

# Analysis of Water Supply Scheduling and Ecological Effects in Water Conservancy Projects

Jia Yan

Hydrology and Water Resources Center Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

## Abstract

Based on panel data from the National Bureau of Statistics (2000-2022), this study establishes an evaluation system for water supply scheduling and ecological effects in water conservancy projects. The total surface and groundwater supply volume serves as an indicator of scheduling intensity, while key ecological indicators—including effective irrigation area, flood control area, soil erosion control area, embankment protection area, and flood-affected area—are used to comprehensively assess ecological impacts. By applying the grey relational model to identify dynamic coupling relationships between indicators and combining DEA (Data Envelopment Analysis) with quantitative evaluation of resource input and ecological output efficiency, the research reveals that water supply scheduling structures significantly influence ecological restoration through nonlinear effects. Rational allocation of surface water enhances irrigation efficiency, whereas excessive groundwater extraction exacerbates ecological fragility. These findings provide quantitative decision support for optimizing basin water resource management and strengthening the ecological functions of water conservancy projects.

## Keywords

water conservancy project; water supply dispatching; ecological effect analysis

## 水利工程水资源供水调度与生态效应分析

贾艳

内蒙古自治区水文水资源中心, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

## 摘要

本文基于国家统计局2000—2022年面板数据, 构建水利工程水资源供水调度、生态效应评价体系, 选取地表水、地下水供水总量表征调度强度, 将有效灌溉面积、除涝面积、水土流失治理面积、堤防保护面积、水灾受灾面积作为基础, 充分体现生态效应。运用灰色关联度模型识别指标之间的动态耦合关系, 结合DEA数据包络分析, 量化评估资源投入和生态产出的相对效率。结果揭示供水调度结构对生态修复具有显著非线性影响, 地表水合理配置可同步提高灌溉效益, 而地下水超采则加剧生态脆弱性。研究为优化流域水资源调度方案、加强水利工程生态功能提供量化决策支持。

## 关键词

水利工程; 水资源供水调度; 生态效应分析

## 1 引言

大型水利工程在优化水资源配置、保障国家水安全中具有战略地位, 其调度行为深刻影响区域生态系统的使用功能。近十年, 南水北调、引汉济渭等重大工程相继出现, 大幅度改变了流域水文过程, 但供水调度、生态效应间的定量关系仍然缺乏系统评估。基于此, 本文基于2013—2022年国家统计局数据, 构建双维度评价体系, 将地表水、地下水供水总量表征调度强度, 以有效灌溉面积、除涝面积、水土流失治理面积、堤防保护面积、水灾受灾面积综合反映生态效应。采用灰色关联度分析, 分析调度变量和生态响应间的动态强

度, 继而引入DEA数据包络模型, 从投入—产出视角量化评估水资源配置效率、生态效益的协同水平。该研究主要目的识别当前调度模式中的生态短板, 为实现水利工程从“工程供水”向“生态服务”功能转型提供科学依据, 推动水资源管理、生态保护实现协同发展。

## 2 工程概况

我国水库体系呈现“小而多、大而强”的典型结构。截至2022年底, 全国共建成水库95296座, 其中小型水库数量占比高达94.75%, 但库容仅占据7.2%; 大型水库虽然仅为814座(占比0.85%), 但控制着80.7%的总库容(7979亿 $m^3$ ), 中型水库库容占比12.1%, 该结构性特征决定了水资源供水调度高度依赖大中型水库, 其调度决策对下游水文节律、河湖生态基流、湿地维持具有重要影响。大中型水

【作者简介】贾艳(1970—), 女, 中国河北衡水人, 本科, 经济师, 从事水文水资源研究。

库具有防洪、供水、灌溉、生态调度等功能，其运行方式直接决定区域水生态系统的完整性，成为研究水利工程生态效应的研究对象。

2013–2022 年数据显示，全国多年平均供水总量为 6023 亿 m<sup>3</sup>，仅占水资源总量（28925 亿 m<sup>3</sup>）的 20.8%，资源开发强度总体可控。其中，地表水供水量 4941 亿 m<sup>3</sup>，占地表水资源量（27804 亿 m<sup>3</sup>）的 17.8%，整体呈现持续上升态势；地下水供水量 987 亿 m<sup>3</sup>，占地下水资源量（8190 亿 m<sup>3</sup>）的 12.1%，且呈逐年下降趋势，反映国家地下水超采治理政策初见成效。地表水作为供水主力，其调度灵活性、生态流量保障能力成为平衡供水安全的关键点。上述数据表明，当前水资源配置正从过度依赖地下水向以地表水为主导的可持续模式转型，为后续分析供水调度和生态效应的融合关系提供了基础支撑。

### 3 水利工程水资源供水调度与生态效应分析

#### 3.1 分析思路

本文采用灰色关联分析法量化水资源供水调度方案和生态效应指标间的关联强度，分析调度行为对河流生态流量、水体自净能力、生物多样性等关键生态参数的影响机制。在此基础上，构建输入—输出型数据包络分析（DEA）模型，将供水保障率、调度效率作为输入变量，生态修复成效、水环境承载力为输出变量，科学评估不同调度策略下的综合效益。通过耦合灰色关联度、DEA 效率值，精准识别影响生态—供水协同关系的主控因子，为优化调度规则提供量化依据。

#### 3.2 指标选取

地表水供水总量（W1）和地下水供水总量（W2）作为核心调度变量，直接反映水资源配置结构、利用强度。在生态效应指标选取时，应严格遵循代表性、敏感性与、量化原则，涵盖工程潜在风险：有效灌溉面积（S1）体现农业用水保障能力；除涝面积（S2）表征区域排涝系统效能；水土流失治理面积（S3）衡量生态修复成效；堤防保护面积（S4）反映防洪工程覆盖范围；水灾受灾面积（S5）则作为负面生态响应指标，用于评估调度策略对极端水文事件的缓冲能力。

数据分析显示，2013—2022 年 S1 至 S4 总体呈现持续上升趋势，年均增长率分别为 1.12%、0.87%、4.83%、0.71%，表明水利基础设施持续强化生态系统服务功能。随着 S5 波动不断下降，十年均值为 5903 千 hm<sup>2</sup>，和早期相比，呈现大幅度下降趋势，说明了调度体系在洪涝风险控制中的积极作用。W1 与 W2 分别由 5007 亿 m<sup>3</sup>、1126 亿 m<sup>3</sup> 下降为 4994 亿 m<sup>3</sup>、828 亿 m<sup>3</sup>，总供水量降低为 2.9%，充分体现“以水定需”调控策略的有效实施。

为了消除量纲差异，采用均值标准化法对原始数据无量纲化（见表 1）。结果显示，W1 和 S1–S4 的绝对偏差普遍小于 0.05，尤其在 2017–2022 年间趋于收敛，表明同步增强供水调度、生态正向指标。而 S5 和 W1 偏差波动较大，分析了供水调度对灾害抑制存在非线性响应机制，为后续灰色关联度计算与 DEA 效率评价提供可靠数据支撑。

表 1 2013 年 ~2022 年水资源供水调度与生态效应指标数据

序号	名称	指标符号	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	平均值
1	有效灌溉面积 / 千 hm <sup>2</sup>	S1	63473	64540	65873	67141	67816	68272	68679	69161	69609	70358	67492
2	除涝面积 / 千 hm <sup>2</sup>	S2	21943	22369	22713	23067	23824	24262	24530	24586	24619	24129	23604
3	水土流失治理面积 / 千 hm <sup>2</sup>	S3	106892	111609	115578	120412	125839	131532	137325	143122	149552	156030	129789
4	堤防保护面积 / 千 hm <sup>2</sup>	S4	40317	42794	40844	41087	40946	41409	41903	42168	42192	41972	41563
5	水灾受灾面积 / 千 hm <sup>2</sup>	S5	8760	4720	5620	8530	5410	3950	6680	7190	4760	3410	5903
6	地表水供水总量 / 亿 m <sup>3</sup>	W1	5007	4921	4970	4912	4946	4953	4983	4792	4928	4994	4941
7	地下水供水总量 / 亿 m <sup>3</sup>	W2	1126	1117	1069	1057	1017	976	934	893	854	828	987
8	总供水量 / 亿 m <sup>3</sup>	W	6183	6094	6103	6040	6043	6015	6021	5812	5920	5998	6023

#### 3.3 水资源供水调度和生态效应的灰色关联度分析

##### 3.3.1 灰色关联度分析

本文采用灰色关联度分析法，将地表水供水总量作为参考序列，生态效应指标为比较序列，通过计算各序列间的发展趋势一致性，量化评估供水调度和生态响应之间的耦合关系。设定分辨系数为 0.5，依据最小绝对差和最大绝对差，构建关联系数矩阵，进而求得关联度。结果显示，水土流失治理面积（S3）和地表水供水量关联度最高，达到 0.812，表明供水调度对于生态修复具有较强的控制作用；水灾受灾面积（S5）关联度最低，为 0.637，反映调度策略对于调整

极端灾害事件存在较强的滞后性。

##### 3.3.2 水资源供水调度与生态效应的灰色关联度分析计算

灰色关联度分析结果揭示供水调度和生态效应间非对称响应关系。表 2 汇总 2013—2022 年 W1、W2、五项生态指标的关联度 ri，呈现显著分异特征。

数据表明，地表水调度对于生态系统的正向支撑作用显著<sup>[1]</sup>。S4 关联度达到 0.932，居于首要位置，直接反映堤防体系稳定性高度依赖地表水调配，调度保障了防洪基础设施的持续覆盖；S1（0.902）和 S2（0.869）紧随其后，充分

体现农业水安全、排涝能力对于地表水的强路径依赖；S3 关联度为 0.713，表明生态修复工程虽然受到供水调度影响，但受限于治理时滞、区域本底条件，响应强度弱于工程类指标；S5 仅为 0.526，充分体现水灾受灾面积受到极端降水、下垫面变化等非调度因素影响，单纯增加供水很难抑制发生灾害。相比之下，地下水（W2）各项关联度普遍偏低，最大值 0.699（S4），最小值 0.485（S5），该结果的生态功能配置权重相对较低，且近年严格控制超采政策削弱其生态补水能力。W1 关联度整体高出 W2 约 0.2–0.3，证明地表水是生态效应调控的主要载体。而关联结构呈现“工程防护 > 农业保障 > 生态修复 > 灾害控制”梯度，该排序为调度目标优先级设定提供量化依据，工作人员应在确保堤防安全与灌溉需求前提下，优化生态流量过程，提升水土保持的适应性支持，并协同气象、土地利用等因子，进一步加强灾害强度 [2]。

表 2 汇总 2013—2022 年 W1、W2、五项生态指标的关联度 ri

供水变量	S1 (灌溉)	S2 (除涝)	S3 (水土治理)	S4 (堤防)	S5 (受灾)
W1 (地表水)	0.902	0.869	0.713	0.932	0.526
W2 (地下水)	0.67	0.647	0.552	0.699	0.485

### 3.4 水资源供水调度的生态效应 DEA 数据包络分析计算

本文基于 DEAP 2.1 软件，构建将地表水供水总量（W1）为单一投入、五项生态指标（S1–S5）为的 BCC 模型，开展 2013—2022 年生态效应效率评价。结果如表 3 所示，综合效率（crste）均值达 0.997，其中 2013、2016、2019–2022 年均为 1.000，处于 DEA 有效前沿面，表明该时段地表水调度在既定生态产出下实现资源最优配置。规模效率持续接近 1，纯技术效率也稳定在 0.995 以上，反映调度系统运行机制成熟，管理技术对于生态转化效率具有重要作用。

地下水（W2）调度生态效率整体低于地表水，且规模

报酬波动更大，证明其生态转化路径受到限制，地表水系统在多数年份维持规模报酬不变，说明当前供水规模与生态承载力基本匹配，具备可持续调控基础 [3]。在未来研究中，需要警惕边际效益递减风险，通过精准调度提升单位水量生态产出 [4]。

表 3 水资源供水调度的生态效应 DEA 数据包络分析计算

年份	综合效率 ( crste )	纯技术效率 ( vrste )	规模效率 ( scale )	规模报酬状态
2013	1	1	1	不变 ( crs )
2014	0.998	1	0.998	递减 ( drs )
2015	0.993	0.996	0.997	递增 ( irs )
2016	1	1	1	不变 ( crs )
2017	0.995	0.996	0.998	递增 ( irs )
2018	0.995	0.996	0.999	递增 ( irs )
2019–2022	1	1	1	不变 ( crs )

## 4 结语

本研究融合灰色关联度和 DEA 模型，分析地表水调度对堤防保护、灌溉保障等生态正向指标具有较强的应用效果，且多数年份处于 DEA 有效状态，表明当前调度体系具备较高生态转化效率。地下水生态贡献相对有限，充分体现水源结构优化的必要性。在未来调度方案中，应立足生态承载力阈值，加强过程调控，推动水利工程从“工程供水”向“生态适配型供水”转型，实现水资源安全、生态系统韧性的同步提升。

### 参考文献

- [1] 刘鑫. 水利工程水资源供水调度与生态效应研究分析[J]. 陕西水利, 2024(10):51-53,57.
- [2] 杨子桐, 方国华, 叶健, 等. 统筹防洪、供水、生态的流域水资源系统优化调度研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(4):71-78, 124.
- [3] 舒海波. 抗旱供水工程中水资源配置与调度策略[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(10):172-175.
- [4] 曲丽英, 王雨雨, 游燕燕. 平潭岛三十六脚湖水库引供水调度规则研究[J]. 中国水利, 2025(19):67-72, 66.