

# 西南典型城市环境地质问题与城市规划

黄润秋<sup>1</sup> 徐则民<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 昆明理工大学土木系, 云南 昆明 650224)

**摘要:**西南地区的昆明、重庆和成都分属高原湖畔城市、沿江山区城市和平原城市,地质环境各异。20世纪80年代以来,伴随城市的发展,均不同程度地出现了与城市可持续发展密切相关的环境地质问题。昆明面临的是地面沉降和软弱地基问题,频繁的崩塌和滑坡地质灾害制约了重庆的发展与扩展,而位于川西平原地下水库上的成都的高速发展已使岷江巨型冲洪积扇地下水系统的完整性及径流交替能力受到严重破坏。环境地质问题应成为城市规划首先考虑的最基本因素,制定合理的规划方案及针对性条款是遏制地质环境恶化的有效途径。

**关键词:**西南典型城市;环境地质;可持续发展;地面沉降;斜坡灾害;地下水资源

**中图分类号:**X141 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)05-0894-13

人口的城市化水平(城市人口与总人口的比例)在一定程度上代表着人类的经济水平。1800年,世界的城市化水平只有3%,100年后达到13.6%,而到2000年,这一数字就跃升到55%。目前发达国家多已高度城市化,发展中国家的城市化进程也正处于快速发展阶段;预计到2030年,世界城市化水平将达到60%。1978年,中国只有约18%的人口居住在城市,而到2004年,城市化水平就已达35%以上;据预测,今后数十年间,城市人口将成倍增长。由大气、地表水、地下水、生物及岩土体等要素构成的广义地质环境不仅是城市的载体,而且许多情况下还会向城市提供其生存与发展所需的部分资源。城市的建设与发展会对其所处的地质环境造成扰动,而环境系统也必然会对这种扰动做出响应,以达到新的平衡。当环境系统相对脆弱或因人为扰动程度过大而使得其响应程度过于强烈时,就会产生各种环境地质问题,而这些问题一旦出现,轻则造成城市扩张成本的提高,重则造成城市发展停滞,甚至整个城市都不得不整体搬迁,严重制约城市的可持续发展进程。

一般来说,城市对地质环境的扰动程度取决于人类的技术经济条件和城市规模。20世纪中期以来,随着城市规模的不断扩大(1990年,全世界有800万人口以上的沿海特大城市8个,而到2010年就将达到20个)、财富的不断积累以及技术

条件的日益改善,城市对地质环境的扰动程度越来越大,许多城市的环境地质与可持续发展问题越来越突出,如罗马等意大利中部城市及印度得里的活动断裂与地震灾害问题<sup>[5-6]</sup>;巴西佩德罗波利斯(Petrópolis)(1940—1990的50年间遭遇1161次滑坡、崩塌及泥石流等地质灾害)、哥伦比亚马尼萨莱斯(Manizales)及中国香港等城市的滑坡灾害问题<sup>[7-9]</sup>;哥伦比亚伊瓦格(Ibagué)的泥石流及印度尼西亚约尔卡塔(Yogyakarta)的火山碎屑流问题<sup>[10-11]</sup>;意大利威尼斯、拉文纳(Ravenna)、哥斯达黎加圣约瑟(San Jose)、日本东京、大坂、泰国曼谷、印度尼西亚雅加达、美国休斯敦、墨西哥首都墨西哥城及中国上海等许多城市因过量开采地下水诱发的地面沉降问题<sup>[12-16]</sup>。此外,西班牙萨拉戈萨(Zaragoza)、法国奥尔良(Orléans)、伊朗克尔曼(Kerman)及中国唐山等城市还出现了严重的地面塌陷灾害<sup>[17-23]</sup>。

中国西南的云南、重庆及四川等省区位于青藏高原东南缘,地形地貌及地质背景复杂多样,其首府城市昆明、重庆和成都的地基结构各异,但在它们所在的省区却具有广泛代表性。20世纪80年代,特别是中国实施西部大开发以来,这些城市的人口总量及空间规模都有了迅猛发展,同时也出现了若干与城市可持续发展密切相关的环境地质问题。

收稿日期:2007-01-29;改回日期:2007-03-25

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90102002)、国家自然科学基金面上项目(40572159)、教育部城市环境与可持续研究中心项目共同资助。

作者简介:黄润秋,男,1963年生,博士,教授,博士生导师,主要从事工程地质及环境地质研究工作;E-mail: hrq@cdu.edu.cn。

# 1 西南典型城市的环境地质问题

## 1.1 昆明地质背景及主要环境地质问题

### 1.1.1 昆明地质背景

昆明地处滇中,平均海拔1891 m,三面环山,南濒滇池,为典型的高原湖畔城市。除洱海湖畔的中等城市大理外,云南境内分别建于抚仙湖、星云湖、杞麓湖及异龙湖畔的澄江、江川、通海和石屏4县的县城也属此类城市。滇池是全国第八大淡水湖,湖面呈弓型,弓背向东,南北长39.5 km,东西最宽12.5 km,湖岸线长163 km,水位标高1887.5 m时,面积298 km<sup>2</sup>,平均水深4.4 m,蓄水量15×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。昆明年均气温15℃,最热月均气温19.7℃,最冷月均气温7.5℃;年均降水量1000 mm左右,其中85%集中在5—10月。

昆明位于扬子准地台二级构造单元滇东台褶带西缘,西接川滇台背斜;基底地层为中元古界,盖层为震旦系—三叠系;印支期隆起后接受侏罗系—第四系沉积。昆明及其外围出露的地层有元古界变质岩、寒武系页岩、砂岩及灰岩、奥陶系页岩、砂岩及灰岩、志留系页岩、泥岩及砂岩、泥盆系碎屑岩及碳酸盐岩、石炭系灰岩、二叠系碎屑岩及碳酸盐岩、三叠系砂岩、页岩、煤系地层及石灰岩、侏罗系页岩、泥岩、砂岩及泥灰岩、白垩系泥岩、砂岩、古近系泥岩、砂岩、砾岩及第四系松散沉积物。尽管出露地层齐全,但由于昆明处于川滇南北向构造带内,区内断裂十分发育,造成地层空间分布混乱,地层单位之间往往呈断层接触。晚三叠世—上新世,滇池盆地所在区域为剥蚀区。中新世晚期,昆明地区被夷平,成为云南原始高原面的一部分。上新世中晚期,由于印度板块对欧亚板块的碰撞作用,青藏高原强烈抬升,致使云南主要断裂复活,沿断裂发生了不同程度的差异升降和水平位移,云南高原面发生解体,滇池盆地开始形成。中更新世—晚更新世期间,滇池湖盆达到全盛时期。作为新构造运动形成的高原断陷湖盆,滇池盆地外围以南北向构造为主的活动断裂十分发育,自1300年以来,昆明共经历有感地震80余次(图1),其中500年以来的破坏性地震就有8次,属烈度为Ⅷ度的高烈度城市<sup>[23-25]</sup>。

### 1.1.2 地面沉降问题

滇池盆地基底为下古生代界,盖层为第四系。第四系主要由滇池湖泊相构成,同时夹有部分沼泽相、冲积相和洪积相,从上到下由全新统浅绿、灰黑色细粉砂、粘土夹黑褐色炭质粘土、淤泥;上更新统灰、褐灰色砾石层夹含砾砂层,灰绿色、暗灰色粉细砂夹褐色粘土;中更新统含炭砂质粘土、褐灰色块状粘土夹硅藻土和粉砂互层和下更新统杂色粘土、炭质粘土及褐煤等组成。第四系盖层总厚度为50~800 m,越接近滇池,厚度越大,在城区的厚度一般为50~200 m。

由于昆明第四系以粉土、粘土等细粒沉积为主,贮存空间有限,地下水资源总量不大。1975年水井及人防工程采水

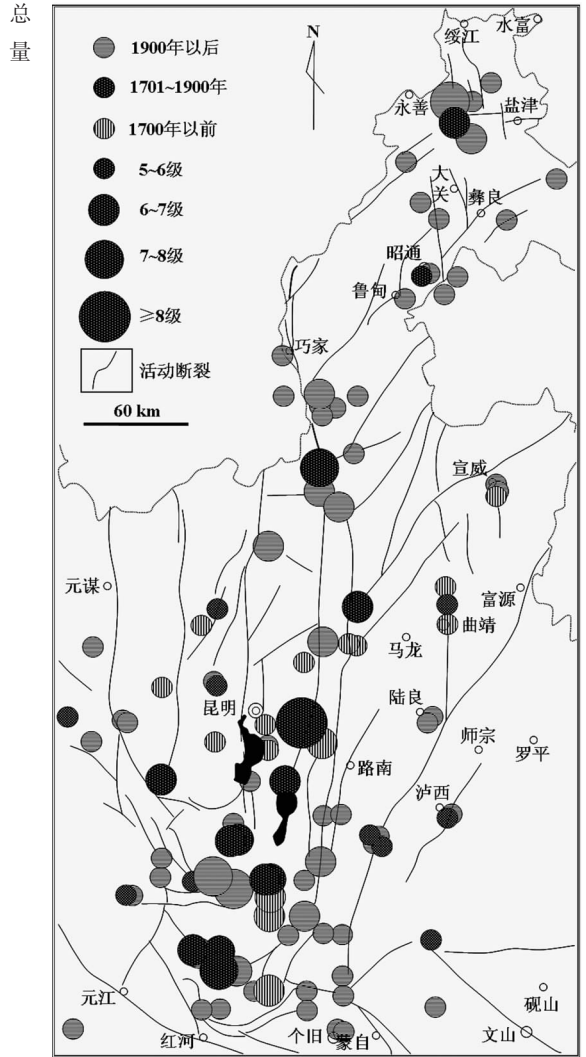


图1 昆明及其外围活动断裂及强震震中分布  
Fig.1 Distribution of active faults and epicenters of intense earthquakes in Kunming and its surrounding areas

仅为3.3×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,但到1982年,抽水井就快速增加到241眼,开采总量达16.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,已经占到当时昆明日供水量的32%。有限水资源的过度开采造成地下水位的急剧下降,市区和北教场一带水位下降10~12 m,东郊金马寺地区下降8 m,西郊梁家河地区下降6 m,南郊南坝地区下降3~5 m,马街地区下降6~11m<sup>[26]</sup>。

由于第四系相变强烈,滇池外围地下水普遍具有承压性,加之含水层以粉细砂等高空隙度、高压缩性介质为主,根据太沙基有效应力定律,抽取地下水将引起含水层骨架压缩,也即地面沉降。自1986年起,云南省地震局测量队进行了350 km城建二等水准测量,发现昆明已经发生显著的地面沉降,沉降中心位于火车站附近,1979—1986年累计最大沉

①李长生, 张宗权, 王子昆, 等. 云南省国土资源地图集, 1990.

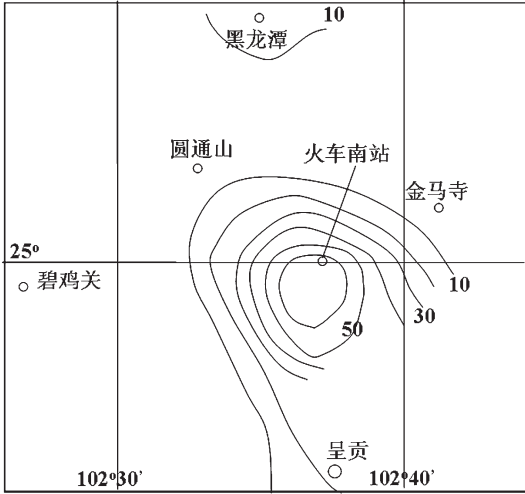


图2 昆明市地面沉降变形等值线 (mm, 1979—1986)<sup>[27]</sup>  
 Fig.2 Contours of deformation (mm) caused by ground subsidence in Kunming (1979—1986)<sup>[27]</sup>

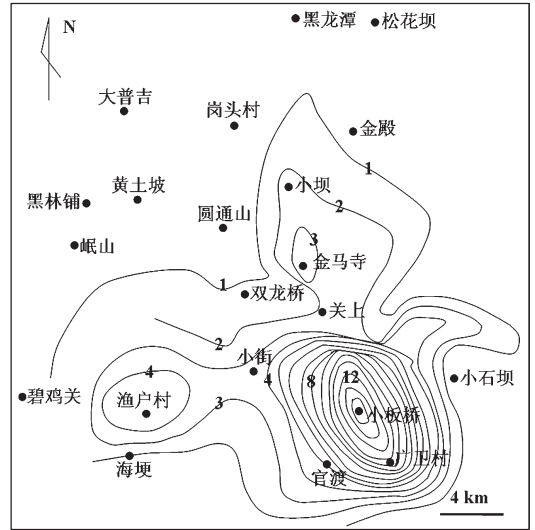


图3 昆明市地面沉降速率等值线 (mm/a, 1986—1993)<sup>[27]</sup>  
 Fig.3 Contours of ground subsidence rates (mm/a) in Kunming (1986—1993)<sup>[27]</sup>

降量达71.0 mm, 沉降速率达10.1 mm/a(图2)<sup>[27]</sup>。

上世纪80年代末,为遏制地下水位的快速下降及由此引起的地面沉降问题,昆明市对城北松华坝水库进行了大规模的改造,供水量提升到 $45 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,可满足日需水量的75%,地下水资源的过度开采得到一定控制。但是,由于管理等原因,地下水开采仍在进行,地面沉降趋势并未被完全遏制。1986—1993年,东部的地面沉降范围扩大到广卫村、官渡、小街一带,沉降中心仍在火车东站在小板桥附近,7年最大沉降量达106.2 mm,沉降速率增大到15.2 mm/a。昆明西南、海埂以北也出现了显著沉降,渔户村7年累计沉降40 mm,速率达5.7 mm/a。此外,在东部金马寺也发现了沉降中心(图3)<sup>[27,28]</sup>。

1993—1998年,昆明市的地面沉降继续加剧,东部沉降中心的最大沉降速率已增至30.3 mm/a;1993—1997西部沉降区的年累计沉降量为100.4 mm,平均沉降速率高达25.1mm/a;地面沉降面积日益扩大,原东部沉降区已和西部沉降区相连,在二环南路以南、滇池以北形成横跨昆明盆地、总面积约250 km<sup>2</sup>的近岸沉降带(图4)<sup>[27,28]</sup>。

1999年12月开工、总投资39亿元的掌鸠河跨流域调水工程将于2006年底投入运营。届时,松花坝的供水能力将提高到 $70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,可望从根本上缓解昆明市的用水紧张状况,遏制地下水过量开采和由此引起的地面沉降问题。

1.1.3 软弱地基稳定问题

如前所述,昆明市的地基土主要为高原湖泊相、沼泽相沉积,以炭质粘土、淤泥质粉土及细粉砂等为主(图5),天然含水量大、压缩系数高<sup>[28]</sup>,属于比较典型的软土地基。

由于地基软弱,昆明地区的工业与民用建筑施工中广泛采用桩基础,如有大直径(90~140 cm,最大160 cm)碎石桩、钻孔灌注桩、人工挖孔桩、深层搅拌桩及静压桩等深基础形

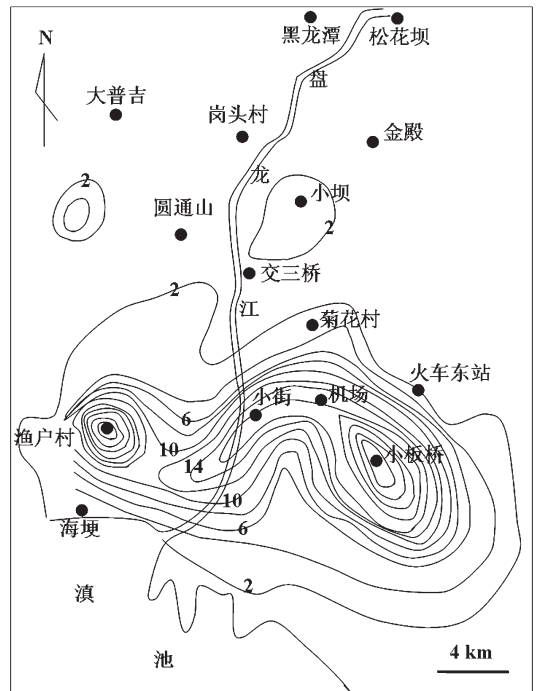


图4 昆明市地面沉降速率等值线 (mm/a, 1993—1998)<sup>[27]</sup>  
 Fig.4 Contours of ground subsidence rates (mm/a) in Kunming (1993—1998)<sup>[27]</sup>

式(图6)。与天然地基及浅基础相比,桩基础不仅增大了建筑成本,而且由于地质条件的复杂性,相同的处置方式在不同地段可能产生不同的处置效果,增加了地基稳定问题的不确定性。昆明永昌小区四村采用深搅桩处理的53幢住宅,最大



图5 昆明地区典型地基土

Fig.5 Typical ground soils in the Kunming area

沉降达572.2 mm,并已影响使用;云南省农牧渔业厅13层牧工商大楼,采用振冲法处理泥炭质土,1987年8月1日,箱基顶板浇筑时开始沉降观测,至1988年6月29日13层主体结构断水,平均沉降就达256 mm,沉降速率0.611 mm/d<sup>[29]</sup>。

随着锚喷技术的日益完善,土钉已经成为城市基坑支护的主要手段。但与中国其他地区不同的是,昆明广泛采用的不是常规灌浆土钉墙,而是喷射灌浆土钉墙。这是一种含有钢管核的注浆土体(钢管土钉),钉体直径30~40 cm。该方法是振动撞击驱动与高压注浆技术的组合,含有预制孔、底端封闭的钢花管被打入土体后注浆,浆体通过花管上的孔洞渗透到土体中,形成复合土钉。由于软土的工程地质特性很差,土钉与土体间的一体化程度往往不高,基坑边墙失稳事故时有发生,已成为昆明地区基坑支护实践中需要解决的重要问题。

某住宅楼工程位于昆明市中心区,基坑开挖深度约12 m,开挖土层为湖相杂色粘土,采用钢管土钉墙支护;钢管长度5~



图6 昆明地区常用的桩基形式

Fig.6 Pile types adopted in the Kunming area

12 m。2004年9月26日凌晨,一侧基坑边墙发生滑坡,造成旁边2栋住宅楼基础悬空,致使72户居民(200余人)全部搬出(图7)。滑体方量近2000 m<sup>3</sup>,滑体前缘位移10~15 m,除部分土钉仍固定在滑床外,大部分都被拔出。尽管事后及时采取了用砂土回填的方法以遏制楼房基础的继续变形,但终因变形过大而致使2栋楼房被彻底拆除,造成了严重的经济损失。

昆明某训练基地基坑净开挖深度6.3 m,从上至下揭露的土层分别为杂填土、褐灰色粉质粘土、灰黑、深灰色粘土、灰兰色粉质粘土和深灰色圆砾。采用钢管土钉墙支护,土钉密度为行×列=1.2 m×1.5 m,自上而下土钉长度分别为9 m、9 m、6 m和2 m。钢管壁厚3 mm、外径48 mm,管体设有射浆孔和三角形角钢护孔倒刺。采用潜孔锤击人后注浆的方法施工;外挂钢筋网并喷射10 cm厚混凝土;按土钉行间距分层开挖分层支护。2002年1月29日,一侧坑壁失稳,产生向坑内水平推移,最大推移距离近2 m,地面张裂缝最宽达到1.3 m,后壁距原坑壁距离最远处为5 m,失稳块体垂直坐落高度为0.95 m<sup>[30]</sup>。尽管该基坑边坡失稳可能存在土钉长度过短及施工方法不当等原因,但最主要的应该与加固土层的软弱工程地质特性有关,因为它们都呈饱和、可塑—软塑状态并具有中—高压缩



图7 某基坑边坡失稳事故

Fig.7 Slope failure of a foundation pit in Kunming

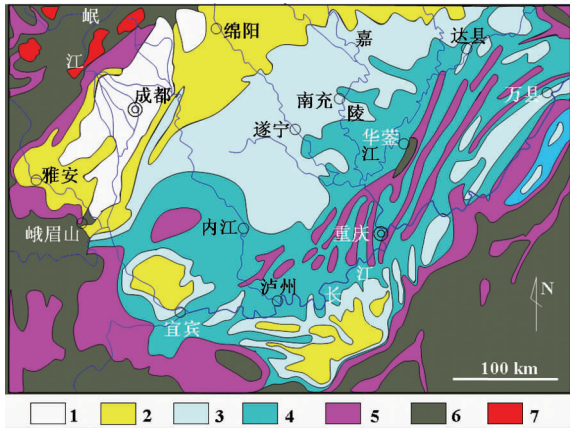


图8 四川盆地地质略图

1—第四系;2—白垩统;3—上侏罗统;4—中下侏罗系;  
5—三叠系;6—前三叠系并层;7—岩浆岩

Fig.8 Geological sketch map of the Sichuan basin

1—Quaternary;2—Cretaceous;3—Upper Jurassic;

4—Middle-Lower Jurassic;5—Pre-Triassic incorporated bed;

6—Paleozoic;7—Magmatic rocks

性,难于向钢管灌浆后形成的复合腱体提供足够的嵌合力。

除了上述工程外,昆明市红十字会住院部大楼基坑边坡、白龙寺砖场取土场边坡及某小区住宅楼基坑边坡等都曾发生严重的变形破坏,基坑边坡失稳已经成为昆明地区土木工程施工中的常见问题。

综上所述,昆明位于滇池断陷盆地北部,属于典型的高原湖畔型城市。昆明外围活动断裂发育,地壳稳定差,是烈度为Ⅷ度的高烈度城市。滇池盆地具有早古生代地层基底+第四系盖层的二元结构,土木工程建设涉及的主要是第四系。

第四系主要由滇池湖泊相沉积构成,同时夹有部分沼泽相和河流相,岩性以富含有机质的粘土、粉土及粉砂等细粒沉积为主;这些土层的贮水能力差,地下水资料量有限,以往对地下水的过量抽取已经造成大范围地面沉降,今后应严格控制地下水采集。第四系中的粘土、粉土及粉砂等土层一般处于湿—饱和状态,压缩性高、抗剪强度及承载力低,大多数建筑工程都需采用桩基础,增大了城市建设与扩张的成本,同时还经常发生基坑边坡失稳事故。湖积软土边坡支护,特别是钢管土钉与软土之间的相互作用及其对土体的加固效应,是今后需要深入研究的重要问题。

### 1.2 重庆地质背景及环境地质问题

#### 1.2.1 重庆地质背景

重庆地处四川盆地东南缘,嘉陵江与长江的汇合处,市区地面最高和最低海拔分别为280 m和160 m,平均200 m左右;夏季平均气温27~29℃,年降雨量1000~1400 mm,年相对湿度81%,属于典型的温湿气候区。构造上,重庆位于扬子地台四川凹陷的东南缘,中生代红层构成的北东向巨型帚状浮褶带(detachment folds)南西端(图8)。

重庆市位于中梁山背斜和南温泉背斜构成的近南北向低山之间的深丘区,区内构造为宽缓的江北(复)向斜;岩层产状平缓,倾角10~20°。出露的主要地层为侏罗系中统沙溪庙组紫红色泥岩、砂质泥岩和紫红色、灰黄色长石砂岩。城区外围出露有侏罗系中统遂宁组长石石英砂岩及紫红色泥岩;侏罗系中下统自流井组页岩、粉砂岩和砂岩;三叠系中统雷口坡组和下统嘉陵江组碳酸盐岩、泥灰岩及三叠系下统飞仙关组红色页岩及灰岩等。除背斜轴部发育有断层外,向斜区断裂构造不发育。

#### 1.2.2 重庆的斜坡灾害问题

由于长江、嘉陵江及其支流的长期侵蚀,重庆市地形起伏高差大,形态各异的斜坡是其主要地貌单元,属于典型的山区沿江城市(四川盆地内的类似城市还有万县及泸州等)。斜坡夷平及地貌重塑是地球表面演化的必然过程,山城重庆本身就具有遭受斜坡灾害(滑坡及崩塌)的潜在危险。构成重庆市各类土木工程地基的沙溪庙组主体为砂泥岩互层,而砂岩下的泥岩,特别是两者的接触带,是滑坡灾害中最为常见的滑动带,加之该组地层有10~20°的倾角,属于典型的易滑地层,因此,重庆市发生斜坡灾害的倾向性是很高的。四川盆地东部的帚状浮褶带形成于中生代中期,始新世晚期印度与欧亚板块的缝合与碰撞在激活龙门山逆冲断层带的同时,也使此前一直作为稳定地块、内部变形较小的四川盆地再次经受挤压。经过两次大规模变形,在中生代红层中形成了大量以不同岩性层位之间的层间虚脱和层内构造裂隙为代表的中尺度构造行迹。这些构造行迹为降水渗入岩体、泥岩软化及(潜在)滑面的形成与演化提供了重要条件。气候温湿、降雨量大、降雨集中(6—8月占71%,最大日降雨量193 mm)是重庆的重要气候特征;充沛的降雨不仅是斜坡演化的重要外部条件,也是斜坡灾害事件最常见的激发因素<sup>[31,32]</sup>。由于沉积岩体整体性

差,加之气候温暖潮湿,重庆市区的物理-化学耦合风化及岩质斜坡的渐进性夷平是强烈的,基岩之上往往覆盖有较厚的腐岩、强风化层或残坡层,为松散层滑坡提供了物源条件。此外,一般来说,岩层的产状越平缓,越容易形成陡峭的斜坡,甚至是直立陡坎,重庆市区岩层的低倾角使得陡坡(坎)十分发育。砂泥岩互层中的泥岩在温湿气候区的风化裂解是十分强烈的,相比之下砂岩层的风化过程则要缓慢得多,这样就易于在砂岩层之下形成凹腔。由于砂岩中的构造裂隙,尤其是X剪节理发育,砂岩块体就容易以崩塌的方式失稳。上述各类条件的有机结合使得重庆成为地质环境脆弱、斜坡灾害频繁的城市,而随着城市建设规模及与此相关的对地质环境扰动程度的不断加大,这一问题将更加突出。

截至1998年,重庆市区各类斜坡灾害点达777处,其中滑坡503处,崩塌89处,危岩体185处;主城区沿江地带斜坡灾害密度为1处/km<sup>2</sup>,而受两江同时侵蚀的渝中区的灾害密度更高达5处/km<sup>2</sup><sup>[33-38]</sup>。滑坡主要分布在160~300 m,嘉陵江沿岸的忠恕沱、李子坝、镇江寺,长江沿岸的重钢、菜园坝及海棠溪等地都是滑坡灾害的高发区域。根据介质类型,滑坡可分为基岩滑坡和半岩质-松散层滑坡。基岩滑坡数量少,但规模相对较大,总方量占滑坡总量的76%。基岩滑坡的滑动面一般都发育于砂岩、泥岩的界面附近,滑面倾角10~40°,但也有部分滑坡的滑面倾角很低,只有5°左右,甚至近水平。该类低倾角滑坡的发生主要与泥岩遇水时的强润滑作用有关。松散层滑坡规模虽小,但数量多;根据滑体物质组成可分为残坡积层(含强风化层)滑坡及崩塌堆积层滑坡等;江水涨落及降雨是此类滑坡的主要激发因素。区内崩塌主要分布于嘉陵江沿岸的浮图关、沧白路和长江沿岸的九渡口、燕子崖、雷家坡等区域。崩塌高发区砂泥岩互层形成陡坎,砂岩中的密集节理和泥岩超前剥蚀形成的空腔为崩塌的发生创造了有利条件。

重庆市区的崩塌、滑坡方量一般都在10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>以内,大多数为小于1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>的小型斜坡灾害,但其分布密度大、发生几率高,因此,即使单从数量上看,其危害也是巨大的。据统计,仅1985—1990年市区发生的数百处(次)崩滑事件就损坏建筑100余幢,死亡65人,中断铁路行车37次,累计中断行车200 h,淤塞城市公路的土石方总量达88×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,直接损失上亿元<sup>[39]</sup>。不仅如此,重庆市区单位体积崩滑岩土体(可能)造成的(潜在)经济社会损失要远大于一般的崩滑灾害。陆地表面的任何既有斜坡都有逐渐变低,并被最终夷平的趋势,这是沉积岩,乃至岩石圈,形成演化的自然循环中不可或缺的重要环节。崩塌与滑坡作为斜坡夷平的特定方式,本是一种自然过程,只有当其威胁、影响到人类的生活或生产活动时,才成为灾害;滑坡方量再大,只有其发生于无人或没有工程设施的地区,也只能被视为一种自然过程,而不算灾害。因此,评价斜坡灾害的危害程度时,既要看到单体的方量及灾害点总数,还要看到其(可能)造成的经济及社会损失的规模。2001年5月1日,位于乌江岸边的重庆市武隆县城319国道路基边坡失稳,方量仅1.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>的崩滑体就将一幢9层住宅楼完全摧毁,

造成79人死亡,国道中断4昼夜的重大损失。2003年,重庆市区人口已达618万,人口密度很大,城市建设用地十分紧张。同时,重庆市区内的工矿企业密集,单位面积上的社会经济载重量庞大<sup>[40]</sup>,一旦遭遇斜坡灾害,损失将是严重的。

综上所述,重庆市区位于四川盆地东南边缘,长江、嘉陵江汇合部位。受到两江及其支流的侵蚀,区内地形起伏强烈,是典型的沿江山区城市。城区位于中生代红层构成的北东向巨型帚状褶皱带南西端,挟持于中梁山和南温泉线状背斜之间的宽缓复向斜上;构成向斜的侏罗系沙溪庙组砂泥岩互层具有10~20°倾角。普遍的斜坡地貌、剖面上软硬相间的红层及其10~20°的倾角决定了重庆市区发生斜坡灾害的高倾向性。由于经历中生代中期和始新世晚期两次大规模构造运动,沙溪庙红层内层间虚脱及层内构造裂隙等中尺度构造行迹发育,为降水渗入,促进斜坡演化及失稳创造了有利条件,而温湿的气候、集中性的高强度降雨不仅可以加快斜坡演化进

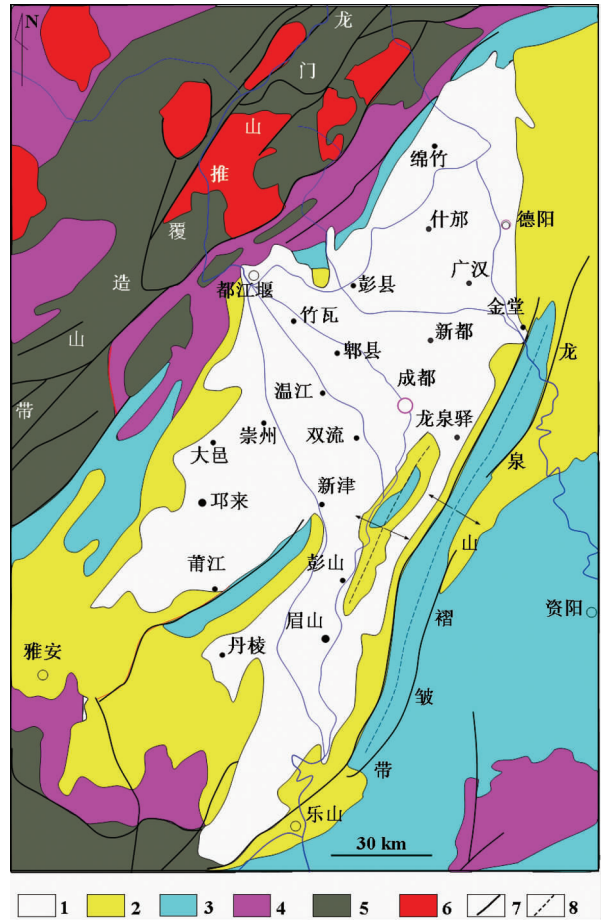


图 9 成都及其外围地质略图

- 1—第四系; 2—白垩系; 3—侏罗系; 4—三叠系;
- 5—前三叠系并层; 6—岩浆岩; 7—断层; 8—褶皱轴

Fig.9 Geological sketch map of Chengde and its peripheries  
1-Quaternary; 2-Cretaceous; 3-Jurassic; 4-Triassic; 5-Pre-Triassic incorporated bed; 6-Magmatic rocks; 7-Fault; 8-Fold axis

程,也使其发生灾害性集中失稳成为可能。这些条件在同一空间区域的有机结合使得重庆成为地质环境脆弱、斜坡灾害频繁的城市。重庆市区的崩滑灾害点密度高达1处/km<sup>2</sup>,滑坡主要分布在160~300 m高程的沿江斜坡区;崩塌主要分布于嘉陵江沿岸的浮图关、沧白路和长江沿岸的九渡口及雷家坡等区域。尽管重庆市区的崩塌、滑坡方量不大,但由于其分布密度大、发生几率高,特别是区内人口密度大、工矿企业密集,单位面积上的社会经济载荷量庞大,崩滑灾害的危险性极大,是制约重庆市区可持续发展的重大问题。

### 1.3 成都市地质背景及环境地质问题

#### 1.3.1 成都市地质背景

尽管与重庆一样,成都也是四川盆地内的特大城市,但却具有完全不同的地质地理环境(图9~10)。成都位于四川盆地西部,川西平原东部,东邻龙泉山,是典型的平原型城市(临近的类似城市还有都江堰及德阳等)。区内地形平坦,北西高、南东低,平均海拔506 m;岷江支流府河从市区通过;年均气温16℃、最高气温30℃,年降雨量920 mm(1961—1990),主要集中在6—9月,年均相对湿度80%。中生代中期,在龙门山推覆造山带与龙泉山之间形成了一个由白垩系、侏罗系及三叠系组成的北东向宽缓向斜;第四纪以来,该向斜被厚度不一、范围广大的岷江冲洪积扇所覆盖,成都就位于该扇的末端(图10)。成都外围出露有龙门山、蒲江—新津和龙泉山等活动性断裂带,地震烈度为Ⅵ度。市区范围内的地层结构简单,而且空间变化不大,表层为1~3 m厚的黄灰色粉质粘土及填土,中间为厚10~20 m的褐黄色卵石土,同时含有少量粘土、粉质粘土及粉土透镜体,底部为白垩系(灌口组)浅紫红色中—厚层泥岩。由于卵石土的承载力较高(标准值一般为700~1200 kPa),成都市的大部分建筑都以该层土体为持力层。总体上看,成都市的地质地理环境是比较优越的,但随着城市规模的日益扩大,也出现了一些(潜在的)环境地质问题,其中比较突出的是水资源问题。

#### 1.3.2 地下水资源问题

成都市地下水的含水介质为中晚更新世—全新世砂砾卵石层,所赋存的主要是孔隙潜水,是岷江冲洪积扇(或称川

西平原)地下水系统的一部分(图10);该系统含水层的厚度一般为15 m,最厚35 m,扇顶部含水层埋深10 m,中下部为2.5 m左右,局部1 m左右。地下水补给充足,来源包括岷江河口(北西)方向地下水的侧向径流补给、农灌及纵横交错的渠系渗漏和部分降水补给;以泄流方式向河流排泄是地下水最主要的排泄途径。市区范围内含水层渗透性强,渗透系数15~40 m/d,厚度一般为15~25 m,埋深3.0~5.0 m,水位年际变幅1.0~3.0 m<sup>[41,42]</sup>。

川西平原第四系含水层中的地下水天然资源达34.73×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,可开采资源25.90×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,贮存量96.91×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,是中国少见的巨型天然地下水库<sup>[43]</sup>。由于总量巨大,加之含水层基本不承压,抽取地下水不会引起(明显的)地面沉降,因而具有重大的利用价值,在平原区自身的水资源调蓄中(枯水期开采地下水,丰水期通过渠系渗漏、大气降水,甚至人工回灌等途径补给)具有重要的作用。这种调蓄在都江堰以上的岷江流域生态环境逐年恶化、水能资源开发密度日益加大,来水量逐年减小的情况下具有重大的潜在意义。不仅如此,龙泉山以东的川中红层丘陵区(图8~9)干旱频繁,缺水严重,将都江堰来水(部分)东调川中,川西平原开发利用地下水(丰水期利用地表水人工回灌,加大补给)的“西水东调”计划尽管目前尚未实施,但却具有技术上的可行性<sup>[41,43]</sup>,尤其是在水资源日益紧张的情况下。川西平原地下水不仅对川西平原自身的水循环是重要的,而且对缓解川中地区的水资源紧张局面也具有重要的潜在价值。

由于优越的地质地理环境,自古以来,川西平原就是四川最主要的人口聚集区。20世纪80年代以来,随着城市(镇)化水平的不断提高,平原内的所有城市(镇)都在快速发展,而且基本都制定了面向2020年的雄心勃勃的扩张计划。城市的深度发展与空间范围扩张对川西平原地下水资源构成了严重威胁,其中以大城市成都最为严重。

成都市城市结构对地下水的影响首先表现在对含水层补给的影响方面。如前所述,川西平原地下水主要接受渠系渗漏、灌溉水及大气降水补给,而在含水层之上修建城市结构后,由于各类建筑及道路都是绝对隔水的,灌溉水和渠系

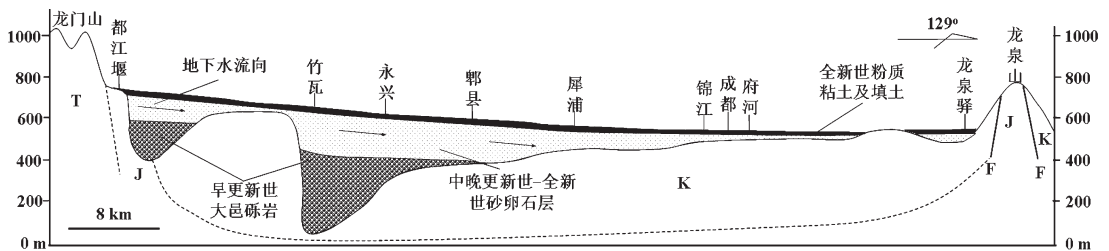


图10 岷江巨型冲洪积扇示意剖面(据参考文献[40]修改)

T—三叠系; J—侏罗系; K—白垩系; F—断层

Fig.10 Diagrammatic section of a giant diluvial-alluvial fan of the Minjiang River (modified from [40])

T—Triassic; J—Jurassic; K—Cretaceous; F—fault

补给消失的同时,降水补给也基本被切断<sup>[44]</sup>。近年来,部分人行道道面被改为多孔状结构并增加了城市绿地面积,但由于总量有限,对含水层的补给作用有限。从原理上看,垂向补给被切断后,地下水可以通过侧向径流获得远距离补给,但当城市对含水层的覆盖范围过大时,这种补给将是微弱的。在此条件下,地下水长期演化的结果是在城市以下形成一个径流交替滞缓的局部水流系统,该系统的水位一旦下降就很难恢复。解放初期,成都市市区面积只有 16 km<sup>2</sup><sup>[45]</sup>,此时城市对地下水的影响基本可以忽略,而到 2004 年市区面积就已超过 280 km<sup>2</sup>。由于远离侧向补给边界,市区范围内地下水的调蓄功能已基本丧失。

城市结构切断垂向补给后,地下水还可以通过侧向径流获得缓慢补给,起码还可维持含水层的存在,而成都市(高层)建筑物基础及部分地下工程对地下水系统的破坏则是致命的,不可恢复的。这些工程施工之前,首先要进行大规模基坑降水,然后挖除表层土体和作为储水介质的砂卵石层,然后进行基础浇注。某一建筑物基础的修建会造成含水层规模的绝对减小,而一定范围内所有建筑地下室的综合效应不仅包括含水空间的减少,更包括对地下水系统性及径流交替能力的严重破坏(图 11)。

20 世纪 90 年代以来,随着成都市的快速发展和建设用地的日益紧张,10 层以上的高层建筑已经成为城市建设的主体。这些高层建筑多数都采用可作为地下室的箱形基础,基础埋置深度一般都在 7 m 以上,有的则在 10 m 以上,甚至完全切穿第四系而坐在白垩系泥岩上<sup>[46]</sup>。位于盐市口的海外交流中心大厦,由两幢 37 层塔楼和裙房组成,设置地下室 3 层,基础埋置深度 15.10 m,侵入含水层约 11 m,侵占含水层厚度的 73%<sup>[47]</sup>。位于通锦路口的通锦大厦地上 15 层,地下室 2 层,基础最大埋置深度 11.76 m,侵入含水层 9 m<sup>[48]</sup>。成都科技中心位于市体育中心附近,地上 32 层,地下 2 层,局部 3 层;基础埋置深度 13.5 m,土层和含水层厚度分别为 5.5 m 和 17.5 m,地下室侵占含水层 8 m,占 46%<sup>[49]</sup>。成都王府井商城由 3 座 23~46 层的主楼及 7 层裙房组成,最大楼高 162 m,地面以上 43 层,地下 3 层,基坑开挖深度 18 m,侵入含水层 13 m<sup>[50]</sup>。与一般工业与民用建筑基础对含水层的片状侵占相比,人防等地下工程对含水层的线状侵占具有更大的破坏作用。1992 年竣工的长 1269 m、宽 19~31 m、埋置深度 7.3~12.5 m 的顺城街人防工程,侵入含水层 5~10 m,犹如一座横卧在地下水流中的大坝,使过水断面大幅减小,个别部位则被完全切断<sup>[44]</sup>,地下水天然径流受到严重影响。拟建的成都地铁一期工程北起红花堰,经天府广场、火车南站至世纪广场,全长 14.975 km,设有 14 座地下车站。地铁隧道呈南北走向,与市区地下水流向大多正交、部分地段大角度斜交。由于主体结构基本都埋藏于含水层中,地铁隧道在侵占大量含水空间(图 12,其中 14 座车站范围内的过水断面平均减小 53%,13 段区间隧道平均减小 38%)的同时,地下水径流格局也将受到显著影响。

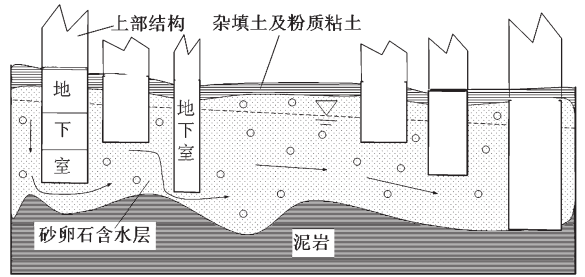


图 11 成都市高层建筑基础对含水层的侵占示意图  
Fig.11 Diagram showing the invasion of an aquifer by the foundation of a high building in Chengdu City

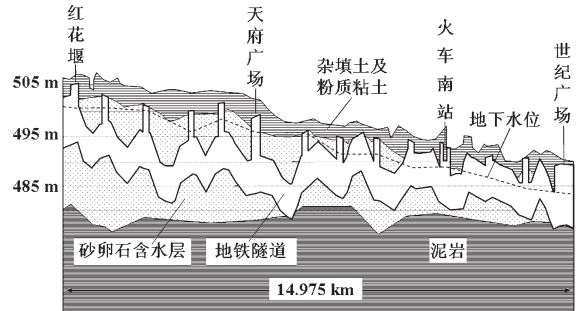


图 12 成都地铁一期工程简化剖面  
Fig.12 Simplified section of the first-phase project of the Chengdu subway

综上所述,成都市区位于川西平原东部,是典型的平原型城市。地震烈度为 VI 度,具有杂填土及粉质粘土+卵石土+泥岩的三元地基结构;卵石土的承载力较高,是大部分建筑的持力层,成都市的地质地理环境是比较优越的。但是,随着城市规模的日益扩大,成都市的地下水环境已被显著恶化。岷江冲积扇是成都市的载体,扇体内丰富的地下水资源不仅对于川西平原自身的水资源调蓄具有重要作用,而且对缓解川中地区水资源紧张也具有重要的潜在价值。但是,成都市的快速发展已经对该地下水系统产生显著的破坏作用。川西平原地下水主要接受渠系渗漏、灌溉水及降水补给,而隔水的各类建筑及道路等将补给源基本切断。由于远离侧向补给边界,市区范围内地下水的调蓄功能已基本丧失。高层建筑基础及部分地下工程的修建不仅造成含水空间的减少,而且严重破坏了地下水的系统性和径流交替能力。成都市区范围内地下水资源总量的减少及径流交替能力的衰减对成都市今后的规划与发展具有重要借鉴意义。

## 2 环境水文地质问题与城市规划

城市都是按着不同时期制定的不同时限的规划方案实



行阶段性发展的。新计划的制定不仅应考虑城市发展的未来需求,更应该对前一个或前几个计划执行中存在的问题进行系统总结,以实现可持续发展。20世纪80年代以来,昆明、重庆及成都3个西南地区的典型城市都经历了高速发展时期,也出现了许多制约城市发展的(潜在)问题,其中最基本、最重大的应该是环境地质问题。但应该说,本世纪初各城市制定的面向2020年的发展规划这一重大问题并没有给予足够的重视,其中以昆明和成都最为突出。

(1)平面扩张规模过快、过大是二城市规划的普遍特点,这种做法不仅会使既有环境地质问题进一步恶化,还会加速潜在环境地质问题的显现进程。

截止2003年,昆明主城区面积180 km<sup>2</sup>,根据昆明2002—2020年的发展规划<sup>[51]</sup>,除主城区面积增加到220 km<sup>2</sup>外,还要另辟东城(今呈贡县)、南城(今晋城镇、新街乡及马金铺乡)和西城(今海口镇、古城镇及晋宁县)(图13),规划的现代新昆明的总面积将达到460 km<sup>2</sup>,人口总数将增加187万,达到450万。根据现代新昆明的发展规划,在今后10余年内,滇池外围

被第四系湖相沉积覆盖的几乎所有平缓地带将被城市所占据(图13),而且呈贡县的大面积山地斜坡区域也被纳入发展区域。应该说,这种“包围式”的沿湖发展战略对昆明的可持续发展是十分不利的。滇池外围第四系中的地下水主要接受降水补给,规划区内修建隔水的建筑及道路等城市结构后,地下水的补给将被切断,地下水位必将缓慢回落;随着城市人口的增加,完全禁止地下水开采也是不现实的,而这种开采很可能会引起既有沉降区的进一步扩大,甚至诱发新的沉降漏斗。更重要的是,新规划的实施将进一步恶化滇池的补给条件,造成其水量循环及自净能力的进一步衰退。天然条件下,滇池接受外围山区河流补给、沿湖第四系中地下水的侧向补给及湖面范围内降水的垂向补给。20世纪80年代以来,随着滇池流域人口的不断增加,用水日益紧张。截止2003年,流域内已建大型水库1座,中型水库7座,小(1)型水库34座、小(2)型水库80座、坝塘733座<sup>[52,53]</sup>,滇池外围山区的大小地表水体可谓星罗棋布(图13),对地表径流的拦截已经到了空前的程度,可以补给滇池的地表水量已十分有限(这种对流域水资源无序开发造成的滇池来水量过小是滇池污染长期治理但不见成效的重要原因之一)。沿湖第四系中的地下水在雨季接受降水补给,旱季向湖泊排泄,在滇池水循环中具有重要作用,而新城区的修建将严重威胁,甚至切断,滇池这一宝贵的补给来源。可以预见,随着时间的加长,只能接受自身范围内的降水补给的滇池,在其出水口海口镇(图13)无水可排,水位越来越低,水质越来越差,变成真正意义上的污水池是完全可能的。

根据成都市2003—2020总体规划,中心城用地规模将由283 km<sup>2</sup>增加到400 km<sup>2</sup>,而新都、青白江、龙泉驿、华阳、温江及郫县等7个周边组的用地规模也将由177 km<sup>2</sup>增加到380 km<sup>2</sup>。尽管中心城规划在一定程度上考虑了市区地下水位连年下降,应向东南发展的思想,但平面,尤其是向西北方向,扩张的幅度依然是很大的。如果绕城高速公路以内全部城市化,再加上郫县等7个县城及城镇自身的扩张,形成所谓总面积达3681 km<sup>2</sup>的统一都市区,对川西平原地下水系统(该系统的分布面积只有6000~8000 km<sup>2[41,43]</sup>)的破坏将是严重的。即使成都中心城与卫星城镇之间存在缓冲区,但如果范围过小,地下水的系统性及径流交替能力也将受到严重破坏。而地下水系统的整体性一旦受到破坏(尤其是建筑基础对含水层的侵占),是很难恢复的。

(2)没有针对城市存在的环境地质问题制定针对性的规划细则。

目前,昆明、重庆及成都3城市普遍存在地基承载力没有用足的现象,主城区还内存在大量10层以下的所谓“城市平房”,甚至建筑高度只有3~4层的城中村。城市规划应该首先考虑老城综合容量的有效利用与挖潜,而不应该仅仅立足于平面扩张。适度发展高层建筑,充分利用地基承载力,不仅可以遏制昆明、成都等城市下伏含水层被快速覆盖的趋势,而且可以节约珍贵的土地资源。发展高层、禁止低层建筑,将会



图13 昆明2002—2020总体规划示意图  
(据参考文献[51],略有修改)

1—现有城区(镇);2—待开发区;3—坝塘、水库

Fig.13 Schematic map showing the general planning of Kunming City from 2002 to 2020 (modified from [51])

1—Existing city and town; 2—Area that is to be developed; 3—Dam, pond and reservoir

增大城市建设与发展成本,但这可以有效遏止大城市人口的快速膨胀,促使非农业人口向中小城市及城镇合理转移。现在,西南地区的城市建设用地还没有东部沿海地区及珠三角地区紧张,但近20年来城市人口的快速膨胀走势及深圳等城市已经开始拆除15层高的建筑群应该引起人们的足够重视。

为保护川西平原地下水系统,成都及其卫星城镇应该限制或禁止使用常被改造为地下室的箱形基础。由于成都地区粉质粘土下的砂卵石层具有较高的承载力,建议采用浅基础;对于超高层建筑,可以采用碎石桩,个别情况下还可以使用混凝土桩,对天然地基进行加固,避免含水层被地下结构侵占的现象。

### 3 结语

(1)西南地区的昆明、重庆和成都分属高原湖畔城市、沿江山区城市和平原城市,地质环境各异,但在它们所在的地区却具有广泛代表性。昆明位于滇池断陷湖泊北岸,外围活动断裂发育,属于地震烈度为Ⅷ度的高烈度城市。昆明具有下古生界基底+第四系盖层的二元地基结构,工程建设主要涉及滇池湖泊相第四系。重庆市位于四川盆地东南边缘,长江、嘉陵江汇合部位,地形起伏强烈。城区位于中生代红层构成的巨型帚状褶皱带的南西端,夹持于中梁山和南温泉线状背斜之间的侏罗系砂泥岩宽缓复向斜上。城市建设主要涉及侏罗系红层及其残坡积物。成都市位于川西平原东部,具有填土及粉质粘土+卵石土+泥岩的三元地基结构,卵石土是大部分建筑物的持力层。

(2)20世纪80年代以来,随着3个城市的快速发展,均出现了若干与可持续发展密切相关的环境地质问题。作为昆明建筑物地基的湖泊相第四系主要由富含有机质的粘土、粉土及粉砂等细粒沉积组成,贮水能力很差,地下水资源量不大,以往对地下水的过量抽取曾造成大范围地面沉降。同时,第四系土层含水量高,易于压缩性、抗剪强度及承载力低,属典型的软弱地基,大多数建筑工程都需采用桩基础,增大了城市建设与扩展的成本,同时还经常发生基坑边坡失稳事故。温湿的气候、集中性的高强度降雨、普遍的斜坡地貌、剖面上软硬相间的红层及其发育的中尺度构造行迹和10~20°的倾角使重庆成为地质环境脆弱、斜坡灾害频繁的城市。尽管重庆市区的崩塌、滑坡方量不大,但由于其分布密度大,发生几率高,人口密度大、工矿企业密集,崩滑灾害的危险性极大,是制约重庆市区可持续发展的重大问题。岷江冲洪积扇是成都市的载体,扇内丰富的地下水不仅对川西平原自身的水资源调蓄具有重要的价值,而且对缓解川中地区水资源紧张也具有重要的潜在价值。但是,成都市的快速发展已经对地下水系统产生显著的破坏作用。隔水的各类城市结构已将地下水的主要补给源切断,市区范围内的地下水位连年下降,调蓄功能已基本丧失。高层建筑基础及部分地下工程的修建不仅造成含水空间减少,而且使地下水系统性及径流交替能力遭

到严重破坏。

(3)环境地质问题应该是城市规划中需要优先考虑的最基本问题,但三城市的面向2020年的发展规划对这一重大问题并没有给予足够的重视,其中以昆明和成都最为突出。现行规划中存在的共同问题是平面扩张规模过快、过大,这将既有环境地质问题恶化,加速潜在环境地质问题的显现进程。

(4)城市规划可针对具体的环境地质问题,通过地方性法规来规范城市建设,遏制地质环境的进一步恶化。充分利用地基承载力,适度发展高层建筑,可有效控制城市的平面扩张速度,保护含水层。位于川西平原地下水库上的成都则可以充分利用砂卵石层的高承载力特性,采用浅基础及(碎石)桩基础,禁止箱形基础,避免含水层被地下结构侵占。

### 参考文献(References):

- [1] 王前福,王艳.世界城市化研究[J].西北人口,2002,(2):60-62  
Wang Qianfu, Wang Yan. Study on urbanization in the world[J]. Northwest Population Journal, 2002,(2):60-62 (in Chinese with English abstract).
- [2] Stephen Faulkner. Urbanization impacts on the structure and function of forested wetlands[J]. Urban Ecosystems, 2004, 7(2): 89-106.
- [3] 白先春,凌亢,郭存芝,等.中国城市化:水平测算与国际比较[J].城市问题,2004,(2):23-26.  
Bai Xianchun, Ling Kang, Guo Cunzhi, et al. The level measure and the international comparison of urbanization in China[J]. Urban Problems, 2004, (2):23-26(in Chinese with English abstract).
- [4] Robert J N. Coastal megacities and climate change [J]. GeoJournal, 1995, 37(3):369-379.
- [5] Galadini F, Galli P. Active tectonics in the Central Apennines (Italy) - input data for seismic hazard assessment[J]. Natural Hazards, 2000, 22(3):225-268.
- [6] Imtiyaz A P, Vaccari F, Panza G F. Site-specific microzonation study in Delhi Metropolitan City by 2-D modelling of SH and P-SV Waves[J]. Pure and Applied Geophysics, 2004, 161(5/6):1165-1184.
- [7] Antonio Guerra. Catastrophic events in petrópolis city (Rio de Janeiro state), between 1940 and 1990 [J]. GeoJournal, 1995, 37(3): 349-354.
- [8] Anne-Catherine Chardon. A geographic approach of the global vulnerability in urban area: case of Manizales, Colombian Andes[J]. GeoJournal, 1999, 49(2):197-212.
- [9] Wyss W. -S. Yim. Vulnerability and adaptation of Hong Kong to hazards under climatic change conditions [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1996, 92(1/2):181-190.
- [10] Jean-Claude Thouret, Christophe Laforge. Hazard appraisal and hazard-zone mapping of flooding and debris flowage in the Rio Combeima valley and Ibagué city, Tolima Department, Colombia [J]. GeoJournal, 1994, 34(4):407-413.

- [11] Franck Lavigne. Lahar hazard micro-zonation and risk assessment in Yogyakarta city, Indonesia[J]. *GeoJournal*, 1999, 49(2):173-183.
- [12] Thomas L H, Johnson A I. Land subsidence caused by ground water withdrawal in urban areas[J]. *GeoJournal*, 1985, 11(3):245-255.
- [13] Hasanuddin Z. Abidin, Rochman Djaja & Dudy Darmawan et al. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodetic monitoring system[J]. *Natural Hazards*, 2001, 23(2/3):365-387.
- [14] Chongxi Chen, Shunping Pei, Jiu Jiao. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2003, 11(2):275-287.
- [15] 王家兵. 天津城市发展中的若干环境地质问题[J]. *地质调查与研究*, 2004, 27(3):164-168.  
Wang Jiabing. Problems of environmental geology on the urbanization in Tianjin City [J]. *Geological Survey And Research*, 2004, 27(3):164-168(in Chinese with English abstract).
- [16] Teatini P, Ferronato M, Gambolati G. et al. A century of land subsidence in Ravenna, Italy [J]. *Environmental Geology*, 2005, 47(6): 831-846.
- [17] Atapour H, Aftabi A. Geomorphological, geochemical and geo-environmental aspects of karstification in the urban areas of Kerman city, southeastern, Iran [J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(7): 783-792.
- [18] 刘善军. 隐伏岩溶区岩溶塌陷易发程度评价—以泰安为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004,15(3):87-90.  
Liu Shanjun. Evaluation on the karst collapse susceptible degree in covered karst region - Example for Tai'an City[J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(3):87-90(in Chinese with English abstract).
- [19] 朱庆杰, 苏幼坡, 刘廷全. 唐山市岩溶塌陷安全评价 [J]. *中国安全科学学报*, 2004, 14(2):91-94.  
Zhu Qingjie, Su Youpo, Liu Tingquan. Safety evaluation of Karst collapse in Tangshan City [J]. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(2):91-94(in Chinese with English abstract).
- [20] Gutiérrez -Santolalla F, Gutiérrez -Elorza M, Marín C, et al. Subsidence hazard avoidance based on geomorphological mapping in the Ebro River valley mantled evaporite karst terrain (NE Spain) [J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(3):370-383.
- [21] Pierre Thierry, Nicole Debeblia, Ardnand Bitri. Geophysical and geological characterisation of karst hazards in urban environments: application to Orléans (France)[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2005, 64(2):139-150.
- [22] 娄华君, 王宏, 夏军, 等. 地质信息可视化的应用——城市环境地质研究之发展方向[J]. *中国地质*, 2002, 30(3):330-334.  
Lou Huajun, Wang Hong, Xia Jun, et al. Application of geological information visualization -Direction in development of the study of urban environment geology [J]. *Geology in China*, 2002, 30(3): 330-334(in Chinese with English abstract).
- [23] 姜朝松, 周瑞琦, 胡耀雄. 昆明盆地的地质构造特征 [J]. *地震研究*, 2003, 26(1):67-74.  
Jiang Chaosong, Zhou Ruiqi, Hu Yaoxiong. Features of geological structure for Kunming Basin [J]. *Journal of Seismological Research*, 2003, 26(1):67-74(in Chinese with English abstract).
- [24] 闵子群. 昆明地区的地震危险性问题[J]. *地震研究*, 1989, 12(2): 97-101.  
Min Ziqun. Seismic risk in Kunming area [J]. *Journal of Seismological Research*, 1989, 12 (2):97-101 (in Chinese with English abstract).
- [25] 谢应齐. 论昆明地区地学灾害 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 1992, 14(4):411-416.  
Xie Yingqi. On the geologic disasters in Kunming [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)* 1992, 14 (4):411-416(in Chinese with English abstract).
- [26] 和锡典. 昆明市地下水资源的开发与管理 [J]. *地下水*, 1991, 13(2):79-81.  
He Xidian. Development and management of the groundwater in Kunming[J]. *Groundwater*. 1991, 13(2):79-81(in Chinese).
- [27] 姜朝松, 邵德晟, 樊友心, 等. 昆明市地面沉降发展过程及其特征[J]. *地震研究*, 2001, 24(1):55-60.  
Jiang Chaosong, Shao Desheng, Fan Youxin, et al. Development process and characteristics of land subsidence in Kunming [J]. *Journal of Seismological Research*, 2001, 24(1):55-60(in Chinese with English abstract).
- [28] 薛传东, 刘星, 李保珠, 等. 昆明市区地面沉降的机理分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, 15(3):47-54.  
Xue Chuandong, Liu Xing, Li Baozhu, et al. Mechanism analysis of land subsidence in Kunming city area [J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004,15 (3):47-54 (in Chinese with English abstract).
- [29] 阮永芬, 刘岳东, 王东 等. 昆明泥炭与泥炭质土对建筑地基的影响[J]. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2003, 28(3):121-124.  
Ruan Yongfen, Liu Yuedong, Wang Dong, et al. Effect of Kunming's peat & peaty soil on the building foundation[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science And Technology)*, 2003, 28 (3):121-124 (in Chinese with English abstract).
- [30] 徐国民, 吴道明, 杨金和. 昆明某训练基地基坑变形失稳原因分析[J]. *岩土工程界*, 2003, 6(2):31-34.  
Xu Guomin, Wu Daoming, Yang Jinhe. Analyses of reasons why foundation piles in a train base of Kunming destabilize and deform [J]. *Geotechnical Engineering Field*, 2003, 6(2):31-34(in Chinese).
- [31] Van Asch Th W J, Hendriks M R, Hessel R. et al. Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps[J]. *Engineering Geology*, 1996, 42 (4):239-251.
- [32] El-Kadi A I, Torikai J D. Identifying variably saturated water-flow patterns in a steep hillslope under intermittent heavy rainfall [J]. *Hydrogeology Journal*, 2001, 9(3):231-242.
- [33] 徐刚. 重庆市滑坡及崩塌的发育规律分析 [J]. *西南师范大学学报*, 1990, 15(4):540-545.  
Xu Gang. Development of landslides and collapse in Chongqing

- city [J]. Journal of Southwest Teachers University, 1990, 15 (4): 540-545(in Chinese with English abstract).
- [34] 尧红庆, 李玉生, 马映清. 重庆市规划区滑坡崩塌及泥流的分布与特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(3):9-19.  
Yao Hongqing, Li Yusheng, Ma Yingqing. The distribution and characteristics of landslide, rock fall and mud flow in the plan region of Chongqing city [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(3):9-19(in Chinese with English abstract).
- [35] 李玉生. 重庆市1991-1993年危岩滑坡治理前期勘察综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(3):49-50, 42.  
Li Yusheng. A summary of exploration in earlier stage for regulation of dangerous rock and landslide in Chongqing City during 1991-1993 [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(3): 49-50, 42(in Chinese with English abstract).
- [36] 胡克定. 浅论重庆地区滑坡的分布规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(3):20-22, 62.  
Hu Keding. Superficial discussion on distribution laws of landslides in Chongqing region[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(3): 20-22, 62(in Chinese with English abstract).
- [37] 刘凯, 殷坤龙. 重庆市区地质灾害信息数据库设计[J]. 安全与环境工程, 2002, 9(2):4-8.  
Liu Kai, Yin Kunlong. The information database design of geo-hazards in Chongqing City [J]. Safety And Environmental Engineering, 2002, 9(2):4-8(in Chinese with English abstract).
- [38] 舒文霓, 胡善铨, 汪予生. 重庆市区危岩滑坡灾害特征、规律及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1):114-116, 125.  
Sbu Wenni, Hu Shanquan, Wang Yusheng. Features, laws and control countermeasures on dangerous rockmass and landslide in Chongqing City [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(1):114-116, 125(in Chinese with English abstract).
- [39] 杜政清. 重庆城市环境地质灾害及其防治 [J]. 国土与自然资源研究, 1994, (2):1-4.  
Du Zhengqing. Environmental geological hazards in Chongqing city and it control[J]. Land and Natural Resources Research, 1994, (2):1-4(in Chinese).
- [40] 何银武. 论成都盆地的成生时代及其早期沉积物的一般特征[J]. 地质论评, 1992, 38(2):149-156.  
He Yinwu. The age of formation of the Chengdu basin and features of its early deposits [J]. Geological Review, 1992, 38(2): 149-156(in Chinese with English abstract).
- [41] 吴敏良. 成都平原地下水浅析[J]. 四川水利, 1999, 20(6):55-56.  
Wu Minliang. Analysis for the groundwater in Chengdu plain [J]. Sichuan Water Conservancy, 1999, 20(6):55-56(in Chinese).
- [42] 徐则民, 张焯元, 刘汉超, 等. 成都地铁环境工程地质评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2):64-69.  
Xu Zemin, Zhang Zhuoyuan, Liu Hanchao, et al. Environment engineering geological assessment of chengdu subway [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13 (2):64-69(in Chinese with English abstract).
- [43] 梁云甫. 成都平原地下水库调蓄作用初探 [J]. 水文地质工程地质, 1989(2):49-52, 15.  
Liang Yunfu. Regulation and storage capacity of the underground reservoir in Chengdu plain [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1989(2):49-52, 15(in Chinese).
- [44] 全纪平. 成都市水文地质环境问题及其对策 [J]. 岩土工程技术, 1997, (3):52-56.  
Quan Jiping. Hydrogeological environmental problems of Chengdu city and relative countermeasures [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1997, (3):52-56(in Chinese).
- [45] 姜钧. 成都市地下水的开发[J]. 城市公用事业, 2002, 16(3):27-29.  
Jiang Jun. On the exploitation of Chengdu's groundwater[J]. Public Utilities, 2002, 16(3):27-29(in Chinese).
- [46] 廖心北, 陈勇, 朱明. 喷锚支护结构设计及其在成都地区深基坑护壁工程中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1):108-113.  
Liao Xinbei, Chen Yon, Zhu Ming. Design for anchor-shotcrete support structure and its application to protect wall works of deep foundation pit in Chengdu Area [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(1):108-113(in Chinese with English abstract).
- [47] 邵家斌. 成都“海外交流中心”深基坑护壁工程剖析[J]. 四川建筑科学研究, 1996(2):33-36.  
Shao Jiabin. Foundation pit support analysis of “oversea exchange center” project in Chengdu [J]. Sichuan Building Science Research, 1996(2):33-36(in Chinese).
- [48] 黄光省. 成都市通锦大厦深基坑支护施工 [J]. 工程科技, 1999 (3):52-56, 84.  
Huang Guangxing. The deep foundation pit support of Tongjin Building in Chengdu [J]. Engineering Science and Technology, 1999(3): 52-56, 84(in Chinese).
- [49] 程渝萍. 成都科技中心深基坑施工技术应用[J]. 四川建筑, 1997, 17(2):48-49.  
Cheng Yuping. The deep foundation pit support of Chengdu science and technology center project [J]. Sichuan Architectural, 1997, 17(2): 48-49(in Chinese).
- [50] 费大勇. 成都王府井商城高层建筑主楼深基坑护壁及邻近地基加固处理[J]. 四川水力发电, 1999, 18(3):57-60.  
Fei dayong. The deep foundation pit support and foundation dispose for Wangfujing commercial building in Chengdu [J]. Sichuan Water Power, 1999, 18(3):57-60(in Chinese).
- [51] 昆明市勘察测绘研究院编. 现代新昆明[M]. 长沙: 湖南地图出版社, 2003.  
Kunming Geotechnical Investigation & Surveying Research Institute. Modern New Kunming [M]. Changsha: Hunan Map Publishing House, 2003.
- [52] 闫自申, 贺彬, 姚美香, 等. 滇池流域水资源的开发与保护[J]. 资源开发与保护, 1993, 9(4):267-270.  
Yan Zishen, He Bin, Yao Meixiang, et al. Development and conservation of the water resources in Dianchi lake drainage basin [J]. Resources Development and Conservation, 1993, 9 (4):267-

270(in Chinese with English abstract).

[53] 段泽文, 龚涛. 滇池流域水资源与水污染问题 [J]. 云南环境科学, 2002, 21(3):24-26.

Duan Zewen, Gong Tao. Water resource and water pollution in Dianchi drainage area[J]. Yunnan Environmental Science, 2002, 21(3): 24-26(in Chinese with English abstract).

## Environmental geological issues of typical cities in southwest China and city planning

HUANG Run-qiu<sup>1</sup>, XU Ze-min<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** Kunming, Chongqing and Chengdu in southwest China are a lakeside city in the Yunnan-Guizhou Plateau, a mountain city beside a river and a plain city respectively and have different geological environments. Many environmental geological issues closely related to the sustainable development of cities have occurred to different extent in these cities with their fast development from the 1980s. Kunming is confronted with land subsidence and soft ground. Frequent landslide and rockfall events have obstructed Chongqing's development and expansion. The integrity and runoff ability of the groundwater system in the giant diluvial-alluvial fan of the Minjiang River have been seriously destructed by the rapid development of Chengdu located above a ground reservoir of the western Sichuan plain. Environmental geological issues should be the most important factors considered in city planning and drafting a rational city-planning scheme is the effective approach to inhibiting the deterioration of the geological environment.

**Key words:** typical cities in Southwest China; environmental geological issue; sustainable development; land subsidence; slope hazard; groundwater resources

---

**About first author:** HUANG Run-qiu, male, born in 1963, Ph.D and professor, specializes in engineering geology and environmental geology; E-mail: hrq@cdut.edu.cn.