

深部地下水的起源及其成矿作用

赵航¹ 孙强²

1. 青岛地质工程勘察院 (青岛地质勘查开发局) 山东青岛 266000

2. 青岛地矿岩土工程有限公司 山东青岛 266000

摘要: 研究地球流体的成因和地质作用是当代地球科学的重要前沿课题。该领域能得到各国地学研究机构的优先资助,很大程度上得益于水文地质学家取得的一系列重要研究成果。

关键词: 地下水成因; 地下水成矿作用; 古水文地质; 沉积盆地水

引言

近年来,国内外深层地下水研究的主要成果有:(1) 阐明了地下水的基本成因类型;建立了一套地下水成矿研究中的古水文地质分析方法。开发了一套研究水-岩相互作用的地球化学模拟软件。本文主要介绍了如何利用地下水及其气体的同位素资料来判断地下水的成因,同时也说明了成矿作用的古水文地质分析、沉积盆地中水的化学特征和成因、沉积盆地中水成矿作用的研究成果和方法。

一、研究的成果

1. 阐述了地下水的基本成因类型,建立了较为成熟的工作方法。长期以来,对地下水的成因一直有不同的看法和认识。近年来,大洋钻探、科学深部钻探、油气勘探、寻找核废料地质处置场等勘探工程技术工作,以及气体地球化学和同位素地球化学研究,极大地丰富了对地下水成因类型的认识,取得了基本一致的观点,认为地下水成因包括渗透、沉积、岩浆和变质四种基本类型。

2. 探索出一套有效的地下水成矿古水文地质分析方法。根据国外学者对古水文地质学的研究成果和对我国实际资料的分析,提出了一些古水文地质学的基本观点。

3. 已经开发了一些用于水-岩相互作用地球化学模拟的软件,通过广泛应用,证明这些软件有助于揭示水-岩相互作用的机理及其控制因素。目前,在深层地下水的成因与成矿研究中,计算机模拟技术已经与水化学、同位素、实验方法一起形成了较为完整的方法体系。

二、地下水的概述

地下水是水资源的重要组成部分。在自然系统的循

环过程中,与地下水接触的岩石圈、生物圈和大气圈交换着极其复杂的物质和能量等信息,水文和化学特征在时间和空间尺度上不断变化。在全球气候变化和高强度人类活动的影响下,地下水的不合理利用和水质恶化引发了一系列生态问题。地下水中化学成分的含量和赋存形式是影响地下水质量的主要因素。因此,研究地下水水化学的时空变化特征和演化规律,可以揭示地下水的现状及其与环境相互作用的形成机制。随着社会经济的快速发展,世界城市化进程越来越快,人们越来越关注城市环境。

三、地下水水化学形成机制

1. 风化淋滤。风化淋滤是南宁市地下水水化学组分形成的重要地球化学过程,主要表现为地下水入渗过程中土壤或岩石层中某些组分的溶解和带走。研究区地下水主要赋存于第四系砂砾石层和上石炭统马坪组(C3M)、上泥盆统五指山组(D3W)灰岩、白云岩灰岩等地层中。淋溶主要体现在沉积岩和土层的淋溶。当地下水经过沉积岩和土层时,溶解度高的氯化物和硫化物首先溶入水中,改变了地下水的成分,增加了水中的含盐量。此外,空气中的CO₂进入地下水形成碳酸,加速淋溶。矿物成分分析结果表明,第四系砂砾石土壤的主要矿物成分为应时和硅质岩、长石、方解石等。主要化学成分为二氧化硅、氧化钙、氧化钠、三氧化二铁、K₂O等。地下咸水与它们反应释放出Ca²⁺和Na⁺离子,其中Na⁺离子的释放相对比Ca²⁺,所以孔隙水主要是Ca²⁺和HCO₃⁻。CaCO₃、MgCO₃和CAMG(CO₃)₂是上石炭统马坪组(C3M)和上泥盆统五指山组(D3W)的主要成分,因此咸水与岩石的相互作用释放出Ca²⁺、Mg²⁺和HCO₃⁻等离子,岩溶水主要是Ca²⁺和HCO₃⁻。

2.地下水混合。混合是研究区地下水化学成分形成过程中的重要地球化学作用，主要表现在地表水与地下水交汇区水质类型往往复杂，化学成分多样。如邕江上游下雨时，河水水位上升，邕江多级阶地松散岩类孔隙水水位也上升，具有明显的补给关系；埋藏岩溶区（良庆区）和裸露岩溶区（清水泉盆地）碳酸盐岩裂隙中的溶洞水主要接受大气降水补给，辅以地表水（大王滩水库），最终排入邕江。

3.人类工程经济活动的影响。大气降水是地下水补给的主要来源，其化学成分丰富，形成了地下水的初始化学成分。随着人类活动的增加，地下水的物理、化学和生物性质发生了变化，从而导致地下水的变化。（1）三废和有害物质总量增加引起的地下水变化。随着经济的快速发展，南宁市工农业发展迅速，城市化进程加快。各种燃料燃烧产生的废气使大气中酸性物质（C、N、S）增加，形成酸雨，使地下水的pH值降低，血浆中 H^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量逐渐增加。固体废物回收和保存不当，废物中的有毒有害物质通过淋溶进入地下，造成地下水污染；废水中的细菌、病毒等微生物消耗水中的溶解氧，而表面泡沫阻止空气中的氧气溶解于水中，导致 CO_2 含量相对增加，地下水中 HCO_3^- 增加。（2）过度开采地下水。随着工农业的快速发展和人口的迅速增加，对水的需求也在增加。为满足工业生产、农业灌溉和生活用水的需要，一方面增加邕江地表水，另一方面打井抽取大量地下水，导致地下水严重超采。一方面造成水位下降，从而形成下降漏斗，改变地下水的动力条件，为污染物进入地下创造便利条件。二是改变了不同含水层之间的水力联系，导致深层水质恶化；第三，改变了地层的渗透性，导致水文地球化学环境的变化，部分金属不溶物被氧化成游离金属离子，淋溶到地下水中。（3）城市建设造成地下水污染。评价城市化进程的一部分是城市建设。城市建设中开挖基坑容易使雨水聚集，成为地下水污染的“源头”；地下工程将浅层地下水切割成块，改变了城市浅层地下水的正常埋藏、补给和排泄条件，容易造成地下水污染。

4.pH值的分布。研究区孔隙水主要为酸性地下水，pH值集中在4.64~7.34范围内，酸性水点占总孔隙水的91%。岩溶水主要为碱性地下水，平均pH值在5.32~7.3之间，碱性水占岩溶水总量的57%。地下水的pH值会对生活用水、工业用水和农业灌溉产生很大的影响。研究区孔隙水pH值低的主要原因是地质环境背景，即包气带

介质间接影响地下水的酸碱度。研究区孔隙水包气带介质主要由第四系冲积砾石层、砂砾石层、粘土和亚粘土层组成，厚度5~63m，表层土壤主要为红壤土。根据市土壤肥料站的数据，全市80.4%的水稻土和69.8%的旱地土壤pH值在6.5以下，而降水、地表水和灌溉水通过土壤渗入含水层。根据黑箱理论原理，进行了城市红壤的淋溶试验。结果表明，酸性水和碱性水通过包气带进入含水层后都呈酸性，pH值最终稳定在4左右。因此，地下水在土壤入渗过程中通过一系列反应转化为酸性液体，pH值稳定在一定范围内。然而，随着人类活动的增加，地下水的pH值也发生了变化。燃料燃烧产生的大量废气导致酸雨的形成，工业的快速发展导致三废和有害物质的排放日益增加。地下水通过大气降水或地表水直接或间接补给，改变其pH值。

四、深层地下水成因辨析

20世纪80年代以来，人们开始重视从地下水（尤其是地热流体）及其气体的同位素组成和气体组成数据中提取成因信息，如 δD 、 $\delta_{18}O_{13}C_{36}Cl$ 、 $34S/32S$ 、 $87Sr/86Sr$ 、 $234U/238U$ 、 $3He/4He$ 、 $7Li/6Li$ 等。其中，在地热流体氢氧稳定同位素研究中发现了“D移”现象。与Taylor推断的“原始岩浆水”相比，岛弧火山区部分高温喷流的 δD 值较高，而这些地区其他类型地热流体的 δD 和 $\delta_{18}O$ 值介于局部雨水和火山喷流之间。这种“氘漂”现象在一些高温热水中也有发现，很难用水岩相互作用引起的同位素分馏来解释，更有可能是同位素组成与火山蒸汽相似的岩浆流体混入了热水。近年来，气体地球化学方法在查明地下水成因中的作用越来越受到重视。不仅可以判断气体的成因，还可以推断流体所处的构造环境和岩浆流体的源岩类型。

五、地热系统与热液成矿

大量的实测、实验和理论研究表明，热液成矿作用的形成和分布与地下热液的动力条件、成因类型、化学成分和熔特征之间往往存在着内在的成因联系。因此，将地热和水文地质学的研究原理和工作方法引入热液矿床的研究，无疑有助于加深对成矿机制和矿化富集规律的认识，进而指导找矿工作。早在1981年，就从水文地质学的角度讨论了现今地热系统中某些矿床的形成。鄂东地区的研究表明，不同类型的地下水参与了某些砾岩矿床的形成。建立了鄂东南多金属成矿带控矿断裂的古水文地质模型。这些模式在基本控矿因素、主要含矿岩石、断层-岩体-矿体的空间关系及成矿溶液来源等方面

面有所不同。矿床学者也十分重视地热系统与热液矿床成矿关系的研究。各类矿床的成矿溶液都参与了成因地下水（大气降水、重力水）或沉积地下水（海水、施工用水）的渗入。

六、沉积盆地中水的化学特征及其成因

沉积盆地水是地壳深部水研究的重要组成部分。随着盆地油气和深层卤水资源勘探的深入，人们对沉积盆地的水化学特征有了更清楚的认识，对其形成机制在许多方面有了更一致的看法。系统总结了沉积盆地中水的化学特征。随着盐度的增加，水中Na、K、Mg、Ca、Sr的含量呈系统上升趋势，而pH和碱度呈下降趋势。盆地水中的有机阴离子主要与低盐度水有关，但Cu、Pb、Zn等金属组分优先出现在盐度大于200g/L的卤水中，可能是高Cl⁻浓度和低pH增强了这些金属元素的溶解性（与Cl⁻缔合形成金属络合物）。地下蒸发的浓度和蒸发岩的溶解有可能形成大多数地下卤水的盐度和Cl⁻浓度。粘性土的膜过滤比效应以及结晶岩和花岗岩中氯硅酸盐（如云母和角闪石）的水解也可能是某些卤水中盐分增加的机理。深层地下水矿化度的明显降低可能是由于大气水的侵入和成岩过程中矿物或有机质脱水产生H₂O造成的。大多数地下水中的主要阳离子不能用地表蒸发水的埋藏或渗透以及地下蒸发岩的溶解来解释。据推测，主要的阳离子（钾、钠、钙、镁等。）广泛受一种亚稳态热力学缓冲效应的影响，即硅酸盐-碳酸盐土（石盐）矿物组合与深部流体之间的热力学缓冲效应是控制地下流体成分的首要因素，即使在100℃以下。对这一假设进行了水溶液的热力学模拟，其结果与野外水化学数据有一些重要的相似之处。将地层水分四类：第一类油田水的TDS普遍较低，一般小于50g/L，通常在几g/L至20-30g/L之间，最低仅为0.5g/L，个别情况下可达200mg/L。（pH值一般大于7，最高可大于10，属于弱碱性-碱性水；水化学类型主要为氯代碳酸钠、氯代碳酸氢钠、氯代碳酸氢钠、碳酸氢钠（包括碳酸氢钠）；（钠/氯）>1.这种水一般分布在淡水-半咸水相的砂质泥岩地层中，地层中没有石膏、盐等矿物，但普遍胶结有方解石和白云石。ii类水TDS较高，一般大于100g/L，最高为349g/L；一般水中Ca²⁺含量较高（与I类相比），但水中Cl⁻和Na⁺含量仍占优势。水的pH值一般小于7，大多在5.0-6.5之间；水化学类型一般为氯钠、氯钠钙和氯

硫酸钠钙。这种水主要出现在有石膏和盐层的沉积盆地中。三类油田水矿化度较高，一般在50~100g/L，有时高于100g/L或低于50g/L；PH介于弱酸性和弱碱性之间；水化学类型主要为氯钠和硫酸氯钠。这类水主要分布在陆相淡水沉积环境的煤系地层中。第四类水的特点是阳离子中Ca²⁺的含量高于Na⁺和Mg²⁺。发现蒸发浓缩水的化学特性（如酸碱度、盐度和水化学成分之间的差异程度）与实际油田水有很大差异。然而，不同CO₂分压和不同地热条件下方解石-白云石-钠长石-微斜长石-白云母-应时矿物组合和盆地水的模拟结果与第一类油田水的化学特征相当。岩盐-石膏-水相互作用体系的模拟结果也与二类油田的水化学特征相当。由于油田水是在漫长的地质历史中形成的，各种物理、化学和生物化学作用无疑会对其产生影响。我们知道油田水化学形成的主导因素，但不否认其他因素的作用。正是由于各种因素的共同作用，油田水的化学特征变得丰富多彩。

七、沉积盆地水与成矿

沉积盆地水的成矿作用包括两层含义：（1）沉积盆地水本身含有较高的成矿元素。当赋存环境发生变化时，溶解在沉积盆地水中的成矿元素会沉淀形成矿床。一般来说，盆地水作为潜在的成矿流体，必须含有1mg/L或以上的溶解成矿元素（如Pb、Zn、Cu、Ba）。（2）沉积盆地水本身在初始阶段不含高成矿元素，但在演化过程中与周围环境相互作用逐渐聚集成矿元素，然后成矿组分在适宜的条件下从盆地水中沉淀出来，进行聚集成矿。在许多独特的地质背景下，沉积盆地水一直被认为是成矿流体。

总之，随着地质勘探的深入和现代测试技术的提高，人们将获得更多关于地球内部流体的信息。由于地球流体特别是深部流体本身的复杂性和人们认识的局限性，对地球内部流体的研究将是一个永恒的科学课题。中国有大量的地质场地可供深部流体研究，如大量的古生代和中新生代沉积盆地、高温、中低温地热田、与深部流体有关的大中型矿床等。因此，中国完全有条件为地球流体的研究做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 张坤. 地下水资源特性及其合理开发利用. 2020.
- [2] 李连凯. 浅谈深部地下水的起源及其成矿作用. 2021.