

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180022

周峰, 吕慧华, 刘长运. 江苏里下河平原城镇化背景下河网水系变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 144-150.  
ZHOU F, LYU H H, LIU C Y. Change of river system in the Lixiahe region during urbanization[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 144-150. (in Chinese)

# 江苏里下河平原城镇化背景下河网水系变化特征分析

周峰, 吕慧华, 刘长运

(盐城工学院 环境科学与工程学院, 江苏 盐城 224051)

**摘要:** 城镇化等人类活动影响下众多河流水系的破坏, 使得江苏里下河平原水安全及生态环境压力加大。基于遥感和地理信息技术方法, 以盐城市区为例, 开展近30年来水系结构时空变化及城镇化影响研究, 结果表明: (1) 区域下垫面变化以城镇面积的增加, 水田和水体的减少为主要特征, 城镇化率由1980年的3.4%增长到2014年的20.8%, 2000年后城镇扩张明显加快, 呈现从中心老城区以空间蔓延形态向东和向南的趋势; (2) 水系变化以低等级水系数量特征减少为主要趋势, 其中河网密度和水面率的变化强度和空间差异性最为显著; 水系减少使得河网复杂性和区域调蓄能力有所降低, 但河网结构整体上仍呈现自然顺直型网状特征。 (3) 2000年以后城镇面积扩张取代农业活动和水利工程等因素成为水系变化的主要驱动因子, 水系变化强度的空间差异增强, 城镇化率低于30%的区域, 水系变化程度与城镇化线性关系显著; 水系特征指标中河网密度、水面率和盒维数对表征该区域的水系数量和结构特征变化具有较好的指示意义, 可作为评价水系变化的主要因子。相关研究成果可丰富平原区水系变化案例研究, 同时可为该区域未来城镇发展下的水系功能规划及保护提供依据。

**关键词:** 水系变化; 城镇化; 平原河网

中图分类号: TV 212 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)01-0144-07

## Change of river system in the Lixiahe region during urbanization

ZHOU Feng, LYU Huihua, LIU Changyun

(School of Environmental Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

**Abstract:** The change of underlying surface and river system and its impact on hydrological process is one of the hot topics in hydrological studies especially in plain areas. In this study, we chose the Lixiahe district as the study area, and adopted RS and GIS technologies to study the changes in underlying surface and river system. The results showed that there was a significant change in land use during the urbanization of the study area. The proportion of urban area increased from 3.4% in 1980 to 20.8% in 2014, while the area of paddy fields and water body decreased. The urban expansion evidently accelerated after 2000, and showed an eastward and southward tendency from the city center. Drainage density and water surface ratio both declined during the past 30 years. As a result, the structural complexity and the regional regulation and storage capacity of the river system also declined. The change of the river system was mainly characterized by the reduction in low-grade rivers. Urbanization became the main driver in river system change after 2000. The degree of river system change had a significant linear relationship with urbanization in areas with an urbanization rate below 30%. The drainage density, water surface ratio, and box dimension were effective indicators of the quantitative and structural changes of the river system. The research results may enrich the case studies on river system change in plain areas, and provide basis for the functional planning and protection of the river system in this region in the future urbanization process.

**Key words:** river system change; urbanization; plain river system

收稿日期: 2017-03-21 修回日期: 2017-10-09 网络出版时间: 2017-12-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1006.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401035; 41501031); 江苏省高校自然科学基金项目(14KJB170021)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41401035; 41501031); Natural Science Fund for Colleges and Universities in Jiangsu Province ((14KJB170021)

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

平原河网区水系众多,水系在水资源分配、调蓄洪水及保证生态蓄水等方面具有重要作用<sup>[1-3]</sup>,这些区域又是人类活动较为强烈的地带,城镇化等人类活动是使得水系结构及功能的不断变化,进而引发新的生态环境问题,制约着城镇可持续发展<sup>[4-9]</sup>。因此在平原河网地区水资源与环境相关研究中水系特征变化是关注的重点。

近年来国内外学者就平原区水系变化做了许多有益研究,研究区域主要集中在太湖流域、上海和深圳等高度城镇化区域<sup>[10-18]</sup>,已有研究为平原水系变化分析在研究方法上提供了借鉴,但由于水系变化是在自然因素的基础上叠加人类活动影响的结果,不同区域自然地理环境因素和城镇化历程的不同使得水系结构特及变化规律亦有所差异。

苏北里下河地区原有河流水系是历史自然演变而成,近年来城镇化等人类活动,导致水系格局及功能的变化,水安全及生态环境压力增加<sup>[19-22]</sup>。随着江苏沿海地区开发上升为国家战略,南水北调里下河水源调整及城镇规模的不断扩张,人类活动对区域水系格局的影响进一步扩大,与此同时社会经济健康可持续发展对水系在蓄滞、生态和景观等功能也提出了新的要求。

本文在该区域典型城镇化区开展水系特征变化及影响因素分析研究,有望丰富平原区水系案例研究,同时为该区域未来城镇发展下的水系保护及规划提供依据。

## 1 研究区域与数据

江苏里下河地区地处江淮下游,南水北调东线水源地,亦是江苏省重要的粮棉生产基地和经济发展潜力较大的地区。行政上包括盐城,淮安,扬州,泰州和南通的部分区域。该区域的盐城市素有“百河之城”,选取的典型城镇化区位于该区域盐城市辖区(见图1),东至沈海高速、南至盐淮高速和西、北至盐靖高速,区域面积约413 km<sup>2</sup>,该区域社会经济一直滞后于江苏南部区域,城市化2000年以前多处于初步阶段,起步较晚,之后进入快速发展阶段,2009年后伴随着江苏沿海开发战略的实施,城市化进程进一步加快,未来规划发展重点呈现向南和向东的空间结构特征。区域位于亚热带向暖温带的过渡地带,具有明显的季风气候特征显著,汛期受梅雨降水和台风暴雨降水的影响,汛期降雨量约占年降雨量的70%左右(5月-9月),洪涝灾害频发,农作物以小麦和水稻为主要类型。区域地势较为平坦,高程多在3.0 m以下,河网密集,水系结构亦较为复杂,属典型平原水网区。

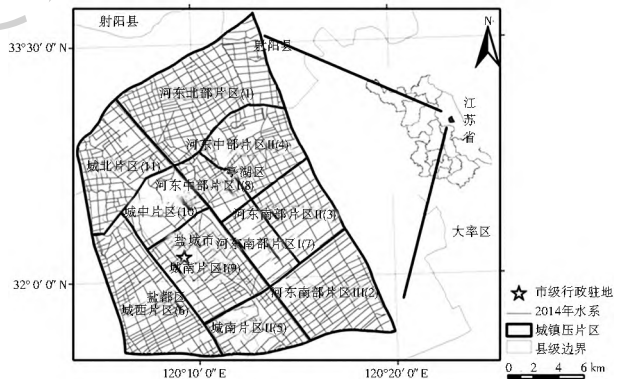


图1 研究区地理位置及分区

Fig. 1 Location of the study area

所使用的数据源主要来源于1980年、2000年和2014年三个时期的1:5万地形图和TM遥感影像数据。水系数据通过地理信息系统软件(ArcGIS)进行地形图数字化获取,并参考水系现状调查进行核对。为分析不同等级水系时空变化特征,在水系数字化和等级划分的基础上,依据河道平均河宽、河道范围和重要性程度等属性,将研究区水系划分为3个等级。其中I级骨干河道多为流域、市级和区域骨干河道,承担着区域的主要引排任务;II级一般河道为连接主干河道的次要河道,主要起I级骨干水系沟通和引排作用;III级河道多为断头河和II级河道河槽,主导对河网调蓄能力起一定作用。

## 2 土地利用变化特征

通过对遥感影像的辐射校正和几何校正等一系列预处理工作,采用决策树分类方法,将研究区土地利用划分为城镇、水田、水体以及旱地和非耕地四种类型,分类后精度评价Kappa系数和总体分类精度均在0.85以上。

1980-2014年间,研究区土地利用类型总体主要以城镇和水田为主,两者占区域总面积的比重达80%以上,在变化趋势上则以城镇用地的增加、水田和水体减少为主要特征。其中城镇用地比重(即城镇化率)由1980年的3.4%增涨到2014年的20.8%,土地利用转移分析结果显示,85%的城镇用地来自于水田的转化,而同时期水田面积减少了近20%(表1)。

近30年来城镇化进程呈现阶段性特征,2000年前城镇用地增加幅度较小,主要围绕老城区呈缓慢扩张趋势,年均增加约1.1 km<sup>2</sup>,近年来受沿海大开发和产业政策等社会经济因素影响,城镇用地扩张明显增快,年均增加3.6 km<sup>2</sup>,城镇扩张呈现明显的空间差异性。城镇化水平重心分析结果显示,受中心城区可利用土地限制等因素的影响,城镇空间

扩张以城南和河东片区发展较为迅速,以 1980 年主城区城镇重心为原点,呈现从中心老城区(如城中片区)以空间蔓延形态向东和向南的发展趋势(见图 2),其中以近郊区(如城南片区 I 和河东中部片区)变化最为剧烈。城镇用地扩张强度呈现空间差异特征,老城区扩张强度相对较弱,原因是城市化进程开展较早,建设用地面积比重大,后期扩张空间受限。

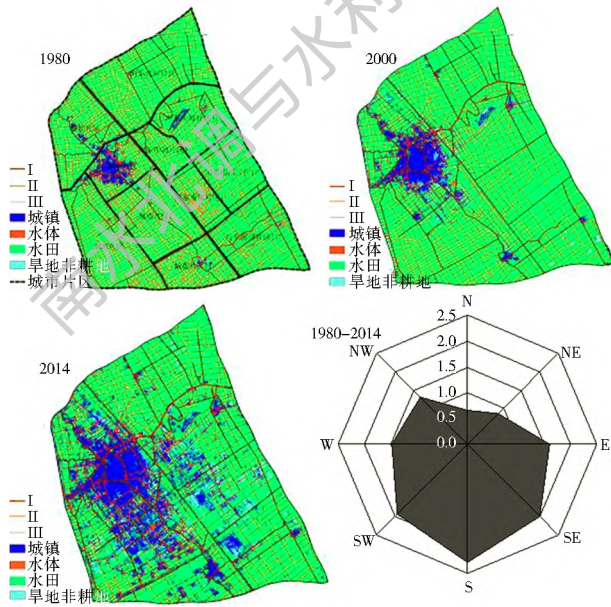


图 2 1980-2014 年城镇用地分布及扩张强度方向  
Fig. 2 Land use and land cover and direction rose of urban expansion intensity during 1980-2014

表 1 土地利用面积及变化特征

Tab. 1 Analysis of land use area and change

类型	面积/km <sup>2</sup>			变化率(%)	
	1980 年	2000 年	2014 年	1980-2000 年	2000-2014 年
城镇	14.1	35.8	86.0	153.9	140.2
水体	11.4	10.9	12.5	-4.7	14.8
水田	383.1	350.0	280.8	-8.6	-19.8
旱地非耕地	4.8	16.7	34.0	246.5	102.8

### 3 水系特征变化分析

水系特征指标是识别水系演变规律的基础。文中在水系特征指标的选取上,参照已有平原区水系研究成果并兼顾研究目的,兼顾数量特征和空间结构特征和功能特征方面构建指标体系,通过各指标的统计以及叠加分析等,分析水系的时空变化特征及其对调蓄能力的影响。

指标体系主要包括河网密度( $D_R$ )和水面率( $P_R$ )、连接度( $r$ )、节点度( $N_d$ )、弯曲度( $S$ )、盒维数( $D_o$ )和骨干面积长度比( $R_{AL}$ )其中河网密度和水面率表征了水系的数量特征,连通和节点度表征了水系的连接特征,盒维数表征了水系的分布密集度,骨干河道面积长度比则表征了水系的面积和长度发育的同步性及骨干河道的排涝能力。各指标内涵及计算方法见表 2 和参考文献[14-18,23]。

表 2 水系指标体系

Tab. 2 Evaluation indexes for river system

指标	计算公式	内涵
河网密度( $D_R$ )	$D_R = L_R / A$	单位流域面积上的河流总长度。式中 $L_R$ 为河流总长度; $A$ 为区域总面积。
水面率( $P_R$ )	$P_R = A_R / A$	多年平均水位条件下河道两岸堤防之间所包括的河道面积与区域总面积之比。式中 $A_R$ 和 $A$ 分别为河道面积和区域总面积。
连接度( $r$ )	$r = L / 3(V - 2)$	网络的连接数与最大可能连接数之比。式中 $L$ 为河网的连接数; $V$ 为网络的节点数。
节点度( $N_d$ )	$N_d = \sum_{i=1}^n N_{d_i} / n$	网络节点的河流连接数。式中 $N_{d_i}$ 为第 $i$ 个节点相关联的边的条数。
弯曲度( $S$ )	$S = L_R / L_a$	河流实际长度与河流两端点直线距离的比值。式中 $L_R$ 为河道实际长度; $L_a$ 为河道起始端点之间的直线距离。
盒维数( $D_o$ )	$D_o = -\lg(N(r)) / \lg r + C$	不同空间尺度与其测量的河网数量的对数关系的直线斜率。式中 $r$ 为多边形边长; $N_r$ 为相对应非空多边形个数。
骨干河道面积长度比( $R_{AL}$ )	$R_{AL} = A_R / L_R$	骨干河道的总面积( $A_R$ )与相对应的河流长度( $L_R$ )的比值。

#### 3.1 水系总体变化特征

水面积大小对于区域防洪排涝和环境生态等都有较大的影响,是区域土地利用和洪涝控制的主要参考指标之一。近 30 年间研究区河网密度和水面率均呈减少趋势(见表 3),其中河网密度由 1980 年的  $5.4 \text{ km}^2 / \text{km}^2$  减少到 2014 年的  $3.1 \text{ km}^2 / \text{km}^2$ , 减少了 43%,水面率由 11.3% 减少至 7.9%, 减少了

近 30%。水系面积和长度变化具有非同步性,其中以河网密度的衰减强度较为明显。

河网水系作为一个生态系统,其数量和结构特征是相互联系的,所以水系数量的变化必然导致其分布密集度和连接状态等结构特征的变化。河网分形用于表征水系在地表的填充程度,基于盒计数法对水系的分形维数进行计算,分析结果表明,1980-

表3 水系特征指标分析

Tab. 3 Analysis of river characteristics indexes

水系指标	年代			变化率(%)
	1980	2000	2014	1980-2014
河网密度/(km·km <sup>-2</sup> )	5.4	3.7	3.1	-42.6
水面率/(km <sup>2</sup> ·km <sup>-2</sup> )	11.3	8.8	7.9	-30.1
连通度	0.57	0.59	0.59	3.5
节点度	3.5	3.2	3.2	-8.6
弯曲度	1.03	1.01	1.01	-1.9
盒维数	1.65	1.51	1.41	-14.5
骨干河道面积长度比/m	48.3	45.1	49.3	2.1

2014年期间,盒维数由1.65减少至2014年1.41,减少了14.5%,节点度由3.5减少至3.2,减少了近9%。已有研究表明河网分形维数(盒维数)与洪涝频率有关<sup>[24]</sup>,区域盒维数的减少将使得洪灾危险性趋于增大。“树枝状”结构形态的山地河流,节点度一般在2~3之间<sup>[25]</sup>,平原区节点度一般都在3~4之间。研究区节点度分析结果表明,近30年来,水系数量减少下河网形态整体上仍具有网状结构特征。

不同等级水系在变化强度和趋势特征上有所不同,河道等级越低受人类活动的影响越强烈。1980-2014年间III级河道总长度由309 km减少到32.5 km,减少近90%,II级河道总长度由1654 km减少到1009 km,减少了近40%,且南北流向水系减少程度要强于东西流向水系。而基于防洪为主要目的的水系规划主要集中在骨干河道,使得I级河道在长度上变化较弱。不同水系特征指标在变化强度有所差异,其中以河网密度、水面率、盒维数和节点度的减少为主要特征。由于研究区河网多以短小

顺直型河道为主,人类活动未对河网进行过明显的截弯取值及形态上的改变,使得河网曲度总体上变化较弱,相对变化均在2%左右;低等级河道的减少是河网结构变化的主要原因,一些低等级连通性较低河流的减少,以及水利连通工程的实施使得河网连接度则呈微弱增强趋势。

### 3.2 水系变化的时空差异特征

依据城镇化水平和区域防洪规划将研究区划分为不同的地理单元,同时依据城镇用地面积比重,参考研究区非农业人口在总人口比重,将研究时段划分为两个时期,即城镇化初期(1980-2000)和城镇化发展期(2000-2014),进而分析不同城镇化水平下河流水系变化的空间差异。结果表明,不同时期II和III级河道的均以持续减少为主要特征,但不同阶段,衰减强度有所不同,由于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,并以III级河道长度的减少最为强烈,减少近90%;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,2000年以来水系减少的强度有所减弱,I级河道总体上则呈现先减少后增加的趋势特征,而这一时期的水系变化主要以II级河道的减少最为明显。

各水系指标物理意义有所不同,其变化强度及时空差异亦有所不同,就整个时期而言,水系变化以数量变化为主,结构上变化较弱,具体表现为以河网密度和水面率的空间差异最为明显,且变化最为剧烈,盒维数、弯曲度和连接度的空间差异相对较弱,且各指标的变化强度主要集中在城市边缘区(见图3)。

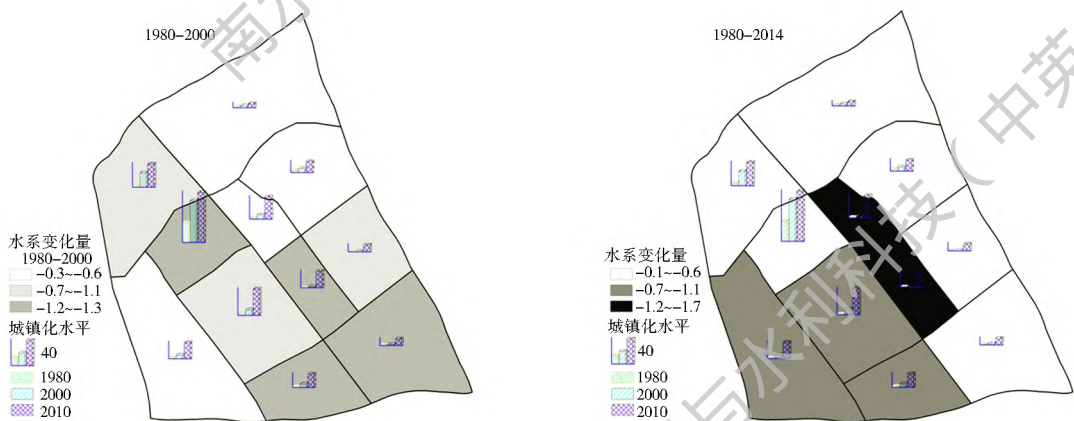


图3 1980-2014 水系变化的时空差异

Fig. 3 Spatial and temporal differences of river system change from 1980 to 2014

### 3.3 水系变化对其调蓄功能影响

受地形和气候条件影响,洪涝灾害是研究区主要的灾害类型,为此在以上分析的基础上,进一步探讨了河网水系变化对该区域调蓄能力的影响。在水

系变化对河网洪涝调蓄能力分析中,选取骨干河道面积长度比和可调蓄容量指标对水系变化后的调蓄能力影响进行分析。面积长度比反应了水系面积和长度变化的同步性及其行洪排涝能力,可调蓄

量表征即河网在常水位( $h$ )下可继续容纳的水体量,在计算上将河道断面概化为梯形(见图 4),在给定河长( $L_R$ )、河宽( $W$ )、河底高( $D_g$ )、边坡系数( $k$ )和最高水位( $h_{max}$ ),调蓄能力( $C_h$ )可计算如下:

$$C_h = A_h \times L = \frac{(W - 2K(h_{max} - h)) + (W - 2K(h_{max} - D_g))}{2} \times (h - D_g) \times L_R$$

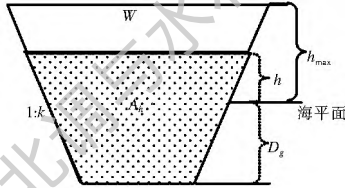


图 4 河道断面概化示意图

Fig. 4 River section diagram

分析结果显示 1980–2014 年间,骨干河网面积长度比整体上呈现先增加后减少的趋势特征,由 1980 年 48.3 m 变化到 2000 年的 45.1 m 和 2014 年的 49.3 m。骨干河道变化主要与区域水利规划和防洪需求有关,尤其是城镇化过程中,由于水系面积不断减少,区域调蓄能力不断减弱,而城镇规模的扩大,防洪等级需求又不断提高,因防洪需要出现疏浚、新挖河道等针对骨干河道整治工程和连通工程,改善了区域的总体行洪排涝能力。

水系数量的减少导致河网调蓄能力减少了近 33%,由 1980 年的 0.68 亿  $m^3$  减少至 2000 年的 0.53 亿  $m^3$  和 2014 年的 0.45 亿  $m^3$ ,河网调蓄能力的减弱使得相同的降雨和入流水量下,河网水位呈增大趋势,尤其在流域洪水排涝不畅情况下,区域防洪压力增加。河网调蓄能力与水面率高度相关,不同等级河道调蓄能力变化强度有所不同,其中以低等级河道减少特征最为显著。由于大量低等级河道(0 和 0 级河道)在自然淤积和人为填埋影响下消失,其调蓄容量由 1990 年的 0.55 亿  $m^3$  减少到 2014 年的 0.30 亿  $m^3$ ,减少了 45% 成为导致河网总体调蓄能力降低的主要因素。

#### 4 水系变化的城镇化影响分析

研究区河流水系的总体变化特征,与实际情况相符,但不同阶段的驱动机制亦有所差异。2000 年以前人类活动主要以农业活动为主,荡地改田和水利规划等一系列措施,形成了以灌溉和排涝为主要目的骨干河网,低等级河道调蓄能力弱化,使得其保护力度较弱,成为影响水系变化的主要因素。

2000 年以来,水系的变化一方面与城镇扩张过程中河道被占用有关外,同时还受河道相对重要性

变化的影响,该时期城镇面积的扩张及建筑废弃物等抛弃入河是导致水系减少的主因,并以 II 级水系功能的弱化及消失为主要类型,总体而言,城市化快速发展对水系格局变化表现在两个方面,一方面是末端河流被填埋,流域调蓄能力的减弱,防洪需求的增强而采取的一系列域输水河道疏浚工程,不同城镇化阶段及不同等级水系特征变化随有一定差异,但城镇化过程对河网影响总体上是呈负向的。

以不同分区水系各指标变化量和城镇化率变化量为数据基础,对水系变化的城镇化影响进行相关性分析(表 4),分析结果显示城镇化与河网密度、水面率和盒维数均存在着显著负相关性,对表征该区域城镇化对水系影响具有重要意义。受河网面积长度变化的非同步性,城镇化与面积长度比指标的相关性较弱。

表 4 城镇化与水系特征变化的相关性

Tab. 4 Correlation between urbanization and change in river system characteristics

河网密度	水面率	连接度	盒维数	弯曲度	节点度	面积长度比
-0.74*	-0.71*	0.11	-0.66	0.03	-0.21	0.19

注:\* 表示在 0.05 水平上显著相关。

不同城镇化水平及变化强度下的水系变化强度的对比分析结果表明,2000 年后河流水系变化与城市化的关联度明显增强,但城镇化对水系变化影响呈现非线性特征,表现为城镇化率低于 30% 时,水系变化程度与城镇化线性关系显著(见图 5,分区代码见图 1),水系变化的影响最为强烈,水系保护尤为严峻。随着城镇化的进一步加快,水系的变化强度并未呈现线性增强趋势。研究区水系数量和结构上的总体变化特征与太湖流域、上海和深圳等高度城市化地区的相关研究成果基本一致<sup>[14-22]</sup>,反映了人类活动影响下平原区河网数量与结构特征衰退的趋势规律,据此预测当城市进入快速乃至高速发展阶段,河网水系将呈持续减少趋势,但变化强度会有所减弱。

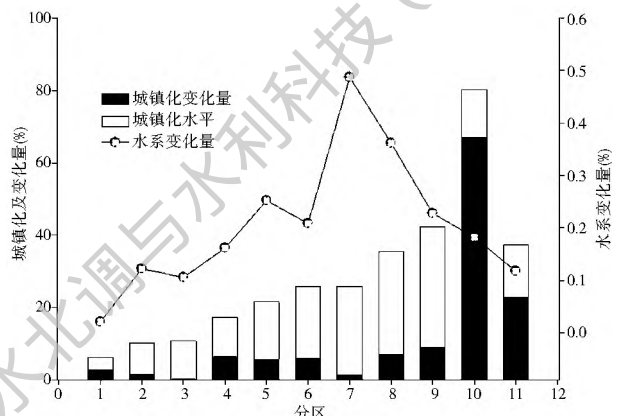


图 5 不同片区城镇变化与水系变化强度

Fig. 5 Intensity of river system change and urbanization in different sub-regions

## 5 结论

在遥感影像解译、水系数字化、分级和特征指标构建的基础上,对江苏里下河平原典型城镇化区水系特征进行分析,主要得出以下结论。

(1)近 30 年研究区域城镇化率由 3.4% 增涨到 20.8%,呈现向南和向东发展特征,反映了不同时期城市区域重点开发政策的演变。河网密度和水面率分别减少 43% 和 30%,盒维数下降使得河流水系结构的复杂性减弱,但总体仍呈网状结构特征。基于防洪需求的水系规划使得骨干河道排涝能力有所增强,但低等级河道功能的弱化与消失,总水面减少导致河网调蓄能力仍呈减弱趋势。

(2)城镇化和农业活动是影响水系结构和功能的主要因素,并呈现区域性和阶段性特征。2000 年以后河流水系变化受城镇化的影响增强,水系变化的空间差异性增强,且以城南片区和河东中部等近郊区城减弱最为显著。城镇化对水系变化影响呈现非线性特征。河网密度、城镇化与河网密度、水面率和盒维数均存在着显著负相关性,受河网面积长度变化的非同步性,城镇化与面积长度比指标的相关性较弱。

在未来城镇建设和水系规划中,应尽量保留现有河道水系,同时注重构建综合水系调蓄功能、环境功能和生态功能的综合开发利用模式上等方面研究。

### 参考文献(References):

- [1] 李丽娟,姜德娟,李九一,等.土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-224. (LI L J, JIANG D J, LI J Y, et al. Advances in hydrological response to land use/land cover[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 211-224. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2007. 02. 008.
- [2] 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. progress in geography, 2012, 31(1): 26-31. (in Chinese)) DOI: 10. 11820/dlxjz. 2012. 01. 004.
- [3] 赵军,单福征,杨凯,等.平原河网地区河流曲度及城市化响应[J].水科学进展,2011,22(5):631-637. (ZHAO J, SHAN F Z, YANG K, et al. River sinuosity in tidal plain and its response to rapid urbanization[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 631-637. (in Chinese)) DOI: 10. 13099. P. 20110911. 1135. 018.
- [4] 左其亭,臧超,马军霞.河湖水系连通与经济社会发展协调度计算方法及应用[J].南水北调与水利科技,2014(3):116-120. (ZUO Q T, ZANG C, MA J X. Calculation method and its ap

- plication of coordination degree between the inter connected river system network and Socio Economic development[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(3): 116-120. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbldqk. 2014. 03. 026.
- [5] 董哲仁,王宏涛,赵进勇,等.恢复河湖水系连通性生态调查与规划方法[J].水利水电技术,2013,44(11):8-13. (DONG Z R, WANG H T, ZHAO J Y, et al. Eco survey and planning method for rehabilitation of connectivity of river-lake water system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(11): 8-13. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2013. 11. 003.
- [6] 李原园,黄火键,李宗礼,等.河湖水系连通实践经验与发展趋势[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):81-85. (LI Y Y, HUANG H J, LI Z L, et al. Practical experience and development trend of the interconnected river system network [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 81-85. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbldqk. 2014. 04. 018.
- [7] 袁雯,杨凯,唐敏,等.平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J].地理研究,2005,24(5):717-724. (YUAN W, YANG K, TANG M, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network [J]. Geographical Research, 2005, 24(5): 717-724. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0585. 2005. 05. 008.
- [8] 赵军凯,蒋陈娟,祝明霞,等.河湖关系与河湖水系连通研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(6):1212-1217. (ZHAO J K, JIANG C J, ZHU M X, et al. Study on river-lake relation and interconnected river system network [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1212-1217. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbldqk. 2015. 06. 040.
- [9] 邓晓军,许有鹏,韩飞龙,等.城市化背景下嘉兴市河流水系的时空变化[J].地理学报,2016(1):75-85. (DENG X J, XU Y P, HAN L F, et al. Spatial-temporal changes of river systems in Jiaxing under the background of urbanization [J]. Acta Geographica Sinica, 2016(1): 75-85. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlx201601006.
- [10] 孟飞,刘敏,吴健平,等.高强度人类活动下河网水系时空变化分析-以浦东新区为例[J].资源科学,2005,27(6):156-161. (MENG F, LIU M, WU J P, et al. Dynamic Changes of River Network under intensive human activities: a case of Pudong new area, Shanghai Municipality [J]. Resources Science, 2005, 27(6): 156-161. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1007-7588. 2005. 06. 025.
- [11] 王跃峰,许有鹏,张倩玉,等.太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响[J].地理学报,2016,71(3):449-458. (WANG Y F, XU Y P, ZHANG Q Y. Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(3): 449-458. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlx201603008.
- [12] 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. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2007.01.018.
- [13] 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. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2008.05.024.
- [14] 黄奕龙, 王仰麟, 刘珍环, 等. 快速城市化地区水系结构变化特征—以深圳市为例[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1212-1220. (HUANG Y L, WANG Y L, LIU Z H, et al. Stream construction characteristics in rapid urbanization area: Shenzhen city as a case[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1212-1220. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2007.03.020.
- [15] 周峰, 吕慧华, 许有鹏. 城镇化平原河网区下垫面特征变化及洪涝影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2094-2099. (ZHOU F, LYU H H, XU Y P. Changes of underlying surface and the influences on storage capacity and flood in the plain river network area[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(12): 2094-2099. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201512013.
- [16] 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. (CHENG J, YANG K, ZHAO J, et al. Variation of river system in center district of Shanghai and its impact factors during the last one hundred years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(1): 85-91. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2007.01.014.
- [17] 徐慧, 雷一帆, 范颖骅, 等. 太湖河湖水系连通需求评价初探[J]. 湖泊科学, 2013, 25(3): 324-329. (XU H, LEI Y F, FAN Y Y, et al. Assessment of the interconnection demand of the river lake system in the Lake Taihu basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(3): 324-329. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2013.0302.
- [18] CUI B, WANG C, TAO W, et al. River channel network design for drought and flood control: a case study of Xiaqinghe River basin, Jinan city, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(11): 3675-3686. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.07.010.
- [19] 杭庆丰, 王书亮, 查红, 等. 里下河地区2016年梅雨期涝水外排探析[J]. 江苏水利, 2016(11): 46-49. (HANG Q F, WANG S L, ZHA H, et al. Exploration and analysis of flood water drainage during Meiyu period in 2016 around Lixiahe region[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2016(11): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7839.2016.11.012.
- [20] 甘小荣. 江苏里下河腹部地区洪涝灾害成因与防治对策[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 85-86. (GAN X R. Cause of flood disaster in middle Lixiahe area in Jiangsu province and countermeasures[J]. *Yangtze River*, 2007, 38(6): 85-86. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2007.06.033.
- [21] 张永勇, 李宗礼, 刘晓洁. 近千年淮河流域河湖水系连通演变特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 77-83. (ZHANG Y Y, LI Z L, LIU X J. Evolution of interconnected river and lake networks in the Huai River Basin over the last millennium[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(4): 77-83. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2016.04.013.
- [22] 冯旭松, 钱志平. 南水北调东线江苏里下河地区水源调整方案研究及有关问题的思考[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(4): 46-49. (FENG X S, QIAN Z P. Research on Water Source Adjustment of Jiangsu Lixiahe District in Eastern Route of South to North Water Diversion Project[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2008, 6(4): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2008.04.017.
- [23] 凌红波, 徐海量, 乔木, 等. 1958-2006年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1129-1136. (LING H B, XU H L, QIAO M, et al. Temporal-spatial evolution of stream construction and its driving forces in Manas river basin during 1958-2006. *Progress In Geography*, 2010, 29(9): 1129-1136. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2010.09.016.
- [24] ZHANG S, GUO Y, WANG Z. Correlation between flood frequency and geomorphologic complexity of rivers network—a case study of Hangzhou China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 113-118. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.060.
- [25] 苏伟忠, 杨桂山. 太湖流域南河水系无尺度结构[J]. 湖泊科学, 2008, 20(4): 514-519. (SU W Z, YANG G S. Scale free structure of the Nanhe drainage of lake Taihu watershed[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(4): 514-519. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2008.04.016.