

景观空间结构分析在城市水系规划中的应用

徐 慧 , 徐向阳 , 崔广柏

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 作为城市重要的生态基础设施, 河流与水系的功能正常发挥与否取决于其结构特征以及格局的完善程度, 而水系规划对城市河流结构与水系格局的改善具有关键作用。运用景观生态学关于廊道与网络的分析方法, 将河流与水系看作水景观元素中的廊道和网络, 通过计算和比较水系规划前后河流廊道与水系网络的一些指标, 反映河流结构和水系网络特征的变化情况, 以此评价水系规划的科学性和合理性, 揭示水系规划在改善城市河流廊道的空间结构和提高水系网络的连接度方面的景观生态学本质; 并以太仓市水系规划为例进行了研究。结果表明, 规划后全市水系网络的连结数与最大可能连结数之比(C)和网络中实际环路数与最大可能出现环路的比值(R)指数值分别比现状提高了 30% 和 119%, 河流廊道的空间结构得到了明显改善。对四个水利片区的研究发现各区的 C 和 R 值具有较为明显的空间差异, C 和 R 值表现为现状指标值越低、城市化影响越强烈的地区, 规划后其值提高的幅度越大。

关键词: 城市水系规划; 河流廊道; 水系网络; 网络连接度

中图分类号: TV212.5; Q149 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2007)01-0108-06

城市水系格局不仅是城市总体规划和一些以城市水系为主要规划对象的各涉水专业规划的基础, 而且它对河流水系的水生态、水景观、水环境、水安全等功能的正常发挥具有关键作用。然而, 一方面, 由于受到城市化过程中剧烈的人类活动的干扰, 城市河流成为人类活动与自然过程共同作用最为强烈的地带之一^[1], 城市的功能片区、交通组织、市政工程的建设以及筑坝、取水、分流、裁弯取直、堵塞汊流及河岸(道)的固化、河岸植被带的破坏等使城市水系受到很大冲击, 水系被填埋、侵占和污染的现象十分严重^[2], 研究显示全球 60% 的河道因城市化发生了深刻的改变, 城市化已经成为改变河流结构发育演变的重要因素^[3], 有必要制定科学合理的水系规划来指导城市水系整治与建设的实践; 另一方面, 在传统水利向现代水利及工程水利向资源水利、生态水利观念转变的过程中, 在城市水系规划的实际工作中, 也常常会面临这样的困惑: 城市水系规划应遵循哪些原则, 如何衡量水系规划的科学性等等。近年来, 景观生态学在土地利用规划、城市规划与管理、流域规划和管理等方面得到了广泛的应用^[4,5], 它尤其注重研究景观的结构和功能、景观动态变化以及相互作用的机理, 景观的合理利用和保护等问题^[6,7], 可为城市水系规划提供理论基础和方法指导。

本文从景观生态学的基本原理和方法出发, 将河道和水系纳入景观结构要素中, 运用景观生态学对景观要素的定量分析功能, 通过河流廊道与水系网络结构指标的分析与对比, 揭示城市水系规划的景观生态学实质, 并以江苏省太仓市的水系规划为例进行实证研究, 从理论与实践两方面指出景观生态学理论和方法对水系规划的指导意义, 旨在提高水系规划的科学性与合理性。

1 原理与方法

1.1 河流廊道的度量指标

河流廊道是指河流本身以及沿河流分布而不同于周围基质的植被带^[8], 它包括河道、河道两侧的河漫滩、堤坝和部分高地。河流廊道是重要的生态廊道之一, 它不仅发挥着重要的生态功能如栖息地、通道、过滤、屏障、

收稿日期: 2005-08-15; 修订日期: 2006-01-06

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50239030)

作者简介: 徐 慧(1969-), 女, 江苏大丰人, 副教授, 博士, 主要从事水生态、水景观与景观生态规划研究。

E-mail: njxh@hhu.edu.cn

源和汇的作用等，而且为城市提供水源保证和物资运输通道、生物保护与景观等多种生态服务功能，以其巨大的自然、社会、经济与环境价值推动了城市的发展，为城市的稳定性、舒适性、可持续性提供了一定的基础^[1,9]。

河流廊道空间结构特征的度量分析指标主要包括廊道长度和宽度、廊道曲度、廊道连通性、廊道的宽长比、廊道的周长面积比、廊道密度指数、廊道非均匀度和间断等^[10]。长度与宽度指标描述河流廊道的线性特征，它们均随河流的大小而变化。长度确定廊道与基质接触的程度，宽度确定廊道对基质的干扰和对动植物阻隔的程度，宽度效应对河流廊道的性质起重要的控制作用。曲度即廊道的弯曲程度，它对景观中的物流、能流起重要作用。弯曲的河道与自然或人工取直后的河道对岸线侵蚀、航运、生态等方面的影响明显不同。裁弯取直后河流长度减少，河岸侵蚀和水质污染加剧，泥沙淤积加重，河流生态功能退化。连通性是指廊道的空间连续程度，它可用廊道单位长度上间断点的数量来表示。廊道有无断开是确定其通道和屏障功能效率的重要因素，因此连通性是廊道结构的主要度量指标^[11]，与河流廊道的功能发挥有重要关系。间断是连续分布的廊道沿线的一些断开区。周长面积比是判定廊道形状的主要指标，与景观中的其他斑块相比，河流廊道具有较大的周长面积比。密度指数指廊道景观在研究区单位面积内的长度，它主要描述廊道的疏密程度。

1.2 水系网络的度量指标

河流廊道相互交叉，交叉点称为结点。河流廊道与结点相连，互连的廊道构成水系网络。水系网络的空间分析指标有连通性、环度、网络结点、网状格局、网眼大小以及廊道密度等^[12]。网络连接度是廊道与系统内所有结点的连接程度，目前主要采用 C 和 C_{max} 指数来计算^[10]。

C 指数是网络的连接线数与最大可能连接线数之比，即

$$C = L/L_{max} = L/3(V - 2) \quad (V \geq 3, V \leq N) \quad (1)$$

式中 L 为连接线数； L_{max} 为最大可能连接线的数目； V 为结点个数； C 指数的取值范围从 0 到 1.0，0 表示各结点之间互不连接，1.0 表示每个结点都与其他结点相联系，该指数越大表明网络的连接度越好。

C_{max} 指数是连接网络中现有结点的环路存在程度，又称环(通)度(circuitry)。它用网络中实际环路数与最大可能出现环路的比值来表示，即

$$C_{max} = (L - V + 1)/(2V - 5) \quad (V \geq 3, V \leq N) \quad (2)$$

式中 L 为连接线数； V 为结点个数； C_{max} 指数的取值范围在 0 到 1.0 之间变化。0 表示网络无环路，1 表示网络具有最大环路。环路是指能为物流提供选择性路线的环线。网络内部“流”的作用可用来表征网络的功能，改善景观网络结构，提升景观功能^[13]。

河流廊道功能的正常发挥既与其起源、受干扰的强度和范围、功能的变化有关，又与其宽度、连接度、弯曲度以及网络连通性等结构特征有密切关系，从而使河流廊道对城市景观的生态过程带来不同的影响。在城市水系规划中，采用定性与定量相结合的方法，通过对河流结构特征的分析以及 C 、 C_{max} 指数的计算，可以发现现状河流廊道存在的问题，找出需要完善和提高的地方，比较水系网络在规划前后复杂程度的变化。

1.3 城市水系规划的流程

城市水系规划是对市域范围内的现状水系格局进行重新调整和构建，使河流廊道和水系网络的结构和格局更加合理。目前城市水系受人类活动的干扰，原始自然的格局早已被打破，不符合城市发展的要求，需要制定科学合理的水系规划来引导水系调整与建设的实践。一个科学、合理的水系规划应在展开更全面的河流结构、功能和动态变化以及河流与其他自然要素之间相互作用关系的分析，以及在河流廊道空间结构和水系网络连接度分析的基础上编制形成。水系规划的基本流程如图 1 所示。

2 研究案例——以太仓市为例

2.1 研究区概况

太仓市位于苏南长江三角洲地区，境内河道纵横交错，水网密布，属于平原河网地区，全市总面积 822.91 km²。根据河道的规模、流经地区及其被管辖的级别，将全市河道分为区域性河道、市级河道、镇级河道和重

要村级河道四级。其中,区域性河道4条,总长度100.74 km,是太仓市河网中规模最大的河流,也是重要的骨干航道,它们担负着阳澄淀泖区的主要引排任务,在太仓市的水资源、水环境、防洪排涝、水生态、水景观中起着非常重要的作用;市级河道12条,总长度176.16 km,河道宽度为30~50 m,它们主要担负太仓市的引排及水系沟通作用;镇级河道143条,河道宽度多在20 m左右,总长度422.23 km,它们主要起区域水系沟通和引排作用;重要村级河道1321条,总长度1312.10 km,大部分村级河道的断面尺寸较小,有些河道仅几米宽,它们对河网调蓄能力起一定作用。由于规划尺度为整个市域,因此纳入本次水系规划的河道的尺度级别为全部区域性河道和市级河道以及部分重要镇级河道,它们共同构成太仓市的骨干水系。

2.2 现状水系的景观生态分析

(1) 河流廊道结构特征分析 图2是对现状骨干水系网络进行概化后的结果。根据太仓市河网特点、自然地理条件、水资源开发利用情况,将全市水系分为四个水利

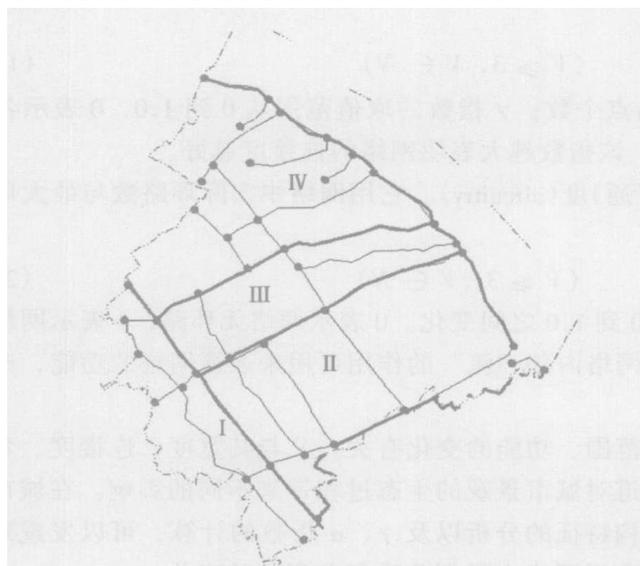


图2 太仓市现状水系及片区概化图

Fig. 2 Simplified map of Taicang's present key river system and its diversion area

片区,分别以I、II、III和IV表示(图2)。现状骨干水系网络共有横向河道9条,长度206.6 km,河宽平均为33.58 m,河道的周长面积比为 $0.06 \text{ m}^2/\text{m}^2$;纵向河道7条,长度244.91 km,河宽平均为16.13 m,河道的周长面积比为 $0.12 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。骨干河道总长度为462.27 km,横向河道宽度远高于纵向河道,其周长面积比是纵向河道的一半。从图2可看出,现状水系网络疏密不均,河流廊道断口较多,共有5处断开,连通度有待提高。从图中还可看出,各个片区河流廊道的长度、密度、连通性、水面率相差很大,具有明显的空间不平衡特点。这主要是由于人类活动对这4个片区的水系功能的要求不同造成的。

2.3 规划方案

规划在充分尊重太仓市原有水系网络格局的基础上,以现有区域、市级河道以及镇级、重要村级河道为基础建立骨干河网,通过分析河流廊道的结构特点、功能和现状水系网络的连接度和复杂程度,从防洪排涝、水

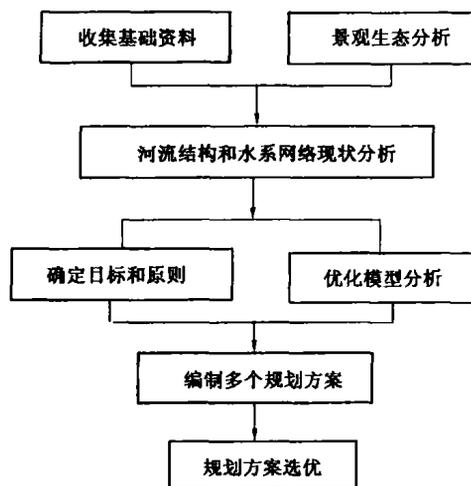


图1 城市水系规划流程图

Fig. 1 Flowchart of city river system planning

片区的连通度 根据式(1)、式(2)和图2,分别计算太仓市全市和各个水利片区现状水系网络的、指数值。经计算得到全市水系网络的、值分别为0.44和0.16,表明现状水系网络的连接度尚可,但环度较低,后者进一步提高的潜力较大。片区I、II、III、IV的、值分别为0.44、0.45、0.47,均大于或等于全市的综合水平,而片区IV的、值最低,为0.41,低于全市的综合水平,反映该区连接度较差;就环度值而言,除了片区I与全市综合水平一致外,其他三个片区的值分别为0.12、0.14和0.09,均低于全市综合水平,表明I、II、III区现有环路较少,环度在各片区不平衡,以IV区为最低,急需改善。从各片区的、值普遍高于全市综合水平可以看出,传统水利片区的建设主要以引排和灌溉功能为主,因而片区内的连接度较好;、值普遍低于全市综合水平,表明过去的水系建设对河流的生态功能重视不够。

片区的连通度 根据式(1)、式(2)和图2,分别计算太仓市全市和各个水利片区现状水系网络的、指数值。经计算得到全市水系网络的、值分别为0.44和0.16,表明现状水系网络的连接度尚可,但环度较低,后者进一步提高的潜力较大。片区I、II、III、IV的、值分别为0.44、0.45、0.47,均大于或等于全市的综合水平,而片区IV的、值最低,为0.41,低于全市的综合水平,反映该区连接度较差;就环度值而言,除了片区I与全市综合水平一致外,其他三个片区的值分别为0.12、0.14和0.09,均低于全市综合水平,表明I、II、III区现有环路较少,环度在各片区不平衡,以IV区为最低,急需改善。从各片区的、值普遍高于全市综合水平可以看出,传统水利片区的建设主要以引排和灌溉功能为主,因而片区内的连接度较好;、值普遍低于全市综合水平,表明过去的水系建设对河流的生态功能重视不够。

环境综合治理、水资源合调配置、交通航运、水景观、水生态以及现实可行性等方面综合考虑，遵循保证水系的通畅性，消除断头浜和满足活动水体的要求等原则，提出了“九纵九横”的规划方案。图 3 是对规划骨干水系及其片区进行概化后的结果。

2.4 规划前后景观要素结构特征的比较

(1) 河流廊道结构特征比较 规划前后的骨干河流廊道的长度、宽度、周长面积比和密度等指标的结果见表 1 所示。从表中可看出，规划后骨干河道长度增加了 16.64 km，其中，横向河道长度增加了 11.3 km，提高了 5.5%，纵向河道长度增加了 5.34 km，提高了 2.2%，横向河道长度的增幅比纵向河道大 3.3%；横向河道河宽平均增加了 17.85 m，纵向河道河宽平均增加了 18.23 m，河宽分别在原来基础上提高了 53.2%和 113%，纵向河道宽度的增幅高出横向河道近 60%，这是因为骨干横向河道大多为通江河道，为了发挥其引排功能，在长期传统水利建设和人类活动影响下而形成的，而纵向河道宽度普遍较小，不利于骨干河道功能的发挥，因此，规划对此进行了调整。横向、纵向河道的周长面积比分别为 0.04 和 0.06 m/m²，该指标分别比原来下降了 0.02 和 0.06 m/m²，也就是说，规划后单位河道长度内的河道面积增加了，该规划方案增加了河道景观面积，提高了水面率。河道密度在规划后比现状均有所提高。比较图 2 和图 3 可看出，规划后河流廊道的疏密度、连通度有了明显提高；河流廊道的不均匀性得到了改善；断口明显减少，现状河流廊道有 5 处断开，规划后仅有一处断开。

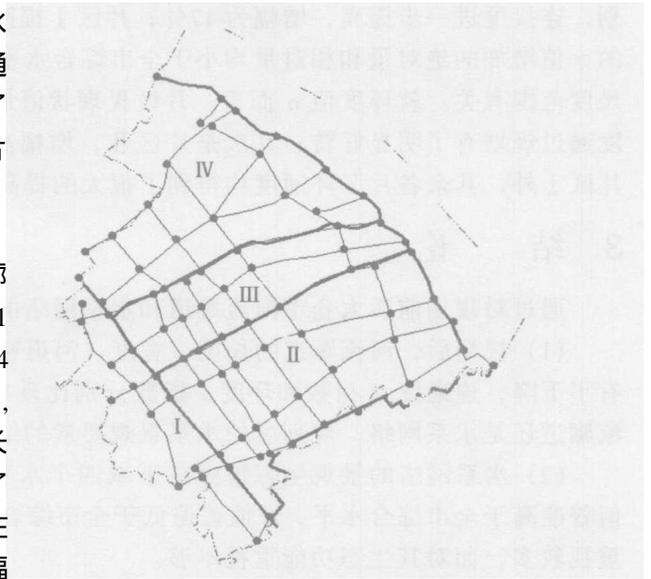


图 3 太仓市规划水系及片区概化图
Fig. 3 Simplified map of Taicang s planned key river system and its diversion area

表 1 太仓市现状及规划骨干河流廊道结构指标值

Table 1 Value of structure indexes of Taicang s present and planned key rivers

| 河流廊道 | 河长/km | | 平均河宽/m | | 周长面积比/(m·m ⁻²) | | 河道密度/(km·km ⁻²) | |
|------|--------|--------|--------|-------|----------------------------|------|-----------------------------|------|
| | 现状 | 规划 | 现状 | 规划 | 现状 | 规划 | 现状 | 规划 |
| 全市 | 445.63 | 462.27 | - | - | - | - | 0.54 | 0.56 |
| 横向 | 206.06 | 217.36 | 33.58 | 51.43 | 0.06 | 0.04 | 0.25 | 0.26 |
| 纵向 | 239.57 | 244.91 | 16.13 | 34.36 | 0.12 | 0.06 | 0.29 | 0.30 |

(2) 水系网络的连通度比较 根据式(1)、式(2)和图 3，分别计算太仓市全市和 4 个水利片区规划水系的、指数值，并与规划前进行比较，结果列于表 2。从表中可看出，规划后，全市水系网络的 值增加了 0.13， 值增加了 0.19，二者分别比规划前提高了 30% 和 119%。表明太仓市规划水系网络的连接度比原先有了较大的提高，环通度的提高则非常显著，规划水系网络的结构进一步趋向合理。

从四个水利片区水系网络的情况来看，就连接度 而言，各个片区均比现状有所提高，其中，片区 提高的幅度最大，为 24.4%，它是太仓城区向外拓展的区域，受人类活动影响最大，随着城市化进程的推进，尤其需要以规划来指导城市水系的建设活动；其次是片区 ，增幅为 22%，该区是现状连接度最低的片区，水系网络的连接度迫切需要提高；片区 是太仓中部以农业生产为主的地区，水系连接度本身较好，通过规

表 2 规划前后太仓市水系网络的、指数值比较

Table 2 Comparison of and indexes of Taicang s river network before and after planning

| 指数 | 连接度 | | | 环度 | | |
|----|------|------|-------|------|------|-------|
| | 现状 | 规划 | 增幅/ % | 现状 | 规划 | 增幅/ % |
| 全市 | 0.44 | 0.57 | 30.0 | 0.16 | 0.35 | 119 |
| 片区 | 0.44 | 0.45 | 2.2 | 0.12 | 0.15 | 25 |
| 片区 | 0.45 | 0.56 | 24.4 | 0.14 | 0.32 | 129 |
| 片区 | 0.47 | 0.55 | 17.0 | 0.16 | 0.31 | 94 |
| 片区 | 0.41 | 0.50 | 22.0 | 0.09 | 0.24 | 167 |

划, 连接度进一步提高, 增幅为 17%; 片区 提高的幅度最小, 只有 2.2%。值得注意的是, 规划后, 各片区的 值增加的绝对量和相对量均小于全市综合水平, 这与各个片区的现状连通性较好以及规划是以全市域作为尺度范围有关。就环度值 而言, 片区 现状值最低, 提高的幅度也最大, 达到了 167%, 表明该区不良的环度通过规划有了明显好转; 其次是片区 , 增幅高于全市综合水平, 片区 提高的幅度最小, 仅为 25%。除片区 外, 其余各片区环通度均得到了很大的提高, 而且空间不平衡现象更为显著。

3 结 论

通过对规划前后太仓市河流廊道和水系网络的景观生态学指标的分析对比研究, 得到如下几点结论:

(1) 规划后, 河流廊道的长度、宽度、河道密度和水面率均比现状有了提高, 周长面积比和断口比现状有了下降; 连通度 指数和环度 指数分别比现状有较大提高, 增幅分别达 30% 和 119%。总体上, 无论河流廊道还是水系网络, 规划后的水系景观要素的结构和格局均得到了不同程度的改善。

(2) 水系网络的景观生态指标在市域四个水利片区内部存在空间差异。除个别片区外, 现状各片区的值普遍高于全市综合水平, 值普遍低于全市综合水平, 反映过去的水系建设以片区为单位, 对河流的连通性重视较多, 而对其生态功能重视不够。

(3) 水系规划的尺度范围是必须考虑的一个重要因素。城市水系规划必须以市域为尺度, 首先满足全市水系网络格局完善的要求。从规划后全市 值提高的幅度均高于各片区、 值的提高较大表明太仓市水系规划符合市域尺度的要求。

(4) 城市内的水利片区应作为规划的辅助参考尺度。对太仓市的研究表明, 现状指标值越低的片区, 规划后提高的幅度越大, 规划改善的效果也越好; 反之, 现状基础较好的片区, 改善的效果较小。在四个水利片区中, 片区 的各项指标增幅最小, 这可能是由于其面积较小, 位于市域西部地势较高处, 规划时对其没有足够重视造成的。因此, 水系规划不仅要考虑总体上的网络连接度, 也要兼顾一些重要功能区的水系网络的连接度, 尽量形成内部空间平衡的水系网络结构。

总之, 城市水系规划的景观生态学实质是完善河流廊道的结构, 提高水系网络的连接度。对水系网络连通度各指标值的分析可验证城市水系规划的效果, 提高水系规划的科学性和合理性。

参考文献:

- [1] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 349 - 355.
- [2] 孙 鹏, 王志芳. 遵从自然过程的城市河流和滨水区景观设计[J]. 城市规划, 2000, 24(9): 19 - 22.
- [3] Aear D A, Mewson M D. Environmental change in river channel: a neglected element. Towards geomorphological typologies, standards and monitoring[J]. The Science of Total Environment, 2003, 310: 17 - 23.
- [4] 肖笃宁, 高 峻, 石铁矛. 景观生态学在城市规划和管理中的应用[J]. 地球科学进展, 2001(16): 813 - 820.
- [5] 蒋学玮, 周正立, 李凯荣, 等. 景观生态学原理在流域规划中的应用[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(2): 112 - 115.
- [6] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 178 - 179.
- [7] 肖笃宁, 李秀珍. 景观生态学的学科前沿与发展战略[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1615 - 1621.
- [8] 肖笃宁, 李秀珍, 高 俊, 等. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 38 - 41.
- [9] 郭建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 30 - 31.
- [10] 刘茂松, 张明娟. 景观生态学——原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 47 - 49.
- [11] 康相武, 潘伯荣, 周华荣. 干旱区廊道景观及其研究之管见[J]. 干旱区研究, 2000, 17(3): 64 - 70.
- [12] 岳 隽, 王仰麟, 彭 建. 城市河流的景观生态学研究: 概念框架[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1422 - 1429.
- [13] Wu J, David J L. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications[J]. Ecological Modelling, 2002, 153: 7 - 26.

Application of landscape spatial structure analysis to urban river system planning^{*}

XU Hui , XU Xiang-yang , CUI Guang-bai

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : As an important ecological infrastructure of an urban area , whether a river system can work normally mainly depends on its structure and patterns , while the latter can be improved through the urban river system planning. By calculating and comparing the major indexes such as C and H etc. of the spatial structure of a city's key river system before and after planning , we can find the changes of the structure and patterns of the river system , judge the rationality of the planning , and expose the essence of river system planning on improving the spatial structure of the local rivers and increasing the connectivity of the river system network. Taking Taicang's river system planning as an example , we calculate the C and H and some other indexes of the current and planned river system. The results show that the indexes including C and H increase , which means that the structure and patterns of Taicang's river system are improved. The results of the four water-diversion areas show that the lower the value of the indexes of the current river system , the higher increasing range of the indexes of the planned river system , and there is remarkable spatial difference among the four areas. So once a river system plan of a city is worked out , the scale of the urban area should be considered firstly , and the next is the diversion-area scale.

Key words : urban area river system planning ; river corridor ; river system network ; network connectivity

^{*} The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50239030) .