

文章编号:1000-4653(2026)02-0069-09

基于社团桥的内河航道网关键航段识别方法

鲁文雅, 廖鹏*, 严牧华

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189)

摘要:随着内河航道由线状运行进入网络化运行新阶段,精准识别网络中的关键航段对于优化资源配置、提升系统抗风险能力至关重要。针对现有方法难以有效识别对全局连通性具有决定性作用航段的问题,提出一种基于社团桥的识别方法。首先,以航道等级和通航里程构建加权拓拓扑网络;其次,运用 Louvain 算法将内河航道网划分为多个内部联系紧密的社团,并将连接不同社团的边识别为关键航段;最后,通过攻击仿真试验评估关键航段识别的有效性。以江苏内河航道网为例,计算结果表明其最大模块度为 0.901,具有显著的社团结构特征,可以被划分为 18 个社团。当前该航道网共识别出 46 条关键航段,若全部失效,相对网络效率和最大连通子图相对大小均下降近 80%,验证了关键航段识别方法的有效性。同时,按照 2017—2035 年、2023—2035 年规划航道网对航道等级进行提升,发现社团结构愈加紧凑,关键航段识别数减少且结果具有连贯性。识别出的关键航段可为内河航道的日常维护及安全监管提供理论依据,加强通航保证可提高航道网络韧性。

关键词:水路运输;关键航段;社团桥;内河航道网;复杂网络

中图分类号:U611

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.008

Identifying critical segments of an inland waterway network based on Community Bridges

Lu Wenya, Liao Peng*, Yan Muhua

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: With inland waterways transitioning from linear to networked operation, accurately identifying critical segments is essential for optimizing resource allocation and enhancing system resilience. Existing methods have limitations in effectively identifying segments that play a decisive role in maintaining global connectivity. To address this issue, a community bridge-based method is proposed. Firstly, a weighted topological network is constructed using waterway class and length. Then, the Louvain algorithm is applied to divide the inland waterway network into multiple communities with strong internal connectivity, and edges connecting different communities are identified as critical segments. Finally, attack simulation experiments are conducted to evaluate the effectiveness of the proposed method. Taking the Jiangsu inland waterway network as a case study, the results show a maximum modularity of 0.901, indicating a pronounced community structure characteristics, and the network can be divided into 18 communities. Currently, 46 critical segments are identified in the network. If all critical segments fail simultaneously, both relative network efficiency and the relative size of the largest connected component decrease by nearly 80%, validating the effectiveness of the identification method. After implementing the 2017—2035 and 2023—2035 waterway network upgrades, the community structure becomes more compact, and the number of identified critical segments decreases while the results remain consistent. The identified critical segments provide theoretical support for routine maintenance and safety supervision of inland waterways, strengthening navigational assurance to enhance network resilience.

Key words: waterway transportation; critical segments; community bridge; inland waterway network; complex network

收稿日期:2025-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52172303);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX23_0079)资助

作者简介:鲁文雅(2000—),女,硕士,研究方向为水路交通规划与管理。*通信作者:pliao@seu.edu.cn

引用格式:鲁文雅,廖鹏,严牧华.基于社团桥的内河航道网关键航段识别方法[J].中国航海,2026,49(2):69-77.

Lu W Y, Liao P, Yan M H. Identifying critical segments of an inland waterway network based on Community Bridges[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 69-77. (in Chinese)

内河港口航道作为国家综合立体交通网的重要枢纽节点和通道,在构建现代化产业体系、推动高水平对外开放中具有重要作用。随着大规模航道治理与人工运河建设,内河航道由“线状运行”进入“网络化运行”新阶段。网络是由节点和边构成的复杂系统,当网络中的关键节点或关键边失效时,将显著影响网络整体运输效率和韧性^[1,2],甚至造成大规模瘫痪。在内河航道网中,船闸、航道交汇点等被视为节点,航段被视为边,它们相互连通共同实现船舶通航。若遇到航道淤积、交通事故、极端天气或突发事件等,航道通航能力将受限,严重时甚至对航道网络的稳定运行构成威胁。因此,精准识别关键航段,是优化资源配置、提升网络抗风险能力的重要前提。

通常,可根据节点度、度分布、平均路径长度及聚类系数等指标对网络进行特征分析^[3],评估网络脆弱性^[4,5]、抗毁性^[6,7]和韧性^[8],识别网络中的关键节点或边^[9,10]。目前已有多种用于判断关键边的方法,如基于路径的边介数^[11]、K-path 边中心性^[12]、基于节点邻居的度乘积^[13]、拓扑重叠^[14],基于特征向量的 LinkRank 算法^[15]等,或将关键边转换为关键节点进行识别^[16]。对于内河航道网络,往往以边介数^[7]和航道等级来衡量航段的重要性。但网络边介数限定船舶只能沿最短路径航行,与实际情况差异较大;基于航道等级的识别方法仅考虑局部信息,识别准确性有待提高。

复杂网络理论中,桥是指删除后会断开网络连接并增加独立子图数量的关键边^[17]。在网络中总存在联系更加紧密的区域,这些具有相似属性的节点集合被称为社团^[18]。社团内节点联系紧密、通达性好、信息传递冗余性强,而不同社团间的连接边则呈现稀疏特征。作为跨社团连接的关键纽带,社团桥^[19]在维持跨区域协同运行和信息交互中具有不可替代性——若发生中断,不仅会割裂社团间联系,还会引发级联拥堵甚至系统性瘫痪^[20]。目前,社团结构特征在道路网^[21]和海运网络^[22]研究中已经得到实证。Zhang 等^[19]通过网络效率、平均传输时间以及相关系数等指标也证明了社团桥在公共交通网络关键边识别中的优越性。因此,本文将内河航道网中连接不同紧密区域、保障网络整体连通性的航段定义为关键航段,通过构建内河航道加权拓扑网络,分析社团结构特征,提出基于社团桥的内河航道网关键航段识别方法。

1 研究方法

1.1 社团划分

目前已有多种社团划分算法,如分层聚类^[23]、

模块度优化^[24]、频谱聚类^[25]、统计推断^[26]和深度学习^[27]等。其中,Louvain 算法^[28]是一种经典的模块度优化算法,通过最大化模块度来寻找网络中的最优社团划分,在运算效率与适用性上表现优异,且引入解析度^[29]后,能够灵活调控社团数量及规模,有效克服模块度优化过程中的分辨率限制。具体地,模块度指网络中连接社团结构内部节点的边权所占比例与另一个随机网络中连接社团结构内部节点的边权所占比例的期望值之差,可衡量无向网络社团划分的好坏程度,其数值表达式为^[11]:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[e_{ij} - \gamma \frac{w_i w_j}{2m} \right] \delta(C_i, C_j) \quad (1)$$

式(1)中: Q 为模块度,取值范围为 $[-0.5, 1)$,数值越大,社团特征越显著; m 为网络中所有边的权重之和; e_{ij} 为节点 i 与 j 之间的边权重,可取 $e_{ij} = 1/(L \times D)$,其中 L 为航段通航里程(km), D 为航段通航等级系数^[6](I级航道 $D=1$,II级航道 $D=2$,III级航道 $D=3$,……,以此类推); w_i, w_j 分别为节点 i 和 j 的点强度,其值为与节点相连的所有边权之和; γ 为解析度,数值越大,划分的社团规模越大、数量越少; C_i, C_j 分别为节点 i 与节点 j 的所属社团,当节点 i, j 属于同一社团, $\delta(C_i, C_j) = 1$,否则为0。

1.2 社团桥模型

桥作为网络关键边,在维持网络全局连通性和鲁棒性方面具有决定性作用^[17]。社团桥通过分析连接边两端的节点度、所属社团的规模(社团所包含的节点数量)以及节点间的连接模式,既能体现社团结构规模对边的差异化影响,也能反映连接节点本身的影响,在交通网络关键边识别中表现出显著优势^[19,20]。其数值表达式为:

$$S_{ij} = \begin{cases} \sqrt{n_i \times n_j \times k_i \times k_j}, C_i \neq C_j \\ 0, C_i = C_j \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, S_{ij} 为节点 i 和节点 j 的社团桥数值; n_i, n_j 为节点 i 所属社团 C_i 和节点 j 所属社团 C_j 的节点数; k_i, k_j 为节点 i 和节点 j 的度。 S_{ij} 越大,边越重要,当两个节点属于同一个社团时, S_{ij} 为零。

社团桥的识别方法为:基于拓扑网络社团划分结果,筛选出连接不同社团的边,依据式(2)计算各边社团桥数值,进行重要性排序,流程见图1。其中,圆圈代表16个节点,灰色连线代表边,网络被分为4个社团,则社团间的黑色连线为社团桥,也就是关键边。由于节点3和6的度分别为 $k_3=4, k_6=3$,其所属社团内部分别有7、3条连边($n_3=7, n_6=3$),故其连边3-6的社团桥数值 S_{36} 为 $\sqrt{7 \times 3 \times 4 \times 3} =$

15.87。依照上述方法对各边社团桥数值进行计算,如图 1 所示,则关键边的重要性排序为:4-10 > 5-

15 > 3-6 = 5-7 > 13-14 > 8-15。

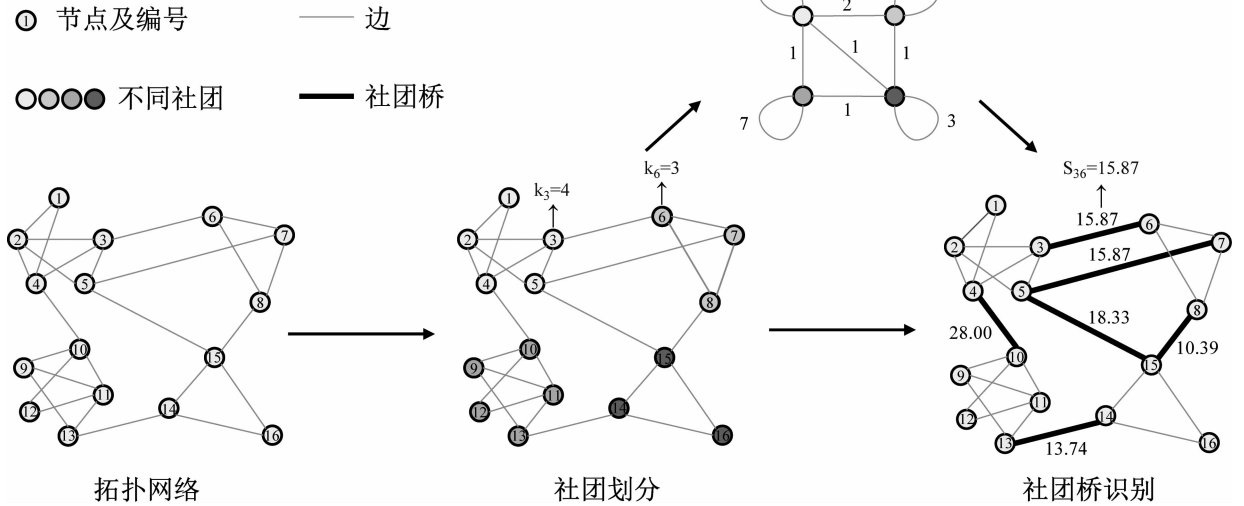


图 1 社团桥的识别方法

Fig. 1 Identification of community bridges

1.3 关键航段识别

关键航段指内河航道网络中承担跨社团连接功能,对维持全局连通性具有枢纽作用的航段。作为社团间物质流动的通道,一旦出现拥堵或因突发事件中断,便会破坏航道网络连通性,丧失跨区域通航能力。关键航段的识别方法如下。

首先,根据原始法将内河航道与辖区边界及各航道间的交汇水域映射为网络中的节点,各航段映射为无向边,以航段通航里程和现状或规划的等级确定边权重,构建内河航道加权拓扑网络。然后,采用 Louvain 算法,比较不同解析度下航道网络的社团划分结果及模块度,通过选择合适的解析度 γ 以平衡社团的大小和数量,最终确定航道网络社团结构,其步骤见算法 1。再基于社团划分结果,依据社团桥流程筛选关键航段并进行重要性排序。最后,依据攻击仿真模型^[30],选取最大连通子图相对大小、相对网络效率,对比内河航道网络在随机攻击、基于边介数及社团桥的蓄意攻击三种攻击模式下各项性能的变化情况,评估内河航道网在关键航段失效后的结构完整性,以验证上述识别方法的有效性。

2 案例分析

江苏滨江临海、河湖密布,水运资源丰富,内河航道里程达 2.44 万 km,等级航道里程约 8 813 km,分别占全国 1/5、1/7,航道网密度 0.247 5 km · km⁻²,覆盖了江苏 85% 的县级及以上城市节点、57% 的省级及以上开发区。以江苏内河航道网为例进行关键航段识别。

算法 1 基于 Louvain 的社团划分算法

输入: 无向网络 G 、解析度 γ

G 中节点 i 均为独立社团,社团标签为 C_i

while 模块度可以提升 do

nodesmoved = false

Q = 当前网络模块度 //依照式(1)计算

for 每个节点 i in G do

$\Delta Q_{\max} = 0, C_{\text{best}} = |C_i|$

for 每个节点 i 的相邻节点 j do

Q' = 节点 i 加入节点 j 所在社团后的模块度

if $Q' > Q$ then

$\Delta Q_{\max} = Q' - Q, C_{\text{best}} = C_j$

end if

end for

if $\Delta Q_{\max} > 0$ then

节点 i 移至社团 C_{best} ,更新网络 G

nodesmoved = true

end if

end for

if not nodesmoved then

break // 无节点移动则结束循环

end if

构建新网络 G' ,同社团节点合并为新节点,社团内及社团间的边权重分别为新节点的自环权重和新节点间的边权重

$G = G'$

end while

输出: 网络社团划分结果

2.1 加权拓扑网络建模

目前,江苏已建成2 576 km的千吨级干线航道网,形成“两纵五横”航道网布局,如图2所示。表1列出了各等级部分航段现状和规划情况,其中规划航道等级分别按江苏省政府批复的《江苏省干线航道网规划(2017—2035年)》和《江苏省干线航道网规划(2023—2035年)》确定,用于变化网络下关键航段识别的比较分析。根据各航段的实际通航里程及等级信息,构建江苏内河航道加权拓扑网络(现状),如图3所示,该网络由664个节点、805条边构成。

2.2 现状航道网关键航段识别

2.2.1 社团划分结果

根据图3和算法1所述步骤,采用Python编程,计算不同解析度下江苏内河航道网的模块度及社团组成,如图4所示。结果显示,无论解析度如何变化,模块度始终保持高数值且平均值达到0.9,表明

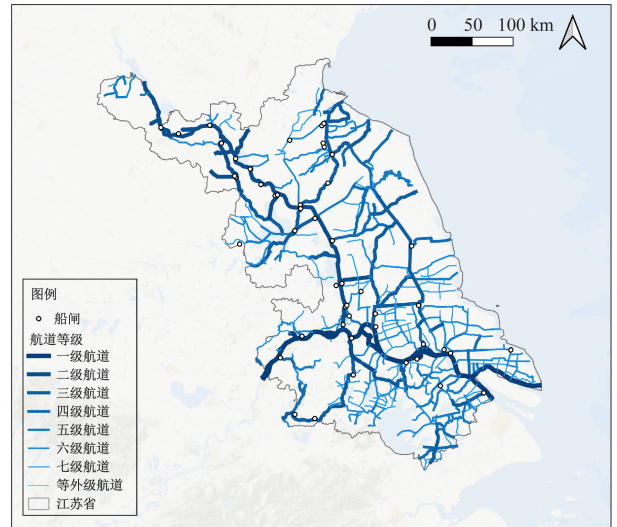


图2 江苏内河航道网(现状)

Fig. 2 Jianguo inland waterway network (current situation)

江苏内河航道网具有显著的社团结构特征^[31]。

表1 江苏内河航道等级及里程(部分)

Tab. 1 Inland waterway classes and lengths in Jiangsu Province (partial)

航段	现状航道等级	规划航道等级 (2017—2035年)	规划航道等级 (2023—2035年)	通航里程/km
长江航段	I	I	I	35.74
京杭大运河高邮市段	II	II	II	52.68
盐河涟水县段	III	III	II	89.57
苏申外港线吴中区段	IV	III	II	9.00
通州湾港区疏港航道崇川区段	V	III	II	16.80
通扬运河通州区段	VI	III	II	28.51
淮沐新河东海县段	VII	III	II	10.35
连申线苏南段(长江—袁家桥段)	等外级	III	III	9.15

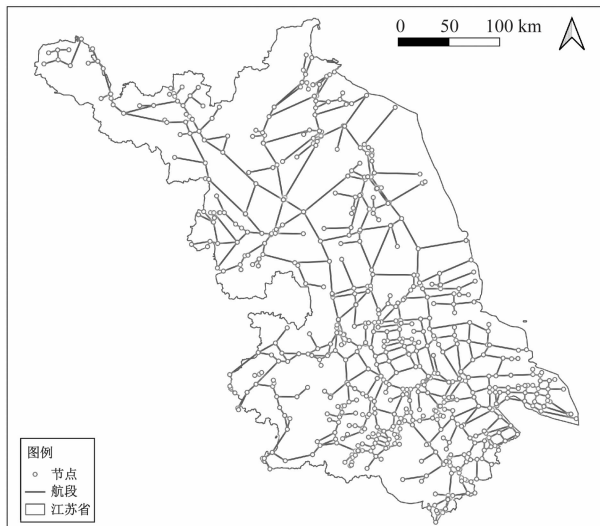


图3 江苏内河航道加权拓扑网络

Fig. 3 Weighted topological network model of the Jiangsu inland waterway

另一方面,随着解析度增大,社团数量逐步减少且趋于稳定。当解析度为4-9时,社团数平均为22个;解析度为10-14时,社团数平均为18个。考虑到社团划分过细时会使部分社团规模过小、内部节点数相差不大,从而导致社团桥数量显著增加且重要性差异不明显。故在保障网络高模块性的基础上,拟将解析度 γ 取值为10,有效减小社团数量、扩大社团结构。此时,对应的最大模块度为0.901,社团数量为18,绘制相应社团划分情况见图5。从图5可以看出,江苏内河航道网社团划分结果与自然地理特征紧密对应,与江苏河流水系(沂沭泗河水系、淮河水系、长江水系及太湖水系)分布相一致,并将“两纵五横”航道网络结构细分。故可认为该社团划分结果合理且具有现实依据。

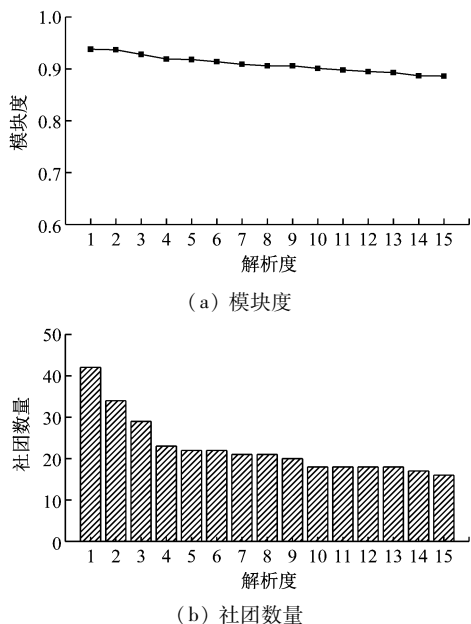


图4 模块度及社团数量随解析度的变化情况
Fig.4 Variations of modularity and number of communities with resolution

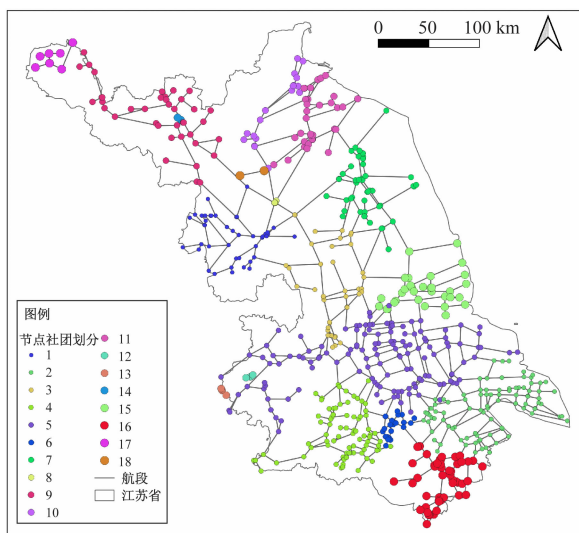


图5 社团划分结果

Fig.5 Community detection results

2.2.2 关键航段识别结果

利用社团划分结果计算网络社团桥,共识别出46条维系网络连通性的关键航段,其空间分布如图6,重要性排序见表2。统计表明,22条(占比48%)关键航段的航道等级达Ⅳ级以上,印证了江苏省干线航道在承担跨区域运输中的核心地位。另外,对比分析表2中各关键航段的物理属性,发现这些航段在航道等级上横跨I-Ⅶ级,长度从8~80 km不等,表明本方法并不依赖单一属性。

需要指出的是,本案例的关键航段识别结果聚焦于江苏内河航道网络内部,这一空间分布特征源

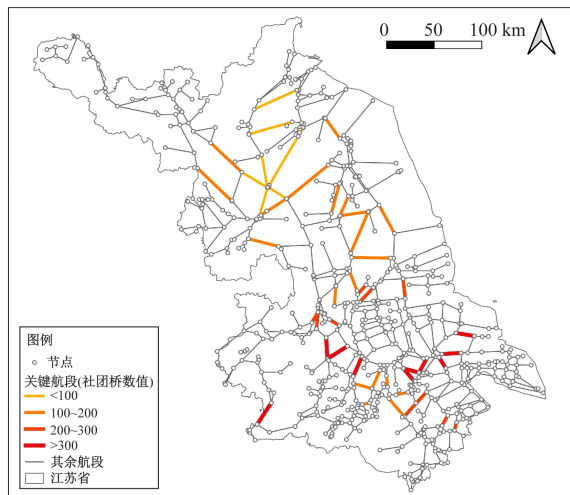


图6 现状网络关键航段识别

Fig.6 Identification of critical segments in the existing network

于社团桥方法论特性。实际上,作为长三角综合航运网络的组成部分,江苏省航道网在区域尺度上与相邻省市航道也存在复杂的拓扑关联。从长三角地区协同发展的宏观视角评估,当前未被纳入关键航段的边界航段,极有可能在更大尺度的网络分析中展现出重要的价值。

2.2.3 识别结果有效性验证

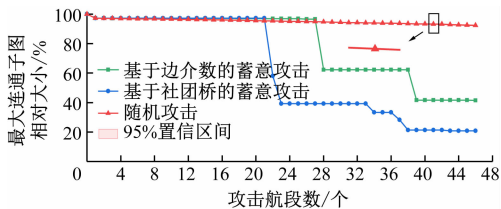
应用前文所述的3种策略对上述航道网进行攻击仿真,评估网络在遭受攻击时的结构完整性,试验结果如图7所示。其中,基于边介数的蓄意攻击按照边(航段)的介数中心度,从高到低取46条航段进行攻击;基于社团桥的蓄意攻击按照社团桥数值,从高到低对识别的关键航段进行攻击;随机攻击通过100次独立重复试验,每次随机移除46条航段,以网络性能指标的算术平均值作为结果,并计算95%置信区间以评估稳定性。

图7展示了江苏内河航道网在不同攻击策略下的表现差异。随机攻击仿真表明,即使46条航段全部失效,网络仍保持较高连通性:相对网络效率仅下降13.7%(95%置信区间[13.07%,14.33%]),最大连通子图相对大小下降7.5%(95%置信区间[7.03%,7.97%])。狭窄的置信区间(半宽<0.7%)证实了重复试验结果的稳定性。与之形成鲜明对比的是,基于社团桥的蓄意攻击展现出极强的网络破坏效能:当网络中社团桥数值排名前24的航段失效后,最大连通子图骤然缩减60.7%,相对网络效率下降48.6%。当46条关键航段全部失效后,网络性能降幅接近80%,内河航道网被割裂成多个孤立或弱连接的子网,严重限制了船舶的跨区域航行,仅能在局部区域内活动,整体效能严重受损。

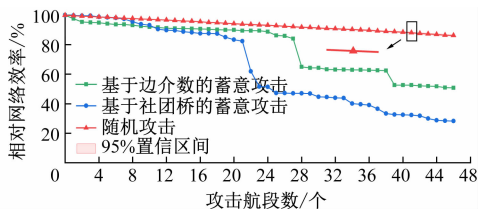
表2 江苏内河航道网关键航段重要度排序

Tab.2 Importance ranking of critical segments in the Jiangsu inland waterway network

排序	航段	航道等级	通航里程/km	排序	航段	航道等级	通航里程/km
1	澄杨线张家港市段	VII	17.30	24	常宜线常州市段	VI	8.57
2	连申线苏南段(袁家桥—西庄)	V	23.11	25	锡十一圩线锡山区段	V	14.80
3	京杭大运河江都区段1	II	23.45	26	射阳港区疏港航道建湖县段1	III	50.24
4	九曲河丹阳市段	VI	27.84	27	盐宝线航道建湖县段1	IV	24.10
5	长江航段	I	13.57	28	盐宝线航道建湖县段2	IV	32.52
6	通吕运河崇川区段	V	19.88	29	阜宝线建湖县段	IV	33.56
7	锡十一圩线张家港市段	VI	17.48	30	京杭运河苏南段常州市段	III	21.06
8	通州湾港区疏港航道通州区段	VI	19.67	31	1号闸接线洪泽区段	III	31.13
9	德胜河常州市段	VI	23.80	32	5号标—衡西村	VI	36.15
10	秦淮河溧水区段	IV	28.25	33	徐洪河航道泗洪县段	III	57.41
11	望虞河相城区段	V	40.45	34	京杭大运河高邮市段1	II	52.68
12	芒稻河江都区段	V	12.55	35	淮河出海航道响水县段	IV	25.86
13	京杭大运河江都区段2	II	17.32	36	射阳港区疏港航道建湖县段2	III	33.95
14	古运河扬州市段	VI	18.07	37	兴东线兴化市段	VI	41.03
15	苏浏线昆山市段	V	19.97	38	苏北灌溉总渠阜宁县段	V	55.56
16	申张线昆山市段	V	10.02	39	许光运河虎丘区段	VI	25.88
17	泰东线姜堰区段	III	20.88	40	柴米河沭阳县段	VI	50.11
18	唐大线边城—董家潭	VII	14.79	41	古泊河航道沭阳县段	VI	49.83
19	连申线苏北段东台市段	III	25.20	42	淮河航道洪泽区段	III	34.15
20	三山港常州市段	VII	23.29	43	京杭大运河高邮市段2	II	35.88
21	通扬线兴化市段	III	21.74	44	京杭大运河高邮市段3	II	24.53
22	三阳河江都区段	VI	20.86	45	盐河涟水县段	III	89.57
23	锡澄运河江阴市段	III	12.14	46	淮沭新河航道淮阴区段	VI	34.65



(a) 最大连通子图相对大小



(b) 相对网络效率

图7 不同攻击策略下内河航道网性能比较

Fig.7 Performance comparison of the inland waterway network under different attack strategies

总体上,相较于随机攻击和基于边介数的蓄意攻击,基于社团桥的蓄意攻击能更加迅速地导致内河航道网络崩溃,表明本文识别出的关键航段准确有效,也突出识别并保护这些关键航段对于维护网络稳定与运行效率的关键作用,为未来网络优化与防护提供参考。

2.3 变化网络下关键航段讨论

实际航道的网络结构一般不会轻易改变,但其航道等级可通过航道整治提升。研究将江苏内河航道网的通航等级分别按照2017—2035年及2023—2035年规划(见表1)提升,解析度 γ 取10,计算分析航道网络演变过程中关键航段识别的变化情况。2017—2035年、2023—2035年规划下内河航道网的关键航段识别结果如图8、图9所示。

表3对比了江苏内河航道网在不同规划阶段下

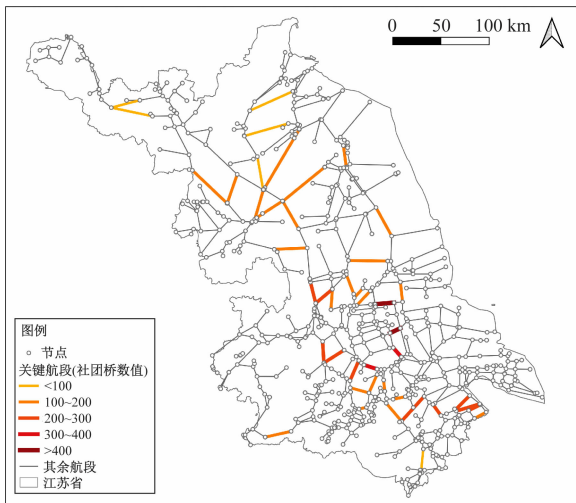


图8 2017—2035年规划内河航道网关键航段
Fig.8 Critical segments in the 2017—2035 planned inland waterway network

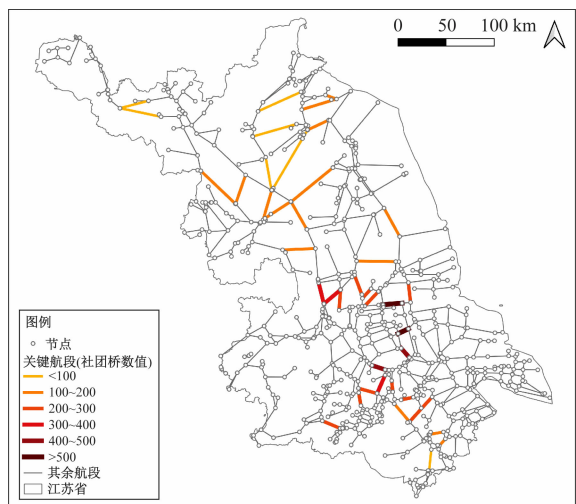
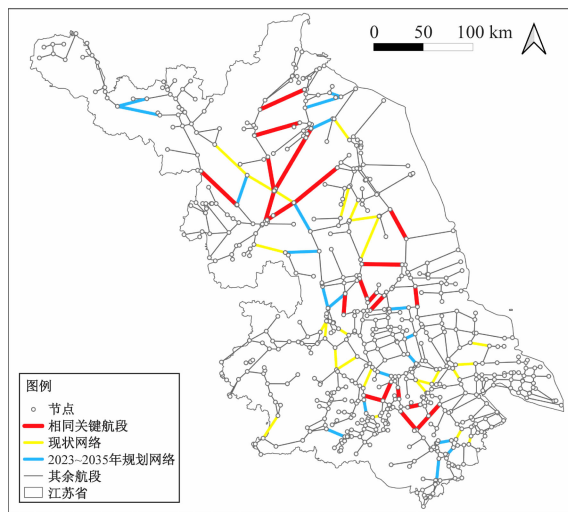


图9 2023—2035年规划内河航道网关键航段
Fig.9 Critical segments in the 2023—2035 planned inland waterway network

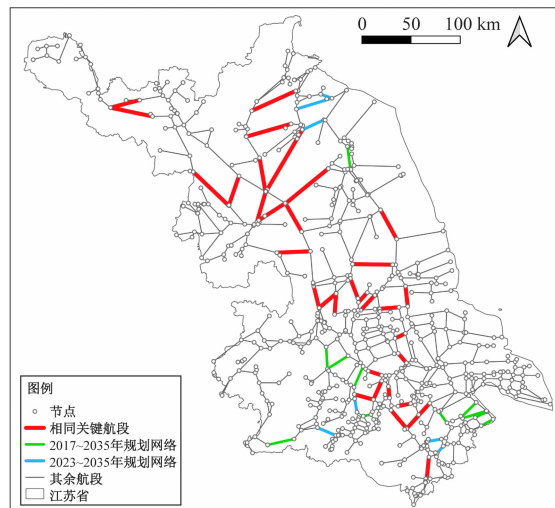
规划网络识别的相同关键航段共有33条,占比超过80%。究其原因,是规划逐步提升了江苏内河干线航道的航道等级,使得干线间联系程度增大,社团划分及社团桥发生改变。但由于网络结构总体稳定,故关键航段识别结果保持连贯性。

表3 网络演变下的社团划分及关键航段识别情况
Tab.3 Community partitioning and critical segment identification under network evolution

参数	现状网络	规划网络	
		(2017—2035年)	(2023—2035年)
模块度	0.901	0.899	0.880
社团数量	18	18	17
识别关键航段数	46	44	40



(a) 现状与2023—2035年规划网络



(b) 2017—2035与2023—2035年规划网络

图10 变化网络下关键航段识别比较

Fig.10 Comparison of critical segment identification across evolving networks

社团划分和关键航段的识别情况。结果显示,规划网络的模块度始终保持高数值,说明网络仍具有显著社团特征,基于社团桥的关键航段识别方法依然适用。进一步观察发现,随着航道等级提升,社团数量与关键航段数相应减少,表明社团结构愈加紧凑,网络结构正朝着更加高效、紧凑的方向演变,与规划总体发展方向一致。

图10 绘出了现状与2023—2035年规划网络、2017—2035与2023—2035年规划网络关键航段的比较情况。从关键航段的演变来看,部分干线航道上的社团桥逐渐向支线移动。从相同关键航段的识别数量来看,现状网络与2017—2035年、2023—2035年规划网络共有25、21条关键航段一致,均占总数的50%以上;2017—2035年和2023—2035年

此外,为提高内河航道网络韧性^[32],对于始终保持重要性的关键航段,如京杭运河苏南段常州市段、苏北灌溉总渠阜宁县段、徐洪河航道泗洪县段、淮河航道洪泽区段等,需要做好日常通航保障。具体可通过智慧航道系统实时监测航道通航设施和水深,科学制定航道疏浚频次,健全航道应急响应机制,具备条件时应尽快提升通航等级,以此保障关键航段的连通性和通航能力。

3 结束语

1) 结合内河航道网实际情况,以其航道等级、通航里程构建加权拓扑网络,运用 Louvain 算法进行内河航道网社团划分。结果表明,江苏内河航道网具有显著的社团结构特征,可划分为 18 个社团,其划分结果与江苏河流水系分布基本一致,为区域交通组织与协同管理提供科学依据。

2) 以江苏内河航道网为例,通过解析网络社团结构,将连接不同社团的边(社团桥)识别为关键航段。社团桥蓄意攻击策略下网络性能的快速退化,指标降幅接近 80%,表明研究所述方法能够精准定位维系全局连通性的关键航段。

3) 江苏内河航道网现状共有 46 条关键航段,按照 2017—2035 年和 2023—2035 年规划航道网提升后,社团数量与关键航段数相应减少,社团结构愈加紧凑,且关键航段识别结果保持连贯性。

4) 本研究所提出的关键航段识别方法依赖于网络范围及拓扑结构特征,未来可进一步考虑船舶流量、通航能力等实际运营因素,并拓展网络范围至长三角,为区域航运一体化发展提供依据。

参 考 文 献

- [1] Chen J, Zhang Y, Liu L. Vulnerability analysis of multimodal transport networks based on complex network theory[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2021, 37(2): 209-215.
- [2] 戈佳威,袁克鏢,殷明,等. 传播动力学视角下集装箱海运网络关键港口节点识别[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(4): 256-262.
Ge J W, Yuan K B, Yin M, et al. Identifying important ports in container liner shipping network: A perspective from spreading dynamic theory [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(4): 256-262. (in Chinese)
- [3] 李慧,甘浪雄,郑元洲,等. 港口水域船舶航路网络复杂度[J]. *中国航海*, 2015, 38(3): 94-98.
Li H, Gan L X, Zheng Y Z, et al. Complexity of waterway networks in port waters [J]. *Navigation of China*, 2015, 38(3): 94-98. (in Chinese)
- [4] 黄常海,高德毅,肖英杰,等. 基于复杂网络理论的内河航道网络脆弱性[J]. *中国航海*, 2014, 37(4): 44-49.
Huang C H, Gao D Y, Xiao Y J, et al. Vulnerability of inland waterway network from the perspective of complex network theory[J]. *Navigation of China*, 2014, 37(4): 44-49. (in Chinese)
- [5] 吴迪,王宇鹏,盛世杰,等. “21 世纪海上丝绸之路”集装箱海运网络的脆弱性变化[J]. *地理学报*, 2022, 77(8): 2067-2082.
Wu D, Wang Y P, Sheng S J, et al. Vulnerability changes of the maritime silk road container shipping network under intentional attacks[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(8): 2067-2082. (in Chinese)
- [6] 娄乃元,黄常海,陈宇里,等. 内河航道网络抗毁性分析与优化方法研究[J]. *中国航海*, 2021, 44(4): 63-70.
Lou N Y, Huang C H, Chen Y L, et al. Invulnerability of inland waterway network and its optimization [J]. *Navigation of China*, 2021, 44(4): 63-70. (in Chinese)
- [7] 娄乃元,黄常海,陈宇里,等. 长三角高等级航道网的网络特性与鲁棒性分析[J]. *大连海事大学学报*, 2021, 47(1): 28-36.
Lou N Y, Huang C H, Chen Y L, et al. Network characteristics and robustness analysis of the Yangtze River Delta high-grade waterway network[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2021, 47(1): 28-36. (in Chinese)
- [8] Mou N X, Sun S Y, Yang T F, et al. Assessment of the resilience of a complex network for crude oil transportation on the Maritime Silk Road [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 181311-181325.
- [9] Feng J R, Zhao M K, Yu G H, et al. Dynamic risk analysis of accidents chain and system protection strategy based on complex network and node structure importance [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 238: 109413.
- [10] Ahmad W, Wang B. A neural diffusion model for identifying influential nodes in complex networks [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2024, 189: 115682.
- [11] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [12] De M P, Ferrara E, Fiumara G, et al. A novel measure of edge centrality in social networks [J]. *Knowledge-*

- Based Systems, 2012, 30: 136-150.
- [13] Barrat A, Barthelemy M, Pastor-satorras R, et al. The architecture of complex weighted networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(11): 3747-3752.
- [14] Onnela J P, Saramaki J, Hyvonen J, et al. Structure and tie strengths in mobile communication networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(18): 7332-7336.
- [15] 尹小庆,莫宇迪,林云,等. 基于有向含权复杂网络的城市交通路网关键路段识别[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(12): 3709-3712.
Yin X Q, Mo Y D, Lin Y, et al. Critical road sections identification of urban traffic road network based on weighted and directed complex networks [J]. Application Research of Computers, 2019, 36(12): 3709-3712. (in Chinese)
- [16] 赵妍,李华,王方. 基于 k-shell 的城市路网关键路段识别方法[J]. 系统工程, 2014, 32(5): 105-110.
Zhao Y, Li H, Wang F. Identifying key sections in urban road network based on k-shell [J]. Systems Engineering, 2014, 32(5): 105-110. (in Chinese)
- [17] Wu A K, Tian L, Liu Y Y. Bridges in complex networks [J]. Physical Review E, 2018, 97(1): 012307.
- [18] Siebert B A, Hall C L, Gleeson J P, et al. Role of modularity in self-organization dynamics in biological networks[J]. Physical Review E, 2020, 102(5): 052306.
- [19] Zhang H, Wang J, Shi B, et al. Exploring significant edges of public transport network under targeted attacks [J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(10): 1950114.
- [20] Yu E Y, Chen D B, Zhao J Y. Identifying critical edges in complex networks[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 14469.
- [21] Wang Y F, Hua M Z, Chen X W, et al. Sustainable response strategy for COVID-19: Pandemic zoning with urban multimodal transport data [J]. Journal of Transport Geography, 2023, 110: 103605.
- [22] 戈佳威,王学锋,万征,等. 世界集装箱海运网络社团结构研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(6): 231-236.
Ge J W, Wang X F, Wan Z, et al. Community structure of world container shipping network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(6): 231-236. (in Chinese)
- [23] Isa I D, Mark L, Yannis K. A multilevel clustering technique for community detection [J]. Neurocomputing, 2021, 441: 64-78.
- [24] Xiao J, Zou Y C, Xu X K. A metaheuristic-based modularity optimization algorithm driven by edge directionality for directed networks [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2023, 10(6): 3804-3817.
- [25] Hu F, Liu J, Li L H, et al. Community detection in complex networks using Node2vec with spectral clustering[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 545: 123633.
- [26] Luo X, Liu Z G, Jin L, et al. Symmetric nonnegative matrix factorization-based community detection models and their convergence analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 33(3): 1203-1215.
- [27] Jin D, Yu Z Z, Jiao P F, et al. A survey of community detection approaches: From statistical modelling to deep learning[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2021, 35(2): 1149-1170.
- [28] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in large networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2008, 2008(10): 10008.
- [29] Lambiotte R. Multi-scale modularity and dynamics in complex networks [M]. New York: Springer, 2013: 125-141.
- [30] Du Z Y, Tang J J, Qi Y, et al. Identifying critical nodes in metro network considering topological potential: A case study in Shenzhen city—China[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 539: 122926.
- [31] Newman M E J. Modularity and community structure in networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(23): 8577-8582.
- [32] 郭明雪,赵婷婷,高自友. 韧性背景下道路交通网络保护和修复优化方法综述[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(11): 3626-3638.
Guo M X, Zhao T T, Gao Z Y. Review of optimization methodologies for road transportation network protection and restoration to enhance system resilience [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2024, 44(11): 3626-3638. (in Chinese)