

流域人居系统科学的框架探索与研究展望

汪芳¹, 刘永², 贺金生³, 胡燮³, 覃栋², 王乐业⁴

(1. 北京大学建筑与景观设计学院/流域人居系统研究中心, 北京 100871; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 4. 北京大学计算机学院/高可信软件技术教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 在人与水的适应过程中, 流域成为孕育人类文明和见证城乡演化的容器与纽带。“流域人居系统”是指流域环境与人居环境在不同时、空间尺度上交互作用和共同演化的适应系统, 具有整体性、动态性、协同性等特征。基于多学科的共性问题, 流域人居系统科学涉及要素耦合、尺度关联、系统演化三方面关键问题, 提炼形成“节点—背景—联系”结构理论与“地方—适应”演化理论, 并提出多学科交叉与智慧流域人居的新范式。流域人居系统科学作为一个适应时代需求的领域方向, 面向人与自然和谐共生的可持续发展目标, 综合运用多个学科领域的知识和方法, 开展学科交叉的系统研究, 将助力新时期流域生态文明和高质量发展建设。

关键词: 流域人居系统科学; 地方适应性; 要素耦合; 尺度关联; 系统演化

早期人类即逐水草而居。“人水关系”是“人地关系”中最持久的一组关系, 流域人居发展是全球安全、宜居和可持续发展的关键组成。从“逐水而居”到“逐水而兴”, 体现了人类文明进步对流域的长期依赖^[1]。作为人类最早活动的地理单元, 流域孕育形成了分布连续、具有鲜明地方特征的文明和聚落。在气候变化和区域性灾害频发的背景下, 流域亦成为当前人地关系最紧张的区域之一^[2]。着眼于生态文明建设全局, 中国将流域生态保护上升为国家重大战略, 并对流域空间提出“大保护、大治理, 走生态保护和高质量发展的路子”的要求^[3], 强调开展综合性的流域治理。国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要中强调“加强长江、黄河等大江大河和重要湖泊湿地生态保护治理”“实施黄河文化遗产系统保护工程”“保护好长江文物和文化遗产”, 凸显流域对中华文明源远流长的支撑作用。党的“二十大”报告指出“中国式现代化道路是人与自然和谐共生的道路”, 对流域人居的整体化保护提出了更高的要求。以上都需要以系统构建来支撑流域人居的高质量发展。

流域作为自然界物质和能源流动与相互作用的载体, 连接人类活动与生态系统^[4]。对于流域人居的研究可以分为如下主要阶段。在19世纪, 随着科学技术的进步, 人们开始系统地研究地表水和地下水的行为, 探讨水文循环、降雨径流过程以及水资源管理等问题。20世纪中期, 欧洲启动莱茵河治理计划以应对工业污染对河流生态系统的破坏^[5]。1949年之后中国通过修建大坝、跨流域调水工程、抽水蓄能电站等方式, 来解决防洪、供水安全以及能源供应等问题^[6]。在此阶段对流域的研究多以地质学、环境科学、水文学等学科

收稿日期: 2023-11-29; 修订日期: 2024-02-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52130804)

作者简介: 汪芳(1973-), 女, 湖南衡山人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城乡建成环境的地方性与适应性。E-mail: wfphd@pku.edu.cn

为指导,聚焦河流地质构造^[7]、水生态系统^[8]以及水资源开发与利用^[9]等方面,主要关注流域系统内部自然环境要素之间的互动关系。20世纪80年代以后,气候变化、人类活动、需水量变化等日益成为全球河流高强度时空变化的主导因素。气候和降水调节着全球水资源的可用性^[10],人类需求和用水压力则影响着系统的脆弱性^[11],加剧了流域环境的不确定性。流域系统呈现出复杂的“自然—社会”二元特征^[12],流域问题由以自然科学问题为主导向自然与人文综合的科学问题转换,研究的对象也由流域系统本身扩展到以流域为载体的城乡空间^[13]。在此阶段,越来越多的学者关注到流域环境和人居环境之间的相互影响^[14],如污水处理能力关乎居民身体健康与生活质量^[15]、城镇化过程中水环境保护与利用的挑战^[16]。尽管普遍认为河流网络具有自然、人文两个维度和多种功能属性^[17],但流域研究和人居研究之间的协同进展仍然相对滞后。面对新时期、新问题和新发展,亟需将流域与人居作为一个系统进行整合研究,从理论和方法范式方面实现突破。

复杂性科学是系统科学理论发展的重要阶段^[18]。基于适应性的复杂适应系统理论由霍兰^[19,20]提出,强调系统内部的成员具有主体能动性,即主体通过与环境之间的非线性相互作用来改变主体的行为规则,并从中涌现出新的层次与新的特性。复杂适应系统理论在现代人居环境的研究中得到了发展和运用。学者们普遍意识到城乡具有非线性复杂巨系统特性^[21],并以复杂适应系统为理论基础构建韧性城市设计方法^[22]以及适应性规划框架^[23],将其运用到旧城更新^[24]、镇村关系重构^[25]以及城市交通基础设施整合^[26]等研究中。而流域聚落及其人水关系从早期人类社会延续至今,内部要素和外部环境之间始终进行着深度融合与协同互动,并造就了以“自然—社会”水循环为纽带的适应系统。对于这样的研究对象而言,复杂适应系统理论和方法将为流域人居的研究提供很好的支撑。

流域作为联系不同时空和不同要素的纽带与容器,在上中下游之间,在不同的空间尺度之间,在过去和现在之间,创造了人类、环境和文化之间的关联^[27],形成了地理连续性和空间异质性。关于流域人居的可持续性测度,氮、磷元素可以用来测度水的安全宜居性^[28],碳、氮元素则可以用来测度陆地的生物多样性^[29],元素流动反映出人居系统的社会经济发展及其外部环境物质、资源、能量的新陈代谢。在已有定性研究的基础上,对这个动态巨系统开展定量研究,既需必要的本构方程对系统的演化进行描述,也需必要的数学工具对元素产生的影响进行有效求解。近年来,随着大数据和机器学习的发展^[30],特别是以深度神经网络为代表的技术发展提供了破局的新思路^[31]。对于大量复杂、高维、未知的函数而言,作为特殊函数的深度神经网络可以进行有效拟合逼近,不仅提供了行之有效的数据分析方法^[32],也对海量数据的高效模拟实现了尺度和精度的平衡^[33]。因此,对流域人居系统的研究,需要加强城乡规划、水环境科学、生态学、地理学、考古学、信息科学等多学科的有效联系,打通各领域的数据壁垒,探索适宜的理论框架,进一步推进流域人居的建设。

1 流域人居系统及其特征

人居系统研究可追溯至希腊学者道萨迪亚斯提出的人类聚居学,吴良镛先生^[35]将其引入国内,提出人居环境科学,认为人居环境是复杂的、开放的巨系统。人居环境科学以乡村、集镇、城市等各类人类聚居环境为研究对象,聚焦于自然、人类、居住、社会和支撑五大系统的相互影响与响应^[40]。在人居环境科学的基础上,流域人居系统将流域

和人居有机联系，以人水关系为基础，并强调二者之间的耦合互动以及由此形成的适应系统，这是对人居环境科学的进一步发展（表1）。

表1 流域人居研究的三个阶段

Table 1 Three stages of river basin habitats research

时间	阶段名称	学者和核心观点举例
2001年前	彼此相对独立阶段	Maidment ^[34] 提出水文学是一门研究地球上各种水体的发生、循环和分布、水的化学和物理性质、水对于环境的作用以及水域生命体关系的科学 吴良镛 ^[35] 提出了创立以人类聚居（包括乡村、集镇、城市等）为研究对象的“人居环境科学” 主要方法： (1) 流域环境：运用生命周期评价等方法 (2) 人居环境：运用空间发展分析等方法
2001—2020年	多学科合作阶段	Huang ^[36] 从经济学视角出发，认为需要从河流提供生态系统服务、维护自然生态系统和人工生态系统稳定的角度重新审视人类活动与河流的关系 Arthington ^[37] 从水科学角度提出需要将流域系统理解为社会和自然，以“水系统（如河流）和社会系统通过空间、时间的持续参与而共同发展”为核心思想 Johnston等 ^[38] 从地理学视角认为河流不仅是城乡空间的空间载体，还提供了一种物质和象征性的交流、互动和交换商品、思想和知识的手段 主要方法： 引入动态模拟方法，对流域地表过程进行刻画
2020年之后	发展新的学科方向阶段	Huertas等 ^[39] 认为应当重视人类与河流构成的相互嵌入和互惠的复杂整体 主要方法： 借助大数据、人工智能等方法建立耦合模型，表达人水系统的互动关系

具体来说，“流域”是河流集水区以内水系为线索生成的地理单元，具有自然和人文属性。在人与水的流动性、涌现性、涨落性的复杂适应过程中，流域孕育了人类文明、见证了城乡演化，体现不同时空尺度中自然环境与人类活动的互动和适应关系，呈现出消逝与存续并存的动态结构。

“流域人居系统”是指流域环境与人居住环境在不同时空尺度上交互作用和共同演化的适应系统。该系统以流域来承载人水的持续互动，是人地关系中最经典、持久的反映，是全球人居的主要源起，受气候变化和人类活动影响，体现为自然系统、文化系统和社会系统相互依存的整体（图1）。

通过对基本概念的梳理，可以归纳出流域人居系统具有整体性、动态性、协同性等三个特征。

(1) 整体性

从组织结构来看，流域人居系统突破行政边界的空间限制，包括水循环、流域文明、城乡空间、生态环境等子系统，这些子系统之间以及系统与外部环境之间不断进行物质、能量和信息的双向交流与传递。聚合之后的整体呈现出各个部分所不具有的功能和特征，达到“1+1>2”的非线性放大效果，最终形成交错包容、复杂嵌套的网络体系。在整体性的要求之下，需要对流域人居系统的特性、子系统的关联性进行深入剖析，寻求整体优化路径。

(2) 动态性

从时间维度来看，流域人居系统具有动态性特征。动态性的产生源于水资源、人口数量、土地利用、自然环境等不同要素、不同子系统有着不同的变化方向、强度和速率，

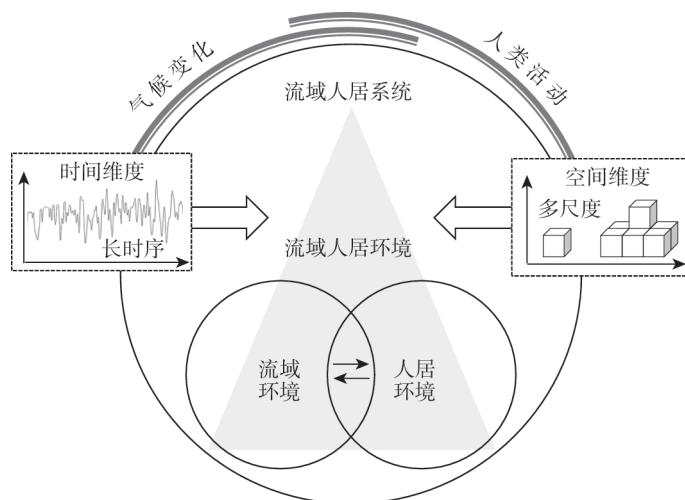


图1 流域人居系统概念框架

Fig. 1 Conceptual framework of river basin habitats

同时相互作用，由此构成了流域人水关系的连续动态演变轨迹，体现着流域人居系统的历时性变化规律。值得注意的是，现代社会中，流域人居系统中城乡高速流动、气候变化加剧、极端灾害频发等背景加剧了人水关系相互作用的强度。因此，需要在对流域人居环境进行模拟演变历程、寻找规律的基础上，加入对未来情景的预测模拟。

(3) 协同性

从系统关联来看，流域人居系统的协同性体现在时间与空间、自然与人文、要素与系统等方面。各个子系统都在一个或多个方面与其他子系统存在直接或间接的关联，协同性强调子系统内部或子系统之间的互动和相互依赖性。当某个子系统发展演变的时间序列、覆盖的空间范围、蕴含的精神文化、具有的功能结构、面向的人群属性等发生变化时，将会产生关联性影响。因此，需要关注流域人居环境中的要素与其他要素和外部环境的作用，以及产生的协同耦合效应，从而促使整个系统的有机协调。

2 流域人居系统科学框架

流域人居系统科学是近年伴随着新技术、新方法与大数据的飞速发展，城乡规划与水环境科学、生态学、地理学、考古学、信息科学等交叉、融合而正在产生的一个新方向，旨在揭示流域和人居系统分别及共同遵循的内在规律，并在此基础上智慧模拟、调控和预测^[41]，从而解答流域人居系统资源开发利用、全球变化应对、人类文明演化、自然—社会耦合互馈等重大问题。自21世纪初以来，在气候变化和人类活动的深刻影响下，流域的循环和发育以及利用方式发生了巨大变化^[42]，人水互动模式也随之改变^[43]。流域人居系统科学的研究视角从原来关注单一维度流域资源要素评价，拓展到寻找流域人居系统的整体演化与存续规律，并逐渐由定性、描述性、局部性研究，朝着定量、分析性、全局性的方向发展。总之，从流域人居环境到流域人居系统的跃迁发展离不开技术进步，而流域人居环境中的新问题又给传统学科的发展提供了动力（图2）。

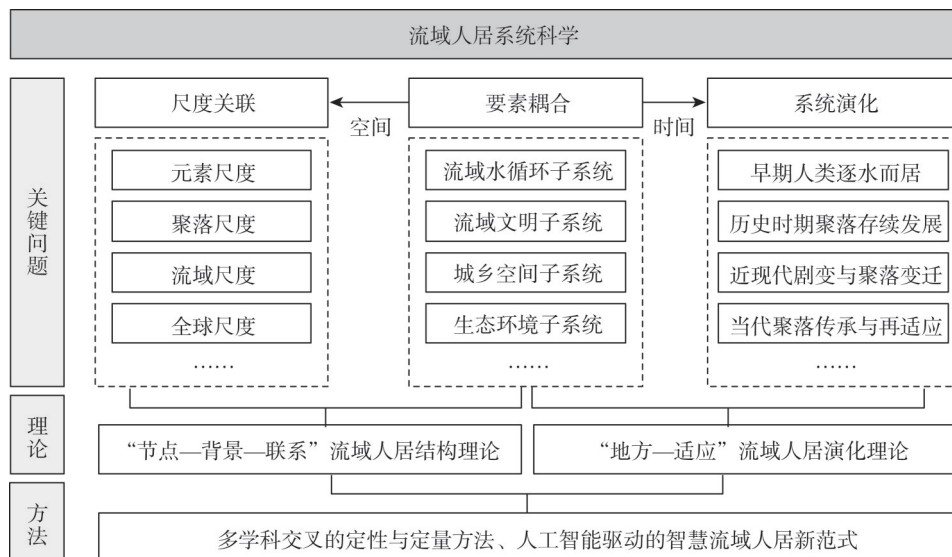


图2 流域人居系统科学框架

Fig. 2 Framework of river basin habitats science

2.1 关键问题：要素耦合、尺度关联与系统演化

就流域人居的安全与宜居，深入探究其网络与演化，围绕多学科的共性问题，即多要素耦合、跨尺度关联、动态性演化等开展研究。

（1）量化流域人居系统多要素的耦合互馈关系

流域人居系统包括流域水循环子系统、流域文明子系统、城乡空间子系统、生态环境子系统等。作为非线性系统，流域人居系统各个子系统之间的相互作用与影响并不是线性叠加关系。不同子系统之间的联系有强有弱，部分子系统比其他子系统有着更加密切的内在联系。水资源作为流域人居系统发育的关键要素，其开发利用决定着整个流域人居系统发育的基本走向和命运^[1]。从协同性视角来看水—能—粮耦合机理，气候变化通过扰动水文循环，导致水资源供给量和供给时间发生变化，不仅会直接影响流域的可持续水资源管理，还会威胁依赖稳定水资源供给的能源系统和粮食系统的安全，并进一步影响整个流域社会经济系统的稳定运行^[44]。水资源、能源和粮食系统之间相互影响和耦合，构成了流域人居系统演化发展的动力之一，使得流域人居系统处于协同与拮抗此消彼长的非平衡态。越来越多的研究开始关注系统之间的耦合互馈，立足生命共同体的高度系统谋划全域、全要素的综合治理^[45]。如何量化不同系统之间的关系，特别是阐明流域人居子系统面对气候变化和人类活动双重扰动的响应机制，是流域人居系统可持续发展的重要问题。

（2）实现流域人居系统跨尺度的空间关联与转译

流域人居系统在不同的空间尺度上呈现出不同的特征。如元素尺度的氮、磷、碳等循环流动、能量循环和水质变化，聚落尺度的人口迁移、交通组织和环境质量，流域尺度的城镇体系网络、景观格局变化、生态系统健康与跨区域水资源调配，全球尺度的气候变化与极端事件对人居系统的影响。流域人居系统在各个层次过渡态上“涌现”的表征规律，不是较小空间尺度的简单相加，而是源于系统在不同尺度上的自组织、协同和

适应能力,从而出现了新的模式、结构或功能。举例来说,从整体性视角出发,传统村落落在不同尺度上与其他村落个体、自然环境之间存在关联关系,大量传统村落形成的网络结构在整体层面体现为集中连片格局,基于不同的联系强度、效率、方向,形成分类、分区的保护方法并将传统格局有效嵌入到现代城乡网络。通过在不同尺度上研究流域人居系统及其跨尺度转译,有助于理解不同空间尺度的相互作用,从而更好地理解流域人居系统的适应性。

(3) 模拟流域人居系统的演化规律与发展趋势

流域人居在发展中常常面临不同的时代课题,如公元前4000年社会不断复杂化的沿江河选址而居,公元前2000年左右环境剧烈变化下的文化响应,距今2000年以来流域城镇聚落的网络变化,距今800~500年以来流域聚落的存续与丰富,以及近现代社会发展的100年和快速城镇化发展40年以来的社会急剧变化中流域聚落的传承与再适应。从动态演化视角来看,人的行为受制于流域环境,也在技术不断进步和社会复杂化中提高对流域环境的适应与改造能力^[46],进而对流域人居系统的地形、河流水文乃至气候环境等产生影响^[47],同时又会因为流域性旱涝灾害等方式反作用于流域城乡空间^[48],导致聚居点的遗弃、文明的衰落^[49],并形成典型的洪涝适应性景观^[50]。在气候变化的背景下,极端事件发生的概率增加,高分辨率数据显示城镇化建设正在让更多人口暴露在高风险区^[51],导致流域内发展的不平衡问题以及人群间的发展不均等的问题^[52]。因此,面向气候变化等复杂场景,应当厘清流域人居系统变化机制,模拟多因素相互作用下的系统阈值与临界状态,实现水资源的可持续利用和人水和谐的建设目标^[53]。

2.2 理论模型:流域人居的结构理论与演化理论

系统动力学理论常常用来研究复杂系统,以分析其系统内部要素的结构特性和相互作用。在研究流域人居系统适应性问题的过程中,本团队衍生出更具针对性的理论,如“节点—背景—联系”流域人居结构理论、“地方—适应”流域人居演化理论。

“节点—背景—联系”流域人居结构理论借鉴汪芳等^[54]已有的文化景观安全格局,主要揭示要素与空间的关系。具体来说,流域人居系统中具有典型人水关系的空间对象构成“节点”,节点所处更大尺度和层级的流域环境构成“背景”,节点之间的循环过程构成“联系”。由此呼应流域人居系统的整体性特征,即前文提到的子系统之间以及系统与外部环境之间不断进行物质、能量和信息的双向交流与传递,形成交错包容、复杂嵌套的网络体系。

“地方—适应”流域人居演化理论借鉴霍林^[55]的适应性循环理论,主要揭示要素与时间的关系,对流域人居系统的状态变化进行如下刻画:潜力代表系统单元具有的自然特质和文化特性,连通性代表系统的资源和能量交流互通的程度,韧性代表系统对于外部扰动的恢复和转换能力。系统的“地方—适应”演化意味着生长、积累、重组、更新等不同阶段、跨尺度嵌套的非线性过程,由此强调流域人居系统的动态性与协同性。

2.3 方法范式:多学科交叉与智慧流域人居新范式

为了实现对流域人居系统的深刻理解、理性规划和精准调控,需要引入多学科交叉的方法。伴随着多时空、全样本的多源数据,以及遥感、地理信息系统、人工智能等技术方法的不断涌现,让定量研究成为可能,将成为定性研究的重要扩充。一方面,移动群智感知为人群流动性数据的获取和利用提供了新的途径,能低成本、广覆盖、多模态

地获取原始数据,精准识别人在系统中的微观行为特征^[56];另一方面,融合卫星和无人机多源遥感影像及地面水文监测站资料,能提高流域数据的时间、空间和光谱分辨率,搭建“空—天—地”一体化的流域人居监测系统。

人工智能驱动的智慧流域人居研究是充分利用人工智能技术,对流域人居的文化传播、空间联系、气候要素、自然灾害等问题进行数据建模,将定性与定量有机结合,从而增强对流域人居的历史理解力、现在掌控力和未来预知力^[57]。与智慧河流、智慧水利相比,智慧流域人居不仅仅要关注水的状态,例如区域的防洪、排涝、供水、需水、节水^[58],更要关注流域内的人居环境建设、文化遗产、聚落发展的内生原动力。这就需要构建流域数据感知体系、流域人居的数字认知体系和流域发展的决策仿真体系^[59]。流域科学与人居科学的深度交叉融合,将加强对流域人居系统多尺度关联的认知,为流域人居系统面临的多重威胁提供新的解决方案。

3 流域人居系统科学展望

3.1 学科本质与社会价值

作为一个适应时代需求的领域方向,流域人居系统科学综合运用城乡规划、水环境科学、生态学、地理学、考古学、信息科学等多个学科的知识和方法,来理解流域中人类活动与自然环境之间的相互关联;既关注定性研究,如案例分析、质性调查和实地观察,也注重定量分析,如群智感知、数字孪生和智慧计算,以更全面地解释流域人居系统的现象和过程;关于流域人居系统相关的气候变化、人类活动以及水资源管理、城镇化等问题,不仅需要关注元素尺度、聚落尺度,还应关注特定流域区域和全球尺度,来共同支撑流域人居系统适应性问题的精准刻画与有效解决。

流域人居系统科学积极探讨流域人居的安全和宜居:从安全角度,通过研究流域内的自然灾害风险、气候变化响应、脆弱性和适应性,为精准模拟多情景下流域人居可能面临的生物多样性丧失、文化遗产破坏、潜在水旱灾害等风险提供预测^[60],从而减少潜在损失;从宜居角度,通过多学科交叉研究人类活动与流域环境之间的相互作用,借助适应性的非线性响应与迭代拟合,来帮助制定合理的资源分配策略,推动经济、社会和环境的流域协调发展。

3.2 学科挑战与发展展望

流域人居系统既是承载人类文明演化、人水适应与城乡安全宜居最重要的空间载体,又是践行国家重大战略中系统治理的区域单元。目前中国亟需在该领域开展学科交叉和前沿研究:完善流域人居系统科学的理论建构,以揭示流域人居系统的基本原理和规律,深入理解流域内的人类活动、环境变化和各个子系统的相互关系;通过与政府、居民和利益相关者的合作,拓展和深化流域人居建设实践,包括资源管理、生态保护、社区规划、风险管理等方面的工作,并从实践中检验和完善其理论;培养具备流域人居系统科学研究和实践能力的专业人才,建立“流域人居与空间规划”专业方向和相应的教学体系,培养人才的跨学科合作和综合分析的能力。同时,基于流域人居系统学科方向的全球共性,加强国际交流与合作,传播中华流域文明和智慧,推动流域人居研究在全球范围内的发展。

流域人居系统科学立足人与自然生命共同体,以流域为空间单元,以要素耦合、尺

度关联和系统演化为关键问题,揭示新时期实现人水和谐共生的关键途径。流域人居系统科学的研究,涉及到元素、能量、信息的传输、交换,以及人文、自然环境的相互适应、协同耦合。定量和定性研究的结合,学科交叉和智慧技术的植入,以整体、动态、协同的视角,进一步揭示流域人与自然可持续发展的关键机制和实现路径,这有着广阔的探索空间,将在多学科对话与碰撞的过程中不断向前发展。

参考文献(References):

- [1] 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(2): 295-303. [ZHANG L, LU C X, WU Y M, et al. An overall development of water resources for China's rivers. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 295-303.]
- [2] 王静, 刘晶晶, 宋子秋, 等. 黄河流域高质量发展的生态保护与国土空间利用策略. 自然资源学报, 2022, 37(11): 2930-2945. [WANG J, LIU J J, SONG Z Q, et al. Strategies of ecosystem protection and territory spatial utilization for high-quality development in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(11): 2930-2945.]
- [3] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 奋斗, 2019, (20): 4-10. [XI J P. Speech at a symposium on ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. *Fendou*, 2019, (20): 4-10.]
- [4] WANG K, DAVIES E G R, LIU J G. Integrated water resources management and modeling: A case study of Bow River Basin, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118242, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118242.
- [5] VANPELT S C, SWART R J. Climate change risk management in transnational river basins: The Rhine. *Water Resources Management*, 2011, 25: 3837-3861.
- [6] JIA J. A technical review of hydro-project development in China. *Engineering*, 2016, 2(3): 302-312.
- [7] 郑锡澜, 常承法. 雅鲁藏布江下游地区地质构造特征. 地质科学, 1979, 14(2): 116-126, 191-193. [ZHENG X L, CHANG C F. A preliminary note on the tectonic features of the lower Yalu-Tsangpo River Region. *Chinese Journal of Geology*, 1979, 14(2): 116-126, 191-193.]
- [8] NOGES T, LAUGASTE R, LOIGUE, et al. Is the destabilisation of Lake Peipsi ecosystem caused by increased phosphorus loading or decreased nitrogen loading. *Water Science and Technology*, 2005, 51(3-4): 267-274.
- [9] VOSS K A, FAMIGLIETTI S, LOM H, et al. Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Lran Region. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 904-914.
- [10] ZHANG Y Q, LI C C, CHIEW F H S, et al. Southern Hemisphere dominates recent decline in global water availability. *Science*, 2023, 382(6670): 579-584.
- [11] QIN Y, MUELLER N D, SIEBERT S, et al. Flexibility and intensity of global water use. *Nature Sustainability*, 2019, 2(6): 515-523.
- [12] 王浩, 牛存稳, 赵勇. 流域“自然—社会”二元水循环与水资源研究. 地理学报, 2023, 78(7): 1599-1607. [WANG H, NIU C W, ZHAO Y. Natural-artificial dualistic water cycle in river basins and water resources research. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1599-1607.]
- [13] VOULVOULIS N, ARPONK D, GIAKOURIS T. The EU water framework directive: From great expectations to problems with implementation. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 358-366.
- [14] DI B G, KOOY M, KEMERINK J S, et al. Towards understanding the dynamic behaviour of floodplains as human-water systems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(8): 3235-3244.
- [15] 赵宏波, 谷天顺, 孙东琪, 等. “三生”功能视角下黄河流域城市人居环境动态演变与机制. 地理学报, 2023, 78(12): 2973-2999. [ZHAO H B, GU T S, SUN D Q, et al. Dynamic evolution and influencing mechanism of urban human settlements in the Yellow River Basin from the perspective of "production-living-ecological" function. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(12): 2973-2999.]
- [16] 汪芳, 王舜奕, PROMINSKI MARTIN. 城镇化与地方性中的水资源: 可持续视角的水环境保护利用与水空间规划设计. 地理研究, 2018, 37(12): 2576-2584. [WANG F, WANG S Y, PROMINSKI M. Water-related urbanization and locality: Protection and utilization of water environment as well as planning and design of water space in a sustainable per-

- spective. *Geographical Research*, 2018, 37(12): 2576-2584.]
- [17] WILLETT S D, MCCOY S W, PERRON J T, et al. Dynamic reorganization of river basins. *Science*, 2014, 343(6175): 1248765, Doi: 10.1126/science.1248765.
- [18] 齐磊磊. 系统科学、复杂性科学与复杂系统科学哲学. *系统科学学报*, 2012, 20(3): 7-11. [QI L L. Systems science, complexity science and philosophy. *Chinese Journal of Systems Science*, 2012, 20(3): 7-11.]
- [19] HOLLAND J H. *Hidden Order*. New York: Basic Books Press, 1995: 56-75.
- [20] HOLLAND J H. *Emergence: From Chaos to Order*. Oxford: Oxford University Press, 2000: 123-137.
- [21] WANG F, PROMINSKI M. Landscapes with locality in urban or rural areas. *Indoor and Built Environment*, 2020, 29(8): 1047-1052.
- [22] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则. *城市发展研究*, 2018, 25(10): 1-3. [QIU B X. Methods and principles of designing resilient city based on complex adaptive system theory. *Urban Development Studies*, 2018, 25(10): 1-3.]
- [23] 孙小涛, 徐建刚, 张翔, 等. 基于复杂适应系统理论的城市规划. *生态学报*, 2016, 36(2): 463-471. [SUN X T, XU J G, ZHANG X, et al. Urban planning adapted to nature based on complex adaptive systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2): 463-471.]
- [24] 方可. “复杂”之道: 探求一种新的旧城更新规划设计方法. *城市规划*, 1999, (7): 28-33. [FANG K. The way of "complexity": Exploring a new planning and design method for the renewal of the old city. *City Planning Review*, 1999, (7): 28-33.]
- [25] 乔晶, 耿虹. CAS理论视角下大都市地区镇村关系的类型识别: 以武汉市为例. *上海城市规划*, 2019, (5): 1-7. [QIAO J, GENG H. Research on the type recognition of town-village relationship from the perspective of complex adaptability system theory: A case study of Wuhan. *Shanghai Urban Planning Review*, 2019, (5): 1-7.]
- [26] 杨柳. 复杂适应系统视角下城市交通基础设施与公共空间整合设计的方法及模拟工具. *城市规划学刊*, 2023, (4): 61-68. [YANG L. Approaches and simulation tools for integrated design of urban transport infrastructure and public space systems: The perspective of complex adaptive system theory. *Urban Planning Forum*, 2023, (4): 61-68.]
- [27] 汪芳, 方勤, 袁广阔, 等. 流域文明与宜居城乡高质量发展. *地理研究*, 2023, 42(4): 895-916. [WANG F, FANG Q, YUAN G K, et al. River basin civilization and high-quality development of its livable urban and rural areas. *Geographical Research*, 2023, 42(4): 895-916.]
- [28] LIU Y, JIANG Q, SUN Y, et al. Decline in nitrogen concentrations of eutrophic Lake Dianchi associated with policy interventions during 2002-2018. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117826, Doi: 10.1016/j.envpol.2021.117826.
- [29] YU L F, WANG H, HE J S, et al. Temporal variation in soil respiration and its sensitivity to temperature along a hydrological gradient in an alpine wetland of the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 282: 107854, Doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107854.
- [30] 吴志强, 张修宁, 鲁斐栋, 等. 技术赋能空间规划: 走向规律导向的范式. *规划师*, 2021, 37(19): 5-10. [WU Z Q, ZHANG X N, LU F D, et al. Emerging technology and planning: A new paradigm guided by data-informed laws. *Planners*, 2021, 37(19): 5-10.]
- [31] 吴志强, 甘惟, 刘朝晖, 等. AI城市: 理论与模型架构. *城市规划学刊*, 2022, (5): 17-23. [WU Z Q, GAN W, LIU Z H, et al. The AI city: Theory and structural model. *Urban Planning Forum*, 2022, (5): 17-23.]
- [32] WANG L Y, CHAI D, LIU X Z, et al. Exploring the generalizability of spatio-temporal traffic prediction: Meta-modeling and an analytic framework. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2023, 35(4): 3870-3884.
- [33] 周广金, 童亚莉, 王凌青, 等. 国土空间规划中水生态空间及保护线的多维识别技术与应用. *自然资源学报*, 2022, 37(12): 3102-3117. [ZHOU G J, TONG Y L, WANG L Q, et al. Multi-dimensional identification technology and application of water ecological space and protection line in the territorial spatial planning. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(12): 3102-3117.]
- [34] MAIDMENT D R. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1992: 15-19.
- [35] 吴良镛. *人居环境科学导论*. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 4-17. [WU L Y. *Introduction to Sciences of Human Settlements*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001: 4-17.]
- [36] HUANG Q H. *China's Industrialization Process*. Singapore: Springer, 2018: 59-71.

- [37] ARTJINGTON A H. Environmental Flows: Saving Rivers in the Third Millennium. Berkeley, CA: University of California Press, 2012: 1-13.
- [38] JOHNSTON B R, HIWASAKI L, KLAVER I J, et al. Water, Cultural Diversity, and Global Environmental Change: Emerging Trends, Sustainable Futures?. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2012: 9-20.
- [39] HUERTAS B, CHANCHARI M. Agua, Culuray Terriorialidad en el pueblo Shawi del rio Sillay. Lima, Peru: Terra Nuova, 2011: 21-27. [HUERTAS B, CHANCHARI M. Water, Culture and Territoriality in the Shawi People of the Sillay River. Lima, Peru: Terra Nuova, 2011: 21-27.]
- [40] 吴良镛. “人居二”与人居环境科学. 城市规划, 1997, (3): 4-9. [WU L Y. "Habitat II" and the science of human settlement environment. City Planning Review, 1997, (3): 4-9.]
- [41] CHEN H L, LIANG Z Y, LIU Y, et al. Integrated remote sensing imagery and two-dimensional hydraulic modeling approach for impact evaluation of flood on crop yields. Journal of Hydrology, 2017, 553: 262-275.
- [42] WANG H, HE G H. Rivers: Linking nature, life, and civilization. River, 2022, 1(1): 25-36.
- [43] WANG Y C, BORTHWICK A G L, NI J R. Human affinity for rivers. River, 2022, 1(1): 4-14.
- [44] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望. 水利学报, 2016, 47(3): 292-301. [XIA J, SHI W. Perspective on water security issue of changing environment in China. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301.]
- [45] 顾恬玮, 彭建, 姜虹, 等. 流域国土空间生态修复: 理论认知与规划要点. 自然资源学报, 2023, 38(10): 2464-2474. [GU T W, PENG J, JIANG H, et al. Watershed-based territorial ecological restoration: Theoretical cognition and key planning issues. Journal of Natural Resources, 2023, 38(10): 2464-2474.]
- [46] 郭立新. 长江中游地区初期社会复杂化研究: 4300 B.C.-2000 B.C. 上海: 上海古籍出版社, 2005: 119-135. [GUO L X. Study on early social complexity in the Middle Reaches of Yangtze River: 4300 B.C.-2000 B.C. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House, 2005: 119-135.]
- [47] 顾延生, 李妮家, 秦养民, 等. 历史时期以来人类活动与江汉湖群生态环境演变. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, 38(s1): 133-144. [GU Y S, LI K J, QIN Y M, et al. Impact of human activity on the evolution of the ecological environment of Jianghan lake group in the historical period, Central China. Earth Science, 2013, 38(s1): 133-144.]
- [48] YU X, WANG G, HU X, et al. Land subsidence in Tianjin, China: Before and after the South-to-North water diversion. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1647, Doi: 10.3390/rs15061647.
- [49] LI B, ZHU C, WU L, et al. Relationship between environmental change and human activities in the period of the Shijiahe culture, Tanjialing site, Jiangnan Plain, China. Quaternary International, 2013, 308: 45-52.
- [50] 吴宏岐, 张志迎. 黄泛平原古城镇水域景观历史地理成因初探. 地域研究与开发, 2012, 31(1): 145-149. [WU H Q, ZHANG Z Y. The historical geography causes of water landscapes of old cities of the Yellow River Floodplain. Areal Research and Development, 2012, 31(1): 145-49.]
- [51] RENTSCHLER J, AVNER P, MARCONCINI M, et al. Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. Nature, 2023, 622(7981): 87-92.
- [52] 夏军, 石卫, 雒新萍, 等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识. 水科学进展, 2015, 26(2): 279-286. [XIA J, SHI W, LUO X P, et al. Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 279-286.]
- [53] DING M, LIN P, GAO S, et al. Reversal of the levee effect towards sustainable floodplain management. Nature Sustainability, 2023, 6: 1578-1586.
- [54] 汪芳, 蒋春燕, 卫然. 文化景观安全格局: 概念和框架. 地理研究, 2017, 36(10): 1834-1842. [WANG F, JIANG C Y, WEI R. Cultural landscape security pattern: Concept and structure. Geographical Research, 2017, 36(10): 1834-1842.]
- [55] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [56] XU Z, LIU Y H, YEN N Y, et al. Crowdsourcing based description of urban emergency events using social media big data. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2016, 8(2): 387-397.
- [57] ZHANG Y S, WU L, REN H Z, et al. Mapping water quality parameters in urban rivers from hyperspectral images using a new self-adapting selection of multiple artificial neural networks. Remote Sensing, 2020, 12(2): 336, Doi: 10.3390/rs12020336.

- [58] VAMVAKERIDOU-LYROUDIA L S, CHEN A S, KHOURY M, et al. Assessing and visualising hazard impacts to enhance the resilience of critical infrastructures to urban flooding. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 136078, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136078.
- [59] 王旭, 王钊越, 潘艺蓉, 等. 人工智能在 21 世纪水与环境领域应用的问题及对策. *中国科学院院刊*, 2020, 35(9): 1163-1176. [WANG X, WANG Z Y, PAN Y R, et al. Perspective and prospects on applying artificial intelligence to address water and environmental challenges of 21st century. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(9): 1163-1176.]
- [60] HU X, BÜRGMANN R, FIELDING E J, et al. Machine-learning characterization of tectonic, hydrological and anthropogenic sources of ground deformation in California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(11): e2021JB022373, Doi: 10.1029/2021JB022373.

River basin habitats science: Framework and prospects

WANG Fang¹, LIU Yong², HE Jin-sheng³, HU Xie³, QIN Yue², WANG Le-ye⁴

(1. River Basin Habitats Research Center, College of Architecture and Landscape Architecture, Peking University, Beijing 100871, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 4. School of Computer Science, Peking University/Key Lab of High Confidence Software Technologies, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

Abstract: In the complex human and water adaptation process, river basins have become the containers and links that nurture human civilization and witness the evolution of urban and rural areas. River basin habitats refer to the adaptive systems formed by the interaction and coevolution of river basin and human settlement, characterized by integrity, dynamism, and synergy. From the multi-disciplinary common problems, the river basin habitats (riv-habitats) science encompasses three key issues: element coupling, scale correlation, and system evolution. It refines the theoretical model of the "node-setting-connection" structural theory and the "locality-adaptation" evolutionary theory and also improves a new paradigm of interdisciplinary approach and artificial intelligence for river basin habitats. As an interdisciplinary field that adapts to the needs of the times and that aims at the sustainable development goal of harmonious coexistence between humans and nature, riv-habitats science comprehensively applies the knowledge and methods of multiple disciplines to carry out interdisciplinary systematic research on river basin habitats, which will contribute to the ecological civilization and high-quality development and construction of river basins in the New Era.

Keywords: riv-habitats science; locality-adaptability; element coupling; scale correlation; system evolution