

DOI: 10.5846/stxb201712312362

曹宸, 李叙勇. 区县尺度下的河流生态系统健康评价——以北京房山区为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4296–4306.

Cao C, Li X Y. Health assessment of river ecosystem at the district and county scales: A case study of Fangshan district in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4296–4306.

## 区县尺度下的河流生态系统健康评价 ——以北京房山区为例

曹宸<sup>1,2</sup> 李叙勇<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 伴随郊区城市化的快速发展, 高强度人工管控对河流生态系统产生持续胁迫作用, 河流生态系统健康受到严重威胁甚至损害。以北京房山区河流水系为例, 于 2016—2017 年在区域内的 31 处样点进行野外调查。选取河流的水环境功能、防洪效益功能、生态效益功能和支持利用功能 4 方面 16 个具体评价指标, 并通过层次分析法计算权重, 构建区县尺度下的河流生态系统健康评价指标体系, 并进行健康状况评价。结果表明: 房山区河流的防洪效益功能与生态效益功能中“健康与亚健康”状态比例分别为 58.0% 与 41.9%, 而水环境功能与和支持利用功能中“较差与差”状态比例为 71.0% 与 41.9%; 河流生态系统健康整体水平较差, 勉强满足河流生态系统一般需求。同时, 房山区境内的拒马河与小清河的河流生态系统健康状态远优于大石河与永定河。河流生态基流是影响河流生态系统健康的关键因素, 适当释放库区截留水量与调配区外清洁水体, 已成为恢复房山区河流生态系统健康的前提与基础。

**关键词:** 河流生态系统健康; 水环境; 防洪效益; 生态效益; 支持利用

## Health assessment of river ecosystem at the district and county scales: A case study of Fangshan district in Beijing

CAO Chen<sup>1,2</sup>, LI Xuyong<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** With the rapid urbanization of the suburbs and the resultant persistent, high-intensity management of ecosystems by humans, the health of river ecosystems is being seriously threatened, ultimately resulting in damage. In this paper, 31 sites along regional river systems in Fangshan district, Beijing, were investigated during 2016—2017. Sixteen specific evaluation indicators were classified into four aspects of river functions, viz., water environment, flood control benefit, ecological benefit, and support and utilization. The analytic hierarchy process method was used to calculate the index weight; next, the river ecosystem health evaluation index system at the county scale was constructed for Fangshan district. The results showed that, for the streams in Fangshan district, the proportion of “health and sub-health” state was 58.0% and 41.9% in terms of the functions of flood control benefit and ecological benefit, respectively. However, the proportion of “below general” state in terms of the functions of water environment and support and utilization was 71.0% and 41.9%, respectively. Overall, the health of the river ecosystems in Fangshan district was poor and barely met the general functions of

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0503007); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-005)

收稿日期: 2017-12-31; 修订日期: 2018-05-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@cees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

the river ecosystem. Meanwhile, comparing the health of the river ecosystems, Juma and Xiaoqing rivers were far superior to Dashi and Yongding rivers. River ecological baseflow was the key factor that affected the health of the river ecosystems. Thus, the government should divert clean water from local reservoirs and other areas to restore and improve the health of the river ecosystems in Fangshan district.

**Key Words:** health of river ecosystem; water environment; flood control benefit; ecological benefit; support and utilization

河流生态系统在人类发展历史中起到不可替代的作用,不仅供给人类生产生活所需的各类河流生态系统产品,而且发挥维持人类生存依赖的自然环境等河流生态系统功能<sup>[1-3]</sup>。伴随现代化城市建设的快速发展,高强度人工管控而引起的水资源供需矛盾与水生态环境退化问题,已对自然状态下的河流生态系统平衡产生极大扰动与破坏,同时原有的河流生态系统也被附加了众多社会经济属性<sup>[4-6]</sup>。同时,人工干预下的河流水源结构与水动力条件的改变,促使河流生态系统在区县级尺度下存在明显的空间异质性,河流健康须界定在自然调整与人工管控系统下的河流生态系统健康<sup>[7]</sup>。因此,如何评估区县级尺度下河流生态系统健康现状已成为当下区域河流生态系统管理的重要议题。

目前,河流生态系统健康评价方法已在世界范围内进行广泛的探讨<sup>[8-11]</sup>,主流的评价方法有2类:指标体系法与指示物种法,如国外较为流行的欧盟水框架指令<sup>[12]</sup>、美国快速生物监测协议<sup>[13]</sup>、澳大利亚河流状态指数法<sup>[14]</sup>、瑞典的农业景观区域河岸带与河道环境评估方法<sup>[15]</sup>等。国内也有诸多学者采用类似方法,在我国海河流域、淮河流域、松辽流域等流域进行河流生态系统健康评价,并取得较为丰富的研究成果:郝利霞等<sup>[16]</sup>以水质、底栖动物与营养盐3方面构建海河流域河流健康评价指标体系;李瑶瑶等<sup>[17]</sup>以水文特征、水质状况、地貌特征与生物状况4方面构建淮河流域(河南段)河流生态系统健康评价指标体系;朱卫红等<sup>[18]</sup>以河流水文、河流形态、河岸带状况、水体理化参数与河流生物构成5方面构建松辽流域图们江河流生态系统健康评价指标体系。指标体系法在上述研究均得到较好展现,已经成为当下河流生态系统健康评价较为理想的方向。然而在指标体系法构建的过程中也存在部分不足:国内外多数学者在研究区域的选取偏向于省市或大流域尺度,而较少深究区县行政尺度下河流的共性探讨;在研究对象上主要倾向于选取水文连续条件较为优良的河流生态系统,而忽视具有较强间断性的河流生态系统评价;在评价体系中较多将河流水质单独作为评价的关键因素,而忽略了人工管控下河流水源结构的客观组成现状,使河流生态系统健康评价整体偏低。因此,目前已有的指标体系法较难适用于区县尺度下河流生态系统健康评价。

北京市房山区作为北京市重点生态保育及区域生态治理协作区,区内河流受人工管控,有明显缺水性、间断性与片段性,河流水体与河流生境构成具有自然与人工双重属性。较为复杂的河流生态系统构成约束着区域内社会经济与自然生态的可持续发展。本研究在吸取并改进相关指标体系法的基础上<sup>[19-23]</sup>,结合区域特征,采用基于区县级行政单元为主体、区域性流域单元为辅助的多因子综合评价指标法,从河流的水环境功能、防洪效益功能、生态效益功能和支持利用功能4方面筛选河流生态系统健康评价指标,通过层次分析法赋权计算权重,探讨北京市房山区河流生态系统健康状况,并构建相应河流生态系统健康评价体系,以期对间断性、缺水性的河流生态系统健康评价与区域河流生态系统管控提供参考。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区域

房山区地处北京市西南,东界永定河,南接拒马河,西北倚太行山余脉,位于115°25′—116°15′E与39°30′—39°55′N之间,总面积2019 km<sup>2</sup>,为首都西南部重点生态保育及区域生态治理协作区(图1)。房山区多年平均降水量为582 mm,属于暖温带半干旱半湿润地区。房山区地跨大清河与永定河2大流域水系、3条骨干河流,11座中小型水库。区域内人口密集,2016年平均人口密度为543人/km<sup>2</sup>,而同年人均水资源量仅

为  $266 \text{ m}^3/\text{人}$ , 远低于全国人均水平, 水资源供需矛盾突出。

房山区降水年内分配极度不均, 6—9 月降水量占全年总降水量 85%, 加之频繁的人类活动, 区域内河流径流量呈现明显季节性波动。2012 年北京“7.21”特大暴雨在房山引发多处河道溢满, 部分区域面临季节性洪水, 而在非汛期, 多数河流仅勉强维持河道基流, 甚至出现季节性断流, 加之工农业与林业的水资源消耗、水库塘坝人为截留与再生水污染风险, 河流生境不稳定导致水生栖息地片区化, 水生生物多样性衰退等区域生态安全隐患, 如何解决区域河流生态系统健康与生态安全间的矛盾迫在眉睫。

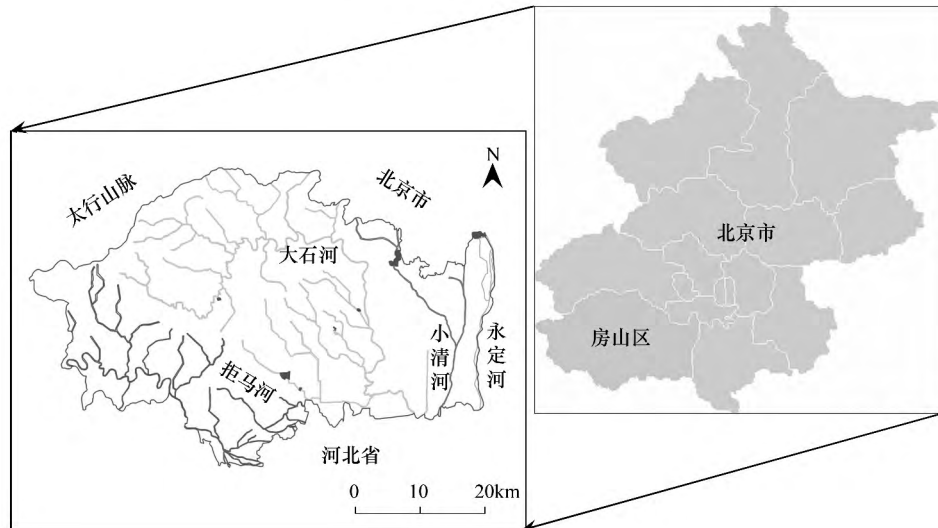


图 1 北京房山区地理位置

Fig.1 Location of Fangshan district in Beijing

## 1.2 样点设置及数据来源

房山区境内水系由大清河水系和永定河水系构成, 由于永定河水系基本长年处于干涸状态, 为此将大清河水系进行二次划分。大清河水系包括大石河、拒马河与小清河三条干流。在 2016 年 9 月—2017 年 9 月四季对北京市房山区水系进行野外调查, 针对连续型流水系布点遵循等间距布设, 季节性流水系布设于河流连续性渐变起始处下游 1 km 处, 基本涵盖各段流水系的基本特征。因此, 在拒马河选取 1—4 共 4 处样点, 大石河选取 5—21 共 17 处样点, 小清河选取 22—28 共 7 处样点, 永定河选取 29—31 共 3 处样点, 总计 31 处样点(图 2)。同时, 选取的 16 项评价指标原始数据有 9 项直接通过野外调查获得, 2 项通过野外调查与历史资料校对获得, 5 项来自于 2015—2016 年统计年鉴。

## 2 评价指标体系及标准

### 2.1 构建房山区河流生态系统评价指标体系

目前, 在我国大流域尺度的河流生态系统健康研究较多, 但因自然条件差异, 人为干扰程度不同等因素, 没有形成统一的评价指标体系, 本文结合已有研究与实地调查情况, 划分流域河流环境功能、防洪效益功能、生态效益功能以及支持利用功能 4 个相对独立的子评价指标系统。

本研究结合华北半干旱半湿润地区社会经济发展水平与自然地理条件, 依据指标数据的代表性、可获取性以及评价方法可操作性, 选取与河流生态系统密切相关的评价指标, 并通过相关领域专家鉴别筛选, 最终确认: 水质综合达标率、防洪河道措施完善率、生态环境用水率、万元地区生产总值水耗等 16 项指标构建北京市房山区河流生态系统健康评价指标体系, 其构成参见表 1。

### 2.2 河流生态系统健康评价模型

目前, 综合评价指标法<sup>[24]</sup>、神经网络法<sup>[25]</sup>、模糊评价法<sup>[26-27]</sup>等多种统计方法在河流生态系统健康评价中

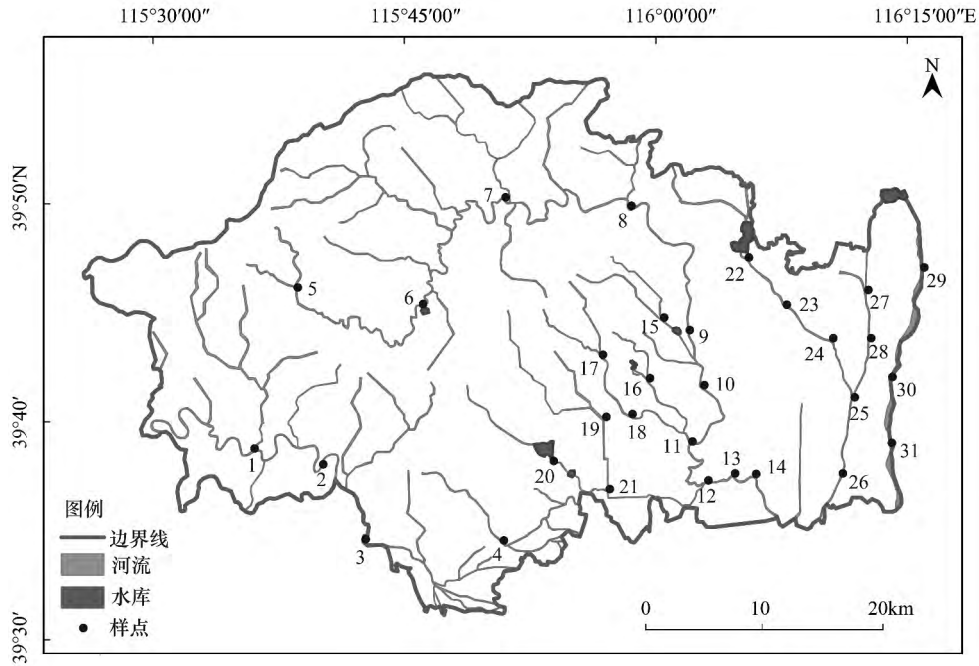


图 2 2016—2017 年北京房山区调查/采样点分布情况

Fig.2 Distribution of survey and sampling sites of Fangshan district in Beijing , in 2016—2017

较为常见。结合实际情况与简洁实用的可操作性, 本文采用多因子综合评价指标法, 分析判断北京市房山区河流生态系统健康状态。

表 1 北京房山区河流生态系统健康评价指标体系

Table 1 Health assessment indicators of river ecosystem of Fangshan district in Beijing

目标层 Goal layer	效应层 Effect layer	指标层 Index layer	指标层涵义 Meanings of index layers	数据来源 Data sources	计算方法 Calculation methods
河流生态系统健康评价指标体系 Health assessment indicators of river ecosystem	水环境功能	水质综合达标率	针对存在常年径流的地表河流水体水质情况	野外调查	取 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 COD 三项指标综合评估河流水质
		水源地达标率	描述地表与地下供水源地水质安全情况	野外调查	水质达标水源地个数/总评价水源地个数 $\times 100\%$
		水体自净率	体现已确定水功能区划流域总体情况	野外调查	满足水功能的河流流域面积/总流域面积 $\times 100\%$
		河流断流率	表达流域河流极端水量变化情况	野外调查	河流发生断流天数 / 全年天数 $\times 100\%$
	防洪效益功能	防洪河道措施完善率	表示流域河流可能抵挡洪水级别与程度	野外调查	已达标防洪河道总长度/河流总长度 $\times 100\%$
		河流调蓄率	表明流域河流缓冲能力	野外调查	湖库实际库容/湖库总库容 $\times 100\%$
		河岸缓冲带结构稳定率	度量河岸潜在抵抗洪水侵蚀与破坏能力	野外调查	通过实地调查, 定性评价河岸带受侵蚀状态
	生态效益功能	生态环境用水率	显示地区经济发展水平与产业结构状态	统计年鉴	生态环境用水量/总用水量 $\times 100\%$
		珍稀水生生物分布状态	呈现水生栖息地生态环境优劣程度	野外调查与历史资料	通过实地调查与历史资料, 定性评估
		鱼类种类变化率	反映水生生物耐受性指标	野外调查与历史资料	实调鱼类种类/历史资料鱼类种类 $\times 100\%$
		万元地区生产总值水耗	表现流域河流水资源社会经济价值	统计年鉴	$10000 \times \text{总用水量} / \text{地区生产总值} \times 100\%$

续表

目标层 Goal layer	效应层 Effect layer	指标层 Index layer	指标层涵义 Meanings of index layers	数据来源 Data sources	计算方法 Calculation methods
		河岸缓冲带 植被覆盖率	展现滨水区域生态环境 状态	野外调查	通过实地调查,定性评价河岸缓冲带植 被占比例
	支持利用 功能	人均用水量	衡量流域内人口 生活水平	统计年鉴	流域总用水量/流域总人口数×100%
		污水处理率	说明流域河流 纳污能力	统计年鉴	污水总处理量/污水总排放量×100%
		通航保证率	反应流域河流支持 承载航运能力	野外调查	通航天数/全年天数×100%
		水资源费征 收率	反馈区域对水资源 管理能力	统计年鉴	实交水资源费/应收水资源费×100%

评价模型:

$$I = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} m_{ij} \quad (1)$$

式中  $I$  为综合评价价值;  $\varphi_{ij}$  为第  $i$  个效应层中第  $j$  个指标层对应权重值;  $m_{ij}$  为第  $i$  个效应层中第  $j$  个指标层的评价价值;  $n$  为各效应层中所对应指标层总数。

### 2.2.1 评价指标标准

针对已构建的北京市房山区河流生态系统评价指标体系,统计年鉴数据指标标准优先选取国家指标,其次选取北京市“十三·五”规划或房山区生态文明建设标准;野外调研数据指标标准则优先考虑地区性标准,以减小区域性差异影响,其次选取专家现场评判方式。指标标准构成参见表 2。

表 2 北京房山区河流生态系统健康评价指标标准

Table 2 Standard of evaluation index for the health of river ecosystem of Fangshan district in Beijing

指标层 Index layers	评价值 Evaluation value				
	1	0.8	0.6	0.4	0.2
水质综合达标率 Comprehensive standard ratio of water quality/%	>95	80	60	50	<40
水源地达标率 Standard ratio of water source/%	>95	90	80	60	<40
水体自净率 Ratio of water self-purification/%	>95	80	60	50	<40
河流断流率 Ratio of river disconnection/%	<1	2	5	10	>20
防洪河道措施完善率 Ratio of flood control measures/%	>95	90	80	70	<60
河流调蓄率 Ratio of river regulation/%	>50	40	30	20	<10
河岸缓冲带结构稳定性 Structural stability of riparian buffer/%	>95	90	80	60	<30
生态环境用水率 Water consumption ratio of eco-environment/%	<4	8	12	16	>20
珍稀水生生物分布状态 Distribution of rare aquatic life	健康	亚健康	一般	较差	差
鱼类种类变化率 Change ratio of fish species/%	<5	10	15	20	>25
万元地区生产总值水耗 Water consumption of ten thousand yuan/m <sup>3</sup>	<20	25	35	50	>70
河岸缓冲带植被覆盖率 Vegetation coverage of riparian buffer/%	>95	85	75	60	<40
人均用水量 Per capita water consumption/m <sup>3</sup>	<60	100	150	200	>250
污水处理率 Wastewater treatment ratio/%	>95	90	80	70	<60
通航保证率 Navigation security ratio/%	>95	90	80	60	<40
水资源费征收率 Charge ratio for water resources/%	>95	90	80	70	<60

### 2.2.2 评价指标权重

为突出评价指标体系中指标差异性与重要性,首先邀请各相关领域专家对效应层层间指标进行两两判别比较。采用数值 1, 3, 5 代表同等重要、重要与非常重要,而数值 2, 4 则表示介于之间的重要性情形,并采用

层次分析法计算各效应层的权重值,并检验其一致性,参见表 3。

表 3 北京市房山区河流生态系统健康矩阵及权重

Table 3 Matrix and weight for the health of river ecosystem of Fangshan district in Beijing

效应层 Effect layers	1	2	3	4	权重 $\varphi$ Weight $\varphi$	参数值 Parameter values
水环境功能 Function of water environment	1.00	0.50	2.00	1.00	0.227	$\lambda_{\max} = 4.01$ $CR = 0.01 < 0.1$
防洪效益功能 Function of flood control benefit	2.00	1.00	3.00	2.00	0.423	
生态效益功能 Function of ecological benefit	1.00	0.50	2.00	1.00	0.227	
支持利用功能 Function of supporting and utilizing	0.50	0.33	1.00	0.50	0.122	

CR: 一致性比率, Consistency Ratio

### 2.2.3 评判标准

按照河流生态系统健康状态及演变规律,结合研究区现有情况并参考相关资料文献,采用直观分析与对比的区间分层方式,将河流生态系统健康程度由高至低依次划分为健康、亚健康、一般、较差与差 5 个评价等级。参见表 4。

表 4 北京市房山区河流生态系统健康等级标准

Table 4 Grade standard for the health of river ecosystem of Fangshan district in Beijing

健康程度 Health levels	等级 Grade	分值区间 Interval range	特征 Property
健康 Health	I	(0.8, 1]	河流健康水平高,适宜河流生态系统可持续发展
亚健康 Sub-health	II	(0.6, 0.8]	河流健康水平较高,适宜河流生态系统发展
一般 General	III	(0.5, 0.6]	河流健康水平一般,满足河流生态系统需求
较差 Bad	IV	(0.4, 0.5]	河流健康水平较差,勉强满足河流生态系统一般需求
差 Very bad	V	[0, 0.4]	河流健康水平差,无法满足河流生态系统基本需求

## 3 结果与讨论

### 3.1 北京市房山区河流生态系统健康现状综合分析

将计算或引用的现状值与对应的评价指标标准相对照,采用数值分析拟合的方式折算为现状评价分值(统一落入 0—1 区间内),并利用计算确定的指标权重,确定房山区河流生态系统健康评价结果。

由表 5 可知,现状下的房山区河流生态系统健康综合评价值  $I$  为 0.445,对照河流健康评价等级标准,其基本情况属于河流健康水平“较差”,勉强满足河流生态系统一般需求。其 4 项效应层的评价值( $I_{\text{生态效益功能}} = 0.162$ ;  $I_{\text{防洪效益功能}} = 0.121$ ;  $I_{\text{水环境功能}} = 0.110$ ;  $I_{\text{支持利用功能}} = 0.054$ )均小于 0.200“健康”状态下线值,  $I_{\text{生态效益功能}} \in (0.150, 0.200)$  介于“亚健康”状态,  $I_{\text{防洪效益功能}}$ 、 $I_{\text{水环境功能}} \in (0.100, 0.125)$  介于健康“较差”状态,而  $I_{\text{支持利用功能}} \in (0.000, 0.006)$  落至健康“差”状态,且支持利用功能在河流生态系统中可以近似忽略不计。表明房山区河流生态系统存在整体功能性偏弱,部分功能不完善,且其健康状况有朝更恶劣情况发展趋向,急需采取有效措施弥补或缓解河流生态系统整体恶化趋势。

结合图 3 可知,房山区河流的生态效益功能是最为突出的,其次关注于防洪效益功能与水环境功能,而对于支持利用功能目前重要性欠缺,即  $I_{\text{生态效益功能}} = 1.33(I_{\text{防洪效益功能}} \approx I_{\text{水环境功能}}) = 1.33 \times 2.08(I_{\text{支持利用功能}})$ ; 而对比四者权重赋值:  $\varphi_{\text{防洪效益功能}} = 1.86(\varphi_{\text{生态效益功能}} = \varphi_{\text{水环境功能}}) = 1.86 \times 1.86(\varphi_{\text{支持利用功能}})$ 。河流的生态效益功能与防洪效益功能间在房山区内存在明显的理论值与实际值间的偏差,而支持利用功能与水环境功能之间基本符合预期。究其原因,房山区全境的防洪工程措施目前正处于大规模建设与改造阶段,短期内强烈的人工河流构筑方式对河流的生态效益与防洪效益功能波动影响较大,而对于支持利用与水环境功能的变化影响具有滞后性。

表 5 北京市房山区河流生态系统健康综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation value for the health of river ecosystem of Fangshan district in Beijing

指标层 Index layers	现状值 Current value	现状评价分值 Conversion value	指标权重 Index weight	评价价值 Evaluation value
水质综合达标率 Comprehensive standard ratio of water quality/%	27.9	0.070	0.052	0.004
水源地达标率 Standard ratio of water source/%	100.0	1.000	0.096	0.096
水体自净率 Ratio of water self-purification/%	40.1	0.244	0.028	0.007
河流断流率 Ratio of river disconnection/%	36.1	0.056	0.052	0.003
防洪河道措施完善率 Ratio of flood control measures/%	29.7	0.057	0.228	0.013
河流调蓄率 Ratio of river regulation/%	75.8	1.000	0.069	0.069
河岸缓冲带结构稳定性 Structural stability of riparian buffer/%	49.9	0.314	0.126	0.039
生态环境用水率 Water consumption ratio of eco-environment/%	14.1	0.495	0.031	0.015
珍稀水生生物分布状态 Distribution of rare aquatic life	健康	1.000	0.056	0.056
鱼类种类变化率 Change ratio of fish species/%	8.2	0.872	0.018	0.016
万元地区生产总值水耗 Water consumption of ten thousand yuan/m <sup>3</sup>	52	0.372	0.031	0.012
河岸缓冲带植被覆盖率 Vegetation coverage of riparian buffer/%	80.2	0.683	0.091	0.062
人均用水量 Per capita water consumption/m <sup>3</sup>	275.8	0.084	0.034	0.003
污水处理率 Wastewater treatment ratio/%	78.2	0.582	0.057	0.033
通航保证率 Navigation security ratio/%	0	0.000	0.012	0.000
水资源费征收率 Charge ratio for water resources/%	92.3	0.896	0.020	0.018
综合评价价值 Comprehensive evaluation value			1.000	0.445

3.2 组内指标分析

3.2.1 水环境功能

同前所述,水环境功能中除河流的水源地达标率指标整体“健康”外,水质综合达标率,水体自净率和河流断流率三项均处于“差”等级,对应于样点中水环境功能健康状态为“较差”与“差”占比均为 35.5%,而健康状态在“亚健康”及以上比例仅 9.7%(图 5),这主要由于山区水库坑塘建设工程均位于各河流干流或汇水区域上游区域,基本截断蓄存河流补给的洁净地下水与坡面汇水,同时山区水源地附近传统矿业已全部关停,农牧业发展受到严格管理,为水源地水体涵养、水质提升优化提供的便利。而对应于水源地下游河流由于被人为切断自然径流补给以及受制于高蒸散发的气候因素,下游河流多数仅能维持 10cm 及以下的自然生态基流,部分支流出现时序不等的季节性或长期断流(图 4)。

山区河流除西南部河流具有长期稳定基流外,其余山区河流沟道多数由于无水断流而无法发挥水体自净能力,而平原河流大部分水质综合达标率与水体自净率均极低,尤其是经过城镇与村镇紧密包围的下游河流极为严重。研究与监测表明,污染严重河流中的氮磷主要源自于村镇生活污水与持续天量的城镇回灌 V 类再生水,河流中自然径流与再生水间极不协调的比例,远远超出河流自净能力上限,同时河流横向的拓宽、纵向坡降的降低以及河流下垫面硬化等水利干预措施极大降低原有水动力条件,富营养化趋势已在部分河段出现,严重损害河流生态系统健康。

3.2.2 防洪效益功能

多数自然山区河沟具有短期调蓄能力薄、汛期过境流量急、抵御山洪能力弱等特点,而平原河流具有丰枯期没水区域变化大,泥沙沉积程度高,防洪标段不统一等特性。衡量河流防洪能力是河流健康评价应用中最

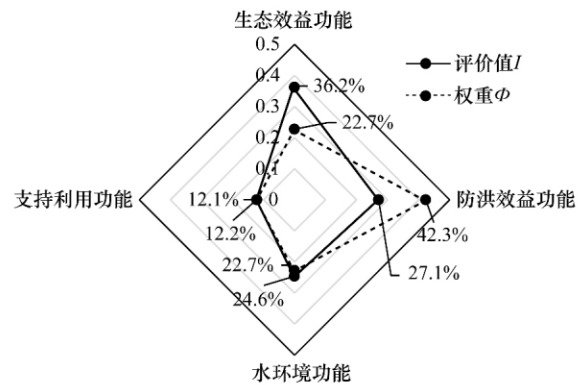


图 3 各效应层权重占比

Fig.3 Weight ratios of each effect layer



为关键的一类标准。目前, 河流调蓄率指标达到“健康”程度, 而防洪河道措施完善率与河岸缓冲带结构稳定性均处于健康“一般”与“较差”程度。调查样点中防洪效益功能健康状态为“健康”与“亚健康”占比分别为 25.8% 与 32.2%, 而健康状态为“较差”比例为 29% (图 5)。从空间分布来看, 山区河流人为侵占或挪用河道用地的隐患集中于缓冲区脆弱区域; 而平原河流则多数处于人工修整治理与扩建阶段, 防洪措施的不完善与河岸缓冲带结构的不稳定 (图 4), 在未来 1—2 年内存在偶发性特大暴雨引起的区域洪水安全事故风险, 河流生态环境健康存在下降可能。

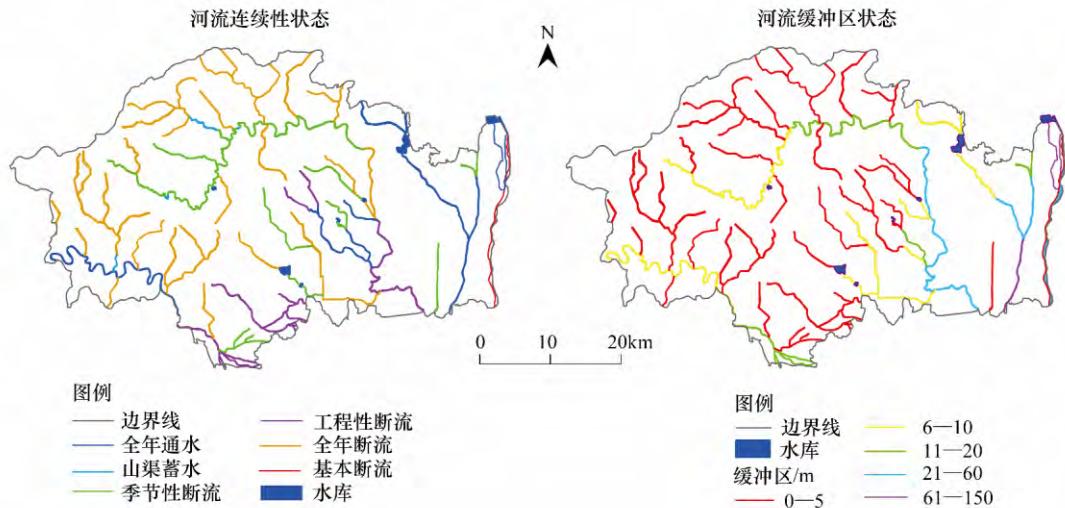


图 4 北京市房山区河流连续性与缓冲区状态

Fig.4 Continuity and buffer state of rivers of Fangshan district in Beijing

### 3.2.3 生态效益功能

如上所述, 生态效益功能由河岸缓冲带植被覆盖率、珍稀水生生物分布状态、鱼类种类变化率等 5 项指标决定, 其中珍稀水生生物分布状态与鱼类种类变化率指标处于“健康”状态, 河岸缓冲带植被覆盖率指标处于“亚健康”状态, 而生态环境用水率与万元地区生产总值水耗则分别处于健康状况“较差”与“差”状态。调查样点中 41.9% 为“亚健康”状态, 29.0% 为“一般”健康状态 (图 5)。

从空间分布分析, 房山区珍稀水生生物主体分布在西南山区主河道, 该河流区域已划为市级野生水生动物保护区, 传统农业与工矿企业已被民俗生态旅游业取代, 因而水生态与水质条件优良, 多鳞铲颌鱼、大鲵、东方薄鳅等一批珍稀水生生物得以生存; 同时通过实地调查, 人工育苗投放与部分人为放生行为的存在, 除断流河流区域与部分季节性断流河段, 普通鱼类 (如: 黄嘎鱼、子陵吻虾虎、麦穗鱼等) 基本全流域分布, 间接说明房山区有水河流水生生物与水生食物链较为完整。目前房山区河流处于综合治理阶段, 平原区河流缓冲带植被多为新种草皮或新栽苗木, 部分区域尚未完工, 而山区多数河流由于常年缺水, 河岸缓冲带区域植被难以存活, 其植被覆盖率在短期内难以提升。

同时, 房山区水资源略有下降的趋势难以维持区域植被覆盖的持续增加, 生态环境用水占比的飙升侧面反映地表河流对陆域以及地下水补给功能的降低与削弱。同时, 平原区粗放型农业与高耗水型建材能源生产模式未得到明显改观, 经济附加值较弱的工农业基础加重水资源消耗的生态成本, 限制了河流生态环境健康进一步改善。

### 3.2.4 支持利用功能

河流的支持利用功能中水资源费征收率指标状态“健康”, 污水处理率指标状态“一般”, 而人均用水量与通航保证率指标健康状态“差”, 调查样点中 41.9% 为“较差”状态, 48.4% 为“差”健康状态 (图 5)。究其原因, 是房山区存在区域性地表水资源总体匮乏问题, 且难以自我消化与解决, 人均用水量中地表河流水资源贡献额占比较低, 基本可以忽略, 同时主干河流 2—3 km 间距建有跌水坝水利构建, 通航能力基本丧失, 并长期难



有改观。污水处理目前主要以污水处理厂为主, 河流生态湿地所承担的污水净化功能在未来 510 年将逐步发挥并提升其功能, 污水处理率指标有从“一般”向“亚健康”提高的空间, 支持利用功能的河流生态环境健康需要长期时间累计才会逐步转好。

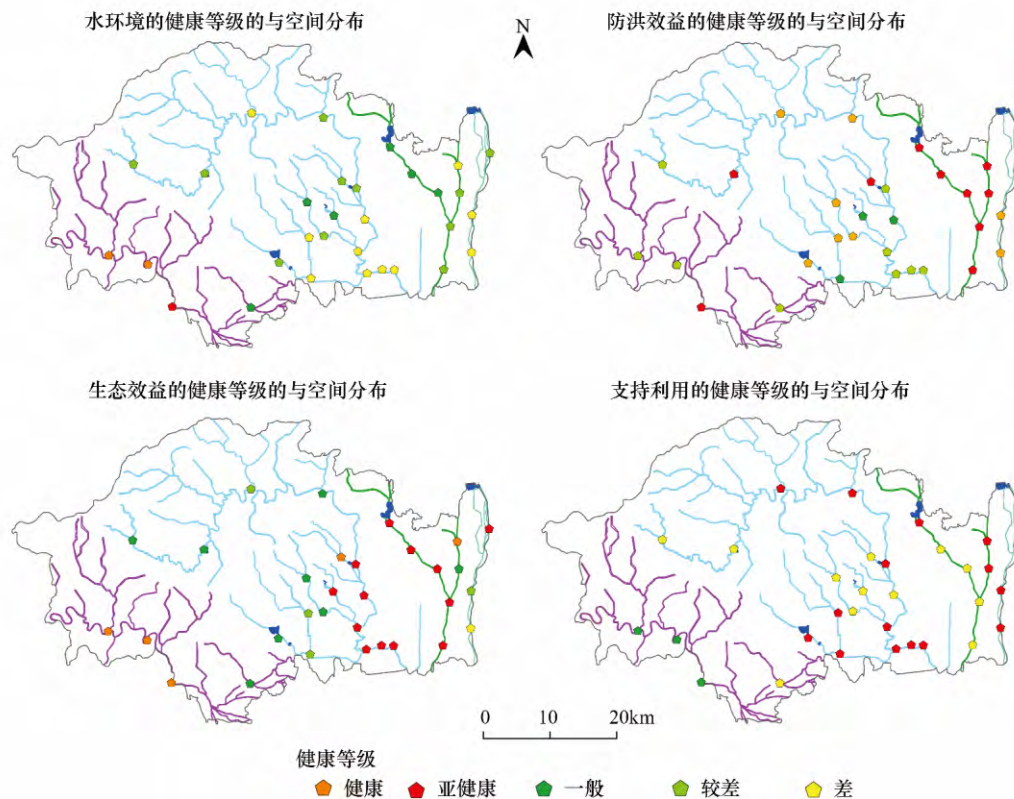


图 5 各效应层的健康等级与空间分布

Fig.5 Health level and spatial distribution of each effect layer

### 3.3 水系河流生态系统健康评价

房山区 4 条主干河流的河流生态系统健康程度差异较大(图 6), 拒马河整体保持“健康”至“亚健康”的状态, 其中 31.3% 样点达到“健康”水平; 小清河介于“亚健康”至“一般”状态, “亚健康”样点数超过 60%; 而大石河与永定河处于“较差”与“差”的状态, 分别有 45%、50% 的样点健康状态低于“一般”健康水平。分析缘由, 结合图 4 与图 6, 河流生态系统健康必须具备生态基流的前提, 水库区域性截留与工程性管控措施极大地削弱河流水文的连续性与稳定性, 河流间断性的断流严重降低河流的水环境功能, 而河流长期性的断流直接削弱河流的支持利用功能。因此, 恢复河流生态基流是提高房山区河流生态系统健康的前提与关键因素。

大石河水系是区内最大水系, 山区段因水源不足与人工截留呈现季节性断流, 河流生态系统健康程度“差”; 而平原段承接再生水, 水质风险突出, 水环境功能的受损, 其河流生态系统健康程度“较差”。

拒马河水系作为过境河流, 山区段已纳入自然保护区, 水质优良, 水量丰沛, 河流生态系统达到“健康”程度; 相对平原段因水利工程建设干扰, 河流人为干涸, 平原段河流生态系统健康程度“较差”。

小清水系主体承接再生水, 作为平原区非灌溉型景观排涝降污河流, 水量稳定, 但水质极差, 其河流生态系统健康程度虽然整体介于“亚健康”与“一般”水平, 但其生态潜在风险十分突出。

永定河水系受大宁水库管控影响, 常年断流, 河道处于荒废阶段, 其河流生态系统整体健康状况“差”, 但其防洪效益功能保持长期“健康”状态。本研究以为, 在面临潜在洪涝灾害风险的房山区, 永定河可承担的区域性防洪排涝功能已超过其整体功能, 对其河流生态系统健康状况评价不适合综合评价方式。

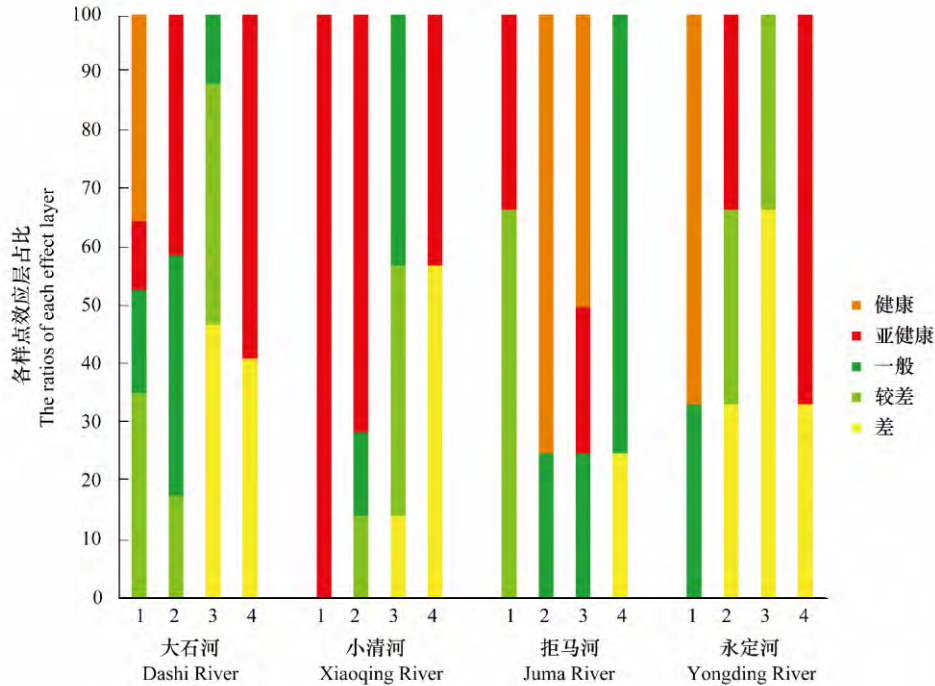


图 6 北京市房山区 4 水系河流生态系统健康对比

Fig.6 Health comparison of river ecosystem of Fangshan district in Beijing

1: 防洪效益功能 Function of flood control benefit; 2: 生态效益功能 Function of ecological benefit; 3: 水环境功能 Function of water environment; 4: 支持利用功能 Function of supporting and utilizing

4 结论

(1) 房山区河流生态系统健康评价体系包括河流的水环境功能、防洪效益功能、生态效益功能和支持利用功能 4 方面, 涵盖 16 个具体指标; 其权重大小排序为防洪效益功能>生态效益功能=水环境功能>支持利用功能。

(2) 在房山区 31 个样点中, 达到“健康与亚健康”状态的防洪效益功能和生态效益功能的样点比例分别为 58.0%与 41.9%, 而水环境功能与支持利用功能中“较差与差”状态样点比例为 71.0%与 41.9%, 房山区河流生态系统健康水平整体“较差”, 勉强满足河流生态系统一般需求。

(3) 房山区境内拒马河与小清河的河流连续性为 43.4%、84.5%, 远高于 20.1%的大石河与 0.0 的永定河, 相对于河流生态系统健康状态, 前两者“健康与亚健康”状态比例超过 60%, 后两者相对比例仅 35%。

(4) 针对房山区内大石河与永定河河流生态系统健康状况, 适当释放河流上游库区截留水量、调配区外清洁水体、提升河流水系连通性以及尽可能恢复或维持河流必须的生态基流, 是提高相应河流水环境功能和支持利用功能与恢复房山区河流生态系统健康的前提与基础。

参考文献(References):

[ 1 ] 唐涛, 蔡庆华, 刘健康. 河流生态系统健康及其评价. 应用生态学报, 2002, 13( 9 ): 1191-1194.

[ 2 ] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 苗鸿. 水生态服务功能分析及其间接价值评价. 生态学报, 2004, 24( 10 ): 2091-2099.

[ 3 ] Karr J R. Defining and measuring river health. Freshwater Biology, 1999, 41( 2 ): 221-234.

[ 4 ] Pan G B, Xu Y P, Yu Z H, Song S, Zhang Y. Analysis of river health variation under the background of urbanization based on entropy weight and matter-element model: a case study in Huzhou City in the Yangtze River Delta, China. Environmental Research, 2015, 139: 31-35.

[ 5 ] 杨朝晖, 王浩, 褚俊英, 周祖昊. 海河流域生态系统价值评估与空间特征. 水利学报, 2010, 41( 9 ): 1121-1127.

[ 6 ] 张晶, 董哲仁, 孙东亚, 王俊娜. 基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系. 水利学报, 2010, 41( 8 ): 883-892.

- [7] 熊文,黄思平,杨轩. 河流生态系统健康评价关键指标研究. 人民长江, 2010, 41(12): 7-12.
- [8] Townsend C R, Riley R H. Assessment of river health: accounting for perturbation pathways in physical and ecological space. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 393-405.
- [9] Young R G, Collier K J. Contrasting responses to catchment modification among a range of functional and structural indicators of river ecosystem health. *Freshwater Biology*, 2009, 54(10): 2155-2170.
- [10] Pinto U, Maheshwari B L. River health assessment in peri-urban landscapes: an application of multivariate analysis to identify the key variables. *Water Research*, 2011, 45(13): 3915-3924.
- [11] Bhutiani R, Khanna, D R, Kulkarni, D B, Ruhela M. Assessment of Ganga River ecosystem at Haridwar, Uttarakhand, India with reference to water quality indices. *Applied Water Science*, 2016, 6(2): 107-113.
- [12] Solheim A L, Rekolainen S, Moe S J, Carvalho L, Phillips G, Ptacnik R, Penning W E, Toth L G, O'Toole C, Schartau A K L, Hesthagen T. Ecological threshold responses in European lakes and their applicability for the Water Framework Directive (WFD) implementation: synthesis of lakes results from the REBECCA project. *Aquatic Ecology*, 2008, 42(2): 317-334.
- [13] 黄艺,文航,蔡佳亮. 基于环境管理的河流健康评价体系的研究进展. 生态环境学报, 2010, 19(4): 967-973.
- [14] Ladson A R, White L J, Doolan J A, Finlayson B L, Hart B T, Lake P S, Tilleard J W. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 453-468.
- [15] Ecot J R, Dice J L, Celeste L A A, Podico R R, Tayong L M P, Abdon S A P, Olegario S P, Sabid J, Ferrer C J, Bigsang R T, Abalunan A J F, Jumawan J H. Riparian zone analysis using riparian, channel and environmental (RCE) inventory and water testing analysis in Lun Padidu river, Lun Padidu, Malapatan, Sarangani Province, Philippines. *Advances in Environmental Sciences*, 2014, 6(3): 276-283.
- [16] 郝利霞,孙然好,陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价. 环境科学, 2014, 35(10): 3692-3701.
- [17] 李瑶瑶,于鲁冀,吕晓燕,王莉,徐艳红,范鹏宇. 淮河流域(河南段)河流生态系统健康评价及分类修复模式. 环境科学与技术, 2016, 39(7): 185-192.
- [18] 朱卫红,曹光兰,李莹,徐万玲,史敏,秦雷. 图们江流域河流生态系统健康评价. 生态学报, 2014, 34(14): 3969-3977.
- [19] 高占国,朱坚,翁燕波,张彪,诸云强,杜宇峰,潘双叶,赵洋甬. 多尺度生态系统健康综合评价——以宁波市为例. 生态学报, 2010, 30(7): 1706-1717.
- [20] 惠秀娟,杨涛,李法云,胡成,王彤,徐成斌,侯伟,马放. 辽宁省辽河水生态系统健康评价. 应用生态学报, 2011, 22(1): 181-188.
- [21] 蔡守华,胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法. 水利水电科技进展, 2008, 28(1): 23-27.
- [22] 王勤花,尉永平,张志强,唐霞. 干旱半干旱地区河流健康评价指标研究分析. 生态科学, 2015, 34(6): 56-63.
- [23] 蒋卫国,李京,李加洪,谢志仁,王文杰. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价. 生态学报, 2005, 25(3): 408-414.
- [24] 付爱红,陈亚宁,李卫红. 基于层次分析法的塔里木河流域生态系统健康评价. 资源科学, 2009, 31(9): 1535-1544.
- [25] 崔东文. RBF与GRNN神经网络模型在河流健康评价中的应用——以文山州区域中小河流健康评价为例. 中国农村水利水电, 2012, (3): 56-61.
- [26] Xu S G, Liu Y Y. Assessment for river health based on variable fuzzy set theory. *Water Resources*, 2014, 41(2): 218-224.
- [27] 张晶,董哲仁,孙东亚,李云生. 河流健康全指标体系的模糊数学评价方法. 水利水电技术, 2010, 41(12): 16-21.