

2.6 应用实例

MGIWE 主工作界面包括图层管理、数据管

理、可视化、模型管理、稳定性评价、空间分析等主要模块，如图 6 所示。用户通过模型使用向导来驱动模型的运行，系统会获取模型运行的结果，对结果进行分析统计、GIS 专题图显示等，同时，在模型的基础上，进行了一些更高级的稳定性评价、决策分析等方面的功能设计与实现，以更好的体现模型的价值，为科研人员提供便利。

图 7 为软件根据评价模块演算后得到的路基监测断面稳定性预测值的 GIS 专题图显示，稳定性评价结果可与实际监测的沉降值进行对比分析，具有很好的参考价值。

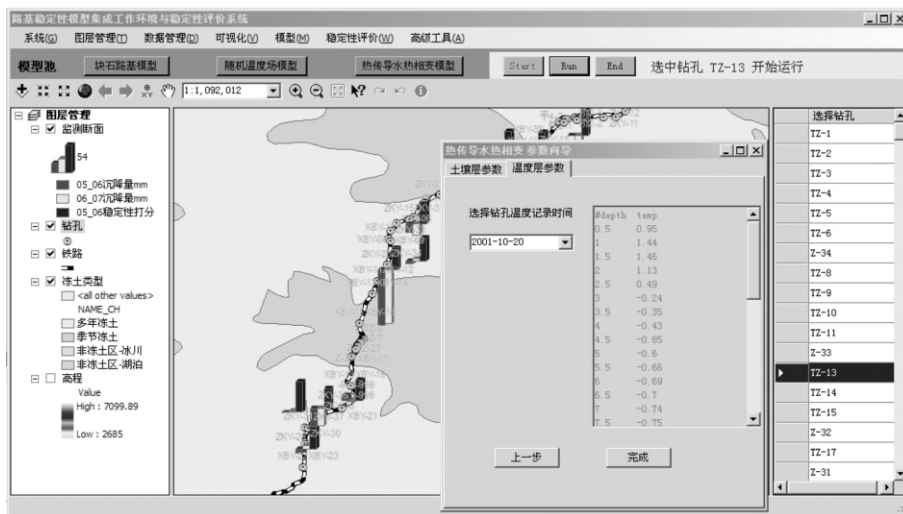


图 6 主工作界面

Fig. 6 Main user interface

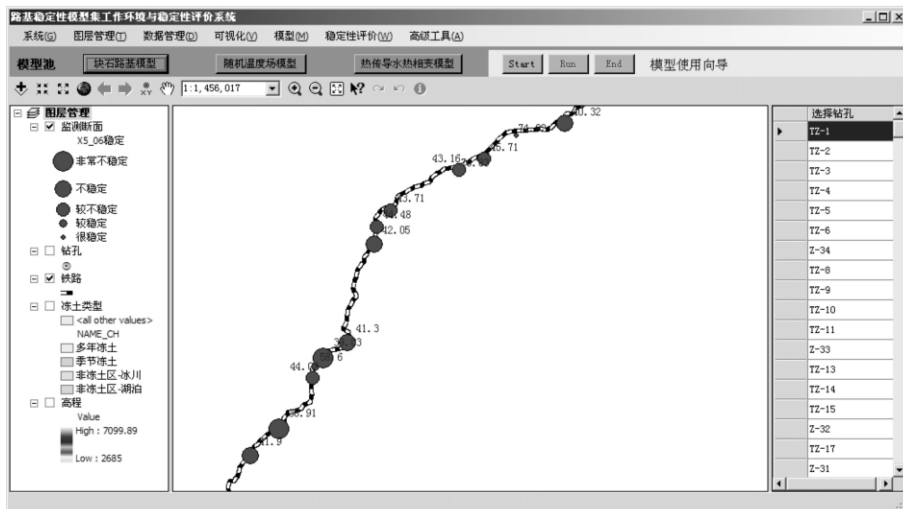


图 7 评价结果饼状专题图显示

Fig. 7 Pie chart of the evaluated result

3 结语

MGIWE 研究为青藏铁路冻土路基稳定性研究的专业模型应用提供有力的空间数据管理、空间分析及结果可视化方面的支持,探讨了一种基于过程的模型与 GIS 环境的集成方法,建立了一个基于 GIS 的实用型模型集成工作环境系统软件,这为后续更多的模型集成工作提供了可供借鉴的技术方法,也需要在此基础上做更多的工作来进行深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, *et al.* Frozen Ground in China [M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [2] Cheng Guodong, Influences of local factors on permafrost occurrence and their implications for Qinghai - Tibet Railway design [J]. Science in China (Series D), 2003, **33**(6): 602-607. [程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(6): 602-607.]
- [3] Cheng Guodong, He Ping. Linearity engineering in permafrost areas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(3): 213-217. [程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(3): 213-217.]
- [4] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Liu Yongzhi. 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. [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.]
- [5] Yang Chengsong, Cheng Guodong. Probabilistic prediction of the impacts of climate change on permafrost stability along the Qinghai-Tibet Railway (I): Active layer thickness and ground temperature [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 461-468. [杨成松, 程国栋. 气候变化条件下青藏铁路沿线多年冻土概率预报(I): 活动层厚度与地温[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 461-468.]
- [6] Yang Chengsong, Cheng Guodong. Probabilistic prediction of the impacts of climate change on permafrost stability along the Qinghai-Tibet Railway (II): Active layer thickness and settlement deformation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 469-478. [杨成松, 程国栋. 气候变化条件下青藏铁路沿线多年冻土概率预报(II): 活动层厚度与沉降变形[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(3): 469-478.]
- [7] Ma mingguo, Wang Xuemei, Li Xin. Design of the Qinghai-Tibetan Railway information system [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(5): 652-658. [马明国, 王雪梅, 李新. 青藏铁路信息系统数据库设计[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(5): 652-658.]
- [8] Nan Zhuotong, Li Xin, Li Shuxun. Architecture design of the digital embankment and numerical simulation platform of the Qinghai-Tibetan Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(5): 646-651. [南卓铜, 李新, 李述训. “青藏铁路数字路基与仿真平台”体系架构设计[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(5): 646-651.]
- [9] Ge Yingchun, Guo Jianwen, Feng Min, *et al.* Lightweight Qinghai-Tibet Railway digital roadbed and numerical simulation platform based on 3S[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(2): 235-239. [盖迎春, 郭建文, 冯敏, 等. 轻量版青藏铁路数字路基仿真平台[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(2): 235-239.]
- [10] Guo Jianwen, Feng Min, Shang Qingsheng, *et al.* Design and implement of highweight Qinghai-Tibet Railway digital roadbed and numerical simulation platform[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29**(5): 770-776. [郭建文, 冯敏, 尚庆生, 等. 重量版青藏铁路数字路基仿真平台[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(5): 770-776.]
- [11] Guo Jianwen. Study on GIS and Digital Embankment of the Qinghai-Tibet Railway [D]. Ph. D Thesis, Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006. [郭建文. 青藏铁路地理信息系统与数字路基研究[D]. 博士学位论文, 北京: 中国科学院研究生院, 2006.]
- [12] Dolk D R, Kotte Mann J E. Model integration and a theory of models [J]. Decision Support Systems, 1993, **9**(1): 51-63.
- [13] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years[J]. Science in China (Series D), 2004, **34**(6): 528-534. [南卓铜, 李述训, 程国栋. 未来 50 与 100a 青藏高原多年冻土变化情景预测[J]. 中国科学(D 辑), 2004, **34**(6): 528-534.]
- [14] Li Shuxun, Cheng Guodong, Guo Dongxin. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China, under climate warming [J]. Science in China (Series D), 1996, **26**(4): 342-347. [李述训, 程国栋, 郭东信. 气候持续变暖条件下青藏高原多年冻土变化趋势数值模型[J]. 中国科学(D 辑), 1996, **26**(4): 342-347.]
- [15] Qi Changqing, Wu Qingbai, Shi Bin, *et al.* Analysis of thermal state of permafrost under high embankment along Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(Suppl. 2): 4518-4524. [祁长青, 吴青柏, 施斌, 等. 青藏铁路高路堤下多年冻土热状态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增 2): 4518-4524.]
- [16] Lai Yuanming, Zhang Mingyi, Yu Wenbing, *et al.* Experimental study on the cooling effect and mechanism of closed ripped-rock embankment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(5): 576-581. [赖远明, 张明义, 喻文兵, 等. 封闭条件下抛石路堤降温效果及机理的试验研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 576-581.]
- [17] Lai Yuanming, Zhang Mingyi, Yu Wenbing, *et al.* The influence of boundary conditions on the cooling effect and mechanism of ripped-rock layers [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(2): 163-168. [赖远明, 张明义, 喻文兵, 等. 边界条件对碎石层降温效果及机理的影响[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(2): 163-168.]

Research of GIS Integration Working Environment of Embankment Stability Models for Qinghai-Tibetan Railway

GUO Jian-wen¹, FU Wei-ping^{1, 2}, LIU Feng^{1, 2}

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: GIS can support the frozen soil embankment stability research of Qinghai-Tibet Railway powerfully. On the base of Qinghai-Tibet Digital Embankment GIS Platform, which has been built already, a GIS-based visualization railway embankment stability model integration working environment is trying to develop for integration of professional frozen soil embankment models and GIS environment by the approach of Process Integration Pattern. The keys of the Model Integration Work-

ing Environment is to research the integrating technical methods, the patterns of model management as well as the pattern of model invoke. As the research result, an applicative prototype system, named Model and GIS Integrated Working Environment, has been established, of which the key functions include model working environment, spatial data support, visualization, as well as the spatial analysis support.

Key words: Qinghai-Tibet Railway; embankment stability; model GIS integration working environment; GIS