

# 苏北里下河典型区河网水系演变特征研究<sup>1</sup>

吕慧华<sup>1</sup>, 周峰<sup>1</sup>, 李娜<sup>1</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】**: 在自然地理气候变化和人类活动胁迫的双重作用下, 平原河网地区水系格局发生了很大的变化。以江淮下游里下河典型区——盐都区为例, 基于 1970s、1980s 和 2010s 年的 3 期水系数据, 利用 GIS 和遥感解译等技术, 选取河网水系数量、结构和连通指标, 对河网水系时空演变特征及其影响因素进行分析研究。结果表明: (1) 研究区河网密度和河网水面率均呈不断减少趋势, 两者分别下降 21.3%和 10.2%。研究区河流曲度较小, 河网连通性较好, 河网曲度和连通度总体上变化较弱。(2) 研究区河网水系变化存在时空差异性。河网水系在缓慢城市化时期(1970s~1980s)的衰减率高于快速城市化时期(1980s~2010s), 特别在城镇化发展缓慢区域表现显著。城镇化发展快速区域, 其河网水系持续减少且变化剧烈。(3) 研究区河道变化存在着等级差异性。城镇化等人类活动对河网水系的影响, 呈现出先低等级(IV级)河道、后高等级(I~III级)河道的特征规律。其中, 低等级河道数量持续减少且变化强度剧烈, 高等级河道数量变化不大且其面积和长度均有所增加。

**【关键词】**: 平原河网; 水系变化; 演变特征; 里下河地区

**【中图分类号】**: TV213

**【文献标识码】**: A

**【文章编号】**: 1004-8227(2018)02-0380-06

**【DOI】**: 10.11870/cjlyzyyhj201802017

水系结构是一个区域或者流域水系的连接形式和空间分布特征, 是分析水系形态、功能和水文水力特性的重要基础<sup>[1]</sup>。河流的水文水力特征是影响污染物扩散、稀释和自净能力的重要因素, 决定着水环境容量的大小<sup>[2~4]</sup>。有关河网结构的研究, 影响较大的是美国河流地貌学家 Horton<sup>[5]</sup>提出的河流分级定律, 相关研究主要集中于自然状态的流域, 并且以树枝状水系较为多见。平原区河网水系特征通常是由自然因素与人类活动共同作用的结果, 具有鲜明的地域特征。国内随着大规模围垦和城镇化对河湖水系的影响不断加剧, 相关水系结构研究逐渐转向东部河网密集、快速城市化的平原河网地区, 如长江三角洲的上海市、太湖流域和珠江三角洲地区<sup>[6~10]</sup>。研究认为城市化是改变感潮河网地区水系结构的重要因素, 高度城市化地区河网水系结构趋于简单, 非主干河道减少, 高强度人类活动导致区域河网水系分枝结构与自然规律完全相反。

苏北里下河地区地处江淮下游, 属典型的平原河网区, 其地形特殊, 腹部区呈“锅底洼”, 湖荡沼泽连片, 水流不畅, 为典型的洪灾受害区。随着城镇化的发展, 里下河地区河网水系发生很大变化, 湖荡面积大幅度萎缩, 水系结构趋于简单, 河道淤积严重。作为江苏省主要的粮食、油料和商品棉生产基地和南水北调东线的主要受水区, 水资源是里下河地区实现沿海大开发和南水北调东线工程可持续发展的重要保障。由于特殊的地形特征, 长期以来里下河地区水资源的规划和调配问题受到广泛

<sup>1</sup>[收稿日期]: 2017-04-20; [修回日期]: 2017-06-26

[基金项目]: 国家自然科学基金项目(41501031, 41401035, 41701030, 41371046); 江苏省高校自然科学基金项目(14KJB170021)

[作者简介]: 吕慧华(1982~), 女, 博士, 副教授, 主要从事水资源与水环境研究. E-mail: xuyoup@163.com

研究<sup>[1]</sup>，但从河网水系结构及连通角度探讨其水资源生态环境问题比较为少见。

盐都区位于里下河腹部区，研究区内既有里下河地区最大的湖泊一大纵湖，又有里下河地区四大入海通道之一的新洋港，河网水系复杂；另外，盐都区既是盐城市区重要的水源地，又是盐城城区重要组成部分，生态保护和城市发展并存，区域地理位置非常特殊和具有典型性。本文以盐都区为典型区，研究里下河平原河网区水系结构演变及驱动机制，可以为区域水资源环境保护提供合理的河湖连通与水循环途径。

## 1、研究区概况及数据来源

里下河地区位于江苏省中北部，位于 119° 08' ~120° 56' E, 32° 12' ~34° 10' N 之间，西至里运河、东至海堤，北至苏北灌溉总渠，南至新通扬运河，辖南通、泰州、扬州、盐城、淮安五市。根据地形和排水方式不同，里下河地区又以通榆河为界，分为腹部区和沿海垦区。腹部区总面积 11879km<sup>2</sup>，其中高程 3m 以下占全区总面积的 80.2%。沿海垦区总面积 9618km<sup>2</sup>，其中地面高程 3m 以下占全区 55.7%。

盐都区隶属于盐城市市辖区，总面积 1044.6km<sup>2</sup>，具有明显的季风气候特点，年均气温 15.41，年平均降雨量 1066mm。区内地势平坦，地面高程一般在 1.5~2.2m 之间。区内河网密布，素有水乡之称。境内大、中、小河道纵横交错，引、排、调、蓄能力较好。客水主要从西南入境，向东北流出。境内主要水系有大纵湖、蟒蛇河、朱沥沟、东涡河、冈沟河等。研究区区位如图 1 所示。

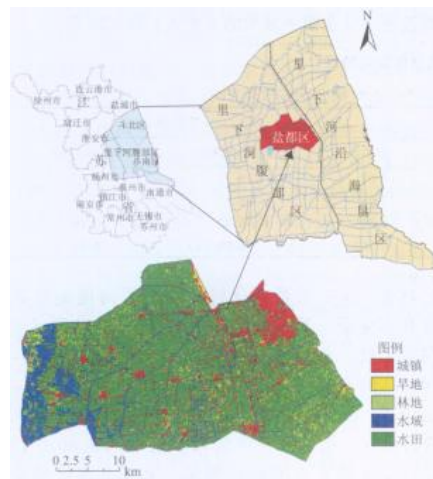


图 1 研究区区位图

以 1970s (1969~1971 年) 和 1980s (1980~1982 年) 的 1: 50000 纸质地形图、2010s (2009 年制图，基于 2010 年遥感影像进行校核) 的 1: 50000 数字水系图作为数据源，参照江苏省 1: 250000 水系图、江苏省水利图集、盐都区水利普查数据及 Google 地图等其它相关资料，运用 ArcGIS 软件对扫描后的 1: 50000 纸质地形图进行配准、分割、剪裁、数字化以及拓扑检查，得到研究区 1970s、1980s 和 2010s 年的 3 期水系图。

本文运用 ERDAS 软件，对 2010 年的 TM 遥感影像进行分类与解译，将草地、林地、园地、滩涂、旱地、城镇、水田、水体等不同下垫面类型合并归类为城镇用地、旱地、林地、水域、水田五个类别，最后得到 2010 年的土地利用类型图 (图 1)，可进一步用于研究区河网水系变化的影响因素分析。

本文依据河道自然、管理和功能属性，将研究区河网水系划分为 4 个等级（I 级、II 级、III 级和 IV 级）。其中，I 级河道主要为市级河道和区域行洪排涝的骨干河道；II 级河道主要为连接骨干河道的次要河道；III 级河道主要为实际河宽为 10~20m 天然河流和人工渠道；IV 级河道一般为实际河宽为 0~10m 人工渠道。

本文分别从数量特征、结构特征以及连通特征，选取河网密度、水面率、河网曲度、实际结合度 7 共 4 个指标进行计算，分析盐都区不同时段（1970s~1980s、1980s~2010s）河网水系时空演变特征。文中曲度和连通度指数的计算，是基于 I 级和 II 级河道进行开展研究，其余指标均是基于所有等级河道进行计算，具体计算方法如表 1 所示。

表 1 平原河网水系指数体系

类别	指标	计算方法
水系数量特征指标	河网密度 ( $R_d$ )	河网密度为单位区域面积上的河流总长度， $R_d = L_R/A$ ，其中， $L_R$ 为研究区内河流总长度， $A$ 为区域总面积；河网密度 $R_d$ ，其值大小说明水系发育与分布疏密的程度
	水面率 ( $W_p$ )	水面率为单位区域面积上的水域面积， $W_p = (A_w/A) * 100\%$ ， $A_w$ 为区域内河流总面积， $A$ 为区域总面积
水系结构指标	河网曲度 ( $S$ )	河网曲度为河流（链）长度与起始端点直线长度的比值， $S = L_{si}/L_{ai}$ ，其中， $L_{si}$ 为河道实际长度， $L_{ai}$ 为河道起始端点之间的直线距离； $S$ 值处于 1~1.3，属于顺直性河流； $S$ 值处于 1.3~1.5，属于低曲度河流； $S$ 值处于 1.5~2.0，属于中曲度河流； $S$ 值大于 2.0，属于高曲度河流 <sup>[12]</sup>
水系连通性指标	实际结合度 ( $\gamma$ )	实际结合度为连接网络中现有节点的环路存在程度， $\gamma = L/L_{max} = L/3(V-2)$ ，其中， $L$ 表示河链数， $V$ 表示水系网络节点数； $\gamma$ 指数取值范围为 0~1 之间，0 表示节点之间互不连接，1 表示每个节点与其它节点相连接，指数值越大表示河网的连接度越好 <sup>[13]</sup>

## 2、河网水系时空演变特征

### 2.1 河网水系总体变化特征

对研究区的 3 期水系图进行叠加分析得出，1970s~2010s，研究区河网密度和河网水面率均呈不断减少趋势。河网密度由 1970s 的 5.86km/km<sup>2</sup> 减少到 2010s 年的 4.61km/km<sup>2</sup>，减少了近 22%；与此同时，河网水面率也由 1970s 的 4.43% 减少到 2010s 年的 3.98%，减少了约 10%。上述研究区水系数量变化特征与长三角平原河网地区总体水系变化特征基本一致<sup>[14]</sup>。

研究区河流曲度较小， $S$  值均小于 1.3，为顺直型河流。河网曲度总体上变化较弱，1970s~1980s，河网曲度降低 4.89%；1980s~2010s，河网曲度几乎不变。其主要因为盐都区河网多以短小顺直型河道为主，80 年代以前，盐都区进行了大规模的农田水利和联圩并圩建设，弯曲低等级河道经过疏浚、清淤和截弯取直成为骨干河网，河网曲度有所降低；80 年代以后，人类活动对水系中的大多数河流没有进行过明显的截弯取直或形态上的改变。

本文采用图论方法，对河网水系的连通性进行测度分析。根据表 2 所知，盐都区河网水系实际结合度指标  $\gamma$  介于 0.5~0.6 之间，水系连通度较好且总体变化较小。1970s~1980s 期间，研究区河网连通性略有增加；1980s~2010s 期间，河网连通性略有下降。盐都区是一个以农业生产为主的地区，河网水系连通性本身较好。

里下河地区河网水系变迁是自然演化及人类活动干扰共同作用的结果<sup>[11, 15]</sup>。一是洪涝灾害，里下河地区洪涝灾害严重，在自然影响因素方面，暴雨降水是成灾的主要原因，“锅底洼”地形是成灾的地貌大背景，复杂的平原河网水系格局则加剧了洪

涝灾害的频度和程度；二是泥沙堆积，里下河平原河网区位于江淮下游，地势低洼，经常受到洪涝灾害的侵袭，洪水所携大量泥沙进入河网水系，逐渐淤积，是导致区域河网水系消失的主要自然因素；三是城镇化，以城镇化发展为主要标志的人类活动，包括城镇建设用地扩张和水利工程建设等，是造成该地区水系结构、河湖连通以及水面率减少的主要人为驱动因素。

## 2.2 河网水系时空变化特征

平原河网地区是人类活动较为强烈的地带，城镇建设和过度围湖造田导致河道堵塞、湖泊萎缩、河网连通性降低，加剧了河流湖泊等水体富营养化程度。本文研究发现，在不同的城市化阶段，研究区河网水系变化程度有所差异。河网密度和水面率在缓慢城市化时期（1970s~1980s）的衰减率为 16.72%和 8.35%，分别高于快速城市化时期（1980s~2010s）的 5.53%和 2.45%。这一水系变化特征在平原河网地区表现并不完全一致。邓晓军等<sup>[16]</sup>研究发现嘉兴市河网密度、水面率在缓慢城市化时期（1960s~1980s）的衰减率高于快速城市化时期（1980s~2010s），而王柳艳等<sup>[17]</sup>对太湖流域的武锡澄虞区进行研究，结果发现该区域水系结构在 80 年代以后变化则更为迅速和明显。出现上述区域差异，主要与各个区域的城镇化进程及其自然社会经济发展状况有关。

为了进一步弄清盐都区河网水系时空变化特征，本文以盐都区 I 级骨干河网为边界，将盐都区分为 6 个水利分区（1~6），如图 2 所示。本文采用各分区城镇面积与总面积的比值来表征各个分区的城镇化发展水平。其中，分区 1~4 的城镇化发展水平分别为 7.24%、7.93%、6.96%和 9.17%，该部分区域主要为农村和乡镇地区，城镇化发展速度比较缓慢；分区 5~6 的城镇化发展水平分别为 14.82%和 18.25%，该部分区域主要为盐城市区及郊区，城镇化发展速度相对较快。

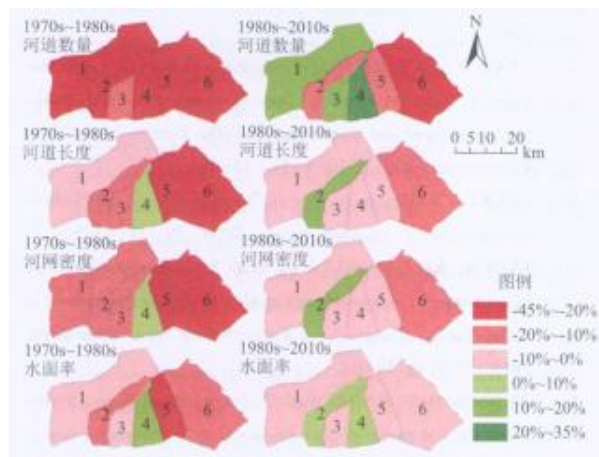


图 2 河网水系空间变化分布图

由图 2 可知，研究区河网水系在时间上和空间上的变化并不一致。1970s~1980s，各个分区河道数量剧烈减少，减少率为 17.12%~40.03%；除分区 4 以外，其余分区的河道长度、河网密度和水面率也持续减少，且分区 5~6 变化最为剧烈，其河网密度减少率分别达到 30.15%和 23.17%；1980s~2010s，分区 5~6 的各项水系数量指标仍持续剧烈减少，其河道数量减少率分别达到 18.43%和 44.25%，而其它分区则变化幅度不大，河网密度减少率均控制在 5%以内。本文进一步将河网水系变化图与土地利用类型图进行叠加分析发现：城镇化发展速度较快的区域（分区 5~6），对应的水系减少越剧烈，尤其是城市边缘区的河流大量消失；而城镇化发展速度较慢的区域（分区 1~4），在 80 年代以前，其水系数量指标减少比较剧烈，而在 80 年代以后，则衰减速度变缓甚至部分区域水系数量指标有所增加。

上述变化特征与里下河地区实际情况基本相符。1950s~1980s，一方面，由于特殊的地形特征，里下河地区开展了大规模的水利改造，主要目的是挡潮、防洪，兼顾除涝和发展灌溉，从而形成了里下河骨干河网和圩区。与此同时，水利工程建设使

得许多低等级河道被填埋，河道数量、长度和面积大幅度减少；另一方面，里下河地区开始以粮棉种植为主的围湖造田运动，湖荡周边形成了部分农业圩区，湖荡面积大幅度萎缩，从而导致河网密度和水面率不断下降；1980s~2000s，一方面，里下河地区又开展以大规模养殖为主的围湖运动，围湖的规模由零星分散逐渐变为大面积集中，湖面被划成众多方块，湖泊自由水域面积不断缩小。1991年大水以后，即使政府出台文件规定湖荡不准再行圈围，但由于种种原因，湖荡围垦仍不断升级，湖荡自由水面锐减。另一方面，由于城市化的快速发展，如分区 5~6，城镇建设侵占河道，低等级河流遭到大量填埋，河网水系数量仍然不断下降。但 2000s 年以后，盐都区作为盐城市区重要水源地，其生态环境保护得到各级政府的重视，特别是分区 1~4 范围内的大纵湖、蟒蛇河和盐龙湖等部分水域及其周边陆域划分为水源地保护区，保护区内河网水系和土地利用受到严格保护和控制，清障疏浚、退田还湖等一系列措施在一定程度上有效遏制了河湖水面锐减的趋势。

### 2.3 河网水系等级变化特征

从图 3 中可以明显看出，研究区河道水系变化存在着等级差异，低等级（IV 级）河道数量持续减少且变化强度剧烈，高等级（I~III 级）河道数量变化不大且其面积和长度均有所增加。城镇化等人类活动对水系的影响，呈现出先低等级河道、后高等级河道的特征规律。1970s~1980s，研究区 I 级河道的数量不变，但其面积与长度分别增加了 13%和 11.7%；II 级河道数量减少 11 条，但面积与长度分别增加 7.4%和 7.2%；III 级河道数量减少 29 条，长度和面积分别增加 9.6%和 9.2%；IV 级河道数量减少 1940 条，且长度和面积分别减少 27.2%和 27.3%。1980s~2010s，研究区 I 级河道的数量不变，但是面积与长度分别增加了 13.5%和 13.2%；II 级河道数量减少 4 条，但面积与长度分别增加 4.6%和 4.8%；III 级河道数量减少 7 条，长度和面积则分别增加 7.2%和 7%；IV 级河道数量减少 332 条，且长度和面积分别减少 7.4%和 7.3%。

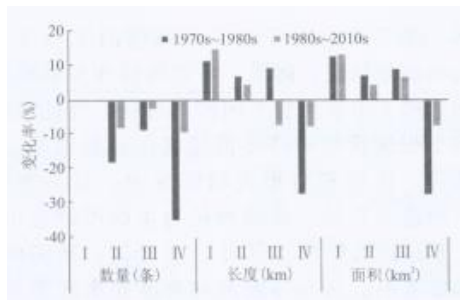


图 3 河网水系数量时间变化特图

1950s~1980s，里下河地区深入开展以梯级河网化为中心的农田水利和大规模的联圩并圩建设，形成了里下河“六横六纵”骨干河网。1980s~2010s 期间，一方面由于大规模的城镇化建设以及对骨干河道的重视，河道疏浚、清淤和截弯取直等水利改造，使得里下河地区河网水系由纵横交错的“网”状逐渐变成了由骨干河道组成的“口”状；另一方面由于城镇建设用地的大规模扩张，低等级水系被截断、缩窄或填埋；从而导致水系结构趋于简单，众多低等级河网消失。

## 3、结论

(1) 里下河地区河网水系变迁是自然演化及人类活动干扰共同作用的结果。研究区河网密度和河网水面率均呈不断减少趋势，两者分别下降 21.3%和 10.2%。盐都区河网多以短小顺直型河道为主，河流曲度较小，河网连通性较好，河网曲度和连通度总体上变化较弱。

(2) 研究区河网水系变化存在时空差异。在不同的城市化阶段，河网水系变化程度有所不同。河网水系在缓慢城市化时期（1970s~1980s）的衰减率高于快速城市化时期（1980s~2010s）。城镇化发展速度较快的区域（分区 5~6），河网水系持续

---

减少且变化剧烈；而城镇化发展速度较慢的区域（分区 1~4）时空差异比较明显：在缓慢城市化时期，其水系数量指标减少比较剧烈，而在快速城市化时期，则水系衰减速度变缓甚至部分区域有所增加。

（3）研究区河道变化存在着等级差异性。城镇化等人类活动对水系的影响，呈现出先低等级（IV 级）河道、后高等级（I~III 级）河道的特征规律。其中，低等级河道数量持续减少且变化强度剧烈，高等级河道数量变化不大且其面积和长度均有所增加。

**[参考文献]:**

- [1]袁 雯, 杨 凯, 徐启新. 城市化对上海河网结构和功能的发育影响[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 4 (2): 133-138.
- [2]SEAR D, NEWSON M. Environmental change in river channels : a neglected element. Towards geomorphological typologies , standards and monitoring[J]. The Science of the Total Environment, 2003, 310 (1-3) : 17-23.
- [3]HOOKE J M. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region[J]. Geomorphology, 2006, 79: 311-335.
- [4]LV H H, XU Y P, HAN L F , et al. Scale-dependence effects of landscape on seasonal water quality in Xitiaoxi catchment of Taihu Basin , China[J]. Water Science and Technology, 2015, 71 (1) : 59-66.
- [5]NEWSON M D, ANDREW R G. Large natural rivers , hydromorphological quality and river restoration : a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31 (13) : 1606-1624.
- [6]周洪建, 史培军, 王静爱, 等. 近 30 年来深圳河网变化及其生态效应分析[J]. 地理学报, 2008, (09) : 969-980.
- [7]杨明楠, 许有鹏, 邓晓军, 等. 平原河网地区城市中心区河流水系变化特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34 (5) : 263-266.
- [8]沈 洁, 赵 军, 尚钊仪. 基于空间自回归模型的景观格局变化对河网水系连通性影响分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015, 3: 124-135.
- [9]孟 飞, 刘敏. 高强度人类活动下河网水系时空变化驱动机制分析——以浦东新区为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2006, 42 (4) : 16-20.
- [10]李宗礼, 刘晓洁, 田英, 等. 南方河网地区河湖水系连通的实践与思考[J]. 资源科学, 2011, 33 (12) : 2221-2225.
- [11]叶正伟, 许有鹏, 徐金涛. 江苏里下河地区洪涝灾害演变趋势与成灾机理分析[J]. 地理科学, 2009, 29 (6) : 880-885.
- [12]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) : 37-43.
- [13]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. XUH,
- [14]韩龙飞, 许有鹏, 杨 柳, 等. 近 50 年长三角地区水系时空变化及其驱动机制[J]. 地理学报, 2015, 70 (5) : 819-827.

---

[15]潘光波, 许有鹏, 丁瑾佳, 等. 江淮下游平原地区降水时空变化: 以江苏里下河腹部区为例[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2010, 46(6): 671-680.

[16]邓晓军, 许有鹏, 韩龙飞, 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, 71(1): 75-85.

[17]王柳艳, 许有鹏, 余铭婧. 城镇化对太湖平原河网影响分析——以太湖流域武澄锡虞区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 21(2): 151-155.