



水土保持通报

Bulletin of Soil and Water Conservation

ISSN 1000-288X, CN 61-1094/X



中国知网
CNKI

《水土保持通报》网络首发论文

题目： 榆林市水资源承载力分析与协调发展研究
作者： 马涛，韩双宝，李甫成，李文莉，赵敏敏，李海学
DOI： 10.13961/j.cnki.stbctb.20221012.002
收稿日期： 2022-07-18
网络首发日期： 2022-10-13
引用格式： 马涛，韩双宝，李甫成，李文莉，赵敏敏，李海学. 榆林市水资源承载力分析与协调发展研究[J/OL]. 水土保持通报.
<https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20221012.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-08-26
资助项目: 中国地质调查局项目“黄河流域等重点地区水文地质与水资源调查监测”(DD20221754) 资助
作者简介: 马涛(1991—), 男(汉族), 河北省保定市人, 工程师, 主要从事地下水资源调查评价和研究
工作。Email: b10111213@qq.com。
通讯作者: 韩双宝(1983—), 男(汉族), 甘肃省会宁市人, 高级工程师, 主要从事水文地质与水资源调
查研究工作。Email: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn。

榆林市水资源承载力分析与协调发展研究

马涛¹, 韩双宝¹, 李甫成¹, 李文莉², 赵敏敏¹, 李海学¹

(1.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心保定 071051; 2.陕西省地质环
境监测总站(陕西省地质灾害中心)西安 710054)

摘要: [目的]全面分析榆林市水资源承载力状况, 为水资源开发利用和地区协
调发展提供科学参考。[方法]构建水-经济-社会-生态评价体系, 利用 AHP、熵权
法并结合 Topsis 方法评价榆林市水资源承载力, 引入耦合协调度和障碍度模型分
析区域协调发展水平和承载力主要障碍因素, 结合发展规划进行承载力演化分析
和预测。[结果]榆林市各区县水资源承载力整体处于中等偏弱水平, 榆阳区、神
木市、定边县等存在发展不协调问题, 人口密度大、农业用水量高是榆阳区承载
力主要障碍因素, 生态环境用水需求是神木市主要障碍因素, 水资源本底弱、可
利用量低和水土流失问题是东部区县承载力的主要障碍因素。区域水资源承载力
较 2016 年整体提升, 未来经济社会发展和引水工程实施下, 榆阳区、神木市、
府谷县和横山县水资源承载力提升, 其他区县受经济社会发展等因素影响水资源
承载力进一步弱化。[结论]榆林市水资源承载力和地区协调发展存在局部脆弱和
失衡问题, 应进一步调整用水结构、优化水资源配置, 统筹规划水-粮食安全-生
态保护。

关键词: 榆林市; 水资源承载力; 耦合协调度; 障碍度模型; 发展预测

中图分类号: TV213.4, X24

Analysis and coordinated development of water resources carrying capacity in Yulin City

Ma Tao¹, Han Shuangbao¹, Li Fucheng¹, Li Wenli², Zhao Minmin¹, Li Haixue¹

(1.Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei, China; 2.Shaanxi

Abstract: [Objective] The water resources carrying capacity of Yulin City was comprehensively analyzed, in order to provide scientific reference for the development and utilization of water resources and regional coordinated development. [Methods] An evaluation system was constructed from the perspective of water-economy-social-ecology. AHP (Analytic Hierarchy Process), entropy and Topsis methods were used to evaluate the carrying capacity of water resources in Yulin City. Coupled coordination degree and obstacle degree models were introduced to analyze the regional coordinated development level and the main obstacles to carrying capacity, and the evolution analysis and prediction of carrying capacity were carried out based on development planning. [Results] The water resources carrying capacity indices of all districts and counties in Yulin City are at a medium and weak level, while the development of Yuyang District, Shenmu County and Dingbian County are not coordinated. High population density and high agricultural water consumption are the main obstacles to carrying capacity in Yuyang District. Ecological environment water demand is the main obstacle factor in Shenmu County. The problems of weak water resources background, low availability and soil erosion are the main obstacles to the carrying capacity of eastern counties. Compared with the year of 2016, the regional water resources carrying capacity has been improved overall. Under the future economic and social development and the implementation of water diversion project, the water resources carrying capacity indices of Yuyang District, Shenmu County, Fugu County and Hengshan County are expected to improve, while the water resources carrying capacity indices of other districts and counties are expected to weaken because of economic and social development and other factors. [Conclusion] The water resources carrying capacity and regional coordinated development in Yulin City are fragile and unbalanced in partial regions, so the water structure should be further adjusted, the allocation of water resources should be optimized, and the water-food-safety-ecological protection should be planned as a whole.

Keywords: Yulin City; water resources carrying capacity; coupling coordination; obstacle degree models; development of prediction

水资源是人类生存命脉，在经济社会和生态发展建设中发挥基础支撑作用。我国人均水资源占有量仅为世界水平的 24.4%，面临分布不均、利用率低和潜在污染等问题。在经济社会稳步前进和生态文明建设日趋重要的发展背景下，水资源能否提供持续保障，协调发展要求下如何改善劣势补足短板，需要进行必要分析和探究。水资源承载力是表征水资源荷载能力及对经济社会发展支撑作用的重要指标^[1]，在地区发展尤其国土空间保护开发和水资源优化配置中发挥着重要指导作用^[2]，我国水资源承载力研究起步于二十世纪八十年代末，随着研究不断深入，水资源承载力研究范畴由原来的以水资源为主逐渐向综合考虑水、生态、社会经济等层面扩展，研究方法更加丰富、参考学科领域更加广泛^[3]。在承载力评价基础上，针对评价结果的进一步分析更加深入，如耦合协调分析、指标敏感分析、障碍度分析等^{[4][5]}。这些研究拓宽了水资源承载力的研究广度和深度，为区域水资源管理利用和保护提供了有力的决策依据。

榆林市作为国家重要的能源化工基地、黄河流域中游重要生态屏障和黄土高原生态文明示范区，功能地位明显。水资源是制约该区域经济发展和生态保护的重要因素，水土流失、湖面萎缩、局地水位下降、用水效率低、矿产资源开发用水需求增长等现状问题依然凸显，水资源承载能力面临较大考验，承载力分析研究意义重大。本文结合榆林市发展现状构建水-经济-社会-生态评价体系，采用 AHP 和熵权—TOPSIS 法相结合评价各区县水资源承载力，同时分析水资源与经济社会生态发展的耦合协调程度，确定影响水资源承载力的主要障碍因素，在此基础上结合地区规划、调用水分配和典型指标发展趋势分析区域水资源承载力演化方向。指标体系建立兼顾全面性和区域针对性，指标赋权兼顾主客观方法，将协调发展思想与改善主要障碍因素的思路融入承载力分析，承载力演化与预测充分结合地区规划，为区域经济社会协调发展和水资源优化配置提供有效的参考与依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

榆林市位于陕西省北部，陕甘宁晋蒙五省接壤区，呼包鄂榆城市群重要节点

城市，下辖 2 区 1 市 9 县，面积 $4.29 \times 10^8 \text{km}^2$ 。全市地势西北高东南地，地貌类型由西向东依次为沙漠滩区、沙盖黄土梁峁、黄土梁峁和黄土丘陵。全市多年平均（2000-2020 年）降水量 $198.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ，由东南向西北递减，400mm 降水线沿榆林风沙滩区边界穿过，年际降雨呈增长趋势，2000-2020 年降雨量增速 7.5mm/a 。全区属黄河流域中游，发育“四河四川”（窟野河、秃尾河、佳芦河、无定河和皇甫川、孤山川、清水川、石马川）及陕西最大内陆河八里河和中国最大的沙漠淡水湖红碱淖。多年平均水资源总量 $22 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中地表水、地下水资源量分别占比 70%、75%，重复量 $9.6 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2020 年全区天然径流量 $15.61 \times 10^8 \text{m}^3$ ，相较 1956-2016 年 $17.60 \times 10^8 \text{m}^3$ 和 1956-2000 年 $21.89 \times 10^8 \text{m}^3$ ，呈明显下降趋势。2020 年全市地下水资源量 $16.2 \times 10^8 \text{m}^3$ ，相较以往年份趋势平稳，各区域地下水资源分布不均，西北部萨拉乌苏组松散岩类孔隙含水岩组及下伏白垩系孔隙裂隙含水层富水性较好，东南部黄土下覆石炭-侏罗系含水层富水性较差，各区县中榆阳区最为丰富，风沙滩区地下水资源量显著优于其它地区^[6]。

1.2 数据来源

指标体系数据主要来源：榆林市各区县 2000-2020 年气象、水文站点降雨量、径流量数据；第二次全国土地调查、第三次全国国土调查数据；2000-2020 年《榆林市水资源年报》；2000-2020 年《陕西省水利统计年鉴》；1996-2020 年《榆林市统计年鉴》；2016-2020 年《榆林市水资源公报》；《陕西省水土保持公报》；水利部第一轮、第二轮、第三轮水资源评价（陕西省）；国土资源部第一轮、第二轮地下水资源评价（陕西省）、自然资源部新一轮地下水资源评价（陕西省）；承载力分析预测参考数据来源：《榆林市水资源综合规划》、《榆林市国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》、《榆林市经济社会发展总体规划（2016-2030 年）》、《榆林市“十四五”水利发展规划》。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

榆林市水资源承载力受水资源及其开发利用特征、经济社会发展及生态环境的共同影响，本次指标体系构建秉持协调发展理念与科学性全面性选取原则，将经济、社会和生态相关指标与水资源指标一同纳入考虑。各项指标选取过程中，全面依据榆林市地区实情及指标可操作性原则。

榆林市地处毛乌素沙地与黄土丘陵过渡区域，水资源条件差异明显，部分区域水资源开发利用程度偏高，同时因水质和地下水过量开采等问题部分区域水资源可利用量偏低；各区县供水特征不同，其中地表供水为主区县 8 个，地下供水为主区县 4 个；各区县用水结构不同，农业是榆林最重要的用水产业，2020 年农业用水占比 53.3%，同时工业用水比例正逐年提升。除水质污染风险以外，风蚀沙化和水土流失是榆林市较为典型的生态环境问题，2020 年榆林市水土流失面积位居陕西省第一，全市水土流失面积占国土面积 43.1%，直接影响区域水土保持、径流调蓄和生态健康。榆林市林草面积占比 64%，显著高于其他土地利用类型，林草覆盖率正向反应了区域生态本底水平和水资源涵养能力。

针对以上特征，选取 26 项对榆林市水资源承载力具有较强表征意义的指标，将指标按照数据特征划分为本底类、效率类、演化类和荷载类四种类别，以本底类指标为基础，效率类、荷载类与演化类兼顾，部分以量值计算的指标（如水资源量、降雨量等）采用模数计量，消除面积或人口因素带来的影响和重复计算问题。为更好适配后续 Topsis 方法，指标归一化方法采用向量规范化法^[7]，具体公式为：

$$z_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}$$

式中， z_{ij} 为归一化后的指标值， y_{ij} 为第 i 个样本第 j 个指标的对应值。

表 1 榆林市水资源承载力评价指标体系

决策层	准则层	指标层	计算方法	单位	属性	综合权重	
水资源承载力		水资源总量 A1	统计数据	10 ⁸ m ³	正向本底	0.085	
		降水量 A2	统计数据	10 ⁸ m ³	正向本底	0.064	
		径流深 A3	统计数据	mm	正向本底	0.033	
	水资源	水资源	地表水可利用量 A4	规划数据	10 ⁴ m ³	正向本底	0.053
			地下水可开采量 A5	规划数据	10 ⁴ m ³	正向本底	0.066
			水资源开发利用率 A6	供水总量/水资源总量	%	负向效率	0.041
			地下水开采率 A7	地下水开采量/地下水总量	%	负向效率	0.026

社会	人口密度 A8	人口/面积	人/km ²	负向本底	0.043
	城镇化率 A9	统计数据	%	负向演化	0.030
	人口自然增长率 A10	统计数据	%	负向演化	0.039
	农业用水量 A11	统计数据	10 ⁴ m ³	负向荷载	0.030
	生活用水量 A12	统计数据	10 ⁴ m ³	负向荷载	0.026
	农业灌溉水有效利用系数 A13	统计数据	%	正向效率	0.022
	农业灌溉面积 A14	统计数据	公顷	负向本底	0.046
经济	经济密度 A15	GDP/面积	万元/km ²	负向本底	0.035
	生产总值指数（以上年=100） A16	统计数据	%	负向演化	0.030
	工业用水量 A17	统计数据	10 ⁴ m ³	负向荷载	0.027
	用水效益 A18	GDP/供水量	元/m ³	正向效率	0.034
	工业用水重复利用率 A19	统计数据	%	正向效率	0.029
生态	生态用水率 A20	生态用水量/总用水量	%	正向效率	0.057
	生态环境需水量 A21	统计数据	10 ⁴ m ³	负向荷载	0.031
	废污水排放量 A22	统计数据	10 ⁴ t	负向荷载	0.024
	污染物排放总量 A23	统计数据	10 ⁴ t	负向荷载	0.023
	森林草地面积林草覆盖率 A24	森林草地面积/土地面积	%	正向本底	0.037
	沙化土地占比 A25	沙化面积/土地面积	%	负向本底	0.020
	水土流失程度 A26	水土流失面积/土地面积	%	负向荷载	0.050

2.2 指标权重确定

2.2.1 层次分析法（AHP）

AHP 是判断系统间重要性的主观权重判断方法^[8]。该方法对系统中各指标进

行两两比较构造判断矩阵，利用求特征值的方法，确定各指标权重。本次依据评价指标规模及特征选取 1,2,3...9 作为构造两两比较判断矩阵的标度，分别代表两项指标间相比较从最重要、明显重要、较重要到最不重要的判断级次，具体计算步骤与公式参考庞振凌等^[9]研究，针对分析结果计算一致性指标和平均随机一致性指标，通过一致性检验结果后用于组合权重分析。

2.2.2 熵权法

熵权法基于数据离散度客观判断指标权重，数据无序度越大，信息熵越小，所携带的信息越大，对应指标权重越大。本次研究将指标体系中 26 项指标值采用向量规范法进行数据标准化操作，计算各指标的熵值与信息偏差度，在此基础上计算各指标的熵权，以熵权值作为各指标权重的客观依据，具体计算过程与公式参考徐建新等研究^[10]。

2.2.3 组合权重确定

本次指标体系部分指标差异度较大，熵权是判断此次权重的重要方法，同时结合层次分析法分析权重，在两者基础上，综合考虑主客观赋权方法，利用拉格朗日乘数法在进行约束求解中的优势^[11]对 AHP 和熵权法权重进行联合计算。具体公式为：

$$w_i = \frac{\sqrt{w_{1i}w_{2i}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{w_{1i}w_{2i}}}$$

其中 w_i 为综合权重值， w_{1i} 为层次分析法计算各指标权重值， w_{2i} 为熵权法计算各指标权重值。

2.3 TOPSIS 评判模型

TOPSIS 法是一种逼近最理想解方式的多目标综合评判方法，针对归一化后的原始数据矩阵采用余弦法确定各方案中的最优最劣方案，计算各指标与最优方案、最劣方案距离，对正理想距离、负理想距离采用线型手段计算综合度得分，最后定量精确表征优劣的数据结果^[12]。TOPSIS 法在承载力评价中应用广泛，本次采用向量规范法对 26 项指标进行归一化处理，结合组合权重构建最优和最劣矩阵向量，分别计算榆林市 12 个区县的 正理想解距离和负理想解距离，并结合距离值计算综合度得分，具体计算公式参照杨帆等^[13]研究介绍。

2.4 耦合协调分析

耦合协调模型可分析两个或以上系统之间的协调发展水平^[14]。耦合协调度模型由耦合度 C 和综合发展指数 T 构成，计算公式为：

$$C = \left[\frac{Y_1 \times Y_2 \times Y_3 \times Y_4}{\left(\frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \right)^4} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$T = \alpha Y_1 + \beta Y_2 + \gamma Y_3 + \delta Y_4$$

$$D = \sqrt{C \times T}$$

式中： Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 为水资源、经济、社会、生态四个准则层对应评价指标，该指数由四个准则层内部各指标归一化数值与组合权重综合得到， C 为耦合度， T 为综合发展指数， α 、 β 、 γ 、 δ 为待定系数， $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ ，考虑四个系统之间互相制约同等重要，取 $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 1/4$ ； D 为耦合协调度，用以反应各系统间发展协调水平和地区发展综合水平， D 值大小与发展优劣成正比，耦合协调度等级划分标准见表 2。

表 2 耦合协调度等级划分标准

耦合协调度 D 值	协调等级	耦合协调程度
(0—0.1)	1	极度失调
[0.1—0.2)	2	严重失调
[0.2—0.3)	3	中度失调
[0.3—0.4)	4	轻度失调
[0.4—0.5)	5	濒临失调
[0.5—0.6)	6	勉强协调
[0.6—0.7)	7	初级协调
[0.7—0.8)	8	中级协调
[0.8—0.9)	9	良好协调
[0.9—1.0)	10	优质协调

2.5 障碍因子模型

障碍因子模型依靠因子贡献度、偏离度计算各评价体系障碍度，以障碍度表征承载力系统的主要影响制约因素^[15]，具体计算步骤为：

$$F_j = w_j w_j^*$$

$$I_j = 1 - x_{ij}$$

$$P_j = \frac{F_j I_j}{\sum_{j=1}^n F_j I_j}$$

式中， F_j 为第 j 个评价指标的因子贡献度， w_j 为准则层下指标权重， w_j^* 是指标 j 所属准则层的权重， I_j 为偏离度， x_{ij} 为各指标归一化后的正向数值， P_j 为障碍度。

3 结果与分析

3.1 榆林市水资源承载力分析

综合水-社会-经济-生态四个准则层各项评价指标，确定其综合权重，采用 TOPSIS 方法计算 2020 年度榆林市各区县水资源承载力指数。结果显示，榆林市各区县水资源承载力整体处于中等水平（图 1），其中神木县、吴堡县和榆阳区承载力指数最大，分别为 0.531、0.525 和 0.513，属承载力较强区域，定边县、横山县和绥德县承载指数最小，分别为 0.402、0.408 和 0.415，位于承载力中等和弱临界区域，整体归属承载力中等区。

受水资源等指标影响，榆林市各区县水资源承载力分布北部优于南部，全区水资源和水资源模数较大区域主要分布于西北部风沙滩区，榆阳区、神木市水资源本底优势突出，地表水、地下水可利用量高于其他区县，吴堡县用水效率优势突出，生态用水率、用水效益等指标高于其他区县，同时降雨量高于西北部区县。定边县水资源承载指数最小，受当地水质影响，可利用水资源量有限，同时该区域地下水开采率高于其他区县，按 2020 年统计的水资源年报数据，其农业灌溉水有效利用系数低于其他区县，而农业灌溉面积与农业用水量处于较高水平，水资源承载力面临较大考验。

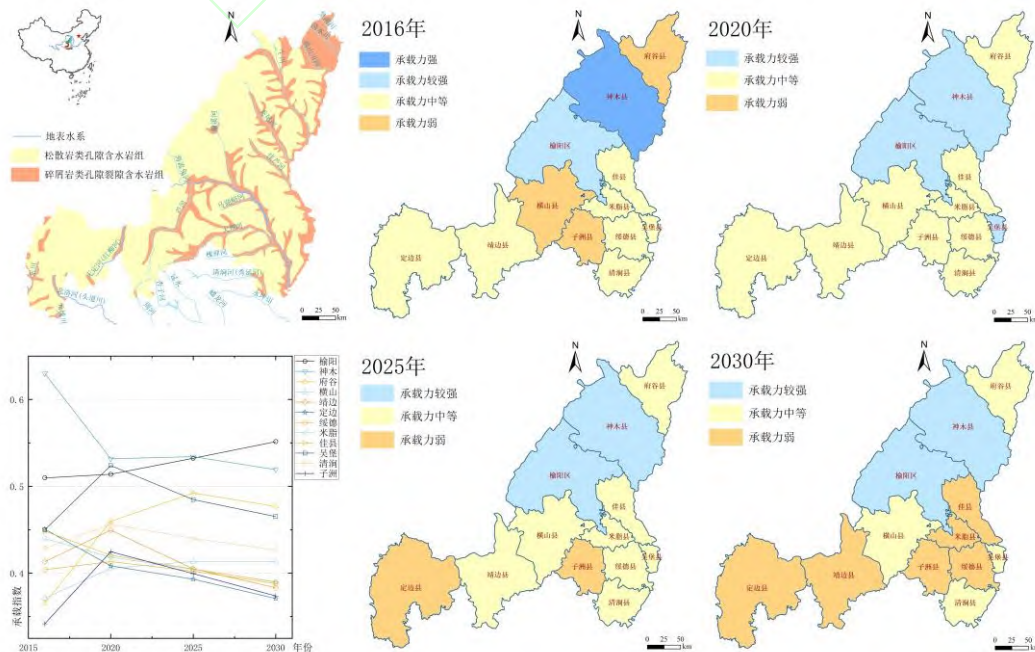


图 1 榆林市各区县水资源承载力时空分布

3.2 榆林市水资源承载力耦合协调分析

按照水-经济-社会-生态整体耦合协调性和准则层之间耦合协调性两个层面，引入耦合度和综合发展指数进行耦合协调分析。研究区各区县整体耦合协调度分属 6 个层级（图 2），其中榆阳区为 3 级-中度失调区，神木市、定边县为 5 级-濒临失调区，府谷县、米脂县为 7 级-初级协调区，横山、靖边、绥德、佳县为 8 级-中级协调区，吴堡县、清涧县、子洲县为 9 级-良好协调区。

分项分析耦合性发现，榆阳区发展不协调性主要来源于经济社会发展与水资源的不匹配，除水资源与生态发展协调性较好外，其他各准则层之间均存在发展失调问题，榆阳区作为榆林市经济社会发展中心区，其人口密度、城镇化率、居民生活用水量等指标高于其他区县，从协调发展角度已对水资源带来超负荷压力；神木市发展失调问题主要体现在生态发展，水资源与生态、经济社会与生态均存在轻度或中度失调，反应到耦合协调性分析及具体指标主要为生态需水量的需求较大^[16]，其生态环境需水量高于其他区县，伴随社会发展及煤炭开采等经济活动，神木市面临天然植被退化、湖泊萎缩、河川径流衰减等问题，通过对典型矿区地下水位监测发现，2018-2020 年矿区地下水位与降雨关联较弱，主要受开采影响，且呈逐年下降趋势，生态问题阻碍神木市经济社会发展，水资源分配中应进一步加强生态考虑。定边县和米脂县发展失调问题主要体现在水资源本底与经济社会生态发展之间的匹配失调，两县水资源模数在各区县处于较低水平，定边县可利用淡水资源量有限，且以地下水开采为主，2020 年地下水开采率为 91%，同时耕地灌溉面积和农业用水量高于大部分区县，水资源与经济社会尤其农业发展关系紧张，存在发展不协调问题；米脂县 2020 年水资源总量 $0.51 \times 10^8 \text{m}^3$ ，仅占全市水资源总量的 2.1%，水资源的紧缺已成为阻碍地区经济社会协调发展的重要原因。

表 3 榆林市各区县水-经济-社会-生态发展耦合协调度

区县	耦合度 C 值	协调指数 T 值	耦合协调度 D 值	协调等级	耦合协调程度
榆阳	0.22	0.40	0.30	3	中度失调
神木	0.40	0.44	0.42	5	濒临失调
府谷	0.89	0.53	0.69	7	初级协调

横山	0.88	0.64	0.75	8	中级协调
靖边	0.98	0.62	0.78	8	中级协调
定边	0.45	0.50	0.48	5	濒临失调
绥德	0.95	0.65	0.78	8	中级协调
米脂	0.54	0.67	0.60	7	初级协调
佳县	0.81	0.73	0.77	8	中级协调
吴堡	0.98	0.80	0.89	9	良好协调
清涧	0.96	0.78	0.87	9	良好协调
子洲	0.93	0.72	0.82	9	良好协调

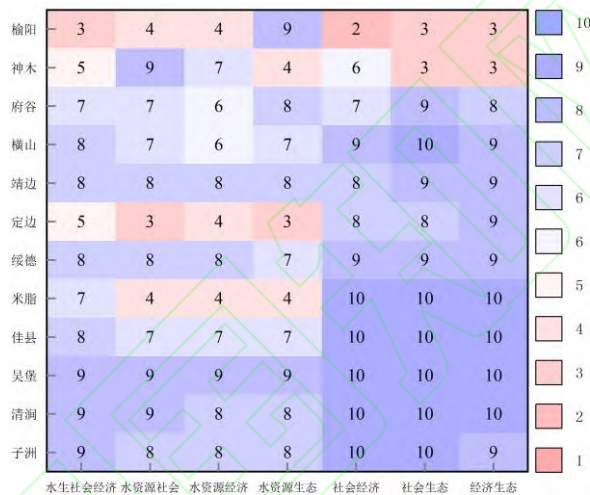


图 2 榆林市各区县耦合协调程度图

3.3 榆林市水资源承载力障碍因子诊断

利用水资源承载力评价结果及各评价指标分布特征，引入因子贡献度、指标偏离度和障碍度指标分准则层和指标层两个层级分析榆林市各区县现状年水资源承载力主要障碍因素。图 3 显示，准则层角度的障碍因素主要为三类，榆阳区承载力主要障碍因素为社会类因素，其障碍度达到 0.44，神木市各项障碍因素较均衡，其中生态障碍因素相对最为突出，障碍度 0.29。其余区县的主要障碍因素均为水资源，米脂县水资源指标障碍度最大为 0.63，水资源指标障碍度最小的府谷县同样达到 0.47，充分反映了榆林市东南部区县水资源本底弱，成为了制约水资源承载能力的主要障碍。

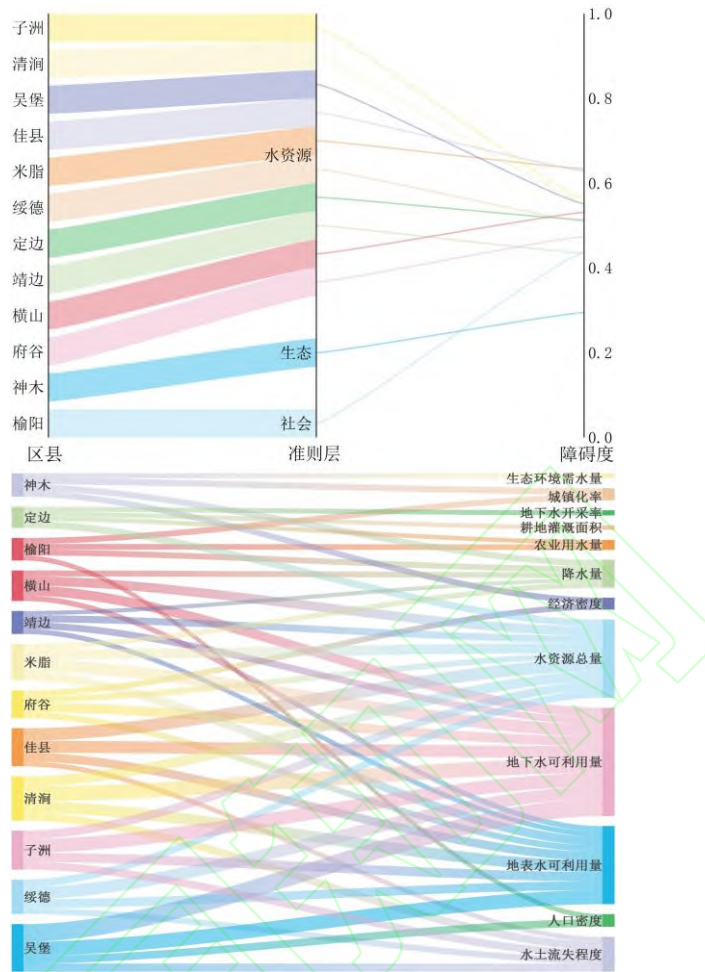


图 3 榆林市各区县障碍因素（上：准则层主要障碍因素；下：指标层主要障碍因素）

进一步从指标层角度分析各区县主要障碍因素，影响榆阳区水资源承载力的主要因素为人口密度、农业用水量和城镇化率，榆林市超 1/4 人口和 1/3 灌溉耕地在榆阳区，人口规模和农业用水较大程度影响了榆阳区水资源承载能力，影响神木市水资源承载力的主要因素为生态环境需水量、城镇化率、和经济密度，加强生态环境建设是提升神木市水资源承载能力的重要途径，其余各区县水资源总量均为制约水资源承载力最主要因素，受地形地貌和含水层富水性等条件影响，榆林市东南部 6 个区县水资源总量较低，6 个区县水资源总和不及榆阳区或神木区，除此之外，地表水、地下水可利用量对靖边县、府谷县及榆林市东南部吴堡、佳县、子洲等县水资源承载力起到了较大阻碍作用，水土流失程度对吴堡县、绥德县、佳县、清涧县、子洲县水资源承载能力起到了一定程度的阻碍作用，近些年榆林市水土保持工作取得长效进展，人为水土流失得到有效控制，但受地质条件和气候等因素的影响，水土流失问题依旧严峻，除榆阳区外其余区县水土流失

程度均高于全省平均值，子洲、清涧等 5 个区县水土流失程度在 50% 以上，中度水土流失程度超 30%，水土流失问题依旧是这些区域水资源承载力的重要障碍因素，进一步加强水土保持工作，不仅能强化当地水资源涵养、地表径流调蓄和生态调节功能，更是提升地区水资源承载能力的重要途径。定边县水资源承载力障碍因素除水资源总量外，还包括地下水开采率、耕地灌溉面积和农业用水量，依据榆林市 2020 年水资源公报和统计年鉴情况，该县农业灌溉 90% 依赖地下水，2020 年农业用水量 1.92 亿方，远超地下水可开采量 0.89 亿方。据最新统测调查数据，白泥井镇等局部区域地下水位较 2002 年累计下降 3.6m，2021 年 1-12 月水位下降 1.3m，地下水储存量减少 $2659 \times 10^4 \text{m}^3$ ，地下水持续下降区面积达 112km^2 ，地下水资源供需关系紧张，水粮问题需引起进一步重视。

3.4 榆林市水资源承载力演化与预测

榆林市各区县呈现不同的水资源承载力演化特征。榆林市水资源公报自 2016 年开始统计发布，同时考虑“十四五”规划结束年 2025 年和中期规划年 2030 年，选取四个典型年份分析榆林市各区县水资源承载力演化规律（图 1）。2025 年、2030 年经济社会指标按照榆林市“十四五”发展规划纲要中人口经济相关指标的规划建议，同时结合榆林东线引黄工程（府谷浪湾引黄、马镇引黄）、盐环定扬黄供水改造工程、神木万镇应急引水工程、府谷应急引黄工程等榆林市 12 项规划水源工程引水供水规划对各区县未来水资源指标进行预测，参考地区水资源综合规划对未来生态需水量等生态指标的预测，利用 AHP+熵权—Topsis 方法得到榆林市水资源承载力演化与预测结果。

2016 年与 2020 年对比，区域水资源承载力水平大部分有所上升，其中府谷、吴堡、子洲县上升程度明显，通过分析 2016-2020 年各项指标数据，各区县经济用水效率、生态用水率等指标均有所提升，同时吴堡、靖边、府谷、横山、子洲县水资源总量较 2016 年有所提升，带动区域水资源承载力提升。神木市、定边县、佳县、米脂县水资源承载力下降，其中除定边县外其他区县水资源总量均有所下降，同时伴随降雨量减少和人口、GDP 增加等因素，定边县社会指标发生较大变化，上世纪八九十年代定边县土壤呈现盐渍化问题，随着地下水位下降，盐渍化缓解，耕地土壤面积不断扩大，加之占补平衡等政策影响，2020 年耕地灌溉面积较 2016 年增长 51%，农业用水量也有较大幅度增长，对水资源承载力

带来较大影响。

未来引水工程实施及经济社会发展等带来区域水资源承载力格局变化。阶段性引水工程实施条件下，榆阳区、神木市、府谷县和横山县水资源增量较大，未来经济社会发展条件下水资源承载力呈现增加趋势，引水措施缓解了神木市生态需水问题、府谷县岩溶地下水开采问题，提升了地区水资源承载能力。伴随地区人口和经济增长，吴堡县、清涧县、靖边县、定边县、子洲县、佳县、绥德县、米脂县水资源承载能力进一步弱化，其中 2025 年定边县、子洲县水资源承载力由中等水平变为弱水平，到 2030 年靖边县、佳县、米脂县、绥德县承载力等级由中等下降为承载力弱水平，经济社会发展等因素导致地区水资源承载力水平呈现下降趋势。

4 结论

受水资源本底、经济社会发展及生态环境需求等影响榆林市水资源承载力呈现中等偏弱水平，榆阳区、定边县、神木市等区县存在不同程度的发展失衡问题。未来国家发展规划和引调水工程实施下，各区县水资源承载力呈现不同发展方向，榆阳、府谷等部分区县水资源承载力逐渐向好，而定边、吴堡等区县则在人口和经济增长因素影响下进一步弱化。

(1) 2020 年榆林市各区县水资源承载力整体处于中等偏弱水平，北部区县好于南部，神木县、吴堡县和榆阳区受水资源总量本底和用水效率等因素影响承载力较强，其余区县承载力处于中等水平，定边县、横山县和绥德县承载力中等偏弱。

(2) 榆林市各区县耦合协调发展状况整体较好，榆阳区、神木市、定边县和米脂县存在发展不协调问题。榆阳区水资源与经济社会发展轻度失调；定边县、米脂县总体发展协调性等级为濒临失调；神木市发展失调问题主要体现在生态发展。

(3) 水资源类指标是制约大部分区县水资源承载力的主要因素，榆阳区主要障碍因素为社会类指标，神木市主要障碍因素为生态类指标。定边县地下水开采率、耕地灌溉面积等指标对水资源承载力有较大影响。

(4) 多数区县 2020 年水资源承载力相较 2016 年上升，神木市、定边县等区县因水资源量下降和耕地灌溉面积扩大等原因承载力下降。伴随经济社会发展

和多项引水工程陆续实施，未来榆阳区、神木市、府谷县和横山县水资源承载力有所上升，其他区县因人口和经济增长等因素，水资源承载力将进一步弱化。

针对水资源承载力分析及协调发展状况提出以下建议：

(1) 进一步协调好区域取水、用水分配，针对地方发展特征调整用水结构，优化水资源配置，加强节水措施实施，提高水资源利用效率。

(2) 提高重点区域发展协调性。进一步加强榆阳区经济发展中的水资源约束力度，提高工业生活用水效率，定边县靖边县等农业种植区进一步协调好水粮关系，确定耕地开发保护范围，加推高标准农田建设，神木市加强生态环境监管和生态建设侧重。

(3) 进一步落实“山水林田湖草沙”综合治理理念，尊重榆林市各区县自然特征，宜草则草、宜林则林、宜荒则荒，加强自然资源综合保护治理，进一步强化水资源在各项活动中的约束和引导作用。

参考文献

- [1] 樊杰. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [2] Ge Wang ,ChanglaiXiao,Zhiwei Qi, et al. Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun city, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 122:1-14.
- [3] Wu C ,Zhou L ,Jin J , et al. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model[J]. Science of The Total Environment, 2019, 710:1-35.
- [4] 阳斌成, 张家其, 罗伟聪,等. 基于 TOPSIS 及耦合协调度的湖南省 2009-2018 年水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报, 2021,41(5):357-364.
- [5] 郑江丽,李兴拼.基于协调性的区域水资源承载力评估模型[J].水资源保护,2021,37(5):30-35.
- [6] 韩双宝, 李甫成, 王赛,等. 黄河流域地下水资源状况及其生态环境问题[J]. 中国地质, 2021,48(4):1001-1019.
- [7] 廖炎平,刘莉,邢超.TOPSIS 中不同规范化方法的研究[J].北京理工大学学

报,2012,(8):871-875,880.

[8]温淑瑶,马占青,周之豪,马毅杰.层次分析法在区域湖泊水资源可持续发展评价中的应用[J].长江流域资源与环境,2000,9(2):196-201.

[9]庞振凌,常红军,李玉英,张乃群,杜瑞卿,胡兰群.层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J].生态学报,2008,28(4):1810-1819.

[10]徐建新,樊华,胡笑涛.熵权与改进 TOPSIS 结合模型在地下水资源承载力评价中的应用[J].中国农村水利水电,2012,(2):30-33.

[11]李帅,魏虹,倪细炉,顾艳文,李昌晓.基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J].生态学杂志,2014,25(9):2700-2708.

[12]徐玖平,吴巍.多属性决策的理论与方法/不确定理论与优化丛书[M].清华大学出版社,2006.

[13]杨帆,陈梓萌,巩世彬.基于 AHP-熵权 TOPSIS 模型的辽宁省各城市土地承载力评价[J].水土保持通报,2022,42(1):144-149.

[14]闵义岚,陈艳,李录堂.陕西省 10 市"土地-经济-环境"耦合协调关系[J].水土保持研究,2021,28(6):420-436.

[15]左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J].水资源保护,2020,36(2):1-7.

[16]朱亮,杨明楠,康卫东,等.神木县地下水功能区划研究[J].人民黄河,2017,39(10):70-79.