

一、项目名称

泥沙、核素、温排水耦合输移关键技术及在沿海核电工程中应用

二、推荐单位意见

该项目系统性地建立了核电工程中泥沙、核素、温排水耦合输移的理论与方法。在纳米尺度上观测到泥沙颗粒表面形貌的梯度与孔隙特征，构建了核素与泥沙颗粒相互作用的表面络合模式；建立了泥沙输移和床面变形过程中核素迁移转化的物理-化学过程模型；提出了沿海核电工程温排水、核素迁移物理模型试验比尺和变态率的取值原则和范围，科学确定了核素及温排水的影响范围，保证了核电的工程安全及水域的环境安全，取排水口的优化方案节省了工程投资。

项目发表学术论文 146 篇，编制了国家技术规范《冷却水工程水力、热力模拟技术规程》等，已经在我国十几座核电工程中得到检验和应用。

推荐该项目为国家科学技术进步奖一等奖。

三、项目简介

近年来我国核电发展迅速，已有大亚湾、岭澳、秦山、田湾、福清、阳江、宁德、方家山、红沿河、防城港和昌江等 11 个滨海核电厂的 34 台机组投入商运，还有海阳、石岛湾、三门、台山等滨海核电厂的 22 台机组在建，核电滨海式布局已经形成。我国滨海地区泥沙构成在世界上最复杂，泥沙运动强度又大，占世界 5% 的水量输运了 30% 的泥沙，泥沙与核素的耦合关系复杂难解，影响到泥沙、核素、

温排水的准确分布和核电工程的安全与环境安全。因此研究泥沙、核素、温排水耦合输移是确保核电工程安全和环境安全的关键技术，决定了核电工程立项和设计的可行性。该项目组在国家自然科学基金和核电企业的资助下，经多年研究和实践，取得如下创新成果：

1. 构建了全三维水沙两相流变密度湍流模型，解决了螺旋流输沙等真实三维水沙计算难题；提出了工程泥沙计算的斜对角笛卡尔坐标方法，克服了河口及海岸工程大尺度泥沙计算中复杂边界的困难。该技术全面提升了水沙模拟的准确性和可靠性，是解决核电工程取、排水口头部、取水泵房内部泥沙冲淤的关键，为核电工程的安全运行提供了保障。

2. 首次提出了包含泥沙颗粒表面形貌信息的数学泥沙概念，基于数学泥沙确定了泥沙颗粒表面非均匀电荷分布规律，量化了核素与泥沙表面形貌之间微观作用机制，建立了泥沙输移和床面变形过程中核素迁移转化的物理-化学过程模式，使水-沙-核素-床面之间的静态模型变为动态模型，该技术大幅提升了核素在海域分布和积累模拟结果极值包络范围的合理性，给出了保护环境敏感区域和生态红线的设定方法。为核电工程环境安全设定阈值和条件提供了保障。

3. 提出了采用比尺模型分析物理模型试验比尺和变态率的研究方法，使物理模型试验比尺和变态率的取值更加合理且具有可操作性；揭示出模型试验中水动力垂向和横向速度误差远大于纵向速度误差的规律；提出基于不同海域岸线、地形、潮动力特性及环境保护目标要求等综合因素的远排差位式、交错分列式和混合式等核电工程取排

水工程布置原则，保证了核电工程的取排水安全和环境安全，且大幅度降低了工程投资及运行成本。

经教育部组织专家鉴定“该项目在泥沙-核素-温排水耦合迁移转化、系统模拟方面创新突出，项目整体达到了国际领先水平”。该项目累计发表学术论文 146 篇，其中 SCI 论文 52 篇，引用 1033 次，授权发明专利 16 项，软件著作权 6 项，出版专著 2 部，支撑 4 项国家行业规范，相关技术成果获得 2009 年教育部科技进步奖一等奖和 2016 年教育部科技进步奖一等奖。研究成果已经在我国台山、石岛湾、防城港、红沿河等核电工程中得到应用，还被日本、马来西亚等国际工程中所采用，解决其泥沙输移和水工排放口优化布置的问题。研究成果为我国核电工程运行的工程安全和环境安全提供了重要的技术支撑，推动了核电行业的科技进步。

四、客观评价

1、项目鉴定意见

教育部组织鉴定专家认为项目的主要创新为：“构建了二、三维数学模型的床面边界条件，给出了以切应力和挟沙能力两种控制条件以确定底部含沙量；提出了处理复杂边界条件的斜对角笛卡尔坐标方法，该方法具有正交格式和较高计算精度；在泥沙-温排水与在建立了泥沙-核素-温排水耦合迁移转化、模拟系统；建立了温排水物理模型试验不同紊流模式对于比尺关系的影响；提出结合我国沿海海域特点及环境保护目标要求的取排水工程布置原则，项目整体达到了国际领先水平。”

2、学术评价

所构建的三维工程紊流计算模式及方法已由国际水利学会 (IAHR)会刊 JHR 主编 Garcia 编撰, 美国 ASCE 出版的泥沙手册推荐为工程泥沙计算模式之一。所采用的三维工程紊流计算模式及方法被美国 University of Mississippi 教授 Wu Weiming 在 Taylor & Francis 出版社出版的专著《Computational River Dynamics》中整段采用和介绍, 共计 2 页文字, 2 个图形等。

在泥沙输移与核素等重金属的迁移方面, 比利时布鲁塞尔大学水文与水利工程系的 Willy Bauwens 教授等在论文 (J. Environ. Radioactiv., 2015, 149: 81-89) 引用中肯定了项目组研究成果极大地改善了对水体中放射性核素迁移过程的认识与定量化” (other studies demonstrate that the inclusion of adsorption-desorption processes by means of a kinetic approach drastically improves the understanding and quantification of the radionuclide transport in aquatic systems)。项目建立的核素等重金属迁移转化模型被国内外同行广泛认同和采用。例如, 印度国际大学生生态模拟实验室的 Santanu Ray 教授等、澳大利亚南昆士兰大学计算工程与科学研究中心的 T. Tran-Cong 教授等在论文 (Ecol. Model., 2015, 306: 226-239; J. Hydrol., 2015, 525: 87-101) 中多次正面引用项目组研究成果)。

长江水利委员会长江科学院的卢金友教授等引用项目组成果, 进一步研究了弯曲槽道中变态率对悬移质泥沙运动的影响 (Sediment. Geol., 2013, 294: 27-36)。美国加州大学戴维斯分校土木与环境工程系

的 M. L. Kavvas 教授等在论文(J. Hydraul. Eng., 2015, 141: 04015003)中 3 次引用项目组发表在 J. Coastal Res.(2008, 52: 41-54)上的论文,研究了物理模型中变态率对悬移质泥沙输移的影响等。

五、推广应用情况

项目已在我国石岛湾、防城港、台山、红沿河等核电工程中得到应用,例如:石岛湾电利用项目技术最终采用“近岸明渠取水、离岸深层排水”取排水布置方案,利用工程海域潮动力特点解决了核电站的温排水问题;台山核电采用项目技术,最终选定了“离岸大襟岛取水、近岸明渠排水”的布置方案,使得冷水、热水各行其道,节省了工程投资,又确保了运行安全;在红沿河核电取排水口设计过程中,采用项目技术,最终确定了“近岸深水排放+取水隔热堤+排水导流堤”方案,兼顾解决了斑海豹保护区和核电取排水安全的问题,取得了很好的环境效益和经济效益;在防城港核电设计运行中,采用项目技术论证了“明渠远排、近岸港池取水”的取排水方案,较好地兼顾了电站安全取水和水环境保护等要求。

六、主要知识产权证明目录

1、发明专利

一种数字条码水位测针 ZL 2006 1 0113116.1

一种可翻转多次测量的沉降筒 ZL 2009 1 0081745.4

一种自动控制闸门泄流量的方法和系统 ZL2008 1 0225702.4

一种潮流环境下垂直浮力射流的射流轴线计算方法 ZL 2015 1 0440997.7

2、计算机软件著作权

水沙数值模拟仿真系统 2008SRBJ5006

闸坝快速调度模拟系统 2008SRBJ5012

河口海岸泥沙粒度计算软件2014SR136562

3、中华人民共和国行业标准：

《冷却水工程水力、热力模拟技术规程》 SL 160-2012

《能源行业标准-核电厂温排水环境影响评价技术规范》 NB/T 20299-2014

《中华人民共和国行业标准海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》 JTS/T 231-2-2010

七、主要完成人情况

方红卫：清华大学，提出总体研究方案，对创新点中 1、2、3 有贡献，建立水沙数学模型，首次提出了包含泥沙颗粒表面形貌信息的数学泥沙概念；提出了基于不同化学反应核素等重金属与泥沙相互作用的方法，并建立相应迁移转化模型。

纪平：中国水利水电科学研究院，对创新点 2、3 有贡献。将建立的核素、温排水等迁移转化模型耦合到浅海水动力模型中，推广了创新点 2 的应用范围；提出了创新点 3 中采用比尺模型分析物理模型试验比尺和变态率取值的研究方法。

张红武：清华大学，对创新点 1、3 有贡献，建立了浑水输沙模型，并将模型应用到工程区泥沙输移、河床稳定等的模拟中，为取排水口的工程安全提供了技术支撑。

赵懿珺：中国水利水电科学研究院，对创新点 2、3 有贡献。研究不同类型模拟技术的特点、适用条件以及模拟结果取用方法；同时

根据水动力与热污染和核素的扩散规律，得到了物理模型试验比尺和变态率的取值范围和取排水布置优化原则。

何国建：清华大学，将污染物-泥沙-水动力耦合模型推广到分层三维的浅海模型中，并在模型中加入河床变形的影响；通过数值模拟方法，研究了模型变率对水动力场的影响，对创新点中 2、3 有贡献。

张华庆：交通运输部天津水运工程科学研究所，对创新点 1、3 有贡献，建立了多维水动力-泥沙耦合输移模型，可进行工程区海域大范围冲淤变形研究，用于多个核电厂选址以及取排水口的优化设计。

李孟国：交通运输部天津水运工程科学研究所，对创新点 1、3 有贡献，通过河口海岸泥沙粒度分析，建立了平面二维和三维潮流泥沙数学模型，已用于多个核电厂取排水明渠口门附近岸滩的冲淤变化计算。

袁珏：中国水利水电科学研究院，对创新点 3 有贡献，通过物理模型试验、数值模拟计算与原型观测结果的比对，得到核电工程取排水模型试验的比尺适用范围，分析了不同比尺对温排水、低放废水模拟的影响，并形成行业标准。

黄磊：清华大学，对创新点 1、2 有贡献。观测得到泥沙颗粒表面的形貌特征，并统计了其相关信息。建立了基于不同化学反应的核素等物质与泥沙的相互作用方法。

刘晓波：中国水利水电科学研究院，对创新点 3 有贡献，修正了潮汐海域三维水动力模式，并耦合温排水变密度紊流模型，提高了模型对物质输移模拟的精度。

陈小莉：中国水利水电科学研究院，对创新点 3 有贡献。将建立的三维水动力、温排水以及低放废水输移模型应用到多个核电站中，推广了模型的应用范围。

王靖宇：清华大学，对创新点 2 有贡献。构建泥沙输移和床面变形过程中核素等重金属迁移转化的物理-化学过程模式，并建立模型。

张海文：中国水利水电科学研究院，对创新点 2 有贡献，研究了自由表面风场、边岸固壁等对水动力以及标量物质输移的影响，提高了模型模拟精度。

刘赞强：中国水利水电科学研究院，对创新点 3 有贡献，通过物理模型试验比对，得到核电工程取排水模型试验的比尺适用范围。

段亚飞：中国水利水电科学研究院，对创新点 3 有贡献。分析核电站取排水口近、远区不同水动力特征，比对优化取排水口布置。

八、主要完成单位及创新推广贡献

清华大学作为项目第一完成单位，负责项目整体方案设计，提出研究的主体思想和核心技术路线。利用高校学科交叉的优势，得到了纳米尺度上泥沙颗粒表面形貌的梯度与孔隙特征，首次提出了包含泥沙颗粒表面形貌信息的数学泥沙概念，基于数学泥沙确定了泥沙颗粒表面非均匀的电荷分布规律，突破了传统泥沙颗粒表面电荷均匀分布双电层理论的限制，进而构建了核素等重金属离子与泥沙颗粒相互作用的表面络合模式，解决了核素等重金属离子在泥沙颗粒表面非均匀分布的难题；提出了水体层与底泥层中基于不同化学反应的核素等重金属与泥沙相互作用的方法，建立了泥沙输移和床面变形过程中核素

等重金属迁移转化的物理-化学过程模式，克服了国内外核电工程评价规范中核素等重金属在泥沙与水体中分配依靠经验方法的缺陷；提出了采用比尺模型分析物理模型试验比尺和变态率取值的研究方法，揭示出模型试验中水动力学垂向和横向速度误差远大于纵向速度误差的基本规律，解决了针对沿海核电工程不同的水动力学条件应采用不同的比尺模型这一基本问题；进而提出了沿海核电工程温排水、核素迁移物理模型试验比尺和变态率的取值原则和范围，使得物理模型试验的精度得到大幅提高。

中国水利水电科学研究院作为项目合作单位，主要开展物理模型试验研究，分析核电站取排水口近区和远区水动力特征，物质扩散特征等，并研究不同模型比尺对这些水动力特征和物质扩散速率的影响。同时将研发的水动力、泥沙对核素的吸附迁移、温排水输移扩散模型进行推广应用，应用到石岛湾、防城港、台山、红沿河等众多核电工程的取排水口优化设计中，为我国核电厂址的选择和布局发挥了重要作用。

交通运输部天津水运工程科学研究所作为项目合作单位，主要开展取排水工程泥沙物模及数模研究，通过泥沙颗粒特征、潮流水动力分析，研究取排水口近区泥沙输移以及海床变形特征。开发的潮流泥沙数学模型已成功应用到田湾、莆田等多个核电厂海工工程研究中。

九、完成人合作关系说明

项目主要完成单位清华大学、中国水利水电科学研究院联合承担自然科学基金委重点基金“河口海岸核电工程的水环境效应

(51139003)”、“红沿河核电厂温排水数值模拟计算”“华能丹东电厂扩建物模及计算”等课题；清华大学、交通运输部天津水运工程科学研究所合作有“连云港核电站海水取排水工程整体泥沙物理模型试验研究”、“福建惠安核电站取排水工程平面二维泥沙数学模型研究”等。主要完成人方红卫、纪平、赵懿珺、何国建、袁珏、黄磊、王靖宇、陈小莉作为重点基金课题负责人及技术骨干合作完成了泥沙和核素的耦合作用关系、温排水物理模型的比尺分析等的部分技术研发，并在石岛湾、台山、防城港、红沿河等多个核电工程进行了推广应用，获得教育部科技进步一等奖。张华庆、李孟国与方红卫共同承担国家“863”子题“长河段悬移质泥沙与床沙交换机理及计算模式研究（2012AA112508）”；张红武、方红卫等合作完成了黄河干支流模型的理论与实践，并在河口泥沙运动中应用，获得教育部科技进步二等奖。刘晓波与方红卫、何国建等合作完成了近海海域三维水流运动特征以及温排水扩散模式的部分技术研发，完成学术专著“水沙输移数学模型”。纪平、刘赞强、赵懿珺合作完成了石岛湾核电排水口试验研究。纪平、赵懿珺、陈小莉、段亚飞、张海文合作完成了温排水模拟方法对比研究等工作。