

河北省唐山市山间盆地岩溶塌陷特点及成因分析

——以遵化市刘备寨村岩溶塌陷为例

左文喆¹, 董军义^{1,2}, 刘善军¹, 费书民², 陶志刚¹

(1. 河北理工大学 资源与环境学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北省地勘局, 河北 唐山 063004)

摘 要: 发生在唐山市西北部山间盆地的岩溶塌陷, 具有与唐山市区不完全相同的时空分布特点。它主要发生在枯水季节末期和雨季初的交替时期; 在不同厚度盖层中塌陷均有分布, 不存在稳定的盖层厚度; 第四系松散岩类孔隙水与岩溶水之间不形成双层水位。根据上述特点, 运用抽水对土洞的形成和发展理论, 说明该区岩溶塌陷的主要诱发因素是大强度开采岩溶地下水, 而在盖层厚度较薄的基岩与第四系交汇处, 塌陷多与降雨有直接关系。针对该区塌陷灾害的分布规律, 提出了防治岩溶塌陷的防治对策。

关键词: 山间盆地; 岩溶塌陷; 机制分析; 防治措施

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2007)06-0174-04

中图分类号: P588.2

A Study on Formation Mechanisms and Characteristics of Karst Collapse in Intermontane Basin

—Take Karst Collapse in Liubeizhai Village of Tangshan City as an Example

ZUO Wen-zhe¹, DONG Jun-yi^{1,2}, LIU San-ju¹, FEI Su-min², TAO Zhi-gang¹

(1. School of Resources and Environment, Hebei Polytechnic University, Tangshan, Hebei 063009, China;

2. The 5th Team, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Tangshan, Hebei 063004, China)

Abstract: Karst collapse in intermontane basin is not completely different from that in Tangshan City. The karst collapse occurred mostly in the period between lower water and high water and it happened in loose cover of different thicknesses. In the region, water table in loose cover is the same as that in bedrock. On the basis of the characteristics, the main causes of karst collapse are analyzed in terms of the formation mechanism of soil cavity. It is found that over pumped groundwater induces karst collapse in thick cover while rain-water seepage induces karst collapse in thin cover. The measures for preventing collapse are proposed according to the distribution of the disaster.

Keywords: intermountain basin; karst collapse; mechanism analysis; prevention measures

河北省唐山市是岩溶塌陷灾害发生的典型地区之一。目前人们对该市岩溶塌陷的形成机理已有较深入的认识, 市区岩溶塌陷也已基本得到控制^[1]。但自 2000 年以来, 位于唐山市区西北的低山丘陵区, 岩溶塌陷发生频度却呈逐年加剧的趋势, 且其发生条件与唐山市区不完全相同, 因此, 对基岩山区岩溶灾害特点进行分析研究, 预防此类灾害的不断发生, 是十分重要的。唐山市西北部基岩山区岩溶塌陷以遵化市刘备寨村最为严重。该村距唐山市约 60.0 km, 地处燕山南麓遵化盆地南部丘陵地带, 地势总体为东北高西南低, 村北为基岩裸露的低山, 最高海拔标高

160.0 m; 村东果园耕地海拔标高 35.0~40.0 m; 西部耕地海拔标高 26.1~32.4 m; 南部耕地和果园海拔标高 37~44.6 m; 中部为刘备寨村民居住区。一条近东西向季节性溪流自东向西穿过。

从村北低山分水岭向南, 整个村庄面积 2.6 km², 发生岩溶塌陷的第四系覆盖区面积约 1 km²。第四系多为冲洪积、洪坡积成因, 岩性主要为粉质黏土、黏土夹粗砂砾石层, 具有大量垂直裂隙, 厚度自村北部的基岩裸露区过渡至中部的 60.0~70.0 m, 向南又缓慢变薄。基岩地层为中元古界蓟县系雾迷山组(Jxw), 呈单斜式产出, 岩层倾向 155°~185°, 倾角

收稿日期: 2007-07-23 修回日期: 2007-08-19

资助项目: 河北省国土资源厅财政支持项目“遵化刘备寨岩溶塌陷勘查预警”

作者简介: 左文喆(1969-), 女(汉族), 河北省昌黎县人, 副教授, 主要从事水文地质及环境地质研究。E-mail: zuowenzhe@sina.com。

37°~68°,岩性为燧石条带灰质白云岩、含砂泥质白云岩及内碎屑灰质白云岩。

该区碳酸盐岩较破碎,风化溶蚀裂隙发育,且多沿层间构造破碎带发育(区内有顺层产出的7条层间滑动正断层, F_6, F_7 这2条出露, F_1-F_5 为5条隐伏断层),连通性好,导水性强。其上发育的棕红色黏土层为弱透土层,黏土层厚度多在0.2~6.0 m之间,但分布不均,有大量“天窗存在”,加之村内机井多开采岩溶水,而均未对第四系水作封水处理,人为加强

了第四系孔隙水和岩溶水之间的水力联系,故该区第四系孔隙水和岩溶水不形成双层水头,而为统一的混合水位,这与多数岩溶塌陷发育区不同(见图1)。

刘备寨村1994年水位埋深4.0~6.0 m,雨季时沿沟两侧个别井口标高较低的水井形成自流。1994年以后由于连年干旱少雨,以及农业、养殖业的发展,地下水开采量加速增长。到2002年,平均水位埋深已下降了约10.0 m,全村平均水位埋深约15.0 m,并在村东果园形成一小型地下水下降漏斗。

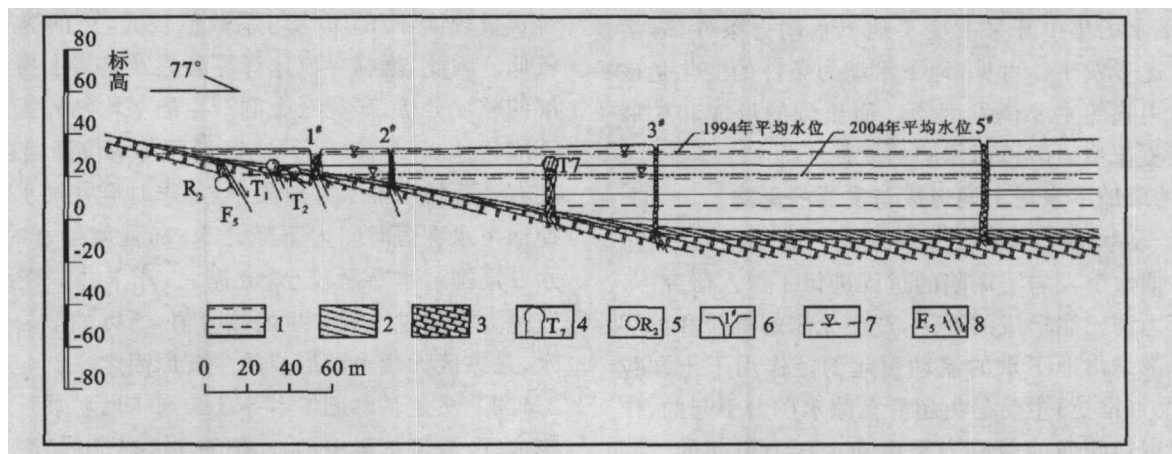


图1 B-B地质剖面图

1. 第四系粉质黏土; 2. 基岩上覆红黏土层; 3. 雾迷山白云岩; 4. 隐伏上洞及编号;
5. 隐伏溶洞及编号; 6. 塌陷点及编号; 7. 水位线; 8. 正断层及编号

1 岩溶塌陷规模及分布特征

刘备寨村自2000年6月开始发现地面塌陷及地裂缝现象,初期规模较小,零星出现在村东耕地中。以后每年又有塌陷发生。近5 a内,先后发生地面塌陷14处。塌陷平面形态基本为圆形或椭圆形,塌坑直径规模1.0~7.0 m不等,一般小于5 m。

通过综合物探及工程地质钻探等多种勘查手段探测,在该区第四系覆盖层中,共发现土洞及潜蚀扰动点22处,其中有4处与已知地面塌陷点(1#, 2#, 3#, 4#)重合。塌陷发生及土洞发育处第四系厚度8~70 m不等,土洞直径一般在5 m左右,最大可达12 m。

1.1 塌陷分布与第四系厚度关系

已有14个塌陷点中,1#, 2#, 14#塌陷点分布于山麓边缘的基岩浅埋区,第四系厚度小于20.0 m;其余塌陷点位于村东果园及季节性水沟边缘,第四系厚度25.0~70.0 m不等;土洞及第四系扰动点也分布在不同厚度的第四系覆盖区,物探剖面显示,大部分土洞已自基岩面向上扩展至盖层中部或顶部。可见该区不存在稳定的盖层厚度,在第四系厚度较大的区

域,仍有岩溶塌陷发生。这与唐山市区岩溶塌陷发育特点不同。

1.2 塌陷分布与构造断层关系

查明的塌陷点与第四系扰动点中,1#, 2#, 3#, 5#, 6#, 7#, 10#塌陷点均沿断层线展布,第四系扰动点及埋藏溶洞也多受断层控制。工程地质钻探揭示,在断层带附近岩石破碎,岩溶裂隙较发育,其上覆第四系盖层中,由于地下水渗流潜蚀作用强烈,粗砂砾石层中,混有大量黏粒、粉粒,粉土层密实程度较低,形成侵蚀扰动带,反映了岩溶沿断层发育的空间分布特征。

1.3 塌陷与地下水位及水位变幅的关系

研究区岩溶塌陷分布密集,大部分塌陷点及土洞集中在村中东部地区水位下降漏斗影响范围内。村东为果树种植区,每年旱季地下水开采量大,抽水集中,因此,村东地区地下水位具有季节性变化大,水位升降频繁的特点。

除在村东集中抽水区的塌陷点外,部分塌陷如11#, 12#, 13#和1#, 2#, 14#塌陷点分布在季节性水沟边缘、山区与第四系交接部位,且这几处塌陷均发生在雨季。

2 岩溶塌陷形成与发展过程分析

岩溶塌陷的形成必须具备 3 个条件。(1) 是具有开口的岩溶形态,如溶洞、大的溶蚀裂隙等,它不仅使上覆的盖层失去支撑,同时也是地下水及塌陷物质的储存与运输通道。(2) 具有一定厚度的松散沉积覆盖层;(3) 有地下水的活动。

如前所述,研究区具备岩溶塌陷形成的地层、岩性、构造、覆盖层条件。但在 20 世纪 90 年代末期以前,该区没有岩溶塌陷发生的记录,直至 90 年代中后期,地下水的集中开采改变了地下水动力条件,岩溶塌陷才逐步发生。可见,地下水动力条件的变化是该区岩溶塌陷的主要诱发因素。而土洞的形成和扩展是产生覆盖型岩溶地面塌陷的前提。

2.1 抽取地下水对土洞形成与发展的影响

2.1.1 抽取地下水诱发土洞形成 万志清^[2]、谢忠球等对抽水引发岩溶塌陷的过程进行了深入研究^[3]。根据万志清土洞形成的理论,产生土洞的推力和剪切两种力都是由地下水的流动引起的。作用于土颗粒的正应力(推力)主要是由超静孔隙水压力引起的,作用于土颗粒侧面的剪应力是由动水压力引起的。当超静孔隙水压力或真空吸蚀力超过土的抗拉强度时,土体就开始产生张裂缝并剥落;当作用于土颗粒之间剪应力超过临界剪应力时,土颗粒就开始在地下水流动作用下发生迁移。在超静孔隙水压力和动水压力的共同作用下,土洞不断发展扩大。超静孔隙水压力与地下水位的波动幅度相关;动水压力则与地下水的流速有关。土洞形成的临界地下水位降幅与土的黏聚力之间的关系式为:

$$\Delta H_{\sigma} = \frac{c}{3g\rho_w}$$

式中: ΔH_{σ} ——临界水位降幅; g ——重力加速度; ρ_w ——水的密度; c ——土的黏聚力。

对于砂土,由于无黏聚力不能形成土拱,抽水可使土洞迅速发展至地面形成塌陷;对于黏性土,当抽水引起的水位降幅超过临界值时,土洞开始发展,当达到平衡应力拱高度暂时处于平衡状态。

研究区基岩上覆黏土层的黏聚力(土体的力学性质见表 1)一般为 21.0~25.0 kPa,计算得该区土洞形成的地下水位变动临界值应为 0.85 m 左右。

不同类型的土质,土颗粒被水流侵蚀的临界地下水流速分别为:

$$\text{黏性土: } V_{\sigma} = \frac{n_0 e_0 d_0}{16\mu} \left\{ \frac{2(r_s - r_w) d_0 \tan\varphi}{3a} + \frac{A}{d_1^4} \right\}$$

$$\text{砂类土: } V_{\sigma} = \frac{n_0 e_0 d_0}{16\mu} \left\{ \frac{2(r_s - r_w) d_0 \tan\varphi}{3d} \right\}$$

式中: $A = 10^{-31} \text{ kN} \cdot \text{m}^2$, $d_1 = \frac{2e_0}{GSr_w}$; G ——土颗粒

比重; S ——土颗粒的比表面积; α ——地下水作用于土颗粒上的有效摩擦面积与最大截面积之比; r_s , r_w , r_0 , e_0 , d_0 , μ ——分别为土的容重、水的容重、孔隙度、孔隙比、土颗粒直径、水的动力黏度; φ ——内摩擦角。

由公式可知,颗粒发生迁移的地下水临界流速,随黏土颗粒径的减小而呈指数增大。该区碳酸盐岩顶部黏性土层发育不连续,且黏土层粗粒含量高,黏粒含量较低,土的不均匀系数值较大,土的黏聚力值较低。因此,据临界流速计算公式及基岩上覆黏性土层的粒度分析,研究区土洞产生的平均临界流速最大不应超过 0.60 cm/s;研究区近几年水位降幅在 10 m 左右。而村东抽水井较集中,旱季时群井抽水灌溉可使地下水在短时间内下降几米;高强度抽水时,因抽水井周围过水断面较小,流速大,开采井周围地下水流速大大超过土洞产生的临界值,所以抽取岩溶地下水,是该区大量土洞形成的主要原因之一。

2.1.2 反复抽取地下水导致土洞不断扩展 土洞的形成,改变了土层中的原始应力状态,引起洞顶的坍塌直至平衡拱的形成。根据土洞的坍塌平衡分析,当土洞顶板的土体自重与土洞侧壁的摩擦阻力之间达成平衡时的盖层厚度 H_0 ,为塌陷发生的临界厚度。当 $H > H_0$,塌陷不会发生。

$$H_0 = D/2\lambda \tan\varphi$$

式中: $\lambda = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ ——侧压力系数; D ——土洞跨度; φ ——内摩擦角。

研究区内土洞直径多在几米左右,以较大值 12 m 计算,它对应的临界盖层厚度为 40 m。理论计算的稳定盖层厚度值与唐山市区的稳定盖层厚度(一般在 30~50 m 左右)相近,但实际上,在研究区,不论盖层厚度多大,塌陷均有发生。这也与超量开采岩溶地下水相关。

在反复抽水情况下,地下水位频繁升降,地下土颗粒反复冲刷、潜蚀,土洞开始向上扩展,其扩展速度与抽水降深、水力梯度呈正比。离抽水井越近,水力梯度值越大,抽水时间越长,水位降深越大。因此,在反复抽水的情况下,土洞在抽水井周围迅速向上扩展,当土层厚度较大时,可以暂时形成天然平衡拱隐伏于地下。

但只要抽水不停,土洞最终会达地表形成塌陷。研究区内土洞及塌陷多发生在村东集中抽水的降落漏斗内,塌陷发生时间多在集中抽水后,在集中抽水区内塌陷无论第四系盖层厚度大小,均有塌陷产生,

此特点均与抽水是引发岩溶塌陷的规律一致。由此可推断,村东果园处岩溶塌陷的发生过程:主要是

抽水产生土洞,集中持续抽水导致土洞快速发展至地面,从而导致这一区域地面塌陷的发生。

表1 基岩上覆黏性土层物理力学性质指标

力学性质指标	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/ %	孔隙比	饱和度/ %	液限	塑限	塑性 指数	液性 指数	黏聚力	内摩 擦角	$a_{1-2}/$ MPa	$E_s/$ MPa
平均值	19.8	25.4	0.46	100	31.4	19.1	12.3	0.5	21	14.1	0.24	6.08

注: a_{1-2} 由压缩系数, E_s 为压缩模量。

2.2 降雨对研究区地下水动力的影响

岩溶地面塌陷起因于地下水流速和水力梯度增大形成的潜蚀^[4]。大强度抽取岩溶水是导致井周围及降落漏斗内孔隙水水力梯度和渗流速度增大的原因之一。而降雨引起的垂直渗透效应,是地下水流速和水力梯度增大形成潜蚀的又一重要原因。

每年旱季,该区农业及畜牧养殖业用水,主要来自地下水的开采,地下水水位降至最低点,且抽水已诱发土洞的形成。这时如遇大的降雨,雨水快速补给地下水,补给强度最大和补给速度最大的区域为基岩山区与第四系的交接部位。

在山麓地带,第四系沉积区与周围基岩露区的高差接近 100 m,雨水沿陡倾斜坡向下汇流,形成具有较大动能的地表水流,在地表雨水与地下水之间形成巨大的水头差。在大水力梯度作用下,下渗雨水对渗流通道内的土体产生渗透潜蚀作用。同时,由于第四系岩层较薄,水位的上下波动,恰好影响到基岩和土洞的顶板(详见图 1),覆盖层底部反复脱水、吸水,在降雨形成的静水增荷效应、软化效应、水位波动的反复动荷载作用下^[5],盖层土体内部的应力、应变体系发生强烈变化,土洞迅速发展直至地面,从而形成岩溶塌陷。

2004 年 7 月 12 日于暴雨后发生该区最大规模的一次塌陷,形成 1[#], 2[#] 塌陷坑, 11[#], 12[#], 13[#] 和 14[#] 等分布在山区与第四系交接部位和季节性水沟的边缘的塌陷,发生时间也都在雨后不久,因此,可推断在汇水量大、渗透强度大,受水位波动影响强烈的基岩区与第四系的交接的地段,塌陷与降雨有直接关系。

盆地中间地带,第四系厚度较大,降雨增加的荷载,对厚度大的盖层来讲,增加的相对值较小;第四系孔隙水与岩溶水之间又无水头差,因此,降水产生的静水增荷效应与垂直渗透效应对中间区域影响较小,塌陷多与高强度开采地下水有关。

2.3 研究区岩溶塌陷发生过程分析

(1) 第一阶段,土洞的形成(主要发在 1994—2000 年期间)。这一阶段主要由抽水引发的。在集中大强度抽水时,随着岩溶水位的快速下降,孔隙水下降速度相对较慢,在井周围和开口岩溶上方这些强渗透通道内,形成集中渗漏点^[6]。围绕这个中心,地下水力梯度和渗流速度大大超过渗流潜蚀作用的临界值,可冲刷、带走溶洞及上覆盖层底部松散沉积物颗粒,在开口岩溶上方处普遍形成土洞,土洞的形成标志着岩溶塌陷灾害隐患的开始。

(2) 第二阶段,土洞发展至地面塌陷发生(以 2000 年后为主)。这一阶段盆地边缘与中部地段塌陷机制不同。在第四系厚度较大的中间地段,集中持续抽水导致土洞快速发展,当洞顶部盖层的自重超过土体的抗剪强度时,洞顶垮落,地面塌陷发生。其塌陷主要诱因为大强度抽取地下水。

在第四系厚度较薄的盆地两侧,降雨汇集的地表雨水与第四系地层之间存在较大的水头差,在较大的水力梯度,雨水下渗产生的渗透力对第四系盖层产生的潜蚀较大。在垂向渗透、动荷载、静水增荷及抗剪强度降低的软化效应共同作用下,土洞迅速发展直至地面,在降水的直接参与下岩溶塌陷发生。

3 结论

研究区岩溶塌陷发生在基岩山区山间小型盆地内。它发生时间特点为:岩溶塌陷多发生枯水季末和雨季初的交替时期。空间分布特点:因岩溶多沿层间构造破碎带发育,塌陷也多沿断裂带呈串珠状分布;岩溶塌陷及土洞在不同厚度的第四系盖层中均有分布。地下水的超强开采改变了地下水动力条件,是诱发该区岩溶塌陷的根本因素;降雨对盆地边缘基岩浅埋区岩溶塌陷影响强烈,是土洞形成后,诱发山麓地段塌陷的直接原因。

(下转第 215 页)

段,但环境问题仍成为主导的制约因子,加大环境污染治理和生态保护力度应成为该市今后实现经济与环境的优质协调发展和经济与环境发展同步的主要任务。

4 结论

(1) 1995—2004年芜湖市经济效益评估值呈明显呈增长趋势,据此可将芜湖市经济发展划分为波动性增长(1995—1998年)、平稳性增长(1999—2001年)和快速增长(2002—2004年)3个阶段。

(2) 1995—2004年芜湖市环境效益评估值呈显著的波动性,其中1995—1997年呈波动下降,1998—2000年呈小幅波动增长,2001—2004年呈大幅度波动增长。

(3) 1995—2004年芜湖市经济与环境协调发展经历了6种类型,环境发展的不稳定性成为芜湖市实现经济与环境的优质协调发展和经济与环境同步的主导制约因子。

[参考文献]

- [1] 芜湖市统计局. 芜湖市统计年鉴(1995—2004)[Z]. 北京:中国统计出版社.
- [2] 刘鸿亮,曹凤中. 21世纪经济与环境协调发展全新思维模式的建立[J]. 环境科学研究,2006(4):148—153.
- [3] 王长征,刘毅. 经济与环境协调研究进展[J]. 地理科学进展,2002,21(1):58—65.
- [4] 张晓东,池天河. 90年代中国省级区域经济与环境协调调度分析[J]. 地理研究,2001,20(4):506—515.
- [5] 王辉,姜斌. 沿海城市生态环境与旅游经济协调发展定量研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(5):115—119.
- [6] 朱丽,孙理密. 济南市环境、社会、经济协调发展评价[J]. 环境保护科学,2006,32(4):60—62.
- [7] 李崇明,丁烈云. 小城镇资源环境与社会经济协调发展评价模型及应用研究[J]. 系统工程理论与实践,2004(11):134—138.
- [8] 李艳,曾珍香,武优西. 经济—环境系统协调发展评价方法研究及应用[J]. 系统工程理论与实践,2003(5):54—58.
- [9] 李崇明,丁烈云. 小城镇资源环境与社会经济协调发展评价模型及应用研究. 系统工程理论与实践,2004(11):134—139.
- [10] 刘辉,任建兰. 山东省区域环境与经济发展协调关系分析[J]. 烟台师范学院学报(自然版),2006,22(1):54—58.
- [11] 张晓东,朱德海. 中国区域经济与环境协调度预测分析[J]. 资源科学,2003,25(2):1—6.
- [12] 李勇,王金南. 经济与环境协调发展综合指标与实证分析[J]. 环境科学研究,2006,19(2):62—65.
- [13] 杨士弘,等. 城市生态环境学(2版)[M]. 北京:科学出版社,2003:254—256.

(上接第177页)

根据该区岩溶塌陷特点,为防止此类灾害频繁发生,应重点采取以下措施:(1)控制深井岩溶水的开采,避免水位在较短时间内快速下降。(2)对村内低洼处的沟渠、河道,集水坑,露天采场、采坑及以及已发现的地表水渗漏点采取排水防渗措施,进行防渗封堵处理,避免地表水急剧集中渗漏。

[参考文献]

- [1] 魏风华. 唐山市岩溶塌陷机制分析[J]. 地质与勘探,2006,42(2):86—89.
- [2] 王志清,秦四清,李志刚,等. 土洞形成的机理及起始条件[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):137—138.
- [3] 谢忠球,王志清,钱海涛. 抽水引起岩溶区路基塌陷的机理分析及其控制[J]. 公路,2006(7):25—29.
- [4] 刘善军,宋长斌,常允新,等. 隐伏碳酸盐岩区第四系松散盖层稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2003,14(1):18—21.
- [5] 王滨,贺可强,姜先桥,等. 岩溶塌陷渗压效应致塌机理研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(1):18—22.
- [6] 河北省地矿局第四水文地质工程地质大队. 河北省唐山市岩溶塌陷地质灾害防治前期勘查报告[R]. 河北:沧州,1994.