黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率及其空间分异

李鸣骥，牛家禾，李晓娟，罗佳芸
（宁夏大学 地理科学与规划学院，宁夏 银川 750021）

摘　要：［目的］测度黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率，揭示其时空演化与长期转移特征，并从网络关联视角刻画城市群间水资源安全结构，为区域协同治理与流域高质量发展提供科学依据。［方法］构建涵盖经济、环境多维指标的非期望产出超效SBM模型评估水资源效率，结合马尔可夫链预测其长期演进趋势，并引入引力模型定量刻画城市群间的水资源安全网络结构。［结果］①黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率整体呈现“阶梯跃升，高位均衡”的演化特征，但省际与城市群间分异显著，形成了晋中依托地下水，宁夏依靠制度创新，呼包鄂乌受困于“中效率陷阱”及陕北能-水协同波动等差异化路径。②空间上形成“双核引领”“三角增长极”“技术极核”等多极协同与梯度分异并存的复杂结构；马尔科夫链预测进一步揭示，各区域效率演进路径差异显著，晋中收敛最快，而呼包鄂乌则陷入中效率锁定。③水资源安全网络结构呈现“双核驱动，边缘依附”“单核极化”及“单极突出，梯度锁定”3类典型模式，表明提升区域水安全需从关系维度统筹节点效率与城际协作强度。［结论］黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率呈现“阶梯跃升，高位均衡”并伴有显著省际分异的特征，其空间格局由多极协同与3类典型水资源安全网络结构共同塑造，亟需实施分区协同调控以支撑流域高质量发展。

关键词：水资源效率；SBM模型；空间分异格局；马尔科夫链；黄河“几字弯”
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2026)04-0372-13　　**中图分类号：**TV213.9，TV213.4

文献参数：李鸣骥，牛家禾，李晓娟，等.黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率及其空间分异[J].水土保持通报，2026，46(4)：372-384. Li Mingji, Niu Jiahe, Li Xiaojuan, et al. Water use efficiency and its spatial differentiation of urban agglomeration at Ω-shaped bend of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 372-384.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.041　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.041**

Water use efficiency and its spatial differentiation of urban agglomeration at Ω-shaped bend of Yellow River

Li Mingji, Niu Jiahe, Li Xiaojuan, Luo Jiayun
(*College of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] The water use efficiency of urban agglomeration at Ω-shaped bend in the Yellow River was measured, its spatiotemporal evolution and long-term transition characteristics were revealed, and the water resource security structure among urban agglomerations was characterized from the perspective of network connections, in order to provide a scientific basis for regional coordinated governance and high-quality development of the basin. [Methods] A super-efficiency SBM model with undesirable outputs incorporating multiple economic and environmental indicators was constructed to evaluate water use efficiency. This was combined with a Markov chain to predict long-term evolutionary trends, and a gravity model was introduced to quantitatively characterize the water resource security network structure among urban agglomerations. [Results] ① The overall water use efficiency of urban agglomeration at Ω-shaped bend of the Yellow River exhibited an evolutionary characteristic of “stepwise escalation, high-level equilibrium”. However, significant inter-provincial and inter-urban agglomeration

收稿日期：2025-07-20　　**修回日期：**2026-03-15　　**采用日期：**2026-03-17
资助项目：国家自然科学基金项目“宁夏城市民族混居社区稳定度评价及其机理研究”(41961028)；宁夏大学研究生创新项目(CXXM2025051)。
第一作者：李鸣骥(1972—)，男(回族)，宁夏回族自治区银川市人，博士，副教授，主要从事城市地理学研究、中阿国别与区域地理。Email：Li_mj@nxu.edu.cn。
通信作者：李晓娟(2001—)，女(汉族)，宁夏回族自治区固原市人，硕士研究生，研究方向为城市地理学。Email：18395089082@163.com。

differentiation formed distinct pathways, including central Shanxi's reliance on groundwater, Ningxia's dependence on institutional innovation, the Hohhot-Baotou-Ordos-Ulanqab area trapped in a "medium-efficiency trap", and the fluctuating water-energy synergy in northern Shaanxi. ② Spatially, a complex structure of multi-polar coordination and gradient differentiation took shape, characterized by "dual-core leadership", a "triangular growth pole", and a "technological pole". Markov chain projections further revealed divergent efficiency evolution paths. Central Shanxi exhibited the fastest convergence, whereas the Hohhot-Baotou-Ordos-Ulanqab area remained trapped in a medium-efficiency lock-in. ③ The water resource security network structure presented three typical models: "dual-core driven, peripheral dependency", "single-core polarization", and "single-pole prominence, gradient lock-in", indicating that enhancing regional water security required coordinating node efficiency and inter-city collaboration intensity from a relational perspective. [Conclusion] The water use efficiency at Ω-shaped bend urban agglomeration of the Yellow River features a "stepwise escalation, high-level equilibrium" accompanied by significant inter-provincial differentiation. Its spatial pattern is jointly shaped by multi-polar coordination and three typical water security network structures, necessitating the implementation of sub-regional coordinated regulation to support high-quality development in the basin.

Keywords: water use efficiency; SBM model; spatial differentiation pattern; Markov chain; Ω-shaped bend of Yellow River

黄河流域作为大尺度河流生态系统,人地关系表现极为复杂,黄河“几字弯”都市圈作为流域“五极”之一,是区域发展增长极和人口、生产力布局的主要载体,并承载着至关重要的战略功能[1]。作为新时代“三北”工程攻坚战三大标志性战役之一,黄河“几字弯”攻坚战是重中之重。中国国家领导人2024年在内蒙古考察时强调,“要全力打好黄河‘几’字弯攻坚战”。水资源是区域资源与环境的关键要素,对于经济社会稳定和生态环境安全有不可或缺的作用[2]。

水资源效率常用于衡量有限水资源条件下,通过优化资源配置、技术创新和管理手段,实现经济、社会与生态效益最大化的能力[3]。围绕这一核心概念,学术界已经形成较为系统的理论与方法体系。国际上,数据包络分析(DEA)[4]、随机前沿分析(SFA)[5]及SBM模型等[6]方法被广泛应用于水资源利用效率的量化评估,并借助Malmquist指数[7]揭示其动态演变特征。近年来,研究逐渐从单纯的技术效率评估转向包含环境与生态要素的综合效率测度,复合指标如水压指数(WPI)[8]、水资源生态足迹(WEF)[9]和绿色效率模型等[10]被引入以深化测度结果。国内研究则在吸收国际方法的基础上,一方面广泛运用耦合协调度模型[11]、熵权法[12]及空间计量分析[13]揭示水资源效率与城市化、产业结构之间的内在关联及空间分异规律;另一方面物联网、数字孪生[14]及GIS等[15]新技术的发展为水资源监测、调度与决策提供了新的技术支撑,机器学习算法(如ANN, LSTM)也逐渐应用于水文模拟与预测,提高了模型的精度与效率[16-17]。现有成果多集中于国家重大战略区域,如京津冀、长三角及长江经济带等中东部发达地区[18-19]。针对黄河流域,研究多从全流域或省际尺度出发[20-21],重点关注其水资源效率的时空格局[20]、影响因素及水-能-粮关联等问题[22]。总体来看,现有研究成果为理解水资源效率提供了坚实的方法与案例基础,但聚焦于黄河“几字弯”这一特定战略区域,仍存在可深化拓展的空间:①现有研究多关注效率值本身的时空分异,对效率等级状态的长期转移路径与稳定性(如“效率陷阱”现象)揭示不足;②多侧重于省际或城市个体分析,对都市圈内部城市群之间的空间关联结构与协同机制缺乏定量网络化解析。针对以上不足,本文在以下方面实现创新:①研究视角方面,引入马尔科夫链模型从状态转移视角揭示效率演化路径与“效率锁定”风险;②研究内容方面,运用引力模型构建都市圈内部空间关联网络,从关系网络视角刻画城市间水资源利用的空间依存格局与协同机制。③研究框架创新。集成非期望产出SBM、马尔科夫链及引力模型,构建“效率评估-动态演进预测-空间网络关联”三维分析框架,实现从个体测度到关系网络的系统性拓展。

本文集成上述方法,以黄河“几字弯”都市圈为研究对象,首先运用SBM模型测度水资源绿色效率,其次采用马尔科夫链分析其效率等级动态演进特征,最后通过引力模型构建空间关联网络并揭示其结构特征,旨在为跨区域水资源协同管控与黄河“几字弯”生态攻坚提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄河“几字弯”都市圈地处黄河上游和中游交汇

区，跨甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西共5个省区，是黄河流域的重要经济腹地。本研究选取银川、中卫、吴忠、石嘴山、呼和浩特、乌海、阿拉善、巴彦淖尔、包头、鄂尔多斯、乌兰察布、榆林、延安、大同、太原、朔州、忻州、吕梁、临汾、晋中、阳泉共21个盟市。研究区内地理条件复杂多样，过境水资源丰富，但存在季节性缺水，随着城市化进程加快，水资源供需矛盾日益突出。

本研究依据水资源安全的空间异质性，将研究区划分为呼包鄂乌、宁夏沿黄、晋中及陕北4大功能单元。基于行政协调与流域功能统一性原则，重点分析前3类城市群，陕北地区因节点规模不足，仅纳入安全水平测度。该划分方式有效规避跨省行政壁垒，兼顾流域完整性与行政可操作性。

1.2 数据来源

研究所用统计数据来源于4省区统计年鉴（2004—2023年）、水资源公报（2003—2023年）、国民经济和社会发展统计公报（2003—2023年）等。网站数据包括中经网统计数据库（https://ceidata.cei.cn/）以及EPSDATA数据统计网站（https://www.epsnet.com.cn/index.html）。本文研究期为2003—2022年，与所获数据匹配，其中部分缺失数据采用线性插值法补齐。

1.3 研究方法

1.3.1 基于非期望产出的超效率SBM模型

水资源效率的评估需统筹经济价值与生态影响，这与Schaltegger&Sturm开创性成果“生态效率”概念内核一致[23]。本研究将这一理念引入城市水资源系统，旨在构建一个能够反映“单位水资源消耗所创造的经济增益与引发的生态损耗之比”的综合评估框架，以更全面地度量黄河“几字弯”都市圈水资源利用的可持续性。

鉴于传统效率模型因忽略工业废水与生活污水等非期望产出，在评估水资源利用效率时存在局限性，易导致效率值高估与政策评估失真。为此，本研究采用Tone提出的非期望产出SBM模型（slack-based measure with undesirable outputs）[24]。该模型的针对性在于将污染物排放纳入生产可能性集约束，通过松弛变量直接测度投入过度与产出不足（包括非期望产出过多），从而更真实地刻画环境约束下的生态经济效率。其核心规划表达式为

$$\rho^{*}=\min\frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{s_{i0}^{-}}{x_{i0}}\right)}{1+\frac{1}{s_1+s_2}\left(\sum_{r_1=1}^{s_1}\frac{s_{r_1^0}^{g}}{y_{r_1^0}^{g}}\sum_{r_2=1}^{s_2}\frac{s_{r_2^0}^{b}}{y_{r_2^0}^{b}}\right)} \tag{1}$$

式中：ρ^{*}为被评价决策单元的水资源利用效率值（无量纲）；m为投入指标个数（个）；s_1和s_2分别为期望产出指标个数和非期望产出指标个数（个）；x_{i0}为第0个决策单元第i个投入指标的实际值（与对应投入指标单位一致）；$y_{r_1^0}^{g}$和$y_{r_2^0}^{b}$分别为第0个决策单元第r_1个期望产出指标和第r_2个非期望产出指标的实际值（与对应指标单位一致）；s_{i0}^{-}、$s_{r_1^0}^{g}$和$s_{r_2^0}^{b}$分别表示投入冗余、期望产出不足和非期望产出过量的松弛变量（单位与对应指标一致）。

$$\text{s.t}\begin{cases} x_0=x\lambda+s_0^{-} \\ y_0^{g}=y^{g}\lambda-s_0^{g} \\ y_0^{b}=y^{b}\lambda+s_0^{b} \\ s_0^{-},s_0^{g},s_0^{b},\lambda\geqslant 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中：x_0，y_0^{g}，y_0^{b}分别为被评价决策单元的投入向量、期望产出向量和非期望产出向量（单位与对应指标一致）；x，y^{g}，y^{b}分别为投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵；s_0^{-}，s_0^{g}，s_0^{b}分别表示投入冗余，期望产出不足和非期望产出过量的松弛向量（单位与对应指标一致）；λ为权重向量（无量纲）。

表1在投入端同时设置“城市总用水量”和“人均生活用水量”。前者刻画用水绝对规模与资源占用压力，后者作为用水强度指标对人口规模标准化，反映居民生活用水集约程度并提升城市间可比性。目前学术界研究亦常采用人均/强度变量：张明斗等[25]，任玉芬等[26]的城市用水效率研究均纳入相关指标，邓捷铭等[27]亦指出应结合用水强度识别缺水成因。该设置契合“总量-强度双控”逻辑，总量约束资源边界、强度衡量效率提升空间；相关供水绩效与节水评价规范亦将人均居民生活用水量列为关键指标，因而其作为投入变量具有规范与实践依据。

表1 水资源利用效率评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of water use efficiency

指标	变量	单位
投入	城市总用水量	m^3
	人均生活用水量	m^3/(人·d)
	就业人数	万人
期望产出	国内生产总值	10^8元
非期望产出	工业废水排放量	10^8t
	城镇生活污水排放量	10^8t

针对研究区内部分城市如太原等可能已处于生产前沿面，传统SBM模型无法进一步区分其效率高下的问题，本研究的另一针对性举措是引入超效率SBM模型（super-SBM）[28]。该模型通过在前沿面构建时排除被评价决策单元本身，允许有效单元的效率值突破1.0的上限，从而精准识别和排序高效率城市之间的细微差异，特别适用于本研究中城市数量

较多、效率分异显著的分析需求。其目标函数如下:

$$\rho^{*}=\min\frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\bar{s}_{i0}}{x_{i0}}\right)}{1+\frac{1}{s_1+s_2}\left(\sum_{r_1=1}^{s_1}\frac{s^{g}_{r_1^{0}}}{y^{g}_{r_1^{0}}}\sum_{r_2=1}^{s_2}\frac{s^{b}_{r_2^{0}}}{y^{b}_{r_2^{0}}}\right)} \tag{3}$$

$$\text{s.t}\begin{cases}\overline{x_0}=\sum\limits_{j=1,\neq k}^{n}\lambda_j x_j\\ \overline{y_0^{g}}=\sum\limits_{j=0,\neq k}^{n}\lambda_j y_j^{g}\\ \overline{y_0^{g}}=\sum\limits_{j=0,\neq k}^{n}\lambda_j y_j^{g},\ \overline{y_0^{g}}\geqslant 0,\lambda\geqslant 0\\ \overline{x_0}\geqslant 0,\ \overline{y^{g}}\geqslant\overline{y_0^{g}},\ \overline{y^{b}}\geqslant\overline{y_0^{b}},\lambda\geqslant 0\end{cases} \tag{4}$$

式中:$\bar{y}_0^{g}$,$\bar{y}_0^{b}$分别表示剔除被评价单元k后,由其他决策单元线性组合形成的投入、期望产出和非期望产出参考值(单位与对应指标一致);x_j,y_j^{g},y_j^{b}分别为第j个决策单元的投入向量、期望产出向量和非期望产出向量(单位与对应指标一致);x_k,y_k^{g},y_k^{b}分别为被评价决策单元k的投入向量、期望产出向量和非期望产出向量(单位与对应指标一致);λ_j为第j个决策单元的权重系数(无量纲);n为决策单元总数(个);$j\neq k$表示构造前沿面时剔除被评价单元k。

1.3.2　马尔科夫链

基于离散时间马尔科夫链(表2)构建水资源效率状态转移模型,采用自然断点法将效率值划分为低(0~0.3)、中(0.3~0.5)、高(0.5~1.0)3类状态,据此构建3×3转移概率矩阵。该矩阵主对角线反映状态持续性,非对角线揭示跃迁路径,有效量化了各城市群效率演化的路径依赖特征,为差异化调控提供依据。

表2　马尔科夫转移概率矩阵

Table 2　Probability matrix of Markov transition

$t/t+1$	E_1	E_2	E_3
E_1	P_{11}	P_{12}	P_{13}
E_2	P_{21}	P_{22}	P_{23}
E_3	P_{31}	P_{32}	P_{33}

矩阵中的元素P_{ij}表示在t时刻城市水资源效率属于i类型而在$t+1$时刻属于j类型的概率,例如P_{11}表示城市在t时刻城市水资源效率类型为1类在$t+1$时刻仍属于1类型的概率,公式为

$$P_{ij}=\frac{z_{ij}}{z_i} \tag{5}$$

式中:z_{ij}表示t时刻水资源效率属于i类型在下一时刻转移为j类型城市数量的总和;z_i表示水资源效率属于i类型城市数量的总和。

基于马尔科夫链的遍历性理论,黄河“几字弯”都市圈水资源效率系统经充分转移后将收敛于稳态概率分布(stationary probability distribution)。该稳态具有时间齐次性,表征区域效率演化的长期均衡格局,其收敛速度由转移矩阵的次优势特征根模值决定,可为长效政策制定提供数理依据。

1.3.3　水资源安全引力模型

引力模型源于物理学引力公式,是描述空间相互作用的基本函数。城市体系的本质是由相互作用区域所组成的集合体,城市引力模型是探讨城市经济空间的重要研究方法。传统城市引力模型公式为

$$I_{ij}=G\times\frac{Q_i\cdot Q_j}{D_{ij}^{2}} \tag{6}$$

式中:I_{ij}为城市i与城市j间的相互引力;Q为两城市的综合质量;D为城市间地理距离,其指数为2;G为引力常数,通常取1。

为进一步探究水资源综合安全水平协作网络结构,需要构建网络关系,其中节点属性包括水资源基础安全指数和水资源效率安全指数(基于CCR模型的超效率结果)。水资源安全质量公式为

$$Q=\sqrt[2]{\mathrm{WSI}\cdot\mathrm{WUE}} \tag{7}$$

式中:Q为城市水资源安全质量;WSI为水资源基础安全;WUE为水资源效率安全。基于修正后的城市水资源—经济耦合引力模型公式可总结为

$$\mathrm{CWS}_{ij}=k\frac{Q_i\cdot Q_j}{D_{ij}^{\beta}} \tag{8}$$

式中:CWS(collaboration water resources security index)用于表示水资源安全协作指数;CWS_{ij}为水资源安全协作网络结构引力强度;Q_i,Q_j分别为城市i和城市j的水资源安全质量;k为标准化常数;β为距离衰减指数,本研究设为2;D_{ij}通常为城市间地理距离。

本研究的目标为水资源安全视角下的城市网络结构,而城市经济能成为影响水资源利用安全水平的直观体现,因此选取经济距离(相对经济差异),以两城市GDP相对差异作为测度依据。相对经济差异公式为

$$D_{ij}=\frac{\left|\mathrm{GDP}_i-\mathrm{GDP}_j\right|}{\mathrm{GDP}_i+\mathrm{GDP}_j} \tag{9}$$

式中:D_{ij}为城市i与城市j之间的相对经济差异;GDP_i为i城市GDP,GDP_j为j城市GDP。

为解决因水资源安全质量Q值偏小导致的引力值过低问题,本研究将引力常数k设定为100进行线性缩放。该处理仅扩大数值区间以增强可视性,未改变城市间引力的相对强弱与空间秩序,以保证分析结果的可靠性。

2 结果与分析

2.1 水资源效率水平特征分析

在评估水资源效率时，需将水环境污染作为非期望产出纳入考量，构建以水资源投入与污染排放最小化、经济产出最大化为目标的分析框架。该方法可有效衡量各城市水资源高效利用与绿色发展水平。基于非期望产出的SBM模型分析表明（图1），2003—2022年黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率呈3阶段演化：低速积累期（2003—2007年）效率从0.066升至0.162，年均增长25.8%；政策驱动跃迁期（2008—2016年）受节水法规推动，2008年效率跃升47.3%，后因经济与资源博弈波动，2014年回调4.2%；技术革新均衡期（2017—2022年）智能管控技术推动2017年效率跃升46.4%并突破0.7阈值，2021年达峰值0.776后进入高位均衡，2022年回落至0.728，体现系统动态调整。整体效率增长11.03倍，2008年与2017年的两次跃升揭示了“政策触发响应-技术突破阈值”的协同驱动机制。2019年后系统稳定性下降，波动熵值增至0.32（较前期上升113%），变异系数扩大至10%，表明系统在高位运行下面临结构性挑战，生态经济博弈诱导其进入相空间漂移阶段。

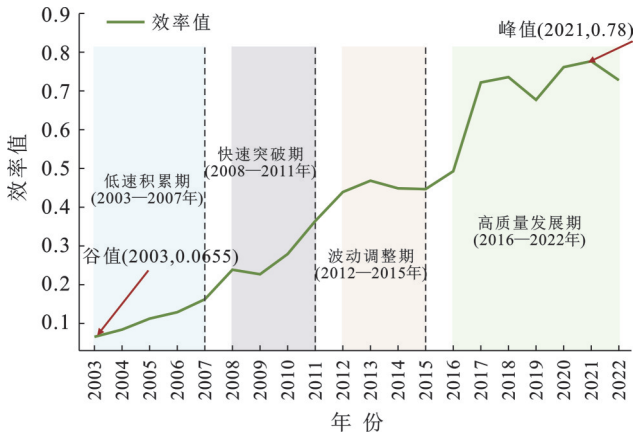


图1 都市圈整体水资源效率年均变化趋势及阶段（2003—2022）

Fig.1 Trends and stages of annual average changes in overall water use efficiency in urban agglomerations (2003—2022)

基于SBM模型的实证研究表明，2003—2022年黄河“几字弯”都市圈水资源效率均值增长10.9倍，但呈现显著时空分异，演化具有政策响应异质与空间分形耦合特征（图2）。重大工程与制度创新驱动了效率跃升：银川（2013—2015年CAGR=10.8%）节水技改实现ΔE=0.406的提升；阳泉（+175.8%）与晋中（+236.1%）因全域配置实现超边际增长。同时存在三重路径锁闭：石嘴山（2015年峰值1.007）与吕梁（2013年峰值1.021）因产业转型滞后而效率衰减；榆林-延安受超采治理影响效率下降>35%；朔州工程呈脉冲-回归周期，反映效益递减。区域韧性分异明显：鄂尔多斯维持0.7～1.1高稳态区间（C_V<0.15），太原持续优化（CAGR=14.2%），包头（5.3%）与呼和浩特（5.1%）形成产业转型增长极。破解“效率-韧性”悖论需构建工程—制度—产业三螺旋治理框架，推动流域整体帕累托改进。

研究区水资源效率空间分异呈现多尺度动态重构特征（图3）。2003—2022年，宁夏沿黄城市群极化效应强化，银川-石嘴山双核主导效率数量级增长；吴忠、中卫等农业型城市效率变异系数超0.35，显示其产业系统脆弱性。呼包鄂乌区域增长极重构为鄂尔多斯-包头-乌海三角结构，其中乌海工业节水技改推动ΔE>0.8的跃迁；乌兰察布、巴彦淖尔效率变程与生态红线政策显著负相关（r=−0.72）。晋中城市群呈核心-边缘分异，太原-阳泉-晋中技术密集区形成高值集聚簇（均值>1.25），大同-朔州-忻州因高耗水产业制约呈现南北向效率梯度（斜率−0.17）。陕北生态区凸显能源-水效协同，榆林稳居效率高位（>1.3），延安受地形约束波动显著（C_V=0.28）。全域演化遵循“单核点状→多极网络”跃迁规律，核心城市效率增长存在约5±1 a的政策响应滞后期。分异机制受农业系统脆弱性、生态-地形复合约束及高耗水产业路径依赖三阶要素驱动，为流域水资源协同管控提供了多尺度解析框架。

2.2 水资源利用效率转移矩阵

对水资源效率水平特征分析数据进行ADF检验，结果表明序列平稳。为进行马尔科夫预测，需将连续效率值离散化为状态：以三大城市群及陕北地区年均效率值为样本，划分为低（E_3）、中（E_2）、高（E_1）3个效率等级，阈值设为：$0 \leqslant E_3 < 0.3 \leqslant E_2 < 0.5 \leqslant E_1$。

表3显示宁夏沿黄城市群水资源系统呈现三重锁定：结构固化型（52.6%，如吴忠粗放灌溉）、极化锁定型（36.8%，如银川水权交易稳定态）及转型黏滞型（10.5%，如石嘴山节水效益递减）。呼包鄂乌城市群呈倒U型阻滞：持续陷落型（42.1%，如阿拉善）、脆弱稳态型（10.5%，如鄂尔多斯煤化工水循环）与高黏滞集聚型（47.4%，如包头效率区间徘徊）。晋中城市群技术外溢受限：路径依赖型（42.1%，如吕梁焦化）、封闭稳态型（26.3%，如太原闭环水系统）及改造惰性型（31.6%，如忻州受市场竞争制约）。陕北地区则形成高效率主导下的梯度演进格局：低效率渐进改善型（23.7%，如榆林部分时期主要在低效率与中效率之

间转移)、中效率跃升型(18.4%,如榆林部分年份表现出由中效率向高效率跃迁的趋势)和高效率稳定型(57.9%,如延安长期维持在高效率状态)。

2.3　水资源利用效率预测

为检验马尔科夫链预测结果的可靠性,首先验证模型的鲁棒性。①初始敏感性分析:以宁夏沿黄城市群为例,将初始概率随机扰动±10%,进行状态转移模拟。结果显示,40 次转移后 E_1 概率均收敛于 98.5%~99.3% 区间(σ=0.21%),表明稳态分布对初始条件具有强稳定性。②历史回溯检验:对比 2015~2022 年呼包鄂乌城市群实际效率演变与模型预测值。实际 E_2 概率年均增长 2.1%,与预测值 2.3% 偏差仅 0.2%,拟合优度 R^2 达 0.94,验证了转移概率矩阵的可靠性。③参数敏感性测试:将 E_1 阈值从 0.5 调整为 0.6 后,晋中城市群的稳态 E_1 概率仍高于 98%,收敛路径趋势一致,表明模型对分类标准具有适应性。

综上所述,模型在初始扰动、历史回溯及参数调整下均表现稳健,结果可靠。

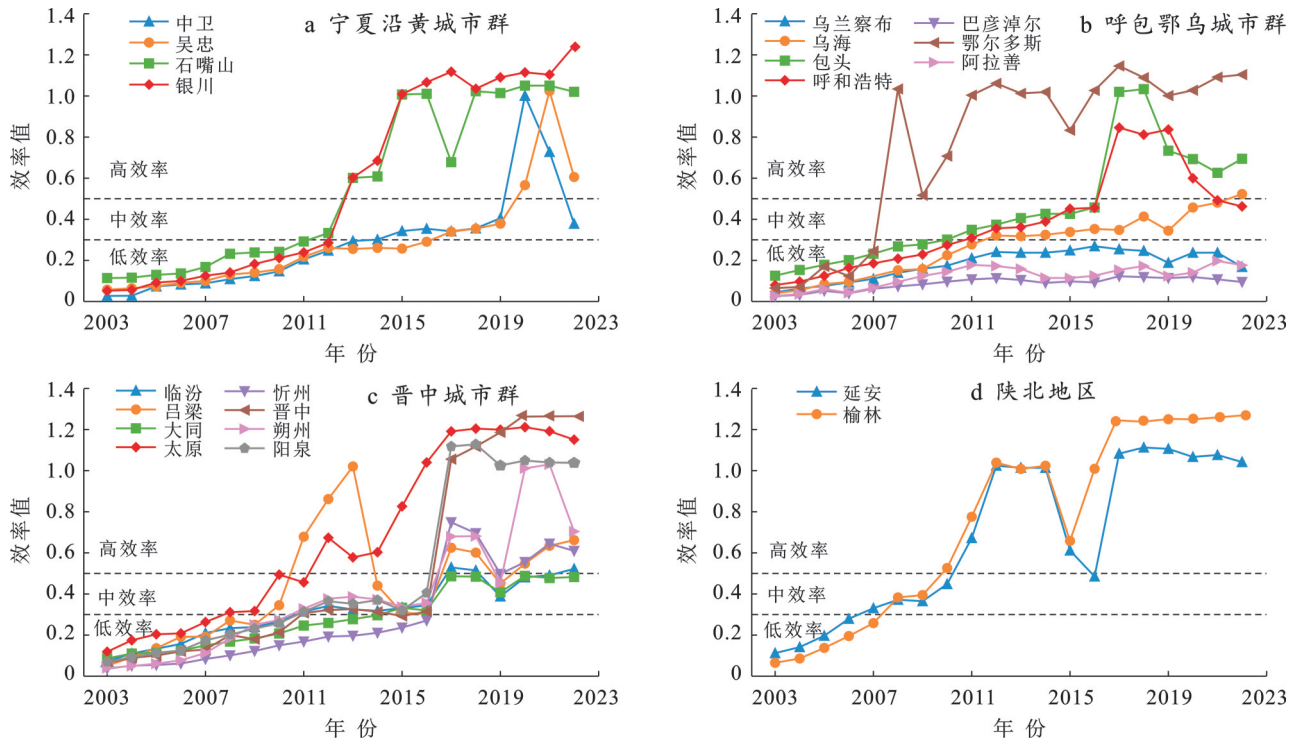
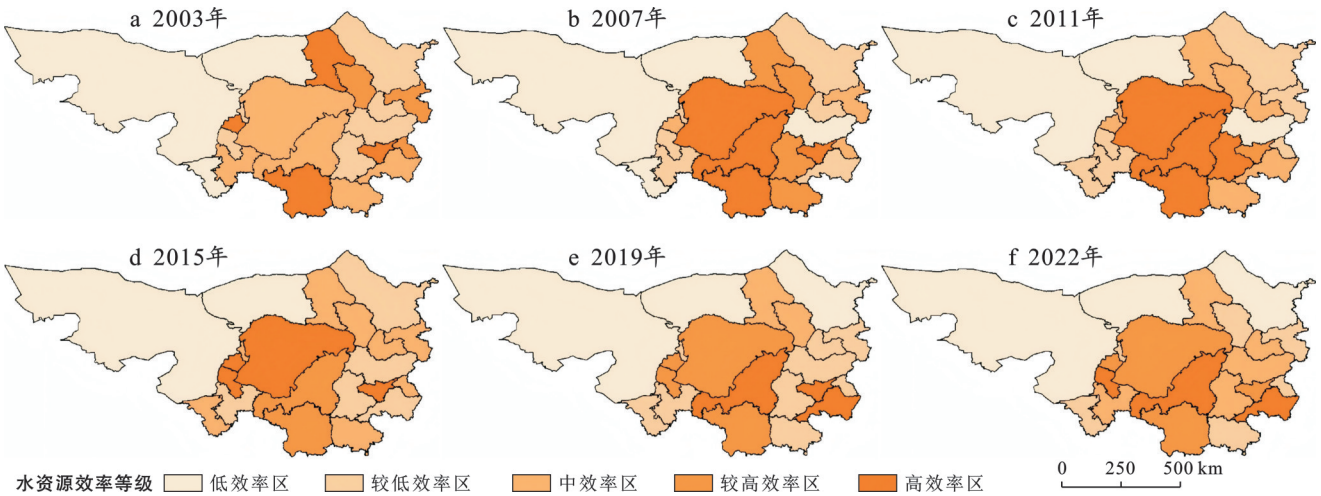


图 2　2003—2022 年各城市群水资源效率变化趋势

Fig.2　Trends in water use efficiency in urban agglomerations (2003—2022)



注:基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作。仅进行研究区域裁剪与专题要素叠加,行政边界未作修改。下同。

图 3　2003—2022 年都市圈水资源效率时空分布

Fig.3　Spatiotemporal distribution of water use efficiency in urban agglomerations (2003—2022)

表 3 黄河“几字弯”都市圈水资源效率类型马尔科夫转移概率矩阵

Table 3 Markov transition probability matrix for water use efficiency types of urban agglomerations at Ω-shaped bend of Yellow River

都市圈	$t/t+1$	E_1	E_2	E_3	状态占比(n)
宁夏沿黄城市群	E_1	1	0	0	0.368
	E_2	0.500	0.500	0	0.105
	E_3	0	0.100	0.900	0.526
呼包鄂乌城市群	E_1	0.500	0.111	0	0.105
	E_2	0.500	0.889	0.125	0.474
	E_3	0	0	0.875	0.421
晋中城市群	E_1	1	0.167	0	0.263
	E_2	0	0.833	0.125	0.316
	E_3	0	0	0.875	0.421
陕北地区	E_1	0.778	0.222	0	0.237
	E_2	0	0.571	0.429	0.184
	E_3	0	0.045	0.955	0.579

基于马尔科夫链的预测分析表明，研究区各城市群水资源效率演化呈现显著差异（图 4）：宁夏沿黄城市群经过 40 次状态转移后实现单极化收敛，高效率（E_1）概率从初始 36.8% 跃升至 99.0%，主要得益于银川水权交易制度的深化和工业用水重复利用率的提升；呼包鄂乌城市群则陷入“中效率陷阱”，稳定状态下中效率（E_2）概率高达 81.3%，反映出包头等城市工业用水效率提升乏力；晋中城市群表现出最优的收敛特性，E_1 概率最终达 99.4%，太原的闭环水系统建设成效显著；而陕北地区展现出超速收敛特征，仅需 14 次转移即实现 99.9% 的 E_1 概率，这主要得益于榆林矿井水回用技术的突破和延安生态建设的协同效应。各区域的差异化收敛路径揭示了水资源效率演进中的多重锁定效应与技术扩散壁垒。

2.4 水资源安全网络引力强度

宁夏沿黄城市群的水资源安全引力格局呈单极辐射模式，以银川为核心，并逐步向多中心网络演进（图 5）。2007 年银川与石嘴山引力值为 640.15，显著高于吴忠与中卫间的 290.32，反映引黄灌区与干旱带基础设施差异。2012 年银川与吴忠间引力跃升至 959.64。2016 年后，石嘴山通过火电空冷技术改造，2022 年与银川引力强度达 4 243.70，较 2007 年增长 5.6 倍；中卫依托灌区现代化改造，与吴忠引力突破 1500，推动农业用水效率与区域协同能力持续提升。从空间分异机制来看，输水技术提升压缩了空间约束，2022 年银川与中卫间引力强度达 2 399.62，输水损失率明显下降；产业节水标准差异形成梯度传导压力，石嘴山与银川间引力强度实现年均 12% 的增长率；而生态补偿机制缺位则加剧了边缘区域的脆弱性，盐池县等干旱区与核心城市间的引力值长期低于 500，显示出协调机制对区域均衡发展的重要性。

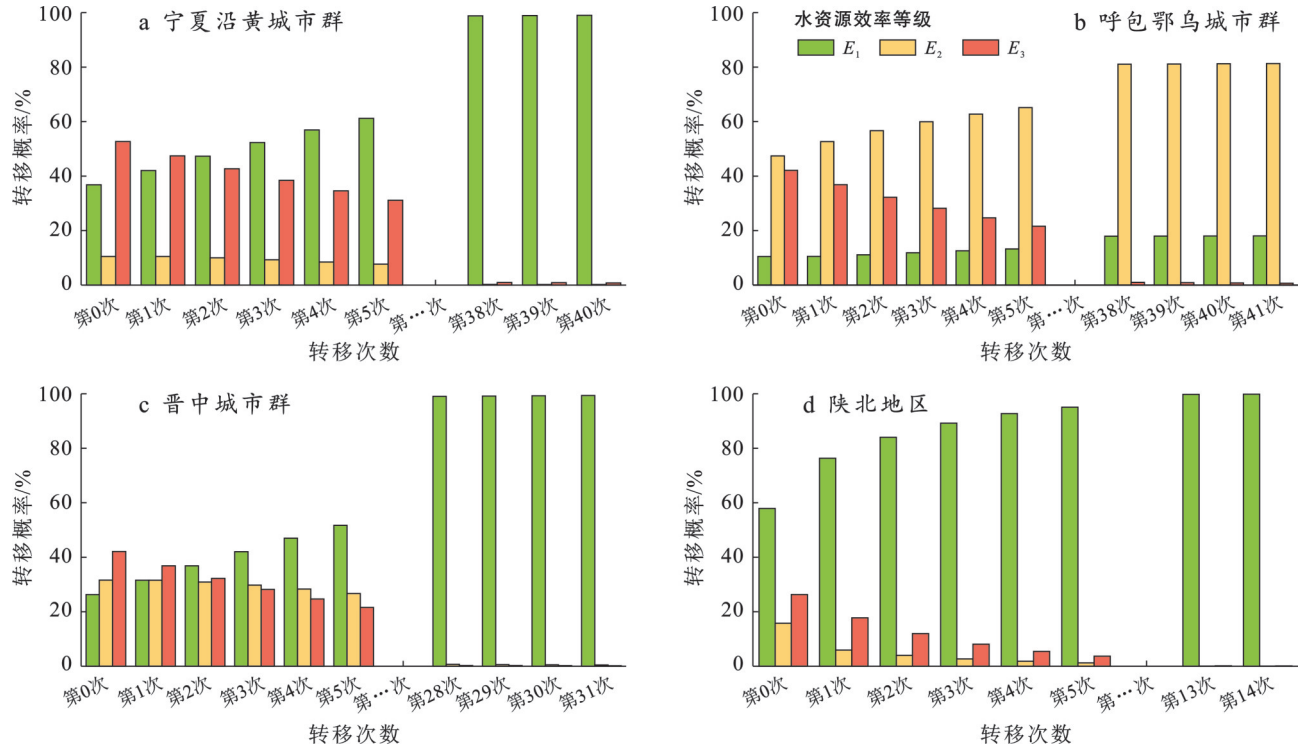


图 4 都市圈水资源效率类型有限次状态转移概率分布

Fig.4 Finite-time state transition probability distribution of water use efficiency types in urban agglomerations

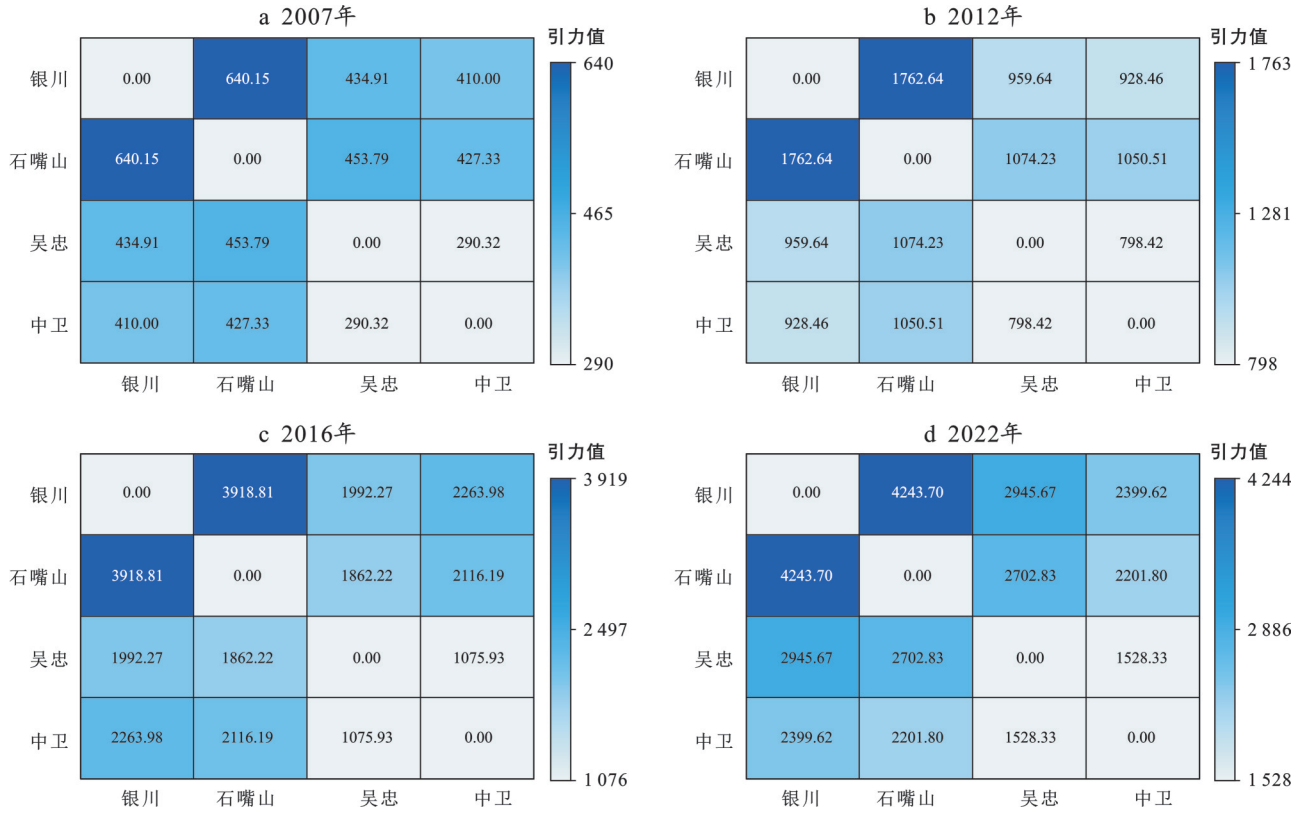


图 5　宁夏沿黄城市群水资源安全结构引力矩阵

Fig.5　Gravity matrix of water resource security structure of Ningxia urban agglomeration along Yellow River

呼包鄂乌城市群水资源安全引力演化呈现显著的核心—边缘结构。从该城市群水资源安全结构引力矩阵可见(图 6),2007 年呼和浩特与包头间引力值达 900.07,标志双核结构形成;至 2012 年,该引力值跃升至 1 494.29(增幅 66%),而鄂尔多斯因煤化工循环水系统投运,与呼和浩特引力强度突破 3 000,形成三角增长极。边缘区域中,阿拉善盟因生态补水缺失,2022 年与巴彦淖尔引力值仅 495.56,凸显荒漠区交互脆弱性。2016 年后格局持续强化,鄂尔多斯始终保持最强联系度,反映核心城市协同深化与边缘区域依附并存的网络特征。从空间分异特征来看,产业用水结构差异首先导致节点地位分化,鄂尔多斯通过降低单位煤产量水耗成功转型为引力增长极。输水设施建设显著重塑空间关联格局,2016 年竣工的引黄入呼工程使呼和浩特与巴彦淖尔引力强度从 467.00 大幅提升至 882.59,渠系利用系数也由 0.65 提高到 0.73。最后,政策调控有效强化了核心城市辐射能力,水资源管理条例的实施推动包头对乌兰察布引力强度实现年均 8.7% 的增长,技术扩散半径延伸至 150 km。

晋中城市群水资源安全引力格局呈现显著的中心突出模式(图 7)。2007 年引力结构显示,太原与阳泉间引力强度为 904.63,而忻州与吕梁间仅为 567.27,反映出资源型与农业主导地区在水资源利用上的差异。太原通过建设煤基产业闭环水系统,显著降低单位钢产量新水消耗,推动其与晋中间引力值由 2016 年的 834.83 跃升至 2022 年的 2 961.45,再生水回用率同步提高。区域引力网络出现结构性演变:阳泉依托节水技术进步,与太原引力强度达 5751.15,形成技术协同极核;吕梁通过推动煤炭产业转型,与忻州引力值从 2007 年的 567.27 提升至 2022 年的 4409.93;临汾借助汾河生态修复工程,2022 年与太原引力强度增至 4231.98,生态补水比例因湿地恢复显著提升。

从空间分异机制来看,地形封闭性导致地下水超采问题加剧,晋中盆地地下水位持续下降,制约了外围城市引力强度的提升;产业升级差异形成用水效率梯度,太原不锈钢产业应用先进工业水循环技术,将其引力辐射半径扩展至 200 km,而忻州法兰锻造业因技术更新缓慢,单位产品水耗仍高于行业先进水平;政策干预效果存在区域异质性,《山西省水资源全域化配置方案》实施后核心城市间引力强度年均增长达 15%,但吕梁等资源衰退型城市因缺乏生态补偿机制,发展水平仍受到明显制约。

3　讨　论

本文研究了黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率及其空间分异(图 8)。

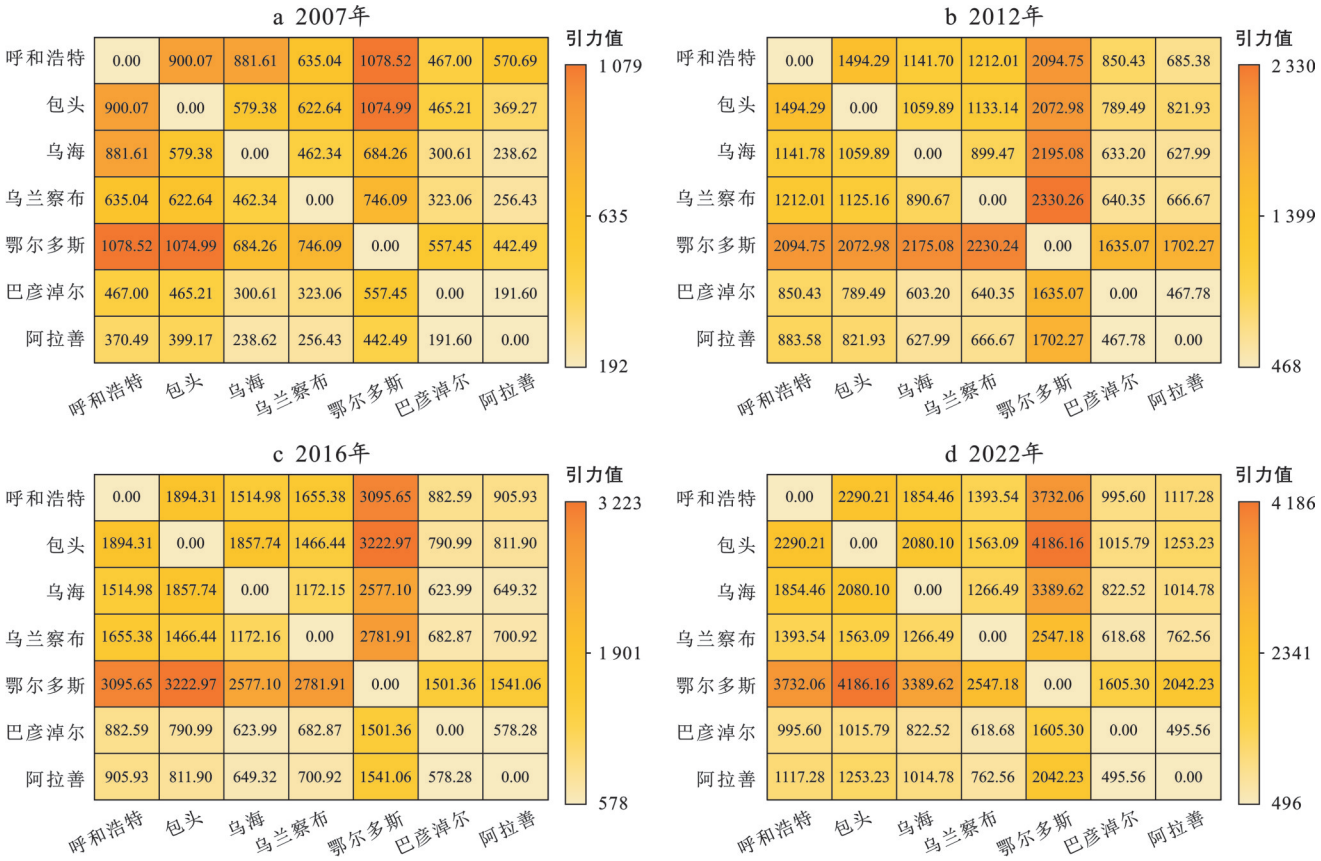


图 6 呼包鄂乌城市群水资源安全结构引力矩阵

Fig.6 Gravity matrix of water resource security structure of Hohhot-Baotou-Ordos-Ulanqab urban agglomeration

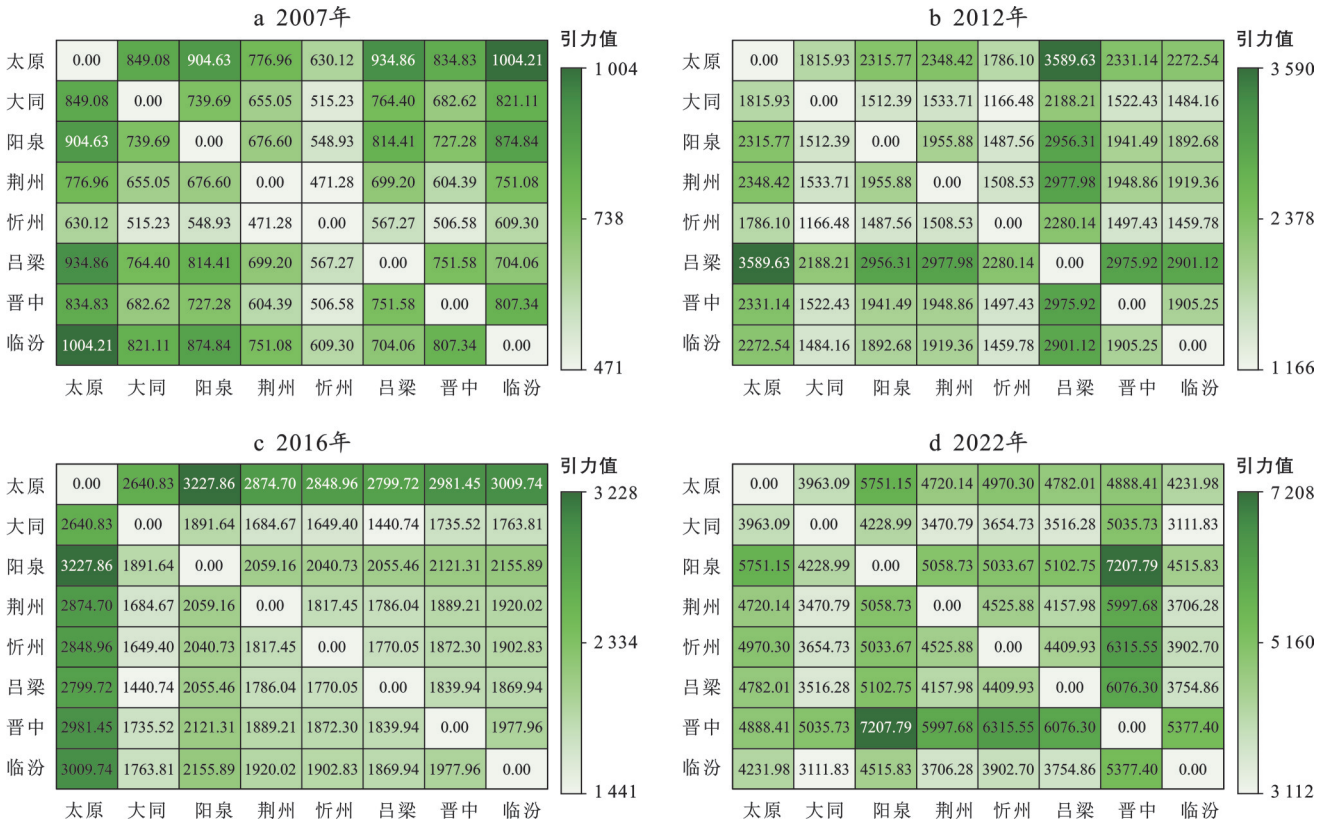


图 7 晋中城市群水资源安全结构引力矩阵

Fig.7 Gravity matrix of water resource security structure of central Shanxi urban agglomeration

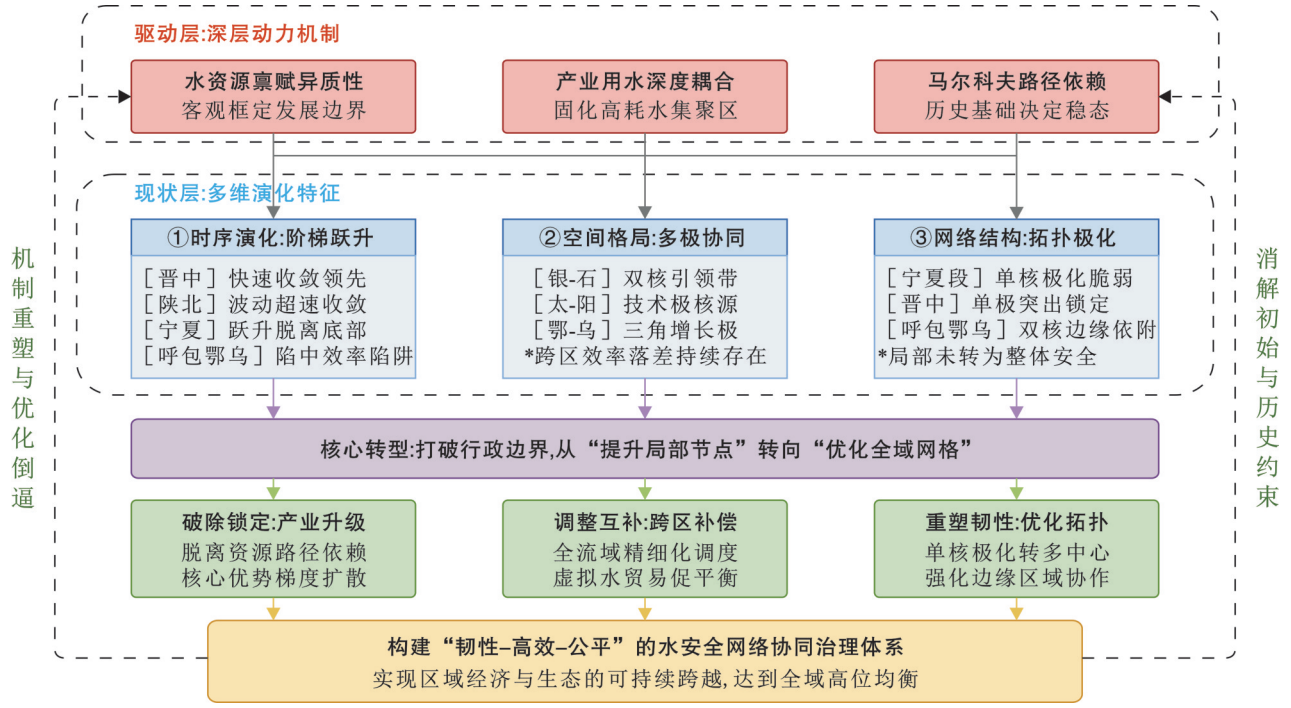


图 8　都市圈水资源利用效率分异的动力机制

Fig.8　Driving mechanisms of water use efficiency differentiation in urban agglomerations

（1）从时序演化来看,2003—2022 年研究区水资源利用效率呈“阶梯跃升,高位均衡”,总体提升显著但地区分异突出,并呈现晋中领先,宁夏跃升,呼包鄂乌“中效率陷阱”,陕北超速收敛且波动强等异质性路径。这与刘浩然等[29]的研究结果基本一致。归因于水资源禀赋的空间异质性,晋中等相对丰水区与宁夏等缺水区形成不同的发展轨迹,客观上框定了区域发展的边界。当前研究多基于投入产出或生态-效率视角,关注资源禀赋与产业结构的矛盾。未来应超越现状分析,聚焦两大方向:①破解呼包鄂乌等地的效率“陷阱”,推动其从资源依赖向结构升级转型,并助力宁夏等缺水地区通过优化配置与虚拟水贸易缓解压力;②强化跨区域协同,建立水资源生态补偿机制,发挥晋中等地区的支撑作用,打破行政边界,实施全流域统一的精细调度与管理,以实现水资源强约束下经济与生态效益的协同提升。

（2）从空间格局与马尔科夫路径来看,形成“多极协同＋梯度分异”的复合格局,并出现银川-石嘴山“双核引领”,鄂尔多斯-乌海“三角增长极”,太原-阳泉“技术极核”等模式,马尔科夫链显示晋中收敛最快,呼包鄂乌中效率锁定,落差持续。深层原因为 3 个关联机制:水资源禀赋的空间分异塑造了“多极协同”的地理格局(如银川-石嘴山双核);资源型主导产业与水资源利用的深度耦合,固化技术极核的扩散效应,导致呼包鄂乌等地区“中效率路径锁定”;马尔科夫链进一步揭示,不同区域因历史基础差异形成了稳定的效率演化路径(如晋中快速收敛,资源依赖型地区则难以跨越区间)。未来需超越静态协同,构建跨行政区划的动态调配与补偿机制,以缓解区域落差,在提升核心效率的同时维护整体“高位均衡”,实现黄河流域水资源利用与区域发展的可持续协同。

（3）从水资源安全网络结构来看,呈现 3 类组织模式:呼包鄂乌“双核驱动,边缘依附”,宁夏沿黄“单核极化”,晋中“单极突出,梯度锁定”,网络拓扑从关系维度解释了效率演进差异,强调提升水安全需兼顾节点效率与城际协作强度。这与何国华等[30]研究基本一致。水资源分布决定了宁夏沿黄“单核极化”则反映其系统脆弱性;呼包鄂乌“双核驱动,边缘依附”的形态;产业用水耦合固化了晋中“单极突出,梯度锁定”的特征。网络视角上,局部效率提升难以转化为整体安全跃迁,关键在于节点间协作强度与网络结构韧性。因此,未来治理首先需从“提升节点”转向“优化网络”:一是打破路径依赖,构建跨区水资源共享与弹性调度机制,强化边缘连接;二是推动宁夏从“单核极化”转向“多中心协同”,增强网络韧性;三是促进晋中等核心枢纽的技术与管理优势梯度扩散,实现“梯度协同”,最终通过结构性优化与制度联动,构建更具韧性、高效与公平的水安全治理体系。

本研究从效率演化、空间格局与网络结构 3 个维度,系统揭示了黄河“几字弯”都市圈水资源利用中资源约束、路径依赖与网络脆弱性的复合作用机制。

但仍存在局限：数据上受统计口径限制，未能深入县域与行业尺度；方法上为静态网络拓扑分析，缺乏动态扰动模拟，难以评估网络韧性。未来可深化多源数据融合，引入复杂系统仿真模拟气候政策情景，开展流域生态补偿与虚拟水贸易等制度实证研究，推动水安全治理从系统认知向系统优化演进。

4 结 论

（1）基于超效率SBM模型的动态分析，黄河“几字弯”都市圈水资源利用效率在2003—2022年呈现“三阶段”演进特征：初期低速积累（2003—2007，CAGR=25.8%），中期政策驱动跃升（2008—2016年、2008年跃升47.3%）与后期技术革新均衡（2017—2022，突破0.7阈值）。效率整体提升10.9倍，但2019年后系统波动性显著增强（熵值增113%），反映出高位均衡阶段的鲁棒性挑战。演化轨迹凸显区域路径分异：银川、晋中等实现超常提升，而石嘴山、榆林等地则陷入效率锁闭。空间分析识别出银川-石嘴山“双核引领”等多中心结构，但马尔科夫链显示除晋中外，多数区域（尤以呼包鄂乌为典型）面临“中效率锁定”，表明当前格局可能强化区域发展的路径依赖。

（2）水资源效率空间分异呈现多尺度重构特征，整体遵循“单核点状→多极网络”的演化路径。宁夏沿黄形成银川-石嘴山双核引领结构；呼包鄂乌演进为鄂尔多斯-包头-乌海三角协同格局；晋中形成太原-阳泉-晋中技术高值集聚区；陕北则呈现能-水协同的空间异质性。空间分异主要受三阶要素驱动：农业系统脆弱性（如吴忠效率波动显著）、生态-地形复合约束以及高耗水产业路径依赖。研究发现，核心城市效率增长普遍存在约5 a的政策响应滞后期，凸显战略布局与地方响应的时空适配对流域协同治理具有重要意义。

（3）黄河“几字弯”三大城市群水资源安全引力网络呈现差异化协同模式：呼包鄂乌经历“双核—三角”结构演变，核心引力显著提升（如鄂尔多斯与呼和浩特间突破3 000），而边缘区因生态补水缺失呈现脆弱性；宁夏沿黄形成“单极—多中心”路径，核心辐射能力强化（如石嘴山与银川间引力增长5.6倍），但干旱区仍处网络边缘；晋中表现为“中心突出，梯度扩散”格局，太原构建高强度协同极核，但外围城市受地形与政策响应差异制约。网络演化揭示三大机制：技术设施强化核心协同、产业差异形成效率梯度、生态补偿与政策适配不足加剧边缘脆弱性，为流域协同治理提供基于网络结构优化的精准干预路径。

参考文献（References）

[1] 王芳，郭梦瑶，牛方曲.“动-静”结合视角下都市圈多层次空间格局研究：以黄河“几”字弯都市圈为例[J].地理科学进展，2023，42(7)：1243-1255.
Wang Fang, Guo Mengyao, Niu Fangqu. Hierarchical spatial pattern of urban agglomeration based on the dynamic and static data: A case study of the Yellow River Ji-shaped bend [J]. Progress in Geography, 2023, 42(7):1243-1255.

[2] 张恬姿，王小军，齐广平，等.甘肃省水资源-经济社会-生态环境耦合协调演变分析[J].水利水运工程学报，2023(2)：53-63.
Zhang Tianzi, Wang Xiaojun, Qi Guangping, et al. Analysis of the spatial-temporal evolution characteristics of water resources-economic society-ecological environment coupling and coordination in Gansu Province [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(2):53-63.

[3] Shi Changfeng, Miao Xufei, Zhang Lina, et al. Spatial patterns of industrial water efficiency and influencing factors: Based on dynamic two-stage DDF recycling model and geographically weighted regression model [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 374:134028.

[4] 田进明，孟丽红，刘友存，等.江西省城市水资源利用效率时空演变与驱动因素[J].中国农村水利水电，2022(9)：146-154.
Tian Jinming, Meng Lihong, Liu Youcun, et al. Spatial-temporal changes of urban water efficiency in Jiangxi Province and its influencing factors [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(9):146-154.

[5] Zhang Shanjun, Liu Jia, Li Chuanzhe, et al. Evaluation of water resources utilization efficiency based on DEA and AHP under climate change [J]. Water, 2023, 15(4):718.

[6] 何伟，王语苓.黄河流域城市水资源利用效率测算及影响因素分析[J].环境科学学报，2021，41(11)：4760-4770.
He Wei, Wang Yuling. Calculation of urban water resources utilization efficiency in the Yellow River basin and analysis of its influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11):4760-4770.

[7] 任志安，刘雨佳.水资源利用效率测度及其收敛性分析：以巢湖流域为例[J].沈阳工业大学学报（社会科学版），2019，12(5)：421-428.
Ren Zhian, Liu Yujia. Measurement and convergence analysis of water resources utilization efficiency: A case of Chaohu Lake basin [J]. Journal of Shenyang University of Technology (Social Science Edition), 2019, 12(5):421-428.

[8] 郝仪佳，夏咏，张扬，等.西北地区水-能源-粮食系统耦合协调发展时空动态及预测分析[J].水土保持研究，

2025,32(3):251-259.
Hao Yijia, Xia Yong, Zhang Yang, et al. Research and forecast analysis on the coupling coordinated development of water-energy-food system in northwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3):251-259.

[9] Zhang Xiuzhi, Zhang Daoyang, Zhang Yiwen. Temporal changes and spatial driving mechanisms of water ecological footprints in the context of urbanization: Taking three major urban agglomerations in China's Yangtze River economic belt as an example [J]. Water, 2023, 15(4):760.

[10] 郝帅,孙才志,宋强敏.基于ESTDA模型的中国水生态足迹及水生态压力评价[J].生态学报,2021,41(12):4651-4662.
Hao Shuai, Sun Caizhi, Song Qiangmin. Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(12):4651-4662.

[11] Wang S Y, Chen W M, Wang R, et al. Study on the coordinated development of urbanization and water resources utilization efficiency in China [J]. Water Supply, 2022,22(1):749-765.

[12] 孟钰,杜琼英,管新建,等.黄河流域水资源利用效率评估及空间分异研究[J].中国农村水利水电,2020(10):12-16.
Meng Yu, Du Qiongying, Guan Xinjian, et al. Research on the water use efficiency and spatial difference in the Yellow River basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(10):12-16.

[13] 郭炳南,唐利,张浩.中国八大综合经济区水资源利用效率的区域差异及影响因素研究[J].生态经济,2022,38(1):153-161.
Guo Bingnan, Tang Li, Zhang Hao. Regional differences and influencing factors of water resources utilization efficiency in eight comprehensive economic zones of China [J]. Ecological Economy, 2022,38(1):153-161.

[14] Huo Litao, Jia Ruitao, Wei Sa, et al. Spatial-temporal evolution of agricultural water use efficiency based on DEA approach and spatial autocorrelation [J]. Water, 2025,17(10):1456.

[15] Wu Qiang. Application of BIM+GIS integration technology in the construction of urban intelligent water informatization [J]. Journal of Electrical Systems, 2024,20(S6):2352-2362.

[16] Farahani M A, Wood A W, Tang Guoqiang, et al. Calibrating a large-domain land/hydrology process model in the age of AI: The SUMMA CAMELS emulator experiments [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2025,29(18):4515-4537.

[17] 周长亮,苗盛,王明丽,等.基于深度学习和物联网技术的智慧污水管控系统[J].安全与环境工程,2021,28(1):191-196.
Zhou Changliang, Miao Sheng, Wang Mingli, et al. Intelligent sewage management and control system based on deep learning and IoT [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021,28(1):191-196.

[18] Liu Xiaoqiong, Wang Xu, Lu Feiyu, et al. Evaluation of the governance efficiency of water environmental governance efficiency in Yangtze River delta from the perspective of multivariate synergies [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(4):2347.

[19] 许秋阳.长春都市圈水-能源-粮食关联系统绿色效率评价及优化策略研究[D].湖北 黄石:湖北师范大学,2024.
Xu Qiuyang. Assessment of the green efficiency of water-energy-food nexus and its optimization strategy in Changchun metropolitan area [D]. Huangshi, Hubei: Hubei Normal University, 2024.

[20] 苗峻瑜,张春英.黄河流域工业水资源效率与经济协调发展特征及时空演变[J].环境科学研究,2024,37(1):114-121.
Miao Junyu, Zhang Chunying. Characteristics and spatial-temporal evolution of industrial water resources efficiency and coordinated economic development in the Yellow River basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(1):114-121.

[21] 贾逸清,杨晓华.“双碳”目标下黄河流域九省区农业水资源利用效率评价及时空分异研究[J/OL].(2025-09-16).水利水电技术(中英文),1-12. https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250916.1319.002.
Jia Yiqing, Yang Xiaohua. Evaluation and spatial-temporal differentiation of agricultural water resources utilization efficiency in nine provinces of the Yellow River Basin under the “dual carbon” goals [J/OL]. (2025-09-16). Water Resources and Hydropower Engineering, 1-12. https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250916.1319.002.

[22] 徐辉,王亿文,张宗艳,等.黄河流域水-能源-粮食耦合机理及协调发展时空演变[J].资源科学,2021,43(12):2526-2537.
Xu Hui, Wang Yiwen, Zhang Zongyan, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River basin [J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2526-2537.

[23] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische rationalität: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten [J]. Die Unternehmung, 1990,44(4):273-290.

[24] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3):498-509.

[25] 张明斗,翁爱华.长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络及形成机制[J].地理学报,2022,77(9):2353-2373.
Zhang Mingdou, Weng Aihua. Spatial correlation network and its formation mechanism of urban water utilization efficiency in the Yangtze River economic belt [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(9):2353-2373.

[26] 任玉芬,方文颖,王雅晴,等.我国城市水资源利用效率分析[J].环境科学学报,2020,40(4):1507-1516.
Ren Yufen, Fang Wenying, Wang Yaqing, et al. Analysis of urban water resources use efficiency in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(4):1507-1516.

[27] 邓捷铭,贾绍凤.区域水安全评价指标体系构建与应用[J].水科学进展,2022,33(1):48-56.
Deng Jieming, Jia Shaofeng. Indicators system construction and application of regional water security [J]. Advances in Water Science, 2022,33(1):48-56.

[28] Eren M, Eren M, Başar S. Measuring of human development through the output-oriented super efficiency VRS DEA model without inputs [J]. Serbian Journal of Management, 2017,12(2):255-270.

[29] 刘浩然,党素珍,任玉玲,等.沿黄九省(区)水资源利用效率及影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(2):267-276.
Liu Haoran, Dang Suzhen, Ren Yuling, et al. Water resource utilization efficiency and influencing factors in nine provinces along the Yellow River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025,23(2):267-276.

[30] 何国华,赵勇,王浩,等.黄河几字弯区水安全保障与一体化水网工程布局研究[J].中国工程科学,2025,27(4):129-140.
He Guohua, Zhao Yong, Wang Hao, et al. Water security safeguarding and integrated water network layout of the Jiziwan region in the Yellow River basin [J]. Strategic Study of CAE, 2025,27(4):129-140.

(上接第371页)

[22] 李佳桐,唐海萍,邝佛缘.国家公园生态系统服务与农牧户福祉的时空耦合分析:以祁连山国家公园为例[J].生态学报,2024,44(15):6527-6539.
Li Jiatong, Tang Haiping, Kuang Foyuan. Spatial-temporal coupling analysis of ecosystem service and well-being of farmers and herdsmen: A case study of Qilian Mountain National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(15):6527-6539.

[23] 李双成,王珏,朱文博,等.基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架[J].地理学报,2014,69(11):1628-1639.
Li Shuangcheng, Wang Jue, Zhu Wenbo, et al. Research framework of ecosystem services geography from spatial and regional perspectives [J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(11):1628-1639.

[24] Bryan B A, Gao Lei, Ye Yanqiong, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. Nature, 2018,559(7713):193-204.

[25] 赵麓,刘衍峰.中国式生态现代化:内涵阐释与实践探索[J].北京林业大学学报(社会科学版),2024,23(3):98-105.
Zhao Ni, Liu Yanfeng. Chinese ecology modernization: Connotation interpretation and practical exploration [J]. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences), 2024,23(3):98-105.

[26] 彭文斌.习近平生态文明思想的形成逻辑、科学内涵与实践指引[J].经济学家,2025(11):5-15.
Peng Wenbin. Forming logic, scientific connotation and practical guidance of Xi Jinping's thought on ecological civilization [J]. Economist, 2025(11):5-15.

[27] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012,109(40):16083-16088.

[28] Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C, et al. Nature-based solutions to address global societal challenges [M]. Gland, Switzerland: Iucn, 2016.

[29] 马雪松,王鼎量.深化区域协调发展视域下超大城市空间治理现代化的内在机理与实现路径[J].云南社会科学,2025(5):23-33.
Ma Xuesong, Wang Dingliang. The internal mechanism and realization path for the modernization of spatial governance in megacities from the perspective of deepening coordinated regional development [J]. Social Sciences in Yunnan, 2025(5):23-33.

[30] Liu Jianguo, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems [J]. Science, 2007,317(5844):1513-1516.