

地气灾害与地质科学问题

卢予北^{1,2}, 李 艺^{3,4}, 周春华², 陈 莹^{1,2}, 王建华^{3,4}, 金 萍²

(1. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053; 2. 河南省地矿局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053; 3. 《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部, 北京 100037; 4. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 地下气体的形成与地质构造或活动有关, 导致地下气体的喷发或溢出主要有自然或人为(钻探或采矿等地下工程等)2 种因素。20 世纪初国内外开始关注地下气体的喷发或溢出, 主要目的是用于地震监测或预报。随着人类活动空间的扩展和地球内部能量周期性聚集释放, 地下气体向其它空间排放现象日趋频发, 其主要成分有 CH₄、CO₂、H₂S 等, 是造成大气、地下水、土壤污染和人身伤害的主要原因之一。同时, 大量文献和证据证明地震、温室效应、雾霾等与地下气体喷发或溢出有关。所以, 地下气体泄漏是一种新型的地质灾害, 属于民生地质的重要部分, 涉及了诸多科学问题。本文结合南太行山前(鹤壁)由钻井工程诱发多起地下气体喷发或溢出现象, 就其危害和成因进行了分析研究, 并提出了具体的地质科学问题和建议。

关键词: 地下气体; 地气灾害; 钻探; 地质科学; 南太行山前(鹤壁)

中图分类号: P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)10-0001-08

Underground Gas Disaster and Geological Science/LU Yu-bei^{1,2}, LI Yi^{3,4}, ZHOU Chun-hua², CHEN Ying^{1,2}, WANG Jian-hua^{3,4}, JIN Ping² (1. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China; 2. No.2 Institute of Geology and Environment Survey, Department of Geology and Mineral Resources of Henan Province, Zhengzhou Henan 450053, China; 3. Editorial Board of Exploration Engineering, Beijing 100037, China; 4. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The formation of underground gas is related to the geological structure or geological activities, but underground gas eruption or overflow are mainly led by natural or artificial factors, such as drilling or mining. At early 20th Century, underground gas eruption or overflow were paid attention both in China and abroad to be applied mainly in earthquake monitoring or prediction. With the expansion of human activity space and periodic accumulation and liberation of intermittent energy in the Earth, the liberation of underground gas to other space are becoming more and more frequent, the main components are CH₄, CO₂, H₂S and so on, which is one of the main causes of the air, groundwater and soil pollution as well as the personal injury. At the same time, a large number of documents and evidence prove that the earthquake and greenhouse effect as well as frog and haze are related to underground gas eruption or overflow. Therefore, the underground gas leakage is a new type of geological disaster, which is an important part of the livelihood geology involving a lot of scientific problems. Combined with the phenomena of underground gas eruption or overflow induced by drilling operation in south Taihang Piedmont (Hebi), the hazards and causes are analyzed in this paper and some geological science problems and specific suggestions are put forward.

Key words: underground gas; underground gas disaster; drilling; geological science; south Taihang Piedmont (Hebi)

1 地气灾害——一种新型的地质灾害类型

我国地质灾害种类繁多、分布广泛、危害性较大, 是世界上发生频率高和损失严重的国家之一^[1]。导致地质灾害发生的原因和种类很多, 根据地质灾害形成机理可以分为内动力地质灾害、外动力地质灾害、人为动力地质灾害以及复合型地质灾

害。国内频发和常见的地质灾害主要有滑坡、崩塌、地面塌陷、泥石流等^[2-6](见表 1)。据国土资源部全国地质灾害通报数据显示: 2016 年 1—3 月全国共发生地质灾害 304 起, 其中滑坡 141 起、崩塌 131 起、地面塌陷 27 起、泥石流 3 起、地裂缝和地面沉降各 1 起, 分别占地质灾害总数的 46.4%、43.1%、

收稿日期: 2016-07-31

基金项目: 2016 年度河南省国土资源科技项目“河南省干热岩钻探问题研究”(编号: 2016-地质矿产类-21); 2015 年度河南省国土资源科技项目“鹤壁市地下硫化氢(H₂S)气体形成机理及地质环境问题”(编号: 2015-22)

作者简介: 卢予北, 男, 汉族, 1964 年生, 教授级高级工程师(二级), 河南省深部探矿工程技术研究中心主任, 河南省学术技术带头人, 地质工程专业, 工学博士, 主要从事深部科学钻探、地质新能源勘查技术研究与管理工作, 河南省郑州市南阳路 56 号, lu-yubei@263.net; 李艺, 女, 汉族, 1962 年生, 《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志主编, 教授级高级工程师, 探矿工程专业。

8.9%、1.0%、0.3%和0.3% (见图1),共造成43人死亡、2人失踪、10人受伤,直接经济损失8606.1万元,图2是2007—2016年1—3月全国地质灾害数量对比。另据民政部国家减灾委员会办公室介绍,2016年以来各类灾害造成全国1074人死亡、270人失踪。其中6月份最为严重,共造成833人死亡,233人失踪^[7]。

表1 常见与地质相关的传统灾害类型

| 地质灾害类型 | 具体灾害特征 |
|-----------|----------------------------------|
| 构造活动与岩体位移 | 地震、火山喷发、地层错动、岩体崩塌、滑坡、泥石流等 |
| 地面变形与特殊岩土 | 地面塌陷与沉降、地裂缝、黄土湿陷与胀缩、冻土冻融、沙土液化等 |
| 极端气候与土地退化 | 地下水疏干或水位下降、洪灾、水土流失、土地沙漠化、盐碱化等 |
| 城镇化与工业化建设 | 建筑物倾斜开裂、地基变形、垃圾污染、地下水和农田污染、地方病等 |
| 矿山工程与矿产开发 | 煤层自燃、洞井塌方、岩爆、瓦斯爆炸、突水、地下水排放及选矿污染等 |

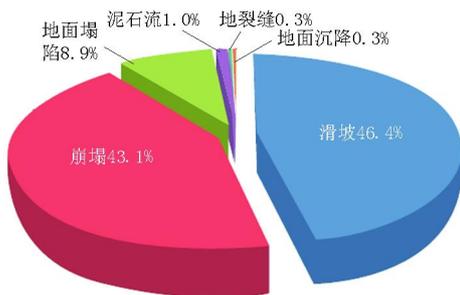


图1 2016年1—3月地质灾害类型构成

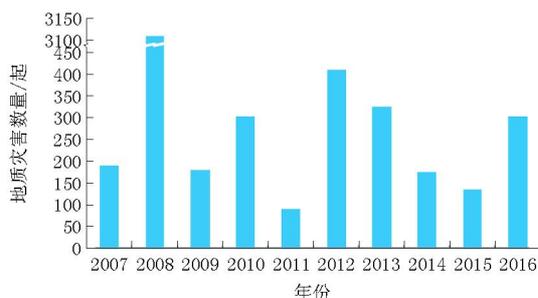


图2 2007—2016年1—3月全国地质灾害数量对比

随着经济社会的快速发展和人类活动空间的拓展,新型的地质灾害相继出现。如油气、地热资源、地下水资源钻探(钻井)和采矿等地下工程出现的地下气体的喷发或溢出导致的大气和地质环境(地下水和土壤)污染^[8-9],其主要成分为 CO_2 、 CH_4 和 H_2S 等。研究表明:这些气体的产生主要有热化学成因、生物成因和岩浆成因3大类,主要由地质构造或活动形成,人为(钻探或采矿等地下工程)因素起

到了诱发作用。

关于地下气体溢出和地球的排气现象早在20世纪初就开始引发关注,主要研究成果应用于地震预报和监测方面。大量地震观测资料表明:地震前后地球排气作用和地下气体异常释放是一种普遍现象^[10-15]。杜乐天认为,地球排气会产生孕震、致旱、地磁异常、特大暴雨、森林草原大火等自然灾害。甚至认为雾霾、大气混浊也和地下排气带上来的可吸入微粒有相当密切的联系^[16]。

近年来,中国地质大学(武汉)李德威等从地球动力学理论对地下气体、地热和地震关联性进行了大量的研究,认为华北地震及其相关的热灾害链可能受源于渤海和青藏高原的下地壳不均匀流动的制约,渤海放射状下地壳热流系统与地幔软流圈底辟作用有关^[17]。随着渤海盆地之下的地幔软流圈热能和青藏高原输出的热能有规律地积累和释放,周期性发生热灾害链(见图3)。

王永才和孙香荣讨论了河北及邻近地区 CO_2 富集带与地热异常带、地震震中的分布关系。结果显示, CO_2 富集带与地热异常带在空间上重合,但与 $M \geq 5$ 地震震中分布并不重合,这些地震多发生在 CO_2 富集带的边沿附近。地热异常带、 CO_2 富集带和地震活动带之间空间分布的这种依存关系不是偶然的。地热异常带地下流体也异常发育,促进了碳酸盐的变质作用,产生 CO_2 富集带。地热异常区呈带状断续分布,从而在地温梯度变化大的地段容易积累热应力,进而引起地震发生^[18]。

综上所述,地球排气与地震、地热异常甚至和自然灾害、雾霾等关系密切^[19-20]。它可以通过深部大断裂排气,也可以是沿着疏松介质持续或间歇性排气。所以,地下气体喷发或无序溢出属于一种新型的地质灾害类型。

2 地下气体喷发或溢出事件

2.1 自然喷发或溢出

(1)2014年10月,西伯利亚的亚马尔半岛和泰梅尔半岛发现了3个巨大的坑洞(见图4),其直径15~80 m,深度60~100 m。目前,科学家证实这是由于地下气体爆炸而形成的坑洞,同时发现洞内含有天然气水合物成分。

(2)俄罗斯北部有一个80 m直径的天坑(见图5),坑孔内缘周围的颜色较暗,表明曾经发生过剧烈

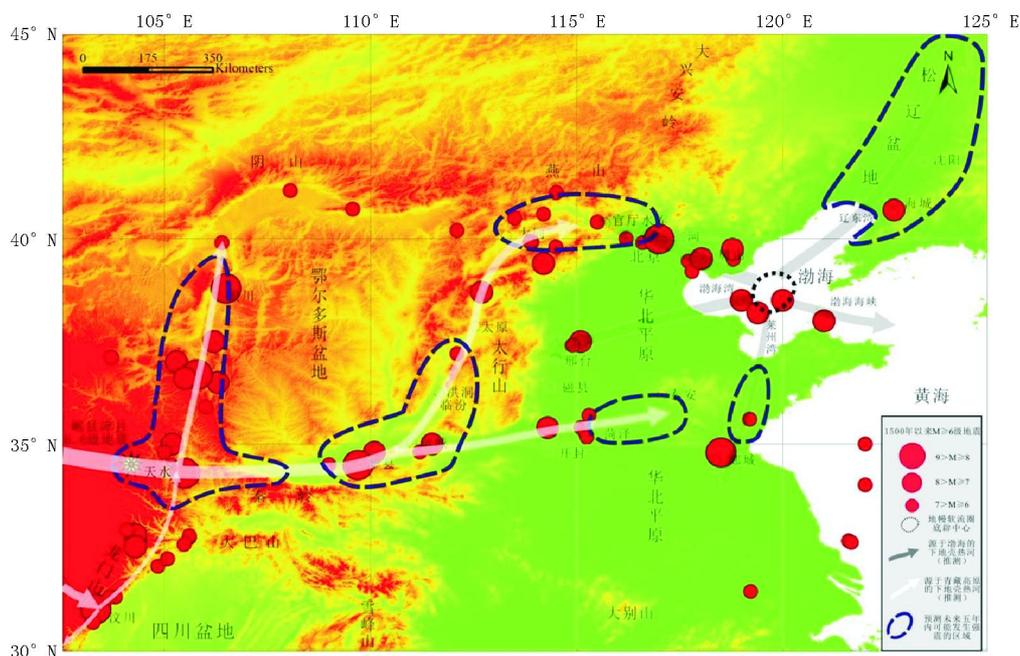


图 3 华北地震孕育环境与强震趋势分析^[16]



图 4 西伯利亚地下气体爆炸形成的坑洞



图 5 俄罗斯北部 80 m 直径天坑

的燃烧。俄罗斯专家表示,这种情况很有可能是由全球变暖导致地下气体被释放出来引起的爆炸。

(3)2015 年 8 月—2016 年 6 月,我国西沙航迹研究所通过科学器材探测与人工潜水发现了西沙永乐蓝洞,蓝洞深度为 300.89 m,上部直径为 130 m,洞底直径约 36 m(如图 6 所示)。目前尚未观测到蓝洞内与外海联通,洞内水体无明显流动。与巴哈马长岛迪恩斯蓝洞(202 m)、埃及哈达布蓝洞(130 m)、洪都拉斯伯利兹大蓝洞(123 m)、马耳他戈佐蓝洞(60 m)相比是目前世界上已知最深的海洋蓝洞。



图 6 中国西沙永乐蓝洞

2.2 钻探诱发地下气体溢出

(1)2003 年 12 月,中石油川东钻探公司“12.23”特大井喷事故中,由于大量 H₂S 飘逸导致 243 人死亡、396 人住院接受治疗。

(2)据《北京科技报》2004 年 4 月 7 日报道:浙

江杭州市萧山区荣星村,一块荒芜之地上,20多个大大小小的地洞,3个多月来持续不断地冒出某种神秘气体,火柴一点就能熊熊燃烧日夜不熄。据悉,2003年11月中旬,某地质钻探公司钻探至地下40 m左右时,地下气体就开始向外喷发,每个钻孔均如此。喷发和溢出的气体无色,有淡淡的煤油味。

(3)甘肃省清水一口165.01 m水井分别在1992年7月30日、2000年6月23日、2000年7月5—7日多次出现井水变蓝现象,期间均有明显的刺激性气味溢出。该井位于秦岭北缘断裂带北侧,主要出露地层为古生界变质岩,火成岩和新生界碎屑岩。第四系中上更新统黄土广布,覆盖于基岩之上,河谷内沉积有冲洪积砂砾石和亚砂土。该井开采层主要为第三系层间承压水^[21]。

(4)2007年1月21日据新华社电,重庆市双桥区通桥镇一温泉井中有不明气体溢出。事发后,该区马上疏散转移了周边3500多人,没有人员伤亡。据检测结果,地下溢出气体为 H_2S 和 CH_4 混合气体。

(5)2010年5月19日下午,海南省三亚市崖城镇长山小村一村民在自家芒果园打水井时,不慎引燃不明气体,致使水井内喷射出3~4 m高的火焰。在消防队员扑灭明火后,水井内突然又喷射出数米高水柱。在灭火过程中,能明显闻到一些刺鼻的味道,甚至有些队员出现头晕、胸闷的现象。

(6)据2015年8月19日《青年报》消息,8月16日15:30左右,上海市崇明县绿华镇华星村水产路四号桥东侧1 km处,在钻井60 m时出现热水自流。同时,地下冒出不明气体,遇明火燃烧,火焰喷射最高有5 m左右(如图7所示)。



图7 上海崇明绿华镇华星村60 m热水井燃烧

(7)中新网柳州2014年6月10电,广西柳州市柳城县一养猪厂在打井至230 m时,突然从井内溢出气体与火星相遇后燃烧,当地群众和部分抢险人员疑为 CH_4 。

3 南太行山前(鹤壁)地气灾害

3.1 区域地质构造与地层

该区隶属中朝准地台山西台隆和华北拗陷,自西向东分别为太行山隆起、汤阴断陷和内黄隆起。由于经历了长期、多次构造运动,构造形迹以断裂为主,褶皱不发育。按断裂特征和空间展布规律可划分为北北东向、北东向和近东西向3组。其中以北北东向断裂规模最大,长达几十至数百千米。由任村—西平罗大断裂、青羊口大断裂和汤东断裂组成太行山东麓深断裂带,控制本区岩浆活动和新生代断陷盆地的形成,图8为区域地质构造图。

区域地层自上而下为第四系(层厚20~40 m)、新近系(层厚600~700 m)、古近系(层厚800~100 m)、三叠系(层厚300~400 m)、二叠系(层厚500~700 m)、石炭系(层厚120~140 m)、奥陶系(层厚 \geq 400 m)。

3.2 地下气体逸出情况

鹤壁位于南太行山前汤阴凹陷盆地,区内储藏着大量的地热资源,1999年至今,多家单位对深部地热和浅层地热能资源进行了勘探开发,分别在1146、3200、320和110 m不同深度钻探时,出现过长时间、大量的井喷或气体逸出现象,并发生过人员和动物死亡事件。

3.2.1 新近系气液逸出

2014年,南水北调鹤壁运行管理处在其办公区域内凿井4眼,地层为第四系和新近系松散地层,第四系地层为32 m。其中1眼饮用水井320 m,其余3眼用于地温空调,井深110 m。饮用水井在洗井过程中发生了井喷现象,据现场人员描述,气体喷出高度达十余米,紧邻水井的办公楼墙面上有白色结晶物,喷出气体伴有刺激性气味,判断喷出气体主要为 CO_2 ,同时含有 H_2S 等其它气体,工地饲养犬晕倒。

2014年4—5月,新凿水井所取地下水先后送检了3家单位,根据采样分析,水体中 H_2S 含量明显偏高,为防止发生人员中毒事故,采取了封井措施。该井南侧约20 m左右处的地温空调井(HB2井),开始未发生气体逸出现象,在饮用水井封井后,有气体间隙性逸出,该气体易致人头晕。BH2井井口硫化严重(见图9)。

3.2.2 深部地层气液井喷

根据《河南省鹤壁市新区地热地质调查报告》和

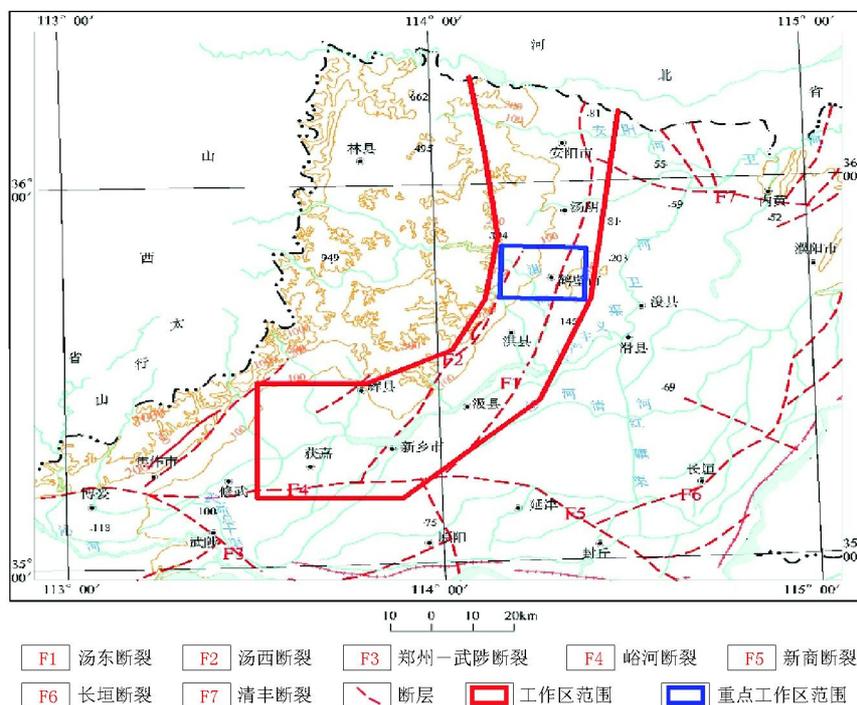


图 8 南太行山前(鹤壁)区域地质构造图



图 9 HB2 井井口硫化现象严重(井深 110 m)

《河南省鹤壁市淇滨新区地热及二氧化碳资源普查报告》显示,几个地热地质调查井均发生气液井喷现象。

鹤热 1 孔成井深度 1146 m,终孔至古近系地层,止水位置 757 m。在 235 和 840 m 深度处有气体显示,成井后产生水气混合物间歇性的喷涌现象,自喷高度 15 m,自流量 190 m³/d。气体成分经检测,体积含量为 H₂S 占 60%,CO₂ 占 40%,有 0.4%

的氮气和微量的氯气,曾造成 1 名人员死亡。

鹤热 2 井成井深 3276 m,终孔地层为奥陶系灰岩。地热水中气水比为 14.2: 1,气体成分 CO₂ 含量 82.44%,其次 CH₄ 含量 17.56%,硫酸根离子、游离二氧化碳和可溶性总固体含量分别高达 630.5、444.49、4718.6 mg/L。出口温度 74 ℃,间歇性井喷,井口压力 2.2 MPa^[22],井喷短时内产生了大量的钙质结垢物(如图 10 所示)。



图 10 气水混合物喷出和结垢情况

鹤热3井与鹤热2井相距仅1 km,溶隙、裂隙发育,但多被后期方解石脉充填,富水性差,成井后发生间歇性井喷,喷出物为气水混合物,井喷延续时间平均为6 h,平均间隔时间约8~10 d。每次井喷

产水量 350 m^3 左右,平均每天产水量仅 35 m^3 。井口温度 $58\text{ }^\circ\text{C}$,压力 1.55 MPa ,富含 CO_2 气体。

气体逸出井特征及平剖面图见表2和图11。

表2 鹤壁市气体逸出井特征

| 编号 | 位置 | 井深/m | 气体逸出特征 |
|-----|--------|---------|--|
| 鹤热1 | 市政府家属院 | 1146 | 成井后产生水气混合物间歇性的喷涌现象,自喷高度15 m,体积含量为 H_2S 占60%, CO_2 占40%,有0.4%的氮气和微量的氯气 |
| 鹤热2 | 热力公司院内 | 3276 | 地热水中富含气体,气水比例14.2:1,气体中 CO_2 含量82.44%, CH_4 含量17.56% |
| 鹤热3 | 华山路南段 | 3318.68 | 成井后仅间歇性井喷,喷出物为气水混合物,井喷延续时间平均为6 h,平均时间间隔约8~10 d |
| HB1 | 南水北调鹤壁 | 320 | 洗井后发生气液井喷,具有刺鼻味,高达十余米 |
| HB2 | 运行管理处 | 110 | 间歇性气体溢出,具有刺鼻味 |
| HB3 | 财政局家属院 | 324 | 水中有 CO_2 气体逸出 |

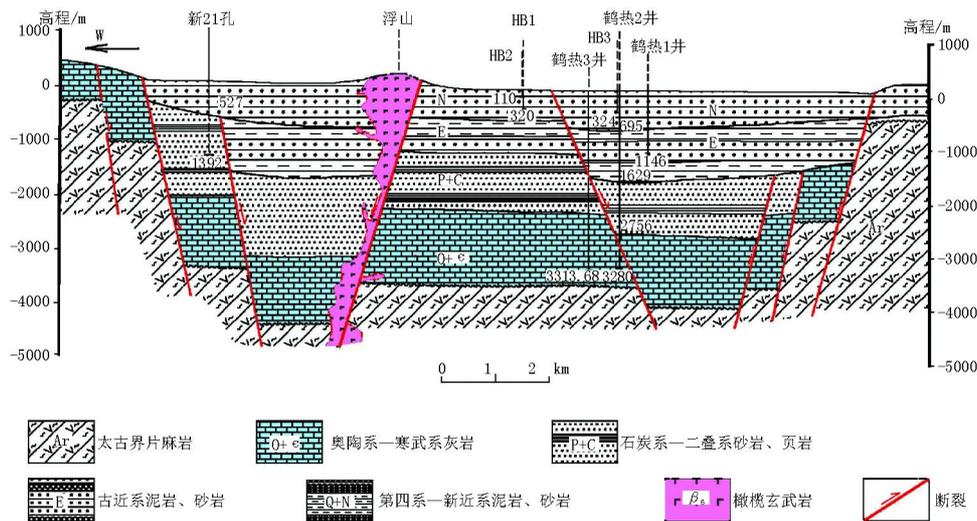


图11 鹤壁市气体逸出井地质剖面图

3.3 地质环境问题及危害

根据《河南省多目标区域地球化学调查》显示:鹤壁地区的土壤中pH、TC和S三个指标随深度的变化存在突变现象,浅表土壤中指标高,逐渐降低后约在150 cm处发生突变后逐渐升高。分析认为这些现象可能与沉积环境有关,也有可能和深层元素的迁移有关。

2015年3月对该地区深度超过40 m的地下水井进行了调查取样,测试结果显示,所测指标中pH、硝酸盐、总硬度、溶解性总固体含量等指标偏高,并且重碳酸根含量高达 1180 mg/L ,不符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

上述调查和测试表明:该区域在110~3318.68 m垂深的新近系、古近系和奥陶系地层都有气体排放,并呈周期性喷发,通过地球化学勘查和水质检测都证实了区域性污染,造成了一定的地质环境问题。

其主要危害有:

(1)该区人口密集,在发生地震、火山爆发、地壳运动等灾害时,逸出气体压力大,导致瞬间喷发,易造成严重的人员伤亡事故,一旦大量排放还会改变大气中各种成分的比例,引起局地气候变化和雾霾加剧;

(2) CO_2 、 CH_4 气体会直接造成区域性温度变化、气候变暖问题,同时,当空气中 CO_2 、 CH_4 气体浓度到达一定标准时,将危害人身安全;

(3) H_2S 是剧毒物质,当大量溢出时,将会导致群体性安全事件;

(4)这些气体或气液渗透到浅层地下水或土壤时,将会造成严重污染,并且现有井喷水井距南水北调中线工程干渠仅100 m,该段干渠设计为内排段,地下水与渠水水力联系密切,从而影响着城镇饮水安全、南水北调供水安全、农业食品安全和环境安全

等。

4 地下气体成因及涉及的地质科学问题

4.1 地下气体成因

地球是一个开放的不平衡体系,45亿年来从地核向外不断的排放气体,主要包括 H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , He 及 Ar 等气体。

地球排气有多种形式,无论是现代火山喷出气体,还是中下地壳加热脱气,或者大洋中脊新洋壳形成处水热流体中, CO_2 是地球排出气中的主要成分。大陆地壳的排气过程按区域大致可划分火山区排气和非火山区排气。在火山区,火山通道及附近的断层成为排气的主要通道;而非火山区,各种规模的断裂、裂谷等都是地球内部向地球表面和大气排放气体的通道。

地下气体排放通道不畅或受阻时,当能量聚集一定程度条件下瞬间喷发将会形成洞穴或天坑;区域构造发育且与地表浅层连通时,地气将会泄漏或溢出地面,造成大气、地下水和土壤污染;深部构造和断裂发育,并未与其它构造和浅部连通时,当气体能量聚集一定程度时,可能发生地震、岩体崩塌或其它灾害^[23-25]。

4.2 涉及的地质科学问题

地下气体排放和在地下储存各有利弊。无序排放造成环境系列问题或灾害,地下大量储存无泄漏时,一旦能量聚集或其它条件诱发很可能发生严重的灾害(地震、崩塌、地面塌陷等)。如何综合研究和开发利用地下气体是一个重大的科学问题。地下气体本身就是资源,一方面地下气体溢出是反映地球深部信息的最好载体,能使地质学家更好地了解地下油气、金属与非金属、地热、天然气、煤层气等矿产资源成矿规律和储量;另一方面,地下排气作用与地震等自然灾害的关系十分密切,做好监测对灾害预防具有一定的意义。所涉及的地质科学问题如下。

(1)地下气体的成因机理、迁移模式和扩散规律。通过钻探建立地下气液动态监测井点,对气体的成分及渗出规律,以及水体中的相关成分、水位水温的变化进行动态监测,掌握气体逸出规律、气体组分的变化,研究地下气体的迁移模式和扩散规律。

(2)地下气体分布与地热异常的关系。通过收集遥感以及以往地热地质勘查等资料,结合水位、水

温测量、土壤地球化学和同位素测量结果,圈出地热异常区,分析气体富集带与地热异常带在空间上的关系。

(3)地下气体分布带地质环境影响。掌握受地下气体影响的地下水水化学成分,结合气体的迁移、扩散、聚集规律,分析水土中相关指标与地下气体的关系,对逸出带地质环境变化进行研究。

(4)地下气体分布与地质构造、地震和雾霾的关系。在各类地质资料的基础上,通过地球动力学理论和相应工作手段查清浅层及深部地质构造,通过监测地下水、地气中的相关指标,搜集相关数据,研究地下气体与地质构造、地震和雾霾的关系。

(5)地下气体资源的综合利用。通过调查及动态监测工作,确定聚气层位,针对相应层位气体的迁移和扩散规律,建立报警系统,结合逸出气体的组分通过研究确定防治对策和方法,在防治的同时,对 CO_2 、 CH_4 等气体开展综合开发利用。

5 开展地气灾害调查与防治的建议

通过地下气体喷发和溢出事件可以看出,多数情况下与钻探(钻井)等工程活动有直接关系,上述5个地质科学问题的研究也需要钻探(钻井)工程来依托和支撑,因此,提出以下建议。

(1)地下气体泄漏潜在危害巨大,涉及民生和环境保护问题,建议将地下气体喷发或溢出纳入地质灾害范畴;

(2)建议在已发生地区开展专题研究和调查评价工作,广泛调研已有钻井资料中地气喷发和溢出信息,圈定地气灾害区域进行调查评价;

(3)通过钻探建立地下气液调查和动态监测井点,为地学问题的研究提供基础数据和依据;

(4)加强气体监测网和预警平台建设,为政府规划和决策提供技术支撑;

(5)注重钻探过程中地下气体泄漏或溢出问题以及安全防护,需要封闭时严格按照封井要求进行,以免造成泄漏和污染。

6 结语

地下气体喷发或溢出是一种新型的地质灾害,涉及地质、地震、土壤、环境地质、水文地质、钻探工程等学科,具有“危害性大、隐蔽性强、突发不可控”等特点,需要加强调查和防治,钻探(钻井)技术可

以在地气灾害调查评价和防治领域发挥重要的作用。

参考文献:

- [1] 李乾坤,石胜伟,韩新强.国内地质灾害机理与防治技术研究现状[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(7):52-54.
- [2] DZ/T 0286—2015,地质灾害危险性评估规范[S].
- [3] DZ/T 0220—2006,泥石流灾害防治工程勘查规范[S].
- [4] 梁柱,陈燕,陈宏伟.特大型泥石流地质灾害治理工程[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):70-74.
- [5] 李晓,李守定,陈剑,等.地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9):1792-1806.
- [6] 彭建兵.中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题[J].工程地质学报,2006,14(1):5-12.
- [7] <http://news.cctv.com/2016/07/26/ARTI1bGgr01gS0lywn3wDbT160726.shtml>[OL].
- [8] 吴时国,谢杨冰,秦芹,等.深水油气浅层钻井的“三浅”地质灾害[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):38-42.
- [9] 宋利娜,张玉铭,胡春胜,等.华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J].中国生态农业学报,2013,21(3):297-307.
- [10] 童纯菡,李巨初.地气物质纳米微粒的实验观测及其意义[J].中国科学(D辑),1998,28(2):153-156.
- [11] 崔月菊,杜建国,陈杨等.汶川 Ms8.0 地震前后龙门山断裂带 CO 和 CH₄ 排气增强[J].地震研究,2016,39(2):239-244.
- [12] 蔡仲琼,高德媛,紫丽曼.震前地下水中硫化氢气体的短临前兆特征[J].西北地震学报,1982,4(3):25-30.
- [13] 高清武.长白山天池火山水热活动及气体释放特征[J].地球学报,2004,25(3):345-350.
- [14] 童纯菡,李晓林.地气测量寻找深部金矿及金多金属矿的研究[C]//贺振华.理工科技新进展.四川成都:四川科技出版社,1996:124-131.
- [15] 葛良全,童纯菡.隐伏断裂上方地气异常特征及其机理研究[J].成都理工学院学报,1997,24(3):29-35.
- [16] 杜天乐.从新世纪独联体有关地球排气和油气成因理论进展所得到的启示[J].岩性油气藏,2009,21(4).
- [17] 李德威,郝海健,刘娇,等.华北热害链的结构、成因及强震趋势分析[J].地学前缘,2013,20(6):102-108.
- [18] 王永才,孙香荣.河北及邻近地区地下水溶解二氧化碳、氢和氦分布的地震地质特征[J].华北地震科学,1992,(2):58-66.
- [19] 刘芳,刘丛强,王仕禄,等.喀斯特地区土壤剖面 CO₂、CH₄ 和 N₂O 浓度的相关关系[J].生态学杂志,2010,29(4):717-723.
- [20] 杨凤根,童纯菡,王鹤年,等.油气田上地气物质迁移机制研究[J].地球化学,2000,29(5):445-446.
- [21] 陈兰庆,钟心,吴永信.甘肃清水陇 07#井井水变色的水文地球化学机理分析[J].西北地震学报,2005,27(3):278-281.
- [22] 吴焯.河南鹤壁新区 2 号地热井存在问题分析与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):38-42.
- [23] 朱自强,陈华静,郑大林,等.地下流体宏观异常变化中气体作用初探[J].地震,2002,22(4):67-73.
- [24] 刘耀炜,张天中,等.强地震短期预测中数字化观测资料应用与前兆物理机理研究[M].北京:地震出版社,2007.
- [25] 赵京轶,汤倩,兰晓雯.地下高压气体对汶川地震灾害的作用分析[J].震灾防御技术,2009,4(4):406-416.

致谢:项目在选题、调查论证和可研报告编写期间得到了中国地质学会地质灾害研究分会、河南省国土资源厅地质环境处和科技处的大力支持。河南省有色地矿局王建平局长,河南省地矿局禄丰年副局长,河南省地矿局张宗恒副巡视员、总工程师,河南省地矿局李贵明处长、朱广彬处长亲自指导和参与了调查论证。中国地质大学(武汉)研究生院杜远生院长及博士生导师李德威教授给予了理论和技术支撑,在此一并表示感谢!