

城市发展中的地质环境演化与控制^{*}

王兰生 孔德坊 赵其华 徐 进 李天斌

(成都理工学院工程地质研究所, 成都 610059)

王思敬 张寿全 郭旭东

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘 要 地质环境是城市自然环境的一个重要组成部分。系统概述了我国城市地质环境的基本特征和主要问题。通过典型实例分析, 论述了城市大规模建设、城市地下资源开发和城市垃圾污染所引起的地质环境的演化规律和控制对策, 并对加强我国城市地质环境问题的研究工作提出建议, 这是从地质环境管理与控制方面保证城市可持续发展的一项重要任务。

关键词 地质环境 环境效应 地质灾害 管理与控制

中图分类号 TU 195 P642.2 X141 X21

0 前 言

城市化是世界各国发展的共同趋势, 是人类文明和进步的标志。本世纪是世界城市化浪潮迅猛发展的时代, 城市人口从世纪之初的 13.6%, 中叶发展到 28.2%。预计本世纪末世界总人口数将达到 62~70 亿。其中, 有一半以上将集中在城市。经济发达国家城市人口比将超过 70%~80%。

近 20 年来, 我国大陆城市数量和规模均有大幅度增长。1978 年设市城市 193 个, 城市人口比 17.9%, 迄今已增加到 640 个, 城市人口比 28% 以上。其中, 100 万人口以上城市达 32 个, 各类建制镇二万多个。预计本世纪末我国城市人口比可接近 30%。世界各国城市化进程规律表明, 当城市化人口比水平进入 30%~60% 的中期发展阶段后, 普遍出现城市化进程加速现象, 预计下世纪初我国城市化水平将跨入一个新阶段。

城市发展无疑会带来经济的繁荣、环境的美化和人民生活水平的提高。然而新城市的大量涌现, 老城市不断扩展, 人口的过度集聚, 伴随而来的是土地资源枯竭、水资源紧缺、能源耗竭,

^{*} 国家自然科学基金“八五”重点项目(编号: 49232050)和“山区城市地质环境演化机制与控制”项目(编号: 49272159)资助研究。

以及工业和生活污染,必将会给自然环境带来不良影响。地质环境是自然环境的组成部分,城市所处地质环境是地质历史演化的产物,也保留着城市建设过程中留下的痕迹。城市发展首先面临的是对原有地质环境的进一步开发和改造,地质环境能否进入良性演化,关系到城市生态环境的演化趋势。对城市发展中的地质环境效应及其演化趋势的研究,是保持人类工程活动可持续发展战略的一个重要组成部分。

1993年以来,我国地质科学工作者围绕“城市发展中的地质环境效应”(编号:49232050项目分题)和“山区城市地质环境演化机制与控制”这两项国家自然科学基金资助项目,开展了一系列研究工作(见附录)。本文是在这些研究成果基础上,以城市发展中的地质环境的演化与环境效应为中心议题撰写而成。文中概述了我国城市地质环境的基本特征,通过典型实例,论述了城市大规模建设、城市地下资源开发和城市垃圾污染引起的地质环境演化规律与控制对策,并对进一步的研究工作提出建议。

1 中国城市地质环境基本特征

1.1 地质环境格局

我国大陆的现代自然格局,是由几个相对稳定的陆块和几条重要活动带经过漫长地质历史时期的发展和演化而形成的,也是岩石圈与大气圈、水圈和生物圈相互作用的结果。按板块学说观点,西部印度洋板块与欧亚板块的碰撞,导致喜马拉雅山脉的形成和青藏高原的隆起;东部太平洋板块向欧亚板块的俯冲,引起弧后拉张和大陆边缘的弥散,出现拉伸构造,造成松辽、华北一带的断陷盆地的低原;东南部又受菲律宾板块与欧亚板块的碰撞,形成包括台湾岛在内的北北东向的隆起带。现代地壳构造格局决定了中国大陆总体地势格架,形成了以青藏高原为第一阶梯,向北、向东递降的三个阶梯状地势面(图1)。在平面布局上构成山地、丘陵、高原、盆地和平原纵横交错的网状地形结构。

上述地势格局,对中国大陆气候的状况起着重要控制作用。西北地区由于印度洋湿气流受阻,造成干旱、半干旱气候,形成新疆和内蒙古大面积戈壁、沙漠及甘陕黄土高原。与此对照,东南地区为湿热、潮湿的亚热带气候。

1.2 城市自然地质灾害发育分布状况

大地构造、地势和气候条件,确定了我国自然地质灾害的分布状况(参见图1),城市建设环境中可能遇到以下主要地质灾害。

(1) 城市地震灾害

我国地震具有频度高、强度大和分布广的特点。地震活跃带多沿陆块间的活动带展布,三个阶梯的接合部和东部碰撞隆起带是地震较强烈的地带(参见图1)。与其他地质灾害相比,它是造成我国城市经济损失、人口伤亡最为严重的灾害。我国有近1/3的大城市和2/5的中等城市,处在地震基本烈度Ⅶ度和Ⅶ度以上地区。地震通过地面振动和引发地面岩土体的变形破坏对城市造成危害。处于第三阶梯的沿海城市,地震引发的大面积砂土液化、软土塑流,以及海啸等扩大了地震灾害;山区城市,主要在第二阶梯分布区,地震引发的山体失稳和江河堰塞加重了地震灾害。我国地震活动性西部明显强于东部,然而由于东部是城市人口密集和经济繁荣地区,地震灾害的损失大于西部。

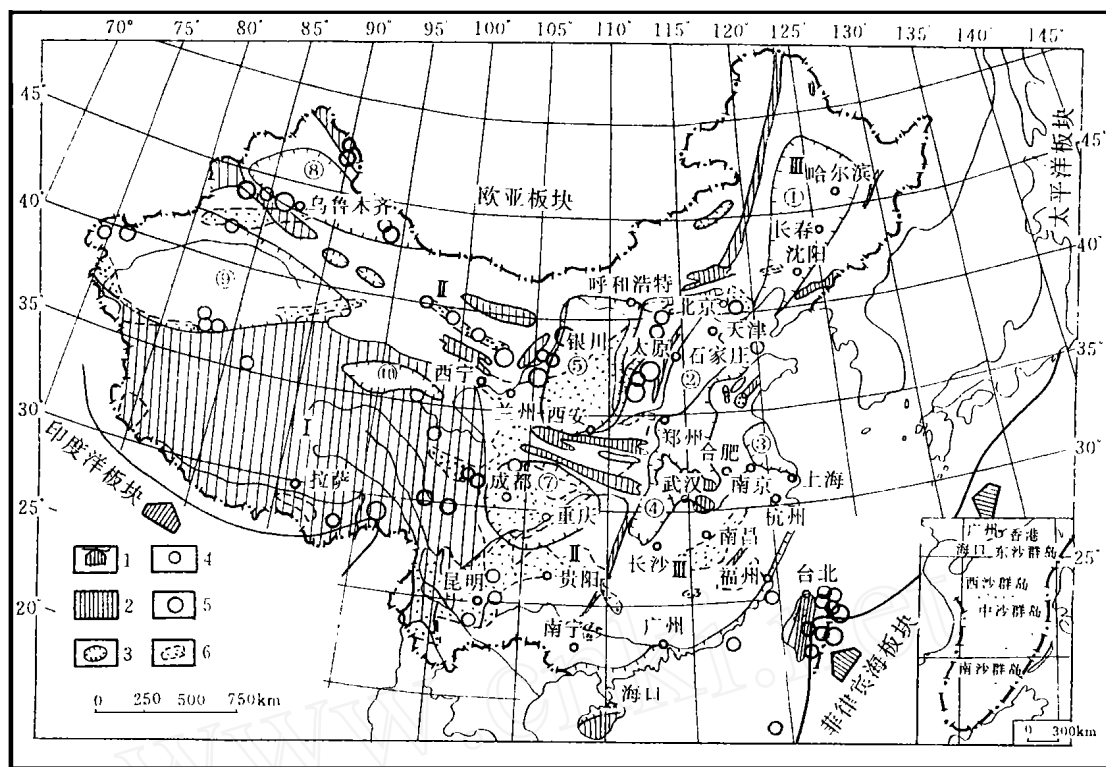


图 1 中国城市地质环境略图

(据文献[1], [2], [15])

Fig 1 Sketch map showing the urban geoenvironment of China

1. 板块碰撞方向; 2. 主要隆起带和山脉; 3. 拗陷或断陷盆地及裂谷; 松辽盆地; 华北盆地(断陷); 苏北盆地(断陷); 江汉盆地(断陷); 鄂尔多斯盆地; 汾渭地堑(断陷裂谷); 四川盆地; 准噶尔盆地; 塔里木盆地; 10 柴达木盆地; 4. 地震震中, $M > 7.5$ 级; 5. 地震震中, $M < 7.5$ 级; 6. 崩塌、滑坡及泥石流发育区; I, II, III: 第一、二、三级阶梯

(2) 城市地面变形与地裂缝

中国东部在引张应力作用下, 岩石圈的扩展形成一系列裂陷盆地和地堑(裂谷), 如第二阶梯的鄂尔多斯(拗陷)盆地, 四川(拗陷)盆地, 汾渭地堑(裂谷)和处在第三阶梯的松辽盆地, 华北(断陷)盆地, 江汉(断陷)盆地, 苏北(断陷)盆地, 以及华南一些小盆地等。这些盆地都是人口相对集聚, 城镇密布的地域。盆地中的断陷盆地和地堑, 其周边通常被一些近期仍有活动的伸展断裂所围限, 有的盆地盖层也被深部断裂分割。盆地扩展引起盆地地面沉降、变形和形成一系列地裂缝, 已受其危害和威胁的城市如西安、渭南、大同、临汾、邯郸、沙市等。这种构造重力扩展引起的地面变形破裂, 一般情况下发展缓慢, 通常通过它的长期演化过程造成的后果构成城市建设的不良环境, 如地裂缝及其附近的不良建基条件, 地面沉降造成积水洼地和扩大洪涝灾区范围等。但城市建设与地下水、气资源开发不当, 可能促使这些变形破裂迹象加剧, 甚至引发深部变动造成更为严重的后果。

(3) 地面岩土体变形破坏

崩塌、滑坡以及泥石流(简称:崩滑流)等地面岩土体变形破坏,是山区城市可能遇到的最主要的地质灾害之一。大陆第二阶梯区是崩滑流频发多灾区(参见图 1),长江和黄河中上游水系沿江城镇受其危害甚重,有些城镇就建在滑坡、崩塌堆积群体之上。东部第三阶梯的辽宁、北京、河北、福建和广东等地低山丘陵区,崩滑流灾害也较为严重。崩滑流可直接危害城市建筑物,造成人员伤亡。一旦堵江堰塞溃决引发洪水(如 1959 年雅砻江唐古栋滑坡造成下游直至攀枝花市沿江异常洪水)或切断水路交通(如 1994 年乌江鸡冠岭滑坡堵江切断航运),可造成更为严重的灾害和损失。

地震和特大暴雨可引起崩滑灾害突然发生。1981 年川西暴雨和 1982 年川东暴雨,先后在两地区造成大范围的崩塌、滑坡和泥石流群体。70 年代以来,香港已多次发生暴雨引起的滑坡、崩塌群体。近 20 多年来,人类工程活动对环境的改造和扰动,往往已成为城市地区崩滑流灾害发生的重要因素。

(4) 海水侵蚀作用

受太平洋板块俯冲和菲律宾板块碰撞的影响,我国东部沿海地带现今地壳运动表现为南北差异的总体特征。大体以杭州湾为界,北部海岸广大平原地区以下降为主,如辽东湾、渤海湾,苏北平原,长江三角洲等;南部海岸则以上升为主,包括沿海山地和丘陵海岸;唯珠江三角洲呈下降趋势。

当今,由于全球气候变化导致海平面上升的趋势已引起广泛关注。我国国家海洋局(1990)根据 48 个长观验潮站资料统计表明,百年来我国海平面平均上升率为 0.14mm/a 。有些学者对资料作精选统计,认为近 30~40 年来平均上升率为 0.17mm/a (陈宗镛等,1992),这意味着上升速率有逐渐增大的趋势。

东部沿海,尤其是黄河、长江、珠江三水系三角洲地带,是人口稠密、经济发达地区,也是我国天津、上海、广州三大城市所在地。这一带海拔接近海平面,又面临海平面上升和地面下降的双重影响,海水入侵、海滩侵蚀后退、土壤盐渍化、咸水入侵、洪涝灾害,以及风暴潮等海水侵蚀作用波及的范围、频度和强度均与日不断增强。从某种意义上讲,这是对沿海城市地区有深远影响的重大地质灾害。

近几十年来,沿海城市过量开采地下水和油气资源造成的地面沉降(表 1),江河水力开发以及三角洲砂土的无节制性开采造成沙洲后退等,无疑加重了海水侵蚀作用,扩大了灾害的范围和频度。

表 1 中国东部部分城市地面沉降统计表

Table 1 Land subsidence in some cities of east China

城 市		上海	常州	苏州	无锡	南通	宁波	天津	汉沽	大港	塘沽	湛江	北京
类 别	最大累积沉降量(mm)	2630	1100	1450	1140	300	350	2690	2630	1230	2780	413	509
	地面沉降面积(km ²)	850	200	56	100		130		1000				45

据 李明朗。

作为城市地质环境中的自然地质灾害,尚有其他多种形式,如水土流失、荒漠化,碳酸盐岩分布区的岩溶塌陷,特种土中的特殊地质现象(如黄土湿陷、红土胀缩等)、高寒地区的冻融作

用等。上述灾害是我国城市发展中面临的最为严重的四类自然地质灾害, 并且分别代表地壳深部、浅层、表层和表部动力对环境的作用与改造, 具有典型意义。

1.3 城市发展中的地质环境效应

城市发展对环境的改造与扰动主要通过三个方面, 即: 大规模的地面和地下工程建设; 城市及其邻区地下资源的开发; 城市垃圾污染。科学规划、合理开发加上严格管理和综合治理, 可使地质环境演化进入良性趋势; 反之, 则可能造成地质环境进入恶性演化进程, 产生不良效应。

城市发展引起的不良环境效应和地质灾害, 与城市所处地质环境特征和原发性自然地质灾害之间存在着一定的成生联系(表 2)。不良环境效应通常是通过对潜在地质灾害的诱发、叠加、反馈和连锁等效应, 增重和扩大灾害的危害性。城市环境工程地质研究的基本任务, 就是要研究与城市发展有关的地质环境问题, 具体研究城市发展中各具特色的地质环境的演化机制, 量化评价预测人类工程活动对地质环境造成的不良效应, 提出有效合理的控制对策, 从地质方面保证城市的可持续发展。

表 2 中国城市地质环境及其主要地质环境问题

Table 2 Type of urban geoenvironment and major geoenvironmental problems in China

地域	基本情况(总数比, %)			地质地貌	主要(或可能的)地质环境问题	代表城市
	人口	耕地	城市数			
东部城市 滨海—近海	72.8	69.7	72.8	第三阶梯 河口三角洲 滨海山地 盆地平原 江河丘陵	地面沉降、海水侵蚀、地震、洪水、软土崩滑流、海水侵蚀、洪水、风化残积土、软土 地面沉降、地震、地裂缝、洪水、湿地崩滑流、岩溶塌陷、洪水、膨胀土	上海、天津、广州 大连、香港 北京、沈阳、沙市 长沙、桂林
中西部城市 西南—西北	26.6	29.5	26.8	第二阶梯 云贵高原 江河山地 盆地平原 黄土高原 荒漠盆地	地震、岩溶、崩滑流、红土崩滑流、水土流失、地震 地震、地裂缝、地面沉降、洪水、湿地崩滑流、地震、水土流失、黄土湿陷 地震、荒漠化、冻融	昆明、贵阳 重庆、万县 西安、大同 延安、铜川、兰州 乌鲁木齐、敦煌
西部边远城市	0.6	0.8	0.4	第一阶梯 青藏高原	地震、冻融、冻土	拉萨

参照 刘玉海、张文范、鲍世行等。

2 山区城市地面岩体演化机制与控制

著名山城——重庆市, 即将成为我国第四个直辖市。它与其邻近的沿江城市如长寿、涪陵、万县等, 均处在正在兴建的长江三峡水库的上游段。这些城市座落在四川盆地川东褶皱带相对宽缓的向斜山地中, 山体主要由产状较平缓的侏罗系中、上统河湖相砂岩、泥岩互层状岩层所组成。地处长江中游暴雨集中区, 最大降雨强度可超过 200mm/d。特殊的岩性与构造条件, 加上河流作用和暴雨, 自古以来就是长江中游崩塌、滑坡强烈发育带, 如重庆市区就有大小滑坡 200 多处(图 2)。根据测年资料, 有的大型滑坡发生在两万年前左右以前。城市中有些建筑物就

建在老滑坡体上。斜坡地面岩体的变形与破坏, 是这些城市最突出的地质环境问题和地质灾害, 也是我国最具典型意义的城市。有以下主要规律。

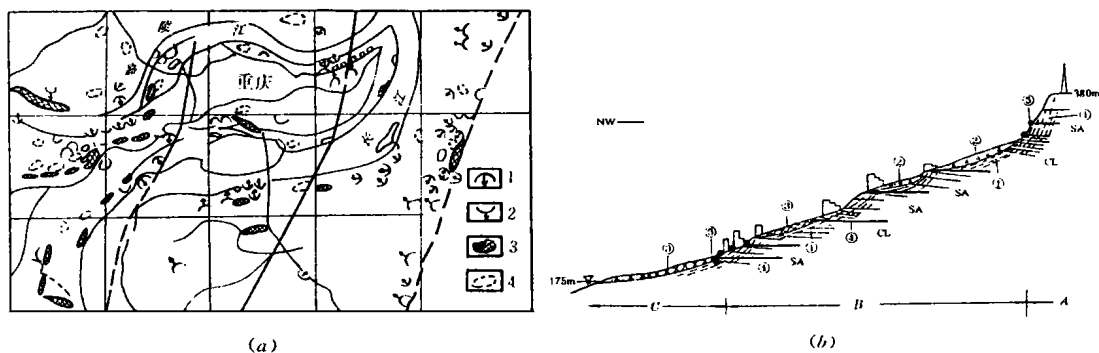


图2 重庆市区斜坡变形破坏图

(参照 地矿部 908 队)

(a) 分布图; (b) 剖面图

Fig 2 Map of slope deformation and failure in Chongqing City

1. 滑坡; 2. 崩塌; 3. 危岩; 4. 斜坡变形区; SA. 砂岩; CL. 泥岩; 风化卸荷裂隙; 崩塌积土层; 滑坡及人工填土; 地下洞室; 水样采样点; A. 山顶区; B. 山坡区; C. 沿江岸坡带

2.1 斜坡变形破坏演化机制分带特征

这些城市山体均由侏罗系河湖相砂、泥岩组成。岩层中砂岩与泥岩的接触面是强度较低的弱面, 在风化卸荷带中常常发生泥化现象, 其基本摩擦角可低于 10° ; 砂岩和泥岩的抗风化能力有明显差异。岩体的这些特性, 对斜坡变形破坏起重要控制作用。近期的斜坡变形破坏, 均发生在卸荷风化带中, 按地形地貌和环境动力条件的差别, 可划分为以下三个带(参见图 2)。

(1) 山顶区

城市的山峰均由厚层砂岩构成, 如重庆市的佛图关、万县的太白崖、石堡寨市的石堡山等, 且大多是城市的著名景点。坡度大于 40° 的砂岩陡坡和陡崖, 残留的强风化层很薄, 但卸荷带的深度可达陡崖或陡坡高度的一倍左右。以佛图关为例, 深达 20~30m。带内发育系列与坡面近于平行大体呈等间距分布的拉张裂隙。下伏泥岩的强风化带, 一般可达 5m 深度以内, 成为上覆砂岩体的软弱基座, 甚至形成凹崖腔。砂岩陡坡可以多种方式演化造成崩落、滑落和翻倒等, 在坡脚一带构成崩、坡积堆积裙, 坡度 $25^\circ \sim 40^\circ$ 。

(2) 山坡区

由系列砂岩陡坡和泥岩缓坡(平台)组成的台阶状斜坡。缓坡段的泥岩和砂岩中也发育与坡面大体平行的风化卸荷裂隙。这一带在山顶区可有较大的汇水面积, 水动力作用比斜坡演化中的作用更为突出。在泥岩缓坡台地, 其下伏砂岩中的风化卸荷裂隙往往是地下水的富集带和运移通道, 从而降低接触面的抗滑能力, 因而在具备适当的水动力环境中, 一些岩层缓倾坡外的斜坡, 可能产生滑移拉裂式的变形与破坏, 甚至发生平推式滑坡。也可联合陡坡中的风化卸荷裂隙, 在陡缓结合部位发生切层滑坡。

(3) 沿江岸坡带

是地表水和地下水作用最活跃的部位, 滑坡发育, 相对集中分布在河流的凹岸(参见图

2)。大多是老滑坡,有的是崩坡积物或人工堆积层沿下伏基岩接触面或软土发生的滑动(如重庆李子坝、双碑詹家溪等滑坡),更多的是顺基岩软弱面的平推式滑坡(如重庆钢铁厂滑坡、镇江寺滑坡等)。这一带近期变动主要表现为老滑坡的复活,大多与特大洪水和江水水位异常急剧消落有关。

对比研究其他依山傍水山区城市,地面岩(土)体大体都有类似的分带特征。

2.2 城市建设对地面岩(土)体稳定性的影响及环境效应

山区城市上述分带特征显示,山顶危岩区,崖脚崩坡积裙,山坡区中滑坡残体和斜坡变形拉裂带,以及沿江岸坡滑坡带,是这类城市地面岩(土)体中的脆弱带。建设中引起的问题和不良环境效应,均与对脆弱带不当的扰动和改造有关。对比其他城市研究,突出表现以下几方面。

(1) 对地面岩(土)体稳定性影响

工程活动造成老滑坡复活和边坡失稳,多半由于对隐伏的滑坡或危岩缺少必要的调查勘察工作,处理措施不当所致。在崩塌、滑坡叠加部位,如崩坡积裙与下伏滑坡结合部位,山坡区与岸边滑坡结合带,以及顺坡向风化卸荷裂隙集中发育带,变形破裂带等,如不采取必要的防护措施即作基础开挖,可引发斜坡连续失稳,如重庆市火车站立交桥地下商场开挖引起山坡区建兴坡老滑体复活,造成大片建筑物拉裂。基础开挖弃土堆载,建筑场地排水不畅造成积水,也是造成滑坡复活、失稳的重要原因,如重庆市的王家村滑坡、虎岩村滑坡、长寿县县一中滑坡等。弃土在暴雨中还可酿成泥石流灾害。此外,航道整治引起岸坡冲淤条件的变化,也可造成沿江岸坡带滑坡的复活与失稳,如嘉陵江边的重庆仪表厂滑坡复活,即与嘉陵江河道治理有关。三峡水库回水,对沿江岸坡带稳定性将造成更大影响。

对重庆市地下硐室调查表明,已有的硐室跨度不大,除对进口段风化卸荷带边坡有一定影响外,至今尚未发现对地面岩体有明显影响的证例,这可能与有厚层完整的砂岩作顶板有关,但高层建筑荷载下硐室的影响值得进一步研究。重庆市郊区的华蓥山地区,采煤造成山体裂缝、水落和严重的崩塌、滑坡灾害,对城市周边环境造成不利影响。

特大暴雨和大风作用下,树木也可成为不利于斜坡稳定性的附加动荷载。据资料,香港市区暴雨滑坡,不少发生在树木茂密的坡度近 40° 的山坡区。重庆市郊华蓥山一带再造林区,1990 年夏季特大暴雨期间曾发生 100 多处滑坡与滑塌,根据现场统计,也都发生在 37°~40° 斜坡区。这是在城市绿化工程中必须注意防范的问题。

(2) 高位崩石和滑坡突发性高速运动的危害

一些潜在的高位危岩或滑体,突然失稳(如在暴雨作用下)可获得极高的运动速度,滑体可转化为碎屑流或泥石流,沿程造成危害。这多半发生在靠近山顶陡崖的山坡区,如重庆市佛图关一带。香港崩滑灾害大多与这些方量不大,但破坏性较强的高速滚石和碎屑流、泥石流有关。这是高层建筑物林立、人口密集的山区城市特别应注意防护的灾害。

(3) 地面工程造成的水土流失灾害

目前,我国城市边坡开挖期间不注意坡面防护的现象仍很普遍。雨水冲刷坡面泥土,使之侵入街道、堵塞下水道和天然排水沟渠,造成积水,引起洪灾、污染环境。深圳市 1993 年 9 月 26 日布吉河暴雨,引发洪水,洪水携带大量泥沙侵入市中心,是这类灾害的典型实例。调查证明,它与布吉河上游低山丘陵区大面积开挖的全强风化花岗岩边坡有关。边坡无任何护面措施,到处堆放弃土,雨水冲刷形成密布的细沟和冲沟,形如黄土坡,造成严重的水土流失。经测试,洪水含砂量及其敏感土粒(0.25~0.075mm)的百分比与黄河泥沙相近,因而在暴雨洪水期

间造成悬河式的沿程淤积, 损失数亿元。

(4) 包气带圈层对环境的二次污染

山区城市地面岩(土)体大多处于包气带, 它对渗入的污染液可起到一定程度的净化作用, 有利于环境的改善。但污染程度超出它的净化功能(尤其像重庆、长寿、万县等这些历史上已被污染的城市), 可通过复杂的生化作用产生一些毒性更大的物质返回地面, 对环境造成二次污染(图 3)。

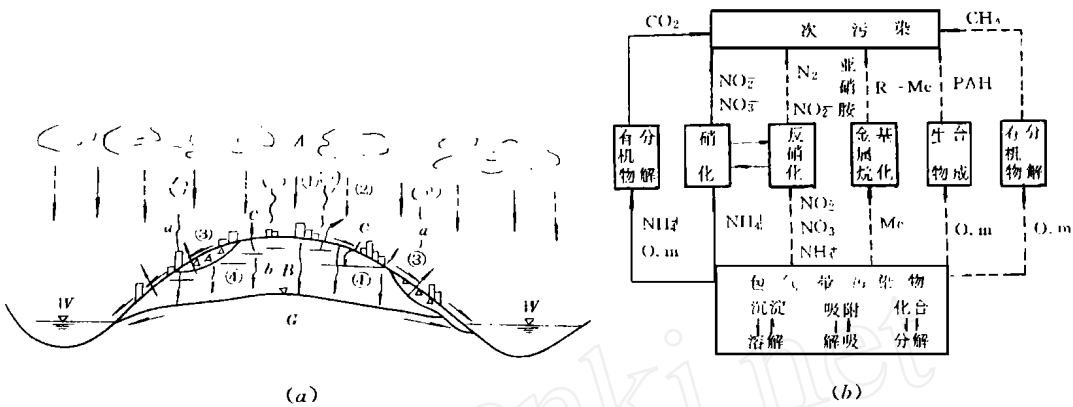


图 3 包气带二次污染模式(a)和污染链(b)图

Fig. 3 Secondary pollution system of aerated zone in mountain city (a) and pollution chains (b)

(a): A. 大气污染子系统; B. 包气带污染子系统; C. 地下水污染子系统; W. 地表水污染子系统; 降雨: 降水; 污水排放, 城市降雨径流冲刷; a. 工业、交通、生活烟尘排放; b. 包气带污染物渗入地下水; c. 包气带污染物二次污染环境(b): ——好氧条件;厌氧条件; O.m: 有机物

2.3 山区城市的管理控制系统

山区城市发展中引发的地质灾害和不良环境效应, 均与表部风化卸荷带及其变形破坏堆积层和人工堆积层有关, 它应是环境管理控制的主要对象。

一个完善的管理控制系统具有查询、咨询、评价预测、方案优化、信息反馈等多种功能, 可作为城市地质灾害防护、环境综合治理、土地合理规划与利用的决策依据, 也可用于指导建立有效的监测网络系统, 并可对具体的建设开发区提供指导性勘察资料和治理防护的优化方案, 为城市建设决策者、地质环境信息需求者提供广泛服务。这是一项十分庞杂而又需要多个部门通力合作才能完成的工程。

本项研究以重庆市为对象, 采用地理信息系统(GIS, DRIS)为工具, 对编制方法作了初步探讨。系统中采用数据库技术(Foxpro)存贮搜集到的环境地质信息参数资料, 建立了一系列评价预测模型, 如地面岩体稳定性空间预测模型、斜坡变形破坏时间预报模型、破坏后运动学评价预测模型、土地资源评价模型、污染状况及污染链评价预测模型等。系统的反馈功能, 可通过新信息的输入达到对模型的检验和修正, 以获得更接近实际的决策信息, 是一个非结构化动态决策过程。系统以图件、文字等多种形式提供信息(图 4)。

管理控制系统可以成为城市规划设计者、环境保护工作者与地质勘察人员之间紧密协作的纽带, 也是城市决策者与具体操作人员沟通的渠道。系统的完善程度, 固然与资料的丰足及其可靠程度和计算机软件功能有关, 然而评价预测模型的准确性十分关键, 这就需要对城市地

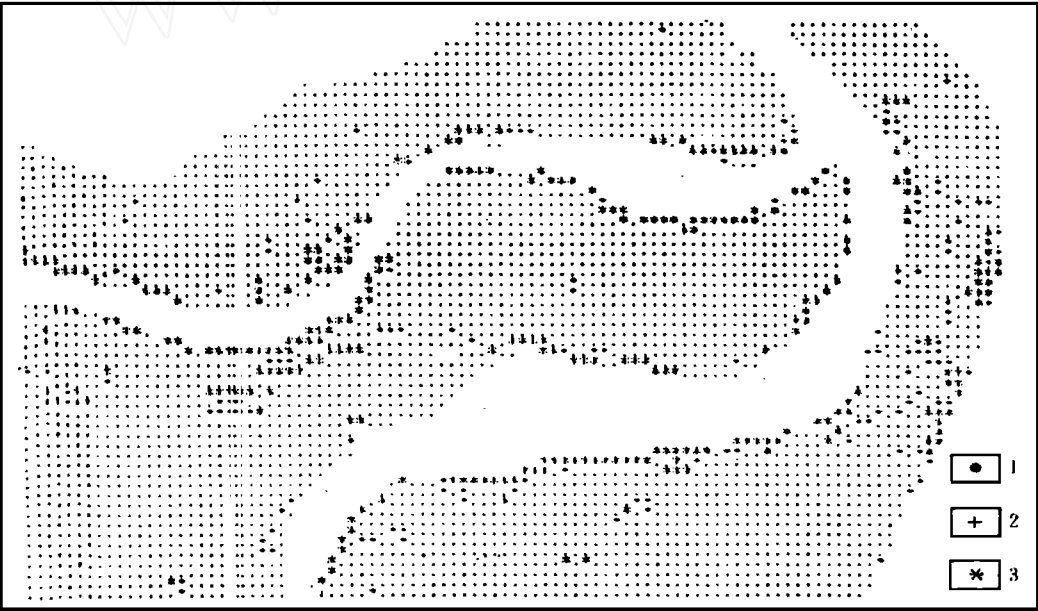
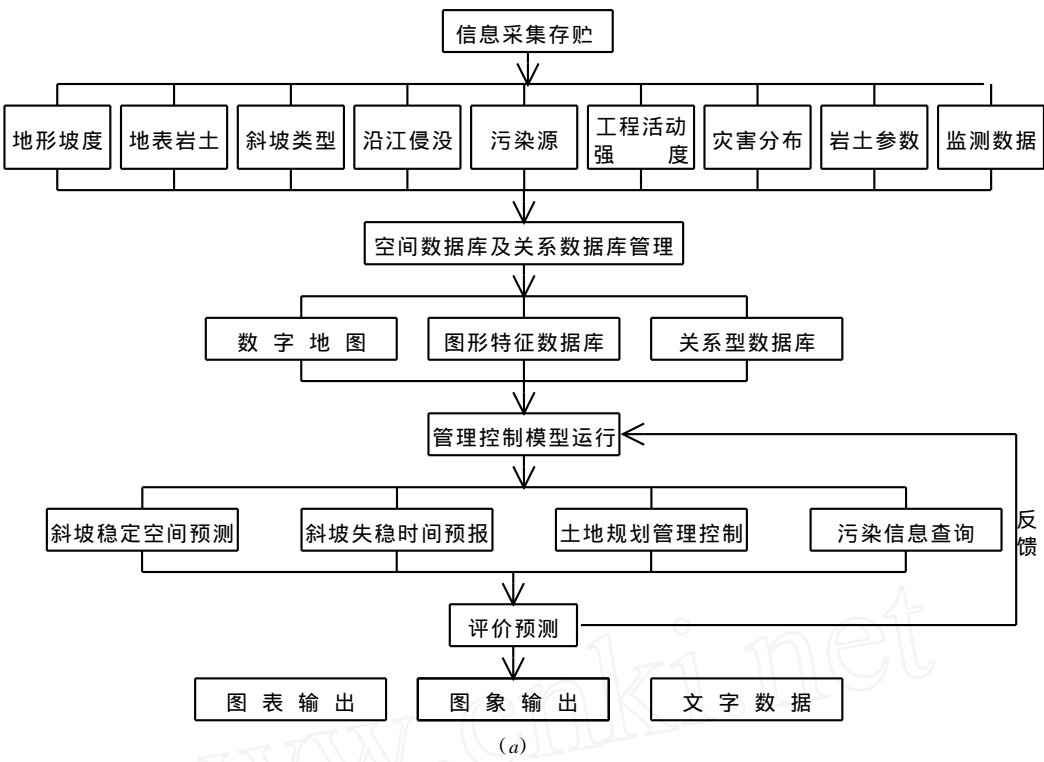


图4 管理控制系统结构框图(a)与重庆市斜坡稳定性综合评价分区图(b)
Fig 4 (a) Frame diagram of urban management and control system, (b) Zoning of slope slaility by GIS in Cnongqing City
1. 基本稳定区; 2. 一般监护区; 3. 重点监护区

质环境系统演化机制作出能反映实际规律的分析。

3 内陆盆地城市地裂缝与地面沉降

著名古城——西安市的地裂缝及与其相联系的地面沉降, 是市最主要的地质灾害。这是一种发育在内陆断陷盆地(地堑)中的特殊地质现象, 其形成机制明显区别于沿海城市的地面沉降。阐明其形成机制, 量化评价自然和人类工程活动在引起地面沉降和地裂缝活动量级中所占比重, 是制定西安市防灾对策和管理控制系统的主要依据。

3.1 西安地裂缝的“构造重力扩展”形成机制

西安地裂缝发育分布区位于渭河地堑式断陷盆地的沉降中心地带。该盆地是第三纪以来形成的一个构造断陷盆地。西安市区位于盆地一断阶之上, 四周被正性断裂围限, 南侧为秦岭山前临潼—长安区域性大断裂(走向NEE), 北侧为渭河断层(图5)。断阶下伏太古、元古至古生界基岩, 上覆厚约5000m的新生界盖层, 其中新、老第三系为厚约4000m的河湖相泥岩、砂岩; 第四系为一套1000m左右冲洪积和湖积相的砂砾石土和黄土状亚粘土。市区发育11条裂缝, 大体呈等间距展布, 主体方向NEE, 平行于南侧边界的临—长断裂。市区地貌黄土梁和洼地相间, 展布方向与地裂缝方向一致, 地裂缝均出现在梁与南侧洼地交界线附近, 裂面深度可达1000多米, 向南倾, 南盘下降。

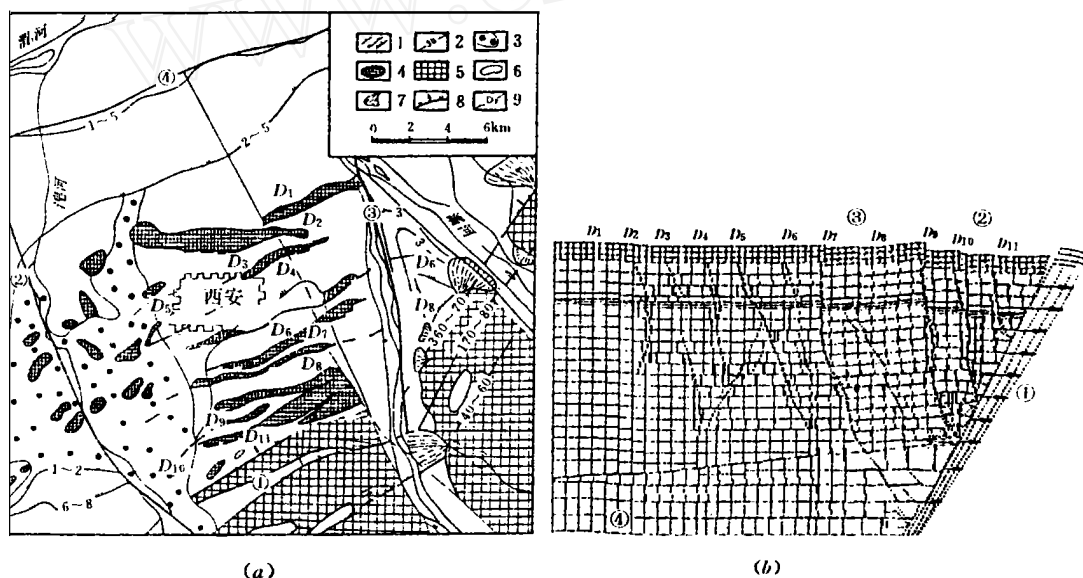


图5 西安地裂缝分布及其构造重力扩展机制概念模型图

Fig. 5 Distribution of Xi'an ground fissures and conceptual model of tectonic gravity spreading

(a) 地裂缝分布图; (b) 数值模拟再现的概念模型图

- (a): 1. 阶地; 2. 陡坎及高(m); 3. 冲积层; 4. 梁; 5. 台塬; 6. 梁间洼地; 7. 洪积扇; 8. 活动正断层;
9. 地裂缝; 临—长断层; 浐河断层; 灞河断层; 渭河断层; (b): 1. 边界断层侧的扩展;
2 中心“陷落带”; 3 地块倾斜; 4 地幔上隆

区域构造动力环境资料表明, 挽近期以来盆地处于拉张扩展状态, 内部断裂活动主要表现为拉张正错。盆地的扩展与盆地中近东西向地幔隆起轴的隆升活动有关, 临—长断裂是拉张最强烈的部位, 近期正错活动率 0.233mm/a , 成为西安次断阶盖层向南侧扩展的潜在临空面。

通过地质对比分析, 西安地裂缝群所造成的外貌特征, 是由于临—长断层拉张使盖层在自重应力场作用下向临空方向扩展、错动、陷落而成(图 5b), 称之为“构造重力扩展机制”。这一观点不仅通过地质力学模拟试验和数值模拟得到再现, 并在渭南、泾阳等构造动力环境相类似的地区发现了相似的地裂缝群。

3.2 西安市地面沉降机制

天然状态下“构造重力扩展”造成地裂缝的形成与演化, 也必然伴随着地面的沉降与陷落, 梁、洼地形的形成就是这种活动的产物, 其展布方向受地裂缝控制。

地面沉降中也叠加了地下水超采造成的沉降。自 60 年代以来抽水沉降波及范围达 250km^2 , 某些部位沉降量超过 1700mm , 最大沉降率达 127mm/a 。地下水采自 $100\sim 300\text{m}$ 深处, 由第四系冲、洪积砂砾土(约占 20%)和亚粘土、黄土状土(约占 80%)组成, 试验证明均具超固结性能($\text{OCR } 1.2\sim 2.4$), 沉降机制区别于沿海城市的欠(正常)固结土的释水沉降。

分析认为, 西安抽水沉降与地裂缝形成过程中对土体的扰动有关, 裂隙化和松动的土体因释水压密造成沉降, 称之为“松动土体再压密”机制, 它是地裂缝“构造重力扩展”机制的一个副产物。计算证明水位降超过 $60\sim 90\text{m}$ 时, 也有产生土的释水压密和局部的排沙沉降的可能, 但“松动土体再压密”机制占主导地位, 松动土体中的裂隙可成为土的释水和排沙的有利通道, 地面沉降带沿裂缝走向呈槽状分布, 地裂缝是沉降量跃变部位, 最大值紧靠裂缝等特征(图 6), 也是这种沉降机制的有力证据。

3.3 地裂缝与地面沉降活动量级的量化分析

根据对市区地面沉降、地裂缝断裂活动、承压水水位和地下水开采量长观资料, 开展了长观资料相关性的灰色动态时序分析, 并配合以三维地质力学模拟与离散元数值模拟研究, 得出如下主要成果。

(1) 南侧边界临—长断层的正错拉张对变形破裂起主导作用, 破裂程度由南向北减弱, 波及最远距离大约为盖层厚度的 $2\sim 2.4$ 倍($10\sim 12\text{km}$);

(2) $D_6\sim D_8$ 地带地裂缝最活跃, 各裂缝错动量级(V)与临—长断层拉张值(T)之间大约有以下关系:

$$V_{\omega_6\sim D_8} = (0.29 \sim 0.65)T; V_{\omega_9\sim D_{11}} = 0.18T;$$

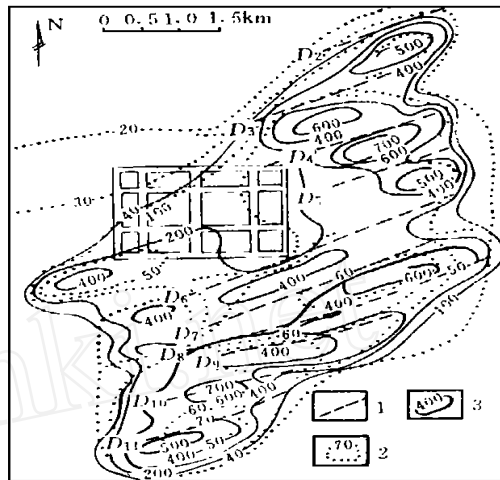


图 6 西安市地面沉降与承压水水位下降等值线(1968~1983)图

(据 杨国强, 适当修改, 1989)

Fig 6 Isopleth of the land subsidence and the drop of confined water level in Xi'an City

1. 地裂缝; 2. 承压水位下降等值线(m);
3. 地面沉降等值线(mm)

$$V_{\omega_3 \sim \omega_5} = (1.2 \sim 2.3) \times 10^{-2} T; V_{\omega_1 \sim \omega_2} \text{ 甚微。}$$

(3) 主裂缝间块体相对较完整, 块体破裂和松动效应在 $D_6 \sim D_8$ 带最为明显。

(4) 地面沉降带中心部位, 构造重力扩展引起的沉降量占总地面沉降量的 10% ~ 15.5%, 抽水沉降量占 85% 以上; 沉降带边缘区构造重力沉降量占 40% 以上。

3.4 地裂缝和地面沉降的环境效应与控制

西安城市发展的环境效应, 是在地裂缝发育情况下, 是由于开采地下水造成的地面沉降所引起的。主要有下列不良环境效应:

(1) 抽水沉降叠加效应, 增大沉降量和速率, 增强地面地裂缝错动量和错动率, 扩大地裂缝松动范围, 构成对地面、地下建筑的危害和影响。

(2) 地裂缝场地地震效应。

(3) 地裂缝与环境污染。如受深部供氟的影响, $D_6 \sim D_8$ 活动带一带地下水中氟、砷含量偏高。地裂缝主缝带附近存在氡气污染问题。裂缝也可成为地面污染源渗入地下的通道, 造成地下水的污染。

控制地下水开采量是防灾和地质环境管理的关键措施。经采用灰色系统分析法作趋势分析表明, 如果采取措施, 控制降水漏斗不再扩大, 则有可能至 2000 年地面沉降将接近天然状态, 地裂活动量可小于 3mm/a , 城市环境必然得到明显改善。但是, 值得注意的是目前地热开采方兴未艾, 必须及时加强管理与控制, 否则将会导致严重后果。

综合地震、地裂缝、地面沉降、土体性能和地下水位等对场地稳定性的影响, 通过模糊综合评判, 可将场地划分为 5 个等级, 作为城市规划管理的依据(图 7)。

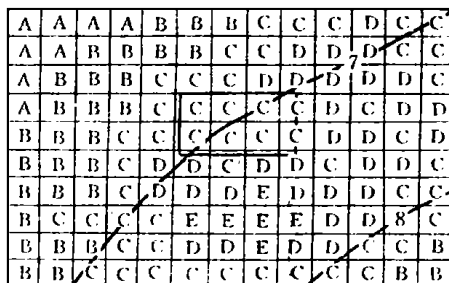


图 7 西安市区地震烈度场及场地稳定性模糊综合评判图

Fig. 7 Earthquake intensity influencing field and fuzzy comprehensive evaluation for its stability, in Xi'an City

- A. 稳定性好, 良好的建筑场地, 无震害;
B. 稳定性良好, 对 I 类建筑按规范作抗震设计;
C. 稳定性一般, 通常不适宜 I 类建筑物;
D. 稳定性较差; E. 稳定性差

4 城市固体废物的地质环境效应和对策

4.1 城市污染物的地质环境效应

城市发展, 人口集中, 工业发达, 不可避免地产生着大量废物。废物, 是个相对的概念, 是指在一定的科技和生产水平条件下还不能有效利用的物质。就其物理状态而言, 包括气态、液态和固态三大类型, 它们都是城市自然环境的重要污染源。其中, 气体废物的直接污染对象是大气, 对地质环境无直接影响; 而液体和固体废物则对地质环境产生直接效应。液体废物的处置, 世界各国均采用净化后二次利用和地下深部灌注处置方式, 已有比较成熟的技术, 尽管全面实施仍存在许多困难。而固体废物(垃圾), 由于其体积大, 需要妥善堆放, 稍有不慎就将会造成对地质环境的污染。例如重庆市, 这虽是一个已经建立了比较完善的垃圾处置场和污水排放管网的城市, 但调查表明, 在包气带(岩体松动圈、土壤)和地下水中部分有毒重金属元素(Hg, Pb, As 等), 以及 Mn, Cr, COD, 大肠杆菌等均超过国家有关规定的标准。工业和生活垃圾则是其重要的污染来源。

城市垃圾主要来源于建筑、工业和生活。建筑垃圾基本上由惰性物质组成,对地质环境的作用较小;工业垃圾(不包括核废料)产生有毒污染因子,而生活垃圾则通过降解作用成为其他有害污染因子的普遍来源。如不妥善处置,这些污染因子首先进入包气带,继而进入地下水和地表水,然后进入人类的食物链,最后被摄入人体中,使人类自食其果,成为最终的受害者。污染液运移演化机制模拟试验还证明,在包气带厌氧环境中,复杂的生化作用还可生成亚硝酸根等毒性更大的成分,对环境造成二次污染(图 8, 参见图 3)。因此,固体垃圾的合理处置,已成为城市发展中的世界性问题。

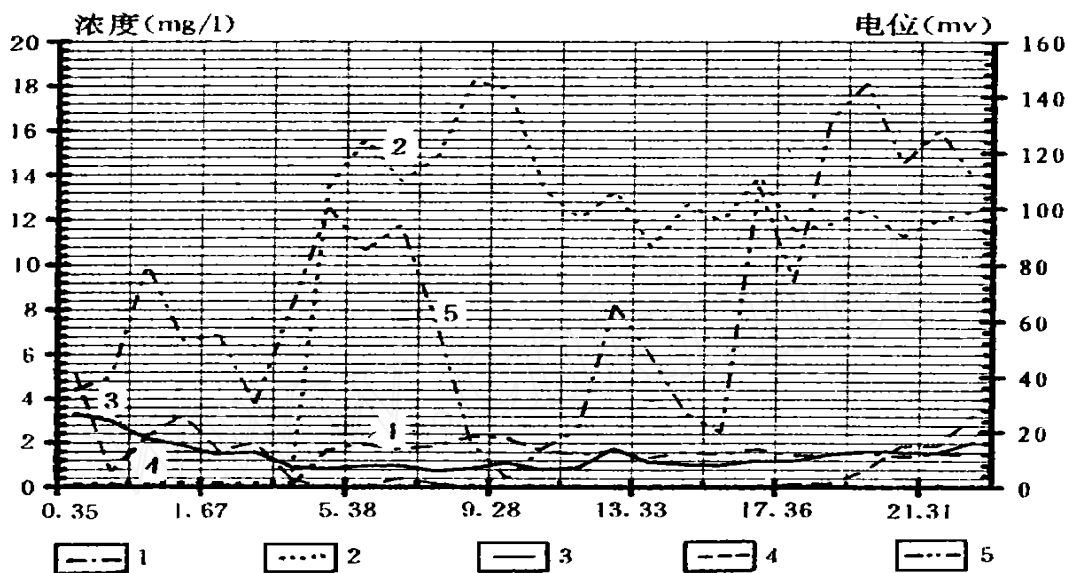


图 8 包气带裂隙岩柱污水渗滤模拟试验结果图

Fig 8 Result of infiltration model test of pollution water in rock block and column

1. COD; 2. NH_4^+ ; 3. NO_3^- ; 4. NO_2^- ; 5. EH (电位)

资源化、减体化和无害化是城市垃圾处置的方向,当前采用的具体方式主要有焚烧、堆肥和卫生填埋。它们在世界各国垃圾处置中所占的比率,则因国情而异。但是,前两种方式的处置成本远远高于后者,而且还不可能处理固体垃圾的全部,因此应当认为,卫生填埋是当前垃圾处置中必不可少的重要而且与地质环境关系最为密切的一种方式。

4.2 固体垃圾的卫生填埋

卫生填埋工程主要包含 4 个系统:在适宜场地上的垃圾填埋系统,地下水监测系统,地表排水、填埋体排气和渗滤液排导系统,以及活水净化系统。设计的主要目标在于尽可能地减少其对城市地质环境的污染(图 9)。从有效保护地质环境观点看,场地位置的选择是基础,合理的填埋体结构设计是关键。

场地位置的选择,必须考虑以下条件:从节约运输费用和避免污染城市大气环境出发,场址应与城市的距离适当;充分利用天然负地形;位于潜水渗滤场的下游方向,且潜水

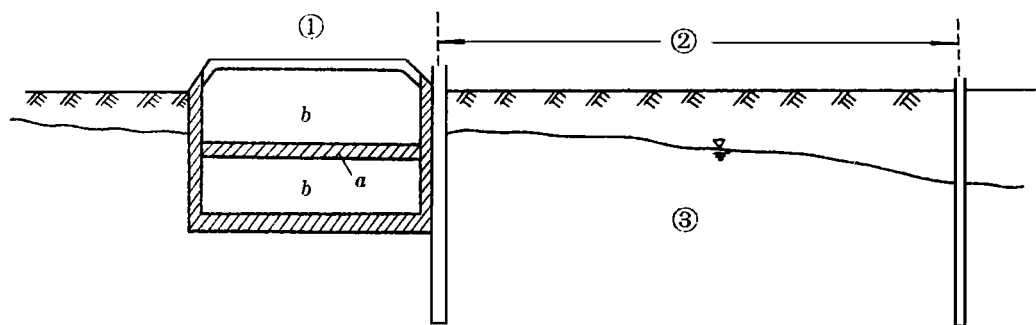


图9 卫生填埋地质环境效应概念模型示意图

Fig. 9 Schematic drawing conceptual model of LFGE effect

垃圾填埋系统; 监测系统; 地质环境系统; a. 填土层; b. 垃圾层

位应尽可能地埋藏较深; 场址表层由一定厚度的隔水层组成, 以减少底部防渗处理投资; 场地附近有丰富的粘性土以作为填土材料。

例如广东省湛江市的垃圾场址初选在市区以西鹰岭的汤谷中, 尽管与市区的距离比较适当(距霞山区约 15km), 又具有天然负地形可资利用, 但位于地下水的补给区(该市是我国南方少有的以地下水为供水主要来源的城市), 而附近土层又为湛江组中的粗砂土, 因而此场址的适宜性明显较差。成都市目前的垃圾卫生填埋场选择在龙泉山西麓的长安场, 从上述条件考虑都是比较适宜的, 启用后 6 年来的监测资料表明, 对地质环境无明显污染迹象。卫生填埋的主体是垃圾层与填土层的交互复合结构体。填土层的主要作用在于阻挡雨水渗入, 延缓垃圾的

公害化降解过程, 阻滞部分污染因子进入渗滤液和减轻有害气体对大气的污染等。对填土性质的要求主要是渗透性和吸附能力, 从土料本身而言, 它们取决于矿物成分和粒度; 从工程效果来说, 则与土层的密度和单层厚度有关(图 10)。在土料一定的条件下, 可利用密度和厚度调节填土层的吸附能力和渗透性能, 以达到具体情况下的最优条件。根据垃圾渗滤液的成分和浓度以及填埋体结构的各种方案, 选用适当的数学模型开展数值模拟分析, 即可进行垃圾渗滤液中污染因子浓度变化的时空预测和填埋体结构的优化设计(图 11)。遵循这一系统, 研究了上海浦东新区垃圾场的规划设计。根据上海市生活垃圾成分和浦东区土粒的特点, 对垃圾场周围 500m 范围内, 垃圾场启用 10 年内渗滤液污染因子的浓度变化, 采用确定性、随机性和风险概率方法, 进行了分析和计算, 提出了在浦东新区采用填土层密度为 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ (浦东新区拟作为填土料的褐黄色粉质粘土, 其天然密度 $\rho = 1.45\text{g}/\text{cm}^3$) 和单层厚度为 2.5m, 是减少污染和保护地质环境的最佳结构方案。

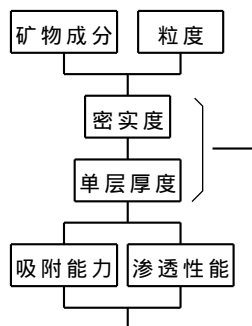


图10 填土料吸附能力渗透性的控因制素

Fig. 10 Factors controlling adsorption and permeability of fill material

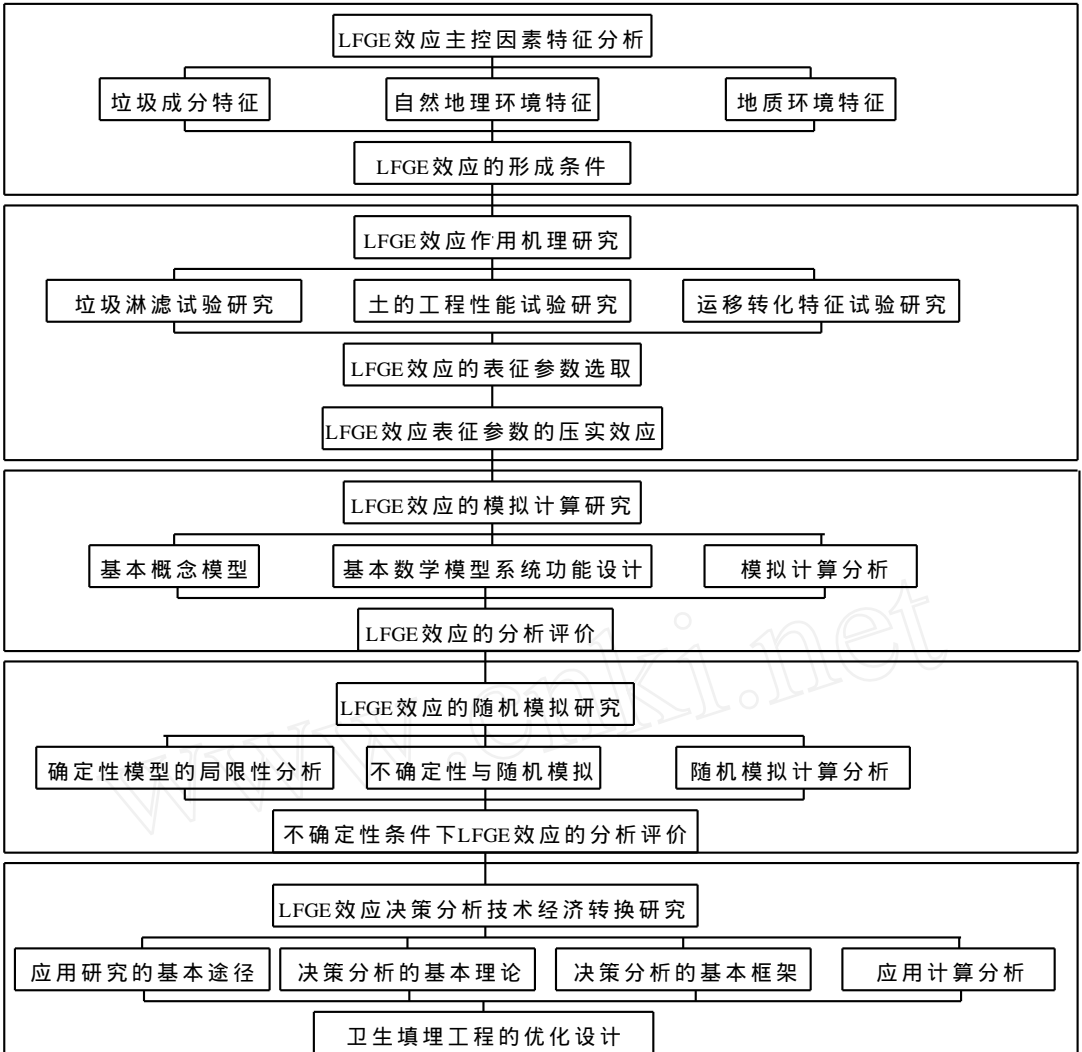


图11 垃圾卫生填埋地质环境(LFGE)效应分析研究系统框图

Fig. 11 Analysis system of waste landfill effect on geological environment (LFGE)

4.3 问题与建议

通过调查研究,在城市垃圾处置和卫生填埋工程中,存在着以下亟待解决和应进行深入研究的问题:

(1) 垃圾是城市地质环境污染的主要来源,而妥善处置城市垃圾以保护地质环境,市政当局责无旁贷。当前虽已有了一些法规和标准,但很不完善,且实施情况也较差。在全国数以十万计的城镇中,尚无正规垃圾处理场者比比皆是,即使已将垃圾合理处置提到当局议事日程上来的大、中城市,有的对场址选定仍很不规范,有的虽有填埋结构设计但未严格执行,因而多数城市仍处于日益增多的垃圾包围之中,地质环境不同程度地遭受着污染,这一现象已不容继续发展下去。完善法规,严格执行,已成为市政当局刻不容缓的重要任务。

(2) 填埋场场址的合理选择是减少污染的基础。在规划阶段应由具有工程地质勘察资格

的单位,按照有关规程进行严格、深入地勘测工作,通过分析对比,选定相对适宜的场址,这一工作中的任何轻率决定,都将会造成难以抑制或弥补的后患和损失。

(2) 垃圾卫生填埋的实施,在国内外虽已有数十年的历史,但对其中多方面的机制问题仍为人们所知不多,从而使垃圾卫生填埋对地质环境的保护效益受到局限。例如对垃圾降解过程中微生物的作用机制,不同矿物颗粒对污染因子的吸附及其相互转换转移,污染因子在地下水中运移和弥散的特定规律,等等,人们都还缺乏足够的认识。这些问题都还有待于城市环卫部门和科技人员共同探索、研究。

5 结论与建议

5.1 主要认识与结论

(1) 我国大陆构造格架,阶梯状地势格局和气候分带特征,确定了我国地质环境的总体特征和自然地质灾害的发育分布状况。带状分布的地震强烈带,沿海因地面下沉和海面上升而渐趋增强的海水侵蚀活跃带,山地丘陵区的崩塌、滑坡、泥石流发育区和断陷盆地(裂谷)的地面变形和地裂缝,是我国地质环境中最薄弱的环节和脆弱地区,也是我国城市建设发展中所面临的最突出的地质环境问题和自然地质灾害。

(2) 城市发展,通过大规模立体化建设、城市及其邻区地下资源的开发与利用、城市垃圾污染物的排放等三个方面,造成对地质环境的扰动与改造。由此引发的不良地质环境效应,总是与地质环境中的脆弱带和原发性自然地质灾害有关。不当的规划、建设和开发,通过诱发、叠加、反馈和连锁反应等多种方式,加重和扩大了地质灾害的危害性,造成地质环境的不良演化趋势。

(3) 地质环境演化中,不同部位地质体之间的相互联系和相互制约的关系,及其因人类工程活动发生的变异,决定了演化的进程与趋势,体现了一种环境链效应。如山区城市,由山顶区 \Rightarrow 山坡区 \Rightarrow 岸边区 \Rightarrow 江河构成了环境链;山前平原城市(如北京市),由山区 \Rightarrow 山前 \Rightarrow 平原构成了环境链;又如平原城市(如成都市)的阶地(台地) \Rightarrow 漫滩 \Rightarrow 河流环境链等,这些是横向环境链。西安市区地质环境表现为由深部构造 \Rightarrow 浅生构造 \Rightarrow 表生结构(地面岩土体)所构成的垂向环境链。污染的地质环境效应也可表现为横向和垂向的污染链。当然,某一个城市中也可同时存在横向与垂向环境链的复合。环境链各组分之间的关系是地质历史演化过程中形成的,水(气)等流体是各组分间发生联系的主要纽带和媒体,许多地质环境的变化正是由于水(气)等流体的量和质的变异而引起的,它往往是环境管理控制的关键。

(4) 地质环境是自然环境的一个重要组成部分,对城市地质环境的系统研究,涉及到城市的规划、建设和环境保护部门之间的配合与协调,更需要得到政府部门的支持与帮助。本项研究体现了这样一条研究思路,即通过系统调查、论证城市所处地质环境的形成演化过程,阐明各类地质作用和地质灾害的形成演化机制,分辨地质环境的演化和地质灾害发展中自然和人为因素所占比重,以达到对城市地质环境演化趋势作出量化评价和预测,提出有效、合理的防范措施和综合治理对策,与规划、建设和环保部门共同努力促使地质环境进入良性演化进程。

地质环境能否进入良性演化进程,关系到城市生态环境演化趋势的优劣。从地质环境保证城市的可持续发展,是城市地质工作者的基本任务。

5.2 对进一步研究工作的建议

(1) 城市地质环境工作应该得到政府部门和市政当局更加认真和有实效的关注与支持, 严格执行已有的环境保护法规, 并根据需要逐步完善和建立新的法规, 将城市地质环境的管理与控制置于法制管理之下。

(2) 我国城市发展正步入一个新阶段, 作为跨世纪工程, 城市链的形成和乡村城市化将成为我国城市发展的两大趋势, 并着力于将城市建设成山水城市。围绕这一发展方向, 城市改造和新建城市市区地质环境和城市链的大环境, 都有许多有待深入研究的重大课题, 如:

沿海三角洲(黄河三角洲、长江三角洲、珠江三角洲等)地带城市地质环境的演化规律, 如地震带的影响, 海面上升、地面下沉的影响, 抽水地面沉降的影响, 以及黄河小浪底水电站、长江三峡水电站建成后可能的影响等, 将是研究的重点。

渤海湾和湛江—海南这两个港湾城市链正在迅速发展, 有规划考虑在庙岛群岛一带穿过渤海海峡, 打通从胶东到旅大的通道(海底隧道和高架桥); 修建琼州海峡隧道, 沟通湛江与海南。这两项 21 世纪工程必然对两港湾区的经济建设带来巨大发展, 应及早开展工程地质的可行性研究, 对两区域地质环境的系统研究应纳入国家有关部门的议事日程之中。

盆地是我国城市发展的重要场所, 盆地扩张引起的地面变形、断裂和裂缝已是较普遍的现象。为维持城市的存在与发展, 盆地城市也存在着地下资源(地下水、地热、石油、天然气、煤等固体矿产资源)开采与利用的问题。系统开展盆地城市地质环境演化机制与控制的研究, 具有十分重要的理论与实际意义。

山区城市的对比研究。我国山区城市分布范围很广, 有西南的江河山地城市, 西北的黄土高原城市, 也有沿海的山地城市, 其中包括香港。各城市的地质环境、气候条件、经济发展状况, 以及城市发展史等虽有所不同, 但作为山区城市的主要地质灾害却都有相类似之处, 开展系统对比研究, 对山区城市的管理与控制具有十分现实的意义。

(3) 采用地理信息系统(GIS)和多媒技术, 建立城市地质环境信息库, 编制多功能的城市管理控制系统, 是城市环境管理控制非常有效的工具。它可以成为城市规划设计者、环境保护工作者与工程地质勘察人员之间紧密协作的纽带, 也是城市决策者与业务工作人员之间相互沟通的渠道。

附 录 本项研究成果汇总

中国科学院地质研究所课题组研究成果

1. 王思敬. 中国城市发展中的地质环境问题. 第四纪研究, 1996; 第 2 期.
2. 张寿全, 王民敬, 宋玉环. 中国沿海地质环境与区域持续发展的若干问题探讨. 工程地质学报, 1996; Vol 4, No. 3
3. 王思敬, 张寿全. 中国沿海地质环境、资源开发与经济发展若干问题探讨. 中国沿海资源、工程、环境系统与经济发展战略. 北京: 地震出版社 1993.
4. 张寿全, 王思敬, 黄巍. 人类活动与中国沿海环境工程地质问题. 地学前缘, 1996; Vol 3, No. 1~ 2
5. 蔡祖煌. 资源开发、工程建设等多种活动效应优化研究. 中国沿海资源、工程、环境系统与经济发展战略. 北京: 地震出版社, 1993.
6. 吴恒. 城市地质环境问题与评价方法. 走向二十一世纪环境地质问题研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 1996.

典型人类工程活动与地质环境相互作用研究专辑

目 录

理论与方法

中国地质环境的基本特征及其对人类工程活动的制约 张倬元 刘汉超 黄润秋 (1)

论人类工程活动与地质环境的相互作用及其环境效应 王思敬 (1 9)

环境工程地质评价、预测与对策分析 王思敬 戴福初 (2 7)

大型开挖工程的地质环境效应评价

大型开挖对环境的影响研究 徐嘉谟 (3 5)

深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究 黄润秋 王贤能 唐胜传等 (5 0)

大型水体及城市开发环境效应评价

大型水域水岩相互作用及其环境效应研究 王士天 刘汉超 张倬元等 (6 9)

城市发展中的地质环境演化与控制 王兰生 孔德坊等 (9 0)

《地质灾害与环境保护》征稿启事 本刊编辑部 (1 1 0)

封面设计 江 昀 (封一)

本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》