

doi:10.3799/dqkx.2016.027

工程地质学中冻土研究的系统与amp;方法

张 泽, 马 巍, 张中琼

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 73000

摘要: 冻土属土质学范畴内的一种“特殊”土类, 以地学研究的问题类型和俄罗斯工程地质学理论为基础, 利用科学哲学的手段对冻土学研究的问题、系统类型、学科结构、研究任务、科学方法等方面进行了阐述。首先, 对冻土进行了重新定义, 从冻土的形态多样性入手说明了冻土学的研究对象; 其次, 提出冻土学中“今日”、“昨日”和“明日”3 个问题; 再次, 针对冻土学研究的系统类型, 并结合工程、冻土和环境的动态变化关系, 将冻土学研究系统分为冻土—工程系统和冻土—环境系统, 并从各个子系统(圈)的动态变化入手深入阐述其相互作用和相互制约的关系; 然后, 将广义工程地质学的学科结构应用于冻土学, 并针对现今冻土学的发展状况, 简要地展望了冻土学未来的理论—方法研究任务; 最后对冻土学的科学研究方法进行了分类, 并在此基础上阐述了冻土学与其他学科的相互联系。

关键词: 工程地质学; 冻土学; 研究理论; 研究任务; 科学方法; 学科结构。

中图分类号: P642.14

文章编号: 1000-2383(2016)02-0351-10

收稿日期: 2015-07-03

System and Method of Geocryology in Engineering Geology

Zhang Ze, Ma Wei, Zhang Zhongqiong

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Frozen soil is categorized as a “special” soil type in soil science. We use principles of philosophy to describe research issues, system types, discipline structure, research objectives and research methodology for geocryology in this paper, on the basis of problem types of geology and Russian theories of engineering geology. First, frozen soil is redefined, and then the research objectives of frozen soil are illustrated from their morphological diversity; secondly, three problem types in the field of frozen soil are generalized as follows: “issues of today”, “issues of yesterday” and “issues of tomorrow”; thirdly, the research system of geocryology is divided into the permafrost-engineering system, and the permafrost-environment system, according to its system types and the dynamic change among engineering, frozen soil and environment, and the interaction and mutual conditioning of its various subsystems (circle) are expounded; fourthly, the prospection of theory and practice of geocryology is discussed in the framework of discipline structure of general engineering geology; finally the research methods of geocryology are classified, and the interrelation between the frozen soil and other disciplines is explained.

Key words: engineering geology; geocryology; theoretical research; research missions; scientific method; discipline structure.

0 引言

冻土地区占据了整个地球陆地表面近四分之一的面积(Brown *et al.*, 1997), 冻土是地球系统 5 大圈层之一, 是冰冻圈的重要组成部分, 冻土学是研究

冰冻圈的两大主要学科之一(李新和程国栋, 2002; 程国栋, 2005)。冻土学形成(20 世纪 30 年代)至今已有 80 余年的历史, 其本身是一门实用性很强的科学, 它的产生和发展与人类的生产和生活有着密切的关系(程国栋和周幼吾, 1988)。冻土学是由于冻土

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No.2012CB026106); 国家自然科学基金项目(Nos.41301070, 41301071); 中科院西部之光博士项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目(第 46 批)。

作者简介: 张泽(1981-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事寒区工程地质、冻土工程与环境等方向的研究。E-mail: zhangze@lzb.ac.cn

引用格式: 张泽, 马巍, 张中琼, 2016. 工程地质学中冻土研究的系统与amp;方法. 地球科学, 41(2): 351-360.

地区的农业、经济和工程建设的需要而逐渐形成的一门独立的学科,在其形成初期就分为两个分支:普通冻土学和工程冻土学.随着冻土学的发展和与其他学科的相互渗透联系,不断有新的研究方向和交叉学科出现.冻土学所解决的基本问题,一方面属于自然—历史科学范畴,另一方面又属于工程和其他应用学科范畴(程国栋和周幼吾,1988;周幼吾等,2000).但由于社会经济发展的需要,冻土学研究的方向一直比较偏向于应用.作为一门独立的学科,冻土学一直没有完善的系统理论和科学研究方法,而这些是独立学科应有的科学哲学体系.一门学科的理论和方法论体系是对本学科的基本认知和理解,是认识、分析和解决该学科问题的一般方法,对学科的发展和进步有着决定性的作用.冻土属土质学范畴内的一种“特殊”土类,本文以俄罗斯的土质学理论为基础,利用科学哲学的手段对冻土学中所研究的问题类型、系统类型、研究任务、科学方法、学科结构等进行了概述.

应当说明的是,由于科学研究的综合性发展趋势,交叉边缘学科不断发展,并且大大推动了科学进步,因此对于冻土学科研究的着眼点可能有所不同,本文以土质学理论为基础对冻土学的研究系统、理论与方法进行阐述.没有百家争鸣,就没有科学的繁荣和理论的发展,希望本文能为冻土学的发展起到抛砖引玉的作用.

1 冻土及冻土学的定义和研究对象

冻土是地表层和岩石圈与地球内部以及大气圈之间热交换的结果,其发生的必要条件是地壳表层热消耗超过来自地球内部的热量(周幼吾和吴紫汪,2010).对于冻土的定义,一般是指温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,并含有冰的各种岩土和土壤.研究土的冻结和融化,冻土区地质过程的形成、发育和分布规律,以及在自然或人为影响下冻土的变化规律和控制方法的科学统称为冻土学(geocryology)(周幼吾等,2000).由于冻土的分布、厚度、温度及稳定性在很大程度上决定了地球表面的气温,自 1990 年以来冻土学成为了气候变化研究中的重要组成部分(Nelson,2003).冻土学的研究对象为地壳表层冻土及其形成的冻土层(体),而研究内容则是冻土的成分、状态、构成和性质.因此根据现今冻土研究的理论基础,冻土可以准确的定义为:温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,并含有冰的各种岩土、土壤、沉积物以及人工地质构

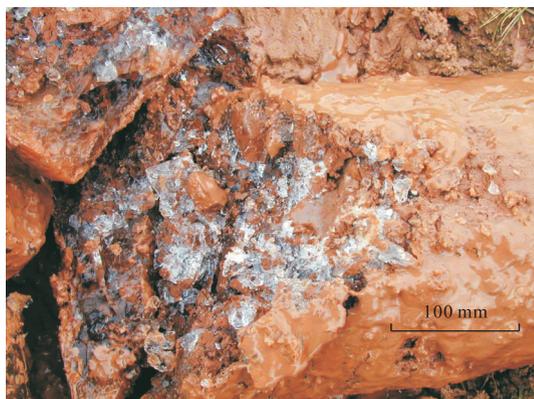


图 1 冻土中的冰

Fig.1 Ice in the permafrost

成物.

冻土是一个既能够主动影响人类工程活动,又能够被动受人类活动影响的多组分能量动态平衡系统(Williams and Smith,1989).总体上来讲,冻土是一个多矿物的、有机的、多组分的和多相的系统(图 1),其中包括固相(冰和土颗粒)、液相和气相.由于冰的特殊性质,有些学者认为冻土是一个 4 相体,即冰是“第 4 相”.根据近代 X 射线的研究结果,证明了冰具有四面体的晶体结构.因此另外一些学者将冰归为矿物的一种,从而认定冻土由固、液、气 3 相组成(Glen,1987;Yershov,1995;Petrenko and Whitworth,1999).

冻土存在的形态多种多样,并且能够在很短的时间内改变自己的成分(如含水量和含冰量)、状态(正冻—冻结—正融)和性质(如物理、化学和力学性质).关于冻土的多样性主要是指冻土特征的多样性(形态)和成因的多样性(形态不同的原因).冻土形态特征的多样性主要表现在冻土参数(成分、状态和性质)复杂的变化规律上.相对于一般的土质学与土壤学,冻土学中运用的参数量要大得多,随着研究工作的发展,还会出现更多的参数,或者更多的方法来描述冻土形态的多样性.

2 冻土学研究中的问题及系统类型

2.1 问题的类型

在任何科学范畴内科学问题的解决都离不开时间,时间是引起物质与世界变化的根源.冻土学属于地学范畴,其科学问题的研究也离不开时间.根据地学研究的问题类型,冻土学也可以分为 3 种研究问题类型:“今日”、“昨日”和“明日”.

“今日”问题主要是形态学问题,是分析冻土的成分、状态、构成和性质.研究的过程是要回答:冻土是什么?冻土的质量如何?对于这两个问题的解答,首先要从室内试验和野外勘测中得出相应的冻土参数,进而分析、判定和解决实际中的工程问题.在工程问题的解决方面,冻土学运用的科学方法论与工程地质学一致.

“昨日”问题主要是成因问题,是对客体形成历史的研究.那么在冻土学中,针对这一问题需要回答:冻土存在形式的原因是什么?它是怎样形成的?形成的过程又如何?冻土学中的“昨日”问题包括冻土形成的历史、成因以及过程.这个问题的解决必须以“今日”问题的答案为基础,分析冻土形态随物理时间的变化过程,即分析、研究地质时间框架下冻土形成的历史、成因以及过程.例如, French(1998)认为地面冰和冰缘地貌地层分析可以帮助阐明过去的气候变化以及冻土的形成过程.

“明日”问题主要是预测和预报,是对客体变化和发展的研究.关于这个问题需要回答:在未来各种条件影响下,冻土如何变化?能变化到什么程度?其主要预测未来(物理时间和地质时间)受众多条件影响下冻土(多组分动态系统)变化的过程和结果.地学中未来时间与空间变化的研究方法也可以运用于冻土学.冻土学中的“明日”问题是预测人为—自然活动过程影响下冻土的时空变化.“明日”问题的解决需要以“今日和昨日”两个问题的答案为基础(图 2),即首先要了解冻土目前的形态(成分、状态、构成和性质)和冻土形成的历史、成因以及过程,在此基础上才能较为准确地解决冻土的“明日”问题.

2.2 系统的类型

冻土学的系统研究将工程建筑和地质环境相互

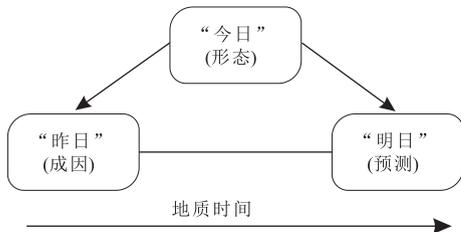


图 2 冻土学研究问题的类型:“今日”问题(形态学)、“昨日”问题(成因)和“明日”问题(预测)

Fig.2 The types of researchable problem in Geocryology: problem of “Today” (morphology), problem of “Yesterday”(genesis) and problem of “Tomorrow” (prediction and forecast)

完美地结合在一起.要在优化工程的设计和施工,以及人力和资源的使用达到最优化的基础上,保证工程建筑和地质环境在某一限定时段内处于稳定的状态,需要对其自然条件、工程条件和地质环境进行系统的研究.系统是由若干要素以一定结构形式连接构成的具有某种功能的有机整体, Trofimov *et al.*(2005)将土质学中的系统研究类型分为 3 种(图 3):(1)现实状态的自然—地质系统;(2)理想状态的自然—工程—地质系统;(3)现实状态的自然—工程—地质系统.

对现实状态下的自然—地质系统开展研究是前期设想建筑区域的工程勘察阶段,需要对系统中岩土的成分、构成、状态、性质(工程地质条件)、成因以及形成规律(形态学和成因问题)进行全面的掌握.

对理想状态下的自然—工程—地质系统开展研究是工程的设计阶段,是在真实掌握设想建筑区域土体的形态学和成因问题的基础上,选择建筑地基的类型以及建筑的类型和形状;并对工程建筑和地质环境的相互作用进行分析、模拟和预测.

对现实状态下的自然—工程—地质系统开展研究是随着工程建设的完成而出现的.在这一阶段,需要对工程建筑和地质环境的相互作用进行长期监测,利用岩土体的监测结果来判定工程建筑的稳定性.如果稳定性出现问题,则需通过监测结果对岩土体进行及时地加固和补救.

工程建设的前期勘察是分析和研究现实状态中自然—地质系统对人类工程建筑的适应性.当工程建筑建成后整体系统发生变化,人们对现实状态的自然—工程—地质系统是否仍是一个相对稳定的系统却考虑的较少,这也是工程中存在潜在安全隐患

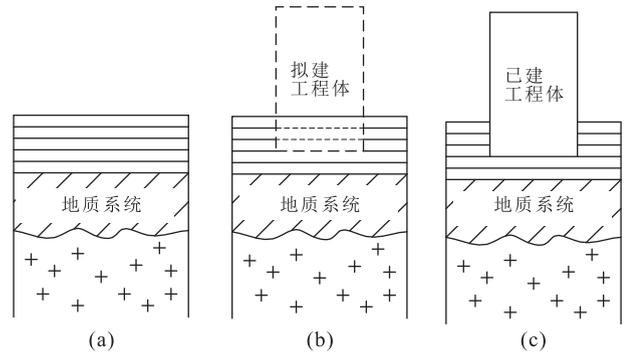


图 3 土质学中的系统研究类型

Fig.3 The types of researchable system in soil science a.现实状态的自然—地质系统;b.理想状态的自然—工程—地质系统;c.现实状态的自然—工程—地质系统;据 Trofimov *et al.*(2005)

的重要原因。冻土地区建筑物对冻土条件有重大影响,由于冻土的敏感性较强,勘察时建筑条件往往是良好的,但在建筑物建造和运营的过程中会发生恶化(程国栋和周幼吾,1988;马巍等,2012)。即使按照冻土条件对建筑物进行了专门设计,但如果气候变暖使整体安全性和稳定性超出了设计标准,仍然会对建筑物造成严重损害(Nelson,2003)。这些正是没有对这种系统变化进行深入研究分析的结果,因此对于冻土学的系统研究,其意义可能比在土质学中更为重大。

冻土学研究的最终目的是服务于人类,冻土学的产生和发展也是从冻土区的经济发展和工程建设实践中开始的。随着经济发展进程的加快,大量的工程建设也会随之出现,人为的活动影响到了冻土,冻土状态的变化也会引起环境的变化,同时也会影响工程的稳定性(图 4),这些由于冻土引起的所有动态变化最终将影响到人类。冻土学的现代理论研究表明,冻土不仅仅是一种工程地质环境,它还是寒区环境十分重要的组成部分。寒区的地质、自然地理、地貌、水文、土壤、生物等因素制约着冻土的消长,而冻土反过来对这些环境因素又有着重大的反作用(程国栋和周幼吾,1988)。

冻土、工程与环境之间的动态变化看似比较复杂,但是分解开来就是冻土与工程和冻土与环境的动态变化,将其分别看成两个系统,即冻土—工程系统以及冻土—环境系统(图 5)。这两个系统是由相互关联的若干元素(子系统)组成的两个集合,并且是具有特定功能的两个有机整体,而且这两个系统又从属于另外一个更高的系统,即工程—冻土—环境系统。

冻土—工程系统与冻土—环境系统分别为动态和复杂的两个整体,系统中的各个元素(子系统)按照一定的方式相互联系、相互依存、相互作用和相互制约。由于对冻土学中冻土—工程—环境动态变化关系的研究具有整体性、关联性、等级结构性、动态

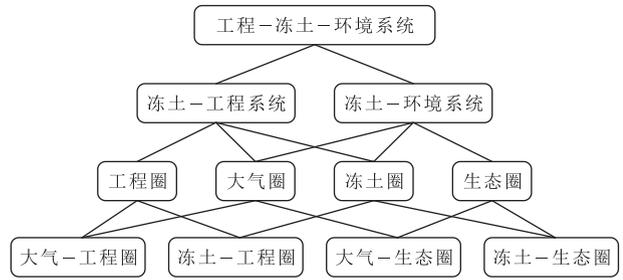


图 5 工程—冻土—环境系统

Fig.5 Engineering-permafrost-environment system

平衡性、时序性等特征,而这些特征是系统具有的基本特征,并且符合系统论的整体观念这一核心思想,因此引入系统论的基本思想方法,就是把所研究和处理的对象当作一个系统,分析其结构和功能,研究其中各个要素的相互关系和变动的规律性,并从优化系统观点去发现问题、分析问题和解决问题(李志才,1995)。

作为一个系统,首先要包含至少两个元素,并且元素需按一定方式相互联系(Bertalanffy,1987)。冻土—工程系统最基本的 3 个元素是大气圈、工程圈和冻土圈。这 3 个最基本的元素相互作用又在冻土—工程系统中组成了两个子系统:大气—工程圈和冻土—工程圈。在寒区这 3 种最基本元素相互作用的过程是大气环境的变化作用于工程建筑,再由工程建筑传递到冻土;冻土在这种影响下发出响应并且产生变化,从而影响到工程建筑(图 6)。

根据土质学中的系统研究类型划分,冻土—工程系统属于现实状态的自然—工程—地质系统,工程圈位于大气圈和冻土圈的中央,是大气圈影响冻土圈的介质。在工程未建阶段,整体的系统属于现实状态的自然—地质系统,大气圈与冻土圈发生水热交换,虽然两者之间产生相对复杂的水热变化不连续层,然而自然—地质系统处于相对稳定的状态。由于工程圈的介入,使自然—地质这一相对稳定的系统状态发生改变,其变化的过程是大气、工程和冻土圈 3 个基本元素相互作用的过程,也是冻土—工程系统向稳定状态发展的过程,而这一过程又恰恰是工程建筑稳定出现问题的关键阶段。由于多年冻土的复杂性,以及人们对生态环境保护和冻土工程问题还没有充分的认识和理解,已建工程先后出现了大量的工程病害(Brewer,1983;Ma et al.,2009)。

因此在整个冻土—工程系统的研究中,要瞄准工程圈这一介质,分别对大气—工程圈和工程—冻土圈进行研究。大气—工程圈是指大气与工程界面

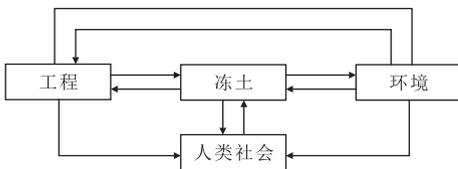


图 4 冻土、工程、环境及人类社会的相互关系

Fig.4 Relationships among permafrost, engineering, environment and human society

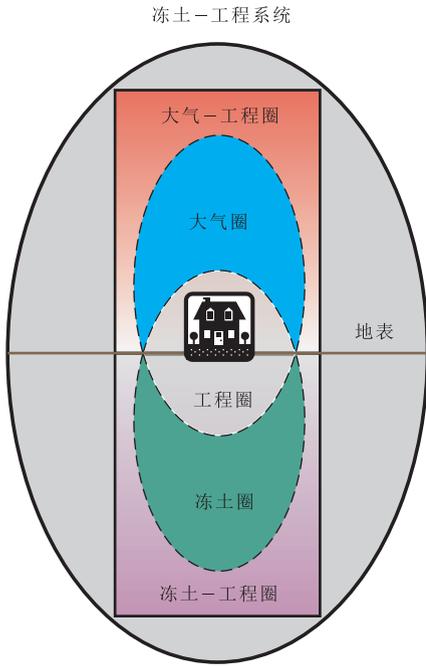


图 6 冻土-工程系统
Fig.6 Permafrost-engineering system

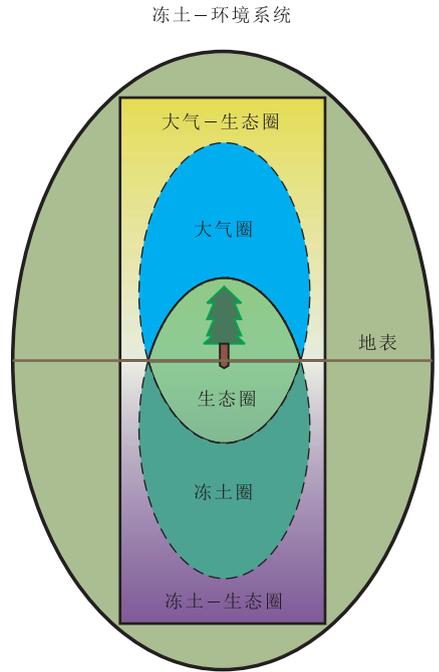


图 7 冻土-环境系统
Fig.7 Permafrost-environment system

之间的相互关联系统,大气圈中的风向与风速、温度、湿度、气压、降雨、辐射等对工程的影响不可忽视,同时工程建筑的结构、使用材料的特性、边界层性质等,也是影响大气圈与工程圈产生能量、水热交换与积累的重要因素,而这种交换会进一步引起工程建筑底部与冻土地基的水热交换,从而引起冻土圈对工程圈的响应.由于工程圈对冻土圈的水热传输,引起冻土的温度、水分和形态发生变化,这种变化会威胁到工程建筑的稳定性.大气、工程和冻土圈是一个统一的整体,冻土-工程系统中这 3 者之间水热传输的综合影响是目前迫切需要解决的关键问题.

冻土-环境系统最基本的 3 个元素是大气圈、生态圈和冻土圈.这 3 个基本元素分别组成两个子系统:大气-生态圈和冻土-生态圈,这一点与冻土-工程系统中的子系统在组合上一致.大气圈对生态圈有着决定性的影响,空气的温度、降水以及太阳的辐射等都是生态圈稳定必不可少的因素,生态圈与冻土圈也是一个相互影响相互适应的关系(图 7).

生态圈覆盖的植被可以保护冻土,冻土的水热过程也会影响到生态的发育.冻土的水热过程与植被生长之间存在着相互作用的关系,冻土的水热过程一旦被破坏,将引起冻土退化、草原退化、植被退化、沙漠化趋势增大以及优势植物种群发生逆向演替,最终导致整个生态圈的退化(吴青柏等,2000,

2003;郭正刚等,2007;王根绪等,2007;Yang *et al.*, 2010;罗栋梁等,2014;林战举等,2015).近几十年以来引起冻土退化的主要因素是气候的变暖,人为活动在局部起到了加速的作用(姚檀栋等,2013).因此在冻土-环境系统中,大气-生态圈是指气候变化与生态植被的关系,即气候变化的规律和极端气候对生态植被的影响,以及生态植被对气候变化的响应;冻土-生态圈是指冻土与植被间的关系,即冻土区生态系统的演化规律和环境的变化规律.

冻土区工程与环境的相互影响关系是冻土-工程与冻土-环境两个系统的相互影响关系.在人类社会追求不断发展的过程中,改造自然、利用自然必然会引起寒区冻土环境的变化和失衡,冻土环境的不断变化会影响寒区环境变化平衡(吴青柏等,2000).人类活动是影响冻土环境的最直接影响因素之一,寒区工程建筑物、森林砍伐、工程开挖、铲除植被、人为的地面改造等,破坏了原有的生态平衡,并且强烈地改变了地表温度使地表产生热侵蚀,影响到地下热流、地中热流等.这些人为因素干扰了地温,使冻土产生了热融蚀.这些作用会导致地下冰融化,从而改变冻土环境以及冻土作为地基土的工程性质,以至于影响到冻土区工程的整体稳定性(程国栋,2002;吴青柏等,2003).研究表明,在 22 世纪的北半球可能发生广泛的冻土退化(Stendel and

Christensen, 2002), 由此也将会对自然生态系统和人类活动带来严重的影响 (McCarthy *et al.*, 2001; Nelson *et al.*, 2002).

3 冻土学的学科结构

广义的工程地质学科分类是将工程地质学分为土质学 (I)、工程地质动力学 (II) 和区域工程地质学 (III) (Sergeev, 1985). 在此分类基础上, 将冻土学的学科结构分为 3 个方向 (图 8): (1) 冻土土质学; (2) 冻土工程地质动力学; (3) 冻土区域工程地质学.

冻土土质学是研究冻土的成分、状态、构成和性质, 以及冻土形成和变化规律的一门学科. 冻土工程地质动力学是在研究自然和人为活动影响下, 冻土区形成地壳表层地质过程的一门学科, 研究的主要内容是冻土区地壳表层地质过程的形态、成因、机理、时空分布规律及其预测、预报. 冻土区域工程地质学是研究冻土区工程地质条件、冻土的形成、空间分布以及时空变化规律的一门学科.

上述冻土学的 3 个基本学科研究方向交叉后, 形成另外 3 个新的交叉学科 (图 8): (a) 冻土工程地质动力土质学; (b) 冻土区域工程动力地质学; (c) 冻土区域土质学.

冻土工程地质动力土质学主要研究冻土区由于自然和人为活动形成的地壳表层地质过程影响下的冻土成分、状态和性质的变化及其预测. 冻土土质的变化是引起地质过程发生的必要条件, 因此该研究是诠释地质过程发生的机理、规律以及预测和预报的必要手段.

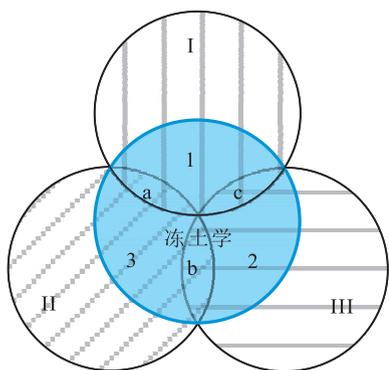


图 8 冻土学的学科结构

Fig.8 Structure of disciplines in geocryology

I. 土质学; II. 工程地质动力学; III. 区域工程地质学; 1. 冻土土质学; 2. 冻土工程地质动力学; 3. 冻土区域工程地质学; a. 冻土工程地质动力土质学; b. 冻土区域工程动力地质学; c. 冻土区域土质学

冻土区域工程动力地质学主要研究冻土区由于自然和人为活动形成的地壳表层地质过程的成因、空间分布以及时空变化规律. 对其成因、分布和变化规律的诠释则需要通过冻土区域土质学的研究来完成.

冻土区域土质学主要研究冻土的成分、状态、构成和性质的空间分布以及时空变化规律. 该研究是冻土区不同类型冻土的分布和变化的研究, 在土质不同的冻土区会发生不同类型的自然地质过程, 而在相同的地区其地质过程发生的类型、机理和规律很可能类似.

4 冻土学的研究任务

任何一个学科的研究任务均可以分为理论与方法两种, 但理论和方法的研究任务却又是相辅相成、不可分割的. 冻土学理论—方法的研究任务总体上可以有以下几个方面组成: (1) 理论研究: 对地壳上部高海拔与高纬度的各种类型冻土进行深入研究, 掌握其在自然条件下和人为活动过程中的变化规律与动态发展趋势; (2) 测试技术: 建立对冻土特征 (成分、构成、状态和性质) 测试、分析和判定的新方法、新技术, 以及新的研究理论体系, 尤其需要完善野外的测试方法; (3) 评价体系: 在自然条件和人为活动的影响下, 冻土土体在不断的发生变化, 因此需要建立冻土土体变异性分析与评价的理论方法体系, 针对冻土区建筑的现状, 在保证其稳定性与安全运营的同时, 完善冻土土体稳定性评价的理论方法体系; (4) 整治措施: 根据冻土特殊的状态和性质, 在工程建筑适用的基础上, 建立冻土土体改良的新理论和新方法体系, 建立并完善冻土区工程与环境的保护手段和修复技术. 防治负面地质与人为过程对冻土区工程的破坏, 以及防治自然条件与人为活动对冻土区环境的破坏.

5 冻土学的科学方法

科学方法是人们为获得科学认知所采用的规则和手段. 它是科学认识的成果和必要条件. 科学方法一般可以分为 3 种 (如图 9): (1) 专门科学方法, 也称单科学方法; (2) 一般科学方法, 也称多学科方法, 适用于自然科学和社会科学的一般方式、手段和原则; (3) 全科学方法, 是具有最普遍方法论意义的哲

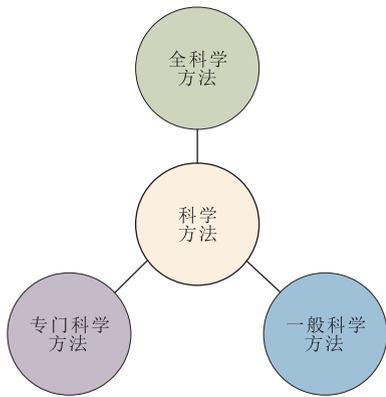


图 9 科学方法的分类

Fig.9 The classification of the scientific method

学方法(袁灿等,1993).

冻土学的科学方法也可以分为上述 3 种类型.冻土学的全科学方法(哲学方法)遵循于现代科学哲学方法,其学派林立,理论观点交替更迭.然而其理论研究的核心都是科学认识论和科学方法论.其中,唯物主义辩证法,即“马克思主义辩证法”,对科学认识论和方法论的研究具有较为完整、系统的理论体系.其他各个流派虽不像马克思主义哲学那样,但他们在各自的理论框架内,就科学认识论和方法论的某一侧面或方面,往往进行了较为深入、严谨的理论探索,有许多具有启发性的闪光思想,尤其是对现代科学技术发展的规律和特点把握得较为准确,对理

论的提炼和概括较为系统.另外一种系统是系统论方法,是指用系统的观点研究和改造客观对象的方法,要求人们从整体的观点出发,全面地分析系统中要素与要素、要素与系统、系统与环境、此系统与其他系统的关系,从而把握其内部联系与规律性,达到有效控制与改造系统的目的(袁灿等,1993).

一般科学方法是指数学、物理、化学、力学等经典学科的方法,这些方法适用于所有自然科学和社会科学,是科学研究的一般方式、手段和原则.冻土学是自然科学中的一个学科,这些一般科学方法也同样适用其中.

对于现今的冻土学研究用到的专门科学方法(单学科方法)越来越多.“地质”一词指地壳的成分和结构(现代汉语词典,2012),由于地壳表层冻土及其形成的冻土层(体)是冻土学的研究客体,因此冻土学的专门科学方法与地质类学科的科学方法联系比较紧密(图 10).另外,土壤学、地理学、气候学、海洋学等其他非地质类地学学科的科学方法,以及非地学类学科(生物学和天文学)的科学方法在冻土学中也有广泛的应用.除此之外,实验室方法和野外试验方法也是冻土学中了解冻土土质必不可少的科学方法之一(图 10).冻土学科学方法将会随着科学的发展更加丰富,科学方法的多样化和系统化也必然会使人们对冻土学的科学认知更加地深入和完善.

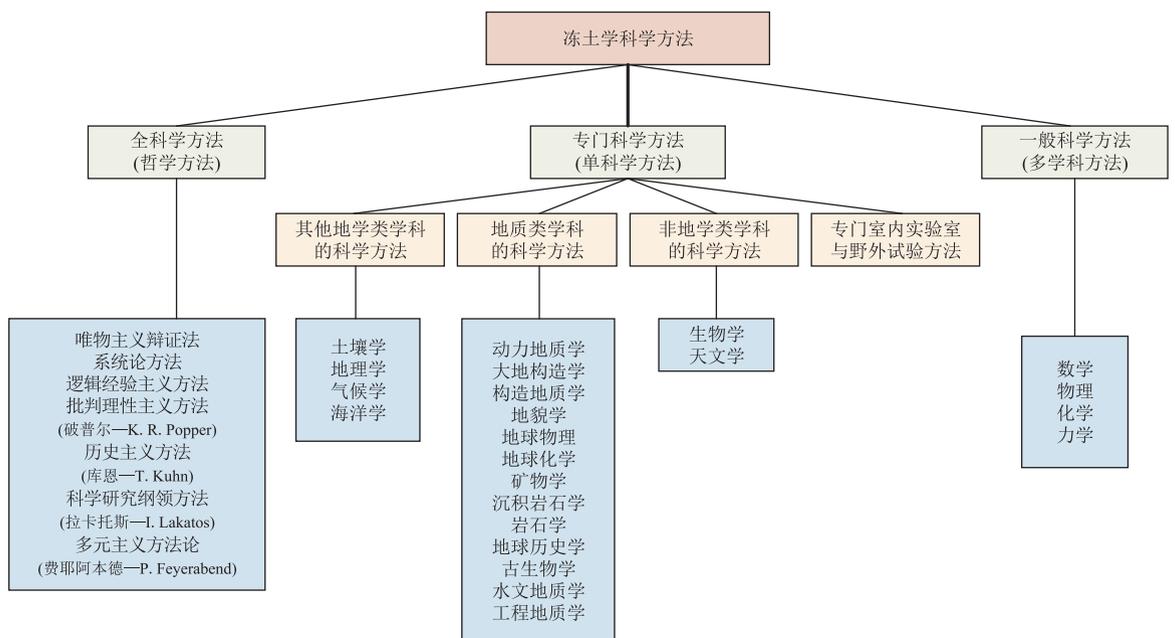


图 10 冻土学科学方法构成

Fig.10 The classification of the scientific method in geocryology

6 冻土学与其他学科的联系

随着科学技术的不断发展和人类社会的不断进步,涌现出了很多的交叉学科.作为“年轻”的冻土学,因人类社会的发展需要也逐渐与其他学科相互渗透.冻土学作为一门独立的地学类学科与其他地质类学科、非地质学类的自然学科、工程类学科以及社会与经济学学科都有着紧密的联系(图 11).冻土学研究方法当中不仅包含了几乎所有地质类学科的研究方法,而且物理、化学、力学和数学方法也得到了广泛的应用,尤其是物理化学和胶体化学的学科方法在冻土学中得到广泛应用.冻土学与非地质学自然学科的联系也很密切,且与这些学科形成了较为广泛和系统的交叉学科体系,如:冻土与天文学交叉形成的“星球冻土学”,土壤学交叉形成的“冷生土壤学”,以及与生物学交叉形成的冻土区动植物学、冻土微生物学等.

随着寒区工程建设的日益增多,冻土学与各类工程类学科也相互联系、相互渗透,冻土区的石油天然气管道修建、采矿工程、建筑设计以及在此基础上延伸出的冻土区专门岩土技术等,都与冻土学有着千丝万缕的联系.

冻土学是在冻土区经济开发的实践中产生和发展起来的.经济发展的需要,使冻土学首先在俄罗斯发展成为独立的学科(周幼吾等,2000).从著名的谢尔金探井,19 世纪的西伯利亚工农业发展、美国军

事工程遭遇的冻土困扰、阿拉斯加及中俄石油管道的修建以及我国西部大发展过程中青藏铁路的建设,都促使冻土研究的迅速发展.当今世界面临着严重的能源危机,人类不可避免地将向冻土地区大规模进军,索取长期被冻结的能源、土地、木材和矿藏(程国栋和周幼吾,1988),因此冻土学的研究与发展无疑将为整个社会和经济带来新的发展动力.

致谢:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所周幼吾研究员与童伯良研究员,以及中国科学院青藏高原冰冻圈观测研究站赵林研究员在本文撰写的过程中给与了宝贵意见和很大的支持.另外在稿件修改过程中审稿人以及编辑对本文提出了许多建设性的意见,对此作者一并表示衷心的感谢.

References

Bertalanffy, L., 1987. General System Theory (Foundations, Development, Applications). Translated by Lin, K. Y., Wei, H. S., Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).

Brewer, M. C., 1983. Petroleum Exploration and Protection of the Environment on the National Petroleum Reserve in Alaska. Proceedings of 4th International Conference on Permafrost, Vol. 2, National Academy Press, Washington D.C., 133-134.

Brown, J., Ferrians, O. J. J., Heginbottom, J. A., et al., 1997. International Permafrost Association Circum - Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. U.S. Geological Survey, Baltimore.

Cheng, G. D., 2002. Interaction between Qinghai-Tibet Railway Engineering and Permafrost and Environmental Effects. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 17(1): 21-25 (in Chinese with English abstract).

Cheng, G. D., 2005. Geocryology of China in the Past 50 Years: Progress and Prospect. In: Ma, W., ed., Research Monograph of Cold and Arid Regions Engineering and Environment—A Collection of the Papers Dedicated to the 70th Birthday of Academician Cheng Guodong. Lanzhou University Press, Lanzhou, 57-83 (in Chinese).

Cheng, G. D., Zhou, Y. W., 1988. State of the Art and Prospect of Geocryology in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 10(3): 221-227 (in Chinese with English abstract).

Dictionary Editorial Office of Language Institute, Chinese Academy of Social Sciences, ed., 2012. A Dictionary of the Modern Chinese Language (Sixth Edition). The Commercial Press, Beijing (in Chinese).

French, H. M., 1998. An Appraisal of Cryostratigraphy in North-West Arctic Canada. *Permafrost Periglacial Processes*, 9

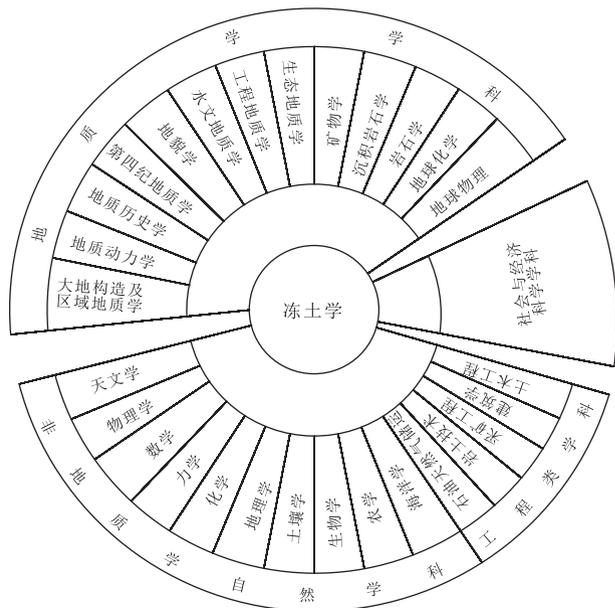


图 11 冻土学与其他学科联系

Fig.11 Relationship of geocryology with other disciplines

- (4): 297—312. doi: 10.1002/(sici)1099-1530(199810/12)9:4<297::aid-ppp296>3.0.co;2-b
- Glen, J. W., 1987. Ice Physics—One of the Most Common Substances Continues to Pose Interesting Problems. Translated by Zhou, T., *Journal of Glaciology and Geocryology*, 9(3): 215—220 (in Chinese).
- Guo, Z. G., Niu, F. J., Zhan, H., et al., 2007. Changes of Grassland Ecosystem due to Degradation of Permafrost Frozen Soil in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 27(8): 3294—3301 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Cheng, G. D., 2002. Review on the Interaction Models between Climatic System and Frozen Soil. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(3): 315—321 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. C., 1995. Encyclopedia Methodique (III)—Natural Science Methods. Nanjing University Press, Nanjing (in Chinese).
- Lin, Z. J., Niu, F. J., Luo, J., et al., 2015. Thermal Regime at Bottom of Thermokarst Lakes along Qinghai-Tibet Engineering Corridor. *Earth Science*, 40(1): 179—188 (in Chinese with English abstract).
- Luo, D. L., Jin, H. J., He, R. X., et al., 2014. Responses of Surface Vegetation on Soil Temperature and Moisture of the Active Layer in the Source Area of the Yellow River. *Earth Science*, 39(4): 421—430 (in Chinese with English abstract).
- Ma, W., Cheng, G. D., Wu, Q. B., 2009. Construction on Permafrost Foundations; Lessons Learned from the Qinghai-Tibet Railroad. *Cold Regions Science and Technology*, 59(1): 3—11. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.07.007
- Ma, W., Niu, F. J., Mu, Y. H., 2012. Basic Research on the Major Permafrost Projects in the Qinghai-Tibet Plateau. *Advances in Earth Science*, 27(11): 1185—1191 (in Chinese with English abstract).
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., et al., 2001. Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 801—841.
- Nelson, F. E., Anisimov, O. A., Shiklomanov, N. I., 2002. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions. *Natural Hazards*, 26(3): 203—225.
- Nelson, F. E., 2003. (Un) frozen in Time. *Science*, 299(5613): 1673—1675. doi: 10.1126/science.1081111
- Petrenko, V. F., Whitworth, R. W., 1999. Physics of Ice. Oxford University Press, Oxford.
- Sergeev, E. M., 1985. Theoretical Foundations of Engineering Geology. Geological Basics. Nedra Press, Moscow (in Russian).
- Stendel, M., Christensen, J. H., 2002. Impact of Global Warming on Permafrost Conditions in a Coupled GCM. *Geophysical Research Letters*, 29(13): 10—1—10—4. doi: 10.1029/2001gl014345
- Trofimov, V. T., Korolev, V. A., Voznesensky, E. A., et al., 2005. Soil Science. Moscow State University Press, Moscow (in Russian).
- Wang, G. X., Hu, H. C., Wang, Y. B., et al., 2007. Response of Alpine Cold Ecosystem Biomass to Climate Changes in Permafrost Regions of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(5): 671—697 (in Chinese with English abstract).
- Williams, P. J., Smith, M. W., 1989. The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology. Cambridge University Press, New York.
- Wu, Q. B., Liu, Y. Z., Tong, C. J., et al., 2000. Interaction between Frozen Soil Environment and Engineering Environment in Cold Regions. *Journal of Engineering Geology*, 8(3): 281—287 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q. B., Shen, Y. P., Shi, B., 2003. Relationship between Frozen Soil Together with Its Water-Heat Process and Ecological Environment in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(3): 250—255 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. P., Ou, Y. H., Xu, X. L., et al., 2010. Effects of Permafrost Degradation on Ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 30(1): 33—39. doi: 10.1016/j.chnaes.2009.12.006
- Yao, T. D., Qin, D. H., Shen, Y. P., et al., 2013. Cryospheric Changes and Their Impacts on Regional Water Cycle and Ecological Conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 35(3): 179—186 (in Chinese).
- Yershov, E. D., 1995. General Geocryology: I—General Physical-Chemical in Geocryology. Moscow State University Press, Moscow (in Russian).
- Yuan, C., Bao, J. Q., Xu, W. M., 1993. Research Methodology of Science and Technology. Zhejiang University Press (in Chinese).
- Zhou, Y. W., Guo, D. X., Qiu, G. Q., et al., 2000. Geocryology in China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, Y. W., Wu, Z. W., 2010. The Permafrost in the North of Greater Khingan Prefecture. In: Wu, Z. W., Zhou, Y. W., ed., Permafrost Research 50 Years: Wu Ziwang, Zhou Youwu Research Corpus. Science Press, Beijing, 38—55 (in Chinese).

附中文参考文献

Bertalanffy, 1987. 一般系统论(基础·发展·应用). 林康义,

- 魏宏森译,北京:清华大学出版社.
- 程国栋,2002.青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应.中国科学院院刊,17(1):21-25.
- 程国栋,2005.中国冻土学研究 50 年成就与展望.见:马巍主编,寒旱区工程与环境研究——程国栋院士七十华诞学术研讨会文集.兰州:兰州大学出版社,57-83.
- 程国栋,周幼吾,1988.中国冻土学的现状和展望.冰川冻土,10(3):221-227.
- 中国社会科学院语言研究所词典编辑室编,2012.现代汉语词典(第 6 版).北京:商务印书馆.
- Glen, J. W., 1987. 冰物理——一种最普通的物质仍在提出有趣的问题.周韬译,冰川冻土,9(3):215-220.
- 郭正刚,牛富俊,湛虎,等,2007.青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征.生态学报,27(8):3294-3301.
- 李新,程国栋,2002.冻土—气候关系模型评述.冰川冻土,24(3):315-321.
- 李志才,1995.方法论全书(III) 自然科学方法.南京:南京大学出版社.
- 林战举,牛富俊,罗京,等,2015.青藏工程走廊热融湖湖底热状态.地球科学,40(1):179-188.
- 罗栋梁,金会军,何瑞霞,等,2014.黄河源区植被对活动层温度和水分的影响.地球科学,39(4):421-430.
- 马巍,牛富俊,穆彦虎,2012.青藏高原重大冻土工程的基础研究.地球科学进展,27(11):1185-1191.
- 王根绪,胡宏昌,王一博,等,2007.青藏高原多年冻土区典型高寒草地生物量对气候变化的响应.冰川冻土,29(5):671-679.
- 吴青柏,刘永智,童长江,等,2000.寒区冻土环境与工程环境间的相互作用.工程地质学报,8(3):281-287.
- 吴青柏,沈永平,施斌,2003.青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系.冰川冻土,25(3):250-255.
- 姚檀栋,秦大河,沈永平,等,2013.青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响.自然杂志,35(3):179-186.
- 袁灿,鲍健强,许为民,1993.科学技术研究方法论.杭州:浙江大学出版社.
- 周幼吾,郭东信,邱国庆,等,2000.中国冻土.北京:科学出版社.
- 周幼吾,吴紫汪,2010.大兴安岭北部的冻土.见:吴紫汪,周幼吾编,冻土研究 50 年:吴紫汪、周幼吾研究文集.北京:科学出版社,38-55.