

DOI: 10.20103/j.stxb.202302280357

周可婧,孔繁花,庄雪颖,班玉龙,尹海伟,杨子健,宋小虎.平原圩区水系结构与功能特征及其影响机制——以昆山南部为例.生态学报,2024,44(8):3268-3279.

Zhou K J, Kong F H, Zhuang X Y, Ban Y L, Yin H W, Yang Z J, Song X H. Structure and function of river network and the influence mechanism in plain polder area: A case study of southern flood district in Kunshan. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3268-3279.

## 平原圩区水系结构与功能特征及其影响机制 ——以昆山南部为例

周可婧<sup>1</sup>,孔繁花<sup>1,\*</sup>,庄雪颖<sup>1</sup>,班玉龙<sup>2</sup>,尹海伟<sup>3</sup>,杨子健<sup>4</sup>,宋小虎<sup>5</sup>

1 南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023

2 昆山市水务局,昆山 215300

3 南京大学建筑与城市规划学院,南京 210093

4 扬州市江都生态环境局,扬州 225200

5 江苏省测绘工程院,南京 210013

**摘要:**明晰平原河网水系结构和功能的影响机制对区域生态可持续发展具有重要意义。以昆山市南部防洪分区为例,选取水系指标分析圩区单元尺度下的水系网络结构与调蓄功能,并构建贝叶斯网络模型,综合考虑用地、自然、工程与政策管理等因子及其相互作用,定量探究水系结构与功能的影响机制。结果表明:(1)水系网络结构具有显著空间异质性,且水系调蓄功能与结构特征密切相关,较复杂的水系形态结构往往表现出较强的调蓄功能;(2)政策、工程、用地和自然条件等因子对水系调蓄功能的影响强度依次减弱;(3)识别水系功能优化目标下的关键变量与关键状态子集,可从社会-生态协同视角指导圩区单元的水系治理与优化。研究结果可为平原圩区水系网络健康与可持续发展提供理论参考和决策依据。

**关键词:**平原圩区;水系结构与功能;贝叶斯网络模型;影响机制分析

## Structure and function of river network and the influence mechanism in plain polder area: a case study of southern flood district in Kunshan

ZHOU Kejing<sup>1</sup>, KONG Fanhua<sup>1,\*</sup>, ZHUANG Xueying<sup>1</sup>, BAN Yulong<sup>2</sup>, YIN Haiwei<sup>3</sup>, YANG Zijian<sup>4</sup>, SONG Xiaohu<sup>5</sup>

1 Department of Geography and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Kunshan Water Bureau, Kunshan 215300, China

3 Department of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

4 Yangzhou Jiangdu Ecological and Environmental Bureau, Yangzhou 225200, China

5 Jiangsu Surveying & Mapping Engineering Institute, Nanjing 210013, China

**Abstract:** River networks are important vehicles for water systems to maintain ecosystem health and sustainability. Especially, in plain areas with dense river networks, the river network pattern, the function of hydrological regulation and storage, as well as its complex influence mechanisms, are of great significance to the regional sustainable development. Taking the southern flood district of Kunshan City, as an example, five river network indexes at polder embankment units were introduced and analyzed in 2018: the water ratio, the river network density, the structural connectivity  $\gamma$  index, the river storage capacity per unit area, and the river retention capacity per unit area, to evaluate the river network structure and storage function. The Bayesian Belief Network model (BBN), a methodology based on casual-effect relationships, was

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2022YFF1303102);昆山市河湖生态空间格局优化方案项目(RHZH2022-KS-Y-02-06)

**收稿日期:**2023-02-28; **网络出版日期:**2024-01-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanhuakong@163.com

applied to explore the influence mechanisms of the river network structure and function, by comprehensively considering social-ecological variables, such as land use cover, environment condition, hydraulic engineering construction, as well as policy governance and planning. The results showed: (1) The river network structure has significant spatial heterogeneity. The northern polder area is mostly lower than that in the central and southern regions, the river density in the central and western polder areas was significantly lower than the average level; besides, overall structure connectivity is moderate as compared to middle-low reach of Yangtze River plain, with relatively low value in urbanized polder embankments. (2) The difference in the storage function of river network is closely related to its structural characteristics. There are several polder embankments in the southwest and central study area that displayed complex morphological structure, and their river storage capacities per unit area is correspondingly high, showing a strong flood regulation and storage function. (3) The structural characteristics of river network can significantly affect the flood regulation function in polder embankments, and the influence degree of social-ecological factors on the river storage and retention capacity was decreased by policy, engineering, land use, and environment conditions, accordingly. (4) Based on sensitivity analysis and diagnostic analysis of the BBN model, the key state subset of key variables can be identified, which can guide the river network governance and optimization of polder embankments from the perspective of socio-ecological synergies. The results of this study can provide a theoretical support and decision-making basis for the healthy and sustainable development of river network in plain polder embankment areas and the improvement of nature-based flood control and storage functions.

**Key Words:** plain polder area; structure and function of river network; Bayesian Belief Network model; influencing mechanism

河网水系是维系生态系统健康的重要载体,在山水林田湖草系统保护修复中处于关键地位,对促进区域社会-生态系统可持续发展起着重要作用<sup>[1-2]</sup>。水系结构是影响水文过程、生态功能和环境容量的重要基础,可用于衡量平原河网的空间分布形态特征,常用测度指标包括河网密度、水面率、河网复杂度、河网发育系数等<sup>[3]</sup>。近年来,国内学者将分形几何学和图谱理论引入流域水系连通性、区域景观格局、城市雨水系统优化等研究领域<sup>[4-5]</sup>,揭示了我国平原地区水系结构时空变化,为河网水系优化与治理工作提供了重要的科学依据<sup>[6-7]</sup>。与此同时,水系结构与调蓄功能的内在关联逐步成为国内外学者关注的热点问题,已有研究通过引入河道水位序列<sup>[8]</sup>、水生生物迁徙情况<sup>[9]</sup>、河道传输容量<sup>[10]</sup>等指标,在不同空间尺度上开展水文模型模拟、网络分析和连通性评价,对厘清城市河网的洪水适应能力具有重要的研究意义。

长江中下游平原圩区地势平坦,河网纵横交错,在快速城市化背景下,河网水系的开发改造加剧了“人-水”关系的冲突<sup>[11]</sup>,加之极端降雨和洪涝灾害频发,严重威胁了居民生命财产安全和水生态系统健康<sup>[12]</sup>。因此,明晰水系结构和功能的影响机制对于平原圩区水系优化与治理十分关键。目前,已有研究基于城市化进程、土地利用覆被变化、气候变化等驱动因素,应用数据统计分析<sup>[13-14]</sup>、灰色关联分析<sup>[15]</sup>、相关性分析<sup>[16]</sup>等方法,探讨水系结构与功能特征的影响机制。然而,仅通过自变量和因变量间的线性统计关系描述上述影响机制,在一定程度上忽略了水文单元上社会-生态过程的潜在影响<sup>[17]</sup>,对自然环境、用地开发、工程实践和政策管理因素也缺乏协同考虑<sup>[18]</sup>。贝叶斯模型是依据图谱理论与概率论开发的因果概率推理模型,可融合多种类型变量构建有向网络结构,结合地理信息、实地测量、过程模型、专家知识等定量或定性数据的离散处理,实现由果到因的证据推理与敏感性分析。近年来,贝叶斯网络模型开始应用于生态用地变化机制分析<sup>[18]</sup>、河流生态系统保护<sup>[19]</sup>、流域/汇水区管理<sup>[20]</sup>,对于厘清水系特征的社会-生态影响机制、制定河网水系治理优化策略具有重要实践价值。

据此,本文基于贝叶斯网络模型刻画水文单元上的社会-生态过程,综合考虑了自然条件、土地利用、工程措施和政策干预因素的相互关联,厘清了平原圩区水系结构和功能的影响机制。首先,以太湖流域典型平原河网地区昆山市南部防洪分区为例,基于圩区单元测算水面率、河网密度、结构连通性、河道槽蓄容积、河道可调蓄容积等水系指标;其次,综合考虑社会-生态过程中不同因子的潜在联系,构建贝叶斯网络模型并开展敏

感性分析与诊断推理,探究水系格局与功能的影响机制,以期为平原圩区城镇水系网络的可持续发展提供理论依据与决策支撑。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

昆山市是典型的平原水网地区,气候温和湿润,雨量充沛,境内湖荡众多,河道纵横交错(图1),全市河湖空间共 154.42 km<sup>2</sup>, 占总面积的 16.58%。依据《昆山市城市防洪规划(2015—2030)》划分的防洪除涝分区,昆南片区位于吴淞江以南地区,涵盖千灯镇、巴城镇、淀山湖镇、锦溪镇和张浦镇的 39 个圩区(2018 年统计),地面高程多在 2—4 m 之间,下辖“两横六纵两通道”骨干河网。圩区作为昆山市重要的防洪自保单元,对缓解区域洪涝灾害发挥了积极作用,但也干预了自然水系形态及连通功能,是片区可持续与韧性发展亟待关注的重要对象。

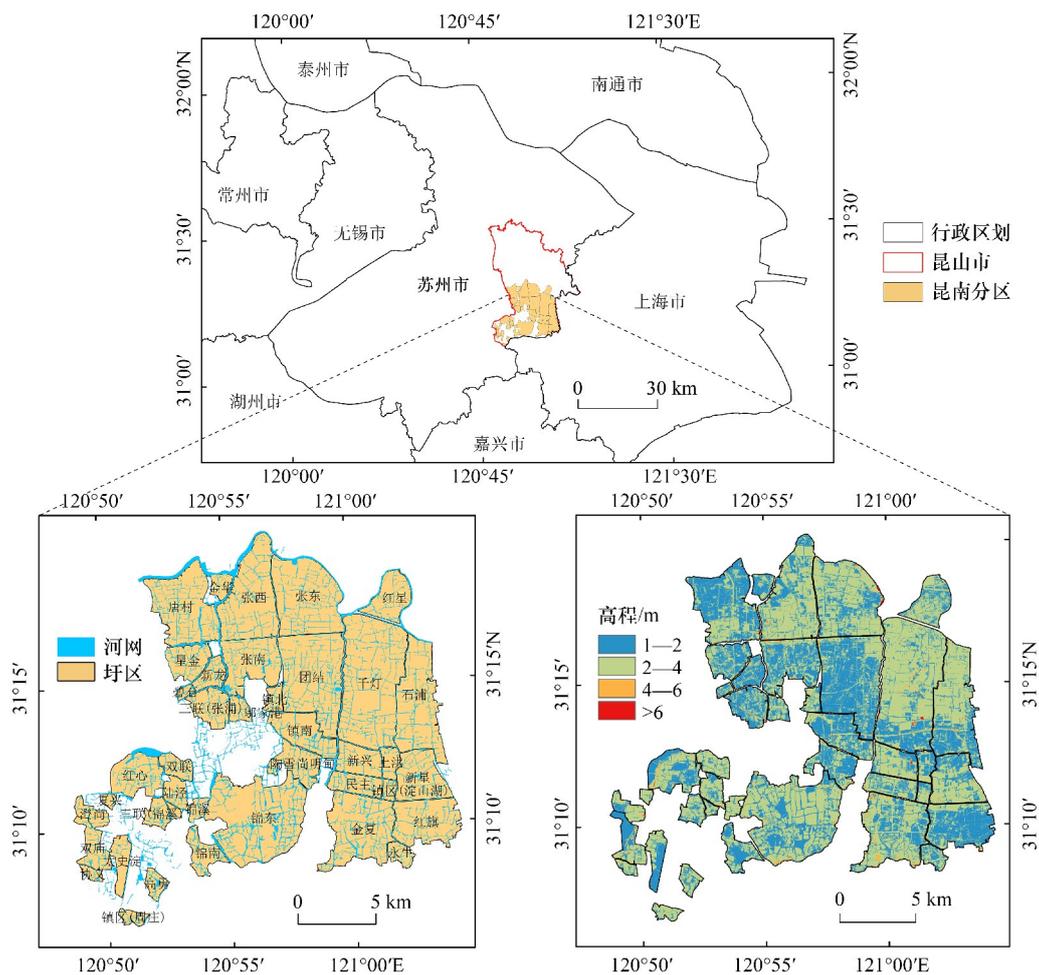


图1 研究区区位及概况

Fig.1 Study area location and characteristic

### 1.2 数据来源与预处理

本文所用的数据主要包括水系网络分布及河道普查信息、圩区空间分布与属性、地形高程、土地利用覆被、工程措施与河道规划资料等,其中,2018 年逐月降雨数据来源于国家青藏高原科学数据中心<sup>[21]</sup>,2018 年土地利用数据提取自欧空局 World Cover 数据集,其余数据均获取自当地相关部门。首先,将 2019 年获取的机载 LiDAR 数据进行航带拼接、去重叠、剔除噪声点、分类地面点及归一化计算等预处理,并生成数字高程模型(DEM)。其

次,通过 ArcGIS 中拓扑检查与修正功能确保水面线闭合,应用 ArcScan 工具识别中心线,并结合遥感影像和河道普查信息进行校核修正,对于河道水面数据预处理并形成水系线状数据。

栅格空间数据均投影至 CGCS2000\_3\_Degree\_GK\_Zone\_40 坐标系,并采样至 10 m 精度。

表 1 数据类型与属性

Table 1 Data type and description

数据类型 Data types	数据信息 Data descriptions
水系网络 River network	2018 年河道水面数据及河道普查信息(河底高程、长度、等级等)
地形高程 Digital surface model	2019 年机载 LiDAR 点云数据
降雨量 Precipitation data	2018 年逐月降雨量数据
土地利用覆被 Land use cover	2018 年土地利用类型数据
圩区信息 Polder characteristic	圩区边界、功能类型及控制水位条件
工程设施 Hydraulic facilities	防洪排涝工程设施分布及属性
政策规划 Policy management	近 10 年河道治理相关规划方案

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 水文指标选取

太湖流域地形低洼、泥沙淤积,加之区域气候温暖、洪灾频发,长期影响着自然河道形态和水位条件<sup>[22]</sup>。在此背景下,水力工程设施修建、渠道化改造以及土地开发利用等人类活动直接或间接地改变了河网水系结构<sup>[23]</sup>,进而影响了区域洪水调蓄、圩区洪水引排功能。近年来,圩内骨干河道疏浚和断头浜连通工程不断落实,一定程度上优化了河网水系结构与功能。因此,本文参考太湖流域相关研究<sup>[14,24-25]</sup>,选取水面率、河网密度和连通性  $\gamma$  指数作为水系结构指标,选取单位面积槽蓄容量和单位面积可调蓄容量作为水系调蓄功能指标(表 2)。

表 2 水系结构与功能特征指标说明

Table 2 Indexes of river structure and functions

水系指标 Indexes	计算公式 Equations	指标说明 Descriptions
结构指标 Structural Index	水面率 ( $W_p$ ) $W_p = \frac{A_R}{A} \times 100\%$ $A_R$ 为河道面积( $m^2$ ), $A$ 为区域面积( $m^2$ )	河道面积与区域面积之比,反映了河流面积发育状况。
	河网密度 ( $R_d$ ) $R_d = \frac{L}{A}$ $L$ 为河流总长度(km), $A$ 为区域面积( $km^2$ )	河流总长度与区域面积之比,反映了河流水系疏密程度。
	连通性 $\gamma$ 指数 $\gamma = \frac{m}{3(n - 2p)}$ $m$ 为连线数量(条), $n$ 为结点数量(个), $p$ 为网络中亚图的数量(个)	反映节点间的实际连接程度, $\gamma$ 指数变化范围为 0—1,0 说明网络中结点均不相连,1 说明网络中每一个结点都存在与其他结点相连的连线。
功能指标 Functional Index	单位面积槽蓄容量 ( $S_R$ ) $S_R = \frac{(A_h - D_g) \times L \times W}{A}$ $A_h$ 为正常水位(m); $D_g$ 为河底高程(m); $L$ 为河道长度(m); $W$ 为河流宽度(m); $A$ 为区域面积( $m^2$ )	常水位下河网槽蓄容量与区域面积之比,其值越大,反映出河网蓄水能力越强、水资源量越大。
	单位面积可调蓄容量 ( $A_{SR}$ ) $A_{SR} = \frac{C_j - C}{A}$ $C_j$ 为河流在最高控制水位时的槽蓄容量( $m^3$ ), $C$ 为河流在常水位时的槽蓄容量( $m^3$ ), $A$ 为区域面积( $m^2$ )	最高控制水位与常水位间的河网可调蓄容量与区域面积之比,其值越大,研究区域河道对洪水的调节能力越强。

### 1.3.2 贝叶斯网络模型构建

贝叶斯网络是一个具有联合概率分布的有向无环图谱,其构建包括节点、链接、概率三个主要部分<sup>[20]</sup>。节点用于表征具有连续或离散状态的变量,链接可体现节点间的因果或依赖关系。概率指的是节点  $X$  处于其父节点组合下特定状态的信度(即条件概率表),对于没有父节点的节点,其概率分布为先验概率分布  $Pa(X)$ ,具体计算方式如下式:

$$P(X) = \sum Pa(X)P(X | Pa(X)) \times P(Pa(X))$$

式中,  $P(X)$  为子节点  $X$  概率,  $Pa(X)$  为节点  $X$  的父节点概率。

本文应用 Netica 6.09 软件,面向水系结构与功能影响机制构建贝叶斯网络(图 2),主要构建流程如下:

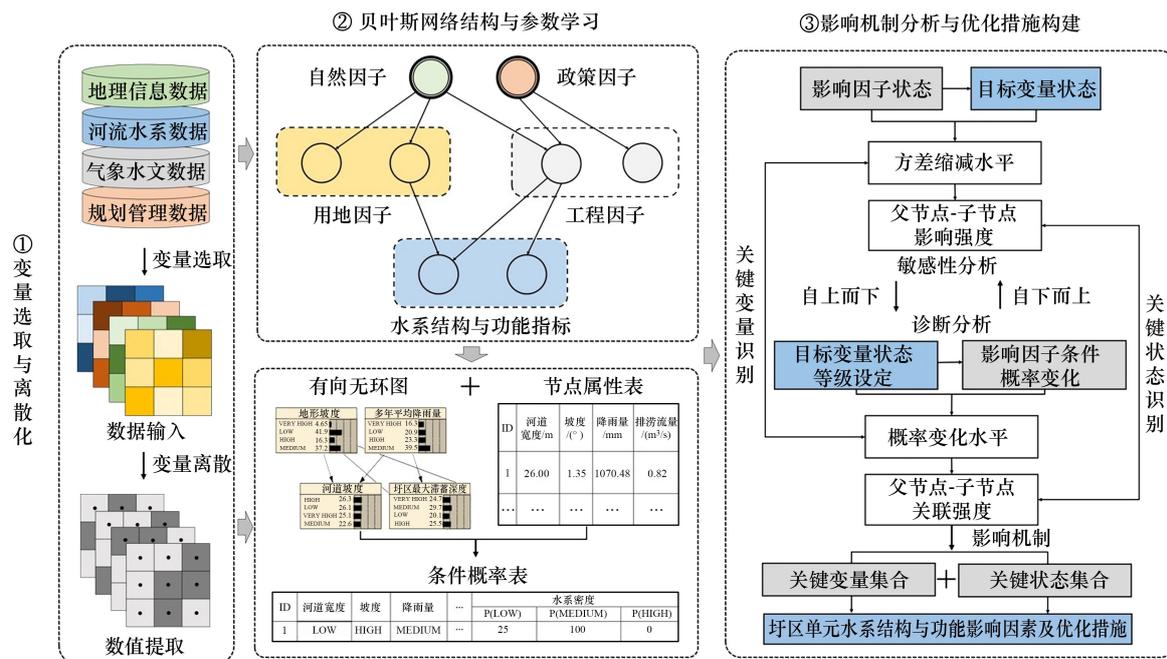


图 2 贝叶斯网络模型构建流程

Fig.2 Workflow of Bayesian network model development

#### (1) 节点变量选取与离散化处理

基于圩区河道水系治理方式和自然水文条件,综合水文单元考虑社会-生态过程的相互作用关系,选取自然条件、土地利用、工程措施、政策管理作为水系结构与功能特征的影响因子(表 3)。其中,依据影响因子的输入数据类型,可将节点分为离散或连续变量。连续变量包括水系结构与功能指标、自然条件因子、用地因子。参考栅格数据离散化方法<sup>[18,26-27]</sup>,应用自然断点法将连续变量由高到低划分为四个等级。例如,将 LiDAR 数据转化为 10 m 精度 DEM,生成地形坡度数据,将栅格值分区统计到圩区单元后进行等级划分。离散变量包括工程和政策因子,依据等频次分割法<sup>[28]</sup>应用四分位数将离散变量从高到低分为四个等级。

#### (2) 网络结构构建与参数学习

在贝叶斯网络结构中,节点间的链接可用于表征因果关系或依赖关系,并通过有向无环图进行刻画。本文通过文献搜集和实地调查,概括自然条件、土地利用、工程措施、政策管理影响因子和水质指标的相关关系,据此构建水系结构与功能特征驱动机制的贝叶斯网络。贝叶斯网络可以通过不同算法识别输入数据与网络结构最为吻合的节点变量条件概率表,其中,最大期望算法可实现参数的最大似然估计,对于数据齐全情况下的参数学习具有明显优势<sup>[29]</sup>。当贝叶斯网络构建完成,将定量或定性数据离散后作为证据添加至节点,进而可通过推理分析进行条件概率累积与更新,为影响机制分析提供了基于概率分布的研究范式。

表 3 变量等级划分

Table 3 State classification of variables

变量名称 Variables	类型 Types	等级 Status				
		低 Low	中 Medium	高 High	极高 Very High	
结构指标	水面率/%	离散	2.7—6.5	6.5—8	8—9	9—17
Structural index	河网密度/(km/km <sup>2</sup> )	离散	1.5—3.2	3.2—3.5	3.5—4	4—4.7
	结构 $\gamma$ 连通性	离散	0.15—0.31	0.31—0.32	0.32—0.34	0.34—0.42
功能指标	单位可调蓄容积/(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	离散	0.01—0.03	0.03—0.04	0.04—0.06	0.06—0.10
Functional index	单位槽蓄容积/(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	离散	0.04—0.18	0.18—0.22	0.22—0.24	0.24—0.45
用地因子	距湖泊坑塘最近距离/m	连续	0—40	40—80	80—112	112—208
Land use index	距不透水面最近距离/m	连续	23—46	46—60	60—90	90—120
自然因子	地形坡度/(°)	连续	1.95—2.03	2.03—2.20	2.20—2.26	2.26—2.29
Environment Index	多年平均降雨量/mm	连续	970—1040	1040—1046	1046—1053	1053—1087
	平均河道宽度/m	连续	16—19	19—23	23—26.4	26.4—39
工程因子	圩区最大滞蓄深度/m	连续	0.4—0.7	0.7—1.1	1.1—1.3	1.3—1.5
	排涝模数(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )	离散	0.6—1.12	1.12—1.43	1.43—2.3	2.3—6.7
Hydraulic facility index	闸站排涝流量/(m <sup>3</sup> /s)	离散	0.8—3.2	3.2—6	6—18	18—93
	闸坝数量/个	离散	0—5	5—8	8—12	12—37
政策因子	堤防总长度/m	离散	0—6.8	6.8—10	10—15	15—30
	径流系数	离散	0.5—0.7	0.7	0.7—0.75	0.75—0.8
Policy index	河道拓宽比例/%	离散	0—25	25—50	50—75	75—100
	断头浜连通比例/%	离散	0—25	25—50	50—75	75—100

### (3) 敏感性分析与诊断分析

贝叶斯网络可通过输入案例证据,实现条件概率的正向推理或反向诊断,进而输出节点变量的联合概率。为明确单个节点变量对于输出结果的影响大小,需要通过贝叶斯模型的正向推理,得到各因子对水系结构和功能的敏感性。本文基于 Netica 6.09,通过节点变量的方差缩减百分比(Variation reduction, VR)表征目标变量的敏感性水平,方差缩减百分比越大、对应因子对目标变量的影响就越强<sup>[30]</sup>。同时,诊断分析可以通过设定目标变量的特定状态,自下而上地推断不同因子的条件概率变化情况,概率变化越大、二者联系越紧密,据此可有效衡量目标变量与不同因子的关联程度<sup>[27]</sup>。依据敏感性分析与诊断分析,可获取贝叶斯网络模型的关键变量及其关键状态,为水系结构与功能优化导向下的圩区治理方式提供参考。

## 2 结果分析

### 2.1 圩区水系结构与功能特征

#### 2.1.1 水系结构特征及空间分布

结果表明,昆南圩区水系结构特征存在显著的空间分布差异。如图 3 所示,城镇圩区水面率多为 5.5%—9.80%,农村圩区集中在 6.50%—14%,且北部水面率普遍较低。其中,高勇联圩水面率高达 16.70%,圩内有振光河、新开河、新泾港等 12 条河道,高于昆南片区平均值 7.96%(不含湖泊)。如图 4 所示,6 个圩区河网密度低于昆山市水系规划目标设定的河网密度控制值 2.95 km/km<sup>2</sup>,27 个圩区高于太湖流域平均河网密度 3.30 km/km<sup>2</sup>。其中,太史淀垦区联圩河网密度最低,经过渠道化整治后,该圩区自然环状水系形态发生改变,形成由南北向河道与东西向沟渠组成的主干化河网,河道密度相对较低。如图 5 所示,昆南片区水系结构连通性  $\gamma$  指数范围为 0.15—0.42,该结果与长江中下游平原地区已有的研究基本一致<sup>[25,31]</sup>。其中,上洪、锦溪、红星联圩  $\gamma$  指数均低于 0.25,上洪、红星圩区部分圩内河道为断头浜,易形成河道淤积并导致断流;锦溪圩区为城镇性质,受道路建设和用地开发影响,水系网络呈“井字型”结构,部分末端水系被截断或填埋,导致水系结构

连通性较低。

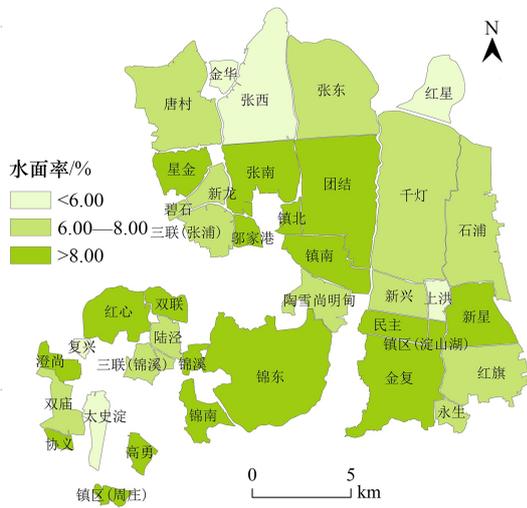


图3 水面率 ( $W_p$ )

Fig.3 Water ratio ( $W_p$ )

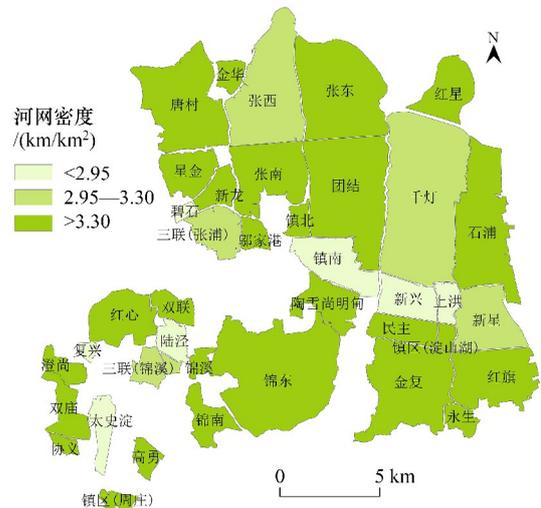


图4 河网密度 ( $R_p$ )

Fig.4 River density ( $W_p$ )

### 2.1.2 水系功能特征及空间分布

昆南分区水系调蓄功能与水系结构特征密切相关。如图6所示,圩区单位面积槽蓄容量 ( $S_R$ ) 取值 0.04—0.45  $m^3/m^2$ ,其中6个圩区的  $S_R$  值高于 0.30  $m^3/m^2$ ,这些圩区具有较高的水面率和河网密度,水系结构发育较为复杂且河道宽度较大,有助于提高圩内河道的蓄水功能。如图7所示,圩区单位面积可调蓄容量 ( $A_{SR}$ ) 取值 0.01—0.10  $m^3/m^2$ ,其中15个圩区  $A_{SR}$  值低于 0.04  $m^3/m^2$ ,集中于东部淀山湖镇,这些农村圩区的水系数量较少,连通性为中等水平,接近树状河网结构,水系结构单一化导致其河网调蓄能力较弱。

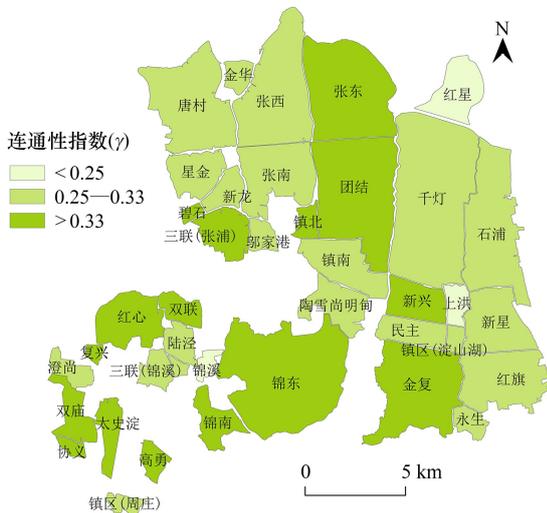


图5 连通性  $\gamma$  指数

Fig.5 Connectivity  $\gamma$  index

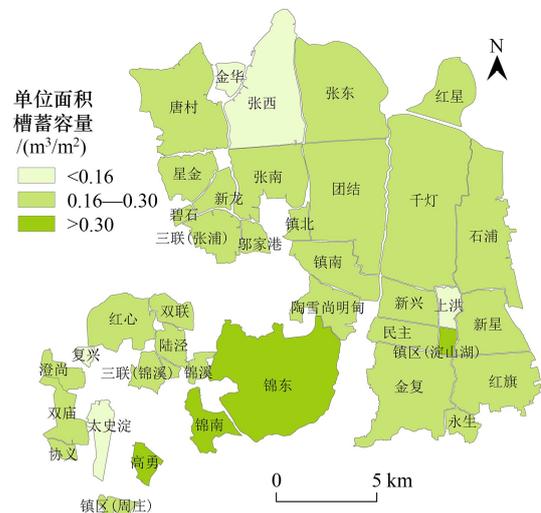


图6 单位面积槽蓄容量 ( $S_R$ )

Fig.6 River storage capacity per area ( $S_R$ )

## 2.2 基于贝叶斯网络模型的影响机制分析

### 2.2.1 模型构建与参数学习

应用 Netica 6.09 实现贝叶斯网络模型可视化,并基于最大似然法对模型变量进行参数学习。如图8所示,昆南片区自然条件和用地条件对于水面率、河道密度、连通性水平存在重要影响,而水系功能依赖于河道

形态、范围与网络结构,进而受制于工程措施和政策调控等人为因素。在父节点地形坡度和多年平均降雨量作为先验概率输入贝叶斯网络模型后,将其他数据按圩区单元进行离散化后作为训练数据输入,获得 2018 年水系结构与功能贝叶斯网络的节点条件概率分布情况。

2.2.2 敏感性分析

由于水系结构特征最终可反映于水系功能,本文设定节点“槽蓄容量”“可调蓄容量”为目标变量,应用敏感性分析中的方差缩减程度,反映驱动因子对目标变量的影响程度。如表 4 所示,水面率、结构连通性和河网密度的方差缩减百分比分别高达 19.70%、8.93%和 2.33%,证实了自然和人为因素共同作用下,水系结构特征可显著影响水系调蓄功能。对于河道槽蓄容量而言,政策因子是最为关键的影响变量,河道拓宽比例和连通比例方差缩减百分比分别为 4.04%和 1.13%。对于河道可调蓄容量而言,工程因子中现状排涝模数产生影响程度最高,方差缩减水平为 14.90%,其他变量自高到低依次为径流系数、闸坝数量、排涝流量、堤坝长度。用地因子中仅距不透水面最近距离对于河道槽蓄容量和可调蓄容量都产生了一定影响,方差缩减百分比分别为 1.58%和 0.27%。相比之下,圩区自然水文条件对于河道槽蓄容量和可调蓄容量的影响较小,仅有圩区最大滞蓄深度方差缩减百分比达到 0.12%,而河道宽度、地形坡度并非影响河道调蓄功能的主要驱动因素。其余因子方差缩减百分比均小于 0.10%,对于水系功能变化的影响较弱。

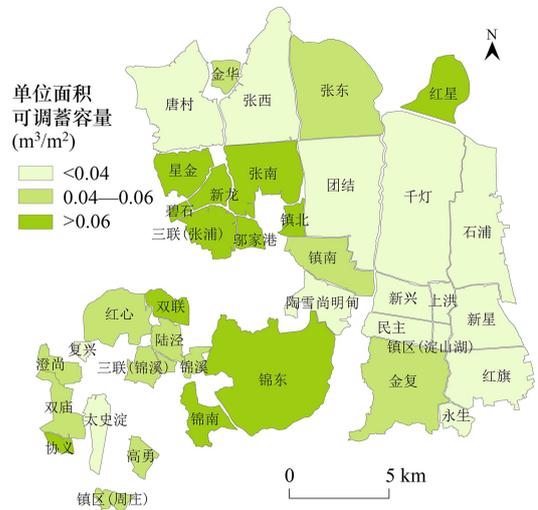


图 7 单位面积可调蓄容量 ( $A_{SR}$ )

Fig.7 River detention capacity per area ( $A_{SR}$ )

表 4 敏感性分析结果

Table 4 Results of sensitivity analysis

目标变量 Targets	影响因子 Variables	方差缩减 Variation reduction/%	目标变量 Targets	影响因子 Variables	方差缩减 Variation reduction/%
河道槽蓄容量 River storage capacity per area	水面率	19.70	河道可调蓄容量 River detention capacity per area	排涝模数	14.90
	河道拓宽整治比例	4.04		结构连通性	8.93
	河网密度	2.33		径流系数	1.67
	距不透水面距离	1.58		闸坝数量	1.05
	断头河道连通比例	1.13		排涝流量	0.79
	地形坡度	0.59		堤坝长度	0.52
	距湖泊坑塘距离	0.44		距不透水面距离	0.27
	河道宽度	0.41		最大滞蓄深度	0.12
	堤坝长度	0.35		河道宽度	0.07
	径流系数	0.24		地形坡度	0.05

2.2.3 诊断分析

本文选取方差缩减百分比大于 1%的因子作为关键变量,进一步通过诊断分析识别其关键状态,明确影响因子与目标变量的关联程度(图 9—10)。假设水系功能处于最优水平,通过条件概率变化水平获取影响因子与目标变量间的定量关联程度。如图 9 所示,当设定槽蓄容量状态为“VERY\_HIGH”时,即假定河道断面高度或河道长度优化,相应地,水面率的“VERY\_HIGH”概率上升 35.90%,河道密度“VERY\_HIGH”和“HIGH”概率变化分别上升 7.40%和 8.60%,水系距不透水面距离概率向远距离聚集,政策因子河道拓宽比例“HIGH”和“MEDIUM”概率分别上升 3.3%和 14.2%,河道连通比例“VERY\_HIGH”和“MEDIUM”概率均

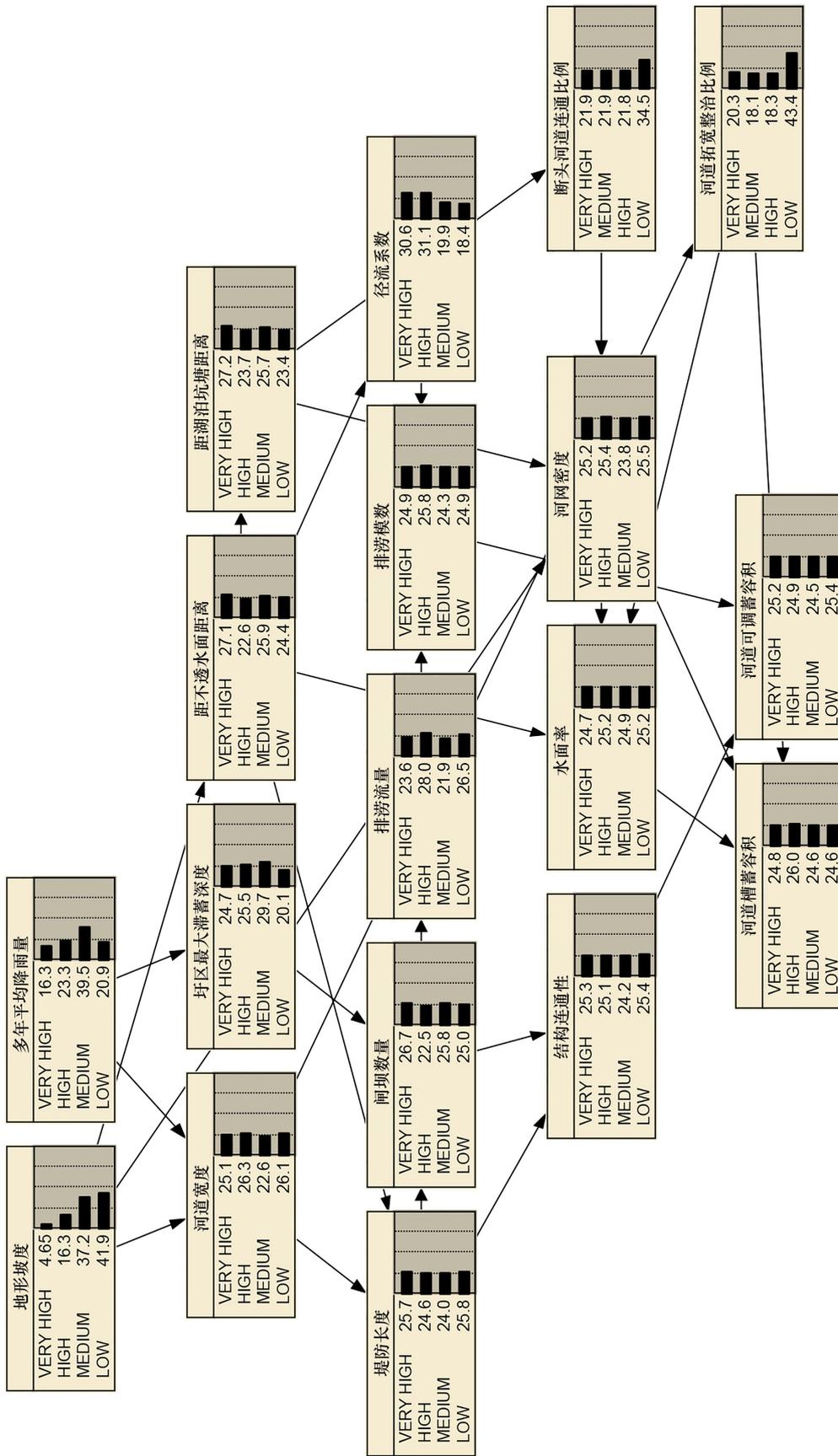


图8 贝叶斯网络模型结构

Fig. 8 Learning result of Bayesian network model

LOW: 低; MEDIUM: 中; HIGH: 高; VERY HIGH: 很高

上升 0.20%。如图 10 所示,当设定可调蓄容量状态为“VERY\_HIGH”,即假设圩区内河道最高控制水位和常水位间的调蓄能力提高时,结构连通性“VERY\_HIGH”概率上升 7.90%,而工程因子中排涝模数“LOW”概率上升 17.30%、闸坝数量“LOW”概率上升 4.10%、径流系数由“VERY\_HIGH”向下转移了 9.90%。

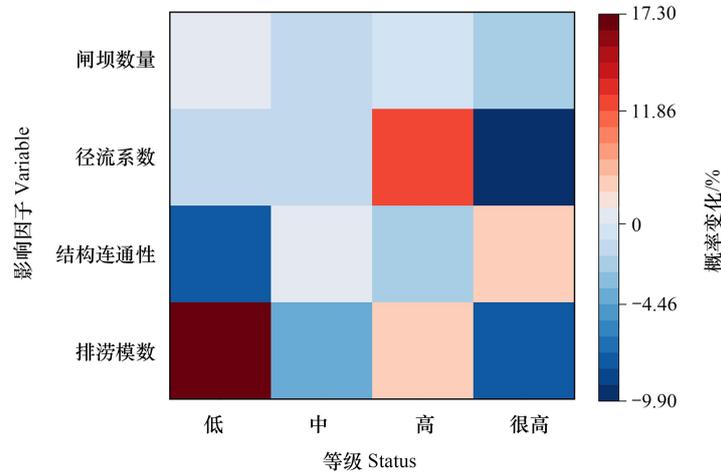


图 9 诊断分析下敏感变量的条件概率变化情况:设定河道槽蓄容量为最优状态

Fig.9 Changed conditional probability of each sensitive variable based on diagnostic analysis: set “VERY\_HIGH” status of river storage capacity as optimized goal

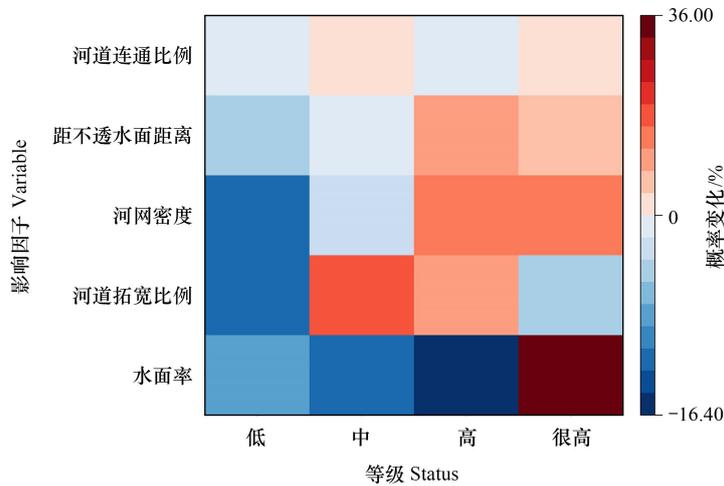


图 10 诊断分析下敏感变量的条件概率变化情况:设定河道可调蓄容量为最优状态

Fig.10 Changed conditional probability of each sensitive variable based on diagnostic analysis: set “VERY\_HIGH” status of river detention capacity as optimized goal

### 2.2.4 关键变量关键状态子集识别

本文通过贝叶斯模型敏感性分析和诊断分析,将各变量等级的组合作为条件状态子集,探究当目标变量“VERY\_HIGH”状态的发生概率最大时的影响因子及其状态集合,将其作为关键变量的关键状态子集,以指导不同圩区单元的水系治理策略。不同水系功能目标下的关键变量关键状态子集如下:子集 I = {水面率 = “VERY\_HIGH”,河网密度 = “HIGH”,距不透水面距离 = “FAR”,河道拓宽比例 = “MEDIUM”,河道连通比例 = “VERY\_HIGH”}是河道槽蓄容量最优目标下的关键变量集合,对应金复、协义(城镇圩区)以及锦南、锦东(湖荡群周边农业圩区)。在水面率和河网密度已相对较高的条件下,上述圩区难以仅通过扩大水面规模、新

建河道来提高槽蓄容量,因此,需要通过点状修复骨干河道廊道生态空间、河流生态廊道线性改造等措施,管控水系周边开发建设强度,加大河道疏浚和拓宽工程,逐步推进断头河浜连通工程,提高圩内水系行洪能力和水资源调度能力。子集Ⅱ = {连通性 = “VERY\_HIGH”,径流系数 = “HIGH”,排涝模数 = “LOW”,闸坝数量 = “LOW”}是河道可调蓄容量最优目标下的关键变量集合,对应张东、团结、金复、镇北、高勇、协义、双庙等城镇化水平较高的圩区。末端水系的可调蓄容量是自然生态系统消减城市雨洪的重要途径,对于河网作为分散式自然蓄排系统的调蓄能力十分关键<sup>[32]</sup>。上述圩区以城镇功能为主,若需要在未来用地开发约束下提升水系结构,则应大力提高水系连通性,减少排涝工程和闸坝建设对于圩区内外水量交换的影响。通过恢复河道水生植物覆盖率、恢复自然河流断面形态、建设生态缓坡驳岸等基于自然的解决方案,能有效优化水系环状网络结构,提升末端水系连通度,进而提高河道调蓄调度效率、增强河道行泄能力。

### 3 讨论与不足

本研究发现,研究区的水系结构特征能够显著影响水系的调蓄功能。其中,包括河道拓宽比例和连通比例在内的政策因子是河道槽蓄容积最为关键的影响变量,工程因子中的排涝模数对于河道可调蓄容量影响程度最高,自然水文条件和用地开发的影响虽然相对较弱,也共同决定了圩区水系的基底条件。因此,圩区水系的治理优化不仅仅是改变空间结构,更需要厘清关键变量对于优化措施的潜在驱动,从目标导向出发,明确水系改造带来的系统性影响。例如,在提高圩区内河道调蓄能力的长期目标下,需要大力改善河道节点-链接空间结构,减少圩内河道对于闸坝外排能力的依赖,同时控制河道周边开发建设、降低地表降雨径流深度,进而使得河道雨前水位及时恢复。因此,结合不同圩区水系功能优化目标,未来河网水系治理应融合政策、工程和自然关键影响因素,与国土生态空间保护、防洪水利工程、城市雨洪管理等多领域协同合作,共同实现圩区水系生态韧性和可持续性<sup>[33-34]</sup>。

总体而言,本研究选取的水系结构与功能评价指标可合理反映昆南分区河网水系的总体格局,具有数据依赖性较低、空间可视化表达等优势。同时,应用贝叶斯网络模型开展敏感性分析和诊断推理,可以有效结合定量与定性多源数据,在河道自然水文条件的基础上,综合考虑水利工程实践、规划治理政策的影响过程,对不同影响因子间的因果关系和关联程度量化效果良好。此外,本文关注圩区这一重要的平原河网水系治理单元,认识到圩区河道调蓄能力受到水文、水力和工程因素的复杂驱动,面向区域水位易涨难消、外排能力较弱的现实问题,强调了从圩区自身排蓄能力出发构建水系结构优化策略,为平原地区洪涝风险管理提供可行思路。然而,本研究仍在以下方面存在一定局限性:首先,在水系测度指标方面,利用二维空间上的水系结构与功能指标,虽然可以体现圩区的空间异质性,但难以反应河道实际调度与调蓄过程。未来的研究可以结合水文水动力模型的模拟结果,从时空尺度上刻画水位上下游连通和河道调蓄功能的动态变化。其次,在贝叶斯网络模型应用方面,本研究尚未将自然条件、土地利用和规划实践的演变特征融入贝叶斯网络模型,也未能考虑圩区居民主体对河网水系治理的主观意愿与态度。因此,后续研究应侧重于挖掘时间序列上河网水系特征的社会-生态系统驱动机制。

### 4 结论

本文以太湖流域典型平原河网地区昆山市南部防洪分区为例,基于圩区单元分析水系网络结构与调蓄功能特征,并应用贝叶斯网络模型进行敏感性与诊断分析,探究社会-生态过程对于水系结构与功能的驱动机制,主要结论如下:

(1) 昆南分区水系调蓄功能与水系结构特征密切相关。西南部、中部存在多个圩区具有较高的水面率和河网密度,水系形态结构较为复杂,圩内河道单位面积槽蓄容量高,表现出较强的调蓄功能。

(2) 在自然和人为因素共同作用下,水系结构特征可显著影响水系调蓄功能,同时社会-生态过程中的因子影响强度由政策、工程、用地到自然条件依次减弱。

(3)当“槽蓄容量”和“可调蓄容量”处于最优水平时,可获取上述变量的关键变量关键状态子集,据此形成圩区单元的差异化水系治理策略。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Dunham J B, Angermeier P L, Crausbay S D, Cravens A E, Gosnell H, McEvoy J, Moritz M A, Raheem N, Sanford T. Rivers are social-ecological systems: Time to integrate human dimensions into riverscape ecology and management. *WIREs Water*, 2018, 5(4): e1291.
- [ 2 ] 刘昌明,李宗礼,王中根,郝秀平,赵长森. 河湖水系连通的关键科学问题与研究方向. *地理学报*, 2021, 76(3): 505-512.
- [ 3 ] 刘海针,许有鹏,林芷欣,张兴奇. 太湖平原武澄锡虞区水系结构及水文连通性变化分析. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1069-1075.
- [ 4 ] 孟宪萌,张鹏举,周宏,刘登峰. 水系结构分形特征的研究进展. *地球科学进展*, 2019, 34(1): 48-56.
- [ 5 ] 李宗礼,刘昌明,郝秀平,邱冰,王中根. 河湖水系连通理论基础与优先领域. *地理学报*, 2021, 76(3): 513-524.
- [ 6 ] 危小建,江平,陈竹安,赵莉. 基于拓扑结构和空间网络结构的水系连通性评价. *人民长江*, 2019, 50(5): 76-81.
- [ 7 ] 金妍,车越,杨凯. 基于最小累积阻力模型的江南水乡河网分区保护研究. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(1): 8-14.
- [ 8 ] 王跃峰,许有鹏,张倩玉,李广,雷超桂,杨柳,韩龙飞,邓晓军. 太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响. *地理学报*, 2016, 71(3): 449-458.
- [ 9 ] Bishop-Taylor R, Tulbure M G, Broich M. Surface water network structure, landscape resistance to movement and flooding vital for maintaining ecological connectivity across Australia's largest river basin. *Landscape Ecology*, 2015, 30(10): 2045-2065.
- [ 10 ] Rodríguez-Alarcón R, Lozano S. A complex network analysis of Spanish River Basins. *Journal of Hydrology*, 2019, 578(11): 124065.
- [ 11 ] 左其亭,崔国韬. 人类活动对河湖水系连通的影响评估. *地理学报*, 2020, 75(7): 1483-1493.
- [ 12 ] 俄有浩,霍治国. 长江中下游地区暴雨特征及洪涝淹没风险分析. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 1053-1062.
- [ 13 ] 田壮壮,关燕宁,郭杉,张春燕,蔡丹路,肖寒,姚武韬,于敏. 城市化背景下建成区扩展及其对河网变化的影响——以苏州市为例. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(4): 915-924.
- [ 14 ] 林芷欣,许有鹏,代晓颖,王强,高斌,袁甲,徐羽. 城市化进程对长江下游平原河网水系格局演变的影响. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(11): 2612-2620.
- [ 15 ] Deng X J. Correlations between water quality and the structure and connectivity of the river network in the Southern Jiangsu Plain, Eastern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 664(5): 583-594.
- [ 16 ] Kuemmerlen M, Reichert P, Siber R, Schuwirth N. Ecological assessment of river networks: from reach to catchment scale. *Science of the Total Environment*, 2019, 650(2): 1613-1627.
- [ 17 ] Gain A K, Hossain S, Benson D, Di Baldassarre G, Giupponi C, Huq N. Social-ecological system approaches for water resources management. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2021, 28(2): 109-124.
- [ 18 ] 郑涛,陈爽,张童,徐丽婷,马丽雅. 基于贝叶斯网络的生态用地流失机制研究. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 2980-2994.
- [ 19 ] McVittie A, Norton L, Martin-Ortega J, Siameti I, Glenk K, Aalders I. Operationalizing an ecosystem services-based approach using Bayesian Belief Networks: an application to riparian buffer strips. *Ecological Economics*, 2015, 110(2): 15-27.
- [ 20 ] Pham H V, Sperotto A, Furlan E, Torresan S, Marcomini A, Critto A. Integrating Bayesian Networks into ecosystem services assessment to support water management at the river basin scale. *Ecosystem Services*, 2021, 50(8): 101300.
- [ 21 ] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2022). 国家青藏高原科学数据中心, 2023, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3185722>.
- [ 22 ] 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(4): 1055-1074.
- [ 23 ] 陆苗,许有鹏,高斌,周才钰. 平原河网区水利工程调控下水文连通变化. *地理学报*, 2021, 76(11): 2685-2696.
- [ 24 ] 徐慧,杨姝君. 太湖平原圩区河网演变模式探析. *水科学进展*, 2013, 24(3): 366-371.
- [ 25 ] 魏莹莹,李一平,翁晟琳,徐芸蔚,朱立. 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(2): 553-563.
- [ 26 ] 余玉洋,李晶,周自翔,唐承延. 基于贝叶斯网络的生态系统服务空间格局优化——以泾河流域为例. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 1268-1280.
- [ 27 ] 黎斌,何建华,屈赛,黄俊龙,李一挥. 基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法. *生态学报*, 2018, 38(3): 800-811.
- [ 28 ] Duan T T, Feng J S, Chang X, Li Y X. Quantification of multiscale links of key factors with watershed nitrogen and sediment exports based on a Bayesian modelling approach. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 399(5): 136586.
- [ 29 ] Lauritzen S L. The EM algorithm for graphical association models with missing data. *Computational Statistics & Data Analysis*, 1995, 19(2): 191-201.
- [ 30 ] 曾莉,李晶,李婷,杨晓楠,王彦泽. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化. *地理学报*, 2018, 73(9): 1809-1822.
- [ 31 ] 吕慧华,周峰,李娜,许有鹏. 苏北里下河典型区河网水系演变特征研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(2): 380-385.
- [ 32 ] 车越,杨凯. 发挥河网调蓄功能 消减城市雨洪灾害——基于传统生态智慧思考. *生态学报*, 2016, 36(16): 4946-4948.
- [ 33 ] 陶芹,吴业,陶宇,陈公太,欧维新. 国土生态空间中现存建设用地与耕地退出的生态系统服务响应——以昆山市为例. *生态学报*, 2022, 42(21): 8690-8701.
- [ 34 ] 李德智,洪靖芝,朱诗尧,崔鹏. 基于复杂适应系统的城市抗涝韧性演化机理研究——以昆山市为例. *系统科学学报*, 2023, 31(2): 63-68, 116.