

近 30 年来南四湖流域城市化进程中的水系变化分析*

江 燕, 薛丽芳**, 于红学, 孟瑶瑶

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221000)

摘 要: 城市化对水系演化影响的研究国内目前多集中在快速、高速城市化地区, 而对大流域、城市化发展较缓地区的研究比较薄弱. 以南四湖流域为研究区, 基于 1987、2000 和 2014 年 3 期遥感影像, 分析了流域城市化进程中的下垫面变化特征; 选取流域 1980s、2003 和 2014 年的地形图进行水系提取, 从数量参数、结构参数和连通性参数 3 个角度分析近 30 年城市化进程中水系结构的时空变化特征. 结果表明: (1) 近 30 年来流域建设用地增加了 1568.06 km², 2000 年以后城市建设用地扩张显著, 2012 年流域人口城市化率为 32%; (2) 1980s—2010s 流域总河流长度、面积和河网密度均呈现出持续减少趋势, 分别减少了 135.46 km、2.75 km² 和 0.49 km/km², 各级河流表现出不同的变化特点, 较低等级河流受到的影响较大; 而流域水面率持续增加, 近 30 年共增加了 59.79%; (3) 流域水系总体上还保持着自然状态下的空间格局, 但结构特征发生了较大改变, 河网结构稳定度减少了 4.30%, 连接率和实际结合度分别减少了 21.82% 和 21.62%; 子流域内部距湖区越远的空间城市扩展强度指数值越大, 城市化对水系的影响越显著. 该研究将补充对不同空间尺度、不同城市化水平地区河网水系演化影响的案例, 并为研究区河网水系的保护提供支持与参考.

关键词: 城市化; 水系结构; 下垫面变化; 南四湖流域

Change of stream structure in the Nansi Lake Basin during the urbanization process since 1980s

JIANG Yan, XUE Lifang**, YU Hongxue & MENG Yaoyao

(The School of Resource and Geo-Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, P.R.China)

Abstract: Currently many studies have been conducted to analyze the impact of urbanization on the change of stream structure. However, most of them have concentrated on some developed areas, but the less developed urban areas have attracted few attentions. Taking Nansi Lake Basin as the investigation area, this study analyzed the change of stream structure during the urbanization process. The change of land surface was firstly extracted by using remote sensing images of 1987, 2000, and 2014. Based on the stream structure data derived from topographic maps in 1980s, 2003 and 2014, this study further analyzed the effect of urbanization on spatiotemporal change of stream structure in 30 years by adopting indicators of quantity, structure and connectivity, respectively. The results show that: (1) The construction land increased by 1568.06 km² during the past 30 years. The area of urban construction land has grown significantly since 2000. The percentage of urban population was 32% in 2012. (2) The whole river length, area and river density percentage have decreased by 135.46 km, 2.75 km² and 0.49 km/km², respectively during the study period. In addition, the impact of urbanization on stream structure varied spatially across the study area. The rivers at the low level experienced more significant change, while the water surface rates increase by 59.79% continuously. (3) Although the spatial pattern of stream remained unchanged, the stream structure varied significantly during the study period. The stability value of river network decreased by 4.30%, and the connection rate and the combination degree fell by 21.82% and 21.62%, respectively. Moreover, the urban expansion intensity has strong-positively impacted on the stream. The study helps in better understanding the impact of urbanization on stream structure at different spatial scales and urbanization levels, as well as to provide a valuable support and reference for stream protection.

* 国家自然科学基金项目(41201166)、江苏高校优势学科建设工程项目和国家级大学生创新训练计划项目(201510290045)联合资助. 2015-12-03 收稿; 2016-04-17 收修改稿. 江燕(1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: 837325863@qq.com.

** 通信作者; E-mail: xuel76@163.com.

Keywords: Urbanization; stream structure; land surface change; Nansi Lake Basin

城市化进程中下垫面性质的变化使得大量河流水系遭到破坏,进而引发一系列水资源与水环境问题,严重制约了城市和流域的可持续发展^[1-2]. 目前,国内关于城市化对水系河网演变影响的研究主要集中在高度城市化地区的城市或城市群流域尺度,如上海^[3-5]、深圳^[6-7]、杭州^[8]等城市流域,以及太湖^[9-12]、长三角^[13]等城市群流域. 这些地区面临的共性问题和研究成果为:近 30 年来城市不透水面积剧增,河网水系和水环境在快速城市化进程中承受了巨大的压力,一方面河网结构趋于简单化、主干化,河湖面积萎缩,连通度下降,河流健康受到严重损害;另一方面河流滞蓄洪涝水与水水质净化能力明显下降,洪涝灾害以及河流水质恶化问题严重.

城市化对水系河网的影响具有明显的区域性和阶段性特点,探索不同流域尺度、不同城市化背景下流域水系的时空特征,能更好地制定规划工作,为后期河网保护与管理、水资源利用与可持续发展、构建生态城市提供参考依据. 目前流域尺度下对水系河网演变的研究较少,仅有对快速发展的太湖流域、长三角地区的研究,而对其他城市化背景下流域水系演变的研究较少.

南四湖是一个复杂的大流域,是南水北调东线的重要调节湖泊之一,也是干旱和洪水频繁发生的流域. 流域内水系纵横交错,而城市化刚进入加速发展阶段,水系受自然和人为干扰发生较大改变. 结合城市化进程,定量分析流域河网水系的变化过程,探讨其变化因素,其成果可以补充城市化对水系结构影响的研究案例,也可以为南四湖流域的水资源管理与调蓄、防洪抗旱减灾、流域宏观治理和规划等研究提供参考.

1 研究区概况

南四湖流域(34°24'~35°59'N, 114°52'~117°42'E)是淮河流域的子流域,从鲁西南部地区向南延伸至苏北地区,范围北起大汶河南岸,南抵废黄河南堤,东至鲁中南低山丘陵区西侧边缘,西以黄河堤坝为界. 南四湖是由北向南连续分布的微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖 4 个相连湖的总称,湖区相互之间由自然和人工河道相连,是我国第六大淡水湖,也是南水北调东线工程中的重要调蓄水库之一. 流域包含 21 个子流域,总面积为 $3.17 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中水域面积约 1266 km^2 (图 1). 全流域以京杭大运河和南四湖为界,湖东为鲁中南低山丘陵和山前冲洪积平原,河流大多属于洪水型季节性河流,源短流急,洪水势猛而峰高;湖西为黄河中下游冲击而成的黄泛平原,大多河流为坡水型河流,河道宽浅,集流入湖缓慢,洪水量大而峰低. 流域入湖大小河流合计 53 条,年平均入湖径流量为 $29.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均出湖径流量为 $19.2 \times 10^8 \text{ m}^3$. 由湖西入湖的河流有 25 条,由湖东入湖的河流有 28 条.

南四湖流域历史上受河道袭夺的影响河网系统异常复杂,且人为干扰极其严重,流域水系具有特殊性,但是相关研究比较薄弱. 改革开放以来,流域社会经济得到一定程度发展,但是由于多种因素,一直滞后于沿海其他地区,是我国东部沿海经济发展的低谷区,2012 年流域城市化水平为 32%,低于同期山东省(41.5%)和全国(52.6%)的城市化水平. 与已经高度城市化地区城市化对自然水系造成较强的不可逆性特征相比,南四湖流域人水关系的可塑性比较大.

2 数据与研究方法

2.1 数据来源及处理

城市化进程主要基于土地利用变化特征来衡量,数据来源于 1987 年 9 月 16 日、2000 年 9 月 10 日、2014 年 5 月 12 日 3 个时期的 Landsat TM 4-5 影像 15 景,3 个时期各 5 景,空间分辨率均为 30 m. 遥感影像进行辐射校正、几何校正、直方图匹配、图像拼接和裁切及图像滤波和增强等一系列预处理工作,综合利用多种遥感影像解译处理方法,结合实际地物类型,以监督分类法为主,神经网络、机器学习等为辅,建立相对应的地物数据库,进行影像的解译分析,将土地利用类型解译为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地 6 大类,其中建设用地包括城镇建设用地、农村居民点和其他建设用地(图 2a). 3 期影响精度评价的 Kappa 值分别为 0.91、0.89 和 0.93,分类精度能满足研究要求.

水系结构的数据源为南四湖流域 1980s 的 1:100000 纸质地形图和 2003 年、2014 年的 1:100000 电子地

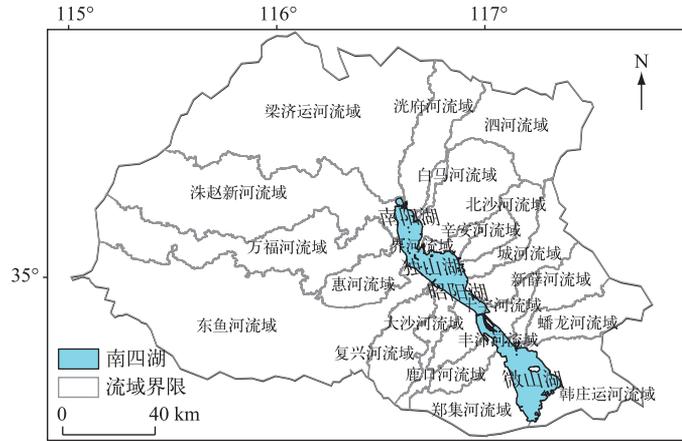


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

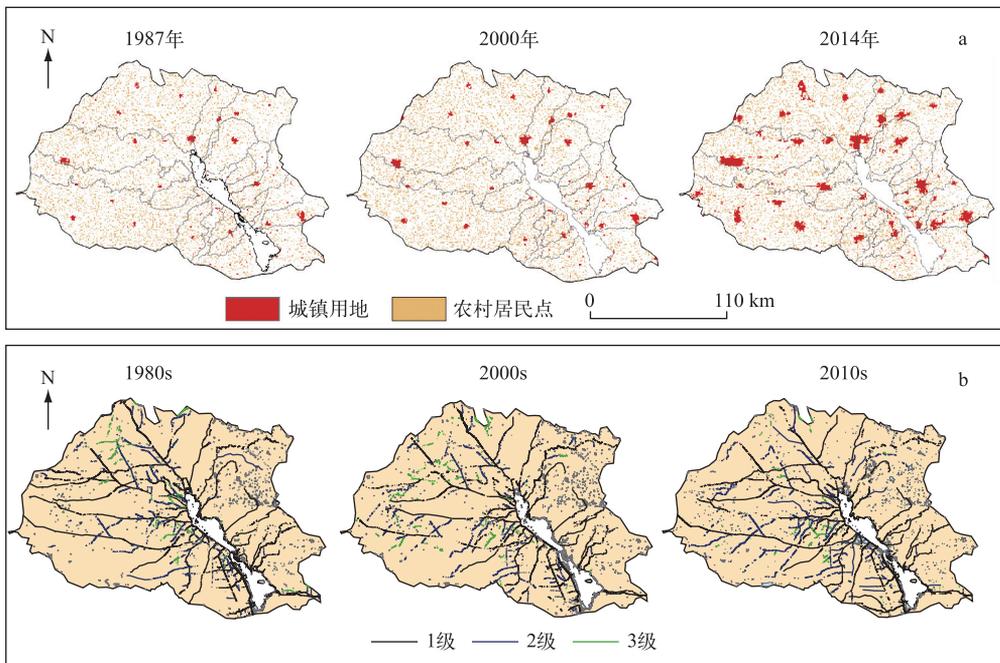


图 2 流域不同时期建设用地空间分布(a)和水系变化(b)

Fig.2 Spatial distribution of construction land (a) and the change of stream systems (b) in different periods

图. 对原始地形图进行矢量化, 经过对矢量数据的编辑、拓扑检查、构造 TIN, 最后生成分辨率为 30 m 的 DEM 图. 对生成后的 DEM 进行洼地填充、流域阈值划分、洼地匹配等过程, 提取 3 个时期的流域水系图. 基于 3 期遥感影像图、谷歌地图和实地考察等对所提取的水系图进行检验、修正, 最终得到流域的水系变化图 (图 2b), 其中湖泊、水库、池塘等为面状水系.

2.2 水系分级

南四湖流域湖西、湖东的河网类型不同, 给水系的分级造成一定的难度, 在实际的水系分级中主要考虑河网密度高的湖西地区的水系特征. 平原河网区的特点为河网交错密布, 河道之间汇入关系不清, 流向也常

常发生变化,加之高强度的人工干扰,河流改道现象普遍存在,并不存在明确的规律. 借鉴 Strahler 河流分级方案的思想 and 自然河流地貌学的分类方法^[14],参考已有文献中关于平原河网地区的河流分级研究^[15],最终确定根据河流宽度对流域水系进行分级:河宽大于 20 m 的河道定为 1 级、河宽 10~20 m 为 2 级、5~10 m 为 3 级. 3 级以下的河道在地形图和遥感影像中与农田中的灌渠等水利设施很难区分,文中不做统计. 河道的面积由长度乘以宽度得到,1、2 和 3 级河道的宽度分别取平均值 20、15 和 7.5 m.

2.3 参数指标

从数量参数、结构参数和连通性参数 3 个角度表达不同时期的河网特征:数量参数包括河网密度和河网水面率,反映水系河网的长度、面积等数量变化情况;结构参数包括河流发育系数、河网复杂度和河网结构稳定度^[10],反映各级河流构成与河流整体发育程度、结构稳定程度;连通性参数包括连接率 β 和实际结合度 γ ^[16],反映河网的通达度与空间上的连续程度. 城市化进程用城市扩展强度指数和城市建设密度表示^[17-18],各参数的含义及计算公式见表 1.

表 1 参数指标及说明
Tab.1 Parameters and instructions

| 分类 | 参数名称 | 公式 | 含义 | |
|-------|----------|--|--|--|
| 水系参数 | 数量参数 | 河网密度 | $DR=L_R/A$ | 单位面积上的河流总长度,表示河流长度发育状况 |
| | | 河网水面率 | $WP=A_W/A$ | 河道和湖泊多年平均水位下的水面积占区域总面积的比例 |
| | 结构参数 | 河流发育系数 | $K_W=L_W/L_m$ | 各级支流与干流的比值,反映各级河流的构成 |
| | | 河网复杂度 | $CR=N_C(L/L_m)$ | 单位河流面积上的河流长度,反映河网数量和长度的发育程度,值越大说明构成层次越丰富,支流水系越发达 |
| | 连通性参数 | 河网结构稳定度 | $SR_t = \frac{L_t/RA_t}{L_{t-n}/RA_{t-n}}$ ($n>0, t>n$) | 河道总长度和河道总面积的比值,衡量河网结构的稳定程度 |
| | | 连接率 | $\beta=L_C/N$ | 反映水网中每个节点连接的平均河链数,衡量一个节点与其他节点联系的难易程度 |
| 城市化参数 | 实际结合度 | $\gamma=L_C/3(N-2)$ | 河网中实际连接数量占可能存在的最大连接数量的比值,即水网的实际结合水平 | |
| | 城市扩展强度指数 | $E_t = \frac{\Delta A}{A} \times \frac{1}{T} \times 100\%$ | 单位时间内新增的城市建设用地面积占区域总面积的比值 | |
| | 城市建设密度 | $I_{ii} = \frac{Ab_{ii}}{A_{ii}} \times 100\%$ | 城市建设用地面积占区域总面积的比值 | |

3 结果与分析

3.1 流域城市化进程

用城市建设用地比重这一比较直观的指标作为城市化的评价指标. 近 30 年来,流域总体的城市化进程比较缓慢,落后于东部沿海发达地区. 1987—2014 年流域建设用地增加了 1568.06 km²,其中城市建设用地面积增加了 1120.54 km²,增加幅度较大(表 2). 到 2014 年流域建设用地面积为 5435.87 km²,占总面积的 14.21%,其中城市建设用地占 1.32%,农村建设用地占 12.74%. 1987—2000 年流域城市化发展缓慢,城市建设密度只增加了 0.53%,城市扩展强度指数为 0.04;2000—2014 年流域城市扩张显著,城市建设密度增加了 3.58%,城市扩展强度指数达到 0.26.

建设用地的空间分布直观地显示了城市的发展变化(图 2). 农村建设用地布局分散,约占流域总面积的 68%,受地形的影响,湖西的布局密度大于湖东,近 30 年来用地格局变化不大. 城市建设用地呈较明显的集聚和外延扩张趋势. 1987 年城市建设用地少且零散;2000 年面积较大的城市用地斑块蔓延扩张,东南部

出现少量新增斑块;2014 年城市建设用地扩张显著,原有集中分布的大斑块区域均以不规则外扩的方式大幅度向外蔓延,湖西各中心建成区之间增加了很多较小的斑块,湖东原来离散分布的较小斑块面积也有所增大,并与集中分布的大斑块逐渐连接成片. 城市建设用地和农村建设用地布局从点到面共同对流域水系变化产生影响.

表 2 南四湖流域不同时期建设用地面积及扩展强度

| 指标 | 1987 年 | 2000 年 | 2014 年 |
|--------------------------|---|---------|---------|
| 城市建设用地面积/km ² | 358.38 | 503.08 | 1478.92 |
| 城市建设密度/% | 1.32 | 1.85 | 5.43 |
| 农村建设用地面积/km ² | 3467.28 | 3677.11 | 3714.23 |
| 城市扩展强度指数 | 0.04(1987—2000 年) 0.26(2000—2014 年) 0.15(1987—2014 年) | | |

3.2 流域水系的时空变化特征

3.2.1 水系数量特征 受气候和人类活动的影响,流域水系的数量呈现较明显的阶段性特征. 1980s 受人类活动影响较小,流域河网水系基本能保持自然状态,水系较发达;2000s 以后,河流总长度、面积有所减少,河网密度降低;2010s 河网密度持续减少,但降水较丰沛,河网水系基本无断流现象(图 2).

随着城市发展,近 30 年来南四湖流域河流长度和面积均呈现出持续减少趋势,1980s—2010s 期间分别减少了 135.46 km 和 2.75 km²,河网密度随之下降. 各级河流的变化特点不同:1 级河流长度和面积持续减少,分别减少 195.17 km 和 3.9 km²;2 级河流长度和面积持续增加,分别增加 110.75 km 和 1.66 km²;3 级河流长度和面积总体上呈持续减少趋势,表现出先增后减特征,总体上分别减少了 51.04 km 和 2.75 km²;除 1 级河流外,2、3 级河流的长度和面积在 2000s—2010s 期间变化幅度均大于 1980s—2000s 阶段(表 3).

面状水系面积呈增加趋势. 近 30 年湖泊、水库面积增加了 159.72 km². 不同阶段变化幅度相差较大,2000s—2010s 阶段变化幅度(增加 126.67 km²)远大于 1980s—2000s 阶段(增加 33.05 km²),相差约 4.8 倍. 受面状水系面积增加的驱动,流域水面率持续增加(表 3).

表 3 南四湖流域不同时期水系数量特征

| 河流等级 | 1980s | | 2000s | | 2010s | | 1980s—2000s | | 2000s—2010s | | 1980s—2010s | |
|----------------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
| | 长度/km | 面积/km ² | 长度/km | 面积/km ² | 长度/km | 面积/km ² | 长度/km | 面积/km ² | 长度/km | 面积/km ² | 长度/km | 面积/km ² |
| 1 级 | 1564.22 | 31.28 | 1396.57 | 27.93 | 1369.05 | 27.38 | -167.65 | -3.35 | -27.52 | -0.55 | -195.17 | -3.90 |
| 2 级 | 728.38 | 10.93 | 736.08 | 11.04 | 839.13 | 12.59 | 7.70 | 0.12 | 103.05 | 1.55 | 110.75 | 1.66 |
| 3 级 | 202.25 | 2.02 | 294.07 | 2.94 | 151.21 | 1.51 | 91.82 | 0.92 | -142.86 | -1.43 | -51.04 | -0.51 |
| 总体 | 2494.85 | 44.23 | 2426.72 | 41.91 | 2359.39 | 41.48 | -68.13 | -2.31 | -67.33 | -0.43 | -135.46 | -2.75 |
| 面状水系面积/km ² | 221.17 | | 254.22 | | 380.89 | | 33.05 | | 126.67 | | 159.72 | |
| 河网密度/(km/km ²) | 9.15 | | 8.90 | | 8.66 | | -0.25 | | -0.24 | | -0.49 | |
| 水面率/% | 0.97 | | 1.09 | | 1.55 | | 0.12 | | 0.46 | | 0.58 | |

3.2.2 水系结构和连通性变化 近 30 年来,流域水系总体上还保持着自然状态下的空间格局,但是水系的结构特征发生一定的变化(表 4),表现为:1)河网复杂度呈现出微弱的增加趋势,1980s—2000s 增加了 8.95%,2000s—2010s 略有下降,减少了 0.82%. 2)河网的干支流比例结构发生变化,2 级河流的发育系数表现出持续增加趋势,1980s、2000s 和 2010s 分别为 0.47、0.53 和 0.61;3 级河流的发育系数则呈现出先增后减的变化趋势,1980s、2000s 和 2010s 分别为 0.13、0.21 和 0.11. 3)河网结构稳定度呈下降趋势,由 2000s 的 1.03 下降到 2010s 的 0.98.

流域河链数与节点数均呈现出大幅减少趋势. 其中, 1980s—2000s 阶段河链数和结点数年均减少速率分别为 60.23 条/a 和 7.31 个/a, 2000s—2010s 阶段为 7.31 条/a 和 90.50 个/a. 到 2010s 河链数和结点数仅为 1969 条和 2277 个, 与 1980s 相比, 分别减少 2039 条和 1362 个. 同时, 连接率和实际结合度持续下降, 1980s—2010s 阶段连接率和实际结合度分别减少了 0.24 和 0.08(表 4). 说明随着城市扩张, 河流连通性受到影响, 原来纵横交错的河网逐渐改变, 河道之间连通程度持续降低.

表 4 南四湖流域不同时期水系结构和连通性变化

Tab.4 Changes of river structure and stream connectivity in the Nansi Lake Basin during different periods

| 河流等级 | | 1980s | 2000s | 2010s | 1980s—2000s | 2000s—2010s |
|--------|-----|-------|-------|-------|-------------|-------------|
| 河流发育系数 | 2 级 | 0.47 | 0.53 | 0.61 | 13.19% | 16.29% |
| | 3 级 | 0.13 | 0.21 | 0.11 | 62.85% | -47.55% |
| 河网复杂度 | | 4.78 | 5.21 | 5.17 | 8.95% | -0.82% |
| 结构稳定度 | | — | 1.03 | 0.98 | — | -4.30% |
| 河链数 | | 4008 | 3225 | 1969 | -783 | -1256 |
| 结点数 | | 3639 | 3544 | 2277 | -95 | -1267 |
| 连接率 | | 1.10 | 0.91 | 0.86 | -0.19 | -0.05 |
| 实际结合度 | | 0.37 | 0.30 | 0.29 | -0.07 | -0.01 |

3.2.3 水系空间变化 湖东地区城市发展速度大于湖西地区. 湖西地区 1987—2000 年、2000—2014 年阶段平均城市扩展强度指数分别为 0.03、0.24, 至 2014 年城市建设用地面积达到 90.70 km²; 湖东地区 1987—2000 年、2000—2014 年阶段平均城市扩展强度指数分别为 0.05、0.29, 至 2014 年城市建设用地面积达到 51.91 km². 就水系参数而言, 湖西河网密度、水面率、河网复杂度和结构稳定度均高于湖东, 分别相差 0.13、0.31%、2.26 和 0.27(表 5). 说明城市发展较快的湖东地区, 河网水系受到的影响较大, 与城市发展程度呈正比.

就子流域而言, 呈现出以下变化特征: 1) 南四湖流域的 21 个子流域城市化水平较低, 1987—2000 年城市发展普遍缓慢, 城市扩展强度指数最大值仅为 0.13(十字河流域); 2000—2014 年城市扩张显著, 7 个子流域的城市扩展强度指数超过 0.3. 2) 子流域内部距湖区越远的空间城市扩展强度指数值越大, 城市化对水系的影响越显著. 将 2000—2014 年的城市扩展强度指数值按 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.8 进行划分可知, 1980s—2010s 期间 3 类子流域的河网密度变化率分别为 14.47%、-17.21% 和 -24.23%, 河网稳定度的变化率分别为 -2.01%、-2.20% 和 -5.16%, 与城市扩展强度指数值呈反比, 即城市化程度越高, 水系受到的影响越显著.

表 5 南四湖子流域不同时期城市扩展强度指数与水系参数变化

Tab.5 Changes of urban expansion intensity index and river parameters in the Nansi Lake Basin during different periods

| 区域 | 城市扩展强度指数 | | 河网密度 | | | 水面率 | | | 河网复杂度 | | | 河网结构稳定度 | |
|----|-------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| | 1987—2000 年 | 2000—2014 年 | 1980s | 2000s | 2010s | 1980s | 2000s | 2010s | 1980s | 2000s | 2010s | 2000s | 2010s |
| 湖西 | 0.03 | 0.24 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 1.32% | 1.90% | 2.93% | 5.35 | 5.51 | 5.39 | 1.01 | 0.98 |
| 湖东 | 0.05 | 0.29 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 1.64% | 1.68% | 1.89% | 3.55 | 2.68 | 3.25 | 0.74 | 0.73 |
| | | 0~0.2 ¹⁾ | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 1.60% | 2.25% | 2.57% | 4.40 | 3.66 | 3.57 | 0.79 | 0.77 |
| | | 0.2~0.4 ²⁾ | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 1.17% | 0.99% | 1.72% | 4.95 | 5.22 | 5.26 | 1.01 | 0.99 |
| | | 0.4~0.8 ³⁾ | 0.11 | 0.08 | 0.08 | 1.64% | 1.89% | 2.77% | 3.87 | 3.40 | 4.32 | 0.84 | 0.80 |

1) 2000—2014 年城市扩展强度指数值为 0~0.2 的子流域有界河流域、辛安河流域、韩庄运河流域、惠河流域、郑集河流域、大沙河流域、鹿口河流域、泗河流域和万福河流域; 2) 2000—2014 年城市扩展强度指数值为 0.2~0.4 的子流域有梁济运河流域、北沙河流域、复兴河流域、新薛河流域、东鱼河流域和白马河流域; 3) 2000—2014 年城市扩展强度指数值为 0.4~0.8 的子流域有洙赵新河流域、城河流域、洸府河流域、十字河流域、蟠龙河流域和丰沛河流域.

3.3 水系变化的原因分析

1980s 以来,气候以及水利工程、城市化、生态环境整治工程等人类活动共同影响南四湖流域河网水系的变化。

气候因素上,2010s 的流域平均降水比前两个年代增加近 80 mm。降水量的增加使得水系参数,如湖泊、水库面积以及水面率增加,同时也缓解了各级河道的断流、枯流状况。

下垫面变化上,近 30 年来,流域建设用地面积增加了 1568.06 km²,遥感影像中解译出来的流域 259 个城镇用地斑块中,有 46% 布局在距离 1、2 级河流 0~2 km 的范围内,城镇空间扩展使得河道缩窄、低等级河道被填埋消失,河流长度面积、河网密度、河网复杂度和结构稳定度有一定程度的降低。城市化初期人类活动影响较小,水系变化不显著;随着城市化的进一步发展,影响增加,水系变化逐渐显著。但流域的城镇化水平总体较低,对河网水系的整体影响不大。

除了城市化导致的下垫面变化外,影响南四湖流域河网水系的人类活动中更多地表现为水利工程和生态环境治理。1980s 以来,为了解决防洪排涝问题,各主要河道都进行了以提升排涝标准为目的的干、支流河道疏浚、开挖与治理工程,主要河流的防洪标准均由 10 年一遇提高到 20~50 年一遇。这些水利工程使得流域 2、3 级河流的长度和面积呈增加趋势。

4 结论

1) 近 30 年来流域建设用地增加了 1568.06 km²,1987—2000 年城市化进程发展缓慢,2000—2014 年城市建设用地扩张显著;2012 年流域城市率为 32%,城市化水平较低。

2) 流域总河流长度、面积和河网密度均呈现出持续减少趋势,1980s—2010s 期间分别减少了 135.46 km、2.75 km² 和 0.49 km²/km²。各级河流表现出不同的变化特点:在城市发展较快的 2000s—2010s 期间,1 级河流变化较小(长度和面积分别减少 27.52 km 和 0.55 km²),2、3 级河流变化较大(河流长度分别变化了 103.05 km 和 142.86 km),即较低等级河流受到城市化的影响较大。而流域水面率呈持续增加趋势,1980s、2000s、2010s 分别为 0.97%、1.09% 和 1.55%。

3) 流域水系总体上还保持着自然状态下的空间格局,但河流结构特征发生了较大改变,河网结构稳定性和连通度均呈现出削弱趋势,河网结构稳定度降低了 4.30%,连接率和实际结合度分别减少了 21.82% 和 21.62%。同时,子流域内部距湖区越远的空间城市扩展强度指数值越大,城市化对水系的影响越显著。将 2000—2014 年的城市扩展强度指数值划分成 3 个等级后,1980s—2010s 期间河网密度变化率分别为 14.47%、-17.21% 和 -24.23%,河网稳定度变化率分别为 -2.01%、-2.20% 和 -5.16%。

与高度城市化的城市流域相比,总体结论基本一致^[8-9],表明整体城市化水平较低的南四湖流域,也出现河网数量与结构特征衰退的趋势。参照快速城市化地区河网演化发展规律,若不采取积极的保护性措施,当城市进入快速乃至高速发展阶段,河网水系受到的影响将愈加显著。因而,实施与城市化同步的水系健康保护是必然的选择。

5 参考文献

- [1] Xu Guanglai, Xu Youpeng, Xu Hongliang. Advance in hydrologic process response to urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(12): 2171-2178. DOI: 10.11849/zrzyxb.2010.12.018. [徐光来, 许有鹏, 徐宏亮. 城市化水文效应研究进展. 自然资源学报, 2010, **25**(12): 2171-2178.]
- [2] Liu Zhenhuan, Li You, Peng Jian. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment. *Progress in Geography*, 2011, **30**(3): 275-281. DOI: 10.11820/dlkxjz.2011.03.003. [刘珍环, 李猷, 彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展. 地理科学进展, 2011, **30**(3): 275-281.]
- [3] Cheng Jiang, Yang Kai, Zhao Jun et al. Variation of river system in center district of Shanghai and its impact factors during the last one hundred years. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, **27**(1): 85-91. [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. 地理科学, 2007, **27**(1): 85-91.]
- [4] Chen Dechao, Li Xiangping. The evolution of river network in the Shanghai under the urbanization development. *Urban Problems*, 2002, (5): 31-35. DOI: 10.13239/j.bjsshkxy.cswt.2002.05.008. [陈德超, 李香萍. 上海城市化进程中的河

- 网水系演化. 城市问题, 2002, (5): 31-35.]
- [5] Yuan Wen, Yang Kai, Xu Qixin. Effect of urbanization on growth of shanghai river function and stream structure. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(2): 133-138. [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. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(2): 133-138.]
- [6] 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.]
- [7] Huang Yilong, Wang Yanglin, Liu Zhenhuan *et al.* Stream construction characteristics in rapid urbanization area: Shenzhen city as a case. *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——以深圳市为例. 地理研究, 2008, **27**(5): 1212-1220.]
- [8] Yang Mingnan, Xu Youpeng, Deng Xiaojun *et al.* River system change characteristics of urban central area in plain river network region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(5): 263-266. [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. 水土保持通报, 2014, **34**(5): 263-266.]
- [9] Wang Liuyan, Xu Youpeng, Yu Mingjing. Analysis of the urbanization effect on the Taihu plain river network—A case study of Wuchengxiyu region of Taihu basin. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2012, **21**(2): 151-156. [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. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(2): 151-156.]
- [10] Shao Yulong, Xu Youpeng, Ma Shuangshuang. Change of river structure and stream network connectivity in the Taihu Lake basin under the urbanization development—A case study in urban Suzhou. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(10): 1167-1172. [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. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(10): 1167-1172.]
- [11] Xu Hui, Lei Yifan, Fan Yinghua *et al.* Assessment of the interconnection demand of the river-lake system in the Lake Taihu basin. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 324-329. DOI:10.18307/2013.0302. [徐慧, 雷一帆, 范颖骅等. 太湖河湖水系连通需求评价初探. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 324-329.]
- [12] Shao YL, Xu YP, Ma SS. The study of land use change on the landscape impact of urban water in Taihu Lake Basin—A case study in Urban Suzhou. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **209**: 325-330. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.209-211.325.
- [13] Han Longfei, Xu Youpeng, Yang Liu *et al.* Temporal and spatial change of stream structure in Yangtze River Delta and its driving forces during 1960s-2010s. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(5): 819-827. DOI: 10.11821/dlxb201505012. [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. 地理学报, 2015, **70**(5): 819-827.]
- [14] 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.]
- [15] Li Changfeng, Feng Xuezhi, Zhao Rui. The methods and application of automatically extracting stream network of watershed. *J Lake Sci*, 2003, **15**(3): 205-212. DOI:10.18307/2003.0303. [李昌峰, 冯学智, 赵锐. 流域水系自动提取的方法和应用. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 205-212.]
- [16] Han Longfei, Xu Youpeng, Shao Yulong *et al.* Effect of urbanization on the stream structure and connectivity—A case study in the mid-lower reaches of the Qinhuai River. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 335-341. DOI: 10.18307/2013.0304. [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. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 335-341.]
- [17] Liu Deng'e, Chen Shuang. Diffusion and aggregate process of urban pattern in Suzhou, Wuxi and Changzhou cities over the recent 30 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, **32**(1): 47-54. [刘登娥, 陈爽. 近30年来苏锡常城市增长形态过程与聚散规律. 地理科学, 2012, **32**(1): 47-54.]
- [18] Li Xiaowen, Fang Jingyun, Piao Shilong. The intensity and modes of urban landuse growth in Shanghai. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(4): 412-422. [李晓文, 方精云, 朴世龙. 上海城市用地扩展强度、模式及其空间分异特征. 自然资源学报, 2003, **18**(4): 412-422.]