

编者按:当前,我国的环境污染问题严峻,已经严重危害着人们的身体健康和制约着国民经济的发展,环境保护和环境污染治理问题已成为相关行业和学科的专家学者研究的热点课题。其中,对于雾霾、地下水和土壤污染的成因,众说纷纭。卢予北教授级高级工程师等人通过大量的调查资料和数据,重点从地质作用方面对雾霾的形成以及对地下水和土壤污染的影响进行了研究,提出了一些独到的观点和认识,可供大家讨论和争鸣。此外,作者利用钻探施工可以第一时间并最直接地接触到来自地下的岩样和信息这一专业优势,关注和收集那些来自地下的信息和现象,利用大地质理念和学科交叉的思维模式积极扩展自己的研究和工作领域,这也为钻探同行提供了较好的示范和启示。

雾霾及地下水土壤污染的地质作用

卢予北^{1,2}, 吴 焯³

(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. 河南工程学院资源与环境学院, 河南 郑州 451191)

摘要:导致雾霾、地下水和土壤污染的机理复杂,且影响因素较多。不同行业和学科研究的成果各有说法和道理,并且取得了一定的成效。但是,就目前的研究成果和实际情况来看依然存在着许多不攻自破的“漏洞”和片面性。通过2年来的野外调查研究和大量文献资料分析认为:雾霾的产生和土壤、地下水体污染主要由地质作用(构造活动和地球深部气体释放、煤田火区)、人类活动(地表到对流层空间)和气候气象(湿度、风力和降雨强度)3大因素造成。其中,地质作用是不可忽略的重要因素,也是难以预测和治理难度最大的。华北平原正好同时满足上述3个条件,处于雾霾严重区域。

关键词:雾霾;地下水;土壤;污染;地质作用

中图分类号:X141;P66 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)05-0001-09

Effects of Geological Factors on the Formation of Fog and Haze and the Pollution of Underground Water and Soil/ LU Yu-bei^{1,2}, WU Ye³ (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. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou Henan 451191, China)

Abstract: The mechanisms are complicated in the formation of fog & haze and the pollution of groundwater & soil with many influence factors, the different viewpoints and arguments from different industries coexist; however, some of the views are of obviously one-sidedness. In this paper, with the field investigation in the past 2 years and based on a large number of reference literatures, the analysis shows that the formation of fog & haze and the pollution of groundwater & soil are caused mainly by 3 factors; geological processes (the tectonic activity, gas release from the deep earth and coalfield fire area), human activities (from the surface to atmospheric troposphere) and meteorology & climate (humidity, wind and rainfall intensity). Among them, the important geological processes cannot be ignored, which are difficult to be predicted and controlled. With the above 3 influence factors, North China plain is just in severe fog area.

Key words: fog and haze; groundwater; soil; pollution; geological processes

0 引言

2017年3月17日,李克强总理为落实《政府工作报告》的工作设立了专项资金并指出:要跨部门组织多学科科学家集中攻关雾霾形成机理与治理,专心做好这一件事,坚决打赢这场雾霾‘歼灭战’!

李克强说,“无论是研究大气的,还是研究土壤的,各相关学科力量都组织起来,进行跨学科集中攻关,真正打一场‘蓝天保卫战’,让大家都看到更多蓝天!”。并强调指出,雾霾涉及人民群众健康,人民群众对此有很大期盼,可以说已经成为“民生之

收稿日期:2017-04-06

基金项目:河南省科技攻关项目“河南省地下水污染问题与原位修复技术研究”(编号:122102310444);2017年度河南省地勘基金项目“河南省干热岩资源潜力调查评价”(编号:2017-22-15)

作者简介:卢予北,男,汉族,1964年生,河南省深部探矿工程技术研究中心主任兼总工程师,河南省学术技术带头人,教授级高级工程师(二级),地质工程专业,工学博士,主要从事深部科学钻探、地热地质和灾害地质研究及管理工作,河南省郑州市南阳路56号,lu-yubei@263.net。

痛”、当务之急。所以我们更要抓紧时间进行大规模、高质量的观测研究,找到治理雾霾的有效对策,给人民群众一个交代。

目前,关于雾霾形成机理及地下水、土壤污染问题,各个行业、学科说法不一。归纳起来主要有:工业污染排放、煤炭发电、汽车尾气、建筑及道路扬尘、垃圾及秸秆焚烧、北方冬季烧煤供暖,化工厂排放、矿产开发及冶炼、城镇生活垃圾等。甚至许多人认为:工业排放、燃煤和汽车尾气是形成雾霾的“罪魁祸首”,这是不全面的说法。山西是我国煤炭主产地,在内蒙古、山西燃煤火电厂较多,且有几百处煤田地火常年自燃,在冬季农村家家户户和厂矿企业燃煤取暖生活。仅山西宁武县昌元煤矿就有3个煤田地火自燃火区,其自燃面积达 1605149 m^2 ,火区深度 $83\sim 100\text{ m}$ 。但为什么他们的雾霾远没有中国东部严重?

中国古代完全没有工业污染,且人类活动影响很小。但据历史文献记载,最早“雾霾”一词,是在公元5世纪前后的史书上曾出现过^[1]。并且,在中国从唐宋以后雾霾天气日趋增多。如:《宋史·五行志五》中记载的灾害性天气中,带“霾”字的有13处,《明史·五行志三》中,有关大气污染的事件有32处,其中带“霾”字的达20起。北京最早的雾霾记载是公元1549年5月3日,京城“风霾四塞,日色惨白,凡五日”。这些均说明中国古代也存在雾霾天气,这也是目前雾霾成因众说纷纭难以给出一个全面科学合理解释最有力的反证。

恩格斯在《自然辩证法》中警告我们:“我们不要过分陶醉于我们人类对自然界的胜利。对于每一次这样的胜利,自然界都对我们进行报复。每一次胜利,起初确实取得了我们预期的结果,但是往后和再往后却发生完全不同的、出乎预料的影响,常常把最初的结果又消除了。”马克思针对人与自然协调关系指出:“我们这个世界所面临的两大变革,即人同自然的和解以及人同本身的和解。”

环保部“十三五”中国绿色增长路线图研究报告显示:“十三五”我国环境承载力仍将处于严重超载阶段。以大气污染物为例,按照环境空气质量二级标准测算的全国 SO_2 、 NO_x 最大允许排放量(即全国333个地级城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度全部达标情景下的大气环境容量)分别为1363万t和1258万t。而2014年这两项污染物的排放总量分别超过环境容量的45%和65%。可以预见的是,即使“十三

五”期间主要污染物排放的叠加总量达到峰值并迅速下降,中国仍将处于环境承载力的严重超载阶段,环境质量难以在短期内得到全面改善。

雾霾成因众说纷纭,雾霾形成机理研究及治理注定是一场持久战。

笔者结合2年来“河南省地下水污染问题与原位修复技术研究”、深部水热型地热资源和干热岩资源勘查项目研究认为:雾霾的产生和土壤、地下水体污染主要有地质作用(构造活动和地球深部气体释放、煤田火区)、人类活动(地表到大气对流层空间)和气候气象(湿度、风力和降雨强度)三大部分因素造成。地上空间的人类活动及污染物排放易发现和治理,而地球深部的地质作用则不宜发现和治理。

地球内部的能量主要以热能、重力能、地球旋转能、化学能和结晶能形式出现,这些能量(也称内力和地质作用)可以使地壳组成物质、地壳构造、地表形态等不断变化和形成。

目前的地形地势形成、地下气体溢出、煤田地火形成、地震、火山喷发等,均与地质作用密切相关。地震和火山喷发产生大量的气体和岩浆、粉尘排出对大气和环境的破坏显而易见,在此不再赘述。

1 地质作用下的地形地势

现代中国地形地势是在200万年前经过多次板块碰撞和侵蚀、搬运、冲积、风力和冰河作用而形成,呈现出西高东低阶梯状分布。第一级阶梯是青藏高原,平均海拔在4500 m以上,第二级阶梯分布着大型的内蒙古高原、黄土高原、云贵高原、准格尔盆地、塔里木盆地、四川盆地等,平均海拔在1000~2000 m之间,其东面的大兴安岭、太行山脉、巫山、雪峰山是地势二、三级阶梯的分界线。地势的第三级阶梯上分布着华北平原、东北平原等,平均海拔多在500 m以下,如图1所示。

2 地气排放及主要成分

地球动力学理论认为:地球内部具有巨大的能量,并且是活动的,存在着活动频发期和相对平静期。也就是说,地球自身存在着周期性的不均匀膨胀或局部收缩^[2]。除了火山、地震、地球龟裂(裂解)和煤田地火排放气体外,地球整个活动构造部分都在向浅部地层和大气中排放气体,就像人体皮肤一样时时刻刻有分泌物产生。杜乐天教授的研究结果表明,

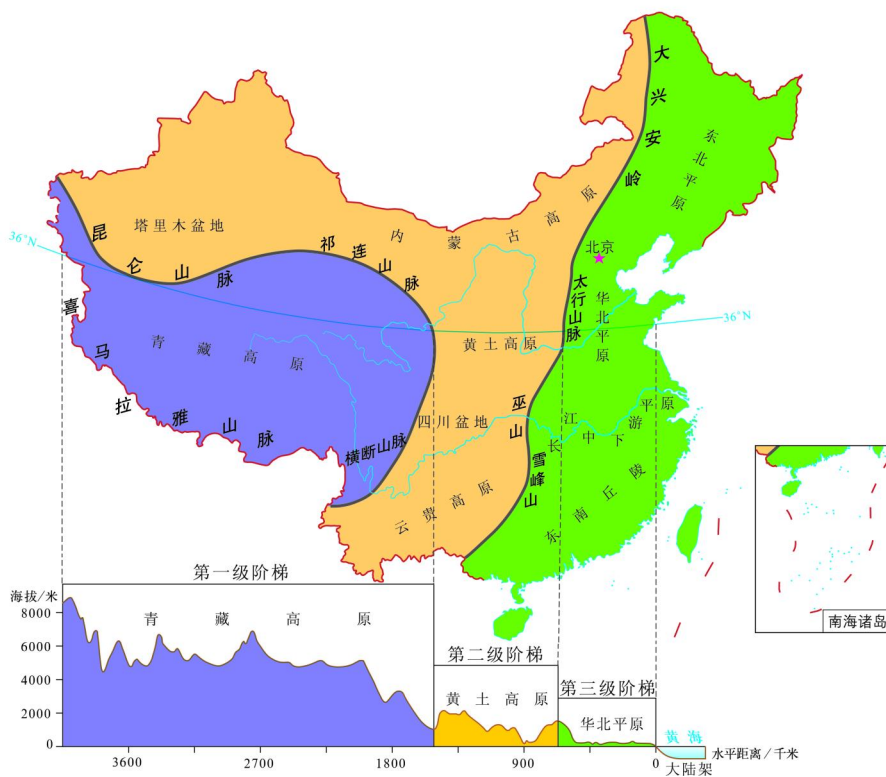


图 1 中国地势三级阶梯示意图

这些气体成分十分复杂,至少包括 H_2O 、 CO_2 、 N_2 、 H_2S 、 HCl 、 HF 、 SO_2 、 SO_3 、 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 等^[3]。现代的大气圈、水圈、油气的形成和大批生物灭绝等都与地球排出大量的 CH_4 、 H_2 、 H_2S 、 CO 以及 Hg 、 As 、 Pb 和 F 等有毒有害成分有关^[4]。同时也是造成大

气、地下水、土壤污染和人身伤害的主要原因之一。

从图 2 可以看出:我国的活动断裂带和单发式地震带、连发式地震带主要分布在西南、华北地区。同时,大量文献和证据证明:地震、温室效应、雾霾和地下气体喷发或溢出有关。

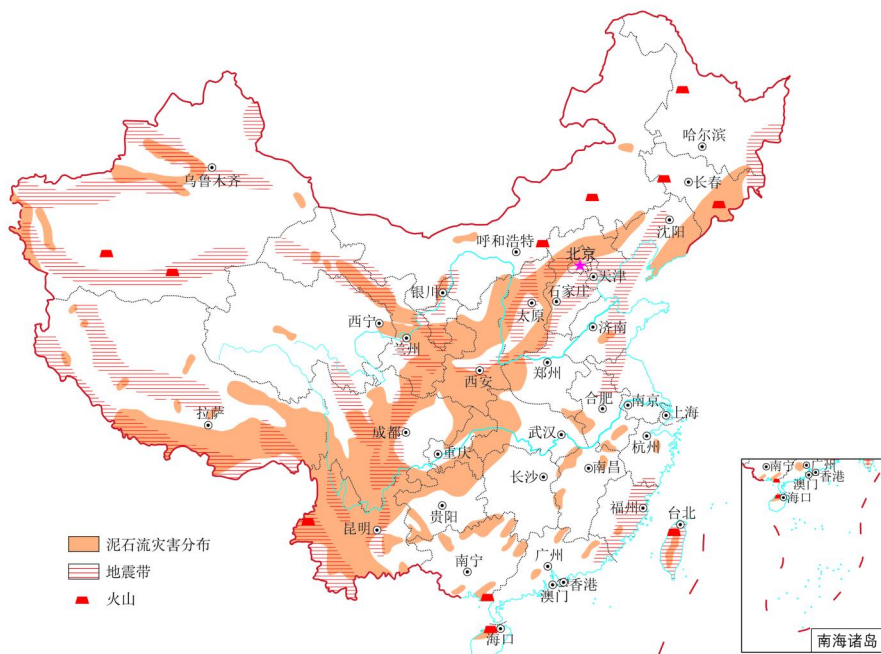


图 2 中国地震带分布图

图3是青藏高原和渤海湾下地壳不均匀流动(热河)能量释放走向,在华北平原交汇,说明该地区是地下气体能量聚集释放的重要区域^[5]。表1是我国南太行东麓(鹤壁)部分地热和供水井气体溢出

出情况,图4是地下气体溢出或喷发地质剖面图。通过对南太行东麓土壤地球化学勘查发现,其土壤中的污染物主要是汞(Hg)、镍(Ni)、铅(Pb)、钴(Co)重金属等,如图5所示。这些现象和特征均证明了

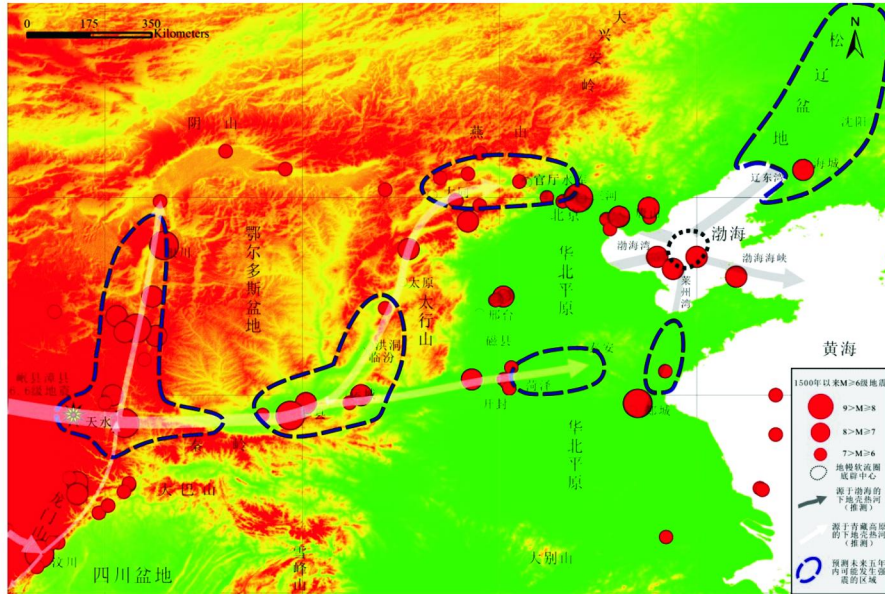


图3 青藏高原和渤海湾下地壳不均匀流动(热河)能量释放走向

表1 鹤壁部分地热和供水井气体溢出特征

井号	位置	井深/m	气体喷出情况及主要成分
鹤热1	新区政府家属院	1146	间歇性喷发(15 m),其中,体积含量为:H ₂ S 57%、CO ₂ 40%、NO _x 0.4%、微量Cl ₂
鹤热2	市热力公司院内	3276	间歇性喷发(18 m),主要成分为CO ₂ 82%和CH ₄ 17%,并含少量H ₂ S和NO _x
鹤热3	鹤壁华山路南段	3319	间歇性喷发(20 m),主要成分为CO ₂ 和CH ₄ ,并含少量H ₂ S和NO _x
HB1	南水北调鹤壁管理处	320	成井洗井时井喷13 m,主要成分为CO ₂ 和CH ₄ ,并含H ₂ S和少量NO _x ,刺鼻味道,pH值6.39,硝酸盐、硬度等超标
HB2	南水北调鹤壁管理处	110	井内有气泡产生,主要成分为CO ₂ 和CH ₄ ,并含H ₂ S和少量NO _x 具有刺激味道,pH值6.39,硝酸盐、硬度等超标
HB3	市财政局家属院	324	井内有CO ₂ 和CH ₄ 溢出,气体未检测

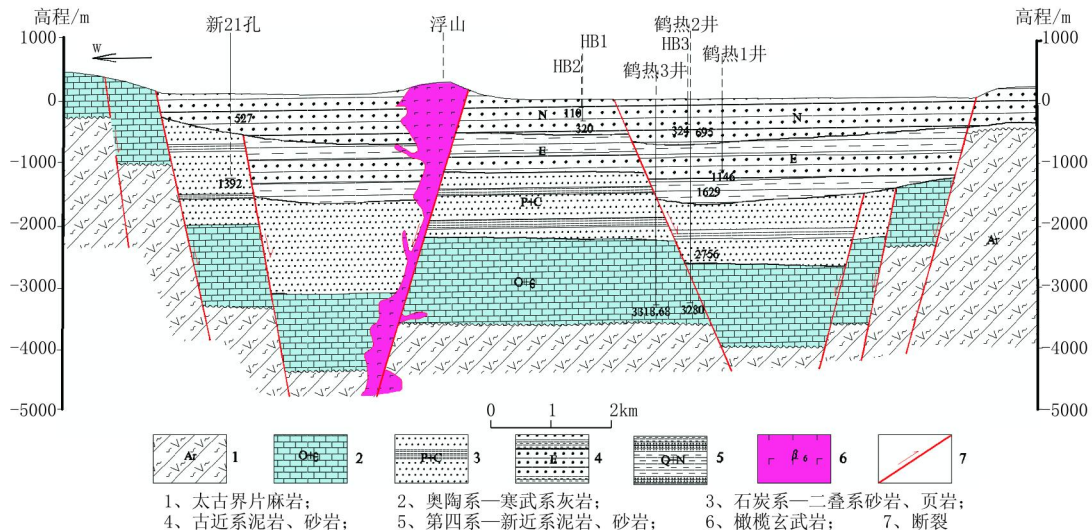


图4 鹤壁市地下气体溢出井地质剖面图

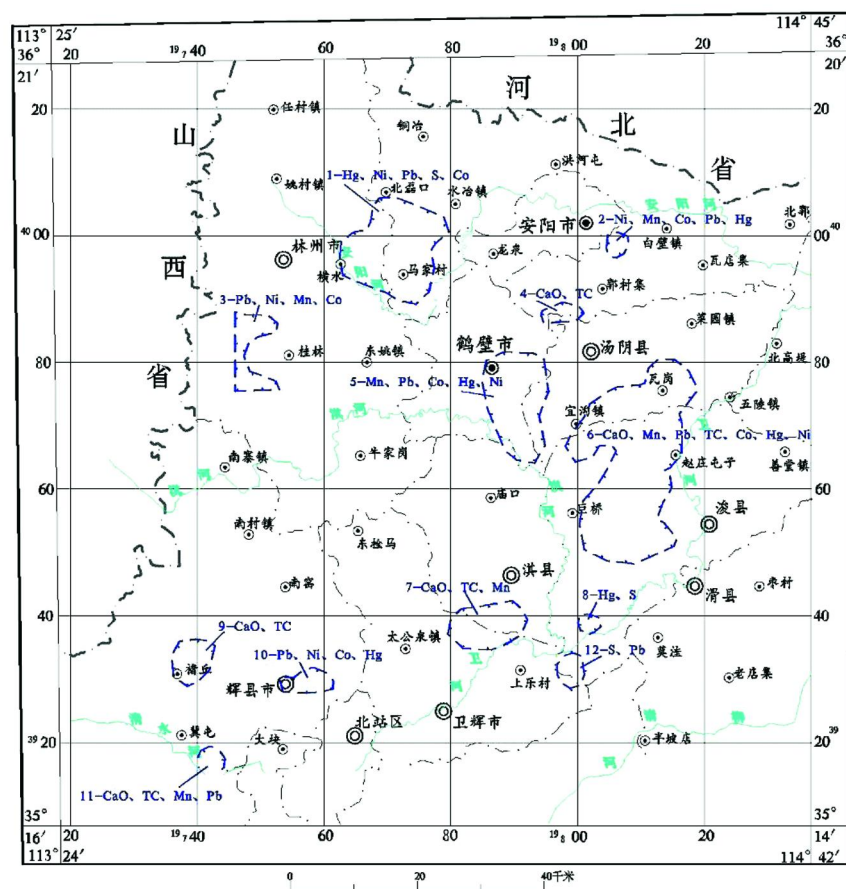


图 5 河南省安阳—鹤壁—新乡太行山东麓土壤地球化学异常图

构造活动区地气持续排放的事实。

另据 2014 年 8 月 25 日《都市快报》(杭州)和 2014 年 10 月 31 日《济南日报》报道:北京和济南雾霾组分中地壳元素分别占到 12% 和 20.6%, 见图 6。这里所谓的地壳元素或物质实际上就是地球主要以气体方式排出的三相流体(气体、水和固体)。

3 煤田火区形成及燃煤排放物^[6-9]

煤田火区自燃除了煤质本身、气候气象条件和人为因素外,其形成的重要因素是煤系地层在地质作用和构造活动条件下造成的,地下水平煤层经过若干次地质作用后,使其变为倾斜煤层并在人为或风化剥蚀影响下使煤层出露,当温度达到燃点时煤层自燃,形成煤田火区。最早记载煤田火灾的是新疆地火(煤田自燃),距今已有 1700 多年。

据人民网、新华网和中国矿权资源网等媒体报道,我国煤田火区主要分布于新疆、内蒙古、山西、甘肃、青海、宁夏、陕西等 7 个省、自治区。其中,新疆目前仍有 33 个火区,每年损失煤炭资源量 800 万 t;

内蒙古煤田火区面积达 6300 万 m^2 ,直接燃烧和冻结资源量约 5 亿 t,间接影响资源安全生产量约 15 亿 t,是中国煤田火区主要分布地之一;山西省共发现煤层自燃火区 167 个、分火区 361 个,其中,火区总面积为 56.59 km^2 ,图 7 是河南省地矿局第二地质环境调查院在山西宁武县昌元煤矿火区治理项目。

目前我国煤田火区总燃烧面积共达 720 km^2 ,煤田火区昼夜燃烧,每年大概吞噬 3000 万 t 煤炭资源,破坏煤炭资源 2 亿 t;每年经济损失约 40 亿元;每年向大气中排放 100 万 t 有毒气体。

煤田自燃不仅浪费资源、影响周边生态,更重要的是持续向大气排放大量的 CO_2 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 、 CH_4 和烟尘等污染物。这些污染物在风力作用下将会向周边地区扩散,从而造成区域性和大面积大气污染。

贾艳红等人的研究成果表明:PM2.5 与 PM10, CO 、 NO_2 和 SO_2 指标呈现正相关关系,说明随着 PM10, CO 、 NO_2 和 SO_2 等污染物数量的增加,雾霾随之呈现加重趋势^[10]。

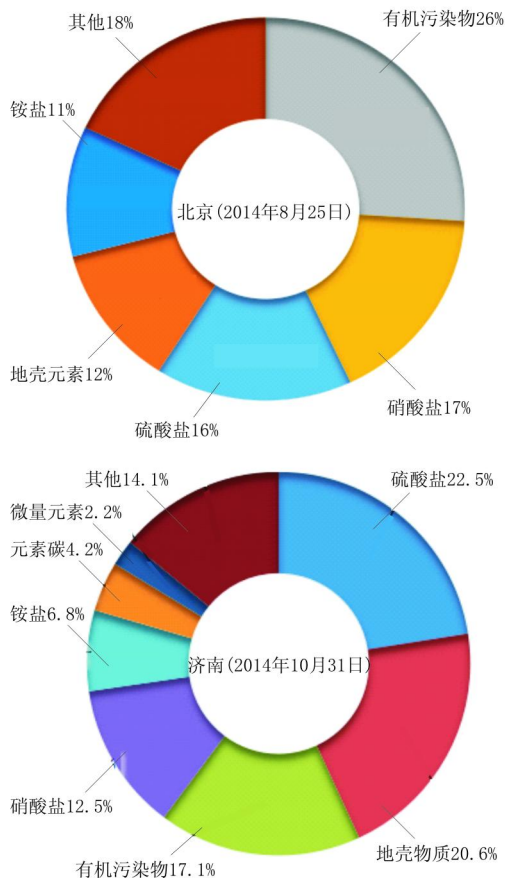
图6 北京和济南 PM_{2.5} 主要成分

图7 山西宁武县昌元煤矿自燃和治理现场

1 t 煤炭燃烧平均会产生 11 kg 烟尘、8.5 kg 二氧化硫、7.4 kg 氮氧化物。每年中国煤炭能源消耗量为 36.1 亿 t^[11], 煤田火区自燃消耗资源量为 3000

万 t, 总计每年消耗煤炭资源量 36.4 亿 t。产生的烟尘、SO₂、NO_x 污染物分别为: 4000.4 万 t、3094 万 t、2693.6 万 t。

由此可见, 日常生活生产煤炭资源消耗和煤田火区自燃造成的污染物排放量是巨大的, 也是造成大气污染和雾霾的一个主要因素。

4 华北地区雾霾成因分析

2017 年 1 月 20 日环境保护部关于 2016 年全国空气质量新闻发布会显示: 2016 年, 京津冀区域供暖期间, PM_{2.5} 浓度为 135 μg/m³, 是非供暖期浓度的 2.4 倍, 仅 12 月份就发生了 5 次大范围空气重污染过程。京津冀及周边地区仍是我国大气污染最严重的区域。区域内河南、北京、河北和山东等北方地区优良天数比例仍不足 60%; 74 个城市空气质量排名相对较差的 10 个城市中, 9 个城市位于该区域。区域内 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 浓度均高于全国平均水平。京津冀区域优良天数比例为 56.8%, 比全国平均比例低 22.0 个百分点; 重度及以上污染天数比例为 9.2%, 比全国平均比例高 6.6 个百分点。2015 年中国环境状况公报: 京津冀及周边地区(含山西、山东、内蒙古和河南)是全国空气重污染高发地区, 2015 年区域内 70 个地级以上城市共发生 1710 天次重度及以上污染, 占 2015 年全国的 44.1%。从重度及以上污染发生季节来看, 1—3 月以及 10—12 月是重污染高发季节, 其中 12 月区域内连续发生多次大范围重污染过程, 重度及以上污染发生天数占全年的 36.8%, 明显高于其他月份。

当地质作用、人类活动及人口密度、气候气象因素 3 种因素同时具备时, 则可能产生雾霾。雾霾是悬浮在大气中气溶胶体颗粒^[12-13], 若只有颗粒状污染物而没有气水时形成不了雾霾, 只会在地面产生粉尘; 当空气中湿度达到一定值和颗粒状污染物形成胶体颗粒时, 在空中悬浮不能及时沉降地面则形成雾霾; 当风力或降水强度较大时, 空中悬浮的雾霾在外力作用下及时降至地面, 则雾霾减轻或消失。

4.1 地质作用因素

华北地区的地势处于中国地势第三级阶梯, 其周边环境为内蒙古、山西、宁夏(燃煤和煤田自燃污染排放严重地区)第二级阶梯下游, 如图 8 所示。从地质构造活动带和地震带来看, 整个华北地区位

于深部断裂交汇处和地震带集中区。从地势、地理位置和深部构造活动等方面均处于一个受外来影响和本地因素双重作用。

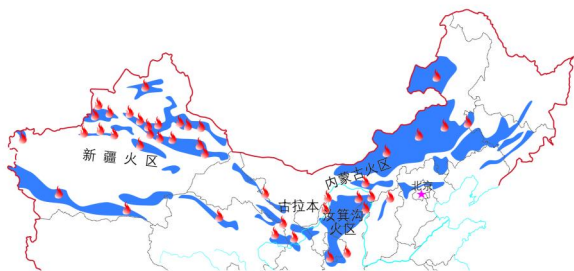


图8 中国北方煤田火区自燃分布图

4.2 人类活动及主要排放物

人类活动包括燃煤、燃气、燃油等化石类能源消耗(工业、发电、汽车尾气、冬季取暖)、油气钻井、建筑及公路扬尘、餐饮厨房油烟、农田施肥等。就华北地区来说,由于该地区人口密集,其人类活动影响相对西北和西南地区严重。

(1)燃油或汽车尾气排放:主要成分是二氧化碳和水,污染物有烟尘、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物、可以挥发性烃类。

(2)燃气排放污染:主要成分为烷烃,有少量硫化氢、氮气等,燃烧时会产生二氧化硫、二氧化氮等,是酸雨主要成分。目前国内为了减少煤炭能源的消耗,把天然气作为“清洁能源”大力推广并实行“煤改气”。实际效果怎样呢?2016年12月29日IMSIA国际金属太阳能产业联盟会议认为,北京率先实行“煤改气”,但空气污染依旧,主要原因是,天然气燃烧会增加大量的氮化物。中国工程院院士倪维斗经过测算得出结论:热电厂“煤改气”后,氮化物排放不但不会减少,反而会增加,雾霾天气更会进一步恶化。

(3)燃煤污染:主要排放物为二氧化碳、一氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、烟尘等。

(4)化肥厂、炼钢厂、炼油厂、砖窑厂污染成分更为复杂。其它建筑物拆除、公路扬尘、烟花爆竹、森林大火、烧香祭拜、吸烟等均可产生一定污染物。

(5)餐饮厨房炒菜污染物:油类物质不完全燃烧沉积出的细而疏松的黑煤烟,共测出220多种化学物质,其中主要有醛、酮、烃、脂肪酸、醇、芳香族化合物、酯、内酯、杂环化合物等。在烹调油烟中还发现挥发性亚硝胺等已知突变致癌物。

(6)农业施肥污染:我国是农业大国,也是全球氮肥生产量和消费量最大的国家。特别是华北平原农业施肥量位居全国之首,据统计:我国每年大约使用7000万t氮肥(尿素为主),被植物吸收的氮肥仅占30%左右,也就是说70%左右的氮肥溶于地下水、土壤和挥发到大气中,其中氨挥发损失达39%和30%。对我国北方69个地点的地下水和饮用水硝酸盐含量的调查结果表明,半数以上的水样中硝酸盐含量超标。研究表明,目前硝酸根已成为农田土壤增加最多的盐离子,占到阴离子总量的67%~76%。当氮肥施用过量时,则易造成土壤严重酸化和土壤中铝、铁等含量超标^[14-16]。

4.3 气候气象因素

据统计:雾霾在干旱区或半干旱区不易形成,在相对湿度60%~90%和风速在1~3 m/s(微风)之间时极易形成,这种条件下有利于水汽和尘埃杂质的聚集^[17-19]。图9是赵晓川等^[20]对营口雾霾的地面形势和风速特征研究统计结果。黄色代表霾发生的数量,可以看出在风速<5 m/s时,雾霾较为严重。图10和图11中可以看出,华北正好处于这个区间,而内蒙古、宁夏、山西等则处于半干旱区,一般相对湿度<50%。从图12则可以看出:冬季华北处于西北风,山西和内蒙古等地污染物极易在风力作用下迁移到华北平原第三级台阶。

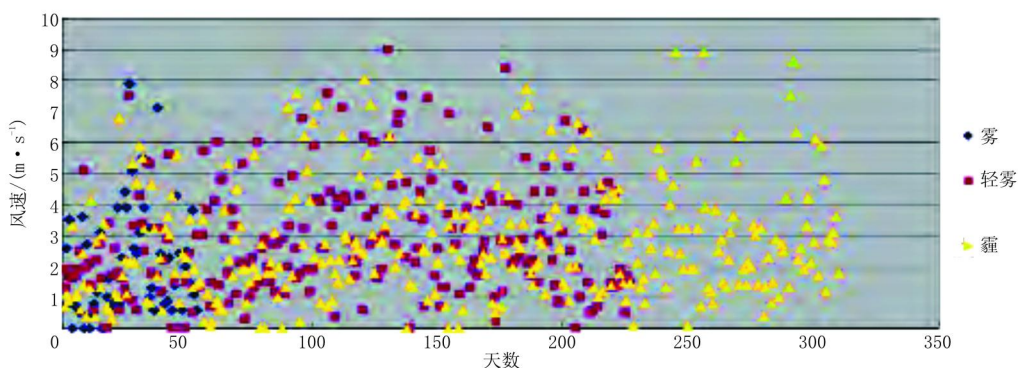


图9 2005—2012年雾霾天气的风速分布图

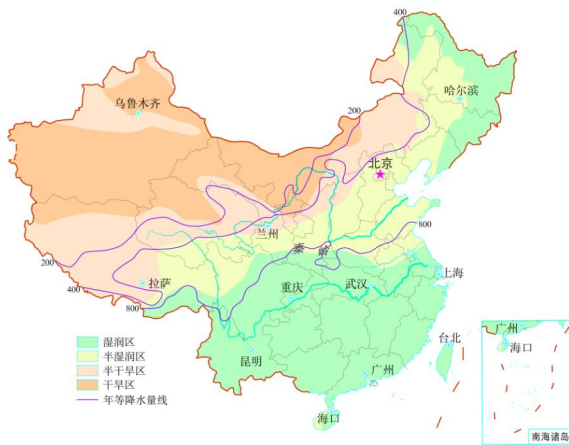


图10 中国干湿区划分

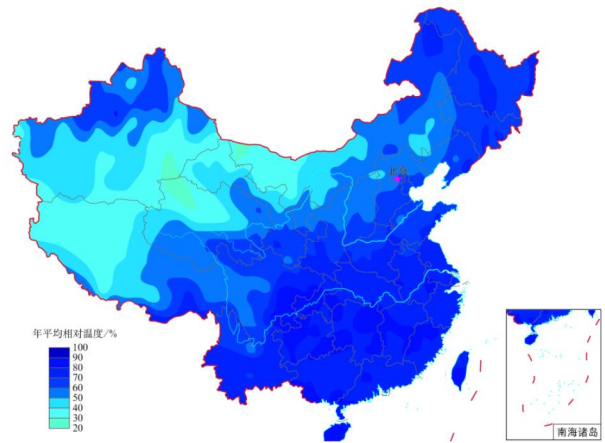


图11 中国年平均相对湿度



图12 中国冬季和夏季风向

5 结论及建议

5.1 结论

(1) 雾霾的形成和地下水体、土壤污染主要由地质作用、人类活动和气候气象共同作用的结果,缺一不可。其中,地质作用和人类活动产生大量的粉尘或固态颗粒,气候气象达到一定程度时,可以聚集大气中固态颗粒形成气溶胶体物,为雾霾创造了环境条件。华北地区就是同时满足了3个条件,所以雾霾天数和污染程度相对其他地区较为严重。

(2) 当前雾霾和地下环境严重态势是环境容量和承载能力超过了允许值,也就是说,地球深部的排

气携带着带电粒子,与粉尘带电粒子相互作用,使得原有的大气浮力平衡遭到破坏,从而使大气浮力丧失。

(3) 局部的雾霾、地下水和土壤污染不一定全部是当地工业、农业、生活排放引起,与地理位置和周边环境密切相关。

(4) 任何一个地区或局部的雾霾成因和类型不是固定不变的,而是相对变化的。

(5) 雾霾、地下水和土壤污染的治理是一个全局性的统一行动,仅靠局部治理其成效不大。

(6) 开发利用深部地热资源,不但可以替代传统化石类能源、节能减排,更重要的是可以有序控制

地下能量的释放(地震、火山喷发及地气无序溢出)。

5.2 建议

要想保持良好的生态环境和持续和谐发展,首先要尊重自然,减少人类破坏性活动。其次通过先进的理念和技术方法调查监测污染源,为预防和治理提供依据。建议如下:

(1)加大力度进行地质作用下区域地下气体的成因机理、迁移模式和扩散规律研究。

(2)通过物化探和钻探技术手段,全面调查煤田已存在火区和潜在火区,并加强治理。

(3)研发轻便钻探-地下气体测试设备。地下气体泄漏是大面积分布,传统的方法和技术不能快速查明异常区。所以,未来需要快速便捷的仪器设备来进行异常区的确定。

(4)在活动构造带和异常区,通过钻探和监测方法,建立地下气体成分和温度变化数据平台,为地球科学研究和灾害防治提供依据和预警。

总之,在资源与环境并重新常态下,地质工作者任重道远,应当围绕当前环境和雾霾问题,利用大地质理念和学科交叉理念进一步研究雾霾和环境的地质成因,加大力度推进地热清洁能源开发利用。同时,政府应鼓励和支持相关专项研究及监测,把雾霾、地下水和土壤污染“看不见”的地质作用影响因素进行调查评价,为我国环境污染攻坚战提供技术支撑和决策依据,还蓝天于人民。

参考文献:

- [1] 倪方六. 中国古代雾霾天最早出现于何时? [EB/OL]. <http://www.takefoto.cn/viewnews-245186.html>.
- [2] 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 1997, 4(3-4): 7-8.
- [3] 杜乐天. 地球排气作用的重大意义及研究进展[J]. 地质论评, 2005, 51(2): 174-178.
- [4] 杜乐天. 地球排气作用——建立整体地球科学的一条统纲[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 381-388.
- [5] 李德威, 郝海健, 刘娇, 等. 华北热灾害链的结构、成因及强震趋势分析[J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 102-108.
- [6] 张廷会, 贺卫中, 崔邦军. 煤田火区成因机理及注浆固化灭火技术[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 904-905.
- [7] 卢予北, 李艺, 周春华, 等. 地气灾害与地质科学问题[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 1-8.
- [8] 吴焯, 王建华, 卢予北. “钻探+”在民生地质工作中的作用与地位[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(11): 1-5.
- [9] 曹代勇, 时孝磊, 樊新杰, 等. 煤田火区环境效应分析[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 40-42.
- [10] 贾艳红, 陆赛娣, 冯小莉, 等. 中国雾霾分布及其组成相关性分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(12): 9-11.
- [11] 梅燕雄, 马建明, 叶锦华, 等. 透过雾霾看矿业发展[J]. 中国矿业, 2014, 23(11): 1-3.
- [12] 王泰, 陈曦, 何公理, 等. 北京市城区冬季雾霾天气 PM_{2.5} 中元素特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1441-1445.
- [13] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 31-36.
- [14] FAO. FAOSTAT; FAO Statistical Databases [DB/OL]. Rome, Italy, 2014. <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/home/E>.
- [15] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念和意义[J]. 土壤学报, 2014, 51(51), doi:10.11766/trxb201405130230.
- [16] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [17] 赵晓川, 张运芝, 李叶妮, 等. 营口雾霾的地面形势和风速特征[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(7): 5-9.
- [18] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [19] 孟晓艳, 余予, 张志富, 等. 2013年1月京津冀地区强雾霾频发成因初探[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 190-194.
- [20] 赵晓川, 张运芝, 李叶妮, 等. 营口雾霾的地面形势和风速特征[J]. 科学技术与工程, 2015, (7): 5-10.

更正:本刊2017年第4期第3页左栏倒数第8行中“钻孔设计深度>5000m的地质取心钻探”应为“钻孔设计深度>500m的地质取心钻探”,特此更正!谨向作者和广大读者致歉!