

地热系统来源有害组分的环境效应及其处理



郭清海^{1,2)}

1) 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉, 430074;

2) 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉, 430074

内容提要: 地热能是亟待加强开发利用的可再生新能源, 但地热研究者与从业者需正视与地热系统相关的各类环境问题。本文聚焦地热系统来源有害组分, 从其形成机制入手, 总结了其类型、存在形态和环境效应, 认为地热水回灌或无干扰井下换热均不可能彻底解除地热开发利用的环境和人类健康威胁, 且地热水天然排泄所导致的周边环境内水质劣化同样不容忽视。在此基础上, 提出水处理是地热成因环境污染防治的重要手段之一, 综述了在此领域今后应着力发展的方向。

关键词: 地热系统; 有害组分; 环境效应; 地热水处理

当前, 人类社会进入前所未有的高速发展时代, 能源问题成为不可避免的重大挑战。煤炭、石油、天然气等化石能源迅速消耗, 所产生的温室气体使全球气候变化日益加剧, 世界范围内生态环境不断恶化, 社会良性发展受到严重威胁。严峻的能源形势与全球环境问题促使世界各国戮力寻求新的替代能源以构建多元化能源结构, 清洁的可再生能源势成世界经济可持续发展之必需。地热能作为一种可再生新能源日渐受到重视, 其开发利用正成为能源行业热点, 利用方式包括发电和直接利用。

然而, 地热能虽为可再生能源和新能源, 亦是相对清洁的能源, 但在其开发利用过程中可能产生不同类型的环境问题, 如增强型地热系统储层刺激过程所诱发的地震 (Majer et al., 2007; Catalli et al., 2016; Trutnevyte et al., 2018; Rathnaweera et al., 2020; Vigano et al., 2021)、地热水超采导致的地面沉降 (Massonnet et al., 1997; Carnec et al., 1999; Sarychikhina et al., 2011)、地热系统来源有害组分对其他类型天然水体的污染 (Guo Qinghai et al., 2015; Shakeri et al., 2020) 等。优化水力压裂参数、对已抽取地热水进行回灌、在地热能开采过程中实施无干扰井下换热等措施可在有利

条件下有效应对上述问题; 但毋庸置疑, 并不能在所有情况下均实现此类问题的彻底解决。因此, 深入认识与地热系统及其开发利用过程相关的负面环境效应, 并在此基础上完善制约其形成的政策管理体系或进一步研发针对性的防治技术, 就具有不言而喻的重要意义, 是实现全球范围内地热能规模化开发利用的必要前提。

客观而论, 在各类与地热系统相关的环境问题中, 以地热系统来源有害组分及其环境效应最具普遍性。本文以地热系统来源有害组分为对象, 解释了此类有害组分的形成机制, 阐述了其环境效应, 并综述了针对地热系统来源有害组分的特点而提出的处理方法与开展的处理实践, 以期为本研究方向的发展提供借鉴。

1 地热系统与地热系统来源有害组分

作为地热能所赋存的地质体, 地热系统可分为水热型地热系统、干热岩型地热系统、岩浆型地热系统。水热型地热能以地下水或地下高温蒸汽为载体; 干热岩型地热能赋存于天然裂隙不发育、因而不含水或含水少的岩层, 需经储层刺激或借助特定换热设备及技术方可利用; 岩浆型地热能则指存在于

注: 本文为国家自然科学基金项目 (编号 42077278、42111530023、42042036、41861134028、41772370、41572335、40702041) 联合资助的成果。

收稿日期: 2022-01-10; 改回日期: 2022-03-25; 网络发表日期: 2022-04-02; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 潘静。

作者简介: 郭清海, 男, 1978年生。教授, 博士生导师, 主要从事高温地热系统地球化学方向研究。E-mail: qhguo2006@gmail.com。

引用本文: 郭清海. 2022. 地热系统来源有害组分的环境效应及其处理. 地质学报, 96(5): 1767~1773, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022035.

Guo Qinghai. 2022. Environmental effects of harmful constituents derived from geothermal systems and their treatments. Acta Geologica Sinica, 96(5): 1767~1773.

未冷凝岩浆中的热能,埋藏深度大,在当前经济技术条件下人类还不具备开采能力。此外,对于目前利用热泵技术所提取的赋存于地表以下较浅范围内的能量,其来源不仅包括自地球内部向外释放的热能,还包括太阳辐射,因此在狭义上并不完全属于地热能范畴。

当前,水热型地热系统是地热开发利用的主要对象;相应地,地热水中的有害组分也是地热系统来源有害组分中最重要的类型。与其他类型天然水体(如常温地下水、地表水)相比,地热水存在于温度更高的环境,因而一般具有自其赋存介质中淋滤更多化学组分的潜力。在地热水的溶解化学组分中,有诸多典型有害组分,如硫、氯、钨、钼、铬、砷、锑、氟、硼、铅、汞、镉等(此处仅列出元素名称,后文详述其形态分布);地热水的排泄常成为环境中上述有害组分的重要来源之一。对于在化学组成上受到岩浆流

体影响的岩浆热源型地热水而言,上述溶解有害组分具有异常高含量的情况更为常见。原因为此类地热系统下作为直接热源的岩浆囊在逐渐冷却过程中所释出的岩浆流体以 H₂O、SO₂、H₂S、HCl、HF、CO₂ 为主要成分,且可能富含多种金属元素(Candela et al., 1984; Giggenbach, 1988; Shinohara, 1994; Fulignati et al., 2011);受到强酸性岩浆流体等化学溶解过程强烈影响的地热水自然具备与非岩浆热源型地热水迥乎不同的地球化学组成。虽然在岩浆流体等化学溶解过程之后,热储流体中多数组分(包括有害组分)会以蚀变矿物形式发生不同程度的沉淀,但与地球化学组成主要受较低温度下水-岩相互作用控制的非岩浆热源型地热水相比,岩浆热源型地热水中钨、钼、砷、锑、氟、硼等有害组分的含量往往仍高得多。表 1 中列出了代表性地热水样品和非地热水样品中典型有害组分的含量。

表 1 代表性地热水样品和非地热水样品中的有害组分及其含量对比
Table 1 Concentrations of harmful constituents in typical geothermal water samples in contrast to those in a non-geothermal water sample

样品 编号	水热区	pH	温度 (℃)	S(VI) (mg/L)	S(II) (mg/L)	Cl (mg/L)	W (μg/L)	Mo (μg/L)	Cr (μg/L)	As (μg/L)	Sb (μg/L)	F (mg/L)	B (mg/L)	Pb (μg/L)	Hg (μg/L)	Cd (μg/L)	数据来源
MLJ07	西藏巴尔	7.71	62	189	0.04	1011	176.4	0.47	16.1	4400	59.4	5.21	457.3	3.51	n. a.	0.11	Liu Mingliang et al., 2020
DG04	西藏打加	8.27	85	76.2	n. d.	156.7	1037	32.6	2.78	6880	145.3	23.3	83.7	3.57	n. a.	0.21	作者未发表数据
DGQ01	西藏多果曲	7.93	76	70.0	0.14	904.8	1025	2.09	42.4	39490	42.8	8.92	270.9	3.77	n. a.	0.15	Liu Mingliang et al., 2020
LJ06	西藏朗久	8.41	82	389	0.06	537.8	250.2	4.67	49.5	5890	60.6	10.0	43.0	4.43	n. a.	0.68	作者未发表数据
QSYB02	西藏玛旁雍错	8.51	85	78.4	0.34	139.5	53.3	1.21	43.8	360	301.3	11.4	193.7	16.1	n. a.	0.28	作者未发表数据
QSYB12	西藏玛旁雍错	2.40	84	1104	0.05	61.1	12.1	0.36	66.9	210	134.2	4.64	18.6	4.24	n. a.	0.13	作者未发表数据
MLJ01	西藏莫落江	7.30	83	77.1	0.10	1965	126.5	0.55	60.5	20750	1165	12.2	581.5	4.34	n. a.	0.10	Liu Mingliang et al., 2020
MLJ02	西藏莫落江	7.80	82	71.8	0.03	1750	115.1	0.49	41.3	17030	2158	8.60	499.9	3.50	n. a.	0.08	Liu Mingliang et al., 2020
LL07	云南邦腊掌	9.23	94	43.9	13.6	20.6	258.9	0.91	3.47	170	9.13	21.3	4.31	1.40	n. a.	0.15	Guo Qinghai et al., 2021
HGQ3	云南黄瓜箐	2.16	67	1809	n. d.	25.6	0.16	0.14	31.2	22	1.35	1.47	0.01	9.00	n. a.	0.62	Guo Qinghai et al., 2021
DGG	云南热海	7.90	84	18.0	0.17	702.8	77.0	0.36	10.7	1211	8.29	17.8	14.5	0.84	1.47	0.31	作者未发表数据
DRTY10	云南热海	2.18	57	1054	n. d.	22.1	0.80	0.09	50.0	18	n. a.	1.13	0.02	14.3	n. a.	0.18	作者未发表数据
RDXX	云南瑞滇	7.17	70	27.1	0.01	165.0	79.8	0.90	5.10	1049	5.81	8.12	4.35	12.1	n. a.	21.4	Guo Qinghai et al., 2021
ZT01*	云南热海	8.52	11	4.3	n. d.	6.5	n. d.	n. d.	n. d.	1.9	4.20	0.32	0.002	0.03	n. a.	n. d.	作者未发表数据

注:标注*的样品为采自地热区(云南热海地热区)上游的未受地热水影响的河水(澡塘河)样品,其中有害组分的含量均低于饮用水标准,且远低于地热水中相应组分的含量;n. d. 表示未检出;n. a. 表示未分析。

与水热型地热能相比,干热岩型地热能受限于当前技术经济条件,其开发利用程度低得多;但干热岩型地热能的储量远大于水热型地热能,在未来必将成为地热能开发利用的主要对象。在干热岩型地热系统的开发利用过程中,同样可能产生含有害组分的流体。现阶段,实施增强型地热系统(EGS)仍是开发利用干热岩型地热能的主流途径。EGS 即人工储层刺激后从低渗透性热岩体中提取热能的工程,通过在热储层裂隙中注入低温流体并使其充分吸收岩体热量后升温,再经生产井将升温后流体提取至地面而利用其中热能。由于低渗透性热岩体的天然裂隙网络非常不发育,不经储层刺激难以保证产能要求,令拟定注入井和生产井之间储层的渗透性得以提高就成为建立 EGS 的关键,目前国际上常采用水力压裂辅以化学刺激的方法。压裂液和化学刺激剂注入热储层后,必然与低渗透性热岩体发生

强烈化学反应;所形成的返排液中含有害组分复杂,其化学组成与压裂液配方、化学刺激剂类型、热储岩性及其矿物/化学组成、热储天然流体水质(如热储中先前存在少量天然流体的话)、注入流体在地下与岩石相互作用的时间等多重因素有关。一般情况下,化学刺激剂在上述各因素中对所产生返排液的化学特征以及其中有害组分的类型和含量影响最大:一方面,强酸性化学刺激剂的加入大大增强了注入流体和岩石之间的相互作用,从其中淋滤入液相的组分的含量远高于仅采用水力压裂而不采用化学刺激时的情况;另一方面,化学刺激剂的酸度在返排液形成早期一般不能全部被流体-岩石相互作用所消耗,因而使返排液呈酸性,同时化学刺激剂中原有的保守性阴离子(如 Cl^-)常成为返排液中的主要有害组分。表 2 中列出了国外典型增强型地热系统返排液样品中有害组分的类型及其含量。

表 2 典型增强型地热系统返排液样品中的有害组分

干热岩场地	Fenton Hill	Soultz-sous-Forêts	Bad Urach	Rosemanowes	Hijiori	Ogachi
所属国家	美国	法国	德国	英国	日本	日本
地层岩性	黑云母花岗闪长岩	富黑云母及角闪石花岗岩	片麻岩	花岗岩	石英闪长岩	花岗闪长岩
储层温度 (°C)	327	150~170	143	99.8	250~270	170~230
储层深度 (m)	3500	3200~3600	3300	2400	2200	711~719;990~1027
注-采井间距 (m)	310	450	n. a.	n. a.	130	80
Cl (mg/L)	955	55522	1275	73.1	188.2	49.7
S(VI) (mg/L)	377.3	225.6	n. a.	74.4	49.9	153.6
F (mg/L)	17.0	4.0	n. a.	11.4	n. a.	6.7
数据来源	Duchane et al., 1993	Durst et al., 2000	Stenger, 1982	Richards et al., 1992	Matsunaga et al., 1995	Kiho et al., 1995

注:n. a. 表示未分析。

2 地热系统来源有害组分的环境效应

综上,不同类型地热系统均可能形成含有害组分的流体,并对其周边环境产生负面影响。相对而言,与增强型地热系统返排液相关的环境问题易于控制——国内外的增强型地热系统在储层刺激后产生的返排液均被严禁直接排入环境,所患者仅是在其排出地表前可能对浅部地下水环境造成的污染。与此相比,天然地热流体则常是不可忽视的重要环境污染源之一;在某些特定地区,如中国高温水热型地热资源集中分布的藏南、滇西和川西,由于工农业和城市发展水平低而人类活动影响小,地热水甚至可成为最主要的污染源。如在西藏羊八井,用于排泄地热尾水的藏布曲(河)及其汇入的堆龙德庆曲(河)曾作为羊八井地热电厂排污口下游村镇的部分人畜饮用水源;长期饮用受地热尾水污染的河水后,

羊八井电厂的工人及附近村民在壮年期即有牙齿和头发大量脱落等健康问题(张天华等, 1997; Li et al., 2003)。

对于已开发利用的水热型地热区,地热尾水回灌是防止其排放造成环境污染的重要手段之一。目前,地热水回灌已在不少孔隙型中低温水热系统得到较成功的应用(王贵玲等, 2002; 林黎等, 2008; 陈玉林, 2012; 王光辉等, 2013; 赵娜, 2014; 贾志等, 2015),既在一定程度上缓解了环境污染,也有助于维持热储层压力并有效延长水热型地热系统开采寿命。然而,对于地质条件更为复杂的裂隙型水热系统,地热水回灌仍面临大量实际困难,使利用回灌工程彻底解决地热水中有害组分的环境污染问题存在相当大的障碍——国内外向各向异性和非均质性极强的裂隙型热储回灌地热水效果不理想的案例不胜枚举(Stefansson, 1997; 刘伟, 2008; Diaz et

al., 2016)。在地质条件和相应技术瓶颈的制约之外,由于管理因素而出现的地热水无许可开采(当然也不可能回灌)也在很大程度上影响了经地热水回灌全面控制地热成因环境污染的蓝图的实现。

鉴于地热水回灌所面临的窘境,在地热能开发利用实践中全面采用“无干扰井下换热”技术成为近年来国内部分地区之政策导向。完全不开采地热水、闭式循环取热的“井下换热”技术可避免因开采而不回灌地热水可能导致的其中有害组分向地表环境的迁移,但自然不能解决地热水的天然排泄(以热泉的形式)所造成的环境问题。世界范围内,以热泉而非地热井开采为主要排泄方式的水热型地热区比比皆是;其中不乏所有热泉均汇入流经地热区且作为当地居民饮用水源河流的情况。更有甚者,一些水热型地热区附近的居民甚至直接饮用热泉水,如青海贵德的扎仓寺水热区,此水热区所排泄热泉中砷、氟、硼等有害组分的含量远超过《生活饮用水卫生标准(GB5749—2006)》(国家标准化管理委员会和卫生部, 2006[●])规定的限值(郭青海等, 2017)。直接饮用热泉水固然不是常例,但因热泉汇入作为饮用水源的河流而使其水质劣化的情况却并不鲜见(Guo Qinghai, 2012)。在影响饮用水水质之外,热泉及其携带的有害组分在排入河流后还可能通过鱼类吸收等途径进入人类食物链(Mccleskey et al., 2010a, 2010b)。诚然,热泉地球化学组成在其形成后的漫长地质历史时期内必然与地热区及下游的生物群落演化达到相当程度的平衡,对区内生态系统的稳定不存在威胁,但鉴于人类历史的长度远小于热泉形成历史,热泉来源有害组分对人类健康的影响却不可忽视。一言以蔽之,地热系统来源有害组分的负面环境效应并非一定在地热能开发利用条件下才需要重视;地热水的天然排泄引发的环境污染及其人类健康风险更加需要加强研究——此问题与地热水开采无涉,其解决当然也不能寄望于“地热水回灌”或“无干扰井下换热”的实施。

3 地热系统来源有害组分的处理

据以上讨论,同时考虑到热泉流量小、非集中排泄的特点以及热泉区及其周边地区居民常具备的分散性居住的特点,在以热泉为主要排泄形式且其中有害组分在地表环境的迁移已产生明显负面环境效应的地区,对热泉或受其排泄影响且作为饮用水源的天然水体通过小型水处理装置进行有害组分处理

以消除对居民健康的威胁非常重要,也具有可行性。即便在人工开采地热水的地区,地热水处理亦可作为地热水回灌(在不能完全回灌的情况下)的有益补充,客观上有利于消除地热系统来源有害组分之负面环境效应可能引起的社会性惶恐并促进水热型地热资源的开发利用。

长期以来,由于缺乏对地热水天然排泄所引发的环境问题的系统认识,地热水处理方面的研究并不多见,且处理方法或材料一般仅应用于水中某种有害组分,如 Kabay et al. (2009)、Koseoglu et al. (2010)、Samatya et al. (2012)分别基于离子交换-微孔过滤混合处理、膜技术、单分散性多孔聚合树脂尝试去除地热水中硼;刘峰彪等(2010)通过电絮凝法开展了处理地热水中氟的实验研究;DeCarlo et al. (1985)、Egawa et al. (1985)、Pascua et al. (2007)用氢氧化铁胶体、螯合树脂、斯沃特曼铁矿进行了地热水中砷的处理。上述研究所涉地热水处理技术或费用高昂,或流程复杂,或难以一次性将待处理组分的含量降至预期;更重要的是,没有考虑到地热水通常所具备的多种有害组分并存的特点,故并不适合直接用于地热系统来源有害组分的处理实践。如前所述,地热水中的常见有害组分包括硫、氯、钨、钼、铬、砷、锑、氟、硼、铅、汞、镉等,其中若干种的含量同时远超过地热水有害组分最高允许排放浓度或饮用水标准的情况有大量实例。在以上典型有害组分中,除少数(铅、镉)在水中的主要存在形态为阳离子外(但其次要存在形态中也包括阴离子或不带电荷的形态,且在特定水化学条件下可能成为主要形态),其他常以单原子阴离子、含氧络阴离子或硫代络阴离子为非极酸性水化学条件下的优势形态,如硫、氯、钨、钼、铬、砷、锑、氟、硼(偏酸性条件下的还原态硫,以及中性、偏酸性条件下的硼和还原态砷、锑的主要存在形态不带电荷,亦是例外);汞则通常以不带电荷的形态为主,但在中性、高硫化物条件下主要以阴离子形态存在。在深入理解地热水中有害组分存在形态及其主要特点的基础上,研究者在近年来利用对水中不同类型有害阴离子有选择性去除能力的阴离子黏土(亦称层状双金属氢氧化物)及其改性材料(在结构中掺杂功能基团、剥层处理等),开展了地热系统来源有害组分综合处理的实验和试验研究,并取得了良好效果(Guo Qinghai et al., 2013; 郭青海等, 2017; 余正艳等, 2018; Cao Yaowu et al., 2021)。在上述研究中,阴离子黏土所具备的超强层间阴离子交换能力、结构记忆效应

以及 pH 缓冲作用是其处理效果优于同领域研究中其他去除材料的主要原因;针对地热水中有害组分的类型和含量范围相应以所选择阴离子黏土的优化组合为处理材料则是最终实现了同时、高效去除其中并存的多种有害组分的关键。水处理之后,富集各类有害组分的阴离子黏土应妥善填埋处置,以规避二次污染,但受限于此领域的发展阶段,此类实际工作及前期基础性理论或实验研究尚未见于文献。因此,在地热系统来源有害组分阴离子黏土处理的规模化应用之前,需系统开展有效处置已使用阴离子黏土材料的相关研究。

地热水中不少对环境和人类健康有潜在威胁的有害组分,如硼和某些重金属元素,在工业领域却可视为有用资源。鉴于此,地热水中包括有害组分在内的溶解组分资源化利用研究已有很长历史,回收利用的主要机理包括吸附(Premuzic et al., 1995)、蒸发(Bourcier et al., 2003)、沉淀(Schultze et al., 1985)等;在成功的实验室研究外,实现了地热系统来源有害组分高效资源化回收利用的实际案例亦不在少数,如美国加利福尼亚州的 Imperial Valley 地热区、Mammoth Lakes 地热区、Coso 地热区,内华达州的 Dixie Valley 地热区、Steamboat Springs 地热区等(Bourcier et al., 2003)。近年来,在此领域也出现了一些另辟蹊径的尝试,如崔帅(2018)基于钛酸纳米管水热法有效去除了异常富硼地热水中的硼,并制备了硼掺杂氧化钛,进而利用此材料作为催化剂在可见光条件下实现了高效催化降解罗丹明 B 以及光解水产氢,其机理为硼进入氧化钛晶格后可有效促进光生载流子的分离从而提高了其可见光催化性能。此类研究为地热系统来源有害组分的有效处理及地热成因环境污染防治提供了新的思路。

4 结论

地热能是有望规模化替代传统化石能源的新能源与可再生能源,但并非绝对意义上的清洁能源(或所谓绿色能源);正视、进而解决与地热系统相关的环境问题,对加速地热能替代化石能源的进程意义重大。地热系统来源有害组分的含量常远高于其他类型天然水系统,其负面环境效应具有普遍性;不但可能发生于地热能的开发利用过程中,也可能出现在并未人工开采而以热泉为地热水排泄形式的水热型地热区。地热水回灌或无干扰井下换热的实施不足以解决与地热系统来源有害组分相关的所有环境

问题;地热水处理是地热成因环境污染防治的重要手段之一,具有广阔的发展前景,可有效促进地热开发利用。

地热系统来源有害组分种类繁多,且往往并存于地热水、增强型地热系统返排液或受其污染的其他类型天然水体中,单一去除材料或去除技术常难以实现其有效处理。典型地热系统来源有害组分的存在形态以阴离子为主,针对待处理水体中有害组分的类型和含量范围以相应阴离子黏土的特定优化组合为复合去除材料而开展的水处理已初获成功,值得推广应用;但如何有效处置已用于处理地热水的阴离子黏土材料,以避免二次污染,还需加强研究。在去除地热水中有害组分的同时,进行此类组分的资源化回收利用,是本领域内在今后应加强研究与发展的另一远景光明的方向。

致谢: 本研究受国家自然科学基金项目(编号 42077278、42111530023、42042036、41861134028、41772370、41572335、40702041)资助。

注 释

① 国家标准化管理委员会和卫生部. 2006. 生活饮用水卫生标准 (GB5749—2006).

References

Bourcier W L, Lin M, Nix G. 2003. Recovery of minerals and metals from geothermal fluids. 2003 SME Annual Meeting, Cincinnati, OH, United States.

Candela P A, Holland H D. 1984. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(2): 373~380.

Cao Yaowu, Guo Qinghai, Sun Weihao, Liang Mengsi. 2021. Simultaneous removal of harmful anions from geothermal waters using OH-intercalated Mg-Fe-LDH: batch and field column studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28: 39345~39356.

Carnec C, Fabriol H. 1999. Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26(9): 1211~1214.

Catalli F, Rinaldi A P, Gischig V, Nespoli M, Wiemer S. 2016. The importance of earthquake interactions for injection-induced seismicity: retrospective modeling of the Basel Enhanced Geothermal System. *Geophysical Research Letters*, 43(10): 4992~4999.

Chen Yulin. 2012. Geothermal reinjection test in Xi'an City. Master thesis of Northwest University (in Chinese with English abstract).

Cui Shuai. 2018. Removal of boron from boron-rich geothermal water and its synchronous resource utilization via doping of nano-titanium oxide. Master thesis of China University of Geosciences (Wuhan)(in Chinese with English abstract).

DeCarlo E H, Thomas D M. 1985. Removal of arsenic from geothermal fluids by adsorptive bubble flotation with colloidal ferric hydroxide. *Environmental Science & Technology*, 19: 538~544.

Diaz A R, Kaya E, Zarrouk S J. 2016. Reinjection in geothermal fields—a worldwide review update. *Renewable & Sustainable*

- Energy Reviews, 53: 105~162.
- Duchane D V, Winchester W W. 1993. Hot dry rock energy progress report fiscal year 1992. Washington DC: Office of Scientific and Technical Information, U. S. Patent and Trademark Office.
- Durst P, Vuataz F D. 2000. Fluid-rock interactions in hot dry rock reservoirs. A review of the HDR sites and detailed investigations of the soultz-sous-forets system. Proceedings of World Geothermal Congress, Japan.
- Egawa H, Nonaka T, Maeda H. 1985. Studies of selective absorption resins XXII: removal and recovery of arsenic ion in geothermal power waste solution with chelating resin containing mercapto groups. Separation Science and Technology, 20: 653~664.
- Fulignati P, Kamenetsky V S, Marianelli P, Sbrana A, Meffre S. 2011. First insights on the metallogenic signature of magmatic fluids exsolved from the active magma chamber of Vesuvius (AD 79 "Pompei" eruption). Journal of Volcanology & Geothermal Research, 200(3-4): 223~233.
- Giggenbach W F. 1988. Geothermalsolute equilibria—derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52(12): 2749~2765.
- Guo Qinghai. 2012. Hydrogeochemistry of high-temperature geothermal systems in China: a review. Applied Geochemistry, 27(10): 1887~1898.
- Guo Qinghai, Zhang Yin, Cao Yaowu, Wang Yanxing, Yan Weide. 2013. Boron sorption from aqueous solution by hydrotalcite and its preliminary application in geothermal water deboronation. Environmental Science and Pollution Research, 20(11): 8210~8219.
- Guo Qinghai, Cao Yaowu, Li Jiexiang, Zhang Xiaobo, Wang Yanxing. 2015. Natural attenuation of geothermal arsenic from Yangbajain power plant discharge in the Zangbo River, Tibet, China. Applied Geochemistry, 62: 164~170.
- Guo Qinghai, Cao Yaowu, Yu Zhengyan, Tian Jiao, Zhang Yin. 2017. Treatment of Typical Harmful Constituents from Geothermal Systems with Anion Clays. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Guo Qinghai, Planer-Friedrich B, Yan Kekao. 2021. Tungstate thiolation promoting the formation of high-tungsten geothermal waters and its environmental implications. Journal of Hydrology, 603: 127016.
- Jia Zhi, Zhang Fenna, Yang Zhongyan, Peng Hongjing, Zhao Na. 2015. Application of perforation technology in the porous geothermal reinjection well. Ground Water, 37(2): 106~109 (in Chinese with English abstract).
- Kabay N, Yilmaz-Ipek I, Soroko I, Makowski M, Kirmizisakal O, Yag S, Bryjak M, Yuksel M. 2009. Removal of boron from Balcova geothermal water by ion exchange-microfiltration hybrid process. Desalination, 241(1): 167~173.
- Kiho K, Mambo V S. 1995. Reservoir characterization by geochemical method at the Ogachi HDR Site, Japan. Proceedings of World Geothermal Congress, 2707~2711.
- Koseoglu H, Harman B I, Yigit N O, Guler E, Kabay N, Kitis M. 2010. The effects of operating conditions on boron removal from geothermal waters by membrane processes. Desalination, 258(1-3): 72~78.
- Li H, He X, Hu X, Duo J. 2003. Environmental issues of geothermal development in Yangbajing, Tibet and the countermeasures. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 8(3B): 965~974.
- Lin Li, Wang Liancheng, Zhao Sumin, Wang Yinping, Hu Yan. 2008. A discussion of the factors affecting geothermal reinjection in the geothermal reservoir of porous type in Tianjin. Hydrogeology & Engineering Geology, 35(6): 125~128 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fengbiao, Shao Linan, Chen Qian. 2010. High fluoride geothermal water treatment with electric flocculation. Nonferrous Metals, 62(1): 96~99 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mingliang, Guo Qinghai, Luo Li, He Tong. 2020. Environmental impacts of geothermal waters with extremely high boron concentrations: insight from a case study in Tibet, China. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 397: 106887.
- Liu Wei. 2008. Hydrogeochemistry and water pollution problems resulting from geothermal fluid exploitation in representative Tibetan high-temperature hydrothermal systems. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Majer E L, Baria R, Stark M, Oates S, Bommer J, Smith B, Asanuma H. 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. Geothermics, 36(3): 185~222.
- Massonnet D, Holzer T, Vadon H. 1997. Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry. Geophysical Research Letters, 24(8): 901~904.
- Matsunaga I, Tenma N, Miyazaki A, Kuriyagawa M. 1995. Characterization of forced flow in a deep fractured reservoir at the Hijiori hot dry rock test site, Yamagata, Japan. Paper 8CONGRESS-1995-161 presented at the 8th ISRM Congress, Tokyo, Japan.
- McCleskey R B, Nordstrom D K, Susong D D, Ball J W, Holloway J M. 2010a. Source and fate of inorganic solutes in the Gibbon River, Yellowstone National Park, Wyoming, USA. I. Low-flow discharge and major solute chemistry. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 193: 189~202.
- McCleskey R B, Nordstrom D K, Susong D D, Ball J W, Taylor H E. 2010b. Source and fate of inorganic solutes in the Gibbon River, Yellowstone National Park, Wyoming, USA. II. Trace element chemistry. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 196: 139~155.
- Pascua C S, Minato M, Yokoyama S, Sato T. 2007. Uptake of dissolved arsenic during the retrieval of silica from spent geothermal brine. Geothermics, 36(3): 230~242.
- Premuzic E T, Lin M S, Jin J Z, Hamilton K. 1995. Geothermal waste treatment biotechnology. Proceedings of the World Geothermal Congress, 4: 2769~2772.
- Rathnaweera T D, Wu W, Ji Y L, Gamage R P. 2020. Understanding injection-induced seismicity in enhanced geothermal systems: from the coupled thermo-hydro-mechanical-chemical process to anthropogenic earthquake prediction. Earth-Science Reviews, 205: 103182.
- Richards H G, Savage D, Andrews J N. 1992. Granite-water reactions in an experimental Hot Dry Rock geothermal reservoir, Rosemanowes test site, Cornwall, U. K. Applied Geochemistry, 7(3): 193~222.
- Samatya S, Tuncel A, Kabay N. 2012. Boronremoval from geothermal water by a novel monodisperse porous poly (GMA-co-EDM) resin containing N-methyl-D-glucamine functional group. Solvent Extraction and Ion Exchange, 30(4): 341~349.
- Sarychikhina O, Glowacka E, Mellors R, Vidal F S. 2011. Land subsidence in the Cerro Prietogeothermal field, Baja California, Mexico, from 1994 to 2005 an integrated analysis of DInSAR, leveling and geological data. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 204(1-4): 76~90.
- Schultze L E, Bauer D J. 1985. Recovering lead-zinc sulfide from a geothermal brine. USBM Report of Investigation 8922.
- Shakeri A, Fard M S, Mehrabi B, Mehr M R. 2020. Occurrence, origin and health risk of arsenic and potentially toxic elements (PTEs) in sediments and fish tissues from the geothermal area of the Khiav River, Ardebil Province (NW Iran). Journal of Geochemical Exploration, 208: 106347.
- Shinohara H. 1994. Exsolution of immiscible vapor and liquid phases from a crystallizing silicate melt: implications for chlorine and metal transport. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58(23): 5215~5221.

Stefansson V. 1997. Geothermal reinjection experience. *Geothermics*, 26(1): 99~139.

Stenger R. 1982. Petrology and geochemistry of the basement rocks of the Research Drilling Project Urach 3. The Urach Geothermal Project. Schweizerbart'sche, Stuttgart, Germany.

Trutnevyte E, Azevedo I L. 2018. Induced seismicity hazard and risk by enhanced geothermal systems: an expert elicitation approach. *Environmental Research Letters*, 13(3): <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9eb2>.

Vigano A, Ranalli G, Andreis D, Martin S. 2021. Inversion for the static friction coefficient of seismogenic faults: application to induced seismicity of the Basel Enhanced Geothermal System, Switzerland. *Journal of Geodynamics*, 145: 101843.

Wang Guanghui, Zhao Na, Zhao Sumin, Gao Liang, Li Yuanyuan. 2013. Reinjection effect study of different geothermal well completion in Neogene system. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 28(3): 481~485 (in Chinese with English abstract).

Wang Guilin, Liu Zhiming, Liu Qingxuan, Yan Xianjun. 2002. Modeling of geothermal reinjection in Xi'an geothermal field, West China. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2): 183~188 (in Chinese with English abstract).

Yu Zhengyan, Guo Qinghai, Cao Yaowu, Zhuang Yaqin, Zhang Canhai, Zhu Mingcheng. 2018. Treatment of the fracturing fluid from Enhanced Geothermal Systems by using selected anion clays. *Environmental Chemistry*, 37(2): 335~346 (in Chinese with English abstract).

Zhang Tianhua, Huang Qiongzong. 1997. Pollution of geothermal wastewater produced by Tibet Yangbajain geothermal power station. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 17(2): 252~255 (in Chinese with English abstract).

Zhao Na. 2014. A study of the geological characteristics of the Neogene porous in Tianjin and geothermal reinjection well completion techniques. Master thesis of China University of

Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈玉林. 2012. 西安地热田地热水回灌试验研究, 西北大学硕士学位论文.

崔帅. 2018. 基于纳米氧化钛掺杂实现富硼地热水中硼的去除及其同步资源化利用, 中国地质大学(武汉)硕士学位论文.

郭清海, 曹耀武, 余正艳, 天娇, 张寅. 2017. 地热系统来源典型有害组分的阴离子黏土处理. 北京: 科学出版社.

贾志, 张芬娜, 杨忠彦, 彭红晶, 赵娜. 2015. 射孔技术在孔隙型地热回灌井中的应用. *地下水*, 37(2): 106~109.

林黎, 王连成, 赵苏民, 王颖萍, 胡燕. 2008. 天津地区孔隙型热储层地热流体回灌影响因素探讨. *水文地质工程地质*, 35(6): 125~128.

刘峰彪, 邵立南, 陈谦. 2010. 电絮凝法处理高氟地热水. *有色金属工程*, 62(1): 96~99.

刘伟. 2008. 西藏典型高温水热系统水文地球化学及地热利用引发的水污染问题研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.

王光辉, 赵娜, 赵苏民, 高亮, 李嫻嫻. 2013. 天津地区新近系地热回灌井不同完井工艺应用效果对比. *地质找矿论丛*, 28(3): 481~485.

王贵玲, 刘志明, 刘庆宣, 烟献军. 2002. 西安地热田地热热水回灌数值模拟研究. *地球学报*, 23(2): 183~188.

余正艳, 郭清海, 曹耀武, 庄亚芹, 张灿海, 朱明成. 2018. 阴离子黏土处理增强型地热系统返排液的研究. *环境化学*, 37(2): 335~346.

张天华, 黄琼中. 1997. 西藏羊八井地热试验电厂地热水污染研究. *环境科学学报*, 17(2): 252~255.

赵娜. 2014. 天津孔隙型储层地热地质特征及回灌井完井工艺研究, 中国地质大学(北京)硕士学位论文.

Environmental effects of harmful constituents derived from geothermal systems and their treatments

GUO Qinghai^{*1,2)}

1) *State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;*

2) *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China*

** Corresponding author; qhguo2006@gmail.com*

Abstract

Geothermal energy is a new, renewable energy whose utilization needs to be strengthened. However, researchers and practitioners have to face up to various environmental problems related to geothermal systems. In this review, harmful constituents derived from geothermal systems are focused on with their formation mechanisms, types, speciation, and environmental effects being generalized. Geothermal water reinjection and undisturbed downhole heat exchange are incapable of completely eliminating the environmental and health threats posed by exploitation of geothermal energy. Moreover, deterioration of the quality of other types of waters in and around a geothermal area resulting from natural discharge of geothermal waters should not be neglected either. Water treatment is one of the vital ways for prevention and remediation of environmental pollutions induced by geothermal discharge. Thus, promising research directions in the area, which are worth being developed in the future, are summarized.

Key words: geothermal system; harmful constituent; environmental effect; geothermal water treatment