

---

# 城镇化下平原水系变化及河网连通性影响研究\*<sup>1</sup>

周峰<sup>1</sup> 吕慧华<sup>1,2</sup> 许有鹏<sup>2</sup>

(1. 盐城工学院环境科学与工程学院, 江苏 盐城 224051;

2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093)

**【摘要】:**针对平原区城镇化背景下水系减少及连通受阻等下垫面变化引起的洪涝加剧问题,综合考虑水系结构和水力特性等因素,建立满足行洪排涝需求的平原水系连通度量方法,并以浙东沿海平原河网区为例,分析了城镇化下平原水系特征变化及其对河网连通度的影响。结果表明:①近 20a 来研究区水系数量和结构复杂性均存在不同程度的衰减,河网密度和水面率分别减少 20%和 30%左右,水系尤其是低等级河道的减少导致河网结构趋于骨干化;②河网连通度受水面率等数量特征和水系空间连接结构的共同影响,在水系数量持续减少情况下,整个河网连通度呈现先减少后增加的趋势,说明了骨干河道工程对水系空间结构特征的优化,可缓解水系减弱对河网连通的负面效应;③建立的河网连通度方法合理反映了水系数量和结构变化下的河网连通度演变规律,以及水系变化下区域排涝能力的空间差异特征,具有操作性强特点。

**【关键词】:**水系变化; 水系连通; 平原河网; 城镇化

**【中图分类号】:**K903 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)03-0402-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201703010

平原河网区水系众多,水系在增加河流系统蓄泄能力,减轻洪水灾害中发挥着重要的作用。随着城镇规模的扩张,人口向城市的聚集,城镇化等人类活动在改变河流结构发育演变中的作用不断增强,水系变化研究已成为水文学、水力学等相关学科的热点问题之一<sup>[1,2]</sup>。

---

<sup>1</sup> 收稿日期:2016-08-10; 修回日期:2016-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41401035)

[NationalNaturalScienceFoundationofChina(41401035,4150103)]; 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301075) [CommonwealandSpecializedProgramforScientificResearch, MinistryofWaterResourcesofChina((201301075)]; 江苏省高校自然科学基金项目(14KJB170021)

[NaturalsciencefundforcollegesanduniversitiesinJiangsuProvince((14KJB170021)]

作者简介:周峰(1985~),男,博士,讲师,主要从事水资源及遥感与GIS应用研究. E-mail:zhoufeng\_hn@163.com

---

近年来国内外学者就平原区水系结构方面做了许多有益的探讨研究,随着水系变化研究的深入,水系连通性在表征水系调蓄能力方面逐渐受到关注,并成为近年来的研究热点。一些学者分别对水系连通的定义、特征、构成要素、研究框架以及面临的问题与挑战等进行了探讨,为水系连通研究提供了理论基础<sup>[3-5]</sup>。除了宏观和理论上的河湖连通分析,目前有关水系连通水平的评估通常采用以图论和景观生态学为基础的分析方法,其基本思想是将水系概化成由边和节点构成的拓扑网络,同等规模节点数相同的网络,边的数量越多网络的连通性就越强<sup>[6]</sup>。徐慧等<sup>[7]</sup>将景观空间结构分析中的连接度和环度指数应用于太仓市水系规划之中,对不同规划方案的水系连通性进行了对比分析;赵进勇等<sup>[8]</sup>将河道—滩涂系统概化为图模型,通过建立图的邻接矩阵,给出了水流通道的连通性评价方法;Cui等<sup>[9]</sup>利用图论对高流量和低流量两种情况的河网设计进行了探讨;徐光来等<sup>[10]</sup>利用 MATLAB 工具和图论分析技术,提出用河网加权邻接矩阵对杭嘉湖水系改造前后的连通性进行了评价,但随着河网拓扑关系复杂性加大,表征网络节点的大型邻接矩阵的构建限制了该类方法在复杂河网区域中的应用,平原水系连通度评价方法仍有待进一步的研究。

我国东部河流中下游平原是洪涝灾害频发的区域之一,随着城镇化进程的不断加快,洪涝灾害问题已经成为影响区域城市安全和经济可持续发展的重要因素。近年来,灾害的形成一方面与极端天气事件频率和强度的增强有关,同时人类活动中水系变化的影响也不容忽视,水系演变特征及影响研究显得尤为迫切。

为此,本文以浙东沿海鄞东南平原为例,在综合分析研究区排涝特征的基础上,通过水系信息的提取、水流阻力的量化及连通网络的构建,提出基于水流阻力和网络分析的河网连通性量化方法,揭示了该区域水系特征演变规律,并进一步探讨了水系变化对河网连通度影响。

## 1 研究区概况及数据源

研究区位于长江三角洲东南部沿海地区,属典型的平原河网地区。地处杭州湾之南,为浙东丘陵与宁绍平原的一部分,东部为山区丘陵,西邻奉化江干流,南临奉化东江,北濒甬江(见图 1)。地势南高北低、东高西低,自然形成由南向北排、自东向西排的格局。平原区现有地面高程一般为 1.9~3.5m,平原区境外来水主要来自汛期的上游东江来水和水库泄洪,此外均为区域内产水。洪涝水大部分通过奉化江、甬江沿岸水闸排出。近年来,研究区水利工程的建设在提高区域的防洪排涝能力方面发挥了重要的作用,但城镇用地的扩张和河流水系减少等因素改变了流域调蓄能力和蓄泄关系,尤其在遭遇外江高潮位,水利工程排泄能力受限的情形下,洪涝情势尤为严峻。

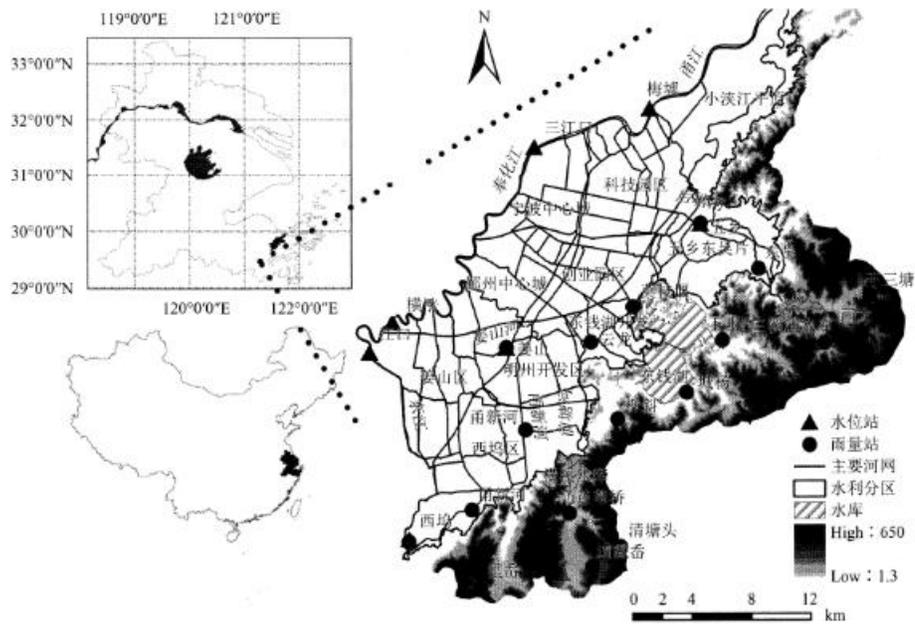


图1 区域位置及地形特征  
Fig.1 Position of Study Area

文中水系数据由面状水系和线状水系构成, 主要来于不同时期 1:10000 土地利用图和地形图资料。水系数据通过地理信息系统软件进行数字化获取, 在数字化过程中, 为了保持线状河道长度尽可能与实际河长相一致, 首先将面状水系转换为二值栅格数据, 然后利用软件的自动捕捉栅格中心线功能, 沿栅格水系中心线进行数字化, 参考 2010 年 ALOS 遥感影像及同期水利普查数据, 并结合实地考察及专家咨询对水系及其之间的连接状况进行核对; 最后利用拓扑检查功能对线状水系进行预处理, 拓扑修正后的线状水系数据最终用于水系和河网连通度量化分析。

为分析不同等级水系的变化特征, 依据河道的自然属性(平均河宽)、管理属性(河道范围)和功能属性(行洪排涝能力)将区域水系划分为三个等级, 即 I 级河道、II 级河道和 III 级河道, 其中 I 级河道多为市级河道和区域行洪排涝的骨干河道, 河道端点一般为上游入流边界, 或沿江闸门位置, 河网中起关键连接的河道, 也归为 I 级河道, 河道均宽通常在 30m 以上; II 级为连接主干河道的次要河道, 河道均宽 20m 左右; III 级河道多为断头河和 II 级河道的河槽, 均宽在 10m 左右, 河道短小, 但总面积较大。经实地考察和专家咨询并参考 2010 年研究区水利普查相关资料, 水系等级及水系连接情况与实际相符, 可用于进一步的水系变化及连通性影响分析。

## 2 水系及连通度量方法

选择合适的水系特征指标是识别水系演变规律的基础, 参考平原区水系国内外已有研究成果, 从行洪排涝角度选取河网密度、河网水面率、盒维数和面积长度比等指标, 用来表征水系的数量和空间结构特征, 各指标物理意义及计算方法详见参考文献<sup>[11, 12]</sup>。

在连通度计算上, 文中将水系连通定义为满足河网蓄泄功能的水流连接通道, 量化上则综合水力学曼宁公式和 GIS 网络分析技术, 构建以水流阻力为核心的连通评价方法, 通过计算网络水系行洪阻力的大小, 表征河网的连通度大小, 建立河网数量和空间结构与河网连通度之间的关系。河网连通度分析技术路线如图 2 所示, 其中水系网络的构建和水流阻力的计算是方法应用的关键。

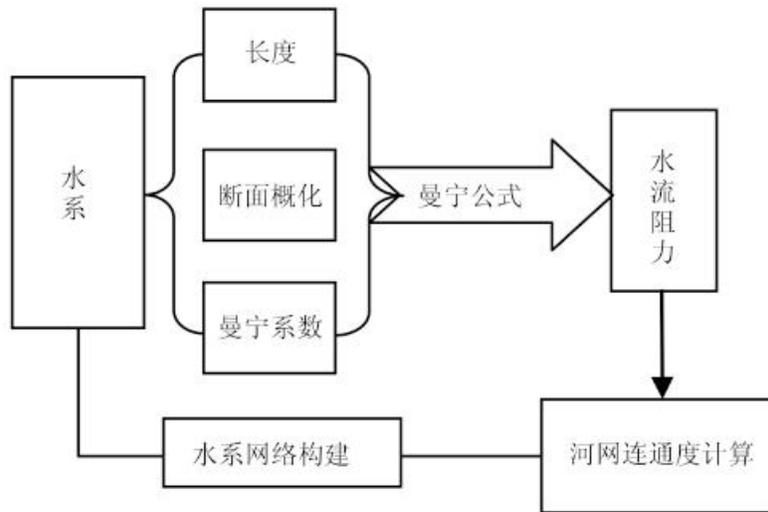


图 2 连通性分析技术路线

Fig.2 River Connectivity Analysis by Flow Path Technology

### 2.1 水系网络构建

依据研究区行洪排涝特征分析,构建水系网络的起点和终点。暴雨期间,研究区外来水量主要由上游水库及堰坝的泄洪组成,下泄水量经骨干行洪河道向西和向北通过沿江水闸排入外江;与此同时,平原河网内部则由骨干行洪河道分割而成的多个小区组成,暴雨期间平原区内降雨经产流后通常就近汇入河网,然后经河网通过沿江水闸排入外江,河网内部无明显的闸坝等水利工程。因此从整个排涝格局而言,河网中骨干河道的节点和上游入流边界点与沿江水闸之间的水流阻力大小,反映了河网的连通程度,即水流阻力越小,表征区域排涝能力相对越强。

为此,本文在构建水系网络时,将沿江水闸位置概化为网络的终点,上游入流边界点和骨干河网节点概化为网络起点(图3),通过计算河道起点和各个终点之间的水流阻力并按河道长度比重加权,对区域河网连通度及不同片区的排涝能力进行分析。



图3 水系网络构建  
Fig.3 River Network Generalization

## 2.2 水流阻力计算

对于独立开放河道,河道流量与河道坡度,纵坡面形状和河道糙率有关<sup>[9]</sup>,河道中水流流速可用曼宁公式表述:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (1)$$

式中: $v$  为截面平均流速;  $n$  为曼宁糙率系数;  $R$  为河道水力半径;  $S_f$  为摩擦坡度,可用河床坡度表示。曼宁公式反映了水流与河床内部诸因素之间的相互关系,即河道的流速与河道水力半径的 $2/3$ 次方和曼宁糙率系数的倒数成比例。水力半径( $R$ )表示为河道纵切断面面积( $A$ )除以湿周( $X$ ),对于梯形河道,可表示为:

$$R = A/X = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \quad (2)$$

式中:A为河道纵切面积;X为湿周;b为河道底宽;h为平均水深;m为河道边坡系数。水流时间除受河道几何形状和糙率系数等影响外,还与河段长度有关,即水流距离越长,能量耗散越大。因而节点与节点之间的水流阻力( $R_c$ )可表示为距离和流速的函数:

$$R_c = l/v = l \times n \times \left[ \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right]^{-2/3} \times S_f^{-1/2} \quad (3)$$

水系连通度的强弱可以用节点间加权水流阻力( $R_c$ )表示,即 $R_c$ 越小,连通度越强,反之连通度越弱。由于不同类型河道组成的河网行洪调蓄能力有所差别,河道边坡系数、曼宁系数和平均水深等因素影响着水流阻力的大小,文中主要依据水系普查数据,同时参考研究区河道设计规范进行相关参数的确定,其中河宽大于30m的骨干河道边坡系数取1:3.0,河道曼宁系数取0.025,平均水深取3.1m;河宽20~30m边坡系数取值1:2.5,河宽小于20m的一般河道边坡系数取值1:2.0,河道曼宁系数取值0.0275,平均水深取2.7m。

通过式(3)计算的水流阻力 $R_c$ 具有时间单位,数值大小与河道长度、宽度、河道的形状参数和糙率系数等因素有关,与河道连通度大小成反比。

### 3 河流水系变化特征分析

水系变化分析结果表明,近20年来研究区河网密度和水面率均呈不断减少趋势,河网由紧密变得较为稀疏,其中河网密度由1990年的 $3.9\text{km}^2/\text{km}^2$ 减少到2010年的 $3.2\text{km}^2/\text{km}^2$ ,减少了近20%;与此同时水面率由1990年9.5%减少到2010年的6.7%,减少了近30%。

不同等级水系的变化特征存在着一定的差异性,其中低等级河道以持续减少为主要特征且变化强度最为剧烈。1990~2010年,Ⅲ级河道总长度由501km减少到353km,减少近30%;相比而言Ⅱ级河道长度由689km减少到542km,约减少了20%;分析结果同时发现,由于骨干河道的被关注度较高,疏浚、清淤及连通工程主要集中在骨干河道,因而Ⅰ级骨干河道水面积呈现先减少后增加的趋势。

不同阶段,线状水系和面状水系的衰减速度有所不同,其中河网长度的减少速度呈不断增加趋势,1990~2003年河网总长度年均减少12.3km,受城镇化加快因素的影响,2003~2010年河网总长度年均减少21.4km,衰减强度比前一时期增加了近1倍;而水面积的衰减速度前后两个阶段年均减少均在 $0.6\text{km}^2$ 左右,衰减速度较为平稳。

不同时期各等级水系减弱程度有所差异。城镇化对水系的影响呈现低等级河道强于高等级河道的特征规律,1990~2003年Ⅲ级河道长度减少了近20%,而同时Ⅱ级河道仅减少了6.7%;2003~2010年,Ⅱ级河道减少了近16%,衰减程度要高于同时期的Ⅲ级河道。其主要因为Ⅱ级河流在人类活动不断加剧的影响下,因宽度缩窄和连通受阻而退化为低等级的Ⅲ级河流,相应的使得低等级河流变化强度表现的较弱。

就水系变化的空间特征而言,衰减程度由中心城区向郊区呈现“弱-强-弱”的阶梯变化特征,其中城镇化较快的城郊结合地带最为剧烈(图4),如鄞州中心城区水面率由1990年的10.2%减少到2010年的5.4%;而城镇化发展较慢的西坞等区域水面率变化相对较弱。

河网密度的空间变化具有类似的特征。

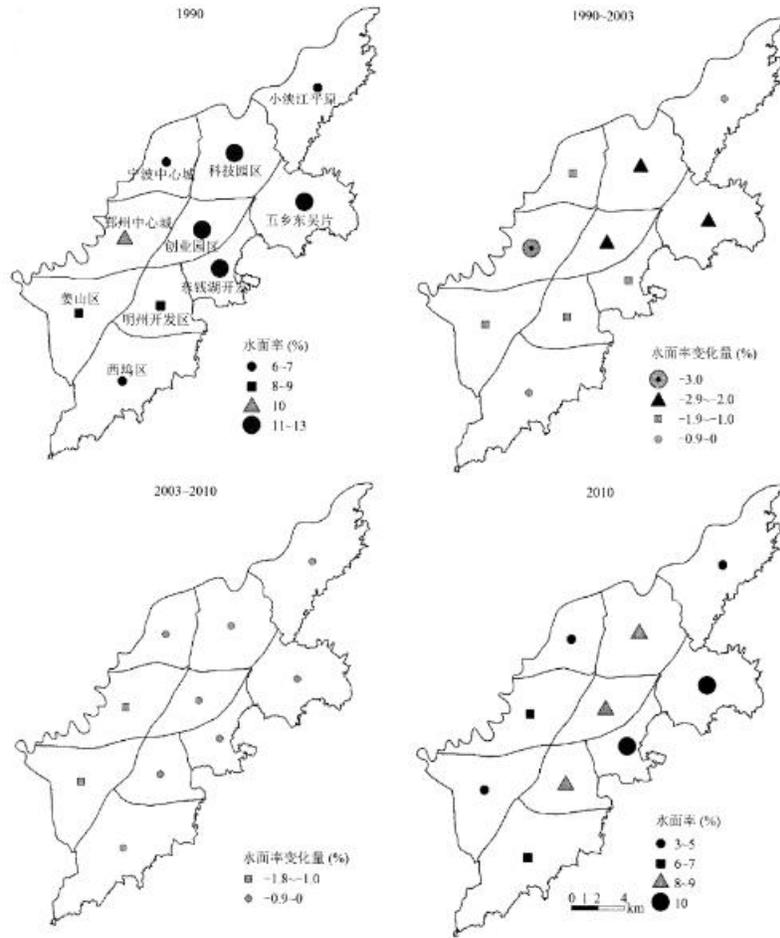


图4 水面率及空间变化特征

Fig.4 Spatial Variation of Water Proportion

进一步分析结果显示,水系数量的减弱改变了河网的空间结构特征,1990~2010期间,盒维数由1.35减少至2010年1.27,减少了5.9%,河网结构逐渐趋于简单化,1990~2010年,河网面积长度比由1990年24.1m减少到2003年的21.5m和2010年的21.0m。不同等级河道的面积长度变化特征有所差异。就变化趋势而言,Ⅰ级骨干河道的面积长度比由1990年的37.4m减少到2003年的34.1m,而后又增加到2010年的35.6m,其中1990~2003年变化最为剧烈。其主要因为城市化发展初期缺少对河网的保护,河道的淤积和填埋使得各等级河道水面均呈减少特征,当城市化发展到一定程度,随着城市防洪压力的加大,研究区开展了一系列针对河网保护的骨干河道整治工程和连通工程,提高了骨干河道的行洪排涝能力。低等级河道的面积长度比则呈持续减少趋势,由1990年的20.2m减少到2010年的15.3m,减少了24%,变化程度较为剧烈。

总的来说,河网数量的锐减,使得干流和支流纵横交错形成的“网”状水系逐渐变成了仅由骨干河道组成的“口”状水系。水系变化与城镇化过程有显著的关系,城镇化水平越高的地区,河网密度与水面率的减少幅度越大,河网遭受的破坏就越大。不同等级河道虽然衰减程度存在一定的差异,但城镇化等人类活动对河网水系的影响总体上呈负向性。

## 4 水系变化对河网连通度的影响分析

分别构建 1990、2003 和 2010 三个不同时期的水系连通网络,对 1990~2010 水系变化后的河网连通度进行分析,结果表明不同时期水系连通能力呈现先增大后减少的趋势,由 1990 年的 21.9 增加到 2003 年的 22.1,而后减少到 2010 年的 21.3(图 5)。

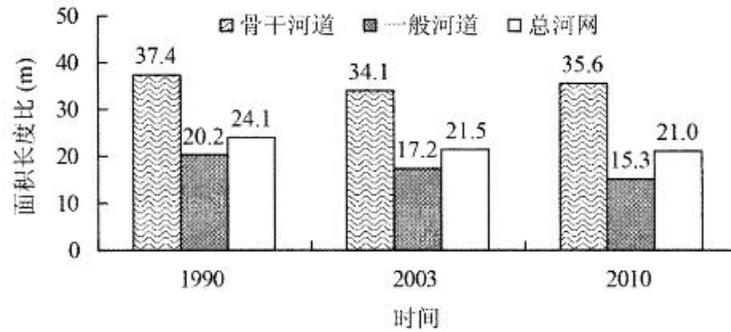


图 5 不同等级河道面积长度比变化特征

Fig.5 Ration of Area and Length for River in Different Grade

1990~2003 年河网连通度变化与水系数量和结构变化特征相关,河道淤塞和消失导致原来纵横交错的河网连通度性变差,区域蓄泄能力减弱,在城镇不透水面增加,产水量增大的情形下,河网调蓄能力减弱又使得相同的降雨条件下河网水位呈现加大趋势,区域洪灾风险进一步加剧。2003~2010 年河网连通的增加主要是受水系保护及骨干连通工程的影响,针对洪涝灾害日益严重的现状,近年来研究区逐步开展了一系列河网保护和骨干河道规划措施,除了尽量维持现状河网水面率外,还在原有河道的基础上新建一些骨干河道疏浚工程,改善了区域河网连通和排涝能力,但近 30 年来在水系不断减弱的情形下,河网连通能力总体仍呈减弱特征。

河网连通变化具有空间差异特征,以前塘河为界(图 1)将构建的水系网络起点划分鄞南片和鄞东片两大水利片区,相应的网路终点分为“北排”和“西排”两个方向,其中“北排”主要指沿甬江水闸,“西排”包括沿东江和奉化江的水闸(表 1)。河网连通变化的空间特征分析显示,1990~2010 期间水系变化条件下,鄞东片和鄞南片连通性均呈现先减少后增加的特征(表 1),与河网连通性整体变化趋势相一致,但水系变化对不同水利片区行洪排涝能力的影响程度却有所不同,由于鄞南水利片排涝路径相对较长,因而受水系变化的影响也更为明显,2003~2010 使得该区域水流阻力减少了 11.2%,骨干河道连通使得该区域排涝能力明显提高。

表 1 不同水利片区河网水流阻力

Tab.1 Network Flow Resistance at Sub-region Scale

		河网水流阻力			变化率(%)		
		1990	2003	2010	1990~2003	2003~2010	1990~2010
鄞南片	西排	13.9	14.9	14.2	7.2	-4.7	2.2
	北排	41.6	42.7	37.9	2.6	-11.2	-8.9
鄞东片	西排	20.9	21.0	20.7	0.5	-1.4	-1.0
	北排	20.3	20.4	20.0	0.5	-2.0	-1.5

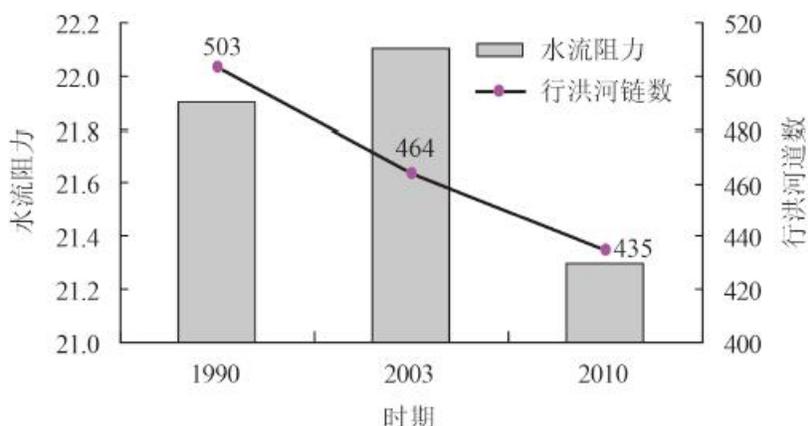


图 6 网络水流阻力分析

Fig.6 Network Analysis of Flow Resistance

以上分析结果表明受城镇化等人类活动的影响,研究区水系数量和结构复杂性均存在不同程度的衰减,而河网连通分析结果显示,2010S河网连通度相比1990S却有所增加。水系减少情形下连通度的增强在一定程度上反映了骨干河道保护及连通工程在改善由水系减弱导致的河网连通受阻等负面效应,提高河网蓄泄能力,遏制洪涝灾害不断加剧趋势方面的重要作用。水系减少同时导致行洪河链数呈现不断减少的趋势(图6),其中1990年网络水流路径数量为498段,减少到2003年的459段和2010年的435段,减少了近13%,表明区域行洪通道逐渐趋于骨干化。分析结果同时表明,河网连通度除了与河网长度和宽度等因素有关外,还受河网空间连接结构的影响,不同区域水系减弱程度和排涝路径有所不同,使得河网连通变化存在一定的空间差异性。

## 5 结论

在水系数字化和特征指标构建的基础上,分析了城镇化背景下浙东沿海鄞东南平原区水系演变特征及河网连通影响,主要得出以下结论:

(1) 受水系淤积和城镇化等因素的影响,研究区近20年水系变化主要表现为数量的减少和空间结构的简单化。不同等级河道虽然衰减程度存在一定的差异,但城镇化等人类活动对河网水系的影响总体上呈负向性,其中低等级河道以持续减少为主要特征。

(2) 基于区域行洪排涝特征分析,建立的基于水力学曼宁公式和网络分析的河网连通度量方法,合理的反映了水系数量和空间结构变化下的河网连通度演变规律及对区域排涝能力的影响,方法具有一定的适用性,可为区域水系规划及防洪排涝措施实施提供参考。

(3) 水系减弱使得行洪河道数量呈持续减少趋势,河网逐渐趋于骨干化。河网连通除了与水面率等指标特征有关外,还受水系的空间连接结构特征的影响,在水系持续减弱的情形下,河道连通工程可缓解水系衰弱对河网蓄泄能力的负面效应,使得研究区河网连通能力呈现先减少后增加的趋势。在城镇化不透面不断扩张情形下,未来可进一步结合区域防洪排涝需求,实施水系结构和连通改善措施,从而提高区域防洪减灾能力。

---

**参考文献:**

- [1] SURIAN N, RINALDI M. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy[J]. *Geomorphology*, 2003, 50(4): 307 - 326.
- [2] 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.
- 【CHEN Y X, XU Y P, FU W J. Influences of urbanization on river network in the coastal areas of East Zhejiang province[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 68 - 73.】
- [3] 李宗礼, 郝秀平, 王中根, 等. 河湖水系连通分类体系探讨[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1975 - 1982.
- 【LI Z L, HAO X P, WANG Z G, et al. Exploration on classification of interconnected river system network[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1975 - 1982.】
- [4] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 26 - 31.
- 【XIA J, GAO Y, ZUO Q T, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 26 - 31.】
- [5] 左其亭, 崔国韬. 河湖水系连通理论体系框架研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(1): 1 - 5.
- 【ZUO Q T, CUI G T. Study on theoretical system and framework of interconnected river system network[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(1): 1 - 5.】
- [6] 陈星, 许伟, 李昆朋, 等. 基于图论的平原河网区水系连通性评价——以常熟市燕泾圩为例[J]. *水资源保护*, 2016, 32(2): 26 - 29.
- 【CHEN X, XU W, LI K P, et al. Evaluation of plain river network connectivity based on graph theory: a case study of Yanjingwei in Changshu City[J]. *Water Resource Protection*, 2016, 32(2): 26 - 29.】
- [7] 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[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 108 - 113.
- 【XU H, XU X Y, CUI G B. Application of landscape spatial structure analysis to urban river system planning[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 108 - 113.】
- [8] 赵进勇, 董哲仁, 翟正丽, 等. 基于图论的河道-滩区系统连通性评价方法[J]. *水利学报*, 2011, 42(5): 537 - 543.
- 【ZHAO J Y, DONG Z R, ZHAI Z L, et al. Evaluation method for river floodplain system connectivity based on graph theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(5): 537 - 543.】

---

[9] CUI B S, WANG C F, TAO W D, et al. River channel network design for drought and flood control: a case study of Xiaoqinghe River basin, Jinan City, China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11): 3675 - 3686.

[10] 徐光来, 许有鹏, 王柳艳. 基于水流阻力与图论的河网连通性评价[J]. 水科学进展, 2012, 23(6): 776 - 781.

【XU G L, XU Y P, WANG L Y. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(6): 776 - 781.】

[11] 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.

【YUAN W, YANG K, WU J P. River structure characteristics and classification system in river network plain during the course of urbanization[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 401 - 407.】

[12] 王柳艳, 许有鹏, 余铭婧. 城镇化对太湖平原河网的影响——以太湖流域武澄锡虞区为例[J]. 长江流域资源环境, 2012, 21(2): 151 - 156.

【WANG L Y, XU Y P, YU M J. Analysis of the urbanization effect on the Taihu plain river network——a case study of Wuchengxiyu region of Taihu basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(2): 151 - 156.】