

水环境容量核算方法及其在排污总量控制中的应用

李双双

河南名扬环保工程有限公司 河南 济源 459000

摘要：本文系统阐述了水环境容量的基本内涵与构成，梳理了当前主流的水环境容量核算方法，包括解析公式法、水质模型法、系统优化法、概率稀释模型法和实测反推法，分析了各方法的理论基础、适用条件及优缺点。在此基础上，论述了水环境容量在排污总量控制中的应用框架，涵盖容量总量确定、允许排污量分配、排污许可证限值核定、容量动态更新及总量削减方案制定等环节。研究表明，水环境容量核算正在从静态、确定性的计算向动态、不确定性分析方向发展，与“三线一单”等环境管理制度深度融合，为精准治污、科学治污提供了关键支撑。

关键词：水环境容量；核算方法；总量控制；水质模型；排污许可

引言

水环境容量指一定水域、水文条件和水质目标下，水体能承载的最大污染物负荷，反映其稀释、自净能力的综合体现。容量受水文条件、水质目标、污染物特性和水域形态等多因素控制。长期以来，我国以浓度控制和目标总量控制为主，虽抑制了污染增长，但未能实现水质与排污精准挂钩，部分区域减排后水质仍不达标，或剩余容量未利用。随着“三线一单”和排污许可制度推进，基于水环境容量的容量总量控制成为必然。科学核算容量并用于排污总量分配，是实现“一河一策”、精准治污的技术前提。

1 水环境容量的基本理论与构成

1.1 水环境容量的内涵

水环境容量是环境容量在水体中的具体体现，其内涵包括三个基本属性：一是客观性，容量的大小由水体自身的物理、化学和生物特性决定，不随人为意志改变；二是相对性，容量是针对特定水质目标和污染物种类而言的，目标越严格、污染物毒性越强，有效容量越小；三是动态性，水文条件（如丰、平、枯水期）的季节性和年际变化导致容量呈现动态波动，而非固定不变的常数。从量纲上看，水环境容量通常以单位时间内水体可接纳的污染物质量表示（kg/d或t/a）。对于河流，容量主要取决于流量、流速、降解系数和本底浓度；对于湖泊水库，容量还与水交换周期、沉积物释放等因素相关。

1.2 水环境容量的构成

水环境容量可分解为稀释容量和自净容量两部分。稀释容量指污染物依靠水体的物理混合过程（对流、扩散）被稀释至低于水质标准浓度的能力，其大小与水体流量及污染物背景浓度密切相关。自净容量指污染物通过生物降解、化学转化、吸附沉降等过程被去除的能

力，通常用一级降解动力学描述。两者之和即为总容量。对于保守性污染物（如重金属、部分难降解有机物），自净容量接近于零，水环境容量主要体现为稀释容量；对于非保守性污染物（如氨氮、COD、总磷等），自净容量占据重要份额。此外，根据管理需要，水环境容量可区分为理想容量和有效容量^[1]。理想容量是假设排污口在空间上均匀分布、不考虑混合区条件下计算出的最大理论容量；有效容量则是在考虑实际排污口布局、允许一定混合区范围、满足水质目标的前提下计算的可利用容量。在总量控制实践中，通常采用有效容量作为分配依据。

1.3 水环境容量的影响因素

水环境容量的主要影响因素包括水文条件、水质目标、污染物本底浓度、污染物降解特性及水域形态。水文条件中，流量是最敏感的参数，流量越大容量越大，但同样流量下不同流速和断面形状会导致不同的稀释扩散能力。水质目标越严格，允许浓度越低，容量越小。污染物降解系数受水温、pH、溶解氧、微生物活性等因素影响，同一水体夏季降解系数明显高于冬季，因此冬季往往是容量控制的关键时期。

2 水环境容量核算的主要方法

2.1 解析公式法

解析公式法基于水质迁移转化方程的解析解，通过简化表达式计算容量。对于一维稳态河流，常用S-P模型计算有机物和氨氮容量：

$$W = Q \times (C_s - C_0) \times \exp(Kx/u) + K_d \times C_s \times V$$

其中W为容量，Q为流量， C_s 为水质标准浓度， C_0 为本底浓度，K为综合衰减系数，x为河段长度，u为流速， K_d 为沉降系数，V为水体体积。对于湖泊水库，采用完全混合箱式模型：

$$W = K \times C_s \times V + Q_{out} \times C_s - Q_{in} \times C_{in}$$

该法计算简便、参数需求少,适用于中小型河流的初步估算和规划阶段。但假设条件苛刻(稳态均匀流、完全混合、常数降解系数),难以反映复杂地形、非稳态水文及多点源输入。适用于资料匮乏地区的大尺度估算。

2.2 水质模型法

水质模型法是目前应用最广泛的方法。通过建立对流、扩散、降解等过程的数学方程组,数值求解污染物浓度场,反推容量。一维模型(如QUAL2K、WASP一维版)适用于规则河道、污染物均匀混合的河流;二维模型(如MIKE21、EFDC、WASP二维版)适用于宽浅型河流、湖泊、近岸海域;三维模型适用于大型湖泊、水库和河口,考虑垂向分层。核心步骤包括:划分网格;选择水动力与水质模块;输入边界及初始条件;率定参数(糙率、扩散系数、降解系数等);用实测数据验证;在设计水文条件下(如90%保证率最枯月流量)模拟浓度分布;通过试探法或优化算法确定最大允许排放负荷^[2]。优势是精细刻画复杂地形和非均匀排污条件下的浓度场,模拟多污染物交互作用,结果可靠。不足:建模工作量大、参数率定需充分实测数据、专业门槛高。广泛应用于重点流域污染规划。

2.3 系统优化法

系统优化法将容量核算与排污削减措施优化结合,以最小化削减成本或最大化允许排放量为目标,采用线性/非线性规划或遗传算法求解。决策变量为各排污口的允许排放量,约束条件包括控制断面水质标准、排放上限、总量目标等。目标函数可设为最大化区域总允许排放量或最小化削减总成本。优点是直接输出满足水质标准的排污总量分配方案,避免后续分配矛盾。缺点:对模型参数精度依赖高,求解复杂。主要用于重大流域治理规划。

2.4 概率稀释模型法

传统确定性方法忽略水文随机性,结果偏保守或冒险。概率稀释模型法将流量、流速、降解系数等视为随机变量,基于概率分布计算不同超标风险水平下的容量。核心:使污染物浓度超过水质标准的概率小于允许风险水平(如5%),对应的排放负荷即为容量。常用Monte Carlo模拟(输入参数概率分布如流量P-Ⅲ型、降解系数对数正态分布,随机抽样模拟,统计超标频率)或一阶二次矩法。优点是定量表达不确定性,为风险管理提供依据,适用于水文变幅大的河流。

2.5 实测反推法

通过现场水文水质同步监测数据反推容量。在选定

的河段进行至少一个水文年内(丰、平、枯水期)水位、流量、流速、污染物浓度监测,选取水质达标或接近达标的历史时期,基于物质平衡计算实际接纳负荷作为容量近似值;或利用枯水期上下游断面污染物通量差扣除沿程降解量估算。优势是完全基于真实观测数据,避免参数率定的主观性,结果说服力强,常用于校核模型结果或核定争议容量。前提:需存在水质达标或接近达标的时段,严重污染水体无法直接反推;监测精度和频率影响结果可靠性。

3 水环境容量在排污总量控制中的应用

3.1 容量总量控制的总体框架

基于水环境容量的排污总量控制(即容量总量控制)是我国“十四五”及今后更长时期水环境管理的核心制度。其总体框架可概括为:第一步,根据水功能区划确定各控制单元的水质目标;第二步,选择设计水文条件(通常为90%或95%保证率最枯月流量),采用上述核算方法计算各单元的水环境容量;第三步,调查统计区域内的现有污染源排放量和入河量,通过容量与现状排放量的比较,确定削减目标和允许排放总量;第四步,将允许排放总量在点源(工业、污水处理厂)、面源(农业、城市径流)和内源之间进行合理分配;第五步,将分配结果纳入排污许可证,作为排污单位的排放限值;第六步,建立容量动态更新机制,根据水文变化和治理进展定期复核调整。

3.2 允许排污总量的确定

允许排污总量是容量总量控制的核心指标。在得到水环境容量之后,尚不能直接作为允许排污总量,因为容量通常是指污染物进入水体的最大允许通量(入河量),而实际管理中以排污单位的排放口排放量为基准(排放量),两者之间需通过入河系数进行换算。入河系数取决于排污口与河道之间的距离、污水输送管网的完好程度以及沿途的降解损失^[3]。允许排放总量 = 水环境容量/平均入河系数。对于包含多个控制断面的复杂水域,可能出现上游容量未被充分利用、下游容量不足的情况,此时需要以最严格的控制断面为基准,进行全河段容量协调。常用的方法是划分控制单元,实施“单元总量控制”,即每个单元的排污总量应保证单元下断面水质达标,同时兼顾上下游之间的总量平衡。

3.3 排污总量分配原则与方法

在允许排放总量确定后,需将总量指标公平、高效地分配到各排污单位。分配应遵循以下原则:一是公平性原则,同等类型的排污单位执行相近的削减比例;二是可行性原则,分配结果应在技术上可行、经济上可承

受；三是效率性原则，单位污染物削减成本低的企业可承担更多削减任务，以实现全区域最小化削减成本；四是激励性原则，对已完成超低排放、清洁生产水平高的企业适当放宽排放额度。常用的分配方法包括：等比例削减法（所有排污单位按相同比例削减现有排放量），操作简单但未考虑排污单位间的差异；按贡献率分配法（根据排污口对控制断面浓度的贡献系数分配允许排放量），体现了责任原则；优化分配法（基于线性规划求解最小成本削减方案），经济效率最优但可能引起公平性争议；基尼系数法（参考收入分配基尼系数，兼顾经济、人口、土地等因素），注重社会公平。实际工作中，往往采用多方法组合，先通过优化法确定总削减目标，再按公平原则微调。

3.4 排污许可证限值的确定与动态管理

排污许可证是总量控制落地的法律载体。水环境容量核算结果经政府批准后，作为确定许可证排放限值的依据。对于重点排污单位，许可证应载明主要污染物（COD、氨氮、总磷、总氮等）的年许可排放量和日最大许可排放量。年许可量由分配结果确定，日最大量则根据年许可量、生产负荷波动系数和在线监测精度综合确定。由于水文条件存在年际波动，容量总量控制不应是一成不变的。建议建立“丰水期宽松、枯水期严格”的动态管理机制：在容量较大的丰水期，可适当增加排污负荷或容错空间；在容量最小的枯水设计条件下，严格执行许可限值。当实际水文条件低于设计水文条件（如特枯年份）时，应启动应急限排措施^[4]。此外，每3~5年应对水环境容量进行复核，考虑流域内水量分配变化、水质目标调整、污染物降解能力改变等因素，适时更新许可限值。

3.5 总量削减方案与容量交易

对于现状排放量超过允许排放总量的区域，必须编制总量削减方案。削减方案应遵循“先点源后面源、先直排后间排、先工业后生活”的优先序，明确各年度削减目标、具体工程措施（提标改造、管网完善、生态修复等）和责任主体。削减方案实施后，应通过水质监测验证容量是否得到有效利用。水环境容量作为一种稀缺

资源，可探索实施排污权交易。在总量控制框架下，允许企业之间进行容量指标的转让：治污成本低的企业通过深度削减产生富余容量，出售给治污成本高或新改扩建项目；政府可通过回购或拍卖容量指标，优化资源配置。容量交易的实施需要建立初始容量分配方案、交易规则、监测核算体系和市场监管机制。目前，我国已在多个流域开展排污权交易试点，但水环境容量的时空异质性较空气环境容量更为复杂，交易应限定在同一控制单元和同一时期内，避免跨区域或跨季节交易导致局部水质超标。

4 结语

水环境容量核算方法经历了从解析公式到数值模拟，再到不确定性分析与系统优化的演进，呈现静态到动态、确定性到概率性、单介质到多介质耦合的趋势。方法选择需依据水域特征与管理目标，必要时相互验证。容量在排污总量控制中建立了水质目标与排污负荷的定量关系，推动管理从浓度控制向容量总量控制转变。当前正值水环境管理精细化转型关键期，“十四五”规划要求以水环境容量为底线确定排污总量。应着力解决参数不确定性、面源内源纳入、跨界协调等难点，构建覆盖全国的核算技术体系与动态平台，将结果应用于排污许可、规划环评、入河排污口设置及生态补偿。随着水质监测自动化、水动力模型智能化及大数据技术发展，容量核算将实现近实时预警，为精准、科学、依法治污提供有力支撑。

参考文献

- [1] 崔嵩,贾朝阳,付强,等.河流动态水环境容量核算与影响因素分析[J].东北农业大学学报,2022,53(1):66-76.
- [2] 郝新,王雪蕾,逯颖,等.基于流域水环境容量的面源总氮污染特征及风险评价[J/OL].环境科学,1-14[2026-05-29].
- [3] 雷波,黄一,魏凯,等.典型山区流域水环境容量测算及验证[J].资源节约与环保,2025,(10):87-90+103.
- [4] 邢召鹏,华国芬,刘尚清,等.降雨径流面源污染作用下河道水环境容量计算[J].环境污染与防治,2025,47(3):88-92+100.