

流域城市街巷形态与水生态可持续关系辨析

孔祥荣¹, 王琳²

¹青岛市规划设计研究院, 山东 青岛

²中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年1月15日; 录用日期: 2024年2月29日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

流域城市的形成与空间组织方式的演变, 影响并改变了流域水系的空间布局与水系走向, 影响了水资源的空间分布。现当代城市棋盘式网络空间组织方式导致了城市水资源短缺和水生态危机。在人与自然和谐共生的背景下, 维护城市水生态可持续发展, 改变以人为中心的流域城市空间组织方式, 遵从河流水系的演进规律, 符合水系自然的形态, 建立水生态导向下的流域城市街巷形态, 形成与河流水生态耦合共生的城市空间组织方式。

关键词

城市水生态可持续, 城市空间组织方式, 城市街巷空间, 路网结构

Urban Street Morphology in River Basin under the Direction of Sustainable Water Ecology

Xiangrong Kong¹, Lin Wang²

¹Qingdao Planning and Design Institute, Qingdao Shandong

²College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: Jan. 15th, 2024; accepted: Feb. 29th, 2024; published: Mar. 29th, 2024

Abstract

The formation of watershed cities and the evolution of spatial organization have influenced and changed the spatial layout and direction of river systems, as well as the spatial distribution of water resources. The checkerboard pattern of cyberspace organization in modern and contemporary cities leads to the shortage of urban water resources and the crisis of water ecology. Under the

background of harmonious coexistence between man and nature, the sustainable development of urban water ecology should be maintained, the human-centered spatial organization mode of watershed city should be changed, the evolution law of river system should be followed and the form of water system development should be followed, and the urban street shape of watershed city guided by water ecology should be established to form an urban spatial organization mode of coupling and symbiosis with river water ecology.

Keywords

Urban Water Ecological Sustainability, Urban Spatial Organization, Urban Street Space, Road Network Structure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天然河流水系形态是水自然动力与地形地貌之间相互作用的结果[1], 遵循自然发育规律。自然状态下, 流域形态多为树枝状结构, 依据水系结构 Horton 定律[2], 流域各级水道数目、平均长度和流域面积随水道级别呈几何级数变化。然而, 由于流域城市的产生, 城市空间组织形式使全球 60%的河道发生了从河流资源向土地资源的变化, 阻断了水系发育演变进程[3], 破坏了自然河流水系的有机形态; May 等研究得出城市化扩展伴随着侵占其所在流域的河道水系、改变河槽形态、影响河流水质、破坏水系生态环境等现象[4]。

城市空间是由街巷组织形成, 街巷是城市空间的主要组成部分, 是城市空间形态的基本构成要素之一。网格状路网 + 矩形地块的棋盘式的街巷的空间组织方式是现代城市广泛采用的街巷形式, 棋盘格网式的街道布局有助于建立有条理的聚居区, 促进区域组织管理, 建立公共空间的安全秩序[5]。然而为了实现棋盘网格式的空间组织形式, 填埋矩形地块内部低等级河道水系、改变水系走向等, 导致城市街区内河流水系减少和河道平直化现象; 表现为高度城市化地区河网结构趋于简单化、非主干河道减少[6], 河网调蓄能力下降[7], 引发洪涝灾害; 沿街巷布置的城市管网系统, 改变了河流水系内的降雨的分配, 导致河流缺水甚至断流。城市化是区域水资源及水环境问题产生的根源, 街巷形态是流域城市水生态问题产生的动因。城市空间组织形式对水系结构破坏性改造致区域地表水文生态格局紊乱, 是区域水资源及水环境问题产生的根源之一。

城市街巷形态被认为是有效支撑了社会经济活动, 促进了经济集聚, 激发了该地区良好的城市活力[8] [9], 城市街区形态的研究从产生到发展, 关注的重点都是经济社会建设的需求, 水生态系统的完整性从来都没有与街区形态产生联系, 为了达成经济社会目的, 满足街区形态要求, 改变水系空间形态是自然而然的事情。芒福汀在《绿色尺度》中呼吁对街道以及街区的价值进行审视和关注[10], 保持原有地貌和水系形态下的城市空间组织, 形成不仅有社会经济活力, 更具水生态活力的城市空间。

2. 需求导向下的街巷与水系形态

城市由大量的街区单元构成, 街区是城市最重要的组成部分与形态系统之一, 是地块空间划分的基本单元, 是城市肌理的构成元素、物质组成和空间结构, 反映了城市营建的理念、政治、经济、土地制

度和历史传统。城市的始源通常是农业居民点, 发展过程中并没有总体目标和规划, 主要是随着自然或是功能的客观条件, 根据发展的实际需求, 不断积累和叠加形成城市综合形态。城市的街区形态表达, 往往构图自由、用地灵活, 整体城市结构有机连接, 同时又根据具体情况而变[11]。中国的街区产生于周代, “匠人营国” 制度确立后, “闾里” 的出现成为有据可查的城市单元; 最早的规划制度源于战国时期的《周礼·考工记》: “国中九经九纬, 经涂九轨”, 王城模式为: 方城、里坊、轴线、对称, 形成了方正路网城市结构的雏形。中国城市以“礼制精神” 为理念, 关注城市轴线的规整与建筑布局的方正。唐朝城市格局逐渐演变为里坊制。皇城居北, 朱雀大街为中轴线, 以 11 条南北大街和 14 条东西大街将全城划分为 108 坊和东西两市。全城分区明确, 道路端直无曲, 诸坊“棋布栉比, 街衢绳直”, 唐长安城形成了成熟的棋盘式街巷布局, 如图 1 所示。



Figure 1. Street layout and spatial form of Chang'an City in the Tang Dynasty [12]
图 1. 唐长安城街巷布局与空间形态[12]

明清政府把层级制官僚体系“物化”为一个整齐有序的城市外在的形态体系, 使城市体系成为权力体系的“化身”, 治所城市(特别是行政等级最高的都城)在空间布局上适应礼制的需要, 体现礼制的精义[13], 政治驱动了方正的路网形态在中国的蔓延, 如图 2 所示, 济南古城的空间形态, 为了达成空间布局礼制的精义, 重新组织了水系空间, 引导河流水系进入护城河, 沿城市外围进入下游河道, 护城河改变了原有的水道[14]; 城市内部利用人工沟渠, 改变河流水系蜿蜒曲折的形态, 变为平直的渠道如图 3 所示, 形成了快排系统, 为了缓解快排导致下游泛洪, 扩建了下游湖泊的空间[15] (大明湖在唐、宋时期不断扩大, 到金、元, “几占城三之一”), 重新组织了水系空间。

1811 年纽约城规划报告明确阐述: “我们不能但必须要记住的是一个城市应该重要是由人的居住生活构成的, 建造直边和正角的住宅造价最低, 且最方便人的居住, 这些简单和清晰的形式是非常重要的”。这些理论成为棋盘网格式街区形态的演进的重要依据。美国《国家土地条例》决定绝大多数美国城镇的基础结构为网格。著名的“曼哈顿网格”规划方案于 1845 年基本形成并奠定了城市的最终格局, 基本呈现密集严格正交网格形态特征, 其中规划街区普遍为 2 hm^2 。以下的矩形形态[18] [19]。



Figure 2. The Weizi city wall and city gates were built during the Tongzhi period of the Qing Dynasty (Source: Wei Yameg's revised painting of "The Grand View of Emerging Jinan City") [16]

图 2. 清代同治时期圩子城墙修筑城门(资料来源: 魏亚萌改绘《新兴济南市大观》) [16]

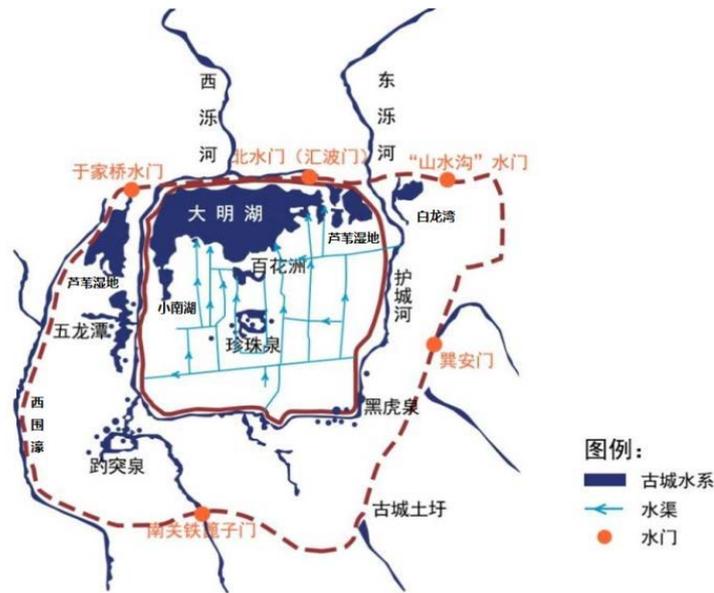


Figure 3. Speculation on the drainage system of Jinan prefecture in the Qing Dynasty [17]

图 3. 清代济南府的排水系统推测[17]

用网格规划改造已有的、不够有条理的城镇现状以引入“更好的秩序”，在受限制的地形中网格规划的正交街道系统仍然可以略作调整而不影响其基本体系，网格规划能较大程度地满足城镇快速建设和规模迅速扩大的要求。正交原则是不同的网格规划之间的共同特点，在网格规划的城市中，不同方向的街道相互垂直，相同方向的街道之间彼此平行。满足人的需求导向下的街巷空间布局，无视自然水系的形态，忽略河道功能作用，改变了流域水系形态。随着城市扩张，水生态环境危机出现，水生态可持续成为人类迫切需要，讨论人类需求导向下的城市形态，是否是水生态危机的成因之一，如果是，水生态可持续背景下城市形态的演进方向将是本文讨论的重点。

3. 专项规划强化下的街巷形态与水文过程

现代城市被概括为“以人为主体的空间和自然环境的合理利用为前提，以集聚经济效益和社会效益为目的，集约人口、经济、科技、文化的空间地域系统是一个与周边地区进行人、物、信息交流的动态

开放系统” [20]。2010 之前, 生态没有纳入城市总体规划, 城市规划以人为中心, 生态环境是为人服务的。以人为中心的原则导向下的专项规划, 强化了这一指导思想, 填埋河流水系, 成为空间管理的手段。

3.1. 路网规划约束雨水径流路径

方格式道路网是古今中外, 经久不衰的路网形式, 自由式路网, 变化丰富, 容易迷失方向, 尽端式路网不是一种网络化的路网形式, 容易带来交通问题[21]。提出优良的城市结构应该是传统的半网结构, 如此才能满足社会活动的多样性[22]。网状的城市结构与交通效率共同促成了方格状的路网形态。《城市道路路线设计规范》(CJJ193-2012)规定: 两相邻平曲线间的直线段最小长度应大于或等于缓和曲线最小长度。《城市道路交叉口设计规程》规定: 平面交叉口按几何形状可分为十字形、T形、Y形, 这些规范组织形成的路网形体, 也有利于形成方格式路网结构。道路网规划对城市发展有着长期的、结构性的作用, 道路网的物质环境一旦建立起来, 由道路网设施配置及布局所带来调整就变得非常困难。《城镇内涝防治技术规范》道路在城市排水体系有通道作用, 在正常情况下雨水通过道路进入雨水管渠[23], 路网空间布局, 约束雨水径流, 形成了雨水收集系统的空间形态。

3.2. 排水规划改变水系空间走向

《城市排水工程规划规范》(GB50318-2017)规定: 排水管渠应布置在便于雨、污水汇集的慢车道或韧性道下; 道路红线宽度大于 40 m 时, 排水管渠宜沿道路双侧布置。《室外排水设计标准》(GB50014-2021): 排水管沿城镇道路铺设, 并与道路中心线平行。城市排水系统规划与城市道路规划相衔接, 导致城市雨水径流改变了自然径流的走向, 集中进入道路两侧的收集系统。以泰安市泮河流域为例, 图 4 为泰安市自然状态的泮河流域的河道系统和汇水区的范围。图 5 是街区和路网规划图。泰安市城区以 5~8 km²/年速度扩张, 如图 4、图 5 所示, 路网改变了自然汇水区的划分, 形成了网格状路网+矩形地块住宅区的街巷形态, 城市局部性暴雨频次增高, 1985 年至 2016 年, 全市共发生较大水灾 14 次, 其中, 较为严重的 5 次[24]。如图 6 所示, 垂直于河道的排水系统, 采用快排方式, 将汇水雨水快排进入下游河道, 导致河道的防洪等级被迫升级, 泰安市城市排水(雨水)防涝综合规划(2016~2030), 河道防洪标准均已经提高至 50 年一遇。人类对下垫面改变, 使得流域水循环过程由天然水循环向天然-人工二元水循环转变[25], 流域城市街巷空间组织方式引导下的排水系统组织形式, 是水资源短缺, 河流枯竭和生态问题的根源之一。



Figure 4. Map of the Pan River basin and catchment area in Tai'an City
图 4. 泰安市泮河流域与汇水区图



Figure 5. Layout of streets, lanes and roads in Pan River Basin, Tai'an City
图 5. 泰安市泮河流域街巷与道路布置图

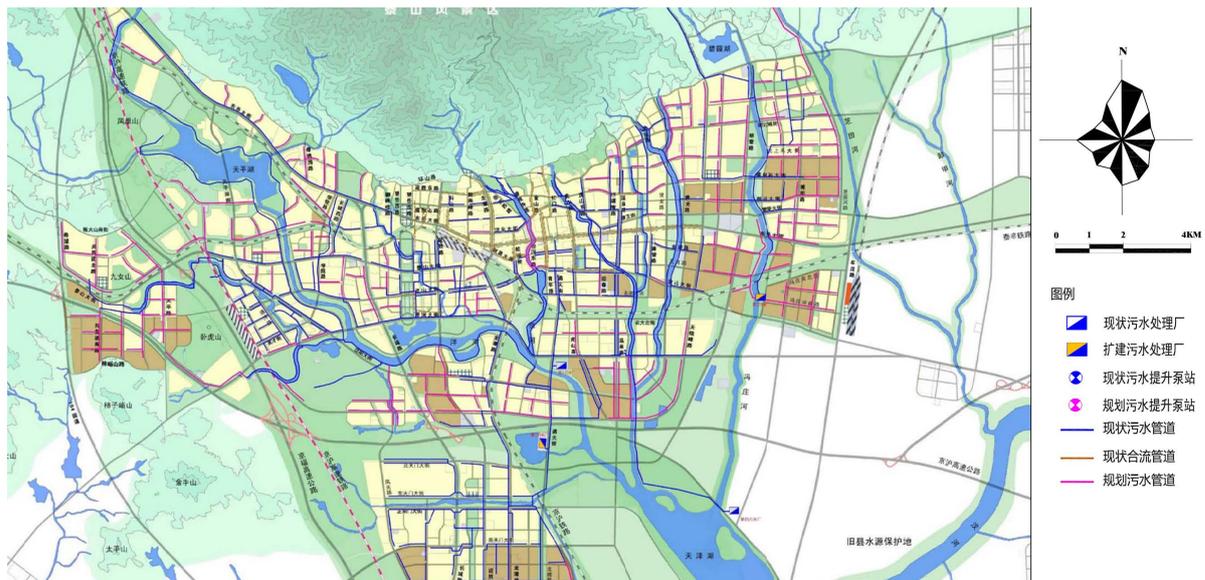


Figure 6. Tai'an City Pan River Basin pipeline network layout
图 6. 泰安市泮河流域管网布置图

棋盘格式街道规划对自然地形地势特征的忽略, 城市排水管道沿主要街道铺设, 忽略自然径流的走向, 阻断了汇水区的功能; 棋盘网格街巷形态, 配以沿街巷布局城市管网机械地推动城市快速扩张, 改变了流域地表水文过程, 阻断了雨水的下渗, 减少了对地下水的补给, 加剧局部区域水资源短缺[26], 成为水生态系统最大破坏力量, 这种力量随着城市规模扩大被持续强化。快速城市扩张, 机械空间组织, 以一种彻底的毁坏和重塑的姿态, 让人们远离赖以生存的家園, 沉浸在一种失落的场所带来的不安之中。尽管如此, 这样的机械式的开发仍然在继续, 加剧了日益单调的城市空间结构的形成。

4. 以人为本机械思维主导的城市组织范式的转向

世界文明的进程是以精神法则战胜自然法则——人战胜自然为标志的[27]。中世纪文艺复兴时期认为

自然运动是通过外界施与而实现的, 赋予人统治万物的权力, 以人的意志为中心对自然进行摆布, 人本主义凌驾自然之上的思维模式和宗教信仰在最深刻、最普遍的意义影响着物质空间的面貌与价值形态。受中国历史传统文化影响, 封闭式街区是特定条件下我国空间组织形式, 并演化为主导模式。封闭的街区表达了封闭的社会关系, 居住隔离意图[28]。城市文化以内力推动街巷几何特征形态固化与形成, 在我国城市街区不是行政单位, 但是管理的基本单位。人工规划的街巷强调功能技术理性, 属于机械性形态, 是经过规划和设计创造出来的形态, 具有清晰的计划性和目的性, 表现为规则的几何形态。

随着全球性生态危机的日益加剧, 城市生态环境的每况愈下, 警示我们以人为中心的人本主义价值观已经无法解决整体性生态危机, 急需用新的价值观进行修正。深层生态学提出的价值观, 成为价值观的新选项。深层生态学认为应该去人类中心主义立场, 将人类自身作为组成部分之一去关心自然[29], 人与自然和谐共生价值论的形成, 是以人为本机械思维主导的城市组织范式, 向人与自然和谐共生理念的转向, 该理念承认自然界存在价值多元化和主体多元化, 自然界并不以人的价值为价值, 不以人为主体发展进化, 人是作为自然环境而存在。在人与自然和谐共生价值观导向下的城市街巷形态受自然地理因素限制, 表达出对自然地理条件的顺从或改造, 以解读自然的方式, 确定物质基础的利用程度, 从系统论的角度提出环境与街巷空间的组织方式, 强调生态和街巷的有机共生, 城市街巷形态与丰富的自然地理形态相互依存、相互延续, 形成有序的街巷空间结构框架。

在人与自然和谐共生价值观主导下, 城市街巷形态的研究关注气象、地形、地貌、水文等要素, 分析各要素紧密联系和互相约束的规律。街巷空间结构以地形、山势、水向、植被为基本的物质基础, 不求规整有序但求自然适用。流域城市水系生态是地域内生物群落与河流水系环境相互作用的统一体, 是一个复杂、开放、动态、非平衡和非线性系统, 具备物种流动、能量流动、物质循环和信息流动等生态系统服务和功能。应充分分析流域水系的组织方式, 减少对水系系统干扰, 保障系统的完整性。

5. 水生态导向下的流域城市街巷形态

吴良镛先生在《广义建筑学》一书中提出了理想的人居环境应该拥有良好的空间组织形式和完美的艺术形象。欧洲旧石器时代晚期的河流系统及其作为空间组织特征的作用, 河流的生物物理特性和社会文化语义[30]用来评价河流在空间组织中的作用。人类是空间的动物, 人类的空间性决定了人生而为人, 社会单元的空间性, 人类不仅受自然条件影响, 更受到流域生态文化系统(ecoculture system)状态塑造, 水生态文化是重要的工具, 指导人类组织不同生活方式。

河流是人类文明的起源, 是联结水圈、生物圈、岩石圈的重要纽带, 同时也是重要的生物栖息地[31]。水系形态结构和连通状况是河流发育的基础, 恢复自然水系形态结构成为了研究的热点[32], Tarboton验证了天然水系具有分形特征[33]。水系弯曲度是河流平面形态的重要表征指标。水系的自然演变中, 弯曲与自然裁弯现象会交替发生, 其蜿蜒性对维持流域的生物多样性具有要意义[34]; 河流的弯曲是一种“动能自补偿”作用, 与水流的能量大小、流量、比降等密切相关, 上下断面动能差越大河流的弯曲系数就越大[35]。在河流的自然修复中, 恢复河流弯曲度也是重要的指导性指标。

用与自然和谐的方式改变流域城市空间组织方式, 需要解析自然水生态系统的组织方式, 用道法自然的生态理念和生存之道[36]组织城市街巷空间。分析流域水系自然形态, 关注水系低级和末端支流, 街巷布局顺应等高线, 垂直于低级或者末端支流布设, 恢复降雨径流水系形成机制, 维持水系自然形态。由于排水系统与道路水系相结合, 街巷在适应雨水径流的过程中, 承担引导水、分配水和排放水的多重功能, 形成树枝状结构等近自然结构形态, 主次分明、结构清晰, 集交通组织、防洪排水于一体的多功能基础设施系统。街巷空间与水系空间耦合, 街巷形态配合水系形态, 街巷尺度符合水系空间尺度, 形成自然与城市空间浑然天成的街巷布局。

以泰安市自然状态的泮河流域的河道系统为例, 在尽可能保护水系各支流分布完整前提下, 如图 7 泮河流域沿等高线规划的主干道和雨水径流排放方向引导。强化平行于等高线方向的径流排水和街巷布局, 改变以快排为目的, 垂直于等高线方向的管线的布局, 输导雨水径流进入上游河道。减少河道下游的行洪压力, 保障上游河道有足够的生态用水; 改变城市路网和城市管网规划的时序, 按照水生态优先的原则, 进行水生态现状分析, 规划雨水径流分布和雨水收集走向后, 按照雨水径流收集的需求, 规划路网的分布; 修改城市道路规划规范, 增加城市道路要遵从河流水系分布, 引导降雨径流分布和生态用水的需求。

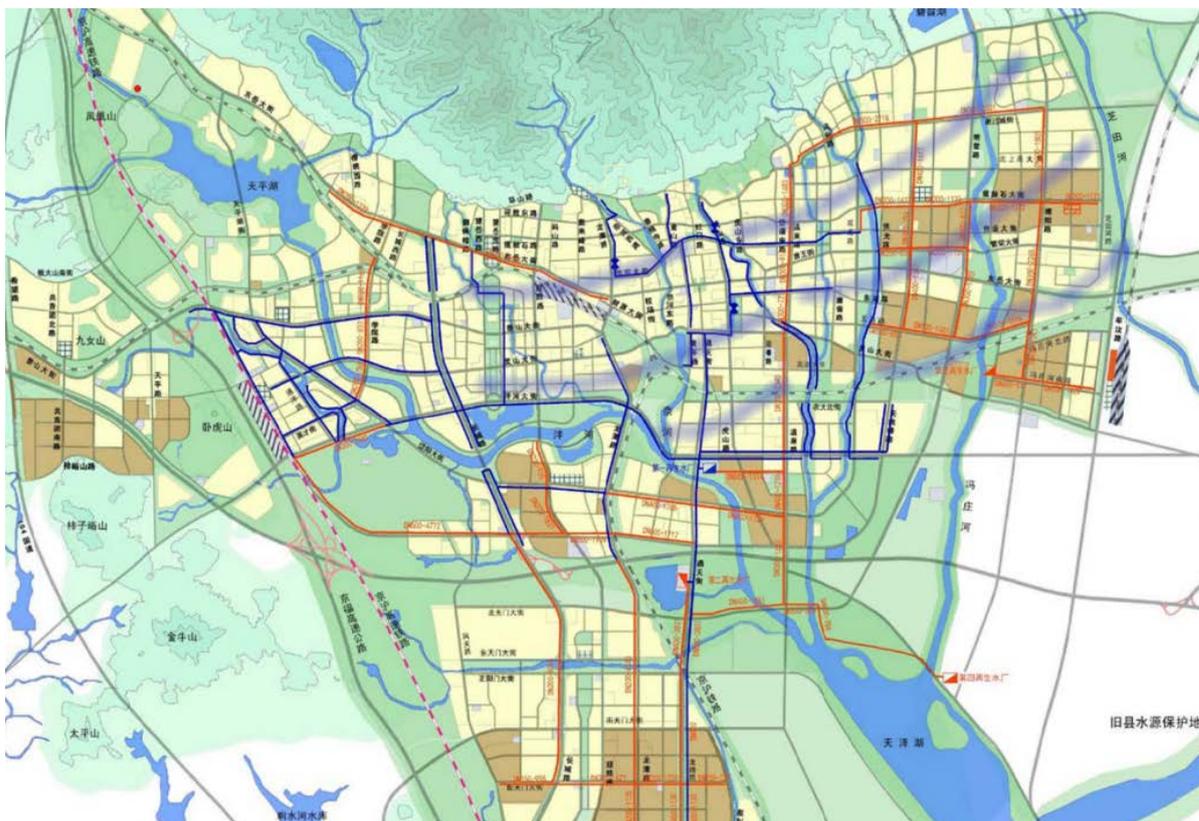


Figure 7. A schematic diagram of the main roads and rainwater runoff discharge directions along the Pan River Basin and other high-tech plans

图 7. 泮河流域沿等高线规划的主干道和雨水径流排放方向引导示意图

6. 结论

1) 以人为主体街巷空间规划, 和由此形成道路和雨水专项规划, 强化了人本主义思想, 填埋河流水系, 成为空间管理的手段。现状流域城市街巷空间组织方式引导下的排水系统组织形式, 是水资源短缺, 河流枯竭和生态问题的根源之一。

2) 人与自然和谐理念, 将改变现代城市规划以人为主体以空间和自然环境的合理利用的原则, 关注水生态自然规律, 以解读自然的方式强调水生态和街巷的有机共生, 城市街巷形态与丰富的自然地理形态相互依存、相互延续, 形成有利于水生态可持续发展的街巷空间结构框架。

3) 按照水生态优先的原则, 进行水生态现状分析, 规划雨水径流分布和雨水收集走向后, 按照雨水径流收集的需求, 规划路网的分布; 街巷空间与水系空间耦合, 街巷形态配合水系形态, 街巷尺度符合

水系空间尺度, 形成自然与城市空间浑然天成的街巷布局。

基金项目

山东省社科重点项目: 习近平生态文明制度思想研究, 编号: 18BDCJ01。

参考文献

- [1] 陈菁. 城镇化过程中应保护天然水系——从几则案例说起[J]. 中国水利, 2014(22): 21-23.
- [2] Horton, R. (1945) Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydro-Physical Approach to Quantitative Morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, **56**, 275-370.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- [3] 孟飞, 刘敏, 吴健平, 等. 高强度人类活动下河网水系时空变化分析——以浦东新区为例[J]. 资源科学, 2005, 27(6): 156-161.
- [4] May, C.W., Horner, R.R., Karr, J.R., et al. (1999) Effects of Urbanization on Small Streams in the Puget Sound Ecoregion. *Watershed Protection Techniques*, **2**, 79-90.
- [5] 斯皮罗·科斯托夫. 城市的形成: 历史进程中的城市模式和城市意义[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 101-102.
- [6] 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[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 557-564.
- [7] 袁雯, 杨凯, 唐敏, 等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 717-724.
- [8] Jacobs, J. (1993) *The Death and Life of Great American Cities*. Modern Library, New York.
- [9] Siksna, A. (1997) The Effects of Block Size and Form in North American and Australian City Centers. *Urban Morphology*, **1**, 119-133.
- [10] Jacobs, A.B. (1995) *Great Streets*. MIT Press, Boston.
- [11] Moughtin, C. (1996) *Urban Design: Green Dimensions*. Architectural Press, London.
- [12] 赵玉龙, 朱海声. 人本尺度视角下西安古城街道空间形态探析[J]. 西安建筑科技大学学报(社会科学版), 2021, 40(6): 36-42.
- [13] 鲁西奇, 马剑. 空间与权力: 中国古代城市形态与空间结构的政治文化内涵[J]. 江汉论坛, 2009(4): 88.
- [14] 陆敏. 济南水文环境的变迁与城市供水[J]. 中国历史地理论丛, 1997(3): 105-116.
- [15] 党明德, 林吉铃. 济南百年城市发展史——开埠以来的济南[M]. 济南: 齐鲁书社, 2004.
- [16] 魏亚萌. 山水考量下的济南明清府城空间形态研究[D]. [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- [17] 冯一凡, 李翊. 适应水文环境的济南古城人居环境营建智慧探析[C]//人民城市, 规划赋能——2022 中国城市规划年会论文集(07 城市设计). 北京, 中国城市规划协会, 2023: 1456-1464.
- [18] Hillier, B. and Vaughan, L. (2007) The City as One Thing. *Progress in Planning*, **67-69**, 205-230.
<https://doi.org/10.1016/j.progress.2007.03.001>
- [19] Koolhaas, R. (1994) *Delirious New York: A Retroactive Manifesto for Manhattan*. The Monacelli Press, New York.
- [20] 唐恢一. 城市学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [21] 蒋朝晖. 从形态学角度浅议城市路网模式[J]. 国外城市规划, 2006, 21(4): 98-103.
- [22] Sbirvani, H. (1985) *The Urban Design Process*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [23] GB 51222-2017 城镇内涝防治技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [24] 泰安市海绵城市专项规划(2016-2030) [Z]. 泰安市住房和城乡建设局, 济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司, 2016-12.
- [25] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等. “流域自然-社会”二元水循环理论框架[J]. 科学通报, 2014, 59(4-5): 419-427.
- [26] Goudie, A. (1990) *The Human Impact on the Natural Environment*. 3rd Edition, The MIT Press, Cambridge.
- [27] Buckle, H.T. (2009) *History of Civilization in England*. BiblioLife, Charleston.
- [28] 宋伟轩. 中国封闭式居住模式的源流、现状与趋势、转型与重构[C]//2011 中国城市规划年会论文集. 2011: 4510-4516.
- [29] A. 奈斯, 雷毅. 浅层生态运动与深层、长远生态运动概要[J]. 世界哲学, 1998(4): 63-65.

- [30] Hussain, S.T. and Floss, H. (2016) Streams as Entanglement of Nature and Culture: European Upper Paleolithic River Systems and Their Role as Features of Spatial Organization. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **23**, 1162-1218. <https://doi.org/10.1007/s10816-015-9263-x>
- [31] 马爽爽. 基于河流健康的水系格局与连通性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2013.
- [32] 金栋, 张玉蓉, 陈刚, 等. 高原山区水系结构及连通性初探-以滇池流域为例[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(11): 116-121.
- [33] Tarboton, D.G. (1996) Fractal River Networks, Horton's Laws and Tokunaga Cyclicity. *Journal of Hydrology*, **187**, 105-117. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03089-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03089-2)
- [34] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, 2003(11): 1-6.
- [35] 姚文艺, 郑艳爽, 张敏. 论河流的弯曲机理[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 533-540.
- [36] 周庆华. 从国内外城市发展历程与理念共识看当下中国城市转型[J]. 建筑与文化, 2016(3): 12-19.