

岩溶地面塌陷形成机理与成因模式研究 ——以山东泰安—莱芜为例

高宗军

(山东科技大学地质科学与工程学院, 山东青岛 266510)

[摘要] 山东省泰安—莱芜地区自20世纪70年代中期开始就陆续由于岩溶水的排除而出现严重的地面塌陷,属于隐伏灰岩区岩溶地面塌陷,给当地社会 and 经济发展带来了巨大危害。总结归纳了该地区岩溶地面塌陷的时空分布特征,论述了其产生的地质条件和人为诱发因素,探讨了岩溶地面塌陷的形成机理,并针对存在的问题探索了其成因模式,最后给出了今后该类研究的思路。

[关键词] 泰安—莱芜;岩溶地面塌陷;时空分布特征;形成机理;成因模式

[中图分类号] TP393 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)04-38-06

1 前言

1.1 岩溶地面塌陷概念

岩溶地面塌陷是岩溶地区因岩溶作用而产生的地面变形现象,是岩溶洞隙上方的岩土体在自然或人为作用下发生变形破坏、并导致地面形成塌陷坑(洞)的一种岩溶地质现象。

当它发生于人类活动地区时,就可破坏土地及其附属物,并危及人类生命及财产安全,从而形成地质灾害。

1.2 隐伏灰岩区岩溶地面塌陷

岩溶地面塌陷可以产生在灰岩裸露区,更多的产生于隐伏灰岩区。灰岩裸露区岩溶地面塌陷,其主体是灰岩,即塌陷体及其围岩都是灰岩;而隐伏区岩溶地面塌陷,塌陷体全部或其上部为第四系松散沉积物。尽管两者在力学机制上相同,但是它们的影响因素上却存在差别。这里主要讨论隐伏灰岩区的岩溶地面塌陷。

隐伏灰岩区指的是灰岩上覆第四系松散沉积物的地区。通常,如果灰岩上覆地层为已经固结成岩的沉积岩时,称作灰岩埋藏区。

隐伏灰岩区一般灰岩岩溶发育,岩溶水丰富,地势低洼处容易形成泉或泉群,因而宜于人类的居住生活,常常是人口密度较大、工农业较为发达的区域。

因而,一旦在隐伏灰岩区产生地面塌陷,危害是很大的,对人们的生命和财产的安全构成威胁,有的可以直接造成危害。所以,隐伏灰岩区岩溶地面塌陷,既是一种地质现象,产生于自然或人为条件下的岩溶地质作用,又是一种严重的地质灾害。这种地质作用的自然或人为影响因素即是讨论的重点。

2 山东省泰安—莱芜概况

山东省泰安市和莱芜市位于鲁中山区西北部,黄河流域支流——曾孕育过大汶口文化的大汶河水系的中上游区域,属于半干旱大陆性季风气候区,一年四季分明,冬春干冷,夏秋湿热,宜于农耕,物产丰富。

山东省泰安—莱芜地区地质概况:地质构造位置属于中朝准地台鲁西断块隆起之泰莱断陷盆地,盆地的周边及基底为太古代形成的变质的花岗岩类,盆地呈南升北陷格局,形成寒武系奥陶系灰岩组

[收稿日期] 2007-12-12

[基金项目] 国家自然科学基金资助(40772145)

[作者简介] 高宗军(1964-),男,山东泰安人,山东科技大学教授,从事水文地址和环境地址教学及研究工作

成的单斜构造,盆地中心沉积了巨厚的第三系含盐物质,在第三系缺失区域,第四系松散沉积物直接覆

盖于寒武系奥陶系灰岩之上,称为隐伏灰岩区域(如图1)。

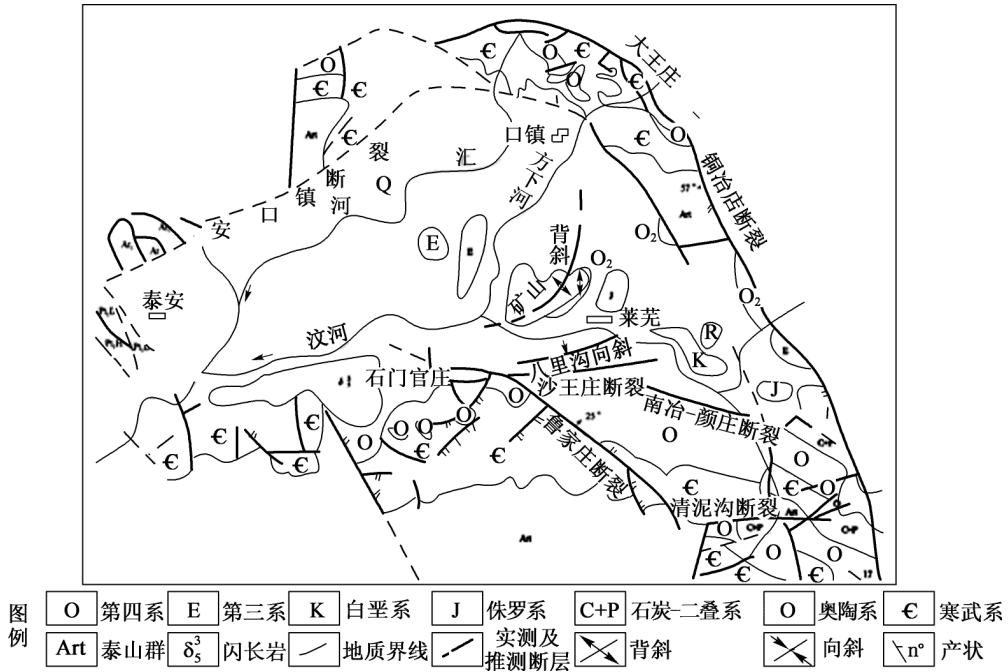


图1 山东省泰安—莱芜地区地质简图

Fig.1 The geological sketch map of Tai'an - Laiwu area, Shandong province

盆地内隐伏灰岩区灰岩岩溶发育,岩溶水丰富,岩溶水单井涌水量在 5 000 m³/d 以上。据以往地质勘探资料显示,该地区的石灰岩岩溶发育具有以下几个特点:

1) 岩溶化程度高,经多孔资料统计,泰安—旧县岩溶水富水地段,灰岩最大岩溶率竟接近 14 % (如图2);

2) 岩溶洞穴体大,揭露最大单个岩溶溶洞的洞高大于 9 m;

3) 岩溶的连通性强,这些都为上覆第四系松散沉积物的迁移准备了空间,这是形成隐伏区岩溶地面塌陷的空间条件;

4) 岩溶的强发育段位于当地地表以下 10 ~ 100 m 范围内^[1] (如图2),在第四系富水砂层与灰岩的直接接触部位的岩溶尤其发育,形成灰岩“空顶”,即构成岩溶含水层“天窗”^[2],它既成为岩溶水与上覆第四系松散沉积物孔隙水的交流通道,也成为第四系松散沉积物的迁移通道,这为隐伏区岩溶地面塌陷的形成准备了物质运移的“交通”条件。

盆地内不同含水层之间的水力联系密切,水交替强烈,特别是通过含水层“天窗”,地表浅部第四

系孔隙水与下伏岩溶水产生强烈的水力联系,在降水影响下发生同样的水位波动。

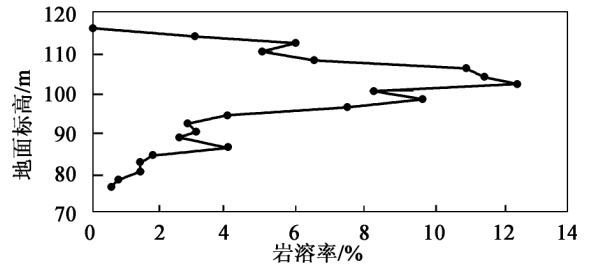
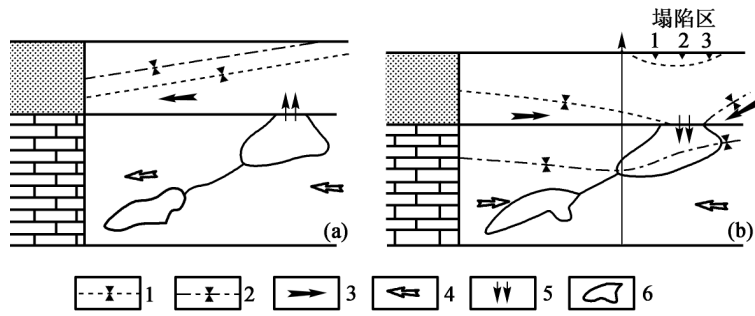


图2 泰安市灰岩岩溶化率随深度变化曲线

Fig.2 The variational curve of karst percentage of limestone along with depth in Tai'an city

由于岩溶水的开发强度高,形成了不断扩大的岩溶水开采降落漏斗,造成岩溶水由天然状态下的承压转化为无压。即在人为条件下,岩溶水与孔隙水之间交流方向发生了倒转,由天然状态下的岩溶水向上运动越流补给第四系孔隙水,转化为人为条件下的第四系孔隙水向下越流补给岩溶水^[3] (如图3)。这种转化为岩溶地面塌陷的形成起到了强化和促进作用。



1—第四系孔隙水水位;2—岩溶水水位;3—孔隙水流向;4—岩溶水流向;
5—两类水转化方向;6—岩溶洞穴

图3 岩溶塌陷与地下水补排关系示意图

Fig.3 Sketch showing the relation between karst collapse and recharge - discharge transformation of groundwater

3 山东泰安—莱芜地区的岩溶地面塌陷的分布发育特征

3.1 岩溶地面塌陷形成随时间的变化

山东泰安—莱芜地区的岩溶地面塌陷常发生于夏秋季节,迄今这个地区在冬春季节尚未发现有岩溶地面塌陷产生。其产生在时间上有以下几个特点:

1) 往往产生于每年的6~9月,即枯水期与丰水期交替的季节,此时要么岩溶水的水位最低,要么最高,水位变动最大、最剧烈;

2) 秋后(10~11月)出现,但是很少,规模也相对较小,在莱芜工业用水井附近,如榭林电厂水源地附近于10月份以后出现过塌陷,在集中开采的旧县岩溶水水源地附近也曾经发生过,但是规模都较小,数量也少;

3) 较大降水过程中或者排水、灌溉等突发性地表径流时产生塌陷的几率较高,特别是在平时干涸的低洼的沟渠、池塘及其附近,当有水流通过时,易于发生岩溶地面塌陷;

4) 夏季雨季来临之前的非降水过程中产生的塌陷,数量较少,但是规模较大,塌陷往往是在早晨或者傍晚产生;

5) 夏秋季节可伴随着剧烈的岩溶水排放(供水开采及矿山排水)产生岩溶地面塌陷,如在水源地范围内,当农业灌溉开采地下水强度骤然增加时,也容易产生规模不等的塌陷。

3.2 岩溶地面塌陷产生的空间分布特征

傍水而生——地表水系或池水附近较多,与地表水的入渗补给有关。

构造一致——总体分布与构造发育方向一致,应该与灰岩岩溶的发育有关。

盖层厚度——总的来看,第四系厚度越小越易产生塌陷,即第四系厚度较小,隐伏灰岩岩溶发育的区域产生塌陷的可能性增加,随之塌陷的分布密度也大;但是,第四系厚度越小,所产生的塌陷的规模越小。由此看来,塌陷的分布密度与塌陷的规模或强度是成反比的。通常,盖层厚度与塌陷之间的关系可以总结为以下几点:

1) 盖层厚度8~10m以下时易产生塌陷,但是规模小;

2) 盖层厚度8~15m易产生规模较大的塌陷,但是密度(数量)小;

3) 盖层厚度20m以上时塌陷罕见,有时会在地面产生一些碟形沉降区域或裂缝;

4) 厚度达到35m以上迄今未见塌陷产生。

盖层岩性——以砂土为主的区域容易产生塌陷,粘性土较厚时则不易产生。可能是由于粘性土的增厚,不易于上下含水层中的地下水之间的交换,因而就不易在其下部的灰岩中产生岩溶或者岩溶发育不强烈,就不具备松散物质迁移的通道。

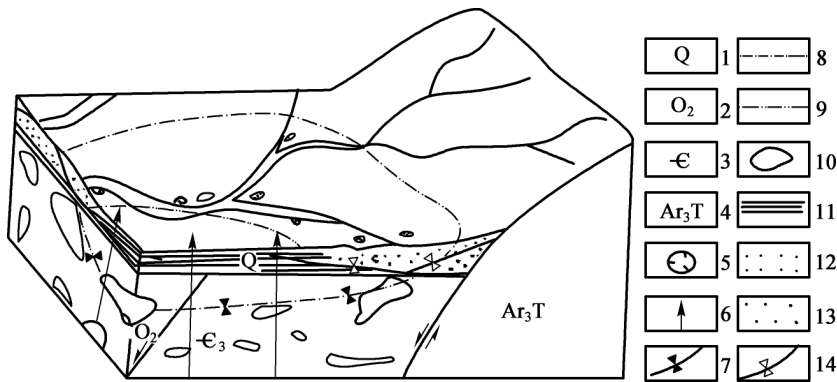
4 岩溶地面塌陷产生的地质条件

根据岩溶地面塌陷时产生的时空分布特征,结合当地的地质构造条件及水文地质条件,得出岩溶地面塌陷形成的地质条件可以概括为以下几点:

1) 岩溶发育——灰岩的岩溶必须十分发育,具备塌陷体的储存空间;

2) 存在“天窗”——灰岩顶部与第四系直接接触的部位发育岩溶的溶穴或较大的溶隙,以允许第

四系松散沉积物下移,即灰岩必须要有岩溶开口,这是塌陷物质的运移通道;



1—第四系;2—中奥陶统;3—上寒武统;4—泰山岩群;5—地面塌陷坑;6—抽水井;7—岩溶水位面;8—水源影响范围;
9—水源范围;10—岩溶洞穴;11—粘土、亚粘土;12—砂砾岩;13—坡积卵石层;14—孔隙水位面

图4 岩溶地面塌陷空间展布示意图

Fig. 4 Sketch showing space distribution of karstic collapse

3) 松散盖层——灰岩的上覆盖层易塌,即塌陷体具有可塌性,盖层成岩后变得坚固不容易坍塌,但是当它们很薄时也可以产生塌陷,如在莱芜市孟家庄村内西北角,第三系厚度在2 m以下,当岩溶水开采强度很高时,也可以产生岩溶地面塌陷;

4) 水流交替——孔隙水与岩溶水水力联系密切,水交替强烈,是岩溶地面塌陷产生的重要条件,当然存在“天窗”是这种水交替强烈的基础,但是同样存在“天窗”时,岩溶水与第四系孔隙水交替强度大时更容易产生岩溶地面塌陷;

5) 渗透性强——盖层的渗透能力强是上下含水层水流交替强烈的重要条件,它与水流交替和操作“天窗”是相辅相成的;

6) 水位变化——这是岩溶地面塌陷产生的主要诱发条件,天然条件下,岩溶水的水位高于第四系孔隙水的水位,而当岩溶水开采强度增加时,通常都会导致第四系孔隙水的水位高于岩溶水的水位,这种水位的巨大变化是促使产生岩溶地面塌陷的重要动力,所以集中在岩溶水的排泄区的塌陷较多,但是补给径流区也存在。

5 形成机理探讨

5.1 前人观点

岩溶地面塌陷的形成机理受到很多的关注,前人在这方面已经积累了很多的观点,这里简单地介绍以下6类:

1) 真空吸蚀论:即岩溶水被开采后,地下空间(空隙)出现负压状态,可以吸蚀上覆的松散沉积物

向下掉落或陷落,从而形成岩溶地面塌陷;

2) 潜蚀论:是指地下水流动可以冲蚀松散沉积物散落向下移动,从而产生岩溶地面塌陷的一种动力形成方式;

3) 荷载振动(液化)论:振动液化是一些粉细砂层的重要属性,通常是指这些粉细砂层在重力荷载的周期性或间断性有节奏的影响下,松散沉积物发生液化,从而向下“流动”,进而导致岩溶地面塌陷的产生。

4) 失托加荷效应论^[4]:由于岩溶水的开采导致地下水位下降时,岩溶之上的松散沉积物失去了天然条件下的岩溶水的顶托作用称作“失托”,其反作用就是“加荷”效应;

5) 渗压效应论:是指松散沉积物内部孔隙水的(向下)运动,产生渗压,可使得松散沉积物颗粒的黏着力减弱,进而产生崩落,直至产生岩溶地面塌陷;

6) 地震触发论:即地震可以诱发岩溶地面塌陷,这显然是一种天然诱发力量。

5.2 存在的问题

在总结岩溶地面塌陷的成因模式之前,先来总结一下存在的现象与未能考虑的问题。

莱芜市谷家台铁矿大抽水时,只有17 min时间,就使得在3 km以内的牛泉区域产生了塌陷,该区域在后期的岩溶水排放(地下水开采或矿山排水)过程中,均出现过类似情况,这些情况下,没有地震和振动扰动,说明塌陷可以伴随着岩溶水的排泄瞬间产生。

泰安市附近最大的岩溶地面塌陷产生于2003年6月,当时第四系孔隙水几乎是疏干状态的,所以渗压效应是不存在的,但是溶洞开口的形成(突然坍塌)或扩大及松散物的离散化加强了。

水化学作用问题一直被忽略。通常,在岩溶水剧烈开采区,岩溶水的水质是不断地恶化的,常规离子的含量急剧增加,包括硬度,即钙镁离子的总含量。组成水的硬度的增加有以下两方面的因素:一方面由于水循环速度的加快,使得大量的氧及二氧化碳进入到地下水中,从而强化了地下水的氧化环境,是造成上述现象的根本原因;另一方面,这些钙镁组分来源于灰岩的溶解,同时也来源于对松散沉积物中钙镁组分的溶解,前者在加速溶洞的扩大和“天窗”的孕育及形成、扩大,后者使得第四系松散沉积物的松散程度加剧,双方面作用,增加了岩溶地面塌陷产生的可能。

岩溶水的水位在第四系与灰岩接触面附近的动态变化的加剧,是造成岩溶地面塌陷的产生以及再生的主要因素。

有时当岩溶地面塌陷产生以后,会阻滞上下两层不同类型地下水的水力联系,从而削弱了当地岩溶地面塌陷再次产生的动力,即通常地面塌陷不会在同一处连续发生就是这个道理;然而,当第四系孔隙水与岩溶水发生了塌陷以后仍然活跃地进行水力联系及水交替循环时,再次产生地面塌陷的可能性会大大增加。

5.3 形成机理的讨论

上述作用或情形都可能存在,但是均不够全面,原因有以下几点:

1)地震肯定可以诱发塌陷,振动液化也是如此,但是地震往往发生于深夜或凌晨,与岩溶地面塌陷通常的形成时序有别,两者是触发或诱发因素,但不是根本因素,实践证明,在无震或无振动液化条件下,都可以产生岩溶地面塌陷,即地震和振动荷载可以是诱发因素,是岩溶地面塌陷产生的必要条件,但不是充要条件;

2)真空吸蚀表述不够全面,应该是叫做“风箱”效应,岩溶水位降低可以形成“真空效应”,但是岩溶水位抬高却可以形成“推鼓”或“膨胀”效应,事实上,由于岩溶水是一种管道流,在岩溶强烈发育的地区岩溶水甚至可以是表现为如同地表水的自由水流,当其开采强度大时,可使得空隙中产生负压,但瞬间或者间断的停采,都会造成岩溶水位的急剧恢

复(上升),自然就会产生“推鼓”或“膨胀”效应,在泰安的工程勘察过程中,曾经在钻遇土洞或溶洞时,钻孔成为排气吸气通道,发出“哨音”,就是这个原因造成的,研究发现,地下水具有潮汐作用,当岩溶十分发育的时候,这种作用会显现的相当强烈,因而这种作用称作“风箱”效应更为妥贴;

3)地下水潜蚀作用确实存在,莱芜市出现了这样的情形,在雨季降水过后或降水过程中,房下出现“摩托车”声响,推断是第四系孔隙水向深部岩溶洞穴中排泄形成的地下瀑布造成的,显然,地下水流肯定可以对第四系沉积物中的细小颗粒产生潜蚀作用,但是该种作用力的大小如何,尚需作试验加以验证;

4)失托加荷效应——“失托”是存在的,因为岩溶地面塌陷往往发生在天然条件下岩溶水承压区域,所以当开采岩溶水时,土体出现“失托”;“加荷”不够正确,因为通常是没有加荷的,第四系孔隙水排向下伏的岩溶洞穴中时,土体整体肯定是在“减荷”而不是“加荷”,除非当其上再加以重力或者其他载荷力的时候,才会出现“加荷”,进而在这两种作用力的共同作用下产生岩溶地面塌陷;

5)渗压效应只是许多致塌因素之一,更确切地说应该是塌陷初期的致塌因素,因为有时塌陷是在第四系孔隙水被疏干状态下发生的,这时是没有渗压存在的。

6 岩溶地面塌陷的成因模式研究

6.1 隐伏灰岩区岩溶地面塌陷的两种成因模式

岩溶地面塌陷的产生是多个因素、综合影响的结果,但是归根结底是个力学失衡的问题,由原来稳定时候的力学平衡,变得不平衡,就会产生塌陷。因而可以总结出隐伏灰岩区以下两种岩溶地面塌陷的成因模式。

6.1.1 土体坍塌造成的岩溶地面塌陷

“天窗”早已存在,当水位波动或者岩溶水的水位急剧下降时,会使得土体发生一些力的变化,使之力学平衡破坏,导致坍塌,直至地面塌陷。

6.1.2 岩体坍塌形成的岩溶地面塌陷

灰岩的溶洞开口突然产生或者突然增大,引发上覆土体瞬间迁移,导致坍塌。其作用可能是化学溶解占主导地位,溶解使得灰岩体沿薄弱部位裂解,从而产生溶洞开口,上覆土体迅速坍塌掉落导致地面塌陷。该种模式也适于裸露灰岩区的岩溶地面塌陷。

6.2 岩溶地面塌陷的力学分析

6.2.1 岩溶地面塌陷灰岩体力学分析

实际上,当灰岩体的重力与其覆盖层的重量之和大于灰岩体的抗剪力的时候,就会产生岩体的坍塌。通常,灰岩在裂隙面的力学性质最差,而岩溶也往往沿着灰岩裂隙发育,因而岩体的坍塌一般应该沿着裂隙面即力学薄弱面产生。

6.2.2 隐伏灰岩区岩溶地面塌陷的土体坍塌的力学分析

设:饱水土体比重为 R ,释水土体比重为 r ;
土体饱水时受到的浮力为 F ,顶托力为 f ;
土体饱水时的粘结力为 T ,土体释水后的粘结力为 t ;

则:(1)天然状态下, $T + F + f > R$,土体是稳定的,地面不会产生塌陷;

(2)当水位下降时(天然或人为条件下均可),

a. 当 $t < r$ 时,土体即可以坍塌,直至地面塌陷;

b. 当 $t > r$ 时,土体仍然是稳定的,此时不会产生地面塌陷;

c. 但是,如果渗透压力 $p > t - r$,则土体不稳定,可产生地面塌陷。

7 结语

通过对山东省泰安—莱芜地区的岩溶地面塌陷的分析研究发现,目前对其形成机理的研究还没有完成,对该类地质现象(灾害)的预测研究更显薄弱。建议今后应该在以下几个方面开展研究工作:开展不同水化学条件下的岩溶化速率的研究,以确定水化学因素在岩溶地面塌陷形成中的作用;探索岩溶地面塌陷的成因模式;开展预测预报的研究,包括地球物理方法寻找潜在塌陷的研究和建立数值模型进行预测预报的研究等。

参考文献

- [1] 高宗军,张富中,鲁峰. 山东泰安岩溶地面塌陷前兆及其预测预报[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(3): 149 - 150
- [2] 高宗军. 泰安岩溶地面塌陷形成机理与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,2001,12(4): 73 - 76
- [3] 高宗军,孙文广,唐蒙生,等. 泰安—旧县水源区岩溶水开采与地质环境的关系[J]. 山东地质,2001,17(3-4): 86 - 91
- [4] 贺可强,王滨,杜汝霖. 中国北方岩溶塌陷[M]. 北京:地质出版社,2005

Study on the Mechanism and Cause Mode of the Karst Collapse ——Taking Tai'an-Laiwu for Example

Gao Zongjun

(The Science and Technology Institute of Geology,
Shandong University of Science and Engineering, Qingdao, Shandong 266510, China)

[Abstract] The fearful karst collapses have been produced in succession since 1970s by the exploitation of karst water in the area of Tai'an-Laiwu, Shandong province. The limestone buried by Quaternary System grows into karst caves, and karst collapse brings enormous harm to the local society and economy development. The spatio-temporal distributing characteristics of karst collapse are summed up in detail. The geological condition, artificial function and forming mechanism of karst collapse are discussed. The cause mode of the karst collapse aiming at the existing questions is discussed and the idea for karst collapse studying in the future is given at last.

[Key words] Tai'an-Laiwu; karst collaps; spatio-temporal distributing characteristics; forming mechanism; cause mode