

魏永耀,孙树林,黄敬军,等.徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J].中国岩溶,2015,34(1):52-57  
DOI:10.11932/karst20150107

## 徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析

魏永耀<sup>1,2,3</sup>,孙树林<sup>4</sup>,黄敬军<sup>1,3</sup>,姜素<sup>1,3</sup>,缪世贤<sup>1,3</sup>

(1.江苏省地质调查研究院,江苏南京210049;2.河海大学,土木与交通学院,江苏南京210098;  
3.国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室,江苏南京210049;4.河海大学,地球科学与工程学院,江苏南京210098)

**摘要:**文章通过对以往岩溶地面塌陷勘查工作成果进行系统梳理,揭示了徐州地区裸露型岩溶和覆盖型岩溶的分布规律及历史上岩溶塌陷的时空分布特征,发现塌陷的分布具有明显的规律性:(1)塌陷受废黄河断裂带控制,离废黄河断裂带越近岩溶发育越强烈,离废黄河断裂带较远的部位岩溶发育明显减弱;(2)塌陷主要分布于浅部岩溶强烈发育地段的奥陶系灰岩中,少数分布于寒武系灰岩之中;(3)塌陷集中分布在古河道形成的,砂性土单层结构地段,少数分布在砂性土—黏性土双层结构地段;(4)塌陷全部位于岩溶水开采降落漏斗内。结合岩溶塌陷的时间与地下水的动态活动过程之间的关系,全面分析地面塌陷形成的原因,提出了古河道与废黄河断裂带的重叠部位为岩溶地面塌陷发生的有利部位,但最终发生地面塌陷则是人类工程活动过程引起岩溶水位剧烈波动——大幅、快速下降的结果。该研究成果可为徐州市今后进一步防治岩溶塌陷地质灾害提供地质科学依据,有重要的实用价值。

**关键词:**裸露型岩溶;覆盖型岩溶;岩溶塌陷;时空分布;规律性

**中图分类号:**P642.26 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2015)01-0052-06

### 0 引言

由于人类活动而诱发的岩溶塌陷等地质灾害日益突出,严重妨碍了当地的经济的发展<sup>[1-4]</sup>。针对北方典型岩溶城市徐州的有关岩溶地面塌陷的研究报道不多,也取得一些有意义的成果,但是研究工作起步较晚,原始数据采集难度大,且分布不均匀,许多研究工作是针对某一具体工程场地,缺乏系统全面的研究成果<sup>[5-9]</sup>,因此对徐州地区岩溶塌陷规律、分布情况以及诱发因素中的主控因素和相互关系尚不清楚。

笔者借助“徐州城市地质调查”、中国地质调查局“徐州地区岩溶塌陷调查”项目所收集与整理的上千份具有代表性的资料及本人多年工作经验来研究徐州地区岩溶塌陷的时空分布特征及岩溶塌陷的成因机制。

### 1 徐州岩溶发育特征

徐州是江苏省唯一将岩溶地下水作为城市供水的城市,由于对岩溶地下水的长期不合理开采,频发岩溶塌陷。区内岩溶发育于寒武系下统猴家山组—徐庄组、中统张夏组、上统崮山组—凤山组;奥陶系下统肖县组—马家沟组为主。

寒武系下统猴家山组—徐庄组属滨浅海相碎屑岩碳酸盐岩沉积,岩性以互层状灰岩、页岩为主,顶部夹砂岩,灰岩厚度占地层厚度的60%以上,灰岩岩性包括厚层豹皮状灰岩、鲕状灰岩、生物碎屑灰岩及薄层泥质灰岩;中统张夏组是一套正常浅海相的碳酸盐岩沉积,岩性为灰色厚层—巨厚层状鲕状灰岩,岩石具粒屑结构,粒屑之间充填物以方解石为主;上统崮山组—凤山组属滨浅海相碳酸盐岩沉积,岩性为灰色泥晶灰岩、鲕状灰岩夹竹叶状灰岩。奥陶系下统肖县组—马家沟组为一套滨浅海相碳酸盐岩沉积,岩性以灰黄、深紫灰色灰岩、角砾状灰岩为主,夹白云质灰岩、白云岩。

基金项目:徐州城市地质调查、徐州地区岩溶塌陷调查(12120114022001)资助

第一作者简介:魏永耀(1979—),男,博士研究生,主要从事工程地质及水文地质领域的研究。E-mail:weiyongyao@163.com

收稿日期:2014-07-25

按出露条件以裸露型和覆盖型岩溶为主(见图 1)。裸露型岩溶主要分布在岩溶丘陵区,标高在 70 m 以上地段,岩溶发育弱,主要是一些溶痕;标高在 70m 以下地段,岩溶发育强,特别是山麓缓坡地带及被第四系覆盖的古岩溶洼地,地表水、地下水汇集条件好,岩石表面溶沟、溶槽及地下溶隙、溶洞均很发育。覆盖型岩溶分布于第四系覆盖区,埋藏深度 20~30m 之间,最大 40m 左右。通过对历史上发生过岩溶塌陷的地区取样分析,对隐伏岩溶上的覆盖层(粉砂、粉土、黏性土)物理力学参数进行统计(见表

1),可以看出覆盖层天然含水量( $w$ )较高、孔隙比( $e$ )大、液性指数( $IL$ )低等特点,易诱发粉砂、粉土(以砂质粉土为主)饱水振动液化,易于流失而产生塌陷;而发生剪切破坏时的抗剪强度指标上,内摩擦角( $C$ )、粘聚力( $\varphi$ )低、压缩性( $\alpha_{0.1-0.2}$ 、 $Es_{0.1-0.2}$ )中等等特点。由于基岩裂隙发育,上部土层将形成一定大小的土洞,当土洞上部土层的承受力大于自重应力时不发生塌陷;当土洞或溶洞继续扩大时,上部土层的自重力及外部荷载超过土层所能承受的抗剪强度后,将形成整体性地面塌陷。

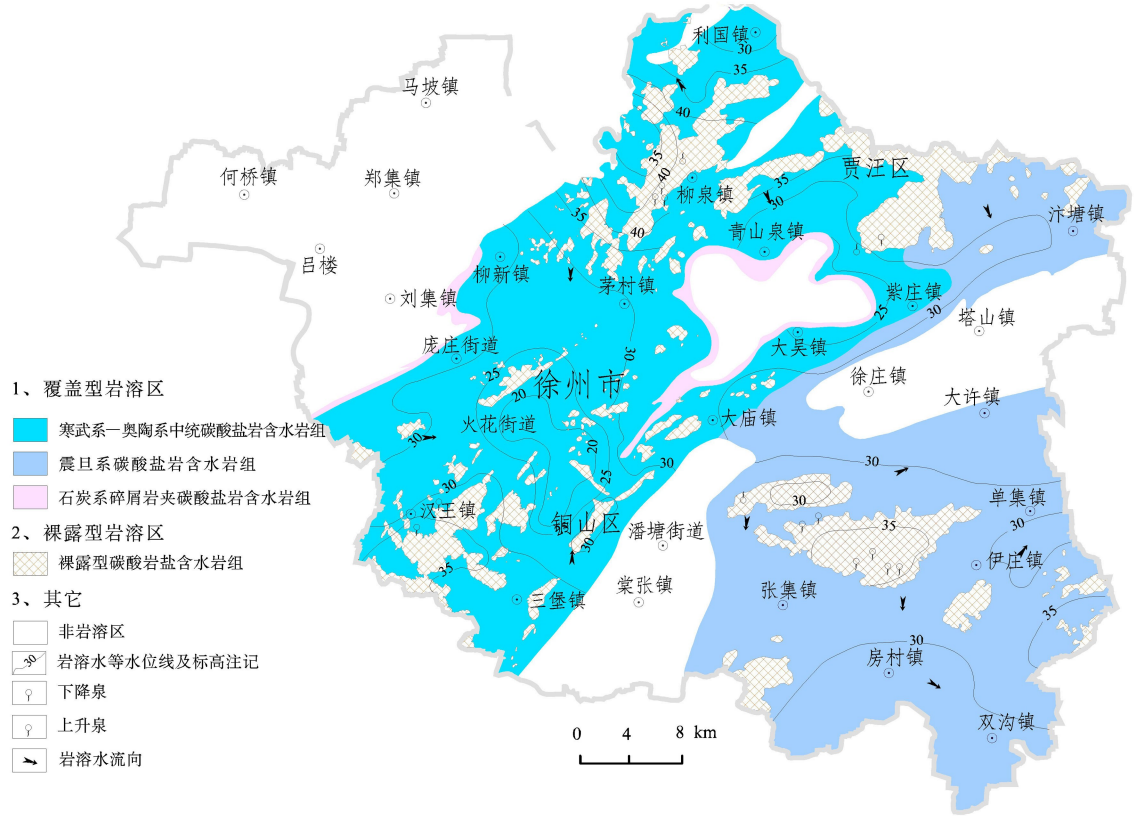


图 1 徐州岩溶水文地质略图  
Fig. 1 Simplified map of karst hydrogeology in Xuzhou city

表 1 塌陷区粉砂、粉土、黏性土物理力学性质指标(平均值)统计表

Table 1 Physical properties (average values) of silt, silt loam and clay in collapsed areas

| 名称  | 含水量( $w$ )<br>/% | 孔隙比<br>( $e$ ) | 液性指数<br>( $IL$ ) | 压缩系数<br>( $\alpha_{0.1-0.2}$ )<br>/ Mpa-1 | 压缩模量<br>( $Es_{0.1-0.2}$ )<br>/ Mpa | 内摩擦角<br>( $C$ )<br>/ Kpa | 凝聚力<br>$\varphi/0$ | 渗透系数( $K$ )<br>/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|-----|------------------|----------------|------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
| 粉砂  | 31.3             | 0.89           | 0.78             | 0.14                                      | 11.3                                |                          |                    | $1.35 \times 10^{-3}$                            |
| 粉土  | 27.7             | 0.79           | 0.89             | 0.21                                      | 10.4                                | 13                       | 26.6               | $1.6 \times 10^{-4}$                             |
| 黏性土 | 31.8             | 0.89           | 0.64             | 0.41                                      | 4.9                                 | 56                       | 13.9               |                                                  |

根据徐州地区塌陷处的土层结构类型,可归纳为两种地层模式:砂性土单层结构模式和砂性土—老黏

土双层结构模式。其中在砂性土单层结构模式中,土层岩性均为  $Q_4$  砂性土—粉砂、粉土,直接覆盖在岩溶

强烈发育的碳酸盐岩之上,厚度在 17~23 m 之间。这种土层结构是全新世古河道内碳酸盐岩之上老黏土被侵蚀掉后,黄河带来的粉砂、粉土堆积而形成。由于赋存在粉砂、粉土中的孔隙水与岩溶水之间缺失隔水层,孔隙水水位又始终高于岩溶水水位,两者高差 1~13 m,所以在水位差的作用下,孔隙水下渗补给岩溶水,当达到一定的临界渗透压力时,砂性土便产生渗透变形向岩溶洞隙内流失而产生土洞和塌陷。据研究发现,该模式占区内塌陷坑总数的 63% 左右。

## 2 岩溶塌陷时空分布规律研究

据统计,徐州自 1986 年以来先后发生 12 起岩溶地面塌陷事件,形成塌陷坑 17 个(见表 2),波及面积达 3 万多  $\text{m}^2$ ,造成了 4 000 多万元的重大经济损失。笔者对以往岩溶地面塌陷勘查工作成果进行系统梳理,发现塌陷的分布具有明显的规律性。

表 2 岩溶地面塌陷统计表  
Table 2 Statistics of karst ground collapse

| 序号 | 发生时间        | 位置          | 深度(m) | 序号 | 发生时间         | 位置            | 深度(m) |
|----|-------------|-------------|-------|----|--------------|---------------|-------|
| 1  | 1986. 5. 27 | 溶剂厂西南角      | 9     | 10 | 1992. 4. 13  | 二轻幼儿园对面       | 1. 5  |
| 2  | 1986. 6. 2  | 电业局宿舍       | 0. 5  | 11 | 1992. 10. 10 | 民主北路五交化门前     | 3     |
| 3  | 1992. 4. 12 | 新生街民安一巷 3#  | 3     | 12 | 1993. 5. 10  | 开明市场门前        | 3     |
| 4  | 1992. 4. 12 | 新生街 128#    | 4. 5  | 13 | 1994. 8. 27  | 朝阳村           | 1     |
| 5  | 1992. 4. 13 | 新生街民安一巷 2#  | 1. 5  | 14 | 1997. 7. 17  | 新生街民安巷 28、29# | 3. 5  |
| 6  | 1992. 4. 13 | 新生街民安二巷 28# | 3     | 15 | 1997. 7. 24  | 新生街 67# 门前    | 3     |
| 7  | 1992. 4. 13 | 新生街民安一巷 19# | 1. 5  | 16 | 1998. 8. 12  | 朝阳村 29#       | 2     |
| 8  | 1992. 4. 13 | 新生街民安二巷 20# | 2. 5  | 17 | 2000. 5. 1   | 下洪村 141~143#  | 3     |
| 9  | 1992. 4. 13 | 新生街 98#     | 2. 5  |    |              |               |       |

### 2.1 塌陷受废黄河断裂带控制

废黄河断裂带是本区控制岩溶发育的主要构造,废黄河断裂自西向东穿越徐州市区,横向切割了不同时代的地层,次级断层较多,断裂带内岩石破碎,裂隙发育、张开性好,透水性强,形成了一条大规模的岩溶水强径流带。以往发生的 17 个塌陷坑,全部位于该断裂带上(见图 2)。同时根据以往的钻孔资料发现,离废黄河断裂带越近岩溶发育越强烈,离废黄河断裂带较远的部位岩溶发育明显减弱。

### 2.2 塌陷分布于浅部岩溶强烈发育地段

岩溶塌陷主要分布在奥陶系灰岩上,少数分布于寒武系灰岩之上。区内下伏寒武系—奥陶系碳酸盐岩中,寒武系张夏组、崮山组、长山组、凤山组和奥陶系肖县组、马家沟组等岩溶层组有利于岩溶发育。特别是废黄河断裂带中,岩层次级断层及裂隙十分发育,形成了大面积的岩溶强烈发育区,浅部岩溶尤其发育。根据钻探资料,各地层岩溶发育统计见表 3。从表中可以看出上述几个岩溶层组中遇洞率达 47.0%~81.4%,线溶蚀率 1.1%~26.2%,溶洞最大高度达 40 m 左右。地表岩溶面积溶蚀率和钻孔中统计的线溶蚀率明显可以看出奥陶系岩溶比寒武

系岩溶发育。同时在塌陷点附近钻孔浅部都遇有溶洞,多无充填或少量充填,钻孔钻至基岩面之下时大量漏水。浅地震资料也反映,塌陷点及附近基岩面存在岩溶强烈发育的基岩破碎带。岩溶洞、裂隙为岩溶地下水和土颗粒提供了良好的运移通道和贮存空间,塌陷的产生与浅部岩溶强烈发育并存在开口洞隙密切相关。

### 2.3 塌陷集中分布在古河道内

在黄河改道徐州之前,有两条河流流经徐州,即古泗水和古汴水。泗水从北部入境,经蔺山村南大致沿着运河向南进入市区,汴水从西部安徽入境,泗水、汴水在市区三中—文化宫一带汇合,向南经新生街、溶剂厂向东南流出市区(见图 2)。古河道的活动使得先前覆盖在碳酸盐岩之上的老黏土被侵蚀,并将新生街一带的老黏土侵蚀殆尽。古河道被后来黄河带来的粉砂、粉土填满覆盖,形成两种土层结构:砂性土单层结构和砂性土—老黏性土双层结构。塌陷主要分布在砂性土单层结构地段,少数分布在砂性土—黏性土双层结构地段。由此可见,古河道为岩溶塌陷的形成创造了有利的地质结构条件,这是塌陷点全部分布在古河道内的最主要原因。

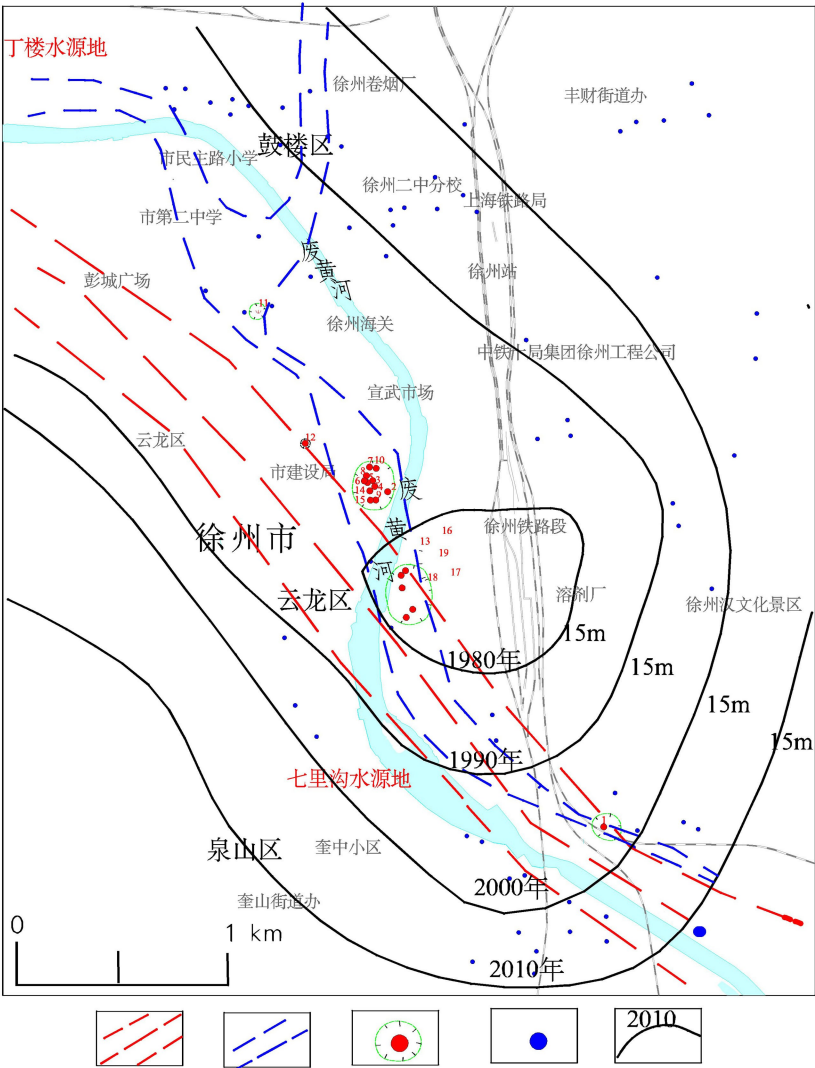


图 2 岩溶塌陷与地下水降落漏斗扩展过程示意图

Fig. 2 Sketch showing Karst collapse and spread process of the underground water drawdown funnel

1. 废黄河 2. 古河道 3. 塌陷点(区) 4. 岩溶水开采井 5. 15 m 等水位线

表 3 不同岩溶层组岩溶发育程度统计表

Table3 Statistics of karst development degrees of various karst beds

| 地层                   | 地表岩溶统计 |          |       |      | 钻孔岩溶统计 |      |         |     |      |
|----------------------|--------|----------|-------|------|--------|------|---------|-----|------|
|                      | 统计点数   | 面积溶蚀率(%) |       |      | 统计点数   | 见洞率  | 线溶蚀率(%) |     |      |
|                      |        | 大值       | 小值    | 均值   |        |      | 大值      | 小值  | 均值   |
| C <sub>2-3</sub>     |        |          |       |      | 3      | 33.3 |         |     |      |
| O <sub>2g</sub>      |        |          |       |      | 4      | 50.0 | 19.8    | 0   | 9.9  |
| O <sub>1x-m</sub>    | 8      | 77.6     | 17.47 | 38.0 | 54     | 81.4 | 75.6    | 3.4 | 26.2 |
| Є <sub>2f2-02j</sub> | 5      | 16.5     | 8.7   | 14.1 | 13     | 30.7 | 11.7    | 6.0 | 8.9  |
| Є <sub>2g-2f1</sub>  | 2      | 38.5     | 12.3  | 24.4 | 17     | 47.0 | 27.1    | 2.4 | 10.3 |
| Є <sub>1z</sub>      | 25     | 72.9     | 11.8  | 36.4 | 25     | 80   | 18.7    | 7.7 | 13.2 |
| Є <sub>1h-2x</sub>   | 4      | 47.0     | 0.4   | 17.6 | 17     | 41.2 |         |     | 1.1  |

## 2.4 塌陷全部位于岩溶水开采降落漏斗内

以上塌陷地段均属于七里沟水源地的强富水地段(废黄河断裂带),该水源地于 1945 年开发利用,在 1976 年以前,开采量比较小,岩溶水水位下降不明显,覆盖区岩溶水水位标高一般不超过 18.5m,常年保持承压状态。1976 年以后,市区开采井迅速增加,开采量不断加大,岩溶水水位逐年下降,逐渐形成了区域性开采降落漏斗。1980 年,降落漏斗主要在徐州铁路以西的溶剂厂一带,面积约 3.5 km<sup>2</sup>,漏斗中心水位标高 17.6 m;1985 年漏斗面积达 39.5 km<sup>2</sup>,漏斗中心水位标高 3.65 m;1989 年漏斗面积扩展到 66.8 km<sup>2</sup>,漏斗中心水位标高 0.68 m(图 2)。此后,漏斗中心水位下降速率趋缓,但漏斗仍在向外扩展。塌陷主要发生在早期的漏斗中心地带。

虽然地面塌陷的产生,与特定的水文地质环境有一定关系,但形成地面塌陷的真正诱导因素应为地下水的过量开采,据水位观测资料,该水位降落漏斗中心部位的裂隙岩溶水水位自 80 年代初期起就一直在其含水层顶板附近波动,这就使得上覆土体不断的产生失托、渗透侵蚀、负压吸蚀、触动液化、水位波动解散,溶蚀等多种水力学效应,从而引起土体平衡破坏,形成土洞,并最终导致塌陷的产生。

## 3 塌陷时间与地下水动态过程关系

笔者对 2000 年以前所发生的典型岩溶塌陷进行

分析,从表 2 中可发现,徐州市岩溶地面塌陷大部分发生在当年的雨水较少的 4—6 月,少部分发生在 7—8 月雨季,这一规律在和平桥水厂(基岩面标高 10.5~11.2 m)附近的岩溶塌陷中反映更为明显(图 3)。部分发生在雨季的岩溶地面塌陷,往往是土洞的滞后塌陷。

在旱季,岩溶地下水资源开采量远大于补给量,依靠消耗地下水储存量来维持开采,岩溶地下水位持续快速下降,第四系土层孔隙水向下渗流补给岩溶水的作用增强,在集中渗流点(岩溶管道开口、裂缝)附近,作用于上覆土层的水力坡度超过了土体发生渗透破坏的临界水力坡度,土体发生渗透变形破坏,地下水位下降速度、幅度越大,作用于土体的水力坡度越大。第四系底部土体类型不同,渗透变形的类型也不同,对于非黏性土,渗透变形以潜蚀为主;对于黏性土,渗透变形以流土为主。同时岩溶水位下降速度过快,第四系孔隙水(气)来不及补给岩溶含水层,在基岩面附近的岩溶管道裂隙系统中,就会产生负压,最大负压值可以达到相当于岩溶水位下降幅度的水柱高度。为了达到新的压力平衡,当负压的出现时,将会加速土层中的孔隙水(气)向下补给岩溶含水层,提高在集中渗流点(岩溶管道开口、裂缝)附近作用于上覆土层的水力坡度,当水力坡度超过了土体发生渗透破坏的临界水力坡度,土体发生渗透变形破坏。即岩溶塌陷与岩溶地下水资源的动态过程有明显的相关关系。

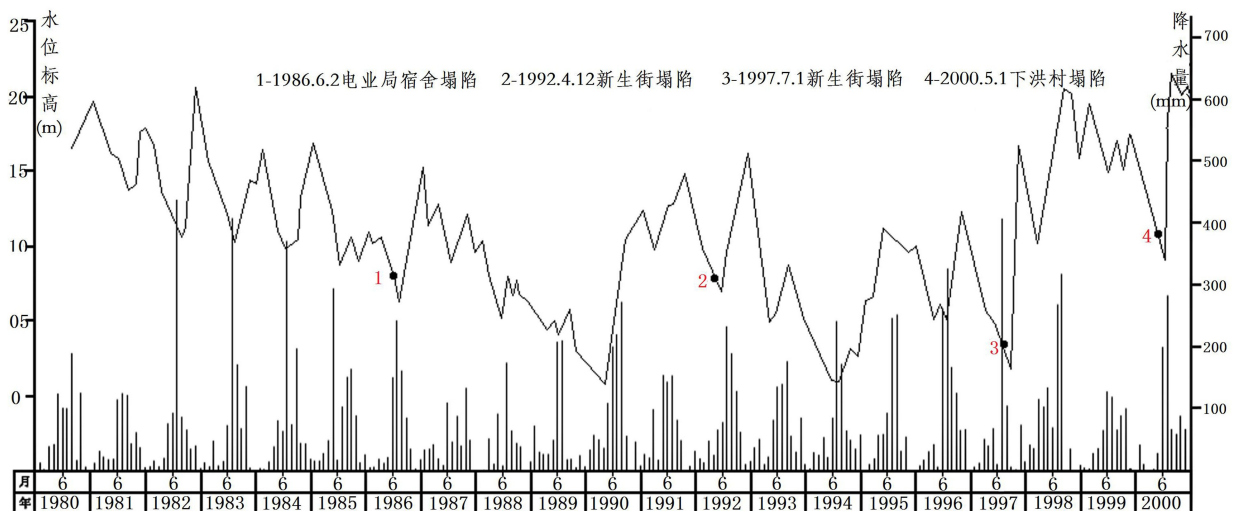


图 3 和平桥水厂岩溶地下水位动态与附近岩溶塌陷的关系

Fig. 3 Relationship between underground water level and nearby karst collapse in the Hepingqiao water plant

## 4 结 论

综上所述,徐州市中心区古河道与废黄河断裂带重叠部位的地质结构,为发生岩溶地面塌陷创造了有

利条件,但塌陷的最终发生则是人类工程活动过程中,引起岩溶水位剧烈波动的大幅、快速下降的结果。岩溶塌陷的空间分布受废黄河断裂带和古河道的共同控制;塌陷时间与季节有关,但其实质是岩溶地下

水资源的动态变化造成了岩溶地下水位的变化,当岩溶地下水水位降到了土层底板时就易发生岩溶塌陷,因此岩溶塌陷多发生于旱季。在诱发原因上主要为渗透变形效应、真空负压效应、浮托力丧失、土体崩解等作用的结果。

### 参考文献

- [1] 雷明堂,蒋小珍.岩溶塌陷研究现状、发展趋势及其支撑技术方法[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(3):1-6.
- [2] 康厚荣,雷明堂,张谢东等.贵州省公路工程岩溶环境区划[J].岩土力学,2009,30(10):3032-3036.
- [3] 白日升.岩溶地区地面塌陷的发生规律及治理[J].土工基础,2001,15(4):34-38.
- [4] 金晓文,陈植华,曾斌,等.岩溶塌陷机理定量研究的初步思考[J].中国岩溶,2013,32(4):437-446.
- [5] 韩宝平,马庆云.徐州市岩溶水开发过程中的环境地质问题[J].中国岩溶,1994,13(2):107-115.
- [6] 马金荣,韩宝平.徐州市塌陷区岩土体特性与塌陷机理[J].中国地质灾害与防治学报,1996,7(2):51-56.
- [7] 周东来.徐州市岩溶地下水运移规律的研究[J].地质灾害与环境保护,2006,17(4):65-69.
- [8] 熊彩霞,刘沂轩.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,2009,20(1):80-82.
- [9] 邢雪,周丹,罗跃.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,2014,25(4):51-58.

## Spatial-temporal distribution and causes of karst collapse in the Xuzhou area

WEI Yong-yao<sup>1,2,3</sup>, SUN Shu-lin<sup>4</sup>, HUANG Jing-jun<sup>1,3</sup>, JIANG Su<sup>1,3</sup>, MIAO Shi-xian<sup>1,3</sup>

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu, 210049, China;

2 Department of civil engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu, 210098, China;

3. Key laboratory of Earth Fissures and Geological Disaster Ministry of Land and Resources, Nanjing Jiangsu 210049, China;

4. Department of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Jiangsu, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Xuzhou is the only city in the Jiangsu Province to use the karst underground water as the municipal water. Due to the long-term absurd use of the Karst underground water, karst collapse often happens in the Xuzhou region. This paper looks into the distribution of bare karst and covered karst in the Xuzhou region in northern Jiangsu Province and the special and temporal distribution of karst collapse in the history, and summarizes rules of the karst collapse. Firstly, as controlled by the fault zone of the ancient Yellow River, the Karst developed more intensive when closer to the ancient Yellow River and vice versa. Secondly, the collapse occurs in sections with shallow well developed karst, mostly in Ordovician limestone and a few in the Cambrian limestone. Thirdly, the collapse is concentrated within the ancient channel. Most collapse happens in the sand soil monolayer, some in the clay sand-clay layer. Lastly, all collapse is in the cone of depression due to the extraction of karst water. In combination with the correlation between the timing of karst collapse and the dynamics of ground water, this paper comprehensively analyzes the causes of ground collapse. Though the overlap section of the ancient watercourse and the fault zone of the ancient Yellow River provides favorable condition for the karst underground collapse, its final occurrence is resulted from human engineering activities, which change the karst water level significantly and causes rapid decline in volatility. The results of this study would provide scientific basis for prevention of karst collapse hazards in the Xuzhou city in the future.

**Key words:** bare karst; covered karst; karst collapse; spatial-temporal distribution; rules of karst collapse

(编辑 张玲)