

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0003

ZHANG Zhongqiong, LIN Fang, WU Qingbai, et al. Stepwise development of the engineering geological mapping in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):176-183. [张中琼, 林芳, 吴青柏, 等. 多年冻土工程地质制图的阶梯发展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):176-183.]

多年冻土工程地质制图的阶梯发展

张中琼¹, 林芳², 吴青柏¹, 张泽^{1,3}, 张鹏¹

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地质大学(北京) 地学哲学研究所, 北京 100083; 3. 东北林业大学 寒区科学与工程研究院/土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 多年冻土工程地质制图是区域和历史冻土学研究的基础内容之一。多年冻土工程地质制图是根据需要和制图原则,在特定时空尺度分析多年冻土特征,以及各种自然、工程、环境要素共同影响下的多年冻土属性的量化描述。多年冻土工程地质制图所解决的科学问题从多年冻土的分布、规律和格局、冻土功能,认识不断提高。制图的内容从研究多年冻土的基本要素,特征要素,到功能要素,制图的实用性不断增强。制图方法从基本地理和工程地质方法逐步发展到系统论方法。总之,多年冻土工程地质制图表现出时间尺度上阶段性和空间坐标上的台阶性,在认识的深度和广度上均不断深化。为多年冻土区基础科学研究、工程建设、寒区资源环境等方面的工作提供基础数据和技术支持。

关键词: 多年冻土; 工程地质制图; 发展阶梯

中图分类号: P642.14; TB23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0176-08

0 引言

多年冻土是有规律的自然历史的地质产物,它具有现代或者古代地球上发生、存在、发展和分布规律所严格决定的特征。多年冻土分布区的总面积(包括格陵兰岛和南极)约占地球表面的40%,欧亚大陆的75%^[1]。我国多年冻土面积占国土面积的21.5%,主要分布在青藏高原,东北大小兴安岭和松嫩平原北部,以及西部高山区^[2]。

多年冻土分布规律以及地质过程是区域和历史冻土学的理论基础。多年冻土是寒区重要的动态变化的环境因子。确定多年冻土的发育规律以及它们现代的演化时空规律,并按照一定特征参数进行地段的区划和编图,揭示多年冻土特性与地质-地理区划结果而划分的具体景观类型、自然环境的多年冻土形成因素的关系,以及冻土工程与环境属性。指定比例尺和需求的多年冻土工程地质制图是区域和局域尺度上的寒区工程规划设计、资源开发和生态保护的重要基础,在多年冻土区社会

和经济发展决策中起到重要的作用^[3-4]。

多年冻土工程地质制图研究是对制图要素的独立性,以及要素的直观定量化、可视化以及空间情况进行评价,依据一定的数学法则和制图原则,通过制图综合,借助GIS等技术手段,表达各个独立要素空间分布,相互关系以及时空变化规律,并进行可视化的表达。形成耦合多源数据的特定属性的系统资料。制图工作是将地理学和工程地质学等理论用于实践的有利工具和关键环节。多年冻土工程地质制图表现出时间尺度上阶段性和空间坐标上的台阶性^[5]。基于多年冻土工程地质制图的研究过程和实践,对多年冻土工程地质制图的发展,研究内容,工作方法进行阶梯式的发展阐述,并说明新时期多年冻土工程地质制图的新内涵。

1 多年冻土工程地质制图问题的发展阶梯

多年冻土工程地质制图的发展是人类生产生活的实践的需要。是随着我们对多年冻土的感知-认识-认知过程,科学和理论系统逐渐建立起来的。

收稿日期: 2017-08-18; 修订日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771074); 国家自然科学基金重大项目(41690144)资助

作者简介: 张中琼, 副研究员, 主要从事特殊土工程地质研究. E-mail: zhongqionghao@163.com

这个过程可以分为三个发展阶段:

第一阶段:以野外调查和工程地质测绘为基础的工程地质填图。主要研究的科学问题是多年冻土的范围和界限,特别是多年冻土的南界。主要是为寒区自然资源开采以及寒区工程构筑物的修建提供基础工程地质资料。绘图的数据来源以现场的点线调查为主,结合部分区域气象数据。制图的目的是在工程实践等活动中尽可能避让,或者选择工程地质条件较好的区域,以较短的距离通过。1882年俄罗斯出版了第一张多年冻土区划图,以描述多年冻土南界为主要内容^[6]。1965年,Fetrians绘制了阿拉斯加的第一张冻土图^[7]。1967年,库德里亚采夫等前苏联学者首次提出了多年冻土制图的原则^[8],该原则是以野外调查的冻土现象,冻土特征,冷生时代为基础的。1975年,童伯良绘制了我国的第一张冻土分布图^[9]。1996年,李树德绘制了青藏高原的多年冻土分布图,描述了青藏高原不同类型多年冻土的分区,并标示了冻胀丘,冻融泥流等冻土现象^[10]。这些资料为区域工程建设和科学研究提供基础支持。

第二阶段:多年冻土的时空格局。随着人类实践范围的扩展,多年冻土已经作为我们生产生活的必要载体。需要更为深入的了解多年冻土的综合属性,为寒区高等级公路、铁路的建设以及寒区环境变化研究等方面提供支持。先进的原位测试和遥感反演技术提供了丰富的数据,并且在制图过程中使用了经验半经验模型。同时,制图原则也有了深入的发展,且考虑多年冻土的要素更为丰富。如以体积含冰量等指标为依据的制图原则^[11]。逐渐形成了以多年冻土地质特征、多年冻土分布和年平均温度,冷生岩土带的厚度和组构,多年冻土地质生成物特征以及相互作用为基础的冻土制图原则。考虑的要素包括年平均气温^[12]、冻结数^[13]、土壤、植被、地形数据^[14-15]、辐射参数^[16]、降水等。这些要素之间通过经验统计等其它概率方法确定之间的关系,比如 PERMAKART 模型^[17],经验准则模型^[14],PER-MAMAP 模型^[12],TTOP 模型^[18-20],GIPL 模型^[21-22]。通过计算,我们可以获得年平均地温,活动层厚度,多年冻土顶板温度等多年冻土的特征参数,实现多年冻土属性的归一和区划。代表性的图件有1997年美国地质调查局出版了环北极地区多年冻土和地下冰分布图。基于多年冻土与海拔、纬度、大陆度的关系我国学者绘制了1:300万青藏高

原多年冻土图。2000年周幼吾等出版了1:1 000万中国冻土区划及其类型图。2006年出版了我国1:400万中国冻土沙漠分布图^[23]。

第三阶段:多年冻土特征和功能性。现阶段的工作从“大气-界面(地面)-多年冻土”系统的角度开展研究。对多年冻土的特征指标多元化、精细化、系统化的反映多年冻土三维性质。并在多年冻土工程属性、环境属性、社会属性等方面开展研究,综合分析多年冻土的服役性能。同时,国际全球陆地冻土热状态监测网络(GTN-P)^[24]和环北极活动层监测网络(CLAM)^[25]等半球全球尺度研究计划的实施,研究从区域已经扩展到了半球全球尺度。为中蒙俄经济走廊的建设,“一带一路”、“沿边开放开发”,以及新型城镇化建设等国家重要战略的实施提供科学的建议和借鉴。

随着观测数据、遥感、物理过程模型(陆面过程)为基础的多年冻土工程制图。更为详细和具体的刻画多年冻土,并赋予了新的实用价值和内涵。形成以气象、遥感数据、再分析数据等为基础,与野外调查相结合,通过经验和物理过程模型方法实现多年冻土特性制图^[26]。在计算过程中,将多年冻土层依照土性和热物理性质等分层,大大提高了多年冻土指标的计算精度。可以模拟多年冻土分布,以及气候、水文、植被和碳氮循环等的影响和响应,以及多年冻土预报的工作。多元及长周期多年冻土特征参数的取得,为我们多尺度多角度刻画多年冻土提供了可能。模型的结构越来越完善,但是目前对深层的水热问题的处理还有待改进^[27]。模型主要包括 n 系数模型^[28-29]、Shaw模型^[30]、Coup model^[31]、热平衡模型^[32-33],以及数据驱动模型^[34]等。其中Colm^[35]、Coup model^[36-37]、Shaw模型^[38]等在我国青藏高原和东北地区的小区域得到了应用。这类模型需要大量数据去驱动。

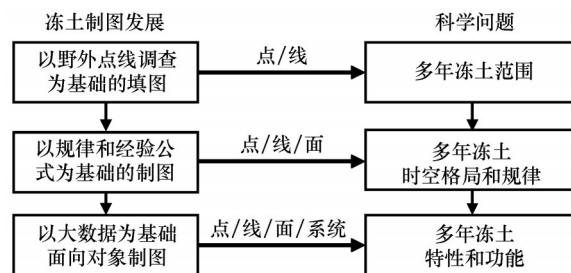


图1 多年冻土工程地质制图的发展阶段

Fig. 1 Development steps of engineering geological mapping of permafrost

2 多年冻土工程地质制图内容的发展阶梯

多年冻土的相关图件是区域性综合研究的主要成果。利用不同的自然-地质-多年冻土要素之间的相关关系,对不同尺度上的多年冻土基本属性,多年冻土特征,服役功能等的组成、数值、时空分布和相关关系等综合特征以及经济-社会要素影响下的各种特征的描述和可视化表达过程。多年冻土工程地质制图的内容的发展可以分为三个阶梯:

第一阶梯:基本属性的研究。多年冻土存在条件的小区划图(包括海底的多年冻土分布),多年冻土类型、多年冻土厚度、年平均温度^[18,39],多年冻土层的厚度和冷生构造图^[11],土的季节冻结和融化图等。这类图件是表述多年冻土及其基本要素的空间变化特征。这类图件是作为区域冻土基础工程地质资料使用,以区域短时间高精度的矢量图件为主。

第二阶梯:多年冻土特征属性。主要是多年冻土地质过程现象图^[40],古冻土分布图^[41-42],以及自然要素动态和一般施工措施有关的多年冻土预报以及区划图,多年冻土地下冰分布图^[43],多年冻土区水文地质图^[44],多年冻土深部地热条件,景观区划图^[45],多年冻土灾害风险性^[43],多年冻土脆弱性评价^[46]等有实用任务的专业评价图。在制图过程中,需要对研究的内容有明确定义和分类区划的标准^[7]。在进行分类时,需要将多年冻土的基本形式参数与制图目标结合,很多时候需要将多个多年冻土基本要素进行综合,在这个过程中需要将多源数据进行归一和分类,定性和定量数据的综合考虑。这类图件包含的信息更多,且具有一定的实用性,以区域、局域尺度为主,在局域尺度可以达到较高的精度,部分图件可以描述特征要素时间变化特征。

第三阶梯:多年冻土功能属性。在多年冻土属性研究的基础上,进行多年冻土-工程-环境以及人类社会之间动态变化和相关关系的研究,针对系统的整体性、要素的相关性、等级结构,动态和时序特征。用动态的系统的角度开展相关研究工作。多年冻土的功能属性主要包括工程服务属性、资源属性、环境属性^[47]、冻土生态^[48-49]等。应该是面向服务对象的一种功能性图件。比如,多年冻土工程地质条件区划图,这类图件需要考虑服务对象的要求,根据公路、铁路、输油管道等寒区工程建设和资源开采过程中对多年冻土功能性和比例尺要求不同。

除了多年冻土强度和变形方面的基本要求以外,还需要考虑其特殊的要求,比如高速铁路路基的差异变形等。根据服务对象的要求不同,设计不同比例尺和范围的图件与之匹配。就天然气水合物可能分布区预测图来说,不同的水合物的气体组分之间的差异,在形成时需要的温度压力条件存在差异,在制图时需要更多的考虑。部分图件还需要考虑社会经济要素。

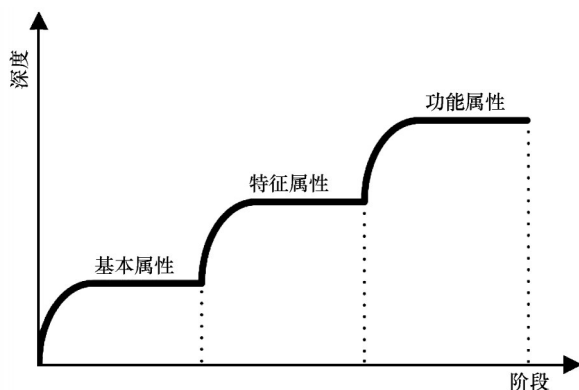


图2 多年冻土工程地质制图研究内容发展阶梯

Fig. 2 Development phases for research contents of engineering geological mapping of permafrost

就目前的研究工作,大尺度大区域的制图以单一的或者几个要素为主,比例尺在1:200万、1:1 000万不等,甚至更小。主要反映空间格局和地带性。因为数据获取难度较大,一般精度较低。局域尺度多年冻土工程地质制图比例尺较大,刻画精度高,内容丰富,能够较好的反映小区域内的实际情况。多年冻土工程地质制图的实用性越来越受到重视。

3 多年冻土工程地质制图工作方法的发展阶梯

多年冻土工程地质制图研究方法的发展阶梯与其科学问题研究内容的发展阶梯相匹配。工程地质学和地理学的方法在多年冻土工程地质制图中同样适用。研究方法的发展分阶段论述。

第一阶梯:在多年冻土工程地质制图发展的早期以单一专门的工程地质和地理学科学方法为主,比如:自然历史的分析方法,多年冻土类比法。通过踏勘、钻探、坑探、工程地质测绘、现场观测等技术手段的基础上,充分认识和了解区域基础工程地质条件,查明各种自然、工程地质条件和各种多年冻土现象、冰缘地貌以及它们之间的关系。通过点线的调查圈出研究要素的范围,比如年平均气温与

多年冻土年平均地温的关系^[50],年平均地温与海拔、纬度、大陆度的关系^[51],积雪、降水、植被、土性等对多年冻土的影响^[52]。即在区域特征要素空间分布特征基础上进行区域研究。虽然调查手段比较直接,但也为当时的区域经济发展提供了技术支持。

第二阶梯:两种以及两种以上方法的耦合。比如数学力学方法、模型模拟方法等。主要是通过研究对象原型的物理概念模型、数学模型,或者是基于基本规律的模拟进行多年冻土工程地质制图工作。这些工作基于自然历史分析方法基础上进行的。数学力学方法是只针对某一科学问题,根据研究目标所确定的边界条件和计算参数,应用理论公式或者经验公式,进行要素的定量计算。比如基于热传导方程的活动层厚度的计算,以 Stefan 公式、库德里亚采夫公式为代表。另外就是基于经验半经验模型和物理过程模型方法。在使用过程中,有时需要通过一些室内实验和现场的测试确定一些热物理以及其他计算所需性质指标,在测试数据的基础上,确定一些符合研究对象的基本规律,并对所使用的模型进行一些针对性调整,之后借助 GIS、MATLAB 等软件进行空间的模拟计算。大内存计算软件以及 3S 技术的发展,为冻土制图发展提供了技术支持。

第三阶梯:基于系统论的综合方法。指对研究对象放在一个特定的系统,具有特定的时间和空间尺度,从系统整体出发,全面的分析系统中要素与要素、要素与系统不同结构,要素与系统,系统与其他的系统等系统组织之间内部和外部联系及规律^[53]。在研究中将研究系统划分范围不同的圈层系统,比如“大气-工程-冻土圈”,“大气-生态-冻土圈”等。在竖直剖面上分为“大气-附面层-活动层-冻土层”,或者根据土的性质进行更详细的分层。在研究过程中,充分考虑载体的现实情况和动态变化特征^[54],研究的精度和深度明显提升。特别是半球全球尺度的国际、国家研究和驱动模型的产生,使得冻土制图内容更加丰富。

总的来说,各种方法各有补充,需要综合应用。现阶段多年冻土工程地质制图的工程流程如图 3 所示。首先根据科学问题制定制图的需求和目标。在此基础上确定制图的原则、范围和比例尺。区域制图的比例尺一般以小比例尺为主,线路工程等局域尺度的比例尺一般要求以大比例尺为主^[45]。图件比例尺依据中国测绘局相关规定执行。

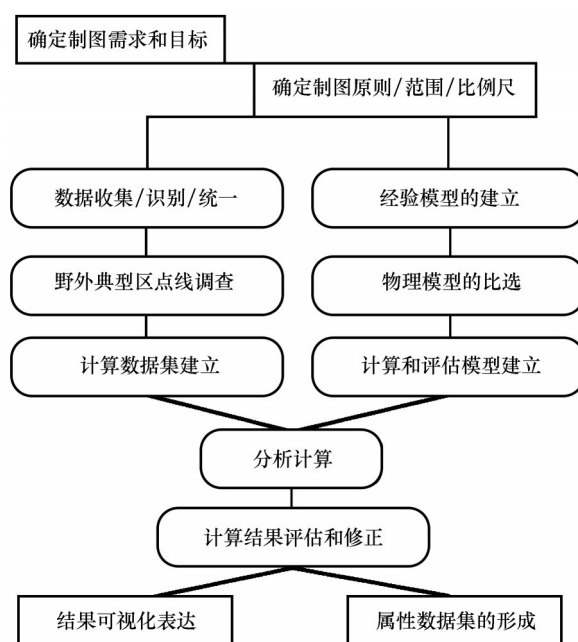


图 3 多年多年冻土工程地质制图的工作流程

Fig. 3 Working procedure of engineering geological mapping of permafrost

4 多年冻土工程地质制图过程

4.1 数据分析

对于大多数多年冻土工程地质制图来说,需要对数据的空间分布和有效性进行分析。模型模拟和评估的结果与数据采样密度和精度密切相关。如图 4 所示,在青藏高原工程走廊的冻土分布制图中,2002 年收集到了 187 个数据点,2012 年仅收集到了 50 个数据点。在楚尔玛河地区,在 2002 年显示为高温极不稳定多年冻土,而在 2010 年显示为高温不稳定多年冻土,该区多年冻土是在发展,不是在退化,这与实际的监测结果不相符^[55]。所以在获得数据之后,要对定性要素进行定量化,其次对定量数据的精度和可靠性进行分析,剔除明显逻辑错误的数据。比如风速、气温等超过历史最大值的,需要剔除并用相近天气条件数据进行插补,保证数据的连续性和可靠性。再次,对数据空间上的分布均匀性进行评估,数据本身数值的大小和空间均匀性在计算过程中就表现出一定的权重信息,数据点分布不均会在插值过程中形成奇点,影响局部制图的效果。在数据分析的基础上,在数据不足区域进行重点区段的补充调查工作。调查工作需要首先根据景观区的划分选定重点区段,在重点区段对地形、地质建造、冻土现象进行描述,采用地球物理调查、现场测试、原位监测等措施对冻土进行细部和

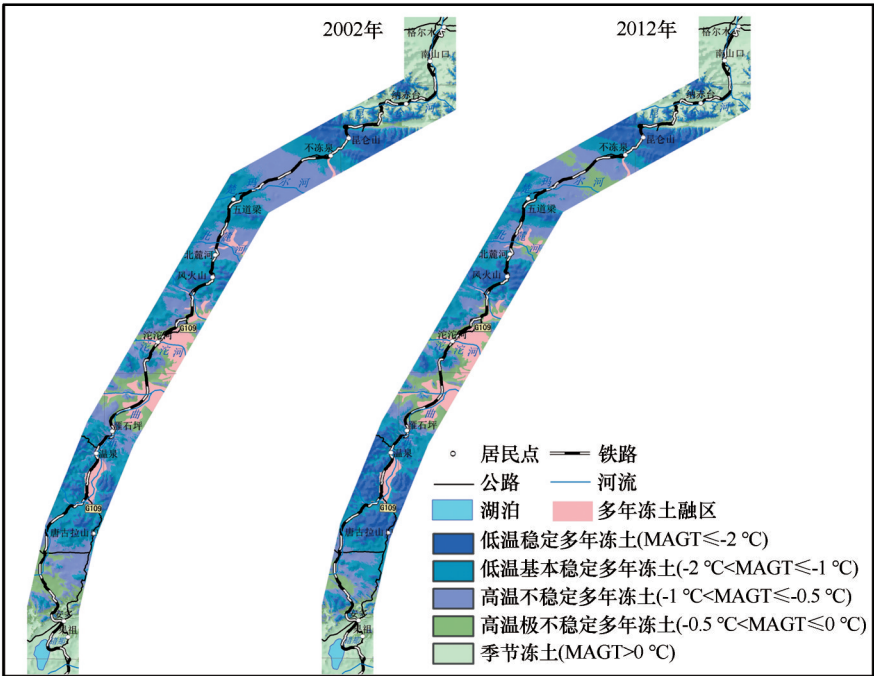


图4 1:25万不同样点数青藏高原工程走廊冻土分布制图
Fig. 4 Mapping (1:250 000) of permafrost distribution with different points along the Tibetan Plateau engineering corridor in 2002 and 2012

定量特征指标的分析。最后将收集的数据和补充调查的数据进行统一和融合,平衡制图精度。图件的精度受输入元素精度最低的要​​素控制。图件的输出精度与要素精度是有差异的。

4.2 模型确定

在数据评估和融合的基础上,需要进行模型的比选。借助概率和数理统计的方法,建立地理、地质、气象等其他要素与多年冻土特征要素的关系,并讨论其空间变异性。模型要素本身的空间属性也会明显影响计算结果。比如:在年平均地温的计算中,就考虑降水条件和不考虑降水条件相比,稳定和极稳定多年冻土的面积增大4.3%,季节冻土面积增加0.58%,其它多年冻土面积相应减小(图5)。在统计关系和数据空间属性的基础上,结合使用模型需要输入元素和数据精度,根据制图目标和需要确定计算或者评估模型。模型的选取是多年冻土工程地质制图的核心内容。

4.3 结果评估和修正

借助 ArcGIS 和 MATLAB 等空间分析软件和数据处理软件进行数据的计算和模拟工作。输出多年冻土的特征属性数据,比如,不同深度的地温、活动层厚度、地下冰情况、冻土厚度、年平均地温等指标。将计算结果与实测数据进行比对和空间误差分析,以残差或者其他误差指标对计算结果进行修

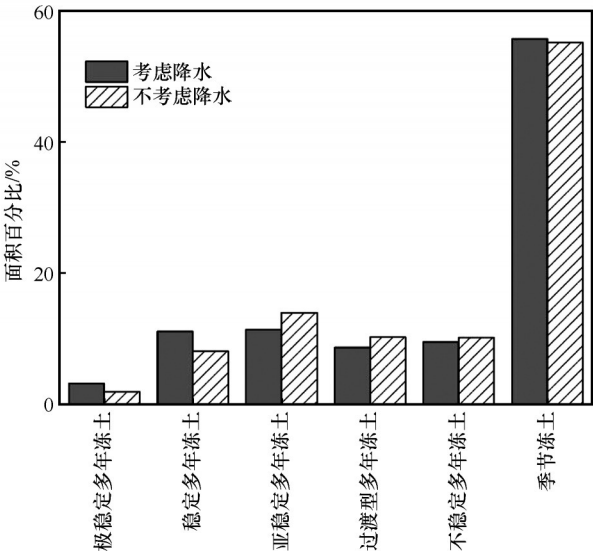


图5 考虑和不考虑降水要素在青藏高原多年冻土计算中的差异
Fig. 5 Area ratios of various permafrost and seasonal frozen soil on the Tibetan Plateau calculated in considering precipitation or not

正,最终形成指定范围和比例尺的多年冻土图件,图件中的其他要素包括:图例、指北针、责任表、边框等,依照“水利水电工程地质制图标准”“综合工程地质图图例及色标”等相关规范执行,形成标准化的多年冻土图件。最后将计算得到的图件属性数据进行集成,并形成相关的说明文件。

5 结论

多年冻土工程地质制图的研究内容和制图方法根据制图需求和目标而不断变化,所解决科学问题的深度和广度也不断增加。在现阶段,综合实测、气象、遥感、地理以及分析数据,建立可靠的定量化评估和计算模型,实现相关的制图目的。在制图过程中,对数据的识别、验证、重组,尺度的匹配,方法的可靠度,结果的验证等是制图的重要内容。借助 ArcGIS、MATLAB 等软件实现数据分析和可视化表达,并快速有效地耦合多种评估制图方法,使得制图内容更为丰富。不同区域之间相同内容的比对和综合,将会使得多年冻土的制图结果有更广泛的应用。学者们结合实践需要,可进行不同时空尺度和特征要素的多年冻土工程地质制图。随着 IPCC 等预测和气候模式的出现,使得我们不但认识到“现在”多年冻土的情况,也可以预测将来多年冻土特征的变化,为区域的冻土科学研究、寒区工程建设以及区域的社会经济发展提供基础数据支持和借鉴作用,使得区域研究和工程设计更具有前瞻性。所以,多年冻土工程地质制图要使用更多的局域尺度拓展和大区域应用的系统方法,提高多年冻土工程地质制图的应用程度和应用范围。

参考文献(References):

- [1] Zhang Tingjun, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere[J]. *Polar Geogr.*, 1999, 23: 132-154.
- [2] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. *Geocryology 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.]
- [3] Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling. Impacts of climate change on permafrost and cold zone environment in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 161-173. [金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 161-173.]
- [4] Wu Qingbai, Niu Fujun. Permafrost changes and engineering stability in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(2): 115-130. [吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. *科学通报*, 2013, 58(2): 115-130.]
- [5] Zhu Xun. The step developments is the important from of material world movement and cognitive movement of human being. *Studies in dialectics of nature*[J]. 2012, 28(12): 1-8. [朱训. 阶梯式发展是物质世界运动和人类认识运动的重要形式[J]. *自然辩证法研究*, 2012, 28(12): 1-8.]
- [6] Nikiforoff C. The perpetually frozen subsoil of Siberia[J]. *Soil Science*, 1928, 26: 61-81.
- [7] Heginbottom J A. Permafrost mapping: a review[J]. *Progress in Physical Geography*, 2002, 26(4): 623-642.
- [8] Qiu Guoqing, Liu Jingren, Liu Hongxu. *Geocryological glossary*[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1994: 82-83. [邱国庆, 刘经仁, 刘鸿旭. 1994. 冻土学词典[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1994: 82-83.]
- [9] Lanzhou Institute of Glacial and Frozen Desert, Chinese Academy of Sciences. *Frozen soil*[M]. Beijing: Science Press, 1975: 19-23. [中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所. 冻土[M]. 北京: 科学出版社, 1975: 19-23.]
- [10] Li Shude, Cheng Guodong. *Map of frozen ground on Qinghai-Xizang Plateau*[M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996. [李树德, 程国栋. 青藏高原冻土图[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996.]
- [11] Cheng Guodong. Compilation principle of water content map of large scale permafrost[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(3): 53-57. [程国栋. 大比例尺多年冻土含水量图的编制原则[J]. *冰川冻土*, 1981, 3(3): 53-57.]
- [12] Funk M, Hoelzle M. A model of potential direct solar radiation for investigation occurrence of mountain permafrost [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1992, 3(2): 139-142.
- [13] Anisimov O A, Nelsom F E. Permafrost distribution in the northern hemisphere under scenarios of climate change [J]. *Global and Planetary Change*, 1996, 14: 59-72.
- [14] Williams D J, Burn C R. Surficial characteristics associated with the occurrence of permafrost near Mayo, Central Yukon Territory, Canada [J]. *Permafrost and periglacial Processes*, 1996, 7(2): 193-206.
- [15] Panda S K, Prakash A, Jorgenson M T. Near-surface permafrost distribution mapping using logistic regression and remote sensing in interior Alaska[J]. *Giscience and Remote Sensing*, 2012, 49(3): 346-363.
- [16] Chen Shenbo. Permafrost classification on the Tibet Plateau based on surface emissivity retrieval from Terra-Modis data[C]//Presented at the IEEE International Geo-Science and Remote Sensing Symposium. Anchorage, Alaska, 2004, 4: 2699-2702.
- [17] Keller F. Automated mapping of mountain permafrost using the program permakart within the geographic information system Arc/Info [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, 3(2): 133-138.
- [18] Nan Zuotong, 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.]
- [19] Dingman S L, Koutz F. Relations among vegetation, permafrost, and potential insolation in central Alaska[J]. *Arctic and Alpine Research*, 1974: 37-47.
- [20] Smith M W, Riseborough D W. Permafrost monitoring and detection of climate change [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1996, 7(4): 301-309.
- [21] Luo Dongliang, Jin Huijun, Serge M. Distribution and changes of active layer thickness (ALT) and soil temperature (TTOP) in the source area of the Yellow River using the GIPL model [J]. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1834-1845.
- [22] Romanovshy V E, Osterkamp T E. Thawing of the active layer on the coastal plain of the Alaskan Arctic [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, 8(1): 1-22.
- [23] Wang Tao. 1:4 000 000 map of the glaciers, frozen ground and deserts in China[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2006. [王涛. 1:4 000 000 中国冰川冻土沙漠图[M]. 北京: 中国地图出版社, 2006.]
- [24] Romanovsky V E, Smith S L, Christiansen H H. Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the inter-

- national polar year 2007—2009: a synthesis [J]. *Permafrost and Periglacial processes*, 2010, 21(2): 106-116.
- [25] Brown J, Hinkel K M, Nelson F E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results[J]. *Polar geography*, 2000, 24(3): 166-258.
- [26] Guglielmin M, Aldighieri B, Testa B. Permaclim: A model for the distribution of mountain permafrost, based on climatic observations [J]. *Geomorphology*, 2003, 51(4): 245-257.
- [27] Stevens M B, Smerdon J E, Gonzalez-rouco J F, et al. Effects of bottom boundary placement on subsurface heat storage: implications for climate model simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L02702.
- [28] Lunardini V J. Theory of N-factors and correlation of data. Proceedings of third international conference of permafrost [M]. National Research Council of Canada, Ottawa, 1978: 40-46.
- [29] Klene A E, Nelson F E, Shiklomanov N I. The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface, Kuparuk River Basin, Alaska, USA. *Arctic* [J]. *Antarctic and Alpine Research*, 2001, 33(2): 140-148.
- [30] Flerchinger G N. The simultaneous heat and water (SHAW) model: Technical documentation [C]//Northwest watershed research center, USDA agricultural research service, Boise, Idaho, 2000.
- [31] Hoelzle M, Mittaz C, Etzelmuller B. Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European Mountain areas: An overview of current development [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, 12: 53-68.
- [32] Jorgenson M T, Kreig R A. A model for mapping permafrost distribution based on landscape component maps and climatic variables [C]//In proceedings of Fifth International Conference on Permafrost, Trondheim, Trondheim: Tapir Publishers, 1988, 1: 176-182.
- [33] Hoelzle M, Mittaz C, Etzelmuller B. Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European Mountain areas: an overview of current development [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, 12: 53-68.
- [34] Gissnas K, Etzelmuller B, Farbrøt H, et al. Cryogrid 1.0: permafrost distribution in Norway estimated by a spatial numerical model [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2013, 24(1): 2-19.
- [35] Xiao Yao, Zhao Lin, Li Ren, et al. Applicability of Colm model to single site simulation in plateau permafrost regions [J]. *Mountain Research*, 2011, 29(5): 633-640. [肖瑶, 赵林, 李韧, 等. Colm模型在高原多年冻土区的单点模拟适用性[J]. *山地学报*, 2011, 29(5): 633-640.]
- [36] Hu Guojie, Zhao Lin, Li Ren. Study on hydro thermal coupling simulation of frozen thawed soil based on COUPMODEL model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 356-362. [胡国杰, 赵林, 李韧, 等. 基于COUPMODEL模型的冻融土壤水热耦合模拟研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(3): 356-362.]
- [37] Zhang Wei, Wang Genxu, Zhou Jian, et al. Simulation of soil water heat process in permafrost region of Qinghai Xizang Plateau based on COUPMODEL [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1099-1109. [张伟, 王根绪, 周剑, 等. 基于COUPMODEL的青藏高原多年冻土区土壤水热过程模拟[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1099-1109.]
- [38] Guo Donglin, Yang Meixue. Simulation of soil temperature and humidity in seasonally frozen soil region in central Tibetan Plateau by Shaw model [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(6): 1369-1377. [郭东林, 杨梅学. Shaw模式对青藏高原中部季节冻土区土壤温、湿度的模拟[J]. *高原气象*, 2010, 29(6): 1369-1377.]
- [39] Ran Youhua, Li Xin, Cheng Guodong, et al. Distribution of permafrost in China: an overview of existing permafrost maps [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, 23(4): 322-333.
- [40] Li Shude, Cheng Guodong. Permafrost map of Qinghai Xizang Plateau [M]. Lanzhou: Gansu Culture Publishing House, 1996. [李树德, 程国栋. 青藏高原冻土图[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996.]
- [41] Vandenbergh J, French H M, Gorbunov A, et al. The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25-17 ka BP [J]. *Boreas*, 2014, 43(3): 652-666.
- [42] Wennrich V, Andreev A A, Tarasov P E, et al. Impact processes, permafrost dynamics, and climate and environmental variability in the terrestrial Arctic as inferred from the unique 3.6 Myr record of Lake El'gygytyn, Far East Russia: a review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 147: 221-244.
- [43] Zhang Zhongqiong, Wu Qingbai, Thermal hazards zonation and permafrost change over the QTP [J]. *Natural Hazard*, 2012, 61: 403-423.
- [44] Dai Changlei, Li Huiyu, Sun Yingna. Suprapermafrost Waters in the Cryolithozone [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. [戴长雷, 李卉玉, 孙颖娜. 寒区冻结层上水[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.]
- [45] Yershov. Principles of Geocryology (The third volume): Regional frozen soil science and historical frozen soil science [M]. Tong Boliang, trans. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2016: 5-13. [叶尔绍夫. 冻土学原理(第三册): 区域冻土学和历史冻土学[M]. 童伯良, 译. 兰州: 兰州大学出版社, 2016: 5-13.]
- [46] Hotaek P, Youngwook K, John S K. Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175(15): 349-358.
- [47] Wu Qingbai, Jiang Guanli, Zhang Peng. Assessing the permafrost temperature and thickness conditions favorable for the occurrence of gas hydrate in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51: 783-787.
- [48] Boike J, Grau T, Heim B, et al. Satellite-derived changes in the permafrost landscape of central Yakutia, 2000—2011: wetting, drying, and fires [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 116-127.
- [49] Hollesen J, Elberling B, Jansson P E. Future active layer dynamics and carbon dioxide production from thawing permafrost layers in Northeast Greenland [J]. *Global Change Biology*, 2001, 17(2): 911-926.
- [50] Tong Changjiang, Wu Qingbai. Permafrost zonation of ground temperature and stability of engineering constructions in the western region China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 166-173. [童长江, 吴青柏. 我国西部多年冻土地温与工程建筑物稳定性. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊1): 166-173.]
- [51] Cheng Guodong. A study on the laws of high altitude permafrost regions in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1984, 39(2): 185-193. [程国栋. 我国高海拔多年冻土地带规律之探讨[J]. *地理学报*, 1984, 39(2): 185-193.]
- [52] Wu Qingbai. Study on change of frozen soil environment and

- engineering suitability under human activities [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2000. [吴青柏. 人类活动下冻土环境变化与工程适应性研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2000.]
- [53] Zhang Ze, Ma Wei, Zhang Zhongqiong. System and method of geocryology in engineering geology[J]. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2016, 41(2): 351-360. [张泽, 马巍, 张中琼. 工程地质学中冻土研究的系统与方法[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2016, 41(2): 351-360.]
- [54] Trofimov V T, Korolev V A, Voznesensky E A. Soil science [M]. Moscow: Moscow State University Press, 2005.
- [55] Wu Qingbai, Zhang Tingjun, Liu Yongzhi. Thermal state of the active layer and permafrost along the Qinghai-Xizang (Tibet) Railway from 2006 to 2010[J]. The Cryosphere, 2012, 6: 607-612.

Stepwise development of the engineering geological mapping in permafrost regions

ZHANG Zhongqiong¹, LIN Fang², WU Qingbai¹, ZHANG Ze^{1,3}, ZHANG Peng¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Geoscience Institute of Philosophy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Institute of Cold Regions Science and Engineering, School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The engineering geological mapping of permafrost is one of the basic contents of regional and historical studies of permafrost. The engineering geological mapping of permafrost is a quantitative description of the properties of permafrost under the influence of various natural, engineering, environmental factors at the particular time and space scale. The scientific problems solved by the engineering geological mapping of permafrost have been improved constantly from the distribution of permafrost to regularity and pattern and then to permafrost function. The content of mapping has developed from the study of basic elements, feature elements and functional elements of permafrost to constantly increase practicability. The method has gradually developed from basic geography and engineering geological method to system theory method. In a word, the engineering geological mapping of permafrost shows the periodicity on the time scale and steps on the space scale. The depth and extent of knowledge have increased. It provides basic data and technical support for the basic scientific research, engineering construction, resource and environment conservation in permafrost regions.

Key words: permafrost; engineering geological mapping; development phase

(责任编辑: 周成林; 编辑: 周成林)