

杨宁,史猛,殷焘,等.胶东半岛岩溶发育程度分区研究——以烟台市中桥地区为例[J].中国岩溶,2023,42(5):956-968.

DOI: 10.11932/karst20230508

胶东半岛岩溶发育程度分区研究 ——以烟台市中桥地区为例

杨宁¹,史猛¹,殷焘¹,于林弘¹,王元峰²,张杰¹,冯培培¹

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 山东省鲁东地质工程有限公司, 山东烟台 264004)

摘要:中桥位于胶东半岛东部臧家庄盆地,是胶东地区典型灰岩分布区,区内岩溶较发育并已多次发生岩溶塌陷地质灾害。为查明中桥岩溶发育分布特征、发育程度及分布规律,为下一步中桥岩溶塌陷地质灾害治理提供依据,采用岩溶地质调查、地球物理勘探、地质钻探、抽水试验等综合研究,查明该地区可溶岩地层主要为蓬莱群香芥组两段灰岩,分布类型有裸露型、覆盖型和埋藏型;岩溶发育形态以开放式溶隙、溶洞为主,少部分地区发育溶孔;岩溶发育程度与地层纯度、岩溶裂隙含水岩组富水性强弱、溶隙率与溶洞率的高低呈正相关;采用层次分析法将研究区岩溶发育程度划分为发育区、较发育区、中等发育区、弱发育区和不发育区五个等级,研究结果为中桥地区岩溶塌陷地质灾害预防与治理提供地质依据。

关键词:胶东半岛中桥地区;岩溶塌陷;层次分析法;发育程度分区

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)05-0956-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

中国具有全球最典型和完整的岩溶多样性,陆域岩溶面积近340万km²^[1]。我国的岩溶研究始于20世纪50年代,岩溶研究实现了从单一岩溶溶蚀动力和资源利用研究扩展到全面融合岩溶系统研究^[2]。岩溶地下水是我国北方30多个地市级以上城市的饮用水、生产生活用水及农田灌溉水水源^[3],岩溶地下水的开采,在推动社会经济发展的同时,也带来了一系列负面效应,如岩溶塌陷、岩溶地下水环境恶化等。近年来,随着我国岩溶区土地资源、水资源开发及工程建设等人类活动作用的增强,岩溶塌陷灾害频繁发生^[4],由于岩溶塌陷在时

间上具突发性、在空间上具隐蔽性,地面常规监测手段来监测预报岩溶塌陷难度较大^[5],其一定程度妨碍城市经济建设与发展,因此,做好岩溶发育程度研究对岩溶塌陷地质灾害防治具有一定的指导意义^[6-7]。

中桥地区是胶东典型灰岩分布区域,岩溶发育,自2005年该区多次发生岩溶塌陷地质灾害,造成了一定的经济损失。岩溶地层的发育情况直接关系到岩溶塌陷地质灾害的发生,通过溶地质调查、地球物理勘探、地质钻探、抽水试验及综合研究等查明研究区内岩溶发育^[8]规律,进行岩溶发育程度^[9]分区,研究成果对胶东地区岩溶塌陷地质灾害防治具有重要指导意义。

资助项目:栖霞市自然资源和规划局项目(栖霞政采[正平]服务2017012);烟台市自然资源和规划局项目(SDGP3706000202102000097, SDGP370600002302000134)

第一作者简介:杨宁(1987—),女,高级工程师,主要从事水工环地质工作。E-mail: yangning@sddksd.com。

通信作者:张杰(1983—),男,正高级工程师,主要从事水工环地质工作。E-mail: 82650376@qq.com。

收稿日期:2023-04-20

1 研究区概况

研究区位于藏家庄镇中桥村及附近地区,属臧家庄盆地,地形整体四周高中间低,海拔 35~262 m,坡度一般 9°~20°,区内植被较为发育,以各类果园为主。研究区地处白洋河流域^[10],主干河流为白洋河,燕地河和山东河为其支流,三条河流均为季节性雨源型间歇性河流,源短流急。区内四季分明,属暖温带半湿润气候,降水主要集中在 7—8 月,受降水影响,河流径流量年内和年际间也有巨大差异,资料显示,白洋河年平均瞬时流量为 $4.11\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,最大瞬时洪峰流量为 $1\,231\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

研究区地质条件简单(图 1,图 2,表 1),大面积出露第四系松散地层,四周以白垩系和震旦系地层为主,局部发育有脉岩。北东向与东西向断裂构造十分发育,贯穿了整个研究区。

2 研究区岩溶特征

2.1 岩溶地层

研究区内发育有可溶岩的地层主要为蓬莱群香

乔组两段灰岩,其中二段相较于一段,灰岩中 CaO、MgO 含量更高。根据可溶岩埋藏条件的不同,将研究区岩溶地层分为三种(图 3):

一是在油家泊村—南桥村、炉头村西—胡珠泊村西北、南城子村西南和后高格庄村—曹家庄村一带,岩溶地层直接出露于地表,属于裸露型岩溶区^[11];

二是在炉头村东南、胡珠泊村北、油家泊村东、燕地村东南和中桥村—北城子村一带,岩溶地层直接覆盖于第四系松散土层之下,属于覆盖型岩溶区;

三是在研究区西北大部分地区,岩溶地层大面积埋藏于其他非可溶岩之下,属于埋藏型岩溶区。

2.2 岩溶水分布

岩溶地层由于其本身具有可溶性,裂隙较其他地层而言更为发育,容易形成地下水流通通道,因此其富水性也较好。研究区可溶岩分布面积虽广,但地下岩溶裂隙发育不规律,富水性相对差别较大(图 4),岩溶裂隙含水岩组^[12]分布规律如下:

(1)在中桥村—泗水村东—南桥村南一带,主要为覆盖型岩溶裂隙含水岩组,上覆为第四系松散岩类孔隙含水岩组。该区域以较纯灰岩为主要含水层,

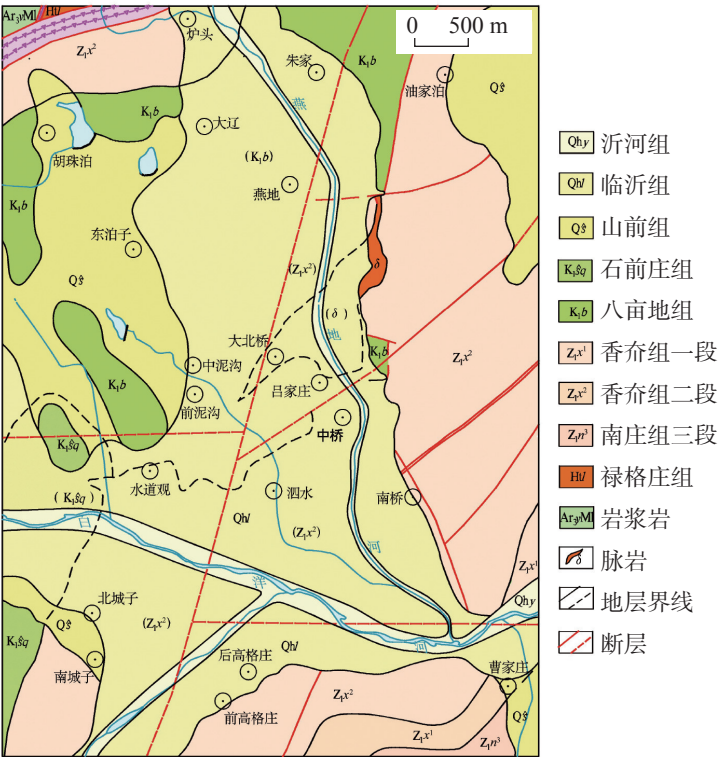


图 1 研究区地质与构造略图

Fig. 1 Geological and tectonic sketch of the study area

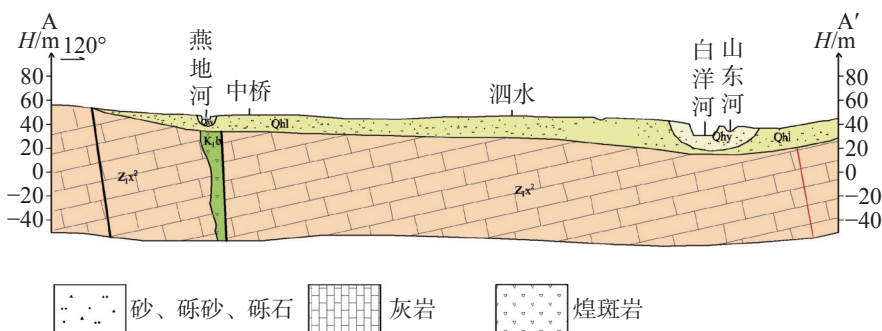


图 2 研究区地质剖面图
Fig. 2 Geological profile of the study area

表 1 研究区地层简表
Table 1 Summary of strata in the study area

年代地层			岩石地层		
界	系	统	群	组	段
新生界	第四系	全新统		沂河组	
				临沂组	
				山前组	
中生界	白垩系	下白垩统	青山群	石前庄组	
				八亩地组	
新元古界	震旦系	下震旦统	蓬莱群	香乔组	二段
					一段
古元古界	溱沔系		荆山群	南庄组	三段
				禄格庄组	

岩溶发育呈开放式大型溶隙、溶孔以及未充填溶洞,发育深度一般在 100 m 以内,该段富水性强,单井涌水量 3 000~5 000 m³·d⁻¹,局部区域单井涌水量大于 5 000 m³·d⁻¹。

(2)在泗水村西—水道观村东南—北城子村东北—曹家庄村北—油家泊村一带,含水层岩性主要为灰岩、泥灰岩及厚层青灰岩,岩溶发育呈开放式溶隙、溶孔以及部分充填溶洞,发育深度一般在 100 m 以内,富水性较强,单井涌水量 1 000~3 000 m³·d⁻¹。

(3)在水道观村西南—前高格庄村—曹家庄村一带,含水层岩性主要为灰岩夹泥灰岩,岩溶发育呈开放式溶隙、小型或部分充填溶洞等形态,发育深度一般在 100 m 以内,富水性中等,单井涌水量 500~1 000 m³·d⁻¹。

(4)在研究区南侧及西北小部分区域,含水层岩性以薄层灰岩为主,岩溶发育多呈小型开放式溶隙为主,发育深度一般在 100 m 以内,富水性中等,单井涌水量 100~500 m³·d⁻¹。

(5)在研究区西北大部分区域,主要为埋藏型岩

溶裂隙含水岩组,上覆含水层为莱阳群砂岩与青山群角砾岩的碎屑岩类孔隙裂隙含水岩组。该区域含水层岩性主要为灰岩夹泥灰岩,岩溶较不发育,或发育呈封闭式溶隙与全充填溶洞,岩溶发育深度一般大于 150 m,富水性弱,单井涌水量一般小于 100 m³·d⁻¹。

由此可知,岩溶裂隙含水岩组富水性与岩溶发育程度直接相关,岩溶越发育,富水性越好,反之亦然。

2.3 岩溶形态

研究区内以往发生的岩溶塌陷地质灾害相对集中,均在燕地河西岸,与白洋河交汇之前。该处地处覆盖型岩溶区,岩溶较为发育;岩溶水从此径流而过,地下水水量十分丰富。丰富的地下水与连片的可溶岩致使地下岩溶裂隙与溶洞相对于研究区其他区域更为发育。

2.3.1 溶孔

溶孔现象在区内不甚发育,多呈零星状分布,局部呈串珠状或蜂窝状。孔口一般为椭圆形,少量为槽状,直径多在 2.00~15.00 mm,最大直径 25.00 mm

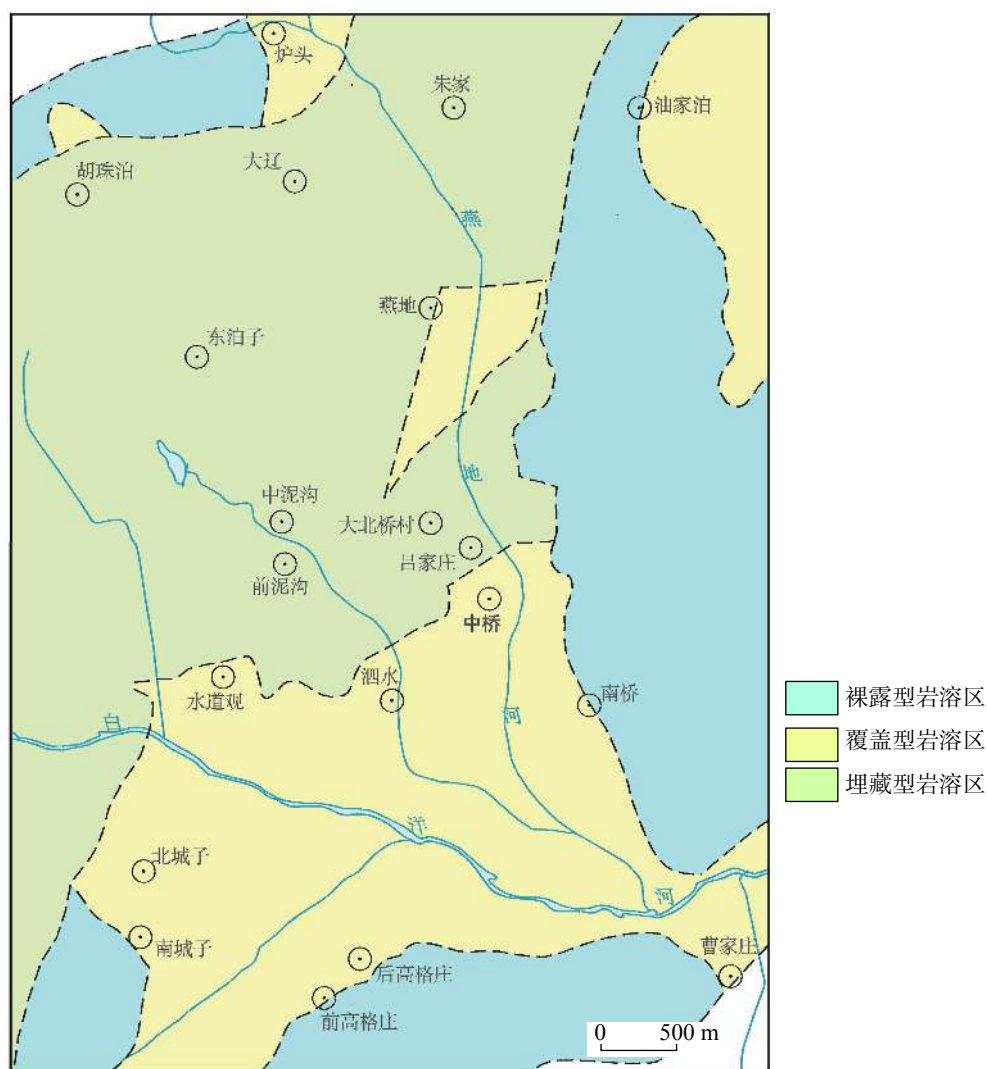


图 3 研究区岩溶分区图

Fig. 3 Karst zoning map of the study area

(照片 1)。溶孔多为半充填状态,局部为全充填,充填物为方解石晶体或土黄色钙质溶蚀物。溶孔多为盲孔,连通性较差,根据其分布特征,主要分布在富水性弱区域,地下水流动性较差。

2.3.2 溶隙与溶洞

2.3.2.1 溶隙与溶洞形态

研究区内溶隙与溶洞较发育,一般呈张开型,少量闭合型(照片 2)。

溶隙面形状不规则,溶隙宽度一般 2.00~5.00 mm,少量>5.00 mm。在溶隙中可以看到有红褐色的铁质侵染,部分被黏土与方解石脉充填。

2.3.2.2 溶隙溶洞发育特征

研究区内以往实施了多种勘探手段用以研究其岩溶发育程度,寻找地下溶隙与溶洞的发育位置及

规律。其中主要的勘探方法为地球物理勘探和工程地质钻探,并且多为两种方法相结合,通过分析不同手段取得的资料研究岩溶发育特征。

(1)研究区内主要采用高密度电法的勘探方式显示溶隙溶洞发育特征^[13],物探剖面垂向异常主要有 2 种特征:

一是,在高密度电法剖面图上呈“V”或“U”型低阻异常,电阻率值一般在 20~50 $\Omega \cdot m$ 。其物理机制是溶洞或岩溶裂隙构造的顶部灰岩被剥蚀或已发生塌陷,形成溶槽、溶沟后被第四系黏土充填。由于地下水水位较高,含水的黏土为低电阻^[14],所以在物探剖面图上出现低阻异常(图 5)。

二是,在高密度电法剖面图出现“O”型低电阻异常,电阻率值一般在 30~60 $\Omega \cdot m$ 。其物理机制是地表上部为完整灰岩层或第四系干燥砂土层、路基等,

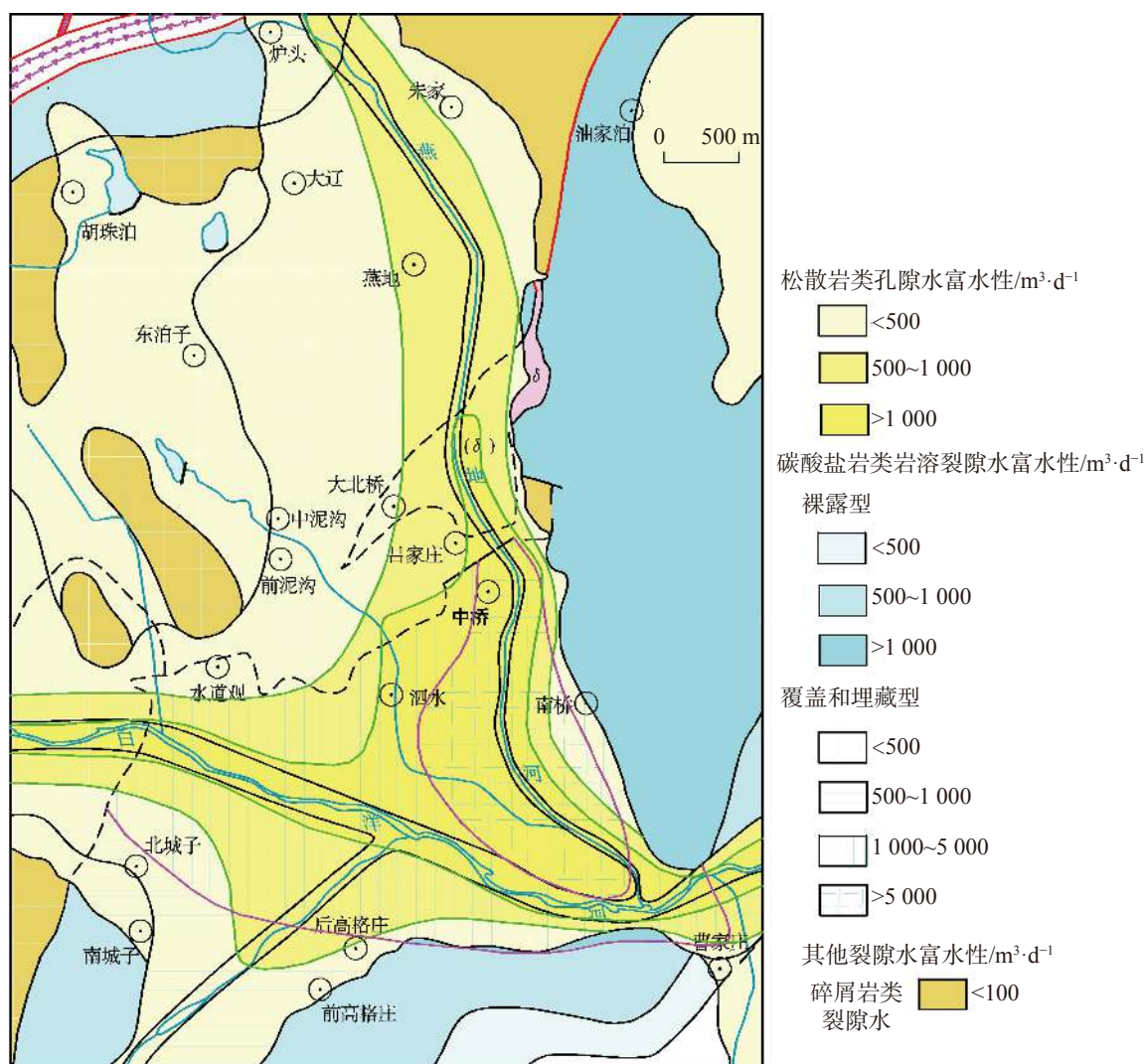


图4 研究区水文地质分区图

Fig. 4 Hydrogeological zoning map of the study area



照片1 溶孔发育照片

Photo 1 Photo of dissolved pore development

下部的溶洞位于潜水面,由于水为低电阻,在物探剖面图上反映为“O”型低阻异常(图6)。

由不同深度物探水平平面异常特征可以推断构造形态与岩溶发育深度(图7)。

构造形态:推断2条NE向断裂构造,F1断裂走向NE,倾向NW,表现为等值线的低阻同向弯曲,岩溶发育区呈低阻封闭圈串珠状展布;F2断裂走向

NNE,倾向NNW,表现为电阻率变化的梯级带,岩溶发育区呈稀疏的宽缓梯级带反映。

岩溶发育深度:在-20 m深度物探面上,西侧大面积呈现低电阻异常,电阻率一般小于 $30 \Omega \cdot \text{m}$,随深度增加,低电阻异常范围逐渐减少,在-50 m深度处,西侧电阻率小于 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 的低电阻异常缩小为几处点状分布,电阻率大面积为 $60 \sim 80 \Omega \cdot \text{m}$ 。

由此可见,岩溶发育多出现在物探低电阻异常区域,由于岩溶发育形态不同,物探低电阻形状也不同;断裂构造是诱发岩溶发育的重要因素,对研究区岩溶塌陷分布起控制性作用,岩溶发育基本沿断裂构造展布,区域走向NE—NNE向;研究区浅层岩溶较深层岩溶更为发育,一半发育深度小于50 m。

(2)自20世纪90年代开始,在研究区内先后施工过近百个工程地质勘察钻孔,共有56个钻孔揭露



照片 2 溶隙溶洞发育照片

Photo 2 Photo of development of karst crack and cave

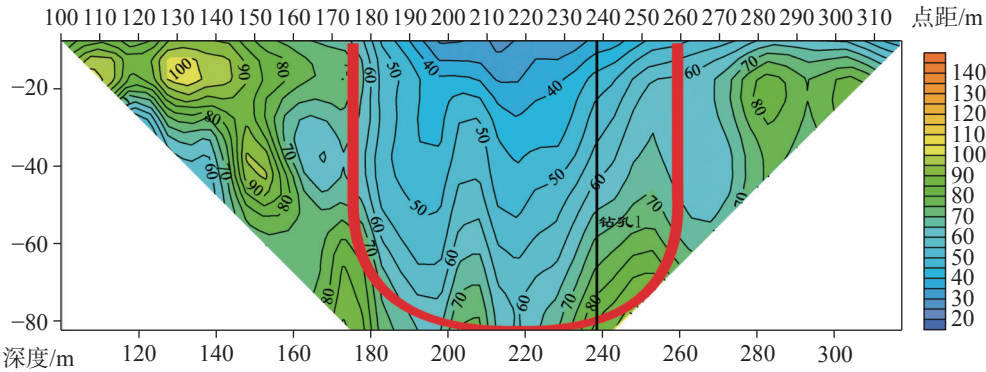


图 5 “U”型低阻异常

Fig. 5 "U" type low resistance abnormality

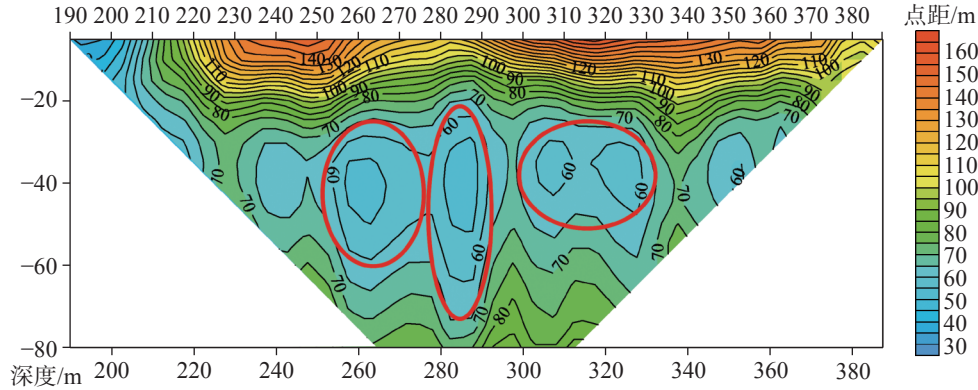


图 6 “O”型低电阻异常

Fig. 6 "O" type low resistance abnormality

了灰岩地层,其中 47 个钻孔揭露了大小不等的浅层溶洞。同时,多数灰岩井在施工过程中都出现不同程度的掉钻现象,即存在溶洞(图 8)。研究区内溶洞主要发育位置在地表以下 60 m 以浅;发育层数以单层和双层的居多,局部发育 8 层溶洞;单个溶洞高度以小于 2.00 m 为主,其次为 2.00~4.00 m,高度大于 5 m 的溶洞数量相对较少(图 8)。

在不同物探线实施钻孔 1、2 钻探验证分析,物探结果与钻探揭露情况基本吻合(图 9)。钻孔 1 位于“U”型低阻异常区,岩心显示溶洞发育,表层溶洞

被黏土充填,但地下水水位较高,使充填黏土呈软塑状态,深部溶洞未见充填物,溶蚀现象十分发育,与物探解译结果基本一致。钻孔 2 反应不同深度岩溶发育状态,岩心显示在不同深度发育着多层溶洞,且未见充填物,与物探解译结果基本一致。

3 研究区岩溶塌陷地质灾害

研究区内先后发生岩溶塌陷地质灾害 17 次,形成 15 处岩溶塌陷点(图 10,表 2)均位于本次物探与

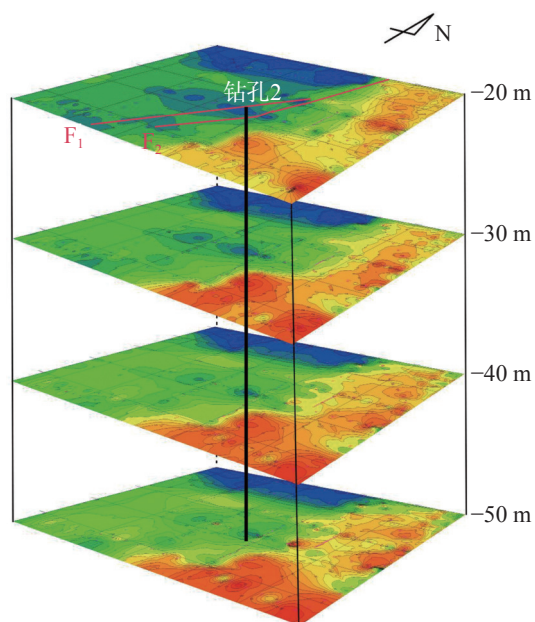


图7 不同深度视电阻率等值线平面图

Fig. 7 Contour lines of apparent resistivity at different depths

钻探揭露的覆盖型岩溶区内, 主要分布在地下水强径流带、断裂带附近。区内岩溶塌陷地质灾害集中发生于2016年6月与2017年6—7月, 主要为雨季, 尤其是强降雨过后, 塌陷坑在平面上一般多呈似圆形、椭圆形, 在剖面上均为坛状, 并在塌陷坑中下部有明显的延伸通道(照片3)。

4 岩溶发育程度分区评价

4.1 评价方法及评价因子

研究区岩溶发育程度分区采用定性的方法进行评价因子的选择, 采用半定量的方法进行单元格评价得分计算, 评价完成后进行人工修饰得到最终分区成果。

本次评价采用层次分析法进行。评价因子的选取根据研究区基础地质特性, 结合《建筑地基基础设计规范》与《工程地质手册》(第五版), 综合考

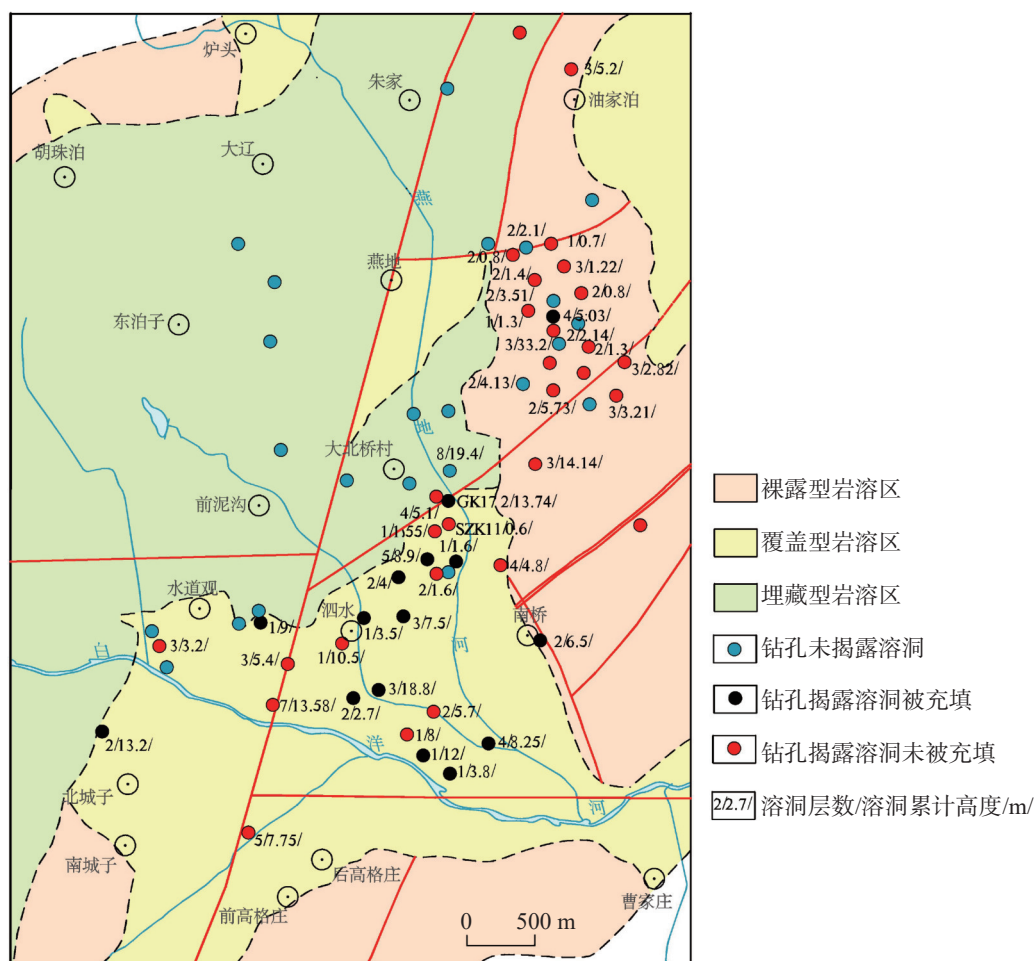


图8 钻孔揭露溶洞规模图

Fig. 8 Scales of karst caves revealed by boreholes

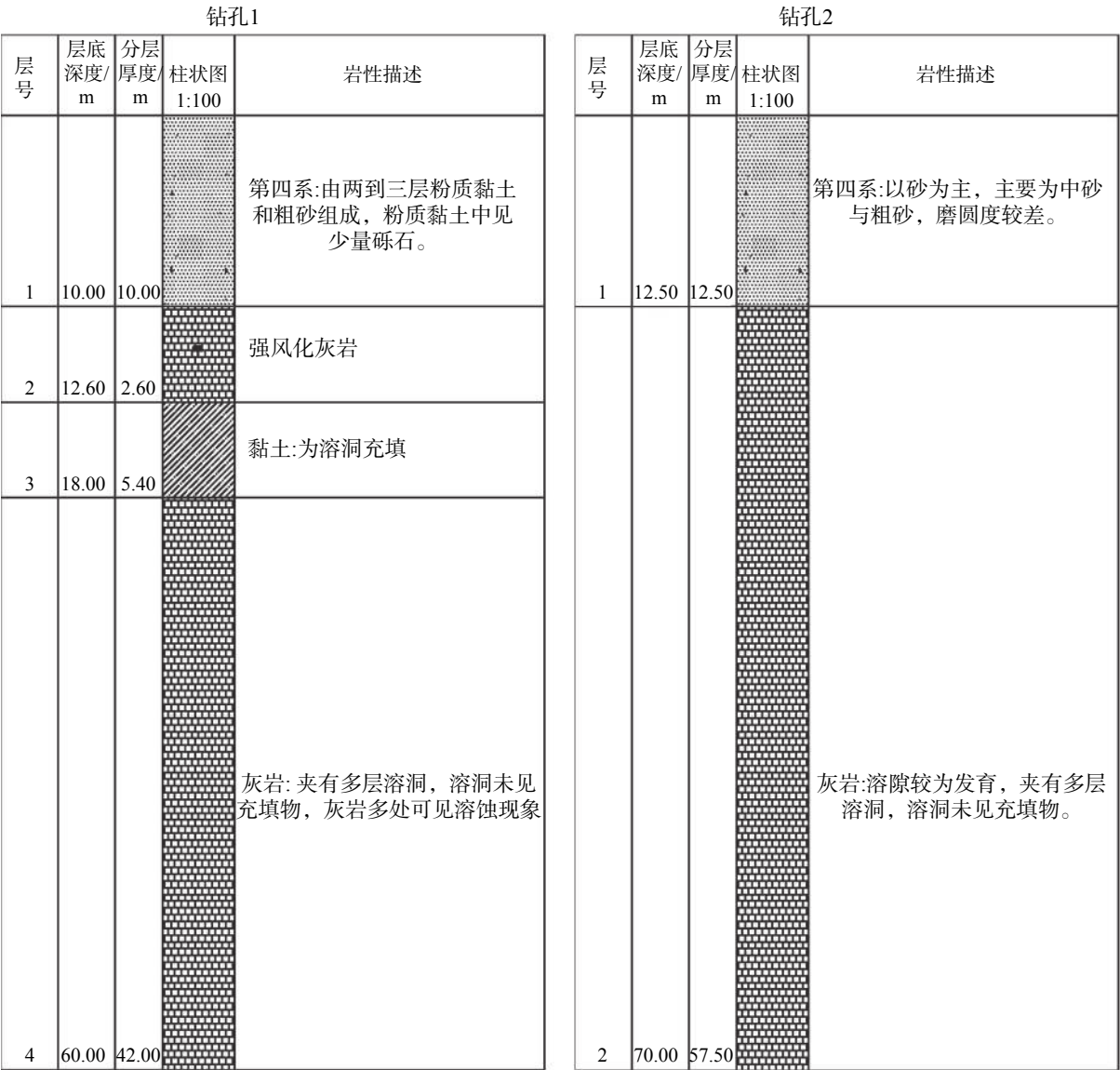


图 9 钻孔柱状图

Fig. 9 Bar chart of boreholes

虑区内实际取得的各工作手段成果,最终选取岩溶地层、富水性、视电阻率、钻孔岩溶率和钻孔遇洞率 5 个评价因子。采用就高不就低的评价标准进行分区评价。

4.2 岩溶发育程度分区

根据研究区以往基础地质资料与岩石试验分析,依据碳酸盐岩纯度划分岩溶地层;依据水文地质资料划分富水性;结合区内所进行的 60 m 以浅地球物理勘探成果与钻探验证,划分视电阻率;利用区内 60 m 以浅工程地质钻探、水文地质钻探资料统计,确定钻孔岩溶率与遇洞率(表 3)。利用岩溶地层分布、岩溶塌陷分布、岩溶水分布、溶隙与溶洞分布及

形态等岩溶发育程度^[15]分级指标,根据各指标进行评定,将研究区岩溶程度划分为五个等级(图 11)。

(1)岩溶不发育区主要分布在朱家村—南城子村西一带,该区域无碳酸盐岩分布或碳酸盐岩埋藏于其他各类非可溶岩之下,埋深较大,钻孔揭露浅部溶洞不发育。

(2)岩溶弱发育区主要分布在南城子村—曹家庄村和胡珠泊村—炉头村一带。该区以夹层状不纯碳酸盐岩为主;局部呈视电阻率低阻异常;钻孔揭露各种岩溶形态较少,钻孔遇洞率<30%,钻孔岩溶率<3%;该区域富水性一般,单井涌水量<500 m³·d⁻¹。

(3)岩溶中等发育区主要分布于北城子村—后高格庄村—油家泊村东一带。该区以夹层状不纯碳

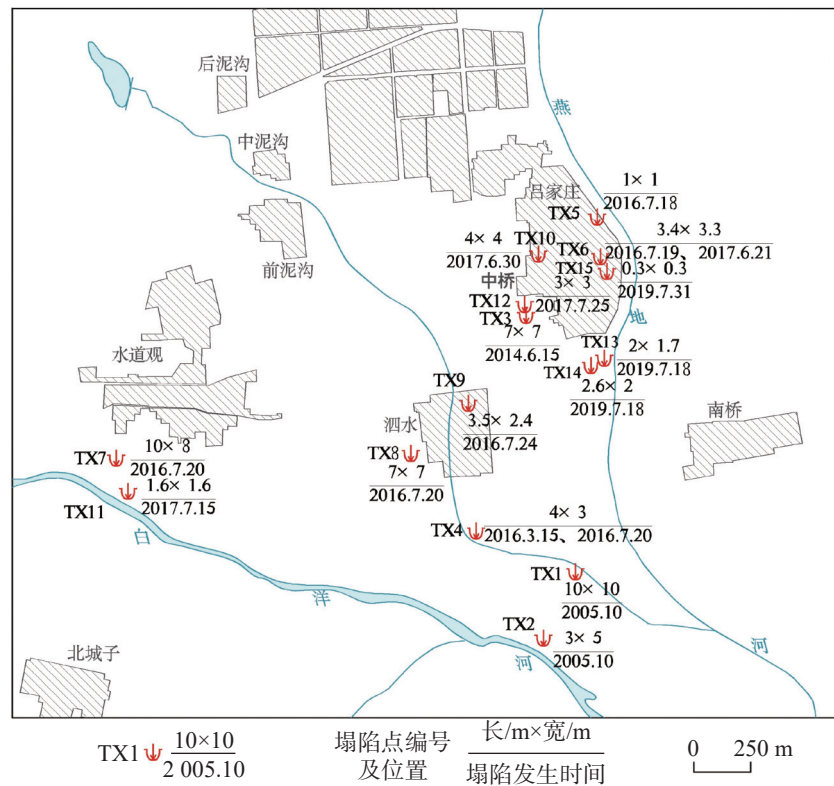


图 10 研究区岩溶塌陷点情况图

Fig. 10 Map of karst collapse points in the study area

表 2 研究区岩溶塌陷点情况表

Table 2 Situation of karst collapse points in the study area

编号	覆盖层厚度/m	覆盖层结构	岩溶地层岩性	钻孔揭露溶洞埋深/m/层数	溶洞充填情况
TX1	27.5	多层	厚层灰岩	27.2~52.8/2	无充填
TX2	10.5	多层	厚层灰岩	28.0~40.0/1	粉质黏土充填
TX3	11.7	多层	厚层灰岩	32.8~58.6/5	无充填
TX4	10.0	多层	厚层灰岩	22.0~44.5/3	含砾粗砂充填
TX5	14.7	多层	厚层灰岩	12.6~55.4/8	无充填
TX6	12.5	多层	厚层灰岩	34.9~64.3/2	无充填
TX7	27.0	多层	厚层灰岩	28.6~63.3/5	无充填
TX8	22.5	多层	厚层灰岩	44.5~55.0/1	无充填
TX9	25.4	多层	厚层灰岩	31.5~35.0/1	含砾粉质黏土半充填
TX10	14.6	多层	厚层灰岩	——	——
TX11	28.0	多层	厚层灰岩	——	——
TX12	11.7	多层	厚层灰岩	32.8~58.6/5	无充填
TX13	14.6	单层	厚层灰岩	——	——
TX14	14.2	单层	厚层灰岩	——	——
TX15	13.5	多层	厚层灰岩	——	——

酸盐岩为主,部分地区呈视电阻率低阻异常。钻孔揭露各种岩溶形态较少,钻孔遇洞率为 35% 左右,钻孔岩溶率 4% 左右。该区域富水性中等,单井涌水量< 1 000 m³·d⁻¹。

(4)岩溶较发育区主要分布在北城子村北—中联水泥厂一带。该区内岩溶地层主要为香奂组二段,岩性为灰岩。多呈视电阻率低阻异常,地下溶洞较发育。该区钻孔遇洞率 40%~60%,钻孔岩溶率 5%~



照片 3 研究区岩溶塌陷形态照片

Photo 3 Photo of karst collapses in the study area

表 3 岩溶发育程度分级表

Table 3 Classification of karst development degree

分级指标	岩溶发育程度				
	发育	较发育	中等发育	弱发育	不发育
岩溶地层	连续状纯碳酸盐岩为主	连续状次纯碳酸盐岩为主	间层状次纯碳酸盐岩为主	夹层状不纯碳酸盐岩为主	无碳酸盐岩发育
富水性(涌水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	3 000~5 000	1 000~3 000	500~1 000	<500	
视电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	<50	50~105	105~150	>150	
钻孔岩溶率/% ^[16]	>10	5~10	3~5	<3	
钻孔遇洞率/% ^[17]	>60	40~60	30~40	<30	

10%。富水性好,单井涌水量 1 000~3 000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(5)岩溶发育区主要分布在水道观村东南部泗水村—中桥村南—南桥村一带。该区以连续状纯碳酸盐岩为主。多呈视电阻率低阻异常,地下溶洞发育。该区钻孔遇洞率>60%,钻孔岩溶率>10%,溶洞多数无充填物。富水性好,单井涌水量>3 000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

4.3 分区结果及问题讨论

本次评价的评价因子与分区指标在借鉴《建筑地基基础设计规范》与《工程地质手册》(第五版)的基础上,充分考虑研究区实际情况,结合了区内以往取得的各项基础资料与试验指标,该评价方法是实际有效且可信的。但该方法只针对地质因素分析岩溶发育规律,在实际生活中应增加考虑人为因素、外界环境因素等多方面条件。

研究区内,以往岩溶塌陷地质灾害发生于厚层灰岩地层,属于连续状纯碳酸盐岩。灰岩上覆第四

系,岩溶类型属于覆盖型岩溶区;地下水富集,地球物理勘探结果出现视电阻率低电阻异常,周围钻孔岩溶率与遇洞率高,符合岩溶发育区特征。在 2020 年至 2022 年间,研究区相继又发生几次岩溶塌陷地质灾害,均发生在岩溶发育区内(表 4)。该结果进一步证明,岩溶发育程度是岩溶塌陷地质灾害发生的基础条件,岩溶塌陷地质灾害发生概率为:岩溶发育区>岩溶较发育区>岩溶中等发育区>岩溶弱发育区>岩溶不发育区。

5 结 论

(1)烟台市中桥地区岩溶塌陷始发于 2005 年,至今已发生岩溶塌陷地质灾害 17 次,对当地居民造成了不同程度的经济损失,通过岩溶地质调查、地球物理勘探、地质钻探等手段,查明了研究区岩溶地层主要为裸露型岩溶区、覆盖型岩溶区、埋藏型岩溶区;

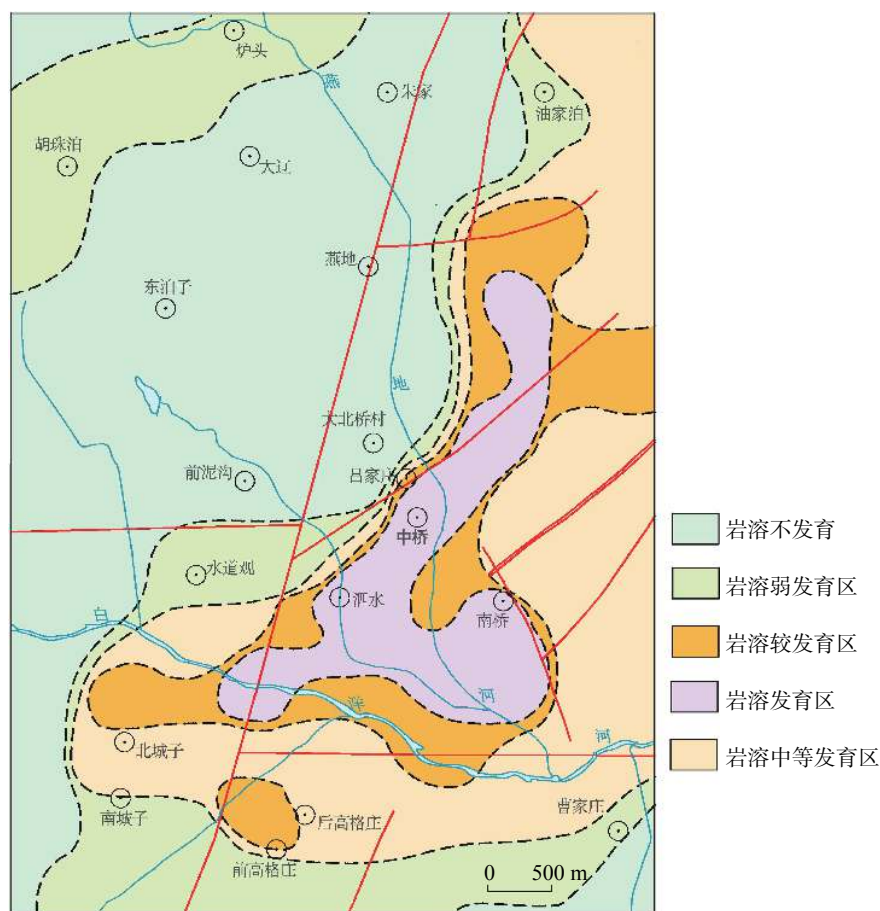


图 11 研究区岩溶发育特征分区图

Fig. 11 Zoning map of karst development characteristics in the study area

表 4 研究区新发生岩溶塌陷点情况表

Table 4 Situation of newly occurred karst collapse points in the study area

编号	岩溶地层岩性	富水性(涌水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	视电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	钻孔岩溶率/%	钻孔遇洞率/%
TX13	厚层灰岩	3 000~5 000	12~25	13.5	—
TX14	厚层灰岩	3 000~5 000	25~45	13.5	—
TX15	厚层灰岩	3 000~5 000	20~40	52.9	18.2

岩溶发育形态为溶孔、溶隙、溶洞,在垂向与水平分布上呈不均匀性。

(2)本文选取岩溶地层、富水性、视电阻率、钻孔岩溶率和钻孔遇洞率 5 个评价因子,对岩溶发育程度进行分区评价,岩溶发育区地层岩性主要为连续性纯碳酸盐岩,地下溶洞发育,视电阻率低阻异常,单井涌水量 $>3\,000\,\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(3)研究区内岩溶塌陷地质灾害发生在覆盖型岩溶区,且多为岩溶发育区,建议今后岩溶塌陷防治重点集中在岩溶发育区和岩溶较发育区,完善地下水动态监测网络,及时发现异常,为今后防灾减灾提供地质依据。

参考文献

- [1] 袁道先,蒋勇军,沈立成,蒲俊兵,肖琼.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbing, XIAO Qiong. Modern karstology[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 李玉辉,章程,庄晓东,丁文荣,俞筱桢.中国岩溶研究进展的哲学认知与展望[J].中国岩溶,2022,41(3):401-413.
LI Yuhui, ZHANG Cheng, ZHUANG Xiaodong, DING Wenrong, YU Xiaoya. Philosophical cognition and prospect of karst research in China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 401-413.
- [3] 梁永平,王维泰,赵春红,王玮,唐春雷.中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J].中国岩溶,2013,32(1):34-42.
LIANG Yongping, WANG Weitai, ZHAO Chunhong, WANG

- Wei, TANG Chunlei. Variations of karst water and environmental problems in North China[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 34-42.
- [4] 王维理, 李文平. 岩溶塌陷地质灾害的评价方法探讨[J]. *地质灾害与环境保护*, 2008, 19(3): 78-81.
- WANG Weili, LI Wenping. Discussion on the method of evaluation of karst collapse[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2008, 19(3): 78-81.
- [5] 雷明堂, 蒋小珍. 岩溶塌陷预测评价系统及其应用: 以唐山岩溶塌陷为例[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(2): 97-104.
- LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen. Karst collapse prediction and evaluation system and its application: Take the karst collapse of Tangshan as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(2): 97-104.
- [6] 万佳威, 张勤军, 石树静. 岩溶塌陷不确定性预测评价综述[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(6): 764-769.
- WAN Jiawei, ZHANG Qinjun, SHI Shujing. Overview of uncertainty assessment on karst collapse prediction[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 764-769.
- [7] 王有智, 杨宁, 于林弘, 吕凌峰. 烟台中桥岩溶塌陷发育特征及防治对策[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 1007-1015.
- WANG Youzhi, YANG Ning, YU Linhong, LYU Lingfeng. Development characteristics and prevention countermeasures of karst collapse in Zhongqiao of Yantai[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 1007-1015.
- [8] 罗小杰. 试论武汉地区构造演化与岩溶发育史[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(2): 195-202.
- LUO Xiaojie. On the history of tectonic evolution and karstification in Wuhan[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(2): 195-202.
- [9] 付勋勋, 刘新社, 邵晓州, 虎建玲, 贾丽, 车永发. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶发育程度的分形特征[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(1): 23-31.
- FU Xunxun, LIU Xinshe, SHAO Xiaozhou, HU Jianling, JIA Li, CHE Yongfa. Fractal features of development degree of Ordovician paleokarst in the Ordos basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 23-31.
- [10] 刘晓寒. 白洋河人工湿地深处理工程进度管理研究[D]. 威海: 山东大学, 2018.
- LIU Xiaohan. Research on the schedule management of Baiyang river constructed wetland deep treatment project[D]. Weihai: Shandong University, 2018.
- [11] 彭淑惠, 王宇, 黄成, 李芹, 王裕琴. 昆明大板桥岩溶地下水系统污染边界及其防污性能研究[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(4): 362-368.
- PENG Shuhui, WANG Yu, HUANG Cheng, LI Qin, WANG Yuqin. A study on the pollution boundary of karst groundwater system and its antifouling performance in Dabanqiao, Kunming[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4): 362-368.
- [12] 杨鹏. 日照市地下水动态特征及演化规律[J]. *地质学报*, 2019, 93(Suppl.1): 100-110.
- YANG Peng. Dynamic characteristics and evolution law of groundwater in Rizhao City, Shandong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(Suppl.1): 100-110.
- [13] 别发礼, 朱蒙蒙, 何云飞. 高密度电法在岩溶地区溶洞探测中的应用[J]. *山西建筑*, 2018, 44(36): 72-73.
- BIE Fali, ZHU Mengmeng, HE Yunfei. Application of high density electrical method in karst cave detection in karst area[J]. *Shanxi Architecture*, 2018, 44(36): 72-73.
- [14] 苏志红. 济南隧道工程岩溶发育区勘察方法探讨[J]. *工程建设与设计*, 2018, 397(23): 142-145.
- SU Zhihong. The investigation method for karst development area of Jinan tunnel project[J]. *Construction & Design for Project*, 2018, 397(23): 142-145.
- [15] 张凯, 霍晓龙, 陈寿根, 涂鹏, 谭信荣. 地下岩溶发育程度评价体系的初步探讨[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(3): 565-573.
- ZHANG Kai, HUO Xiaolong, CHEN Shougen, TU Peng, TAN Xinrong. Preliminary study of assessment system for subsurface karst development degree[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(3): 565-573.
- [16] 李慎奎, 陶岚. 武汉地区岩溶发育特征及地铁工程中岩溶处理[J]. *隧道建设*, 2015, 35(5): 449-454.
- LI Shenkui, TAO Lan. Features of karst development in Wuhan area and treatment of karsts encountered in construction of Wuhan metro[J]. *Tunnel Construction*, 2015, 35(5): 449-454.
- [17] 李腾芳, 覃小群, 黄奇波, 程瑞瑞, 刘朋雨, 张连凯. 崇左岩溶峰林区岩溶发育特征及对钻孔涌水量的影响[J]. *广西科学*, 2018, 25(5): 560-566, 578.
- LI Tengfang, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, CHENG Ruirui, LIU Pengyu, ZHANG Liankai. Characteristics of karst development and its impact on the yields of wells in karst peak forest region in Chongzuo City, Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(5): 560-566, 578.

Study on the zoning of karst development in the Jiaodong Peninsula: Take the Zhongqiao area of Yantai City as an example

YANG Ning¹, SHI Meng¹, YIN Tao¹, YU Linhong¹, WANG Yuanfeng², ZHANG Jie¹, FENG Peipei¹

(1. Shandong Third Institute of Geology and Mineral Exploration, Yantai, Shandong 264004, China;

2. Shandong Ludong Geological Engineering Co., Ltd., Yantai, Shandong 264004, China)

Abstract Karst is developed in all provinces of China. In Shandong Province, karst is mainly developed in its

southwest part, and is sporadically distributed in the Jiaodong area. Particularly, the typical development area is located in the Zhongqiao area of Yantai City—the eastern part of the Jiaodong Peninsula in Zangjiazhuang basin whose overall terrain is high at peripheral edge and low in the middle. There are four distinct seasons in the Zhongqiao area with the annual precipitation mainly concentrating in June and July. Three seasonal rivers—the Baiyang river, the Yandi river and the Shandong river—run through the whole area. With large areas of Quaternary, Cretaceous and Sinian strata exposed as well as fault structures developed, this area presents a simple geological condition, typically distributed with limestone. According to the different burial conditions, the karst area can be divided into three types: exposed karst area, covered karst area and buried karst area. There is a wide distribution of soluble rocks in this area, where karst is developed in three forms, namely, dissolved pores, dissolved cracks and karst caves. However, the irregular development of underground karst fractures leads to the relatively large difference in the abundance of karst underground water. Consequently, there have been many geological disasters of karst collapse usually occurring at a small scale after heavy rainfall in the history of the Zhongqiao area. These collapses caused certain losses to the local economy, though with no casualties.

In order to find out the distribution, degree and law of karst development in the Zhongqiao area, we have carried out a comprehensive study on the karst collapse according to geological environment survey, geophysical exploration, geological drilling, pumping testing, etc. Results of geological survey and geological drilling show that soluble rock strata in the study area are mainly made up of two limestone sections of Xiangkuang Formation of Penglai Group. The distribution of three burial types and the characteristics of karst development have also been identified. Results of geophysical exploration and geological drilling demonstrate the distribution of karst strata in the study area. Meanwhile, the distribution range, development characteristics and changes of developmental depths of dissolved pores, caves and dissolved cracks have been investigated. It is found that this area is mainly composed of the north-east fault structure. Results of geological drilling and pumping testing indicate the groundwater flow direction and the distribution characteristics of karst underground water abundance, with the maximum water inflow per well greater than $3,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. The degree of karst development is positively correlated with the variables such as the purity of karst strata, the water abundance of water bearing rock group in karst fissure, the distribution of anomalous points in geophysical exploration, and the level of dissolved crack ratio and cave ratio. From five evaluation factors including karst formation, water abundance, apparent resistivity, the ratio of borehole to karst and the ratio of borehole to cave, we used analytic hierarchy process to divide the karst degree in the 60 m zone and divided the degree into five grades, karst development zone, the zone with karst development at a relatively high level, the zone with karst development at a medium level, the zone with karst development at a low level and the zone with undeveloped karst. With the decline of these five grades of karst degree, both the purity of karst strata and the water abundance decrease successively, whereas the apparent resistivity, the ratio of borehole to karst and the ratio of borehole to cave all increase gradually. The distribution range of each karst degree is successively distributed without overlap. The probability of karst collapses is as follows, karst development area>the zone with karst development at a relatively high level>the zone with karst development at a medium level>the zone with karst development at a low level>the zone with undeveloped karst. Collapses mainly concentrate in the karst development area. The degree of karst development is the basic condition of karst collapse; therefore, finding out the distribution, degree and law of karst development in the Zhongqiao area may provide a geological basis for the prevention and control of geological disasters of karst collapse, and guarantee the normal life of local residents and effective operation of enterprises. The study result may also provide a basis for further research on the distribution, degree and law of karst development in the Jiaodong area.

Key words the Zhongqiao area, karst collapse, Analytic Hierarchy Process, development level zoning

(编辑 杨杨张玲)