DOI: 10.5846/stxb202105311426

高雯琪, 陆颖, 屈霄, 刘晗, 辛未, 虞文娟, 周伟奇, 王伟民, 陈宇顺. 城镇化背景下河流生境评价——以深圳市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 8783-8793.

Gao W Q, Lu Y, Qu X, Liu H, Xin W, Yu W J, Zhou W Q, Wang W M, Chen Y S. River habitat assessment under urbanization: a case study in Shenzhen. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8783-8793.

城镇化背景下河流生境评价 ——以深圳市为例

高雯琪^{1,3}, 陆 颖¹, 屈 霄^{1,3}, 刘 晗^{1,3}, 辛 未¹, 虞文娟², 周伟奇^{2,3}, 王伟民⁴,
陈宇顺^{1,3,*}

1 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 深圳市环境监测中心站, 深圳 518049

摘要: 城镇化背景下, 河流生态系统退化趋势明显, 有效评价河流生境状况是修复和保护河流生态系统健康的重要基础。深圳市作为全国经济发展的窗口城市, 河流生境的调查研究十分匮乏。因此, 为阐明深圳市不同城镇化程度的流域河流生境的差异与主要影响因素, 对深圳市两个代表性流域的河流生境展开了研究。针对深圳市河流的生境特点, 于 2019 年丰水期(8 月)和枯水期(11 月)对城镇化程度较高的深圳河流域的 13 个样点和城镇化程度较低的坪山河流域 12 个样点河段的生境状况进行定量调查与评价。采用综合评价法, 从河床、河道和河岸带 3 个方面选取 10 个生境指标, 构建深圳市河流生境评价指标体系和评价方法。结果表明: 深圳河流域河流生境质量总体较差, 生境评价等级为“良”、“中”、“差”的样点河段分别占 7.7%、38.5%、53.8%; 坪山河流域河流生境质量总体较好, 生境评价等级为“优”、“良”、“中”、“差”的样点河段分别占 8.3%、41.7%、41.7%、8.3%。方差分析结果表明两次调查河流生境状况无显著性差异, 短时间跨度内河流生境状况变化较小; 两个流域河流生境状况差异显著, 城镇化程度较低的坪山河流域河流生境质量显著好于城镇化程度较高的深圳河流域。河流生境评估指标主成分分析结果表明人类活动强度、河岸稳定性、河道变化、底质、河岸土地利用及植被多样性是影响深圳市河流生境变化的主要因子。本文对河床、河道、河岸带 3 个方面分别提出针对性的修复建议, 对深圳市河流的生境修复和保护具有重要的指导作用。

关键词: 城镇化; 河流; 生境评价; 影响因子; 深圳

River habitat assessment under urbanization: a case study in Shenzhen

GAO Wenqi^{1,3}, LU Ying¹, QU Xiao^{1,3}, LIU Han^{1,3}, XIN Wei¹, YU Wenjuan², ZHOU Weiqi^{2,3}, WANG Weimin⁴,
CHEN Yushun^{1,3,*}

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

2 State Key laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Central Station for Environmental Monitoring and Assessment, Shenzhen 518049, China

Abstract: In the context of urbanization, the degradation of river ecosystems has become increasingly prominent. Consequently, effectively assessment of river habitat conditions is an important foundation for restoration and protection of

基金项目: 地方委托项目(2019-07-233)

收稿日期: 2021-05-31; 接收日期: 2021-10-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yushunchen@ihb.ac.cn

river ecosystem health. Shenzhen, as a window or opening city of China's economic development, has extremely limited research conducted related to river habitat conditions. Therefore, in order to accurately elucidate the differences and main influencing factors of river habitats in basins with different degrees of urbanization in Shenzhen, a habitat assessment study was conducted on streams and rivers in two representative basins in Shenzhen. Based on characteristics of river habitats in Shenzhen, quantitative investigation and assessment of habitat conditions were conducted in 13 sampling sites in the highly urbanized Shenzhen River Basin and 12 sampling sites in the less urbanized Pingshan River Basin, in both wet (August) and dry (November) seasons in 2019. We adopted a comprehensive evaluation method to select 10 key habitat indicators from three categories: river bed, river channel, and riparian zone, to construct the habitat assessment index system and assessment method for Shenzhen rivers. The results showed that the overall condition of river habitat in the Shenzhen River Basin was poor, and the habitat condition of river sections with "good", "fair" and "poor" were 7.7%, 38.5%, and 53.8%, respectively. The overall condition of river habitat in the Pingshan River Basin was good, and the habitat condition of river sections with "excellent", "good", "fair" and "poor" were 8.3%, 41.7%, 41.7%, and 8.3%, respectively. The analysis of variance (ANOVA) results showed that there was no significant difference in river habitat conditions between the two seasons, which indicated that the overall river habitat conditions did not change too much in the short time period. There were significant differences in river habitat conditions between the two basins, and the overall river habitat condition of the less urbanized Pingshan River Basin was significantly better than that of the highly urbanized Shenzhen River Basin. Principal components analysis (PCA) results of river habitat assessment indices showed that human activity intensity, riparian stability, river channel modifications, substrate composition, riparian land use and vegetation diversity were the main factors driving river habitat conditions in Shenzhen. Based on the results of the river habitat assessment in Shenzhen, targeted restoration and management recommendations were proposed from three aspects: riverbed, river channel, and riparian zone, which have important implications for river habitat restoration and ecological conservation in Shenzhen.

Key Words: urbanization; river; habitat assessment; driving factors; Shenzhen

21 世纪以来,随着城镇化和工业化进程的加快,城市的不断扩张和人口的逐渐增加导致了资源的过度消耗以及污染物的大量排放,产生了一系列的生态环境问题^[1-2]。城市群经济迅猛发展使得自然景观、土地利用和生态系统发生了深刻变化^[3-4]。河流生态系统作为城市生态系统的一部分,提供了改善生态环境、维护生物多样性、调节气候、景观美学等多项生态服务功能^[5],与此同时也不可避免地受到城镇化进程的影响^[6-7]。生物多样性锐减^[8]、水体污染^[9]、生境退化^[10]、河流水系结构和水文过程不断被改变^[11]等多种河流生态系统问题随着城镇化的发展日益突出,河流生态系统的退化趋势明显。河流生境是河流生态系统的重要组成部分,为水生生物的生存和繁衍提供了场所,是河流水生生物和物理环境的自然纽带,也是河流生态系统健康和完整的重要因素^[12-13]。河流生境评价是有效揭示河流生态健康影响因子的重要方法,可为河流生态系统的保护与修复提供基础支撑。如何在高度城镇化背景下合理有效地保护和修复河流水生态环境,对于城市的未来发展及规划管理具有极其重要的战略意义。目前,国内外对于河流生境评价已有较多研究^[14],根据评价方法的技术特征,可以将河流生境评价方法分为四个类型:水文水力法、河流地貌法、生境预测模拟法以及综合评价法^[15-16]。其中,综合评价法种类较多,拥有较为成熟的研究方法及理论体系。此类型生境评价方法是对河流生境进行总体把握,对河流水质、水文特征、物理结构、植被特征与人类干扰等多个指标按照一定的评分标准进行打分评价。美国的快速生物评价方法(Rapid Bioassessment Protocols, RBPs)^[17]、英国河流生境调查(River Habitat Survey, RHS)^[18]以及澳大利亚溪流状态指数法(Index of Stream Condition, ISC)^[19]等均属于综合评价法。我国已在许多区域都开展了河流生境调查,但专门针对城市河流生境评价研究较少,作为全国经济发展的窗口城市,深圳市的河流生境调查研究更是匮乏。基于此,本研究参考了中国环境监测总站在《河流水生态环境质量监测技术指南》^[20]和《河流水生态环境质量评估技术指南》^[21]中提出的生境调查与

评估的方法,结合北美的河流生境评价方法^[17],对深圳市城镇化程度较高的深圳河流域及城镇化程度较低的坪山河流域的河流生境进行定量调查和评价。本研究旨在探讨深圳市不同城镇化程度的流域河流生境的差异与主要影响因素,为深圳市河流生境恢复和生态保护提供研究基础与科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

深圳市是中国南部海滨城市,毗邻香港,是我国改革开放和经济飞速发展的窗口城市。位于北回归线以南,东经 113°43′—114°38′,北纬 22°24′—22°52′之间。所辖范围呈狭长型,东西宽,南北窄,地势东南高,西北低,全市总面积 1948.7 km²。深圳市地貌类型多样,有低山、丘陵、平原、台地,其中丘陵面积最大,平原次之。深圳市所处纬度较低,属亚热带海洋性气候,雨量充沛,日照时间长。深受季风影响,夏季盛行偏东南风,高温多雨;其余季节盛行东北季风,天气较为干燥,气候温和^[22]。全市境内流域面积大于 100 km²的河流有 5 条,即深圳河、观澜河、茅洲河、龙岗河和坪山河。深圳河流域作为城镇化高速和高度发展的典型区域^[23],其土地利用类型主要为建设用地。坪山河流域由于其地貌特征,流域内土地利用包含大面积森林用地,建设用地占比及城镇化水平低于深圳河流域。

深圳河流域位于深圳市中南部,属独立入海水系,主要由深圳河及其支流组成。深圳河发源于牛尾岭,干流流经深圳与香港,自东北向西南流入深圳湾,中下游为深圳与香港特别行政区的界河。主流长 37 km,流域面积 297.4 km²。深圳河流域主要包括罗湖区全部、福田区及龙岗区的部分区域,是深圳市的政治、文化和经济中心,人口密集,经济活动频繁,城镇化水平高^[24]。

坪山河流域位于深圳市东北部,全流域地貌以丘陵、台地、低山为主,流域水系发达,河流水库众多。坪山河属于东江水系支流淡水河的一级支流,发源于深圳市三洲田梅沙尖,自西向东流经深圳龙岗区进入惠州市,在下土湖汇入淡水河,最后进入东江,河长约 33 km。坪山河流域总面积约 181 km²,其中位于基本生态控制线内的面积约 78 km²,流域植被发育较好,是深圳市五大河流中生态本底最好的一支^[25]。

本研究以城镇化程度较高的深圳河流域及城镇化程度较低的坪山河流域为研究区域,于 2019 年丰水期(8 月)和枯水期(11 月)对两个研究区域的样点河段进行河流生境状况的调查。样点布设采取等距布设原则,结合实际情况,在深圳河流域选取 13 个具有代表性的河段、坪山河流域选取 12 个具有代表性的河段进行采样调查,样点名称、编号如表 1 所示,样点分布见图 1。

1.2 调查内容与方法

参照中国环境监测总站在《河流水生态环境质量监测技术指南》^[20]中提出的生境调查的方法,选择调查点位上下 100 m 河段作为生境调查单元,使用 GPS 定位记录每个点位的海拔及经纬度。通过调查人员现场目测以及无人机航拍的方式对每个调查点位的生境评价指标情况进行总体全面的调查、测量和记录。主要调查内容为样点河段的河长、河宽、水深、流速、底质组成、水体状况、水生植物种类及分布、河岸特征及周围人类活动方式及强度等。现场对各项生境评价指标进行打分,对各样点河段的主要生境特征拍照保存以备后续查阅。进行河流生境评价时,为了评价结果的准确性,要近距离观察河流的生境特征,同时避免对河流生境造成干扰,每个样点由两人共同完成生境评价,取平均值,以免个人的主观性对评价结果造成一定的

表 1 深圳市河流生境调查采样点

Table 1 Sampling sites of river habitat assessment in Shenzhen

深圳河流域 Shenzhen River Basin		坪山河流域 Pingshan River Basin	
点位名称 Site name	点位编号 Site ID	点位名称 Site name	点位编号 Site ID
梧桐河入库	s1	碧岭	p1
正坑入库	s2	榄核桥	p2
沙湾截排闸	s3	红花岭	p3
木棉湾	s4	红花岭上	p4
下李朗	s5	红花潭	p5
中兴大桥	s6	赤坳河口	p6
草埔村	s7	汤坑	p7
沙湾河口	s8	汤坑桥	p8
人民桥	s9	金龟村	p9
田面村	s10	上坪	p10
砖码头	s11	石溪河	p11
深圳河-1	s12	山岭	p12
深圳河口	s13		

s: 深圳;p: 坪山

图 1 深圳市河流生境采样点分布
Fig.1 Distribution of river habitat sampling sites in Shenzhen

影响。调查工具主要包括无人机、相机、测距仪、彼得森采泥器、采水器等。

1.3 生境评价方法

河流生境是水生生物的生存空间及其中环境因子的总和,一般包括河床、河道、河岸带 3 个部分^[26-27]。三大类型下再进一步细分为 10 个具体的生境评价指标,对每个指标内容进行调查评价^[12,20-21](表 2),河床仅包括底质指标,河道包括河道变化、河水水量状况、水质状况、V/D 结合特性、栖境复杂度指标,河岸带包括河岸稳定性、植被多样性、人类活动强度、河岸土地利用类型指标。生境评价指标的赋分标准参照了中国环境监测总站在《河流水生态环境质量评价技术指南》^[21]中提出的生境评价的方法,每个评价指标的评分范围为 0(最低值)—20(最高值),分为 4 个赋分标准,对应优(16—20 分)、良(11—15 分)、中(6—10 分)、差(0—5 分)4 个评价等级^[21](表 3)。其中,对河岸带包含的评价指标打分时应综合考虑样点河段左右岸的生境状况。

表 2 河流生境评价指标体系
Table 2 River habitat assessment index system

分类 Type	评价指标 Assessment index	指标内容 Index content
河床 River bed	底质	底质类型及组成占比:大石(>4000 mm)、巨砾(250—4000 mm)、圆石(65—250 mm)、细砾(2—65 mm)、细沙(0.06—2 mm)、淤泥、黏土、人工底质
河道 River channel	河道变化	河道结构人工改造类型(修建闸坝、渠道化、裁弯取直、桥梁建筑等);人工改造程度;人工护岸形式、河道渠化长度及分布
	河水水量状况	水量特征:水位线、水量淹没河道占比
	水质状况	水环境特征:透明度、气味、沉淀物、水表油污;人工排污口分布;生活垃圾堆放
	V/D 结合特性	河段代表性形态类型:浅滩、池塘、急流
	栖境复杂度	河段生境状态特征:水生植被、枯枝落叶、倒木、倒凹河岸、巨石、底质类型
河岸带 Riparian zone	河岸稳定性	河岸稳定性特征:坍塌、冲淤、侵蚀
	植被多样性	植被类型(天然植被林、人工种植林);植被成熟度(成熟林、幼林);植被种类搭配(乔木、灌木、草、藤蔓);植被覆盖面积、植被密度
	人类活动强度	人类活动状况:人类活动方式、人类活动密度、人类干扰强度
	河岸土地利用类型	调查河段河岸土地利用类型(植被、农田、港口、城区、工厂、矿区);其他可能对水质造成影响的土地利用类型;土地使用过程中会产生污染类型及特征

表 3 河流生境评价等级及赋分标准

Table 3 Classification and assignment criteria of river habitat assessment

评价指标 Assessment index	等级分类 Classification														
	优 Excellent					良 Good					中 Fair				
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
底质 Substrate composition	75%以上是碎石、卵石、大石,余为细沙、淤泥等沉积物(碎石、卵石、大石占比越高,得分越高)					50%—75%是碎石、鹅卵石、大石,余为细沙、淤泥等沉积物(碎石、卵石、大石占比越高,得分越高)					25%—50%是碎石、鹅卵石、大石,余为细沙、淤泥等沉积物(细沙、淤泥等沉积物占比越高,得分越低)				
栖息复杂度 Habitat complexity	有水生植被、枯枝落叶、倒木、倒凹河岸和巨石等各种小栖息境(出现 4 种以上小栖息境,分布越均匀,得分越高)					有水生植被、枯枝落叶和倒凹河岸等小栖息境(出现 3 种以上小栖息境,分布越均匀,得分越高)					以 1 种或 2 种小栖息境为主(小栖息境分布越多,分布越均匀,得分越高)				
V/D 结合特性 Velocity/Depth combination characteristics	慢-深、慢-浅、快-深和快-浅 4 种类型均有,流速大,呈流水状态(类型分布越平均,得分越高)					只有 3 种情况,洪水季节流速较大,呈流水状态(如快-浅未出现,分值较低;类型分布越平均,得分越高)					只有 2 种情况出现,水体流速较缓(如快-浅和慢-浅未出现,分值较低)				
河岸稳定性 Riparian stability	河岸稳定,无侵蚀痕迹,观察范围内(100 m)小于 5%河岸受到损害(侵蚀河岸越少,得分越高)					比较稳定,观察范围内(100 m)有 5%—30%的河岸出现侵蚀现象(侵蚀河岸越少,得分越高)					观察范围 30%—60%河岸发生侵蚀,且洪水期可能会有较大隐患(侵蚀河岸越多,得分越低)				
河道变化 River channel modifications	渠道化没有或很少,观察范围内(100 m)小于 5%,河道维持正常模式(渠道化越少,得分越高)					渠道化较少,且通常出现于桥墩周围,观察范围内(100 m)5%—30%,对水生生物影响较小(渠道化越少,得分越高)					渠道化较广泛,出现于两岸有筑堤或桥梁支柱的情况下,观察范围内(100 m)30%—60%,对水生生物有一定影响(渠道化越多,得分越低)				
河水水量状况 Water volume status	水量较大,河水淹没到河岸两侧,或仅有少量的河道暴露(水量越大,河道暴露越少,得分越高)					水量比较大,河水淹没 75%左右的河道(水量越大,河道暴露越少,得分越高)					水量一般,河水淹没 25%—75%的河道(水量越小,河道暴露越多,得分越低)				
植被多样性 Vegetation diversity	河岸周围植被种类很多,面积大,河岸植被覆盖 50%以上(植被成熟度越高,分布面积越大,得分越高)					河岸周围植被种类比较多,面积一般,河岸植被覆盖 50%—25%(植被成熟度越高,分布面积越大,得分越高)					河岸周围植被种类比较少,面积较小,河岸植被覆盖少于 25%(植被成熟度越低,分布面积越小,得分越低)				
水质状况 Water quality	很清澈,无任何异味,河面几乎无垃圾漂浮,河水静置后无沉淀物质					较清澈,轻微异味,河面少量垃圾漂浮,河水静置后有少量的沉淀物质					较浑浊,有异味,部分河面垃圾漂浮,河水静置后有沉淀物质				
人类活动强度 Human activity intensity	无人类活动干扰或少有人类活动(人类活动越少,得分越高)					人类干扰较小,有少量的步行者或自行车通过(人流量同等状况下,有自行车出现得分较低)					人类干扰较大,少量机动车通过(人流量同等状况下,出现步行者、自行车得分较高)				
河岸土地利用类型 Land use patterns	河岸两侧无耕作土壤,营养丰富(河岸两侧主要为天然林地或草地,无耕地或者居民点)					河岸一侧无耕作土壤,另一侧为耕作土壤(耕作土壤面积越大,得分越低)					河岸两侧耕作土壤,需要施加化肥和农药(耕作土壤面积越大,得分越低)				

每个样点河段生境评价总分由 10 项生境评价指标得分值累加计算,满分为 200 分。参照相关河流生境质量分级标准^[21,28],得分>150 分等级为“优”、150≥得分>120 为“良”、120≥得分>90 为“中”、90≥得分>60 为“差”、得分≤60 为“劣”。

1.4 数据处理

使用 SPSS 24.0 对深圳市河流生境评价得分进行季节、流域间双因素方差分析 (Two-way ANOVA), 分别对深圳河流域及坪山河流域的生境评估综合得分和各项评估指标得分进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)。当方差具有同质性时, 就进行 LSD (The least significant difference) 检验; 当方差不具同质性时, 就选用非参数 Games-Howell 检验。同时使用软件 R 语言 (Vegan 功能包) 对深圳市河流生境评价指标进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA), 确定生境评价指标对河流生境质量的贡献率, 找出影响深圳市河流生境质量的因子。进行主成分分析需对数据进行标准化处理。将所有统计分析的显著性水平定为 0.05。使用 SPSS 24.0、excel 2019 进行基本数据处理及图表绘制。

2 研究结果

2.1 深圳市河流生境特征

2.1.1 生境评价结果

对 2019 年丰水期和枯水期两次调查的河流生境评估结果做季节与流域间的双因素方差分析 (Two-way ANOVA), 结果显示河流生境结果在季节间无显著差异, 但在流域间差异极显著, 季节和流域间没有交互作用 (表 4)。

依据河流生境评价赋分标准对深圳市两个流域的样点断面进行调查评价, 计算两次调查中各样点断面生境评价的平均得分 (图 2)。两次河流生境评价结果表明, 深圳河流域的 13 个生境样点中, 无生境质量分级为“优”和“劣”的样点, 仅有 1 个样点的生境质量等级为“良”, 占 7.7%, 有 5 个样点生境质量等级为“中”, 占 38.5%, 有 7 个样点生境质量等级为“差”, 占 53.8%; 坪山河流域的 12 个生境样点中, 有 1 个样点的生境质量等级为“优”, 占 8.3%, 有 5 个样点的生境质量等级为“良”, 占 41.7%, 有 5 个样点的生境质量等级为“中”, 占 41.7%, 仅有 1 个样点的生境质量等级为“差”, 占 8.3%, 无生境质量等级为“劣”的样点 (表 5)。

表 4 季节、流域间生境评估结果双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA results of habitat assessment scores in seasons and basins			
参数 Parameters	df	F	P
季节 Seasons	1	0.051	0.822
流域 Basins	1	36.846	0.000 ***
季节×流域 Seasons×Basins	1	0.001	0.971
*** : P<0.001			

表 5 深圳市河流生境评价结果分析

Table 5 Analysis of river habitat assessment in Shenzhen				
河流生境质量分级 River habitat quality classification	深圳河流域 Shenzhen River Basin		坪山河流域 Pingshan River Basin	
	样点数量 Sample quantity	所占比例 Proportion/%	样点数量 Sample quantity	所占比例 Proportion/%
优 Excellent	0	0	1	8.3
良 Good	1	7.7	5	41.7
中 Fair	5	38.5	5	41.7
差 Poor	7	53.8	1	8.3
劣 Extremely poor	0	0	0	0

2.1.2 生境评价指标得分状况

两次调查中深圳河流域及坪山河流域的各样点生境评分指标得分状况如图 3 所示, 除 V/D 结合特性指标在不同样点间得分较集中外, 其余指标得分在不同样点间的得分区间跨度大。从各指标得分分布来看, 深圳河流域的 V/D 结合特性、河岸稳定性和人类活动强度这 3 个指标得分整体较低, 坪山河流域的水质状况指

图2 深圳市河流生境评价结果

Fig.2 Results of river habitat assessment in Shenzhen

图3 深圳市河流生境评价指标得分状况

Fig.3 Scores of river habitat assessment index in Shenzhen

标得分最高,底质、植被多样性这两个指标得分也相对较高,V/D 结合特性指标得分较低。

2.1.3 深圳市河流生境差异

对两个流域间生境得分进行单因素方差分析(One-way ANOVA),发现两个流域间生境得分结果差异极显著($P < 0.01$)。深圳河流域两次调查平均得分 92 分,坪山河流域两次调查平均得分 119 分,坪山河流域河流生境质量显著高于深圳河流域。对两个流域生境评价指标得分进行单因素方差分析(One-way ANOVA),

发现两个流域河流的底质、河道变化、水质状况、植被多样性及人类活动强度这 5 个指标得分差异极显著 ($P<0.01$), 剩余 5 个指标得分无差异, 结果表明坪山河流域在底质、河道变化、水质状况、植被多样性及人类活动强度得分显著高于深圳河流域(表 6)。

表 6 不同流域生境评估指标方差分析

Table 6 One-way ANOVA results of habitat assessment indexes in different basins

指标 Index	深圳河流域 Shenzhen River Basin	坪山河流域 Pingshan River Basin	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
底质 Substrate composition	(8±5) b	(13±4) a	1	16.238	0.000 ***
河道变化 River channel modifications	(8±6) b	(13±6) a	1	11.342	0.002 **
河水水量状况 Water volume status	(10±6)	(9±4)	1	1.377	0.246
水质状况 Water quality	(12±6) b	(17±2) a	1	17.105	0.000 ***
V/D 结合特性 Velocity/Depth combination	(6±1)	(6±1)	1	0.696	0.408
栖息复杂度 Habitat complexity	(11±5)	(12±4)	1	0.569	0.569
河岸稳定性 Riparian stability	(6±2)	(9±6)	1	3.324	0.075
植被多样性 Vegetation diversity	(10±4) b	(14±3) a	1	17.793	0.000 ***
人类活动强度 Human activity intensity	(8±4) b	(13±5) a	1	15.956	0.000 ***
河岸土地利用类型 Land use patterns	(12±3)	(13±4)	1	0.554	0.460
总分 Total score	(92±17) b	(119±24) a	1	21.220	0.000 ***

在表格的每一行, (平均值±标准差) 后标有不同字母指示该指标在两个流域之间存在显著差异 ($P<0.05$)

2.2 深圳市河流生境影响因子

对各项河流生境评估指标结果进行主成分分析, 结果表明, 前 3 个主成分的累计方差贡献率达到 70.73%, 表明当前生境评价指标能够很好地体现深圳市河流生境状况, 其中第一主成分的方差贡献率为 38.10%。具有较高因子负荷的生境评价指标为影响河流生境质量的关键指标。由主成分分析结果可见, 第一主成分的关键变量包括人类活动强度、植被多样性、河岸稳定性等生境评估指标, 其中, 深圳市河流生境质量受人类活动强度指标的影响最大(表 7)。

表 7 河流生境评估指标主成分分析

Table 7 Principal component analysis results of river habitat assessment indices

生境评估指标 Habitat assessment index	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3
底质 Substrate composition	-0.847	0.654	-0.125
栖息复杂度 Habitat complexity	-0.265	0.855	0.491
V/D 结合特性 Velocity/Depth combination	0.235	0.253	-1.036
河岸稳定性 Riparian stability	-0.903	0.232	0.446
河道变化 River channel modifications	-0.858	-0.238	-0.440
河水水量状况 Water volume status	0.094	-0.990	0.530
植被多样性 Vegetation diversity	-0.927	-0.525	-0.053
水质状况 Water quality	-0.816	-0.494	-0.311
人类活动强度 Human activity intensity	-1.101	-0.092	-0.133
河岸土地利用类型 Land use patterns	-0.873	0.196	0.238

3 结论与讨论

3.1 深圳市河流生境质量综合评价

深圳市河流生境质量评价结果表明城镇化程度较高的深圳河流域河流生境质量总体较差, 城镇化程度较

低的坪山河流域河流生境质量整体较好。2019 年丰水期和枯水期两次生境评估结果无显著差异,说明短时间跨度内生境状况变化不大。两个流域间生境评估结果差异极显著,城镇化程度较低的坪山河流域河流生境质量显著优于城镇化程度较高的深圳河流域,且在多个生境评价指标得分都显著高于深圳河流域。

深圳河流域河流生境调查样点除了 s1 和 s2 外其他样点都位于城区中心。样点 s1 和 s2 位于深圳河流域东北方,属于丘陵地区,是深圳河流域河流生境评估得分最高的 2 个点位。点位 s2 两次调查平均得分为 135 分,是深圳河流域河流生境得分最高的点位。该点位生境类似山地溪流,河流维持自然形态,河道内无渠道化、护坡等人为改造,小生境较多,水质清澈,两侧河岸为自然生境,河岸植被类型丰富且覆盖面积大。点位 s1 两次调查生境平均得分 110 分,该点位靠近深圳水库,底质类型主要为碎石、鹅卵石等,水体清澈,河岸无耕作土壤,植被缓冲带状况良好。深圳河流域生境评估得分最低的点位为 s4(平均得分 69.5 分)、s6(平均得分 76.5 分)及 s9(平均得分 70 分),这些点位完全位于中心城区,人类活动密集区,土地利用类型主要为建筑、交通用地。河道完全渠道化,水泥筑堤,河岸带缺少植被缓冲带。河流水量极小且水流形式单一,有些河段甚至面临周期性断流的风险,由于位于人类活动密集区域,人类干扰强度大,河流周遭频繁强烈的人类活动对其水质影响严重。样点生境类型的不同是导致深圳河流域不同样点间河流生境评价指标得分差异较大的原因。坪山河流域河流生境点位分为 2 个区域,一个是河流生境较好的丘陵—山地过渡区,两次生境评估得分较高的点位如 p1(平均得分 145.5 分)、p2(平均得分 152 分)、p4(平均得分 140 分)以及 p12(平均得分 148.5 分)均位于此区域内;另一个是河流生境质量较差的平原城区,此区域内生境点位有 p6(平均得分 83 分)、p7(平均得分 92.5 分)等,坪山河流域河流生境评估指标得分变幅较大也与这两种不同的生境类型有关。丘陵—山地过渡区河岸带土地利用类型主要为森林,河流基本保持自然流水状态,为小型山地溪流。人工改造及人为干扰较少,此区域植被类型丰富,植被覆盖率及宽度较高,河流微生境复杂度高,底质组成主要为大石、碎石、鹅卵石等,水体清澈,但其水量较少,水流形式较为单一。而平原城区河流大部分河段建设堤岸和硬质护坡,河道渠道化明显,河岸带植被多样性低、覆盖面积小,人类干扰对河流影响较大。

综合两次调查结果发现,两个流域的河流在 V/D 结合特性与河水水量状况这 2 个生境评估指标得分均偏低,说明河流水量较少,水流形式单一。高晓薇以深圳河为例,分析了 1996—2006 年间的深圳河河流健康状况,发现深圳河主要问题有水质污染严重、河水水量不足^[29]。经过近些年的城市污染治理,深圳河流域整体水质状况有所改善,在部分样点仍然存在水质污染问题,河水水量不足目前依然是影响深圳河流域河流生境质量的重要问题之一。深圳市由于其地理条件特殊,水资源短缺,本地水资源供应不足,属于严重缺水城市^[30]。市内大多数河流河道短小,是明显的雨源性河流特征,缺乏其它的动态补水渠道,水环境容量偏小。因此,缺水不仅仅是深圳市河流所存在的问题,是整个深圳市淡水生态系统所面临的严峻考验。

3.2 深圳市河流生境状况影响因素分析

深圳河流域和坪山河流域河流都包含有两种生境类型,河流生境评价指标得分跨度较大也与这两种生境类型相关。综合两个流域生境评估结果,无论是单个河流生境评估指标,还是整体的河流生境状况,丘陵—山地区域河流生境都要好于平原城区。丘陵—山地区域周围为茂密的森林植被,人类活动较少,河流的河床、河道及河岸带大都保持自然形态,河流底质组成呈现多样化,大石、鹅卵石、碎石占比较高,河流微生境较多且复杂度高,水质清澈,河流两岸为丰富的植被缓冲带,能有效减少外部干扰对河流的影响,无耕地、建筑等土地利用。而平原居民区河流高度城镇化,人工改造程度高,河岸筑堤、河道渠道化,底质单一,多为细沙或者淤泥,河流沿岸缺少植被缓冲带,河岸周遭强烈的人类干扰对河流水质、微生境都造成了不好的影响。丘陵—山地区域河流生境评估结果及各项评估指标均高于平原居民区域的河流,表明高度城镇化的发展会对流域内河流生境质量造成不利影响。罗坤在重庆市两江新区流域内河流生境调查表明,城镇化背景下河流生境质量随着城市化水平的提高而降低^[31]。周洪建等分析了深圳市近 30 年间的河网变化,发现河网变化及城镇化是观澜河流域生态系统功能降低的主要原因^[32]。城镇化的发展对社会和经济带来了巨大的效益,但伴随而来的人口增加和高密度聚集也对当地的生态系统造成了不利的影响。城市人口的增长带来了房地产、商业、工业和

交通的发展,导致了土地利用的变化^[33]。大量土地利用侵占河岸缓冲带,河岸植被缓冲带严重缩减甚至消失。研究表明,与其他生态系统相比,全球土地利用对淡水生态系统的负面影响最大^[34]。

3.3 建议

河流是重要的自然生态系统,承载着陆地生态系统和水生生态系统间物质循环、能量流动和信息交流的重要生态功能^[35-36]。但是近些年,随着城镇化进程的加快,河流生态系统不断遭受人类活动干扰带来的不良影响,河流生态系统持续退化,河流生境破碎化、水污染、生物多样性下降等问题亟待解决^[8-10]。深圳市出台了《深圳市贯彻国务院水污染治理行动计划实施治水提质行动方案》(深府[2015]45号),明确要求加强河湖生态保护,提高生物多样性。河流是水生生物的重要栖息地和关键生境,实施河流生境修复,有利于提高水生生物多样性,维护河流生态健康^[36-37]。在对深圳市河流生境质量分析和问题识别的基础上,从流域总体治理出发,整体规划,统筹把握,突破传统的对单一生境指标进行修复的方法,立足于河流生境的整体修复。从本研究中深圳市河流生境调查评价中发现的问题着手,包括河岸带生境修复、河道自然结构修复、河流水质保护等。基于评价结果,我们提出以下建议:(1)河床生境修复:在目前自然河流生境的基础上,从生态优化的角度,在河道内人工构造巨石、鹅卵石、砾石、细沙等组合类型的底质格局和各种水流类型,营造丰富多样的栖境类型及流水环境,提高生境类型与水流类型的多样性^[15]。(2)河道生境修复:从流域整体污染控制及河道的生态修复两个方面开展河流水污染治理,从源头上减少污染物排放,修复河流水生态,改善水动力,提高水体自净能力。减少渠道化河段,综合考虑多方面因素的前提下尽可能拆除部分河段的硬质化材料,恢复其自然生境。(3)河岸带生境修复:在安全范围内下调水泥等硬质护岸的高度,减少河岸带固化长度,建设亲自然的生态护岸,为水生生物提供合适的栖息地;在河道空间较大的河段科学布设水生植物,也可建设多种植被类型的生态浮岛^[38],为河流水生生物提供食物及小型生境;针对有限的河岸带空间,综合考虑多方面因素,建设适宜宽度的河岸带植被,丰富植被类型^[39];减少河道周围的建设施工,划定生态开发红线,科学规划亲水河段,使河道和开发建设之间保持一定的安全距离,减少人类活动干扰,使河流维持正常的自然流通状态。

参考文献 (References):

- [1] Li Y F, Li D. Assessment and forecast of Beijing and Shanghai's urban ecosystem health. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 154-163.
- [2] Shen W, Zheng Z C, Pan L, Qin Y C, Li Y. A integrated method for assessing the urban ecosystem health of rapid urbanized area in China based on SFPD framework. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107071.
- [3] Ren W W, Zhong Y, Meligrana J, Anderson B, Watt W E, Chen J K, Leung H L. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai: 1947-1996. *Environment International*, 2003, 29(5): 649-659.
- [4] Gu Q W, Wang H Q, Zheng Y N, Zhu J W, Li X K. Ecological footprint analysis for urban agglomeration sustainability in the middle stream of the Yangtze River. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 86-99.
- [5] 范小杉, 何萍. 河流生态系统服务研究进展. *地球科学进展*, 2018, 33(8): 852-864.
- [6] Kuang W H. Evaluating impervious surface growth and its impacts on water environment in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(3): 535-547.
- [7] Zhao Y W, Xu M J, Yu L, Yin X A, Zhang Y. Identifying sensitive indices in the response of aquatic biota to landscape pattern changes: a case study of the Taizi river basin in north China. *River Research and Applications*, 2014, 30(8): 1013-1023.
- [8] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [9] Malmqvist B, Rundle S. Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation*, 2002, 29(2): 134-153.
- [10] Dudgeon D, Arthington A H, Gessner M O, Kawabata Z I, Knowler D J, Lvque C, Naiman R J, Prieur-Richard A H, Soto D, Stiassny M L J, Sullivan C A. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 2006, 81(2): 163-182.
- [11] 郭科. 城市化河流生态水文效应及调控研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [12] 邹曦, 杨志, 郑志伟, 史方, 邵科, 管波, 万成炎. 长江干流典型区域河流生境健康评价. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(10): 2219-2228.
- [13] 吴阿娜. 河流健康评价: 理论、方法与实践[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.

- [14] 陆颖, 陈宇顺. 河流生境的评估方法及应用的研究进展. 水生生物学报, 2020, 44(3): 670-684.
- [15] 汪昱昆. 太湖流域河流生境多尺度评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [16] 王强. 山地河流生境对河流生物多样性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [17] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. Washington: US Environmental Protection Agency, 1999: 11-101.
- [18] Raven P J, Fox P, Everard M, Holmes N T H, Dawson F H. River habitat survey: a new system for classifying rivers according to their habitat quality//Boon P J, Howell D L, eds. Freshwater Quality: Defining the Indefinable? Edinburgh: The Stationery Office, 1997: 405-424.
- [19] White L J, Ladson A R. An Index of Stream Condition: User' Manual. 2nd ed. Melbourne: Department of Natural Resources and Environment, 1999: 1-22.
- [20] 中国环境监测总站. 河流生态环境质量监测技术指南(试行). 北京: 中国环境监测总站, 2014.
- [21] 中国环境监测总站. 河流生态环境质量评价技术指南(试行). 北京: 中国环境监测总站, 2014.
- [22] 黄奕龙, 王仰麟. 深圳市河流水质退化及其驱动机制研究. 中国农村水利水电, 2007, (7): 10-13.
- [23] 高晓薇, 刘家宏. 深圳河流域城市化对河流水文过程的影响. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(1): 153-159.
- [24] 闵凤阳, 王家生, 朱孔贤, 章运超. 河长制下的城市水环境治理——以深圳市深圳河流域为例. 中国水利, 2019, (14): 16-17.
- [25] 张亮, 任心欣, 俞露. 基于低影响开发模式的流域水污染治理思路——以深圳坪山河流域为例//2013 中国城市规划年会论文集. 青岛: 中国城市规划学会, 2013: 1-9.
- [26] Parsons M, Thoms M, Norris R. Australian River Assessment System: Review of Physical River Assessment Methods—A Biological Perspective, Monitoring River Health Initiative Technical Report No. 21. Canberra: Commonwealth of Australia and University of Canberra, 2002.
- [27] 陈婷. 平原河网地区城市河流生境评价研究——以上海为实例[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [28] 刘昊, 黄健, 陈建林, 黄海博, 黄亮亮, 吴志强, 宋晓红, 詹诚. 基于快速生物评价协议(RBPs)的漓江上游区河流生境评价. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2020, 41(6): 27-32.
- [29] 高晓薇, 刘元元, 戴纪翠, 毛小琴. 深圳河健康状况诊断及分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(4): 636-642.
- [30] 邱国玉, 张清涛. 快速城市化过程中深圳的水资源与水环境问题. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 629-633.
- [31] 罗坤. 城市化背景下河流健康评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [32] 周洪建, 史培军, 王静爱, 高路, 郑憬, 于德永. 近 30 年来深圳河网变化及其生态效应分析. 地理学报, 2008, 63(9): 969-980.
- [33] Antrop M. Landscape change and the urbanization process in Europe. Landscape and Urban Planning, 2004, 67(1/4): 9-26.
- [34] Díaz S, Settele J, Brondizio E S, Ngo H T, Agard J, Arneth A, Balvanera P, Brauman K A, Butchart S H M, Chan K M A, Garibaldi L A, Ichii K, Liu J G, Subramanian S M, Midgley G F, Miloslavich P, Molnár Z, Obura D, Pfaff A, Polasky S, Purvis A, Razzaque J, Reyers B, Chowdhury R R, Shin Y J, Visseren-Hamakers I, Willis K J, Zayas C N. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. Science, 2019, 366(6471): eaax3100.
- [35] 黄宝强, 李荣昉, 曹文洪. 河流生态系统健康评价及其对我国河流健康保护的启示. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4600-4602, 4641-4641.
- [36] Allan J D, Castillo M M. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Netherlands: Springer, 2007: 75-103.
- [37] Southwood T R E. Habitat, the templet for ecological strategies. Journal of Animal Ecology, 1977, 46(2): 337-365.
- [38] 曾鹏, 汪昱昆, 刘垚焱, 王话翔, 陈氏权, 车越. 基于河段尺度的太湖流域城市河流生境评价. 应用生态学报, 2020, 31(2): 581-589.
- [39] 汪冬冬, 杨凯, 车越, 吕永鹏. 河段尺度的上海苏州河河岸带综合评价. 生态学报, 2010, 30(13): 3501-3510.