

# 珠江三角洲环境地质控制性因素及问题分析

董好刚<sup>1</sup> 黄长生<sup>1</sup> 陈 雯<sup>1</sup> 张宏鑫<sup>1</sup> 支兵发<sup>2</sup> 赵信文<sup>1</sup>

(1. 武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430000; 2. 广东省地质调查院, 广东 广州 510610)

**摘要:**珠江三角洲经济区地处广东省中南部, 濒临南海, 海陆相互作用较强烈, 新构造运动活跃, 侵蚀和剥蚀作用明显, 第四系广布, 地貌类型多样, 是地质环境的过渡带和敏感带, 独具特色的区域地质环境必然产生相应的环境地质问题。本文基于现代调查并综合以往研究成果, 从地形地貌、新构造运动、海平面变化、第四纪沉积的角度分析了控制珠三角城市群地质环境的重要因素, 提出了对可持续城市化进程具有广泛影响的灾害性环境地质问题: 地震灾害, 软土区地面形变, 岩溶塌陷, 海岸异常变迁叠加海平面上升等问题。从地质环境的角度分析了这些问题的成因并提出了针对性的对策建议。

**关键词:**珠江三角洲; 地质环境; 第四纪; 成因分析; 对策研究

**中图分类号:** P66

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3657(2012)02-0539-11

## 1 引言

珠江三角洲经济区是中国重要的经济增长极, 城市化进程日新月异。该区地处广东省中南部, 濒临南海, 海陆相互作用较强烈, 新构造运动活跃, 侵蚀和剥蚀作用明显, 第四系广布, 地貌类型多样, 是地质环境的过渡带和敏感带。独具特色的区域地质环境必然产生相应的环境地质问题, 近年来沿断裂带频频出现的地面沉降(塌陷)就是城市发展与地质环境紧密依存的最好例子。环境地质问题已深深地影响、困扰和制约着城市的健康发展和人民的生命财产安全。

珠三角环境地质问题和对策研究前人已做过大量工作<sup>[1-4]</sup>, 但结合新构造运动、海平面变化等控制城市群地质环境形成演化的内在因素的分析尚需加强。在人-地关系日益紧张的今天, 从地质环境的内因出发, 深刻地理解这些控制性地质环境因素的基础及动态演化对于提高珠江三角洲经济区环境治理、国土规划、防灾减灾具有前瞻性和决定性意义。

## 2 珠江三角洲控制性地质环境要素

### 2.1 地形地貌

珠江三角洲是广东经济发展的主体区, 东、西、北三面均被山地、丘陵围绕, 南面向海, 构成一个马蹄形的港湾形势, 总面积 11 281 km<sup>2</sup>。珠江三角洲本身的地貌特色是平原上有 160 多个岛丘突起, 表现为丘陵、台地、残丘地貌类型, 面积约占三角洲总面积的五分之一。

河网十分发育是珠江三角洲平原地貌的另一特征。西、北江三角洲主要水道近 100 条, 总长 1600 多千米; 东江三角洲主要水道 5 条, 总长 138 km。珠江三角洲的水动力条件是强径流弱潮流, 无论洪季或枯季, 径流都很强大, 珠江年输砂量约  $8 \times 10^{10}$  kg, 河口地带堆积强烈, 成陆迅速。

### 2.2 新构造运动

受南海扩张的影响, 珠江三角洲发育 NE、NW 和 EW 向 3 组断裂, 它们不仅控制三角洲的外部轮廓, 同时也控制着河道延伸方向、古海岸线和第四系

收稿日期: 2011-08-17; 改回日期: 2012-02-18

基金项目: 地质灾害预警项目“珠江三角洲经济区地质环境调查评价”(1212011140031)和“珠三角 NW 向活动断裂调查评价”(1212011140032)资助。

作者简介: 董好刚, 男, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事环境地质及新构造运动研究; E-mail: donghaogang@126.com。

沉积物的展布。珠江三角洲受三组断裂的切割,形成多个垂向上具有不同运动方向或运动速率的断块(图1),新构造运动以断裂活动和断块差异升降运动为主要特征<sup>[5-8]</sup>。

### 2.2.1 断裂活动

根据历史地震、地质和地貌特征、大地水准测量、卫星影像、热泉、地球物理及钻孔资料分析,珠江三角洲地区发育的3组断裂在近代地质历史时期都有不同程度的活动<sup>[6-14]</sup>。以西江断裂为例,地貌上控制了西江河谷的发育和三角洲的西界,第四系等厚线沿西江呈北西向长条带状延伸。断裂两盘显示出差异运动,导致北东盘阶地发育,南西盘阶地不发育<sup>[9]</sup>。磨刀门水道

道断层泥最新年龄(23.4±1.5)ka,鸡啼门水道的破碎带最新断代 25 ka,垂直错动达 6 m<sup>[10]</sup>。垂直形变速率自北向南增强,北段高要金利附近为 0.51 m/a,中段南海九江附近为 0.86 mm/a,南段灯笼沙附近为 4.86 mm/a<sup>[7,8]</sup>。断层气(氦气)异常峰值超过异常下限值 2 倍左右<sup>[7]</sup>。西江断裂为最活跃的弱活动断裂,共发生>4.75 级地震 5 次,最大震级 5.5 级<sup>[9]</sup>(澳门,1905)。

现代调查成果表明,珠江三角洲存在切割晚更新世甚至全新世的断裂<sup>[12]</sup>。在珠江三角洲五桂山南麓发现的 2 个断层剖面显示第四纪地层被切割,通过三角洲第四系的分析和对比,确认五桂山南麓断

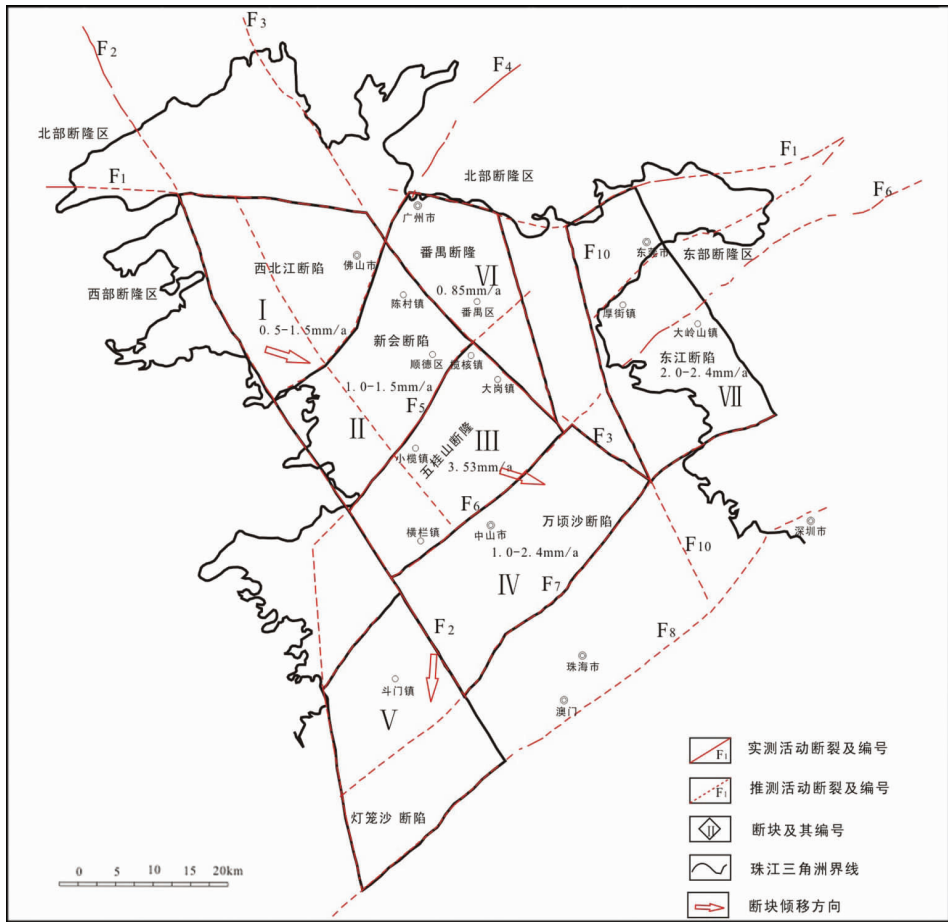


图1 珠江三角洲地区活动断裂与断块分区示意图

F<sub>1</sub>—瘦狗岭断裂;F<sub>2</sub>—西江断裂;F<sub>3</sub>—沙湾断裂;F<sub>4</sub>—古劳从化断裂;F<sub>5</sub>—市桥新会断裂;  
F<sub>6</sub>—五桂山北麓断裂;F<sub>7</sub>—五桂山南麓断裂;F<sub>8</sub>—深圳断裂;F<sub>9</sub>—崖门断裂;F<sub>10</sub>—萝岗太平断裂;

Fig.1 The distribution of fault activities and fault blocks in the Pearl River delta

F<sub>1</sub>—Wesouling fault;F<sub>2</sub>—Xijiang fault;F<sub>3</sub>—Shawan fault;F<sub>4</sub>—Gulaoconghua fault;F<sub>5</sub>—Shiqiaoxinhui fault;  
F<sub>6</sub>—Northern foot fault of Wugui Mountain;F<sub>7</sub>—Southern foot fault of Wugui Mountain;F<sub>8</sub>—Shenzhen fault;  
F<sub>9</sub>—Yamen fault;F<sub>10</sub>—Luogantaiping fault

裂在中、晚更新世时期是活动的,这是断裂第四纪活动的直接地质证据<sup>[13]</sup>。综合以往研究并结合现代调查,北东向的广州—从化断裂,近东西向的三水—罗浮山断裂,北西向的西江断裂,白坭—沙湾断裂活动性较强,历史地震多发生在上述断裂周边及交汇部位。另外,深圳断裂、新会—市桥断裂等近期小震活跃,也该引起足够重视。现将上述 3 组主要断裂的活动标志、活动特征列于表 1。

### 2.2.2 断块差异升降运动

珠江三角洲受 3 组断裂的切割,形成多个垂向上具有不同运动方向或运动速率的断块。关于珠江三角洲断块的划分,张虎南、黄玉昆、陈伟光、姚衍桃等做过大量工作<sup>[5-8]</sup>,综合区内主要断裂、第四系厚度、地貌特征、地震活动及地壳垂直形变,把珠江三角洲划分为 7 个断块(5 个断陷和 2 个断隆):西北江断陷、万顷沙断陷、东江断陷、新会断陷、灯笼沙断陷、番禺断隆和五桂山断隆(图 1)。断块活动特征如下:

(1)早全新世(10~4 ka B.P)断块运动以抬升为主,最大速率约 1.8 mm/a;晚全新世以沉降为主,最大速率-3~-4 mm/a<sup>[7]</sup>。

(2)7 个断块区的活动可大致分为较强、中等和较弱 3 档。其中断块活动较强的斗门断块和广州—番禺断块,早全新世平均抬升速率分别为 1.03 mm/a 和 0.85 mm/a,远超过其他各区的数倍至十倍;晚全新世平均沉降速率分别是-1.65 mm/a 和-1.33 mm/a,亦明显地大于其他各区。震中分布显示,4.5 级以上的破坏性历史地震大多位于两个断块区周边的断裂位置。如 1905 年发生的 5 级地震位于斗门断块所处的西江断裂与澳门—三灶岛断裂的交汇部位,近年有报道的破坏性的史前地震也发生在三灶岛。1915 年发生的 4.5 级地震与 1372 年 4.5 级地震则发生在广州—番禺断块周边的广州—从化断裂与三水—罗浮山断裂的交汇部位<sup>[7,8]</sup>。

断块活动较弱的是顺德断块和新会断块,抬升速率和沉降速率分别是 0.64 mm/a、-0.29 mm/a 和 0.56 mm/a、-0.4 mm/a;其余断块区活动均属中等,平均速率为上升<1 mm/a,下降>-1 mm/a<sup>[7,8]</sup>。

(3)上述估算表明,珠江三角洲内晚更新世晚期以来的沉降量南部地区大于北部地区,可能反映了三角洲所在的地块存在自北向南掀斜的趋势(图 1)。现代地壳垂直形变观测资料显示珠海斗门一带存在一个 NNW-SSE 走向的年变速为-7 mm/a 的沉降

中心,可能就是它的一种反映。

(4)断块差异升降导致西江断裂上盘下降,整体向东西掀斜,产生 2 个沉陷区和地质构造活跃区(图 1)。东部受挤压,且沉积速率加快。

## 2.3 海平面变化

全球海平面上升主因是基于全球变暖,是各国科学家通过长期研究得出的结果。珠江三角洲濒临南海,研究其全新世以来的海平面升降,预测其发展趋势,对未来的城乡规划、经济开发有着重要的意义。珠江口相对海平面上升除受全球气候变暖影响外,还受地壳运动、河口沉积物压缩、近期断裂活动、地震以及水文地理等因素的影响。关于珠江三角洲海平面升降问题,前人做过大量卓有成效的工作<sup>[1,15-18]</sup>。以往研究证明,距今 7 500~6 000 a 以来,珠江三角洲地区海平面在波动中总体趋于上升。广东国家海洋局 2007 年发布的一项观测报告表明,近 30 年来广东海平面总体上升为 5~6 cm,平均上升速率为 2.5 mm/a。对 1990—2030 年海平面上升的预测,主要有 4 种不同的结果:9.24 cm<sup>[15]</sup>、25~30 mm/a<sup>[16]</sup>、30~40 mm/a<sup>[17]</sup>、22~33 mm/a<sup>[18]</sup>,珠江三角洲海平面近数年已由 mm/a 级加速为 cm/a 级的趋势。虽然对海平面今后上升的速度和幅度有不同看法,但对上升趋势的认识却是基本一致的。

## 2.4 珠江三角洲第四系沉积的形成及演化

珠江三角洲的形成演化具有独特的特征<sup>[1,2,5]</sup>。从时间上讲,现有研究认为三角洲最老的沉积年龄 40~60 ka,属晚更新世。第四系沉积厚度大多为 25~40 m,最厚达 63.6 m,可分为下部、中部、上部厚度不等的 3 部分:下部,晚更新世三角洲沉积前古河流沉积相砂砾层、砂质粘土层,含枝叶腐木等,厚度一般为 3~5 m,最厚 26.28 m,<sup>14</sup>C 年代为 20 480~37 000 a,见于中山东风、新会双水、三水西南、博罗元洲、东莞石排、高要广利,珠海九洲港等地;中部,早—中全新世陆相过渡到三角洲浅海相沉积,底部为中细砂、粉砂含少量贝壳,厚 0.5~3 m,其上为灰黑色淤泥,含牡砺及其他海生动物化石,厚 15~20 m,最厚 40.28 m,<sup>14</sup>C 年代为 2 500~7 500 a,见于斗门灯笼沙、中山小榄、元洲上南、顺德金桔咀及滨海地区;上部,晚全新世泛滥平原相和三角洲沉积相砂质粘土、粘土、粉砂、细砂、含贝壳及植物枝叶,还有石器、陶片、淡水马来鳄等,厚度一般为 3~5 m,<sup>14</sup>C 年代为 1 520~2 700 a,见于东莞沙田,新会荷塘、顺德勒

表1 珠江三角洲主要活动断裂及特征一览<sup>[5-14]</sup>  
Table 1 Characteristics of the main fault activities

断裂名称	地貌特征	最新活动时代和位移	历史地震	综合分析
北西向断裂	西江断裂	地貌上控制了西江河谷的发育和三角洲的西界,第四系等厚线沿西江呈北西向长条带状延伸,断裂两盘显示出差异运动,导致北东盘阶地发育,南西盘阶地不发育。 磨刀门水道断层泥断代最新年龄 $(2.34\pm 0.15)\times 10^4$ a <sup>[9]</sup> ,鸡啼门水道的一条破碎带最后一次活动(25 kaBP)所导致的垂直错动达6 m <sup>[9]</sup> 。 垂直形变速率自北向南增强,北段高要金利附近为0.51 mm/a,中段南海九江附近为0.86 mm/a,南段灯笼沙附近为4.86 mm/a <sup>[8]</sup> 。晚第四纪垂直位移速率为0.44 mm/a <sup>[9]</sup>	共发生>4.75级地震5次,最大震级5.5级(澳门,1905) <sup>[8]</sup> 。断层气(氡气)异常峰值超过异常下限值2倍左右 <sup>[7]</sup>	西江断裂为最活跃的弱活动断裂
	沙湾断裂	地貌上控制了三水盆地的东界和西北江三角洲东侧的沉积发育,致使第四纪等厚线沿断裂呈北北西向长条带状展布 牛头岛北部海域浅层人工地震测试剖面显示,该断裂可能切割至全新统的底面,沿断裂有喜山期基性岩侵溢体,表明在晚更新世至全新世初有过活动 <sup>[9]</sup> 灵山大岗后山,未被压碎的方解石脉测年结果为 $(7.13\pm 0.49)\times 10^4$ a和 $5.66\times 10^4$ a,碎裂的方解石脉为 $5.40\times 10^4$ a(陈国能等);郭钦华等人在大岗镇人民公园中采集的构造岩热释光测年数据为 $22.45\times 10^4$ a和 $19.48\times 10^4$ a。乌岗碎裂岩年龄 $(484000\pm 33000)\times 10^4$ a(广东地调院),为中更新世。这些数据都表明该断裂在晚更新世中期曾有多次明显的活动。 垂直形变速率自北向南增强,北段南海松岗附近为1.64 mm/a,中段番禺灵山附近为1.91 mm/a,南段万顷沙附近为2.65 mm/a <sup>[8]</sup> 。晚第四纪垂直位移速率为0.39 mm/a <sup>[9]</sup>	共发生>4.75级地震2次,最大震级5级(南海,1940),近期小震活跃	沙湾断裂为弱活动断裂
	狮子洋断裂	根据断裂展布的地貌形态,升降幅度的累积变化和 <sup>14</sup> C测年资料,可将其分为北、中、南三段	北段断层物质TL年龄有:文冲船厂 $(34.9\pm 2.7)\times 10^4$ a和 $(18.86\pm 1.12)\times 10^4$ a;石化厂 $(18.2\pm 0.9)\times 10^4$ a和 $(13.2\pm 0.8)\times 10^4$ a;石化医院 $(17.45\pm 1.45)\times 10^4$ a。中段威远码头断层物质热释光测年为 $(13.86\pm 1.12)\times 10^4$ (a B.P.),以及断层泥中石英碎屑在电镜扫描下显微刻蚀形貌分析结果,认为该断裂在中更新世晚期和晚更新世曾发生过强烈活动 <sup>[9]</sup> 。珠江水利委员会在小铲岛西北侧浅层人工地震探查发现该断层已切割至全新统顶部淤泥层底界,该断裂在全新世中晚期仍有活动 <sup>[9]</sup>	
北东向断裂	广从断裂	地貌上控制红层盆地边界,地貌反差大,见多处温泉出露,从北往南增多 其断层物质的裂变径迹、热释光年龄可分为早更新世(2.24-2.58Ma)和中更新世(0.13-0.58 Ma)2期,地质连井剖面显示晚更新世后期(距今18 000-11000 a)仍有活动,切截了上更新统,全新世以来仍保持微弱的正断层活动 <sup>[9]</sup> 据1992至1997年的跨断层短水准测量数据估算,断裂两侧的平均形变速率为0.18 mm/a <sup>[8]</sup> 。晚第四纪垂直位移速率为0.47 m m/a <sup>[10]</sup> ;断层气(氡气)异常峰值南部、中部接近异常下限值2倍左右、北部达到2-6倍左右 <sup>[7]</sup>	最大震级5级(佛山,1683),近期小震活跃	广从断裂为弱活动断裂,向北有增强的趋势
	深圳断裂	地貌反差大,控制丘陵一山地与谷地、港湾 曾发生5.5级地震(澳门,1905)1次,近期小震较活跃,2010年5月发生3级地震。断层气(氡气)异常峰值局部地段接近异常下限值3倍左右 <sup>[7]</sup>		深圳断裂为弱活动断裂
东西向断裂	广州罗浮山断裂	断层热释光年龄主要有 $(2.44\pm 0.15)$ Ma、 $(2.63\pm 0.18)$ Ma和 $(0.78\pm 0.05)$ Ma <sup>[8]</sup> ,反映断裂在早、中更新世的活动 1992至1997年的跨断层短水准测量显示断层两盘相对升降的平均速率为0.19 mm/a <sup>[8]</sup> 。晚第四纪垂直位移速率为0.19-0.21 m m/a <sup>[10]</sup> 。断层气(氡气)异常峰值广州段接近异常下限值2倍左右、广州段(汞)含量接近异常下限值5倍左右 <sup>[7]</sup> ,反映切割深度较深	历史资料表明瘦狗岭断裂附近有3-4级地震记录,该断裂的西段在与广州—从化断裂的交汇处于1982—1983年间曾发生过ML1.5-2.7级地震6次,表明一定活动性	广州—罗浮山断裂为弱活动断裂

流、中山小榄等地。

空间上,沉积相平面展布界限决定于古海岸线,并受控于断层<sup>[12]</sup>(图 2)。珠江三角洲为晚更新世以来形成的较新的三角洲,曾发生两次海侵。陆相位于古海岸线以北,即沿黄埔—广州文化局—河南七星岗—佛山—澜石一线以北分布,该线与广从断裂基本一致;海相层沿广州黄埔经济开发区—市桥—大良—江门—新会一线以南至滨海地区分布,该线恰好与市桥—新会断裂相吻合;海陆过渡相则夹于上述两线与两断裂之间。与之对应,珠江三角洲软土分布自北而南可分为 3 个区(图 2):A,广从断裂以北的河流冲积平原松软土区;B,广从和新会断裂之间的河流冲积平原松软土与滨海海积软土过渡区;C,新会断裂之南的滨海海积软土区,为最不利的工程地质分区。其天然含水量高达 66.7%~80.6%,液限指数  $I_L=1.44\sim 2.49$ ,压缩系数( $a_{1-2}$ )= $0.11\sim 0.186\text{ cm}^2/\text{kg}$ ,多呈流塑状、触变性。本区高压缩性、低承载力、大面积、大厚度分布的淤泥软土层工程地质性质较差,极易发生地面沉降。

## 2.5 珠江三角洲地质环境控制性因素的内在统一性

珠江三角洲现代地质环境是在原有区域地质基础上形成和发展起来的,新构造运动和海平面升降共同主宰了三角洲地质环境最新演化的历史和未来演化的方向。岸线、河流、山川地貌变迁,晚第四纪沉积的形成和演化是在上述因素共同作用下形成和发展的,由此形成的环境地质问题的内因也是上述地质环境的结果。

## 3 主要环境地质问题分析与对策研究

从控制珠江三角洲城市地质环境的主要因素出发,对可持续城市化进程具有广泛影响的主要环境地质问题包括 4 个方面:地震灾害、软土区地面形变、灰岩分布区地表塌陷以及海平面上升引起的环境地质问题等(图 3)。

### 3.1 地震灾害及区域稳定性问题

#### 3.1.1 珠江三角洲地震活动特点及危害

由图 3 可知,珠江三角洲的地震活动,反映了南部强于北部的特点。南部磨刀门在 NE 向莲花山断裂与 NW 向西江断裂交汇处发生过 1 次 5.5 级地震,而北部震级均未超过 5 级,但地震频度较高,历史有感地震较密集地分布在广州、南海、顺德、番禺等地。自 1372 年以来,先后在区内发生 4.5~5.5 级地

震 9 次,其中 1905—1940 年就有 4 次。表明 20 世纪以来地震活动较频繁。特点是频率高、震级低。

珠江三角洲经济区人口密集,经济发达,加上软土分布广泛,场地烈度增加,如果发生地震,即使只有中等震级,所造成的损失可能也不亚于边远地区的大地震。随着 20 世纪 90 年代中国进入地震活动活跃期,珠江三角洲地区已被列入中国 21 个地震重点监视防御区之一,1997 年中国第三代烈度区划图确定该区和珠江口外近海为 6~6.5 级地震的潜在震源区,地震烈度Ⅶ度区范围(图 3)。

#### 3.1.2 地震灾害成因的地质环境分析

(1)活动断层是引发地震灾害的元凶。地震活动空间上集中在珠江三角洲沉陷区内,破坏性地震(4.5~5.5 级)主要沿 NE 向的广州—从化断裂、新会—市桥断裂、NEE 向的滨海断裂与 EW 向的罗浮山断裂及 NW 向的西江断裂、珠江口断裂的交汇处。NW 向断裂本身震级较小,但频率较高,如白泥—灵山断裂曾发生 3 级地震 12 次,顺德—沙洛断裂发生 3~4 级地震 21 次。

(2)地震主要发生在两个不同运动速度块体的边界上。近年来的研究表明,基底断裂的活化对第四纪沉积盆地和水系起到控制作用,断块型三角洲地区 4.75 级以上的破坏性地震的分布与断裂活动相关<sup>[6-9]</sup>;而断块的差异升降和东西掀斜特征也决定了地震震中经常在西江断裂和沙湾断裂之间来回迁移(图 2)。

#### 3.1.3 对策研究

(1)对区内主要断裂及其活动性开展系统的调查研究。在对珠江三角洲主干断裂精确定位,在查明断裂活动历史及其所引起的珠三角环境变迁的基础上,尽快建立覆盖本区活动断裂(断块)的监测网络体系,对断裂(断块)体系下方深部系统的内能变化进行长期的实时监测,以积累科学数据,建立基底断裂活动的监测预警系统。

(2)防震抗震工作要走在经济建设前面,加强工程建筑抗震设防及加固现有建筑物。

## 3.2 软土沉降

珠江三角洲经济区软土分布广泛,面积近 8 000 km<sup>2</sup>(图 2~3),占陆地总面积近 20%。由于其独特的地质、地理成因而形成的明显的区域性特性,使得珠江三角洲软土成为全国所报道过的工程中遇见的最软的软土,具有承载力低、受荷后变形大、时间效应

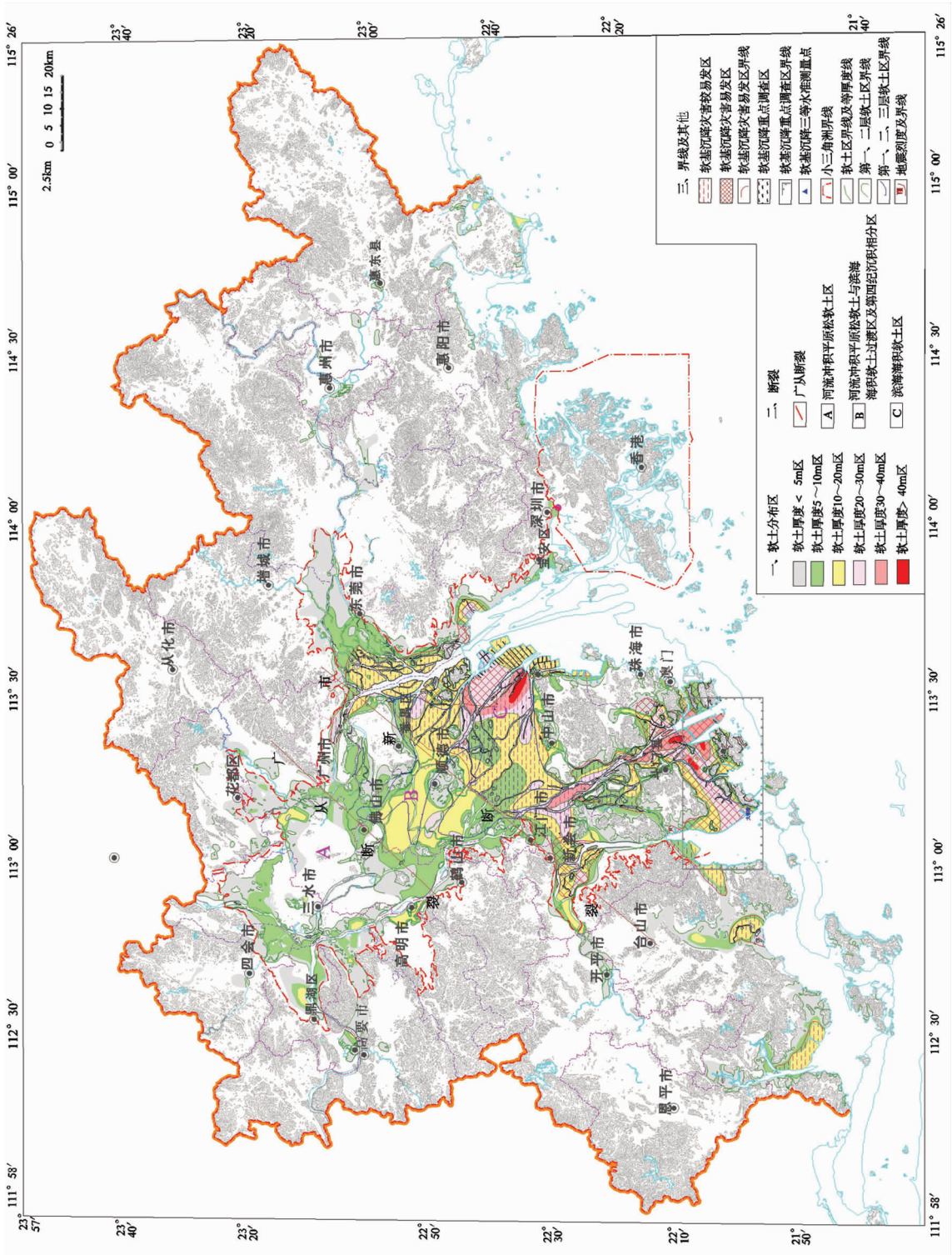


图2 珠江三角洲第四纪沉积厚度分布图

Fig.2 Distribution of soft soil in the Pearl River delta

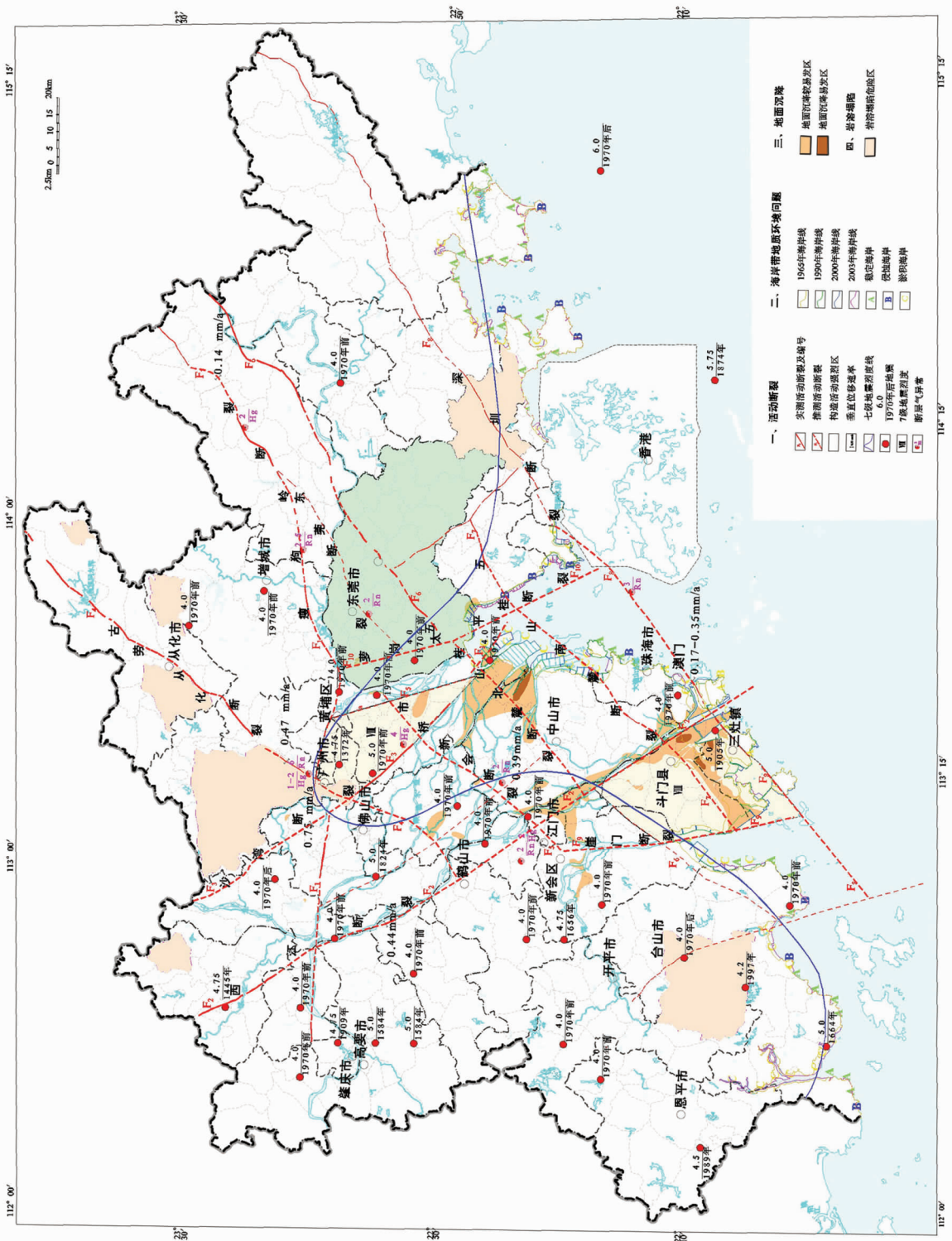


图 3 珠江三角洲经济区主要环境地质问题分布图  
Fig.3 Distribution of main geological environment problems in the Pearl River delta

明显、与建筑物共同作用能力强等特性<sup>[4]</sup>。软土引起的地面沉降不仅影响工业与民用建筑的安全,而且影响水利工程、地下供电、供气、供排水管网等基础设施的正常使用或使公路、桥梁等不能正常营运。三角洲南部的滨海海积软土区(图 2~3),属地震Ⅶ度区,地下水位浅,仅数十厘米,饱和的淤泥质粉细砂在震动荷载下有液化和震陷的可能,影响城市建设与社会经济发展。因而广泛发育的软土已经成为制约城市建设的重大地质环境因素。

软基地面沉降是一种连续、渐进、累积式的地质环境问题,一旦形成一定的规模和可观的破坏,以人类现在的能力和治理,治理和恢复起来是极为困难的,必须采取有效的措施进行预防和治理。

### 3.2.1 地面沉降成因的地质环境分析

(1) 三角洲的形成和演化决定软土分布和特性

珠三角地区软土地基地面沉降发生的区域与软土层分布范围一致,是由新构造运动和海水入侵的范围共同决定的(图 2~3)。地面沉降较为集中的代表性区域为广州市番禺南部,中山市东北部及珠海市西南部,中山市横门镇、民众镇,广州南沙经济技术开发区,珠海西区,江门市新会开发区等。珠江三角洲珠江口附近软土厚度大,形成时间短,是软基沉降的重点区段。

软土的形成时代只有 40 000 a 左右,一般处于次固结阶段,在垂向上发生不均匀沉降。软土形成时代越老、埋藏越深、厚度越小的区段,地面沉降量越小,对工程的影响越小;软土沉积时代越新、埋藏越浅,厚度越大的区段,地面沉降量就越大,对工程的影响越大。

(2) 新构造运动长期的影响作用不容忽视

由前面论述,新构造运动决定了软土分布范围和分区。珠江三角洲经济区的新构造运动,继续着三角洲以前的断块运动的特征,除表现为边缘断块及五桂山断块的隆起和三角洲腹心的下沉外,还有由东西两侧向三角洲中心的挠曲,向南掀斜,导致灯笼沙、万顷沙等口门淤积加快。这些地方正是最易发生地面沉降的地区(图 2~3)。这种向东挠曲、向南掀斜的趋势虽然缓慢,但在三角洲长期规划中仍是一种不可忽视的因素。

### 3.2.2 防治对策

(1) 加强软基地面沉降的机理研究。从土体的微观结构着手建立土体结构性本构模型,可在很大程度

上提高工程勘察、设计的精度,减少工程事故的发生。

(2) 建立软基沉降监测体系。在软土地区,进行场地沉降监测意义很大。通过开展软基地面沉降监测研究,建立地面沉降预警预报体系,以系统的地面沉降监测网为依托,开展地面沉降的预测预报。

(3) 考虑新构造运动影响,科学规划软土分布区土地利用,改善水利、建筑设计方案;本区属地震Ⅶ度区,地下水位浅,仅数十厘米,饱和的淤泥质粉砂在震动荷载下,对由地震效应引起的液化和震陷强度应作出评价。

## 3.3 岩溶塌陷

珠江三角洲经济区岩溶塌陷主要分布在广州的广花盆地、深圳龙岗区、肇庆、惠州等隐伏灰岩溶洞发育区。溶洞的存在除直接影响持力层选择、地基稳定,给基础施工带来困难外,还出现因过量开采地下水造成地面形变,包括地面下沉、地裂和地表塌陷。该区的分布范围并不很大,然而由于其具突发性和危险性的特点,已给发生区造成了巨大的经济损失和相当数量的人员伤亡<sup>[19-20]</sup>。

### 3.3.1 地面塌陷成因的地质环境分析

(1) 岩溶的存在和发育程度是岩溶塌陷形成的基础前提条件。岩溶塌陷常沿岩溶强烈发育的地段分布,尤以隐伏上石炭统壶天群灰岩( $C_2HT$ )分布区最为发育。如新华水源地灰岩为壶天群灰岩,岩溶塌陷密度大,规模常为大—巨型,塌陷成群分布;而江村水源地灰岩为石磴子组灰岩,岩溶塌陷密度小,规模为中小型(图 3)。

(2) 覆盖层特征为岩溶塌陷的基本条件。覆盖层岩土物理力学性质及状态、厚度对塌陷的形成具有重要作用。覆盖层渗透性越好、力学性质越差、厚度越小,越易发生塌陷。

(3) 隐伏上石炭统壶天群灰岩( $C_2HT$ )分布区和断裂构造的交叉部位及褶皱轴部是岩溶最为发育地段。所以断裂尤其是活动断裂也是岩溶发育和发生灾害的重要条件(图 3)。

### 3.3.2 对策研究

(1) 对岩溶塌陷区进行系统调查评价工作,研究典型岩溶塌陷发育规律、发育条件和发育判据,建立珠三角地区岩溶塌陷危险性分区。

(2) 运用先进技术手段,对岩溶塌陷触发因素和塌陷形成演化过程实施监测和预警。

(3) 按照科学发展观进行城市规划。城市不宜向



灰岩水源地发展,严禁在危险区内过量开采地下水。

### 3.4 海岸异常变迁叠加海平面上升对城市可持续发展的影响

岸线变迁已成为珠江三角洲经济区海岸带最为关注的问题之一(图 3)。珠江三角洲海岸的发育演变经历了缓慢淤积阶段和快速淤积阶段<sup>[21]</sup>。2000 年以来,造陆速率由秦汉—唐初期间的  $0.55 \text{ km}^2/\text{a}$  逐渐发展至唐初以来的  $1.78\sim 2.41 \text{ km}^2/\text{a}$ ; 基于遥感数据信息和实地调查,1965—2003 年珠江三角洲海岸总造陆面积达  $730.64 \text{ km}^2$ ,造陆速率为  $19.23 \text{ km}^2/\text{a}$ 。其中伶仃洋、磨刀门、黄茅海为海岸变迁的典型地段(图 3)。伶仃洋两岸 38 年间共造陆  $2\,483 \text{ km}^2$ ,平均速率为  $6.42 \text{ km}^2/\text{a}$ ,其中 1965—1990 年为  $4.05 \text{ km}^2/\text{a}$ 、1990—2000 年为  $10.33 \text{ km}^2/\text{a}$ 、2000—2003 年为  $13.09 \text{ km}^2/\text{a}$ (图 4)。分析结果真实反映了伶仃洋的造陆的速度呈越来越快的发展趋势。前人估算 1883—1956 年万顷沙四个时段的发展速率平均为  $63.3 \text{ m}/\text{a}$ <sup>[19]</sup>,最近 38 年间按最大推进距离量算岸线推进速率约为  $408 \text{ m}/\text{a}$ ,从这个角度也证明万顷沙的生长速度呈加快的势头。

海岸线频繁变动,直接导致湿地生态破坏,特别是某些重要的珍稀生物繁殖区、鱼类产卵场和幼鱼保护区等因盲目围垦破坏,引发海岸生物种群和数量的减少,造成目前的渔业资源日益衰退。海岸线频繁变动,增加河道及口门、港口及航道淤积,并可使河道水位升高,加剧洪涝灾害。经计算,河口每延伸  $100 \text{ m}$  河道水位就会上升  $0.5\sim 1 \text{ cm}$ <sup>[18]</sup>,这一数量是惊人的。

前述分析,珠江三角洲海平面上升的趋势,到 2030 年珠江三角洲沿岸海平面上升幅度将达  $30 \text{ cm}$ 。海平面上升对环境地质影响巨大:大片低地将被淹没或受威胁、风暴潮灾害加剧、咸水入侵范围扩大、海岸侵蚀作用将加强,沿海城市环境面临新的恶劣形势<sup>[15-18,21]</sup>。

#### 3.4.1 影响因素分析与对策研究

从图 3 可知,岸线侵蚀和淤积较强的地段一般发育在断块构造活跃的区段。岸线变迁一方面有三角洲自然生长和新构造活动影响的结果,另一方面与人类活动密切相关;海平面变化是海平面升降、地壳构造活动等因素的综合表现。其长期积累的结果将对沿海地区的社会稳定、经济发展带来严重影响,但只要采取合理的对策和防范措施,就可以有效控

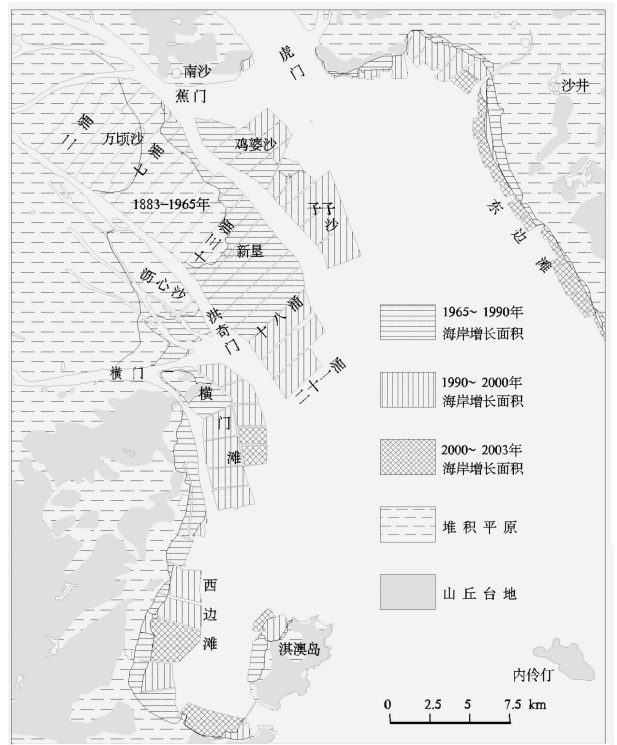


图 4 伶仃洋区海岸变迁图<sup>[21]</sup>

Fig.4 Coast changes of the Lingding Yang area

制和减轻不利影响<sup>[15-18,21]</sup>。

(1)珠江三角洲河道整治应以“疏导”方针进行全面规划,丰水期能排洪,枯水期能有潮水倒入补充,保证三角洲水道成为四季畅道的河道。

(2)结合新构造运动特征,进行防止东岸淤浅的水动力模型试验及理论研究工作,以解决与西岸围垦之间的矛盾。在西岸围垦时,各口门应留有足够的宽度及有利于水流排泄的河槽,以引导泥沙在适当部位停积。

(3)对海岸工程(海堤、排污)进行科学规划,充分考虑海平面上升和新构造运动的影响,将海平面上升作为一种重要影响因素来加以考虑,提高其设计标准。

## 4 结论

(1)影响和控制珠江三角洲的地质环境要素是地形地貌、新构造运动、海平面变化和第四纪软土等。

(2)主要环境地质问题有地震与区域稳定性、地面沉降、岩溶塌陷及海岸带问题。考虑地质环境尤其是新构造运动、第四纪地质环境演化和海平面升降的

影响提出针对性规划和对策,确保经济区科学发展。

### 参考文献 (References):

- [1] 黄镇国,李平日,张仲英,等.珠江三角洲形成发育演变 [M].广州:科普出版社广州分社,1982.  
Huang Zhenguang, Li Pingri, Zhang Zhongying, et al. The Formation Development and Evolution of the Pearl River Delta [M]. Guangzhou: Popular Sciences Press, Guangzhou Branch, 1982 (in Chinese).
- [2] 夏法,黄玉昆.珠江三角洲地质环境与灾害性地质问题 [J].中山大学学报论丛,1992(1):139-146.  
Xia Fa, Huang Yukun. Problems of Geology Environments and Calamitic Geology in the Zhujiang Delta [J]. Supplement to The Journal of Sun yatsen University, 1992(1):139-146(in Chinese with English abstract).
- [3] 中国科学院地学部.东南沿海经济快速发展地区环境污染及其治理对策[J].地球科学进展,2003,18(4):493-496.  
Chinese Academy of Sciences Faculty. The environmental pollution and its countermeasures in the southeast coastal and rapid economic development area [J]. Advance in Earth Sciences.2003,18 (4):493-496(in Chinese with English abstract).
- [4] 支兵发.影响珠江三角洲可持续城市化的若干环境地质问题[J].地质通报,2005,24(6).576-581.  
Zhi Bingfa. Environmental -geological problems impacting sustainable urbanization in the Pearl River Delta Economic Zone, Guangdong, China [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (6): 576-581(in Chinese with English abstract).
- [5] 黄玉昆,夏法,陈国能.断裂构造对珠三角形成和发展的控制作用[J].海洋学报,1983(3):316-327.  
Huang Yukun, Xia Fa, Chen Guoneng. Control action of fault in the formation and development of the Pearl River Delta [J]. Marine Journal,1983(3):316-327(in Chinese with English abstract).
- [6] 陈国能,张珂,陈华富等.珠江三角洲断裂构造最新活动性研究[J].华南地震,1995,15(3):16-21.  
Chen Guoneng, Zhang Ke, Chen Huafu, et al. A Study on the Neotectonics of The Faults in the Pearl River Delta Area [J]. South China Journal of Seismology, 1995, 15 (3):16-21 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈伟光,魏柏林,赵红梅,等.珠江三角洲地区新构造运动 [J].华南地震,2002,22(1):8-18  
Chen Weiguang, Wei Bolin, Zhao Hongmei, et al. The neotectonic movement in Pearl River Delta Area [J]. South China Journal of Seismology, 2002, 22(1):8-18.
- [8] 姚衍桃,詹文欢,刘再峰,等.珠江三角洲的新构造运动及其与三角洲演化的关系[J].华南地震,2008,28(1):29-40.  
Yao Yantao, Zhan Wenhuan, Liu Zaifeng, et al. Neotectonics of the Pear River Delta and its relationship with the deltaic evolution [J]. South China Journal of Seismology, 2008, 28 (1):29-40 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张虎男,郭钦华,陈伟光,等.西江断裂磨刀门段地质近期活动性研究[J].华南地震,1990,10(1):15-26.  
Zhang Hunan, Guo Qinhuang, Chen Weiguang, et al. A study of recent activity of Medaomen Section in Xijiang Faul [J]. South China Journal of Seismology, 1990, 10(1):15-26(in Chinese with English abstract).
- [10] 王业新,李子权,彭承光,等.珠海市鸡啼门大桥桥址区断层的勘查研究 [J].南海研究与开发,1992,(1):32-37  
Wang Yexin, Li Ziquan, Peng Chengguang, et al. Prospecting and studying the fault at the area of Jitimen bridge site [J]. Research and Development of the South China Sea, 1992, (1):32-37(in Chinese with English abstract).
- [11] 宋方敏,汪一鹏,李传友,等.珠江三角洲部分断裂晚第四纪垂直位移速率[J].地震地质,2003,25(2):203-210.  
Song Fangmin, Wang Yipeng, Li Chuanyou, et al. Late Quaternary vertical dislocation rate on several faults in the Zhujiang Dela [J]. Seismology and Geology, 2003, 25 (2):203-210 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张珂,陈国能,庄文明,等.珠江三角洲北部晚第四纪构造运动的新证据[J].华南地震,2009,29(增刊):22-26.  
Zhang ke, Chen Guoneng, Zhuang Wenming, et al. New evidences for Late Quaternary tectonic movement in the north Pearl River Delta [J]. South China Journal of Seismology, 2009, 29 (sup.):22-26(in Chinese).
- [13] 宋方敏,汪一鹏,李传友,等.珠江三角洲五桂山南麓断裂第四纪活动新知[J].地震地质,2001,23(4):581-587.  
Song Fangmin, Wang Yipeng, Li Chuanyou, et al. New Insight into the Quaternary activity of Wuguishan southern piedmont fault in the Zhujiang Dela [J]. Seismology and Geology, 2001, 23 (4):581-587(in Chinese with English abstract).
- [14] 郭钦华,郭良田,陈庞龙.广州市城区地震地质灾害探讨 [J].华南地震,2008,28(2):85-94.  
Guo Qinhuang, Guo Liangtian, Chen Panglong. Assessment of urban seismogeologic disasters in Guangzhou City [J]. South China Journal of Seismology, 2008, 28 (2):85-94 (in Chinese with English abstract).
- [15] 曾昭璇,刘南威,胡男,等.珠江口海平面上升趋势与地壳运动 [J].热带地理,1992,12(2):99-107.  
Zeng Zhaoxuan, Liu Nanwei, Hu Nan, et al. Sea level rise of the Zhujiang Delta and neotectonics [J]. Tropical Geography, 1992, 12 (2):99-107(in Chinese with English abstract).
- [16] 李平日,方国祥,黄光庆.海平面上升对珠江三角洲经济建设的可能影响及对策[J].地理学报,1993,48(6):527-534.  
Li Pingri, Fang Guoxiang, Huang Guangqing. Impaces on Sea Level Rising on the economic Developm ent of Zhujiang Delta and countermeasures [J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48 (6): 527-534(in Chinese with English abstract).
- [17] 任美镔,张忍顺.最近80年来中国的相对海平面变化[J].海洋学报,1993,15(5):87-97.  
Ren Meie, Zhang Renshun. The relative change of sea level in

- recent 80 years China[J]. *Journal of Ocean*, 1993, 15(5):87-97.
- [18] 黄镇国, 张伟强, 吴厚水. 珠江三角洲 2030 年海平面上升幅度预测及防御方略[J]. *中国科学(D 辑)*, 2000, 30(2):202-208.  
Huang Zhengguo, Zhang Weiqiang, Wu Houshui. The forecast and defensive countermeasures of 2030 sea level rise in Pearl River Delta [J]. *Science in China (series D)*, 2000, 30 (2):202-208(in Chinese with English abstract).
- [19] 刘江龙, 刘会平, 吴湘滨. 广州市地面塌陷的形成原因与时空分布[J]. *灾害学*, 2007, 22(4): 62-65.  
Liu Jianglong, Liu Huiping, Wu Xiangin. Mechanism and Temporal-Spatial Distribution of Ground Collapse in Guangzhou [J]. *Journal of Catastrophology*, 2007, 22(4):62-65(in Chinese with English abstract).
- [20] 方燎原. 广州地铁岩溶地质条件[J]. *地球与环境*, 2005, (4): 89-91.  
Fang Liaoyuan. Karst geology in Guangzhou Metro [J]. *Earth and Environment*, 2005, (4):89-91.
- [21] 梁向阳, 梁家海, 萧金文. 珠江三角洲海岸变迁及对城市可持续发展的影响[J]. *资源调查与环境*, 2005, 26(4):283-291.  
Liang Xiangyang, Liang Jiahai, Xiao Jinwen. The coast changes of Zhujiang river delta and its influence on city sustainable development [J]. *Resources Survey and Environment*, 2005, 26 (4):283-291(in Chinese with English abstract).

## The controlling factors of environment geology in the Pearl River Delta Economic Zone and an analysis of existing problems

DONG Hao-gang<sup>1</sup>, HUANG Chang-sheng<sup>1</sup>,  
CHEN Wen<sup>1</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>1</sup>, ZHI Bing-fa<sup>2</sup>, ZHAO Xin-wen<sup>1</sup>

(1. *Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430000, Hubei, China;*

2. *Geological Survey of Guangdong Province, Guangzhou 510080, Guangdong, China*)

**Abstract:** The Pearl River Delta Economic Zone, which lies in the central south of Guangdong Province and borders on the South China Sea, has experienced strong land-sea interaction and active neotectonism as well as obvious erosion, and is characterized by wide distribution of Quaternary sediments and a variety of landform types. It is a transitional zone and a sensitive belt of geological environment. The unique geological environment must have caused corresponding geological environment problems. Based on current survey and past research findings, the authors have summarized the main factors controlling geological environment, such as geomorphologic landscape, neotectonism, change of sea surface and evolution of Quaternary sedimentation. The mainly problems of geological environment and calamity geology in the Pearl River Delta are put forward, which include earthquake and crustal stability, surface deformation in soft soil area, karst collapse, and coast anomalous change with the superimposition of sea level rising. From the angle of geological environment, some corresponding countermeasures are proposed.

**Key words:** Pearl River Delta; Quaternary geological; cause analysis; countermeasure research

**About the first author:** DONG Hao-gang, male, born in 1970, senior engineer, engages in the study of environmental geology and neotectonism; E-mail: donghaogang@126.com.