

doi: 10.12029/gc20190215

黄敬军, 崔龙玉, 武鑫, 姜素, 姜国庆, 徐士银. 2019. 徐州废黄河断裂带对岩溶塌陷的控制作用[J]. 中国地质, 46(2): 389–397.

Huang Jingjun, Cui Longyu, Wu Xin, Jiang Su, Jiang Guoqing, Xu Shiyin. 2019. The control of the old (abandoned course of) Yellow River fault zone in Xuzhou on the karst collapse [J]. Geology in China, 46(2): 389–397(in Chinese with English abstract).

徐州废黄河断裂带对岩溶塌陷的控制作用

黄敬军, 崔龙玉, 武鑫, 姜素, 姜国庆, 徐士银

(国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018)

摘要:徐州城区是岩溶塌陷地质灾害危害严重的区域,已发生的塌陷均展布在废黄河断裂带内,有明显的规律性,为断裂带地下水富集区过量抽水所造成。研究表明,废黄河断裂带内岩溶发育,发育有向上开口的溶洞和裂隙,断裂带沟通了不同时代的含水层,形成了地下水强径流带或富集带;地堑式断裂带构成的负地形形成了晚更新世和全新世古河道,古河道区域形成“单一透水型盖层”和“透-阻型盖层”,使黄河泛滥沉积的砂性土直接覆盖在岩溶含水层上,为过量抽水发生岩溶塌陷提供了重要水动力条件。因此,废黄河断裂带及其伴生断裂控制了岩溶塌陷的形成条件,特别是岩溶发育强度、岩溶水文地质结构和地下水富集规律。

关键词:岩溶塌陷;废黄河断裂带;控制作用;徐州

中图分类号:P642.2 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)02-0389-09

The control of the old (abandoned course of) Yellow River fault zone in Xuzhou on the karst collapse

HUANG Jingjun, CUI Longyu, WU Xin, JIANG Su, JIANG Guoqing, XU Shiyin

(Key laboratory of Earth fissures Geological Disaster of Ministry of Land and Resources, Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract: The urban area of Xuzhou has had serious karst collapse geological hazards which are widely distributed in the old Yellow River fault zone. There exists obvious regularity that the karst collapses are caused by excessive groundwater exploitation, and the fault zone is enriched with groundwater. The research shows that the karst is developed well in the old Yellow River fault zone and there are upward opening karst caves and fissure. The fault zone has linked up aquifers of different ages and thus has formed fierce runoff belt or enrichment belt of groundwater. The graben fault zone constituted negative landforms which formed the late Pleistocene and Holocene paleochannels. The paleochannels become “permeable-only covering layer” and “permeable-aquiclude covering layer” which made the sandy soil of the Yellow River flood sediments directly cover the karst aquifers. Then they provided important hydrodynamic conditions for the karst collapse which was caused by excessive groundwater exploitation. Therefore the extensional-shear fault zone and the accompanying fractures have controlled the formation conditions of karst collapses, especially

收稿日期:2016-08-08;改回日期:2017-07-23

基金项目:徐州市人民政府、江苏省国土资源厅合作项目“徐州城市地质调查”与中国地质调查局国土资源大调查项目(12120114022001)联合资助。

作者简介:黄敬军,男,1962年生,研究员级高级工程师,主要从事水文地质和环境地质研究等工作;E-mail:hjjhfy@163.com。

karst development, karst hydrogeological structure and enrichment regularity of groundwater.

Keywords: karst collapse; old Yellow River fault zone; controlling role; Xuzhou

First author: HUANG Jingjun, born in 1962, male, senior engineer, mainly majors in hydrogeology and environmental geology; E-mail: hjhfy@163.com.

Fund support: Supported by cooperation project "Xuzhou Urban Geological Survey" between People's Government of Xuzhou and Territory Resource Bureau of Jiangsu Province; Land and Resources Survey Project of China Geological Survey (No. 12120114022001).

1 引 言

徐州市位于江苏省西北部,苏鲁皖三省接壤处,是重要的综合性交通枢纽和淮海经济区的中心城市,岩溶地下水是城市和工矿企业的重要供水水源。20世纪80年代以来,由于长期超量开采岩溶水,引起水源地下地下水动力条件改变,水位逐年下降,导致岩溶塌陷地质灾害频发,使铁路路基变形、陷落、楼房开裂、民房陷落及倒塌,造成严重的经济损失和不良的社会影响。全国337个地级以上城市受岩溶塌陷影响程度评估表明,徐州是41个受岩溶塌陷影响大的城市之一(林良俊等,2017),岩溶塌陷已成为徐州城镇化建设中需关注的重大地质问题(姜月华等,2017)。因此,随着徐州新城区、开发区的不断建设与发展,岩溶塌陷易发性、危险性评价工作变得非常紧迫。

徐州岩溶塌陷发生以来,有关部门曾陆续开展了岩溶塌陷勘察与研究,研究工作主要集中在岩溶塌陷机理研究(韩宝平等,1994,1996)、岩溶塌陷分布规律及成因分析(魏永耀等,2015)、岩溶塌陷与岩溶水开采关系研究(熊彩霞等,2009)、岩溶塌陷的防治对策(邢雪等,2015)等方面,取得一些有意义的成果,但对岩溶塌陷的控制因素研究相对较少。本文借助地质大调查项目——徐州地区岩溶塌陷调查的研究成果,从废黄河断裂带对岩溶发育程度、上覆第四纪沉积物岩性结构及岩溶水富水性等岩溶塌陷形成的地质条件的控制进行探讨,为徐州岩溶塌陷易发区划分及防控提供决策依据。

2 区域地质构造概况

徐州市位于中国东部新华夏系第2个隆起带的西侧与秦岭—昆仑纬向构造带的交汇处,属于徐蚌褶皱束,地层属华北地层区鲁西分区徐宿地层小区,主要发育两大地层,上部为第四系松散沉积物,

下部则为古生界以碳酸盐岩为主的沉积建造,其中,寒武系张夏组鲕粒灰岩和奥陶系马家沟灰岩,因质纯层厚岩溶十分发育。

徐州最主要的构造当属徐宿弧形构造,表现为复式背斜与复式向斜的平行相间呈隔档式发育,复式背斜核部主要由新元古界地层组成,复式向斜核部则多由二叠系组成。与褶皱构造伴生的还有一系列横向和纵向断层,其中纵向压扭性逆断层更发育,断层大致与徐宿弧形构造平行,多倾向南东,横向断裂横切徐宿弧形构造,切断了区内所有地层,断裂带宽,且岩石破碎,胶结松散,常成为区域性控水构造(冯启言,1990;王桂梁等,1998)(图1)。

3 废黄河断裂带空间分布特征

废黄河断裂带是区内最大的断裂带,西北端始于徐宿弧形构造的西边界(夹河),东南止于张圩地区,沿断裂形成一系列串珠状展布的湖泊,延伸至东南边界处该现象逐渐消失,全长约75 km,整体隐伏于地表之下。断裂带延伸方向基本与废黄河展布方向一致,断裂两侧山体普遍出现断头现象,形成地貌上明显的断阶带,断裂带控制了废黄河的发育。废黄河断裂横切区内所有复式褶皱,以及在断裂两侧梁堂、褚兰两地,地层不连续,而且断裂北侧梁堂一带的地层相对向西移动明显,表现出左行走滑性质(陈丁等,2011;张鹏等,2014)。废黄河断裂带由3条大致平行的断裂组成,北支主干断裂走向约北70°西、倾向南西、视倾角约60°,南支断裂走向约北70°西、倾向北东、视倾角约60°,均为上盘下降、下盘上升的正断层,废黄河断裂总体上表现为地堑形式,北支主干断裂最大视断距7 m,南北支主干断裂最大视断距5 m,断裂宽度1~2 km,东南窄、西北较宽,呈发散状。第四纪以来为张性活动,断裂带内堆积洼地相对缓慢下降,而两侧低山丘陵继续抬升,在地貌上表现为负地形。断裂带内岩石破

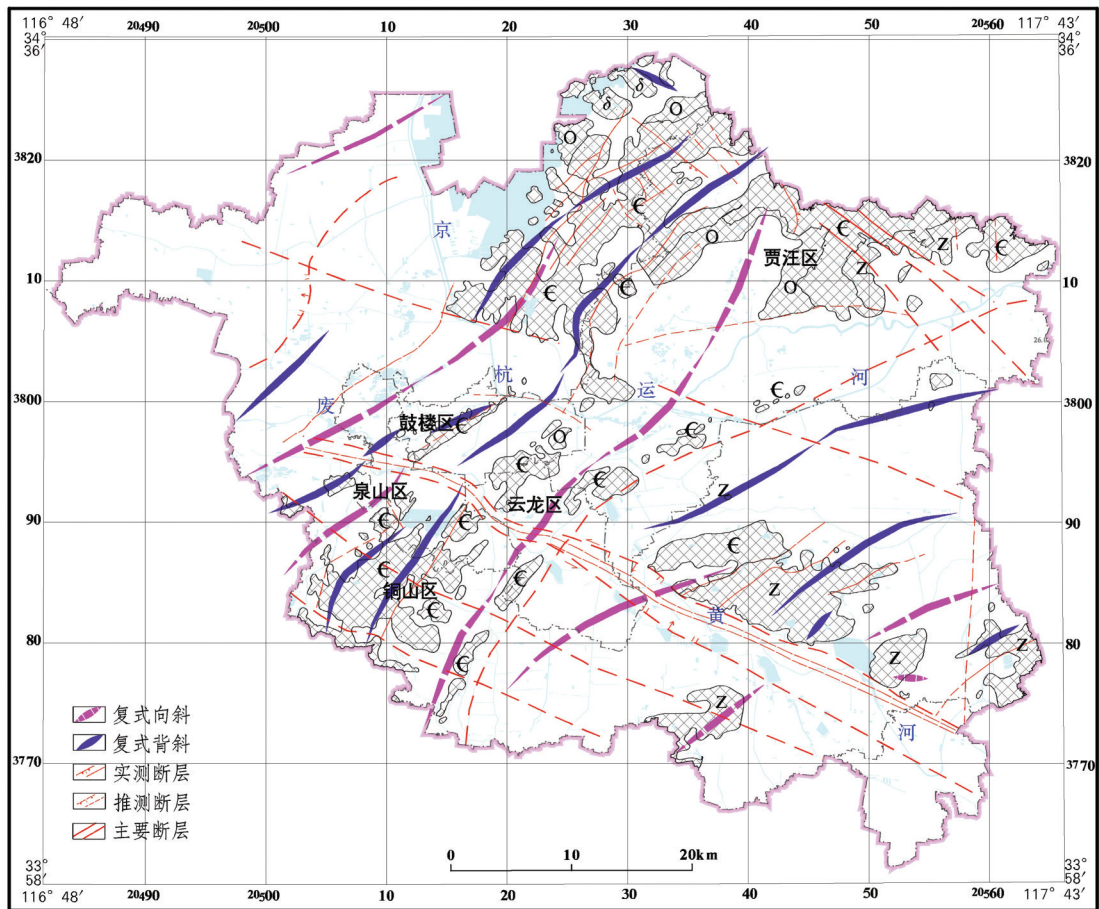


图1 徐州市区构造形迹简图
Fig.1 Geological structure in Xuzhou City

碎、岩溶强烈发育,形成了一条大规模的岩溶水强径流带,徐州市3个供水水源均位于该断裂带内。

4 岩溶塌陷概况及发育的地质模式

4.1 岩溶塌陷概况

徐州岩溶塌陷主要分布在城市中心区,塌陷始发于1986年5月27日的市溶剂厂,此后,在新生里、民安巷、五交化商场、开明市场、朝阳路和下洪村等地先后发生岩溶塌陷14起,共20个塌陷坑(表1),塌陷虽属小型,但由于塌陷区人口及建筑物密度大,危害严重,造成了4000多万元的重大的经济损失。从岩溶塌陷与废黄河断裂带的空间关系图(图2)可知,岩溶塌陷点显示出成群分布的特征,集中发生在新生街塌陷群和下洪村塌陷群。新生街塌陷群发育11个塌陷坑、下洪村陷群发育5个塌陷坑,且这些岩溶塌陷坑大多发育在断裂带内,介于

北支主干断裂与中间断裂之间。塌陷群基本呈线状分布,发育方向为北西向与废黄河断裂带展布方向一致,由此说明废黄河断裂带对岩溶塌陷有明显的控制作用。

4.2 岩溶塌陷发育的地质模式

根据松散沉积层与基岩地层的接触关系,岩石的透水性及“岩-土-水”相互作用,将徐州岩溶塌陷发育的地质模式概化为“单一透水型盖层”和“透-阻型盖层”(图3)。

“单一透水型盖层”模式其盖层为砂土单层结构,砂性土直接覆盖在岩溶发育的碳酸盐岩之上,形成水文地质“天窗”,主要分布在古泗水的河床内,是古泗水的活动使得先前覆盖在碳酸盐岩之上的老黏土被侵蚀后,被黄河带来的粉砂、粉土堆积所致。岩溶水开采加剧了孔隙水与岩溶水的联系与交替,当岩土界面处的实际水力梯度大于土体临

表1 徐州市岩溶塌陷地质灾害一览

Table 1 Karst collapse geological hazards in Xuzhou

时间	位置	塌坑形态及灾情
1986.05.27	溶剂厂西南角	塌坑呈圆形、直径13 m、深9 m,铁路路基下沉7.5cm,东陇海线运输中断22小时
1986.06.02	电业局宿舍	塌坑呈圆形、直径11 m、深0.5 m,南楼基础下沉20cm,三层楼房中部断裂
1992.04.12-13	新生街—民安巷一带	共8个塌陷坑,6个塌坑呈圆形,直径3~8 m不等,2个塌坑呈椭圆形,长轴NE向,最大长25 m、宽15m;塌陷群长190 m、宽110 m、长轴NW向,直接倒塌民房96户,房屋224间。500户被就近搬迁,造成的直接经济损失达3000万元
1992.10.10	民主北路五交化门前	塌坑呈圆形、直径5 m、深3 m,大树陷落坑内
1993.05.10	开明市场门前	塌坑呈圆形、直径3 m、深3 m
1994.08.27	朝阳村	塌坑呈椭圆形、长轴NW向,长5 m、宽4 m、深1 m
1997.07.17	新生街民安巷2	塌坑呈椭圆形、长轴NE向,长7 m、宽4 m、深3.5 m,倒塌民房6间
1997.07.24	新生街	塌坑呈圆形、直径5 m、深3 m,损坏民房1间
1998.08.16	朝阳村	塌坑呈椭圆形、长轴NW向,长5 m、宽4 m、深2 m,损坏民房4间
2000.05.01	下洪村	塌坑呈椭圆形、长轴NW向,长6 m、宽2 m、深3 m,损坏民房20间
2003.08.29	下洪村	塌坑呈圆形、直径1 m、深1.9 m
2006.07.10	下洪村	塌坑呈圆形、直径0.3 m、深0.2 m
2014.03.21	铜山柳新钮庄	塌坑呈圆形、直径2 m、深1.5 m,4月、6月再次塌陷

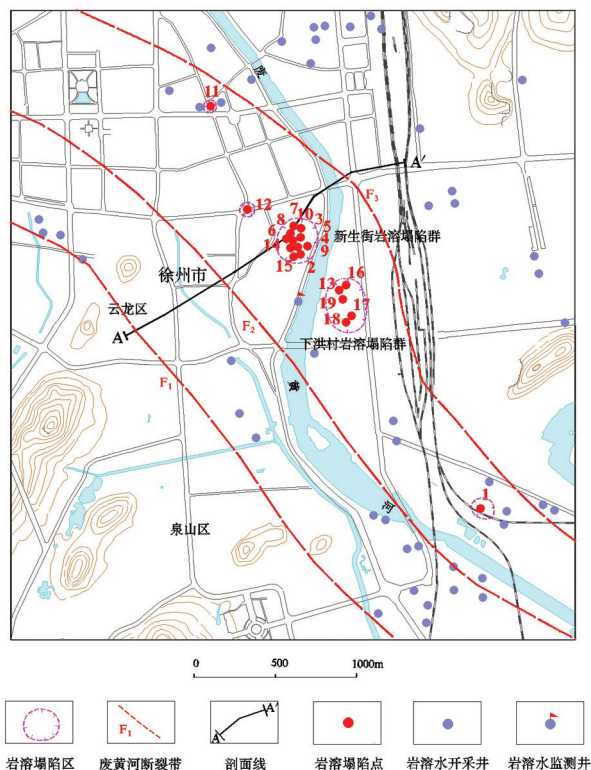


图2 徐州岩溶塌陷与废黄河断裂带空间关系图

Fig.2 The spatial relationship between karst collapses in Xuzhou and the old Yellow River fault zone

界水力梯度时,先前充填于岩溶洞隙中的泥沙及基岩面附近的土粒在水流的冲刷作用下不断被潜蚀

带走,使盖层土体下部逐渐形成土洞,随着土洞向上逐渐发展扩大,在孔隙水渗透压与土体自重作用下,产生渗透变形破坏,在降雨或火车震动等触发因素下塌陷。徐州地区该模式所形成的塌陷坑12个,占塌陷坑总数的60%。由于砂性土结构松散,内聚力和承载力较小,故地下形成的土洞体积及单个塌坑也较小。

“透-阻型盖层”模式其盖层为砂性土-黏性土双层结构,即黄河泛滥沉积的粉砂、粉土底部存在晚更新世沉积的黏性土,黏性土之下为岩溶发育的碳酸盐岩。由于碳酸盐岩界面与黏性土接触部位存在软化的饱水区,在岩溶水水位降至盖层以下时,潜蚀作用使软化的土粒带走而形成土洞,在土体自重应力及水力梯度渗透力作用下,土洞加速向上及侧壁发展,在降雨等触发因素下致塌,该模式所形成的塌陷坑8个,占塌陷坑总数的40%。

“单一-透水型盖层”塌陷的致塌模式为潜蚀-渗透变形-重力致塌,岩溶水开采是其主要诱因,废黄河水位的变化及降雨是其触发因素;透-阻型的塌陷的致塌模式吸蚀-剪切变形-重力致塌致塌模式,岩溶水开采是其主要诱因,触发因素为降雨。

5 废黄河断裂带对岩溶塌陷形成条件的控制作用

徐州岩溶塌陷的形成条件主要包括地质条件

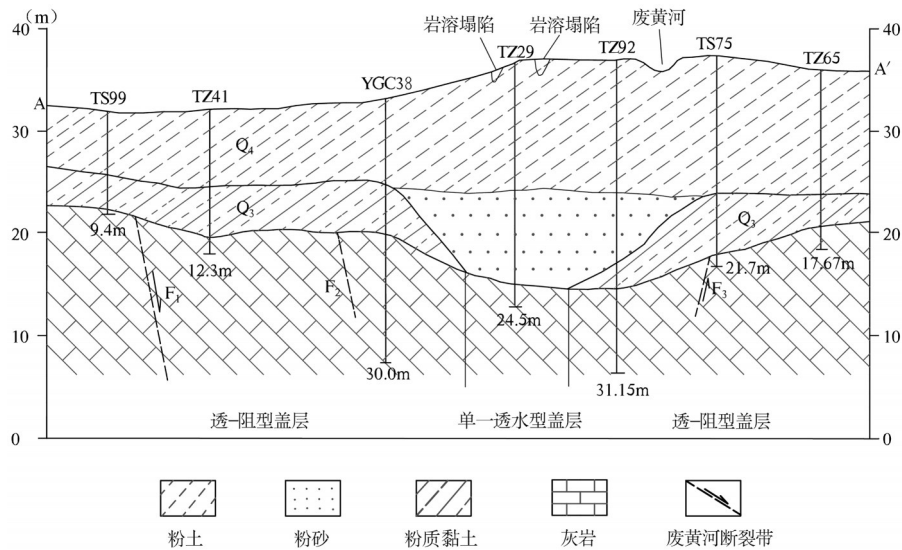


图3 徐州废黄河断裂带岩溶塌陷区环境地质结构剖面图

Fig.3 The environmental geological section in the collapse area of the old Yellow River fault zone

和水动力条件,地质条件主要指岩溶发育程度、上覆松散土层岩性结构,是岩溶塌陷的内因,地下水是岩溶塌陷物质迁移和能量转换的载体,是产生潜蚀、真空吸蚀、失托加载效应的动力条件。就徐州而言,岩溶发育程度、岩溶水的富水程度都受北西向张性或张扭性断裂带控制,即前述的废黄河断裂带、不老河断裂带和班井断裂带,而地堑式的废黄河断裂带又控制着晚更新世以来古河道走向,继而又控制上覆松散地层的沉积建造。

5.1 废黄河断裂带对岩溶发育的控制作用

岩溶发育是岩溶塌陷的基本条件,徐州地区寒武—奥陶系碳酸盐岩中的张夏组、崮山组—凤山组下段和肖县组—马家沟组等岩溶层组属全型连续状灰岩,最大面溶蚀率可达30%以上,有利于岩溶发育。张扭性的废黄河断裂带断面粗糙、开口较宽且胶结性差,所形成的破碎带及次级断层的裂隙十分发育,且断裂带附近发育有大规模“串珠状”的溶蚀洞穴,其发育带多与断层走向平行(胡明毅等,2014),为地表径流与地下水之间的交替转换以及化学组分迁移、松散碎屑物质运移等提供了流动通道,利于岩溶塌陷的形成。由废黄河断裂带及两侧5 km范围内93个水文地质钻孔线岩溶率对比(图4)可知,废黄河断裂带内钻孔线岩溶率明显高于废黄河断裂带两侧,高于断裂带外1倍以上。废黄河断裂带在地球物理探测资料上有明显的显示,并发育

有向上开口的溶洞(图5),据13条穿越废黄河断裂带和22条废黄河断裂带外的高密度电阻率法测线解译对比,废黄河断裂带内外岩溶率(岩溶破碎带宽度/基岩地层宽度)(表2)差距明显,多数地层岩溶率受废黄河断裂带影响,奥陶系马家沟组碳酸盐岩及寒武系张夏组碳酸盐岩受控显著。

据新生街塌陷群及下洪村塌陷群勘察钻孔揭露,废黄河断裂带内的奥陶系碳酸盐岩见洞率81.4%;线溶蚀率3.43%~75.60%,平均26.16%;寒武系碳酸盐岩见洞率66.7%,线溶蚀率2.40%~27.10%,平均11.75%。溶洞大多分布在基岩面之下50 m以浅(李后尧等,2003),钻孔钻遇最大溶洞高达42.39 m,1998年白云大夏施工时遇溶洞漏浆,单孔注入水泥400多吨,1996年徐州电业局大楼施工时钻孔坍塌(花修权等,2015),均是遇到较大溶洞所致。

5.2 废黄河断裂带对第四纪古河道的控制作用

根据历史记载和勘查资料的分析,晚更新世以来徐州地区发育过3条古河道:晚更新世古河道和全新世古泗水、古汴水河道。晚更新世古河道发源于山东,沿徐宿弧西侧进入徐州境内,城中心区则完全受控于废黄河断裂带,在废黄河断裂带形成的地堑式洼地内摆动;全新世泗水古河道基本继承了晚更新世古河道,全新世汴水古河道则沿废黄河断裂带由西向东径流,在塌陷区与泗水古河道汇合二

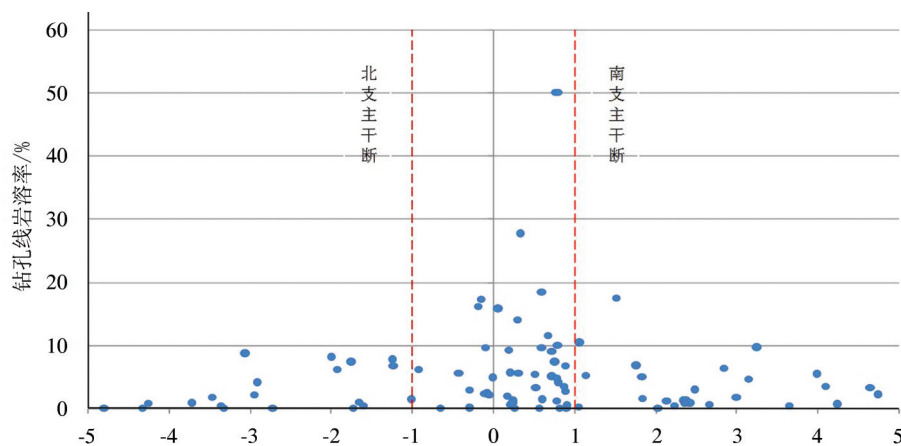


图4 断裂带内外钻孔线岩溶率对比图

Fig. 4 The correlation of linear karst rates inside and outside the fault zone

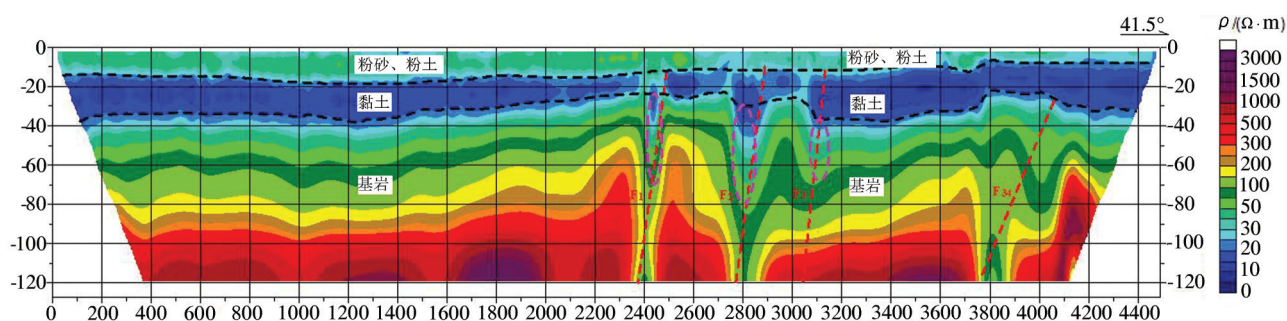


图5 废黄河断裂带物探解译图

Fig. 5 Geophysical prospecting interpretation of the old Yellow River fault zone

表2 废黄河断裂带内外岩溶率对比
Table 2 The correlation of rates of karstification inside and outside the old Yellow River fault zone

地层	断裂带内/%	断裂带外/%	
奥陶系	马家沟组	42.41	25.59
	三山子组	23.97	12.01
	炒米店组	17.06	10.67
寒武系	张夏组	39.85	24.23
	馒头组	4.18	6.02
震旦系	魏集组	13.44	12.92
	倪园组	6.20	8.39

为一,河道以侵蚀作用为主,早期沉积的黏性土及老黏性土遭受部分或全部侵蚀。黄河夺汴入泗后,汴水古河道及泗水古河道均被黄河入侵所带来的粉砂、粉土填满掩埋,使全新世古河道内形成两种土层结构:河流切割基岩地段,粉砂、粉土直接覆盖在碳酸盐岩之上,形成“单一透水型盖层”;未切割至基岩的其余河段,粉砂、粉土之下存在一定厚度

的老黏性土,形成“透-阻型盖层”,这些区域也正是徐州岩溶塌陷主要发生的区域。

据史书记载,新生街塌陷群至下洪村塌陷群一带,为徐州古泗水“三洪”之一的“百步洪”区域,河道狭窄、基岩裸露,黄河泛滥的粉砂、粉土覆盖后构成砂性土单层结构(图3)。对比废黄河断裂带与古河道展布特征(图6)可知,徐州岩溶塌陷均发生在废黄河断裂带与晚更新世及全新世古河道的重叠部位。

5.3 废黄河断裂带对岩溶水富水性的控制作用

徐州地区岩溶水赋存在纯碳酸盐岩中,包括寒武系中统张夏组、寒武系上统及奥陶系下-中统、震旦系淮河群等含水层。岩性为灰岩、白云质灰岩、白云岩,富水性不均匀,其富水性受地质构造控制。北西向张扭性的废黄河断裂带活动时代较晚,横切本区地层及纵向压性断裂和纵向节理裂隙,使不同时代含水层之间沿断裂破碎带发生较为密切

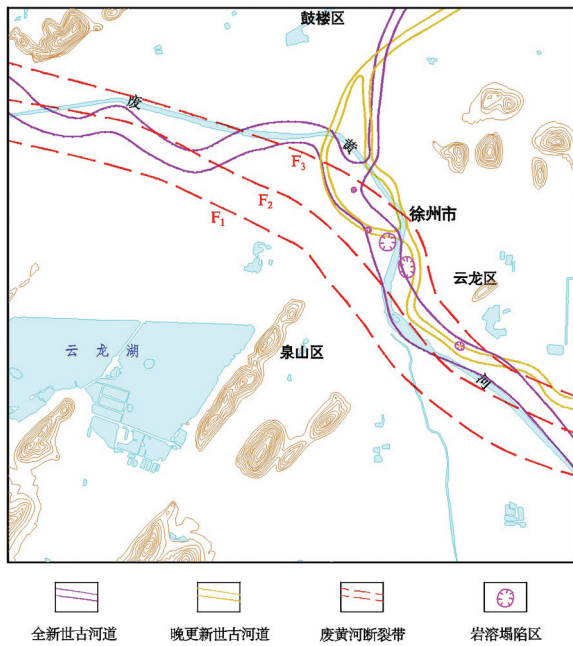


图6 黄河断裂带与古河道分布关系图
Fig.6 The diagram of the old Yellow River fault zone and the distribution of paleochannels

的水力联系,在断裂带附近“顺层渗流、穿层排泄”,从而构成地下水强径流带或富集带,徐州市七里沟、丁楼及张集供水水源地均位于该断裂带上。

据废黄河断裂带及两侧6 km内水文地质钻孔抽水试验资料统计,废黄河断裂带内寒武、奥陶及震旦系含水层,渗透系数普遍大于25 m/d,导水系数大于5000 m²/d(含水层厚以200 m计),最大渗透系

数达187.24 m/d,单孔出水量均大于1000 m³/d,最大出水量4679.86 m³/d,降深仅0.34 m;而断裂带外渗透系数普遍小于10 m/d,导水系数小于2000m²/d,单孔出水量低于500 m³/d,震旦系含水层则低于100 m³/d(表3)。

显然,废黄河断裂带及其伴生断裂对岩溶水富水性和导水性的这种控制作用,在形成有利于地下水开发利用的同时,也造成开采井相对集中。据调查,徐州市岩溶水开采于1941年,三眼供水井均位于废黄河断裂带内,年开采量7.00×10⁴m³,至1990年供水井达640眼,年开采量18290×10⁴m³,有近160眼供水井在废黄河断裂带内。其中,岩溶塌陷区域49眼供水井有26眼在废黄河断裂带内(图2)。

徐州废黄河断裂带虽然控制了岩溶塌陷发生的地质条件,但形成岩溶塌陷的真正诱导因素应为岩溶水的超量开采。据新生街塌陷群监测资料,岩溶水自1985年后降到含水层顶板以下,并长期在基岩面升降波动,使得灰岩中的洞隙受到岩溶水流的冲刷、淘空、渗透潜蚀以及真空吸蚀等作用,造成上覆古河道的砂砾、粉砂层的失稳形成土洞,暴雨后岩溶水水位骤升引起岩溶塌陷的发生,即岩溶塌陷集中发生于地下水动态出现异常波动时段(黄健民等,2015)。塌陷区监测井水位与塌陷发生时间对应关系(图7)可知,新生街塌陷群的三次塌陷是发生在水位降至基岩面下回升或骤升的过程中,水位下降渗流潜蚀作用增强,形成土洞并发展,水位回升或骤升触发塌陷发生。显然,岩溶水水位低于

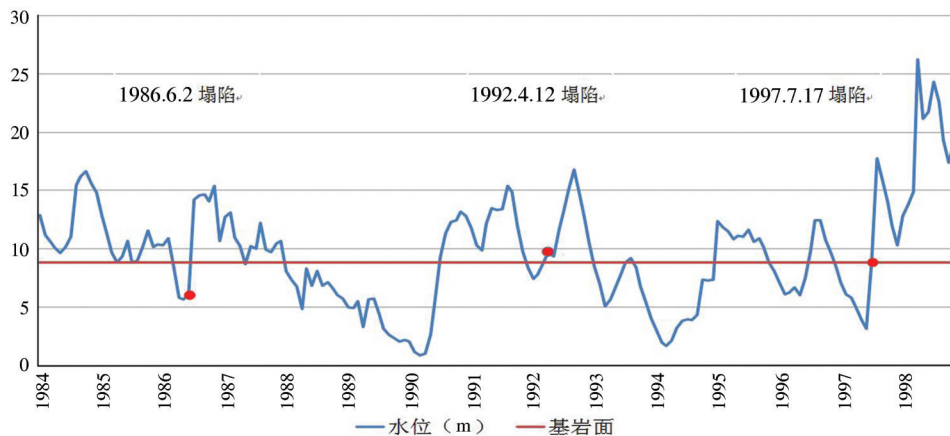


图7 塌陷区监测井水位与塌陷的时间关系图
Fig.7 Duration curve of monitoring well in collapse region (1984 to 1998)

表3 断裂带内外岩溶水富水性统计对比
Table 3 The correlation of water abundances inside and outside the fault zone

孔号	相对位置	涌水量 /(m ³ /d)	降深/m	渗透系数 /(m/d)	导水系数 /(m ² /d)	含水 地层
6	废黄河	49.76	4.16	36.00	7200	O
15	断裂带	146.07	9.42	4.07	814	C
21	南侧	162.69	4.53	3.44	688	C
22		28.93	10.41	1.12	224	C
23		547.65	4.46	18.58	3716	O
31		34.21	15.86			C
33		267.76	3.08	3.63	726	O
35		86.4	6.47	2.05	410	O
77		309.92	8.35			C
96		5.88	1.88	0.16	32	Z
89		39.15	12.4	4.94	988	Z
105		2.7	39.78			Z
102		24.37	24.6			Z
3	废黄河	1427.65	0.38			O
8	断裂带内	3852	0.1	55.12	11024	O
25		895.66	1.31	15.36	3072	O
24		666.93	1.26	10.54	2108	C
36		3910.4	0.35	68.77	13754	O
38		4679.86	0.34	98.51	19702	Z
53		1092.1	0.77	47.04	9408	C
54		988.79	1.03	32.14	6428	Z
41		2152.22	0.55	41.77	8354	Z
47		1457.2	0.67			Z
42		2016.06	0.61	16.26	3252	Z
1	废黄河	446.98	1.35	12.61	2522	O
4	断裂带	16.17	3.69	2.53	506	C
12	北侧	32.21	0.98	3.15	630	O
13		42.3	0.55	42.17	8434	O
20		175.46	6.52	12.07	2414	C
32		87.8	8.2	7.85	1570	C
103		10.45	21.03	0.41	82	Z

基岩顶板这一临界条件出现后,失托加荷效应、真空负压作用的发生,潜蚀效应加强,岩溶塌陷发生概率加大。因此,岩溶水可将岩溶水位在基岩面以下出现拐点后回弹作为岩溶塌陷的发育判据。

6 结 论

(1)地质构造为岩溶发育及地下水活动提供必要条件,并通过对岩溶及地下水活动的控制作用而

对塌陷产生影响。张性的废黄河断裂带所形成的破碎带及次级断层的裂隙发育,并形成了开口向上的岩溶洞隙,为岩溶地下水运移提供流动通道,为上覆土层的塌落提供所需的空間。

(2)地堑式的废黄河断裂带形成了负地形,为古河道提供了径流途径,河流的侵蚀与堆积作用,使古河道区域形成“单-透水型盖层”和“透-阻型盖层”的地质模式,其盖层为砂土单层结构和砂性土-黏性土双层结构,其中,砂性土结构松散,易流失形成空洞。

(3)岩溶强烈发育的废黄河断裂带形成了岩溶水强径流带或富集带,构成徐州地区重要的供水水源地,其盖层结构使地表水、潜水、岩溶水直接相通,为过量抽水发生岩溶塌陷提供了重要水动力条件。当岩溶水水位下降并长期在古河道底板附近升降波动时,古河道砂性土受水流的冲刷、淘空、渗透潜蚀以及真空吸蚀等作用,失稳而发生塌陷。

(4)岩溶塌陷是徐州最严重的地质灾害,灾害的隐蔽性、突发性、规模不确定性和继发性,给城市规划建设带来了困难。

References

- Chen Ding, Zhang Jingfa, Zhu Lu, Jiang Wenliang, Lu Xiaocui, Liu Jianda, Li Limei, Zhang Peng. 2011. Spatial distribution and activity of Xuzhou Fei Huanghe fault zone[J]. *Seismology and Geology*, 33(1): 67-78 (in Chinese with English abstract).
- Feng Qiyang. 1990. Arc structure and groundwater in Xuzhou area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 19(2):87-91 (in Chinese with English abstract).
- Han Baoping, Zhou Donglai, Zhao Lin, Zhang Meng, Ma Qingyun. 1994. Environmental geological problems during development of karst water in Xuzhou city[J]. *Carsologica Sinica*, 13(2): 107-115 (in Chinese with English abstract).
- Han Baoping, Ma Jinrong, Pei Zongping, Yu Zhiwei. 1996. Study on mechanism of karst collapses in Xuzhou city[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 25(3): 33-37 (in Chinese with English abstract).
- Hua Xiuquan, Huang Jingjun, Wei Yongyao, Miao Shixian, Xu Shiyin, Jiang Su, Zhang Li. 2015. Demand analysis and key problems of the urban geological survey in Xuzhou[J]. *Journal of Geology*, 39(2): 322-328 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jianmin, Deng Xiongwen. 2015. The relationship between groundwater and ground collapse and land subsidence in Jinshazhou, Guangzhou City[J]. *Geology in China*, 42(1): 300-308

- (in Chinese with English abstract).
- HuMingyi, Fu Xiaoshu, Cai Quansheng, Yang Wei, Zhu Wenping. 2014. Characteristics and genetic model of karst reservoirs of ordovician Yingshan–Yijianfang formation in Halahatang area, northern Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 41(5): 1476–1486(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanning, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2017. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Geology in China*, 44(6): 1045–1061(in Chinese with English abstract).
- Li Houyao, Feng Qiyan. 2003. Typical urban geological hazards in Jiangsu Province[J]. *China University of Mining and Technology*, 12(1): 67–70 (in Chinese with English abstract).
- Lin Liangjun, Li Yamin, Ge Weiya, Hu Qiuyun, Li Xiaozhao, Li Yun, Meng Hui, Zhang Lizhong, Yang Jianfeng. 2017. General ideas for urban geological survey in China and key theory and techniques [J]. *Geology in China*, 44(6): 1086–1101(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiliang, Jiang Bo, Cao Daiyong, Zou Hai, Jin Weijun. 1998. On the Xuzhou– Suzhou arcuate duplex– imbricate fan thrust system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(3):228–236 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yongyao, Sun Shulin, Huang Jingjun, Jiang Su, Miao Shixian. 2015. Spatial–temporal distribution and causes of karst collapse in the Xuzhou area[J]. *Carsologica Sinica*, 34(1): 52–57 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Caixia, Liu Yixuan . 2009. Relation of surface collapse and karst water exploitation in urban area of Xuzhou city[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 20(1): 80–82 (in Chinese with English abstract).
- Xing Xue, Zhou Dan, Luo Yue . 2015. Study on geological disasters of karst collapse in Xuzhou and its protection measures[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 25(4): 51–58 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peng, Li Limei, Xu Hangang, Liu Jianda, Li Jinliang, Gu Qiping, Wang Jinyan, Jiang Xin. 2014. Identification of fault activity in “urban active fault exploration and seismic risk assessment in Xuzhou city” [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 9(4): 801–812 (in Chinese with English abstract).
- 陈丁, 张景发, 朱鲁, 姜文亮, 路晓翠, 刘建达, 李丽梅, 张鹏. 2011. 徐州废黄河断裂带的空间展布与活动性研究[J]. *地震地质*, 33(1): 67–78.
- 冯启言. 1990. 徐州弧形构造与地下水[J]. *中国矿业大学学报*, 19(2): 87–91.
- 韩宝平, 周东来, 赵林, 张猛, 马青云. 1994. 徐州市岩溶水开发过程中的环境地质问题[J]. *中国岩溶*, 13(2): 107–115.
- 韩宝平, 马金荣, 裴宗平, 余志伟. 1996. 徐州市区岩溶塌陷机理研究[J]. *中国矿业大学学报*, 25(3): 33–37.
- 花修权, 黄敬军, 魏永耀, 缪世贤, 徐士银, 姜素, 张丽. 2015. 江苏徐州城市地质调查需求分析及关键问题[J]. *地质学刊*, 39(2): 322–328.
- 黄建民, 邓雄文, 胡让全. 2015. 广州金沙洲岩溶区地下水位变化与地面塌陷及地面沉降关系探讨[J]. *中国地质*, 42(1): 300–308.
- 胡明毅, 付晓树, 蔡全升, 杨巍, 朱文平. 2014. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系鹰山组–一间房组岩溶储层特征及成因模式[J]. *中国地质*, 41(5): 1476–1486.
- 姜月华, 林良俊, 陈立德, 倪化勇, 葛伟亚, 成杭新, 翟刚毅, 王贵玲, 班宜忠, 李媛, 雷明堂, 谭成轩, 苏晶文, 周权平, 张泰丽, 李云, 刘红樱, 彭柯, 王寒梅. 2017. 长江经济带资源环境条件与重大地质问题[J]. *中国地质*, 44(6): 1045–1061.
- 李后尧, 冯启言. 2003. 江苏典型的城市地质灾害与防治[J]. *中国矿业*, 12(1): 67–70.
- 林良俊, 李亚民, 葛伟亚, 胡秋韵, 李晓昭, 李云, 孟晖, 张礼中, 杨建锋. 2017. 中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J]. *中国地质*, 44(6):1086–1101.
- 王桂梁, 姜波, 曹代勇, 邹海, 金维浚. 1998. 徐州–宿州弧形双冲–叠瓦扇逆冲断层系统[J]. *地质学报*, 72(3): 228–236.
- 魏永耀, 孙树林, 黄敬军, 姜素, 缪世贤. 2015. 徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J]. *中国岩溶*, 34(1): 52–57.
- 熊彩霞, 刘沂轩. 2009. 徐州市区地面塌陷与岩溶水开采关系研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 20(1): 80–82.
- 邢雪, 周丹, 罗跃. 2015. 江苏徐州岩溶塌陷及其防治对策[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 25(4): 51–58.
- 张鹏, 李丽梅, 许汉刚, 刘建达, 李金良, 顾勤平, 王金艳, 蒋新. 2014. 徐州活动断层探测项目主要断层活动性研究[J]. *震灾防御技术*, 9(4): 801–812.

附中文参考文献