

基于指标法的区域水环境承载力评价研究

马颖丽 汪 涛 李 超
保定学院 河北 保定 071001

摘 要：水环境承载力评价是区域水生态安全保障的基础性工作，指标体系法是最常用的技术路径。本文系统梳理指标体系的构建原则、指标选取方法、权重确定技术及综合指数计算模型，构建完整的指标法评价框架。在赋权环节，对比分析层次分析法、熵权法及组合赋权法的适用条件；在综合评价环节，探讨加权综合法、模糊综合评价法及灰色关联分析法的优劣与选择依据。研究表明，合理的指标构建与科学的权重分配是评价结果可靠性的关键，组合赋权与多方法交叉验证可有效提升结论可信度，可为区域水环境承载力评价提供方法论参考。

关键词：水环境承载力；指标体系法；层次分析法；熵权法；综合评价

引言：水环境承载力是指在水环境质量目标和人类活动约束下，水生态系统支撑经济社会发展的最大能力，其量化评价是水环境精细化管理的基础环节。指标体系法通过构建多层级指标体系、确定指标权重并计算综合指数，实现对承载力状态的定量诊断，是应用最广泛的评价方法。然而，当前研究存在指标体系参差不齐、主观赋权随意性大、综合评价方法选择缺乏依据等问题，制约了评价结果的科学性与可比性。本文系统论述指标体系构建、权重确定与综合评价三阶段的方法与实践要点，明确各方法的适用条件与选择依据，为区域水环境承载力评价提供方法论指导。

1 水环境承载力与指标法概述

1.1 水环境承载力的概念内涵

水环境承载力是环境科学和水资源管理领域的核心概念，其内涵经历了从单一水质容量到复合系统支撑能力的拓展演化。早期研究将水环境承载力理解为水体的纳污能力，即水体在满足水质目标前提下所能容纳的最大污染物量；随着可持续发展理念的深入，水环境承载力的概念逐步拓展为包含水量、水质、生态和社会经济等多维度的综合承载能力。当前普遍接受的定义是：水环境承载力是指在特定时期和区域范围内，在维持水生态系统结构完整和功能正常的前提下，水环境系统所能支撑的人类社会经济活动的最大规模和强度。水环境承载力具有系统性、动态性和空间差异性三个基本特征。系统性是指水环境承载力由水资源量、水环境质量、水生态健康和社会经济压力等多要素协同决定，各要素之间存在复杂的耦合关系；动态性是指水环境承载力随气候条件、人类活动强度和技术进步水平的变化而呈现时变特征；空间差异性是指不同区域的自然禀赋和发展阶段不同，其水环境承载力存在显著的空间分异^[1]。

1.2 指标法的基本原理与技术路线

指标体系法是采用多指标综合方式来衡量水环境承载力的评价方法，其基本原理是：将水环境承载力这一抽象概念分解为若干可量化的具体指标，通过分层汇总的方式将多维信息综合为一个数值或等级，从而实现对承载力状态的定量描述。与物理模型法相比，指标法不依赖复杂的数学物理方程，数据需求相对灵活，计算结果易于理解；与单一指标法相比，指标法能够反映承载力系统的多维属性，评价结论更为全面。指标法的完整技术路线包含四个核心环节：指标体系构建、指标数据采集与预处理、指标权重确定、综合指数计算与等级判定。指标体系构建是评价的基础环节，决定了评价内容的全面性和代表性；权重确定是评价的关键环节，直接影响各指标对综合评价结果的贡献程度；综合指数计算是评价的技术实现环节，其计算方法决定了信息汇总的方式。

1.3 指标法的发展与应用现状

自20世纪90年代以来，指标体系法在国内水环境承载力评价中得到了广泛应用，应用场景涵盖流域、湖泊、城市和农业区域等多种类型。早期的研究主要采用简单加权法，指标权重的确定以主观经验为主；进入21世纪后，层次分析法、熵权法、主成分分析等定量方法逐步引入权重确定环节，评价方法的科学性和客观性显著提升。近年来，随着遥感与大数据技术的发展，指标体系的数据来源更加丰富，评价的空间分辨率和时间频率也逐步提高，指标法正在从静态评价向动态监测方向发展。

2 评价指标体系构建方法

2.1 指标体系构建的基本原则

指标体系构建是决定评价质量的首要环节，须遵循

以下原则。科学性原则要求指标的概念界定清晰、物理含义明确、计量方式规范,能够真实反映水环境承载力的内在属性;系统性原则要求指标体系全面覆盖水量、水质、生态和社会经济等维度,避免重要信息遗漏;可操作性原则要求指标数据可通过监测、统计或遥感等手段实际获取,且在时间和空间上具有可比性;独立性原则要求各指标之间的信息重叠程度尽可能低,以降低评价中的重复计算;动态性原则要求指标体系具备对时间变化的响应能力,以适应承载力动态评价的需求。

2.2 指标筛选的方法与流程

指标筛选是构建指标体系的核心步骤,通常采用理论分析法、频度统计法和专家咨询法相结合的方式。理论分析法依据水环境承载力的概念框架和系统构成,从逻辑上推演各维度应包含的指标类型;频度统计法通过对已有研究文献的指标使用频次进行统计,筛选出得到广泛认可的通用指标;专家咨询法通过设计调查问卷征询领域专家意见,对初选指标进行重要性和可行性评定,剔除不符合要求的指标。具体筛选流程为:首先通过理论分析和文献调研建立备选指标库,指标数量一般为初始指标数量的2至3倍,以保证筛选空间;然后采用频度统计方法,统计各项指标在相关文献中出现的频次,保留出现频次较高的指标;最后通过两轮专家咨询对指标进行评分,保留重要性和可行性均达标的指标,形成最终的评价指标体系^[2]。上述流程实现了客观统计与主观判断相结合,既保证了指标的学术共识基础,又兼顾了特定区域的特征需求。

2.3 典型指标体系的结构与构成

水环境承载力评价指标体系通常采用“目标层—准则层—指标层”的三层递阶结构。目标层为水环境承载力综合指数,是评价的最终输出;准则层是水环境承载力的核心维度,一般包括水资源禀赋、水环境质量、水生态健康状况和社会经济压力四个维度;指标层是各维度下的具体可测指标。以区域水环境承载力评价为例,典型指标体系包含以下指标。水资源禀赋维度包括人均水资源量、地表水资源模数、水资源开发利用率等;水环境质量维度包括地表水水质达标率、COD浓度、氨氮浓度、总磷浓度等;水生态健康维度包括水生植被覆盖率、底栖动物多样性指数、生态流量满足程度等;社会经济压力维度包括人口密度、万元GDP用水量、废水排放强度、农田化肥施用强度等。实际应用中,指标的具体选取需结合区域自然条件、数据可得性和评价目标进行适应性调整。

3 指标权重确定方法

3.1 层次分析法

层次分析法是一种将定性判断与定量计算相结合的主观赋权方法,其基本原理是将复杂决策问题分解为有序的递阶层次结构,通过两两比较的方式确定各指标的相对重要程度,最终计算各指标对总目标的合成权重。操作步骤为:构建层次结构模型,将指标体系按目标层、准则层和指标层排列;构造两两比较判断矩阵,由专家对同一层级各要素的相对重要程度进行赋值;计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,经归一化处理后得到各指标的权重;对判断矩阵进行一致性检验,确保专家判断的逻辑一致性在可接受范围内。层次分析法适用于指标间重要性差异明显、可邀请有经验专家进行判断的评价场景,其优势在于能够充分利用专家经验和领域知识,对定性因素进行合理的量化处理。局限性在于专家的主观判断偏差可能影响权重的客观性,且当指标数量较多时,两两比较的工作量和一致性检验的难度显著增加。

3.2 熵权法

熵权法是一种基于数据离散程度确定权重的客观赋权方法,其理论基础是信息熵原理——指标的熵值越小、数据离散程度越大,则该指标在评价中的信息量越大,应赋予更高的权重。计算步骤为:构建原始评价矩阵并对各指标进行标准化处理;计算各指标的信息熵值,熵值越大表示数据越均匀、信息量越小;根据信息熵计算各指标的差异系数,差异系数越大、数据离散程度越高、信息量越大;将差异系数归一化后得到各指标的权重。熵权法的优势在于完全基于数据本身的统计特征确定权重,避免了主观偏差的干扰,具有客观性和可重复性。但该方法对数据质量要求较高,样本量不足或数据异常值时权重计算结果可能偏离实际意义,且完全依赖数据分布可能导致权重分配与指标实际重要程度不符^[3]。

3.3 组合赋权法

组合赋权法是将主观赋权与客观赋权方法进行加权综合的技术,旨在兼顾主观经验判断与客观数据信息两方面的优势,克服单一赋权方法的固有局限。组合权重的常见计算方式为线性加权组合——将层次分析法和熵权法的结果分别赋予组合系数后相加,组合系数的确定可采用乘法归一化或基于优化准则求解。在实际应用中,当专家经验较为成熟且数据质量良好时,主观权重与客观权重的比例一般设定为相近水平;当区域基础数据充分、统计特征明显时,可适当提高客观权重的比例;当评价区域缺乏历史数据或数据质量不可靠时,则

以主观权重为主。组合赋权法通过两种赋权结果的相互校验,能够识别权重结论的敏感性,有助于提升评价结论的稳健性和决策依据的可靠性。

4 综合评价方法与等级划分

4.1 常用综合评价模型

加权综合法是最基础的模型,通过将各指标标准化后的数值与对应权重相乘后求和得到综合指数,计算公式为综合指数等于各指标权重与标准化值的乘积之和。该方法计算简便、结果直观,是应用最广泛的评价模型,但各指标之间的互补性可能导致某一指标严重超载而另一指标显著富余时综合指数仍处于中等水平,掩盖了极端情况。模糊综合评价法基于模糊数学的隶属度理论,通过建立各指标对各评价等级的隶属度函数,采用模糊合成算子计算评价对象对各等级的综合隶属度。该方法的优势在于能够处理评价中的模糊性和不确定性,尤其适用于指标边界值不清晰、等级划分存在过渡区间的场景,但隶属度函数的构建和模糊算子的选择需要较强的主观判断。灰色关联分析法基于灰色系统理论,通过计算评价指标序列与参考序列之间的几何形状相似度来评价承载力水平,对数据量和分布形态要求较低,适用于数据不完整或信息不充分的评价场景,但参考序列的设定对评价结果影响较大^[4]。三种方法各有优势和适用边界,实际应用中可根据数据基础、评价目的和结果要求选择合适的方法,或采用多方法交叉验证以增强结论的可靠性。

4.2 评价等级的划分方法

评价等级的划分是将综合指数的连续值转换为离散的承载力状态标签,是评价结果应用于管理决策的关键转化环节。常用的等级划分方法包括等间距法、分位数法和标杆法三种。等间距法将综合指数取值范围按等分原则划分为若干区间,操作简便但缺乏对实际状态分布的考虑;分位数法根据评价样本的综合指数分布特征确定等级边界,保证各等级样本数量相对均衡,但等级边界值在不同评价轮次间可能波动;标杆法选取典型区域或历史特定时期的评价结果作为参照标杆,通过与标杆值的对比确定评价等级,适用于有清晰管理目标或对照标准的评价场景。等级划分应与管理需求和政策目标对

接,通常划分为“承载富余—临界承载—轻度超载—严重超载”四级。

4.3 评价结果的解释与应用建议

评价结果的解释不应仅停留在综合指数的数值层面,应结合准则层和指标层的评价结果进行结构化诊断。准则层分析可识别承载力的短板维度,例如水资源量不足还是水质恶化为因;指标层追溯可定位到具体问题指标,为精准施策提供靶向。在结果应用方面,承载力评价应服务于空间管控分区、污染减排目标分配和生态补水方案制定等管理场景——对不同承载状态的区域实行差异化管控策略,将评价结果与总量控制指标挂钩,为工程布局提供承载力约束依据。

结束语

指标体系法是区域水环境承载力评价的核心技术手段,其科学性直接决定评价结论的可靠性。本文从指标体系构建、权重确定和综合评价三个环节系统论述了指标法,明确了各阶段关键方法的原理、流程与适用条件。指标筛选需兼顾系统性与可操作性,权重确定宜采用主客观组合赋权,综合评价应结合数据基础选择合适模型并辅以多方法交叉验证。指标法将复杂的水环境承载力问题转化为结构化评价框架,为管理决策提供直观可比的信息基础。未来应强化评价动态性、推动指标法与机理模型融合,并加强评价结果与管控措施的定量关联。

课题: 2023 年保定市科学技术研究与发展指导计划项目“水资源承载力监测预警关键技术研究”(2340ZZ031)

参考文献

- [1]王富强,李鑫,赵衡,等.基于水环境容量和综合指标体系的区域水环境承载力评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(2):24-31.
- [2]王西琴,贾宝珍,姜智强,等.基于产业结构的区域水环境承载力优化方法与例证[J].中国环境科学,2023,43(5):2652-2661.
- [3]张玲,高秀秀.区域水资源承载力评价方法改进及实证分析[J].水资源开发与管理,2026,12(3):29-33.
- [4]陈晨,邓钰,张翔翔.水生态承载力评价指标体系构建研究[J].中国资源综合利用,2022,40(3):50-53.