

任务来源：国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重点项目、工程项目

完成时间：1985—2013年

获奖情况：2017年度国家科学技术进步二等奖

## 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

本项目主要内容如下：

(1) 泥沙、核素、温排水耦合输移理论和方法研究。针对核电工程设计及运行过程中提出的温排水、泥沙、核素输运过程模拟精细化、同步化、准确化以及取排水布置最优化等核心技术问题，采用理论分析、数据同化、技术研发与工程实践相结合的技术路线，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，并在沿海核电工程研究中以成功应用。

(2) 复杂边界水沙两相变密度紊流模拟技术研究。项目针对河口海岸大尺度区域计算特点及径流结合潮流的长波输运特点，构造了更加适应复杂岸线边界的水沙模拟体系斜对角笛卡儿坐标方法，揭示了工程泥沙模拟技术中的三种基本物理模式，从理论上推导出泥沙底部边界条件三种类型，建立了全三维水沙两相变密度紊流模型，该模型将水沙耦合输移的难点模化为输沙关系的判定，有效提升了复杂条件下泥沙输移模型的适应性，在泥沙浓度和床面变形计算结果的精度上有大幅提高。

(3) 泥沙颗粒与核素的相互作用机制以及泥沙输移、床面变形过程中核素迁移的物理—化学过程模式研究。基于高分辨率显微技术，在纳米尺度上深入研究了泥沙颗粒与核素的微观作用机制，基于对大量泥沙颗粒表面形貌的统计分析，建立了表征泥沙形状和表面形貌的数学方程，构建了核素与泥沙颗粒相互作用的表面络合模式，解决了核素在泥沙颗粒表面非均匀分布的难题。

(4) 沿海核电温排水（核素）物理模型设计方法及取排水布置优化方法研究。系统研究了模型变态率对温度场及流场模拟的影响规律，据此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；归纳分析了我国沿海潮流特征，依据工程海域潮流特点，深入研究了可保障沿海核电安全及水环境安全的取排水布置优化方法。

### 主要技术创新

(1) 构建了全三维水沙两相变密度湍流模型，使得国际上流行的 CH3D 模型（美国）和 DELFT3D 模型（欧洲）不能解决的螺旋流输沙等真实三维水沙计算这一难题变为可能；提出了工程泥沙计算的斜对角笛卡儿坐标方法，克服了河口及海岸工程大尺度泥沙计算复杂边界的困难。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技术关键，应用该技术提高了核电工程安全运行的保证率。

(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的微观作用机制，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



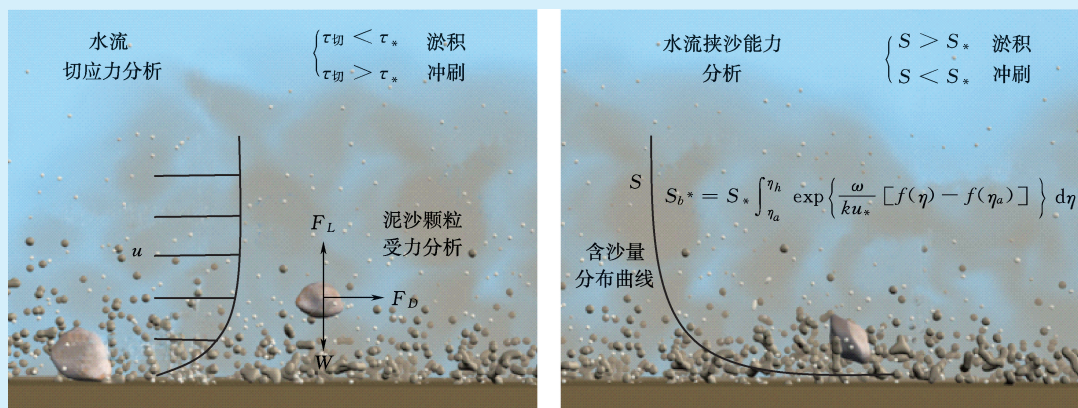
的静态模型变为动态模型，该技术大幅提升了核素在海域分布和积累模拟结果极值包络范围的合理性，是保护环境敏感区域和生态红线的关键，应用该技术提高了核电工程环境安全的程度。

(3) 系统研究了模型变态率对温度场及流场模拟的影响规律，提出温排水物理模型设计方法，解决了模型变态率选取不合适造成温度场和流场与实际产生较大偏差的问题。从减小温排水环境影响、确保核电安全出发，在对潮流特征归纳分类（顺岸往复流、离岸往复流、旋转流）基础上提出远排差位式、远排分隔式及混合式取排水布置方法和适用条件，提高了核电工程的安全保证率，降低了工程投资运行成本。

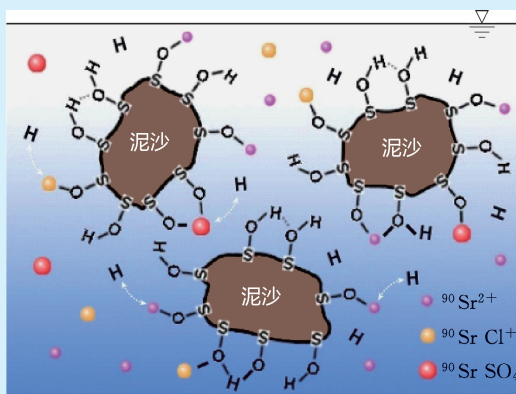
#### 推广应用情况

研究成果已成功应用于我国 90% 以上的沿海核电，取得了显著的经济效益与社会效益。采用研发的耦合模拟技术研究了滨海核电温排水、泥沙及核素输运规律，结合工程海域潮流特征对核电厂取排水工程布置进行了优化，实现了工程安全、环境安全和节省投资的目标，节约工程建设及运行成本数亿元，同时优化后的排放口可以显著减小核电温排水对海域环境生态系统的影响，确保了核电与水环境的协调性。

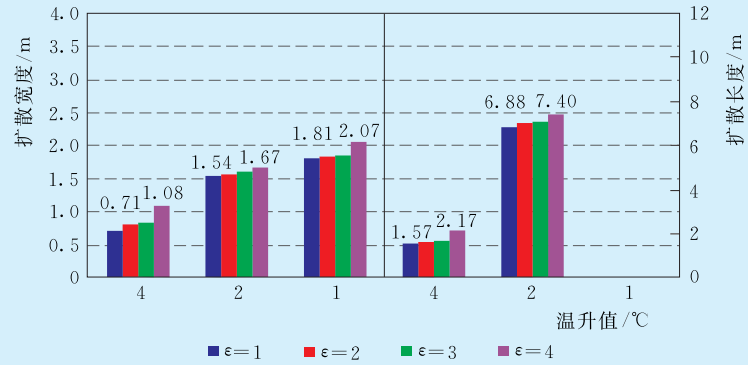
#### 代表性图片



河床冲淤的两种模式



泥沙与核素的络合模式



变态率对温排水扩散宽度的影响

完 成 单 位：清华大学、中国水利水电科学研究院、交通运输部天津水运工程科学研究院  
 主要完成人员：方红卫、纪平、张红武、赵懿璐、何国建、张华庆、李孟国、袁珏、黄磊、刘晓波  
 联 系 人：杨帆  
 邮 箱 地 址：yangf@iwhr.com  
 联系电话：010-68781126