

影响我国内陆核电发展的关键性问题分析

黄欢,丁文杰¹,郭海兵²

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所,四川绵阳621900)

[摘要] 核电作为一种安全、清洁和高效的能源,对我国经济建设与环境保护有着积极的作用。在我国电力结构向低碳化转型的过程中,核电的装机容量将持续增加,沿海核电厂址将无法满足不同核电的装机需求,有必要启动并发展内陆核电。通过借鉴国外内陆核电建设经验,并结合我国的实际情况,文章分析了我国发展内陆核电面临的选址、流出物排放、用水、安全和公众关注等关键问题,给出了建议,对我国内陆核电的稳步推进具有参考意义。

[关键词] 内陆核电; 发展前景; 关键性问题

[中图分类号] TM623 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2019)03-0009-07

核电具有安全、低碳、清洁、经济、稳定、能量密度高的特点,发展核电对于优化能源结构,保护生态环境,推动地区经济发展起着重要的作用。福岛核事故给全球核电复苏态势产生巨大影响,同时也延缓了我国内陆核电的发展步伐^[1]。“十二五”期间,国务院宣布只在沿海安排少数经过充分论证的核电项目厂址,未安排内陆核电项目^[2]。进入“十三五”,核电重启,而内陆核电的建设问题也引起了广泛关注^[3-5]。目前我国已有30多年的滨海核电发展经验,但尚缺乏内陆核电的建设、运维与审管经验。通过借鉴国外发展滨湖、滨河的核电的经验,结合我国国情,开展内陆核电的可行性和关键问题研究,对我国内陆核电的建设与管理具有参考价值。

一 我国内陆核电的发展前景

随着我国在新时代经济社会的转型升级,电能 在能源消费中的比重不断提高^[6]。大量的分析研究表明:在我国未来的电力结构转型中,陆上风电、光伏发电将是发展速度最快的可再生能源,其发展呈现“风光领跑、多源协调”态势。另一方面,我国当前经济呈现东南沿海发达、西部及北部相对落后的局面,而电力资源(尤其是风电、光电)则呈现出西部及北部丰富、东南地区、中部地区匮乏的状态,电源与需求间存在着显著的不平衡关系,大规模发展风电、光电的同时也必将面临着并网消纳与跨区

输电的巨大压力^[7-10]。相比较于风电、光电及水电,核电不仅是一种清洁、高效、优质的现代能源,同时其发电厂址的选择更为灵活。将未来核电发展布局集中在中部地区以及东南部地区,既可以为经济发达地区的电力需求做贡献,亦可以缓解风电、光电跨区输电的巨大压力。目前,许多研究机构均对我国中长期核电发展情景进行了预测,其预测结果如表1所示。然而根据中国能源研究会统计^[11],我国当前可支撑的装机规模约3.6亿千瓦,其中内陆约为1.6亿千瓦,沿海约为2亿千瓦。根据表1核电装机容量预测数据^[12-15],在我国核电发展过程中,单靠沿海核电的装机容量将无法满足不同地区电力需求,发展内陆核电对满足未来电力供给需求有着重要意义。

二 国外内陆核电发展

国际原子能机构(International Atomic Energy Agency,以下简称IAEA)将世界核电站厂址划分为滨海、滨河、滨湖三大类,而我国习惯将核电厂厂址分为滨海核电厂、内陆核电厂^[16]。根据中国核能行业协会课题组2006年对世界核电站调查显示,美国、法国、加拿大、德国、俄罗斯、西班牙等国的内陆核电厂占比都在50%以上,而乌克兰、瑞士、斯洛伐克、捷克等国的内陆核电厂占比达到了100%^[17]。

(一)美国内陆核电发展现状

美国是目前世界上核电装机容量最多的国家。

[收稿日期] 2018-12-10

[基金项目] 国家自然科学基金(L172400024),中国工程院咨询项目

[作者简介] 黄欢(1992-),男,四川成都人,中国工程物理研究院研究实习生。

¹ 中国工程物理研究院助理研究员。

² 中国工程物理研究院副研究员,博士。

截至 2017 年,美国共有 99 个商用核反应堆(65 座压水堆和 3 座沸水反应堆),总容量为 804.9 TW,占美国总发电量的 20% 以上,大多数核设施位于美国中部至东部,如图 1 所示^[18]。

表 1 核电装机容量预测值

机构	核电装机容量预测值(亿 kW)						
	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年
国核科学技术研究院 ^[12]	0.4	0.58	1.04	1.90	2.30	2.65	3.0
中国工程院 ^[13-14]	0.7	—	2.0	—	—	—	4.0
国际能源署与经合组织核能署 ^[15]	—	—	—	—	—	—	2.5

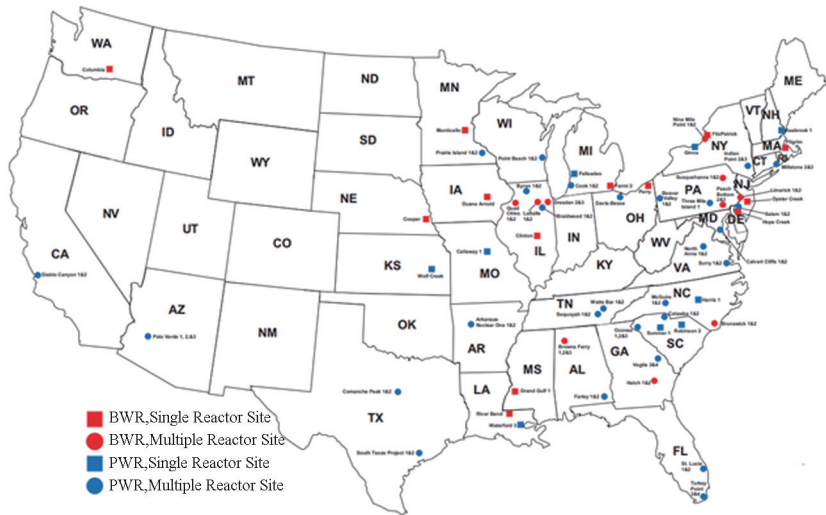


图 1 美国核电站分布情况

美国在对核电厂进行选址时,首先考虑的是社会经济因素,如电力需求、电力布局等,地理位置不是其选址的关键因素。由于美国东部工业密集,用电需求远高于西部地区,因此东部地区的核电站数量远高于西部地区。由于东北内陆地区的河流、湖泊较多,均可满足内陆核电建设要求,因此建有许多滨河、滨湖核电站。表 2 给出了美国滨海核电站与内陆核电站对比情况,可以看出,内陆核电站的厂址数、机组数以及装机容量均高于滨海核电站,大约是其的 3 倍,占总数量的 70% 以上^[19]。

为了保证核电站有足够的热阱对反应堆冷却,根据每个核电站的冷却水源的具体情况,采用直流

冷却方式和冷却塔冷却方式相结合,为保证核电厂热源顺利排出,配以一机一塔或者一机多塔^[20]。美国核电站 30 多年的运行经验充分表明,内陆核电站与滨海核电站并无本质区别,建设内陆核电站完全可行,不存在技术上的问题,安全性也能有效保证。

(二)法国内陆核电发展情况

法国是世界第 2 大核电生产国。2017 年,法国电力供应系统的核能达到 63.13 TW。它包括 58 座压水堆(900 兆瓦的 34 座反应堆、1300 兆瓦的 20 座反应堆和 1450 兆瓦的 4 座反应堆),其分布如图 2 所示^[18]。

表 2 2017 年美国内陆、沿海核电站对比情况

核电站			机组		装机容量	
分类	数量(座)	比例(%)	总数(台)	比例(%)	总数(万千瓦时)	比例(%)
内陆	49	77.3	72	72.7	71985	72
滨海	16	22.7	27	27.3	27967	30
总计	65	100	99	100	99952	100



图 2 法国核电站分布情况

法国核电厂选址时,首先要满足国家法律和法规中的核安全要求。选址时要考虑电力市场需求和电源布局,并且符合国家社会生活和经济建设方面的需求,同时充分考虑对环境的影响,得到社会公众的认同。此外,在选址时还需考虑场地、取水、大件运输等建设成本。

根据电力需求以及冷却水源的分布,法国核电

厂主要位于卢瓦尔河、罗纳河、加龙河、塞纳河、默兹河等流量较大的河流流经区域。法国现有运行核电厂 20 座,内陆核电站在数量、装机容量占比均超过 70%,如表 3 所示。法国经过几十台核电机组的建设和长期运行,发现核电对环境的影响微不足道,并且没有发现核电厂对陆地和水体环境存在影响^[19]。

表 3 2017 年法国内陆、沿海核电站对比情况

核电站			机组		装机容量	
分类	数量(座)	比例(%)	总数(台)	比例(%)	总数(万千瓦时)	比例(%)
内陆	15	75.0	40	72.7	4174.3	65.1
滨海	5	25.0	18	27.3	2240	34.9
总计	20	100	58	100	6414.3	100

(三)国内外内陆核电的发展经验

国内外电力建设表明,在内陆地区建设核电并不与水电、火电矛盾,相反可以互补。核电选址在国际上并无沿海与内陆之分,沿海与内陆地区核电厂选址原则是一致的,与其建设项目有相关的地震、水源、大气弥散等地质条件以及放射性废物排放规定无实质区别。国际核电实践表明,内陆核电厂对环境的影响非常小并且不影响河流流域的其他功能要求,安全上是可靠的,合理的设计配以完善的应急措施能够保证在事故情况下周边环境的安全。

三 我国内陆核电发展应关注的问题

核电各国及国际原子能机构(IAEA)对内陆核

电厂都采用与滨海核电厂同样的核安全法规和标准。但内陆核电厂具有其特殊性,与滨海核电厂相比,我国内陆核电厂需要关注以下若干问题:

(一)内陆核电的选址要求

根据《我国核电厂厂址选择安全规定》,核电厂选址必须满足厂址外部环境(自然和人为事件)对核电站厂安全可能产生的影响、核电厂对厂址周围环境可能产生的影响以及实施应急计划的可行性。虽然内陆核电站厂址的安全要求与沿海厂址一致,适用的法律和法规也完全相同,但是由于自然环境的差异,除了满足沿海核电厂址要求之外,在选址时还需特别注意以下几点:

1. 内陆地区特有的自然灾害

内陆核电厂址应更加关注内陆地区特有的自然灾害,如:地震、洪水、溃坝、泥石流、堰塞湖、极端降水等,同时应该注意由这些自然灾害带来降雨、上游溃坝、河道阻塞等影响用水安全的问题,保障厂址不会受到这些自然灾害的威胁。

2. 核电厂建设对环境的影响

内陆核电厂选址必须严格按照现行核安全法规,满足有关气态、液态流出物排放要求,还必须考虑水源及环境危机、国土安全以及社会稳定等因素。应将水资源管理及应急响应机制纳入核应急体系计划以保护水资源,同时应开展内陆核电厂对区域环境影响评价以及厂址选择与环境安全相关研究以保护生态环境^[21]。

3. 内陆核电厂选址对人口分布的影响

据《核电厂环境辐射防护规定》,核电厂应尽量建在人口密度较低,地区平均人口密度较小的地点。核电厂距离 10 万人口以上城镇的直线距离不应小于 10 km,距 100 万人口以上大城市的市区发展边界的直线距离,不应小于 40 km。与滨海厂址相比,内陆核电厂具有以下特征:

(1)内陆核电厂址的平均人口密度水平普遍高于沿海地区;

(2)气候及地理环境复杂,导致大气扩散条件相对较差,大气中的辐射剂量高;

(3)内陆地区人口分布和地理位置相对复杂,导致居民搬迁问题也变得相对复杂;

(4)运输条件受限,增加了人员的生活和材料的运输成本。

内陆核电厂由于周围水域面积较小,人口密度可能更高,对内陆厂址人口分布的特点要密切关注。同时大气弥散条件差,导致放射性气体难以稀释,对于相应的应急计划实施也需要特殊制定。

4. 内陆核电厂选址所需的运输条件

滨海地区的厂址靠近大海,可以在厂区附近建设满足运输需求的码头,大件运输条件便利,而内陆地区的厂址只能依靠铁路、公路、内河进行运输。内陆地区的地理环境复杂,能够满足大件运输的河流有限。在大件运输时,必须建设数十甚至数百千米的运输道路,遇到收费站等其他建筑还需拆除,还需对特殊路面进行改造。此外,在偏远地区建设核电站会大大加重运输成本^[22]。因此内陆核电厂址的选取必须充分考虑其运输条件,充分利用内陆河流

运输优势,同时还必须具备公路、铁路等运输条件。

(二)内陆核电厂放射性物排放问题

滨海地区厂址的地表和地下水环境较为简单,其受纳水体为海水,具有容量大,同时气候及地理环境较为简单,大气弥散条件更好,能够很好地承载放射性液体、气体。与滨海厂址相比,内陆核电厂址的环境对放射性流出物的吸纳有以下特点:

1. 环境对液态流放射流出物承载力低

与滨海厂址相比,内陆核电厂的地表水和地下水环境相对复杂,受纳水体为湖泊、河流,其储量相对较少,且受气候及季节的影响。内陆核电厂正常运行工况和事故工况,放射性会进入河流湖泊中,由于其扩散条件差,会逐渐地在环境中积累,形成显著的生态效应。河流湖泊的用水时常见的生活、灌溉用水,对公众影响比滨海地区更加敏感,需与滨海核电站作不同的评估。

2. 大气弥散条件差

与滨海厂址相比,内陆厂址的小风和静风频率高。滨海厂址的静风频率多在 10% 以下,而内陆预选厂址的静风频率大多在 20% ~ 40% 左右。因此,内陆核电厂址的大气扩散条件一般差于滨海厂址,导致大气中辐射剂量高。对于事故工况,在小风和静风期间,厂址周围短期内会出现高浓度的放射性气体,会被人体吸入。放射性气体通过降雨进入河流湖泊,污染生活水源。因此,需充分评价大气弥散条件对环境承载力的影响。

为了减少放射性流出物对环境的影响,世界各国都采用放射性废物处理最佳可行技术以及近零排放,确保核电厂排放到环境中的放射性废物浓度接近于零^[23]。我国内陆核电厂采用了先进的反应堆技术和最佳可行技术进行放射性废液处理,减少了放射性物质产生,降低了废物中的放射核素浓度,制定了严格的排放标准。我国内陆核电厂液态流出物排放标准比沿海要高出一个数量级,即排入河流经稀释后达到环境接受点的浓度(除 3H 外)为 0.74Bq/L,3H 浓度为 74Bq/L。

目前,核电厂放射性流出物的排放已经在很低的水平,对周围公众的影响低于天然辐射照射的百分之一。通过进一步通过增加贮存罐、优化排放管理、加强环境监测等一系列综合措施,尽可能低的减少排放量,使得排放浓度完全满足国家标准,排放口下游一公里能够达到饮用水水质要求。国内外核电厂运行实践也表明,通过严格的管控措施,内陆核电

厂的放射性流出物对周围环境的积累量很小,是完全可以接受的。

(三)内陆核电厂用水问题

滨海核电厂靠近大海,可使用大海作为最终热阱,热量通过海水直冷系统直接排入大海,必要时可使用海水进行直接冷却。我国只有少数的河流、湖泊具备同滨海核电厂相同的直接冷却条件。对于大多数内陆核电厂,只能采用同常规火电厂类似的循环供水,需建设大型的冷却塔以保证热量导出。内陆核电厂需要较大的水源,而且这些水源通常会涉及饮用、灌溉和其他生活用水,这会出现用水矛盾等相关问题。因此水源是内陆核电布局的关键性条件,也可能是其颠覆性因素。内陆核电厂用水必须考虑以下几点:

1. 正常条件下的用水需求

核电厂耗水来源主要有以下部分:常规岛循环水系统用水和耗水(约75%)、核岛厂用水系统用水和耗水(主要是排污设备)、工业水系统用水和耗水、除盐水系统用水和耗水、生活杂用和耗水、未预见用水和耗水(环境变化、维修等)、其他用水和耗水(泄漏)^[24]。为保障核电厂具有足够的水源,同时避免核电厂对水资源产生重大影响,必须从最严格的水资源角度出发,对用水进行可行性分析,保证核电厂运行期间具有充足可靠的用水量。

2. 考虑极端事件下的水供给

由于内陆河流存在枯水期,需要分析在河流枯水期对核电厂正常供水的影响。此外,由于内陆地区气候多变,在全球变暖以及干旱的背景下,内陆核电厂存在水资源减少、环境和水源温度升高等问题,会降低核电厂的热量排出能力,影响核电厂的经济性和可靠性,对供电产生影响。因此,在建造内陆核电厂时,需充分考虑水资源及气候环境变化带来的影响,合理地设计冷却方式,确保核电厂能够持续、可靠地运行。

3. 设置备用水资源

核电厂的水资源不仅需要提供正常运行期间的用水需求,还需要满足消防和其他用水。在事故条件下,还需要有足够的水资源保证堆芯冷却。由内陆核电厂的可用水资源比滨海核电厂低,在发生极限事故时,水资源的供给能力可能不足。因此,需要设置备用水源,如选择合适的水库,或者建设大型的蓄水池作为储备水源。

我国拟选的30个内陆核电厂址大部分选择在

水资源较为丰富的长江流域、珠江流域和松花江流域。其中26个为滨河厂址,大部分河流在枯水期的流量大于 $100\text{ m}^3/\text{s}$;4个为水库厂址,水库的库容均在 $10\times 10^8\text{ m}^3$ 以上^[25]。我国内陆核电厂大部分采用闭式循环冷却,补水量仅为冷却塔所用的蒸发量,通过合理的布局以及冷却方式,降低了核电厂的用水量和耗水量,完全可以满足核电厂正常运行期间的用水需求,消除与其他用户的用水矛盾。

(四)内陆核电厂的安全问题

我国现有的核电厂址均位于沿海地区,内陆核电厂址的建设和运行经验不足。由于内陆核电站和沿海核电站的差异,在应对事故条件方面也有所不同。在考虑环境与核电厂安全问题之间的相互影响时,应特别注意以下4个方面:

1. 事故条件下对水资源的影响

核电厂发生严重事故时,放射性液态流出物会进入下游水环境,导致水中放射性物质含量升高,危害生态环境。日本福岛核事故导致大量的放射性物质进入大海,对生态环境和人类生活造成了巨大影响。而内陆核电的受纳水体为地表水和地下水,且地表水和地下水的扩散条件较为复杂。放射性液态流一旦进入其中,很难被稀释且会产生长远影响。因此,需要制定事故条件下的水资源安全应急预案和处置程序,确保核电厂运行期间和事故工况的水资源安全。

2. 应对极端洪水的能力

内陆特有的洪水、溃坝、河流潮位等问题,不仅在选址过程中需要考虑,其对核电厂安全运行产生的影响同样需要考虑,包括:因洪水、溃坝、泥石流、堰塞湖等外部事件对核电厂安全运行带来的影响;由于气象条件及人类活动导致河流、水文、堤岸等条件变化对核电厂安全运行产生的影响。

3. 核废料处理问题

对于核废料处理,绝大部分核电厂采用大量的冷却水对核废料进行稀释,滨海电站有充足的海水对其进行稀释。而内陆核电站只能利用内陆湖泊或者江河淡水进行冷却稀释,这将导致这些淡水受到一定放射性污染。我国内陆核电厂大部分处于水资源较为丰富的河流及江湖附近,这些水资源跟群众的生活密切相关,因此必须处理好核废料的问题^[26]。

4. 人口分布对核应急的影响

我国人口密度总体偏高,无论在内陆还是滨海核电厂选址时都应该关注。核电厂址应该选择在远

离人口中心的低密度人口区。与滨海核电厂相比,内陆核电厂由于水域较小,人口密度可能更高,分布也更为复杂。同时,滨海厂址周围的大气弥散条件好,其非居住区半径可小至 500 m,然而,内陆核电厂址的大气扩散条件较差,某些厂址的非居住区半径可大至几千米^[27]。实施核应急计划实施可行性是核电厂选址的重要因素之一,实施应急计划必须考虑周围的人口分布。为保证核应急计划的顺利实施,必须充分考虑复杂的内陆核电厂址居民分布以及交通、通讯、气象条件等特殊条件。

(五)核电的公众意识问题

目前,我国公众的核科学常识较为匮乏,对核电知识的了解水平较低,但是关注度和兴趣都较高。我国的核电信息度不够透明,公众参与度低,媒体对核电发展积极的报道较少,但是对核事故的报道却广泛全面,导致公众对核电存在抵触心理,以至于公众对于核电站建设首先想到的不是优势而是隐患,严重阻碍核事业的发展,因此必须把公众接受作为核电建设关键要素。

当前的首要问题是解决核电的专家认识和公众认识的差异,需要通过积极的宣传让公众对核电有个正确全面的认识,消除各界人士对核电不必要的担忧。要提高公众对核电的接受度,不能只依靠媒体对核电的科普介绍,还要提高核电建设过程中的公众参与度。我国目前核电站在建规模位于世界第一,但是公众参与的量颇为不足。因此,要培育一支中坚的拥核力量,充分利用现代技术手段构建信息平台,推进核电建设及运行过程的公众参与,将核电建设过程及运行过程中的利益和风险告知公众,并且确保核电在网络宣传的正确导向,从而不断提高公众的接受度。

四 总 结

在我国电力结构向低碳化转型的过程中,为满足电力供给需求,有必要启动并发展内陆核电。通过借鉴国外核电发达国家的内陆核电建设相关经验,加强内陆核电特殊问题的研究,特别是针对放射性排放和水环境问题研究,同时加强对核电知识的宣传工作,对安全稳步推进我国内陆核电建设与发展有着重要意义。

[参考文献]

[1] 刘 达,黄本胜,邱 静,等.内陆核电水资源管理政策的初步探讨[J].水利发展研究,2012,12(5):39-41.

- [2] 张禄庆.实事求是 合理把握建设节奏[J].中国核工业,2012(11):32-35.
- [3] 郑砚国.关于“十三五”初启动内陆核电建设的建议[J].中国核工业,2016(3):32-32.
- [4] 王 璐.核电“十三五”规划思路渐明 31 个厂址完成可行性初审[J].能源研究与利用,2015(6):50-50.
- [5] 徐 豪.国务院发展研究中心研究员王亦楠——内陆核电是否上马尚需研究论证[J].中国经济周刊,2015(18):35-38.
- [6] 张 宁,邢 璐,鲁 刚.面向 2050 年的中国电力发展展望[J].中国能源,2018(3):5-10.
- [7] 赵勇强.2050 年我国高比例可再生能源情景的初步思考[J].中国能源,2013,35(5):5-11.
- [8] 张小锋,张 斌.我国中长期能源碳排放情景展望[J].中国能源,2016(2):38-42.
- [9] AMORY B LOVINS, JON CREYTS, CLAY STRANGER.重塑能源中国的清洁能源路线图[J].竹 西,译.博鳌观察,2016(2):80-85.
- [10] 国家发改委能源研究所“重塑能源”课题组.重塑能源:面向 2050 年的中国能源消费和生产革命路线图[J].经济研究参考,2016(21):3-14.
- [11] 中国能源研究会.中国能源展望 2030[M].北京:经济管理出版社,2016.
- [12] 蔡立亚,王苏礼,刘泮漪.中国未来核电发展空间研究[J].中国能源,2016,38(1):25-31.
- [13] 陈润羊,花 明.铀矿资源对我国核电发展战略影响的研究[J].矿山机械,2015(11):7-11.
- [14] 杜祥琬.前瞻中国能源中长期发展战略[J].中国经济和信息化,2011(z1):22-23.
- [15] IEA/NEA. Technology Road-map-Nuclear Energy(2015 edition)[R]. NEA/IEA, OECD, 2015.
- [16] 佚名.纵览世界各国内陆核电一览[J].中国核工业,2013(3):36-37.
- [17] 陈茂松.世界内陆核电厂的运行及探讨[C]//中国核学会 2007 年学术年会,2007.
- [18] IAEA. Country Nuclear Power Profiles-2018 Edition[R]. IAEA, Austria, 2018.
- [19] 王韶伟,陈海英,林权益,等.国外内陆核电状况及我国内陆核电建设亟待解决的问题[J].辐射防护,2013,33(6):390-396.
- [20] 陈子斌.国外内陆核电厂情况整理与分析[J].能源研究与管理,2013(1):15-21.
- [21] 陈泽韩.我国内陆核电选址决策思考及安全环境问题探讨[J].南方能源建设,2015,2(4):28-33.
- [22] 中国核能行业协会课题组.内陆核电厂需关注的问题及不同类型核电机组适宜性的分析[J].中国核工业,2009(2):24-29.

- [23] 中国工程院科技论坛. 我国核能发展的再研讨[M]. 北京:高等教育出版社, 2013.
- [24] 郭有, 曹佑群, 先涛, 等. 内陆核电耗水指标浅析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(7):119.
- [25] 张爱玲, 陈晓秋, 刘森林, 等. 我国内陆核电的用水安全[J]. 水文, 2015(3):69-73.
- [26] 陈杰, 周涛, 周蓝宇. 我国内陆核电站五个问题的研究[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2016, 100(2):1-4.
- [27] 常向东. 我国内陆核电厂选址评价中应关注的问题[J]. 核安全, 2007(3):41-45;58.

Analysis on Key Issues of the Inland Nuclear Power Development in China

HUANG Huan, DING Wen-jie, GUO Hai-bing

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: As a safe, clean and efficient energy, nuclear power played a positive role in economic development and environmental protection in China. In the process of power structure transformation to low carbonization, the installed capacity of nuclear power would continue to increase, and the coastal nuclear power plant site would not meet the installed demand of nuclear power. Therefore, it is necessary to start and develop inland nuclear power. The analysis on the key issues of the inland nuclear power development in China is of great significance to ensure the nuclear power developed safely and steadily and meet the national power demand, by referring to the experience of overseas inland nuclear power construction and based on the actual situation of China.

Key words: inland nuclear power; development prospect; key issues