

流域“山-水-城”空间组织模式及其生成机理

王华^{1,2,3}, 周国华^{1,2,3*}, 吴国华¹, 郭汐禹¹, 赵万民⁴

1. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081

2. 地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410081

3. 湖南师范大学城乡转型过程与效应重点实验室, 长沙 410081

4. 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400023

* 联系人, E-mail: uuy828@163.com

2025-04-07 收稿, 2025-06-23 修回, 2025-08-05 接受, 2025-08-07 网络版发表

国家自然科学基金(42401243)和湖南省自然科学基金(2023JJ40444)资助

摘要 流域系统空间优化及其治山、治水、治城一体推进,是当前学术研究的重要领域和可持续发展的关键途径之一. 本文基于“现实表征-模型构建-实证分析”的科学认知范式,系统分析流域“山-水-城”空间组织的内涵特征、一般模式及其生成机理,以长江流域为例,开展理论与实证相结合的研究,发现:(1) 流域“山-水-城”空间组织具有整体关联性、协同互补性、动态适应性、尺度嵌套性等特征,呈现出典型的异质同构现象与树状组织结构,由此提出流域“山-水-城”空间组织的流域树模式,并刻画其概念模型;(2) 流域“山-水-城”空间组织模式的“萌芽-生成-强化-成熟”演化过程与流域社会经济发展阶段相适应,在社会经济客体的集聚与扩散过程中,山、水、城空间组织关系的变化以及流域人居系统对其的选择,驱动形成流域树模式;(3) 长江流域“山-水-城”空间组织具有多尺度嵌套的整体性结构,呈现典型的流域树模式特征,自然与人文因素的空间相互作用、流域空间单元间的互补性与通达性、流域人居系统的复杂性与适应性,共同驱动其流域树模式的生成与演化. 本研究回答了流域“山-水-城”空间组织的一般模式及其生成机理等关键问题,深化了流域人居系统的科学认知,可为山、水、城协调共生提供参考依据.

关键词 “山-水-城”空间组织, 流域树模式, 生成机理, 演化过程, 长江流域

中国城乡建设转型与高质量发展,已突破局部地区或单个城市的人居环境优化及经济增长问题,而强调更大区域或流域的经济协同、生态平衡、资源配置与人地和谐^[1]. 中国是一个山水资源丰富的国家,山地占国土陆地总面积的67%,其间山川形胜、江河湖泊、森林湿地等不同景观单元相互交融,以河流为骨架所构成的流域,孕育形成了具有时空连续性与地域特色的人类文明及其聚落体系,集中了中国重要的经济带与城市群^[2]. 同时,受人类活动与气候变化影响,地质与洪旱灾害频发,碳失衡风险愈发严峻,湖泊萎缩、河流污染与山地生境退化等问题不容忽视. 尤其是快速

城镇化建设对自然山水资源的侵占与破坏,造成流域人地矛盾加剧,成为流域人居系统可持续发展面临的困境. 如何让人类社会经济活动融入流域地理本底,以流域城乡高质量发展与山水环境高水平治理构建新的国土格局,促进山、水、城协调共生,是提升城镇生态韧性、打造高品质宜居生活、满足人民群众对美好山水环境需要的重要途径,关系到美丽中国建设与社会主义现代化建设的质量.

基于流域地理单元的山、水、城组织关系研究,在中国具有深厚的历史渊源. 传统城镇选址建设遵循“天人合一”原则,通过因循山水形胜、统揽山水格局,

引用格式: 王华,周国华,吴国华,等. 流域“山-水-城”空间组织模式及其生成机理. 科学通报, 2025, 70: 4569–4588

Wang H, Zhou G, Wu G, et al. The “mountain-water-city” spatial organization pattern in river basins and its formation mechanism (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4569–4588, doi: [10.1360/CSB-2025-0445](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0445)

从宏观山水风景的发掘逐步进入人工环境的营造,实现由外而内的筑城造郭,城镇及其重要人文要素镶嵌在流域山林水网间,形成城镇空间与大尺度山水环境和谐共融的文化秩序^[3]。由此,钱学森提出“山水城市”的发展理念,追求城市与山水的协调发展^[4];吴良镛在规划实践中探索“山-水-城”模式,突出山水的文化内涵与空间塑造功能,强调从区域/流域的宏观尺度,建立山、水、城的动态平衡关系^[5]。近年来,国内外流域“山-水-城”空间组织相关研究,聚焦于“流域城镇社会经济发展与自然山水环境变化的动态适应机理”这一核心议题:(1) 研究内容层面,从以水循环、水资源等自然科学研究为主导,逐渐向人水关系、山城关系等自然与人文综合的科学研究转换^[6]。围绕要素耦合、形成演化、类型模式等关键问题,阐明流域内“水-土-气-生”等自然要素与“社会-经济-文化”等人文要素的作用关系^[2],构建“山-水-城”空间组织的理论框架^[7],分析中国流域二元水循环效应与河湖水系联通特征^[8],揭示国际河流跨境水冲突与合作机制及生态补偿机制^[9],厘清水资源利用管理与重大水利工程对流域人居环境可持续发展的影响^[10-12]。但目前流域系统研究与城乡人居环境研究的集成融贯探索仍相对滞后,从流域视角对“山-水-城”空间组织的整体性认知不足,未能全面考虑流域山、水、城生态系统的动态耦合关系,导致其综合治理难以取得显著且持久的成效。(2) 研究方法层面,技术进步对流域人居环境系统综合研究方法的发展起到推动作用,定性、定量方法的应用与分析已日趋成熟,并逐渐由局部描述的质性归纳向全局分析的量化研究发展——主要利用田野调查、文本分析等质性方法,阐明流域文明化进程与河流水系、地形地貌的关系,提炼流域“山-水-城”景观基因与空间分异格局;融合多源数据,运用最小累积阻力模型(MCR)与机器学习等数理模型,构建流域国土空间协同治理网络与景观生态安全格局^[13],提出城市水环境综合治理关键技术体系与山水城市景观营建范式^[14],并广泛应用于流域国土空间可持续利用与宜居城乡高质量发展等多个方面。然而既有研究中,质性分析与量化研究结合不充分依旧明显,无论是长时间序列历史过程的全景演绎,还是海量数据与复杂模型的高效模拟,大多始于个性化研究对流域山、水、城组织关系的理解,缺乏综合多学科理论方法的共同认知基础与概念模型,以支持研究结果的统领与进阶^[15]。(3) 研究对象层面,从流域系统本体研究逐步向流域城乡人居环境系统综合研究拓

展,从以水体为主的单一要素、单一过程分析向山水林田湖草生命共同体的全要素与全生命周期探索转型。国外学者主要聚焦莱茵河、湄公河、密西西比河等流域人类社会经济活动与河流水系的耦合关系^[16,17],分析全球气候变化下的水循环利用模式与影响因素、蓝绿基础设施的社会效应及响应机制;国内学者主要围绕中国七大流域,分析长江流域灰-蓝-绿蓄水能力及国土空间开发适宜性^[13,18],揭示黄河流域水生态承载力的时空连通性与空间分异机制^[19],厘清西北干旱区流域洪水发生机制^[20],从城镇空间形态、综合交通、历史文化等方面阐明西南山地流域人居环境特征及演化规律^[21],为流域山、水、城生态系统综合研究提供支撑。不过,目前流域人居系统的实证类探索偏多、理论性研究偏少,多要素、跨尺度的流域空间组织关系及其结构功能研究不足,针对流域“山-水-城”空间组织的一般模式亟待提炼。

综上,如何更好地组织流域自然与人文要素、城市与山水环境,是学术界研究的重要领域与热点议题。目前流域“山-水-城”空间组织研究存在整体性认知不足、定性与定量分析结合较弱、概念模型与一般模式亟待提炼等问题,尤其是在治山、治水、治城一体推进的背景下,深入认识流域“山-水-城”空间组织模式以及各要素之间的组织关系,阐明其内涵特征与生成机理,是流域山、水、城协调共生的根本途径。鉴于此,本研究围绕以下2个问题:(1) 流域“山-水-城”空间组织的一般模式为何?其演化过程与生成机理是什么?(2) 如何利用案例对这一组织模式进行实证探索?通过整体认知流域“山-水-城”空间组织的内涵特征,本研究认为西方古典区位论与区域双核结构模式,可为流域树模式的提炼提供重要启发,人地关系地域系统与点-轴系统理论等可为其演化过程与生成机理的解析提供理论基础,并选择长江流域为案例地,理论与实证相结合,以期丰富流域人居环境系统空间组织模式,进一步完善新时期“山-水-城”空间组织研究。

1 流域“山-水-城”空间组织的内涵特征

“流域”首先是一个水文概念,是以河流水系为线索、以自然地貌“分水线”为边界、以连续的陆面-水体过程连接上中下游而生成的地理单元与完整生态域,内部各要素关联度高、整体性强,横向上表现为河道、阶地、坡面的地理连续性,纵向上一般呈现出上游多山地、中游多丘陵与湖泊、下游多平原的空间异质

性^[22,23]。流域社会人文经济发展和自然山水资源变化相互耦合与演进,在人水关系的动态性与涌现性的复杂适应过程中,创造了人类聚居文化与流域自然环境之间的内在关联,形成独特的山、水、城空间组织关系。流域“山-水-城”空间组织是指流域山水环境与城镇人工环境交互适应的动态过程及作用规律^[24],强调自然与人文要素的组织关联与有机协调,其实质是以城为主体的人类社会经济系统与流域自然山水资源要素交互所形成的复杂网络系统,其根本是在两者间寻求一种相对稳定且平衡的发展模式^[25]。从生态学角度来看,“山”是高原、山地、丘陵等起伏地貌共同构成的山地生态系统,“水”是江河湖海等诸多水域生态系统,“城”是自然-社会-经济要素构成的复合生态系统^[7,26]。流域“山-水-城”空间组织承载山、水、城生态系统在不同流域时空尺度上的持续互动,通过识别自然与人文要素的斑块-廊道-源地,确定相应的联系网络与组织结构,形成“空间-自然-人文”影响互动的有机整体,促进流域山、水、城生态系统的和谐共生。

由此可知,流域“山-水-城”空间组织是时间、空间与人的因素协调构成的产物,受流域地理单元内自然圈层与社会圈层的直接影响,其功能结构与时空演化是人地相互作用的结果,具有整体关联性、协同互补性、动态适应性、尺度嵌套性等特征。(1) 整体关联性。从系统组织来看,流域具有特殊的根系结构与完整的生态格局,上中下游之间存在自然的关联耦合互馈机制。整体关联性是流域“山-水-城”空间组织建立的基础,即在“生态优先”原则下,将具有特定关联的流域城镇人文景观与自然山水环境视若整体,构建山、水、城生态系统间的物质、能量与信息流动网络。由此,河流水系与周围环境共同构成流域生态共同体,控制和影响不同高程社会经济客体的行为活动,表现出整体的功能结构与面域特征^[21]。(2) 协同互补性。从系统要素来看,其协同性体现在流域自然与人文、上游与下游等长期竞合交织的关系上。就流域内部而言,不同区段自然资源、发展水平、文化基因等具有空间差异性,为各城镇功能互补、经济分工与协同发展提供条件。上游矿产、林草、水能等资源能源为下游社会经济客体提供生态服务,干支流之间水陆要素协同构成流域生态系统,并围绕流域山水资源开发进行统筹,有利于合理组织流域国土空间规划治理与城镇社会经济的高质量发展。(3) 动态适应性。从时间维度来看,其动态性的产生源于城镇人口、土地利用等要素的变化方向、

强度和速率具有差异性^[6]。作为环境适应性主体,城镇空间系统通过调节自身功能结构而适应流域山水环境,由此构成流域“山-水-城”空间组织的长时序生命周期与演变轨迹,且随着时间推移,流域“自然-人文”要素空间相互作用所构成的功能结构与组织关系发生变化,通过认知流域“山-水-城”空间组织的序变过程,探究其成因、影响因素及变化规则,有助于实现流域人居系统的科学组织与可持续发展。(4) 尺度嵌套性。从空间维度来看,尺度特征是地理现象和过程在流域的固有属性。流域“山-水-城”空间组织是多尺度嵌套层叠的复合结构,一个大流域可划分为若干小流域^[22],一个流域的范围可包括由超大、特大城市以及大中小城市等构成的城镇体系,每个城市又可划分为诸多功能组团与发展片区,镶嵌在流域山水生态网络中。流域山、水、城空间组织关系在多个层级尺度上跨级嵌套,水系网络互联互通与生态功能有序流转,有利于流域人居系统整体高效组织与良性发展^[27]。

2 流域“山-水-城”空间组织模式的概念模型

2.1 流域“山-水-城”空间组织的流域树模式

(1) 现实表征。流域“山-水-城”空间组织的流域树模式,其发现始于我们对流域人居环境建设的长期田野调查与实践工作^[21],呈现出以下共同特征:其一,流域主要中心城市一般位于干支流的汇合点。这类地点一般受河流冲积作用形成沿江阶地或河谷盆地,具有水陆交界、水水中转的突出区位优势^[28],有利于在此进行选址营城与生产生活,并随着社会发展与文明进步,其政治经济职能不断完善,进一步强化该类城市的中心地位;其二,中心城市间的联系受流域地理因素影响而具有一定选择性。干支流分叉的一级汇合点,因其优越的区位条件易于形成一级中心城市,干流及主要支流的二级汇合点则会出现二级中心城市,以此类推,各级中心城市及港口城市所处自然环境、通航条件等具有差异性,上中下游地区的人口密度、经济发展、城镇化水平等总体呈梯度递增、略有起伏的变化趋势^[29];其三,受地形条件影响,流域上中下游地区城镇空间发展整体呈现分异特征,上游山地地区城镇建设用地垂直空间特征相对突出,中下游丘陵与平原地区城镇建设用地爬坡指数相对较低。但无论是中国西南地区的山地流域,还是东南沿海的诸河流域,无论是涪江、涟水等中小流域,还是长江、密西西比河等大流

域,均呈现出典型的流域树组织结构特征.这种异质同构现象,表明流域“山-水-城”空间组织的流域树模式具有一般性.

(2) 组织结构. 在流域系统结构研究中,目前主要有4种空间组织理论:点-轴模式、双核结构模式、板块结构模式与核心边缘模式.综合以上理论的核心观点,我们发现:若将沿江(河)城镇视为“点”,江河为“轴”,在自然山水物理阻隔与人文要素影响反馈的综合作用下,流域经济将趋向分散化与“网”状发展,进而辐射整个流域,形成流域空间系统的“点-轴-网”结构模式,其基本框架由水系构建而成,自然与人文要素因河流水系的同构而联系密切,并由各集水区的水系划分为地形起伏变化的流域地理单元.因此,流域山、水、城生态系统的空间组织关系,首先应反映流域水系的特征.自然界以随机的方式建立起水系的分枝图式,从分形理论来看,树枝状、羽毛状等水系平面结构具有自相似,可用一种不均匀的自组织树状结构予以刻画.尤其在山地丘陵地区,河流水网受山地褶皱与构造运动的影响显著,形成复杂且有机的树状组织结构^[30].根据水系结构定律与有限布局水系模式^[31],

我们试图根据不同源点数量、位置与等级,生成布局上迥然不同的枝状水系、城镇体系与流域范围,初步刻画流域“山-水-城”空间组织的一般模式,将之称为流域树模式(图1).简单来说,这种树状空间组织模式将流域山、水、城的空间组织关系视为一棵树的结构.树干是流域系统中承担主要航运、水资源供给等功能的干流(一级河流);树枝与树干交错相连,是流域系统中深入腹地的次要河流水系(二级、三级河流等),其分枝形态随地形起伏而变化;树叶为树枝的物质能量涵养地,是流域系统中基本的集水区单元,同时也是山地丘陵起伏的区域;果实是不同规模的城市(镇)或都市区,结于不同河流的汇合点,随着流域历史演替与社会经济发展,逐渐形成结构完整、功能协同的流域人居系统.

2.2 流域树模式的概念模型

对地球表层空间系统进行规律性认知,由此构建理论范式,是地理学的主要研究任务^[32].在跨尺度人地系统耦合的复杂地理情境下,传统行政区划导向的区域规划结构与组织模式制约了流域人居系统整体性认

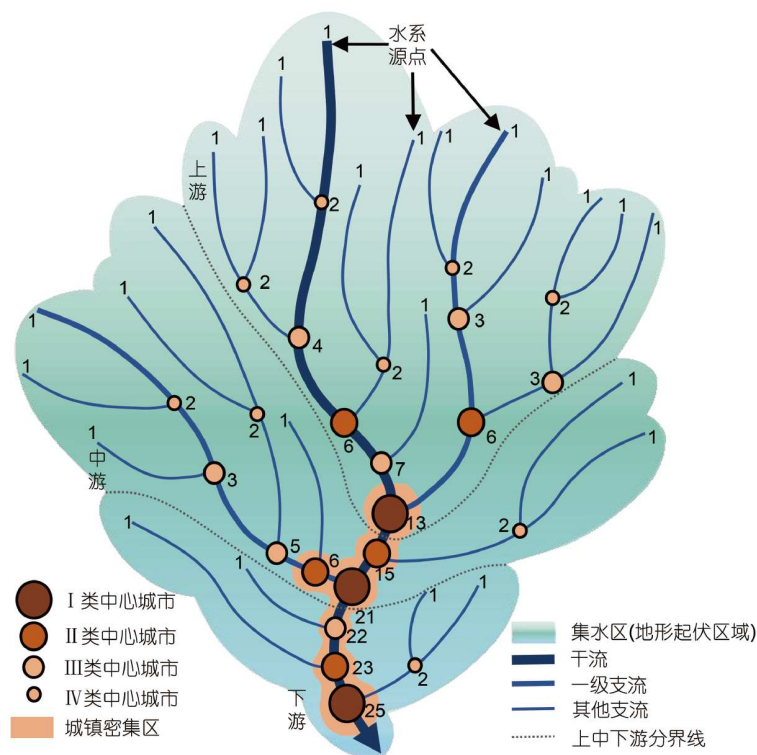


图1 流域树模式简图. 图为源点为25时的流域水系结构之一, 所注数字表示水系的量级

Figure 1 The simplified diagram of the river basin tree pattern. The figure shows one of the water system structures of the river basin with the source point at 25, and the numbers noted indicate the magnitude of river system

知框架的构建,全球城镇化及气候变化正重塑流域山、水、城生态系统的空间组织关系与复杂适应过程,而近万年的人类聚落演化规律也亟需新的概念模型进行解释.流域树模式是城镇人文景观与自然山水环境在特定的流域地理单元中相互作用所形成的动态适应结构与空间组织模式,是基于流域“山-水-城”空间组织的异质同构现象,以人地关系地域系统理论与点-轴系统理论为指导,根据流域水系结构与地形特征,寻求客观事物组织关系与演变规律而提炼出的一般性结构模式,为解释流域人居系统的长时序时空演化、多尺度组织模式、多要素耦合机制提供支撑.

显然,流域人居系统是一个自然-文化-社会-经济复合系统,为使流域树模式更具直观性,我们对流域人居系统的关键要素进行抽象提炼,突出山、水、城生态系统的空间组织关系,强调自然与人文要素影响下流域“山-水-城”空间组织模式的形成演化,进而建立流域树模式的概念模型,其概念模型高度概括了流域山、水、城生态系统的主要特征,既包括各个子系统组分间相互作用的耦合结构关系,也包括与之对应的物质循环与能量流动等功能特征.从生态学视角来看,在自然(如气候变化)与人文因素(如人类生活生产行为)的驱动下,流域人居系统的景观格局与生态过程随之改变,并通过级联效应引起流域上、中、下游间生态系统服务的动态变化^[33],呈现出迥异的空间特征与组织规律.山水林田湖草等自然资源为社会经济客体的可

持续发展提供支撑,也对城镇经济发展、空间扩张等产生生态约束,促使流域城镇人文景观与山水生态网络在交互适应过程中,不断重塑流域土地利用、网络型基础设施等要素系统,形成山、水、城协调共生的流域树模式(图2),其概念模型的特殊性表现在:(1)与西方古典区位论相比,相关概念模型均强调空间性的表达,但设定条件不同.中心地理论等探寻的是城镇、工业等单要素在均质空间中的静止、局部均衡状态;而对于流域这一特殊区域,给定范围内由于水系引导与地形起伏而导致不同区域集聚与扩散的作用力不同.因此,流域树模式概念模型的设定条件需置入河流域水系、地形条件、城镇单元等自然与人文要素,以更好地刻画流域地理综合体的实际分布状态,阐明其动态的、整体的空间组织关系.(2)点轴结构、双核结构与流域树结构都是一种综合的区域整体性组织模式,但三者的侧重点有所不同.点-轴系统模式主要侧重于探究社会经济空间组织渐进式扩散的内在规律^[34,35],而流域树模式侧重于分析流域人居系统的空间结构与运行机制,强调空间、自然、人文互动影响下多要素、多尺度的空间组织规律;双核结构模式侧重于揭示区域中心城市与港口城市的空间耦合机理^[28],流域树模式则侧重于探讨流域城镇人工环境与自然山水环境的相互作用机理,不仅强调港口城市与中心城市、中心城市与流域腹地的互补关系,更强调流域人居系统内部山、水、城各要素的和谐共生.

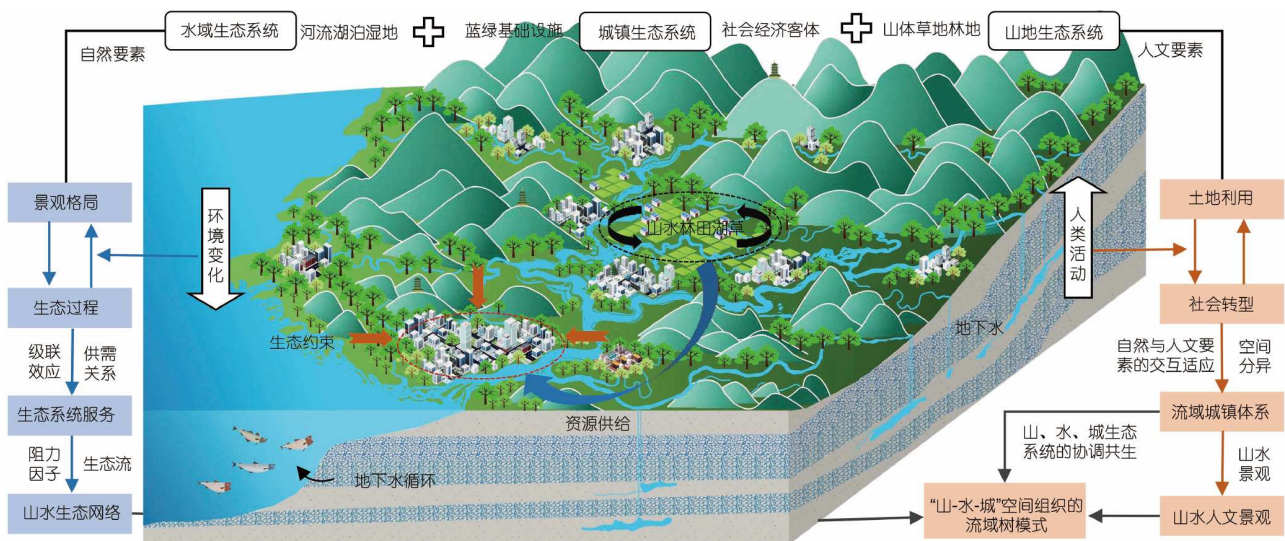


图2 流域树模式的概念模型示意图

Figure 2 Schematic diagram of the conceptual model of the river basin tree pattern

3 流域“山-水-城”空间组织模式的演化过程与生成机理

3.1 流域“山-水-城”空间组织模式的演化过程

在“自然-人文”要素的交互作用下,流域“山-水-城”空间组织模式的“萌芽-生成-强化-成熟”演化过程,与流域社会经济发展阶段相适应(图3(a)). (1) 萌芽阶段:早期人类逐水而居,以自然地理过程为基底,形成自组织的人水关系.考古发现,肯尼亚人、坦桑尼亚人、元谋人等原始人类的聚落均选址于低山缓坡临水阶地,长江流域、两河流域等流域的早期城市也大多布局于河谷盆地或冲积平原,人类聚居被动依附并顺应山水环境的变化,反映了先民对流域系统能量流动、物质循环、空间适配机制的本质性把握,自组织的流域树模式开始萌芽; (2) 生成阶段:在社会经济发展缓慢的农业文明时期,受“以农立国”生产生活方式与“趋利避害”聚居行为的影响,人类聚居选择并占据沿江阶地、山谷台地等有利于生产生活需求的场所,形成散点式或串珠状的聚落形态格局,在航运交通、防洪防灾等方面构成城镇功能体系,创造出山、水、城、景交织一体的传统朴素均衡组织模式.这一阶段,由于交通条件的制约与生产力水平差异,流域城镇相互联系较为松散,主要由一个或数个增长极向特定地理空间辐射,带动流域内不同区域相对独立地发展; (3) 强化阶段:工业化初期及中期,随着商品经济的发展,首先在流域航运与陆路交通的交汇处形成城镇居民点,为适应社会经济联系的需要,沿主要河流航运通道,形成效益水平高、人口与经济技术集中的发展轴线与经济带,逐渐构建出流域树模式的点轴组织框架.而在工业化后期,以沿江铁路与公路交通网络、水利和防灾网络、科技信息网络等为依托的网络体系,强化流域腹地内各城镇之间的通达性,进一步促进流域局部有组织地进行空间生产,“自然-人文”要素交织一体的流域树模式不断强化; (4) 成熟阶段:生态文明时期,在社会经济要素“自组织”与流域生态治理政策“他组织”的综合作用下,流域树模式回归到以自然山水资源为核心的生态聚居组织模式,从流域“增长极+经济带引导”发展模式,向流域“经济区梯度推移”发展模式转变^[29],强调流域山、水、城生态系统的整体统筹、功能的协同互补、动力的内生发展.

总之,流域树模式是流域山、水、城生态系统经过较长时间发展而形成的空间组织模式,反映了流域

人居空间组织的客观规律,在其螺旋式上升的演化过程中,人居聚落组团以点状簇群分布于不同级别的河流骨架两侧,形成与山水格局相契的城镇功能结构,并不断沿江/跨江、依山/越山生长,进而构成大小不一的面状人居体系,每个“点”的变化与运动以渐进式扩散的方式,与流域其他空间、自然、人文要素相互作用,其树状结构逐渐凸显,并与网状人工联系通道交织一体.需要特别指出的是,这种“萌芽-生成-强化-成熟”的完整演化过程,是对流域“山-水-城”空间组织模式形成与演化的一般性概括——并非所有江河沿线都可形成城镇密集区与产业经济带,也并非所有流域人居系统都必须以水运航道为主轴来组织城镇空间结构才是最佳模式^[36]——不同干湿地区,甚至不同河段的流域树模式空间组织关系、结构功能及发展阶段具有差异性.我们寻求的是在流域系统发展与城镇体系布局中,如何综合水土资源、城镇发展、社会经济协作与生态治理等条件,提出流域“山-水-城”空间组织理论或模式,进而探讨水域与山地的生态服务功能在流域城镇空间生产中所起到和将能发挥的作用,为流域系统的管理者及实践者提供明确的层次结构关系^[35].

3.2 流域“山-水-城”空间组织模式的生成机理

流域“山-水-城”空间组织模式是城镇社会经济系统(包含城镇经济技术系统、社会文化系统等子系统)和自然山水环境系统(包含水域生态系统、山地生态系统等子系统)交互作用所构成的复杂系统,表现出有序的组织关系与功能结构.这一复杂适应系统,以河流水系作为联系纽带与廊道,以山地丘陵作为生态屏障与基质,以“流域-子流域-城市-组团”构成多尺度组织模式,以流域系统功能整体开发与城镇社会经济发展作为动力机制,源于流域人居系统在自组织过程中涌现,并受流域山水环境变化及流域文明发展的综合影响,形成整体关联、协同互补、尺度嵌套、动态适应的流域树模式(图3(b)).其中,自然山水环境系统是河流水系、地形条件等自然要素所构成的流域地理环境整体,城镇社会经济系统是人类活动的主体,人类通过生产生活主动地改变城镇聚落物质空间环境,从而改变周边地形条件、河流网络,进而改变流域人居系统的功能结构与空间形态.尤其是在城镇化与工业化过程中,人口流动与空间集聚致使流域经济、技术、资源等要素的融合与再配置,人类活动与气候变化影响流域水循环与碳循环过程,流域综合治理与整体统筹

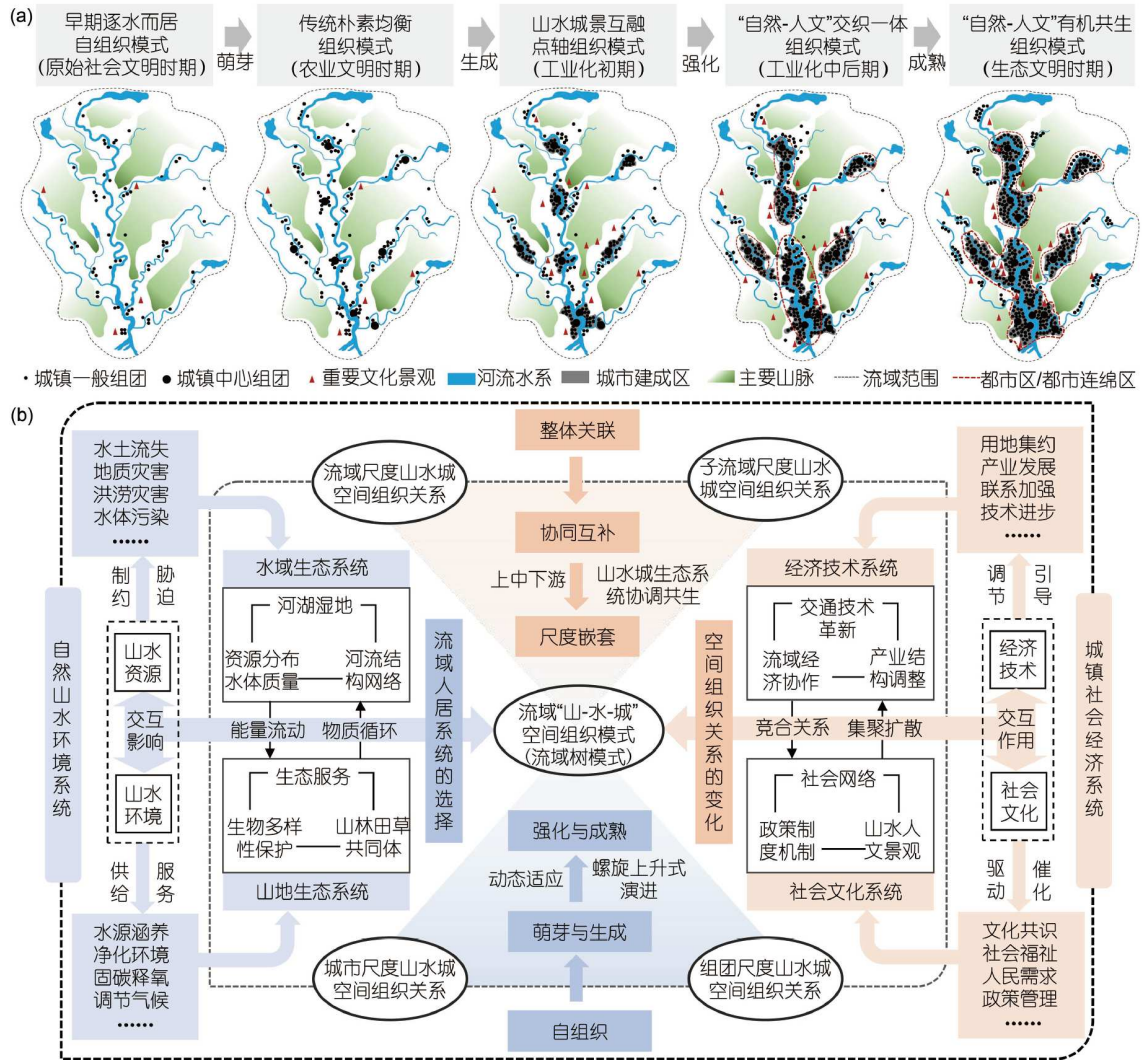


图3 流域“山-水-城”空间组织模式的演化过程与生成机理。(a) 流域“山-水-城”空间组织模式的演化过程；(b) 流域“山-水-城”空间组织模式的生成机理

Figure 3 The evolution process and formation mechanism of the “mountain-water-city” spatial organization pattern in the river basin. (a) The evolution process of the “mountain-water-city” spatial organization pattern in the river basin; (b) the formation mechanism of the “mountain-water-city” spatial organization pattern in the river basin

不断调适人与环境的关系，促进流域系统内部城镇空间生长与自然山水环境的和谐共生^[37]。可见，各子系统间及其系统内部间交织着诸多影响及反馈作用，主要表现在两方面：其一，自然山水资源对城镇社会经济活动的资源供给及促进作用(如矿产、森林、水能等)和地灾水害等对城镇社会经济活动的生态胁迫及抑控作用(如洪涝、滑坡、泥石流等)；其二，通过流域经济协作、交通技术革新、产业结构调整等，对自然山水环境系统投入可控资源，引导城镇用地集约发展，提升山水资源的“自然-社会”价值^[38]。

由此可知，流域“山-水-城”空间组织的流域树模式形成主要受自然山水资源要素以及社会经济人文因素两类因素的影响。一方面，流域树模式的形成，是社会经济客体的集聚与扩散过程，与水运的低成本优势密切相关。河流、湖泊、湿地等水资源的利用强度与结构特征，直接或间接影响流域人地耦合系统的演进路径及生态系统的服务供给能力，持续塑造着自然地理基底与人文社会活动的空间异质性^[39]。无论是早期原始社会聚落的形成，还是传统城镇的选址布局与现代大城市的快速发展，社会经济客体首先在一个或若干

个“点”上集聚,并依附于交通线,向外扩散人口、产品等社会经济“流”^[34],流域系统密集的天然航道就成为其最为经济有效的连接方式之一。资源与基础设施在新的城镇聚居地集中,上中下游地区扩散通道相互联结,流域主要河流廊道逐渐成为人类活动集聚扩散与城镇聚落形成演化的发展轴线。从“逐水而居”到“逐水而兴”,社会经济客体在流域空间单元中的渐进式扩散,其扩散力随距离延伸而衰减,并受自然地形的不均匀阻隔作用与线性基础设施的综合引导,不断强化山、水、城空间组织关系的“点-轴”网络系统,流域树模式不断趋于成熟。这种“点-轴-网”整体格局,是对流域河流系统功能开发相对充分、城镇社会经济较为发达的流域树模式的共性提炼,针对不同地理区位、气候条件、山水资源禀赋、社会经济规模与地域历史文化的流域系统,其空间组织模式的发育程度与生长特质各异,或初步呈现“点-轴”发展态势,或已形成相对成熟的网络系统,演化出丰富的流域树组织结构;另一方面,受社会、技术、文化、政策等多种人文因素的影响,原有山、水、城空间组织关系解构而发生动态变化,流域自然与人文要素在重组过程中形成新的空间组织关系,产生特定的流域“山-水-城”空间组织模式。与空间组织关系变化相伴的,是流域人居系统对其不断地进行筛选与整合,最终那些更能适应流域自然地理条件、满足社会经济活动需求的空间组织关系会延续下来,表现出特定的流域树模式^[7,40]。这种地域性空间组织关系的变化与流域人居系统对其的选择,受“自然-人文”要素的空间相互作用、流域系统的复杂性与适应性、流域单元间的互补性与通达性等的综合影响,共同促使流域树模式的形成与演化,使其既承载流域人居系统特有的自然与人文信息,又维系着城镇空间生长与山水环境变化两者有机协调的组织关系^[24]。尤其是随着铁路、公路等交通网络及信息网络的发展,在山、水、城生态系统的动态适应过程中,流域树模式的空间组织关系不断更新重构,形成更为复杂的“社会-生态”网络系统。

4 流域“山-水-城”空间组织模式实证研究:长江流域案例

地理学是研究地球表层自然与人文要素的分布特征、演变规律与作用机制的一门学科。基于人类社会经济活动与自然地理环境的相互作用关系,揭示人类活动的组织模式与地理过程,是人文地理学的重要研

究领域。中国有自己特殊的自然与经济地理特征,中国人文地理学者以中国为研究对象进行规律认知与理论创新,形成了系列学术成果——胡焕庸线、点轴系统理论、双核结构理论等均是对地理现象客观存在的发现过程,从不同角度揭示中国空间组织模式的基本特征与规律^[32]。可见,地理学的空间结构模型需在高度抽象的基础上进行提炼,并通过案例实证,解剖实际事物的地表空间组织及其形态特质,挖掘地理现象下的实质^[35]。本研究基于“现实表征-模型构建-实证分析”的科学认知范式,发现流域树模式的异质同构现象,探究其概念模型与生成机理,并根据流域自然山水条件与社会经济发展水平,选取长江流域及内部典型子流域作为研究区,展开实证探索,通过识别不同尺度的长江流域“山-水-城”空间组织模式,归纳并分析各阶段山、水、城空间组织关系变化特征,反演其形成与演化过程,阐明其网络系统特征,进而推导其流域树模式的形成与演化规律。

4.1 研究区域及方法

(1) 研究区概况。长江是中国第一大河,流域面积约为180万km²,地势西高东低,以山地丘陵为主,大小湖泊与干支流众多,水系具有显著的分形特征,主要中心城市与社会经济组织客体沿江分布。作为国家层面的“T”型一级主轴,长江黄金水道对流域城镇社会经济发展与上中下游整体联系具有重要作用,其货运量位居全球内河第一(2020年长江干流货运量为30.6亿t,占同期全国内河水运货运量的80.21%)。可见,长江流域文明的延续性、地理环境的多样性、开发强度的梯度性以及人地关系的复杂性,对于流域“山-水-城”空间组织模式研究具有典型性。

(2) 数据来源与处理。本研究涉及的数据主要包括数字高程数据(DEM)、植被覆盖度、水系、土地利用、地质灾害、感兴趣点(POI)、国内生产总值(GDP)、道路、人口密度等多源地理空间数据与相关历史资料。2020年DEM数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),可表征地形起伏变化程度。山地丘陵地区高程与坡度组合情况复杂,仅用高程或坡度难以表征地形空间分布特征,因此本研究通过综合高程与坡度,利用DEM数据计算地形位置指数(TPI),更充分、合理地反映流域地形复杂状况。

2020年长江流域土地利用、植被覆盖度、地质灾害与GDP数据均来源于中国科学院资源环境科学与数

据中心(<http://www.resdc.cn>)。其中,土地利用数据用以表征长江流域草地、耕地、林地、水域等不同地类的空间分布格局;植被覆盖度数据用以表征长江流域植被群落分布状态;地质灾害数据为累积至2020年地质灾害点数据,通过计算其核密度,用以表征长江流域崩塌、滑坡等地质灾害空间分布特征;GDP是表征长江流域经济发展水平的重要指标,该数据是综合经济统计数据、夜间灯光指数、居民点密度等数据而生成的空间网格数据。

2020年道路、河流与POI数据来源于开放街道地图数据库(<http://www.openstreetmap.org>)。其中,道路数据包含铁路、高速公路、一般公路等多种道路信息,通过计算距公路与铁路的距离、距河流与水域的距离,用以表征长江流域道路交通与河流水系对生态流的阻力程度。POI数据包括商业服务设施、公共管理与公共服务设施的点位数据,通过计算POI核密度,可有效表征社会基础设施分布特征与影响强度。此外,2020年人口密度数据来源于全球人口计划数据集(<https://hub.worldpop.org>),用于表征流域人类足迹强度指数。

长江流域主要城镇的历史资料与规划政策,主要来源于长江流域各地县志及历年历次规划文本;2010~2020年社会经济统计数据来源于中国统计年鉴与中国人口普查数据(<https://www.stats.gov.cn>),并通过多次田野调查,系统了解长江及嘉陵江、乌江、湘江等河流流域的山、水、城空间组织关系及其结构模式。

(3) 研究方法。首先,综合高程、坡度、起伏度,将长江流域地形分为高山、中山、低山、丘陵、平原5种类型,识别长江流域主要山体斑块^[24]。由此,结合城镇建设用地、水体与主要山体斑块,整体表征长江流域及其子流域“山-水-城”空间组织模式,并利用田野调查与文本分析方法,探究其形成与演化特征。其次,利用形态学空间格局分析(MSPA)识别生态源地。MSPA模型主要用以描述地图元素的连通性^[41],通过提取长江流域林地、草地、水域作为前景数据,生成二值栅格数据,将生态要素划分成核心区、孤岛、空隙等7种景观类型,进而识别核心区生态斑块的景观连通性,采用斑块重要性指数(dPC)评价流域核心斑块间的连接水平,以筛选主要生态源地^[42]。同时,构建综合阻力评价体系,进行空间主成分分析(PCA)。结合长江流域社会经济发展水平与生态环境现状,根据流域“山-水-城”空间组织模式的内涵特征与生成机理,参考已有研究成果^[42-45],从自然山水环境系统与城镇社会经济系统

两个维度,选取 TPI 、距河流及水域的距离、植被覆盖度、地质灾害密度、土地利用类型等5个指标作为自然环境阻力因子,分别指代地形、水系、植被、地质灾害及不同地类的生态阻力;选取人口密度、GDP密度、距公路与铁路距离、距建设用地距离、商业与公共服务设施密度等5个指标作为人为干扰阻力因子,分别指代人口、经济、道路、城镇人工建成环境与社会基础设施的生态阻力,将单因子分析结果分为5级,建立综合阻力评价体系,以响应流域树模式概念模型中自然与人文要素的阻力设定条件(图S1)。为消除各因子间的潜在相关性而导致的多重共线性干扰与信息冗余,本研究使用SPCA的贡献值、特征值与荷载矩阵,计算各生态阻力因子的权重^[46-48],继而将各生态阻力因子进行加权求和,建立长江流域的综合生态阻力面,采用自然断裂法将其综合阻力大小划分为低、次低、中等、次高与高阻力5个等级。最后,利用MCR模型提取生态廊道。基于生态源地、生态阻力面与累积耗费距离,运用MCR定量分析模拟生态流的运行,生成所有源/汇点间的生态廊道,并利用重力模型评价源地间相互作用强度,筛选生态网络中对长江流域生态连通性起重要作用的关键生态廊道^[43,44],构建流域山水生态网络,进而形成“斑块-廊道-源地”景观生态格局(表S1)。

4.2 长江流域“山-水-城”空间组织的多尺度结构模式

(1) 从流域整体尺度来看,2020年长江流域已形成长三角城市群、长江中游城市群和成渝双城经济圈等国家级城市群,包含3个超大城市、5个特大城市、22个大城市及诸多中小城市与城镇,流域内2/3以上的城市均沿长江干支流分布,处于不同等级河流水系的汇合点,形成分级梯度发展的城市空间组织格局,并与流域枝状水系、复杂地形交互适应,形成典型的流域树模式(如上海位于长江汇入东海的河口处,重庆、武汉、南京分别位于嘉陵江、汉水、秦淮河与长江交汇处)。整体来看,由于山地地形与江河水系等自然地理条件的物理阻隔,以及经济发展水平、社会功能结构、内外源制度等人文因素的空间差异,长江流域城镇体系空间分布不平衡与非连续性特征明显,城市群发育程度呈现东高西低的整体态势,形成依存于不同地理条件、具有空间差异性的流域山水人居景观(图4(a))。

(2) 从子流域尺度来看,嘉陵江、湘江、赣江等子流域面积超过8万 km^2 ,其河流水系呈现枝状结构特征,子流域内城镇发展与河流水系、地形地貌长期交互作

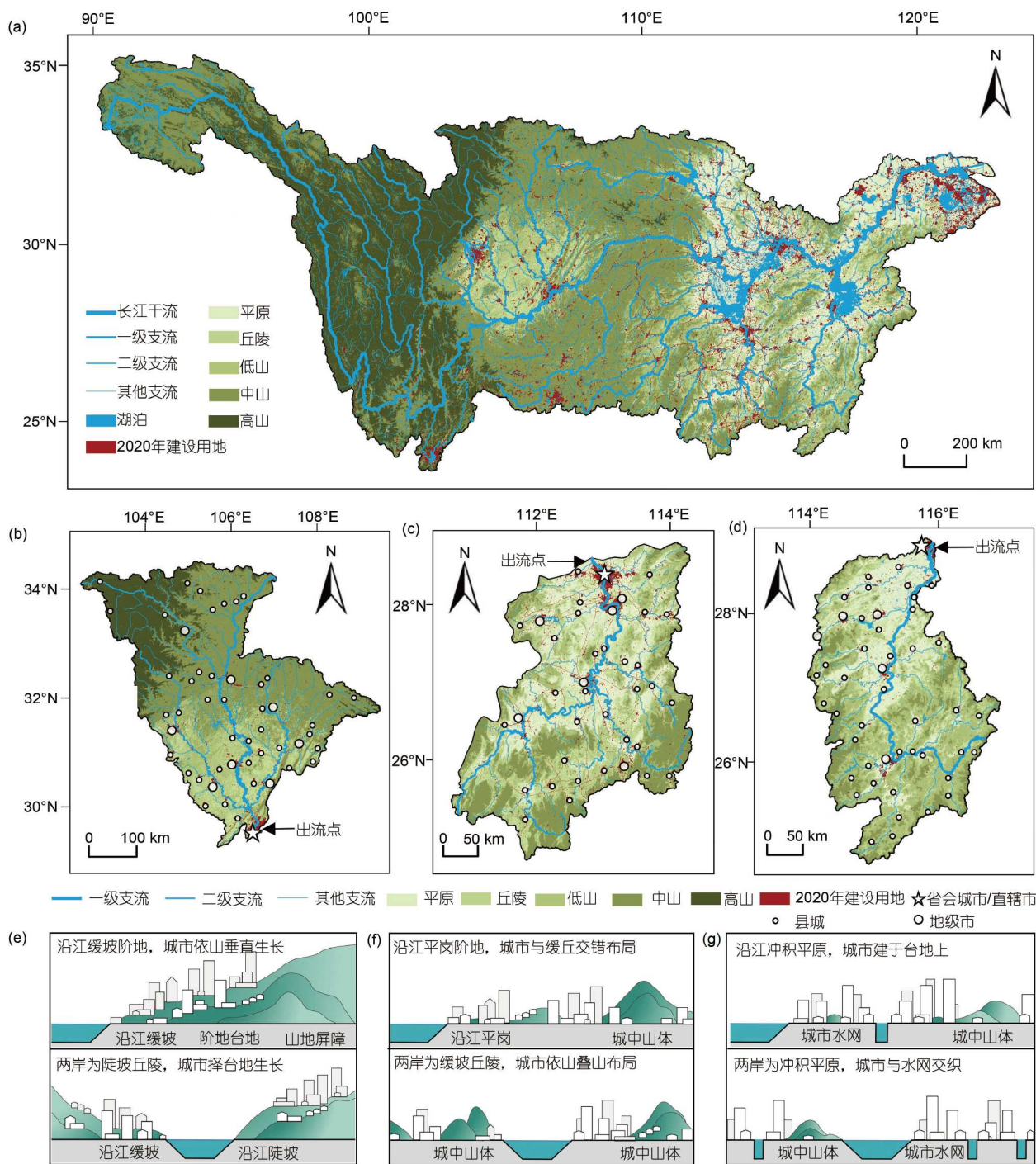


图 4 长江流域“山-水-城”空间组织的多尺度结构模式。(a) 长江流域; (b) 嘉陵江流域; (c) 湘江流域; (d) 赣江流域; (e) 上游地区(三峡库区典型城市); (f) 中游地区(江南丘陵地区典型城市); (g) 下游地区(长三角典型城市)

Figure 4 The multi-scale structural pattern of the "mountain-water-city" spatial organization in the Yangtze River Basin. (a) Yangtze River Basin; (b) Jialing River Basin; (c) Xiangjiang River Basin; (d) Ganjiang River Basin; (e) upstream areas (typical cities in the Three Gorges Reservoir Area); (f) midstream areas (typical cities in Jiangnan hilly areas); (g) downstream areas (typical cities in the Yangtze River Delta)

用, 形成典型的流域树模式。例如, 嘉陵江流域上游于秦岭山区曲流嵌绕, 并由中游盆地丘陵区进入下游平

行岭谷地带, 其间, 广元、阆中、南充等城市沿嘉陵江干流而下, 绵阳、遂宁等城市沿涪江而下, 广安等城市

沿渠江而下,三江继而交汇于合川,并从重庆主城汇入长江,其流域树模式特征凸显;而湘江流域在三面环山、一面临湖的马蹄状山水格局中,呈现出树枝状水系与环状结构地势特征,上游、中游地区丘陵与盆地相间分布,永州、衡阳等城市沿江而下,而下游地区平原与河湖岗地交织,长沙、株洲、湘潭等城市构成长株潭城市群,山、水、城各要素组织关系同样呈现出典型的流域树模式(图4(b~d))。

(3) 从城市尺度来看,无论是重庆、武汉、南京等超大/特大城市,还是万州、九江、镇江等大/中/小城市,长江流域上、中、下游地区城市在规划与建设中均强调与自然山水环境的协调共生关系,促进城市与山水、自然与人文的和谐统一。同时,由于流域地理条件的梯级分异,上中下游山、水、城生态系统的作用方式与程度不同,形成具有地域特色的山水城市景观格局,造就了巴山蜀水的文化基因与江南水乡的地域景观。例如,位于上游的重庆,两江环绕,平行岭谷穿插于人居组团间,形成多维立体的城市山水景观;位于中游的长沙,集合山水林田洲垸等自然资源,塑造楚汉名城与山水洲城交融的城市空间结构;而位于下游的南京,彰显“襟江带湖”的古都山水形势,形成“江河融汇、城丘绿间”的城市风貌与拥江发展格局(图4(e~g))。

这种不同尺度的流域“山-水-城”空间组织关系,形成多重嵌套的整体性结构。事实上,从要素流的空间转移视角来看,资本、人口、信息等具有多层次的流动特征,使长江流域社会经济发展与自然山水环境间存在着跨越空间距离的复杂网络结构,进一步强化流域山、水、城生态系统的整体关联性^[49]。同时,由于不同尺度城镇社会经济系统与自然山水环境系统占据的空间实体具有地理差异性,两者的空间组织关系、结构模式等随尺度变化而呈现出明显的空间分异规律——在城市尺度,结合地域历史文化与山水形势,形成丰富多元的山、水、城景观格局;而在流域尺度,山、水、城空间组织关系则呈现典型的流域树模式。

4.3 长江流域“山-水-城”空间组织模式的生成与演化过程

(1) 萌芽。早期城市逐水而居、择地筑城的自组织过程。长江流域“山-水-城”空间组织具有多尺度嵌套特征,呈现典型的流域树模式,其生成与演化是流域自然山水环境与社会经济客体长时间交互适应的结果。新石器时代,长江沿岸已出现从事稻作农业的聚居村落,

并从自组织的分散村落向集聚的功能复合型聚落群与早期城市发展,从三星堆、盘龙城、石家河、城头山、良渚等遗址来看,其所在位置均位于沿江低丘岗地边缘的冲积台地或缓坡阶地之上,择地势较高处布置大型建筑与冶炼作坊,城垣与城壕结合周边河流山体因地制宜布局,城址平面形状不甚周正规整,且多与附近河流相通(如良渚古城修建了复杂的水利系统,城头山、淹城等古城内可行舟通船)^[50,51]。可见,长江流域史前城市具有因江而建、沿江分布的特征,中国先民在逐水而居的过程中,偏向于择平坦高台处筑城定居:滨水临江有便于舟楫航运,高台坡地有利于防洪排涝,冲积河滩有助于农桑之事。这种临江傍水、结合地形的早期聚落自然生长模式,体现出先民充分尊重并利用自然环境的生态智慧,在历史脉络中持续形塑着长江流域城乡聚落的空间组织逻辑。

(2) 生成。传统城镇以水为轴、城景相融的点轴发展态势。秦汉时期,长江成为出川入蜀的重要通道,都江堰工程的修建改善了成都平原的水循环过程,体现了人类经济社会发展对于水域生态系统的作用逐渐增强。随着中原居民逐渐向长江中、上游地区迁移,在水水、水陆交汇处置地营城,为未来长江流域区域中心城市的分布奠定了基础(如重庆、武汉、长沙等)^[28]。唐宋以来,随着南方农业经济的发展,中国城镇的空间分布重点逐渐由黄河流域向长江流域推进,特别是宋代,长江航运与造船技术已十分发达^[52],由长江干支流与大运河构成的水运网,将沿岸城镇连结在一起,通过水系网络的结构耦合作用,在上中下游局部地区开始呈现“点-轴”布局态势。直至明清时期,长江流域城市仍局限于城郭之内,主要以“点”的形式展开布局,对周边地形条件与江河环境的改造较小,具体表现为营城建设对流域山水格局的顺从与遵循^[53],叙州(今宜宾)、重庆、武汉、江宁(今南京)等城市依江而下,形成山、水、城、景相生相融的流域环境共同体。

(3) 强化。由封闭走向开放、上中下游贯通的流域人居系统。鸦片战争以后,随着上海、汉口、重庆等相继对外开埠,打破了自给自足的以农业发展为主的传统经济格局,沿长江及其支流岸线拓展新的生长轴,形成沿江带状组团空间结构。同时,近代工业的兴起与新式轮运的引入,不断提升长江航运能力,极大加强长江沿江城市人流、物流、信息流的集聚与扩散功能,流域系统的“点-轴”组织关系整体开始形成,其对外经济联系与开放度得到极大提升。直到1970年代初,连接上

海、南京、铜陵等下游城市的铁路贯通,以及成渝铁路、皖赣铁路等交通走廊的建成,沿线开始形成新的集聚-扩散态势,加之南京、武汉、重庆长江大桥等跨江桥梁的修建,促使沿江城市逐步实现跨江、越山生长,城市功能结构与山水环境相互作用形成复杂多元的空间形态.尤其是1978年改革开放后,长江沿岸地区外向型经济联系不断强化,现代工矿城市、工商业城市、交通枢纽城市等主体功能各异的城市构成长江流域上中下游协作网络,长江成为中国“T”型开发模式的主轴,主要的“点-轴”框架形成,并呈现出非均衡发展的“核心-边缘”空间规律与多尺度的“双核结构”现象^[28,32](如南昌-九江、长沙-岳阳等双核结构).可见,在被动与主动开放的过程中,长江流域山、水、城空间组织关系处于不断变化与更新的过程,并受地域特殊事件(如战争)与经济技术革新的影响,实现跃迁式发展.

(4) 成熟. 自然与人文综合影响下的“点-轴-网”组织关系. 21世纪以来,随着沪渝高速、沪蓉高速、沪渝蓉沿江高铁的相继开通及建设,以及三峡工程的完工、黄金水道功能的提升与西部陆海新通道的建设,长江流域已成为全球最大的以水运为主体的、包括铁路、公路、管廊等组成的综合性运输通道^[54],重庆、武汉、上海等港口城市的腹地纵深得到进一步拓展,上游地区的水能资源经由大型水电站输往中下游地区,山地丘陵地区的农矿资源向沿海沿江港口集散,资金-技术密集型产业向沿海地区与沿江中心城市集聚,沿江地区成为重要的产业带与城镇发展密集区.成渝双城经济圈、长江中游城市群、长三角城市群沿江而下,呈簇群组团形式分别布局于盆地岭谷地带、丘陵缓坡地带与冲积平原地带,构成上、中、下游的区域发展中心,带动流域社会经济整体发展,形成流域树的“点-轴-网”结构模式.从景观生态学视角来看,这种流域树模式的网络系统呈现出典型的“斑块-廊道-源地”景观格局特征.本研究集成DEM、POI、交通、土地利用等多源数据,识别长江流域主要生态源地与关键生态廊道,进而建立流域树模式的生态网络.首先,运用MSPA方法,识别2020年长江流域7种景观类型,利用dPC评价流域内核心斑块间的连接水平,筛选出主要生态源地79.31万km²,分布在上游横断山脉、北部秦岭-大巴山地区以及中游江南丘陵地区,说明长江流域景观构成以核心区大型斑块为主(主要位于山地丘陵地区),有利于维系流域生态稳定性.其次,从自然与人文两个维度

综合评价长江流域生态源地扩张的阻力值,结果表明,低阻力区面积为42.16万km²,主要分布在横断山脉、雪峰山脉等山地丘陵地区以及洞庭湖、鄱阳湖等水网密集地区;而高阻力区面积为5.25万km²,占比最低,主要分布于建设用地相对集中的长三角城市群、长江中游城市群与成渝双城经济圈(图5(a)).

基于此,利用MCR模型,提取2020年长江流域连接生态源地的生态流通道861条,再利用重力模型筛选其中关键潜在生态廊道共160条,平均长度达到446.38 km,集中于长江流域中游地区,并分散布局在山地丘陵地区及各类自然保护区范围内(图5(b)).可见,目前长江流域山、水、城生态系统的功能稳定性较强而整体连通性不高,流域城镇空间、山地坡面、主要水域之间的生态过程仍然受阻,流域树模式网络系统的生态服务功能以及上中下游之间的竞合关系有待从流域尺度进行全面协调.尤其是受城镇快速扩张与人类经济活动的综合影响,长江流域国土空间开发强度整体较高,以地质灾害(滑坡、崩塌等)与水灾为主的自然灾害频发,重大工程与气候变化相交织,增加了流域生态环境问题的复杂性与不确定性.故而,作为中国乃至全球的重要生态安全屏障,新时期长江流域强调“共抓大保护、不搞大开发”,以流域(子流域)为单元实施山水林田湖草系统保护与治理,河流、湿地、森林等生态系统正逐步得到总体修复,未来将进一步提升流域生态网络的稳定性及连通性^[55].

总体而言,长江流域“山-水-城”空间组织模式的形成与演化,由“点”发展为“点-轴结构”,不同等级规模的发展中心、产业廊道、生长轴线组成了社会经济组织的空间网络,与流域系统内的山水生态网络交互适应,形成复杂的流域树模式网络系统.同时,人口、能源、技术等要素在长江流域人居系统中具有的跨区域供需关系,是山、水、城各要素组织关系解构与重组的驱动力,进而使得城镇社会经济系统与自然山水环境系统在能量流动、物质循环过程中,形成上游向下游梯级递增的经济发展格局与“两横三纵”的网络型国土空间架构(“两横”指长江干流轴线与南部的铁路轴线,“三纵”指东部沿海京沪高铁轴线、中部京广与京九线形成的纵轴以及西部成渝与渝黔线等形成的纵轴)^[56].这种“人工+自然”复合网络系统,以点轴结构为基础,以长江流域带形自然属性特征及城镇空间复杂性特征为触媒,通过整合并优化流域内资源能源、信息技术等要素,促进城镇功能片区与产业密集地带的分工协作、

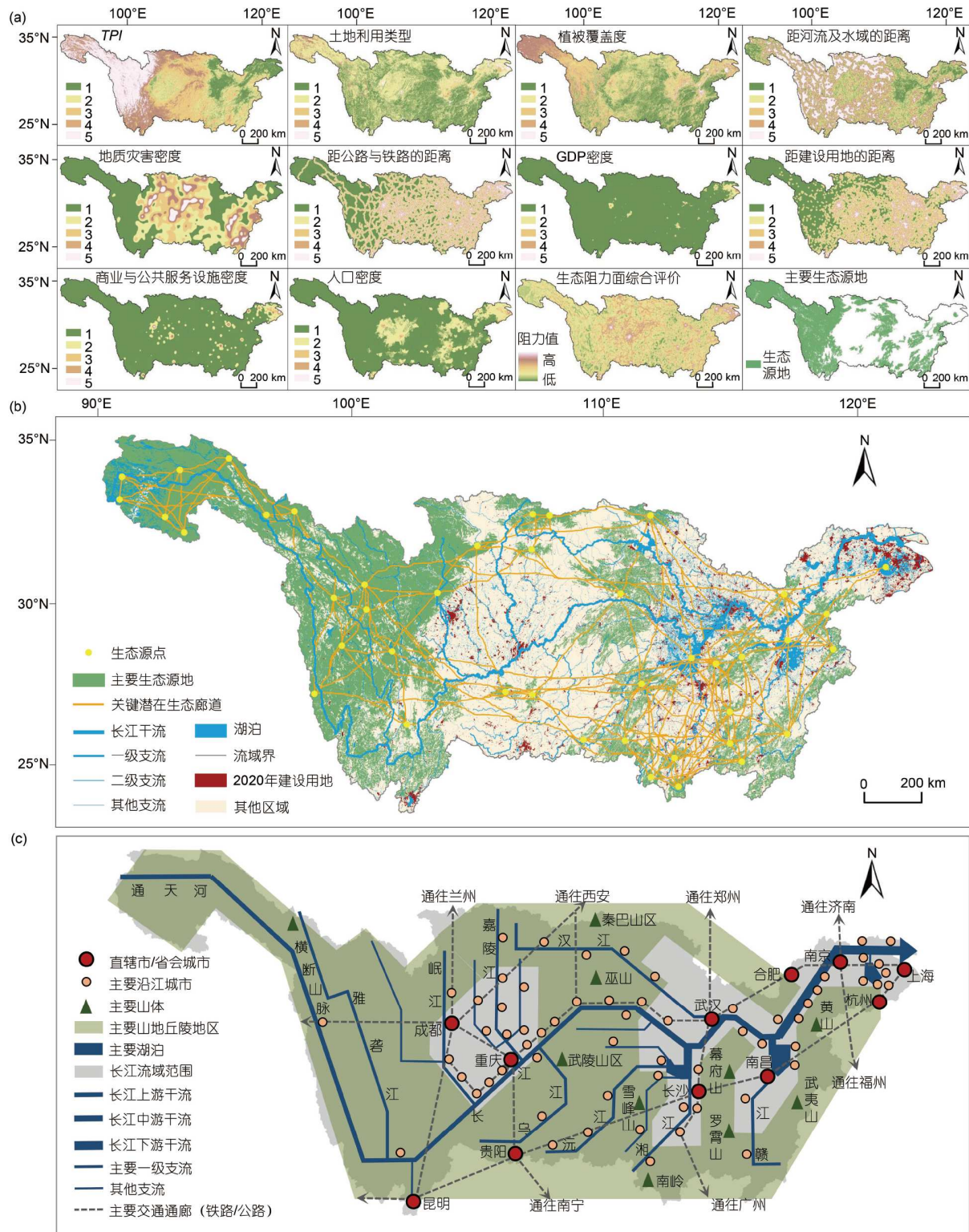


图 5 长江流域“山-水-城”空间组织的流域树模式网络系统. (a) 生态阻力评价与生态源地识别; (b) 流域树模式的生态网络系统; (c) 流域树模式的“人工+自然”复合网络示意图

Figure 5 The river basin tree pattern network system of the “mountain-water-city” spatial organization in the Yangtze River Basin. (a) Ecological resistance assessment and ecological source identification; (b) the ecological network system of the river basin tree pattern; (c) the “artificial + natural” composite network diagram of the river basin tree pattern

优势互补。值得注意的是,随着长江经济带国家战略深入实施,各个不同等级规模城市的“点”,与整个流域自然与人文要素互动的广度和密度不断增强,形成基础设施的连通网及生产要素的流动网,通过复杂网络的外延,长江流域内外生态要素及社会经济的联系得到强化,将更大范围内的山、水、城要素进行合理配置与优化组合,形成流域空间经济系统的梯度推移,促进治山、治水、治城一体化推进与流域树模式的可持续发展(图5(c)).

4.4 长江流域“山-水-城”空间组织模式的生成与演化规律

长江流域“山-水-城”空间组织的流域树模式,是以长江干支流为纽带、以上中下游山林湿地为源地、以城乡聚落为生态服务对象的组织模式,也是以自然山水条件为依托、以流域生态资源与环境可持续利用为命脉的“自然-社会-经济”复合系统^[57],从逐水而居的早期聚落自然生长模式,发展为山水城景相生相融的朴素均衡组织模式,从点轴框架的基本确立到复杂网络的交织一体,其外在表征为流域“山-水-城”空间组织异质同构的树状形态,究其根本,是自然与人文因素耦合关联而形成的网络系统,从其“萌芽-生成-强化-成熟”的演化过程来看,自然与人文因素的相互作用是流域树模式形成的内在动因,流域空间单元间的互补性与通达性是“自然力+人工力”综合作用的基础^[58,59],而流域人居系统的复杂性与适应性是山、水、城生态系统

协调发展的关键,共同推动长江流域“山-水-城”空间组织模式的生成与演化(图6).

(1) 自然与人文因素的空间相互作用为内在动因. 长江流域“山-水-城”空间组织的流域树模式是流域城镇社会经济系统与自然山水环境系统之间动态适应与长期演化的结果,受自然山水环境与社会经济技术等多种因素相互作用的影响,可将其归类为“自然”与“人文”两类^[53]. 自然因素主要包括区位条件、河流水系、地形与地质条件等,是长江流域城镇社会经济发展的生态基底;人文因素主要包括经济技术体系(航运交通条件、经济技术革新等)与地域社会文化(地域特殊事件、公共政策制度等)等,是长江流域城镇空间扩张与要素流动的根本动力,对流域人居空间发展具有引导与催化作用. 尤其是现代信息技术进步与创新要素集聚扩散,不断促使长江流域山、水、城空间组织关系解构与重组,进而形成更为复杂的流域树组织模式. 在“自然-人文”因素空间相互作用的过程中,长江干支流沿岸城镇形成较高的对外社会经济联系强度,不同尺度区域的一体化发展,各种生产要素的重新组合,造就了流域树模式的网络体系.

(2) 流域空间单元的互补性与通达性为形成基础. 由于流域产业结构与自然资源的差异,流域内部的功能互补关系决定“自然-人文”因素的空间相互作用方式与强度. 长江流域自然地理条件复杂多样,地域差异明显,空间发展不平衡,上中下游资源结构、技术水平与产业发展的功能互补性强. 这种互补性,是社会经济客

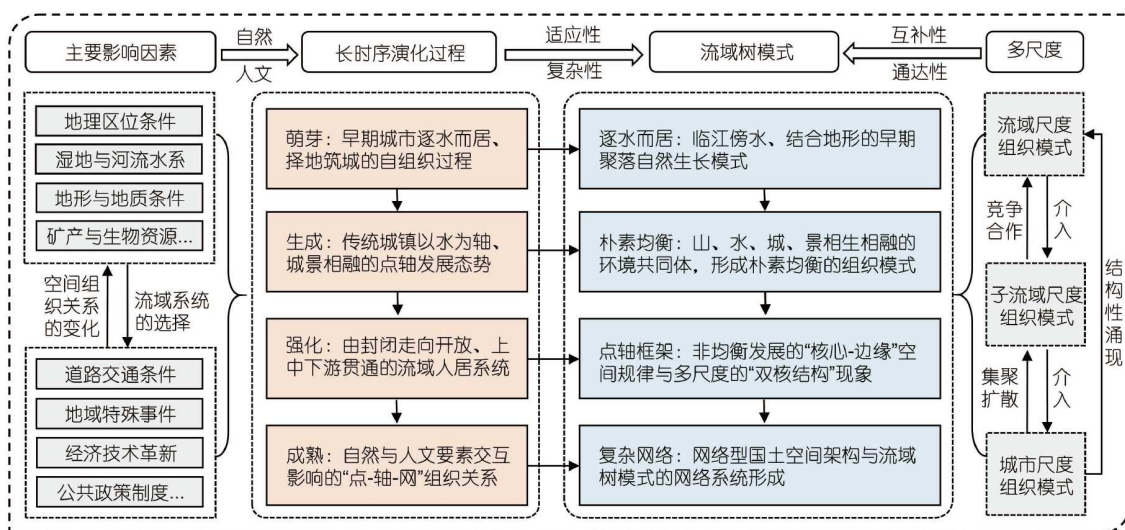


图 6 长江流域“山-水-城”空间组织模式的生成与演化规律

Figure 6 The generation and evolution law of the “mountain-water-city” spatial organization pattern in the Yangtze River Basin

体长期自组织形成的结果,使各要素得以流动与变化,生成结构各异、功能互补、协调共生的流域“山-水-城”空间组织模式;另一方面,流域系统的通达性直接影响自然与人文因素的聚集及扩散效率,也直接影响流域与子流域、城市群与城市之间相互作用的强度^[60]。以水运为中心的复合运输系统,构成长江流域城镇社会经济联系轴、信息网与能源走廊,随着区域性交通网络的不断优化,高速公路与铁路等新媒介的不断介入与链接,促进上中下游城镇间资本、产业、劳动力的双向流动与互补,人流、资金流、信息流等在近远程耦合与时空压缩过程中,各种社会经济要素在空间上集聚扩散,长江流域“山-水-城”空间组织关系不断发生变化。因此,长江流域山、水、城协调共生发展需遵循整体关联性与协同互补性原则,建立多重嵌套的整体结构与流域生态共同体,提升流域人居系统的社会福祉与经济效应,推动流域/子流域空间单元的资源优化配置与可持续发展。

(3) 流域人居系统的适应性与复杂性为组织关键。长江流域不同尺度的“山-水-城”空间组织之所以出现异质同构现象,是由于其流域人居系统内已形成依存于不同城镇结构形态与自然地理条件的多尺度空间组织关系,其跨尺度的作用关系进一步促使流域树模式的形成演化。根据复杂适应系统理论,山、水、城生态系统的复杂程度决定其适应能力的大小^[53],高原山地、丘陵盆地、平原湿地以及江河湖泊等自然山水环境的多样性,直接导致长江流域自然与人文因素空间相互作用的复杂性。同时,长时序历史演进过程中,长江流域城镇社会经济转型、地域特殊事件等导致“山-水-城”空间组织关系不断变化调整——作为环境适应性主体,上、中、下游地区城镇主动选择并占据适宜建设的地理空间,为适应流域地形条件与水系变化,改变自身功能结构与组织模式,涌现出复杂的城镇空间生产行为与社会经济网络,并由多个相对简单的城镇空间单元,通过点-轴系统的渐进式扩散与集聚,演化成更为复杂的城市群及流域城镇体系,“自然-人文”因素的空间相互作用界面也由此跃升至子流域与流域尺度。这种从城市到城镇体系的结构性涌现,即为流域树模式由无序到有序的生成过程,是城市功能组团、城市整体形态、城镇体系结构等不同尺度的空间要素适应于流域自然山水环境的结果,长江流域“山-水-城”空间组织模式的组织关系与结构层级也由此愈发复杂,形成相对稳态、复合多元的网络系统。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 流域“山-水-城”空间组织具有整体关联性、协同互补性、动态适应性、尺度嵌套性等基本特征,呈现出典型的异质同构现象和树状组织结构。由此,本研究提出流域“山-水-城”空间组织的流域树模式,其基本框架由水系构建而成,分枝形态随地形起伏而变化,并在干支流交汇处形成等级规模各异的城镇,其概念模型是城镇人文景观与自然山水环境在特定的流域中交互适应形成的动态结构,强调空间、自然、人文互动影响下多要素、多尺度的空间组织规律及其形成与演化机理。

(2) 流域“山-水-城”空间组织模式是城镇社会经济系统和自然山水环境系统交错构成的复杂系统,其演化过程与流域社会经济发展阶段相适应,在社会经济客体的集聚与扩散过程中,流域城镇人文景观与山水生态网络的动态适应及调节,山、水、城空间组织关系的变化以及流域人居系统的选择,促使流域树模式的萌芽、生成、强化与成熟。

(3) 长江流域“山-水-城”空间组织具有多尺度嵌套的整体性结构,呈现出典型的流域树模式特征,历经“萌芽-生成-强化-成熟”渐进式生长过程,从逐水而居的早期聚落自然生长模式,发展为山水城景共生相融的朴素均衡组织模式,从长江流域“山-水-城”空间组织点轴框架的基本确立到复杂网络的交织一体,“自然-人文”因素的空间相互作用是流域树模式形成的内在动因,流域空间单元间的互补性与通达性是“自然力+人工力”综合作用的基础,流域人居系统的复杂性与适应性是山、水、城生态系统协调发展的关键,形成上游向下游梯级递增的经济发展格局与网络型国土空间架构。

5.2 讨论

(1) 流域“山-水-城”空间组织模式研究,涉及多要素、多系统、多过程的融贯综合探索,需科学审视流域城镇空间发展面临的关键挑战,聚焦生态基底、空间关联、经济协同、上中下游区域差异等视角,从流域山水林田湖草系统治理与多主体、多维度联动等方面予以重视,推动流域山、水、城生态系统有机共生,从系统思维出发,解构流域人居系统核心要素组成、功能结构及交互适应关系的核心要义^[2],探索流域“自

然-人文”影响因素及其空间作用机制, 阐明流域“山-水-城”空间组织的一般性与地域性模式。

(2) 治山、治水、治城一体推进, 是流域“山-水-城”空间组织模式研究的重要目标。在新时代美丽中国建设同区域协调发展共促联动的美好愿景下, 需耕织流域人居系统与“山-水-城”空间组织模式的理论认知, 揭示流域内自然与人文要素的交互适应机理及演化互馈规律, 探究跨流域城镇协同发展模式, 结合中国多山多水的地理条件与历史悠久的流域文明, 集成融贯地理学、生态学、城乡规划学等多学科理论方法, 从流域山、水、城生态系统的作用机理与适应过程出发, 建立结构完整、功能稳定的流域国土空间格局, 恢复和提升流域生态功能与生态服务能力, 将相关研究成果积极应用于流域国土空间规划与治理、流域城乡融合与区域协调发展、流域经济开发与生态修复、流域聚落历史文化遗产保护与人居数字孪生体系当中, 为管理者提供解决或缓解流域社会经济发展与资源环境保护矛盾的依据, 促进流域山、水、城走向和谐共生。

(3) 理论模型问题仍然是流域树模式研究的难点。理论模型的提出、完善与成型一般需要经过现象发现、机制分析与计算机模拟3个阶段^[28]。本研究所作的机制分析与模式提炼主要还限于质性分析与中国典型案例实证。流域树模式研究的完善, 应利用系统动力学、深度学习与大数据挖掘等方法, 至少还需对以下内容做出定量的机理分析与全球更多案例的比较研究: 其一, 流域树模式如何进行数理推导, 如何量化其“自然+人文”地理过程的双向耦合关系? 其二, 流域城镇聚落选址与地形起伏度、水系汇合点的关联度是否有阈值或最佳值? 城镇规模等级与干支流汇合点的等级是否存在数量层面的对应关系? 其三, 结合全球典型流域分析, 流域“山-水-城”空间组织模式有哪几类主要变式? 这些地域性模式在流域交通联系、生态网络、产业结构方面是如何交互作用的? 最后, 如何模拟流域“山-水-城”空间组织模式未来演化趋势, 综合比较不同情景下流域树模式的社会、生态、经济效益, 定量评价并选择山、水、城各要素在流域内的最优组织模式, 并辅助流域开发与保护决策的制定?

参考文献

- 1 Zhao W M. Scientific connotations of mountain urban and rural planning—the academic statements in the launch conference of academic committee of mountain urban and rural planning, Urban Planning Society of China (in Chinese). *J Human Settl West China*, 2014, 29: 4–9 [赵万民. 论山地城乡规划研究的科学内涵——中国城市规划学会“山地城乡规划学术委员会”启动会学术呈述. 西部人居环境学刊, 2014, 29: 4–9]
- 2 Luo J, Xia J, Hao F H, et al. Theoretical thinking and practical development on coordination and high-quality governance of human activity space in river basins in China (in Chinese). *J Nat Resour*, 2024, 39: 2505–2524 [罗静, 夏军, 郝芳华, 等. 中国流域人类活动空间协同与高水平治理的理论思考与实践发展. 自然资源学报, 2024, 39: 2505–2524]
- 3 Wang S S, Li X L, Yan S F. Research on the design method of China's traditional urban planning based on large-scale landscape environment (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 3564–3571 [王树声, 李小龙, 严少飞. 结合大尺度山水环境的中国传统规划设计方法. 科学通报, 2016, 61: 3564–3571]
- 4 Qian X S. Socialist China should build shan-shui city (in Chinese). *City Plan Rev*, 1993, 17: 18–19 [钱学森. 社会主义中国应该建山水城市. 城市规划, 1993, 17: 18–19]
- 5 Wu L Y. The urban model and protected objects of Guilin (in Chinese). *City Plan Rev*, 1988, 12: 3–8 [吴良镛. 桂林的城市模式与保护对象. 城市规划, 1988, 12: 3–8]
- 6 Wang F, Liu Y, He J S, et al. River basin habitats science: framework and prospects (in Chinese). *J Nat Resour*, 2024, 39: 997–1007 [汪芳, 刘永, 贺金生, 等. 流域人居系统科学的框架探索与研究展望. 自然资源学报, 2024, 39: 997–1007]
- 7 Wang H, Zhou G H, Zhao W M, et al. The analysis framework and research prospect of “mountain-water-city” spatial pattern (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2024, 79: 1478–1502 [王华, 周国华, 赵万民, 等. “山-水-城”空间格局的分析框架与研究展望. 地理学报, 2024, 79: 1478–1502]
- 8 Liu C M, Li Z L, Wang Z G, et al. Key scientific issues and research directions of the interconnected river system network (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2021, 76: 505–512 [刘昌明, 李宗礼, 王中根, 等. 河湖水系连通的关键科学问题与研究方向. 地理学报, 2021, 76: 505–512]
- 9 Yan Z M, Du D B, Liu C L, et al. Spatio-temporal evolution and generative mechanism of global transboundary water resources cooperation (in Chinese). *J Nat Resour*, 2021, 36: 1825–1843 [颜子明, 杜德斌, 刘承良, 等. 全球跨境水资源合作时空演变及生成机制. 自然资源学报, 2021, 36: 1825–1843]
- 10 Belletti B, Garcia de Leaniz C, Jones J, et al. More than one million barriers fragment Europe's rivers. *Nature*, 2020, 588: 436–441
- 11 Willett S D, McCoy S W, Perron J T, et al. Dynamic reorganization of river basins. *Science*, 2014, 343: 1248765

- 12 Qin Y, Mueller N D, Siebert S, et al. Flexibility and intensity of global water use. *Nat Sustain*, 2019, 2: 515–523
- 13 Tang C C, Sun W. Comprehensive evaluation of land spatial development suitability of the Yangtze River Basin (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2012, 67: 1587–1598 [唐常春, 孙威. 长江流域国土空间开发适宜性综合评价. *地理学报*, 2012, 67: 1587–1598]
- 14 Xia J, Zhang S Y, Zhang Y Y, et al. Key technologies of integrated urban water system management and their applications in the Yangtze River Economic Belt (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2024, 79: 2163–2175 [夏军, 张世彦, 张永勇, 等. 城市水系统综合治理关键技术及其在长江经济带的示范应用. *地理学报*, 2024, 79: 2163–2175]
- 15 Lü G N, Zhou C H, Lin H, et al. Development overview and some thoughts on geographic synthesis (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 2542–2554 [閻国年, 周成虎, 林珏, 等. 地理综合研究方法的发展与思考. *科学通报*, 2021, 66: 2542–2554]
- 16 Sabo J L, Ruhi A, Holtgrieve G W, et al. Designing river flows to improve food security futures in the Lower Mekong Basin. *Science*, 2017, 358: eaao1053
- 17 Edmonds D A, Toby S C, Siverd C G, et al. Land loss due to human-altered sediment budget in the Mississippi River Delta. *Nat Sustain*, 2023, 6: 644–651
- 18 Xi Q J, Zhong H, Wang T, et al. Spatio-temporal variation of gray-green-blue storage capacity in nine major basins of China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4437–4448 [奚巧娟, 钟华, 王涛, 等. 中国主要流域灰-绿-蓝蓄水能力时空演变. *科学通报*, 2021, 66: 4437–4448]
- 19 Zhou G S, Zhou L, Ji Y H, et al. Basin integrity and temporal-spatial connectivity of the water ecological carrying capacity of the Yellow River (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 2785–2792 [周广胜, 周莉, 汲玉河, 等. 黄河水生态承载力的流域整体性和时空连通性. *科学通报*, 2021, 66: 2785–2792]
- 20 Weng J Z, Yang Y X, Mu Z X, et al. Mechanisms and spatiotemporal variation characteristics of flooding over northwestern China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2024, 79: 2768–2779 [翁嘉泽, 杨依欣, 穆振侠, 等. 中国西北干旱区流域洪水的形成机制及时空变化特征. *地理学报*, 2024, 79: 2768–2779]
- 21 Zhao W M. Study on The Construction of Human Settlement Environment in the Basin of Southwest China (in Chinese). Nanjing: Southeast University Press, 2011 [赵万民. 西南地区流域人居环境建设研究. 南京: 东南大学出版社, 2011]
- 22 Zhao W M, Zhao W. Landscape and ecological research on human settlements construction in mountainous watershed: a case study of Wujiang (in Chinese). *City Plan Rev*, 2005, 29: 64–67 [赵万民, 赵伟. 山地流域人居环境建设的景观生态研究——以乌江流域为例. *城市规划*, 2005, 29: 64–67]
- 23 Gao J X. The exploration of essential theories about regional ecology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 693–700 [高吉喜. 区域生态学核心理论探究. *科学通报*, 2018, 63: 693–700]
- 24 Wang H, Fang G C, Zhao W M, et al. Study on the growth model and formation mechanism of “mountain-water-city” spatial pattern in the Three Gorges Reservoir Area: take Wanzhou as an example (in Chinese). *J Nat Resour*, 2024, 39: 1698–1719 [王华, 方国臣, 赵万民, 等. 三峡库区“山-水-城”空间格局的生长模式与形成机理研究——以万州为例. *自然资源学报*, 2024, 39: 1698–1719]
- 25 Zeng C F, Zhou Y Q, Duan Z D, et al. Life community health trajectory evaluation of mountains, rivers, forests, farmland, lakes, grass, and cities: a case study of Three Gorges Reservoir Area (in Chinese). *J Chongqing Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 37: 57–67 [曾春芬, 周仪琪, 段振东, 等. 山水林田湖草·城生命共同体健康轨迹评价——以三峡库区重庆段为例. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 37: 57–67]
- 26 Shi Y, Zhao X, Zhu J L, et al. Evolutions, functions and conservations of mountains-rivers-forests-croplands-lakes-grasslands-deserts system (in Chinese). *Chin J Nat*, 2022, 44: 1–18 [石岳, 赵霞, 朱江玲, 等. “山水林田湖草沙”的形成、功能及保护. *自然杂志*, 2022, 44: 1–18]
- 27 Wang G Y, Chen T. Flexible urban spatial planning for river basins to address multidimensional issues of water constraints: conceptual framework and response model (in Chinese). *Urban Plan Forum*, 2023, 67: 86–92 [王高远, 陈天. 应对多维水约束的流域城镇空间弹性规划: 概念框架与响应模式. *城市规划学刊*, 2023, 67: 86–92]
- 28 Lu Y Q. The mechanism of the model of dual-nuclei structure (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2002, 57: 85–95 [陆玉麒. 区域双核结构模式的形成机理. *地理学报*, 2002, 57: 85–95]
- 29 Zhou X H. Study on human settlements construction of Jialing river basin (in Chinese). Doctor Dissertation. Chongqing: Chongqing University, 2012 [周学红. 嘉陵江流域人居环境建设研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2012]
- 30 Qian N, Zhang R, Zhou Z D. River Bed Evolution (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987 [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987]
- 31 Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol Soc Am Bull*, 1945, 56: 275–370
- 32 Lu Y Q. The rule cognition and theoretical construction of spatial pattern in China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2021, 76: 2885–2897 [陆玉麒. 中国空间格局的规律认知与理论提炼. *地理学报*, 2021, 76: 2885–2897]
- 33 Fu B J. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 3768–3779 [傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应. *科学通报*, 2022, 67: 3768–3779]
- 34 Lu D D. Formation and dynamics of the “pole-axis” spatial system (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2002, 22: 1–6 [陆大道. 关于“点-轴”空间结构系

- 统的形成机理分析. 地理科学, 2002, 22: 1–6]
- 35 Lu D D. Review and understanding of “pole-axis system” theory and the “T-shaped” spatial structure (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2024, 79: 2951–2960 [陆大道. “点-轴系统”理论与“T”字型结构的回顾及启示. 地理学报, 2024, 79: 2951–2960]
- 36 Wu X L. Function of river system and spatial organization model of basin economy (in Chinese). *J Suihua Teachers College*, 2000, 20: 14–17 [吴相利. 河流系统功能与流域经济的空间组织模式剖析. 绥化师专学报, 2000, 20: 14–17]
- 37 Liu Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2020, 40: 1221–1234 [刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. 地理科学, 2020, 40: 1221–1234]
- 38 Wu C J. The core of study of Geography: man-land relationship areal system (in Chinese). *Econ Geogr*, 1991, 11: 1–6 [吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统. 经济地理, 1991, 11: 1–6]
- 39 Zhang L, Lu C X, Wu Y M, et al. An overall development of water resources for China’s rivers (in Chinese). *J Nat Resour*, 2014, 29: 295–303 [张雷, 鲁春霞, 吴映梅, 等. 中国流域水资源综合开发. 自然资源学报, 2014, 29: 295–303]
- 40 Duan J, Jiang Y, Li Y G, et al. Space gene: connotation and functional mechanism (in Chinese). *City Plan Rev*, 2022, 46: 7–14, 80 [段进, 姜莹, 李伊格, 等. 空间基因的内涵与作用机制. 城市规划, 2022, 46: 7–14, 80]
- 41 Sun J, Southworth J. Indicating structural connectivity in Amazonian rainforests from 1986 to 2010 using morphological image processing analysis. *Int J Remote Sens*, 2013, 34: 5187–5200
- 42 Fan C M, Wang Z T, Tang N, et al. Construction of ecological network in downtown of Guiyang city based on morphologically spatial pattern and spatially principal component analysis (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2022, 42: 6620–6632 [范春苗, 王志泰, 汤娜, 等. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建. 生态学报, 2022, 42: 6620–6632]
- 43 Yao C Y, He Y M, Cheng J X, et al. Evaluation of ecological security pattern and optimization suggestions in Minjiang River Basin based on MCR model and gravity model (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2023, 43: 7083–7096 [姚材仪, 何艳梅, 程建兄, 等. 岷江流域生态安全格局评价与优化——基于最小累积阻力模型和重力模型. 生态学报, 2023, 43: 7083–7096]
- 44 Yu C L, Liu D, Feng R, et al. Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2021, 41: 290–301 [于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41: 290–301]
- 45 Yang H Y, Xiu C, Li L L, et al. Construction of ecological and urban network pattern or a bay area urban agglomeration oriented towards ecological synergy: a case of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2024, 44: 11049–11064 [阳慧园, 修晨, 黎丽莉, 等. 面向生态协同的湾区城市群生态与城镇网络格局构建——以粤港澳大湾区为例. 生态学报, 2024, 44: 11049–11064]
- 46 Lu J, Jiao S, Han Z W, et al. Promoting ecological restoration of deeply urbanized hilly areas: a multi-scale ecological networks approach. *Ecol Indic*, 2023, 154: 110655
- 47 Ke X L, Xiang M, Feng M. Research on ecological security evaluation of the core cities in Yangtze River Economic Belt based on grey clustering method (in Chinese). *Resour Environ Yangtze Basin*, 2017, 26: 1734–1742 [柯小玲, 向梦, 冯敏. 基于灰色聚类法的长江经济带中心城市生态安全评价研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26: 1734–1742]
- 48 Liu L C, Sun Z X, Wu F, et al. Evaluation of suitability and emission reduction benefits of photovoltaic development in Beijing-Tianjin-Hebei region (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2022, 77: 665–678 [刘立程, 孙中孝, 吴锋, 等. 京津冀地区光伏开发空间适宜性及减排效益评估. 地理学报, 2022, 77: 665–678]
- 49 Ren Y F, Fang C L, Sun S A, et al. Progress in local and tele-coupling relationship between urbanization and eco-environment (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 589–606 [任宇飞, 方创琳, 孙思奥, 等. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展. 地理学报, 2020, 75: 589–606]
- 50 Liu S L, Ding X S. The origin and development of cities in the Yangtze River Basin (in Chinese). *Study Pract*, 2024, 41: 121–129+2 [刘士林, 丁煦诗. 长江流域城市的起源与发展. 学习与实践, 2024, 41: 121–129+2]
- 51 Feng D, Li H Y, Ma C M, et al. Environmental change and human activity response to the rise and fall of Liangzhu hydraulic enterprise (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 1382–1396 [冯丹, 李海燕, 马春梅, 等. 良渚古城水利工程兴衰的环境变化与人类活动响应. 科学通报, 2025, 70: 1382–1396]
- 52 Zeng G. Condition and Strategy for Coordinated Development of Yangtze Economic Zone (in Chinese). Beijing: Economic Science Press, 2014 [曾刚. 长江经济带协同发展的基础与谋略. 北京: 经济科学出版社, 2014]
- 53 Wang H. Study on the adaptability of urban spatial morphology to mountains and rivers environment in the Three Gorges Reservoir Area (in Chinese). Doctor Dissertation. Chongqing: Chongqing University, 2021 [王华. 三峡库区城镇空间形态的山水环境适应性研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2021]
- 54 Lu D D. Economic belt construction is the best choice of economic development layout: the enormous potential for the Changjiang River Economic Belt (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2014, 34: 769–772 [陆大道. 建设经济带是经济发展布局的最佳选择——长江经济带经济发展的巨大潜力. 地理科学, 2014, 34: 769–772]
- 55 Yang G S, Xu X B. Foundation and strategy of well-coordinated environmental conservation and avoiding excessive development in the Yangtze River Economic Belt (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2020, 35: 940–950 [杨桂山, 徐昔保. 长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”的基础与

策略. 中国科学院院刊, 2020, 35: 940–950]

56 Wang C S, Fang M, Liu Y. Research on territorial development pattern optimization of Yangtze River Economic Belt (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2016, 31: 80–91 [王传胜, 方明, 刘毅. 长江经济带国土空间结构优化研究. 中国科学院院刊, 2016, 31: 80–91]

57 Li Y S, Hu Y. Construction of synergetic and symbiotic development mechanism of river basin system: a case study of Yangtze River Basin (in Chinese). Stud Soc Chin Charact, 2019, 25: 76–82 [黎元生, 胡熠. 流域系统协同共生发展机制构建——以长江流域为例. 中国特色社会主义研究, 2019, 25: 76–82]

58 Liu S J. A Comparative Study on Economic Development and Upper, Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Basin (in Chinese). Wuhan: Cental China Normal University Press, 1998 [刘盛佳. 长江流域经济发展和上、中、下游比较研究. 武汉: 华中师范大学出版社, 1998]

59 Ullman E L. American Commodity Flow. Seattle: University of Washington Press, 1957

60 Chen X Y. The formation, evolvement and reorganization of spatial structure in Yangtze River Economic Zone (in Chinese). Acta Geogr Sin, 2007, 62: 1265–1276 [陈修颖. 长江经济带空间结构演化及重组. 地理学报, 2007, 62: 1265–1276]

补充材料

- 图S1 生态阻力因子及其权重与分级
- 表S1 研究方法及对应公式、参数说明

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “流域‘山-水-城’空间组织模式及其生成机理”

The “mountain-water-city” spatial organization pattern in river basins and its formation mechanism

Hua Wang^{1,2,3}, Guohua Zhou^{1,2,3*}, Guohua Wu¹, Xiyu Guo¹ & Wanmin Zhao⁴

¹ School of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

² Key Laboratory of Geographic Big Data Development and Application in Hunan, Changsha 410081, China

³ Key Laboratory of Urban–Rural Transformation Process and Effect, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

⁴ School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400023, China

* Corresponding author, E-mail: uuy828@163.com

The spatial optimization of a river basin system and the integrated governance of mountains, waters, and cities within river basins have become focal areas in contemporary academic research, serving as essential pathways toward achieving sustainable development. China possesses abundant mountainous and aquatic resources. To construct a Beautiful China and advance socialist modernization, it is imperative to address the following critical questions: How can socio-economic development in urban areas be integrated within the geographical context of a river basin? How can the harmonious coexistence of mountains, waters, and cities be promoted through the establishment of a new territorial configuration, guided by coordinated and integrated governance of human activity spaces within it? This study adopts a scientific cognitive paradigm encompassing “factual representation-modeling-empirical analysis”. A systematic investigation was conducted to examine the connotative features, general pattern, and formation mechanism of “mountain-water-city” spatial organization in river basins. Focusing on the Yangtze River Basin, both theoretical and empirical analyses were undertaken using multi-source geospatial data, including elevation, vegetation coverage, land use, and points of interest. Research methods combined field surveys and textual analysis with morphological spatial pattern analysis and the minimum cumulative resistance model. Finally, the following points were uncovered.

The “mountain-water-city” spatial organization in a river basin refers to the dynamic process and laws of interactive adaptation between the mountain-water environment and the urban artificial environment within it. This spatial organization manifested holistic relevance, synergistic complementarity, dynamic adaptability, and scale nesting. There are typical phenomena of heterogeneous isomorphism and tree-like organizational structures. Hence, this paper proposes a river basin tree pattern for “mountain-water-city” spatial organization and delineates its conceptual model.

This spatial organization pattern was the outcome of long-term interactions between the urban socio-economic system and the mountain-water environmental system. Its evolution from germination to emergence, reinforcement, and maturity aligned with the socio-economic development stages in the basin. During the agglomeration and dispersion of socio-economic entities, this spatial organizational relationship changed and was selected by the river basin habitat system. Both the change and selection promoted the development of the river basin tree pattern.

The “mountain-water-city” spatial organization in the Yangtze River Basin exhibits a multi-scale, nested, and holistic structure. It reflects the typical characteristics of a river basin tree pattern, forming a stepwise economic development gradient from upstream to downstream regions. Concurrently, a network-based national territorial spatial framework has emerged. The development of this river basin tree pattern is driven by the interplay of multiple factors, including spatial interactions between natural and anthropogenic elements, the complementarity and accessibility among spatial units, and the inherent complexity and adaptability of the river basin habitat system.

These findings address fundamental questions regarding the general patterns and formation mechanisms of “mountain-water-city” spatial organization in river basins. They also advance scientific understanding of river basin habitats systems within these contexts, offering valuable insights for promoting harmonious coexistence among mountains, waters, and cities.

“mountain-water-city” spatial organization, river basin tree pattern, formation mechanism, evolution process, Yangtze River Basin

doi: [10.1360/CSB-2025-0445](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0445)