

秦淮河流域水系结构及连通度变化分析

高玉琴¹, 刘云苹¹, 闫光辉¹, 何平², 陆晓华^{1,3}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省泰州引江河管理处, 江苏 泰州 225321;
3. 中水北方勘察设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要:为定量分析城镇化所导致的河网结构及水系连通变化,通过计算1990年、2000年、2010年和2015年4个时期秦淮河流域的河网密度、水面率、河网复杂度、河网稳定度、河网连通度、水文连通度,得出秦淮河流域水系结构演变过程及连通度变化规律,并运用统计学方法得到水系结构指标与水系连通度之间的联系。结果表明:近25年来,秦淮河流域河网密度、水面率均呈不断减小趋势,河道呈现主干化特征,流域河网整体规模呈萎缩趋势,水系连通变化与河网结构变化总体趋势一致,均呈降低趋势,且其变化与水面率、河网密度和河网复杂度具有显著相关性。

关键词:水系结构;水系连通度;Pearson 相关分析;偏相关分析;秦淮河流域

中图分类号:P343.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)05-0032-08

Analysis on variation of water system structure and connectivity of Qinhuai River Basin//GAO Yuqin¹, LIU Yunping¹, YAN Guanghui¹, HE Ping², LU Xiaohua^{1,3} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Taizhou Yinjiang Canal Administration of Jiangsu Province, Taizhou 225321, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: To quantitatively analyze the variation of river network structure and water system connectivity caused by urbanization, the river network density, water surface rate, river network complexity, river network structural stability, river network connectivity, and hydrological connectivity of the Qinhuai River Basin in 1990, 2000, 2010 and 2015 were calculated. The evolution process of the water system structure and connectivity in the Qinhuai River Basin were obtained. The statistical method is used to obtain the relationship between the water system structure index and the water system connectivity. The results show that the river network density and water surface rate in the Qinhuai River Basin have been decreasing continuously in the past 25 years. The river channel is characterized by main trunking. The overall scale of the river network in the basin is shrinking. The water system connectivity variation is consistent with the overall trend of river network structure variation, both showing a decreasing tendency. The change is significantly correlated with the water surface rate, river network density and river network complexity.

Key words: water system structure; water system connectivity; Pearson correlation analysis; partial correlation analysis; Qinhuai River Basin

随着城市化的快速推进,天然水系格局遭到破坏,逐步转变为自然与人工相结合的复杂格局^[1],部分天然河道萎缩消失,水系结构及连通度发生改变,导致洪涝灾害频发,严重制约了区域社会经济的发展^[2]。秦淮河流域位于江苏省西南部,是我国经济发达、城镇化发展迅速的典型区域,近年来下垫面不透水率增加,人河争地问题突出,水系自然结构及水系连通遭到破坏,水系结构及连通度研究成为区域河湖整治和防洪排涝的重要研究问题之一^[3]。

水系结构是一个地区或者流域水系的空

间分布形态特征,对水系结构的研究多集中于水系分形特征和水系发育定量化研究方面^[4],其中影响较大的是美国河流地貌学家 Horton 提出的河流分级定律,后经 Stralher 修正被广泛地运用于河流结构研究中^[5-6]。随着地理信息系统(GIS)和遥感技术(RS)的发展,尤其是 DEM 的引入对水系提取和结构分析带来了深刻的影响^[7]。水系连通度通常被视为上下游之间的纵向连接^[8-9],其中包括干支流、湖泊及其湿地等的连通情况、水体的连续性、水系的过流能力和畅通能力^[3,10]。基础的水系连通度评价方法有景观

生态学法^[11-12]、图论法^[13-15]、水文模型法^[16-17]等,随着研究的深入,逐渐出现改进图论法^[18]、站点间水位差^[19]以及水流阻力与水文过程^[20]等水系连通度评价方法,使得水系连通度量化评价更加准确。

当前关于水系结构和连通度评价方面的研究相对较为成熟,但存在评价过程中忽略水文过程及当地降雨径流的问题,且多集中于城市化的影响研究,关于水系结构与水系连通度之间的内在联系缺乏较为系统和完整的研究。本文选取秦淮河流域为研究对象,运用图论等方法,定量分析近年来秦淮河流域水系结构及连通度变化情况,并运用数学统计法对水系结构与水系连通度进行相关性分析,为水系格局的合理构建和水系功能的发挥提供决策依据。

1 研究区域及数据预处理

1.1 研究区概况

秦淮河流域位于长江下游,介于东经 118°39′~119°10′、北纬 31°34′~32°10′之间,总面积 2 631 km²,涉及南京、句容两市,其中南京占 66.6%,约为 1 751 km²;句容占 33.4%,约为 880 km²,为江苏省经济发达地区。流域内商贸发达,第三产业发展水平高,城镇化特征显著。改革开放后,南京城镇化发展度过了 4 个阶段:1985 年以前,农村体制改革推动城镇化发展阶段;1986—1992 年,城市体制改革拉动城镇化发展阶段;1993—1999 年,城镇化稳步加快阶段;2000—2010 年,城镇化快速提高阶段;2010 年以后,城镇化水平趋于平稳,至 2018 年城镇化率达 82.5%^[21]。句容市相较于南京市经济发展水平较低,1995—2000 年城镇化年均增长率为 7.96%;2000—2010 年城镇化年均增长率为 11.83%;

2010—2015 年城镇化年均增长率为 4.17%^[22]。从秦淮河流域整体看,2000 年之后城镇化进程明显加快,2010 年之后城镇化速度放缓,基本保持稳定。

1.2 数据处理

结合研究区城镇化发展进程,选取 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年 4 个时期进行水系处理和分级。1990 年水系图通过纸质地图扫描和对比修正得到,其余通过中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台下载获得 DEM 数据,其中 2000 年选用分辨率为 90 m 的 SRTM 高程数字模型,2010 年和 2015 年选用分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM 高程数字模型,通过 ArcGIS 软件进行水文分析提取得到不同时期的水系矢量图,并将生成的河网水系对照 Google Earth 历史影像图进行适当修正。根据秦淮河流域水系实际情况及相关文献^[7,23],将流域水系分成 3 个等级:河流宽度大于 40 m 的定义为主干河道,即一级河道,一般属于区域行洪排涝骨干河道;河流宽度小于 40 m 的定义为支流,其中河流宽度在 20~40 m 之间的为二级河道,0~20 m 之间的为三级河道,支流在河网水系中主要起调蓄作用。不同时期水系分布图如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 水系结构评价方法

水系结构是进行河网形态和功能分析的重要研究基础^[24],主要通过不同地貌指标对河流进行评价。本文根据秦淮河流域平原河网特征,选取河网密度、水面率、河网复杂度和河网结构稳定度等水系结构参数作为评价指标如表 1 所示,表中 L 为流域内河流的总长度; A 为流域总面积; A_L 为流域内的

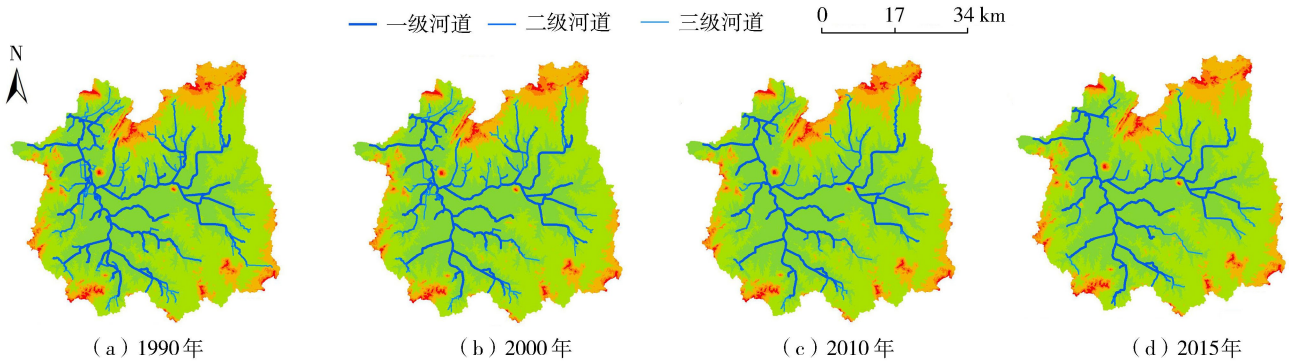


图 1 秦淮河流域不同时期水系分布

表 1 水系结构参数计算方法及含义

结构指标参数	含义	计算方法
河网密度 D_R	流域单位面积上的河流总长度,表示河流长度的发育情况	$D_R = L/A$
水面率 W_P	流域内的水域面积与流域总面积之比,表示流域内河流及湖泊等水系的面积发育情况	$W_P = A_L/A$
河网复杂度 C_R	河网数量和长度的发育状况	$C_R = N_0(L/L_m)$
河网结构稳定度 S_R	河流长度与面积的不同步演变,表示河网结构的稳定程度	$S_R = (L_{i+n}/A_{R_{i+n}})/(L_i/A_{R_i})$

水域面积; N_0 为河流等级数; L_m 为主干河流(一级河道)长度; L_{i+n} 、 L_i 分别为第 $i+n$ 年和第 i 年的河流总长度; $A_{R_{i+n}}$ 、 A_{R_i} 分别为第 $i+n$ 年和第 i 年的河流总面积。

2.2 水系连通度评价方法

水系连通度由河流各项特征参数及水文过程所决定,为全面考虑河网形态特征、不同类型河道的输水能力及流域内的水文过程,本文运用水流阻力与图论方法计算河网连通度,运用站点间水位差计算水文连通度,并将两者计算结果加权得到水系连通度。

a. 将秦淮河流域数字河网概化为图模型,考虑不同河道输水能力的差别,将水流阻力 R_H 的倒数作为边权值 ω ^[25]。

$$R_H = l/v = t = \ln \left[\frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right]^{-2/3} \quad (1)$$

$$\omega = 1/R_H = \frac{1}{\ln \left[\frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right]^{2/3}} \quad (2)$$

式中: v 为平均流速; l 为河长; n 为曼宁系数; b 为河道底宽; h 为水深; m 为边坡系数。

b. 用邻接矩阵 R 表示河网图, r_{ij} 是顶点 u_i 和 u_j 之间的关系,即顶点 u_i 和 u_j 之间的水流通畅程度^[26]。为防止 r_{ij} 为 0 或 r_{ij} 较小时,顶点 u_i 和 u_j 之间的水流通畅度无法计算或错算漏算,运用矩阵乘法得到 R_k 。

$$r_{ij} = \begin{cases} \sum_i^{m_{ij}} 1/R_{H_{ij,q}} & u_i \text{ 和 } u_j \text{ 之间至少有一条边直接相连且 } i \neq j \\ 0 & u_i \text{ 和 } u_j \text{ 之间不存在边直接相连, 或者 } i = j \end{cases} \quad (3)$$

$$R_k = \sum_{p=1}^n r_{ip,k-1} r_{pj} \quad (4)$$

式中: m_{ij} 为顶点 u_i 和 u_j 之间连接的河道数; $R_{H_{ij,q}}$ 为顶点 u_i 和 u_j 之间第 q 条相连河道的水流阻力; $r_{ij,k}$ 为顶点 u_i 和 u_j 间有 $k-1$ 个其他节点时的水流通畅度; p 为顶点编号。

c. 根据河网邻接矩阵建立水流通畅度矩阵 $F = (f_{ij})_{s \times s}$ (f_{ij} 为 u_i 和 u_j 之间水流通畅度的最大值, s 为节点数)。进而计算出任一节点的水流通畅度 D_i 以及河网连通度 D 。

$$f_{ij} = \begin{cases} \max r_{ij,k} & i \neq j (k = 1, 2, \dots, s-1) \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (5)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^s f_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j \neq i) \quad (6)$$

$$D = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s D_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

d. 水文连通度主要是指水流或以水为介质的有机物、能量的转移效率,这一效率可以通过水流运行时间、流量、水位、水温等指标进行定量计算^[23]。秦淮河流域属平原河网地区,其水位变化与河网纵向连通性基本一致,具有显著的相关性,且区域内各站点之间的水位联系较大^[9,27],故本文基于站点间的水位差来定义水文连通度。为避免水位差为 0 时无法计算,以及水位差为负时水文连通度为负的情况出现,于是定义:

$$C_h = \frac{1}{|\Delta Z| + 1} \quad (8)$$

式中: C_h 为水文连通度; ΔZ 为相邻站点的水位差。

e. 由于河网连通度与水文连通度计算结果单位不同且常常不在同一个量级,为方便进行加权求和,将其结果进行归一化处理:

$$D' = \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (9)$$

$$C'_h = \frac{C_h - C_{h\min}}{C_{h\max} - C_{h\min}} \quad (10)$$

式中: $D_{\min}$ 、 $C_{h\min}$ 分别为河网连通度和水文连通度的最小值; $D_{\max}$ 、 $C_{h\max}$ 分别为河网连通度和水文连通度的最大值。

f. 将归一化后的河网连通度与水文连通度加权,得到流域的水系连通度 E :

$$E = w_1 D' + w_2 C'_h \quad (11)$$

式中: w_1 、 w_2 为对应的权重,其和为 1,可依据河道自然与功能属性、区域防洪排涝重要性等来确定。

2.3 相关性分析

相关性分析是用以描述随机变量之间相关关系的统计学方法,通常用 Pearson 相关系数 r 来反映变量间的相关性强弱和方向^[28],计算公式如式 12 所示。相关系数仅能刻画变量间线性相关程度,表示两变量间的共变联系,在实际应用中,变量常常受多个因素共同影响,仅使用相关系数 r 进行相关性分析,不能真实准确地反映两变量间的相关关系^[29]。故本文在运用 Pearson 相关系数对水系结构指标与水系连通度进行简单相关分析的同时,采用偏相关系数排除其他因素的影响,得到单个因素与目标值之间的净相关关系, N 阶偏相关系数计算通式如式 (13) 所示,偏相关系数的绝对值的大小表示各变量间的相关程度,也可表示各变量间的相对重要性^[30-31],其值越大相关程度越高,也越为重要。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

$$r_{y_{xx_1x_2\cdots x_N}} = \frac{r_{y_{xx_1x_2\cdots x_{N-1}}} - r_{y_{xx_1x_2\cdots x_{N-1}}} r_{xx_{xx_1x_2\cdots x_{N-1}}}}{\sqrt{(1 - r_{y_{xx_1x_2\cdots x_{N-1}}}^2)(1 - r_{xx_{xx_1x_2\cdots x_{N-1}}}^2)}} \quad (13)$$

$$t = \frac{r\sqrt{c-d-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (14)$$

式中: X_i 、 Y_i 为随机变量; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 为随机变量的算数平均值; t 为检验统计量; r 为相关系数或偏相关系数; N 为样本数量, d 为阶数。

3 结果与讨论

3.1 水系结构变化分析

秦淮河流域近 25 年来河网密度由 0.253 8 减少至 0.162 1,水面率由 1.45% 减少至 1.01%,河网复杂度由 6.148 1 减少至 5.043 0,河网密度、水面率和河网复杂度总体呈降低趋势,流域河网整体规模呈较剧烈的萎缩态势;河网结构稳定度由 1.035 9 变为 0.985 6,秦淮河流域水系变化规律表现为:先水域面积(河道宽度)减少,后河流长度减少,结构稳定度变化呈“先减后增”变化趋势,说明城镇化发展越快,河网稳定度越低,当城镇化达到一定程度时,河道长度与面积缩小速度趋于一致,河网稳定度提高。

秦淮河流域不同时期河网密度、水面率和河网复杂度呈现出不同的变化趋势(表 2 和表 3)。河网密度在 2000—2010 年期间变化最为剧烈,下降速度将近 1990—2000 年的 2 倍,2010—2015 年变化速率放缓;水面率在 1990—2000 年间变化较大,2000—2010 年次之,2010—2015 年变化最小。河网复杂度

表 2 秦淮河流域不同时期河网密度及其变化

河道等级	河网密度/(km·km ⁻²)				不同时段变化率/%		
	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2015 年
一级河道	0.123 9	0.103 5	0.099 0	0.096 4	-16.47	-4.32	-2.59
二级河道	0.062 1	0.056 7	0.043 8	0.038 8	-8.76	-22.71	-11.31
三级河道	0.067 9	0.061 3	0.031 2	0.026 8	-9.64	-49.15	-13.96
总体	0.253 8	0.221 4	0.174 0	0.162 1	-12.76	-21.44	-6.82

表 3 秦淮河流域不同时期水面率及其变化

河道等级	水面率				不同时段变化率		
	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2015 年
一级河道	1.18	0.97	0.89	0.86	-18.05	-7.72	-3.78
二级河道	0.18	0.17	0.12	0.11	-4.29	-27.58	-13.06
三级河道	0.09	0.08	0.05	0.04	-8.35	-42.78	-4.30
总体	1.45	1.22	1.06	1.01	-15.78	-12.83	-4.87

在 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年分别为 6.148 1、6.421 3、5.272 2、5.043 0,在 1990—2000 年期间有明显的提升,但到 2000 年之后开始迅速下降,至 2010 年下降速度放缓。从不同阶段变化趋势上来看,不同水系结构指标存在明显差异,进一步探索其原因,将水系按照一、二和三级河道进行比较分析,其中一级河道河网密度和水面率降低趋势呈现“快-慢-慢”的特征,而二、三级河道河网密度和水面率呈现“慢-快-慢”的变化趋势,说明秦淮河流域河网密度的改变主要由二、三级河道减少导致,水面率的变化主要由一级河道减少导致。第一阶段一级河道减少速率大于二、三级河道,导致总河长下降速度小于一级河道下降速度,河网复杂度在第一阶段小幅度增长,第二、三阶段一级河道下降速度放缓,二、三级河道下降速度提升,河网复杂度降低,河网主干化特征逐渐形成。

城市快速发展是导致河网水系发展改变的重要因素之一,而城市的快速发展主要表现为人口的快速增长和土地利用方式的改变。城市人口的快速增长导致区域环境发生巨大改变,生活垃圾的随意倾倒导致河道淤积甚至填埋,造成河道长度、河道面积减少,其中低等级河道影响最为显著^[32]。秦淮河流域城市化率,即区域内城市人口占总人口比例近年来呈不断递增趋势(表 4),其中 2000—2010 年间人口增长最为剧烈,因河道淤积、人为干扰等原因,此阶段二、三级河道被大量填堵侵占,河道长度迅速下降,河网密度、河网复杂度迅速降低,分别下降 21.44% 和 17.90%,一级河道受影响相对较小,河道变化不大,水面率减少速度较河网密度和河网复杂度低。除此之外,秦淮河流域近几十年来土地利用变化显著,不透水率由 3.2%(1988 年)增长至 19.09%(2015 年),年均增长 6.04%,增长近 4 倍^[33],导致区域产汇流过程发生变化,影响河道冲淤过程,最终导致水系结构发生改变。

表 4 秦淮河流域不同时期城市化率

地区	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年
南京市主城区	99.77	98.02	99.10	99.63
江宁区	9.82	20.78	45.60	51.72
溧水区	8.85	16.26	23.60	24.76
句容市	15.86 [*]	22.17	48.40	58.48

注:①表中所有数据由查阅《南京市统计年鉴》和《镇江统计年鉴》计算获得;②15.68% 为句容市 1995 年城市化率。

3.2 水系连通度变化分析

3.2.1 时间变化特征

根据前述水系连通度计算方法,参考相关文献资料^[34-35]、秦淮河流域水文资料及水系特征确定河道相关参数,其中一级河道曼宁系数为 0.022 5,边

坡系数为 1 : 3,平均水深为 3.5 m;二级河道曼宁系数为 0.025 0,边坡系数为 1 : 2,平均水深为 2.2 m;三级河道曼宁系数为 0.027 5,边坡系数为 1 : 1.5,平均水深为 1.8 m。 w_1 、 w_2 依据河道自然与功能属性、区域防洪排涝重要性等来确定,对于河道规模差异大,区域控制河道和主干河道占主导,防洪排涝重要性高的地区,水系连通性主要取决于一级河道的防洪排涝能力,而其防洪排涝能力的大小与河道水流阻力密切相关,则 w_1 取较大值;对于河道规模差异小,防洪排涝压力小的地区,区域水系连通性主要取决于当地的水文过程,则 w_2 取较大值。秦淮河流域河道规模差异较大,一级河道行洪排涝功能的重要性高,参考已有研究成果^[20,36],确定 w_1 取值为 0.7, w_2 取值为 0.3。将秦淮河流域按照城市化发展特点将其分南京市主城区、江宁区、句容市和溧水区四片,计算得到不同时期水系连通度如表 5 所示。

表 5 秦淮河流域不同时期水系连通度及其变化

地区	水系连通度				不同时段变化率/%		
	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2015 年
南京市主城区	0.625 3	0.511 5	0.558 5	0.530 9	-18.21	9.19	-4.94
江宁区	0.992 1	0.754 8	0.407 6	0.337 5	-23.92	-46.00	-17.18
溧水区	0.609 6	0.539 6	0.420 0	0.249 1	-11.48	-22.16	-40.71
句容市	0.608 2	0.564 3	0.497 5	0.327 9	-7.22	-11.84	-34.09
秦淮河流域	0.828 0	0.775 5	0.478 9	0.353 9	-6.34	-38.24	-26.09

秦淮河流域整体水系连通度呈下降趋势,水系连通度由 1990 年的 0.828 0 下降至 2015 年的 0.353 9,降低 57.25%,以 2000 年为界,后期较前期变化速率明显增加。对比不同行政区水系连通变化过程,南京主城区水系连通变化主要集中在 1990—2000 年,2000 年之后水系连通度略有提升后又下降,整

体变化幅度较小;江宁区水系连通变化最为显著,1990—2015 年水系连通度降低 65.98%,其中 2000—2010 年变化速率最大,2010 年之后变化速度略微降低;溧水区和句容市水系连通变化进程较为近似,1990—2000 年期间水系连通变化速率相对较小,2000 年之后水系连通度迅速下降。结合秦淮河流域土地利用变化特征^[33,37],南京市主城区城市发展相对靠前,至 2000 年基本稳定,建设步伐放缓,水系连通度在一定区间内上下浮动,变化较小;江宁区 25 年来整体发展较快,2010 年后发展速度减慢,水系连通变化也经历先快后慢的变化过程;溧水区和句容市城市发展相对滞后,2000 年之前不透水面积缓慢增加,2000 年之后迅速提升,导致水系连通度持续下降。

3.2.2 空间变化特征

秦淮河流域不同行政区域的水系连通变化快慢存在明显差异(图 2),1990—2000 年秦淮河流域城市化建设以南京主城区和江宁区为主,导致水系连通发生巨大变化,其中江宁区在南京主城区水系连通变化最为显著,其次为溧水区和句容市;2000—2010 年期间城市化扩张主要集中于江宁区、溧水区和句容市,而南京城区城市化建设已接近饱和状态,增速大大减慢,水系连通变化主要体现在江宁区、溧水区和句容市 3 个地区,其中江宁区变化最为显著,变化率增长近 2 倍,其次为句容市、溧水区和南京主城区;2010—2015 年期间江宁区城市化建设放缓,溧水区和句容市城市化建设持续加快,不透水面积增加,水系连通度持续下降,水系连通变化主要集中于溧水区和句容市,其次为江宁区 and 南京主城区。

进一步对比同一时期不同行政区域水系连通、水系结构指标和河长变化过程(图 3),发现 1990—2000 年期间,不同地区水系连通变化快慢与河网复杂度变化一致,江宁区 and 溧水区水系连通变化与河网密度和水面率变化快慢相同,其水系连通变化主

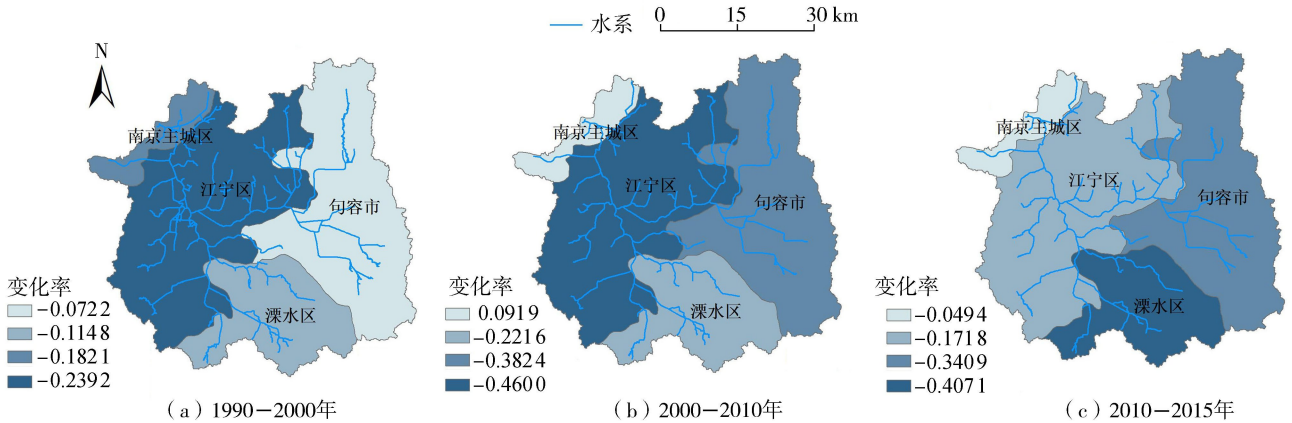


图 2 秦淮河流域不同地区水系连通度变化率

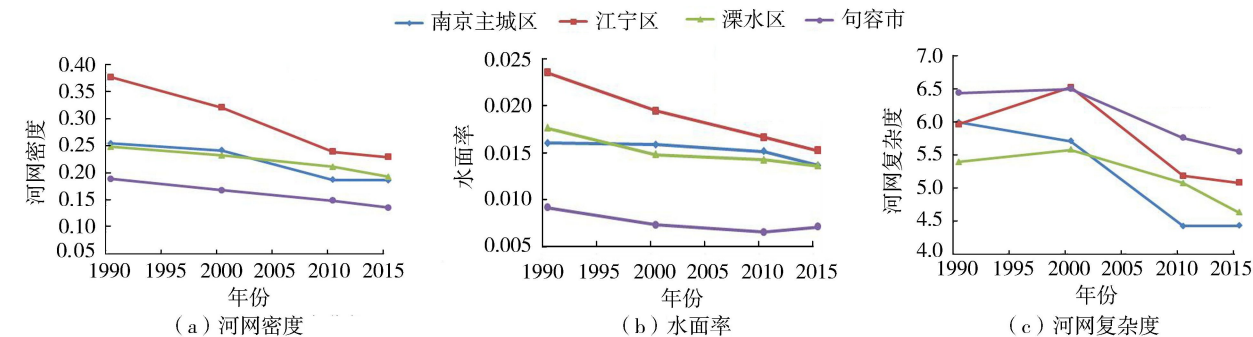


图3 秦淮河流域不同地区水系结构及河长变化情况

要受一级河道变化影响,句容市和南京市主城区水系连通变化主要受二、三级河道变化影响;2000—2010年期间,除南京主城区外,其他地区水系连通变化与水面率、河网密度和河网复杂度变化快慢一致,此阶段水系连通变化受到所有等级河道变化的共同作用,南京主城区此阶段河网密度和复杂度变化较大,水面率变化较小,水系连通变化主要受二、三级河道变化影响;2010—2015年期间,不同地区水系连通变化与河网密度、河网复杂度变化快慢一致,与水面率变化快慢相反,南京水系连通变化主要受一级河道影响,其他水系连通变化受到二、三级河道变化的主要影响。

3.3 水系结构与连通度相关性分析

城市化建设,不透水面积增加,导致河网水系被填埋拥堵,水系结构发生改变,河网水系密度、水面率和河网复杂度发生巨大变化,水系连通度随之改变,为定量分析水系结构与水系连通间的响应关系,运用 Pearson 相关系数来刻画水系结构各指标与水系连通度之间的相关关系,计算结果如表 6 所示。水面率、河网密度和河网复杂度均与水系连通度呈正相关关系,水面率、河网密度、河网复杂度与水系连通度之间的相关系数分别为 0.487、0.703 和 0.605, t 检验的显著性概率分别为 $0.029 < 0.05$ 、 $0.001 < 0.01$ 和 $0.005 < 0.01$,即河网密度和河网复杂度与水系连通度在 0.01 水平上显著相关,水面率与水系连通度在 0.05 水平上显著相关。河网稳定性与水系连通度之间相关性较弱,且 t 检验均大于 0.05,相关性不显著。

表6 水系结构指标与连通度的 Pearson 相关分析

指 标	相关性	显著性
水 面 率	0.487	0.029
河 网 密 度	0.703	0.001
河网复杂度	0.605	0.005
河网稳定性	0.339	0.216

为进一步分析水面率、河网密度和河网复杂度对水系连通度影响程度的强弱关系,采用偏相关分析方法进行计算分析,分析结果如表 7 所示。在河

网密度、河网复杂度和河网稳定性作为控制变量的情况下,水面率与水系连通度的三阶偏相关系数为 0.473,显著性概率为 $0.120 > 0.05$,表明河道长度保持不变时,河道宽度与水系连通度呈正相关,但对其作用不显著;在水面率、河网复杂度和河网稳定性作为控制变量的情况下,河网密度与水系连通度的三阶偏相关系数为 -0.432 ,显著性概率为 $0.161 > 0.05$,表明河道宽度保持不变时,河道长度与水系连通度呈负相关,但关系不显著;在水面率、河网密度和河网稳定性作为控制变量的情况下,河网复杂度与水系连通度的三阶偏相关系数为 0.578,显著性概率为 $0.049 < 0.05$,表明河网密度和水面率保持不变时,河网复杂度与水系连通呈正相关关系。

表7 水面率、河网密度与连通度的偏相关分析

指 标	控制变量	相关性	显著性
水 面 率	河网密度、河网复杂度、河网稳定度	0.473	0.120
河 网 密 度	水面率、河网复杂度、河网稳定度	-0.432	0.161
河网复杂度	水面率、河网密度、河网稳定度	0.578	0.049

以上相关分析结果表明:河网密度、水面率、河网复杂度与水系连通度均存在显著的正相关关系,即河道长度与水域面积直接影响水系连通性,河网密度、水面率和河网复杂度越大,水系连通性越好。保持水面率、河网复杂度不变,单方面减少河网密度(河道长度降低,河道宽度拓宽)可提高水系连通度,但提升效果不显著;保持河网密度、河网复杂度不变,单提升水面率(河道长度不变,河道宽度拓宽)可提高水系连通度,同样提升效果并不显著;保持河网密度、水面率不变时,河网复杂度越高,即降低一级河道长度,提升二、三级河道长度,且拓宽河道宽度可有效提高水系连通度。综上,水系结构指标参数对水系连通的影响相辅相成,单通过提高或降低某一指标并不能有效改变水系连通度,在河湖水系治理工作中,应将三者相结合,同时改变河网密度、水面率和河网复杂度,并寻求其最优解,快速有效地提高水系连通度。

在当前河网水系中,水系连通变化多由河道长

度降低、河道宽度减少引起,并随着城市建设的快速推进,二、三级河道大量填堵消失,河网水系主干化特征逐渐明显。针对此现象,在进行区域水系治理过程中,应加强河湖水系保护措施,在保持二、三级河道长度和宽度不再减少的同时,加强一级河道治理工作,通过清淤、局部拓浚等措施拓宽河道宽度,提高河网密度和水面率,有效提高水系连通度,降低洪涝灾害。

4 结 论

a. 秦淮河流域随着城镇化的快速发展,水系结构发生改变,河网密度和水面率呈不断降低趋势,河道萎缩现象日渐严重。

b. 秦淮河流域河网复杂度表现出“先增后减”的变化趋势,城市化建设初期主要表现为一级河道部分河宽减少,降为二、三级河道,河网复杂度呈现短暂性的增长,随着城市化快速推进,人口剧增和不透水面的快速增加导致大量二、三级河道被淤积、填埋,河网趋于主干化,河网复杂度降低。

c. 秦淮河流域河网稳定性呈“先减后增”的变化趋势,同步性不高,并且城镇化发展越快,河网稳定度越低,当城镇化达到一定程度时,河道长度与面积缩小速度趋于一致,河网稳定度提高。

d. 秦淮河流域水系连通变化趋势与河网结构变化趋势相同,呈不断下降趋势,不同区域水系连通变化与城镇化发展历程的不同呈现明显差异性,其中南京主城区水系连通变化主要集中在1990—2000年之间,2000年后整体变化幅度较小,江宁区水系连通变化在2000—2010年期间变化最为显著,2010年之后变化速度略微降低,溧水区和句容市水系连通变化进程较为近似,1990—2000年期间水系连通变化速率相对较小,2000年之后水系连通度迅速下降。

e. 水系连通度与河网密度、水面率、河网复杂度具有显著相关性,河网密度、水面率和河网复杂度对水系连通的影响相辅相成,在河湖水系保护过程中,应综合考虑河网密度、水面率和河网复杂度等指标,合理确定区域的最优水面率、河网密度和河网复杂度,加强河湖水系保护措施,通过清淤、局部拓浚等措施有效提高河网水系连通度。

参考文献:

[1] 王柳艳. 太湖流域腹部地区水系结构、河湖连通及功能分析[D]. 南京:南京大学,2013.
[2] 唐传利. 关于开展河湖连通研究有关问题的探讨[J]. 中国水利, 2011 (6): 86-89. (TANG Chuanli. The

research on the connection of river and lake is discussed [J]. China Water Resources, 2011 (6): 86-89. (in Chinese))

[3] 夏军, 高扬, 左其享, 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 Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (1): 26-31. (in Chinese))
[4] 胡尊乐, 汪姗, 费国松. 基于分形几何理论的河湖结构连通性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (6): 24-28. (HU Zunle, WANG Shan, FEI Guosong. Evaluation method of structural connectivity for rivers and lakes based on theory of fractal geometry [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (6): 24-28. (in Chinese))
[5] HORTON R E. Erosional development of stream and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Geological Society of America Bulletin, 1945, 56(3): 275-370.
[6] STRAHLER A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(11): 1117-1142.
[7] 孟慧芳. 鄞东南平原河网区水系结构与连通变化及其对调蓄能力的影响研究[D]. 南京:南京大学, 2014.
[8] LARSEN L G, CHOI J, NUNGESSER M K, et al. Directional connectivity in hydrology and ecology [J]. Ecological Applications, 2012, 22(8): 2204-2220.
[9] DENG X, XU Y, HAN L. Impacts of human activities on the structural and functional connectivity of a river network in the Taihu Plain [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(8): 2575-2588.
[10] 马爽爽. 基于河流健康的水系格局与连通性研究[D]. 南京:南京大学, 2013.
[11] 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 Hui, XU Xiangyang, CUI Guangbo. Application of landscape spatial structure analysis to urban river system planning [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 108-113. (in Chinese))
[12] MARTINEZ-CARRERAS N, WETZEL C E, FRENTRESS J, et al. Hydrological connectivity inferred from diatom transport through the riparian-stream system [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19 (7): 3133-3151.
[13] POULTER B, GOODALL J L, HALPIN P N. Applications of network analysis for adaptive management of artificial drainage systems in landscapes vulnerable to sea level rise [J]. Journal of Hydrology, 2008, 357 (3/4): 207-217.
[14] PHILLIPS R W, SPENCE C, POMEROY J W. Connectivity and runoff dynamics in heterogeneous basins [J]. Hydrological Processes, 2011, 25 (19): 3061-

- [15] 杨晓敏. 基于图论的水系连通性评价研究[D]. 济南: 济南大学, 2014.
- [16] KARIM F, KINSEY-HENDERSON A, WALLACE J, et al. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in a tropical floodplain in north Queensland, Australia: hydrological connectivity of floodplain wetlands [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26 (18): 2710-2723.
- [17] 田传冲, 陈星, 湛忠宇, 等. 水量水质系统控制的流域水系连通方案[J]. *水资源保护*, 2016, 32(2): 30-34. (TIAN Chuanchong, CHEN Xing, ZHAN Zhongyu, et al. Watershed system connectivity scheme based on water quantity and quality control system [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(2): 30-34. (in Chinese))
- [18] 高玉琴, 肖璇, 丁鸣鸣, 等. 基于改进图论法的平原河网水系连通性评价[J]. *水资源保护*, 2018, 34(1): 18-23. (GAO Yuqin, XIAO Xuan, DING Mingming, et al. Evaluation of plain river network hydrologic connectivity based on improved graph theory [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34 (1): 18-23. (in Chinese))
- [19] 邵玉龙. 太湖流域水系结构与连通变化对洪涝的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [20] 孟慧芳, 许有鹏, 徐光来, 等. 平原河网区河流连通性评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(5): 626-631. (MENG Huifang, XU Youpeng, XU Guanglai, et al. Study on rivers connectivity evaluation in plain river network area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 626-631. (in Chinese))
- [21] 南京市统计局, 国家统计局. 南京统计年鉴[M]. 南京: 南京市统计局, 2019.
- [22] 镇江市统计局, 国家统计局镇江调查队. 镇江统计年鉴[M]. 镇江: 镇江市统计局, 2016.
- [23] 徐光来. 太湖平原水系结构与连通变化及其对水文过程影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [24] 沈洁. 上海浦东新区城市化进程对水系结构、连通性及其调蓄能力的影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [25] 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 Guanglai, XU Youpeng, WANG Liuyan. Evaluation of river network connectivity based on hydraulic resistance and graph theory [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 776-781. (in Chinese))
- [26] 顾政华, 李旭宏, 于世军. 区域高速公路网布局结构的连通度研究[J]. *公路交通科技*, 2005(2): 86-89. (GU Zhenghua, LI Xuhong, YU Shijun. Research on connectivity of layout structure for regional expressway network [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005 (2): 86-89. (in Chinese))
- [27] DENG X, XU Y, HAN L, et al. Spatial-temporal changes in the longitudinal functional connectivity of river systems in the Taihu Plain, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 846-859.
- [28] 吴文玲. 基于数据挖掘技术的课程相关性分析及其应用研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.
- [29] 任福栋, 张宏烈, 孙景峰, 等. 简单相关分析与偏相关分析在高考成绩相关性分析中的对比研究[J]. *高师理科学刊*, 2014, 34(2): 24-27. (REN Fudong, ZHANG Honglie, SUN Jingfeng, et al. The comparative study between simple correlation analysis and partial correlation analysis of the national college entrance examination [J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2014, 34(2): 24-27. (in Chinese))
- [30] 王海燕, 杨方廷, 刘鲁. 标准化系数与偏相关系数的比较与应用[J]. *数量经济技术经济研究*, 2006(9): 150-155. (WANG Haiyan, YANG Fangting, LIU Lu. Comparison and application of standardized regressive coefficient & partial correlation coefficient [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2006 (9): 150-155. (in Chinese))
- [31] 乐红志. 基于偏相关分析的土体强度影响因素重要性评价[J]. *山西建筑*, 2019, 45(11): 81-82. (LE Hongzhi. Importance evaluation of influencing factors of soil shear strength based on partial correlation analysis [J]. *Shanxi Architecture*, 2019, 45(11): 81-82. (in Chinese))
- [32] 许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [33] 宋明明, 都金康, 郑文龙, 等. 秦淮河流域近30年不透水面景观格局时空演变研究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(2): 238-247. (SONG Mingming, DU Jinkang, ZHENG Wenlong, et al. Quantifying the spatial-temporal changes of impervious surface landscape pattern from 1988 to 2015 in Qinhuai River Basin [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(2): 238-247. (in Chinese))
- [34] 李炜. 水力计算手册[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 灌溉与排水工程设计标准: GB50288—2018[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018.
- [36] 周震. 巢湖流域水系连通性及其对水质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [37] 马小雪, 卞子浩, 李娜, 等. 秦淮河流域1980—2010年土地利用变化及驱动机制[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(6): 272-276. (MA Xiaoxue, BIAN Zihao, LI Na, et al. Land use change and its driving mechanism in Qinhuai River Watershed during 1980-2010 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(6): 272-276. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-10-01 编辑: 郑孝宇)