

## 2.4 流域水生态承载力与总量控制技术研究

### ➤ 简要信息

【获奖类型】应用一等奖

【任务来源】国家水专项课题

【课题编号】2008ZX07526-004

【课题起止时间】2008年8月~2012年6月

【完成单位】中国水利水电科学研究院

【主要完成人】彭文启、杜 强、刘晓波、诸葛亦斯、谭红武、杜 霞、李国强、董 飞、张士杰、冯 健

### ➤ 立项背景

流域水污染是流域社会经济发展、污染排放、气候及水资源循环系统变化等多因素共同作用的结果。随着我国经济的快速增长，资源能源消耗大幅度增加，导致污染排放强度大，负荷高，同时不合理的经济社会活动、水土资源的过度开发以及全球气候变化，加剧流域生态状况的恶化，从而形成主要污染物负荷远超过流域生态承载力的不利局面，成为制约经济社会可持续发展的重大瓶颈。为了实现流域水污染问题的根本解决，从流域尺度出发，系统认识流域水环境系统特征，研究各种污染形成机制，按照流域水生态健康要求，建立流域水生态承载力技术体系，实施流域总量控制策略，才能有效抑制流域水污染恶化的趋势。

本课题研究从流域水环境系统理论与流域水环境系统模拟技术体系——流域水生态承载力理论及其计算技术体系——流域总量控制理论与总量分配技术体系——流域控制单元污染排放限值技术方法等关键技术环节，研究流域水质目标管理共性理论与技术，形成流域水环境质量目标管理技术体系，为国家污染物总量控制、监测和执法“三大体系”建设提供技术支持。

### ➤ 详细科学技术内容

#### (1) 研究内容一：流域水环境系统分析与模拟技术研究

针对我国流域水质目标管理技术需求，研究流域水文循环、生物化学循环、河湖（库）水生态动力学过程，明确流域水环境系统基本要素，解析流域水污染

驱动特征，明晰流域水污染发展关键环节及其控制节点，构建基于流域水生态功能分区的流域水环境系统理论架构；根据流域总量控制模型技术需求，研发流域水质、水量和水生态动力学模型，构建多要素耦合的流域水环境系统分析及演化过程仿真集成模型；基于流域水环境系统模型和流域水环境系统调查监测成果，分析研究社会经济、城镇化过程、水资源利用以及污染物排放与流域水环境质量的定量耦合与响应关系，揭示出流域水污染的形成过程及水环境系统的演变趋势，为流域经济社会可持续发展策略的制定提供指导。

### **(2) 研究内容二：流域水生态承载力基本理论与评估方法研究**

在系统剖析水资源、水环境与水生态承载力的内涵、相互关联与区别基础上，界定流域水生态的基本内涵，定量研究流域自然资源以及人类压力要素（人口、社会经济发展、土地利用、水资源利用等）与水生态承载力之间的关系。构建水生态承载力评价指标体系，研究基于水生态系统健康的水生态承载力的计算模型。研究基于水资源、水环境与水生态系统负荷承载力评价指标和评价方法。研究生态占用增长模式分析技术，提出流域水生态安全预警值确定方法，建立以水生态承载力指数为基础的水生态系统安全状态判别标准。

### **(3) 研究内容三：流域污染物总量分配技术研究**

针对流域污染物总量技术体系中存在的不足，围绕流域污染物总量分配技术体系中的关键技术问题，研究流域水污染物总量计算技术方法体系，研究流域阶段性总量目标的确定技术方法；基于流域水环境生态承载力，提出流域层次的总量分配准则，研究不确定性多目标规划优化模型等来研究多情景、多目标条件下的流域层次的排污总量分配的技术方法，建立流域水污染物总量控制方案制订的技术体系；建立控制方案评估指标体系，研究总量控制方案的经济可行性和技术可行性和总量控制方案的风险评估方法；根据流域水体允许排放负荷量要求的分类、分期原则，研究总量削减的时限与实施步骤制定技术。

### **(4) 研究内容四：流域数字水环境系统集成研究**

针对流域水环境管理数字化和业务化需求，以流域水环境系统模型为核心，研究流域数字水环境系统总体框架，研发基于 GIS 技术和三维可视化技术的流域水环境系统可视化关键技术，突破流域数字水环境系统集成关键技术，选择典型流域，形成适用于流域水质目标管理的流域数字水环境系统，服务于流域水环境管理实践。

## ➤ 发明及创新点

### (1) 关键技术突破简介

#### 1) 流域水环境系统分析与模拟技术

该项技术根据流域容量总量管理要求，构建了以流域负荷估算与水体水质响应为核心的河流流域及湖泊网河流域水环境系统分析与模拟技术。河流流域水环境系统分析模拟技术采用流域分布式非点源模型和河流水体水质响应模型，具备流域坡面水循环物理过程与主要污染物化学过程、河道与水工程水质过程综合模拟分析能力，适用于河流流域基于水生态功能分区的容量总量计算与分配。湖泊网河流域水环境系统分析模拟技术采用“陆面单元-河网-湖泊嵌套”耦合模拟模型，具备网河流域陆面过程与河网过程耦合仿真模拟功能，适用于湖泊网河流域容量总量计算与分配。该项技术解决了流域社会经济、水资源开发利用以及污染物排放与流域水环境质量的定量耦合与响应关系模拟分析技术难题，形成了流域容量总量管理适用的模型技术方法，对形成流域容量总量控制管理方案具有重要支持意义。

#### 2) 流域水生态承载力评估指标体系与评估方法

该项技术根据流域水生态保护管理要求，在系统明晰流域水生态承载力概念和内涵基础上，形成了覆盖流域水资源、水环境、水生物及经济社会的流域水生态承载力指标体系，提出了流域社会-经济-水生态耦合关系关键指标计算技术方法；在有效解决控制单元分区系统耦合技术难题基础上，建立了包括控制单元内部的水陆耦合（内部耦合）和控制单元之间基于水力联系及物质与信息交换的控制单元之间的耦合（外部耦合）的耦合模拟技术方法，形成了基于流域控制单元的流域水生态承载力分区耦合系统动力学模型，为流域水生态承载力“分区、分期、分级”调控分析方案制定提供了技术平台；在辽河流域太子河流域、赣江袁河流域、太湖溇湖水系 3 个示范流域的流域水生态承载力系统动力学模型案例实证研究表明，基于该项技术所形成的流域水生态承载力调控方案，对流域水污染防治管理具有重要支持意义。

#### 3) 流域容量总量计算和分配技术

该项技术根据流域容量总量控制管理技术要求，采用流域水质响应系数法，即依托流域水质模型建立水质控制断面对流域各入河污染源（包括点源入河排污



口,非点源入河支流口)的水质响应系数矩阵,形成了流域—控制单元容量总量计算与分配技术方法:流域容量总量最大分配方法、基于区域差异需求的流域容量总量分配方法和流域最小负荷削减容量总量分配方法,解决了行业技术标准中推荐方法所存在的不满足流域整体协调性要求、难以统筹流域水域与陆域关系、无法形成水文分期保障流域水生态功能区达标要求等方面的技术难题,也同时避免流域层面容量计算方面,针对数量庞大的入河排污口及数量同样众多的水质控制断面所采用的试算法所存在的组合计算情景数量十分巨大且操作性差的问题。在辽河太子河流域、赣江袁河流域及太湖溇湖水系的案例实证研究表明,该项技术方法适用于流域层面容量控制总体方案的计算,尤其适合水文及水质过程季节性差异明显、水工程调控强度大的流域或区域。

#### 4) 流域数字水环境系统集成技术

该项技术采用基于 GIS 和多维信息可视化技术,形成了以水环境系统综合数据库为基础,以流域水生态承载力与总量控制相关模型库为核心的流域数字水环境系统集成技术,解决了流域水生态承载力和总量控制模型、数据、方案成果等与三维数字流域技术相结合的难题,实现了基于二维 GIS 平台及三维流域场景的流域水生态承载力与容量总量控制计算模型的可视化数据分析和结果表达功能,包括三维流域/交互浏览、业务数据集成、基础属性信息查询、监测信息查询、水生态承载力指标分析、专题图层制作、流域水生态承载力调控方案可视化、容量计算与分配成果展示等,同时实现了基于 WebGIS 技术的流域空间基础数据、属性数据、专题图层及水资源承载力分析数据的网络发布及应用功能。在辽河流域太子河流域、赣江袁河流域、太湖溇湖水系 3 个示范流域的流域水环境系统案例开发研究成果表明,该项技术对形成流域水生态承载力调控及容量总量控制管理业务化平台具有重要价值。

### ➤ 与当前国内外同类研究、同类技术的综合比较

课题针对关键技术成果进行技术查新,查新报告表明,课题关键技术研究成果创新性强。

#### (1) 流域水生态承载力理论与调控

国内外在流域水资源承载力、流域水环境承载力、流域生态承载力方面有较多研究,本课题在上述研究成果基础上,形成了以流域水生态完整性为核心,综

合流域经济子系统、社会子系统、水资源子系统、水环境子系统及水生态子系统的流域水生态承载力理论与评估技术方法体系。

国内外有关流域水资源及水环境承载力的系统动力学模型技术多为集总模型，不能适用于分区、分期、分类、分级的水质目标管理技术体系，本课题在有效解决控制单元分区系统耦合技术难题基础上，建立了包括控制单元内部的水陆耦合（内部耦合）和控制单元之间基于水力联系及物质与信息交换的控制单元之间的耦合（外部耦合）的耦合模拟技术方法，形成了基于流域控制单元的流域水生态承载力分区耦合系统动力学模型，为流域水生态承载力“分区、分期、分级”调控分析方案制定提供了技术平台。

### **(2) 流域容量总量计算与分配技术**

课题在系统分析现行技术标准规定的容量总量计算技术方法基础上，借鉴美国 2000 年以后新研究提出的流域 TMDLs 的技术体系框架，建构了适合我国国情及水情的流域容量总量控制技术体系。课题在系统分析相关技术标准规定的基于区段分割、单一水文条件的容量计算方法的不足的基础上，研究提出了满足流域整体协调要求、以水质达标为核心、兼顾公平和效率的流域容量总量多层次多目标优化分配技术框架与适用技术方法，既有效解决了相关技术标准提出的技术方法导致的容量计算结果的流域上下游不协调问题，也避免以往针对数量庞大的入河排污口及数量同样众多的水质控制断面的技术解决方法（试算法）所存在的组合计算情景数量十分巨大且操作性差的问题。

### **(3) 流域水生态承载力与容量总量管理系统集成技术**

课题针对流域水生态承载力评估调控及流域容量总量计算与分配等流域水污染控制管理技术需求，以有效提高流域水生态承载力调控管理及容量总量管理的业务能力为导向，提出了基于 GIS 和多维信息可视化技术、以水环境系统综合数据库为基础、以流域水生态承载力与总量控制相关模型库为核心的流域数字水环境系统集成技术。课题申请软件著作权 7 项：①易景三维平台软件(著作权号：2009SR017798)；②基于三维 GIS 的河流流域水生态承载力与总量控制集成技术系统(著作权号 2011SR018542)；③流域水生态承载力分析计算模型管理系统(著作权号 2011SR018543)；④基于 WEBGIS 的流域水生态承载力与总量控制信息共享系统（著作权号：2011SR022160）；⑤流域社会经济水环境系统演化综合模型（著作权号：2011SR020328）；⑥流域水生态承载力与总量控制专业数据库管

理系统（著作权号：2011SR022158）；⑦流域生态系统模型与污染物总量分配管理技术平台（著作权号：2011SR072414）。其中“三维 GIS 平台-易景三维平台软件（Evia Sight Platform V1.0）”技术以三维 GIS 底层平台技术为核心，实现了流域三维交互浏览、GIS 分析、信息查询定位、专题图层管理、专题信息三维可视化等功能。

## ➤ 成果应用情况及社会效益

### （1）成果应用及其产业化情况

课题研发的基于三维 GIS 的流域水生态承载力总量控制集成技术系统和太湖流域数字水环境系统平台已经在多处水资源水环境管理部门得到应用。

基于三维 GIS 的流域水生态承载力总量控制集成技术系统的辽河太子河流域系统，已被辽宁省水文水资源勘测局应用于辽宁省关于太子河流域的水资源管理工作中，为进一步深化辽宁省水资源的信息化管理提供了有力的技术支撑。辽宁省水文水资源勘测局在今后的工作中将继续予以进一步的应用和推广。

基于三维 GIS 的流域水生态承载力总量控制集成技术系统的赣江袁河流域系统，已被江西省水资源管理中心应用于江西省关于袁河流域的水资源管理工作中，为实现江西省水资源的信息化管理提供了有力的技术支撑。江西省水资源管理中心在今后的工作中将继续予以进一步的应用和推广。

太湖流域数字水环境系统平台软件已被江苏省水文水资源勘测局常州分局应用于江苏常州的水资源水环境管理工作中，为排污口管理、水域纳污能力核算等水环境管理工作提供了依据，为区域水情预报和水资源管理提供了支持，为区域水资源水环境管理提供了便利为宏观认识区域的水文水质演化过程提供了依据。该平台在江苏省水文水资源勘测局常州分局的应用，不仅为常州市水资源管理提供了有力工具，而且对全面认识和确定洮漏水系水污染的成因与特征、主要污染物的负荷量、污染物来源及空间分布等具有重要科学价值，对常州水环境综合治理与水资源保护方案和措施的制定具有重要的现实意义。

### （2）在国家重大工程、重点项目中的应用情况

#### 1) 国家重点流域水污染防治规范中的应用

##### ● 环保部“十二五”规划方面的技术转化应用

本课题提出流域总量控制管理的水环境模型方法和容量总量计算与分配方



法，基于本课题研究成果，向环保部环境规划研究院提交了《流域水环境总量控制模型研究》报告，中国环境规划院组织的验收认为“研究成果可为“十二五”水污染防治规划编制提供参考”。

- 《辽河流域“十二五”水污染防治规划》应用

在《辽河流域水污染防治“十二五”规划编制大纲》前言中明确指出“国家重大水专项在辽河流域实施了 2 个项目 14 个课题，已经凝练并形成了一批成形的示范关键技术。”“全面体现水专项对“十二五”规划的技术支撑”。

2) 区域水污染防治管理中的应用

- 太湖常州纳污能力计算成果应用

课题组依托在太湖示范区研究成果，承担完成了《常州市武进区太湖流域水（环境）功能区主要污染物纳污能力研究》任务，提出了该区域的纳污能力计算成果，为其水功能区限制排污管理提供重大支持。

**(3) 对提升单位技术创新能力（市场竞争力）的作用**

一是基于课题的研究过程，形成了流域坡面及河道生态水文过程研究试验基地，配备了相对先进的仪器设备，培养了结构合理的研究团队，使承担单位在流域水环境过程机理及模型技术创新性研究能力显著提高。

二是形成了流域水生态承载力、容量总量计算与分配、流域水环境数字化的系列研究成果，进一步夯实了在流域水质目标管理方案方面的研究基础，容量总量业务化管理关键技术及应用方案等方面的技术创新能力进一步加强。

三是积累一批示范流域的系列科学研究数据，包括辽河、太湖、赣江的水文水资源、水环境、水生态及经济社会等方面的系列数据，为在上述研究区的进一步深入研究奠定一定的竞争优势。

**(4) 成果应用所取得的直接经济效益和社会效益**

本课题紧密结合国家和地方政府的实际需求，研究成果具有明显的经济和社会效益。

1) 经济效益

直接经济效益。课题研发的多类模型及流域容量总量管理集成模型软件及其中的多项软件著作权，均已在多个管理部门进行应用，有效地提高了管理部门工作效率，降低了相关工作的经济成本，已在相关应用单位的应用证明中体现。

间接经济效益。作为流域水质目标管理技术体系的重要组成环节，流域水生

态承载力评估与调控和容量总量计算与分配，是在借鉴发达国家流域 TMDLs 的理念的基础上，发展形成的适合我国河湖水系特点的容量总量控制管理体系，部分成果已在国家层面与水质保护有关的规划及重大制度方面（如最严格水资源管理制度）应用，在水污染防治及水资源保护方面发挥了较好引导作用，必将在未来的经济社会建设及河湖健康保障方面产生重大经济效益。

### 2) 社会效益

流域水环境质问题是经济社会广泛关注的重大社会问题，建立从目标总量向容量总量管理制度的转变并实现业务化运行，是能进一步促进流域水质改善的重大制度建设举措。本课题“十一五”研究任务即是对容量总量计算与分配共性技术的研究，研究成果直接支持流域容量总量管理制度建设，因此对国家层面的总量管理制度的完善有支持意义，同时，课题在三个示范区提出了容量总量分配方案和经济社会提调控对策，对示范流域经济社会的“十二五”水污染防治及水资源保护具有支持意义。

课题研究过程中以流域水生态承载力及流域容量总量计算模型技术举办了多次研讨及交流培训会议，参加会议的人员主要来自与水环境相关的管理、科研、高校等单位，人次总计约 300 人次，在流域容量管理理念和关键技术方面的普及推广具有重要意义。

本课题是共性技术课题，对项目中示范流域课题有技术指引责任。课题通过项目组织的技术交流及中期评估研讨会议，系统介绍本课题研究成果，与示范流域课题技术人员共同探讨关键技术问题，为示范流域课题的技术工作提出技术建议，由此产生了良好的示范引领效果。

课题编制了课题标志性成果展板，参加了国家“十一五”水污染防治成果展览，并编制了课题成果宣传小册子，向流域水环境及水资源保护的管理及科研单位发放，将先进的理念和思想传播到基层管理单位和公众，产生良好社会影响。

基于课题研究成果编制了《流域水生态承载力评估技术导则》、《流域容量总量计算与分配技术导则》和《水资源开发利用评价导则》的“水污染调查评价”篇章，其中《水资源开发利用评价导则》已经完成意见征求，《流域水生态承载力评估技术导则》和《流域容量总量计算与分配技术导则》完成专家咨询。多项技术标准的推行，必将产生良好的社会效益。

课题的重点研究成果之一是流域水生态承载力，基于流域水生态健康保障调



控经济社会发展的理念及相对完善的技术体系基本形成,通过流域水环境管理理念的更新,实施以水生态分区为核心的流域水环境管理模式,形成流域河流水环境总量控制方案和适合我国主要污染物的排放限值技术体系,可为我国的水环境治理与改善提供有力的技术支撑,具有明显的社会效益。

