高宗军,鲁统民,王 敏,等.基于岩溶水动态的岩溶地面塌陷预测预报方法[J].中国岩溶,2019,38(5):739-745.
DOI:10.11932/karst2019y09

基于岩溶水动态的岩溶地面塌陷预测预报方法

高宗军,鲁统民,王 敏,冯建国,刘书江,王 姝
(山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590)

摘 要:由于突发性、影响因素多样性等特点,岩溶地面塌陷的预测预报目前只能做到区域上的危险区划定,而不能实现危险区内何时、何处发生塌陷的预测预报。已有岩溶地面塌陷调查结果表明,岩溶地面塌陷的发生是有前兆的,即附近水井会提前出现水位波动大、水浑浊等现象。本文据此提出了建立健全岩溶水监测网络,对岩溶水位、水量、浊度及主要化学组分等指标进行实时动态监测,结合岩溶水流向等参数,实现短时间(数小时至数日)、小范围(小于监测网络间距)的较高精度岩溶地面塌陷预测预报的方法,并以山东省莱芜市孟家庄地区为例做了简要说明。

关键词:岩溶地面塌陷;预测预报;方法;监测网络;岩溶水动态
中图分类号:P642.2 **文献标识码**:A
文章编号:1001-4810(2019)05-0739-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

0 引 言

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[1]。该灾害具有突发性、隐蔽性、破坏性强的特点,而且对人民群众的生命财产安全以及公路等基础设施安全造成了严重威胁,是一种影响社会和谐稳定的不安定因素,因此准确地预测预报岩溶地面塌陷具有重要的意义。

近年来,许多专家、学者在岩溶地面塌陷预测预报方面进行了许多有益的探索,雷明堂等[2]利用GIS空间预报法预测潜在塌陷点;陈学军等[3]利用层次模糊数学方法划分稳定区与非稳定区;朱庆杰等[4]提出运用人工神经网络(ANN)法预测岩溶塌陷危险性分布;赖永标等[5]提出了基于支持向量机(SVM)预测法的预测模型;李公岩等[6]利用层次分析法定性-半定量预测评判岩溶塌陷发生的难易程度;黄仁东等[7]建立了基于Fisher判别分析法(FDA)的岩溶塌陷倾向性等级分类预测模型;蒋小珍等[8]通过预埋光纤,监测土洞发育引起的光纤形变来预测塌陷;蒙彦等[9]通过运用异常数据分析法进行岩溶塌陷预警。上述方法都有其自身的优点,为岩溶塌陷的预测预报作出了重要贡献,但也具有一定的局限性。有的对宏观区域上的岩溶塌陷预测预报具有较好的效果,但是在评价因子的选取、权重赋值等方面主观性较高;有的计算方法太复杂,泛化性不高,不宜推广和实际应用等;有的还存在着许多关键技术问题需要完善和解决。此外,这些方法大多是基于地质条件的分析,预测了可能产生岩溶地面塌陷的区域范围。这个范围通常较大,甚至与可溶岩分布区相一致,至少也不小于岩溶强发育区与第四系松散堆积物厚度较小的分布区的重合区域,导致防范或避让岩溶地面塌陷灾害的可操作性低,无法实现对数十至数百米范围这样的小区域甚至是单个塌陷发生的预测预报,更不能进行短时间尺度,如几天甚至更短时间的预测预报,也就是说,通过这些工作尚无法做出何时在何地会产生岩溶地面塌陷的预测预报。因此,寻找一种有效的、具有可操作性的、基于水位与水质动态监测数据的、可以实现实时(短至几天或几小时)

基金项目:国家自然科学基金(40772145,41641022)
第一作者简介:高宗军(1964-),男,博士,教授。主要从事水文地质及工程地质研究。E-mail:gaozongjun@126.com。
收稿日期:2018-10-28

万方数据

较准确定位(预测预报精度小于观测井群间距)的岩溶地面塌陷(点)的预测预报方法,具有十分重要的意义。本文提出采用水位水质联合追溯的方法,通过对可能产生岩溶地面塌陷的区域内的岩溶水位、水质的实时动态监测数据的综合分析,实现对岩溶地面塌陷的短时(近期)定位的"精准"预测预报。

1 岩溶地面塌陷的产生及先兆

岩溶地面塌陷产生的基本要素有:下部可溶岩发育岩溶洞穴,上部存在可塌陷主体。由此可将可产生岩溶地面塌陷的地区划分为裸露性、覆盖型和埋藏型3类。裸露型是岩溶发育的可溶岩直接裸露地表,覆盖型是岩溶发育的可溶岩上部覆盖有厚度不大(不超过30~50 m)的松散堆积物,而埋藏型则是岩溶发育的可溶岩上覆巨厚的松散堆积物或成岩的非可溶岩。岩溶洞穴之上塌陷主体为可溶岩或固结成岩的岩层,即在裸露型和埋藏型分布区域产生的岩溶地面塌陷,可称作岩质塌陷,目前所见到的巨大的"天坑"及煤矿区分布的部分"陷落柱"应该属于此类;而覆盖型分布区岩溶地面塌陷可称之为土质塌陷,其塌陷主体是松散堆积物。有人又根据松散堆积物类型将覆盖型岩溶地面塌陷分为沙漏型、土洞型和泥流型3种[10]。通常,在土质塌陷分布区,松散土体不会太厚,可溶岩与土体接触面上的岩溶洞穴开口大小所对应的土体洞顶拱失效才产生岩溶地面塌陷;当岩溶洞穴上覆土体厚度大到可以形成稳定的洞顶拱时,就不会产生岩溶地面塌陷了。由于松散土体的可破坏性强,因而覆盖型碳酸盐岩岩溶发育区是岩溶地面塌陷发生最严重的区域,其往往源于岩溶水开采量变化引起的岩溶水位的变化,先在覆盖层形成土洞,之后快速发展成为地面塌陷。

无论何种类型的塌陷,在发生时都会使塌陷体落入岩溶洞穴,致使岩溶水受到扰动而出现水位及水质的变化。尤其是覆盖型岩溶地面塌陷,由于塌陷体以松散堆积物为主,因而该种塌陷往往是逐渐式地、快速地形成的,在塌陷产生前通常都有先兆。山东省泰安羊东村于2003年5月产生的特大型岩溶地面塌陷,在发生前就出现附近水井水位波动大、水浑浊等征兆[1]。山东省莱芜市斛林电厂供水井塌陷前,也曾出现水浑浊现象。莱芜铁矿1970年代大抽水期间,影响范围内产生岩溶地面塌陷之前均出现过地下水浑浊现象。由于均没有进行水化学样品采集及测试,所以不知道具体的水化学变化,但是可以由水变浑浊这种物理的变化推知其水化学性质也会随之发生变化的。这就是本文提出的利用岩溶水动态(物理及化学指标的变化)观测资料,开展岩溶地面塌陷预测预报的基本出发点。

接下来,以覆盖型岩溶发育区岩溶地面塌陷为例,具体说明土洞形成、地面塌陷及其与岩溶水水位、水质动态变化的关系。

1.1 覆盖型岩溶发育期土洞的形成及地面塌陷过程

覆盖型岩溶发育区地面塌陷过程其实就是土洞形成、发展直至最后地面坍塌的过程。当岩溶水强烈开采后,形成岩溶水的降落漏斗,岩溶水与上覆松散堆积物孔隙水的补排关系发生逆转,即岩溶水开采前向孔隙水排泄,岩溶水开采后,孔隙水向岩溶水排泄,从而引起孔隙水流方向的逆转,导致:①孔隙水的渗流促使松散堆积物中微小颗粒流失,先在岩溶洞隙附近形成较小土洞;②非粘性颗粒(如沙粒)快速流失,土洞扩大;③粘性颗粒再逐渐掉落、流失,土洞进一步扩大;④土洞达到一定规模后,洞顶部土体失去平衡,快速坍落,波及地面而最终形成地面塌陷。这个土洞发育直至塌陷的过程,有的要经历较长的时间,有的则快速完成。但是,形成地面塌陷时是迅速的、且伴有大量泥沙落入下伏可溶岩岩溶水中,尤其是较大规模的、可以致灾的塌陷,其泥沙土的坍塌量是较大的,因此会使得较大范围内岩溶水出现浑浊及水化学的快速变化。

1.2 土洞发育与地下水位的关系

实践表明,地下水位变幅的大小反映了地下水位变化的强度,水位变幅大,影响范围也相应地增大,水位变化对覆盖层产生的致塌作用力也就相应地增大,短时间、大幅度的水位下降,会使覆盖层受到的浮托力快速消失,覆盖层受重增大,相应的增大了致塌作用力。大幅度的水位下降还会增大孔隙水、地表水与下部岩溶水的水头差,使其补给岩溶水的强度增加,潜蚀作用增强,进而使致塌作用力增大。岩溶水位的上升则会产生向上的渗透力,快速大幅上升产生的渗透力大,会使覆盖层土颗粒间的有效应力减小,孔隙水应力增加,当向上的渗透力与土体的容重相等时,土颗粒产生液化现象,当水位再次下降时,土颗粒被搬运带走,形成土洞[10]。

岩溶地下水位的升降还会引起岩溶空腔及土洞内的气压产生变化。水位下降会在洞内形成负压,

万方数据

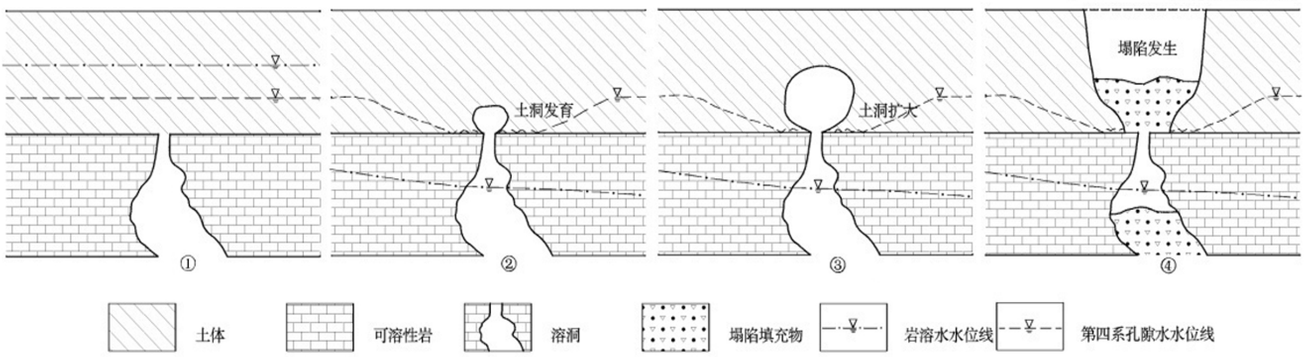


图 1　覆盖型岩溶地面塌陷形成过程示意图

Fig. 1　A schematic diagram of karst ground collapse formation process of soil cave type

在土洞与外界联系不畅的情况下,压力得不到释放,一方面形成洞内与外界的压力差,另一方面产生吸嘬效应,从而使致塌力增大;同样,水位上升则会形成正压力,在压力得不到及时释放的情况下,破坏土洞平衡状态,产生气爆(鼓),导致塌陷发生。地下水位上升或下降速度及幅度的大小,对洞内气压的变化具有控制作用,在相对密闭的空间内,气压的变化与岩溶地下水位的变化速度和幅度呈正比关系。这就是所谓的"风箱"效应[11]:即在岩溶水迅速被抽出致使岩溶水位急剧下降时,或短时间停止抽水致使水位恢复时,在岩溶空隙内就会随之形成真空负压或强压,直接作用于与之接触的松散堆积物上,既会影响孔隙水流的方向和速度,影响其渗透压力发生变化,又能改变松散物颗粒间的作用力,从而使平衡破坏,土洞发展、增大。

1.3　土洞形成与岩溶水水质的关系

土洞形成的过程,是岩溶地面塌陷的孕育过程,土洞的发展结果,在松散堆积物巨厚的区域,可形成稳定拱;但在不能形成稳定拱的区域,就形成岩溶地面塌陷。在此过程中,构成覆盖层的土体逐渐向下部的岩溶洞穴中掉落,并掺混于岩溶水中,物理上造成水的浑浊,悬浮于水中的细小的颗粒在运动的水体中将会保持较长的时间,并随着水流产生相应的一定距离的迁移,如同黄河水中的细小颗粒能够随河水迁移达数百千米,直至流入大海一样,岩溶水中的这些细小颗粒会随着岩溶水岩溶洞穴中的流动,进入附近的抽水井中,或者处于其运动途径(悬浮物分散晕)上的观测井中,从而被观测到。同时,由于作为覆盖层的土体中可能含有的有机物或其它化学物质,在土洞形成的过程中,特别是产生地面塌陷前的快速的大量的土体坍塌时,也会伴随着悬浮物一同运移,致使局部的化学物质形成快速变化,从而可以在附近的岩溶水的运动途径上的观测井及被排泄的抽水井观测到。这也是本文所讨论的建立监测网络开展岩溶地面塌陷预测预报的基础依据。

需要说明的是,上述这些变化,不仅发生在覆盖型岩溶地面塌陷区域,在埋藏型或裸露型岩溶地面塌陷区,当岩溶地面塌陷即将产生前,也会由于"硬质"岩石的坍塌,造成岩溶水在物理及化学性质上的快速变化,通过抽水井及观测井形成的监测网络,这些变化都是可以捕捉到的。

2　岩溶地下水水位—水质联合追溯方法

2.1　水位—水质联合追溯方法的原理

如上述可知,岩溶地面塌陷的形成是快速的、有时是近乎瞬间完成的,但是其形成总是需要经过一定的孕育时间的,则可以根据岩溶水位、水质监测结果,实现对岩溶地面塌陷做出短时的、小范围的较准确预测[1]。在具有产生岩溶地面塌陷条件的隐伏灰岩区,建立具一定密度的岩溶水监测网络,对岩溶水位、水质进行监测。当岩溶水位下降至第四系底部附近时,应加密监测,并及时整理监测资料,做出等水位线平面图,了解岩溶水运动方向;当岩溶水位出现波动,特别是当岩溶水骤然变得浑浊并伴随相应的水化学主要指标发生变化时,根据监测资料结果,即可较准确划定可能塌陷的位置或范围。

2.2　水位—水质联合追溯方法

假设在 2 km×2 km 岩溶地面塌陷危险性较大的隐伏灰岩区,岩溶发育且松散堆积物均质各向同性分布,则可按照纵横方向上隔一段距离布设观测孔的办法,建立水位水质监测网络(图 2a),水位可实时

万方数据

传输，水质亦可通过在线设备检测浊度及主要化学指标（如 pH、TDS、Cl^-、SO_4^{-2}、NO_3^-、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）实时传输。如此可实时判断岩溶水运动方向，并实时掌握水质变化动态。

在图 2a 的情况下，若观测井 Z_{54} 突然发现岩溶水变得浑浊了，水化学性质（主要化学指标，视监测的指标而定）骤然发生变化了，而其它观测井没有任何突发现象发生，则可以根据水位所指示的岩溶水的流向判断，在短期内，甚至几小时或更短的时间里，在 Z_{44} 与 Z_{54} 之间的小范围内存在产生岩溶地面塌陷的可能。

再如图 2b 所示，Z_{33} 为抽水井，若观测井 Z_{44} 浊度突然增大，主要水化学指标（同上）变化剧烈，其它观测井未出现上述现象，则可根据岩溶水运动方向，判断在 Z_{44} 上游方向且在不远处，短时间内具有产生岩溶地面塌陷的可能，而且范围可以划到很小，不会大于观测井间距，即在 Z_{44}、Z_{45}、Z_{54}、Z_{55} 圈围的区域内。

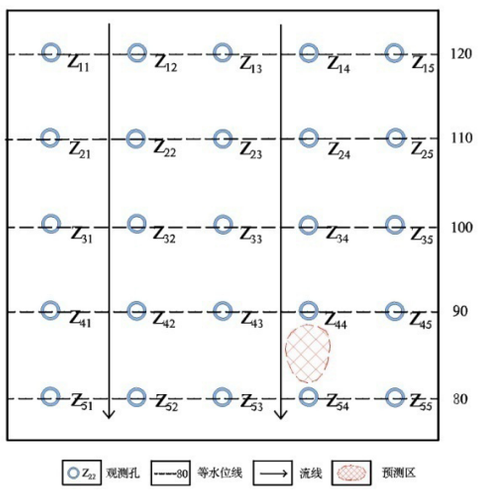
若监测网络测得的流网形态如图 2c 所示，当只有 Z_{44} 观测井监测到水位突降、水浊度及主要水化学指标骤然变化等信息时，说明在 Z_{44}、Z_{34} 之间、横向上变化很小的范围内具有可能形成岩溶地面塌陷的可能。若在 Z_{32}、Z_{33} 两井同时出现上述水浑浊、水化学指标骤然变化时，则指示在 Z_{22}、Z_{23} 两井之间或其下游某个位置将出现岩溶地面塌陷。其它情况，以此类推。

3 应用实例介绍

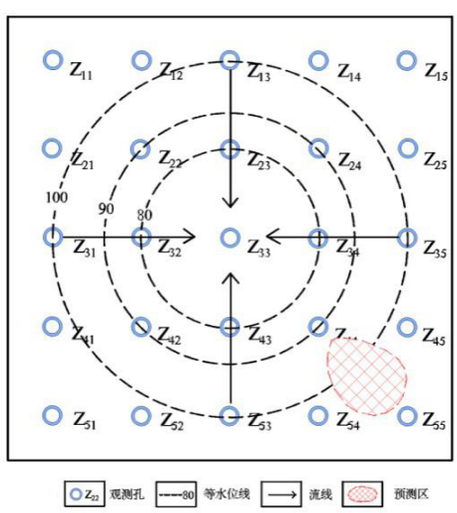
3.1 实例概况

以位于山东省莱芜区西部的凤城街道叶家庄—孟家庄—曹西村一带为例，说明该方法的应用设想。该区地处山前剥蚀平原区，区内地势开阔，地貌类型单一，地形较平坦，地势北高南低，向大汶河方向微倾。该区是山东省乃至我国北方地区岩溶塌陷地质灾害发生最早和危害最为严重的地区之一，塌陷最早发生于 1975 年叶庄铁矿排水大抽水时期。孟家庄村西北部发生地面塌陷 17 处，塌陷范围约 60 000 m^2，曹西村西部塌陷 3 处，塌陷范围约 10 000 m^2。塌陷坑平面形状多为圆—椭圆形，以井状或坛状为主，坑口直径一般 5~6 m，最大 10 m，可见深度 5~7 m。截止 2014 年 8 月，该区域共发生塌陷 50 处。近期在农田内有小规模塌陷多有发生，且房屋斑裂一直未间断，对当地居民的生命财产安全造成威胁。

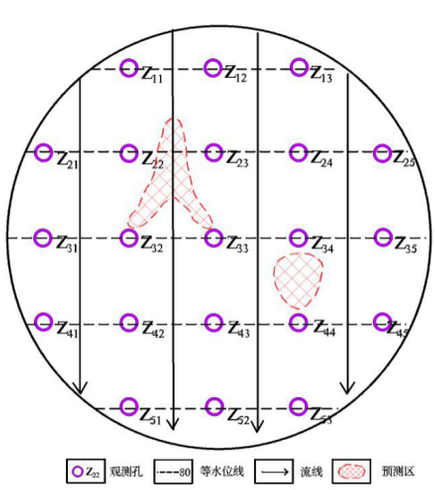
该塌陷区位于大汶河平原河谷区，第四系发育，



(a)



(b)



(c)

图 2 水位水质联合追溯法模型

Fig. 2 Combined tracing method model of water level-water quality

万方数据

下伏基岩地层主要为奥陶系马家沟群灰岩、白云岩及泥质灰岩,岩溶发育,线岩溶率大于10%[13]。这些受构造等因素影响,前第四纪地层缺失,奥陶系灰岩与第四系松散堆积物直接接触的区域,通常称之为“天窗”,该区则称之为孟家庄“天窗”(图3)。由于该区分布的古近系地层胶结程度和强度较低,故本次将古近系0~30 m的范围均圈定为“天窗”区域,范围包括孟家庄西北部、曹西村西部一带,面积约0.48 km²。

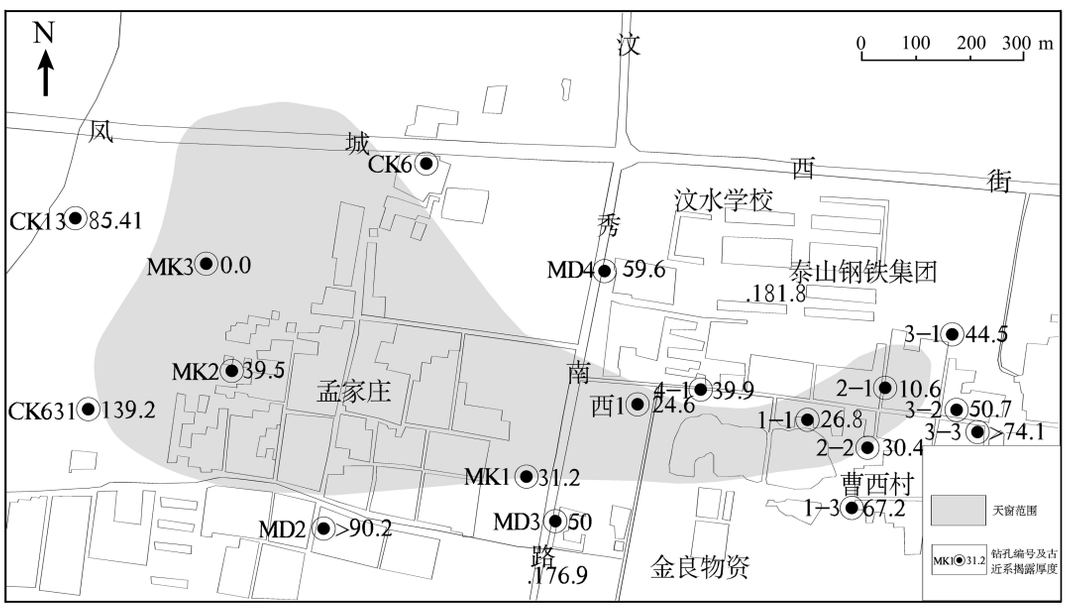


图3　孟家庄“天窗”范围图

Fig. 3　Mengjiazhuang "skylight" range map

调查研究证明,该区塌陷都发生在“天窗”区域。隐伏灰岩岩溶洞穴发育和力学性质薄弱的上覆第四系松散堆积物是塌陷产生的基础,岩溶水位的下降、尤其是在岩溶水位处于灰岩顶板附近上下波动时,上部孔隙水与下伏岩溶水产生强烈的水力联系,特别是由天然条件下的岩溶水向上顶托补给第四系孔隙水转化为岩溶水接受第四系孔隙水的补给这种水流发现的反转,致使岩溶洞穴开口附近的松散物在多种致塌因素影响下发生变形破坏,先形成土洞,并逐步向上扩展到地面,从而形成塌陷。因而将这个“天窗”区域划为岩溶地面塌陷的危险区。

3.2　方法应用设想

由图3所示,在预测的可能产生塌陷的危险区范围分布有10个观测井,但是分布不均,如果按照这一的监测网络,只要对每个监测井都进行水位及水质的监测,相信也是可以依照前述的水位—水质追溯方法,对短期可能产生塌陷的区域进行预测预报。为了达到较高精度的预测预报,建议在此基础上,再施工一定数量的观测井,使之形成更高预期精度(监测井网格大小决定)的监测网络(图4),对各个监测井的岩溶水位、水质进行动态监测,即可使得预测预报的岩溶塌陷的位置、时间更为精准。

该区地面标高176 m左右(图5),第四系厚度一般为8~12 m,以粘性土构成的一元结构或粘性土与砂砾石层构成的二元结构为主。“天窗”范围内碳酸盐岩类顶板标高一般在150 m左右,有古近系分布的区域,第四系底部位于标高164 m左右。根据本地区长期动态监测结果,综合确定其岩溶地面塌陷发生的岩溶水临界(警戒)水位为164 m(埋深12 m左右)。因此,无论是否完善上述监测网络,当岩溶水位接近或低于164 m时,就应加密对岩溶水的水位、水质监测,根据水位、水质突变的情况,判断岩溶地面塌陷的可能产生位置及时间,实现有效预测预报。

4　结　语

岩溶地面塌陷发生突然(快速)、危害大,但是其孕育、发展还是会有征兆。经验表明,依据监测井对岩溶水的水位、水质的动态监测,当发现骤然的水位波动,并伴随着明显的水浑浊、水化学性质快速变化时,依据监测井所处的位置及岩溶水的流场形态,是可以对即将形成的岩溶地面塌陷进行短期(短至数日或数小时甚至更短时间)、较准确位置(预测范围

万方数据

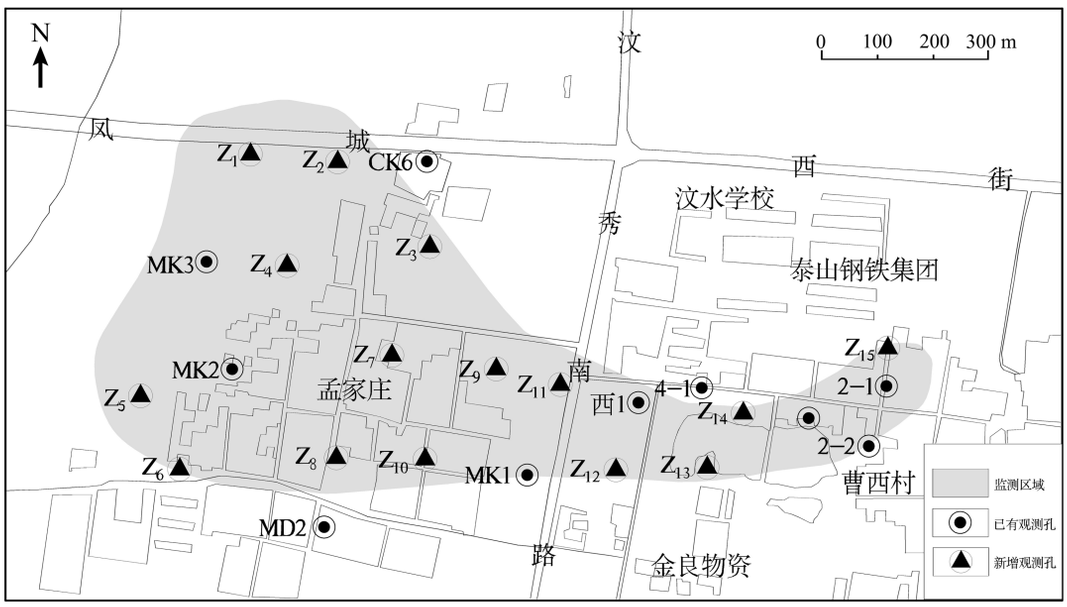


图4 孟家庄“天窗”监测网络部署图

Fig. 4 Monitoring network deployment diagram in Mengjiazhuang "skylight" range

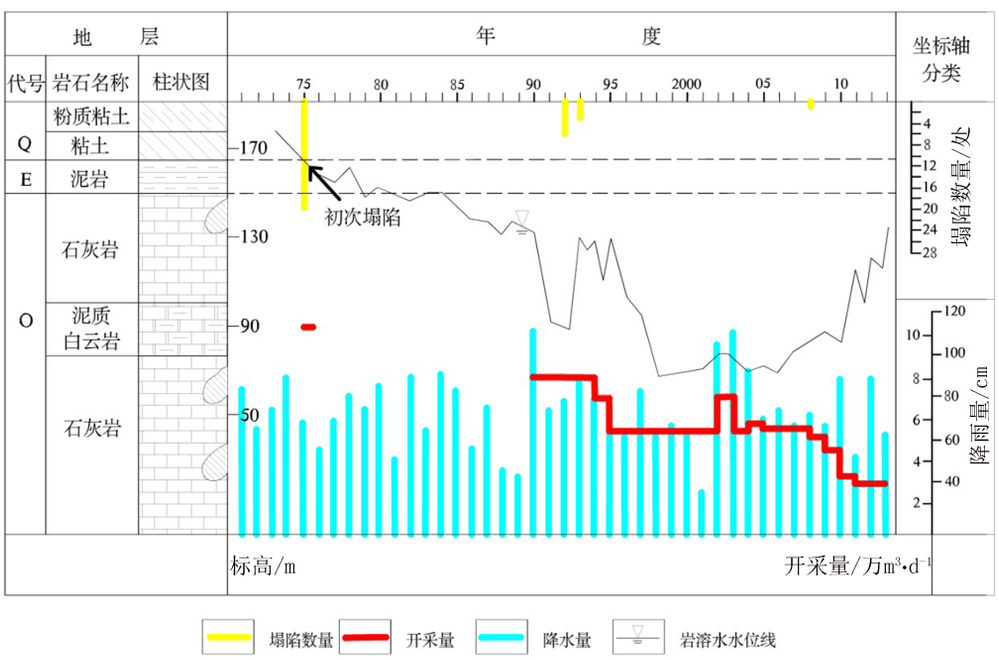


图5 孟家庄“天窗”区岩溶塌陷发育特征图(根据山东省地质五队的报告内容修改)

Fig. 5 Characteristics of karst collapse development in Mengjiazhuang area

可控制在监测井间距以内)的预测预报的。据此,本文提出了建立健全岩溶水监测网络,对岩溶水位、水量、浊度及主要化学组分等指标进行实时动态监测,结合岩溶水流向等参数,实现短时间(数小时至数日)、小范围(小于监测网络间距)的较高精度岩溶地面塌陷预测预报的方法,并以山东省莱芜市孟家庄地区为例做了简要说明。

基于岩溶水动态的岩溶地面塌陷预测预报精度的高低,取决于监测网络密度及监测频率的高低,监测网络密度越大、频率越高,则监测精度越高,预测预报的岩溶地面塌陷的时间点及空间位置就越准确。

本文只是依据以往的经验提出了基于岩溶水动态的岩溶地面塌陷的预测预报方法设想,在实际应

万方数据

用中可能会遇到预想不到的问题,但是仍愿意呈现出来以飨读者,希望能够对岩溶地面塌陷的预测预报工作有所助益。

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(3):153-154.

[2] 雷明堂,蒋小珍,李瑜.岩溶塌陷综合预测评价的理论与方法[J].中国地质灾害与防治学报,1997(S1):46-50.

[3] 陈学军,陈植华,陈先华,等.桂林市西城区岩溶塌陷模糊层次综合预测[J].桂林工学院学报,2000(2):112-116.

[4] 朱庆杰,苏幼坡,刘廷全.唐山市岩溶塌陷安全评价[J].中国安全科学学报,2004(02):94-97+3.

[5] 赖永标,乔春生.基于支持向量机岩溶塌陷的智能预测模型[J].北京交通大学学报,2008(1):36-39+43.

[6] 李公岩,李元仲,杨蕊英,等.山东省枣庄市岩溶塌陷的层次模糊预测评判[J].中国地质灾害与防治学报,2008(2):87-90.

[7] 黄仁东,韩明,张小军,张海彬,金浩,华正阳.基于Fisher判别法岩溶塌陷倾向性等级分类预测[J].中国安全科学学报,2011,21(9):70-76.

[8] 蒙彦,黄健民,贾龙.基于地下水动力特征监测的岩溶塌陷预警阈值探索:以广州金沙洲岩溶塌陷为例[J].中国岩溶,2018,37(3):408-414.

[9] 蒋小珍,雷明堂,陈渊,葛捷.岩溶塌陷的光纤传感监测试验研究[J].水文地质工程地质,2006(6):75-79.

[10] 罗小杰.也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J].工程地质学报,2015,23(05):886-895.

[11] 高宗军.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[J].中国工程科学,2008(4):38-43.

[12] 王延岭.山东省泰莱盆地岩溶地面塌陷影响因素分析[J].中国岩溶,2016,35(01):60-66.

[13] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等.山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J].中国岩溶,2015,34(5):495-506.

[14] 姜伏伟.岩溶塌陷发育机理模式研究[J].中国岩溶,2017,36(6):759-763.

[15] 邢宇健.岩溶区地下水位动态变化诱发地表塌陷的机理研究[D].北京交通大学,2018.

[16] 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(4):75-78.

Prediction of karst ground collapse based on karst water regime

GAO Zongjun, LU Tongmin, WANG Min, FENG Jianguo, LIU Shujiang, WANG Shu

(*Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao*, *Shandong* 266510, *China*)

Abstract　Due to the characteristics of sudden occurrence and diversity of influencing factors, the forecasting and prediction of karst ground collapse can only be defined in the area of dangerous areas, and it is impossible to predict when and where the dangerous area will occur. The existing investigation results of karst surface collapse show that the occurrence of karst surface collapse is precursory, that is, the water level fluctuation and turbidity of nearby wells will occur ahead of time. Based on this, this paper proposes to establish a sound groundwater observation network and carry on the real-time dynamic monitoring of karst water level, water volume, water turbidity and main chemical components, and can be combining with karst water flow parameters to achieve the higher precision karst ground collapse prediction for short time (hours to days) in small range (less than the monitoring network spacing). It is illustrated by the Mengjiazhuang area of Laiwu City, Shandong Province. Due to the characteristics of sudden occurrence and diversity of influencing factors, the forecasting and prediction of karst ground collapse can only be defined in the area of dangerous areas, and it is impossible to predict when and where the dangerous area will occur. The existing investigation results of karst surface collapse show that the occurrence of karst surface collapse is precursory, that is, the water level fluctuation and turbidity of nearby wells will occur ahead of time. Based on this, this paper proposes to establish a sound groundwater observation network and carry on the real—time dynamic monitoring of karst water level, water volume, water turbidity and main chemical components, and can be combining with karst water flow parameters to achieve the higher precision karst ground collapse prediction for short time (hours to days) in small range (less than the monitoring network spacing). It is illustrated by the Mengjiazhuang area of Laiwu City, Shandong Province..

Key words　karst ground collapse, prediction and forecast, method, monitoring network, karst water regime

(编辑　吴华英)

万方数据