

城市化背景下建成区扩展及其对河网变化的影响

——以苏州市为例

田壮壮^{1, 2} 关燕宁¹ 郭杉¹ 张春燕¹ 蔡丹路¹ 肖寒^{2, 3} 姚武韬^{1, 2} 于敏^{1, 21}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

【摘要】: 根据苏州快速城市化与水网密布的典型地域特征, 利用不同空间分辨率卫星遥感信息, 通过标准化处理流程, 获取 2002~2018 年期间多期苏州建成区与水网专题信息, 采用垂直类比的定量化方法, 在区域和地理空间格网单元的层面, 对城市建设用地与河网水系进行空间叠加分析。探讨城市化进程中建成区建设用地与河网水系分布的格局, 以及河网的密度、河链数、节点数、连接率和分形维数等特征参数动态变化与相互影响关系。结果表明: (1) 苏州城市空间扩展特征已经从区域中心建成区放射型蔓延向多中心建成区放射型+网络化的蔓延方式改变。(2) 苏州河网水系伴随建设用地扩展, 密度持续降低, 建成区以外的农田植被区河网水系分布格局未发生根本性改变。河网连接率未发生变化, 连通性维持稳定, 分形维数稍有降低, 河网结构复杂性略有下降。(3) 河网变化受建成区扩展影响显著。前期各建成区格网单元内水网密度降低空间分布较为均匀, 后期主要集中于建成区增量所占比例较低的网格单元即主要发生在建成区边缘扩展区域。本文的方法可为遥感信息在城市生态系统的空间规划决策和遥感尺度效应研究提供科学依据。

【关键词】: 城市化 河网水系 格网单元 分形维数

【中图分类号】: X52 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)04-0915-10

河网水系是水资源的物质载体, 水资源是生态环境的组成部分, 生态环境是经济社会发展的重要支撑^[1]。伴随着城市规模的扩张、城市人口的聚集, 剧烈的人类活动深刻地影响着河网水系的发展, 大量河道被淤积、堵塞和填埋, 水系数量、形态和结构特征^[2~4]随之发生改变^[3], 河网行洪调蓄能力和水环境承载力下降, 从而导致一系列生态环境问题, 制约着经济社会的可持续发展^[5~9]。为实现生态环境良性发展、经济社会稳定运转, 城市化背景下河网水系的变化研究成为水文、地理和生态等学科领域的热点之一^[10]。

高强度、大范围的人类活动强烈地影响着河网水系的演变, 其中, 城市化对河流水系影响尤为明显^[11~13]。目前, 国内有关

作者简介: 田壮壮(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境与气候变化遥

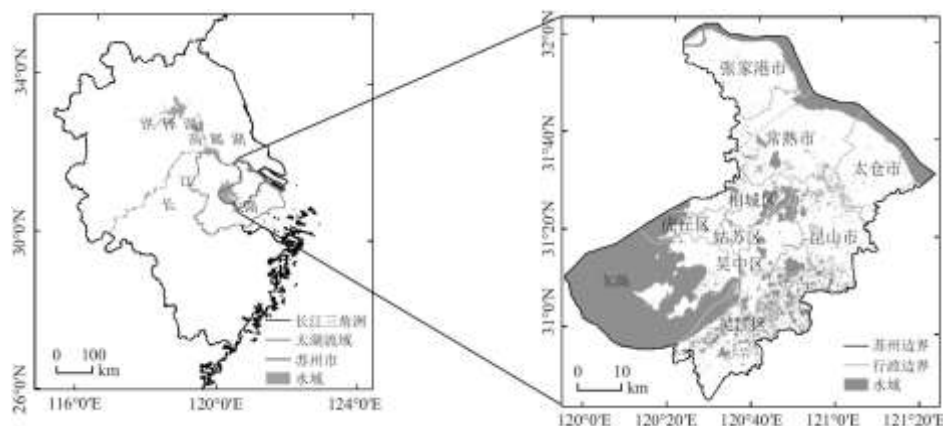
感. E-mail: tianzhuangzhuang17@mails.ucas.ac.cn

关燕宁 E-mail: guan@irsa.ac.cn

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA23100504)

城市化对河网水系变化影响的研究多集中在高度城市化的平原河网区,如长三角、珠三角等地区^[14~18],林芷欣等^[19]利用风玫瑰图,结合水系结构参数揭示城市化进程对长江下游平原河网水系格局演变的影响,魏莹莹等^[20]基于景观生态学和图论的相关理论,探究太湖流域河网水系结构与连通性参数变化及城市化对其影响,周峰等^[21]提出满足行洪排涝需求的平原水系连通度量方法,分析城镇化背景下浙东沿海平原水系特征变化及其对河网连通度的影响。研究表明:近几十年来,快速城市化地区河网水系减少,河流功能受到影响,一方面,河道支流干涸、萎缩,河网结构趋于简单化、主干化,导致河流健康受损害,另一方面,河流调蓄、自净能力下降,洪涝灾害、水资源污染等问题加重。而随着城市化进程推进,城市发展与河流水系演变的空间异质性亟待以区域生态系统的构成要素及其关系视角展开进一步探讨。

1 研究区概况



苏州市涵盖两个一级自然地理区：太湖平原、长江三角洲平原，分属四个二级自然区：苏锡平原区、沿江平原沙洲区、太湖及湖滨丘陵区 and 阳澄淀泖地区。其中平原、水域和丘陵分别占 55%、42% 和 3%。全域地势低平，自西向东缓慢倾斜，西部山区和太湖诸岛零星散布着低山丘陵，低山丘陵海拔多在 100~342m，而平原区海拔一般在 3~4m，阳澄湖和吴江附近仅 2m 左右^[23]。苏州市内河道交错，湖荡密布，各级河道 2 万余条、湖泊 323 个，属于典型的平原水网地区^[24]。近年来，苏州市经历着持续的城市化过程，人类活动改变下垫面属性，各级建成区扩展致使河道改道、消失，河网水系结构遭到破坏，区域内水环境调节能力下降、承载压力增加。

2 数据与方法

2.1 数据预处理

基础数据源采用中观尺度的 LandsatTM/OLI 遥感图像；高空间分辨率数据采用 IKONOS 和 QuickBird 遥感图像。中观尺度遥感数据的时相选择以植被茂盛期的同步无云数据为准。以每 4 年为一个间隔的五期数据采集时间为 2002、2006、2010、2014、2018 年。用于河网水系提取的高空间分辨率遥感数据以每八年为一个采集间隔，采集时间为 2002、2010、2018 年。

遥感信息标准化流程涵盖传感器定标、几何精校正、特征信息提取。按照国家基础地理信息的标准，完成植被、建设用地和河网水系的数字化等专题信息，以及 1km×1km 格网单元的建设用地比例和河网水系要素的提取。

2.2 参数指标

结合苏州平原区河网地区的水系发育特点，选用统一的水系结构参数指标体现各时期河网水系特征变化。针对建成区变化与水网联系关系的研究目标，选用河网密度 (D_d)、连接率 (β)^[25] 和分形维数 (D)^[26] 作为体现河网水系分布特征和规律的参数指标 (表 1)。

表 1 参数指标和含义

参数	计算方法	含义
河网密度 (D_d)	$D_d=L_R/A$, L_R 为河流总长度, A 为区域总面积	反映水系的数量发育状况、分布疏密程度, 其数值越大, 代表区域内河网越密集
连接率 (β)	$\beta=L_c/N$, N 为节点数, 节点即河网中河流交汇的点, L_c 为河链数, 河链即连接两个节点的边	体现河网结构中每个节点连接的平均河链数, 衡量一个节点与其他节点关联的难易程度
分形维数 (D)	$D = \frac{M - \ln N(r)}{\ln r}$, 用边长为 r 的网格覆盖分形图像, 统计包含分形对象的格数, 变换盒子尺寸 r , 得到一系列 r 、 $N(r)$ 。最小二乘法拟合点 $(\ln r_i, \ln N(r_i))$ 的双对数坐标的趋势线, 直线斜率 D 即分形维数	反映河网水系空间形态的复杂程度, 其数值越大, 代表河网水系结构越复杂

3 结果与分析

3.1 建成区扩展变化

苏州建成区分布的形态和规模及其扩展模式从 2002 年主要受河网水系影响的中心建成区放射型蔓延方式, 转变为受山地地形及其湖泊和河网水系综合影响的多中心建成区放射型加网络化的蔓延方式。体现在以每四年为一个间隔的 2002~2006 年以建设用地扩展为标志的建成区增长幅度超过 10%, 在 2006~2018 年之间的 3 个阶段呈现较小幅度的波动型增长态势, 分别为 5.11%、2.56% 和 4.23%。从 2002 年的以各区、县围绕中心建成区均匀扩展模式, 演变为以苏州工业园区建设为标志的跨区、县之间的相互贯通式扩展, 以及沿长江向陆地并进的扩展模式。并且从 2002~2010 年期间的规模化集中连片式扩展, 转变成为 2010~2018 年小规模零星“填充”式扩展 (图 2、表 2)。

通过 1km×1km 格网单元以建成区建设用地所占比例的 10 级划分。在 2002~2018 年期间,建成区比例在 10%以下级别格网呈现 35%的减少幅度;建成区比例在 10%~90%的八个级别格网中,最大增长幅度均小于 5%,而在 90%以上级别格网的增加幅度明显高于其他级别,且 2002~2018 年的增加幅度超过 10%,反映建成区分布格局变化的单极化趋势,即由农村、乡镇和城市的同步小幅度增长,变为围绕各类城市整体的大幅度扩展(图 3)。

3.2 河网水系变化

对 2002~2018 年河网分布进行对比可知,苏州河网水系分布依然保持北部密集于南部,各建成区明显稀疏于农田植被区的基本特征,各阶段河网水系总长度保有率均在 90%以上,第 I 阶段为 90.27%,第 II 阶段为 95.77%,河网水系总长度的保有率变化体现了河网水系与建成区扩展的关联程度,并且伴随建设用地扩展的河网水系总长度减少程度有所缓解(图 4、表 3)。

阶段性河网水系变化与建成区扩展变化的对比表明,在 2010~2018 年的第 II 阶段河网水系减少和增加幅度均低于 2002~2010 年的第 I 阶段,河网水系的变化与各建成区扩展程度和进程密切相关,且第 I 阶段的河网水系规模减少集中分布于常熟、昆山、吴江、吴中等建成区和苏州工业园区周边,甚至延伸至阳澄湖区,而建成区以外的农田植被区河网水系分布格局未发生根本性改变(图 5)。

采用特征参数定量反映河网水系特征变化。2010~2018 年第 II 阶段相对于 2002~2010 年第 I 阶段的主要水系特征参数而言,河链数和节点数呈现相同减幅趋势的减少使得连接率保持稳定。河网密度、河链数、节点数等减少程度均有所降低,但是,通过分形维数体现的苏州河网水系空间形态的结构复杂程度的特点基本得以保持。河网密度、河链数、节点数等水系特征参数在不同阶段变化中的共同性,包括相对稳定的连接率和趋于稳态的分形维数,均验证了苏州建成区扩展与河网水系的密切关系,即河网水系的结构、数量和形态伴随苏州建成区扩展方式和程度的改变而变化(表 4)。

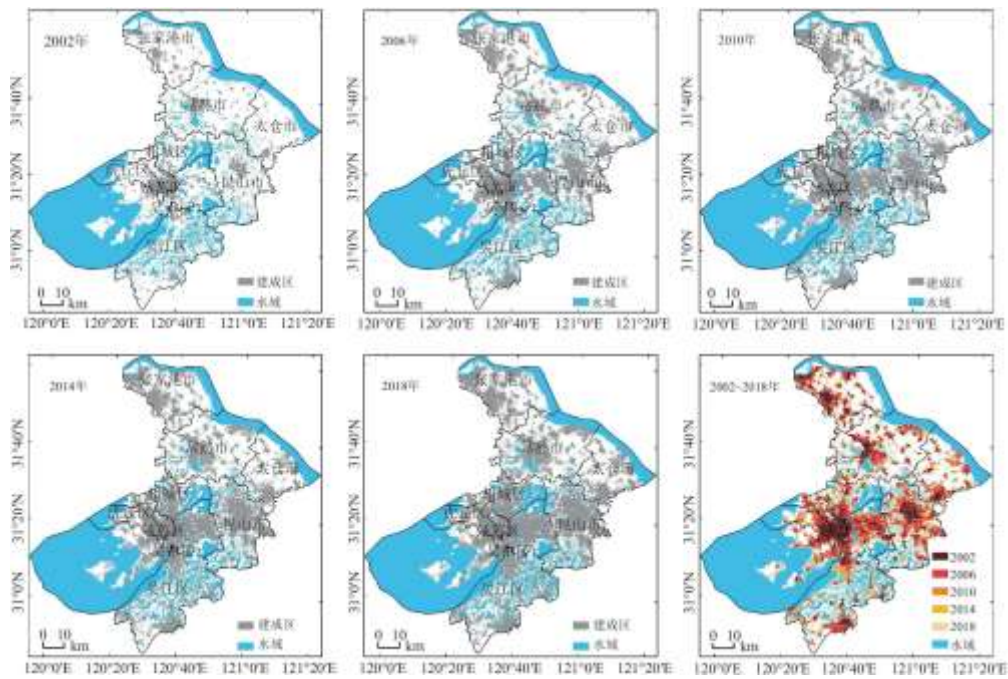


图 2 苏州市建成区分布和动态变化对比

表 2 苏州市建成区分布和动态变化

指标	2002	2006	2010	2014	2018	2002~ 2006(I)	2006~ 2010(II)	2010~ 2014(III)	2014~ 2018(IV)
面积 (km ²)	648.77	1618.90	2061.35	2283.33	2737.33	970.13	442.45	221.98	454.00

在苏州全域进行基于 1km×1km 格网单元的河网密度计算。按照格网单元水网密度的零值、低值、中低值、中值、中高值和高值等间隔划分的三期结果显示，张家港市北半部、常熟区东南部和太仓市中部保持河网密度最高，除去湖泊和长江水面之外，全域保持每平方公里拥有超过累计 1 公里以上的河网；北半部河网密度高于南半部；在六级数值类型中，中值区以下三级的分布呈现小幅度增加，而中值区及其以上三级的分布均有小幅度减少(图 6)。

3.3 建成区扩展对河网水系的影响

为了从地理空间视角分析城市化进程与河网水系变化的影响关系，将覆盖苏州的共计 9030 个网格按照 1km×1km 格网单元内建成区扩展程度分为 10 级，相应的河网累计长度变化可分为两个阶段：

在 2002~2010 年的八年期间，河网累计长度的减少明显大于增加的变化贯穿于十个级别的格网，且减少和增加的长度均随着建成区所占比例的减少而加大。其中，前 4 年各级网格的河网累计减少长度基本在 130~350km 之间；河网累计增加的长度多数不到 100km，形成河网不对称改变趋势。在后续 2006~2010 年的后 4 年河网水系累计长度变化中，无论是增加，还是减少均较前四年存在明显变化，即增加、减少更集中在较小比例的建成区增量网格内，表明河网水系变化的重心在规模较大的建成区及其周边。

在 2010~2018 年的 8 年期间，河网累计长度变化相对于此前 8 年更集中于 30%以下建成区增量比例网格中。其中，2010~2014 年期间的河网累计长度改变明显小于其余时间段，并且河网水系变化尤其聚集于较低建成区增量比例的格网。

从 1km×1km 格网看苏州各建成区扩展比例的河网水系阶段性变化可知，建成区扩展-格网化河网密度变化散点图进一步验证了苏州城市化进程中建成区扩展程度和方式的变化，即前两个时期表现为集中连片的大规模扩展，后两个时期则为相对分散的填充式零星扩展。

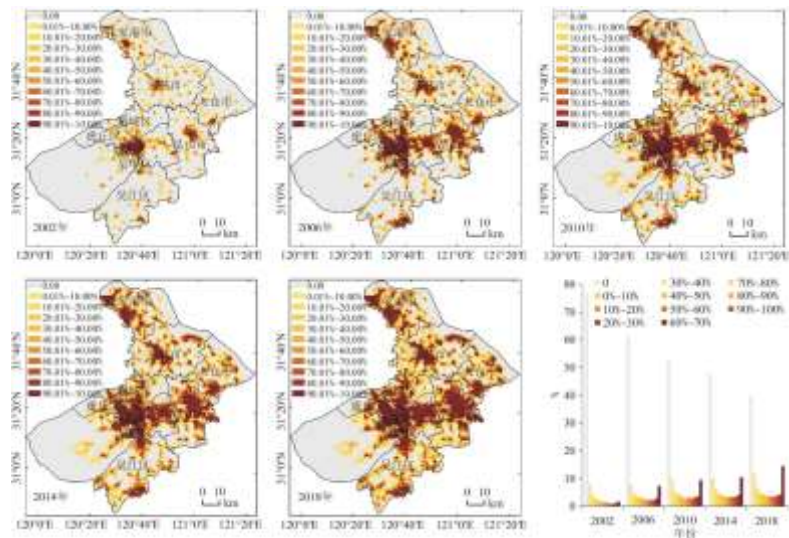


图3 苏州市格网化建成区时空分布及动态变化

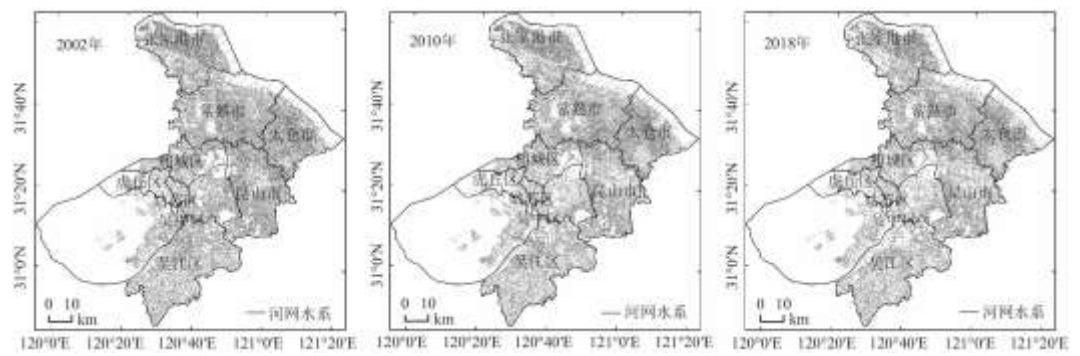


图4 苏州市河网分布

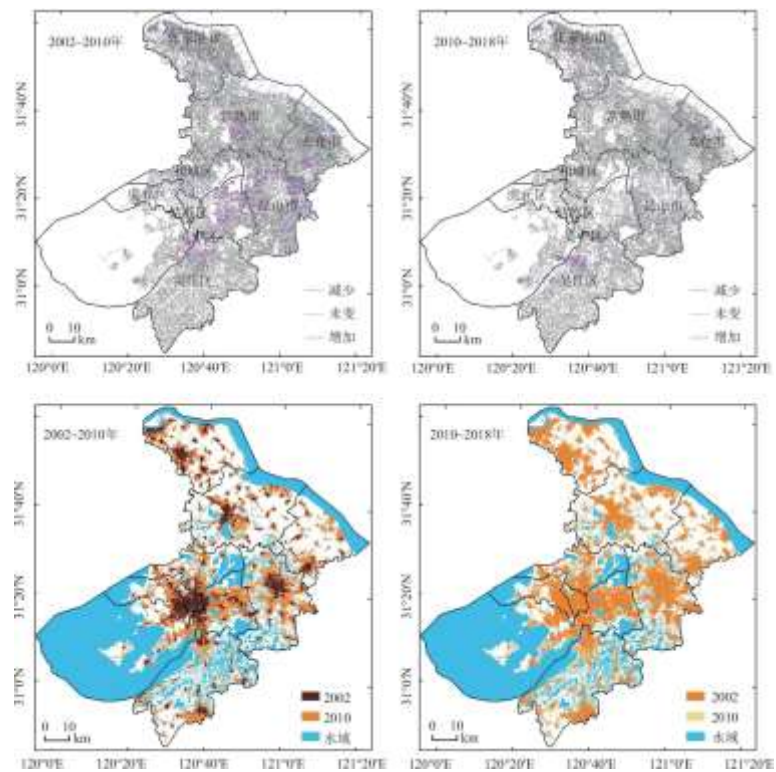


图5 苏州建成区扩展和河网水系变化阶段性对比

表3 苏州市河网长度变化

指标	2002	2010	2018	2002~2010 (I)			2010~2018 (II)		
				减少	未变	增加	减少	未变	增加
长度 (km)	23180. 17	20924. 14	20038. 44	2960. 99	20219. 19	705. 20	1192. 68	19731. 45	306. 98

表 4 苏州市不同时期水系特征变化

水系特征参数	2002	2010	2018	2002~2010 (I)	2010~2018 (II)	2002~2018 (III)
D_d (km/km ²)	2. 67	2. 41	2. 31	-0. 26	-0. 10	-0. 36
L_c (条)	59003	50568	47156	-8435	-3412	-11847
N (个)	50771	43519	40590	-7252	-2929	-10181
β	1. 16	1. 16	1. 16	0. 00	0. 00	0. 00
D	1. 73	1. 71	1. 71	-0. 02	0. 00	-0. 02

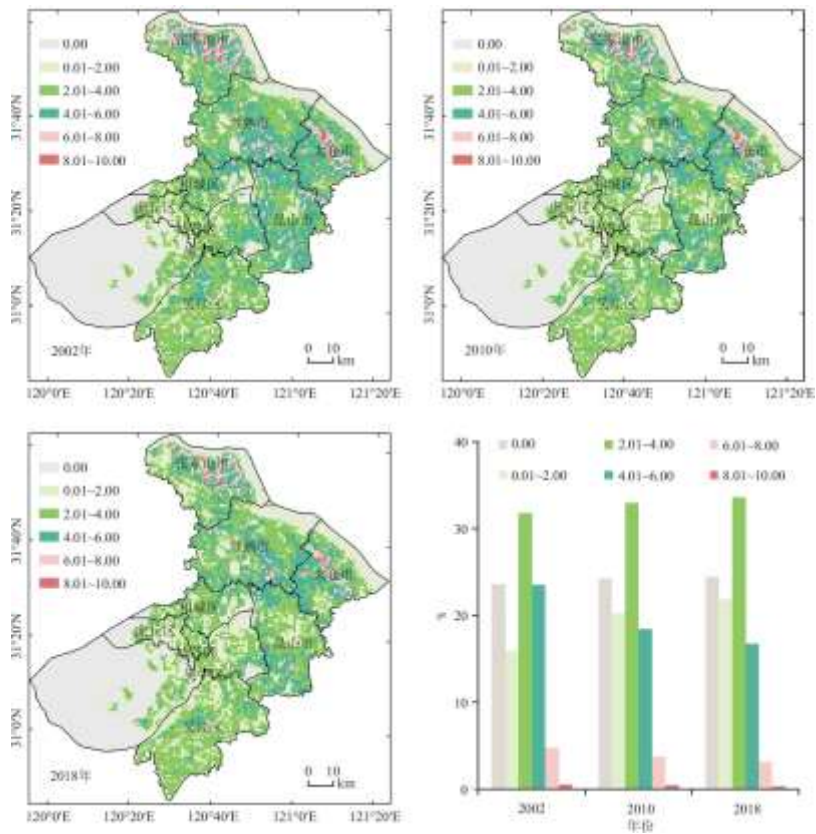


图 6 苏州市格网化河网密度时空分布和比例

表 5 苏州市各建成区扩展区域河网水系变化 (km)

格网中建成区增量所占比例	2002~2006 年		2006~2010 年		2010~2014 年		2014~2018 年	
	增加	减少	增加	减少	增加	减少	增加	减少
0%~10%	111. 98	350. 82	205. 75	761. 69	73. 05	334. 99	114. 32	386. 18

10%~20%	89.32	327.12	106.64	508.65	59.11	198.18	48.73	195.82
20%~30%	55.10	256.49	82.77	389.96	29.32	93.29	34.19	163.17
30%~40%	58.78	254.15	42.74	211.00	16.30	61.10	13.37	87.96
40%~50%	34.42	231.47	26.18	142.03	10.72	41.15	7.83	50.22
50%~60%	30.19	194.56	12.46	52.05	2.11	10.99	6.56	34.09
60%~70%	31.32	207.45	4.78	37.30	2.36	10.40	0.44	2.57
70%~80%	22.88	132.41	2.61	24.30	0.52	5.09	0.00	2.32
80%~90%	22.01	147.60	1.34	11.42	0.00	0.00	0.00	0.00
90%~100%	24.76	175.74	1.71	7.85	0.06	0.04	0.00	0.00

在 2002~2018 年期间, 涉及建成区扩展的格网比例分别为 37.72%、36.04%、27.94%和 48.88%。水系变化模式由集中于几个主要建成区的河网水系变化, 转变为较分散的河网水系变化。其中, 2002~2006 年、2006~2010 年各建成区格网单元内河网密度降低的空间分布相对均匀, 而 2010~2014 年、2014~2018 年则集中于建成区增量所占比例较低的网格单元内, 即主要发生于建成区边缘扩展区域。

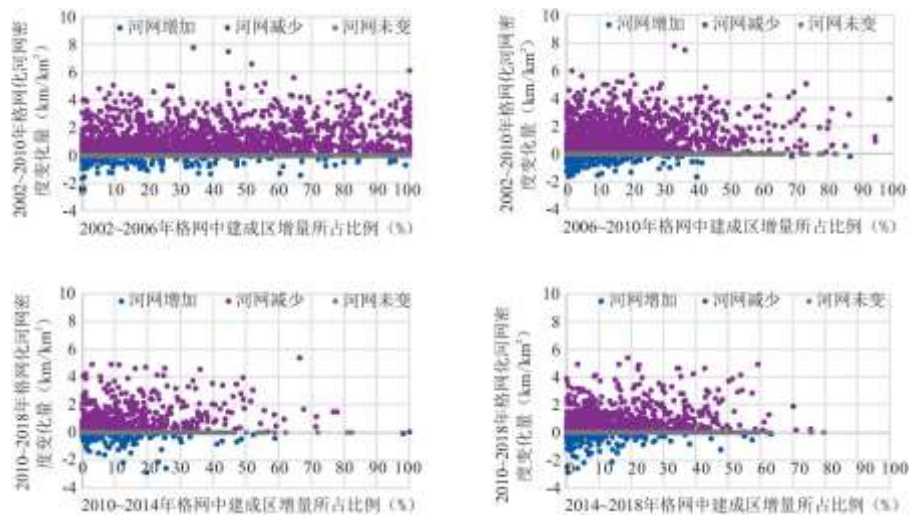


图 7 苏州市建成区扩展对河网水系变化影响

4 结论

本文量化提取苏州不同时空尺度的建成区和河网水系信息, 采用基于地理空间特征元素关系集成的垂直类比方法, 展开城市化进程中城市建设用地与河网水系分布的格局和动态变化关系的探讨, 分析了区域和格网单元的建成区扩展对河网水系变化影响, 以及水系特征参数的变化特征和规律。主要结论如下:

- (1) 苏州城市空间扩展特征已经从区域中心建成区放射型蔓延向多中心建成区放射型+网络化的蔓延方式改变。随着近几十

年城市规模持续加大，城市形态已经由原来仅受河网水系影响，逐步转变为主要受山地地形、湖泊和河网水系的共同影响。

(2) 苏州河网水系伴随建设用地扩展，密度持续降低，建成区以外的农田植被区河网水系分布格局未发生根本性改变。河网连接率未发生变化，连通性维持稳定，分形维数稍有降低，河网结构复杂性略有下降。其中，各阶段河网水系总长度保有率均超过 90%，2002~2010 年期间为 90.27%，2010~2018 年期间增加至 95.77%。

(3) 河网变化受建成区扩展影响明显。前期各建成区格网单元内水网密度降低空间分布较为均匀，后期主要发生于建成区边缘扩展区域，体现为河网变化由所有格网不同建成区增量比例整体的河网减少，转变为集中于较低建成区增量比例格网地区的河网减少。

城市建成区持续扩展改变着区域水热循环机制，是影响城市气候变化的重要因素之一，通过本文探讨，可以为遥感信息在城市生态系统的空间规划决策和遥感尺度效应的研究提供科学依据。

参考文献:

- [1] 邵玉龙, 许有鹏, 马爽爽. 太湖流域城市化发展下水系结构与河网连通变化分析——以苏州市中心区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1167-1172.
- [2] 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.
- [3] 傅春, 李云翊, 王世涛. 城市化进程下南昌市城区水系格局与连通性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(7): 1042-1048.
- [4] 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.
- [5] ZHANG S X, GUO Y K, WANG Z W. Correlation between flood frequency and geomorphologic complexity of rivers network: A case study of Hangzhou China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 113-118.
- [6] JI X M, XU Y P, HAN L F, et al. Impacts of urbanization on river system structure: A case study on Qinhuai River Basin, Yangtze River Delta[J]. Water Science and Technology, 2014, 70(4): 671-677.
- [7] XU Y P, XU J T, DING J J, et al. Impacts of urbanization on hydrology in the Yangtze River Delta, China[J]. Water Science and Technology, 2010, 62(6): 1221-1229.
- [8] YANG L, XU Y P, HAN L F, et al. River networks system changes and its impact on storage and flood control capacity under rapid urbanization[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(13): 2401-2412.
- [9] 韩昌来, 毛锐. 太湖水系结构特点及其功能的变化[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 300-306.
- [10] 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.
- [11] SONG S, ZENG L, WANG Y F, et al. The response of river network structure to urbanization: A multifractal

perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 221:377-388.

[12] DENG X J, XU Y P, HAN L F, et al. Impacts of urbanization on river systems in the Taihu Region, China[J]. Water, 2015, 7 (4) :1340-1358.

[13] 江燕, 薛丽芳, 于红学, 等. 近 30 年来南四湖流域城市化进程中的水系变化分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29 (1) :135-142.

[14] 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.

[15] 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]. 长江流域资源与环境, 2012, 21 (2) :151-156.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 徐羽, 许有鹏, 王强, 等. 太湖平原河网区城镇化发展与水系变化关系[J]. 水科学进展, 2018, 29 (4) :473-481.

[19] 林芷欣, 许有鹏, 代晓颖, 等. 城市化进程对长江下游平原河网水系格局演变的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (11) :2612-2620.

[20] 魏莹莹, 李一平, 翁晟琳, 等. 太湖流域城市化对平原河网水系结构与连通性影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32 (2) :553-563.

[21] 周峰, 吕慧华, 许有鹏. 城镇化下平原水系变化及河网连通性影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26 (3) :402-409.

[22] 林芷欣, 许有鹏, 代晓颖, 等. 城市化对平原河网水系结构及功能的影响——以苏州市为例[J]. 湖泊科学, 2018, 30 (6) :1722-1731.

[23] 吴雷, 许有鹏, 徐羽, 等. 平原水网地区快速城市化对河流水系的影响[J]. 地理学报, 2018, 73 (1) :104-114.

[24] 杨柳, 许有鹏, 田亚平, 等. 高度城镇化背景下水系演变及其响应[J]. 水科学进展, 2019, 30 (2) :166-174.

[25] 韩龙飞, 许有鹏, 邵玉龙, 等. 城市化对水系结构及其连通性的影响——以秦淮河中、下游为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25 (3) :335-341.

[26] 王大鹏, 王周龙, 李德一, 等. 太湖流域水系分形特征的空间分异研究[J]. 浙江水利科技, 2006, 34 (3) :5-7.