

# 近50年杭—嘉—湖平原水系时空变化

徐光来<sup>1,2</sup>, 许有鹏<sup>2</sup>, 王柳艳<sup>2</sup>

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241000;

2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

**摘要:** 基于1960s、1980s和2000s地形图水系数据, 采用河网密度、水面率、河网发育系数、干流面积长度比和盒维数等指标, 对杭嘉湖地区近50年水系空间分布和时间演化进行了研究。结果表明: (1) 杭嘉湖地区1960s-2000s期间水系长度和面积呈衰减趋势。近50年河流长度减少了11023.33 km, 衰减了38.67%, 水面积减小了151.58 km<sup>2</sup>, 衰减了18.83%, 且这种趋势在加剧; (2) 支流发育系数呈下降的趋势, 河网随着城市化的发展逐渐主干化。1960s二级支流发育系数为1.41, 至1980s下降到1.35, 下降了3.9%; 1980s-2000s期间急剧下降至0.15, 下降了88.6%; (3) 水系变化的空间差异明显, 河网密集的南部区水系衰减最为剧烈; (4) 在不同下垫面条件下水系变化有各自特点。城市区水面率较小, 约4.9%~9.4%, 1960s以来水面率、河网密度呈减小的趋势, 伴随城市化过程出现较重要的城市防洪疏浚、新挖河道工程。河网区河网密集, 约2.1~5.3 km/km<sup>2</sup>, 支流下降明显, 干流有增加趋势以致河网主干化。典型湖区水面率较大, 约17.8%~19.7%, 水系格局变化相对不明显。

**关键词:** 河网; 水系格局; 城市化; 杭嘉湖地区

## 1 引言

城市化作为典型的人类活动过程之一, 对区域水系产生重要的影响。全球60%的河道因城市化发生了深刻的改变<sup>[1]</sup>。城市化背景下的人类活动对河流水系影响研究也日益增强, 并开始从防洪、排涝以及水生态环境保护的角度开展研究分析<sup>[2-3]</sup>。国外的研究主要从河流地貌学角度分析土地利用变化、河流泥沙以及河道渠化等对河流系统的影响<sup>[4-5]</sup>。Chin等<sup>[6]</sup>和Gregory等<sup>[7]</sup>归纳了城市化对河流的影响范式: 城市化初期大规模施工建设, 河道淤积变窄; 城市化快速期由于不透水面的增加, 径流增加; 城市化稳定期, 河流进入新冲淤平衡期, 河道有扩大的趋势。国内早先是从河流地貌学以及河流水沙动力学角度来研究长江、黄河等大江大河的中下游河流水系变化<sup>[8]</sup>。近年来研究转向河流下游的平原河网区, 如长江三角洲的上海地区、太湖流域和珠江三角洲地区<sup>[9-13]</sup>。平原河网区是水系数量大、结构独特, 且水系发育受人类活动高度影响的区域。水系格局变化影响水系的功能, 如河网的调蓄和行洪排涝能力。韩昌来<sup>[14]</sup>对太湖流域的研究发现河道淤积严重, 数量减少。陈云霞<sup>[15]</sup>等研究宁波市城市化对河网水系影响, 河网水面率减幅与城镇用地增幅呈正相关。周洪建<sup>[15]</sup>研究认为永定河流域京津段水系结构明显简单化, 水系调蓄能力下降, 水灾危险性加大, 平原段潜在中度危险区的空间分布格局与河网消失区的空间分布相似。袁雯<sup>[16-17]</sup>研究上海地区平原河网认为河流结构有自然型→井型→干流型演变趋势。杨凯<sup>[18]</sup>基于水利

收稿日期: 2013-02-04; 修订日期: 2013-03-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40730635); 水利部公益项目 (200901042; 201301075) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40730635; Public Project of the Ministry of Water Resources, No.200901042; No.201301075]

作者简介: 徐光来 (1978-), 男, 安徽无为, 博士, 主要研究方向为水文学与水资源。E-mail: guanglaixu@163.com

通讯作者: 许有鹏 (1956-), 教授, 中国地理学会会员 (S110001881M), 主要从事流域水文水资源评价与防洪减灾方向研究。E-mail: xuyep305@yahoo.com.cn

片划分河网,水系形态结构参数与功能参数显著相关,非高度城市化区水系发育具有Horton规律。

在我国社会经济发达的太湖平原河网区,近50年以来,由于区域大规模的城市化进程,下垫面发生剧烈的改变,水面率、河网密度大幅衰减,并由此带来了一系列水文和水资源等问题,如水文情势改变和洪涝灾害加剧等。因此,对人类活动特别是城市化作用强烈的平原河网地区水系变化进行研究,有助于分析变化环境下水文情势,有利于区域防洪减灾和社会经济的持续发展,具有重要的理论意义和实践价值。已有太湖流域水系变化研究主要集中在上海地区<sup>[18]</sup>、苏锡常地区<sup>[12]</sup>等,且主要侧重水系变化—城市化关系的方法和理论研究或水系—水文变化的定性分析。杭嘉湖区是太湖流域面积最大的平原区,其河流水系对排泄太湖洪水,促进太湖水循环与水体交换、净化水质有重要作用。本文以杭嘉湖区为例,深入探讨水系时空变化的特征和规律,并结合不同水系类型区变化特点初步分析水系变化的机制。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究区概况

杭嘉湖平原区位于太湖流域南部,北临太湖、太浦河,南接钱塘江、杭州湾,西临浙西丘陵区东苕溪,东接黄浦江支流大泖港、张泾塘,主要包括杭州、嘉兴和湖州三市辖区,位置介于 $30^{\circ}09' \sim 31^{\circ}02'N$ 、 $119^{\circ}52' \sim 121^{\circ}16'E$ 之间,东西长约110 km,南北宽约60 km,面积约7607 km<sup>2</sup>(图1)。杭嘉湖区属于亚热带季风气候,温和湿润,四季分明,热量丰实。区内降水丰富,但丰枯年际差异较大,气象灾害频繁。丰水年如1954年降水量达1905 mm,枯水年份如1978年降水量仅850 mm。该区地面高程一般在1.6~2.2 m,北部靠太湖黄浦江一带,特别是嘉北平原地区,高程仅在1.4 m左右。

杭嘉湖区土地利用以水田、城市用地和水域为主。区内河道纵横交错,属于典型的平原河网地区,河网密度2.3 km/km<sup>2</sup>,水面率约为8.6%。该区南部杭州湾一带水面率较小,在5%左右;北部和东北部一带水面率较大,为12%左右,有小于10 km<sup>2</sup>的湖泊91个,主要分布在北部。杭嘉湖区是我国河网密度最大的地区之一,近50年随着城市化迅速发展<sup>[19]</sup>,水系格局变化剧烈。

### 2.2 数据来源

本研究中水系数据主要依据各时期地形图,并通过高分辨率遥感影像和实地考察对地形图中水系数据进行核实。对杭嘉湖地区1960s、1980s的1:5万纸质地形图进行扫描、配准、数字化、拓扑检验、拼接和裁剪等,获得不同时期水系图。由2009年1:5万数字线划地图(DLG)获得2000s水系图。由1960s(城市化初期)、1980s(城市化快速期)和2000s(城市化稳定期)等3期水系图的叠加分析得到研究区水系的时间变化,并将研究区分别按照2500 m×2500 m栅格和行政分区边界研究水系格局的空间分异。

根据1:5万地形图的制图标准和平原水网地区的水系特点,将水系分为面状和线状2类,建立2个面状要素图层和3个线状要素图层:湖泊(荡)层,一般实际湖泊面积大于2500 m<sup>2</sup>依比例表示,图中面积大于1 mm<sup>2</sup>;主干河道层,即为实际河宽大于20 m的河

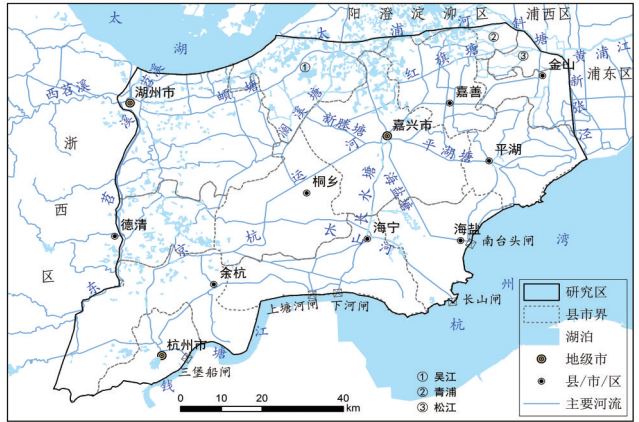


图1 杭嘉湖平原示意图

Fig. 1 Sketch map of Hangzhou-Jiaxing-Huzhou plain

道, 图中依比例尺表示; 一级支流层, 一级支流包括天然河流和人工渠道, 实际河宽为10~20 m; 二级支流层, 一般为人工渠道, 实际河宽为0~10 m; 独立支流层, 一般为人工渠道, 实际河宽为0~10 m, 独立支流与其他河流通过地下涵洞、泵站、桥相连或者因为城市化作用被道路分割开, 因其特征上属于二级支流, 本文在统计分析时归入二级支流。

### 2.3 水系变化指标

本文采用的水系变化指标包括数量特征、结构特征和复杂性等3类5项指标(表1)。数量特征表征水系的密集程度, 用单位面积河流长度和水面积表示, 即河网密度和水面率<sup>[18]</sup>; 结构特征表征水系组成部分数量和比例情况, 文中河流的级别划分以河宽为主要依据, 借用Strahler水系分级方法, 将研究区水系分为主干河流、一级支流和二级支流三个级别。河网结构特征用河网发育系数<sup>[9]</sup>和干流面积长度比表示, 分别表示支流的发育和干流的发育特征。复杂性指标用河网的盒维数表示。有研究表明, 河网的盒维数与区域洪水数量呈负相关关系<sup>[20]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 水系总体变化与水系变化分期

1960s-2000s杭嘉湖地区水系变化显著(图2)。从数量上看, 2000s与1960s相比河流长度减少了11023.33 km, 衰减了38.67%, 河网密度从3.75 km/km<sup>2</sup>下降到2.30 km/km<sup>2</sup>; 2000s与1960年代相比水面积减小了151.58 km<sup>2</sup>, 衰减了18.83%, 水面率从10.58%下降到8.59%。从结构上看, 支流长度下降明显( $K_{12}$ 减少了65.01%), 主干河道相对稳定( $R_{AL}$ 增加了2.31%)。从河网的复杂性看, 河网盒维数由1960s的1.24下降到2000s的1.11, 下降了10.15%, 河网空间分布格局趋于简单化(表2)。

在变化阶段上, 水系的衰减随城市化过程逐渐加剧。研究区1960s-1980s河流长度由28505.7 km减小到24688.6 km, 水面积由805.1 km<sup>2</sup>减小到753.1 km<sup>2</sup>, 河网密度与水面率分别减少13.4%和6.5%。1980s-2000s变化较前一阶段更为剧烈, 河流长度由24688.6 km减小到17482.4 km, 水面积由753.1 km<sup>2</sup>减小到653.5 km<sup>2</sup>, 河网密度与水面率分别减小29.2%和13.2%。可见1960s以来河网密度与水面率呈衰减趋势, 且这种趋势随着城市化过程在加剧。这种加剧衰减的现象在河网发育系数和盒维数指标上也得到反映(表2)。

表1 河网水系变化指标体系  
Tab. 1 Indicator system of river network change

分类	参数	计算方法	内涵
数量特征	河网密度 ( $D_R$ )	$D_R = L_R/A$ , $L_R$ 为区域内河流的总长度, $A$ 为区域总面积	河流长度发育。各区河流的集中程度。
	水面率 ( $W_P$ )	$W_P = (A_w/A) \times 100\%$ , $A_w$ 为区域内河流和湖泊的总面积	河流、湖泊等水系面积发育。反映水系的调蓄能力。
结构特征	河网发育系数 ( $K_\omega$ )	$K_\omega = L_\omega/L_0$ , $L_\omega$ 为 $\omega$ 级支流长度, $L_0$ 为主干河流长度	河网各级支流的发育, 其值越小, 河网主干化越明。
	干流面积长度比 ( $R_{AL}$ )	$R_{AL} = A_0/L_0$ , $A_0$ 为主干河流面积, $L_0$ 为主干河流的长度	单位干流长度的水面积, 表示干流河流面积与长度发育的不同步性。
复杂性	盒维数 ( $D_0$ )	$D_0 = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r}$ 用边长 $r$ 的网格覆盖河网, 统计包含河网的格数, 记为 $N(r)$ 。变换盒子尺寸, 得到一系列 $r-N(r)$ 。	河网空间分布的复杂性, 其值越大, 河网分布越复杂。

\*本文在计算水面率时, 根据地图制图标准和地形图图例, 将一级支流(10~20 m)的平均宽度概化为15 m, 二级支流(0~10 m)的平均宽度概化为5 m。湖泊与干流面积根据图上面积与地图比例尺进行计算。

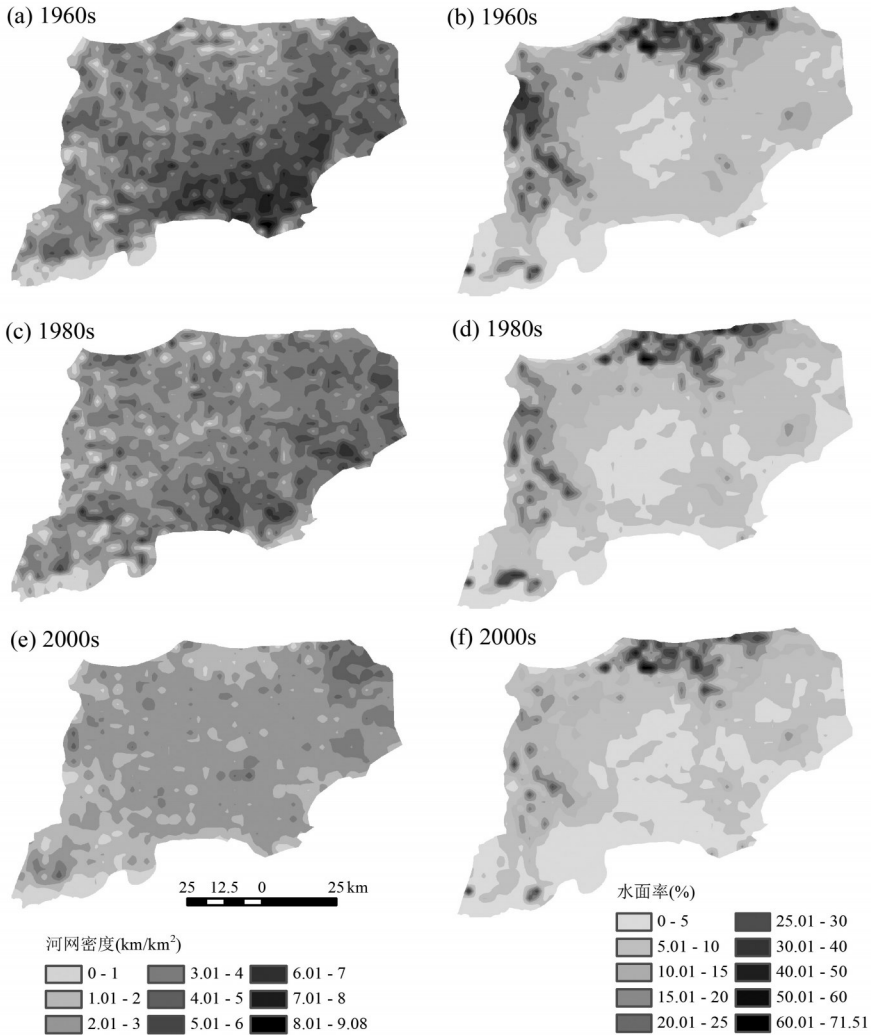


图2 杭嘉湖区河网密度(左)与水面率(右)变化(2500 m×2500 m栅格内统计, 克吕金插值)

Fig. 2 Change of density of river network (left) and ratio of water area (right)

支流衰减剧烈, 河网主干化逐渐显现。1960s二级支流发育系数( $K_2$ )为1.41, 至1980s下降到1.35, 下降了3.9%, 1980s-2000s期间急剧下降至0.15, 下降了88.6%。对于天然河流系统来说, 一般是等级越低的河流, 总长度越大, 数量越多。当 $K_2$ 小于1时, 表明二级支流总长度比主干河道长度要低, 河流的结构受到严重干扰。杭嘉湖地区的河道组成已违背了这一自然状态。一级支流发育系数( $K_1$ )有类似的特点, 1960s-1980s下降了34.1%, 1980s-2000s下降了24.2%。

与 $K_2$ 不同的是,  $K_1$ 两个时期下降百分比差别不大, 且第二阶段稍慢, 未出现小于1的情景。原因可能是城市化的作用主要在河宽最窄的末端河流(本文的二级支流), 这部分河流淤积或填埋消失的最为严重。干流面积长度比( $R_{AL}$ )三个时期变化不大, 1960s-2000s略有增大。干流面积长度比增大表明干流平均宽度在增大, 即河网主干化程度增加。

### 3.2 水系变化分区

1960s各区河网密度( $D_R$ )在1.8~5.3 km/km<sup>2</sup>之间, 1980s在1.7~4.3 km/km<sup>2</sup>之间, 2000s在1.2~4.0 km/km<sup>2</sup>之间, 河网密度总体呈下降趋势(表3)。1960s-1980s时期11个分区水面

表2 杭嘉湖地区1960s-2000s水系变化

Tab. 2 River network change of Hangzhou-Jiaxing-Huzhou region in the 1960s-2000s

水系参数	1960s	1980s	2000s	水系变化 (%)		
				1960s-1980s	1980s-2000s	1960s-2000s
河流长度 (km)	28505.71	24688.56	17482.37	-13.39	-29.19	-38.67
$D_R$ (km/km <sup>2</sup> )	3.75	3.25	2.30			
水面积 (km <sup>2</sup> )	805.09	753.14	653.51	-6.45	-13.23	-18.83
$W_p$ (%)	10.58	9.90	8.59			
$K_1$	1.41	1.35	0.15	-3.93	-88.57	-89.02
$K_2$	2.24	1.48	1.12	-34.07	-24.22	-50.04
$K_{1,2}$	3.65	2.83	1.27	-22.44	-54.98	-65.08
$R_{AL}$ (km <sup>2</sup> /km)	44.65	46.41	45.68	3.96	-1.59	2.31
$D_0$	1.2374	1.1865	1.1073	-4.11	-6.68	-10.51

\*2000s水面积统计未包括池塘面积, 约286.4 km<sup>2</sup>。

率下降, 下降幅度为0.3%~30.2%, 金山、嘉善、吴江三区略增加(增幅3.3%~6.2%)。1980s-2000s期间13个分区河网密度下降, 下降幅度4.2%~44.2%, 青浦略增加(增幅9.2%)。近50年各区河网密度均下降, 下降幅度4.1%~61.1%。河网密度较大地区位于杭嘉湖的南部、东部。西部和北部是由小湖荡和湖泊构成的湖泊区, 水系以湖泊为主。河网密度变化上, 衰减程度最剧烈的为南部河网密集区, 衰减程度相对较小的是东部下游区。

1960s各区水面率( $W_p$ )在5.2%~19.7%之间, 1980s在4.5%~18.8%之间, 2000s在4.1%~17.8%之间, 水面率总体呈下降趋势(表3)。1960s-1980s时期11个分区水面率下降, 下降幅度为2.2%~25.8%, 青浦、余杭、杭州水面率增加(增幅2.1%~17.5%)。1980s-2000s期

表3 杭嘉湖分区1960s-2000s水系变化

Tab. 3 Change of river network of Hangzhou-Jiaxing-Huzhou subregion in the 1960s-2000s

子区	德清	海宁	湖州	海盐	杭州	金山	嘉善	
面积 (km <sup>2</sup> )	420.7	691.7	1064.8	481.1	288.6	249.7	509.8	
$D_R$ (km/km <sup>2</sup> )	1960s	3.23	5.27	3.35	5.33	1.75	3.97	3.57
	1980s	2.61	3.73	2.92	3.72	1.66	4.22	3.77
	2000s	1.83	2.12	2.39	2.07	1.16	3.31	2.45
$W_p$ (%)	1960s	16.84	6.46	14.82	6.93	5.23	6.17	15.42
	1980s	15.99	5.55	13.22	6.20	6.15	5.66	14.63
	2000s	12.97	4.07	10.50	5.67	4.87	6.13	12.80
$K_{1,2}$	1960s	1.24	15.19	1.46	9.83	3.56	6.52	1.34
	1980s	0.87	10.31	1.12	6.36	4.95	7.04	0.96
	2000s	0.20	3.00	0.58	1.18	2.75	3.66	0.56
$R_{AL}$ (km <sup>2</sup> /km)	1960s	50.89	26.65	46.51	41.04	35.69	44.43	46.23
	1980s	52.33	36.83	54.13	45.81	40.87	43.81	39.42
	2000s	61.81	33.06	48.90	38.04	47.11	38.91	44.35
$D_0$	1960s	1.2039	1.3468	1.1783	1.3670	1.1442	1.2358	1.2004
	1980s	1.1151	1.1884	1.1226	1.2059	1.1150	1.2640	1.2187
	2000s	1.0913	1.0874	1.1080	1.0884	1.0510	1.1825	1.1075

子区	嘉兴	平湖	青浦	松江	桐乡	吴江	余杭	
面积 (km <sup>2</sup> )	999.2	5244	80.6	119.3	714.2	570.9	874.2	
$D_R$ (km/km <sup>2</sup> )	1960s	3.89	4.40	4.06	4.44	4.16	2.67	2.71
	1980s	3.30	4.29	3.57	4.18	3.23	2.76	2.70
	2000s	2.46	2.71	3.89	4.01	2.31	2.06	1.78
$W_p$ (%)	1960s	9.36	7.62	14.36	8.29	6.11	19.70	7.58
	1980s	8.57	6.68	14.66	8.11	4.53	18.80	8.45
	2000s	8.13	6.26	12.41	8.01	5.15	17.75	5.59
$K_{1,2}$	1960s	6.54	4.86	3.09	7.54	7.24	1.88	2.98
	1980s	5.66	4.10	1.81	5.86	5.83	2.13	2.25
	2000s	1.83	1.78	2.33	5.09	1.62	1.07	1.30
$R_{AL}$ (km <sup>2</sup> /km)	1960s	44.94	38.48	64.41	75.59	34.70	51.37	41.74
	1980s	46.02	37.89	57.83	70.36	35.47	52.80	41.80
	2000s	39.83	37.46	58.57	61.14	33.13	54.21	45.88
$D_0$	1960s	1.2294	1.2745	1.2554	1.2597	1.2461	1.1433	1.1809
	1980s	1.1607	1.2698	1.1925	1.2291	1.1408	1.1554	1.1758
	2000s	1.1067	1.1258	1.2246	1.2184	1.0929	1.0864	1.0926

间13个分区水面率下降,下降幅度1.2%~33.8%,金山水面率增加(增幅8.3%)。近50年各分区水面率均下降,下降幅度0.6%~37.0%。水面率较大地区位于杭嘉湖的北部、西部两个湖泊密集区,较小区位于中部和南部桐乡、海宁、海盐。水面率变化上,衰减程度最剧烈的为西部、南部,其次是中西部,衰减程度相对较小的是北部吴江,东部松江、金山和南部杭州。

1960s各区支流发育系数( $K_{1,2}$ )在1.2~15.2之间,1980s在0.9~10.3之间,2000s在0.2~5.1之间,支流发育系数下降明显,衰减呈加剧趋势(表3)。支流发育系数较大地区位于研究区中部、南部河网区,较小区位于北部和西部湖泊区。支流发育系数变化上,衰减程度最剧烈的为南部,其次是中、西部,衰减程度相对较小的是杭州、上海三区 and 吴江。

1960s各区干流面积长度比( $R_{Al}$ )在26.7~75.6之间,1980s在36.8~70.4之间,2000s在33.1~61.8之间(表3)。干流面积长度比较大地区位于杭嘉湖东北部下游主干河流区,较小区位于中部和南部。湖区吴江、德清中等。衰减程度最剧烈的为东部,中西部地区干流面积长度比增加。

1960s各区盒维数( $D_0$ )在1.1442~1.3670之间,1980s在1.1151~1.2698之间,2000s在1.0510~1.2246之间,盒维数有下降的趋势(表3)。1960s-1980s除金山、嘉善、青浦三区略增加外(增幅1.1%~2.3%),其他各区均下降(降幅0.1%~11.8%)。1980s-2000s除青浦区略增加外(增幅2.7%),其他各区均下降(降幅0.9%~11.3%)。近50年各区盒维数均为下降趋势(降幅2.5%~20.4%)。盒维数较大地区位于杭嘉湖的东部、南部,较小区位于北部和西部。变化程度上,衰减程度最剧烈的为南部区,其次是中、西部,衰减程度相对较小的是上海三区。

### 3.3 水系变化分类

以杭州市辖区和嘉兴市辖区为典型城市区(湖州市辖区水系特点更接近于湖泊广布区,未归入此类),以海盐、海宁为典型河网密集地区,以临近阳澄淀泖湖群、湖泊广布的吴江市为典型湖泊广布区,分别分析不同类型下垫面条件下的水系变化特点。

**3.5.1 城市地区** 城市区水面率较低。在平原地区,水面积-水体容积有较好的对应关系,水面积的大小对于区域防洪排涝、水资源利用、以及环境生态等都有较大的影响,一般用水面率反映单位面积水系调蓄能力。目前杭州市辖区水面率在4.9%,嘉兴市辖区水面率为8.1%,且1960s以来水面率呈减小的趋势(图3b)。本文未计算杭嘉湖最优水面率,借鉴上海等相似类型地区研究结果,水面率应不低于9%<sup>[18]</sup>。

城市区河网密度下降,水系格局简化。杭州市辖区河网密度1960s-2000s期间平均下降了0.6 km/km<sup>2</sup>,分维数从1960s期间1.1442下降到2000s的1.0550。嘉兴市辖区河网密度1960s-2000s期间下降了1.4 km/km<sup>2</sup>,分维数从1960s期间1.2294下降到2000s的1.1067(图3a, d)。河网密度的下降和分维数的降低主要来自于二级支流的大幅衰减,如1960s嘉兴市辖区二级支流长度为1108 km,到2000s仅有93 km,下降了92%。

城市区1980s后因防洪需要出现疏浚、新挖河道。杭州市辖区主要为京杭运河与钱塘江的连通工程。历史上五代两宋此江河曾沟通,元、明渐衰,清、民国此江河之间已不连通。京杭运河钱塘江沟通工程于1983年开工,1988年竣工,实现了京杭运河和钱塘江两大水系直接通航。嘉兴市辖区在原有放射状水系格局(海盐塘、长水塘、杭州塘、新腾塘、平湖塘、嘉善塘、长纤塘、苏州塘,俗称“八大水系”)基础上,1989-1999年间,在市区先后兴建了多次防洪工程,如北郊河、南郊河和东环河等环城河工程。嘉兴市环城河工程在城市中心外围对八大水系进行不同程度的连通,缓解了城市的防洪压力。

**3.5.2 河网密集地区** 河网密集区河流长度下降明显。杭嘉湖平原是我国河网最稠密地区之一,其中南部钱塘江、杭州湾沿岸的海盐、海宁河网最为密集。1960s海宁、海盐河网密度均为5.3 km/km<sup>2</sup>,高于杭嘉湖平原平均值3.7 km/km<sup>2</sup>,至2000s两区河网密度均仅

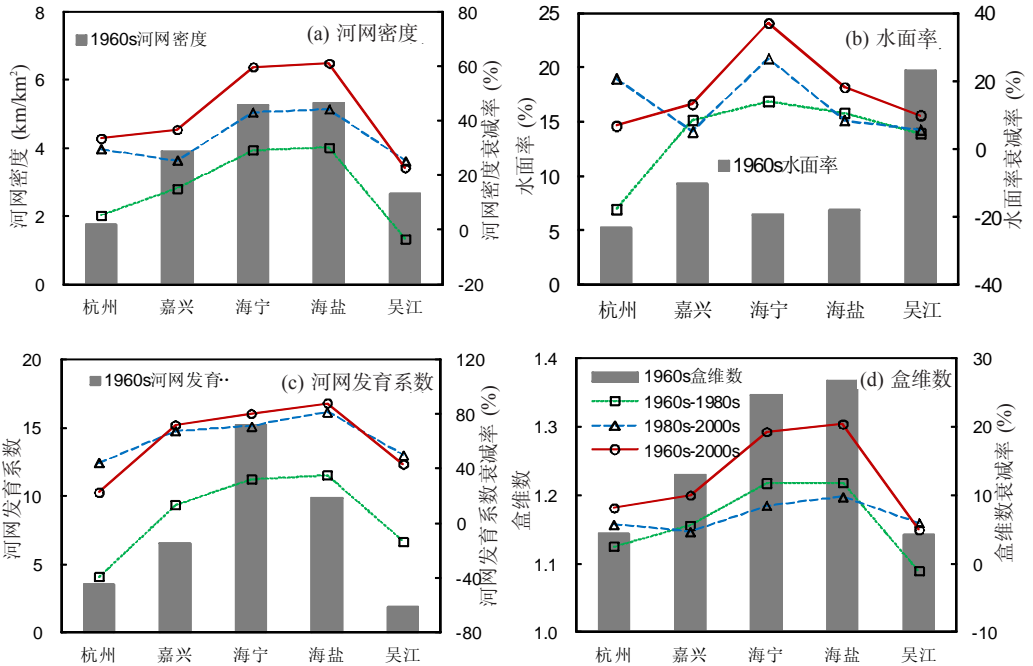


图3 典型区水系变化

Fig. 3 River network change of typical sub regions with the indicators of river density

剩2.1 km/km<sup>2</sup> (表3, 图3a)。河流的消失以支流为主, 其中二级支流衰减更为剧烈。1960s海宁、海盐支流发育系数分别为15.2、9.8, 至2000s两区支流发育系数仅为3.0和1.2 (图3c)。随着城市化的发展, 大量末端河流被填埋消失, 1960s-1980s海宁二级支流下降了833 km, 下降了50.9%, 海盐二级支流下降了564 km, 下降了42.0%; 1980s-2000s二级支流的衰减则更为明显, 海宁下降了84.9%, 海盐下降了96.9%; 至2000s, 海宁、海盐二级支流几乎衰减殆尽, 长度仅占区域河流总长度的8%和2%。

河网密集区干流有增加趋势, 大型水利工程逐渐成为水系格局骨干。1960s-1980s干流总长度变化不大。这一时期重要水利工程是杭嘉湖平原南排工程主要出海口之一——长山河长山闸排涝工程。1980s-2000s干流总长度增加明显, 海宁、海盐分别增加了61%和89%, 相比于支流长度的减少, 海盐、海宁河网主干化明显。这一时期出现较大的水利工程有海盐南台头、海宁盐官上塘河、盐官下河3座大闸, 到2000年, 杭嘉湖南排主要工程全面建成, 在抵御洪涝灾害中发挥主要作用。

**3.5.3 水面率较大的下游湖泊区** 湖泊区水面积较大, 水面率下降不明显。吴江市水面率为18%左右, 水体以湖泊为主, 其中水面率的65.9%来自湖泊, 24.2%来自干流, 一级支流与二级支流的贡献率仅8.1%和1.7%。城市化对水面率的影响在吴江市表现不明显; 1960s-2000s期间水面率下降了9.9%, 下降幅度较小 (图3b)。其原因主要为该区处在区域排水下游方向, 水系以湖泊和干流为主, 对城市化敏感的细小河流较少。

1960s-1980s河网密度和分维变化不大, 1980s-2000s略有下降。吴江市1960s河网密度为2.7 km/km<sup>2</sup>, 至1980s达到2.8 km/km<sup>2</sup>, 2000s下降至2.1 km/km<sup>2</sup>。河网盒维数衰减与河网密度基本一致 (图3a, d), 其主要原因为1980s-2000s支流长度的减少。

## 4 结论

通过构建水系数量、结构和空间复杂性变化指标体系, 探讨了河网的时空变化及其原

因。主要结论如下:

(1) 杭嘉湖地区近50年伴随城市化过程水系长度、面积和盒维数呈衰减趋势,尤其是1980s-2000s水系衰减趋势更为明显。城市化初期河网密集( $D_R = 3.75 \text{ km/km}^2$ ),城市化快速期河网开始衰减( $D_R = 3.25 \text{ km/km}^2$ ),城市化稳定期河网已大幅衰减( $D_R = 2.30 \text{ km/km}^2$ )。水系衰减以支流为主,1960s二级支流发育系数为1.41,至1980s下降到1.35,下降了3.9%;2000s急剧下降至0.15,下降了88.6%。干流面积长度比近50年略有增大,河网随着城市化的发展有主干化趋势。

(2) 河网密集的南部区水系衰减最为剧烈。其中河网密度、河网发育系数和盒维数衰减程度空间分布大致相同,这些区域主要为河网密集的区域,水系组成以河流为主,湖泊相对较少。水系衰减以支流减少为主。

(3) 水系格局的变化表现在两个方面,一是城市化作用下,末端河流被填埋,二是为了防洪排涝的需要,疏浚拓宽了一些重要河流,开挖连通了一些区域输水河道。这两个过程在不同地区有一定的差异。城市地区水面率相对其他区较小,近50年河网密度、水面率和盒维数呈减小趋势,水系格局简化。由于城市防洪需要,1980s以来出现较重要的防洪疏浚和新挖河道工程;河网密集区相比其他区而言水系衰减较为明显,主要以支流的大幅消失为主,而干流长度略有增加。

## 参考文献 (References)

- [1] Sear D, Newson M. Environmental change in river channels--A neglected element: Towards geomorphological typologies, standards and monitoring. *The Science of the Total Environment*, 2003, 310(1-3): 17-23.
- [2] Zhang Jianyun, Zhang Silong, Wang Jinxing et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Resource*, 2007, 18(2): 230-234. [张建云, 章四龙, 王金星等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究. *水科学进展*, 2007, 18(2): 230-234.]
- [3] Xu Youpeng. Impacts of Urbanization of the Yangtze River Delta Region on River System in Basins and Hydrological Processes. Beijing: Science Press, 2012. [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. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [4] Gregory K. Identification of river channel change due to urbanization. *Applied Geography*, 1992, 12(4): 299-318.
- [5] Vanacker V, Molina A, Govers G et al. River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. *Geomorphology*, 2005, 72(1-4): 340-353.
- [6] Chin, A. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 460-487.
- [7] Gregory K J. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 172-191.
- [8] Xu Jiongxin. Rivers Geomorphological System of China and Its Response to Human Activities. Beijing: Science Press, 2007. [许炯心. 中国江河地貌系统对人类活动的响应. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [9] Zhou Hongjian, Shi Peijun, Wang Jing'ai et al. River network change and its ecological effects in Shenzhen region in recent 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9): 969-980. [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. *地理学报*, 2008, 63(9): 969-980.]
- [10] Huang Yilong, Wang Yangling, Liu Zhenhuan et al. Stream construction characteristics in rapid urbanization area. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1212-1220. [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. *地理研究*, 2008, 27(5): 1212-1220.]
- [11] Meng Fei, Liu Min. Analysis of driving forces and changes in river network under intensive human activity: A case study of Pudong New Area, Shanghai. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2006, 42(4): 15-20. [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. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(4): 15-20.]
- [12] Wang Liuyan, Xu Youpeng, Yu Mingjing. Analysis of the urbanization effect on the Taihu plain river network. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(2): 151-155. [王柳艳, 许有鹏, 余铭婧. 城镇化对太湖平原河网的影响. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(2): 151-155.]
- [13] Shao Yulong, Xu Youpeng. Change of river structure and stream network connectivity in the taihu lake basin under the urbanization development. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(10): 1167-1172. [邵玉龙, 许有鹏. 太湖流域城市化发展下水系结构与河网连通变化分析. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(10): 1167-1172.]
- [14] Chen Yunxia, Xu Youpeng, Fu Weijun. Influences of urbanization on river network in the coastal areas of east Zhejiang Province. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 68-73. [陈云霞, 许有鹏, 付维军. 浙东沿海城镇化对河网



- 水系的影响. 水科学进展, 2007, 18(1): 68-73.]
- [15] Zhou Hongjian, Wang Jing'ai, Yue Yaojie. Assessment of flood hazard based on river network change. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 45-49. [周洪建, 王静爱, 岳耀杰. 基于河网水系变化的水灾危险性评价. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 45-49.]
- [16] Yuan Wen, Yang Kai, Tang Min et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network. Geographical Research, 2005, 24(5): 717-724. [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. 地理研究, 2005, 24(5): 717-724.]
- [17] Yuan Wen, Yang Kai, Wu Jianping. River structure characteristics and classification system in river network plain during the course of urbanization. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 401-407. [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. 地理科学, 2007, 27(3): 401-407.]
- [18] Yang Kai, Yuan Wen, Zhao Jun et al. Stream structure characteristics and its urbanization responses to tidal river system. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 557-564. [杨凯, 袁雯, 赵军等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应. 地理学报, 2004, 59(4): 557-564.]
- [19] Statistics Bureau of Zhejiang Province. Statistical Yearbook of Zhejiang of 2008. Beijing: China Statistics Press, 2008. [浙江省统计局. 2008浙江统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2008.]
- [20] Ma Zongwei, Xu Youpeng, Li Jiajun. River fractal dimension and the relationship between river fractal dimension and river flood. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 530-534. [马宗伟, 许有鹏, 李嘉峻. 河流形态的分维及与洪水关系的探讨. 水科学进展, 2005, 16(4): 530-534.]

## Temporal and spatial changes of river systems in Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain during 1960s-2000s

XU Guanglai<sup>1,2</sup>, XU Youpeng<sup>2</sup>, WANG Liuyan<sup>2</sup>

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China;

2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Based on the topographic map data in 1960s, 1980s and 2000s, the temporal and spatial changes of river networks of Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain region were analyzed from aspects of the river density ( $D_R$ ), rate of water area ( $W_P$ ), development coefficient of the river network ( $K_\omega$ ), the ratio of area-length of main river ( $R_{AL}$ ) and box dimension ( $D_0$ ) etc. The results showed that: (1)  $D_R$  and  $W_P$  presented a decline trend during the 1960s-2000s with river length decreased by 11023.33 km (about 38.67%) and water area decreased by 151.58 km<sup>2</sup> (about 18.83%), and the trend was still intensifying. (2)  $K_\omega$  also showed a decline trend with  $K_2$  decreasing from 1.41 to 1.35 (a decrease of 3.9%) during the 1960s-1980s and to 0.15 during the period of 1980s-2000s (decreased by 88.6%). And the main rivers were gradually dominant in river network in the process of urbanization. (3) The spatial variation of the river network was obvious, the southern regions with an intensive river network was the most dramatic. (4) Each river system has its characteristics under different underlying surface conditions.  $W_P$  was smaller with 4.9%-9.4% in city regions. The  $D_R$  and  $W_P$  had decreased since the 1960s. Some river channel projects for dredging and urban flood control were implemented in the process of urbanization. In the regions of intensive river network ( $D_R$  was 2.1-5.3 km/km<sup>2</sup>), there was a significantly decreasing trend of tributary rivers, and an increasing trend of main rivers. In the lake regions with bigger  $W_P$  (about 17.8%-19.7%), there were no significant changes of river system pattern.

**Key words:** river network; river system pattern; temporal and spatial changes; urbanization; Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain