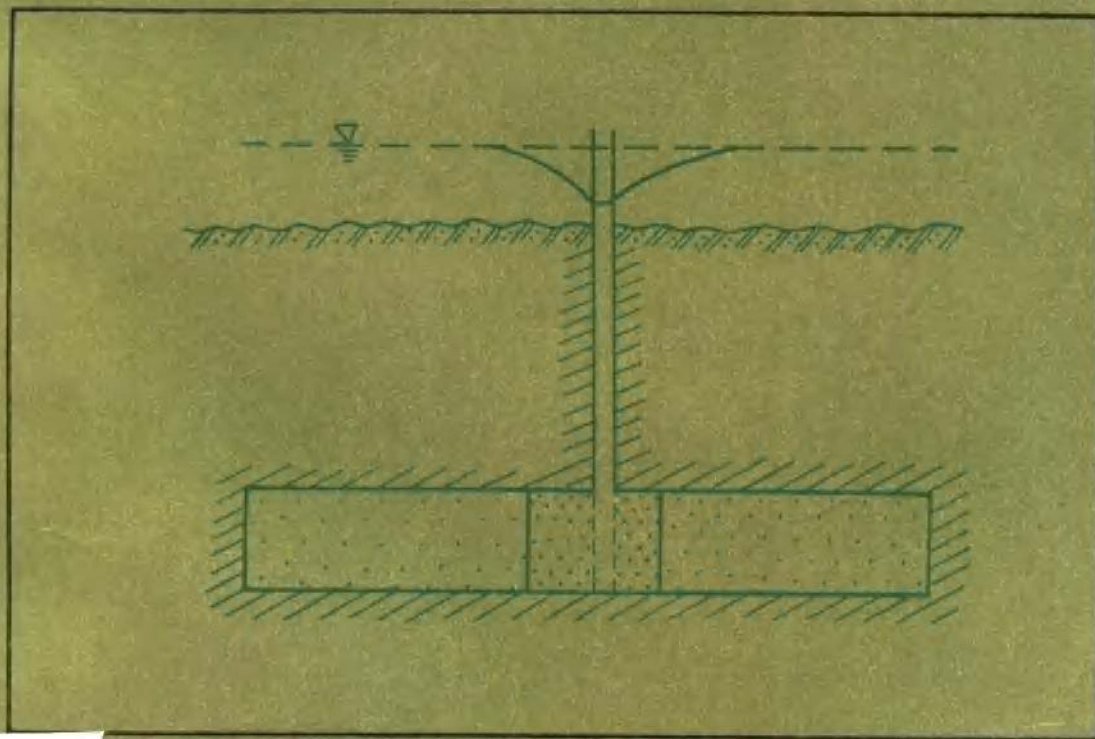




深层卤水资源量评价的研究

李慈君 杨立中 周训 陈明 著



地质出版社

中华人民共和国地质矿产部

地质专报

六 水文地质 工程地质 第12号

深层卤水资源量评价的研究

李慈君 杨立中 周训 陈明 著

地质出版社

前 言

深层卤水作为一种液体矿产资源，其重要的经济价值已为人们所共知，而对它的资源量评价则直接关系到它的合理开发和利用，也涉及到其它地学分支学科的发展，因此，对深层卤水资源量评价的研究愈来愈受到广泛的重视。但是，由于我国在这一领域的研究起步较晚，特别是由于深层卤水埋藏深度大、获取实际资料艰难，因而增加了评价工作的难度，使这一领域的研究进展缓慢。

自1985年以来，作者多次承担了这方面的课题研究。在王大纯教授指导下，杨立中博士于1988年完成了国家博士基金项目“深层地下卤水资源量评价的研究——以四川盆地自贡凹陷邓关储卤构造为例”；李慈君、杨立中、周训、陈明、陈明佑、李兵等于1990年完成了地质矿产部“七五”重点科技攻关项目“四川盆地深层地下卤水资源量评价及其方法的研究”。这些研究成果以我国深层卤水储存的典型地域——四川盆地为研究区，比较系统地分析了深层卤水资源的形成、分布、富集、运移等规律；在深层卤水资源量的计算和评价方面，也从单个储卤构造发展到整个盆地，从一二种评价方法发展到多种评价方法；从评价其开采资源量发展到综合评价其区域资源量、潜在资源量、可采资源量、剩余可采资源量和单井可采资源量等；对深层卤水资源量评价的理论和方法进行了初步的探讨，同时初步解决了四川盆地深层卤水资源量一直模糊不清的问题。作者以多年来的科研成果为基础，并注意吸收国内外在这一领域的研究成果，撰写成本书，希望它能对从事深层卤水资源开发和研究的水文地质工作者以及从事与深层卤水有关的油气勘探、地热开发、热液成矿、工业及核废料处理等研究的地质工作者有所帮助。

全书共分五章。第三章和第五章由李慈君执笔；绪言、第一章的第一至三节、第四章的第二节三至五部分及第三节由杨立中执笔；第二章、第四章的第一节、第二节的一、二部分及英文摘要由周训执笔；第一章的第四节和第四章的第四节由陈明执笔；最后由周训负责全书的修改、统编和定稿。在科研工作和本书的撰写过程中，中国地质大学（北京）、西南交通大学、四川省地矿局第二地质大队等单位给予了支持和帮助，王大纯教授给予了极大关心，宋正平、袁见齐、沈照理、辛奎德等专家学者认真评审了科研成果，李兵工程师参加了第三章的部分整理和撰写工作，在此一并致谢。

作 者

1991年9月

目 录

绪言	1
第一章 深层卤水及其资源量评价的一些基本问题	5
第一节 深层卤水的形成条件	5
第二节 深层卤水的分布与富集规律	9
第三节 深层卤水的基本水化学特征	14
第四节 深层卤水资源的特征、分类及评价原则	19
第二章 深层卤水资源量评价方法	25
第一节 概述	25
第二节 容积法	27
第三节 蒙特卡罗法	28
第四节 有限单元法	30
第五节 时间序列分析法	35
第六节 类比法	38
第七节 物质平衡法	39
第八节 解析法-平均布井法	42
第九节 直线回归法	43
第三章 四川盆地深层卤水资源综述	47
第一节 四川盆地地质、水文地质背景	47
第二节 储卤层的空间展布及卤水水文地球化学特征	54
第三节 卤水的储集与富集特征	58
第四节 卤水的水动力特征及开采动态	63
第四章 四川盆地深层卤水资源量评价	65
第一节 重点储卤构造的确定	65
第二节 卤水资源量评价方法在重点储卤构造中的应用	67
一、蓬莱镇构造	67
二、龙女寺构造	76
三、邓关构造	80
四、威远构造	87
五、双河矿区	93
第三节 重点储卤构造资源量评价综述	97
第四节 区域卤水资源量的评价	99
第五章 四川盆地深层卤水资源量评价的若干结论	103
参考文献	109
英文摘要	112

Contents

Introduction	1
Chapter I .Some Basic Problems about Deep Formation Brines and Evaluation of the Brine Resources	5
1. Forming Conditions of Deep Formation Brines	5
2. Features of Occurrence and Enrichment of Deep Formation Brines	9
3. Hydrochemical Characteristics of Deep Formation Brines	14
4. Features,Classifications and Principles of the Evaluation of Deep Formation Brine Resources.....	19
Chapter II . Methods of Evaluation of Deep Formation Brine Resources	25
1. An Outline	25
2. Volumetric Method	27
3. Monte-Carlo Method.....	28
4. Finite Element Method	30
5. Time-series Analysis Method	35
6. Analogy Method	38
7. Material Balance Calculation Method.....	39
8. Analytical and Average Well Pattern Method.....	42
9. Linear Regression Method.....	43
Chapter III . Survey of Deep Formation Brine Resources in Sichuan Basin.....	47
1. Geologic and Hydrogeologic Settings of Sichuan Basin	47
2. Occurrence of Brine-bearing Aquifers and Hydrogeochemical Characteristics of the Brines	54
3. Features of Storage and Enrichment of the Brines in Brine- bearing Aquifers.....	58
4. Hydrodynamic Properties and Exploitation Behaviour of the Brines	63
Chapter IV . Evaluation of Deep Formation Brine Resources in Sichuan Basin.....	65
1. Determination of Major Brine-bearing Structures.....	65
2. Application of the Methods of Evaluating Deep Formation Brine Resources to the Major Brine-bearing Structures.....	67

2.1 Penglaizhen Brine-bearing Structure	67
2.2 Longnusi Brine-bearing Structure	76
2.3 Dengguan Brine-bearing Structure	80
2.4 Weiyuan Brine-bearing Structure	87
2.5 Shuanghe Ore Area.....	93
3. Summary of the Evaluation of Deep Formation Brine Resources in the Major Brine-bearing Structures.....	97
4. Evaluation of Regional Brine Resources of the Basin	99
Chapter V. Conclusions of the Evaluation of Deep Formation Brine Resources in Sichuan Basin	
References.....	103
Summary.....	109
	112

绪 言

一、深层卤水的概念

卤水是一种高矿化度地下水，它除含有高浓度的Cl、Na离子外，尚含有不同浓度的Br、I、K、Li、Sr、Ba等多种有用元素，是盐业、化工、宇航、核工业、军工部门的重要原料。关于卤水的概念，在50年代，苏联学者奥弗琴尼科夫（А.М.Овчинников）曾定义，总矿化度大于50 g/L的地下水为卤水。我国一些学者和水文地质工作者采用了这个定义。另外一些学者考虑到地下水的水文地球化学规律，根据正常海水的平均矿化度（35 g/L），石膏开始沉淀时水溶液的矿化度（145 g/L），岩盐开始沉淀时水溶液的矿化度（335 g/L），把矿化度大于35 g/L的地下水定义为卤水。其中矿化度35—145 g/L的为淡卤水，145—335 g/L的为浓卤水，大于335 g/L的为饱和卤水。然而无论卤水的矿化度界线如何划分，但它作为一种可供开发利用的液体矿产资源，却已为各国学者所公认。

卤水按其埋藏条件可分为浅层卤水和深层卤水。浅层卤水赋存在距地表不深的含卤层中，有时甚至出露地表，为晶间卤水或孔洞卤水。其形成主要决定于自然地理条件和气候特点，如我国的柴达木盆地察尔汗盐湖，美国犹他州大盐湖等地的卤水。深层卤水则赋存于地下深部，储卤层埋藏深度达数百米至数千米，是与油、气、岩盐矿床产出有关的高矿化度地下水。本书所讨论的正是这种地下卤水。

二、深层卤水资源量评价研究的意义

1. 研究的实际意义

随着科学技术的发展，深层卤水这种重要的液体矿产资源越来越为人们所重视。在国外，深层卤水的开发利用和资源评价的研究迅速发展。据联合国教科文组织资料，1971年全世界利用深层卤水中的有用组分和化合物，获利达40亿美元左右，其中日本、美国等利用深层卤水提取碘、溴的生产不断扩大，产量逐年增加。美国利用深层卤水提取锂，投资100万美元，便可得到价值达500万美元的商业产品，每年产品总值达7000—8000万美元。原苏联所有的碘和60—70%的溴都从深层卤水中提取。

我国深层卤水分布较广，特别是四川盆地，卤水不仅资源丰富，而且开采历史悠久。据《华阳国志·蜀志》记载：“穿广都盐井诸陂池，蜀于是盛有养生之饶焉”。早在公元前250年，四川已开始利用深层卤水，特别是在四川自贡，凿井采卤、熬盐迄今已有2000余年历史。现在，自贡已成为我国重要的盐化工业基地之一，深层卤水的利用已由单一精制食盐转化为盐化工业的综合利用，已能从卤水中提取溴、碘、硼、锂等化工原料，部分解决了国家依靠进口的状况。但是与工业发达国家相比，我国深层卤水开发和综合利用方面仍处于比较落后的状态。以碘的生产为例，我国至今仍然是主要从海带中提取碘，成本高昂，年产量仅300 t左右，远远不能满足国家的需求量，不得不依靠进口。我国四川盆地许多储卤构造中的深层卤水含碘量高达35 mg/L以上，制盐母液中含碘量甚至高达120 mg/L以上，却得不到开发和利用。造成这种状况的原因是我国深层卤水资源评价研究在

过去较落后,至使这些地区的深层卤水资源量不清,卤水的勘探和开发无从下手,甚至多次失去引进外资的良机。如自贡某盐厂年产9万t的真空制盐设备,因该地区深层卤水资源量不清,原料不足,生产仅达到设计能力的一半。又如日本日宝株式会社,美国施贵宝(SQUIBB)公司制药分公司,美国乙基(ETHYL)公司等曾与四川省一些盐化工厂联系,试图合资开发深层卤水资源,以提取碘、溴原料,但均因深层卤水资源量不清而搁浅。由此可见,深层卤水资源量不清的状况严重阻碍了我国井卤盐化工业的进一步发展。此外,由于资源量不清,使得很多地区对深层卤水的开发只能沿袭边勘探边开采的生产方式。这种无计划地盲目开采,导致储卤构造中深层卤水水位大幅度不均匀下降,一些地段资源面临枯竭,而另一些地段则资源潜力未能充分发挥。

因此,开展深层卤水资源量评价的研究,为有计划地开发利用这种宝贵资源提供比较准确的基础数据,确实是井卤盐化工业生产实际中迫切需要解决的问题。

2. 研究的理论意义

浅层地下水资源早已为人类所利用,其资源量评价的理论和方法已趋完善。尤其是电子计算机问世后,数学模拟方法已使许多复杂水文地质条件下浅层地下水资源量的评价得以解决。深层地下水虽然在现代日益为盐化工、医疗、能源等部门所利用,但对其资源量评价的研究却进展缓慢。深层地下水无论其埋藏条件、资源属性、物理性质和化学成分、水动力特征、开采手段、利用形式等均与浅层地下水有较大的差别。由于埋藏深度大,致使深层地下水勘探、试验、测试等存在极大困难,特别是深部地静压力、地温、地下气体的影响,更使深层卤水的研究复杂化。因此,如何进行深层地下水资源的评价,寻求一套有效的方法,建立比较完善的理论,是水文地质学的一个重要内容。而深层卤水是最主要的深层地下水,其富集、运移规律以及资源量评价的研究,对促进深层地下水资源的研究有着十分重要的意义。

如果把达西定律的建立作为近代水文地质学的开始,至今已有100余年。一个多世纪以来,水文地质学取得了很大的发展,特别是在近半个世纪内,随着遥感地质学、同位素地质学、电子计算机等新技术、新理论的应用,水文地质学的研究日新月异。其分支学科或边缘学科,如古水文地质学、水文地球化学等方面的研究不断深入,同时,水文地质学又渗透到矿床学、地热学、油田地质学、环境保护等学科中,在解决热液成矿、地热开发、油气勘探、工业及核废料处理等问题中都涉及到许多崭新的水文地质课题。无论是水文地质学边缘学科的深化,还是其有关交叉学科的发展,都提出了一个共同需要解决的问题,即深层地下水的定量化研究。已有的研究成果表明,深层卤水只是一种特殊的地下水,其水化学特征、水动力条件等无不类似于深层地下水。因此,深层卤水资源量评价的研究意义已远远超出对它自身的评价,对很多水文地质学的边缘学科、交叉学科的发展有着深远的影响。

三、深层卤水资源量评价研究的发展与现状

深层卤水资源量的评价比浅层地下水资源量的评价更加困难和复杂。从地下水运动的特点分析,深层卤水类似于浅层地下水,其资源量评价可以利用浅层地下水资源量评价的方法;从埋藏条件、压力特征来看,深层卤水又类似于石油和天然气,其资源量评价又可借鉴石油、天然气资源评价中的某些方法。因此可以认为,深层卤水资源量的评价方法是集浅层地下水资源评价方法和深部油、气资源评价方法为一体的综合评价方法。

由于上述缘故,使深层卤水资源量评价难度大,另一方面深层卤水的经济价值又不如油、气资源大,因此,其资源量评价的发展一直缓慢。

在国外,原苏联在该领域起步较早。70年代,宾杰曼(Н.Н.Биндемэн)等在地下水资源分类中便考虑了深层卤水的特点,为适应其评价,特别相对于浅层地下水的“资源”,提出了深层卤水的“储量”概念,并把它们共同列入1976年全苏储委(ТКЗ СССР)批准的规范中。1984年,邦多连科(С.С.Бондаренко)、德罗勃诺霍德(Н.И.Дробноход)在所著的《地下工业原料水》、《地下水储量评价》两书中,利用了石油储量计算的体积法,浅层地下水资源评价的稳定流和非稳定流方法,评价了深层卤水的资源量。1986年,邦多连科和瓦尔塔尼扬(Е.С.Вартанян)在所著的《深层地下水的资源评价和研究方法》一书中,又进一步提出了深层卤水的地质经济评价(теолото-экономическая оценка),并拟定了深层卤水矿床的技术经济指标(техничко-экономические показатели)。欧美国家的卤水大量来自地表盐湖或浅层地下卤水,如美国的犹他州大盐湖。因此,欧美学者,如托思(J.Toth)、希特琼(B.Hitchon)、格拉斯伯根(P.Glasbergen)、诺瓦肯斯基(K.S.Norakowski)、A.G.柯林斯、J.S.Hanor和Y.K.Kharaka等,对深层卤水或深层地下水的研究大多结合石油、天然气的生成与运移,以及工业废料、核废料的处理,并侧重于深层卤水或深层地下水的形成因素、埋藏条件、水化学景观、水动力特征,以及储存介质的低渗透性等方面的研究,而对其资源量评价的研究涉及很少。

我国对深层卤水资源的评价其实也有着悠久的历史。古代劳动人民在开采深层卤水中常总结和分析卤井产量的高低、水质的好坏。这便是对卤水资源的一种最简单的评价,更确切地说,仅是一种评估。这对当时极其低下的生产状况或许尚能适应。然而,随着生产技术的发展,卤井生产能力的提高和规模扩大,使卤井的利用周期缩短,井数增多。因此,这种简单的定性评估方法已无法满足生产的需要。如何半定量甚至定量地评价深层卤水资源,为勘探开发设计提供依据,显得越来越迫切。于是,各种深层卤水资源评价的方法应运而生。70年代中期,四川盆地深层卤水开采中已开始采用提捞、气举抽水,运用水位下降法、产量递减法、稳定流法,进行深层卤水单井开采资源量的计算,使深层卤水资源由定性评估过渡到半定量计算。但是,深部储卤层的渗透性能较之浅部含水层差得多,所以抽水试验极难达到稳定,使资源评价的结果与实际相差甚大。70年代末,四川省自贡盐业地质钻井大队、地质矿产部水文地质工程地质研究所、四川省地矿局第二地质大队等单位,使用石油抽汲设备和声波测试技术,进行了深层卤水非稳定流抽水试验的尝试,并运用非稳定流理论评价了单井深层卤水资源量,使深层卤水资源量评价的研究有了新的进展。80年代中期,杨立中以四川省自贡市东南的邓关储卤构造为研究区,通过宏观和微观的研究,建立了该构造的深层卤水水文地质概念模型,进而建立了深层卤水资源量评价的确定性和随机性数学模型,运用有限单元数值模拟法和时间序列分析法,对该储卤构造的深层卤水剩余可采资源量进行了计算和评价,系统地研究了该储卤构造的深层卤水资源量评价方法,使评价由单井发展到单个构造。90年代初,李慈君等以四川盆地为研究对象,对深层卤水资源的形成及分类进行了研究,建立了不同类型的储卤构造、不同性质的储卤层、不同勘探开采阶段的深层卤水资源量计算模型,并分别采用了有限单元法、时间序列分析法、蒙特卡罗法、物质平衡法等八种方法,对深层卤水的区域地质储量、储卤构造的

潜在资源量、可采资源量、剩余可采资源量、单井开采量等进行了计算，使深层卤水资源量评价的研究从单个储卤构造发展到整个沉积盆地的范围，从用单一方法的评价发展为针对不同类型的资源量利用不同方法的综合评价。

纵观国内外深层卤水资源量评价的发展和现状，不难看出，该领域的研究正在不断深化和趋于完善，并建立了一套较全面和系统的理论和方法。然而，由于深层卤水资源量评价是一个难度很大的新的研究领域，因此，就目前的现状来分析，还存在不少问题，归纳起来有两个方面。第一，深层卤水由于埋藏较深，所以深层卤水及其储卤层受到地静压力、地动压力以及地温的影响，特别是它们常与石油、天然气伴生并相互影响，如何解决深层卤水资源量评价中异常温度、压力和地下气体的影响是该领域需要解决的问题。第二，深层卤水的开采价值主要是因其含有大量的有用组分，因此它不仅需要象评价浅层地下水资源或石油资源那样评价其数量的多寡，还应根据其有用组分含量的不同，评价其利用价值和经济意义。所以，如何进行深层卤水资源的地质经济评价是该领域需要解决的另一个问题。

可以相信，随着盐化工业综合利用技术水平的提高和生产规模的扩大，随着科学技术的进步和地学学科的发展，深层卤水资源评价的研究必将不断深入和完善，从而丰富和拓宽我国水文地质学的研究领域。

第一章 深层卤水及其资源量评价的一些基本问题

第一节 深层卤水的形成条件

深层卤水的形成是水文地质学研究中的一个重要问题。国内外学者对此作了大量研究。深层卤水在其形成过程中受到古地理、古气候、古水文地质等因素的影响,经历了沉积、变质、淋滤等作用。在漫长的地史演化过程中,这些影响因素不断变化,相互交织,使各种作用更加复杂化。因此,要完整、全面地再现深层卤水的形成过程非常困难,但究其形成的主要条件可归纳为构造条件、物质条件以及保存条件。

一、深层卤水形成的构造条件

深层卤水的形成首先需要有足够的储存空间和有利的生成环境。在大型构造盆地中,持续下降的坳陷堆积了厚度巨大、分布广阔的沉积层,为深层卤水提供了良好的储存空间。同时,大型构造盆地常形成封闭、半封闭的洼地,使卤水不致于外流,并处于浓缩、变质的相对稳定的还原环境,又为深层卤水提供了适度的生成环境。所谓构造条件,正是指大型构造盆地为深层卤水形成所造成的这种有利条件。

我国几个大型构造盆地——四川盆地、陕甘宁盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地、江汉盆地、赣州盆地、渤海凹陷盆地等均为深层卤水主要的储集区和埋藏地。这些盆地面积广阔,为数万至数十万平方公里,沉积厚度巨大,为数千甚至上万米,其沉积物主要为碎屑岩和碳酸盐岩(见表1-1)。这样广厚的沉积层为深层卤水的形成造成了良好的条件。

表 1-1 中国主要储卤构造盆地基本特征

盆地名称	盆地面积(km ²)	沉积时代	沉积厚度(m)	主要岩性
四川盆地	23 × 10 ⁴	P、T、J、K	>10000	碳酸盐岩、碎屑岩
陕甘宁盆地	26 × 10 ⁴	Є、O、C、P、T	4400	碳酸盐岩、碎屑岩
准噶尔盆地	13 × 10 ⁴	C、P、T、J、K	1300	碎屑岩
塔里木盆地	56 × 10 ⁴	T、J、K、E	1500	碎屑岩
江汉盆地	3.8 × 10 ⁴	K、E	6000	碎屑岩、蒸发岩
渤海凹陷盆地	20 × 10 ⁴	Z、Є、O、C、P	33000	碳酸盐岩、碎屑岩

二、深层卤水形成的物质条件

深层卤水是高矿化度的地下水,所含离子总量是淡水的数百倍。这些盐类物质的来源及它们的浓缩条件,则是深层卤水形成的物质条件。

按盐类物质来源,可分为海源(沙洲说)、陆源(沙漠说)及地壳深部源。海源说认为,

成盐盆地与古海相通，古海水的平均盐度为3.5%，它是盐类物质的来源，如我国四川盆地中盐类物质的来源多属于此。陆源说认为，成盐盆地位于与古海不相通的内陆，因盐、再溶盐、风化盐、火山盐等是盆地中盐类物质的来源，如我国西部的内陆盆地所赋存的盐矿多属于此。现代热卤水的研究还发现一部分盐类物质来源于地壳深部，与岩浆活动关系密切，如在红海中央裂谷分布的一系列深达1900—2200m的海盆内发现了高热卤水（40—60℃），其矿化度高达257g/L。这些卤水是从“大西洋Ⅱ”海渊的裂隙中流出的。据同位素地质学证实，它是以高热流为特征的循环海洋卤水，在红海下面的玄武质基岩和蒸发岩中形成，其盐类物质来源于地壳深部。

这三种来源的盐类物质在形成深层卤水的过程中还必须保证液体的蒸发量大于其补给量，才能使含盐原生水浓缩成高矿化度深层卤水。要获得这一条件，对于海源、陆源的深层卤水，其形成则应在干旱、半干旱的古气候条件下，由于降雨稀少、气候炎热、季风盛行，水体的蒸发量远大于补给量，有利于含盐原生水浓缩，形成深层卤水。对于地壳深部源的卤水，其蒸发作用主要依靠地温。因此，在深部岩浆活动和地热流影响下，同样可使含盐原生水浓缩形成深层卤水。

三、深层卤水形成的保存条件

当盐类物质沉积于构造盆地中，如果盆地抬升，沉积盖层遭到风化淋滤，盐类溶解流失，则无法形成深层卤水。因此，盐类物质沉积之后，只有大型构造盆地上覆巨厚的沉积盖层，并且有良好的封闭性，造成水交替十分缓慢的还原环境，才能使盐类物质得以保存，并形成深层卤水。

从深层卤水保存的角度，按封闭条件的好坏和水交替的快慢，可把大型构造盆地分为三个水动力带（图1-1）。

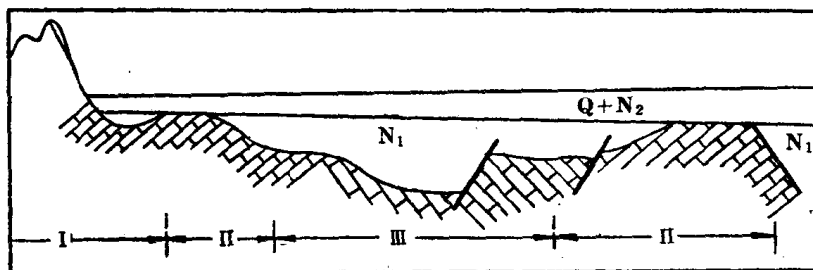


图 1-1 构造盆地水动力分带示意图

I—半开启区水交替积极带；II—局部开启区水交替缓慢带；III—封闭区水交替十分缓慢带。N₁—新第三系中新统；Q+N₂—第四系—新第三系上新统

I. 半开启区水交替积极带

在大型构造盆地的边缘，外侧与补给区相连，呈半开启状态，储卤层部分出露地表，受到大气降水或地表水的影响，由于水交替较快，淋滤作用较强，使该带深层卤水往往形成低矿化度卤水。

II. 局部开启区水交替缓慢带

在大型构造盆地中的古隆起部位，常形成局部开启区。这些区域是古补给区。该区附近的古卤水受到古淋滤作用的影响，在地质历史时期，古卤水与古淋滤水之间相互交替，形成了成因较复杂的深层卤水，其矿化度变化较大。

Ⅲ. 封闭区水交替十分缓慢带

封闭区处于大型构造盆地中心, 远离古代和近代补给区, 其盖层封闭性良好, 水交替十分缓慢。这一区域古卤水受淋滤水影响甚微, 形成矿化度很高的深层卤水。

由以上分析可知, 巨厚沉积盖层使深层卤水处于良好的封闭环境中, 对其保存具有重要意义。巨厚沉积盖层的另一个重要意义在于产生巨大的地静压力, 使其它含盐软泥层或粘土在成岩过程中压缩释水, 补充古卤水, 同时还导致地层温度、压力大幅度增高, 产生地球化学作用, 使古卤水发生正向变质, 向盐化方向转化, 浓缩成为高矿化度的深层卤水。

深层卤水形成的上述三个条件缺一不可, 它们相互联系、制约, 使古卤水演化为现在具有工业利用价值的深层卤水。下面以四川盆地深层卤水的形成为例加以具体说明。

四川盆地是我国著名的成盐盆地, 对其深层卤水的形成, 我国老一辈地质学家作了大量研究, 提出了多种假说。谭锡畴、李春昱等曾提出渗滤说, 他们认为, 四川盆地的白垩系红层和三叠系飞仙关页岩是含盐地层, 地表水及上层地下水由孔隙、裂隙渗入, 溶滤了含盐地层, 浓者下沉, 轻者上浮, 且沉积越深, 浓度越大, 在三叠系嘉陵江组灰岩中形成极浓的卤水。林斯澄提出另一种假说, 即升聚说。他认为三叠系地下卤水是随天然气从下部地层中运移而来, 由于存在上覆致密地层使运移受阻, 储集在三叠系灰岩的洞缝中, 而后水分蒸发浓缩, 形成盐岩或高浓度卤水。如果把上述两种观点看作陆源说, 那么李悦言提出的沙洲说则是与之相反的海源说。他认为, 三叠纪四川盆地周围古陆的盐类物质被地表水搬运注入海盆并沉积下来, 盐质积少成多, 遂成今日之各种盐矿, 一些盐矿经地下水溶解而成盐水(卤水)。

根据近年来不少学者的研究成果, 可将四川盆地三叠系深层卤水的形成过程概括为:

早一中三叠世, 四川盆地为一个与外海相通的陆源海, 东南为江南古陆, 西南为川滇古陆, 西北为龙门山古陆, 北为秦岭大巴山古陆(图中未表示), 其间有海峡与外海相通, 为一个半封闭海盆(图 1-2)。整个早、中三叠世, 盆地经历了多次海侵和海退。古海水的侵入、退出和四周古陆地表径流搬运来的大量含盐风化物注入海盆, 形成了星罗棋布的泻湖和盐湖。中三叠世盆地的古气候炎热干燥, 强烈的蒸发作用使古盐湖中的海水不断浓缩, 矿化度升高, 形成了古卤水。

晚三叠世以后, 四川盆地沉积了巨厚的(大于1000m)陆源碎屑岩, 造成了良好的封闭条件, 古卤水在水交替异常缓慢的环境中得以保存。巨厚沉积层造就的巨大地静压力, 一方面使软泥岩中的沉积水被挤压释出, 进入含卤层中, 参与卤水的运移; 另一方面又使地静压力高的广元、江油一带古地下卤水向压力低的自贡、泸州一带运移。同时, 在巨厚沉积盖层导致的异常温度、压力下, 古卤水经历了围岩溶滤作用、液相盐交换作用、地下蒸发作用等复杂的物理化学过程, 成分得到纯化, 矿化度进一步升高。

白垩纪末, 规模巨大的四川构造运动使盆地总体上升, 结束了沉积历史。盆地周边褶皱成山, 内部发生断褶。规模巨大的构造运动不仅使古卤水受到热变质作用, 使卤水继续朝着盐化方向发展。而且构造应力不均匀分布形成的断褶使地层产生了大量裂隙, 为地下卤水富集提供了空间。构造应力场的地动压力所产生的水平构造运动(тектоногидравлическое движение), 驱使高矿化度深层卤水向断褶裂隙空间运移, 经过地史的演化形成了现代具工业开采价值的四川盆地深层卤水矿床。

深层卤水的上述形成过程使它在赋存特性上具有三个明显的特点。第一, 储卤层良好

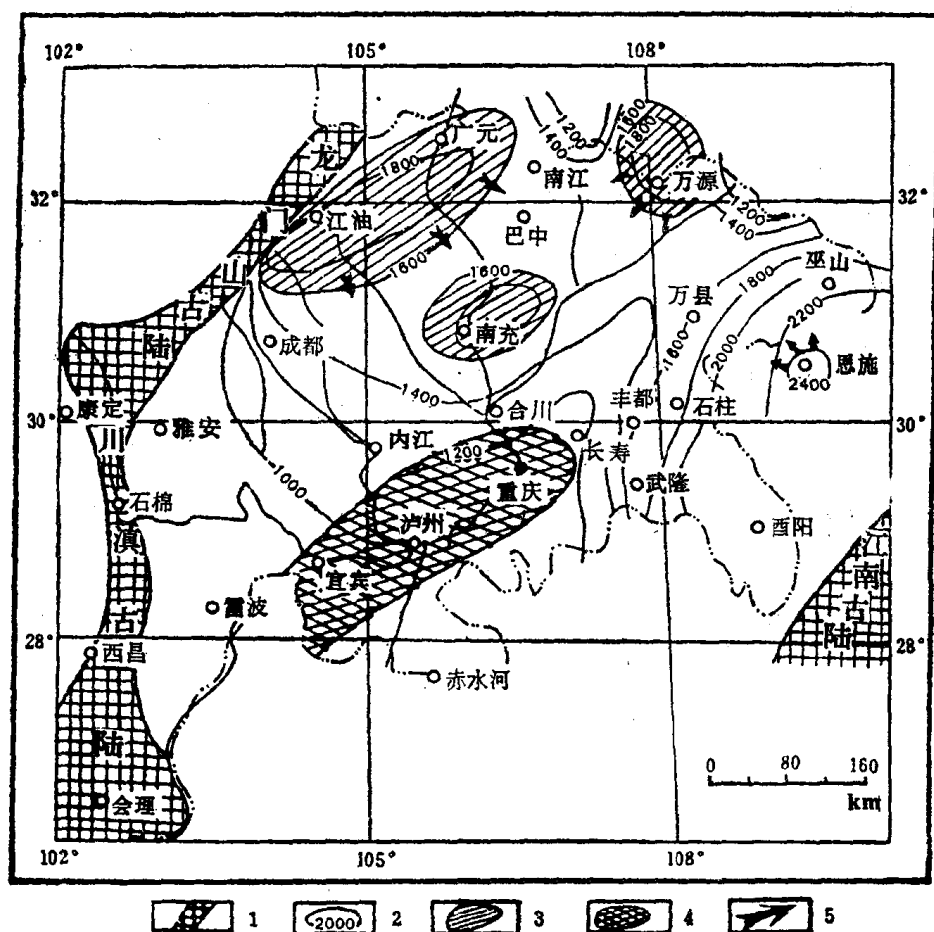


图 1-2 四川盆地中三叠世末沉积水运移示意图

(据汪蕴璞, 1982)

1—古陆; 2—中下三叠统岩层等厚线 (m); 3—地静压力高压区; 4—地静压力低压区; 5—沉积水运移方向

的封闭性。深层卤水赋存于大型构造盆地中, 其上沉积的巨厚盖层阻隔了地表水、大气降水的渗入。局部构造隆起区虽然盖层较薄或缺失, 可能导致大气降水入渗, 但因压力较低, 难以侧向补给压力较高的储卤层。深层卤水形成的漫长地史时期, 频繁的海侵、海退造成了沉积相变或多个沉积旋回, 使储、隔卤层平行叠置, 相互分隔, 在无剧烈的构造作用时, 相邻储卤层难以发生水力联系。因此, 良好的封闭性不仅使储卤层与大气降水、地表水隔绝, 而且各储卤层互无联系、自成系统。第二, 储卤介质极低的渗透性。储卤层上覆的巨厚沉积盖层产生了不可低估的地静压力。如果上覆地层为砂岩, 平均容重按 2.6 kg/cm^3 计, 地层厚度以 1000 m 计, 则可产生 25.5 MPa 的地静压力, 其中大部分由储卤层的骨架承担。由于岩石的形变与作用力的时间成正比, 所以在漫长的地史时期, 在地静压力的不断作用下, 储卤层被压实, 其孔隙度、渗透率远小于浅层含水介质, 一般孔隙度为 $1.2\text{—}1.5\%$, 渗透率为 $1\text{—}8 \text{ mD}$ 。第三, 深层卤水高度的承压性。如前所述, 储卤层上覆盖层产生巨大的地静压力, 这样大的压力是由储卤层骨架和深层卤水共同承担, 因此, 深层卤水将产生巨大的压力水头。如四川盆地三叠系嘉陵江组的储卤层中, 深层卤水的测压水头高度一般都超过 1000 m , 远大于浅层地下水。由于测压水头高度异常大, 故深层卤水可以大幅度调节测压水头值, 释放出大量的弹性储存量, 供开采利用。

综上所述, 深层卤水形成于大型构造盆地之中, 埋藏深度大, 上覆有巨厚的沉积盖层。在漫长的地史时期, 古海水在干燥炎热的气候条件下不断蒸发, 后又经历了变质、纯化、蒸发、浓缩等地质及物理化学作用, 形成了如今高矿化度的深层卤水。独特的形成条件使卤水及其储卤层具有良好的封闭性、极低的渗透性和高度的承压性。这些特性决定了深层卤水的资源属性和资源评价方法均与浅层地下水不尽相同。

第二节 深层卤水的分布与富集规律

一、深层卤水的分布规律

深层卤水形成于封闭或半封闭的大型构造盆地中, 在大型构造盆地的各种沉积地层中赋存有深层卤水。

从地域上分析, 我国的卤水从北纬 25° — 45° , 东经 80° — 120° 内均有分布, 主要集中于几个重要盆地内, 即渤海凹陷盆地、赣州盆地、江汉盆地、四川盆地、陕甘宁盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地等 (见表 1-1)。在大型构造盆地中, 深层卤水主要分布于两个有利的地质带。第一, 古海盆的陆缘海、海湾、泻湖、盐湖、由构造隆起阻隔的陆缘海潮下带等; 古陆盆的泻湖、干盐湖、沙漠盐滩等。它们常因海侵、海退, 或因干旱气候影响, 为深层卤水形成提供了良好的环境, 成为深层卤水的分布区。第二, 断裂构造带常成为卤水的通道和减压带, 使深层卤水上升或侧向运移, 并在这些部位富集, 成为深层卤水的重新分布带。如我国四川盆地、江汉盆地中均有这种深层卤水分布带。

从垂向上分析, 深层卤水一般埋藏很深, 但在不同的盆地、不同岩性的储卤层中, 其分布有所差别。碳酸盐岩中的深层卤水分布较深, 如四川盆地、陕甘宁盆地、渤海凹陷盆地的碳酸盐岩中, 深层卤水多分布于 1000—4000m 内, 甚至更深。而在陆相碎屑岩中的深层卤水分布相对较浅, 如四川盆地的碎屑岩中, 深层卤水分布于 800—2000m 内。

值得提出的是, 由于深层卤水的形成条件与盐岩、石油、天然气等矿产有相似之处, 其分布与这些矿产关系密切。事实上, 在我国西南、西北、中南、华北等地, 盐岩和油气矿藏分布区, 往往也是深层卤水分布区。

从时间上分析, 深层卤水分布于地史的不同时代。我国地史时期气候从温暖潮湿到半干旱、干旱炎热, 形成了数个气候旋回, 其干旱气候主要出现在震旦纪、寒武纪、奥陶纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪、侏罗纪、白垩纪和第三纪。每个时代虽各有其气候特点, 但干燥炎热的气候均为深层卤水的生成创造了条件, 形成了不同时代的卤水分布。根据目前的研究资料, 我国深层卤水由老至新主要分布于以下时代:

震旦纪: 如四川的威远、长宁。

寒武纪: 如四川的巫溪、邻水、江津、泸州; 湖北的竹溪; 云南的盐津、威信; 贵州的绥阳等地。

奥陶纪: 如四川的磨溪、彭水。

石炭纪: 如四川的万县、邻水。

二叠纪: 如四川的自贡、蓬萊、邻水、开县、忠县、云阳。

三叠纪: 如四川、湖北、黔北、新疆等地。为我国主要的深层卤水分布时期。

侏罗纪: 如四川、湖北、云南、甘肃、青海、西藏。

白垩纪：如四川的大邑、新津、眉山、天全及湖北、河南、云南等地。

第三纪：如新疆、云南、山东、湖北、西藏等地。

综上所述，我国深层卤水无论在空间和时间上都分布较广。它们主要集中于几个大型构造盆地，并分布在古生代、中生代的各个地史时期的沉积地层中。其中，四川盆地是我国深层卤水的最重要的分布区。另外，深层卤水与盐岩、石油、天然气等矿产的共生关系，使深层卤水的研究可以与这些矿产的研究相互借鉴和影响。

二、深层卤水的富集规律

分布于大型构造盆地中的深层卤水并不是遍布整个盆地，特别是具有开采利用价值的深层卤水分布更加局限。因此，对深层卤水分布的区域必须进一步分析其富集区。从这一意义上说，深层卤水的富集规律可以认为是一种具有特殊条件的深层卤水分布规律。

深层卤水的富集受到众多因素的影响，难以找到一种通用的富集模式，但其制约因素却可大致归纳为岩性和构造两类。

（一）岩性对深层卤水富集的影响

岩层的空隙是深层卤水储存的场所和运移的通道，不同岩性的地层正是通过所具有的孔隙、裂隙和溶隙来影响深层卤水的富集。因此，深层卤水的富集程度可用储卤层的孔隙度和渗透率（mD）^①来定量描述，孔隙度、渗透率越大，则储卤层对深层卤水的富集越有利、富集程度越高，反之则不利于深层卤水的富集。

在碎屑岩中，影响深层卤水富集的主要因素是岩层孔隙的大小和多少。一般说来，碎屑岩的碎屑粒径越大、分选性越好、胶结物含量越少，碎屑岩的孔隙性和渗透性则越好。如华北黄骅群羊木组中、下段砂岩的孔隙度和渗透率，随直径大于0.1 mm的碎屑颗粒百分含量的增加而呈现明显地增大（表1-2）；华北第三纪钙质胶结砂岩的孔隙度和渗透率随

表 1-2 华北黄骅群羊木组中、下段砂岩粒度与孔隙度、渗透率关系

项目 时代	粒 度(mm)及含量 (%)			孔隙度(%)	渗透率(mD)
	>0.1	0.1—0.01	<0.01		
中段	57.80	24.50	17.23	28.55—30.22	540.80—179.65
	44.16	38.96	15.90	28.25—28.20	127.25—172.01
	27.76	49.27	22.97	19.15	17.37
下段	17.50	46.57	35.83	17.98	0.29

（据沈治安，1982）

胶结物含量的增大而明显减小（表1-3）。

在碳酸盐岩中，越来越多的资料表明，影响深层卤水富集的除了原生和次生孔隙外，更重要的是次生的裂隙和溶隙。在对四川自贡邓关储卤构造的三叠系下统嘉陵江组石灰岩储卤层的研究中发现，石灰岩中孔隙以次生溶孔即针孔为主，兼有原生粒间、晶间孔隙，其孔径为0.012—1.822 mm，这些孔隙扩大了储卤层的储存空间，对深层卤水的富集有一

① $1 \mu\text{m}^2 = 1.01325 \text{ D} \approx 1 \text{ D} = 1000 \text{ mD}$ ，下同。

表 1-3 黄骅坳陷第三系灰质胶结砂岩胶结物含量与孔隙度、渗透率关系

碳酸盐含量(%)	孔隙度(%)	渗透率(mD)
<5	>24	>4000
5—10	约 24	约 500
10—20	17—24	<1—40
>20	<17	<1

(据沈治安, 1982)

定影响, 但当具有次生裂隙后, 则储卤层的储集性能大大提高, 孔隙度、渗透率增大数倍, 使深层卤水的富集程度明显地改观 (表1-4)。

表 1-4 不同结构岩样的孔隙度和渗透率

岩性结构	孔隙度(%)	渗透率(mD)
一般岩样	6.419	1.100
针孔结构岩样	12.279	0.646
裂隙、针孔结构岩样	15.250	8.141

在构造应力影响相同的情况下, 碳酸盐岩裂隙的发育程度主要取决于岩性特征, 纯石灰岩、白云岩一类具弹脆性岩石易产生裂隙, 而泥灰岩一类塑性岩石不利于裂隙的产生。岩性不仅对裂隙的数量有影响, 而且对裂隙的隙宽也有影响。斯麦霍夫(E. C. Смахов)曾统计了波罗的海杜尔地区石灰岩中的裂隙, 发现结晶石灰岩中裂隙隙宽大部分为 50—100 μm , 而泥灰岩中则均小于 50 μm 。在四川自贡邓关储卤构造的研究中, 对不同岩性的储卤层统计证实, 脆性较强的白云岩类裂隙隙宽和密度均较石灰岩类大, 纯碳酸盐岩类的裂隙隙宽和密度又较塑性高的泥质碳酸盐岩类大。针孔状碳酸盐岩类由于结构影响了岩石的变形特性, 裂隙的宽度和密度出现异常特征 (表 1-5)。

表 1-5 不同岩性的裂隙隙宽、密度与变形的关系

岩 性	隙 宽(mm)	密 度(条/m)	岩石变形特征
白 云 岩	0.581	15.210	↓ 塑性 变形 增强 ↑ 弹脆性 变形 增强
石 灰 岩	0.476	14.845	
针孔状白云岩	0.270	22.190	
针孔状石灰岩	0.217	6.250	
泥质白云岩	0.490	10.380	
泥质石灰岩	0.443	7.910	

综上所述, 不同岩性的地层因其空隙发育的差异, 使岩层的孔隙度和渗透率发生变化, 从而导致了深层卤水在不同岩性的储卤层中富集程度的不同。如四川盆地三叠系由交互叠置的砂岩、页岩、石灰岩、泥质石灰岩组成, 正是由于岩性对深层卤水富集的影响, 呈现