J. Lake Sci.(湖泊科学),2026,38(6):000-000
DOI 10.18307/2026.0642
©2026 by *Journal of Lake Sciences*

洱海流域水网结构驱动因子与拓扑特征的空间中介效应

陈凤林 ，陈运春，郭晓飞，吴晓聪，唐禹周，黄玉南 ，曾维军**

（云南农业大学水利学院，昆明 650201）

摘 要：为了探讨洱海流域在社会与自然复合驱动下的水系网络时空耦合机制，揭示拓扑特征在驱动因子与水系要素之间的中介作用。本研究基于四期遥感与地理数据，运用复杂网络理论，选取九项拓扑指标表征结构特征，为克服传统回归难以同时处理驱动共线性、空间溢出与机制分解的局限，本文构建处理多驱动共线性的同时刻画空间溢出，并将总效应分解为直接效应与经拓扑结构传导的间接效应，从而更精准识别关键中介路径的偏最小二乘（PLS）–空间杜宾（SDM）–中介分析（Med）框架。结果表明：（1）2001–2023 年间，洱海水系由多源冗余向主干清晰、相对高效稳态演化。（2）共 216 条路径中识别 68 条显著 X–M–Y 路径，中介效率主要位于 40%–80%间，边介数中心性、紧致度、全局效率和代数连通性为核心中介指标。（3）社会因子主要通过拓扑结构对水系要素产生高比例负向效应；自然因子整体表现为中等强度正向稳定效应，少数路径呈结构性抑制效应。本研究构建的 PLS–SDM–Med 框架可推广用于识别高原湖泊流域的关键结构单元与风险路径，可为洱海流域和其他高原湖泊的分区限制与生态修复提供理论依据。

关键词：时空耦合；水系网络；拓扑特征；空间中介效应；PLS–SDM–Med 模型

The spatial mediating effect of driving factors and topological characteristics of the water network structure in the Lake Erhai Basin

Chen Fenglin, Chen Yunchun, Guo Xiaofei, Wu Xiaocong, TangYuzhou, Huang Yunan, Zeng Weijun**

(College of Water Resources, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, PR.China)

Abstract：This study uses complex network theory and four periods of remote sensing and geographic data to explore the spatiotemporal coupling mechanism of the water network in the Lake Erhai Basin under natural and human combined drivers, and clarify how topological features act as mediators between driving factors and water system elements. Nine topological indicators are adopted to describe the structural characteristics of the basin water network. Traditional regression methods cannot effectively address driver collinearity, spatial spillover, and mechanism decomposition at the same time. To solve this problem, this study establishes a PLS-SDM-MED framework. This framework reduces the interference of multi-driver collinearity, quantifies spatial spillover effects, and splits total effects into direct effects and indirect effects mediated by topological structure. It helps accurately recognize key intermediate pathways. The results show that: (1) From 2001 to 2023, the Erhai water network changed from a multi-source redundant structure to a stable pattern with distinct main streams and relatively high operational efficiency. (2) A total of 216 pathways are analyzed, among which 68 significant X-M-Y pathways are detected. Their mediation efficiencies mostly fall between 40% and 80%. Edge betweenness centrality, compactness, global efficiency, and algebraic connectivity are confirmed as core mediating indicators. (3) Human factors mainly produce strong negative impacts on hydrological elements via network topology mediation. Natural factors generally present moderate and steady positive impacts, while a small number of pathways show structural inhibition effects. The PLS-SDM-MED framework

*2025-12-10 收稿；2025-04-07 收修改稿
国家自然科学基金项目（42361043）和云南省教育厅科研基金（2026Y0563）联合资助
*通讯作者： E-mail: zengweijunde@163.com

proposed in this study can be applied to identify key structural units and risk pathways in plateau lake basins. It also provides theoretical support for zoned management and ecological restoration in the Lake Erhai Basin and other similar highland lake watersheds.
Keywords：Spatiotemporal coupling; Water network; Topological characteristics; Spatial mediation effect; PLS–SDM–Med model

流域水系网络（Water Network, WN）是连接自然水文过程与生态系统功能的关键载体，其结构特征在很大程度上决定了流域物质输移、能量循环与生态稳定性的空间格局与演化方向错误!未找到引用源.。在气候变化与人类活动共同作用下，外部驱动对水系格局的影响往往并非直接作用于单个点－线－面要素，而是改变汇流通道的组织方式与连通关系，从而引发网络层面的响应[2]。仅从形态或要素数量出发难以解释水系格局差异，因此，需要引入能够刻画连接关系的结构性视角。拓扑结构具有动态性，常通过网络在扰动下维持稳健性连通能力及由局部演化形成骨干化格局的自组织过程加以刻画[3]，本文由结点（河流汇合点、水利节点）、弧段（河渠通道）和面域（湖泊、湿地）抽象拓扑结构构成的水系网络，既体现地貌与水文过程的组织方式，也折射出自然环境与人类活动耦合作用下的时空响应[4]。近年研究逐渐从将其视为静态地理对象，转向从拓扑结构入手解析连通性、稳健性与自组织演化过程[5]。因此，关注拓扑结构不仅有助于解释水系网络自身的演化规律，也为驱动因子与结构调整和水系要素响应的传导提供了可量化的结构表征。

已有研究表明，流域水系的形态结构及其拓扑特征对生态过程具有显著影响[6]。网络节点密度、连通度、介数中心性等指标能够有效表征水流汇聚路径、信息传导效率与系统稳健性，反映水文过程与景观格局之间的相互作用[7]。近年来，复杂网络理论被引入水文地理与生态系统研究，为多尺度空间结构分析提供了新的理论支撑[8]。水系网络的拓扑复杂度与生态稳定性存在密切联系，高连通度与高冗余度往往意味着更强的系统适应性[10]；而过度人为干扰导致的网络断裂与结构简化，则会削弱流域的自组织能力与生态服务功能[12]。这些研究在揭示局部要素演变机制方面取得进展，但多聚焦于平面或单尺度分析；且多数研究仅揭示结构特征的时空变化，缺乏从空间显性视角量化拓扑特征中介作用。为弥补上述不足，本文构建 Partial Least Squares–Spatial Durbin Model–Mediation effect （PLS–SDM–Med）空间中介框架以刻画驱动—拓扑—格局的层级耦合链条；其必要性在于：驱动变量存在共线性与阶段差异，PLS 用于稳健识别关键驱动；水网演化具有空间溢出，SDM 用于分解本地效应与邻域效应；拓扑结构作为结构传导层，Med 中介分析用于区分直接效应与经拓扑传导的间接效应，从而将驱动—拓扑—格局的机制链条转化为可检验的路径分解结果。上述机制识别与空间分解的不足，在高原湖泊流域的人类活动强干预和水系结构敏感以及治理需求迫切的情境下尤为突出，因此有必要在典型流域中开展检验与应用。

洱海作为高原断陷湖盆的典型代表，其独特的断陷地形决定了河流汇流路径集中且水网结构高度分支化，水系网络特征直接关系到湖泊水质、生态服务与区域社会发展协调 错误!未找到引用源.，既有研究表明其水体营养状态与入湖河流水质存在显著时空差异，TN/TP 及富营养化总体呈“北高南低、汛期偏高”的格局，外源污染物输入与北部入湖河流贡献密切相关[15]。同时，农业面源污染与土地利用变化被认为是关键外源压力源，治理上自 2017 年以来实施了以控源截污与生态修复为核心的措施；但现有工作多聚焦水质、负荷或景观变化，较少从水系复杂网络拓扑视角解析驱动因子如何通过拓扑演化产生空间溢出与中介效应机制。基于此，本文以洱海流域为研究对象，从驱动因子-拓扑特征-时空耦合视角出发，构建流域水系复杂网络分析框架；研究问题主要包括：其一，2001—2023 年洱海流域水系网络在节点、边、水面及整体网络层面的拓扑结构如何演化，并与点–线–面要素格局呈现何种时空耦合特征；其二，社会经济与自然生态驱动因子对水系拓扑结构的作用方向与强度如何，是否存在显著空间溢出；其三，拓扑特征是否在驱动因子与水系要素之间发挥中介作用，关键 X–M–Y 传导路径及其中介贡献如何分解。研究结果旨在从结构层面深化对高原湖泊流域水系演化机理的认识，并为洱海流域水系治理与生态修复提供可量化的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洱海流域（25°24′N～26°25′N，99°50′E～100°27′E）位于云贵高原西北部、横断山脉东缘，澜沧江、金沙江和元江三大水系分水岭地带，云南省大理白族自治州境内，属低纬高原亚热带季风气候。洱海流域水系要素纵横密布，流域内有大小河溪 117 条。

洱海流域面积为 2565km^2，其中北部三江、西部十八溪、南部波罗江流域汇流总面积 2037.8km^2，占流域总面积的 79.4%；年地表径流量 5.01 亿 m^3，占洱海流域的入湖径流量 87.1%。因三大流域在洱海生态保护中占有举足轻重的地位，特将其作为洱海流域的典型流域。详见图 1。

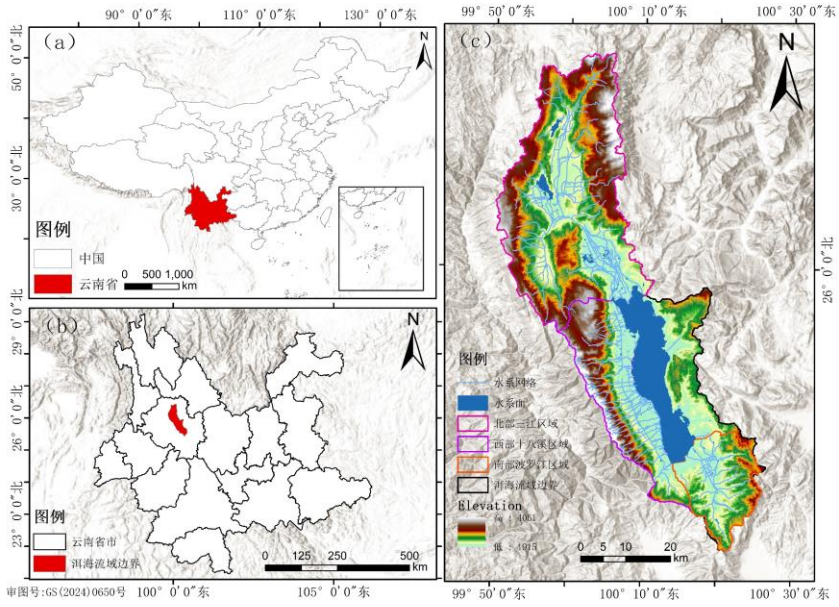


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview map of the study area

1.2 数据来源

数据主要来源于哨兵 2 号遥感影像、Landsat 7 遥感影像、DEM、统计年鉴、国民经济社会发展公报等。根据水网体系剧烈演化时间节点，分别提取 2001 年、2008 年、2015 年与 2023 年的洱海三大典型流域的水网体系数据。具体来源见表 1。

表 1 数据来源

Table 1 Data Sources

数据类型	数据来源	相关下载网站
2001、2008 年洱海流域遥感影像	Landsat 7、实地调研	https://www.gscloud.cn/
2015、2023 年洱海流域遥感影像	Sentinel-2A、实地调研	
自然水系与自然湿地、湖泊数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	https://www.resdc.cn/
DEM、高程、坡度数据	GDEMV2 30M	http: //srtm.csi.cgiar.org
自然气候因子数据	实验气象站、国家气象科学数据中心	https://data.cma.cn/
社会经济因子数据	云南省统计年鉴、大理市、洱源县统计年鉴、大理市、洱源县国民社会经济发展公报	https://stats.yn.gov.cn/

受卫星启动时间限制，Sentinel-2A 影像在 2015 年后可稳定获取，因此本文 2001 年、2008 年水网体系基础数据提取采用 Landsat 7 遥感影像，2015 年、2023 年采用 Sentinel-2A 遥感影像，以兼顾长时序对比需求与后期对窄河渠、小型水体的识别精度。为降低不同 传感器差异带来的不确定性，本文优选同季节少云影像，并对各期影像进行统一的几何校正、投影一致化及分辨率匹配处理，在一致解译规则下开

展水网要素提取。与此同时，2023 年研究团队对洱海典型流域开展了野外实地调研，结合 Earth 地球和奥维地图 App 的辅助，对水网要素的实际位置、连通关系及影像存疑区域进行核查与校正，从而进一步约束遥感解译结果。由于后续分析以矢量水网的连通关系及其拓扑指标为研究对象，而非直接比较像元光谱差异，在统一预处理与实地验证的共同支撑下，不同遥感数据源的选取影响降到最低。水网处理技术路线如图 2 所示。

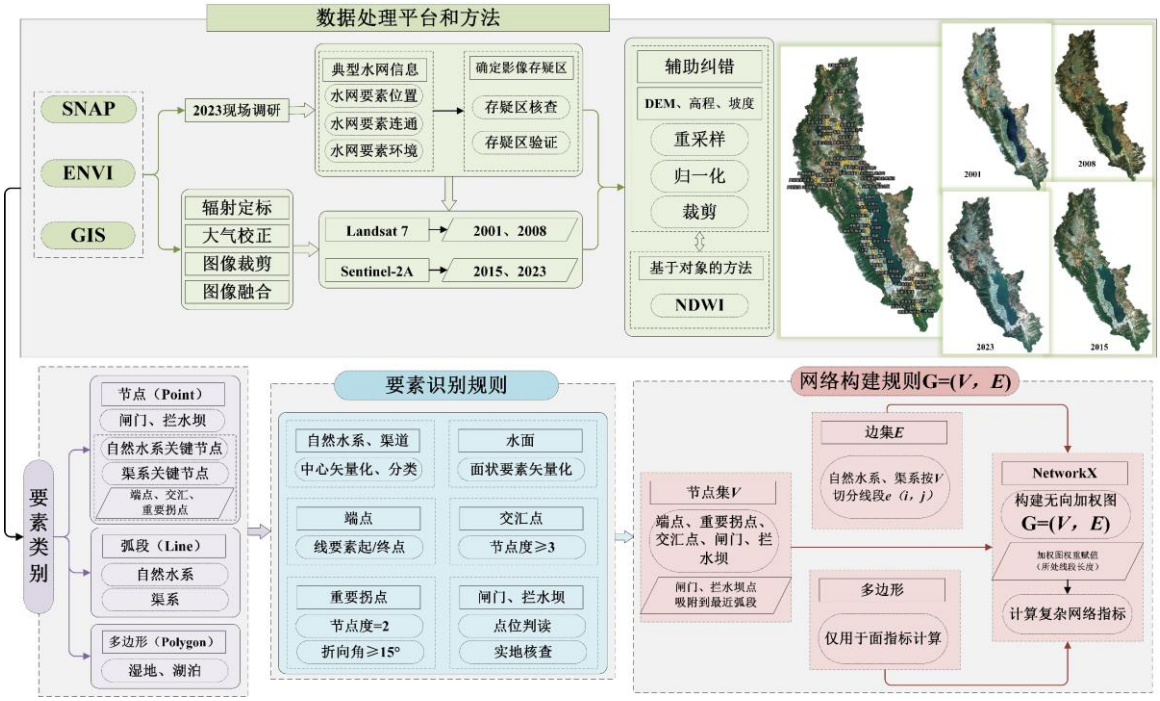


图 2 水网处理技术路线

Fig.2 Technical route for water network treatment

1.3 数据处理与分析

本研究从自然–人工耦合视角出发，严格依据数据的可获得性、水网体系的完整性和遥感影像解译的可实现性原则，构建了包含 11 类核心要素的洱海流域水网分类体系。其详细分类依据及特征描述详见表 2。

表 2 洱海流域水系网络基本要素分类

Table 2 Classification of Basic Elements of the Water System Network in Erhai Lake Basin

要素类别	名称	概念
结点	大闸门	具备开、关、调度能力，用于控制流量和调节水位的低水头水工建筑物。
	自然水系关键节点	自然河流中具有拓扑意义的节点集合：①起点/终点（河段源头）；②交汇点（两条及以上水系汇流处）；③重要拐点（表示河道方向显著变化、用于保持几何形态的折点）。
	渠系关键节点	渠系中具有拓扑意义的节点集合：①起点/终点（引水口、出水口）；②交汇点（渠系汇流处）；③重要拐点（渠线方向显著变化的折点）。
	拦水坝	是固定阻挡来拦截江河渠道水流以抬高水位或调节流量的挡水建筑物。
弧段	自然水系	流域内所有的自然河流等线状要素组成的河网系统。
	渠道	是指农田水利建设中的水渠、沟渠，是水流的通道。
多边形	湿地、湖泊	流域内所有的湿地、湖泊等面状要素组成的自然水网系统。

为进一步解析水网要素的动态演化机制，利用 ArcMap 10.8 平台对 2001 年、2005（附图Ⅰ）年及 2018（附图Ⅱ）、2023 年四个时期的水系要素进行空间可视化表达，完整呈现了不同发展阶段水网要素的空间分布格局。针对长时间序列数据中局部缺失的问题，为构建年度面板并进行跨期汇总，对同一流域缺口年份在 SPSS 27.0 中采用时间序列线性插值。详情如图 3。

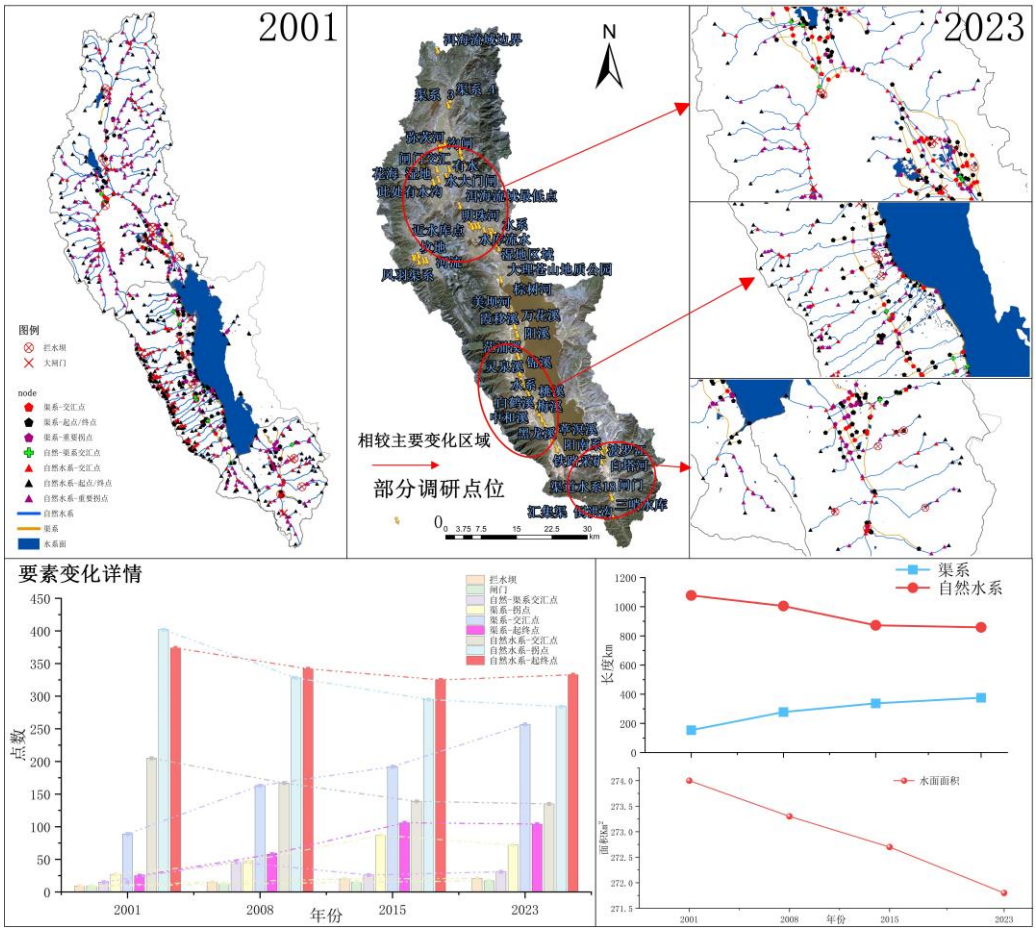


图 3 水系网络要素详情图

Fig.3 Details map of water system Network elements

1.4 研究方法

1.4.1 网络分析 为揭示洱海流域水系网络在结构形态与功能特征上的时空演化规律，构建了节点、边、面及整体四个层级的网络特征指标体系。基于 NetworkX（Python）平台，分别选取九个典型指标进行量化分析。详见表 3。

1.4.2 PLS–SDM–Med 框架构建 （1）PLS 模型构建

PLS 分析在 SIMCA 14.1 中实现，潜在成分数通过交叉验证确定，并结合 VIP 指标描述变量贡献。外生驱动 X：社会经济：人均 GDP（x_1）、土地利用综合指数(x_2)依据庄大方等人提出的计算方法[16]、夜间灯光(x_3)、人口密度(x_4)；自然生态：NDVI(x_5)、NPP(x_6)、温度(x_7)、降水量(x_8)。中介变量 M：点层面：节点度(M_1)、平均节点邻接度(M_2)；边层面：边介数中心性(M_3)、边连通度(M_4)；面层面：紧致度(M_5)、景观分割指数(M_6)；整体网络拓扑：分形维数(M_7)、全局效率(M_8)、代数连通性(M_9)。分析其对水网要素（点数量 y_1、线长度 y_2、多边形面积 y_3）的影响。偏最小二乘回归（Partial Least Squares Regression, PLS）适用于高维数据降维及多重共线性问题[17]

$$\text{外部模型：}\begin{cases} X = \sum_{i=1}^{n} t_i P_i^T + E = TP^T + E \\ Y = \sum_{i=1}^{n} u_i q_i^T + F = UQ^T + F \end{cases} \tag{10}$$

$$\text{内部模型：} U = T\beta \tag{11}$$

式中，n 为潜在向量的数量；$T=(t_1, t_2, \ldots, t_n)$和 $U=(u_1, u_2, \ldots, u_n)$分别是 X 和 Y 的分数矩阵；$t_i$ 和 u_i 分别是 X 和 Y 的分数向量；$P=(p_1, p_2, \ldots, p_n)$和 $Q=(q_1, q_2, \ldots, q_n)$分别为 X 和 Y 的荷载矩阵；p_i 和 q_i 分别是 X 和 Y 的荷载向量；E 和 F 是对应于 X 和 Y 的 PLS 残差；β 为回归系数矩阵。

表 3 复杂网络指标含义与相关计算方法

Table 3 Meanings of Complex Network Indicators and Related Calculation Methods

类别	指标名称及公式	数学定义公式	参数说明	编号
节点层	M_1 节点度 $K_i = \sum_j a_{ij}$	k_i 表示节点；i 为度数；a_{ij} 为邻接矩阵元素	表征节点的平均连接数，反映流域中水系交汇的密度与复杂性	（1）
	M_2 平均节点邻接度 $k_{nn} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{k_i}\sum_{j\in N(i)} k_i$	k_i：节点度，$N_{(i)}$：节点 i 的邻居集合	衡量节点间的局部相关性，反映水流网络的局部连通性	（2）
边层	M_3 边介数中心性 $B(e) = \sum_{s\neq t}\frac{\sigma_{st}(e)}{\sigma_{st}}$	σ_{st}为节点 s 到 t 的最短路径总数	衡量边在流域水系传输中的重要性，识别主干通道	（3）
	M_4 边连通度 $\lambda(G) = min\{cut(S,T)\}$	$cut(S,T)$：最小割集	反映网络的抗断裂能力，衡量流域主干通道连通的稳健性	（4）
面层	M_5 紧致度 $C = \frac{4\pi A}{P^2}$	A：面面积；P：面周长	衡量面状汇流单元的形态聚合度，反映水系单元的空间整合水平	（5）
	M_6 景观分割指数 $D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i^2}{(\sum_{i=1}^{n} A_i)^2}$	A_i：第 i 个水体斑块面积；n：斑块总数	衡量景观整体破碎化程度。D 越大，说明破碎化程度越高	（6）
整体层	M_7 分形维数 $D_r = \lim_{r\to 0}\frac{\ln N_r}{\ln(1/r)}$	N_r：尺度 r 下盒计数数目	描述水系的空间复杂性和自相似性，反映水流分形结构的层次特征	（7）
	M_8 全局效率 $E_g = \frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j} d_{ij}^{-1}$	d_{ij}：节点间最短路径长度	衡量水流在整个流域范围内的平均传输效率	（8）
	M_9 代数连通性 λ_2：Laplacian 矩阵第二小特征值	$L=D-A$：度矩阵与邻接矩阵差	衡量整体网络的连通稳定性，反映系统抗扰与自组织能力	（9）

（2）SDM–Med 模型构建

本研究将空间杜宾模型[18]（Spatial Durbin Model, SDM）与中介效应（Mediation effect，Med）结合，在 Stata 18 平台构建 SDM–Med 框架，揭示区域系统空间依赖与空间溢出特征[19]，识别社会—自然驱动因素在网络拓扑角度下的水系空间格局间接路径。本研究以流域内子流域单元为基本空间分析单元，考虑到该尺度下空间相互作用主要受地形和水文连通与相邻外溢约束，本文采用拓扑邻接权重矩阵刻画局地传导，为使每个空间单元对其相邻单元的影响权重之和为 1，在此基础上将邻接矩阵进行行标准化处理。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

选择双固定效应空间杜宾模型（SDM–FE）作为基准设定。此外，本研究遵循中介效应的三步法逻辑[20]，将其嵌入 SDM 模型中。具体如下：

①建立基准空间杜宾模型，考察外部驱动对水系格局的总体空间效应：：

$$y_{it} = \rho\,(WY)_{it} + X_{it}\beta + (WX)_{it}\theta + \mu_i + \tau_t + \varepsilon_{it} \tag{13}$$

②建立驱动因子对拓扑特征的影响模型（路径 a）

$$M_{it} = \rho_M\,(WM)_{it} + X_{it}\alpha + (WX)_{it}\gamma + \mu_i + \tau_t + u_{it} \tag{14}$$

③将中介变量引入结果方程，估计中介效应（路径 b 与 c′）

$$y_{it} = \rho'（W）_{it} + X_{it}\beta' + M_{it}b + （WX）_{it}\theta' + WM_{it}\phi + \mu_i + \tau_t + \xi_{it} \quad (15)$$

式中，ρ，ρ'为空间自回归系数；WY，WX，WM为空间滞后项；β'为控制中介后的直接效应（路径 c′）；θ，γ，ϕ刻画空间溢出。

在空间分解框架下，驱动因子对格局变量的间接影响通过拓扑结构实现。设路径 a 表示 X→M 的直接效应，路径 b 表示 M→Y 的直接效应，路径 c 表示 X→Y 的基准直接效应，若a、b均显著且$a \times b \neq 0$，则表明存在显著的空间中介效应（Mediating Effect, ME）。本研究仅分析显著路径的$a \times b$值及其中介效率（Share）；中介效应显著性通过 Bootstrap（500 次）构建 95% 置信区间检验判定。相关公式为：

$$\mathrm{ME} = a \times b \quad (16)$$

$$\mathrm{Share} = \left|（a \times b）/c\right| \quad (17)$$

通过以上步骤，可系统识别社会与自然驱动因子经由网络结构对水系格局的空间作用链条，定量揭示洱海流域水系网络的多层空间传导机制。详细构建过程见图 4。

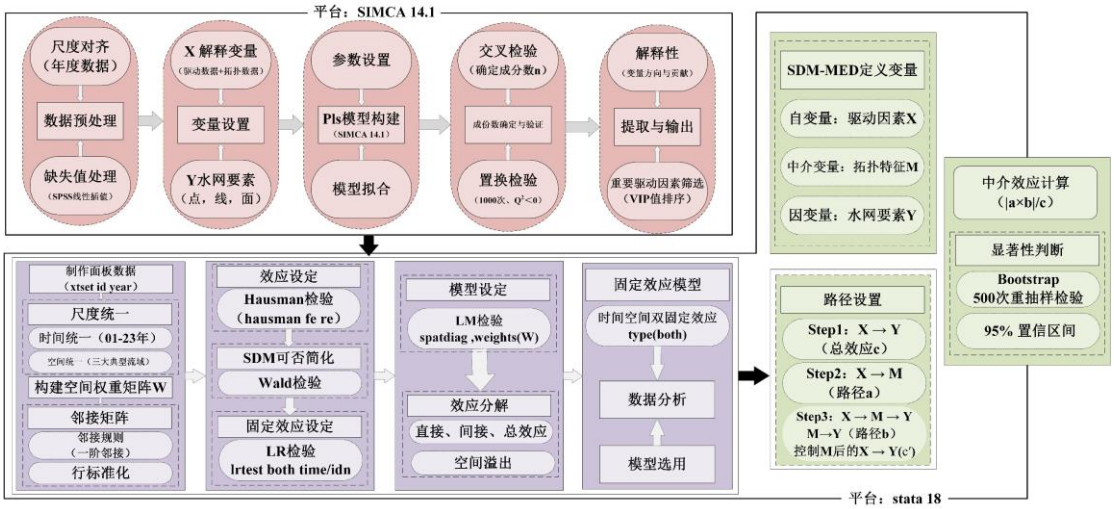


图 4 PLS–SDM–Med 框架构建流程图

Fig.4 Flowchart of the construction of the PLS-SDM-MED framework

2 结果与分析

2.1 水系网络–布局中介拓扑参数分析

由图 5 可知，2001—2023 年洱海三大典型流域水网拓扑演化呈现局部连接强度与通道冗余（M_1、M_2、M_3、M_4）整体下降，而整体连通与传输性能（M_8、M_9）持续上升，表现为局部简化、整体优化的结构调整。分流域看，北三江呈显著主轴收敛，西部十八溪维持多级汇流骨架，波罗江体现修复性整合特征。

北三江流域呈现由发散向主轴汇聚的结构收敛特征，平均节点度由 1.617 降至 1.465，平均节点邻接度由 1.783 降至 1.608，边介数中心性和边连通度同步下降。全局效率与代数连通性分别由 0.0823、0.206 上升至 0.0965、0.276。这表明支流分叉与交汇密度降低、汇流路径趋于集中，水流与物质输送更依赖入湖主干通道；同时最短路径缩短、整体连通稳定性增强，水系形成以入湖主干为核心的输导格局。

西部十八溪流域在局部结构简化的同时维持了较高复杂度与多级汇流特征，平均节点度由 1.627 降至 1.377，平均节点邻接度由 1.993 降至 1.579，边连通度略有下降，但全局效率由 0.237 升至 0.360，代数连通性由 0.302 升至 0.350，分形维数稳定在 1.61，景观分割指数保持在 0.99 左右，表明该区低效支沟连接减少，但网络整体路径更直接、连通更稳，多级汇流格局仍被保留，从而维持一定的汇流调蓄与栖息地空间异质性基础。

南部波罗江流域则呈现由碎片化向整体化的修复性重构过程，平均节点度与平均节点邻接度维持在 1.36，边介数中心性由 0.0040 降至 0.0026，紧致度约为 0.61，景观分割指数由 0.915 降至 0.898，分形维

数介于 1.46–1.50，全局效率与代数连通性由 0.223、0.127 分别升至 0.252、0.162，这反映水体斑块由离散趋于整合、水面系统整体连通恢复，网络输导和连通同步改善；从过程上更符合连通廊道修复、岸线整治或湿地重建等作用下的结构恢复特征。

总体看来，节点度、边连通度与边介数中心性普遍下降，而全局效率与代数连通性持续上升，洱海流域水系整体由多源冗余向主干清晰、高效稳健的网络格局演化。边介数中心性、紧致度、全局效率与代数连通性等指标在结构简化和功能优化过程中的敏感性较高，揭示了流域在社会－自然交互背景下的结构性自组织规律。

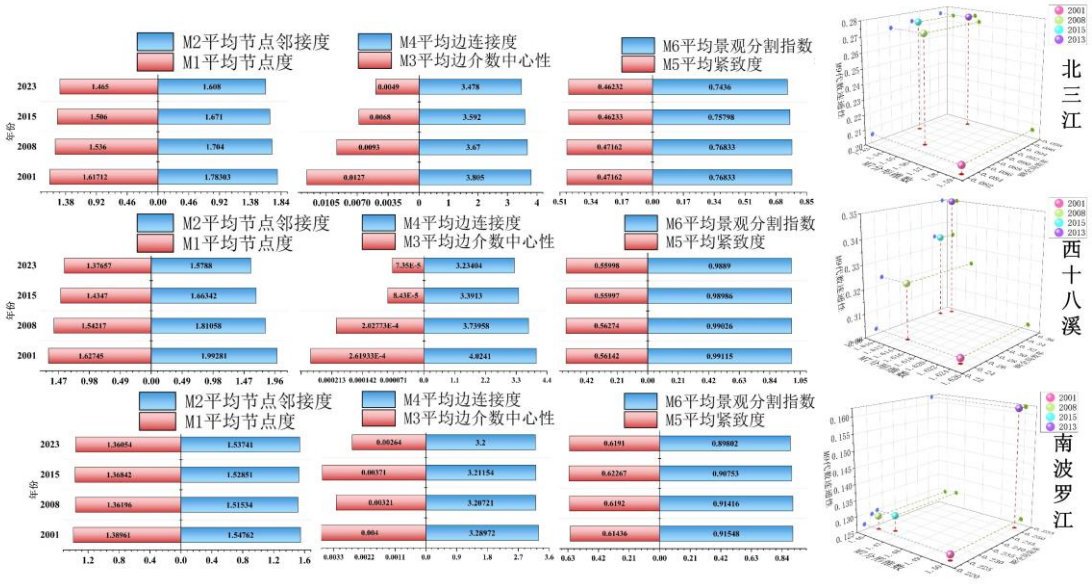


图 5 三大典型流域拓扑数据图

Figu.5 shows topological data graphs of three typical river basins

2.2 关键驱动因子识别及贡献分析

基于四期洱海流域水系数据，采用偏最小二乘回归（PLS）与主成分回归（PCR）方法识别拓扑特征的主导驱动力及其阶段性差异。总体上，驱动体系呈现由社会扩张主导向社会胁迫、结构重组、再向生态恢复主导并最终进入拓扑反馈稳态的演化过程。

由图 6 可知，2001 年水系处于初始扩张阶段。M_5、M_7、M_3、M_2、M_1等指标 VIP 均在 1.1 以上，x_1（VIP=1.07）与 x_6（VIP=1.10）也较突出。PCR 显示 x_1、x_6对节点数量 y_1均为正（x_6–y_1=0.098），说明经济发展与植被生产力共同推动网络扩展，但对边层 y_2和面层 y_3影响方向不一，表明不同空间层次对社会驱动的响应存在差异。

2008 年进入社会胁迫与结构重组并行阶段。M_8、M_6、M_9（VIP=1.18）为关键拓扑变量，x_1（VIP=1.16）、x_4（VIP=1.05）和 x_5（VIP=1.14）重要性上升。PCR 结果显示 x_1对 y_1、y_2为正，对 y_3为负，x_2、x_6对 y_2、y_3均为负，反映经济与土地利用扩张虽提高网络复杂度，却导致水面缩减，体现结构优化与生态压力并存。

2015 年驱动体系转向自然主导。M_7、M_9、M_5、M_8为主要拓扑指标，x_7（VIP=1.21）与 x_2（VIP=1.08）权重较高。PCR 显示 x_5、x_6、x_7、x_8对 y_2均为正（如 x_7–y_2=0.213），说明植被恢复和气候改善更可能通过增加径流汇集与补给稳定性、提升整体连通效率，推动水网由胁迫调整转向生态恢复”

2023 年系统进入拓扑反馈主导的稳定期。M_7、M_9、M_8、M_5居核心，自然因子（x_5、x_6）保持高重要性，而 x_2、x_3作用下降。PCR 显示 x_1–x_8对 y_1、y_2系数普遍转负，仅 y_3保留微弱正效应，表明网络结构稳定后，社会与自然因子影响减弱，稳态主要依赖内部拓扑自组织。

综上，拓扑特征在各阶段始终保持高显著，是连接社会与自然的核心变量。洱海流域水系经历了由社会扩张、结构胁迫向生态恢复、拓扑稳态的演化过程，为后续分析提供了阶段性依据与结构支撑。

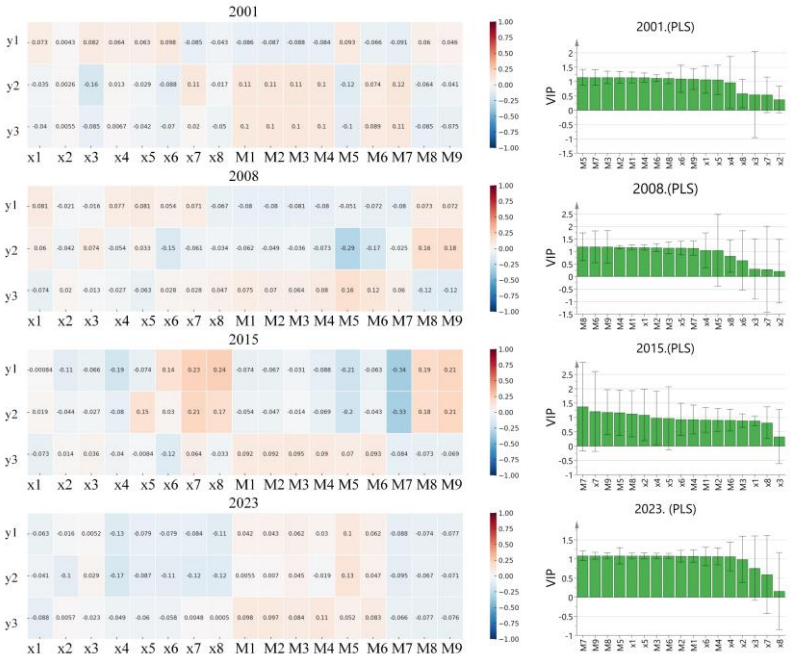


图 6 影响因素驱动关系

Fig. 6 Driving Relationship of Influencing factors

2.3 空间中介机制

2.3.1 空间杜宾模型基准回归 如图 7 所示，三类要素变量均存在显著空间相关，ρ 在 0.824–0.935 之间，均通过 1%显著性检验，y_1、y_2、y_3的 R^2分别为 0.934、0.909、0.927，说明模型拟合良好。

社会因子对节点与边结构表现为本地与邻域的协同促进（如 x_1对 y_1、y_2为正且 Wx_1亦为正），说明经济活动与人口集聚往往通过工程整治、汇流通道完善等方式推动河段扩展；但在面结构（y_3）上，社会因子空间滞后项多为负，体现邻域尺度上对水面斑块存在挤出效应。自然因子的影响相对温和。升温（x_7）对本地 y_1–y_3为正而对邻域为负，表明水热条件改善有利于本地水系发育，但在区域尺度上可能通过蒸散增强或补给再分配对邻域形成抑制。综上，洱海水系格局具有显著空间依赖性。

变量	y_1		y_2		y_3	
x_1/Wx_1	0.019***	0.075***	0.021***	0.186***	0.008***	-0.022***
	(0.022)	(0.022)	(0.022)	(0.022)	(0.008)	(0.008)
x_2/Wx_2	0.132***	0.281*	0.164***	0.333*	0.057	-0.159***
	(0.142)	(0.142)	(0.189)	(0.189)	(0.056)	(0.056)
x_3/Wx_3	0.012***	0.048***	0.014***	0.087***	0.005*	-0.021***
	(0.014)	(0.014)	(0.018)	(0.018)	(0.005)	(0.005)
x_4/Wx_4	0.015***	0.041**	0.021***	0.082***	0.006***	-0.018***
	(0.016)	(0.016)	(0.021)	(0.021)	(0.006)	(0.006)
x_5/Wx_5	0.080**	-0.067	0.113	-0.119	0.030	0.040
	(0.081)	(0.081)	(0.117)	(0.117)	(0.030)	(0.030)
x_6/Wx_6	0.043	-0.023	0.060	-0.052	0.015	0.019
	(0.043)	(0.043)	(0.060)	(0.060)	(0.015)	(0.015)
x_7/Wx_7	0.075***	-0.246***	0.099***	-0.450***	0.029***	0.050
	(0.077)	(0.077)	(0.103)	(0.103)	(0.031)	(0.031)
x_8/Wx_8	0.060	-0.125	0.087	-0.123	0.021**	0.030
	(0.082)	(0.082)	(0.115)	(0.115)	(0.029)	(0.029)
rho	0.935***		0.888***		0.824***	
	(0.381)		(0.043)		(0.034)	
R^2	0.93		0.909		0.927	

图 7 空间杜宾模型回归结果

Fig.7 Regression results of the spatial Durbin model

*、**、*** 分别表示变量在 0.1、0.05、0.01 水平下显著， 括号内为标准误，后表相同。

2.3.2 空间杜宾模型中介回归 为揭示驱动因子对水系网络中介拓扑参数的空间作用机制，分别以九类中介变量 M_1–M_9为因变量构建空间杜宾模型。图 8 显示，各模型空间滞后系数 ρ 介于 0.889-0.959，均通过 1%显著性检验，R^2为 0.937–0.968，说明拓扑参数存在显著空间相关性，驱动因子能较好解释其空间差异。

社会因子（x_1–x_4）对节点、边层指标（M_1–M_4）以及面形态类指标（M_5、M_6）在本地多表现为正向影响，而对整体网络效率与连通稳定（M_8、M_9）在本地多为负向；同时其空间滞后项在整体指标上多转为正。这表明社会经济扩张更倾向于在本地推动通道加密与工程化连接，但也可能伴随更强的分割与结构不均衡，使网络整体稳定性在本地下降；而在邻域尺度，拓扑调整通过主干通道的连通与区域汇流产生溢出效应，从而提升相邻子流域的整体连通与效率。

自然生态因子中，植被相关指标（x_5–x_6）对面层形态指标（M_5–M_6）影响更为集中，整体呈负向作用，指向植被恢复更可能通过地表侵蚀削弱，降低水体破碎化程度，从而改变水体形态。温度（x_7）对本地 M_1–M_6 多为负而对 M_7–M_9为正，且其空间滞后方向相反，反映水热条件变化可能通过，削弱支沟冗余、强化主干控制来提升整体连通效率，但在邻域尺度存在水文过程再分配与竞争，导致拓扑响应呈现异向溢出。降水（x_8）总体影响较弱，主要体现在对整体形态复杂度与面层指标的调节。

总体而言，社会因子通过强化本地节点与主通道、抑制邻域水系来重塑拓扑特征；自然因子则呈局部促进、邻域扩散的差异化效应，为空间中介机制分解提供了重要理论基础。

变量	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	(rho)	R^2
x_1	0.091***	0.192***	0.811***	0.138***	0.026***	0.026***	-0.010	-0.191***	-0.631***		
	(0.012)	(0.019)	(0.118)	(0.017)	(0.007)	(0.007)	(0.007)	(0.039)	(0.109)	0.958***	0.968
Wx_1	-0.094***	-0.197***	-0.809***	-0.144***	0.001	0.007	0.032***	0.199***	0.656***	(0.022)	
	(0.012)	(0.019)	(0.120)	(0.017)	(0.008)	(0.007)	(0.008)	(0.039)	(0.111)		
x_2	0.431***	0.769***	3.422***	0.551***	0.173***	0.063	0.046	-0.836***	-2.750***		
	(0.087)	(0.159)	(0.854)	(0.130)	(0.045)	(0.046)	(0.045)	(0.259)	(0.744)	0.923***	0.959
Wx_2	-0.332***	-0.670***	-3.100***	-0.487***	0.055	-0.054	0.167***	0.814***	2.685***	(0.033)	
	(0.089)	(0.162)	(0.873)	(0.132)	(0.047)	(0.046)	(0.045)	(0.260)	(0.747)		
x_3	0.059***	0.113***	0.500***	0.082***	0.016***	0.008*	-0.010**	-0.133***	-0.433***		
	(0.008)	(0.014)	(0.079)	(0.012)	(0.005)	(0.004)	(0.004)	(0.024)	(0.067)	0.889***	0.963
Wx_3	-0.041***	-0.089***	-0.416***	-0.064***	-0.003	-0.012**	0.016***	0.118***	0.393***	(0.036)	
	(0.009)	(0.017)	(0.091)	(0.013)	(0.005)	(0.005)	(0.005)	(0.026)	(0.075)		
x_4	0.017	0.037	0.166	0.012	0.022***	0.022***	0.003	-0.003	-0.066		
	(0.012)	(0.022)	(0.112)	(0.018)	(0.005)	(0.005)	(0.005)	(0.034)	(0.100)	0.949***	0.941
Wx_4	-0.00028	-0.048**	-0.02288	-0.022	-0.000	0.001	0.018***	0.029	0.141	(0.030)	
		(0.022)		(0.017)	(0.006)	(0.005)	(0.005)	(0.033)	(0.097)		
x_5	-0.046	-0.046	-0.829	-0.017	-0.110***	-0.060**	-0.035	0.221	0.671		
	(0.059)	(0.109)	(0.543)	(0.086)	(0.027)	(0.026)	(0.027)	(0.159)	(0.471)	0.953***	0.938
Wx_5	0.044	0.065	0.747	0.027	-0.077***	-0.020	-0.062**	-0.215	-0.672	(0.030)	
	(0.060)	(0.110)	(0.550)	(0.087)	(0.028)	(0.027)	(0.027)	(0.161)	(0.477)		
x_6	-0.010	-0.012	-0.275	-0.004	-0.058***	-0.029**	-0.013	0.099	0.295		
	(0.030)	(0.056)	(0.284)	(0.044)	(0.015)	(0.014)	(0.014)	(0.082)	(0.243)	0.954***	0.938
Wx_6	0.026	0.052	0.323	0.033	-0.036**	-0.012	-0.00035	-0.112	-0.349	(0.030)	
	(0.030)	(0.056)	(0.286)	(0.044)	(0.015)	(0.014)		(0.083)	(0.245)		
x_7	-0.172***	-0.342***	-1.999***	-0.209**	-0.060**	-0.076***	0.119***	0.521***	1.693***		
	(0.057)	(0.104)	(0.511)	(0.086)	(0.027)	(0.026)	(0.026)	(0.154)	(0.447)	0.959***	0.947
Wx_7	0.167***	0.320***	1.792***	0.195**	0.053*	0.040	-0.019	-0.456***	-1.507***	(0.028)	
	(0.059)	(0.108)	(0.531)	(0.089)	(0.028)	(0.027)	(0.027)	(0.161)	(0.467)		
x_8	0.020	0.048	0.030	0.062	0.020	0.002	0.059***	-0.059	-0.129		
	(0.044)	(0.082)	(0.414)	(0.063)	(0.020)	(0.019)	(0.020)	(0.120)	(0.357)	0.951***	0.937
Wx_8	-0.014	-0.043	0.249	-0.069	0.094***	0.067**	0.029	-0.022	-0.083	(0.030)	
	(0.060)	(0.110)	(0.559)	(0.086)	(0.028)	(0.026)	(0.027)	(0.165)	(0.490)		

图 8 空间杜宾中介回归结果

Fig.8 Results of spatial Durbin mediation regression

2.3.3 空间中介回归 为揭示驱动因子对水系格局的空间中介机制，在空间杜宾框架下以 y_1、y_2、y_3为因变量，分别引入单个拓扑参数 M_1–M_9构建中介模型。由图 9 显示，ρ 均在 1% 水平显著，说明引入中介后模型仍具有较强空间依赖性。

在节点层（y_1）模型中，社会因子（x_1–x_4）的直接效应由基准模型中的正向显著转为负向显著，这表明社会经济扩张优先改变连通组织，当拓扑指标被纳入模型后，其直接贡献被吸收，残余效应表现为对节点、边扩张的抑制。自然因子（x_5–x_8）保持正向。x_1对 y_1由 0.019 降至-0.055~-0.093，x_2由 0.132 降至-0.342~-0.429，x_3、x_4均为负，而 x_5、x_6、x_7、x_8多为正。这表明社会经济扩张并非简单增加节点，而是先促使水网通道集中，从而在节点层表现为扩张受限；自然因子则更可能通过径流补给维持水系发育。

b 路径中，M_1–M_6对 y_1为负，M_8、M_9为正，而 WM 则相反，表明局部增强抑制邻域扩展，而全局效率提升促进整体增长。

在边层（y_2）模型中，社会因子在基准模型中的正效应全部转为负效应，其中 x_1为 -0.114 到-0.195，x_2普遍小于-0.80，显示经济与用地扩张对边层的作用从促进转为约束。这反映通道工程化与整治可能带来主干替代支沟的结构调整。b 路径上，M_1–M_6为负，M_8、M_9为正，反映局部收缩与整体优化的结构特征，即支流冗余减少降低边要素增长，但整体连通效率提升强化主通道输导功能。

面层（y_3）表现更复杂。社会因子多为显著正向，说明经济与人口促进水面维持而建设用地挤压空间。自然因子中，x_5、x_6效应减弱，x_7和 x_8由正转负，表明其影响已部分通过拓扑中介传导。这提示水面斑块更受形态调整影响，气候和植被变化不一定直接扩大水面，而可能先改变分割程度，从而体现为间接效应。b 路径中，M_1、M_4、M_7为负，M_6多为正，WM 多为负，显示邻域竞争对局部水面具抑制作用。说明在邻域尺度，用地竞争与岸带占用更易导致水面破碎化与水面收缩，从而使水面格局呈现更强的空间补偿与挤出。

总体而言，节点与边尺度的拓扑结构显著吸收社会因子的正向作用，使其转为抑制效应；拓扑特征通过不同路径共同驱动局部收缩与整体优化。水面格局社会与气候因子交互作用体现了空间补偿与结构反馈。

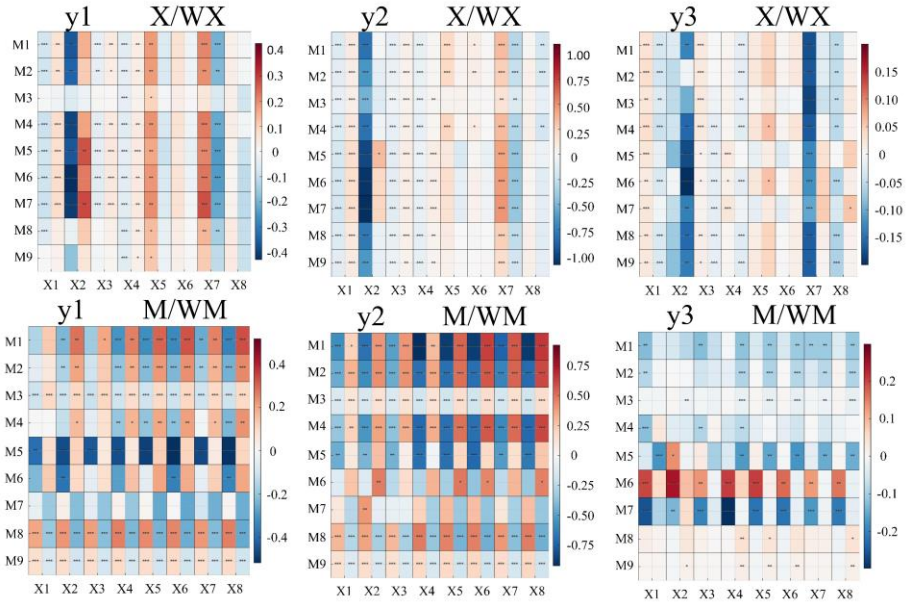


图 9 空间中介回归结果

Fig.9 Spatial mediation regression results

2.3.4 空间中介效率 如图 10 可知，在完成驱动因子—中介拓扑参数—水系要素的三步空间回归后，共得到 216 条 X–M–Y 路径，其中 68 条中介效应显著，主要集中在 y_2（31 条）和 y_1（23 条），y_3相对较少（14 条）。显著中介以负向为主（46 条），正向 22 条；中介效率占比普遍处于 40%–80%区间，少数超过 90%，表明驱动因子对水系格局的影响主要通过拓扑结构间接实现。

社会因子（x_1–x_4）以高比例负向中介为主。x_1经 M_3作用于节点 y_1的中介效应为−0.0877，对总效应贡献 94.4%；经 M_3作用于 y_2的中介占比为 55.7%，均为显著负向。x_2经 M_3作用于 y_1的中介占比为 84.9%，经 M_2、M_3、M_8、M_9作用于 y_2的中介占比为 40%–50%；x_3通过 M_3作用于 y_1的中介占比达 114.5%，表明中介效应方向完全反转。x_4显著路径较少，主要通过 M_5和 M_6对 y_1、y_2产生约 18%～20%的负向效应。总体来看，社会因子的显著中介 42 条，负向占八成以上，中介占比普遍高于 40%，说明经济扩张与建设用地集聚通过改变拓扑关系削弱了节点和边的连通性。

自然因子（x_5–x_8）则以中等强度正向中介为主。x_5经 M_5作用于 y_1、y_2的中介占比分别为 26.2%和 41.7%；x_6经 M_5作用于 y_2的中介占比达 73.4%，为自然因子中最高。x_7经 M_3、M_8、M_9作用于 y_1、y_2的中

介占比多在 40%–80%之间，表现为显著正向，表明适度升温可通过增强主干通道与整体效率促进连通。x_8仅经 M_7作用于 y_3的中介占比约 23.8%，且为负向，提示在水面格局上有简化趋势。总体上，自然因子正向占多数，中介占比约 35%–40%，在增强网络稳定性与整体优化方面发挥间接作用。

从拓扑参数看，显著路径主要以 M_5、M_1、M_3、M_8和 M_9为中介。M_5涉及 15 条路径，M_1含 9 条，M_3、M_8与 M_9各 8 条，说明这些指标是社会–自然作用在水系要素的主要通道。社会因子经 M_1–M_5及 M_8、M_9效率多为负，反映经济与土地扩张通过提升局部节点度和通道集中性间接抑制水系扩张；相同参数下自然因子多为正向，反映经济胁迫与生态恢复的双向调节机制。

综上，洱海水系对社会－自然驱动的响应主要通过关键拓扑指标传导。社会因子以高比例负向中介为主，自然因子以中等强度正向中介为主，M_3、M_5、M_8、M_9 在不同驱动下反复充当枢纽变量，是连接社会活动、生态恢复与拓扑稳态的关键结构节点。

y1

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
M1	-0.014	-0.100	-0.011	-0.005	0.015	0.003	0.044	-0.007
M2	-0.010	-0.122	-0.012	-0.007	0.010	0.003	0.060	-0.012
M3	-0.088	-0.362	-0.056	-0.017	0.086	0.029	0.206	-0.003
M4	0.000	-0.067	-0.005	-0.002	0.004	0.001	0.032	-0.015
M5	-0.010	-0.080	-0.007	-0.010	0.053	0.030	0.028	-0.010
M6	-0.006	-0.024	-0.002	-0.006	0.019	0.010	0.022	-0.001
M7	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.011	0.001
M8	-0.038	-0.192	-0.028	-0.001	0.054	0.025	0.116	-0.015
M9	-0.052	-0.250	-0.039	-0.006	0.063	0.029	0.150	-0.013

y2

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
M1	-0.051	-0.294	-0.030	-0.016	0.040	0.009	0.126	-0.018
M2	-0.088	-0.439	-0.051	-0.025	0.032	0.008	0.207	-0.034
M3	-0.110	-0.515	-0.070	-0.028	0.145	0.048	0.326	-0.005
M4	-0.049	-0.293	-0.030	-0.008	0.012	0.002	0.123	-0.045
M5	-0.012	-0.073	-0.007	-0.015	0.076	0.041	0.031	-0.013
M6	-0.003	-0.008	-0.002	-0.006	0.018	0.010	0.019	-0.001
M7	-0.001	0.019	0.001	0.001	-0.010	-0.003	0.012	0.017
M8	-0.058	-0.308	-0.039	-0.001	0.101	0.046	0.208	-0.028
M9	-0.084	-0.427	-0.058	-0.012	0.125	0.056	0.284	-0.024

p < 0.05 p < 0.01 p < 0.001

y3

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
M1	-0.012	-0.021	-0.008	-0.001	0.002	0.000	0.019	-0.001
M2	-0.016	-0.001	-0.007	-0.001	0.000	0.000	0.015	0.000
M3	-0.007	0.014	-0.004	0.000	-0.004	-0.001	0.017	0.000
M4	-0.017	-0.018	-0.007	-0.001	0.001	0.000	0.014	-0.001
M5	-0.001	0.024	0.000	-0.001	-0.002	0.000	0.002	0.000
M6	0.005	0.016	0.001	0.004	-0.012	-0.005	-0.010	0.000
M7	0.003	-0.006	0.002	-0.001	0.008	0.003	-0.020	-0.012
M8	-0.004	0.006	-0.002	0.000	-0.003	-0.001	0.010	0.001
M9	-0.003	0.017	-0.002	0.000	-0.005	-0.002	0.008	0.001

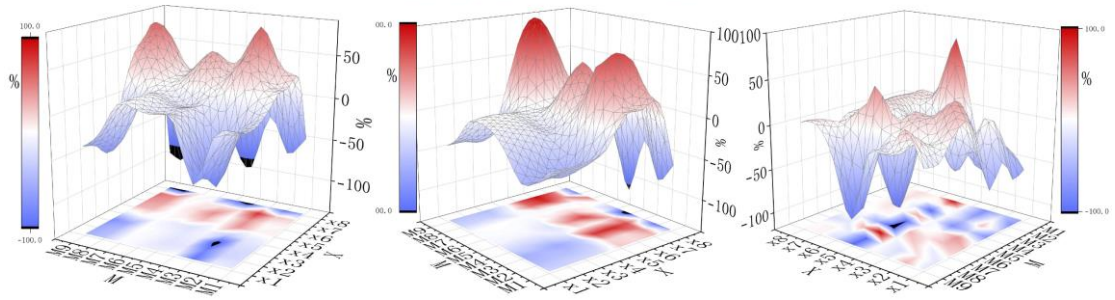


图 10 空间中介效率结果图

Fig.10 shows the results of spatial mediation efficiency

3 讨论

3.1 拓扑中介参数在 2001—2023 均呈显著性

本研究发现，2001—2023 年间水系拓扑中介参数始终显著，且流域在经历社会扩张、生态修复等的不同阶段间，拓扑结构始终持续作为驱动作用传递到点–线–面要素之前的必经层。这一现象的原因可能有：（1）高原流域由地质构造塑造的河网骨架在短期内相对稳定，使主干河道与关键节点长期保持高介数中心性和较强连通性[21]；（2）无论是建设用地扩张、河道整治，还是生态修复与湿地重建，实际干预路径都首先落在“改渠、裁流、并池”等结构调整上[22]，从而持续作用于拓扑指标，使其在不同阶段反复进入核心中介组合；（3）该研究与诸发文等人在平原地区的水系、湿地网络的研究中发现连通度、代数连通性等指标长期作为水质与生态过程主导因子相一致[23]。这一跨期稳定性说明 PLS–SDM–Med 框架在处理驱动共线性与空间溢出的同时，能够识别结构慢变量。

现行洱海治理的“七大治理”强调入湖河道治理、湖滨带、湿地建设与监测预警体系等，其以结构为抓手的路径与本文识别的拓扑中介长期显著性相吻合；管理上建议将结构指标纳入治理评估与预警，用于识别网络简化风险与生态修复提供动态反馈。

3.2 点–线–面格局的差异性

从中介效率和 SDM 基准回归结果看，点（y_1）、线（y_2）、面（y_3）三类水系要素对驱动因子的响应存在差异。显著中介路径中，y_1有 23 条，y_2有 31 条，而 y_3有 14 条；但 y_3的平均中介效率接近 100%，远高于 y_1（约 46%）和 y_2（约 35%）。点、线格局中介参与的路径更多，且 SDM 中 x_1–x_4对 y_1、y_2的局部效应和空间滞后效应多为显著正值。此外，面状的驱动响应较弱，且对 y_3的空间滞后项则普遍为显著负值。造成上述的可能原因有：（1）节点对应交汇点，是直接嵌入社会工程活

动，因此对经济活动和土地变化敏感；（2）边层是汇流和输导的载体，在网络通道化过程中承担主要调整；（3）面层则处于结构变化的末端，它既不直接参与开发布局，又受制于节点和边结构重组，因此显著路径虽少，但一旦通过拓扑中介被触发，对水面格局的影响往往是成片的[24]。

洱海保护治理“七大行动”中入湖河道治理与截污治污等工程更容易直接改变点—线系统，而湖滨带、湿地建设与岸带管控更关键于面状水体维持；这与现行入湖河道治理加湖滨带与湿地建设的组合策略相一致，但也提示需分别设置针对点线与面的差异化考核指标。

3.3 抑制型空间中介路径的机制解析

空间中介结果显示，夜间灯光（x_3）–边介数中心性（M_3）–节点（y_1）的中介效率为 114.5%；NDVI（x_5）–景观分割指数（M_6）–水面（y_3） 的中介效率高达 822.8%。二者均超过 100%，都表现为中介效应方向与直接效应相反，且强度更大，这类现象称为抑制效应[25]。当总效应 c 接 0 而间接效应ab显著时，Share 会被比例放大，因此可出现远大于 100%的数值；该类结果需结合ab与实际情况综合解读。说明本研究方法可揭示方向相反的并行通道，从而解释仅看总效应时容易被掩盖的结构性副作用。

对于 x_3–M_3–y_1 路径，可能的机制为：高原湖盆空间受限，建设用地和交通基础设施集中沿主干河道布局，优先加固和渠化骨干通道，压缩或切断部分支流与洼地水系。在洱海流域近年截污治污与入湖河道治理等工程背景下，河道整治更倾向于提升主干输导与排水效率，从而强化通道化。x_3增强，即更多流量被分配到关键边上，而部分次级节点弱化甚至从水网中消失[错误!未找到引用源.]。同时，洱海流域年降水呈缓慢下降趋势，枯季来水偏弱会提高小支流间歇性与断流概率，从过程上放大主干集中、支流弱化。这种结构调整使得城市化对节点数的直接影响被低估，而通过拓扑层的负向中介被放大。

对于 x_5–M_6–y_3 路径，可能解释是：生态修复通过填平滩地洼地、整治岸线和合并小型水体，减少了零散水面。洱海湖滨带生态修复与岸带整治往往伴随岸线形态优化与斑块整合，使水体空间更集中。NDVI 提升往往伴随岸线规整和斑块整合，进而通过 M_6 对 y_3 产生负向中介，但小型、边缘水体被压缩[27]。叠加枯季来水偏弱背景，小型浅水斑块更易季节性萎缩，从而强化该抑制效应。

3.4 社会–自然中介效应对比

社会因子（x_1–x_4）与自然因子（x_5–x_8）的中介作用存在显著差异。社会因子中介路径多、效率高，且以负向中介为主。自然因子为中等强度的正向稳定中介。差别可能源于两类驱动对水系拓扑结构作用方式的差异：社会因子多通过建设用地扩张、渠化整治、岸线硬化等工程性、一次性强干预，集中强化主干通道、削弱支流与边缘水体，降低网络冗余与缓冲能力，因而在拓扑层面形成突出负向中介[28]；自然因子则主要通过降水格局、植被恢复与基底条件等渐进性过程，缓慢调整径流与斑块配置，在不破坏骨架的前提下增强连通与调蓄功能，从而体现为相对稳健的正向中介[29]。表明本研究方法框架，有助于识别不同治理手段可能触发的结构方向与风险通道。

现行洱海保护治理已同时包含“截污治污、面源减量、生态修复与湿地建设”等组合举措，其方向与本文“工程型驱动更易触发负向中介、自然过程更稳定正向”的发现相一致；管理上建议在持续控源截污与河道治理的同时，强化岸带/湿地恢复与面源控制以提升网络冗余与系统韧性；并针对关键通道与关键节点开展分区限建与连通修复，避免结构性负向效应在空间上扩散。

3.5 局限性

本研究在方法与应用层面具有一定价值，通过 PLS–SDM–Med 框架，将关键驱动识别、空间溢出刻画与中介路径分解纳入同一链条，使驱动–拓扑–格局的结构传导机制具备可检验的路径表达。结果同时提示流域治理需关注网络连通性与冗余度等结构状态，并重视空间溢出背景下的跨单元协同，但在数据与方法层面仍存在约束。时间维度上，受遥感影像可获取性与水网精细提取工作量限制，仅选取四期数据，时间分辨率有限，可能难以刻画短时尺度的快速调整与阶段性波动。驱动因子方面，为保证跨期比较与空间计量所需的时间连续性与空间一致性，未纳入部分难以获取长序列或空间一致性不足的变量（如水利工程运行方式、农业施肥强度及阶段性治理措施等），其影响可

能未被充分揭示。方法层面，拓扑指标用于表征水系结构并作为功能变化的结构性代理，但其与水质调控、生境供给等生态过程仍为间接关联，需结合水动力或生态过程模型进一步验证。

总体而言，该框架主要面向多源驱动共线性和空间依赖以及机制链条检验这一类普遍问题，因此该框架可推广至类似流域；但在强人工调度或强季节性间歇河流区，连通关系更具事件性、对时间分辨率更敏感，且若关键驱动变量缺失，机制解释将受数据可得性限制。

4 结论

（1）2001—2023 年间，洱海流域水系网络由多源冗余型逐步演化为主干清晰的相对高效稳态结构。北三江、西部十八溪、波罗江分别形成上游控制、中游缓冲、末端调蓄的分层耦合格局。

（2）拓扑结构是驱动因子与水系格局间的关键中介层。SDM–Med 识别出 68 条显著 X–M–Y 路径，中介效率多集中在 40%–80%，部分超过 90%，表明水系演化主要通过结构层的间接传导实现。边介数中心性、紧致度、全局效率和代数连通性是最具代表性的中介参数。

（3）社会经济因子通过拓扑结构产生显著负向中介，是河网通道化和结构简化的主要驱动力。自然生态因子总体表现为正向稳定中介。

（4）构建的 PLS–SDM–Med 框架系统揭示了驱动—拓扑—要素的传导关系，识别出关键中介路径与高风险结构单元，为高原湖泊从要素管控转向基于网络结构的限建管控与生态修复优化提供了可操作的分区限建、节点优先修复与动态评估框架。

5 附录

附图见电子版（DOI: 10.18307/2026.0642）.

6 参考文献

[1] MA M, YIN YJ, SHI YD, et al. Spatiotemporal Variations of Lake Currents in Gonghu Bay of Lake Taihu under the Influence of the “Yangtze-to-Taihu Water Diversion Project” . *J Lake Sci*, 2024, 36(06): 1922-1932. [马明,殷燚杰,石亚东,等.“引江济太”影响下太湖贡湖湾湖流时空变化.湖泊科学,2024,36(06):1922-1932.]

[2] LI J, YANG JM, LIU YC, et al. Analysis of water system pattern and connectivity change in the Poyang Lake Basin . *Water Resour Prot*, 2026, 42(01): 30-38. [李加林,杨佳铭,刘永超等.鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析.水资源保护,2026,42(01):30-38.]

[3] LI TZ, DU DB, HOU CG, et al. Evolution of Global Cross-border R&D Investment Network Structure and Its Impact Mechanism . *Acta Geographica Sinica*, 1-20 [李庭竹,杜德斌,侯纯光,等.全球跨境 R&D 投资网络结构演化及影响机制.地理学报,1-20

[4] XU H, XU XY, CUI GB. Application of Landscape Spatial Structure Analysis in Urban Water System Planning . *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 108–113.DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2007.01.018. [徐慧,徐向阳,崔广柏.景观空间结构分析在城市水系规划中的应用.水科学进展,2007,(1):108-113.]

[5] YANG LZ, NIU T, YU Q, et al. Ecological Space Optimization Based on Complex Network Theory: A Case Study of the Songhua River Basin . *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(9): 91-103. [杨林哲,牛腾,于强,等.基于复杂网络理论的生态空间优化——以松花江流域为例.北京林业大学学报,2022,44(9):91-103.]

[6] ZHANG X, LI F, ZHAO Y. Impact of changes in river network structure on hydrological connectivity of watersheds. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109848.

[7] TIWARI S, BRIZUELA S R, HEIN T, et al. Water-controlled ecosystems as complex networks: Evaluation of network-based approaches to quantify patterns of connectivity. *Ecohydrology*, 2024, 17(7): e2690.

[8] HOU Q, LI Q, YANG Y, ZHOU J, DU Y, ZHANG Y. Evaluation and optimization of ecological spatial resilience of Yanhe River Basin based on complex network theory. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 1–14.

[9] WANG Y, WAN F, WANG WH, et al. Complex Network Characteristics and Resilience-Driving Mechanism of Watershed Water Resources System . *Advances in Water Science*, 2025, 36(02): 190-203.DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.002. [王煜,万芳,王威浩,等.流域水资源系统复杂网络特征及韧性驱动机理.水科学进展,2025,36(02):190-203.]

[10] WANG T, HUANG Y, CHENG J, et al. Construction and optimization of watershed-scale ecological network based on complex

network method: A case study of Erhai Lake Basin in China. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111794.

[11] Benda L, Andras K, Miller D, et al. Confluence effects in rivers: Interactions of basin scale, network geometry, and disturbance regimes. *Water Resources Research*, 2004, 40(5): W05402.

[12] LU M, HUA J, ZHANG X, et al. Spatial responses of water quality to river density and connectivity alterations on the Taihu Plain. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 97808-97823.

[13] WEI YY, LI YP, WENG SL, et al. Impacts of Urbanization on the Structure and Connectivity of Plain River Networks in the Taihu Basin . *J Lake Sci*, 2020, 32(02): 553-563. [魏莹莹,李一平,翁晟琳,等.太湖流域城市化对平原河网水系结构与连通性影响.湖泊科学,2020,32(02):553-563.]

[14] NIE M C, YAO J, GONG L Q, et al. Effects of the Three Gorges Reservoir regulation & storage and basin inflow on the extreme flood/drought regime of Poyang Lake since 2020 [J/OL]. *J Lake Sci*, 2026: 1–15 [2026-02-14]. [聂珉川, 姚静, 龚磊强, 等. 三峡水库调蓄与流域来水对 2020 年以来鄱阳湖极端洪/枯水情的影响[J/OL]. 湖泊科学, 1-15[2026-02-14].]

[15] HUA ZH, LI R, YANG Z, et al. Spatiotemporal Trends of the Trophic State of Lake Erhai from 2017 to 2022 and Their Driving Factors . *J Lake Sci,* 2024, 36(06): 1639-1650.[华兆晖,李锐,杨智,等.2017—2022 年洱海水体营养状态的时空变化趋势及其成因分析.湖泊科学,2024,36(06):1639-1650.]

[16] ZHUANG DF, LIU JY. A Study on the Regional Differentiation Model of Land Use Degree in China . *Journal of Natural Resources*, 1997, (02): 10-16.[庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究.自然资源学报,1997,(02):10-16.]

[17] Geladi S, Kowalski B R. Partial least-squares regression: a tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 1986, 185: 1–17.

[18] LeSage J, Pace R K. Introduction to Spatial Econometrics[M]. *Boca Raton*: CRC Press, 2009.

[19] Elhorst J P. Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panels[M]. *Heidelberg: Springer*, 2014.

[20] WEN ZL, ZHANG L, HAU JT, et al. Testing and Application of the Mediation Effect Procedure . *Acta Psychologica Sinica*, 2004, (05): 614-620. [温忠麟,张雷,侯杰泰,等.中介效应检验程序及其应用.心理学报,2004,(05):614-620.]

[21] XIA JH, CHEN YM, ZHOU ZY, et al. Review of Mechanisms and Calculation Methods of River Network Connectivity . *Advances in Water Science*, 2017, 28(05): 780-787.[夏继红,陈永明,周子晔,等.河流水系连通性机制及计算方法综述.水科学进展,2017,28(05):780-787.]

[22] 王琳. 基于湿地功能，构建菏泽水系湿地生态基础设施策略研究. 环境保护前沿, 2024.

[23] ZHU FW, LU ZH, CAI M, et al. Evaluation of Water System Connectivity in the Plain River Network Area of the Taihu Basin . *Journal of Water Resources and Waterway Engineering*, 2017, (04): 52-58. [诸发文,陆志华,蔡梅,等.太湖流域平原河网区水系连通性评价.水利水运工程学报,2017,(04):52-58.]

[24] YANG S, WAN R R, LI B. Hydrological Connectivity in the Taihu Basin: Current Status, Research Progress, and Future Challenges . *J Lake Sci*, 2022, 34(04): 1055-1074. [杨素,万荣荣,李冰.太湖流域水文连通性：现状、研究进展与未来挑战.湖泊科学,2022,34(04):1055-1074.]

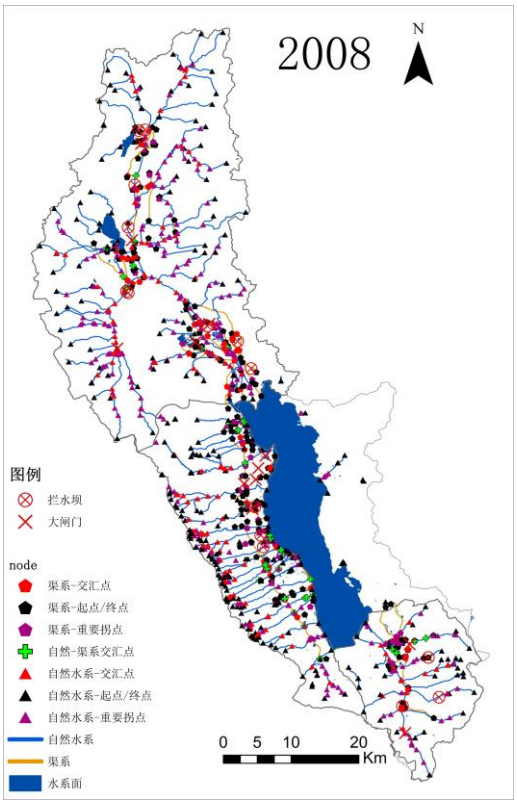
[25] WEN ZL, YE BJ. Mediation Effect Analysis: Development of Methods and Models . *Advances in Psychological Science*, 2014, 22(05): 731-745. [温忠麟,叶宝娟.中介效应分析:方法和模型发展.心理科学进展,2014,22(05):731-745.]

[26] LIU T, JIA P, HU C, ZHANG B, ZHANG A. Research on the connectivity of urban river network–wetland and water quality simulation. *Water Science and Technology*, 2024, 89(9): 2416–2428.

[27] CHENG Y, CUI Y, LIN T, et al. Evaluation of Ecological Protection and Restoration Effectiveness of the Mountains–Rivers–Forests–Farmlands–Lakes–Grasslands Project in the Ertix River Basin . *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(12): 2798-2818. [程艳,崔瑶,林涛,等.额尔齐斯河流域山水林田湖草工程生态保护修复成效评价.自然资源学报,2024,39(12):2798-2818.]

[28] XU JJ, JING H. Research Progress on Concepts and Technologies of River Ecological Restoration . *Research of Agricultural Modernization*, 2022, 43(04): 691-701. [许继军,景唤.河流生态修复理念与技术研究进展.农业现代化研究,2022,43(04):691-701.]

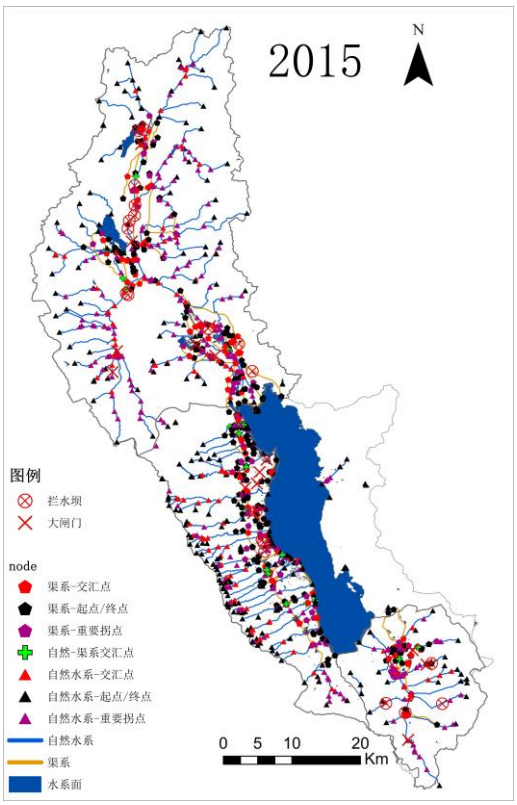
[29] JIA DD, CHEN M, LI K, et al. Research Progress on the Damage Mechanism of Ecological Revetments under Multi-Factor Coupling in the Lower Yellow River . *Advances in Water Science*, 2024, 35(05): 853-864. [假冬冬,陈萌,李锟,等.黄河下游多因素耦合作用生态护坡破坏机制研究进展.水科学进展,2024,35(05):853-864.]



[30]

附图Ⅰ 2008 年水系要素详情

Attachted Fig.1 Detailed Distribution of Water System Elements in 2008



[31]

附图Ⅱ 2015 年水系要素详情

Attachted Fig.2 Detailed Distribution of Water System Elements in 2015