我国沿海核电发展态势、致灾因素分析及研究建议 *

文 / 侯西勇 ** 于良巨 ** 骆永明 ** 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264003

摘要：改革开放以来，我国经济社会发展迅速，能源需求日益增加，尤其是东部沿海人口和产业不断积聚，能源不足问题的严重性远远超过中西部，这总体上决定了我国已建和在建核电厂全部位于海岸带区域的基本特征。但是，东部沿海遭受地震、海啸、台风、风暴潮等灾害的威胁十分突出，2011 年 3 月，日本东北部海域 9.0 级地震引发巨大海啸，并导致福岛核电站的核泄漏，这一重大事件在全球范围引发了对核电安全及其未来发展的深入思考和争论。因此，本文从全球核电发展与核安全形势出发，分析我国沿海核电发展的态势、环境条件以及致灾因素特征，进而，重点围绕核电选址安全评价与风险预测问题，有针对性地提出增进沿海核电安全的政策建议与重大科研任务建议。

关键词：沿海 核电 选址 安全 风暴潮 地震 海啸

DOI:10.11842/chips.2014.04.013

海岸带是地球表层陆、海、气、生多圈层的耦合区域，是陆海相互作用强烈而复杂的地带，也是自然与人文因素强烈耦合和相互反馈的区域。虽然全球海岸带的面积非常狭小，但是对全球尺度的物质循环、气候变化以及海洋生态系统健康等具有极为重要的影响。工业革命以来，伴随世界范围的经济发展和人口增长，海岸带区域的人类活动与日俱增，目前，全球 60% 以上的人口居住于海岸带，人口超过 160 万的城市有 2/3 位于海岸带 [1]。在我国，也已经有 40% 以上的人口和 60% 以上的国内生产总值分布在东部沿海，尤其是改革开放以来，东部沿海经济社会发展迅速，在全国经济社会发展中发挥了不可替代的引领作用。人口不断集中、经济社会持续快速发展，对能源需求提出了重大的挑战，并总体上决定了我国已建和在建核电厂全部位于海岸带区域的基本特征。但是，沿海区域受地震、海啸、台风、风暴潮等灾害的威胁突出，2011 年 3 月，日本东北部海域 9.0 级地震引发巨大海啸，并导致福岛核泄漏，这一重大事件在全球范围引发了对核电安全及其未来发展的深入思考和争论。因此，从全球核电发展与核安全形势出发，重新认识我国沿海核电发展的环境条件与风险特征，并有针对性地提出增进沿海核电安全的政策建议，这是一个非常重要的研究工作。

* 中国科学院重点部署项目（KZZD-EW-TZ-15）：我国沿海海啸与风暴潮的记录、识别与安全风险评估（2013—2016），负责人：骆永明；中国科学院重点部署项目（KZZD-EW-14）：北方典型海岸带水动力变化和复合污染机制及其生态损害评估（2013—2016），负责人：张华。

** 侯西勇，博士，中国科学院烟台海岸带研究所研究员、博士生导师，主要从事海岸带土地利用变化、岸线变化遥感监测、海岸带综合管理等方面研究。通信作者：骆永明，博士，中国科学院烟台海岸带研究所研究员、博士生导师，主要从事土壤环境与修复方面研究。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一、全球核电发展及核电事故概况

1. 核电发展

根据国际原子能机构（IAEA）2011 年 1 月公布的数据，目前全球核电机组达到 440 台（包括 5 台长期关闭的机组），总装机容量约 3.75 亿 kW，核能发电量约占全球总发电量的 16%；在建核电机组 65 台，总装机约 0.63 亿 kW[2]。世界核电主要分布在北美（美国、加拿大）、欧洲（法国、英国、俄罗斯、德国）和东亚（日本、韩国），这 8 个国家的核电机组数量与装机容量分别占全世界总和的 74% 和 79.5%，美国、法国和日本是三大核电国家，其核电机组之和占全球的 49.4%，装机容量占 56.9%[3]。按已建核电机组统计，美国为 104 台，约占全球的 1/4，居全球首位；法国核电机组数量全球第 2，但能源结构中核电比例最高，核电机组发电量约占全国的 80%；日本核电机组拥有量仅次于法国，位居全球第 3[2]。从核电发展趋势来看，在今后 30 年内将会有更多国家和地区拥有核电站，预计到 2025 年，核发电量将占总发电量的约 1/3，核电将成为电力工业的支柱。

2. 核电分布

国际上一半左右核电站建设在内陆[4]。美国 65 个核电厂（共 104 台机组）中有 39 个（共 64 台机组）位于内陆地区，占美国所有核电机组的 61.5%，这些机组至 2010 年底已经有约 2000 堆年的运行经验，其中，在密西西比河流域建有 21 个核电厂，在五大湖周边建有 13 个核电站[5]。法国共有 19 座核电站（58 台压水反应堆核电机组），其中 4 座位于滨海，1 座位于入海口，其余 14 座为内陆核电厂，内陆滨河机组占 69.5%；2008 年核电发电量达 4176 亿 kWh，占其总发电量的 86.3%。俄罗斯内陆核电为 58%；加拿大内陆核电站为 85%；有些内陆国家，比如瑞士，5 座核电站都在内陆的江河边上（5 座核电站总发电功率为 3220MW，占总发电量的 37%）。从建造的先后次序来看，滨海与内陆核电站并无明显区别。法国的第一座核电站于 1956 年建在罗讷河畔，属内陆地区。滨海核电站均建设于 20 世纪 80 年代之后。美国 20 世纪 60 年代建造的第一批核电站大部分位于内陆地区，在 70 和 80 年代的核电建设高峰时期则既有内陆核电站，又有滨海核电站[6]。

3. 核电技术发展

核电技术按照发展历程分为 4 代[2]：第 1 代核电主要是试验性和原型核电机组。第 2 代核电是在第 1 代核电的基础上建成的功率在 300MW 以上的压水堆型、沸水堆型、重水堆型机组。第 3 代核电是满足美国“先进轻水堆型用户要求”（URD）和“欧洲用户对轻水堆型核电站的要求”（EUR）的压水堆型核电机组。第 4 代核电是由美国发起，并联合法国、英国、日本等 9 个国家共同研究的下一代核能技术，是安全性、经济性更好的新一代核电，其概念最早在 1999 年 6 月召开的美国核学会年会上提出；美国、法国、日本、英国等核发达国家于 2000 年组建 Gen-IV 核能国际论坛；2003 年，美国、法国、日本、英国、加拿大、韩国、阿根廷、南非、巴西、瑞士、欧洲原子能共同体共 11 个国家和组织决定共同开发第 4 代核能系统；俄罗斯也于 2006 年 7 月加入第 4 代核能国际论坛。目前，全球已建核电站主要采用第 2 代和第 3 代技术[2]，我国以“2 代加”技术为主，兼有部分第 3 代技术。

4. 核电事故概况

截至目前，全球核泄露事故 80 余起。最早的是 1952 年 12 月 12 日加拿大恰克河（Chalk River, Ontario）的一个反应堆发生氢气爆炸，堆芯损毁；最近的是 2011 年日本 311 大地震与海啸引发核泄漏；世界核泄漏在 1979 年之前较少；1979 年之后，除 1990 年、1998 年、2000 年、2001 年外每年都发生；1983—1987 年和 1996 年每年发生达 4～5 次；20 世纪 80 年代比较多，达 30 次；90 年代和 2000 年之后（到日本 311 事件）各发生 17 起。美国的核事故次数和频率最高，共 45 起；其次是法国 10 起和日本 9 起；德国 3 起，英国 3 起，加拿大 2 起；其他国家包括瑞士、瑞典、俄罗斯、乌克兰、匈牙利各 1 起；核事故严重程度居前四位的分别为 1986 年前苏联切尔诺贝利核灾难（7 级）、2011 年日本福岛第一核电站事故（7 级）、1957 年前苏联克什特姆核灾难（6 级）、1979 年美国三里岛核事故（5 级）[7, 8]。

事故原因方面，绝大部分为损坏的热屏蔽和堆心、冷凝器系统故障、地下管道老化、废水泄漏、控制棒故

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

障、人工事故、冷却设备和原因不明的故障造成。完全由自然灾害诱导的核泄漏事故所占比重小，其中有代表性的共 3 起[8, 9]：2011 年 3 月 11 日，日本福岛核泄露，起因于日本东北部海域 9.0 级的地震及其引发的巨大海啸，福岛核电厂海啸爬高达 14m，超过标高为 10m 的厂坪；2007 年 7 月 16 日，东京刈羽核电厂，里氏 6.8 级地震击中电厂，放射性水洒到日本海，关闭所有的反应堆进行调查和维修；1999 年 12 月 27 日，法国 Blayais 核电厂，意外强风暴及洪水使注射泵和遏制安全系统紧急停机失败。

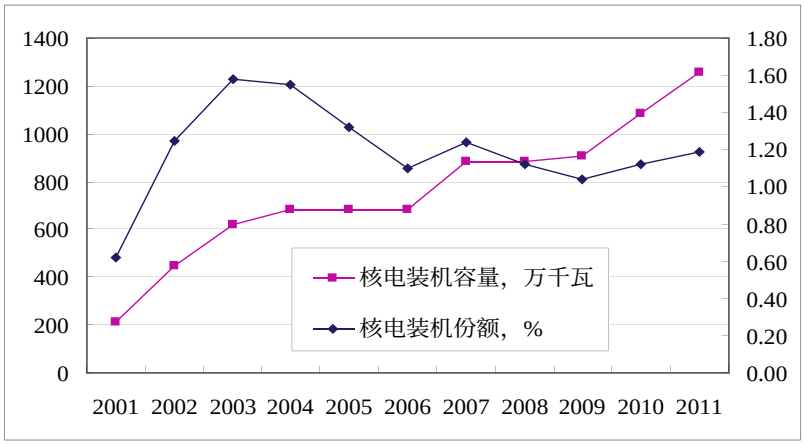
二、中国核电发展

1. 发展过程

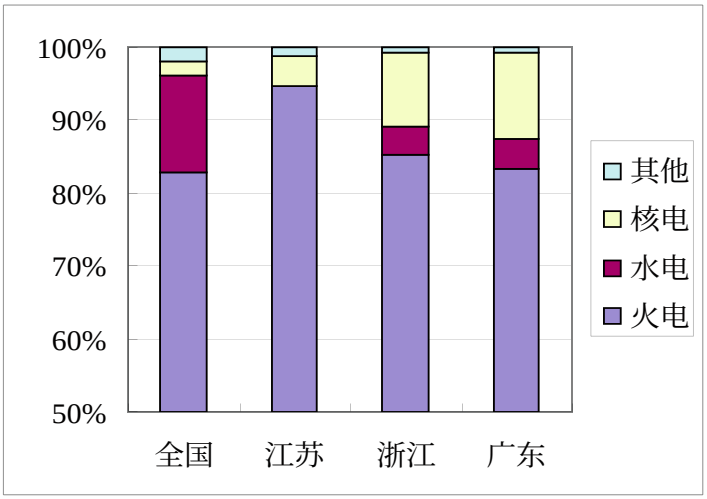
我国核电起步于 20 世纪 80 年代。1991 年 12 月，秦山核电站并网发电，是我国自行设计、建造和运营管理的第一座 30 万千瓦压水堆核电站，实现大陆核电零的突破，标志着中国成为继美、英、法、前苏联、加拿大和瑞典之后世界上第 7 个能够自行设计、建造核电站的国家；“九五”期间，我国自主建造的秦山核电二期工程和引进建造的岭澳核电工程、秦山核电三期工程、田湾核电工程，共 8 台机组相继开工[10,11]。2000 年以来我国核电发展迅猛。自 2007 年 8 月 15 日至 2010 年 7 月 18 日不到 3 年期间，就有广西防城港、海南昌江、广东台山、广东阳江、福建福清、福建宁德、浙江三门、浙江方家山、山东海阳和辽宁红沿河 10 地获得核电厂工程机组建造许可通知。

我国东部沿海经济发达，常规能源资源短缺，电价较高，核能在经济上具有竞争力，因此，我国已运行和在建的核电厂都分布在沿海地区[6]。根据核电行业 2011 年底的统计，我国沿海地区有约 21 台核电机组已获国家发改委的同意开始前期工作。全国民用核设施综合安全检查情况报告显示，截至 2012 年，我国已拥有 15 台在运核电机组，总装机容量约为 1250 万 kW，主要布局在浙江、广东和江苏三省；在建核电机组 26 台，约占全球在建机组的 40%，装机容量约 2760 万 kW。两者相加已经有 4010 万 kW，完成了 2015 年的规划目标。从 2001—2011 年变化趋势来看（见图 1），核电装机容量逐年递增，但赶不上总发电装机容量（火电、水电、核电合计）的增长，因此核电装机份额停滞不前，不管是全国，还是沿海的几个核电大省，火电仍然占据绝对优势地位。

2011 年福岛核事故之后，中国暂停了所有核电新



(a) 核电发电装机容量及其所占份额



(b)2011 年核电和其他电源发电量对比

图 1　中国核电发展趋势

(数据来源：2012 年电力行业风险分析报告)

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

项目的审批，福清核电站、阳江核电站在内的多个核电项目的建设不得不推迟。但是，核电是一种清洁和高效的能源形式，是目前可以实现工业化生产的主要新能源，对于解决能源短缺、优化产业结构、推动地区经济发展起着重要的作用[3]。国际上石油等化石能源日益减少及价格不断攀升、核电与核安全技术不断发展和成熟、全球气候变化影响等因素共同决定了核能的发展将不可遏制[12]。我国已经是全球第二大经济体，仍处于工业化中期和城市化加速发展阶段。我国早已成为石油净进口国。在这种形势下，核电发展的需求与动力十分强劲，未来时期，核电发展仍将是我国能源领域发展的重点。2012 年 10 月 24 日，国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议，讨论通过《能源发展“十二五”规划》，再次讨论并通过《核电安全规划 (2011—2020 年)》和《核电中长期发展规划 (2011—2020 年)》。这两个规划的通过，意味着核电新项目审批重新启动。

表 1　我国已建成核电厂

核电厂名称		堆型	额定功率	开工日期	首次并网	商运日期
秦山一期		压水堆	310MW	1985.3.21	1991.12.15	1994.4.1
秦山二期	1#	压水堆	4×650MW	1996.6.2	2002.2.6	2002.4.15
	2#			1997.4.1	2004.3.11	2004.5.3
	3#			2006.4.28	2010.8.1	2010.10.21
	4#			2007.1.28	2011.11.25	2011.12.30
秦山三期	1#	重水堆	2×700MW	1998.6.8	2002.11.19	2002.12.31
	2#			1998.9.25	2003.6.12	2003.7.24
田湾	1#	压水堆	2×1060MW	1999.10.20	2006.5.12	2007.5.17
	2#			2000.9.20	2007.5.14	2007.8.16
大亚湾	1#	压水堆	2×983.8MW	1987.8.7	1993.8.31	1994.2.1
	2#			1988.4.7	1994.2.7	1994.5.6
岭澳	1#	压水堆	2×990.3MW	1997.5.15	2002.2.26	2002.5.28
	2#			1997.11.28	2002.9.14	2003.1.8
	3#		2×1080MW	2005.12.15	2010.7.15	2010.9.20
	4#			2006.6.15	2011.5.3	2011.8.7

表 2　我国在建核电机组

省份	核电站 / 机组号	堆型	开工日期	容量，万千瓦
辽宁	红沿河 /1 号	CPR 压水堆	2007.08.18	108
	红沿河 /2 号		2008.03.28	108
	红沿河 /3 号		2009.03.07	108
	红沿河 /4 号		2009.08.15	108
福建	宁德 /1 号	CPR 压水堆	2008.02.18	108
	宁德 /2 号		2008.11.03	108
	宁德 /3 号		2010.01.08	108
	宁德 /4 号		2010.09.29	108
	福清 /1 号	二代改进型压水堆	2008.11.21	108
	福清 /2 号		2009.06.17	108
	福清 /3 号		2010.12.31	108
广东	阳江 /1 号	CPR 压水堆	2008.12.16	108
	阳江 /2 号		2009.06.05	108
	阳江 /3 号		2010.11.15	108
	台山一期 /1 号	EPR 压水堆	2009.12.21	175
	台山一期 /2 号		2010.04.15	175
浙江	方家山 /1 号	二代改进型压水堆	2008.12.26	108
	方家山 /2 号		2009.07.17	108
	三门 /1 号	AP1000 压水堆	2009.04.19	125
	三门 /2 号		2009.12.15	125
山东	海阳 /1 号	AP1000 压水堆	2009.12.28	125
	海阳 /2 号		2010.06.21	125
海南	昌江 /1 号	二代改进型压水堆	2010.04.25	65
	昌江 /2 号		2010.11.21	65
广西	防城港 /1 号	CPR 压水堆	2010.07.30	108
	防城港 /2 号		2010.12.28	108

2. 已建和在建核电厂

我国大陆区域已建及在建核电厂分别如表 1、表 2 所示[3]。

此外，我国的台湾省有 6 个核电机组在运行，以及 2 个核电机组在建设过程中；投运的 6 个机组总装机容量为 4904MW，在建 2 个机组为 2×1356MW。

3. 核电发展政策

在核安全法规体系建设方面：20 世纪 80 年代以来，国家环保总局和国家核安全局对核安全与辐射安全进行监管，建立了与国际接轨的监督管理体制和相关法规体系。发布的法律与规章 20 多项，相关导则 70 多项，法规技术文件、综合报告和核安全法规译文等 200 多项。其中，比较重要的有：1986 年 10 月 29 日国务院发布《民用核设施安全监督管理条例》；1987 年 6 月 15 日国务院发布《中华人民共

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和国核材料管制条例》;1993 年 8 月 4 日国务院发布《核电厂核事故应急管理条例》;2003 年 6 月 28 日全国人大通过《中华人民共和国放射性污染防治法》;2005 年 8 月 31 日国务院发布《放射性同位素与射线装置放射防护条例》;2007 年 7 月 4 日国务院发布《民用核安全设备监督管理条例》;2011 年 3 月 11 日环保部颁布《核动力厂环境辐射防护规定》等。上述法规规范了核设施营运单位和设备制造商的行为，明确了设计准则和核安全目标，规定了选址、建造、安装、调试、运行和定期试验以及维修的要求，对核设施的安全运行、保证工作人员和公众不会遭受过量放射性照射、保护环境起到了重要的作用。

在核电发展政策与规划方面:近年来我国制定了多个核电发展方面的政策与规划（见表 3），体现了我国对核电发展的高度重视。

三、影响我国沿海核电发展及安全的主要灾害因子

1. 现行核电站选址要求中所考虑的因素

影响核电厂建设和运营的因素众多，尤其是选址，需综合考虑多方面的因素。我国核电厂选址有关的核安全法规和导则体系基本参照国际原子能机构的法规体系，同时参考美国和法国等主要核电国家有关核电厂安全的监管要求，实际选址过程中，按照厂址所在地区的极端事件（可能最大地震、可能最大降水、可能最大龙卷风、可能最大风暴潮等）确定厂址设计基准。

例如，《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249—2011）规定如下:在评价核动力厂厂址的适宜性时，必须综合考虑厂址所在区域的地质、地震、水文、气象、交通运输、土地和水的利用、厂址周围人口密度及分布等厂址周围的环境特征，必须考虑厂址所在区域内可能发生的自然的或人为的外部事件对核动力厂安全的影响，必须充分论证核动力厂放射性流出物排放（特别是事故工况下的流出物排放）、热排放及化学流出物排放对环境、当地生态系统和公众的影响，必须考虑新燃料、乏燃料及放射性固体废物的贮存和转运。在核动力厂厂址选择中，应结合厂址周围的环境特征现状和预期发展，论证实施场外应急计划的可行性。在核动力厂厂址选择时，应考虑核动力厂放射性废物的安全处置。在核动力厂的厂址选择过程中，应考虑环境保护和辐射安全因素，经比选，对候选厂址进行优化分析。必须在核动力厂周围设置非居住区和规划限制区。非居住区和规划限制区边界的确定应考虑选址假想事故的放射性后果。不要求非居住区是圆形，可以根据厂址的地形、地貌、气象、交通等具体条件确定，但非居住区边界离反应堆的距离不得小于 500m;规划限制区半径不

表 3　近年来我国核电相关政策和规划

时间	事件	规划内容
2006 年	《核工业“十一五”发展规划》	积极推进核电发展，大幅提升核电自主化能力，提高核燃烧循环生产能力和技术水平
2007 年	《核电中长期发展规划（2005—2020 年）》	到 2020 年核电运行装机容量争取达到 4000 万千瓦，核电占全部典礼装机容量的比重从不到 2% 提高到 4%
2007 年	国家核电技术公司成立	引进第三代核电 AP1000 技术，最终形成具有自主知识产权的核电技术。
2008 年	上调核电装机容量规划	我国核电装机容量规划（2020 年）调升为 6000 万千瓦（在建 3000 万千瓦）
2009 年	能源局将“积极发展核电”定调为“大力发展核电”	到 2020 年装机容量预计调整为 7000 万千瓦（在建 3000 万千瓦）
2009 年	国务院常务会议（应对哥本哈根会议）	到 2020 年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%-45%
2010 年	“十二五”规划草案，《核电中长期发展规划》	到 2015 年，核电装机规模将达到 3900 万千瓦，到 2020 年的核电装机规划将提高到 8600 万千瓦
2012 年	国家核安全局发布《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求（试行）》	规范各核电厂共性的改进行动，解决目前我国核电厂在实施福岛后改进措施过程中所采用技术的统一性问题
2012 年	《两岸核电安全协议》	就两岸核电安全及事故紧急通报等事宜在相关领域进行交流合作
2012 年 10 月	讨论并通过《核电安全规划（2011—2020 年）》和《核电中长期发展规划（2011—2020 年）》	确定 2015 年将完成原规划当中的在运 4000 万千瓦核电装机的目标，在建核电装机规模有所上调，将超过 2000 万千瓦;到 2020 年中国核电装机将达到在运 5800 万千瓦，在建 3000 万千瓦。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得小于 5km。核动力厂应尽量建在人口密度相对较低、离大城市相对较远的地点。规划限制区范围内不应有 1 万人以上的乡镇，厂址半径 10km 范围内不应有 10 万人以上的城镇。

2. 地震灾害

我国海域强震主要在近海，有渤海、南黄海 2 个强震集中且频度高的地震窝以及泉州、南澳及琼州 3 个强度高但频度低的强震区。海域强震与相邻大陆的大震活动在时间上有明显的相关性，有共同的活跃期和平静期。海域强震发生的构造条件与大陆地震相近，常发生在新生代特别是第四纪以来的强烈断陷区。海域地震应力场方向与邻近大陆完全一致[13]。日本岛弧、琉球岛弧对太平洋或板块俯冲带源产生的海啸有明显的阻隔作用，因此我国受地震海啸的影响不大。但是，琉球海沟俯冲带海啸源可影响我国东海和黄海沿岸的核电厂[9]；马尼拉海沟俯冲带海啸源可影响我国南海沿岸的核电厂[14]；菲律宾西侧的地震不受阻隔，可能产生海啸并影响我国；南海海底滑坡亦可能引发海啸；巽他海峡是整个岛链火山活动最激烈的地区以及世界上火山最活跃的地区，海啸波可以无阻挡地传播到中国沿海。

日本 311 地震是世界上有记录历史以来的第 5 大地震，这样的地震只可能发生在“俯冲带”断层上，俯冲带的大地震也必然会产生巨大的海啸。福岛事件之后，我国对已建和在建的沿海核电厂进行安全检查，表明个别核电厂遭受海啸影响的可能性比较显著[9]，例如，阳江和台山核电厂，如将潜在海啸源假定为南海东北 20°N，120°E（马尼拉海沟附近），震级分别为 7.0、7.5、8.0、8.5 级，震源深度分别为 10、20、40、60km，共 16 种地震海啸情形，计算表明，影响台山核电厂海区最大地震海啸增水为 2.41m，减水为 -1.36m，与风暴潮相比，尽管增水幅度不高，但其影响不容低估。

3. 海啸灾害

渤海、黄海、东海和南海平均深度分别约为 20m、40m、340m 和 1200m，只有南海平均深度较为突出，这使得中国大部分海域地震产生本地海啸的可能性较小，只有在南海和东海的个别地方发生特大地震才有可能产生海啸。但中国东部沿海地势低，许多地区，特别是经济发达的沿海大中城市只高出海平面几米，受海浪浪高影响极大，从成灾的角度来看，小海啸、大灾难的情况完全有可能[15,16]。而且，近海海域如果发生可造成垂向错动的大地震，其产生海啸的破坏性也不可忽视，核电选址需要对未来海啸进行预测研究[17]。

历史文献中将风暴及海底地震等引起的潮位异常变化混称为海啸、海溢、海侵或大海潮等[18]，尽管这些记载缺少验潮站记录，但是仍表明历史时期确曾发生过大的海啸。1948 年 5 月 23 日威海附近海域发生 6 级地震，在养马岛造成了涌浪现象，增水高度 2 ～ 3m，此次地震的震中（37.6°N，121.9°E）水深 20m，到养马岛附近海水变为 10m，养马岛与对岸之间海水更浅并形成较窄的通道，这种地形对海浪具有一定的放大作用，可能是造成地震涌浪的一个重要原因[19]。建国后曾完整地记录到海南岛西南沿海的一次地震海啸波：1992 年 1 月 4 日 2 时 40 分至 5 日 19 时 43 分，海南岛西南部海域（108°E，18°N）海底记录到 8 次地震，最大震级 3.7 级；三亚港 5 日 14 时起港内潮水上涨速度加快，14 时 30 分至 17 时潮位出现异常，潮水急涨急退，目测涨潮速度可达 10 节以上，退潮比涨潮速度缓慢，每次涨退过程 20 ～ 40 分钟不等，大约 5 ～ 6 次，一次涨潮，增水可达 50 ～ 80cm，16 时后出现两次较大涨潮，达 70 ～ 80cm，涨潮时明显出现流带、水涡旋，海水较浑浊，水面小鱼翻白上浮；海南岛周围 4 个验潮站与北部湾的 1 个验潮站完整地记录到此次地震海啸波。事后分析表明，群震发生在南海 VI-VII 度的地震烈度区内，震源深度 8 ～ 12km，水深约 100m，尽管震级最大仅 3.7 级，但一天内连续 8 次地震，群震可能触发不稳定岩石结构，导致海底塌陷并诱发海啸波[18]。沉积柱样品分析同样提供了我国发生古海啸的证据。例如，对西沙群岛东岛沉积柱样的粒度、元素地球化学、古生物学等的分析提供了南海 1000 年前发生较强海啸的重要证据[20]。

4. 风暴潮

主流观点认为，我国滨海核电厂灾害风险受风暴潮影响远大于来自地震海啸的影响（见表 4），我国滨海核电厂的防洪因素主要为风暴潮，在设计基准洪水组

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合因素中的极端事件确定为风暴潮[9]。

5. 假潮

假潮是在外力激发下海湾或湖泊中的水体产生与水域固有振动有关的振动。这种振动可以是自由振动或受迫振动。突然而剧烈的风场变化是导致假潮的直接原因，地理环境差异是造成港湾假潮强弱的关键因素。大振幅假潮引起水位的急骤升高或急骤降低。渤、黄海沿岸主要港湾存在不同周期和不同振幅的假潮，大振幅假潮（振幅大于 80 cm）频繁，100 cm 以上振幅假潮几乎每年都有。假潮具有明显的局地性、季节性和年际变化。夏季是大振幅假潮（振幅 >80cm）多发期，冬季基本上不出现；龙口港湾的大振幅假潮最突出，最大振幅可达 293cm；气压和风速、风向突变的良好配合是发生大振幅假潮的主要原因[21]。东海区港湾假潮特征明显，浙江沿海假潮比福建沿海多，多数出现在 3、4 月和 8、9 月，坎门、嵊山、长涂和三沙的最大振幅分别为 170、95、85 和 100cm，大陈和平潭为 41 和 39cm[22]。南海北部沿岸 15 个海洋站假潮资料表明，较大振幅假潮多发生在春、夏季，且都和风速、风向以及气压的剧烈变化有关[23]。

表 4　我国部分滨海核电厂址可能最大风暴潮增水与海啸增水对比

滨海核电厂名称	所在海域	可能最大风暴潮增水 (m)	可能最大海啸增水 (m)
红沿河核电厂	渤海	2.49	0.55
海阳核电厂	黄海	3.96	0.23
田湾核电厂	黄海	4.33	0.51
秦山核电基地	东海	5.44	0.53
三门核电厂	东海	4.22	1.06
宁德核电厂	东海	5.12	<0.50
福清核电厂	东海	4.37	<0.50
大亚湾核电厂	南海	5.30	1.16
阳江核电厂	南海	5.19	1.16
台山核电厂	南海	5.23	2.41
昌江核电厂	北部湾	3.71	<0.80

四、我国沿海核电厂选址安全评价与风险预测研究的建议

1. 我国沿海核电厂选址安全评价与风险预测技术的不足之处

在海啸预警方面，国际上已经基于对地震波及海平面信息的分析而建立了全球海啸预警系统。该系统最初是 1946 年阿留申地震后所建立的全太平洋海啸预警系统，1960 年海啸之后升级为国际性海啸预警系统，太平洋地震带上的北美、亚洲和南美国家，太平洋上的一些岛国、澳大利亚、新西兰，以及法国和俄罗斯等都先后加入。2004 年印度洋海啸夺取了 25 万多人的生命，之后在加勒比海、印度洋和大西洋启动了建立类似预警系统的工作。国际海啸预警系统一般是把参与国家的地震监测网络的各种地震信息全部汇总，通过计算机进行分析，判断海啸发生的地点、规模和破坏性。基本数据形成后，系统向有关成员国传达相关警报，一旦海啸形成，分布在海洋上的数个水文监测站会及时更新海啸信息。目前国际上在地震海啸预警方面所存在的主要难题包括：局部地震引发的海啸难以预警；还没有完全认识海啸传播与冲岸的水动力学过程；对波幅和冲上沿岸的态势预测仍不准确[24]。

近年来，我国也在海啸研究与预警系统建设方面取得了进展，例如，国家海洋环境预报中心建立的“业务化海啸传播时间预报模式（CTTT，China Tsunami Travel Time model）”2005 年开始业务化运行，其技术特点包括：球面坐标，适合大范围计算；采用格点迭代法，计算效率高；覆盖整个中国沿海及临近海域；空间分辨率为 2′，计算时间小于 2 分钟，全过程自动化；输入参数为地震信息，输出结果为西北太平洋海啸传播时间图；海啸传播到沿海海洋站的时间，以及 Google Earth 显示的 KML 文件。但是，中国海啸预警的整体水平与日、美等国家相比，差距仍较明显，主要表现在预警体系不完备、观测装备技术落后、灾情分发系统不完善、公众宣教不足等。

2. 沿海核电厂选址安全评价数据库建设与风险预测系统研发建议

综合国内外已有的地震、海啸、风暴潮等数据库，集成和建立中国沿海区域不同时空尺度的多源、多要素科学数据库。在此基础上，综合应用物理海洋、地质学、地震学、地理学、环境经济学、海洋科学等学科的理论、方法与模型，建立“中国沿海核电厂选址安全评价与

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

风险预测研究信息系统”。

数据库建设方面应该注重集成如下要素信息：卫星影像、行政地图、交通图、交通规划图、城镇建设规划图；地区经济发展报告、能源规划报告、铁路 - 水运 - 港口 - 码头等资料；主要水系水资源及水文资料、气象资料；统计年鉴、人口资料及环境公报；大比例尺地形图和地质图、水文地质调查报告等地质资料；历史地震分布图、旅游资源、军事设施、危险品仓库分布；核电厂址周边其他工程勘察、规划资料、周边矿产资源分布；海域水文（海流、波浪、海啸、风暴潮、假潮）记录数据、水下地形、渔业养殖与渔场分布等。

在风险预测系统研发方面应注重如下技术方法及功能：基于历史资料分析、物理海洋数值模拟、大气弥散模拟、温排水环境与生态影响评价、灾害风险情景分析与模拟、GIS 空间分析和制图等技术方法；综合分析和判断沿海核电厂的灾害脆弱性，重点开展设计重现期状况下核电厂灾害防御能力的分析评估，开展可能最大风暴潮（增、减水）、海啸、假潮、陆源洪水等因素影响及其复合作用状况下灾害风险与损害的分析和评估；基于上述研究，从核电厂周边人口分布、城镇分布、产业发展、环境与生态所遭受的威胁与影响等角度出发，设定合理的目标，开展灾害应急预案的分析和制定研究。

3. 对若干重要问题开展深入研究的建议

重大基础问题研究：局部地震（尤其是我国沿海近源地震）引发海啸的数值模拟与预警技术、海啸激发过程研究、海啸传播与冲岸的水动力学过程研究等。

中国沿海地震海啸风险及其对沿海核电厂安全运营的影响特征：重点分析地震和火山引发海啸的可能性及影响范围和影响程度，以及海啸与风暴潮等复合作用下的影响特征。

中国沿海核电厂事故风险、环境与经济影响及灾害应急研究：分别针对事故发生前、过程中及灾后 3 个阶段，研究有效的事先防御、灾害应急与灾后管理措施及方案，促进我国核电厂事故应急处置能力的提高。

致谢：本文在撰写过程中得到了毕晓丽、芦清水、过杰、宁吉才、高志强、李艳芳、邢前国、唐诚、田崇国、吴晓青、王德等同事的支持，对他们表示衷心的感谢。

参考文献：

[1] Primavera J. H. Overcoming the impacts of aquaculture on the coastal zone. Ocean & Coastal Management [J],2006,49（9-10）:531-545.

[2] 武宏波,王智冬,项冰 . 国内外核电发展形势分析 [J]. 能源技术经济,2012,24（3）:5-9.

[3] 赵小辉,邹树梁,刘永 . 内陆核电发展形势分析 [J]. 南华大学学报 (社会科学版),2012,13（3）:1-7.

[4] 叶奇蓁 . 后福岛时期我国核电的发展 [J]. 中国电机工程学报,2012,32（11）:1-8.

[5] 北极星电力网新闻中心 . 内陆核电厂水环境影响评估可借鉴美国经验 [EB/OL]. 2011-10-12,2013-08-12, http://news.bjx.com.cn/html/20111012/315362.shtml

[6] 田杰棠 . 借鉴国外经验发展内陆核电 [J]. 国防科技工业,2006,4:44-47.

[7] 潘自强,陈竹舟,肖雪夫,等 . 由核事故看核与辐射安全 [J]. 中国核工业,2011,7:26-31.

[8] 宋祖荣,潘翔,车树伟 . 核事故与国内现役核电机组核安全措施 [J]. 中国核电,2012,5（3）:284-289.

[9] 常向东,周本刚 . 我国沿海核电厂地震海啸影响分析 [J]. 核安全,2011,4:45-49.

[10] 谭德明 . 国外核电站建设对我国核电发展的启示 [J]. 南华大学学报 (社会科学版),2009,10（2）:1-4.

[11] 刘兵,汪昕,费赫夫 . 我国核电技术的能力演进与追赶路径 [J]. 南华大学学报 (社会科学版),2013,14(1):1-5.

[12] Srinivasan T.N., Gopi Rethinaraj T.S.. Fukushima and thereafter: Reassessment of risks of nuclear power [J]. Energy Policy,2013,52:726-736.

[13] 汪素云,时振梁,环文林 . 中国近海地震活动特征 [J]. 海洋学报,1990,3:194-199.

[14] 杨马陵,魏柏林 . 南海海域地震海啸潜在危险的探析 [J]. 灾害学,2005,9:41-47.

[15] 陈颙,陈棋福,张尉 . 中国的海啸灾害 [J]. 自然灾害学报,2007,4:1-6.

[16] 高焕臣,闵庆方 . 渤海地震海啸发生的可能性分析 [J]. 海洋预报,1994,11（1）:63-66.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[17] 王健，时振梁．海啸及其在核电厂选址中的安全评价 [J]. 地震地质，1993，12：364-368.
[18] 卢晓东．地震海啸对滨海核电厂影响的探讨 [J]. 电力勘测，1995，3：57-60.
[19] 王健，汪素云，胥广银，等．1948 年山东威海地震再调查和参数校订 [J]. 中国地震，2004，20（4）：419-424.
[20] Sun Liguang, Zhou Xin, Huang Wen, et al. Preliminary evidence for a 1000-year-old tsunami in the South China Sea [J]. Sci. Rep. 3, 1655; DOI：10.1038/srep01655（2013）.
[21] 李坤平，陈则实．渤海、黄海沿岸主要港湾假潮的基本特征 [J]. 海洋与湖沼，2002，3：128-138.
[22] 李宝泰．东海沿岸假潮基本特征 [J]. 海洋通报，2000，19（3）：1-7.
[23] 夏综万，林少奕，王永信，等．南海北部沿岸海洋站的假潮 [J]. 海洋与湖沼，2002，1：8-14.
[24] 中国科学院国家科学图书馆，科学研究动态监测快报 - 地球科学专辑，2011 年 3 月 15 日，第 6-7 期（总第 108-109 期）.

Development Trend, Disaster Threats of Nuclear Power Plants in China's Coastal Zone and Suggestions for Further Studies

Hou Xiyong, Yu Liangju, Luo Yongming
Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academic Sciences, Yantai 264003

Abstract: China's energy demand has increased dramatically as the rapid social and economic development since the beginning of the Reform and opening-up policy. The problem of energy shortages in China's eastern coastal area is more serious than that in the central and western China because more population and industries have been concentrated in the eastern coastal area. As a result, almost all the nuclear power plants have been built or under construction are locating in China's coastal zone. However, the coastal zone has been suffered and will go on suffering more natural hazards than the central and western China, such as earthquake, tsunami, hurricane, storm surge, sea ice. A magnitude 9.0 earthquake took place near Japan's northeast coast and triggered a large tsunami on March 2011, which led to the Fukushima nuclear leak. This major hazard brought about the intense discussion and controversy on nuclear security and future development of nuclear power plants globally. This paper reviewed the development of nuclear power and nuclear security at home and abroad, and analyzed the development tendency, conditions and disaster sources of nuclear power plants in China's coastal zone; finally, some suggestions with respect to management strategy and academic studies were put forward in order to improve the security of nuclear power plants in China's coastal zone.

Keywords: coast; nuclear power; location; security; storm surge; earthquake; tsunami

（责任编辑：何岸波；责任译审：龚　宇）

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net