

岩溶矿床疏干迟后性地面塌陷的防治

仰步雨

(湖南省煤炭研究所)

提要 本文从分析塌陷机理出发,按照地下水位在疏干过程中的时空关系,把岩溶地面塌陷分为瞬发性和迟后性两种塌陷类型。论述了塌陷形成条件、特征与其土质性质、结构的关系。根据湖南169厂塌陷的形成条件,提出了一种迟后性塌陷综合防治途径和方法。通过该厂近五年的治理实践,证明是成功的。

关键词 岩溶矿床疏干;迟后性地面塌陷;防治;湖南

岩溶大水矿床疏干产生地面塌陷现象,是一个影响矿山建设、危害疏干区工农业生产安全普遍存在的环境工程地质问题。迫切要求搞清其成因和有效的防治方法。近十余年来,广大同行从生产实践中,对岩溶地面塌陷进行了多种成因探讨、分类和治理方法的研究。但真正投入全面防治实践的甚少。

湖南斗立山煤矿区由于疏干排水,在早已形成疏干漏斗的岩溶地下水位降落区内的169厂,近几年来,陆续发生大规模地面塌陷,严重危及厂安全。为防塌保厂,进行了工程地质勘察和大面积的防治工作,取得了满意的效果。从勘察和治理中,我们认为169厂的塌陷属于一种潜蚀动力塌陷,在地下水位已被疏降至土层界面以下的条件下,它与土层性质结构、基底岩溶洞隙和地表水三因素密切相关,而地表水是此种塌陷的主导因素。它与地下水位初期被疏降时所引起的塌陷有所不同,在机理上、动力条件上、塌陷形成时间和地下水位降落的空间位置上,都有显著的差别。而这两种塌陷在岩溶大水矿床持续疏干过程中,是普遍存在的。现就我们了解到的岩溶大水矿床地面塌陷和169厂防塌治理实践,对塌陷分类、形成条件、土层性质结构和防治途径方法,作一粗浅的探讨,为促进岩溶地面塌陷防治技术的发展而抛砖引玉。

1 塌陷分类及形成条件

岩溶地面塌陷,一般都产生在具有第四系上层和岩溶化可溶岩组成的水流活动畅通的双层介质的地面上。依据塌陷产生与矿井疏干相对时间和岩溶地下水疏降的空间位置,分为瞬发性塌陷和迟后性塌陷两种类型。

1.1 瞬发性塌陷。大都出现在地下水疏降的初期,地下水疏降强度较大,随着水位急速下降,在水位自由面或承压面降离土层过程中,将引起一系列水动力和场应力的变化,破坏天然状态

下的重力平衡而导致地面塌陷(包括地面不均匀下沉、开裂和塌陷洞)。其形成原因主要有三种因素分别作用或综合作用的结果。

(1)地下水位下降造成脱水段不同土质层不均匀收缩,破坏了土体稳定性平衡(见图1),以致地面发生不均匀下沉和开裂。

土体失水前平衡式:

$$h_r < \tau + \left[(h - h_0) \frac{r_w}{1 + e} \right]$$

式中: h_r ——土层的自重力

τ ——土层内聚力和内摩擦力

$$(h - h_0) \frac{r_w}{1 + e} \quad \text{——水的浮托力}$$

土体失水后的压缩量

$$S = m_s \sum_{i=1}^h \frac{\Delta P_{si}}{E_{si}} (Z_i C_i - Z_{i-1} C_{i-1})$$

式中: E_{si} ——疏干 i 土层的压缩模量

Z_i, Z_{i-1} ——分别为地面到 i 层及 $i-1$ 层土底面距离

C_i, C_{i-1} ——分别为 $i, i-1$ 土层内附加压力系数

m_s ——经验系数

ΔP_{si} ——疏干层失去水的浮托力,可用下式取得:

单层土质结构:

$$\Delta P_{s1} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{r_1}{1 + e_1} dh$$

多层土质结构:

$$\Delta P_{si} = \int_{h_i}^{h_1} \frac{r_i}{1 + e_i} dh$$

(2)地下水力梯度的增大,加强了动力水头对土层的潜蚀、造就流砂溃落和形成土洞条件。其动力功:

$$W = \frac{1}{2} m K I^2$$

当 K 一定时,其水头所做功与水力梯度平方成正比,潜蚀作用急剧增大。

若渗流发生在具有蚀变性的疏松土石中,水力梯度 $I > I' = (G-1)(1-n)$

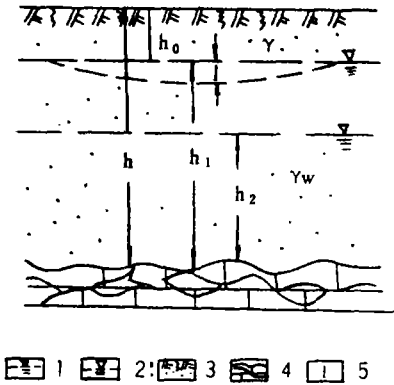


图1 土层脱水与压缩

Fig.1 Dehydration and compression in soil layer

1—天然地下水位; 2—疏降水位; 3—第四

系土层; 4—灰岩基底; 5—土层收缩离层高度

时,将出现流砂冲溃或土石液化,将产生瞬发地面塌陷。

式中: I' ——临界水力梯度

G ——土石比重

n ——土的孔隙度

(3)早期土洞的存在,尤其是土洞跨度处于重力临界平衡状态时,极易造成塌陷的产生。

瞬发性塌陷发生的特点是:无预兆。时间上与排水(或穿水)初始地下水位的下降和疏干漏斗的扩展具有相对同步性。在井下突水后,最快数十分钟或几小时,一般1~7天就有明显的地面塌陷反映。此类实例在湖南的桥头河斗立山、恩口、煤炭坝、孝坪诸矿区,水口山的柏坊铜矿,以致江南各岩溶大水矿区疏排突水和供水源地勘探抽水时都有此类塌陷普遍发生。

1.2 迟后性塌陷。多见于地下水位已经疏降至第四系土层底面以下,灰岩地下水位的天然动态对土层不发生直接动力作用。此时,土层的破坏,土洞的形成、发展以致地面塌陷的产生,主要是地表水的入渗、潜蚀、对土石的搬运流失的结果。在形成塌陷过程中,地表水入渗所具有的动能功为:

$$W = \frac{1}{2} m V^2 \sin \alpha \quad \text{或} \quad W = mgH \sin \alpha$$

当渗流角一定时,其水头所做的功与水头值 H 成正比,土层愈厚,其功愈大。此类塌陷明显的特点:一是,在地下水位疏降漏斗区内,塌陷的形成相对于疏降漏斗的形成,在时间上具有迟后性。因为这类塌陷的产生,其土层必须有一个地表水入渗发生动力潜蚀形成和发展土洞的时间过程;二是,地表必须有地表水和它的入渗通道的存在;三是,在此类塌陷区,只要不终断地表水的入渗,一般都有复塌或向老塌陷点就近迁移的新塌陷点产生;四是,塌陷点的分布,多见于上层厚度小于30m的碎石土为底卧层的上层地面。此类塌陷在湖南岩溶大水矿区内,每年约有5%左右的塌陷点出现。169厂治理区的塌陷均有上述特点。

2 塌陷与土质、结构层的关系

岩溶塌陷形成的三要素:具有可溶岩岩溶网络化的介质基底;具有运动着的水动力条件;具有形成土体洞穴的土质条件,三者缺一不可。其中土质条件,包含土质和土质结构层。经钻探表明,土质以角砾土、砂土最易形成土洞。角砾土、砂土,透水性好,遇水松散,动力水潜蚀易崩裂垮塌,细粒和粘土矿物易迁运液化溃落流失形成土洞,尤其是靠近岩溶网络系统的灰岩汇水口附近之接触面一带,是形成土洞的常见位置,据169厂防塌勘探、注浆工程土层中遇土洞57孔59个,全部出现在角砾土、砂土之中,土洞直径0.2~8.2m,均分布在离灰岩溶蚀面0~10.12m间。而353个勘探、注浆孔中所见粘性土层质地致密、粘结、隔水性能好,未发现一个土洞,一般都组成土洞的盖层,能否产生塌陷是由土洞的跨度和盖层单向抗压强度来决定。盖层可以由粘性土组成,也可以由粘性土与角砾土、砂土互层组合而成。因此结构层类型的不同将决定是否产生塌陷,或产生不同形态的塌陷。厂区不同土质厚度以大于2m起算,结构层一般可分为三种类型:(1)单一结构层,即土层由单一的角砾土、砂土或单一的粘性土组成。单一的

角砾土、砂土,由于遇水松散易于潜蚀崩裂垮落,土洞层层向上发展到达地表时,一般以小型塌陷洞或沉陷为主,在建筑物下若砌有砼整体基础,也可能有大面积空洞酿成,导致塌洞的产生;单一的粘性土,一般致密透水性弱,潜蚀条件差,土洞难以形成和发展,不具备形成塌陷的条件。(2)双层结构层,通常情况,上为粘性土,下为角砾土、砂土,是土洞形成发展产生地面塌陷最常见的土质结构层。若上为角砾土、砂土下为粘性土,粘性土厚度大而稳定,则塌陷不易发生;(3)多层结构层,是指粘性土、角砾土、砂土呈互层结构。若互层厚度层位稳定,其渗水及潜蚀条件差,则不易产生塌陷。若互层中粘性土厚度不稳定呈透镜体,且下层角砾土、砂土厚度大,基底灰岩岩溶网络发育,水流畅通,一旦产生塌陷,一般规模较大。其形态有不均匀沉陷或大型塌洞和开裂等(见图2、3、表1)

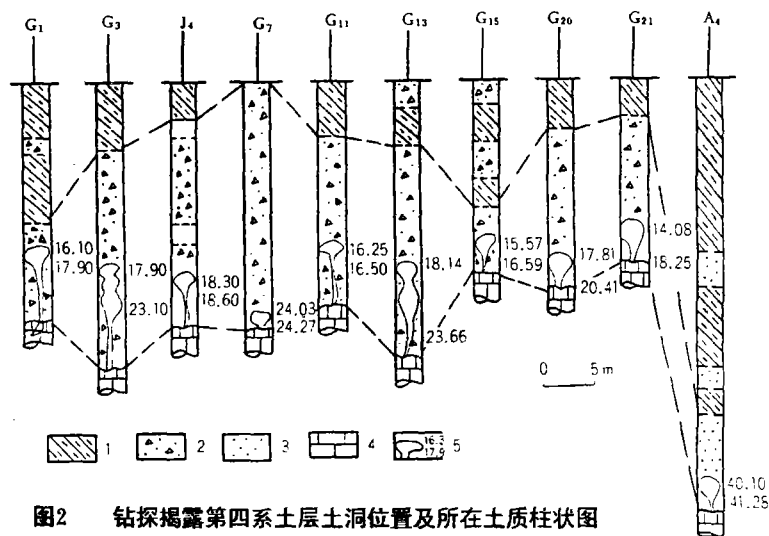


图2 钻探揭露第四系土层土洞位置及所在土质柱状图

1—粘性土;2—解砾土;3—砂土;4—灰岩;5—土洞及起止深度(m)

Fig.2 Soil cave location and soil property of the Quaternary soil layer exposed by drilling

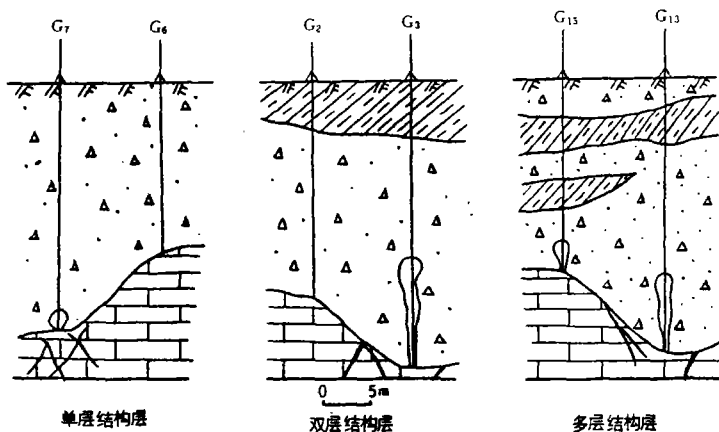


图3 结构层类型划分图

Fig.3 Division of texture layer type

表1 不同土质的物理性质指标
Tab.1 Physical indexes of different soil property

土质名称	天然容重 (g/cm ³)	天然比重	孔隙比	天然含水量 (%)	饱和度 (%)	液性指数	内聚力 (t/m ²)	取样个数 (个)
粘性土	1.90	2.73	0.93	39.54	89.53	0.093	1.042	17
砂土	1.93	2.71	0.90	34.05	82.93	0.223	0.67	4
角砾土	1.91	2.71	0.79	23.8	72.94	-0.34	0.61	15

3 迟后性塌陷防治途径和方法

迟后性塌陷防治途径和方法的探索以湖南省169厂生产区为例。

3.1 生产区概况及塌陷概况

169厂座落在下二叠统茅口组灰岩之上(图4)。建筑面积25136.27m²。工房全系毛石条形基础,砖瓦平房结构,自1967年以来,东翼香花台、黄港、湖坪三对矿井大规模疏排茅口灰岩水,总排水量达4578m³/h,最低疏干标高-300m,垂深达450m,地下水位大幅度下降,随着疏干漏斗的扩展,沿茅口灰岩地下水排泄区相继出现较多的瞬发性塌陷,而169厂生产区未受到塌陷的影响。直至1973年起,疏干漏斗早已越过生产区形成了稳定的水头边界。生产区自然动态水位最浅埋深,离土层下界面一般在30m以下(图5)。在此条件下生产区陆续产生了地面塌陷、下沉和开裂达20余处。尤其自85年以来塌陷在主要生产工房频频发生,规模加大,塌洞最大直径达6.2~8.0m,深5.8m,有的生产设备掉入坑内不见踪迹。房屋开裂、水管折断,严重危及生产及人生安全。为防塌保厂,1986年进行了水文及工程地质勘探,资料表明本区塌陷及形成条件有如下特点:

(1)土层下伏灰岩岩溶发育,受地下水四个集中迳流带的控制已形成了地下岩溶网络系统,有足够的空间来容纳潜蚀的土石。全区36个钻孔揭露茅口灰岩2375.85m,有29孔见洞157个,遇洞率达80.55%,溶洞裂隙率15.13%,溶洞率9.3%,溶洞高0.2~13.96m,主要岩溶发育深度在地表以下垂深60m以上,即土层界面以下30~40m。

(2)土层厚6.63~34.0m,以角砾土为主,夹砂土及粘性土互层,局部发育单一粘性土。具有单层、双层、多层结构。土洞多发育在下层角砾土、砂土与灰岩接触面间14个钻孔见土洞18个,且土洞以下多为松散层,表明土洞形成发展是自下而上进行的。

(3)灰岩地下水位埋深在50.2~89.61m,相距土层界面30m以上,考虑区内历年地下水位年变幅最大为11.52m,水位自然动态变化,仍不可能达到土层界面。

(4)经考察本区出现塌陷的地点,一般都存在地表水源和地表水入渗条件。经试验观测,塌陷点只要保持地表水入渗水源,就会出现就地复塌或在老塌陷点相邻处发生新的塌陷。

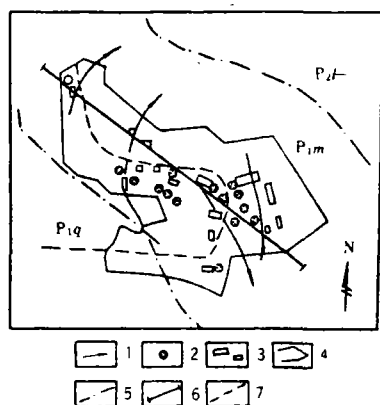


图4 169生产区平面示意图

Fig. 4 Map of workshop area of the 169 factory

1—地下水迳流带; 2—塌陷点; 3—治理工房; 4—生产区范围线; 5—地层界线; 6—剖面; 7—公路

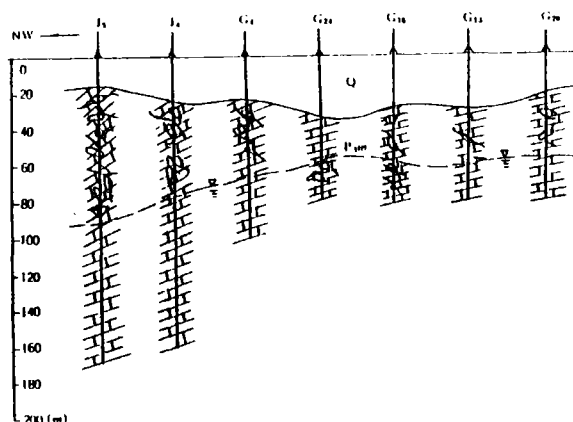


图5 生产区地下水位沿走向剖面

Fig. 5 Strike section of groundwater table in workshop area

(5) 本区塌陷, 以塌陷形式出现的多在双层结构层中, 以不均匀下沉形式的常在厚层多层结构层中。

(6) 生产区塌陷出现的时间, 是在矿井疏排地下水形成了疏降漏斗之后, 在其漏斗内正常排水情况下发生的。

综上所述, 本区塌陷应属地表水潜蚀作用形成的迟后性塌陷。

3.2 防治途径和方法

鉴于本区地面塌陷特点, 属地下水长期疏排, 水位大幅度下降后, 由于地表水入渗, 促使潜蚀土洞的形成和发展, 破坏了土体平衡而发生的一种迟后性塌陷。形成塌陷的主导因素是地表水入渗的动力作用。因此, 在选择防治途径上, 采取了“以消除或减弱地表水入渗, 防止潜蚀动力作用为主, 配合改善建筑物结构、充填土洞、堵塞土层过水通道, 封闭岩溶口和埋设报警器等综合途径”(图6)。其方法:

3.2.1 排洪导流

为减少大气降雨入渗量, 改善地表迳流条件, 依照生产区地形条件划分为16个汇水小流域, 沿小流域建筑排洪沟、导流槽, 与全区主干排水沟相连接形成导流系统

导流系统过水断面底宽 B 值, 按谢才公式计算

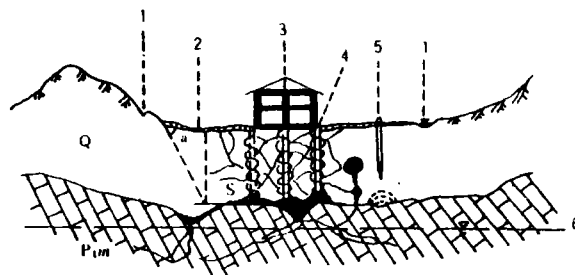


图6 岩溶塌陷综合治理图

Fig. 6 Comprehensive management of karst collapse

1—排洪导流沟渠; 2—地面铺盖防渗层; 3—建筑物结构加固
4—注浆充填加固地基; 5—埋设报警装置; 6—地下水位

$$B = \frac{1.112nQ}{\sqrt{H^{\frac{4}{3}} \lg x}}$$

式中: Q ——预计流域最大汇流量

H ——设计水头高度

α ——导沟槽坡角

n ——粗糙系数

B ——导流沟底宽(按梯形断面边坡角70°设计)

3.2.2 地面铺盖

为防止地表水垂直下渗,沿建筑物四周加铺防水层。铺盖宽度由下式计算。

$$b = H \cot \alpha + S$$

式中: H ——土层厚度

S ——保护层宽度

α ——地表水垂直渗透扩散角

铺盖面积为:

$$F = \pi(r+b)^2 - F'$$

式中: r ——建筑物底面积引用半径

F' ——建筑物底面积

3.2.3 改善建筑物结构

(1)为加强基础刚度和强度,改原基础为钢筋砼条形基础,并设置基础梁;(2)为增强建筑物整体性,提高砖砌体的抗剪抗拉强度,在墙内设置圈梁和构造柱;(3)为减少基底附加荷载,减轻建筑物自重,改薄腹梁、砼槽板屋面为框架石棉瓦屋面;(4)加强地面的整体性,变原三合土或砼地面为与基础梁衔接的钢筋砼整体地面;(5)拆除危房重建工房,要求建筑物长高比不大于2.5。

3.2.4 注浆工程

为达到对土层加固、充填土洞、堵塞土层过水通道、封闭土层下界面岩溶泄水口,形成水泥砂浆盖盘和建筑支撑基桩的目的,采用了与日本CCP工法高压旋喷桩法原理相近似的低压旋喷注浆,我们称之为低压射流、定点、定时、旋喷闷压注浆工艺。利用常规40/200,50/250泥浆泵,正常工作压力2.0~2.5Mpa,注浆段为土层段。为取得高压注浆效果,通过优化试验,为确定最佳溃击土体压力水束,比较好的选择了喷射器的喷咀直径、喷咀长度、最佳喷咀数和材料选型,工艺上优化了定点喷射时间、旋转角度和提升速度、浆液配方、速凝剂、缓凝剂都作了较好的选择,为提高水泥有效利用率,减少水泥浪费,一般对不返浆段采用了水泥浆液旋喷注浆;返浆段改用清水旋喷兼浆液闷压注浆。此法浆液注入率达95%以上,可大大减少浆液的浪费,充分发挥了注浆防塌的效能,且可形成直径为0.6m以上的支撑基桩。此工艺适用于50m

以内的粘性土、角砾土、砂土加固、成桩工程。

3.2.5 埋设报警装置

为减少注浆工程工作量,对于某些具有塌陷形成条件,而一时无塌陷迹象或安全级别较低的工房,我们设计一种借助重力传感音响报警,并设有喷浆接头的报警器。埋设深度,在建筑物持力层以下,灰岩以上第一层角砾土(或砂土)的上界面位置。以监测土洞发育尚未达到持力层时,在保证建筑物不受变形影响的前提下,发出报警信号,就地进行注浆治理。上述各种方法,可视其治理目标的安全价值综合采用或用其之中2~3种。

3.3 治理效果

经过防塌工程地质勘察,用疏导防渗、钻孔注浆和埋藏报警器等措施治理,经过三年的观测效果良好。主要成效如下:

(1)地面铺盖和导流系统的形成,加速了地表迳流集中泄流条件,大大减少了地下入渗量,经主干排水沟雨季流量观测,治理前最大排泄量为 $300 \sim 400 \text{ m}^3/\text{h}$,治理后最大排泄量达 $1200 \sim 1500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。基本断绝了地表水明显向土层入渗现象。

(2)通过注浆,[1]提高了土层荷载强度,经N63.5标贯试验对比,注浆后N值比注浆前提高5.85~11.7锤,平均提高9.74锤,提高荷载强度 $15 \sim 20 \text{ t/m}^2$;[2]充填土洞28个,累高59.75m,对土层过水裂隙达到了充填堵塞效果;[3]堵塞了土层下界面过水溶洞泄水口5处共27孔,注入水泥量3136.53t。[4]形成了直径大于 $0.6 \sim 0.8 \text{ m}$ 的砼状支撑桩。

(3)由于地面防渗和注浆工程的开展,改变了区内原来地表水入渗和地下迳流环境,终止了土洞发育和塌陷形成的继承条件,对其非治理区地面塌陷的形成相应起到了抑制作用。

(4)房屋结构加固配套,增强了防塌抗塌能力。

以上效果充分表明所采用的综合防塌途径和方法对于迟后性塌陷的防治是有效的,已控制了地面塌陷的再度发生。这是我国综合防塌治理技术上一次规模较大的探索。

PREVENTING OF DELAYED SURFACE COLLAPSE DURING DEWATERING OF KARST MINERAL DEPOSITS

Yang Buyu

(Institute of Coal Science, Hunan Province)

Key words: Karst mine drainage; Delayed surface collapse; Prevention and control; Hunan

Abstract

Based on analysis of the mechanism of surface collapses, the paper divided collapse into the instantaneous and the delayed collapse by the change of water table during dewatering. The relationship between the condition of collapse development and the soil property and texture is expounded.

A comprehensive preventing method is presented for the delayed collapse in the 169 Factory, in Hunan. After practice for 5 years, it is evident that the method is effective and succesful.

国际第四纪研究联合会第十三届大会在北京召开

来自47个国家的885位学者参加的国际第四纪研究联合会第十三届大会于8月2~9日在北京隆重召开。大会组委会主席刘东生在大会上致开幕词,国务委员宋健和中国科学院院长周光召出席了大会,并分别代表中国政府和中国科学院在大会上致词。大会闭幕式上宣布中国科学院刘东生教授当选为国际第四纪研究联合会主席。这是第一位亚洲科学家当选为该组织的主席。刘先生目前是中国第四纪研究会主席。

本届大会以第四纪时期人类与全球环境变化为主题。共收到81个国家和地区学者的论文1768篇,其中712篇分成7个学科组和53个专题在大会上进行交流,其余论文以197个展报和书面发言的形式与同行交流。我国第四纪研究取得许多成果,尤其对黄土的研究、古人类和考古的研究、中国东部第四纪冰川的研究等。

近十多年来,国内外第四纪地质科技发展迅速,提出大量与国土整治、资源开发、环境地质、灾害地质、农业地质、水文地质、工程地质有关的第四纪地质问题。各国政府和第四纪科学家对人类所面临的这些严重问题都十分关注。

为配合这次大会开得更好,大会组委会还安排了28条长距离野外地质路线和北京近郊10条一日地质路线的考察。桂林地区安排了以岩溶地貌和第四纪沉积为主要内容的地质路线考察。会前和会后有两批二十多位国外第四纪学者到桂林进行为期6天的地质路线考察。

王克钧