

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 95 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2020 年 6 月 30 日

“寒区旱区工程与环境”论坛综述

一、国内外研究现状

1. 全球冻土及工程环境

冻土是土体与大气之间相互作用的产物，是岩石圈和大气圈系统在发生热交换过程中形成的。冻土的形成与地表的热量交换密切相关，土壤热交换量是连接空气与冻土层上部土层热状况的纽带。气候变化必然会直接影响到冻土的变化。近年来的研究成果也表明，冻土存在普遍的融化，多年冻土的范围在逐步缩小。在过去的一个世纪里，俄罗斯、加拿大、美国阿拉斯加、北欧等地区的地表温度上升了 2~4℃，同时，这些地区都观测到了冻土退化的迹象。很多学者指出，这是受到全球及区域气候变暖的影响。随着未来气候的持续变暖，全球冻土将进一步退化。

与北美及俄罗斯的极地冻土相比，青藏高原多年冻土具有地温高、厚度薄、热稳定性差等特点，因此对气候变化更加敏感。从 1996~2001 年，青藏高原多年冻土上限处的地温以 0.01~0.08℃/年的速率上升，高温冻土区上限以 2.6~6.6 cm/年的速率下降，6~8 m 处的地温也以

0.021~0.053℃/年的速率上升。近期研究发现，青藏高原多年冻土面积显著减小，过去的半个世纪内，多年冻土面积减少约 10%。

冻土在冻结和融化过程中，存在着复杂的水热力（水热力盐）相互作用，从而产生冻胀和融沉现象，容易引发诸如热喀斯特、泥石流、滑塌、滑坡和冰椎等地质灾害。气候变暖诱发的区域冻土退化、地下冰融化将加剧灾害的发育，从而必将影响工程稳定性和生态环境。其中，热融性灾害是多年冻土融化或退化过程中产生的灾害，这种灾害可以表现为岩土体的不同规模变形和失稳（如滑坡、热融泥石流），以及冻土地基融沉过程对于建（构）筑物的直接破坏。冻胀性灾害主要是土体原位冻结或冻结过程中水分迁移所产生的体积膨胀类病害。一方面直接表现为构筑物的冻胀危害；另一方面表现为因施工造成地下水通道的改变而出现的冰椎、冰幔等，其可能会造成工程建（构）筑物的抬升、侧向挤压和冰体掩埋等危害。冻融性灾害是由于岩土材料受反复冻融循环的影响，材料的形态或强度等物理力学特性发生变化所引起的灾害。在山地多年冻土区，气候变化导致的冻融灾害更加频繁。尤其在高含冰量冻土分布区域，冻土融化导致高含冰量土体及冻结岩体的强度弱化，以及融化后土（岩）体内孔隙水压力的升高，使得原先处于稳定状态的斜坡体趋于失稳，在高含冰量冻土斜坡上分布弱透水性细颗粒土区域，易发生一系列活动层滑脱型滑坡、溯源热融滑塌、融冻泥石流等地质灾害。

冻土灾害的发育会对区域工程构筑物的安全运营构成巨大的威胁。研究结果表明，全球冻土灾害分布主要与多年冻土分布一致，加拿大、美国阿拉斯加、俄罗斯西伯利亚及中国青藏高原是冻土灾害主要分布区。我国冻土的脆弱性以中度脆弱为主，且具有显著的空间差异性。青藏高原南部、北部与东北部边缘地区脆弱程度最高，藏北高原、西部高山、东北北部多年冻土区脆弱性相对较高，这些区域的工程风险也相对较大。

2. 寒区重大交通工程及安全风险

寒区交通工程建设在我国国民经济和国防安全中占有相当重要的地位。随着振兴东北老工业基地和西部大开发战略的进一步实施，以及“一带一路”建设伟大构想的推进，亟需构建“横贯东西、纵贯南北、内畅外通”的综合运输大通道。目前，为构建西北、西南、东北对外交通走廊，加快推进高速铁路成网，完善国家高速公路网络，新一轮交通基础设施建设将继续向西部、东北等高寒地区延伸。寒区交通工程的主要问题体现在道路、桥梁、隧道等方面。

由于冻土中冰的存在决定了寒区道路工程建设及病害的特殊性，如不采取特殊措施和方法，可能引起寒区道路工程遭受冻融灾害威胁，甚至造成巨大经济损失。由于气候类型和地理环境复杂多变，寒区道路工程的危险源类型多样。低温、冻融、干湿、辐射、车辆荷载、盐胀等引起道路工程破坏的因素会造成路基结构破坏和路面材料老化。实践表明，寒区道路工程遇到的主要病害是融沉和冻胀，在多年冻土地区主要表现为融沉，在季节冻土地区主要表现为冻胀。而在寒区盐渍土地区则还要受到盐胀、盐溶等问题的影响。研究表明，寒区道路工程病害高发，比如：俄罗斯贝阿铁路（第二条西伯利亚大铁路）病害率约 28%（1994 年），俄罗斯贝加尔铁路（第一条西伯利亚大铁路）病害率高达 41%（1996 年），青藏公路病害率为 72%（2013 年），东北地区多年冻土区铁路病害率达 40%。总体而言，寒区道路建设、养护成本较大，服役性能劣化较快。寒区路基/路面冻融病害主要表现为：纵向裂缝、翻浆、波浪变形和网裂等。

桥梁工程是寒区交通工程的重要组成部分。当道路跨越河流沟谷、沼泽湿地、野生动物通道或与其他交通工程交叉时，需建桥梁。在高温、高含冰量多年冻土区，桥梁工程因其对多年冻土环境的扰动小、抵御气候变化风险能力强等特点而被广泛采用。由于桥梁桩基础、路桥过渡段等受冻融作用影响最为剧烈，一直是寒区桥梁工程研究的难

点和热点。寒区桥梁病害主要有：桥基沉陷、路桥过渡段差异性沉降、桩基冻拔和桥梁结构冻融侵蚀破坏等。

寒区隧道，特别是多年冻土地区的隧道，由于受到寒冷气候的影响，除了存在一般地区常见的病害以外，还有其他特殊的冻融病害。从性质上看，隧道冻害可以分为以下类型：衬砌开裂、酥碎、剥落，衬砌渗漏水、挂冰，隧道底部冒水、积冰及冻胀，排水系统冻结堵塞，洞门墙开裂和洞口热融滑塌等。这些冻害不仅给隧道的运营管理带来很大的安全隐患，处理起来费工、费时、费财，而且大大弱化了隧道的使用功能，造成了巨大的资源浪费和经济损失。根据日本的调查，在日本 3800 座铁路隧道中，1100 座由于冻害问题，列车在冬季通过隧道时存在较大的安全隐患。我国对西北、东北、华北、西藏地区的 25 个寒区隧道的冻害状况进行了调查，结果显示：28%的隧道由于设计不周，如排水设施以及冻胀作用考虑不足造成隧道冻害的出现；此外，28%的隧道产生冻害是因为渗漏水严重。而寒区隧道冻害所发生的位置统计表明，64%的隧道发生衬砌冻害破坏，40%的隧道产生路面/道床破坏，24%的隧道存在排水沟破坏。对隧道冻害纵向分布的调查发现，大部分病害出现在洞口至洞内一定长度范围内。

二、论坛概况

2019 年 7 月 26~28 日，在赖远明院士的召集下，中国科学院学部科学与技术前沿论坛暨建院 70 周年学术论坛在兰州成功举办。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院技术科学部、学部学术与出版工作委员会承办，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、《中国科学》杂志社和中国科学院青年创新促进会西北生态环境资源研究院小组共同协办。

中国科学院西北生态环境资源研究院程国栋院士、清华大学王光谦院士、中国气象科学研究院徐祥德院士、东南大学缪昌文院士、西南交通大学翟婉明院士、中国科学院/水利部成都山地灾害与环境研究

所崔鹏院士出席了本次论坛。论坛汇聚了全国 78 家科研院所、高等院校、设计施工企业单位的百余位寒区旱区工程与环境领域知名专家学者以及广大相关领域的博士、硕士研究生，共计 547 位代表参会。

三、论坛的目的和意义

我国寒区旱区地域广阔，生态环境脆弱，是极为重要的生态安全屏障。在这些特殊区域随着经济的发展，工程基础设施建设日益增多，将会不可避免地对区域内生态环境造成严重影响，致使区域内资源、环境、生态与工程矛盾更加突出，生态环境恶化和地质灾害进一步加剧。本次论坛的召开对促进寒区旱区工程与环境领域学科交流，完善和发展寒区旱区工程建设理论和技术体系，服务于寒区旱区工程建设与环境的协调发展，为实施寒区旱区工程建设“走出去”战略和加强泛第三极地区寒区旱区工程多边合作战略提供理论支持和技术保障具有重要意义。

本次论坛通过 14 个报告的研讨，系统梳理了寒区旱区工程与环境研究的发展历程，分析了气候变化背景下工程服役性能与环境变化趋势，聚焦了寒区旱区工程与环境协调发展所存在的关键科学技术问题，探索了寒区旱区重大工程建设与运维关键技术，研讨了寒区旱区环境风险与防治对策。

四、报告内容

14 位寒区旱区工程与环境领域的专家学者围绕寒区旱区工程的挑战与对策、寒区旱区环境变化与对策 2 个议题的科学及技术前沿问题，分别作了精彩的特邀报告，充分展示了当前我国寒区旱区交通工程致灾机理、风险评估方法和防治对策等方面取得的重要进展，剖析了寒区旱区工程建设与环境协调发展所面临的前沿科技问题和亟待解决的关键技术问题。

论坛部分报告内容如下。

1. 崔鹏院士：川藏铁路环境灾害研究的构想

川藏铁路是中央重大决策，对国家长治久安和西藏经济社会发展具有重大而深远的意义，但是川藏铁路沿线海相对高差 4000~6000 m，跨越 3 条主缝合带（雅江、班公湖-怒江、金沙江），对铁路建设的影响极大，主要包括：显著的地形高差、活动的板块构造、频发的山地灾害和敏感的生态环境。因此，川藏铁路是世界上科学与技术难题最多、最难修建的铁路。

报告分析了川藏铁路沿线地质条件，梳理了川藏铁路面临的 10 个重大安全风险：大地震震害及次生灾害风险、活动断裂带工程错断风险、山体破裂与高切危坡风险、隐蔽性高位滑坡和巨型古滑坡风险、重大泥石流风险、远程巨型灾害链风险、气候变化导致的极端天气和气候灾害风险、与地下水循环变化有关的突水突泥风险、与高地应力有关的岩爆和岩体大变形风险、与高温热泉有关的水热热害风险。总结了川藏铁路工程风险研究的 4 大特点：全球构造最活跃地带的灾害动力学机制、全球气候变化最敏感地区的灾害链生演化机制、全球地表隆升最快地区的灾害发生动力学机制、全球地形地貌差异最大地区的工程灾变动力学机制。凝练了 3 大主要科学问题：查明板块活动背景下构造-气候-地表过程耦合成灾动力学机制，揭示青藏高原构造-气候-地表过程的耦合作用与重大灾害的关联机制；明确复杂环境重大工程与环境灾害互馈效应，揭示重大工程与复杂岩土体互馈作用的重大工程灾害衍生机制；掌握特殊艰险环境下重大灾害防控理论与关键技术，构建重大工程全寿命周期灾变综合防控体系与人地协调模式。提出 7 项研究内容：板块挤压作用下重大灾害动力学机制、青藏高原隆升的环境与灾害效应、气候变暖背景下重大灾害链生演化机制、人类工程活动与重大灾害互馈机制、重大灾害早期识别、监测预警与风险评估技术、重大线性工程风险调控与安全保障技术、复杂艰险环境条件下重大工程与环境协同机制。通过这些研究，主要解决以下 7 个问

题：川藏铁路的大震风险问题、活动断裂与缝合带工程影响问题、高地应力导致的岩爆与大变形问题、巨型灾害链及其远程风险问题、青藏高原气候变化对川藏铁路工程建设影响问题、川藏铁路工程灾变问题、川藏铁路重大灾害判识、调控与预防问题。

2. 翟婉明院士：中国高速铁路发展进程

近年来，我国高速铁路取得了令世人瞩目的成就。高速铁路已经成了中国工业与经济高速发展的象征，它不仅大大改善了我国的交通状况，同时也成为我国的一张最可信的名片。报告首先回顾了中国铁路高速化发展历程，包括已经建成和规划中的高速铁路网、中国高速铁路动车组、中国高速铁路线路特点、中国高速铁路在国际上的地位。20世纪90年代以前，中国的铁路路线标准低、铁路运营速度只有60~70 km/h，运输严重紧缺。从2008年至今，经过6次提速，中国铁路已经进入高速发展时期。中国铁路通过引进消化吸收再创造的模式，已建成并投入运营的高速铁路路线近3万公里，最高运营速度达到350 km/h，成为世界上高速铁路运营规模最大、运营速度最高的国家，实现了跨越式发展，彻底改变了长期落后的面貌。中国铁路的最高试验速度达到486.1 km/h，仅次于法国，位居世界第二。

报告对我国铁路规划及发展进行了详细介绍。2004年1月，国务院批准了《中长期铁路网规划》，规划建设了北京-上海、北京-广州-深圳、北京-沈阳-哈尔滨、杭州-福州-深圳“四纵”和徐州-郑州-兰州、杭州-南昌-长沙、青岛-石家庄-太原、南京-武汉-重庆-成都“四横”客运专线。2008年《中长期铁路网规划》在原规划“四纵四横”主骨架基础上，新增武汉、长株潭、成渝、中原、关中城市群以及海峡西岸经济区6个城际客运系统。2011年《铁路“十二五”发展规划》又新增四个城际客运系统，分别位于呼包鄂地区、滇中地区、北部湾地区及鄱阳湖生态经济区。自此，我国城际铁路快速客运系统达到13个。

最后，报告展望了未来我国高速铁路的发展走向及需要重点研究

的问题，认为高速铁路运营速度不是唯一追求目标，绿色、环保、可持续发展是前提条件。同时，提出了未来高速铁路建设中应重点开展高速铁路低耗能、低震动、低噪音技术等方面的研究。

3. 缪昌文院士：严酷环境中混凝土耐久性提升技术研究

混凝土是世界上用量最大的人工建筑材料，已广泛应用到各类土木工程建设中，如海洋工程中钢筋混凝土约占90%以上。近年来，随着现代工程超大化、超高层、超复杂化的快速发展，混凝土在复杂条件下的应用面临新的挑战。严酷环境下（如：海洋高盐、高温、高湿、浪溅冲刷耦合环境等）混凝土耐久性问题突出，普通海洋工程混凝土结构使用10~15年后出现严重锈蚀破坏。西部极端低温环境下，普通混凝土2年开裂，3年失效。因此，亟需研发面向严酷环境的混凝土耐久性提升关键技术，满足构筑物服役寿命需求。

报告介绍了目前严酷环境下混凝土劣化机理方面的最新研究成果，分析了硫酸盐腐蚀、氯离子传输、钢筋锈蚀造成的混凝土耐久性劣化机制，提出了材料/结构一体化的混凝土构筑物耐久性设计思路，初步建立了应变对扩散系数的修正模型，基于氯离子扩散系数实现材料/结构耐久性一体化设计。基于建模绘图、有限元分析、报告处理等软件的无缝对接，运用建筑信息模型（BIM）技术建立材料、结构耐久性一体化设计方法，搭建了材料/结构耐久性一体化设计平台。基于BIM平台完成结构混凝土材料与结构参数的协同设计。

报告提出了高抗渗混凝土基体、混凝土表层强化、钢筋锈蚀抑制的耐久性提升整体思路。针对跨海桥梁混凝土桩基，结合不同作用方式，提出了大气区、潮差区和浪溅区的分区防护思路，并针对不同区域提出了关键技术发展方向和应用部位。混凝土外防护方面，发明了强渗透、抗侵蚀的改性硅酸盐密封材料，低聚物硅氧烷材料，喷涂聚脲弹性体材料；基体抗渗方面，研发了侵蚀离子传输抑制剂；钢筋阻锈方面，提出了掺入型有机阻锈剂、自迁移型有机阻锈剂、电迁移型

有机阻锈剂。系列技术在青岛万达混凝土抗滨海盐渍土腐蚀、灌河大桥和虎门二桥抗滨海化学腐蚀中得到了应用，工程效果显著。

最后，报告展望了未来严酷环境下混凝土耐久性提升的重点研究方向：推动混凝土材料/结构耐久性一体化设计方法的科研工作，实现重大工程耐久性的定制化研究与设计；加大混凝土耐久性理论的原创新性研究，采用先进技术改造传统混凝土材料，基于有机无机的学科交叉，开发混凝土耐久性提升新技术；重视既有混凝土耐久性的长期服役数据积累，建议加强基于物联网技术的大数据采集平台与分析方法。

4. 汪双杰教授级高工：青藏高原进藏高速公路工程建设风险评估与对策研究

报告从国家安全、生态安全屏障、战略资源储备、民族特色文化、一带一路建设 5 个方面论述了西藏重要的战略地位。总结了进出西藏 5 大通道公路交通建设现状，包括青藏通道、滇藏通道、青康通道、新藏通道、川藏通道 317 线（北线）和 318 线（南线）。目前 5 大通道均无高速公路，西藏仍是高速交通的“孤岛”，这与其重要的战略地位极不匹配，亟需修建进藏高速公路。其中，青藏通道穿越青藏高平原，纵深达 1500 公里以上，通道内公路、铁路、能源、电力集中，有利于战略保障，是国防战略主通道，目前规划的青藏高速公路格尔木至那曲段尚未建设。川藏通道连接西藏和西南地区经济发展中心，直接对接四川、云南、青海三省区，旅游资源丰富，是藏区经济发展主通道，规划中的川藏高速公路康定至林芝段尚未建设。而新藏通道、滇藏通道、青康通道是辅助通道。从青藏通道的气候特点和工程地质特点出发，提出了青藏高速公路建设的 8 大工程风险：道路行车安全风险、结构耐久性风险、冻胀灾害风险、工程措施失效风险、道路运营安全风险、高寒冻害风险、热融灾害风险、工程融沉灾害风险。结合青藏公路和共玉高速公路科研历程和建设经验，提出了高速公路宽厚黑导致的建设难题及应对策略，如：新型冷却路基、分幅路基、微扰动施

工等。随后，对比分析了川藏高速公路建设中的环境特征和工程风险，提出了地质灾害密集频发的川藏通道内高速公路选线原则及风险防治关键对策。

报告最后提出了青藏高原高速公路建设中需深化研究的若干问题：高速公路施工过程控制与检测标准、桥头路基稳定问题、大断面冻土隧道稳定控制、高速公路桥梁群桩效应、早强抗冻耐久混凝土、青藏高原高速公路监测体系、青藏高原高速公路长期养护技术以及交通安全、节能环保、筑路材料和路面结构等。倡导融合热学、力学、道路、地质和材料等多学科的联合攻关，为国家重大工程建设提供科技支撑。

5. 魏永幸教授级高工：川藏铁路工程建设难题及对策思考

报告简要介绍了中铁二院在川藏铁路3阶段建设（成都-雅安、雅安-林芝、林芝-拉萨）中已经开展的工作。基于已有工作积累和认识，分析了川藏铁路建设中的4大环境特征：显著的地形高差、强烈的板块运动、频发的山地灾害、敏感的生态环境。这些特征给工程建设带来了诸多困难，总体凝练为5大工程特点和3大建设难题。

5大工程特点为：工程建设环境恶劣、铁路长大坡度前所未有（最大坡度30‰）、超长深埋隧道集中（20 km以上隧道总长是我国已建铁路隧道总和，海拔超过3000 m的隧道占隧道总长的76%）、山地灾害防范任务艰巨（巨型滑坡、泥石流及沟谷灾害链等）、生态环境保护责任重大（线路穿越青藏高原生态安全屏障、黄土高原-川滇屏障的核心区）。3大建设难题为：复杂地质高海拔无人区勘察难、减灾选线与工程防灾减灾设计难、复杂环境深埋长大隧道群施工难。针对3大建设难题，提出了相应的对策：创新复杂艰险山区“空天地”综合勘察技术；贯彻铁路全生命周期防灾减灾理念，做好灾害风险识别和规避、防控、监测工作；创新深埋长大隧道群的施工方法、工艺、装备。

最后指出，如何提高川藏铁路高寒无人山区工程长期服役性能，也是亟需解决的技术难题。主要包括：高温隧道工程服役性能，特别

是沿线高岩温和高温热水隧道，全线对线路有影响的高温热泉 50 余个，穿越 50℃ 以上地温约 5.5 km；高海拔寒区隧道工程服役性能，川藏铁路雅林段隧道洞口 1 月平均气温低于 0℃ 的有 34 座，其中低于 -8℃ 的有 2 座，主要涉及隧道防抗冻对策与措施；路基防护工程服役性能，主要包括结构材料耐久性等；高海拔桥梁工程服役性能，川藏铁路雅林段海拔 3000 m 以上桥梁 68 座，涉及混凝土的耐久性、施工工艺及附属结构材料耐久性问题。

6. 蔡德钧研究员：季冻区高速铁路路基冻胀规律及冻胀整治新技术研究

我国季节冻土约占国土面积的 53.5%，季节冻土区高速铁路建设里程约 1.5×10^4 km，高速铁路变形控制要求极高，轨道静态高低偏差容许值超过 8 mm 时须限速至 200 km/h，因此季节冻土区路基冻胀对高速铁路的建设和安全运营带来了严峻挑战。

报告梳理和凝练了季节冻土区高速铁路路基涉及的关键科学与技术问题：路基冻胀的时空特征、路基微冻胀填料冻胀发育机制、路基防冻胀结构及措施、冻害发生后冻胀维护措施。对 2012~2013 年期间哈大高铁路基冻害的监测资料分析认为，路基冻胀主要是由于填料不良、结构设置不当、结构缝封闭失效、基床表层排水不畅、路堑截水不力引起的。提出了路基微冻胀填料的控制标准：以簇团率 2% 作为高铁路基填料冻胀的控制限值，细颗粒含量不超过 3% 定义为高铁路基不冻胀填料，将细颗粒含量不超过 5% 作为严寒地区高铁路基填料控制限值。同时，基于“防、排、疏、渗”的路基冻胀控制理念，提出了 II 型渗透性级配碎石和水泥改性级配碎石等不同类型的防冻胀填料，形成了严寒地区大流态自密实沥青混凝土的生产、施工和质量控制成套技术，完善了我国高速铁路相关设计规范，系列技术在哈大、哈齐、京沈、郑徐高速铁路中得到应用。

报告提出了“发现要及时、维护要迅速、整治要提前、效果要持

久”的高速铁路冻胀防治技术要求和系列冻胀防治措施：运营高速铁路冻胀综合检测监测技术、冻胀管理应对制度、冻胀维护与整治技术。建立了路基冻胀自动综合监测技术体系，构建了车-地一体化的监测检测预警体系，提出了季节冻土区高速铁路无砟轨道路基冻胀管理标准，以及截排地下水、路基表面封缝、靶向化学注胶技术、微型盾构横向置换整治技术等维护整治措施。最后总结了我国季节冻土区高速铁路冻胀防治总体水平：实现了 3 m 冻深下的高铁路基冻胀变形控制，确保了哈大高铁 2015 年以后冬季时速 300 km/h 安全运营，为一带一路建设提供了重要技术支撑。

7. 马巍研究员：北京-莫斯科高速铁路设计建设中的冻土工程问题

报告首先回顾了青藏铁路建设中的冻土工程问题，并对目前运营状况进行了评估。高温高含冰量冻土区修筑路基工程并确保其稳定性是世界性难题，为解决这一难题，我国在青藏铁路建设中采用了冷却路基、降低冻土温度的设计新原则，提出了块碎石路基、热管路基、管道通风路基等系列主动冷却路基技术，确保青藏铁路多年冻土区平均时速达到 100 km/h，创造了世界冻土区铁路的最高时速。结合青藏铁路运营期变形监测资料认为：多年冻土年平均地温 $T_{cp} < -1.5^{\circ}\text{C}$ 时，冻土路基一般是稳定的，冻胀、沉降变形缓慢，量值较小； $T_{cp} > -1.5^{\circ}\text{C}$ 时，块石路基基本是稳定的，左右路肩变形差异较小，而普通路基是不稳定的，冻土温度越高，变形越大。此外，路桥过渡段差异变形在青藏铁路运营中较为普遍，楚玛尔河高平原地区路桥差异沉降量可达 110 cm。

随后，对季节冻土区高速铁路-哈大高铁的运营状况进行了分析。哈大高铁设计时速 350 km/h，运营初期采用了夏季（300 km/h）和冬季（200 km/h）限速的措施。监测资料显示：冻土区路基微冻胀显著，变形大于 10 mm 的区段较多。变形主要是由于粗颗粒土中的水汽迁移以及细颗粒含量所致。在压实系数大于 0.85 的情况下，细颗粒填充率

大于 0.25 以后，随着填充率的增大，粗粒土冻胀率显著增加，在未来寒区高铁设计建设中则需要对填料的细粒含量进行考虑。

最后，重点讨论了北京至莫斯科高速铁路（京莫高铁）面临的主要问题。以中蒙俄通道为例，高寒、冻土类型多样（季节冻土、岛状冻土、连续多年冻土和不连续多年冻土）、多年冻土地下冰厚（俄境内）等是制约京莫高铁建设的重要障碍。对比分析京莫高铁和青藏铁路建设技术标准、冻土问题及次生灾害的差异性，京莫高铁建设难度远超青藏铁路。报告提出京莫高铁建设中的关键科学与技术问题：开展沿线冻土工程地质评价；多年冻土冷却路基新技术研发；粗颗粒土微冻胀问题；路桥过渡段差异变形问题；多年冻土区桩基沉降与冻拔问题；高频动荷载下的冻土效应研究；工程建设及运营期导致的次生灾害问题；高寒、极端低温下材料冻融劣化问题；复杂国际工程环境下建设技术和标准的有效对接等。

8. 王宁练教授：青藏高原雪线高度分布、季风界限与冰川变化

报告首先介绍了世界季风区域和我国季风界线、为什么要关注以青藏高原为主体的高亚洲（Asian high mountains）冰川的变化及气候、冰川平衡线高度与冰川变化相关的问题。针对上述问题，深入讲述了雪线高度的提取方法和高亚洲冰川雪线高度的空间分布特征及其气候环境意义。在此基础上，详细介绍了青藏高原高原冰川空间变化特征的主控因子。结合 2003~2009 年高亚洲冰川冰量的变化，指出高亚洲冰川基本处于物质亏损状态，喀喇昆仑山地区的冰川略呈正平衡。恒河、雅鲁藏布江和澜沧江流域冰川亏损较为严重，而印度河流域冰川海拔较高，亏损量最少。疏勒河、黑河流域的冰川亏损较为严重，塔里木河其次。采用综合考虑插值点与冰川距离以及冰川面积的反距离加权平均空间插值法计算了西部冰川 20 世纪 50 年代末以来冰川面积年变化率的空间分布情况，分析了青藏高原地区 LIA-2013 年冰川面积变化空间特征、小冰期以来不同规模冰川的变化情况、青藏高原现代

冰川平均面积分布状况及小冰期以来不同规模冰川的变化情况等。研究表明，青藏高原冰川雪线高度的空间分布特征，与亚洲季风水汽和夏季冻结层高度的影响密切相关。夏季冻结层高度的分布与变化，是青藏高原高原冰川变化时空格局的主控因素。

9. 马耀明研究员：复杂地表地气相互作用过程研究进展：从青藏高原到第三极，再到泛第三极

青藏高原平均海拔 4000 m，对我国、东亚乃至全球的气候变化有着非常重要的影响。报告主要介绍了研究团队多年来在地表与近地表大气以及边界层大气之间，能量通量和水汽交换方面的研究进展和下一步工作计划。首先展示了青藏高原观测平台各站点的分布，包括珠峰站、纳木错站、灵芝站、阿里站、慕士塔格站、双虎站和那曲站的地理位置、观测项目以及仪器布设状况。然后对各站点的观测资料结果进行了分析，根据珠峰站多年观测数据发现夏季存在明显的冰川风，冬季高空存在很强的西风期。高原上大于 1 km² 的湖泊有 1000 多个，高原湖泊蒸发对区域水循环非常重要，根据纳木错湖面通量观测发现 4~6 月纳木错湖贮存能量，9~11 月释放能量，非结冰期能量基本平衡，能量平衡率为 0.97；基于 Makkink 方法得到小湖长时间序列（1979~2015 年）的湖面蒸发呈现增大的趋势。感热加热对高原气候环境的研究很重要，要实现高原复杂地形下感热通量的准确计算，获取准确的参数至关重要。以台站小尺度测量数据获得局地动力学和热力学粗糙度，以有效粗糙度用于区域模型的计算，并且在数值模式及卫星遥感参数化方案中利用观测数据拟合的热附加阻尼值计算热通量可获得更为准确的结果。

报告还介绍了团队利用卫星遥感资料分析青藏高原植被覆盖状况、地表温度，地表热通量年际变化规律的研究结果，并通过台站观测资料验证，对比了不同类型遥感资料在研究地气相互作用过程方面的适用性。最后，展望了未来工作计划：扩大研究范围，聚焦季风和

西风影响断面，根据天空地立体综合观测方案，利用青藏高原、第三极环境和泛第三极环境观测研究平台，获得观测点结果，通过模式模拟、卫星遥感参数化和陆面资料同化系统实现整个泛第三极地区陆面过程的分析，同时以观测数据对模拟数据进行验证，并反复循环，提高准确性，最终得出泛第三极地区多圈层地气相互作用过程和大气边界层过程对区域天气和气候环境变化的影响规律。

10. 屈建军研究员：中国特征环境重大工程风沙危害形成机理与防治对策

目前青藏高原和戈壁等特殊环境下的重大工程遭受风沙灾害的严重影响，其严重威胁交通安全，如青藏铁路、兰新铁路等。目前常采用的流沙固定过程主要分以下几个步骤：流动沙漠、草方格固沙、种植沙生植物、形成人工植被、苔藓类及草本植物等。随着与公路距离缩小，依次采用阻沙栅栏、空留积沙带、草方格固沙带及草方格护坡带等防沙措施。

报告梳理了特殊环境风沙灾害机理与防治技术，戈壁特大风区及特殊地形风沙灾害形成机理与防治的研究，重点展示了两方面内容：

(1) 青藏铁路——海拔最高铁路的风沙防治。青藏铁路主要遇到沙埋线路、路基及涵洞，桥梁积沙等沙害问题。研究了高寒区风沙运动规律，阐明了高寒环境下风沙流的起动与传输特征。通过栅栏流场、石方格流场和输沙量风洞模拟及野外监测，揭示不同路基断面风沙危害机理，研发适合高原的风沙防治体系和新材料。(2) 敦煌自然与文化遗产——戈壁风沙防治。针对莫高窟经常遭到的风蚀、积沙、粉尘磨蚀等风沙危害，提出了敦煌自然文化遗产风沙灾害防治关键技术。建立了极端干旱区世界文化遗产沙害防治技术体系，提出“阻-固-疏-导”相结合的“六带一体”沙害防护体系。

最后，总结了重大工程风沙防治未来研究热点：提出防沙材料装配式和施工装备化的理念，进行可装备化防沙治沙新材料和关键技术

新工艺研发；研发低成本、环保型、综合高效的防沙治沙新材料，研制工程化产业化防沙治沙的智能新装备；集成智能机械化防沙治沙系列新材料、新装备、新技术，形成有机、高效、动态管理的防沙治沙施工技术系统。

11. 王根绪研究员：寒区复杂下垫面生态水文学研究进展

冰川、积雪、冻土是影响寒区流域水过程的重要成分。在过去几十年，全球范围内寒区的水文过程发生了很大变化，例如：青藏高原湖泊水的扩张，如何解释水文过程的这种变化是目前一个很大的难题。报告首先介绍了目前的研究进展，认为寒区水文问题的最大难题为“下垫面冻土和高寒生态系统如何影响水循环和径流效应”。关于寒区水文学理论与方法目前还存在很多不足：在寒区陆面 SAPC 系统水热耦合传输方面缺乏大气-植被-冻土水热交换与传输过程的理解及定量模型；传统的降水-径流形成理论不能适用；坡面产流模式和机理不清。

报告总结了目前团队在寒区水文方面的研究进展。冻土-生态耦合变化及其水分作用研究发现：冻土退化对植被生态具有正逆双向作用，其相应方式存在阈限；高寒地区草地变化与显著差异并存，与冻土条件和土壤水分条件密切相关；水分而非温度是多年冻土干旱草地 NPP 变化的主要驱动力。冻土-生态耦合过程对土壤水热传输方面的结果表明：土壤水分动态和土壤温度动态对植被覆盖变化有很大的影响；青藏高原多年冻土有空间反向变化与生态作用特征，地温的空间分布格局是植被覆盖、土壤有机质和地形等因子共同作用的产物，修正了过去单纯基于地形因子的冻土温度空间分布理论；提出并定义了描述土壤水分活动对活动层冻融响应的参数系统；对土壤水热耦合模型与路面过程模式进行了改进，提出了生态“二元”作用的 DOC-TEM 模型。流域尺度冻融过程时空动态模拟方面：准确识别了植被、地形双因子作用的空间差异。

12. 吴梦军教授级高工：寒区公路隧道关键技术探讨

针对公路行业目前尚无寒区工程统一标准的问题，结合建筑行业《建筑气候区划标准》(GB50178-93)、《民用建筑热工设计通则》(GB50352-2005)、《民用建筑热工设计规范》(GB50176-2016)、《水工建筑物抗冰冻设计规范》(GB/T50662-2011)和《混凝土结构工程施工及验收规范》(GB50204-92)中有关寒区以及严寒区的区划指标，考虑寒区公路行业发生工程冻害的具体情况，建议用月平均气温低于 0°C 且年日平均气温低于 5°C 的天数超过90天两个指标进行寒区的区划，当寒冷气候持续时间超过145天则为严寒地区。同时，考虑寒区岩土和环境的相互作用，将寒区的临界冻结深度规定为0.15 m。寒冷和严寒地区的分界深度为1.0 m。

报告对目前寒区公路隧道和水工建筑建筑物规范中有关冻胀力的计算方法进行了讨论。认为冻胀力应同含冰量、衬砌刚度、温度变化、地层条件等相关，目前还没有冻胀力计算的统一计算方法，现有规范中各个取值方法均有差异和不足，同时，多年冻土区和季节冻土区以及冻土和冻岩的冻胀力计算方法应有区别，需要做深入研究。针对具体工程进行了冻胀力计算，并对衬砌结构受力进行了分析，认为寒区公路隧道只采用抗冻的设计思路难以满足工程要求，且工程代价较大，应强化防冻设计理念，加强各种防冻措施的设计，确保隧道不冻。从设防要求、设防分级和防冻方式三个角度讨论了寒区公路隧道的防冻设计，并总结了目前工程常用的防冻措施：敷设保温层防冻、管道电伴热系统防冻、放水保温、填充防冻液防冻等，以及各种措施的优缺点。最后，对寒区公路隧道的消防给水系统进行了讨论，结合美国规范NFPA502、奥地利规范和我国《建设设计防火规范》以及实际工程经验，认为干式消防是寒区公路隧道较为适宜的消防措施，基于公路隧道事故应急救援时间和工程经济性分析，给出了满足国内公路隧道防冻要求的干式消防关键参数，如干式系统充水时间不超过10 min，

消防管网最大允许长度为 1500 m。

五、论坛提出的科学问题和战略建议

本次论坛，与会专家学者纷纷发表对寒区旱区工程与环境领域相关问题的看法和观点，围绕重点关注的科技问题和热点工程问题展开热烈的讨论和交流，提出了未来寒区旱区交通工程服役性能的提升对策与建议。

(1) 寒区路基/路面工程

准确把握寒区道路工程详细的工程地质勘探资料、路基温度变化特征、路基冻融变形过程，是寒区道路工程合理设计、施工及运维的有力保证。此外，针对寒区道路工程病害，应该在设计、施工和运维中坚持“预防为主，防治结合”的大原则，对出现病害的地方争取一次性根治，以防止寒区道路病害的再次发生。在针对我国寒区路基/路面工程危险源、病害类型、已有防治措施调研和分析基础上，结合最新研究进展，提出如下对策与建议。

1) 进一步深入研究寒区环境-工程互馈过程与多场耦合理论：寒区工程环境对冻土路基的服役性能会产生重要影响，如冻土路基水热边界的改变会对路基的热力稳定性产生影响，而路基/路面水热变化也会影响路基温度的分布及水分的迁移，进而引起路基/路面结构破坏，加剧路基/路面的劣化过程，造成路基/路面服役性能下降。因此，深入研究寒区环境-工程互馈过程与多场耦合理论对于认识寒区路基/路面劣化过程，提高寒区路基/路面服役性能具有重要的现实意义。

2) 完善冻土区宽幅高等级公路冷却热力学理论，研发高效的路面-路基强化冷却综合技术：首先要对宽幅高等级公路的热力学特征进行研究，进而深化冻土区宽幅高等级公路冷却热力学理论，从而才能够充分考虑路基的降温效能，选用经济有效的路基结构，尽量避免或者防止路基内部出现融化夹层，并确保路基温度场横向对称。此外，还应综合考虑材料反射率、耐久性、成本等因素，研发新型路面反射材

料，增大路面反射率，提高路基/路面的热力稳定性。从路基、路面双重角度出发，研发有效的路面-路基强化冷却综合技术。

3) 深化高寒条件下路基/路面材料劣化机理，研发耐低温、抗冻融、防辐射的高性能材料：寒区道路的服役性能受材料抗冻融性能、抗紫外线辐射能力的影响。目前，尚未有一种可在寒区广泛推广、经济适用的路基/路面材料。因此，迫切需要加强对高寒条件下路基/路面材料劣化机理的研究，研发适用于高寒、冻融循环、干湿交替、辐射强烈等复杂条件的耐久性新型材料，提高寒区道路工程的长期服役性能。

4) 加强冻土路基/路面预防性养护技术研究及应用：在道路还未出现或刚出现轻微病害时，采取养护措施，以保持良好的运营状态，延缓未来路面破坏，延长其使用寿命。预防性养护是针对没有结构性破坏的道路，施工快、周期短，从全寿命周期内考虑可以使费用降到最低。在寒冷地区，道路预防性养护技术和理念都需要加强，以提升道路的服役性能。

5) 建立寒区交通工程全寿命周期服务状态评价系统及智能管控平台：寒区交通工程所处的复杂恶劣环境及动荷载具有显著的随机性，其安全状态的实时监测、检测及评估就显得尤为重要。如何实现智能监测、安全诊断、灾害预警和超前加固，是保障工程全寿命周期安全运营的关键。因此，亟需建立寒区交通工程全寿命周期服务状态实时监测与评价系统，开发智能安全综合管控平台，实现对工程安全的智能诊断及管控、灾害预警及防控。

此外，对于季节冻土区路基工程，设置保温层或者采用热管加热技术减小路基的冻结深度，或研发新型路基侧向排水材料，减少路基含水量，进而控制路基冻胀，减少冻害的发生。

(2) 寒区桥梁工程

在对我国寒区桥梁工程病害特征和防治技术现状调研和分析的基

础上，结合最新研究进展，提出如下建议与对策。

1) 深入研究寒区桥梁-冻土相互作用机理，发展寒区桥梁计算理论：寒区桥梁-冻土相互作用过程复杂，深刻理解寒区桥梁-冻土相互作用机理是寒区桥梁建设和病害防治的前提和基础。目前，对于寒区桥梁-冻土相互作用过程，特别是对其长期热力行为的相关研究较少，桥梁基础变形计算主要是借鉴冻土蠕变的计算方法，很少考虑桩基-冻土相互作用的特殊性。因此，亟需深入研究寒区桥梁-冻土相互作用机理，发展适合寒区桥梁的计算理论。

2) 提出适合冻土热力特性的桥梁设计理论和建造技术：冻土工程地质性质复杂，尤其对温度变化极其敏感。寒区工程环境恶劣复杂，也是造成寒区桥梁工程病害多发、服役期性能下降的主要原因。过去的桥梁设计，一般沿用常规地区的工程经验，很少考虑寒区桥梁的特殊性。因此，亟需提出适合冻土热力特性的桥梁设计和建造技术。在深刻理解寒区桥梁热力特性的基础上，有针对性地在设计和建造中充分利用冻土与桩基的冻结力，有效避免桩基对冻土环境的扰动，进而形成适合冻土热力特性的桥梁设计理论和建造技术。此外，寒区路桥过渡段差异变形病害非常普遍，长久以来路桥过渡段跳车一直是影响运营速度、行车安全和舒适度的关键难题，往往通过经常性维护养护来缓减，缺乏成熟有效的解决方案。亟需在掌握路桥过渡段水热力过程的基础上，提出有效的病害处置技术。当前，“一带一路”建设正进入全面推进阶段，沿线冻土和冻融灾害依然复杂，如何保障沿线桥梁工程的安全绿色建筑是不可避免的难题，对寒区桥梁设计、施工和安全运营意义重大。

3) 研发寒区桥梁病害智能检测、快速修复加固技术：实践证明，研制满足现场数据实时采集、智能分析和远程控制的寒区桥梁病害智能检测技术体系，对推动高寒地区桥梁监测技术进步及提高桥梁养修效率具有积极的意义。研发寒区桥梁病害智能检测、快速修复加固技

术是应对寒区桥梁病害的有效途径之一，提升监测方案和监测系统可靠性，研发耐恶劣环境和现场复杂条件的智能化、快速化监测设备，如采用多点分布布局模式的高寒地区桥梁长期监测系统，并使监测设备具备结构合理、耐低温、耐低压、防水、低功耗和功能模块化等特点，满足寒区环境恶劣、保障不足的特殊要求。另外，国内外对寒区桥梁病害的应急修复技术匮乏，亟需发展桥梁病害的预防性养护与快速修复加固技术。

(3) 寒区隧道工程

1) 构建寒区恶劣环境下隧道长期服役性能的预测评价体系：应基于隧道衬砌结构温度、水分、变形及应力长期监测结果，考虑寒区周期冻融作用下隧道衬砌结构受力性状及时空演化规律，结合衬砌混凝土冻融损伤演化规律，系统分析寒区隧道衬砌结构裂缝产生及发展过程，揭示隧道衬砌长期服役性能衰减机制，构建隧道长期服役性能的预测评价体系。

2) 研发高寒隧道的新型绿色节能防抗冻技术：结合寒冷偏远地区经济发展、自然条件与运营条件，开展降低交通隧道照明亮度标准的可行性研究。在保证行车安全的前提下，研发蓄能式发光涂料、反光诱导标识、车辆主动照明等新型绿色节能技术。考虑高海拔高寒区隧道的冻害规律，结合分子振动暗红外纳米热管的快速、高效、低能耗的发热特征，采用温度反馈伺服控制模式，确定柔性热管布置方式及温控技术参数，研制成套智能节能保温技术，使围岩和排水系统终年处于不冻结状态。

3) 研究高寒高烈度震区隧道动力致灾机制及隔减震技术：开展高寒高烈度震区隧道结构的动力响应时程及特征分析，揭示高烈度震区、活动性断裂带等隧道结构地震动力损伤时程演化规律。分析围岩与衬砌结构损伤的空间分布特征、节理与块体滑移运动机制和结构变形特性等的时程演化规律，阐释寒区隧道地震灾变机制，研发高寒高烈度

地震区隧道隔震技术。

4) 构建高寒缺氧环境下长大隧道的防灾、预警及救援体系：基于火灾发展规律，分析人员疏散可用安全时间，确定火灾通风的临界风速，提出烟流控制标准；基于网络通风理论，优化设计隧道工程防灾通风系统。基于高寒缺氧环境下人员体力消耗及人群疏散特点，研究分析人员疏散必需的安全时间。针对高原地区城镇分散、人烟稀少、运输里程长、隧道应急救援难度大等特点，建立高寒缺氧地区交通隧道的防灾、预警及救援体系。

六、其他特色与创新之处

此次论坛促进了寒区旱区工程与环境领域产、学、研、用的有力结合，推动了相关单位在功能与资源优势上的协同与集成化，加强了技术创新链条各节点的密切对接。从研讨的议题和报告内容来看，论坛涉及了国内外重大寒区旱区工程建设，如川藏铁路、青藏高速公路、京莫跨国高铁等，研讨了寒区旱区重大工程建设及环境协调发展的关键科学和技术问题，对整个寒区旱区交通工程领域的科技前沿问题、工程难题等进行了全面的梳理和讨论。不仅对推动新时代国家寒区旱区重大工程绿色发展有重要意义，而且对推动寒区旱区重大交通工程技术走出国门意义重大。

（作者：赖远明，中国科学院院士，中国科学院西北生态环境资源研究院院长、研究员；张明义，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副主任、研究员；喻文兵，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研究员；温智，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研究员；李双洋，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研究员）

联系方式：中国科学院学部工作局学术与文化处，010-59358366