

跨界含水层研究——世界进展和亚洲实践

韩再生, 李尧, 王皓, 何静

中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083

摘要 跨界含水层是指其组成部分位于不同国家的含水层。妥善管理并合理利用跨界含水层,对水资源可持续利用,以及国家之间的睦邻关系具有重要意义。本文论述了跨界含水层世界研究概况,标定了亚洲跨界含水层,并完成了亚洲跨界含水层图。对涉及中国的两个实例——黑龙江—阿穆尔河中游盆地和澜沧江—湄公河流域跨界含水层进行了典型研究,提出了跨界含水层评估指标体系,并实践于澜沧江—湄公河流域4个跨界含水层。

关键词 跨界含水层;地下水;亚洲;评估指标体系

中图分类号 P641

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.05.009

Research on Transboundary Aquifers: International Development Progress and Their Practice in Asia

HAN Zaisheng, LI Yao, WANG Hao, HE Jing

School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Transboundary Aquifer (TBA) is an aquifer system that exists in more than one state. As an important component of the groundwater system, proper management and rational utilization in TBAs are significantly important for promoting sustainable development and good-neighbor relationships. The TBAs will not simply implicate by the country's political boundary as it follows the natural boundary lines. A brief count of the research on TBAs in the world is presented. Within the framework of the UNESCO's International Hydrological Program (IHP-VI & VII) activities for the International Shared Aquifer Resource Management (ISARM), the both preliminary and detail inventories on TBA in Asia has accomplished. Those TBAs are classified into two types, that is, regional grade and local grade. A draft of Asian TBAs map has advanced; the updated map provides the situation of the regional TBAs identifying as the actual shape. Two case studies have been conducted. Those are the TBAs in the middle Heilongjiang-Amur River and Lancang-Mekong River Basin. The UNESCO leading expert group has attempted with DPSIR framework for driving forces, pressures, state impact, and responses to classifications of TBAs. A TBA comprehensive evaluation indicators system is put forward. The potential benefits achieved in the case of TBAs depend on three sets of variables, namely, TBAs intrinsic value and functions, socio-economic, and legal indicators. With the legal and institutional indicators, the aquifers could be classified as inconsistent, less harmonious, harmonious, and more harmonious. Those are applied to the four TBAs in the Lancang-Mekong Basin. Countries with the TBAs should strengthen their cooperation for coordinative and joint management of groundwater resources in order to achieve sustainable utilization.

Keywords transboundary aquifer; groundwater; Asia; evaluation indicators system

0 引言

跨界含水层是指其组成部分位于不同国家的含水层或含水层系统。如同国际河流一样,世界上存在大量跨界含水层和跨界含水层系统。对国际河流问题的重视和研究可以追

溯到上百年以前,但直到20世纪80年代中期才有人针对中东地区潜在的冲突,对跨界含水层问题展开科学讨论。由于跨界地下水相关法律法规的匮乏,对其评价的难度较大,缺乏制度上的协调以及没有足够的信息等原因,相关研究起步

收稿日期:2012-02-06;修回日期:2012-02-13

基金项目:联合国教科文组织国际水文计划第六阶段、第七阶段项目(UNESCO-IHP-VI, IHP-VII, ISARM)

作者简介:韩再生,研究员,研究方向为水文地质、环境地质、地热地质,电子信箱:hanzsh@163.com

较晚。跨界含水层具有资源、环境的巨大价值,在其开发利用中,涉及国家之间的利益关系。研究跨界含水层问题,对合理开发利用国家或地区之间具有联系的地下水资源,建设和谐世界具有重要意义^[1-2]。

1 跨界含水层研究概况

自 20 世纪末国际水文地质学界开始重视和研究跨界含水层。1997 年国际水文地质学家协会 (IAH) 设立了跨界含水层资源管理专业委员会。协会在 1999 年发表了黎波里声明。2000 年联合国教科文组织 (UNESCO) 的国际水文计划 (IHP)、国际水文地质学家协会和联合国粮农组织 (FAO) 等国际机构,发起了国际跨界含水层资源管理计划 (ISARM),并得到很多国家的配合^[3]。这项计划在联合国教科文组织国际水文计划的第五阶段 (1996—2001)、第六阶段 (2002—2007) 和第七阶段 (2008—2013) 均列有课题,内容包括为含水层划定边界并分析含水层系统,鼓励跨界含水层国进行互惠合作并实现含水层的可持续利用等。联合国教科文组织 10 多年来召开了一系列国际学术研讨和工作会议,并组织了实例研究。大量现代水文地质的理论和技术方法应用于该研究,并正在形成一套完整的研究方法和工作指南^[4]。跨界含水层的研究既是水资源可持续利用的前提,又是管理跨界含水层的重要依据。

跨界含水层问题涉及自然科学-水文地质学、法律、社会经济、制度和环境 5 个方面。

(1) 自然科学-水文地质学方面。跨界含水层中的地下水形成一个流动系统,它常被一个或多个国际边界分割,水由边界的一侧流向另一侧,因此这个系统既包括水在局部的流动,也包括在区域的流动。在很多情况下,含水层在边界的某一侧接受补给,而在另一侧发生排泄。应该从整个含水层系统出发,考察边界两侧含水层间的水力联系。很多因素都可能影响含水层的特性和开采潜力,包括水动力学参数、降雨及补给区、承压区和非承压区、天然排泄区、现有的和计划的地下水开采区、水质及其恶化的潜在风险、受污染脆弱程度等。流经边界的地下水流量变化往往无法直接测量获取,可以用参数评价并通过数学模型计算得出。

(2) 法律方面。跨界含水层的法律管理是实现其水资源价值和可持续利用的有效手段。国际、地区或双边水资源条约是国际水资源管理的关键环节。跨界含水层生态系统的整体性要求相关流域国联合起来对跨界含水层进行统一管理。由于涉及主权等因素,必然需要国际条约对相关事宜做出规定,调整水资源利用和保护其中的国家关系。在过去的 50 年中,签订了 157 项有关跨国界水资源问题的双边或多边条约,其中部分涉及地下水。含水层条件的多样性和复杂性,决定了各国内部所使用的有关含水层的法律通常只能供制定跨界含水层管理国际法规的参考。

(3) 社会经济方面。出于发展的需要,跨界含水层涉及的

国家对地下水的争夺日益激烈。因此,地下水开采引起的社会和经济问题已经跨越了边界,成为国际重点关注问题。问题比较突出的是高强度开采的含水层,在上游地区开采地下水,下游地区受到影响;或者地下水污染的运移跨越了边界。这些成为造成国家间矛盾的原因之一。在许多地区,地下水为社会发展提供了可靠的淡水水源,人们对它的依赖日益增长。但在可开采的地下水被耗竭或污染程度较大的时候,对水资源的争夺问题就突显出来。

(4) 制度方面。跨界含水层是一个国际问题。而各国家或区域的管理制度、道德观念等都有所差异,这就成为就跨界含水层问题交流的一大障碍。

(5) 环境方面。为了确保跨界含水层可持续发展,应该把地下水开采总量控制在可持续开采范围内。目前有些地区的地下水开采量远远超过了可持续开采量。如果等到问题出现不良后果以后再想办法解决,那么恶劣的环境影响将是不可避免的。例如,由于连续、高强度的地下水开采导致的地面沉降一旦出现,就是不可逆转的。含水层多年平均补给量一部分应该用于生态环境保护,其余就是地下水的可持续开采量。跨界含水层的可持续管理需要进行预测分析。

国际上跨界含水层研究实例如下^[5-9]。

(1) 南美洲 Guarani 含水层系统位于南美洲南部的 Parana 和 Chaco-Parana 盆地,跨越了巴西、乌拉圭、巴拉圭和阿根廷 4 个国家。该含水层系统面积超过 120 万 km²,总体积超过 4 万 km³,是世界上最重要的地下淡水水库之一。该系统的地下水被广泛应用于城市供水、工业用水和农业灌溉。含水层分布在南美洲人口密集地区,包括巴西的圣保罗市等。4 个国家已经建立了该含水层的地下水数学模型及数据库,交流了对含水层系统的认识,实现了含水层的最新数据跨界。4 个国家和联合国教科文组织的代表于 2001 年在阿根廷召开研讨会,专门讨论了 Guarani 含水层的管理问题。

(2) 欧洲 Praded 含水层系统为捷克和波兰跨界含水层,面积 3300km²。地下水自西南向东北,由捷克流向波兰。波兰大部分的饮用水均取自该含水层,因此捷克境内地下水以及地表水的日益严重的污染给波兰方面带来很大危害。目前两国已开始共同建立该地区水资源管理系统。

(3) 非洲努比亚砂岩含水层系统涵盖了整个努比亚盆地,横跨利比亚东部、埃及、乍得东北部和苏丹北部,面积达 200 万 km²,由一系列具有水力联系的含水层组成。区域气候条件决定了其接受补给的速度缓慢。努比亚砂岩含水层系统中抽取的地下水主要用于农业,利比亚建设了一个从该含水层调水到地中海滨海地区的大型工程。在埃及西南部进行的高强度抽水所产生的降落漏斗的范围超过埃及—苏丹边界 50—70km。在含水层北部的滨海地区进行抽水,会导致海水入侵的发生。随着位于利比亚边境中部的地下水抽水量的增加,努比亚含水层系统水质恶化的风险也在增大。

(4) 中东约旦河西岸含水层系统是以色列和巴勒斯坦的

最重要的水资源。西部和东北部含水层中的地下水是以色列居民生活用水的主要来源。以色列获得了约旦河西岸近 80% 的地下水资源量,留给巴勒斯坦的不足 20%。以色列全国供水的 1/4 左右来源于约旦河西岸地下水含水层。由东向西流动的地下水有助于防止地中海海水侵入以色列沿海含水层。巴勒斯坦认为地下水是约旦河西岸居民用水的唯一水源,要求增加地下水用水份额以改善贫穷生活条件和发展经济。水资源问题直接与双方的政治和领土问题联系在一起,两国将该含水层的用水配额问题作为巴以和平和谈内容。这个问题引起了国际上许多专家学者的重点关注。

2008 年联合国国际法委员会 (UNILC) 在联合国教科文组织国际水文计划 UNESCO-IHP 的援助下,完成了“跨界含水层法”条款的制定,并提交联合国大会讨论,形成了联合国 63/124 号决议^[7]。2011 年 11 月联合国大会再次讨论了“跨界含水层法”,并通过了 66/104 号决议^[8]。《跨界含水层条款草案》共 19 条,分为 4 部分。一般原则包括:含水层国的主权,公平合理利用,与公平合理利用相关的因素,不对其他含水层国造成重大损害,一般合作义务,数据和资料的定期交流,双边和区域协定。各国政府的立场仍存在分歧。部分国际法律和地下水专家曾采用“共有国际含水层”和“共享水资源”等术语^[9],目前大部分专家采用“跨界含水层”的术语,它仅仅表述了物理因素,避免了涉及所有权和主权的歧义。

2011 年联合国决定将题为“跨界含水层法”的项目列入第 66 届大会议程,为此,中国政府对条款草案中多项内容提出了具体的修改意见。在国际社会没有取得共识的情况下,期待短时间内实现跨界含水层约束目标是不现实的。即便取得了共识,公约编纂和通过的过程需要很长时间,在全球面临水危机情况下,需要采取紧急行动。因此,跨界含水层国家政府在条款草案规定的原则基础上,通过协商缔结双边或者区域安排,有针对性的处理具体跨界含水层问题,应该是更为实际的做法^[10]。

2010 年 12 月 6 日至 8 日,联合国教科文组织召开跨界含水层问题国际会议。在联合国大会通过有关《跨界含水层法》提案的两年后,探索各种可实施的制度性机制。Han 等^[11]在会议上就亚洲跨界含水层问题作了大会发言。会议为 2011 年联合国大会举行的关于跨界含水层法的讨论做了技术准备。

2 亚洲跨界含水层的标定

2003 年至 2009 年,由联合国教科文组织、世界地质图委员会 (CGMW)、国际水文地质学家协会 (IAH)、国际原子能机构 (IAEA) 和德国地球科学及自然资源研究院 (BGR) 共同组织了世界地下水资源图的编制。主要是在各大洲和主要国家水文地质图或地下水资源图的基础上,建立地下水资源数据库,编制世界地下水资源图^[12]。在该项目的执行中,各大洲的水文地质学家以世界地下水资源图为基础,分别标定了本大洲跨界含水层。教科文组织的国际水文计划于 2008 年发布

了首份跨界含水层的地图。到 2010 年,该计划已对全球超过 280 个跨界含水层予以确认,并建立了数据系统。其中,美洲 73 个、非洲 40 个、东欧 65 个、西欧 90 个、亚洲 12 个。大洋洲和南极洲不存在此类含水层。

根据联合国教科文组织发布的世界各国地下水资料、中国最新的地下水评价成果,以及收集到的亚洲部分国家地下水资料,对亚洲东部、中部和南部地下水系统进行分析,以 ArcGis 为平台,圈定了亚洲具有重要意义的主要跨界含水层 12 处^[13]。亚洲主要跨界含水层的初步标定,遗漏了很多跨界含水层,有待进一步完善^[14]。Han 等^[15]完成了《亚洲跨界含水层——初步圈定和评价》。2011 年至今,开始重新标定亚洲跨界含水层,编制详尽的亚洲跨界含水层图,比例尺 1:1000 万。以亚洲地质图、地下水资源图为基础^[16-20],中国学者对中国地下水资源、周边国际河流和跨界含水层作了很多研究^[21-23]。亚洲其他国家,特别是中亚和中东地区在这项研究中也有很多论述^[24]。根据跨界含水层规模的大小,将其划分为区域跨界含水层和局部跨界含水层。在亚洲标定了 49 个区域跨界含水层和 18 个局部跨界含水层,见图 1、表 1 和表 2。

3 黑龙江—阿穆尔河中游盆地跨界含水层

黑龙江—阿穆尔河中游盆地含水层是中国与俄罗斯的跨界含水层^[25]。盆地四面环山,西为小兴安岭,西北部为俄罗斯境内的布瑞恩高地 (Burein heights),东为锡霍特山脉 (Sihote-Aline mountain range),南为中国的完达山。盆地总面积为 10 万 km²。其中,中国境内称为三江平原,面积 4.5 万 km²,俄国境内 5.5 万 km²,参见图 1。该盆地是中国东北和俄罗斯远东的重要经济区,有中国黑龙江省的重要城市佳木斯和俄罗斯远东区的重要城市哈巴罗夫斯克 (伯力)。由于长期的构造下陷和黑龙江 (阿穆尔河)、松花江、乌苏里的泥沙堆积,形成低洼平坦的平原,地面坡度 1/10000 左右。中俄边界的黑瞎子岛 (抚远三角洲) 海拔 34m,砂砾质河谷平原分布在松花江、黑龙江、乌苏里江及其主要支谷中,包括一级阶地和漫滩。地形标高 40—80m,流域水系发育,河流纵横。

黑龙江—阿穆尔河中游盆地为一个大型的含水层系统。埋藏有第四系松散岩类孔隙水、第三系碎屑岩类孔隙裂隙水和前第四系基岩裂隙水。各含水层之间存在直接或间接的水力联系。目前地下水仍处于均衡状态。在盆地西部近山前地带地下水水位标高 80—90m,南部近山前地带地下水水位标高 70—85m,而在中部地下水排泄基准面地带地下水水位标高仅 35m 左右,总水位差为 35—55m。地下水从山前地带向黑龙江和乌苏里江汇流。地下水径流系统包括局部地下水径流系统和区域地下水径流系统。

盆地沉积第四系含水层厚度从盆地边缘向中心加厚。山前地带厚 2—40m,至盆地中心厚度为 60—150m,最厚处达 300m。含水层岩性为细砂、中粗砂、砂砾石,渗透系数为 12—35m/d,单井出水量为 1000—5000m³/d。俄罗斯部分沉积物由



图 1 亚洲跨界含水层图

Fig. 1 Map of Asian transboundary aquifers

古生代到新生代的沉积岩、火山岩和变质岩构成,水文地质研究限于 300m 以内。第四系主要含水层的含水介质为砂砾石、中粗砂,其间夹有黏性土,为封闭自流含水层。在砂、砂砾石层上覆盖有 2—17m 黏性土层,地下水主要由侧向径流补给,由于隔水顶板较薄,大气降水和地表水可以下渗补给。盆地西部砂砾石层直接出露,地下水受大气降水、山区基岩裂隙水和汛期河水补给。

由于两国尚未对黑龙江—阿穆尔河中游盆地地下水资源进行统一的评价,中国和俄罗斯分别按照本国的评价标准和方法,对该地区的地下水资源进行了计算。盆地中国部分地下水可开采资源量为 37.1×10⁸m³/a,俄罗斯部分主要含水层地下水储量为 47.3×10⁸m³,分别与其所占面积 4.5×10⁴km² 和 5.5×10⁴km² 的比例相当,说明同一盆地两部分的水文地质条

件类似,地下水资源状况基本相同。根据调查,中国部分地下水总排泄量与总补给量相等。盆地的地下水处于平衡状态,全区地下水自然循环良好。中、俄罗斯界附近含水层的浅层地下水流排泄进入黑龙江和乌苏里江,深部区域地下水流从中国流向俄罗斯。

根据中国部分对地下水水质的调查结果,盆地内的第四系松散岩类孔隙水化学类型主要为重碳酸钙镁型,还有重碳酸钙型、重碳酸钠钙型。地下水中腐殖酸含量高,多为低矿化弱酸性软水。大部分地区矿化度为 0.2—0.75g/L,pH 值为 6.5—7.5,总硬度为 1.45—4.29mmol/L。大部分地区第四系孔隙水适于人畜饮用和农业灌溉。地下水原生组中铁离子质量浓度高,一般为 0.3—24mg/L,最高为 40mg/L。锰离子质量浓度一般为 0.2—0.4mg/L,最高为 12mg/L。高铁、锰地下水的

表 1 亚洲区域跨界含水层
Table 1 Regional TBAS in Asia

序号	跨界含水层名称	跨界含水层国家	含水层类型	面积/km ²
1	北加里曼丹含水层	文莱, 马来西亚	1	6246
2	澜沧江下游含水层	中国, 缅甸	2, 3	39509
3	红河平原含水层	中国, 越南	1, 2, 3	60805
4	湄公河中游含水层	越南, 老挝, 泰国	1, 2, 3	106816
5	呵叻高原含水层	老挝, 泰国	1, 2	90837
6	湄公河三角洲含水层	柬埔寨, 越南	1, 2	223422
7	雅鲁藏布江中游含水层	印度, 中国	1, 2	35905
8	喜马拉雅山南部含水层	印度, 不丹	1, 2	29717
9	恒河平原含水层	印度, 孟加拉	1	180384
10	喜马拉雅山脉南部含水层	印度, 尼泊尔	1, 2	311589
11	印度河平原含水层	印度, 巴基斯坦	1	394625
12	早第三纪白垩纪含水层	沙特阿拉伯, 也门, 阿曼, 阿联酋, 科威特, 伊拉克, 约旦, 叙利亚	1, 2, 3	2135251
13	东地中海含水层	以色列, 约旦, 黎巴嫩, 巴勒斯坦, 叙利亚	1, 2, 3	15000
14	上耶瑞扎含水层	土耳其, 叙利亚, 伊拉克	1	100000
15	贝瑞那—乌尔含水层	乌兹别克斯坦, 土库曼斯坦	1, 3	60000
16	前塔什干含水层	乌兹别克斯坦, 哈萨克斯坦	1	20000
17	楚盆地含水层	哈萨克斯坦, 吉尔吉斯斯坦	1	13148
18	伊犁河谷含水层	哈萨克斯坦, 中国	1, 2	45015
19	塔城盆地含水层	哈萨克斯坦, 中国	1	22381
20	额尔齐斯河平原含水层	哈萨克斯坦, 中国	1, 3	30233
21	布尔干河盆地含水层	蒙古, 中国	2	8060
22	西阿尔泰含水层	哈萨克斯坦, 俄罗斯	1	85699
23	乌布苏湖盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	1, 2, 3	10500
24	丹寒柯金塞尔含水层	蒙古, 中国	2	12679
25	阿彻海尔哈那塞尔含水层	蒙古, 中国	1, 2	12896
26	扎尔特盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	2	5599
27	门彻河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	2	5100
28	乌勒兹河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	1	6243
29	额尔古纳河含水层	中国, 俄罗斯	1	4913
30	克鲁伦河盆地含水层	中国, 蒙古	1, 2	7229
31	哈拉哈河盆地含水层	中国, 蒙古	1	3588
32	泽亚河盆地含水层	中国, 俄罗斯	1	76689
33	黑龙江—阿穆尔河中游盆地含水层	中国, 俄罗斯	1	113574
34	鸭绿江盆地含水层	中国, 朝鲜	2	20534
35	朝鲜半岛中部含水层	朝鲜, 韩国	1, 2	12731
36	纽穆哈格河盆地含水层	中国, 蒙古	2	6185
37	扎门乌德盆地含水层	中国, 蒙古	2	11687
38	德勒格尔大河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	2	22813
39	希希黑德河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	2	19745
40	贝尔基河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	2	9094
41	南缅甸含水层	缅甸, 泰国	1, 2, 3	33715
42	湄公河上游含水层	缅甸, 泰国, 老挝	1, 2, 3	31841
43	喀布尔河含水层	巴基斯坦, 阿富汗	1, 2	6219
44	洽特库—库曼含水层	哈萨克斯坦, 乌兹别克斯坦	1	20000
45	哈润和阿拉伯含水层	约旦, 沙特阿拉伯, 叙利亚	2	48000
46	特丝河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	1	7900
47	特修河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	2	3974
48	鄂嫩河盆地含水层	蒙古, 俄罗斯	2	4465
49	阿拉扎尼河含水层	阿塞拜疆, 格鲁吉亚	1, 3	3050

注: 1 代表孔隙水; 2 代表裂隙水; 3 代表岩溶水。下同。

Notes: 1, porous aquifer; 2, fissured/fractured aquifer; 3, karst aquifer. The same as below.

表 2 亚洲局部跨界含水层
 Table 2 Local TBAS in Asia

序号	跨界含水层的名称	跨界含水层国家	含水层类型	面积/km ²
1	艾格斯特福—艾布耶克含水层	阿塞拜疆,亚美尼亚	2	500
2	帕姆贝克—待贝特含水层	格鲁吉亚,亚美尼亚	2	<3000
3	阿拉斯河中下游含水层-1	阿塞拜疆,伊朗	2	<3000
4	凯瑞套格含水层	乌兹别克斯坦,塔吉克斯坦	1	328
5	托什干河盆地含水层	中国,吉尔吉斯斯坦	1,2	<3000
6	黑尔特河盆地含水层	蒙古,俄罗斯	1,2	1168
7	帝士杰克吉安塞尔含水层	中国,蒙古	1,2	2838
8	查干克吉安塞尔含水层	中国,蒙古	2	2319
9	图们江三角洲含水层	中国,俄罗斯,朝鲜	2	2329
10	在若什跨界含水层	乌兹别克斯坦,塔吉克斯坦	1	88
11	扎佛依含水层	乌兹别克斯坦,塔吉克斯坦	2	<3000
12	达尔佛依含水层	乌兹别克斯坦,塔吉克斯坦	1,2	<3000
13	色莱普塔—巴特肯—乃—艾克佛含水层	塔吉克斯坦,吉尔吉斯斯坦	1,2	891
14	撒克含水层	乌兹别克斯坦,吉尔吉斯斯坦	1	<3000
15	奥什艾若未吉含水层	乌兹别克斯坦,吉尔吉斯斯坦	1	<3000
16	莫伊修弗含水层	乌兹别克斯坦,吉尔吉斯斯坦	1	1760
17	奥姆—沃依含水层	乌兹别克斯坦,吉尔吉斯斯坦	1,2	<3000
18	阿拉斯河中下游含水层-2	阿塞拜疆,伊朗	2	<3000

较广泛分布,是该区地下水水质的显著特征。该区地下水中还含有溶解氧,二氧化碳和硝酸盐类物质。按照中国国家标准对本地区地下水进行水质综合评价,Ⅲ级和Ⅳ级主要分布在西部地区,即松花江流域;Ⅰ级和Ⅱ级主要分布在东部和南部,即国界附近。盆地的俄罗斯部分第四系孔隙含水层地下水为矿化度 0.2—0.3g/L 的淡水,超过 100m 埋深的地下水矿化度略有增加。水化学类型从盆地边缘的重碳酸钠型,过渡到重碳酸镁钠型,到中部的重碳酸钙铁型。地下水中铁来源于周边山区,聚集在盆地中部,铁离子质量浓度达到 20—30mg/L,局部甚至高达 80mg/L。地下水中除 Fe 质量浓度高外,Mn、Si、Ba、Li 的质量浓度也较高。本区地形平坦,地下水径流迟缓,交替相对较弱,有利于地下水的溶滤和元素的富集,造成 Fe、Mn 离子质量浓度较高。

黑龙江—阿穆尔河中游盆地的地下水是中国和俄罗斯当地生活用水和农业灌溉的主要水源。含水层分布广,地下水不易受到污染。中国佳木斯市和俄罗斯哈巴罗夫斯克市分别依靠松花江和黑龙江—阿穆尔河傍河地下水源地作为城市供水水源。整个盆地地下水的补给量与包括开采量在内的排泄量总体上保持平衡,地下水径流基本保持天然状态。部分地区因开采浅层地下水,导致局部地区水位下降。盆地分布着大面积湿地,主要分布在靠近乌苏里江和黑龙江的低平地区。中国部分 50 年前湿地面积约 34000km²,目前减少至 4500km²。湿地是与地下水密切相关生态环境的重要部分。中国正采取退耕还湿等措施,保护和恢复本地区的湿地。

中国一直致力于松花江、黑龙江流域的水资源保护,制定

了相应的污染防治规划。2005—2006 年,通过对松花江沿岸含水层地下水进行定期取样检测,结果表明,地下水中未检出苯类污染物,黑龙江—阿穆尔河中游盆地含水层未受到松花江水污染事件的污染。2006 年 10 月第 34 国际水文地质地质大会期间,中国黑龙江省和俄罗斯远东地区的水文地质工作者首次就黑龙江—阿穆尔河中游盆地的水文地质条件和地下水开发利用问题进行了研讨,并表达了进一步合作研究的意向^[26]。

4 澜沧江—湄公河流域跨界含水层

澜沧江—湄公河是东南亚重要国际河流,发源于中国青海省杂多县境内唐古拉山北麓查加日玛的西侧,流至西藏自治区昌都县附近与昂曲汇合后称澜沧江,向东南流入云南西部至西双版纳傣族自治州南部,流出国境称湄公河,经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨,在越南南部胡志明市(西贡)南面注入中国南海^[27-28]。

流域内孔隙含水层分布在山间盆地、河谷区及滨海平原,赋存于第四系、新近系松散岩类孔隙中。第四系冲积物厚度为 40—350m,含水层岩性颗粒较粗,透水性强,径流通畅。碳酸岩类岩溶含水层分布在横断山脉以及他念他翁山脉一带,赋存于上古生代和中生代碳酸岩类中。该区岩溶发育,地表溶蚀洼地,漏斗,落水洞、溶裂为地下水补给提供良好通道,广泛发育地下河系。裂隙含水层水赋存运移于变质岩和岩浆岩裂隙中,砂砾岩、砂岩构成储水盆地,而硅质、泥质砂岩,粉砂岩,页岩和浅变质的千枚岩,板岩地区水量贫乏。湄公河三角洲、

万象平原、沙湾那吉平原、巴色平原以及柬埔寨境内湄公河左岸向东部山地过渡平原,为流域内重要的孔隙地下水供水区。裂隙水分布于老挝中部及南部、呵叻高原等地区,分布面积大。岩溶水位于他念他翁一带,呈条带状分布,分布面积小。湄公河上三角洲地区(位于柬埔寨境内)地下水可开采资源量约为 $17.3 \times 10^9 \text{m}^3/\text{a}$,占柬埔寨整个国家的 50%以上。湄公河下三角洲地区地下水开采资源量为 $25.1 \times 10^9 \text{m}^3/\text{a}$,占据越南地下水资源的 42%。

以地下水系统分析为基础,划出澜沧江—湄公河流域主要跨界含水层(图 1)。其中 4 个跨界含水层水文地质特征如下。

(1) 澜沧江下游含水层为中国与缅甸跨界含水层。含水层面积为 39508km^2 ,在中国的部分面积为 31167km^2 ,占该含水层面积的 78%。该地区年降雨量为 1000—1500mm,补给条件较好,天然补给模数为 $15 \times 10^4 - 20 \times 10^4 \text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。地下水天然补给资源量约为 $35.68 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$,地下水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 和 HCO_3-Ca 型微硬水为主,矿化度为 0.15—0.4g/L。该区含水层主要岩性为三叠系的酸性侵入花岗岩、侏罗系的页岩夹泥质灰岩和白垩系的砂岩夹泥岩、砾岩泥岩夹粉砂岩、细砂岩。构造裂隙发育及酸性侵入岩与围岩接触位置地下水富集可成为集中供水水源。

(2) 湄公河中游含水层为泰国、老挝和越南三国跨界含水层。含水层面积为 106816km^2 ,在老挝的面积为 77956km^2 ,占总面积的 73%;泰国的面积为 2243.3km^2 ,占 21%;越南部分占 6%。该地区人口数量大于 300 万,年降雨量在 900—1600mm。该含水层主水质比较好。但泰国境内的浅层地下水水质含盐量较高,深层有供水意义的淡水含水层;老挝境内地区东部铁含量较高。含水层为侏罗陆相碎屑沉积岩、白垩系中上统砂砾岩和全新世冲洪积层。全新世冲洪积物集中分

布在湄公河两侧阶地,沉积物堆积厚度为 100—500m,地表水和降雨量丰富,补给量充沛,地下水富水程度好。

(3) 呵叻高原含水层为泰国与老挝跨界含水层。含水层总面积为 95510km^2 ,泰国部分为 90837km^2 ,占据绝大部分。该区年平均降雨量为 1300mm 左右,浅层地下水水质为咸水、微咸水,水化学类型以硫酸型、氯化物型为主。主要河流为蒙河与栖河,河两岸天然补给模数高达 $50 \times 10^4 \text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。其他部分的天然补给模数在 $5 \times 10^4 - 20 \times 10^4 \text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,地下水资源估算值为 $82.97 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。含水层岩性主要为白垩系石灰岩、流纹岩、燧石岩以及全新世河湖松散沉积物。河湖相松散沉积物沿着湄公河支流——栖河与蒙河两岸分布,为砾石、黏土、卵砾石堆积物等。呵叻高原表层有一层较厚的土层,不易渗水,雨季洪水泛滥,旱季龟裂。

(4) 湄公河三角洲含水层为柬埔寨与越南跨界含水层,范围从柬埔寨境内的扁担山脉延伸至下湄公河三角洲,为典型的三角洲冲洪积盆地,属松散沉积物孔隙水含水层。含水层总面积为 223422km^2 ,柬埔寨占据的面积为 141338km^2 ,为总面积的 63.3%。年降雨量在 1500—2400mm。湄公河在柬埔寨境内河长约 1000km,下游有洞里萨湖水系汇入。地下水环境从淡水过渡到咸水,柬埔寨境内地下水水质良好,下三角洲地区地下水矿化度普遍大于 3g/L。水文地球化学作用由溶滤、混合作用过渡到浓缩盐化作用。靠近沿海地区受到海进海退的影响,盐分不断增加。三角洲地区地下水中砷的浓度也很高。含水层主要为堆积巨厚的松散沉积物孔隙水含水层,下三角洲为地下水排泄区,构成了极好的含水介质,补给来源丰富,为三角洲地区地下水提供了良好的存储空间。

澜沧江—湄公河主要跨界含水层特征见表 3^[29]。

表 3 澜沧江—湄公河跨界含水层特征

Table 3 Characters of TBA in Lancang-Mekong River Basin

编号	含水层名称	跨界含水层国家	分布面积/ km^2	含水层类型	地下水补给量 / ($10^8 \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)
A1	澜沧江下游含水层	中国, 缅甸	39508	块状岩单一结构裂隙含水层	35.68
A2	湄公河中游含水层	泰国, 老挝, 越南	106976	双层结构孔隙—裂隙含水层	126.97
A3	呵叻高原含水层	泰国, 老挝	95510	多层结构裂隙含水层	82.92
A4	湄公河三角洲含水层	柬埔寨, 越南	223422	松散沉积物多层结构孔隙含水层	278.70

5 跨界含水层评估指标体系

针对跨界含水层出现的复杂问题,迫切需要建立一套跨界含水层综合评估指标体系。目前学术界尚没有统一认可的跨界含水层评价指标以及评价标准。联合国教科文组织地下水专家组按照跨界含水层的内涵和要求,提出基于 DPSIR(驱动力、压力、状态、影响、响应)框架模型来建立一套综合评估指标^[30]。DPSIR 框架模型是由欧洲环境组织(EEA)为综合分析和描述环境问题及其和社会发展的关系而发展出来的模

型。DPSIR 模型强调社会经济运作及其对资源、环境的影响之间的联系,具有综合性、系统性、整体性、灵活性等特点。借用 DPSIR 体系中的驱动力、压力、状态、影响和响应来分析跨界含水层地下水资源、环境、社会经济、法律等方面的复杂问题。其思路是对跨界含水层的水资源特征、社会经济特征和国际合作程度分别进行评估。将该体系划分为 3 个层次:第 1 级为目标层,也称为总体评估指标(GBI),对跨界含水层的 3 类目标分别进行评估——跨界含水层本质功能指标、跨界含

水层社会经济管理指标、跨界含水层法律规则指标;第2级为次级指标(I_i),是对第1级每个指标的分类评估;第3级为因素指标(x),是二级指标的相应细分。

跨界含水层综合评价指标涉及的各方面因素不是孤立的,而是存在着广泛的多层次的相互联系、相互制约和相互作用,同时这些因素按一定的结构进行组合,形成一系列的功能指标——本质功能指标、经济管理指标、法律效应指标。每个功能指标还包括更小的次级指标层,次级指标层还包括更小的因素指标层,这样就形成了递阶层次结构。

跨界含水层综合评价指标确定后,就需要明确各项指标的评价标准,才能对跨界含水层进行综合评价。根据跨界含水层的特点和要求,建立各指标的评价标准。对3个功能指标的赋值在1—3,每个次级指标的因素(x)可用数值1、2、3来表示低、中、高。数值越大表明该因素对含水层的水资源可持续利用越有益。根据总体评估指标的评估结果,将其数值划分为4个等级:1—1.5、1.5—2、2—2.5、2.5—3。本质功能指标的4个等级称为低、较低、较高、高;社会经济管理指标的4个等级称为最敏感、较敏感、敏感、不敏感;法律效应指标的4个等级称为不和谐、较和谐、和谐、最和谐。根据跨界含水层评估指标体系的结构特点,因素指标(x)与次级指标(I_i)之间的关系为

$$I = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i) / n \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, I 为对应于该因素的次级影响指标评价价值; x_i 为第*i*个因素值。

对次级指标(I_i)与总体评估指标之间关系用加权平均法进行综合评价。

$$GBI = \sum_{j=1}^m \omega_j I_j \quad j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

其中, GBI 为被评价对象指标的综合评估值; ω_j 为与评价指标 I_j 相对应的权重系数 ($0 < \omega_j < 1$); I_j 为对应的评价影响因子指标。

式(2)的关键在于确定评价指标的权重系数。评价指标的权重是指被评价对象对上级指标影响程度的大小。采用客观赋值法中的熵值法来确定权重。

运用该评估指标体系对澜沧江—湄公河流域的跨界含水层资源、环境、社会经济、法律等方面的复杂问题进行分解、概化,然后进行综合评价。通过相关文件、图件、文献等获取4个跨界含水层的因素(x)的信息,根据这些信息对含水层的影响程度赋予指标因素的定量化数值(1、2、3),并在此基础上运用指标评价体系模型对澜沧江—湄公河流域跨界含水层的各个功能指标进行评价。各项综合评估指标分别见表4—表6。

根据总体评估结果,澜沧江下游含水层是较高、敏感、和谐含水层;湄公河中游跨界含水层是高、较敏感、较和谐含水层;呵叻高原跨界含水层是较低、较敏感、较和谐含水层;湄公河三角洲跨界含水层是较高、敏感、较和谐含水层。澜沧江

表4 本质功能指标

Table 4 Functional indicators for transboundary aquifers intrinsic values

次级指标	因素	A1	A2	A3	A4
地下水本质特征	地下水年平均补给速率	3	3	2	3
	含水层存储能力	1	2	2	3
	地下水天然水质	2	3	1	1
	含水层敏感性	2	2	2	1
	$I_{IV} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / 4$	2	2.5	1.75	2
人类与环境对地下水依赖程度	生活饮用水依赖地下水程度	3	2	1	3
	农业和其他用水依赖地下水程度	2	2	1	2
	生态用水依赖地下水程度	2	2	2	2
	$I_{HE} = (x_1 + x_2 + x_3) / 3$	2.33	2	1.33	2.33
地下水脆弱性	地下水污染	1	3	2	1
	地下水消耗	2	3	1	3
	气候变化对含水层的影响	2	3	2	3
	$I_{VS} = (x_1 + x_2 + x_3) / 3$	1.67	3	1.67	2.33
	$GBI = \sum_{j=1}^3 \omega_j I_j \quad \sum_{j=1}^3 \omega_j = 1$	2.23	2.82	1.71	2.28

表5 社会经济管理指标

Table 5 Indicators for socio-economic management

次级指标	因素	A1	A2	A3	A4
社会经济驱动力	可持续的社会经济发展 GDP	1	1	1	3
	经济变化、结构调整	2	1	1	2
	可持续的国家体系	3	1	2	2
	国家或地区的安全	2	2	2	3
	农业发展、粮食安全	3	3	3	3
	$I_{SD} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) / 5$	2.2	1.6	1.8	2.6
经济手段	水价变动	1	1	1	2
	经济刺激	2	1	1	1
	$I_{E} = (x_1 + x_2) / 2$	1.5	1	1	1.5
经济管理	参与国际水资源市场管理程度	1	2	2	2
	水资源经济管理体系	2	2	1	3
	主产业的扩展程度	3	1	2	2
	副产业的发展程度	3	2	3	3
	$I_{EC} = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) / 4$	2.25	1.75	2	2.25
	$GBI = \sum_{j=1}^3 \omega_j I_j \quad \sum_{j=1}^3 \omega_j = 1$	2.19	1.65	1.9	2.41

下游含水层3个功能指标都处于第3等级,可见该含水层在水资源利用各个方面比较好;湄公河中游跨界含水层本质功能好,但在社会经济管理、法律效应方面有不足的地方,因此应加强社会经济的可持续性以及国际的合作;呵叻高原跨界含水层3个功能指标都处于第2等级,这就提醒跨界含水层国家注意提高供水能力,控制减少污染,做好经济机构规划,

表 6 法律和规则指标
Table 6 Indicators for legal and regulation

次级指标	因素	A1	A2	A3	A4
国际 合作	跨界含水层国家达成的协议	2	2	1	2
	其他有关水体达成的协议	3	2	2	3
	国际上认可的有关国际河流的合约关系	2	1	2	2
	参与跨界含水层的项目	1	1	1	1
	$I_C=(x_1+x_2+x_3+x_4)/4$	2	1	1.5	2
法律 体系	水法	2	2	2	1
	地下水规章	3	2	2	1
	水源地规则	3	1	1	1
	涉及地下水合作的组织	2	2	2	2
	$I_1=(x_1+x_2+x_3+x_4)/4$	2.5	1.75	1.75	1.25
$GBI=\sum_{j=1}^2 \omega_j I_j \quad \sum_{j=1}^2 \omega_j=1$		2.21	1.68	1.65	1.85

加强国际合作以及完善法律体系;湄公河三角洲跨界含水层在本质功能指标和社会经济管理指标方面较好,但是在法律效应方面有待加强。从 4 个跨界含水层评价来看,有 3 个跨界含水层的法律效应指标偏低,因此建立国家之间的合作机制以及含水层法律管理制度是管理跨界含水层的迫切需求。

6 结论

跨界含水层问题的研究包括水文地质、法律、社会经济、制度和环境等方面。国际上对跨界含水层从水文地质和法律等方面进行了 20 多年的研究,取得了一些成果。本文完成了亚洲跨界含水层的初步标定和详细标定,编制了亚洲跨界含水层图。对涉及中国的两个实例——黑龙江—阿穆尔河中游盆地和澜沧江—湄公河流域,进行了典型跨界含水层实例研究。参照 UNESCO 专家组提出的方案,完善了跨界含水层指标体系,并首次实际应用于跨界含水层的评估。

参考文献 (References)

[1] UNESCO. World water development report: Water for people, water for life[R]. Barcelona: UNESCO and Berghahn Book, 2003.

[2] Zektser I S, Everett L G. Groundwater resources of the world and their use, UNESCO IHP -VI, series on groundwater No. 6[R]. Barcelona: UNESCO, 2004.

[3] Puri S, Aureli A. Transboundary aquifers: A global programme to assess, evaluate & develop policy ground water[J]. *Ground Water*, 2005, 43(5): 661-668.

[4] Stephan R M. Transboundary aquifers: Managing a vital resources[R]. Barcelona: UNESCO, 2009.

[5] IGRAC. Transboundary aquifers of the world [R]. Amsterdam: IGRAC, 2009.

[6] United Nations. Water: A shared responsibility, the United Nations world water development report 2 [EB/OL]. [2006-03-15]. <http://www.unesco.org/publishing>.

[7] 联合国大会大会决议. 跨界含水层法, 第六十三届会议根据第六委员会的报告 (A/63/439)通过, 63/124[R]. 纽约: 联合国, 2009.

General Assembly of the United Nations. The law of transboundary aquifers, on the report of the Sixth Committee (A/63/439), 63/124[R]. New York: United Nations, 2009.

[8] 联合国大会大会决议. 跨界含水层法, 第六十六届会议根据第六委员会的报告, (A/66/477)通过, 66/104[R]. 纽约: 联合国, 2012.

General Assembly of the United Nations. The law of transboundary aquifers, on the report of the Sixth Committee (A/66/477), 66/104[R]. New York: United Nations, 2012.

[9] PURI S. Internationally shared (transboundary) aquifer resources management—a framework document[M]. Paris: UNESCO, 2001: 9-36.

[10] 王秀梅, 王瀚. 跨界含水层法编纂与发展述评——兼论跨界含水层的保护与利用[J]. *资源科学*, 2009, 31(10): 1685-1695.

Wang Xiumei, Wang Han. *Resources Science*, 2009, 31(10): 1685-1695.

[11] Han Z, He J. Transboundary aquifers in Great Mekong River Basin[C]// Challenges and New directions: Proceedings of ISARM2010 International Conference Transboundary Aquifers. Paris: UNESCO-IHP, 2010: 55-58.

[12] Struckmeier W, Richts A, Acworth L, et al. WHYMAP groundwater resources of the world, transboundary system, 1:50M [M]. Bielefeld: Graphischer Betrieb Giesecking GmbH & Co. KG, 2008.

[13] Han Z, Wang H. Research on transboundary aquifers, earth science frontiers[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 32-39.

[14] 韩再生, 王皓. 跨边界含水层问题研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(5): 81-84.

Han Zaisheng, Wang Hao. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(1): 81-84.

[15] Han Z, Jayakumar R, Arduino G, et al. Transboundary aquifers in Asia—A preliminary inventory and assessment [R]. Beijing, Jakarta: UNESCO Office, 2010.

[16] 程彦培, 张发旺, 黄志兴, 等. 亚洲地下水资源与环境地质系列图的编制[J]. *测绘通报*, 2010(9): 38-41.

Cheng Yanpei, Zhang Fawang, Huang Zhixing, et al. *Mapping Bulletin*, 2010(9): 38-41.

[17] 亚洲地质图编图组. 亚洲地质图[M]. 北京: 地质出版社, 1982.

Team of Geological Map of Asian. Geological map of Asia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.

[18] 张宗祜. 亚洲水文地质图[M]. 北京: 地质出版社, 1997.

Zhang Zonghu. Hydrogeological map of Asia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.

[19] 中国地质科学院地质研究所. 亚洲大地构造图[M]. 北京: 中国地图出版社, 1982.

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. Geological constructor map of Asia[M]. Beijing: SinoMaps Press, 1982.

[20] 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. 中国水文地质图 [M]. 北京: 中国地图出版社, 1988.

The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. Hydrogeological map of China [M]. Beijing: SinoMaps Press, 1988.

[21] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源[M]. 北京: 中国地图出版社, 2005.

Zhang Zonghu, Li Lierong. Water resources of China [M]. Beijing: SinoMaps Press, 2005.

[22] 汪民. 21 世纪水资源研究[M]. 北京: 地质出版社, 2001.

- Wang Min. Research on 21 century water resources [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [23] 唐蕴, 唐克旺, 康伟, 等. 跨界含水层研究现状与展望[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 15-19.
- Tang Yun, Tang Kewang, Kang Wei, et al. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2010, 37(5): 15-19.
- [24] Economic Commission for Europe. Our waters: Joining hands across borders—first assessment of transboundary rivers, lakes and groundwater [R]. New York, Geneva: Unite Nations, 2007.
- [25] 王皓. 基于世界地下水资源图亚洲部分的跨界含水层研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- Wang Hao. Research on transboundary aquifers based on Asia part of world groundwater resource map [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [26] Han Z, Jayakumar R, Wang H, et al. Review on transboundary aquifers in the People's Republic of China with case study of Heilongjiang—Amur river basin[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(7): 1411-1422.
- [27] 陈茜, 孔晓莎. 澜沧江—湄公河流域基本资料汇编[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2000.
- Chen Qian, Kong Xiaosha. Basic data of Lancang-Mekong river basin [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2000.
- [28] 何大明. 澜沧江—湄公河水文特征分析[J]. 云南地理环境研究, 1995, 7(1): 58-74.
- He Daming. *Yunnan Geographic Environment Research*, 1995, 7(1): 58-74.
- [29] 何静. 澜沧江—湄公河流域跨界含水层研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- He Jing. Research on transboundary aquifers in Lancang-Mekong river basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [30] Jaroslav Vrba and Working Group. Indicators approach paper for possible application of the resource allocation framework to transboundary aquifers [R]. Delft, Netherlands: UNESCO-IHP Transboundary Aquifers Expert Group Meeting, 2009.

(责任编辑 安莹, 吴晓丽)

· 学术动态 ·



“第二届热电厂锅炉专业暨锅炉燃烧与防腐节能技术交流研讨会”征文

“第二届热电厂锅炉专业暨锅炉燃烧与防腐节能技术交流研讨会”计划于 2012 年 4 月 1 日在北京市召开。会议由中国电机工程学会热电专业委员会主办。

征文范围: (一) 锅炉稳定运行与燃烧技术。(1) 成熟的各容量锅炉燃烧调整技术; (2) 锅炉低负荷稳燃低负荷稳燃影响因素及对策; (3) 低挥发份燃煤燃烧技术; (4) CFB 锅炉的燃烧经验与分析; (5) 贫煤锅炉烟煤启动技术研究及应用; (6) 燃煤的最佳掺烧的原则、方式、调整方法; (7) 锅炉快冷在大机组的应用; (8) 锅炉燃烧风粉在线监测与燃烧运行优化经验; (9) 燃烧优质煤与劣质煤对发电综合经济性影响分析; (10) 燃用非设计煤种时降低飞灰可燃物的措施; (11) 根据煤种特点优化运行方式及掺烧安全性、经济性分析。(二) 锅炉辅机设备优化及改造、节能技术。(1) 锅炉节能技改及优化运行经验; (2) 锅炉辅机设备优化运行及改造技术; (3) 锅炉排渣机及除渣技术状况; (4) 降低制粉单耗的成熟技术经验; (5) 机组启停过程采用汽动给水泵上水经济性分析; (6) 锅炉风机节能技术分析; (7) 各种型式磨煤机优化运行对比与探讨; (8) 引风机常见故障原因及节能改造; (9) 锅炉成熟的冷态启动节油技术比较; (10) P91/T91、P92 钢管国产化研究进展。(三) 锅炉事故预防及处理技术。(1) 炉膛结焦、积渣的防止及结焦原因分析; (2) “四管泄漏”的预防措施及处理经验; (3) 防止辅机故障, 提高利用水平的技术与经验; (4) 电厂停炉不停机可行性分析; (5) 锅炉飞灰可燃物含量影响因素分析及解决措施; (6) “W”型火焰锅炉频繁熄火的原因分析及预防措施; (7) 对锅炉熄火不跳机处理的探讨; (8) 北方高寒地区高水分褐煤锅炉出现的问题及采取的措施; (9) 锅炉排烟温度高影响因素及处理措施。(四) 环保及防腐技术。(1) 成熟的脱硫技术与运行经验分析; (2) 锅炉 NO_x 改造及调整技术与经验; (3) 锅炉 NO_x 改造对烟气温差的影响分析; (4) 锅炉产生高温硫腐蚀机理及预防措施; (5) 燃煤品质对除尘器的影响; (6) 锅炉及烟道防腐成功改造技术与经验。(五) 新设备、新方法的应用。

全文截止日期: 2012 年 3 月 30 日。

联系电话: 010-63416388; 13911161523。

电子信箱: csee2011@163.com。

会议网站: <http://www.cectech.org.cn/>。