

浅层地能开采中土体的热湿迁移机制及力学性状研究综述与展望*

赵艳林^{①②} 曾召田^{①②} 吕海波^{①②} 葛若东^②

(①广西岩土力学与工程重点实验室 桂林理工大学 桂林 541004)

(②广西大学土木建筑工程学院防灾减灾研究所 南宁 530004)

摘要 浅层地能的开采是与岩土介质相关的能量交换过程。本文从岩土工程应用的角度,简述了浅层地能开采中与岩土体相关问题的国内外研究现状,指出了目前存在的问题并进行了分析和展望;在此基础上,凝练出了3个主要的科学问题,即换热过程岩土体热湿迁移机理、岩土层地质构造对热交换的影响以及热交换对岩土力学性质的影响,并对它们的具体研究内容进行了详细的分析。论文的分析成果对于掌握浅层地能开采对土体力学性状的影响,合理开发利用浅层地能,实现能源的可持续发展具有重要的理论和现实意义。

关键词 浅层地能 热湿迁移 力学性状 岩土介质

中图分类号:TU443 文献标识码:A

REVIEW AND PROSPECT OF HEAT AND MOISTURE MIGRATION MECHANISM AND MECHANICAL BEHAVIOR OF SOIL IN SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY EXPLOITATION

ZHAO Yanlin^{①②} ZENG Zhaotian^{①②} LÜ Haibo^{①②} GE Ruodong^②

(①Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004)

(②Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004)

Abstract The exploitation of shallow geothermal energy is the energy exchange process relating to the geotechnical medium. In the view of geotechnical engineering application, this paper briefly elaborates the present domestic and international research about geotechnical-related issues during shallow geothermal energy exploitation. It points out the existing problems and the development orientation. Furthermore, it presents three key scientific issues. They are heat and moisture migration mechanism of soil in heat transfer process, effect of geological structure on heat transfer and effect of heat transfer on mechanical properties of soil. The paper also analyzes their detailed research contents. It points out the great theoretical and practical significance for understanding effect of shallow geothermal energy exploitation on mechanical behavior, rational development and utilization of shallow geothermal energy, and the energy sustainable development.

Key words Shallow geothermal energy, Heat and moisture migration, Mechanical behavior, Geotechnical medium

* 收稿日期:2012-03-20;收到修改稿日期:2012-07-15.

基金项目:973前期研究专项(2010CB434810),国家自然科学基金(51169005)和广西自然科学基金(2010GXNSFD013012).

第一作者简介:赵艳林,主要从事特殊性岩土工程特性、结构分析理论与方法研究. Email: zhaoyanlin@glite.edu.cn

1 引言

浅层地能是指地球浅表层数百米内的土壤、砂石和地下水中所蕴藏的低温热能,是可再生能源的重要组成部分^[1]。与传统能源相比,浅层地能具有储量巨大、分布广泛、清洁环保、可循环利用等优点,因此,合理开发利用浅层地能是解决能源短缺问题、平衡发展与消耗矛盾的必要技术手段之一,是近年来的研究热点问题。

浅层地能的开采涉及到与地下岩土介质的能量交换,以应用最为广泛的地源热泵技术为例,它通过少量高位能驱动水作为载热介质与浅层地能进行热交换,使不能直接利用的岩土低位热源转换为可利用的高位热能。在这一过程中,热交换对岩土介质产生复杂的影响,土体的温度场发生变化引起水分发生迁移,改变土体含水量,而含水量的变化又引起土的比热容、热导率及热扩散率发生变化,从而影响热量的传输过程。在某些对含水量变化特别敏感的土,如胀缩性土、湿陷性黄土,由于水分迁移引起的土体变形十分显著,因此还需考虑土体变形场及应力场的影响。可见浅层地能的开采对周围土体的影响是一个热、湿、力相互作用的过程。因此,开展地热开采中土体的热湿迁移机制及力学性状研究,对于合理开发利用浅层地能、实现可持续发展战略都具有重要的理论和现实意义。

2 国内外研究现状

2.1 换热理论模型

在利用地源热泵进行浅层地能利用时,由埋入地表以下土层中的换热器组成的换热系统是其工作的基础,而合理的换热器传热模型则是换热系统设计的核心理论。早期的传热模型是以热阻概念为基础的半经验公式法,具有技术简单、易于掌握的特点,现已积累了较多的工程经验,为一些工程设计规范所采用。如基于线热源理论的 Ingersoll 模型^[2]、IGSHPA 模型^[3],将换热管简化成线状热源,热流向四周土体呈辐射状传播; Kavanaugh^[4]考虑换热管 U 型排列和逐时热流变化对该方法进行了改进。Eskilson^[5]提出用无量纲的温度响应系数 g -function 来计算一个时间步长的阶梯热输入引起的埋管温度的变化,在此基础上叠加求取岩土介质的温度场,该方法为现行的许多计算软件所采用。由于对换热管

周围土体的过分简化会带来计算上的较大误差,一些研究者对换热模型进行了改进,譬如 V. C. Mei^[6]在考虑土壤冻结界面的移动及回填土等因素影响的基础上,根据能量平衡理论建立了三维瞬态远边界传热模型;但与半经验模型一样,该模型也没有考虑传热过程中土体发生的热湿迁移。20 世纪 80 年代后期起,有关学者根据质量和能量守恒定律,建立一些传热、传质耦合的传热模型^[7, 8]。

地下垂直埋管换热器一般埋在地面以下几十米,需要穿越各种不同地质层;其传热过程受地质层性能的影响较大,特别是地下水流动的影响尤为显著。Eskilson^[5]运用移动线热源问题的稳态解析解,探讨了稳定渗流对地热换热器的影响。Chiasson^[9]采用软件模拟分析了长期运行的 U 型埋管周围温度场的变化情况,并与无地下水流动情况进行对比。山东建工学院刁乃仁等^[10, 11]结合移动热源理论和多孔介质中有渗流时的能量方程,探讨了有均匀渗流时线热源引起的无量纲二维温度响应的解析解。赵军^[12]针对富含水地下土壤层,结合室内模拟实验台和理论模型,推导出稳态的饱和型多孔介质层理论模型,在此基础上,进一步揭示出无因次多孔介质参数的传热规律。李新国等^[13]提出内热源型埋管换热器理论模型,在此基础上建立了换热器周围土壤热湿传递的物理、数学模型。内热源模型将换热器处理为等效内热源,在考虑土壤类型、热物性及湿度迁移等各因素影响的基础上,对埋管换热器及周围土壤传热及温度场的数值模拟开展研究。

2.2 土壤热湿迁移

1856 年, H Darcy 通过大量试验获得了土中水渗流速度与能量损失之间的渗流规律(即达西定律),奠定了土壤水流动研究的理论基础。1931 年, L A Richards 在研究非饱和土壤水流运动时,结合连续性定理和达西定律,建立了描述土壤水分运动的等温方程。1952 年, Klute 提出了非等温扩散流方程。1957 年, Philip 和 de Veries^[14, 15]提出了描述土壤水热耦合运移的理论,揭示了双场驱动机制。Luikov^[16~18]运用不可逆热力学方法研究多孔介质的热湿迁移,对场物理量温度、湿分和压力三者进行耦合分析,从而提出了三场驱动模型。

目前,常用的土壤热湿迁移模型主要有以下 4 类:

2.2.1 Philip-De Vries 模型^[14, 15]

Philip-De Vries 在研究液体和蒸汽的等温变化及热传递规律时,将蒸汽扩散定律与重力势下液体流动黏性规律两者进行结合,对 Darcy 定律和 Fick 定律的温、湿度梯度形式进行修正,从而获得更实用的修正公式。Milly^[19, 20] 利用基质势梯度取代含水量梯度,对 Philip 模型进行了改进;该修正模型主要用于非均质土壤,不考虑水分滞后的影响。

2.2.2 Taylor-Cary 模型^[21]

Taylor-Cary 结合不可逆热力学定律,提出了温度梯度下土壤水分运动理论;在此基础上,通过消除热通量,推导出线性流动方程,该方程的适用范围更广。

2.2.3 Luikov 模型^[16, 17]

Luikov 根据不可逆热力学、宏观质量、能量守恒定律,并引入迁移势概念,推导出以温度、含湿量和压力为迁移势的偏微分方程,提出了三场驱动模型。由于物性参数难以确定和方程求解困难等原因,该模型并未能够获得广泛应用。Milly^[19]、Bavel 和 Hille^[22, 23]、Liu et al.^[24] 在各自的研究中采用 Luikov 计算模型,并根据计算结果进一步发展了该理论。

2.2.4 夏彦儒-施明恒模型

夏彦儒和施明恒^[25] 在研究岩土传热传质时引入线性不可逆过程热力学方法,推导出线性唯象方程组和热质交换干扰准则,可用来描述多个推动力耦合迁移过程。

陈振乾和施明恒^[26] 在分析土壤非饱和区热湿迁移的“力”和“流”时采用非平衡热力学理论分析方法,利用扩散定律和气体状态方程对热湿迁移唯象方程的唯象系数表达式进行了推导,在此基础上,分析了温度、含水率及蒸汽分压力等参数对唯象系数的影响。

2.3 土体热力学性质

研究者很早就注意到土体在取样、运输过程中由于温度变化而引起其工程性质发生改变这一现象,并对两者关系进行了深入研究。Passwell^[27] 在 1967 年完成了恒定荷载条件下的加热试验,首次提出了热固结的概念,认为孔隙水压力的产生原因主要是由于土体成分(固体颗粒和水)的热膨胀特性差异。Schiffman^[28] 对黏性土的热固结过程进行了研究,认为其存在不可逆的体积应变。Campanella^[29] 进行了各向等压固结试验,对土各组分的热膨

特性差异和孔隙水压力的产生问题进行了详细研究。Eriksson^[30]、Leroueil^[31] 和 Tidfors^[32] 等探讨了温度对黏性土变形和固结特性的影响,认为温度对土的压缩和蠕变特性产生影响的根本原因与土颗粒间结合水膜厚度的变化有关系。Hueckell^[33] 对天然黏性土和重塑黏性土进行了考虑温度效应的三轴试验(温度范围为 18~115℃),同时进行了荷载-温度循环试验,对饱和黏性土在加热过程中的体积应变进行了详细分析。De Bruyn D^[34] 等发现饱和黏性土试样抗剪强度随温度升高而减小。Burghignoli et al.^[35] 对热固结过程中热量和土骨架蠕变进行了研究,发现热循环会导致土的硬化。目前,复杂条件下黏性土的温度效应问题、加热速率或冷却速率对其力学特性的影响、冷热循环的反复作用条件下体应变变化规律及其可逆性机理研究是本研究方向的热点课题。

3 存在的问题及展望

已有的研究表明,换热器与土壤之间的换热过程受土壤中水分变化的影响较大,土壤含水量发生改变时,土壤的比热、热导率、热扩散系数等均会随之而发生变化。夏季,地下热交换器向土壤内排热,引起土壤温度升高;热泵机组连续运行,管壁周围的土壤将变得十分干燥,致使土壤的热导率下降,换热性能减低,热泵的供冷效率也随之而降;而冬季正好相反,当地下热交换器向土壤内排冷时,管壁附近的土壤温度降低,管壁周围土壤较湿润,相当于增强了传热效果。在实际工程中,换热管周围的土体可以是饱和的和非饱和的,水分的运动在饱和区的土体内部主要以热对流为主,而在非饱和区水分则会发生显著的热迁移,导致土体内部含水量不均匀,进而引起导热参数的变异,因此在模型中应加以考虑。近年来,考虑岩土体热湿迁移的瞬态模型目前在国内外也受到研究者的极大关注,在考虑能量和质量平衡基础上一些理论模型被提出来,但这方面的研究仍较为薄弱,表现在模型提出的多,验证的少,尤其是在试验和工程应用中的效果尚需完成大量的基础工作。

岩土介质的分布具有鲜明的地域特性,各种地质构造对传热的影响也大不相同,以南宁市为例,其地质构造为断陷盆地,盆地分布有四级河流阶地,换热时埋管需要穿越黏土、粉砂、砾石层,各土层的传热参数变化较大,目前尚未进行任何相关的测试。

更值得关注的是,该地区的地下潜水水位较高,河水与之形成相互补给关系,在地下岩土介质中形成饱和-非饱和渗流,使得土的换热能力增强,埋管深度大为减小(约20m),这一地质构造在我国南方许多地区具有代表性,因此针对典型的区域性地质构造传热特点开展研究,将有望取得切实可行的、有针对性的成果,为合理利用浅层地能提供理论基础。

岩土介质的热湿迁移效应不仅表现在导热参数的变化上,同时也会对土体的力学性质产生不可逆的影响。从土力学的观点分析,水分的迁移将导致土中孔隙水压力(在非饱和区为负孔压)发生改变,在热交换的长期作用下,这相当于在土体内部附加了重复的加卸载作用,导致土的各种力学指标发生变化,土中原有的力学平衡状态将被打破,这种影响对于具有胀缩性的土(如膨胀土、红黏土等)尤为显著。在胀缩性土中,水分的迁移引起土体反复变形,使得换热管与一定深度内的土体产生分离,影响换热效果;另一方面导致土体内部产生裂隙,削弱其整体性,引起土体强度及变形性能的衰减,而后者往往会对地基及管线的安全产生威胁。胀缩性土分布于我国20多个省份,广西34个市县均有不同程度的分布,因此有必要深入研究换热过程对土体尤其胀缩性土的影响机理及相应防治措施。

换热过程对土体的强度、变形等力学以及导热参数均有影响,一是这些参数随着温度的变化,二是反复的热湿迁移后参数也会发生改变。非饱和区内的土体吸力(负孔压)在含水量变时发生变化,这是由于水的黏度和表面张力变化引起。但该因素并非唯一影响因素,欧孝夺等^[36]曾对南宁的红黏土及膨胀土进行过试验研究,发现在等含水量时,小于600℃以下温度对土的强度特性影响不大,当环境温度超过600℃以后,黏聚力和内摩擦角有明显提高;谢云等^[37]通过控制温度的非饱和土三轴排水剪切试验也发现,非饱和土的抗剪强度随着温度的升高而增加。而非饱和土力学中吸力是随着温度增加而减小的,无法解释土体的这种力学特性,可见系统的研究并未真正开展,因此如何反映土的这种热力学性质值得深入研究。在实际应用时,换热过程的持续时间一般较长且具有季节性,因此换热管周围的土体在此过程将发生周期性的反复干湿循环:吸热时土体湿化,放热时土体变干。由于土体为松散颗粒的集合体,即使在较小应力水平下也会发生不可逆的微结构改变,宏观上表现出变形及强度指标的变化(在胀缩性土中表现为力学性能严重劣化),同

时导热参数也会发生变化。针对地表蒸发及降雨引起的干湿循环后土体力学性状的变化在岩土力学中已有一定的研究,但与地下换热引起的干湿过程有显著差异,这方面的研究至今仍是空白,对此开展基础性的工作有望取得理论上的突破。

4 主要科学问题及研究内容

从前面的分析中可知,在浅层地能的开采过程中,主要需对3个与岩土体相关的科学问题进行研究:换热过程岩土体的热湿迁移、土层地质构造对热交换的影响、热交换对岩土力学性质的影响。

4.1 换热过程岩土体热湿迁移机理

研究比热容、热导率、热扩散率等导热参数随土壤类型及含水量的变化规律,通过室内和现场试验,建立含水量-导热参数关系;根据试验结果,在能量平衡和传质理论上,建立岩土体热湿耦合的数学模型,并针对土体开展耦合形式及模型参数研究,考虑换热管内流体流动以及土层分布的非均匀性,模拟不同工况下岩土体内的温、湿度场分布特征,并与现场观测结果比较,进行模型修正。

4.2 岩土层地质构造对热交换的影响

研究广西区域典型地层分布特征对热交换的影响,根据热湿耦合模型研究热交换区饱和-非饱和渗流对温度场的影响,在此基础上结合现场观测结果,考虑季节性地下水变化对热交换的影响,并与现有不考虑渗流的计算结果相比较,提出修正方法。

4.3 热交换对岩土力学性质的影响

研究不同温度下土体抗剪强度、变形模量的变化规律,结合土的矿物组成、微观特征,研究热湿迁移后土体的力学指标及导热参数的变化规律,重点研究不同的干湿次数、干湿幅度以及干湿路径等反映热湿迁移过程的参数对土性的影响,结合不同温度水平下的研究结果,建立土体性质与热湿迁移参数之间的关系,通过热湿迁移数值模拟,预测土体应力场和位移场的变化,正确评估热交换对地基岩土体性状的影响。

5 结 语

随着经济持续快速增长,能源供需矛盾日益突

出,开采浅层地能已成为缓解能源危机、保护生态环境的必要技术手段,许多研究者对此进行了广泛研究,但是对于浅层地能的开采对周围土体的影响目前却鲜见研究。浅层地能的开采是与岩土介质相关的能量交换过程,涉及到热、湿、力的相互作用。因此,开展地热开采中土体的热湿迁移机制及力学性状研究,对于掌握浅层地能开采过程对土体力学性状的影响,合理开发利用浅层地能,实现能源的可持续发展具有重要的理论和现实意义。

参 考 文 献

- [1] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, **42**(3): 345 ~ 359.
Jiang Zemin. Reflections on energy issues in China. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, **42**(3): 345 ~ 359.
- [2] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. Heating Piping and Air Conditioning, 1948, **20**(7): 119 ~ 122.
- [3] Ball DA, Fischer RD, Hodgett DL. Design methods for ground-source heat pumps[J]. ASHRAE Transactions, 1983, **89**(2): 416 ~ 440.
- [4] Kavanaugh SP. Simulation and Experimental Verification of Vertical Ground-Coupled Heat Pump Systems[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1985.
- [5] Eskilson P. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes[M]. Lund: University of Lund, 1987.
- [6] Mei VC, Emerson CJ. New approach for analysis of ground-coil design for applied heat pump systems[J]. ASHRAE Trans., 1985, **91**(2): 1216 ~ 1224.
- [7] RJ Couvillion. Field and laboratory simulation of earth-coupled heat pump coils[J]. ASHRAE Trans., 1985, **91**(Pt. 2B): 1326 ~ 1344.
- [8] HR Thomas, CLW Li. An assessment of a model of heat and moisture transfer in unsaturated soil[J]. Géotechnique, 1997, **47**(1): 113 ~ 131.
- [9] Chiasson AD, Rees SJ, Spitler JD. Preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems[J]. ASHRAE Trans., 2000, **106**(1): 380 ~ 393.
- [10] 刁乃仁, 李琴云, 方肇洪. 有渗流时地热换热器温度响应的解析解[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003, **18**(3): 1 ~ 5.
Diao Nairen, Li Qinyun, Fang Zhaohong. An analytical solution of the temperature response in geothermal heat exchangers with groundwater advection. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2003, **18**(3): 1 ~ 5.
- [11] Nairen Diao, Qinyun Li, Zhaohong Fang. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, **43**(12): 1203 ~ 1211.
- [12] 赵军. 竖直埋管型地源热泵地下传热及热力性能的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- Zhao Jun. Heat Transfer and Thermal Performance of the Vertical Downhole Heat Exchanger for Ground Source Heat Pumps. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [13] 李新国, 赵军, 周倩. 埋地换热器理论模型与周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报, 2004, **25**(4): 492 ~ 496.
Li Xinguo, Zhao Jun, Zhou Qian. Theoretical model of underground heat exchanger and numerical simulation on underground temperature field. Acta Energise Solaris Sinica, 2004, **25**(4): 492 ~ 496.
- [14] Philip JR. Evaporation, moisture and heat fields in the soil[J]. J. Meteor., 1957, **14**: 354 ~ 366.
- [15] Philip JR, Vries DA. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Trans. Amer. geophys. Union, 1957, **38**: 222 ~ 232.
- [16] Luikov AV. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies[J]. Advance Heat Transfer, 1964, **1**: 173 ~ 184.
- [17] Luikov AV. System of differential equation of heat and mass transfer in capillary-porous bodies[A]. Int. J. Heat and Mass Transfer[C], 1975, **18**: 1 ~ 14.
- [18] Luikov AV. Thermal conductivity of porous system[J]. Int. J., Heat and Mass Transfer, 1968, **11**: 117 ~ 140.
- [19] Milly PCD. Moisture and heat transport in hysteretic, in-homogeneous porous media, A matrix head-based formulation and a numerical model[J]. Water Resources Res., 1982, **18**(3): 489 ~ 498.
- [20] Milly PCD. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[J]. Water Resources Res., 1984, **20**(8): 1087 ~ 1098.
- [21] Taylor SA, Lary JW. Linear equations for the simultaneous flux of matter and energy in a continuous soil system[J]. Soil Soc. Am. Proc., 1964, **28**: 167 ~ 172.
- [22] Van Bavel, CHM, Hillel, DI. A simulation study of soil heat and moisture dynamics as affected by a dry mulch[A]. Proc. of 1975 Summer Computer Simulation Conf., San Francisco, CA Simulation Councils Inc. [C]. La Jolla, CA, 1975, 815 ~ 821.
- [23] Van Bavel, CHM, Hillel DI. Calculating potential and actual evaporation from bare soil surface by simulation of concurrent flow of water heat[J]. Agric. Meteorol., 1976, **7**: 53 ~ 76.
- [24] Liu W, Zhao X X. 2D numerical simulation for simultaneous heat, water and gas migration in soil bed under different environmental conditions[J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1998, **34**: 307 ~ 316.
- [25] 夏彦儒, 施明恒. 不平衡热力在热质输送中的运用[J]. 南京工学院学报, 1965, (2): 19 ~ 32.
Xia Yanru, Shi Mingheng. Application of Non-equilibrium thermodynamic in caloric transportation. Journal of Nanjing University of Technology, 1965, (2): 19 ~ 32.
- [26] 陈振乾, 施明恒, 虞维平. 研究土壤热湿迁移特性的非平衡热力学方法[J]. 土壤学报, 1998, **35**(2): 218 ~ 226.
Chen Zhenqian, Shi Mingheng, Yu Weiping. Non-equilibrium thermodynamics method of heat and moisture transport properties in unsaturated soils. Acta Pedologica Sinica, 1998, **35**(2): 218

- ~226.
- [27] Paaswell R E. . Temperature effects on clay consolidation. Soil Mech. and Found Engrg. Div., ASCE, 1967, **93**(3): 9 ~21.
- [28] Schiffillan R L. A thermo elastic theory of consolidation[J]. Environmental and Geophysical Heat, 1972, **5**(4): 78 ~84.
- [29] Campanella R G, Mitehell J K. Influence of temperature variation on soil behavior[J]. Soil Mech. and Found Engrg. Div., ASCE, 1968, **94**(3): 709 ~734.
- [30] Eriksson L G. Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays[A]. Proc. 12th ICSMFE[C], 1989, **3**: 2087 ~2090.
- [31] Leroueil S. Compressibility of clays: Fundamental and practical aspects[J]. Geotech Engrg., ASCE, 1996, **122**(7): 534 ~543.
- [32] Tidfors M. Temperature effect on preconsolidation pressure. Geoteeh[J]. Test. J., 1989, **12**(1): 93 ~97.
- [33] Hueckell T, Borsetto M. Thermo plasticity of saturated clay sands hales; Constitutive equations [J]. Geotech. Engrg., ASCE, 1990, **116**(12): 1765 ~1777.
- [34] Bruyn D De, Thimus J F. The influence of temperature on mechanical characteristics of boom clay: The results of an initial laboratory programmer[J]. Engineering Geology, 1996, **41**: 117 ~126.
- [35] Burghignoli A, Desideri A, Miliziano S. A laboratory study on the thermo mechanical behavior of clayey soils. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(4): 764 ~780.
- [36] 欧孝夺, 吴恒, 周东. 广西红黏土和膨胀土热力学特性的比较研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(7): 1068 ~1072.
Ou Xiaoduo, Wu Heng, Zhou Dong. Comparative study on thermodynamics characteristics of red clay and expansive soils in Guangxi. Rock and Soil Mechanism, 2005, **26**(7): 1068 ~1072.
- [37] 谢云, 陈正汉, 李刚. 考虑温度影响的重塑非饱和膨胀土非线性本构模型[J]. 岩土力学, 2007, **28**(9): 1937 ~1942.
Xie Yun, Chen Zhenghan, Li Gang. Thermo-nonlinear model for unsaturated expansive soils. Rock and Soil Mechanism, 2007, **28**(9): 1937 ~1942.

中国地质灾害区域预警方法与应用

刘传正 刘艳辉 温铭生 唐 灿 薛群威 著

内 容 提 要

本书概述了国内外地质灾害区域预警预报理论研究和应用服务发展动态,阐述了我国地质环境和地质灾害分布特点,提出了地质灾害区域预警划分为隐式统计预警、显式统计预警和动力预警原理。简单总结了采用临界降雨判据方法(隐式统计)建立的中国第一代国家级地质灾害预警系统及2003~2007年期间的应用经验。通过系统建立包括30个图层的全国地质环境信息系统、因子分析确定权重、多元统计和人工神经网络模型对比,对中国大陆分区建立了显式统计预警模型,研发了第二代国际级地质灾害预警系统,经过2008年汛期地质灾害区域预警预报服务检验证明效果良好。概括提出了地质灾害区域预警预报的工作程序及其基本要求。

本书可供从事地质灾害防治和防灾减灾公共管理、科学技术研究、应用服务和教学培训人员参考使用。

联系方式:电话:82998084

Email:engineer2003@mail.igcas.ac.cn

