

近70年来上海中心城区水系演变及水安全响应 ——基于景观连通视角

吴孜孜¹, 张森², 王忠昊², 赵军²

(1.上海水务局行政服务中心, 上海市 200050; 2.上海大学环境科学与工程系, 上海市 200444)

摘要:采用景观生态学理论和GIS空间分析技术,诊断1950年以来上海中心城区的河网水系变化特征,及其对水系连通性和城市水安全的影响。研究表明:(1)采用景观生态学方法中的廊道连接率、环路指数等连通性指标,较好地诊断了河网地区的高密度网状水系结构特征及其变化过程,四个典型河网连通指标之中,以环路指数对水系结构演变的响应较为敏感。(2)近70年来,上海中心城区河网密度下降了68.54%,消亡河道多为1 km长度以下末端村镇级河道,占总消亡河道的77.13%。(3)1994年之前区域水系连通性指标高于1,而此后开始低于1,河网水系环路指数剧烈下降,上海中心城区基本不再具有典型的网状水系结构特征。(4)河网萎缩导致水面率锐减和河网连通受阻,近70年来,雨水泵站排水能力增强与河网总长度和河网连通性变化均存在显著的响应关系,其中对河网总长度变化的响应更加明显。

关键词:河网水系;演变;连通性;水安全;上海中心城区

中图分类号:TV213.4

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2021)06-0137-05

0 引言

上海中心城区是历史上典型的平原河网地区,水系高度发育,河流水系纵横交错。城市化进程对上海及长三角地区水系结构影响的研究近年来得到重视^[1-8],然而因其“横塘纵浦”式的复杂网状水系结构,采用传统的地貌学方法如Horton定律,以及相关水系结构参数,来探讨区域水系结构面临许多理论挑战。

现运用景观生态学理论和GIS空间分析技术,采用水系连通指标描述平原河网地区网状水系结构及其变化,可为复杂的网状水系结构研究提供新的视角^[9]。为此,以上海中心城区为典型案例区域,探讨了近70年以来区域河网水系在快速城市化过程中的变化,以及其对河网连通性和城市水安全的影响,以期未来快速城市化过程中河网水系保护工作提供科学参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域

研究区域是以目前上海中心城区内环线为基

础,适当外扩而形成的矩形区域(见图1),包括黄浦、静安、长宁等中心城区,以及浦东新区城市化区域,东西方向长度为16.5 km,南北方向宽度为12.6 km,面积为207.9 km²。建国初期该区域除黄浦、静安、卢湾等三个中心城区外,大多以农业用地为主且水系密布,随着近70年以来社会经济和城市建设的迅速发展,城市建设不断与河争地,作为大量末端村镇级河道被填堵,河网水系发生显著变化。



图1 上海中心城区河网景观结构演变研究区域示意图

1.2 数据与方法

河网水系遥感解译数据来源于华东师范大学教育部地理信息科学重点实验室,共包括1950—2018

收稿日期:2021-02-20

作者简介:吴孜孜(1982—),女,工程师,理学硕士,从事水文水资源工作。

时期内共八个时相,其中1950—1979数据来源于美国侦察卫星遥感影像,黑白图像,空间分辨率2 m,1984—2006数据来源于航空遥感影像数据,彩红外图像,空间分辨率2 m。2010—2018数据系根据Google Earth遥感影像,对2006年数据做局部调整。需要指出,该地区河流纵横交错,此外城市河流多受人工水闸控制,导致河道等级较为模糊。考虑到研究区域的河流长度与河流等级存在的对应关系,以及河流长度分布特点,现按长度将河流划分为0~0.5 km、0.5~1.0 km、1.0~2.0 km、2.0~5.0 km、及5.0 km以上等五个等级,进行分析讨论。

河网连通性一般是指河链与河网内所有节点的连接程度,其计算须依赖于河网节点和河链的提取^[10-11]。河流廊道相互交叉,交叉点称为节点,邻近两个节点之间的河段即为一条河链(见图2)。

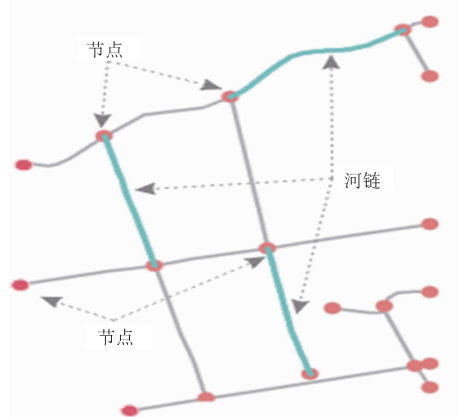


图2 研究区域局部网状水系结构及河流廊道节点、河链示意图

目前一般河网水系的连接程度指标和扩展潜力指标用来评估河网连通性。

(1)河网连接程度指标:主要包括连接率(β)和环路指数(μ)。

$$\beta = L/N \quad \beta > 0 \quad (1)$$

$$\mu = L - N + P \quad \mu \geq 0 \quad (2)$$

式中: β 为河网中河链数 L 与水系网络节点数 N 的比值,反映每个节点连接的平均河链数。参考地图图形结构判别方法和标准,当 $\beta > 1$ 时,河网为回路结构或网格状结构; $\beta < 1$ 时,河网则为树枝状结构; μ 等于水系网络中河链数 L 减去节点数 N 再加上网络子图个数 p 之值。 μ 值越大,网络越发达。 p 为网络中各自相交的子网络的数量之和(在铁路、城市道路等网络分析中,一般令 $P=1$,而水系网络中由于存在较多的断头河浜或与区域主干河网脱离水文联系的独立子水系,因而一般 $p > 1$ 。该项研究中 p 值主要依赖于视判读)。

(2)河网扩展潜力指标:主要包括实际成环率(α)和实际结合度(γ)

$$\alpha = (L - N + P) / (2N - 5P) \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3)$$

$$\gamma = L / [3 \times (N - 2)] \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (4)$$

式中: α 表示环路指数与最大可能环路数的比值,反映河网水系实际成环的水平; γ 反映河网水系河道之间的实际结合水平。

河流廊道连通性评估的主要步骤在于识别提取河网中的河链和河道节点(尤其是节点判读)。在ArcGIS 10.2软件中重新建立河网拓扑关系,根据相关功能模块识别并提取节点和河链;根据上文式(1)~式(4)即可计算研究区域河网水系的廊道连通性及相关表征指标。需要指出,以往河网水系景观研究大多对区域河网进行了概化(即面向区域若干主干河道),节点和河链基本来源于目视判断,但平原河网地区水系高度发育,为更加科学地提取河网节点和河链识别方法,现尝试采用GIS技术方法(见图3)。

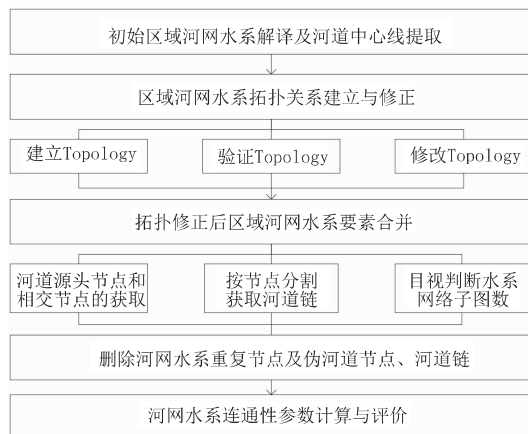


图3 基于GIS的河网连通性评价技术图示

2 结果与分析

2.1 河网水系变化基本过程

2.1.1 总体变化趋势分析

建国初期除黄浦、卢湾、静安等三区外,研究区域大部分地区水系保存良好。此后随着城市建设不断扩展,河网水系快速萎缩,河道数量从1950年的465条减少为2018年的54条,现状数量仅约为初始状态的11.61%。河道总长度相应地持续下降,区域河道总长度由442.42 km减少为139.19 km,现状总长度约为初始状态的31.46%。

区域河道平均长度发生显著变化。1950年区域河道平均长度为0.95 km,2018年则为2.58 km,区域河道平均长度显著增加。1994年之后,河道平均长度增长更加显著,这与1990年之后研究区域浦东部

分开始大规模的开发建设、导致中小河道大规模萎缩有关。

2.1.2 河道变化等级差异诊断

按前文所提出的河道等级划分方案,对五个不同长度等级河道的数量变化进行分析。结果表明,等级越低的河道其变化更加剧烈,近70年以来长度低于1 km河道共消亡317条,占研究区域全部消亡河道的77.13%。从长度上来看,不同等级河道的消亡并未表现这一规律,除最高等级的5 km以上河道基本保持稳定外,其余四个等级河道消失长度未表现显著区别,其原因在于等级较高的河道消失量虽少,但长度较大,因而消失总长度相应较大(见图4)。

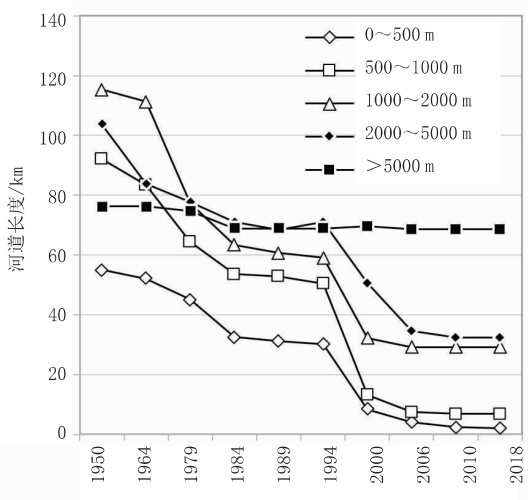
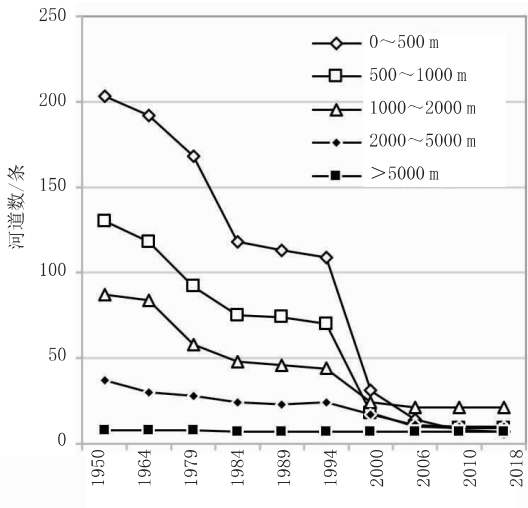


图4 近70 a以来上海中心城区不同等级河道的数量和长度变化曲线图

2.2 河网水系变化对景观连通性影响

2.2.1 节点和河链迅速减少,阶段性变化特征显著

研究初期河网中河链为862条,至2018年急剧减少为119条。河链数变化具有阶段性特征,1950~1979年时期内年均消失河链8.24条,1979~1984

年近5年期间年均消失河链30.60条,而1984~1994年期间河链数基本稳定,1994~2000年期间变化最为剧烈,年均消失河链46.50条(见表1、图5),2000~2018年变化趋于稳定。近70年以来研究区域河网廊道密度由2.08 km/km²减少为0.67 km/km²,消亡的河道主要分布于西北方向的普陀区和东南方向的浦东新区,节点和河链的阶段性变化与上海城市发展的时间特征基本可以呼应。

表1 上海中心城区河网节点和河链数变化表

时期	河链数 L	结点数 N	子图数 p	河链总长度/km	河链平均长度/m	河网密度/(km·km ⁻²)
1950	862	802	27	432.48	502.31	2.08
1964	788	732	17	401.87	508.06	1.93
1979	623	615	25	329.50	529.74	1.58
1984	470	458	18	283.75	607.61	1.36
1989	459	453	16	281.26	616.80	1.35
1994	452	440	15	276.40	615.59	1.33
2000	173	174	8	171.21	1 025.21	0.82
2006	132	135	9	144.49	1 094.65	0.70
2010	121	123	7	140.57	1 161.70	0.68
2018	119	123	8	140.16	1 177.82	0.67

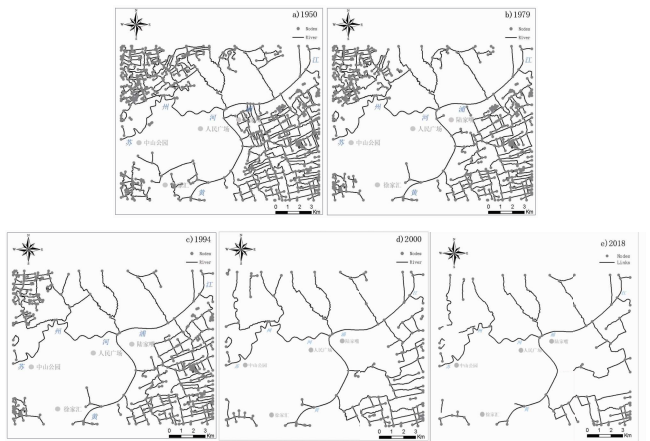


图5 上海中心城区河网水系形态演变及河链节点的动态消亡过程图示

2.2.2 河链总长度下降,平均长度增加

河链总长度的变化趋势与河网节点、河链相同,但河链总长度下降幅度相对较少,原因在于消亡河道多为河网中的末端河道。2018年河链总长度为1950年的1/3,变化较大时期为1964—1984年和1994—2000年,河链总长度均变化30%左右。由于河网中长度较低的末端河道消亡,河链平均长度逐渐变大。1950年河链平均长度为502.31 m,2018年

增大至 1 177.82 m,约为 1950 年 2.34 倍。1994 年为河链平均长度变化的分界点,在此之前河链平均长度变化不大,1994~2000 年间河链平均长度增长较快,而 2000 年后较为稳定。

值得注意的是,随着末端河道不断消亡,河链平均长度虽不断增大,但由表 1 推算可发现,各时间阶段内消亡河链的平均长度并未发生明显变化趋势,基本保持为 400 m,这表明近 70 年来上海中心城区消亡河道一直集中于末端村镇级河道,未向较高等级河道转移。结合前文分析,1950 年上海中心城区长度小于 1 km 河道为 333 条,而 2018 年仅剩为 16 条,末端村镇级河道消亡 95.20%,当前研究区域河道保护工作应注意避免消亡河道由村镇级河道转向较高等级河道。

2.2.3 河网连通明显削弱,结构由网状转为树枝状

河流廊道各项指标均呈趋势性下降,表明研究区域河网结构趋向简单化和主干化。1994 年之前河网连接率高于 1,显示水系为网状结构,而此后连接率指标开始低于 1,且河网成环率和结合度逐渐降低,水系逐渐转为树枝状结构(见图 6)。研究初期的河网水系中共存在闭合水系回路 87 个,而 2018 年仅为 4 个,水系环路指数对河网变化较为敏感。可以认为,1990 年开始的大规模快速城市化,导致研究区域河网水系发生了显著变化,2000 年之后区域河网已不再具有典型的网状水系结构表现。

2.3 河网水系变化对城市排水安全的影响

分析近 70 年来不同时期上海中心城区雨水泵站排水能力和区域河网总长度,以及河网连通性的关系(见图 7)可以发现,前者和后二者存在显著负相关,表明雨水泵站建设与区域河网萎缩和连通受阻存在良好的响应关系。图 7 还表明,雨水泵站排水能力与河道总长度的负相关关系相对更加明显,与河网连通性关系稍弱。尽管上海中心城区排水能力不断增强,但这些人工措施仍难以替代自然河网的雨水调蓄和排涝功能,较之于河网密集的郊区区域,中

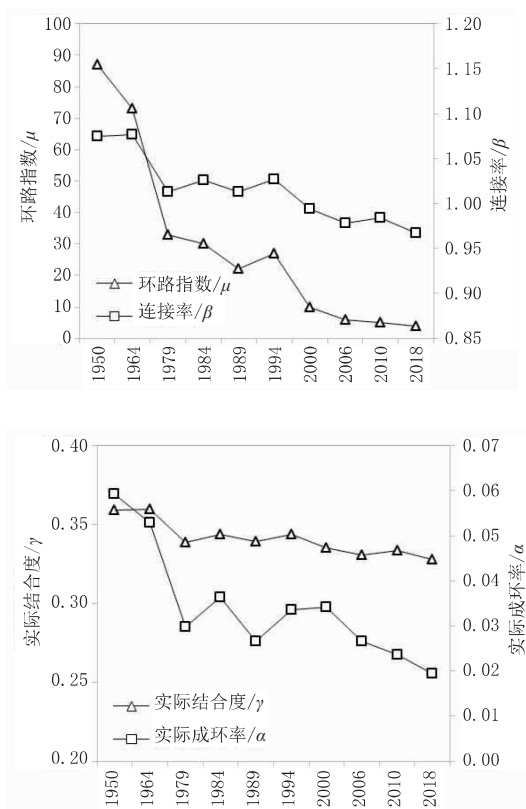


图 6 上海中心城区河网水系各景观连通指标变化曲线图
中心城区的汛期积水问题持续趋向严重^[12-14]。

3 结论与讨论

(1)近 70 年来上海中心城区的高密度河网迅速萎缩,河网密度下降了 68.54%,消亡河道多为 1 km 长度以下的村镇级河道,占消失河道比例约 77.13%。河道数量不断下降,河道平均长度则持续增加,河网结构趋向简单化和主干化。

(2)河网结构变化导致河链和河网节点数显著下降,对区域河网廊道连通性产生重要影响。1994 年之前区域河网水系连接率指标高于 1,即保持为网状水系结构,而此后水系环路指数剧烈下降,连接率指标低于 1,由复杂的网状逐渐转变为简单的树枝状。

(3)河网萎缩导致河网密度锐减和河网连通受阻,两个因素共同对上海中心城区水安全问题造成

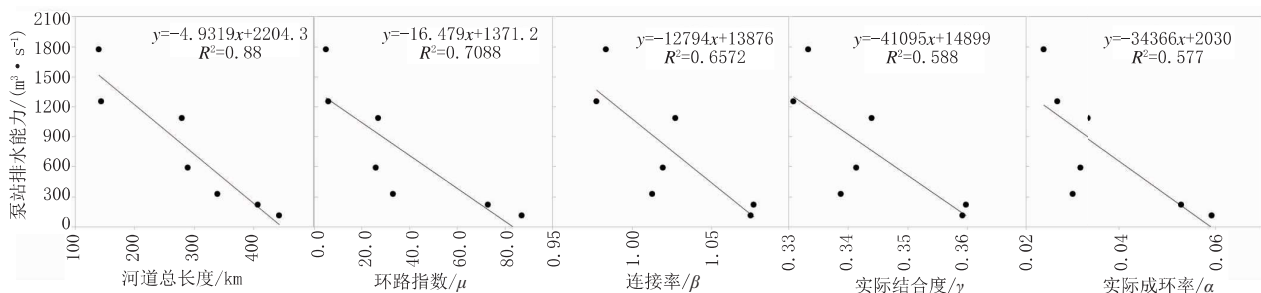


图 7 上海中心城区雨水泵站建设与河网总长度及景观连通指标的响应关系图(1950~2010)

压力。近 70 年来区域雨水泵站排水能力不断增强,并与河网总长度和河网连通性两个指标的变化均存在显著的响应关系,其中对河网总长度变化的响应程度更加明显,连通性稍弱。

(4)本文在河网连通性对水安全影响方面的研究还有待进一步深入,虽初步证实河网连通性与城市水安全存在关联,但城市水安全的影响因素比较复杂,既与河流自身的消亡和连通性下降有关,同时与大气降水、河道外土地利用状况、排水市政设施建设状况亦有密切关系,未来研究可在掌握更多相关数据资料的基础上,采用更先进的研究方法对不同影响因素与城市安全的关系进行定量分解。

参考文献:

[1] XU Y, XU Y P, WU L. Changes in River Networks and their Storage and Regulation Capacities in the Rapidly Urbanized Taihu Basin, China. *Hydrological Processes*, 2018, 32:3341-3351.

[2] 邵玉龙,许有鹏,马爽爽.太湖流域城市化发展下水系结构与河网连通变化分析—以苏州市中心区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(10):1167-1172.

[3] 王坤,许超,王文杰,等.1980—2015 年清水河流域水系连通变化研

究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(04):747-754.

[4] 程江,杨凯,赵军,等.上海中心城区河流水系百年变化及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2007, 27(1):85-91.

[5] 袁雯,杨凯,吴建平.城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 401-407.

[6] 陈云霞,许有鹏,付维军.浙东沿海城镇化对河网水系的影响[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1):68-73.

[7] 陈德超,李香萍,杨吉山,等.上海城市化进程中的河网水系演化[J]. *城市问题*, 2002(5):31-36.

[8] Hermida MA, Cabrera JN, Osorio P, et al. Methodology for the assessment of connectivity and comfort of urban rivers. *Cities*, 2019, 95:102376.

[9] 金凤君,王姣娥.20 世纪中国铁路网扩展及其空间通达性[J]. *地理学报*, 2004, 59(2):293-302.

[10] 张青年.地图图形结构分析与概括研究[J]. *中山大学学报*, 2002, 41(1): 87-90.

[11] 杜清运,杨品福,谭仁春.基于空间统计特征的河网结构分类[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, 31(5):419-422.

[12] 周丽英,杨凯.上海降水百年变化趋势及其城郊的差异. *地理学报*, 2001, 56(5):467-476.

[13] 袁志伦.上海水旱灾害[M]. 南京:河海大学出版社,1999.

[14] 李荣.特大暴雨袭击上海 局部雨量超过 200 毫米[EB/OL]. (2015-06-17) [2020-04-18].

(上接第 132 页)

可以看出在设计荷载作用下,主要控制设计部件四氟板应力满足设计要求和相关行业标准。其主要承力部件应力分布均匀,可以保证支座在设计荷载下的安全、可靠使用。

参考文献:

[1] GB/T 17955—2009,桥梁球型支座[S].

[2] 王锦.特性球型支座有限元分析与试验研究[D].上海:同济大学, 2007.