2020年度陈嘉庚科学奖专辑

陈嘉庚青年科学奖——地球科学奖获奖人

唐朝生

南京大学教授, 博士研究生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部青年长江学者, 国家优秀青年科学基金获得者. 2018年获国家科技进步一等奖(排名第14), 2012年获IAEG-RWP奖亚洲唯一提名. 中国地质学会第十四届金锤奖获得者, 中国地质学会工程地质专业委员会首届谷德振青年科技奖获得者, 江苏省“六大人才高峰”高层次人才.

相关成果名称: 极端干旱气候作用下土体工程性质灾变过程及应对措施

受全球气候变化影响, 近年极端干旱气候事件频发, 诱发了一系列环境工程地质问题或灾害, 对国民经济建设和社会可持续发展产生深远影响, 给当前工程地质研究带来许多新的挑战. 大力提高我国自然灾害防治能力, 关系国计民生. 唐朝生过去围绕极端干旱气候作用下土体工程性质灾变过程及应对措施开展了系统研究, 揭示了极端干旱气候作用下土体水分蒸发-收缩-龟裂过程及其耦合作用关系; 阐明了极端干旱气候作用下土体内部热/水/力/变形/结构等多场参数的时空演化规律及工程性质响应特征, 构建了大气-土体相互作用理论模型; 创建了土体龟裂研究方法体系, 研发了基于物理、化学和生物原理的纤维加筋、高分子材料固化和微生物成矿等土质改性抗旱新技术, 开发了工程土体变形分布式光纤监测及灾害预警技术. 研究成果弥补了工程地质领域在极端干旱气象灾害方面的研究不足, 对提升工程地质界应对极端干旱气候事件的决策能力、增强综合防灾减灾能力, 具有重要的理论和现实意义. 相关成果已在多个重要工程中得到成功应用, 取得了显著的社会和经济效益. 不仅如此, 涉及干旱气候-土体相互作用方面的研究成果对农业、土壤、环境、生态等及其他相关学科领域研究亦有重要参考价值.

极端气候工程地质: 干旱灾害及对策研究进展

唐朝生

南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

2020-03-19 收稿, 2020-05-15 修回, 2020-05-15 接受, 2020-06-02 网络版发表

国家杰出青年科学基金(41925012)、国家优秀青年科学基金(41322019)和国家自然科学基金(41572246, 41772280)资助

摘要 受全球气候变化影响, 极端气候事件的发生频率和强度均呈显著加剧趋势, 并通过各种方式作用于地质体, 诱发一系列工程地质灾害, 严重影响经济社会可持续发展, 给当前工程地质研究带来许多新的挑战. 迫切需要加大极端气候工程地质作用及防灾减灾基础研究. 这对于提高我国重大工程应对气候变化和极端气候事件的防御及其决策能力, 提升我国自然灾害综合防治能力, 具有重要战略和现实意义. 这也是现代工程地质学科的重要使命和发展方向. 针对干旱灾害问题, 近些年来工程地质界围绕干旱气候-土体相互作用方式、作用结果、监测技术及对策开展了大量研究, 在干旱气候作用下土体工程性质响应过程及灾变机制方面取得了重要进展, 尤其在土体蒸发、收缩、龟裂过程及机理等方面取得了一批创新性研究成果, 弥补了工程地质领域在干旱气象灾害方面的研究空白, 为指导干旱地区的工程地质实践和防灾减灾工作提供了科学依据. 今后, 除了需要加强气候变化以及大气-地质体相互作用基础研究外, 还应该加强相关技术研究, 如分布式光纤感测技术、基于自然解决方案的微生物地质工程技术、大数据与云计算技术、人工智能等, 为工程地质防灾减灾提供先进的理论和技术支撑.

关键词 气候变化, 地质灾害, 极端干旱气候, 土体工程性质, 蒸发-收缩-龟裂, 气候-土体相互作用

1 极端气候工程地质

政府间气候变化专门委员会(IPCC)的研究报告指出, 受全球气候变化影响, 各种极端气候事件, 如强降雨、长时间干旱、多年一遇的低温寒潮或高温热浪等^[1]发生的频率、强度、空间范围及持续时间都呈显著加剧趋势, 这类极端气候会对工农业生产和生态环境带来巨大负面影响, 且严重拖累世界各国的经济社会发展, 阻碍全球可持续发展战略目标的实现, 甚至影响社会稳定和国家安全策略.

从工程地质学科角度来看, 极端气候会对地质体施加各种影响, 导致工程地质条件严重恶化、工程地质作用和过程加剧、岩土体工程性质快速劣化、地下

水位大幅度变化和地貌演化过程加速等工程地质问题, 并诱发一系列地质灾害, 摧毁基础设施, 造成人员伤亡和巨大经济损失. 这给当前工程地质研究带来许多新的挑战(图1)^[2-5]. 正因为如此, 近年来欧盟、美国、加拿大等发达国家和地区的地质、岩土工程领域相继启动了一系列与全球气候变化及灾害相关的重大研究计划项目, 如2014年欧盟重大国际合作项目GREAT获得立项. 该项目旨在全球范围内开展学术交流和合作, 共同提升工程领域应对极端气候灾害的能力. 与此同时, 气候变化与工程地质防灾减灾也越来越成为许多国际会议的热门主题, 极端气候工程地质也成为了现代工程地质研究的重要发展方向.

我国是全世界极端气候事件及灾害最严重的国家

引用格式: 唐朝生. 极端气候工程地质: 干旱灾害及对策研究进展. 科学通报, 2020, 65: 3008–3027

Tang C S. Extrem climate engineering geology: Soil engineering properties response to drought climate and measures for disaster mitigation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3008–3027, doi: 10.1360/TB-2020-0282

图1 典型极端气候事件及其诱发的典型工程地质问题与灾害

Figure 1 Typical extreme climate events and the induced typical engineering geological problems and disasters

之一,且灾害种类多、强度大、频率高,危害严重.中国气象局的研究资料表明,未来相当长一段时期内,我国群发性或区域性高温、暴雨、干旱等极端气候事件频次和范围将显著增加,灾害风险加大^[1].尤其近几十年来,我国重大工程建设的数量和规模不断增加,如“一带一路”、川藏铁路、南水北调、西气东输、西电东送、青藏铁路(公路)、高速铁路/公路网络建设等.极端气候事件会通过影响重大工程设施本身、重要辅助设施尤其是重大工程所依托的工程地质环境,导致地质灾害,从而进一步影响工程的安全性、稳定性、可靠性和耐久性,并对重大工程的运行效率和经济效益产生重要影响^[6].如“一带一路”贯穿亚、欧、非三大洲,涉及70多个国家,44亿多人口,沿线国家与地区地质构造复杂,极端气候事件及自然灾害频发.据国际灾害数据库显示,“一带一路”沿线重大基础设施建设与区域可持续发展面临着自然灾害的重大威胁,灾害损失是全球平均值的两倍以上.为此,中国科学院成都山地灾害研究所崔鹏等人^[7]指出,“一带一路”沿线工程应高度关注气候变化因素的影响,尤其要重视极端气候事件诱发重大工程大规模灾害风险的预测与防范.川藏铁路全长1500余千米,从海拔500 m的四川盆地跃升到4000多米的青藏高原,穿越板块构造活跃带、高山峡谷地形急变带和极端气候多发带,揭示构造活动-峡谷地貌-气候变化内外动力跨尺度耦合作用及其孕灾机理,是确保川藏铁路工程顺利推进和后期安全运行重要前提.此外,受气温升高影响,青藏地区多年冻土

出现退化,造成地基融沉变形,地基承载力降低,不良冻土现象发育,严重影响冻土工程的安全稳定.不仅如此,由于冰川退化导致该地区冰湖堵塞湖数量和面积在过去40年间分别增加了约7和0.6倍,近10年发生不同规模的冰湖溃决事件约20起.强降雨引发的滑坡、泥石流等地质灾害,是对铁路、公路、能源管线运行安全危害最大的自然灾害^[8,9].极端干旱气候导致地下水位下降和地基土体收缩,进一步加剧地面沉降变形和地裂缝发育,对浅表层基础设施和工程结构产生大规模破坏,对其安全性和稳定性产生极大负面影响^[10-12].因此,迫切需要开展气候变化尤其是极端气候工程地质作用及防灾减灾研究.

气候变化和极端气候事件是工程地质灾害的重要营力之一.从地球系统科学的角度来看,地表的大规模物质运动过程或重大地质灾害动力过程在本质上是地球多圈层耦合作用的结果,其中大气圈动力系统起到重要作用(图2).地球深部动力导致地壳升降,改变地质体的内部应力状态(内动力),是区域性地形地貌条件的控制因素,在冰川、河流以及人类活动等地球表层动力系统及大气圈动力系统的进一步作用下(外动力),地表物质发生以水平运动为主的迁移,这往往也是滑坡、泥石流等地质灾害的表现形式.如果辅以极端气候事件的耦合作用,会对地表物质大规模运移及地貌演化施加更加强烈的影响,酿造重大地质灾害和安全隐患.如2010年四川清平8·13特大泥石流是我国近20年来有记录的规模最大的泥石流灾害,它的爆发是内

图2 地球多圈层耦合作用与地质灾害

Figure 2 Coupling effects of multispheres of earth's system and the induced geological disasters

外力尤其是地震活动和强降雨耦合作用的典型结果。2008年5·12汶川地震引起的大规模山体崩塌和滑坡为该泥石流积累了大量的松散固体物源,而泥石流爆发当天的降雨量达到了特大暴雨的水平,且远高于历史同期平均日降雨量,成为直接诱发因素^[13]。需要强调的是,我国幅员辽阔,气候类型多样,地形地貌复杂多变,各种构造活动活跃,许多地方分布有大量对气候变化非常敏感的特殊岩土体^[14~17]。因此,气象灾害的表现形式呈现多样性、地域性和季节性等特点,极大地增加了研究难度。

随着我国经济社会的快速发展以及资源、环境和生态压力的不断加剧,极端气候事件防范应对形势更加严峻复杂,自然灾害损失日益加剧加重,已成为制约国民经济持续稳定发展的主要因素之一。尽管我国近年全面实施了《国家气象灾害防御规划(2009–2020)》,但主要侧重于全国七大流域防洪和水利农业领域抗旱,在工程地质或重大工程方面的极端气候防灾减灾基础依然十分薄弱,相关研究工作严重滞后和不足。在工程地质领域,过去与极端气候相关的研究主要局限于强降雨诱发崩塌、滑坡和泥石流等典型地质灾害方面。截至目前,学界在降雨致灾动力过程、成灾模式、灾害预警预报和相关理论方面尚未取得统一认识,仍然有待进一步深入研究。除强降雨外,工程地质领域有关其他极端气候工程地质作用及灾害方面的系统研究几乎处于空白状态。

因此,无论是从国家发展需求层面,还是从工程地质学科发展需求层面,如何有效应对极端气候事件,加强灾害风险管理,迫切需要开展针对性研究。丁一汇和杜祥琬^[6]在2015年发布的《第三次气候变化国家评估报告》特别报告中明确指出:研究影响我国经济发展的区域性重大工程所面临的气候变化风险,以及在气

候变化的形式下,由极端气候事件产生的新兴风险,及其对重大工程安全运行可能存在的影响,并提出在工程设计和运行管理上适应气候变化的新对策,对于提高重大工程应对气候变化和极端气候事件的防御及其应对决策能力,促进我国经济社会持续、健康、快速发展,增强综合防灾减灾的安全保障能力,实现全面建设小康社会的宏伟目标,具有重要的战略和现实意义。习近平总书记2018年10月在主持召开的中央财经委员会第三次会议中也特别强调,大力提高我国自然灾害防治能力,关系国计民生。

2 干旱气候工程地质作用及灾害

无论极端气候灾害以何种形式呈现,如果以工程地质思维来透析,其本质都是因为极端气候通过各种作用方式改变地表岩土体温度场、结构场、物质场尤其是水分场,进而改变岩土体的工程地质特性,引起灾变^[18~23]。在我国发生的所有自然灾害中,干旱灾害发生频率最高,对工农业生产、生态环境和社会经济的影响也最为深远,年均经济损失超千亿元^[24]。美国国家气象研究中心(NCAR)的研究成果表明(图3(a)),受全球气候变化的影响,在接下来的几十年中,全球干旱呈严重加剧趋势,持续时间长、影响范围广和强度高的极端干旱气候发生频率显著增加,某些地区的干旱会持续恶化,局部地区甚至可能遭遇百年一遇甚至几百年一遇的打破历史纪录的特大旱情^[25,26]。可以预见,干旱气候带来的灾害问题将越来越严重,必须引起人们的高度重视,并开展深入而系统的防灾减灾对策研究,而工程地质学科对此肩负重要使命。

然而,过去工程地质领域考虑气候因素的研究主要局限于强降雨引发的地质灾害方面,有关干旱气候工程地质作用的研究报道比较鲜见,相关研究工作进

图3 全球干旱发展趋势及其影响。(a) 21世纪全球干旱发展趋势, 资料来源: 美国国家气象研究中心(NCAR); (b) 干旱气候导致的典型工程地质和环境地质问题

Figure 3 Global drought development trend and the related impacts. (a) Global drought development trend in the 21st century (source: NCAR); (b) drought-induced typical engineering geological and environmental geological problems

展亦十分缓慢^[27-29]。事实上, 无论是降雨还是干旱, 直接改变的都是土体的含水率, 而土体的工程性质对含水率变化非常敏感。相对于降雨, 干旱气候具有影响范围广和持续时间长的特点, 干旱对土体含水率的改变是一种潜移默化的过程, 其对土体工程性质的影响具有缓慢性的特点, 常常被忽视。此外, 土体在干燥过程中表观上呈现逐步硬化的趋势, 这看似对工程有利, 实则不然。唐朝生等人^[30-33]通过开展大量研究, 发现土体尤其是黏性土在脱水过程中, 水分场会重新分布, 导致土体的非饱和过程和非饱和带的扩张, 极大地改变了

土体的物化、水理和力学性质, 是许多区域性工程地质和环境地质问题的诱因(图3(b))。

比如在干旱气候作用下, 土体会发生显著的收缩变形, 引起地面沉降, 对地表的基础设施和工程结构的稳定性产生极大负面影响。欧洲、北美洲和亚洲等世界许多地区都曾因遭遇严重干旱而出现大规模房屋、道路和桥梁等基础设施开裂受损的现象, 经济损失巨大^[34]。英国地质调查局(BGS)的最新研究成果指出, 每年英国因干旱引起的地面沉降灾害损失超过20亿英镑, 到2050年, 该数值有可能超过60亿英镑, 引起了当地政

府部门和研究人员对干旱气候作用下地面沉降问题的极大关注^[35]。在美国, 1987~1989年约36%的国土面积遭受极端干旱, 导致390亿美元的经济损失^[12]。在法国, 自1990年以来, 干旱引起的地面沉降灾害损失逐年递增, 据统计仅2006年就已达43亿欧元^[34]。由于极端干旱气候频发, 欧洲其他地区与干旱相关的经济损失也呈急剧上涨趋势^[36]。我国的干旱灾害尤其严重, 如20世纪90年代末, 华北地区连年干旱, 地下水位大幅下降, 地面沉降和地裂缝活动显著加剧; 2010年西南地区遭遇百年一遇的特大干旱, 昆明国际机场跑道和多条高速公路因地面沉降出现了严重破损; 2013年夏天长江中下游地区出现长时间罕见极端高温和干旱气候, 地表蒸发量、工农业及城镇生活用水突然增加, 江苏省苏州、无锡、常州地区多个地面沉降监测点数据出现明显回升, 类似事件在国内外均有较多报道^[37,38], 本文不再赘述。

干旱气候引起的持续水分蒸发还会导致土体中发育大量干缩裂隙, 俗称龟裂, 极大弱化土体的工程性质, 为土体工程灾变的发展提供有利条件^[39~44]。许多研究表明, 边坡中的干缩裂隙严重破坏了土体的整体性, 为雨水入渗提供快捷通道, 是导致边坡失稳的重要前提^[45]。如我国南水北调中线工程穿越膨胀土渠段累计近400 km, 大部分的渠段坍塌和浅层滑坡都与膨胀土中发育的龟裂有关^[46]。龟裂还会成倍增加土体的渗透性, 对水利工程和环境岩土工程产生负面影响。2007年我国重庆地区遭遇的特大旱情使1200座水库大坝严重开裂, 稳定性降低, 直接面临暴雨的威胁。英国、荷兰、美国、澳大利亚等许多国家境内成百上千千米的防洪堤坝长期经受龟裂的困扰, 每年需要投入数百亿美元对坝体内发育的龟裂进行排查和修复, 预防管涌和溃决^[47]。在城市垃圾卫生填埋场的设计过程中, 由于对干旱气候因素考虑不足, 导致隔离系统开裂失效的例子屡见不鲜^[48]。一些土质文物或者古建筑在干旱气候作用下表面也容易发育龟裂, 从而加速表层结构的风化、剥蚀和破坏, 极大地增加了文物和古遗址的保护难度^[49]。还有学者指出, 干旱蒸发导致表层物源堆积体更加松散破碎, 为雨季爆发大型泥石流创造了便利条件^[50]。

我国幅员辽阔, 土体种类多样, 不同的土体由于其物质成分和结构特征存在差异, 其对干旱气候的敏感程度和灾变风险也存在差异。总体上, 膨胀土作为一种特殊土, 由于富含亲水性黏性土矿物, 其工程地质特性

对气候变化异常敏感, 常给工程建设活动带来巨大危害, 是一种“问题多的特殊土”^[51]。在干旱气候作用下膨胀土会发生较大的收缩变形, 且表面极易发育大量龟裂, 胀缩性和裂隙性是膨胀土的典型特性, 因此膨胀土也常被称之为“裂土”^[52]。而我国是膨胀土大国, 膨胀土分布非常广泛, 26个省区存在着这种区域性分布土, 遍及华北、西南及长江中下游地区, 3亿以上人口生活在膨胀土分布区, 而这些地区往往也是干旱发生频率较高的地区, 因此我国的膨胀土灾害十分突出。据不完全统计, 我国由于膨胀土地基致害的建筑面积超过1000万 m^2 , 尤其是铁路、公路路基受膨胀土危害非常严重, 年经济损失超过900亿元^[52,53]。正是由于膨胀土对气候及外界环境变化的敏感性, 使工程中的膨胀土问题一直比较棘手, 让人难以捉摸, 甚至被称为“工程中的癌症”、“世界性难题”^[45]。因此, 要实现膨胀土地区的防灾减灾, 必须从根本上理解膨胀土在气候作用下工程性质的响应特征及灾变机制。此外, 我国干旱、半干旱地区面积占全国60%, 干旱气候是土壤盐渍化、沙化、荒漠化的主要驱动力, 严重破坏工程地质环境和生态环境^[24,27]。在我国广大西部地区, 常年处于干旱状态, 土体生产力和工程性质显著劣化, 水土流失严重, 沙尘暴频发, 越来越严重地威胁到人类的生存环境和工程地质活动。

由此可见, 与干旱气候相关的工程地质问题、环境地质问题及灾害具有相当的普遍性, 涉及的领域非常多^[54,55]。2011年11月, 国务院审议通过了《全国抗旱规划》, 这是建国以来编制的第一个关于抗旱减灾工作的专项规划, 充分体现了我国对抗旱减灾的高度重视, 同时也反映出我国干旱气候及其灾害的严重性。但是, 相关抗旱减灾工作的重点主要局限在农业、水利和生态环境领域, 对工程领域的重视程度远远不够。事实上, 无论干旱灾害以何种形式呈现, 归根到底, 都与干旱气候对土体的作用方式及土体工程地质性质发生改变有关。然而, 与降雨相比, 学界关于干旱气候工程地质作用研究存在严重滞后和不足, 我国在这方面的研究尚处于起步阶段^[27]。尤其要强调的是, 干旱涉及土体的非饱和过程, 而传统的土力学理论是建立在饱和土基础上, 因此难以直接指导干旱环境中的工程实践, 这是当前工程地质学科在应对干旱灾害时所面临的主要挑战。

在这样的背景下, 笔者认为开展干旱气候作用下土体工程性质响应过程及灾变机制系统研究已成为当

务之急. 通过研究, 掌握干旱气候作用下工程土体水分场及其他多场信息的时空演化规律、耦合作用机理和关键影响因素, 同时结合土质学、土结构和非饱和土力学理论, 从宏观和微观层面系统阐明干旱气候作用下土体工程性质响应特征. 在此基础上, 揭示干旱气候-土体相互作用过程及物质能量交换规律, 阐明灾变机理, 建立相应的理论模型和预测模型, 并提出干旱灾害对策. 相关研究成果必然对提升我国工程地质界应对全球气候变化能力、提高灾害风险预警能力和减少灾害损失具有重要理论和现实意义.

3 干旱气候作用下土体工程性质响应

要实现干旱气候工程地质防灾减灾, 首先需要了解干旱气候是如何作用于土体的, 以及土体的工程性质是如何响应的. 结合前文的分析, 笔者认为, 解决这些问题的关键是掌握土体的蒸发过程、收缩过程及龟裂过程, 并阐明其机理. 下文将对国内外的相关研究进展进行归纳和总结.

3.1 蒸发过程

蒸发是地表水循环的一个重要环节, 也是干旱气候对土体的主要作用方式和二者之间进行物质能量交换的主要形式. 对于自然界中的土体而言, 蒸发是导致土体水分场和工程性质发生改变的直接原因, 几乎所有与干旱气候有关的工程地质问题 and 环境地质问题首先都源于蒸发作用. 因此, 系统掌握土体水分的蒸发过程是解决干旱问题的前提^[31].

由于土体是一种具有典型各向异性的多孔介质, 其蒸发过程比纯水复杂得多, 它涉及液、气两相流体在非均质多孔介质中的迁移问题, 且受气象因素(温度、辐射、湿度和风速等)和土性因素(含水率、吸力、体变、矿物成分、粒度成分、孔隙分布和密实度等)的共同作用, 因此土体蒸发具有非常复杂的发生发展过程^[31,56]. 为了使所研究的问题简单化, 过去许多学者都选择了均质砂土为研究对象, 因为砂土不会像黏性土一样在蒸发过程中发生明显的体变, 砂土孔隙结构和孔隙水状态相对稳定, 从而规避了许多土性因素的影响问题^[57]. 基于所得试验结果及多孔介质经典水-热-气传输理论, 不同的学者提出了不同的蒸发模型, 用于预测和评估土体在大气作用下的蒸发量. 代表性的成果有Penman模型、Philip & De Vries模型及修正的Penman-Wilson模型等^[58,59]. 这些经典理论模型及以此

为基础发展起来的修正模型在均质砂土中普遍能取得较好的计算结果, 但在黏性土中则会产生较大的误差, 主要是因为黏性土与水分子之间的相互作用非常复杂, 蒸发作用下黏性土中的水分迁移过程比砂土也要复杂得多, 而已有的理论模型大多只考虑了环境温度、相对湿度等气象参数, 较少考虑土性因素对蒸发的影响及蒸发引起的土体工程性质变化, 从而极大地制约了上述理论成果在实际工程中的推广应用^[60,61].

唐朝生等人^[31]对初始为饱和状态的黏性土开展了一系列精细化蒸发试验, 获得了黏性土的蒸发特征曲线(WECC), 发现其蒸发过程呈典型的三阶段特征, 即常速率阶段I、减速率阶段II和残余阶段III, 并基于土质学理论、多孔介质渗流理论及土-水相互作用原理对黏性土水分蒸发过程进行了深入分析, 揭示了蒸发三阶段与饱和度和孔隙水赋存状态之间的关联特征(图4(a)). 在常速率阶段I, 土体通常处于饱和状态, 土中有足够的水分供给蒸发面, 因此第I阶段蒸发速率的大小主要取决于使水分汽化所需的外部能量, 受气象因素的控制, 主要是孔隙中的自由水发生蒸发. 目前国际上关于气象因素对土体蒸发速率的影响已有大量研究成果, 对第II阶段水分蒸发迁移机制也基本清楚, 即毛细水作用是剖面水分传输的主要驱动力, 水分传输速率受达西定律控制^[27,31,62,63].

随着干燥的持续, 土体蒸发逐渐进入第II、III阶段(图4(a)), 蒸发速率不断减小. 关于蒸发速率减小的原因, 学术界尚没有取得统一的认识. Wilson等人^[64]将该现象归因于含水率降低、吸力增加和气-土界面蒸汽压差减小三方面. Tang等人^[32]结合土水特征曲线, 发现第I阶段和第II阶段转折点对应的临界含水率位于进气值(AE)附近, 即土体开始由饱和变为非饱和状态, 并据此提出饱和度减小、水分传输方式及孔隙水赋存状态的改变是导致蒸发速率减小的主要原因. 当土体处于非饱和状态时, 表层逐渐形成干燥土层, 蒸发锋面向土体内部推进, 孔隙中同时存在液、气两相流体, 蒸发过程中剖面水分传输由毛细水渗流作用和水蒸气的扩散作用共同控制, 并逐渐由液相传输向气相传输过渡, 传输速率分别遵循达西定律和菲克定律. 但目前关于蒸发锋面是如何向土体内部推进的以及水分传输方式在蒸发过程中的支配地位是如何变化的并不十分清楚, 缺乏量化研究成果^[63]. 此外, 对于饱和黏性土, 孔隙中首先被蒸发的是自由水, 其次是弱结合水, 最后才是强结合水, 当外部环境条件(温度、蒸汽压)或能量供应强

图 4 土体水分蒸发及收缩过程。(a) 土体水分蒸发过程及机理示意图；(b) 土体收缩过程
Figure 4 Soil water evaporation and volumetric shrinkage process. (a) Soil water evaporation process and mechanism; (b) soil volumetric shrinkage process

度不变时,水分子逃逸到大气中所需克服的阻力逐渐增加,蒸发速率必然减小^[31].理论上,第II和第III阶段转折点应该标志着水蒸气扩散作用开始支配蒸发过程,从土质学的角度上分析,应该是薄膜水运移或者强结合水蒸发开始支配蒸发过程.总之,这些观点尚有待进一步验证.还必须指出的是,蒸发作用下黏性土中水分迁移过程比一般土体更加复杂,因为蒸发会导致黏性土发生显著收缩变形,孔隙比、孔隙连通性不断减小,这些内在因素的变化反过来又必然会对剖面的导水性及水分的迁移过程产生影响,存在复杂的耦合作用关系.土中黏性土含量、黏土矿物成分、压实度等亦是影响蒸发过程的重要因素^[56].总体上,土性应该是第II、III阶段蒸发过程的主控因素.

因此,对于黏性土而言,有必要从土中水自由能和土结构的角度,结合土水特征曲线、蒸发特征曲线、收缩特征曲线及水-土相互作用能量学特征,对第II、III蒸发阶段的水分迁移机制进行综合分析,同时还应考虑孔隙水状态(自由水、弱结合水和强结合水)及裂隙发育状态对蒸发的影响.基于上述认识及大量试验研究结果,借助非饱和土力学的基本理论,笔者提出了如下的黏性土蒸发模型:

$$E_a = \frac{\exp(\Psi g W / RT)}{1 - h_a} f(u) (e_s - e_0) (1 + k R_{sc}), \quad (1)$$

式中, E_a 为实际蒸发速率, Ψ 为土体表面吸力(kPa); W 为水的摩尔质量(18.016 kg/kmol); g 为重力加速度(m/s^2); R 为气体常数(8.31432 J/(mol K)); T 为温度(K); h_a 为参考面处的空气相对湿度; $f(u)$ 为风速的函数, e_s 为蒸发面处温度对应的饱和蒸汽压; e_0 为空气露点温度对应的饱和蒸汽压, R_{sc} 为表面裂隙率; k 为与裂隙发育状态相关的参数.该模型同时考虑了土体裂隙和大气状况对水分蒸发的影响,且能独立于一般土性因素和蒸发时间,无论对于饱和土还是非饱和土均具有较好的适应性,为预测工程土体的实际蒸发量和评价干旱影响提供了科学依据.

持续的蒸发作用会导致土体剖面水分场分布极不均匀,进而引起土体的力学性质存在明显的空间差异性,并随蒸发时间不断演变.传统的岩土力学测试技术和方法一般只针对于小型的均质试样,如何实时掌握蒸发作用下土体水/力学性质的动态演化特征一直是该领域的研究热点和难点.一直以来,在土体剖面中埋设点式的时域反射计(TDR)、中子水分仪、热探针土壤

水分计等测量设备是测试土体特定点位含水率动态变化的基本方法^[65].由于土体具有显著的非均质性,蒸发过程中水分的分布特征也存在较强的空间差异性,局部测点获得的水分资料很难准确反映研究区域水分的分布特征和空间迁移规律.近年来,非破坏性的、三维的和动态可监测的高密度电阻率成像技术(electrical resistivity tomography, ERT)被证明可对蒸发过程中土体内部水分场分布状态及迁移特征进行精细化监测,实时获取土体水分场的三维空间信息,空间分辨率可达到毫米级,即可用于室内小尺度蒸发模型试验,也可用于原位土体水分场空间分布成像分析^[66-68].此外,南京大学施斌研究团队研发的分布式光纤传感技术也为土体水分场监测提供了全新的技术手段,使得原位大规模和长距离土体水分场全分布监测成为可能^[69].

在力学性质方面,传统的土力学测试方法一般只适用于含水率均匀分布的试样,无法获得蒸发过程中土体内部的力学特性变化.而超微型贯入试验仪则能克服上述问题,基于连续的贯入曲线可获得不同深度处土体贯入阻力随蒸发时间的变化规律,从而实现对土体脱水过程中剖面的力学特性的准确表征,为准确掌握动态脱水条件下土体工程性质时空响应提供了创新的方法^[23].研究表明,在土体含水率低于进气值之前,土体的力学性质受含水率的影响比较轻微,在此之后,土体的强度随含水率减小呈指数递增趋势^[12,20].

3.2 收缩过程

土体收缩变形是干旱气候作用的典型结果之一,也是导致地表基础设施和各种工程结构物发生失稳破坏的重要诱因.然而,相比于土体吸湿过程的膨胀变形,收缩变形研究成果尚缺乏系统性和深度,成为制约极端干旱气候工程地质作用评价的瓶颈.

从力学的角度而言,土体在脱水过程中之所以会发生收缩变形,主要是因为干燥过程中引起的吸力增加了土颗粒间的有效应力(图4(b)),导致颗粒发生重新排列而变得更密实,因此吸力是导致土体收缩变形的内在力学机制^[30].但吸力对土体收缩变形可逆性的控制存在临界值,有结果表明,当吸力>113 MPa时,试样的胀缩变形基本可逆,而当吸力<113 MPa时,试样的胀缩变形表现出明显的不可逆性,且不可逆程度随吸力的减小而增加^[70].从土质学的角度而言,主要归因于土中亲水性黏土矿物水化膜厚度的变化.在高含水率条件下,黏土颗粒外围包裹一层很厚的水化膜,颗粒间距

较大,在干燥过程中,水分逐渐被蒸发,水化膜逐渐变薄,土颗粒逐渐靠拢,孔隙不断减小,从而土体体积发生收缩变形。这也可以解释砂土为什么在干燥过程中不发生收缩变形,因为砂土中一般不含黏土矿物。通常情况下,土体的收缩性随黏粒含量尤其是蒙脱石含量的增加而显著增强^[71]。唐朝生等人^[30]指出,正是由于黏性土的这种失水收缩性,龟裂的发育才具备了空间条件。从土结构的角度而言,土体的宏观收缩变形在本质上源于微观孔隙尺寸的减小,收缩变形量主要受控于大孔隙所占的比重,小孔隙对收缩变形的贡献极其有限。此外,土体收缩过程始于大孔隙并逐渐向小孔隙过渡,含水率达到较低水平后孔隙比可能存在反弹现象(图4(b))。

唐朝生等人^[72~74]对黏性土的收缩问题开展了大量试验研究,基于获得的土体收缩特征曲线(SSCC),发现体积收缩过程主要经历3个阶段(图4(b)),即正常收缩、残余收缩和零收缩,3个阶段之间分别以进气点和缩限含水率为界限。具体表现为:

(1) 在含水率低于进气点之前,土体处于正常收缩阶段。在此过程中,体积收缩与含水率变化呈线性发展,土体始终处于饱和状态,体积收缩量与失水体积相等,孔隙比的减小完全归因于孔隙水的蒸发。通常情况下,土体绝大部分体积收缩变形发生在正常收缩阶段。

(2) 当含水率低于进气点后,土体变为非饱和状态,并进入残余收缩阶段。此时空气开始进入孔隙中,体积收缩减缓,收缩曲线呈下凹形,体积收缩量小于失水的体积。这主要是因为孔隙中自由水减少,黏土颗粒的吸附水化膜变薄,颗粒间联接力增加,土体结构重排阻力增大。此外,土体变为非饱和后,吸力开始迅速发展,极大增加了土颗粒间的有效应力和结构刚度,土体的抗变形能力得到加强。

(3) 随着干燥的继续,土体的含水率继续减小,当达到缩限时,土结构处于最密实的状态,土颗粒之间直接接触,体积和孔隙不再随含水率的减小而变化,土体进入零收缩阶段。

然而,对于自然中结构性较强的原状饱和土体而言,其收缩过程可分为4个阶段,即在正常收缩之前,还存在结构收缩阶段^[75],如图4(b)中的虚线所示。在结构收缩过程中,土体的体积收缩量远远小于水分蒸发的体积,收缩曲线呈上凸型。这主要是因为原状结构性土中含有较多的团聚体,团聚体之间会形成一些大的空洞。干燥时,这些空洞中的自由水首先被蒸发而逐渐被

空气所取代,无毛细水压力产生,从而不会导致明显的收缩变形^[74]。

在以往的多数研究中,收缩试验一般只测试竖向变形或者总体积变形,而忽略了土体收缩变形存在明显方向性的客观现实。试验结果表明,土体收缩变形存在显著的各向异性特点,收缩各向异性受含水率、蒸发速率、应力状态和土质条件等许多因素的影响。通过“收缩几何因子”,可对收缩各向异性进行定量分析。对于压实土,在低压实度条件下,径向收缩大于轴向收缩,收缩几何因子大于3,在高密度条件下,轴向收缩大于径向收缩,收缩几何因子小于3。在工程实践中,利用收缩几何因子可对干燥条件下土体发生的沉降变形和收缩开裂特征进行评价。除此之外,收缩几何因子对研究土中水分迁移规律也具有重要意义^[73,76]。

任何科学研究成果的取得,最终目的都希望能解决具体的实际问题。对于土体的收缩而言,如何建立相应的模型来评价或者预测干旱气候引发的地面沉降灾害,指导干旱环境中的工程实践,是本课题的重要研究目标。对此,笔者认为可以借助GIS、卫星遥感和大数据分析等手段,结合气象资料、土体区域性分布资料、土性参数、水分蒸发模型及土体收缩模型,获得区域性的地面沉降指数,在此基础上,进一步考虑旱敏因素(易损建筑分类分布、工程地质条件、土地利用分类、人口密度等)和历史旱损数据,从而建立干旱灾害风险管理模型,达到工程地质防灾减灾的目的,但后续还需要开展更多精细化研究工作。

3.3 龟裂过程

土体龟裂也是干旱气候作用的最典型结果之一,是一种很常见的自然现象。如前文所述,龟裂会极大弱化土体的力学性质,成数量级增加土体的渗透性,是导致边坡和堤坝失稳、工程屏障系统失效、基础设施开裂破坏、坡面水土流失加剧、土地退化等一系列工程地质问题 and 环境地质问题的直接诱因^[77~79]。

土体龟裂现象看似简单,事实上其发生发展过程极为复杂,受许多因素的影响,且涉及多个学科领域。关于龟裂的形成机理,学界尚没有统一的认识,存在蒸发致裂、收缩致裂、空气入侵等多种观点^[80]。唐朝生等人^[30]认为龟裂在本质上是土体发生张拉破坏的一种表现形式,必然是力学作用的结果。收缩空间和力学作用是土体产生龟裂的两个必要条件。在干燥过程中,含水量的减小会导致吸力的产生和土体收缩变形,而吸

力或者土体收缩变形受到限制时会在土体中形成张拉应力场,当张拉应力的的大小超过土体的抗拉强度时,裂隙便会产生(图5(a))^[81~83].因此,吸力和抗拉强度是控制龟裂形成的两个关键力学参数,从而明确了龟裂的力学机制^[30,32].为了获取这两个关键力学参数,他们开展了大量针对性试验,在模拟干燥条件下同时测得了土体的抗拉强度和吸力随含水率的变化规律,构建了抗拉强度特征曲线(TSCC)与土水特征曲线(SWCC)的对应关系,根据土体开裂时的临界状态进一步提出了土体龟裂预测力学模型(图5(b)):

$$\sigma_t = \sigma_x = \frac{1-2\nu}{1-\nu}s, \quad (2)$$

式中, σ_t 为土体的抗拉强度; σ_x 为吸力引起的水平张拉应力; ν 为土体的泊松比; s 为土吸力. 该模型得到了试验验证,为从力学的角度预测龟裂的发育奠定了理论基础.需要指出的是,在土体抗拉强度方面,虽然国内外有一些研究报道^[84~86],但这些研究几乎都不是以解决龟裂问题为目的,且主要局限于特定压实状态的土样,因此无论是试验条件还是研究方法都不符合龟裂

研究的要求,今后有必要在模拟龟裂发育过程的条件围绕该课题开展更系统和深入的研究.

以往人们习惯性地认为龟裂是随机发育的,然而事实并非如此.由于土体物质成分和结构的非均质性,裂隙往往是从土体表面的一些“弱点”处率先产生,主要是因为“弱点”的存在会导致干燥过程中局部收缩变形与周边区域不协调,发生应力集中,从而触发裂隙的形成^[83].裂隙一旦形成,局部的应变能得以释放,拉应力便在裂隙的尖端产生集中,并在尖端的引导下,裂隙从水平方向和竖直方向继续延伸,逐渐变宽加深,对土体进行再“切割”.这主要是因为裂隙的形成,一方面加速了局部水分的蒸发,张拉应力场相对其他区域发展更为迅速和剧烈;另一方面,裂隙形成后破坏了区域的应力场平衡,使裂隙边面的土颗粒失去了部分约束,在吸力和表面张力的作用下向裂隙面两边重新排列,直到在新的位置上达到应力平衡,这在宏观上即表现为裂隙变宽的过程.因此,从力学的角度而言,每一条裂隙的形成和发展都有其内在的必然性和确定性^[87~90].

依据龟裂发展的动态特征,唐朝生等人^[72,83,91~93]将

图5 土体龟裂的形成及发育过程. (a) 土体龟裂形成过程的力学机制示意图; (b) 土体TSCC、SWCC及开裂临界状态预测; (c) 土体龟裂发育过程

Figure 5 Soil desiccation formation and propagation process. (a) Mechanical mechanism of soil desiccation cracking formation; (b) soil TSCC, SWCC and prediction of critical cracking state; (c) soil desiccation cracking process

龟裂的发育过程区分为3个典型阶段: 主裂隙发育阶段、子裂隙发育阶段和稳定阶段(图5(c)). 第一阶段: 在土样的某些位置, 首先产生单根裂隙, 在裂隙尖端的“引导”下向前延伸和弯曲. 这一类最先形成的孤立的裂隙称之为主裂隙. 随着时间的推移, 当相邻的主裂隙靠的足够近时, 彼此似乎相互“吸引”并发展成近垂直相交, 从而将土样表面分割成若干较大的初级块区, 如图5(c)中含水率区间 $w=38.7\%\sim 26.3\%$ 所示. 第二阶段: 在初级块区形成的同时或形成后, 主裂隙上开始萌生新的裂隙, 并近垂直于主裂隙发育, 如图5(c)中含水率区间 $w=30.5\%\sim 20.5\%$ 所示. 这种从主裂隙上发育的分支裂隙称为子裂隙, 若干子裂隙将初级块区细分成更多的次级块区, 直到与邻近的另一主裂隙近垂直相交而停止发育. 在某些面积比较大的次级块区中, 子裂隙上有可能进一步衍生出分支裂隙对次级块区继续“切割”. 第三阶段: 当所有块区面积都处于合理大小的稳定状态后, 尽管试样的失水过程未结束, 但是表面不再出现新生裂隙, 裂隙网络结构定型, 随着干燥时间的延续, 裂隙只是逐渐变宽并最终稳定, 如图5(c)中含水率区间 $w=14.3\%\sim 4.5\%$ 所示. 可以看出, 裂隙总体上垂直发育(图5(c)), 节点以“T”和“+”型为主, 裂隙围成的块区以四边形居多, 这种现象主要对应于相对均质的土体裂隙有序发育的情形, 其中的应变能有序释放, 可归因于“最大张拉应力原理”^[72,83]. 因为龟裂发育是一种张拉破坏形式, 裂隙发育方向总是垂直于最大拉应力方向. 但土体经历多次干湿循环或者表面存在大量“弱点”时, 裂隙往往不再有序发育, 而是会同时在多个点位发育, 此时裂隙节点以“Y”型较多, 夹角以 120° 为主, 这种现象可归因于自然界中普遍适用的“最小能耗原理”^[55,77,82,94].

为了研究土体的龟裂, 过去许多学者提出了不同的方法, 基本建立了龟裂研究方法体系, 主要分为三大类: 室内模型试验、原位观测试验和数值模拟仿真^[95~97]. 定量获取龟裂网络的几何形态参数一直是龟裂研究的重要内容, 对于评价土体的裂隙发育状态、工程性质及潜在影响具有重要意义. 早期的龟裂定量分析技术以现场手工测量为主, 但测量结果易受人为和环境因素的干扰, 加之裂隙网络几何形状异常复杂, 实际操作过程中很难准确、全面获得裂隙长度、宽度、面积、角度等参数. 近些年来, 随着计算机科学的发展, 图像处理技术被广泛用于龟裂网络定量分析中^[93,98~102]. 为了描述土体表面龟裂的发育程度, Miller

等人^[103]引入了裂隙强度因子(CIF)参数, 定义为裂隙面积与土体总面积之比; Velde^[104]和唐朝生等人^[92]利用数字图像处理技术分析了裂隙的分形维数; 袁俊平和殷宗泽^[105]将远距光学显微镜观测系统应用于龟裂试验, 利用所获得的裂隙图像灰度熵作为裂隙发育程度的量度指标. 上述定量分析方法各具特色, 在一定程度上促进了龟裂研究的发展, 所取得的成果加深了人们对龟裂演化规律的认识. 但随着试验工作的不断细化和理论研究的不断深入, 人们对龟裂图像的处理效果、定量分析效率和参数计算精度的要求越来越高. 为此, 唐朝生等人^[93,106]针对龟裂图像的特点和量化要求, 专门开发了一套土体龟裂图像处理系统CIAS(免费下载: www.climate-engeo.com), 该系统可实现裂隙图像的二值化、桥接、去杂、智能识别、骨架化等前期处理, 还可自动获取裂隙面积、长度、宽度、条数、交角、间距、交点个数、连通系数、分形维数以及相关参数的分布特征等, 目前已经在国内外50多个科研机构得到成功应用, 为龟裂研究提供了方便快捷的定量分析手段.

除此之外, CT、ERT、激光扫描技术、数字图像相关技术(DIC)、粒子图像测速技术(PIV)等也被广泛用于土体龟裂研究, 在土体内部裂隙3D量化、原位监测、发育过程预测等方面取得了重要进展(图6(a))^[87,107~111]. 考虑到土体的龟裂发育是应变能集中和释放的结果, 因此应变场是控制土体龟裂发育的重要参量, 但传统的监测方法受技术限制, 无法获取土体内部应变场信息. 近期, 施斌团队^[95,112,113]研发了基于分布式光纤传感的土体变形开裂监测技术, 基于获得的土体内部应变场时空演化特征, 实现了裂隙发育的预测和精准定位(图6(b)), 为工程土体灾变过程的早期识别提供了先进的技术手段. 相对于传统监测技术, 分布式光纤传感监测技术是一类以光为载体, 光纤为媒介的新型感测技术, 可分布式、长距离(达80 km)、长寿命(大于30年)测量光纤沿线的变量信息, 具有抗电磁干扰、抗腐蚀、高灵敏度、高性价比和不漏检等诸多优点, 在区域性土体变形开裂监测方面具有无可比拟的优势, 是现代工程地质灾害监测的重要发展方向, 也是未来大地感知技术和大地感知工程的重要支撑^[114].

3.4 蒸发-收缩-龟裂耦合作用关系

干旱气候作用下土体的蒸发、收缩及龟裂过程并不是完全独立的, 而是彼此叠加相互耦合的, 他们都跟

图6 土体龟裂的研究方法及蒸发-收缩-龟裂耦合作用。(a) 土体龟裂发育过程DIC分析; (b) 土体龟裂发育过程分布式光纤监测; (c) 土体蒸发-收缩-龟裂耦合作用过程

Figure 6 Methods for soil desiccation cracking study and coupling behavior of soil evaporation-shrinkage-desiccation cracking. (a) DIC analysis of soil desiccation cracking process; (b) distributed optical fiber monitoring of soil desiccation cracking process; (c) coupling behavior of soil evaporation-shrinkage-desiccation cracking

土体的含水率变化有关(图6(c))。蒸发是土体收缩和龟裂的前提和诱因, 龟裂是土体干燥失水或者收缩变形到一定程度的产物, 而收缩和开裂又会影响到孔隙水的传输迁移条件, 进而影响蒸发速率。裂隙的扩展正是源于土体收缩变形所提供的空间, 裂隙发育程度与土体的收缩特性显然密不可分。因此, 揭示土体的蒸发-收缩-龟裂耦合作用关系, 对深入理解干旱气候作用下土体工程性质响应机制和采取正确的对策具有重要意义。

基于蒸发特征曲线和龟裂特征曲线(图6(c)), 可以

发现龟裂产生时土体的蒸发速率处于常速率阶段, 说明土体是饱和的, 且大部分裂隙都在饱和阶段发育完成, 这修正了过去许多理论将土体龟裂完全归类于纯非饱和和土力学问题的错误认识。有的学者认为土体开裂时对应的临界含水率应该很低, 或者土体处于比较干的状态, 但试验结果表明, 土体可以在远高于液限含水率的条件下发育龟裂, 且开裂临界含水率与蒸发速率密切相关。因此, 在某种程度上, 蒸发速率相对于开裂临界含水率对龟裂机理研究更具有指导意义, 明确

蒸发速率与开裂临界含水率之间的关系,应该是后续该课题研究的重要方向^[72]。

基于收缩特征曲线与龟裂特征曲线(图6(c)),可以发现裂隙的发育始终伴随孔隙比的减小,说明裂隙在本质上就是微观孔隙收缩的宏观反映,且开裂含水率对应于正常收缩阶段,再次证实土体发育龟裂时处于饱和状态,超过80%的裂隙都是在正常收缩阶段完成发育。此外,收缩特征曲线上的进气值和缩限两个特征点同样影响龟裂特征曲线的变化趋势,比如达到缩限后收缩变形和裂隙发育都发生终止,这说明土体的收缩特性一定程度上反映了龟裂行为,两条曲线上的特征点具有相同的物理意义,利用收缩特征曲线可对土体龟裂发育过程、最终状态进行评价和预测^[33]。

4 对策与建议

干旱气候诱发的工程地质、环境地质问题或者灾害具有多样化和区域性的特点,而且未来呈现加剧趋势,采取有效的措施来应对干旱气候并降低其不利影响对我国生态文明建设和经济社会可持续发展至关重要。当前人类社会还不具备长时间、大范围改变气候的能力,因此最可行的途径是提高地质工程的干旱气候适应性和气候变化韧性。

考虑到地质工程的特点,笔者认为有两套对策思路可供参考:第一,在工程的设计上,充分考虑气候变化尤其是极端干旱气候的影响,在结构形式、工程规模、施工建设、抗变形能力等方面做出具备良好适应性的设计方案,提高地质工程韧性。第二,在工程规划与选址上,尽量避开极端干旱气候发生频率较高的地区或者对干旱气候比较敏感的地质体,同时开展相关技术研究,提高地质体的干旱承载力。比如可根据干旱气候的工程地质作用特点对选址区域或可能产生灾变区域的土体进行改性处理,其目的是提高土体的保水性,降低土体的收缩性和龟裂发育程度,进而提高其干旱适应能力。常用的方法包括物理措施和化学措施,比如在土体中参入离散纤维加筋材料能显著提高土体的抗裂性和强度^[115~120],在土体中加入STW生态高分子固化剂能降低黏性土的亲水性和收缩性^[121]。随着人们对生态环境的重视程度越来越高,土体改性技术也越来越追求低碳和绿色。近年来,基于自然解决方案(NBS)的微生物土体改性技术成为国际研究热点,代表性的有采用微生物成矿作用(MICP)对土体进行加固处理,无论在提高土体保水性、抗裂性和其他工程性质方面

都表现出较好的效果,具有广阔的应用前景,并发展出微生物工程地质研究方向^[122~127]。

然而,必须要意识到的是,干旱气候工程地质作用及灾变过程非常复杂,当前我国的综合防灾减灾能力还比较薄弱。对于工程地质学科而言,今后有必要加强气候变化及干旱气候对工程地质条件影响的基础研究,尤其应该同气象学科及相关学科开展交叉研究,强化国际合作与多部门联动,提高气象及工程地质灾害监测与预警能力,提高灾害风险管控能力,并制定相应的工程技术标准和法律法规。

5 总结与展望

在全球气候变化的大背景下,极端气候事件呈现频发高发趋势,引发各种工程地质问题及灾害,给当前工程地质研究带来许多新的挑战,深入开展极端气候工程地质作用及防灾减灾研究是现代工程地质学科的重要使命和发展方向。近年来,国内外学者围绕干旱气候作用下土体工程性质响应过程及灾变对策开展了大量研究,取得了如下主要创新成果:(1)揭示了干旱气候作用下土体蒸发-收缩-龟裂过程及其耦合作用关系,构建了大气-土体相互作用理论模型;(2)掌握了干旱气候作用下土体内部热/水/力/变形/结构等多场参数的时空演化规律及工程性质响应特征,并分别从土质学、土结构和土力学等多学科角度阐明了相应的机理及灾变过程;(3)创建了土体龟裂研究方法体系,研发了基于物理、化学和生物原理的土质改性抗旱新技术,开发了土体变形及工程地质灾害分布式光纤监测预警技术。

上述成果弥补了当前工程地质领域在干旱气象灾害方面的研究空白,丰富了气象成灾理论体系,增强了工程地质界应对干旱气候事件的决策能力和综合防灾减灾能力。

然而,大气-地质体相互作用及灾变过程非常复杂,主要体现在气象因素的复杂性(风、霜、雨、雪、辐射等)、地质体响应的复杂性(干、湿、冷、热、蒸发、入渗、径流、冻融等)、影响因素的复杂性(地形、地貌、岩性、构造活动等)、作用方式的复杂性(长期性、周期性等)几个方面。今后非常有必要开展多学科交叉及多部门协同研究,并着重考虑多种极端气候事件的交替作用和长期周期性作用,解决以下关键科学问题:(1)气候变化及极端气候事件近期预测模型;(2)极端气候-地质体之间的物质能量交换规律;(3)

极端气候作用下地质体工程性质响应及灾变机制; (4) 大气-地质体相互作用理论模型和灾害风险管理模型。

这些问题的解决对提升工程地质界气候变化应对能力和指导工程地质防灾减灾具有重要理论和现实意义。

义。除此之外, 还应该加强相关技术研究, 如分布式光纤感测技术、基于自然解决方案的微生物地质工程技术、大数据与云计算技术、人工智能等, 为工程地质防灾减灾提供先进的技术支撑。

致谢 图3涉及的世界地图经自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2020)2338号。

参考文献

- 1 Qin D H, Zhang J Y, Shan C C, et al. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [秦大河, 张健云, 闪淳昌, 等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015]
- 2 Dijkstra T A, Dixon N. Climate change and slope stability in the UK: Challenges and approaches. *Q J Eng Geol Hydrogeol*, 2010, 43: 371–385
- 3 Jardine R J. Geotechnics, energy and climate change: The 56th Rankine Lecture. *Géotechnique*, 2020, 70: 3–59
- 4 Gens A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering. *Géotechnique*, 2010, 60: 3–74
- 5 Tang A M, Hughes P N, Dijkstra T A, et al. Atmosphere-vegetation-soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe. *Q J Eng Geol Hydrogeol*, 2018, 51: 156–168
- 6 Ding Y H, Du X W. Research on the Impact of Climate Change on China's Major Projects and Countermeasures (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [丁一汇, 杜祥琬. 气候变化对我国重大工程的影响与对策研究. 北京: 科学出版社, 2016]
- 7 Cui P, Zou Q, Chen X, et al. Comprehensive natural disaster risk assessment and reduction in the Belt and Road (in Chinese). *Bull Chin Acad Geol Sci*, 2018, 33: 38–43 [崔鹏, 邹强, 陈曦, 等. “一带一路”自然灾害风险与综合减灾. 中国科学院院刊, 2018, 33: 38–43]
- 8 Dixon N, Brook E. Impact of predicted climate change on landslide reactivation: Case study of Mam Tor, UK. *Landslides*, 2007, 4: 137–147
- 9 Clarke D, Smethurst J A. Effects of climate change on cycles of wetting and drying in engineered clay slopes in England. *Q J Eng Geol Hydrogeol*, 2010, 43: 473–486
- 10 Zeng H, Tang C, Cheng Q, et al. Coupling effects of interfacial friction and layer thickness on soil desiccation cracking behavior. *Eng Geol*, 2019, 260: 105220
- 11 Wang D Y, Tang C S, Cui Y J, et al. Effects of wetting-drying cycles on soil strength profile of a silty clay in micro-penetrometer tests. *Eng Geol*, 2016, 206: 60–70
- 12 Wang D Y, Tang C S, Shi B, et al. Studying the effect of drying on soil hydro-mechanical properties using micro-penetration method. *Environ Earth Sci*, 2016, 75: 1009
- 13 Xu Q. The 13th August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: Characteristics, genetic mechanism and suggestions (in Chinese). *J Eng Geol*, 2010, 18: 596–608 [许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示. 工程地质学报, 2010, 18: 596–608]
- 14 Cheng Q, Zhou C, Ng C W W, et al. Thermal effects on water retention behaviour of unsaturated collapsible loess. *J Soils Sediments*, 2020, 20: 756–762
- 15 Cheng Q, Zhou C, Ng C W W, et al. Effects of soil structure on thermal softening of yield stress. *Eng Geol*, 2020, 269: 105544
- 16 Xu D, Tang C S, Leng T, et al. Shear strength of unsaturated expansive soil during wetting-drying cycles (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2018, 24: 286–296 [徐丹, 唐朝生, 冷挺, 等. 干湿循环对非饱和膨胀土抗剪强度影响的试验研究. 地学前缘, 2018, 24: 286–296]
- 17 Wang D Y, Tang C S, Li J, et al. An experimental study of penetration characteristics of expansive soil under wetting-drying cycles (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2016, 37: 57–65 [王德银, 唐朝生, 李建, 等. 干湿循环作用下膨胀土的贯入特性试验研究. 岩土力学, 2016, 37: 57–65]
- 18 Cheng Q, Tang C S. Coupled effects of matric suction and temperature on the compression behaviour of loess. *Environ Geotech*, 2019, doi: 10.1680/jenge.18.00186
- 19 Cheng Q, Ng C W W, Zhou C, et al. A new water retention model that considers pore non-uniformity and evolution of pore size distribution. *Bull Eng Geol Environ*, 2019, 78: 5055–5065
- 20 Tang C S, Wang D Y, Shi B, et al. Effect of wetting-drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions. *Catena*, 2016, 139: 105–116
- 21 Tang C S, Shi B, Wang B J. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2008, 30: 560–565 [唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于SEM土体微观结构研究中的影响因素分析. 岩土工程学报, 2008, 30: 560–565]
- 22 Gong X P, Tang C S, Shi B, et al. Evolution of soil microstructure during drying and wetting (in Chinese). *J Eng Geol*, 2019, 27: 775–793 [巩学鹏, 唐朝生, 施斌, 等. 黏性土干/湿过程中土结构演化特征研究进展. 工程地质学报, 2019, 27: 775–793]

- 23 Wang D Y, Tang C S, Li J, et al. Super miniature penetration test on structural strength (in Chinese). *J Eng Geol*, 2014, 22: 818–823 [王德银, 唐朝生, 李建, 等. 基于超微型贯入试验的黏性土干燥过程中结构强度演化规律研究. *工程地质学报*, 2014, 22: 818–823]
- 24 Zhang Q. Drought (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2009 [张强. 干旱. 北京: 气象出版社, 2009]
- 25 Durack P J, Wijffels S E, Mearns R J. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. *Science*, 2012, 336: 455–458
- 26 Dai A. Drought under global warming: A review. *WIREs Clim Change*, 2011, 2: 45–65
- 27 Ouyang B Q, Tang C S, Wang D Y, et al. Advances on soil moisture evaporation (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2016, 37: 625–636 [欧阳斌强, 唐朝生, 王德银, 等. 土体水分蒸发研究进展. *岩土力学*, 2016, 37: 625–636]
- 28 Toll D G, Md Rahim M S, Karthikeyan M, et al. Soil-atmosphere interactions for analysing slopes in tropical soils in Singapore. *Environ Geotech*, 2018, 6: 361–372
- 29 Pk S, Bashir R, Beddoe R. Effect of climate change on earthen embankments in Southern Ontario, Canada. *Environ Geotech*, 2018, 26: 1–70
- 30 Tang C S, Shi B, Liu C. Investigation of shrinkage and cracking characteristics of expansive soil (in Chinese). *J Eng Geol*, 2012, 20: 663–673 [唐朝生, 施斌, 刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究. *工程地质学报*, 2012, 20: 663–673]
- 31 Tang C S, Shi B, Gu K. Experimental investigation of evaporation process of water in soil (in Chinese). *J Eng Geol*, 2011, 19: 875–881 [唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究. *工程地质学报*, 2011, 19: 875–881]
- 32 Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Experimental investigation of the desiccation cracking behavior of soil layers during drying. *J Mater Civ Eng*, 2011, 23: 873–878
- 33 Tang C S, Cui Y J, Tang A M, et al. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Eng Geol*, 2010, 114: 261–266
- 34 Hemmati S, Gatmiri B, Cui Y J, et al. Thermo-hydro-mechanical modelling of soil settlements induced by soil-vegetation-atmosphere interactions. *Eng Geol*, 2012, 139–140: 1–16
- 35 Harrison A M, Plim J F M, Harrison M, et al. The relationship between shrink-swell occurrence and climate in south-east England. *Proc Geol Assoc*, 2012, 123: 556–575
- 36 Corti T, Muccione V, Köllner-Heck P, et al. Simulating past droughts and associated building damages in France. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2009, 13: 1739–1747
- 37 Corti T, Wüest M, Bresch D, et al. Drought-induced building damages from simulations at regional scale. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2011, 11: 3335–3342
- 38 Rajeev P, Chan D, Kodikara J. Ground-atmosphere interaction modelling for long-term prediction of soil moisture and temperature. *Can Geotech J*, 2012, 49: 1069–1073
- 39 Cui J Y, Tang C S, Tang A M, et al. Investigation of soil desiccation cracking using an environmental chamber. *Rivista Italiana Di Geotecnica*, 2014, 48: 9–20
- 40 Zeng H, Tang C S, Liu C L, et al. Effects of boundary friction and layer thickness on desiccation cracking behaviors of soils (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 544–553 [曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应. *岩土工程学报*, 2019, 41: 544–553]
- 41 Lin Z Y, Tang C S, Zeng H, et al. Boundary effect test and discrete element simulation of soil dry shrinkage cracking process (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2020, 42: 372–380 [林朱元, 唐朝生, 曾浩, 等. 土体干缩开裂过程的边界效应试验与离散元模拟. *岩土工程学报*, 2020, 42: 372–380]
- 42 Xu Q L, Tang C S, Liu C L, et al. Research progress on the development process and fracture mechanics of soil dry shrinkage fractures (in Chinese). *J Earth Sci Environ*, 2018, 40: 223–236 [徐其良, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 土体干缩裂隙发育过程及断裂力学机制研究进展. *地球科学与环境学报*, 2018, 40: 223–236]
- 43 Liu C L, Tang C S, Sun H D, et al. Experimental Investigation of the effect of interfacial roughness on soil cracking (in Chinese). *J Eng Geol*, 2017, 25: 1314–1321 [刘昌黎, 唐朝生, 李昊达, 等. 界面粗糙度对土体龟裂影响的试验研究. *工程地质学报*, 2017, 25: 1314–1321]
- 44 Zhang Y P, Gu K, Li J W, et al. Effect of biochar on desiccation cracking characteristics of clayey soils. *Geoderma*, 2020, 364: 114–182
- 45 Yin Z Z, Yuan J P, Wei J, et al. Effect of cracks on the stability of expansive soil slope (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2012, 34: 2155–2161 [殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定性的影响. *岩土工程学报*, 2012, 34: 2155–2161]
- 46 Cheng Z L, Li Q Y, Guo X L, et al. Investigation of the stability of expansive soil slope (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2011, 28: 102–111 [程展林, 李青云, 郭熙林, 等. 膨胀土边坡稳定性研究. *长江科学院院报*, 2011, 28: 102–111]
- 47 Robinson J D, Vahedifard F. Weakening mechanisms imposed on California's levees under multiyear extreme drought. *Clim Change*, 2016, 137: 1–14
- 48 Yanful E K, Mousavi S M. Estimating falling rate evaporation from finite soil columns. *Sci Total Environ*, 2003, 313: 141–152
- 49 Pei Q Q, Wang X D, Guo Q L, et al. Laboratory experimental study on deformation mechanism of consolidation of earth site by ramming and

- supporting roof in arid environment (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2018, 39: 1–10 [裴强强, 王旭东, 郭青林, 等. 干旱环境下土遗址夯补支顶加固变形机制室内试验研究. *岩土力学*, 2018, 39: 1–10]
- 50 Zhang M S, Li Z H, Sun P P, et al. Properties and risk mitigation measures of the debris flow happened on 8th August 2010 in Zhouqu county (in Chinese). *Northwest Geol*, 2011, 44: 10–20 [张茂省, 黎志恒, 孙萍萍, 等. 舟曲三眼峪8.8特大泥石流灾害特征与风险减缓对策. *西北地质*, 2011, 44: 10–20]
 - 51 Li S L, Shi B. Study on the Engineering Geology of Expansive Soil in China (in Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992 [李生林, 施斌. 中国膨胀土工程地质研究. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992]
 - 52 Leng T, Tang C S, Xu D, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil (in Chinese). *J Eng Geol*, 2018, 26: 112–128 [冷挺, 唐朝生, 徐丹, 等. 膨胀土工程地质特性研究进展. *工程地质学报*, 2018, 26: 112–128]
 - 53 Shi B, Jiang H, Liu Z, et al. Engineering geological characteristics of expansive soils in China. *Eng Geol*, 2002, 67: 63–71
 - 54 Vardon P J. Climatic influence on geotechnical infrastructure: A review. *Environ Geotech*, 2015, 2: 166–174
 - 55 Cheng Q, Tang C S, Zeng H, et al. Effects of microstructure on desiccation cracking of a compacted soil. *Eng Geol*, 2020, 265: 105418
 - 56 An N, Tang C S, Xu S K, et al. Effects of soil characteristics on moisture evaporation. *Eng Geol*, 2018, 239: 126–135
 - 57 Song W K, Cui Y J, Tang A M, et al. Experimental study on water evaporation from sand using environmental chamber. *Can Geotech J*, 2014, 51: 115–128
 - 58 Xu S K, Tang C S, Li C L, et al. Review on soil moisture evaporation model (in Chinese). *Geol J China Univ*, 2017, 23: 640–649 [徐士康, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 土体水分蒸发模型研究进展. *高校地质学报*, 2017, 23: 640–649]
 - 59 Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Can Geotech J*, 1994, 31: 151–161
 - 60 An N, Hemmati S, Cui Y, et al. Numerical investigation of water evaporation from Fontainebleau sand in an environmental chamber. *Eng Geol*, 2018, 234: 55–64
 - 61 An N, Hemmati S, Cui Y, et al. Numerical analysis of hydro-thermal behaviour of Rouen embankment under climate effect. *Comput Geotechn*, 2018, 99: 137–148
 - 62 Blight G. Solar heating of the soil and evaporation from a soil surface. *Géotechnique*, 2009, 59: 355–363
 - 63 Shokri N, Lehmann P, Or D. Characteristics of evaporation from partially wettable porous media. *Water Resour Res*, 2009, 45: 1–12
 - 64 Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Can Geotech J*, 1997, 34: 145–155
 - 65 Tang C S, Shi B, Gao L, et al. Urbanization effect on soil temperature in Nanjing, China. *Energy Build*, 2011, 43: 3090–3098
 - 66 Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resour Res*, 2001, 37: 273–285
 - 67 Ni A, Tang C S, Cheng Q, et al. An experimental application of electrical resistivity/resistance method (ERM) to characterize the evaporation process of sandy soil. *Phys Chem Earth*, 2020, 117: 102873
 - 68 Ni A, Tang C S, Wang D Y, et al. Laboratorial characterization of soil water content variations during evaporation process using electrical resistivity method. *Bull Eng Geol Environ*, 2020, doi: 10.1007/s10064-020-01805-y
 - 69 Cao D, Shi B, Zhu H, et al. A soil moisture estimation method using actively heated fiber bragg grating sensors. *Eng Geol*, 2018, 242: 142–149
 - 70 Tang C S, Shi B. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2011, 33: 1376–1384 [唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征. *岩土工程学报*, 2011, 33: 1376–1384]
 - 71 Tay Y Y, Stewart D I, Cousens T W. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners. *Eng Geol*, 2001, 60: 263–274
 - 72 Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Appl Clay Sci*, 2011, 52: 69–77
 - 73 Tang C S, Shi B, Cui Y J. Shrinkage characteristics of buffer-backfilling materials in high-level radioactive waste geological disposal (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2012, 34: 1192–1200 [唐朝生, 施斌, 崔玉军. 高放废物地质处置库中缓冲回填材料的收缩特征. *岩土工程学报*, 2012, 34: 1192–1200]
 - 74 Tang C S, Cui Y J, Tang A M, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2011, 33: 1271–1279 [唐朝生, 崔玉军, Tang A M, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征. *岩土工程学报*, 2011, 33: 1271–1279]
 - 75 Boivin P, Garnier P, Tessier D. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil sample. *Soil Sci Soc Am J*, 2004, 68: 1154–1153
 - 76 Cornelis W M, Corluy J, Medina H, et al. A simplified parametric model to describe the magnitude and geometry of soil shrinkage. *Eur J Soil Sci*, 2006, 57: 258–268
 - 77 Morris P H, Graham J, Williams D J. Cracking in drying soils. *Can Geotech J*, 1992, 29: 263–277
 - 78 Rodríguez R, Sánchez M J, Ledesma A, et al. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Can Geotech J*, 2007, 44: 644–658
 - 79 Péron H, Herchel T, Laloui L, et al. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: Experimental characterization and mechanisms

- identification. *Can Geotech J*, 2009, 46: 1177–1201
- 80 Shin H, Santamarina J C. Desiccation cracks in saturated fine-grained soils: Particle-level phenomena and effective-stress analysis. *Géotechnique*, 2011, 61: 961–972
 - 81 Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Developing law and morphological analysis of shrinkage cracks of clayey soil under different temperatures (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2007, 29: 743–749 [唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析. *岩土工程学报*, 2007, 29: 743–749]
 - 82 Tang C S, Cui Y J, Shi B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. *Geoderma*, 2011, 166: 111–118
 - 83 Tang C S, Shi B, Cui Y J. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2018, 40: 1415–1423 [唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理. *岩土工程学报*, 2018, 40: 1415–1423]
 - 84 Tang C S, Pei X J, Wang D Y, et al. Tensile strength of compacted clayey soil. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2015, 141: 4014122
 - 85 Li H D, Tang C S, Xu Q L, et al. Advances in experimental testing methods of soil tensile strength (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2016, 37: 175–186 [李昊达, 唐朝生, 徐其良, 等. 土体抗拉强度试验研究方法的进展. *岩土力学*, 2016, 37: 175–186]
 - 86 Li H D, Tang C S, Cheng Q, et al. Tensile strength of clayey soil and the strain analysis based on image processing techniques. *Eng Geol*, 2019, 253: 137–148
 - 87 Wang L L, Tang C S, Shi B, et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks. *Eng Geol*, 2018, 238: 27–35
 - 88 Zeng H, Tang C S, Liu C L, et al. Measurement and analysis of shrinkage stress of expansive soils during drying process (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 717–725 [曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析. *岩土工程学报*, 2019, 41: 717–725]
 - 89 Zeng H, Tang C S, Lin L, et al. Interfacial friction dependence of propagation direction and evolution characteristics of soil desiccation cracks (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 1172–1180 [曾浩, 唐朝生, 林鑫, 等. 土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究. *岩土工程学报*, 2019, 41: 1172–1180]
 - 90 Liu C L, Tang C S, Sun K Q, et al. Review on the mechanism and theoretical model of desiccation cracking in clay soil (in Chinese). *J Eng Geol*, 2018, 26: 296–308 [刘昌黎, 唐朝生, 孙凯强, 等. 土体龟裂力学机理及理论模型研究进展. *工程地质学报*, 2018, 26: 296–308]
 - 91 Tang C S, Cui Y J, Tang A M, et al. Shrinkage and desiccation cracking process of expansive soil and its temperature-dependent behavior (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2012, 34: 2181–2187 [唐朝生, 崔玉军, Tang Anh-Minh, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应. *岩土工程学报*, 2012, 34: 2181–2187]
 - 92 Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2007, 38: 1186–1193 [唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析. *水利学报*, 2007, 38: 1186–1193]
 - 93 Tang C, Shi B, Liu C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Eng Geol*, 2008, 101: 204–217
 - 94 Peron H, Laloui H, Lu L B, et al. Formation of drying crack patterns in soils: A deterministic approach. *Acta Geotech*, 2013, 8: 215–221
 - 95 Sun K Q, Tang C S, Liu C L, et al. Research methods of soil desiccation cracking behavior (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2017, 38: 11–26 [孙凯强, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 土体龟裂研究方法. *岩土力学*, 2017, 38: 11–26]
 - 96 Albrecht B A, Benson C H. Effect of desiccation on compacted natural clays. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2001, 127: 67–75
 - 97 Konrad J M, Ayad R. A idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Can Geotech J*, 1997, 34: 477–488
 - 98 Liu C, Tang C S, Shi B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing. *Comput Geosci*, 2013, 57: 77–80
 - 99 Leng T, Tang C S, Shi B. Quantifying desiccation crack behaviour of remolded expansive soil during wetting-drying circles (in Chinese). *J Eng Geol*, 2016, 24: 856–862 [冷挺, 唐朝生, 施斌. 干湿循环条件下重塑膨胀土的裂隙发育特征及量化研究. *工程地质学报*, 2016, 24: 856–862]
 - 100 Tang C S, Shi B, Cui Y J, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil. *Can Geotech J*, 2012, 49: 1088–1101
 - 101 Liu B, Zhu C, Tang C S, et al. Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP). *Eng Geol*, 2020, 264: 105389
 - 102 Sun K Q, Tang C S, Wang P, et al. Effects of salinity on shrinkage and cracking of soil (in Chinese). *J Eng Geol*, 2015, 23: 77–83 [孙凯强, 唐朝生, 王鹏, 等. 盐分对土体干缩开裂的影响. *工程地质学报*, 2015, 23: 77–83]
 - 103 Miller C J, Mi H, Yesiller N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *J Am Water Resour Assoc*, 1998, 34: 677–686
 - 104 Velde B. Structure of surface cracks in soil and muds. *Geoderma*, 1999, 93: 101–124
 - 105 Yuan J P, Yin Z Z. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2004, 35: 108–113 [袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究. *水利学报*, 2004, 35: 108–113]
 - 106 Tang C S, Wang D Y, Shi B, et al. Quantitative analysis of dry shrinkage crack network in soil (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2013, 35: 2298–2305 [唐朝生, 王德银, 施斌, 等. 土体干缩裂隙网络定量分析. *岩土工程学报*, 2013, 35: 2298–2305]
 - 107 Tang C S, Wang D Y, Zhu C, et al. Characterizing drying-induced clayey soil desiccation cracking process using electrical resistivity method. *Appl Clay Sci*, 2018, 152: 101–112
 - 108 Tang C S, Zhu C, Leng T, et al. Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray

- computed tomography. *Eng Geol*, 2019, 255: 1–10
- 109 An N, Tang C S, Cheng Q, et al. Application of electrical resistivity method in the characterization of 2D desiccation cracking process of clayey soil. *Eng Geol*, 2020, 265: 105416
- 110 Luo X W, Zhang K, Tang C S, et al. Monitoring and research on soil shrinkage and cracking process based on high-density resistivity imaging technology (in Chinese). *Chin J Geol*, 2018, 24: 939–946 [骆晓伟, 张宽, 唐朝生, 等. 基于高密度电阻率成像技术的土体干缩开裂过程监测研究. 高校地质学报, 2018, 24: 939–946]
- 111 Lin L, Tang C S, Cheng Q, et al. Research on shrinkage and cracking of soil based on digital image correlation technology (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 1311–1318 [林鉴, 唐朝生, 程青, 等. 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究. 岩土工程学报, 2019, 41: 1311–1318]
- 112 Zhang C C, Shi B, Zhu H H, et al. Discussion on the theoretical basis of ground fissure detection with distributed optical fiber (in Chinese). *J Eng Geol*, 2019, 27: 1473–1482 [张诚成, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 分布式光纤探测地裂缝的理论基础探讨. 工程地质学报, 2019, 27: 1473–1482]
- 113 Cheng Q, Tang C S, Zhu C, et al. Drying-induced soil shrinkage and desiccation cracking monitoring with distributed optical fiber sensing technique. *Bull Eng Geol Environ*, 2020, doi: 10.1007/s10064-020-01809-8
- 114 Shi B, Zhang D, Zhu H H. Geological and Geotechnical Distributed Optical Fiber Monitoring Technology and Its Development (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019 [施斌, 张丹, 朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展. 北京: 科学出版社, 2019]
- 115 Tang C S, Wang D Y, Cui Y J, et al. Tensile strength of fiber-reinforced soil. *J Mater Civ Eng*, 2016, 28: 04016031
- 116 Tang C S, Li J, Wang D Y, et al. Investigation on the interfacial mechanical behavior of wave-shaped fiber reinforced soil by pullout test. *Geotext Geomembr*, 2016, 44: 872–883
- 117 Tang C S, Shi B, Zhao L Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotext Geomembr*, 2010, 28: 54–62
- 118 Tang C, Shi B, Gao W, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotext Geomembr*, 2007, 25: 194–202
- 119 Zhu H H, Zhang C C, Tang C S, et al. Modeling the pullout behavior of short fiber in reinforced soil. *Geotext Geomembr*, 2014, 42: 329–338
- 120 Wang H S, Tang C S, Gu K, et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced, chemically stabilized dredged sludge. *Bull Eng Geol Environ*, 2020, 79: 629–643
- 121 Liu J, Shi B, Huang H, et al. Experimental study on the expansion and contraction of cohesive soil with STW ecological soil stabilizers (in Chinese). *J Eng Geol*, 2008, 16: 820–825 [刘瑾, 施斌, 黄河, 等. STW型生态土壤稳定剂改良工程黏性土胀缩性试验研究. 工程地质学报, 2008, 16: 820–825]
- 122 Jiang N J, Tang C S, Yin L Y, et al. Applicability of microbial calcification method for sandy-slope surface erosion control. *J Mater Civ Eng*, 2019, 31: 04019250
- 123 Tang C S, Yin L, Jiang N, et al. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: A review. *Environ Earth Sci*, 2020, 79: 94
- 124 Jiang N J, Tang C S, Toshiro H, et al. Bio-mediated soil improvement: The way forward. *Soil Use Manage*, 2020, 36: 185–188
- 125 Xie Y H, Tang C S, Yin L Y, et al. Mechanical properties of fiber-reinforced microbially cured sand (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 675–682 [谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性. 岩土工程学报, 2019, 41: 675–682]
- 126 Xie Y H, Tang C S, Liu B, et al. Water stability improvement of clay soil based on microbially induced calcium carbonate deposition technology (in Chinese). *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2019, 53: 1438–1447 [谢约翰, 唐朝生, 刘博, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉积技术的黏性土水稳性改良. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53: 1438–1447]
- 127 Zhang K, Tang C S, Liu B, et al. Experimental study on mechanical properties of clayey soils based on new single-phase MICP technology (in Chinese). *J Eng Geol*, 2020, 28: 306–316 [张宽, 唐朝生, 刘博, 等. 基于新型单相MICP技术改性黏性土力学特性的试验研究. 工程地质学报, 2020, 28: 306–316]

Summary for “极端气候工程地质: 干旱灾害及对策研究进展”

Extrem climate engineering geology: Soil engineering properties response to drought climate and measures for disaster mitigation

Chao-Sheng Tang

School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

Due to global climate change, extreme climate events occur in increasing frequency and intensity and act on earth surface in various ways, inducing a series of engineering geological disasters, which seriously affect the sustainable economic and social development, and bring many new challenges to current engineering geology research. There is an urgent need to strengthen the basic research on extreme climate engineering and disaster prevention and mitigation. It has important strategic and practical significance for improving China's defense and decision-making capabilities when major projects are subjected to climate change and extreme climate events, and for improving China's comprehensive prevention and control capabilities of natural disasters. It is also an important mission and development direction of modern engineering geology. This paper focuses on how the extreme climate affects geological bodies and major projects, and how to induce disasters from the perspective of engineering geology. In addition, this paper systematically summarizes the research advances of drought climate-induced soil engineering property response processes and catastrophic mechanisms, especially the processes and mechanisms of soil evaporation, shrinkage, and desiccation cracking.

Generally, the evaporation process of soil water occurs in three fairly distinct stages: constant rate stage, falling rate stage and residual stage. The constant rate stage occurs when the soil is still fully saturated. The moisture transfer is dominated by liquid flow and mainly controlled by capillary force. The change of soil from saturated to unsaturated state results in the evaporation transition from constant rate stage to falling rate stage. In this stage, the moisture transfers in both liquid and vapor forms and the later one gradually dominates the evaporation process. The evaporation reaches residual stage when the pore water is dominated by absorbed water, and the moisture transfers in vapor form only.

The volumetric shrinkage soil is mainly attributed to suction-induced pore size reduction. Based on soil shrinkage characteristic curve, three shrinkage stages can be distinguished: normal shrinkage, residual shrinkage and zero shrinkage. Most of the volumetric shrinkage occurs before the air-entry point while the soil is still fully saturated. The shrinkage direction of soil shows obvious anisotropy, which can be quantified by shrinkage geometry factor. At low degree of compaction, the radial shrinkage strain is higher than axial shrinkage strain, and the shrinkage geometry factor is larger than 3, while it is contrary at high degree of compaction. The reversibility of shrinkage deformation depends on soil suction. Shrinkage deformation is reversible when suction is higher than 113 MPa.

Drying-induced soil desiccation cracking process takes place in three typical stages (i.e., primary cracks initiate, sub-cracks initiate and crack network stabilization), and presents evident time-order characteristics. New cracks always start perpendicularly from the existing cracks. Generally, the initiation and propagation of desiccation cracks show evident dynamic characteristics and significantly depend on soil water evaporation rate, stress state and shrinkage potential. The cracks initiate at constant evaporation rate stage where soil is still fully saturated. The cracking water content can be much higher than liquid limit. Cracking is likely to occur if the tensile stress, which is induced by soil suction or shrinkage constraint, reaches the tensile strength of soil. It is believed that soil suction and tensile strength are the two key mechanical parameters that control the cracking behavior. From a perspective of soil structure, cracking is the result of pore shrinkage and microstructure re-arrangement. The mechanical effect and shrinkage potential are proposed as the two prerequisite factors for crack initiation. Quantitative characterization of crack patterns plays a very important role in understanding the cracking dynamic and mechanism. Image processing technique has been proved as a powerful, efficient and high-accurate tool for quantitative description of crack patterns. In the past decades, systematic research methods for soil cracking have been well established, including testing, monitoring, quantifying, data processing etc.

These achievements make up for the research blanks of drought climate disasters in the field of engineering geology, and provide scientific basis for guiding engineering geological practice and disaster prevention and mitigation in arid regions. In the future, in addition to strengthening basic research on climate change and atmosphere-geological body interaction, the related technical research should also be strengthened, such as distributed optical fiber sensing technology, microbial geological engineering technology on nature-based solutions, big data and cloud computing technology, artificial intelligence technology, so as to prevent and mitigate disasters in engineering geology by providing advanced theoretical and technical support.

climate change, geological disaster, extrem drought climate, soil engineering property, soil evaporation-shrinkage-desiccation cracking, atmosphere-soil interaction

doi: [10.1360/TB-2020-0282](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0282)