DOI:10.15928/j.1674-3075.202201050005

缺水地区城市河流健康评价研究
——以太原市区9条河流为例

夏龙超,袁 进,董 静,孙 琦,周 媛

(太原理工大学环境科学与工程学院 环保产业创新研究院,山西 晋中 030600)

摘要:构建缺水地区城市河流评价指标体系,丰富缺水城市水系管理、河流生态修复的理论基础。以太原市9条城市河流为研究对象,从水文水质、河流形态、生物、社会经济等4方面选取13个指标构建适用于缺水城市的河流健康指标体系,采用层次分析法和集对分析法进行评价。结果表明:9条河流均在过去5年里经历过大规模改造,各河流健康状态较为接近,其中,北排洪渠处于健康状态,风峪沙河处于不健康状态,其余7条河流处于亚健康状态;各河社会经济方面均处于健康状态,生物状况、河流形态多处于亚健康状态,水文水质多处于亚健康和不健康状态。评价结果从理论上揭示了太原9条河流存在的问题,水文状况较差是目前的主要问题,与实际情况较为一致,证明本研究所建立的评价模型适用于缺水地区城市河流健康评价。当前在河道尺度上开展生态补水是改善河流健康状态的主要手段和可行措施,而实施水源涵养、水资源优化配置、河道近自然恢复、海绵城市建设等流域综合治理修复是维持河流生态健康的治本之策。

关键词:河流健康评价;城市河流;缺水地区;集对分析;太原九河

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2023)06-0027-09

文明滨水而生,城市依水而兴,河流为城市发展提供了供水、交通、景观等多种生态服务和经济服务功能,在人类社会发展中发挥着重要作用(赵彦伟和杨志峰,2005)。然而伴随着城市化进程,人类社会对河流生态系统服务需求不断增加,城市河流健康面临多方面的威胁:水资源开发量过大、水体污染严重、河流渠道化、河岸硬质化、生态系统全面退化等(Shan et al,2021)。水环境问题的日益凸显,引起政府和公众的广泛关注,水环境治理从理论、政策、实践等多方面展开,河流健康评价作为河流管理中的重要内容以及河流生态恢复的重要评判依据,已经成为国内相关研究的热点(鲍艳磊等,2021;朱惇等,2019)。

河流健康评价方法目前主要分为两种,一是以河流无脊椎动物预测与分类系统(River Invertebrate Prediction and Classification System)和澳大利亚河流评估系统(The Australian River Assessment System)为代表的预测模型法;另一种是以生物完整性指数(Index of Biological Integrity),河岸、河道与环境指标体系(Riparian, Channel, Environment)和溪流状况指数(Index of Stream Condition)等为基础的综合指标法(Zhao et al,2019)。其中,综合指标法在国内研究较多,且更多地应用于城市河流健康评价中(赵彦伟和杨志峰,2005;罗坤,2017;曾鹏等,2020),研究内容集中于评价方法和指标体系。常用的河流健康评价方法有模糊综合评价法(赵彦伟和杨志峰,2005)、集对分析法(Zhao et al,2019)、层次分析法(方晓等,2021)、物元可拓模型(Shan et al,2021;桂玉茹等,2021)等。其中集对分析法近年来得到稳定发展,在环境领域内得到广泛应用(Yang et al,2011;Yang et al,2015;Xiang et al,2021a),且环境评价是集对分析最主要的发展方向(Xiang et al,2021b)。在长期的实践和总结国内外经验中,国内河流健康评价指标体系趋向于涵盖水文水资源、物理形态、水质、水生生物及社会服务功能5方面内容(彭文启,2018),其中整合社会服务功能方面指标是我国河流健康评价的独到之处,是我国城市河流特点的体现(Anwar et al,2020)。

目前城市河流健康评价相关研究多集中于水资源丰沛地区,而对缺水城市的河流研究相对较少。缺水地区的城市河流大多流域规模小、季节性明显、水环境容量小,更易受城市发展的影响(桂玉茹等,

收稿日期:2022-01-05 **修回日期:**2023-10-20

基金项目:国家重点研发计划项目课题(2019YFC0408602)。

作者简介:夏龙超,男,1997年生,硕士研究生,研究方向为城市河流生态修复与评价。E-mail:xialongchao0716 @link.tyut.edu.cn

通信作者:袁进,男,1967年生,研究员,博导,主要科研方向为河流生态环境修复、生态环境用水安全、固体废物协同处置。E-mail:yuanjin@tyut.edu.cn

2021)，加之水资源紧张的区域背景，这类河流在为城市发展提供生态、经济服务的同时出现了河道流量少甚至长期断流，高度依赖人工补给，河流水生生态退化、消失(姚璐等，2021)等一系列不同于其他地区城市河流的问题。针对缺水地区城市河流，本文以太原市市区范围内的9条河流为研究对象，立足实际，创新评价指标选取，选择水文综合得分、河道植物多样性指数、优势植物类型，城区沿河快速路覆盖率等指标构建缺水地区城市河流评价指标体系，利用层次分析法和集对分析法进行河流健康评价，并给出分析和建议，以期为缺水地区城市河流管理、生态修复提供科学依据。

1 研究方法

1.1 区域概况

利用太原地区GDEMV2 30 m分辨率数字高程数据(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台<http://www.gscloud.cn>)、河流实际位置数据，借助SWAT软件中Watershed Delineator模块，计算出太原九河各河网分布及流域范围(图1)。以计算出的各流域范围为研究区域。

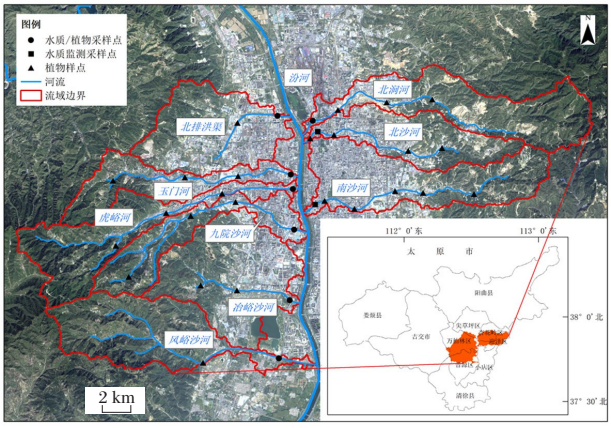

图1 研究区域及调查地点位置

Fig.1 Schematic map of the study area and investigation sites

北排洪渠、玉门河、虎峪河、九院沙河、冶峪沙河、风峪沙河、北涧河、北沙河、南沙河(简称太原九河)均为太原市六城区内的汾河一级支流，位于37°44′4"~37° 56′3" N，112° 17′59"~112° 45′54" E，流域面积32.37~63.86 km²，长度5.4~26 km。北排洪渠、玉门河、虎峪河、九院沙河、冶峪沙河、风峪沙河发源于太原西山，北涧河、北沙河、南沙河发源于太原东山，流域区域大部分位于城市之中，全部于太原市六城区内汇入汾河。研究区属暖温带大陆性季风气候，区内多年平均降水量467 mm(1956-2000年)，全年约70%的降雨量集中在6-9月(王倩等，2023)，气候年际变化大，干旱灾害频发。随着城市发展，9条河流均由于排污、基础设施不完善等原因出现水体黑臭情况(徐明德等，2010)。2018年太原市完成九河综合整治工程，黑臭水体、防洪、交通等问题得到一定程度解决。

1.2 数据来源

评价数据来源于水文水质监测、植物群落调查、河流形态调查等实地调查工作、政府公开的数据统计、政策文件资料以及其他学者研究成果，具体数据来源见表1。于2021年7-9月对太原九河进行实地调查。水文水质监测和植物群落生态调查点位如图1，水质监测使用YSI便携式水质测定仪结合实验室检测分析进行；参照刘璐等(2020)和方精云等(2009)的方法进行植物群落调查；河流形态调查包括河岸类型、河床类型、河流连通性的调查，河床类型的调查结合设定的植物样点进行，河岸类型与河流连通性沿河进行调查。

1.3 评价模型

1.3.1 指标体系构建 指标体系的构建应因地制宜、因时制宜(彭勃等，2014)，本研究在借鉴前人研究成果的基础上，结合太原市九河实际情况从水文水质、生物、河流形态、社会经济4方面选取13个评价指标，构建评价指标体系(表1)。

水文方面，太原九河缺乏水文监测，且河道普遍缺水，大部分河段仅在雨季存在较浅水流，进行流速、流量监测较为困难。在借鉴使用其他水文要素(如水面率、淹没面积等)量化方法(方晓等，2021；桂玉茹等，2021)的基础上，结合现场监测条件，结合水面占比、流速状态对水文状况进行综合评价，水文综合得分赋分规则见表2。水质方面，水质综合指数可反映水体在水质标准下总体的污染水平，避免了单项水质指标数据的冗余，本文选取水质综合指数作为水质评价指标。

生物方面，对于本研究区内太原九河，生态基流难以保持、非雨季多呈干涸，水生生物缺失的现状，传统的鱼类、底栖动物、浮游动物、浮游植物的研究方法显然不适用，而各河道内植物群落趋于稳定，故选用河道内植物相关指标进行健康评价。Shannon-wiener多样性指数是群落调查中常用的α多样性指数，可反映群落内物种的丰富度和均匀度(方精云等，2009)，故选用河道内植物Shannon-Wiener多样性指数来评价河道植物群落多样性。此外，河道植物的生活型也是反映河流植物群落是否健康的重要方面，故选用河道植物优势种类型得分(曾鹏等，2020)作为生物评价指标，河道优势植被类型评价赋分标准见表2。

表1　河流健康评价指标体系及计算方法

Tab.1　River health assessment index system and calculations

准则层（权重w_f）	指标层	计算方法	权重（w_i）	数据来源	方法参考文献
水文水质（0.351）	水文综合得分	水文综合得分的平均值	0.281*	水文水质监测	/
	水质综合指数	$P=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{S_i}$	0.070*	水文水质监测中总磷、氨氮、溶解氧、化学需氧量数据	桂玉茹等，2021
河流形态（0.109）	河床底质	各调查点异质性和稳定性的平均值	0.036	现场调查	陆小宁，2020
	河岸类型	$B=\frac{\sum_{i=1}^{6}B_i\times L_i}{L}$	0.036	现场调查	/
	河流蜿蜒度	河流本身长度与源头游入汾口两点直线距离的比值	0.015	由DEM数据提取的水系	徐彩彩等，2015
	纵向连通性	每100 km影响河流连通性的建筑物或设施数量	0.022	现场调查	河湖健康评价指南（试行）
生物（0.189）	河道植物多样性	$H'=-\sum_{i=0}^{S}P_i\ln P_i$	0.047	现场调查	刘璐等，2020；方精云等，2009
	河道优势植物类型	各调查点河道优势植物类型得分的平均值	0.142	现场调查	/
社会经济（0.351）	不透水地面率	不透水地面面积占区域总面积的百分比	0.036	Gong et al，2019	/
	水资源开发利用率得分	$-625w^2+1000w-300$，120%≥w≥40%	0.091	太原市水资源公报	米小婷，2021
	防洪工程达标率	达到防洪标准的堤防长度所占百分比	0.091	汾河流域景观规划	河湖健康评价指南（试行）
	城区沿河快速路覆盖率	以路代堤的河段中快速路河段长度占比	0.036	卫星影像结合实地调查	/
	万元GDP用水	/	0.098	太原市水资源公报	/

注：P为水质综合指数，C_j为第单项指标i的监测时间段内的平均浓度值，S_i为单项指标i评价标准值，取值参见参照地表水环境质量评价标准（GB3838-2002）。B为河岸类型评价总得分，B_i为河岸类型评价得分，L_i为评价河段对应长度，L为总河长。H'为植物多样性指数，取河流内采样点Shannon-Wiener多样性指数的平均值。S为样方内物种总数；P_i为第i个物种占总数的比例。*风峪沙河由于无水质数据，计算时水文数据权重为0.351。w为水资源利用率，水资源利用率大于120%或低于40%为0分。

Note: P is the comprehensive water quality index, C_j is the average concentration value in the monitoring period of the first single indicator i, and S_i is the evaluation standard value of the single indicator i, for which refers to the evaluation standard of surface water environmental quality (GB3838−2002). B is the total score of river bank type evaluation, B_i is the score of river bank type evaluation, L_i is the corresponding length of the evaluated river section, and L is the total river length. H' is an index reflecting the diversity of river plants, and the average value of Shannon Wiener diversity index of sampling points in the river is taken. S is the total species number. P_i is the important value at the i-th sampling point of the river. * There is no water quality data in Fengyu Shahe River, and the weight of hydrological data is 0.351 during calculation. w is the water resource utilization rate, and when the water resource utilization rate is greater than 120% or less than 40%, the score is 0.

表2　部分评价指标赋分标准

Tab.2　Scoring criteria for assessment indices

赋分	0	1	2	3	4	5	6
水文综合得分	干涸或水面覆盖<10%	水体静置、流动速度很小或存在较大水体斑块，且水面覆盖≥10%	水体有明显流动，且水面覆盖≥10%	水体静置、流动速度很小或存在较大水体斑块，且水面覆盖≥30%	水体有明显流动，且水面覆盖≥30%	水体静置、流动速度很小，且水面覆盖≥60%	水体有明显流动，且水面覆盖≥60%
河道优势植被类型	植被稀疏，基本无覆盖	只有陆生草本植物	陆生植物为主，优势植被类型为草本植物	陆生植物为主，优势植被类型包含灌木、草本两种类型	水生植物为主，优势种为单一植物	水生植物为主，优势种包含多种水生植物	/
河岸类型（张宇航，2017）	暗渠/管道	矩形断面，直立式钢筋混凝土护岸	矩形或梯形断面，浆砌石块护岸	复式断面，直立式钢筋混凝土或浆砌石护岸	自然土质/堆石岸坡	石笼/生态凝土	/

随着城市化进展，城市河流形态发生巨大的变化，河道空间被挤占、河道渠化成为城市河流最直观的问题之一，故本文从河道尺度上选取河床底质和河岸类型来反映河道微观形态，从流域尺度上选择河流蜿蜒度和纵向连通度来反映河流的宏观形态。

社会经济的发展离不开河流为城市提供的服务功能，社会经济的发展也深刻影响和改变了河流，社会经济指标从城市与河流相互作用的角度选取。一是考虑河流发挥的社会经济功能：由于区域缺水背景和河道缺水现状，太原九河不承担供水和航运功能，主要发挥行洪功能，选取防洪工程达标率作为评价行洪功能的指标；太原市九河改造的一个重要内容是以路代堤，修建沿河快速路，一方面形成了硬质堤防，压缩了河流空间，对河流生态性产生了较大的负面影响，但另一方面，以路代堤提高了土地利用效率，疏解了太原市的交通压力，连通城中心与东西山地区，带动区域环境改善、经济发展，故选用沿河快速路覆盖率来评价太原九河突出的交通服务功能。二是考虑城市发展导致的流域状况的改变：水资源开发利用率可以反映流域水资源利用程度，评价区域水资源紧张情况；万元GDP用水来评价流域水资源利用合理程度，反映地区工业用水水平；不透水地面率能够较好的反映出城市建设发展程度（罗坤，2017），相较于其他城市发展指标，不透水地面率更加直观，且易于通过遥感手段获取。

1.3.2 评价标准 本文将健康等级分为很健康、健康、亚健康、不健康、病态5个等级，结合相关研究成果、太原九河实际情况及专家意见，各等级取值范围如表3。

表3 评价标准

Tab.3 Grading criteria for the river health assessment system

指标层	很健康	健康	亚健康	不健康	病态	参考文献
水文综合得分	$6\geqslant x\geqslant 4.8$	$4.8>x\geqslant 3.6$	$3.6>x\geqslant 2.4$	$2.4>x\geqslant 1.2$	$1.2>x\geqslant 0$	
水质综合指数	$x<0.4$	$0.4\leqslant x<0.7$	$0.7\leqslant x<1$	$1\leqslant x<2$	$2\leqslant x$	王肖肖等，2012
河床底质	$5\geqslant x\geqslant 4.5$	$4.5>x\geqslant 4$	$4>x\geqslant 3$	$3>x\geqslant 2$	$2>x\geqslant 1$	陆小宁，2020
河岸类型	$5\geqslant x\geqslant 4$	$4>x\geqslant 3$	$3>x\geqslant 2$	$2>x\geqslant 1$	$1>x\geqslant 0$	
河流蜿蜒度	$x\geqslant 2$	$2>x\geqslant 1.6$	$1.6>x\geqslant 1.4$	$1.4>x\geqslant 1.2$	$1.2>x$	Wang et al，2019
纵向连通性	$0\leqslant x<5$	$5\leqslant x<10$	$10\leqslant x<15$	$15\leqslant x<20$	$20\leqslant x$	桂玉茹等，2021
河道植物多样性指数	$x\geqslant 3$	$3>x\geqslant 2$	$2>x\geqslant 1.5$	$1.5>x\geqslant 1$	$1>x$	牛智航，2020
河道优势植被类型	$5\geqslant x\geqslant 4$	$4>x\geqslant 3$	$3>x\geqslant 2$	$2>x\geqslant 1$	$1>x\geqslant 0$	
不透水地面率/%	$0\leqslant x<20$	$20\leqslant x<30$	$30\leqslant x<60$	$60\leqslant x<80$	$80\leqslant x\leqslant 100$	Zhao et al，2019
水资源开发利用率/%	$100\geqslant x\geqslant 80$	$80>x\geqslant 60$	$60>x\geqslant 40$	$40>x\geqslant 20$	$20>x\geqslant 0$	米小婷，2021
防洪工程达标率/%	$100\geqslant x\geqslant 95$	$95>x\geqslant 90$	$90>x\geqslant 85$	$85>x\geqslant 70$	$70>x$	河湖健康评价指南（试行）
城区沿河快速路覆盖率/%	$x\geqslant 90$	$90>x\geqslant 80$	$80>x\geqslant 60$	$60>x\geqslant 40$	$40>x$	
万元GDP用水/m^3	$x<100$	$100\leqslant x<150$	$150\leqslant x<300$	$300\leqslant x<400$	$400\leqslant x$	Zhao et al，2019

1.3.3 评价方法 层次分析法是一个被广泛运用的、成熟的权重分配方法（桂玉茹等，2021），通过同一层次中不同指标的两两比较构造判断矩阵，求解出各指标的权重。首先按照指标体系层次关系设计专家打分表，邀请相关专家按1-9标度法填写咨询表，建立判断矩阵，计算采用特征向量法，求得最大特征根及其对应的特征向量，若经过一致性检验，该特征向量归一化后即为指标权重（曹明弟，2007）。

集对分析是由我国学者赵克勤提出的一种不确定性理论，以联系度表达式$\mu=a+b_i+c_j$刻画各种不确定性问题，使对不确定性的辩证认识转化为具体的数学表达，在处理不确定性问题上有着广泛应用（赵克勤和宣爱理，1996）。集对分析有着计算简单，结果可靠，处理不确定问题的能力强的优点（Xiang et al，2021b），而河流健康评价是一个多指标的不确定性问题，因此本文使用集对分析理论来构建河流健康评价方法（胡晓雪等，2008；Zhao et al，2019）。计算方法如下：

设$S=\{s_{ik}\}$（$k=1,2,3,4,5$）为河流健康评价指标的标准集，分别对应很健康、健康、亚健康、不健康、病态的标准值。标准值取值规则见式①（王文圣等，2009）。对于越大越优指标，其联系度函数计算方法如式②，对于越小越优指标，其联系度函数计算方法如式③。

$$S_{ik}=\begin{cases} s, s\leqslant x\text{或}x\leqslant s \\ \dfrac{s_1+s_2}{2}, s_1\geqslant x\geqslant s_2\text{或}s_1\geqslant x\geqslant s_2 \end{cases} \quad ①$$

$$\mu_i=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+0i_3+0j,\ x_i\geqslant s_{i1}\\ \dfrac{x_i+s_{i2}}{S_{i1}-s_{i2}}+\dfrac{s_{i1}+x_i}{S_{i1}-s_{i2}}i_1+0i_2+0i_3+0j,\ s_{i1}>x_i\geqslant s_{i2}\\ \dfrac{x_i-s_{i(n+1)}}{S_{in}-s_{i(n+1)}}i_{(n-1)}+\dfrac{s_{in}+x_i}{s_{in}-s_{i(n+1)}}i_n,\ s_{in}>x_i\geqslant s_{i(n+1)},\ 3\geqslant n\geqslant 2\\ 0+0i_1+0i_2+\dfrac{x_i-s_{i5}}{s_{i4}-s_{i5}}i_3+\dfrac{s_{i4}-x_i}{s_{i4}-s_{i5}}j,\ s_{i4}>x_i\geqslant s_{i5}\\ 0+0i_1+0i_2+0i_3+1j,s_{i5}>x_i\end{cases}\quad ②$$

$$\mu_i=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+0i_3+0j,\ x_i\leqslant s_{i1}\\ \dfrac{x_i-s_{i2}}{S_{i1}-s_{i2}}+\dfrac{s_{i1}-x_i}{S_{i1}-s_{i2}}i_1+0i_2+0i_3+0j,\ s_{i1}<x_i\leqslant s_{i2}\\ \dfrac{x_i-s_{i(n+1)}}{S_{in}-s_{i(n+1)}}i_{(n-1)}+\dfrac{s_{in}-x_i}{s_{in}-s_{i(n+1)}}i_n,\ s_{in}<x_i\leqslant s_{i(n+1)},\ 3\geqslant n\geqslant 2\\ 0+0i_1+0i_2+\dfrac{x_i-s_{i5}}{s_{i4}-s_{i5}}i_3+\dfrac{s_{i4}-x_i}{s_{i4}-s_{i5}}j,\ s_{i4}<x_i\leqslant s_{i5}\\ 0+0i_1+0i_2+0i_3+1j,\ s_{i5}<x_i\end{cases}\quad ③$$

准则层f的联系度μ_f计算公式如下：

$$\mu_f=\sum w_{i1}\mu_i \quad ④$$

式中：μ_i、w_{i1} 为准则层f对应的指标层指标联系度及其相对准则层的权重。河流的总联系度μ计算如下：

$$\mu=\sum w_f\mu_f=\sum_{i=1}^{13}w_i\mu_i=a+bi_1+ci_2+di_3+ej \quad ⑤$$

式中：w_f为准则层指标相对于总目标的权重；a~e为联系函数系数。

按照均分原则（i_1=0.5，i_2=0，i_3=-0.5，j=-1）赋值计算得到联系度；将区间[-1,1]五等分，得到(0.6,1]、(0.2,0.6]、(-0.2,0.2]、(-0.6,-0.2]、[-1,-0.6]分别对应于很健康、健康、亚健康、不健康、病态5种评价状态（胡晓雪等，2008）。

2 结果与分析

2.1 权重分布及特点

由层次分析法得到各层次指标权重见表1，准则层中水文水质、社会经济权重较大，均为0.351；指标层中，水文水质中的水文综合权重较大，为0.281。这在一定层度上体现了本文评价对象城市河流的问题和特点：缺水地区，生态基流难以保障是河流的突出问题；城市之中，防洪等社会经济服务功能相对重要。

2.2 太原九河健康评价

太原九河健康评价结果如表4。总体上各河健康程度差异不大，除北排洪渠处于健康状态、风峪沙河处于不健康状态外，其余各河均处于亚健康状态。各河准则层评价结果如图2。水文水质方面评价结果较差，其中，风峪沙河处于病态，南沙河、北沙河、虎峪河和冶峪沙河处于不健康状态，北涧河、玉门河和九院沙河处于亚健康状态，只有北排洪渠处于健康状态。

太原九河指标层评价结果见图3。水文水质方面包含水文综合指标和水质综合指数2项指标，其联系度评价结果如图3a，水文综合指标由于相对权重较大，评价结果同水文水质相似，除北排洪渠处于健康、玉门河处于亚健康、风峪沙河处于病态，其余各河均处于不健康状态；各河之间水质指标差异性较大，北涧河、九院沙河水质较好，评价结果为很健康，南沙河、北沙河、北排洪渠、玉门河则处于病态。多数河流处于不健康的水文综合指标评价结果，反映了区域缺水背景下太原九河河道缺水的现状，而水质综合指数的评价结果除了部分反映了河流水污染治理的工作成效之外，在本文研究背景下，也一定程度上反映了河道缺水的状况。2018年太原市九河综合整治工程采取管网雨污分流改造、关闭排污口等工程措施，沿河排污得到了有效治理，北涧河、九院沙河处于很健康状态也印证了这一点，但其余各河水质状况并不理想，可能由多原因共同导致，从河流自身的角度，水体流动性差，水环境容量小、易受外部因素扰动和底泥内源污染是水质不健康的可能诱因；从外部环境的角度，经过多年的城市建设和污染治理，太原市城区基本完成雨污分流改造，沿河基本无点源污染，因此可能原因是面源污染。结合实地调研情况，认为河流自身水文情况不够理想导致的流动性差、水环境容量小可能是太原九河不健康的主要原因。

表4 太原九河健康评价

Tab.4 Health assessment results of the nine rivers in Taiyuan city

河流名称	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*μ*	健康状态
南沙河	0.246	0.071	0.302	0.229	0.150	0.017	亚健康
北沙河	0.225	0.052	0.323	0.227	0.173	-0.035	亚健康
北涧河	0.304	0.064	0.155	0.381	0.096	0.049	亚健康
北排洪渠	0.349	0.335	0.082	0.061	0.174	0.312	健康
玉门河	0.246	0.085	0.386	0.131	0.151	0.072	亚健康
虎峪河	0.246	0.041	0.278	0.317	0.118	-0.010	亚健康
九院沙河	0.294	0.046	0.287	0.239	0.134	0.064	亚健康
冶峪沙河	0.224	0.139	0.299	0.232	0.106	0.072	亚健康
风峪沙河	0.282	0.040	0.043	0.098	0.537	-0.284	不健康

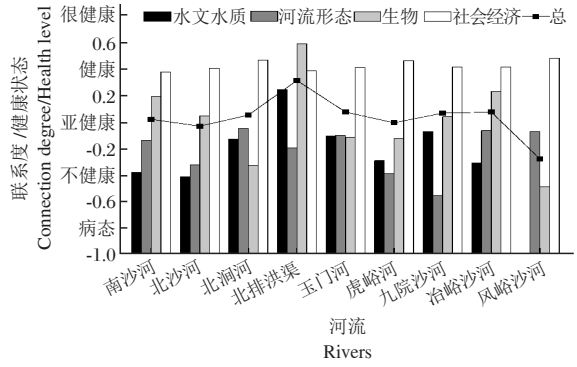

图2 太原九河准则层健康评价

Fig.2 Health assessment results and status at the level of the four principles for the nine rivers in Taiyuan city

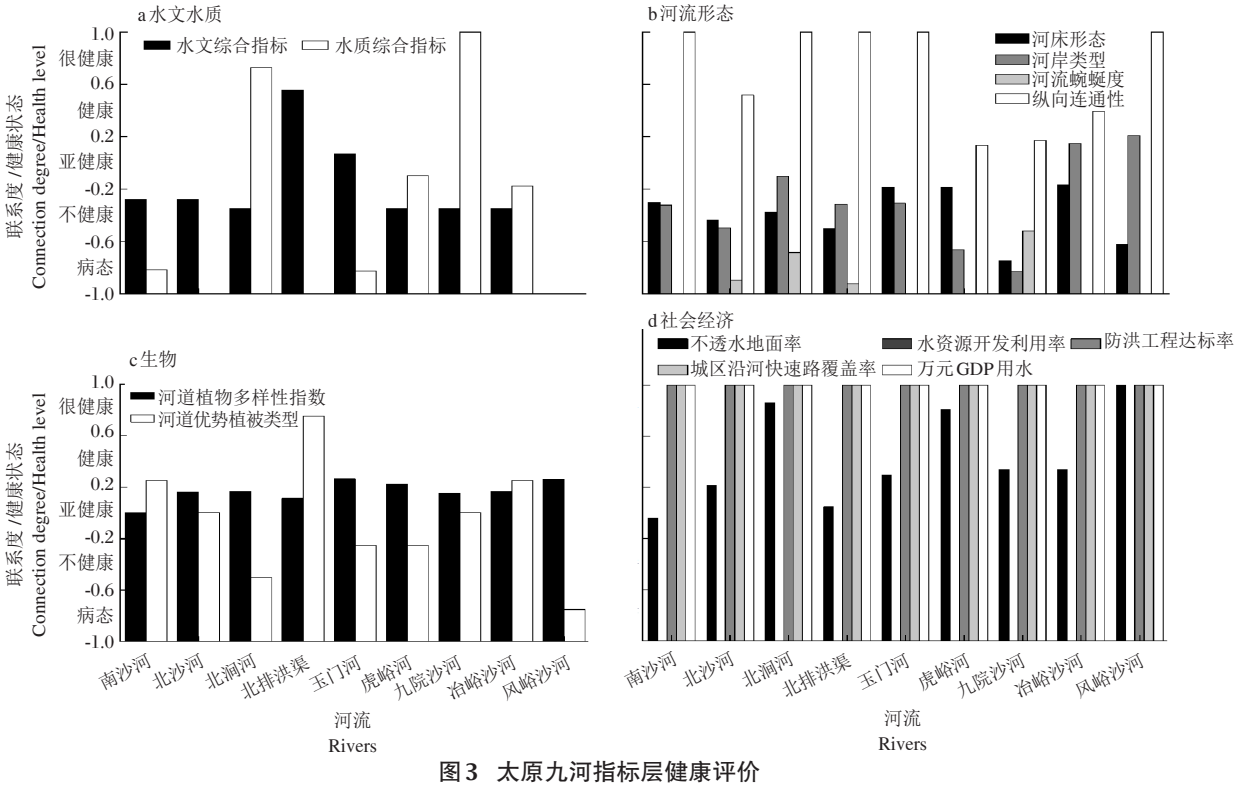

图3 太原九河指标层健康评价

Fig.3 Health assessment results at the index level of the nine rivers in Taiyuan city

河流形态方面除北沙河、虎峪河、九院沙河处于不健康状态外，其余各河差异不大（极差为0.146），均处于亚健康状态。具体指标（图3b）中纵向连通性评价结果较好，除虎峪河、九院沙河处于亚健康状态，其余各河均处于健康或很健康状态；河床底质、河岸类型、河流蜿蜒度3项指标则多处于不健康或病态。河流形态现状是城市河流随城市变迁长时期演化的结果，与城市发展的各个时期的社会经济需求、人们对城市与河流的关系的认知水平息息相关。

生物指标方面北排洪渠和冶峪沙河处于健康状态，南沙河、北沙河、玉门河、虎峪河和九院沙河处于亚健康状态，北涧河、风峪沙河处于不健康状态；各河Shannon-wiener多样性指数评价结果（图3c）差异很小，多处于亚健康水平，而河道优势植被类型评价结果（图3c）产生了较大的差异，涵盖了5种评价结果，其中北排洪渠评价结果最好，为很健康，风峪沙河评价结果最差，为病态。总体上太原九河河道植被以陆生草本植被为主，缺乏水生生物，原因可能来源于以下两点，一是河道缺水使得水生生物生境匮乏，二是近年大规模河流改造工程几乎重置了河道内生物群落，水生植物恢复除了需要水生生境还需要更长的时间（孔维博等，2021）。

得益于2018年完成的太原市河流综合整治工程，各河社会经济方面评价结果较好，均处于健康状态。其中（图3d）表征城市河流服务功能的防洪工程达标率、沿河快速路覆盖率各河均处于很健康状态，社会服务功能发挥良好。表征流域水资源利用的水资源开发利用率和万元GDP用水评价结果对立，前者处于病态、后者处于很健康，一方面体现了城市经济用水处于合理水平，另一方面印证了水资源紧张的区域背景和人口、经济密集的城市区域特点，揭示了社会经济发展同自然资源的矛盾。表征城市化水平的不透水地面率除南沙河、北排洪渠处于亚健康状态，其余各河均处于健康或很健康状态。

3 讨论

3.1 基于缺水地区实际情况的指标体系

我国地域辽阔，各河流所处的自然背景、社会经济背景都不尽相同，为此应因地制宜地制定河流健康评估体系（董哲仁，2005）。相对于他人相关研究（曾鹏等，2020；桂玉茹等，2021），本文在指标的选择上有一定的地域特点。太原九河缺少长期、全面的水文水质和生态监测，且太原九河现状使得相关指标较难通过监测手段获得，局限了相关指标的选择。为此，本文使用了简化水文指标，使其简单易行，且适合于太原九河这一类缺水地区城市河流的水文情况描述。生物指标则选用了适用于太原九河生物调查的植物相关指标。太原九河上游比降较大，下游城市段坡度较小，但经过以保障行洪等社会服务功能为目的的工程改造，加之太原降水集中、总体缺水的区域背景，河道内不易维持水面，非雨季基本呈干涸状态，造成了水生动物缺失的现状，使得传统上使用的底栖无脊椎动物、鱼类相关指标在本研究中有明显的不适用性。社会经济方面首次使用了城市快速路覆盖率作为评价指标，将以路代堤，看作河流为城市提供的交通服务功能。综上，本文在指标体系的建立上有一定创新，使指标体系更适合于研究对象的评价，但其同河流健康的关联程度仍需进一步探索。

3.2 河流健康问题分析及建议措施

从评价结果和实际调查来看，改善水文状况是提升九河健康状态的关键。北排洪渠是本次评价结果最好的河流，同其他河流不同的是，北排洪渠河道比降小，降雨过后滞留在河道的水在近汾段形成了较大的水面，而其他河流则多在降水过后水面迅速缩小、甚至干涸，这使得北排洪渠的水文状况好于其他河流，处于健康状态。相对稳定的水体为水生生物提供了生境基础，一定程度上促使北排洪渠生物方面处于健康状态。北排洪渠的现状为改善太原九河城市段水文现状提供了一种思路，采用适当的蓄水措施，使河道能够留住部分雨水用于维持自身生态，但结合水质现状，在蓄水的同时应注意水质维持。将这种思路拓展到流域尺度，即海绵城市思想（仇保兴，2015），调蓄雨洪、净化水质，利用好雨水资源供给补充河道生态用水。河流上游水源涵养作为改善河流水文的根本逐渐受到重视，上游水源涵养相关工程正在实施之中。生态补水是北方河流常见的生态修复措施，已有相关研究和实践（李志强等,2002），太原九河汇入的汾河就曾因生态流量不足、断流等问题采取过生态补水措施进行复流（栾清华等，2015），太原九河近年提出了相关生态补水计划，但由于多方面原因，目前并未实施。除了具体河流生态修复工程措施外，河湖长制、水资源保护、节水技术应用、用水结构调整等技术、政策措施则能直接在人类社会经济端调节城市河流所承受的压力，缓解区域水资源紧张的状态，对促进河流和区域水资源健康都有重要意义。综上，在中短期内，生态补水等河流具体工程措施能使河流水文状况改观，但从长期来看，涵养水源、海绵城市建设、完善水资源保护政策等流域、社会经济层面上的综合措施才有可能缓解区域水资源紧张的局面，使城市河流水文状况根本好转。

河流形态现状是城市河流随城市变迁长时期演化的结果，河流蜿蜒度、城市段河岸、河床底质等在短时期内无法改变，但对于特定河段出现的施工土方侵占河道影响连通性、上游河段生态治理工程中涉及河流形态的工程设计，相关管理者仍可在中短期内采取相应的措施来促进河流健康。在城市区域或城市河流的长期规划中平衡河流同城市的关系，为河流留出必要的空间和自然资源，实现城市河流的可持续发展，对促进城市河流未来长期的形态健康乃至总体健康都显得尤为重要。

参考文献

鲍艳磊，田冰，张瑜，等，2021. 雄安新区河流健康评价[J]. 生态学报，41（15）：5988-5997.

曹明弟，2007. 城市河流生态系统健康评价指标体系研究及其应用[D]. 北京：中国环境科学研究院.

仇保兴，2015. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水，51（3）：1-7.

董哲仁，2005. 河流健康评估的原则和方法[J]. 中国水利，（10）:17-19.

方精云，王襄平，沈泽昊，等，2009. 植物群落清查的主要内

容、方法和技术规范[J].生物多样性,17(6):533-548.
方晓,胡淦林,樊子豪,等,2021.基于AHP层次分析法的郑州市东风渠生态健康评价[J].河南农业大学学报,55(3):544-550.
桂玉茹,白洁,高婷,等,2021.北京市平原区中小河流生态综合评价[J].生态学杂志,40(6):1874-1882.
胡晓雪,杨晓华,郦建强,等,2008.河流健康系统评价的集对分析模型[J].系统工程理论与实践,(5):164-170,176.
孔维博,尹亚敏,彭尔瑞,等,2021.山区河流生态河道治理工程扰动区植被群落恢复的影响研究[J].中国农村水利水电,(3):31-35.
李志强,王亚娟,温子希,等,2022.潮白河春季生态补水及地下水响应[J].南水北调与水利科技(中英文),20(2):375-384.
刘璐,刘志成,杨瑞莹,等,2020.永定河干涸段(卢梁段)河流廊道植物群落数量分类及多样性特征[J].生态学报,40(24):9129-9137.
陆小宁,2020.基于GIS的城市河流健康评价研究[D].南京:南京大学.
栾清华,李玮,刘家宏,等,2015.汾河清水复流工程生态影响及价值评价[J].人民黄河,37(5):62-65.
罗坤,2017.城市化背景下河流健康评价研究[D].重庆:重庆大学.
米小婷,2021.石羊河上游山区河流健康评价[D].兰州:兰州大学.
牛智航,2020.密云水库上游流域典型入库河流健康评价[D].邯郸:河北工程大学.
彭勃,王化儒,王瑞玲,等,2014.黄河下游河流健康评估指标体系研究[J].水生态学杂志,35(6):81-87.
彭文启,2018.河湖健康评估指标、标准与方法研究[J].中国水利水电科学研究院学报,16(5):394-404,416.
王倩,甄志磊,王春玲,等,2023.汾河太原段沉积物中细菌群落的分布特征[J].水生态学杂志,44(3):110-119.
王文圣,金菊良,丁晶,等,2009.水资源系统评价新方法——集对评价法[J].中国科学(E辑:技术科学),39(9):1529-1534.
王肖肖,张妙仙,徐兵兵,2012.模糊标识指数与对应分析法在水质评价中的联合应用[J].环境科学学报,32(5):1227-1235.
徐彩彩,张殷波,张远,等,2015.辽河流域河流的分类[J].生态学杂志,34(6):1723-1730.
徐明德,卢建军,李春生,2010.汾河太原城区段支流水质评价[J].中国给水排水,26(2):105-108.
姚璐,王雪红,刘懿,2021.北方季节性河流水环境综合治理方案与思考[J].水资源开发与管理,(8):26-31.
曾鹏,汪昱昆,刘垚燚,等,2020.基于河段尺度的太湖流域城市河流生境评价[J].应用生态学报,31(2):581-589.
张宇航,2017.生态护坡系统结构形式的综合评价研究[D].郑州:华北水利水电大学.
赵克勤,宣爱理,1996.集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J].系统工程,(1):18-23,72.
赵彦伟,杨志峰,2005.城市河流生态系统健康评价初探[J].水科学进展,(3):349-355.
朱惇,贾海燕,周琴,2019.汉江中下游河流健康综合评价研究[J].水生态学杂志,40(1):1-8.
Anwar S M, Guan Y, Zhang D, et al,2020. The associations between river health and water resources management lead to the assessment of river state[J]. Ecological Indicators, 109:105814.
Gong P, Liu H, Zhang M, et al,2019. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J]. Science Bulletin, 64: 370-373.
Shan C, Dong Z, Lu D, et al,2021. Study on river health assessment based on a fuzzy matter-element extension model[J]. Ecological Indicators, 2(10):1-4.
Wang S, Zhang Q, Yang T, et al,2019. River health assessment: Proposing a comprehensive model based on physical habitat, chemical condition and biotic structure[J]. Ecological Indicators, 103: 446-460.
Xiang W Q, Yang X H, Li Y Q,2021a. A set pair analysis model for suitability evaluation of human settlement environment[J]. Thermal Science, 25: 2109-2116.
Xiang W Q, Yang X H, Babuna P, et al,2021b. Development, application and challenges of set pair analysis in environmental science from 1989 to 2020: a bibliometric review [J]. Sustainability, 14(1):153.
Yang X H, Sun B Y, Zhang J, et al,2015. Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China[J]. Natural Hazards, 84: 63-76.
Yang X H, Zhang X J, Hu X X, et al,2011. Nonlinear optimization set pair analysis model (NOSPAM) for assessing water resource renewability[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 18: 599-607.
Zhao Y W, Zhou L Q, Dong B Q, et al,2019. Health assessment for urban rivers based on the pressure, state and response framework—a case study of the Shiwuli River[J]. Ecological Indicators, 99: 324-331.

(责任编辑 郑金秀)

Health Assessment of Urban Rivers in Water Scarcity Areas: A case Study of Nine Rivers in Taiyuan City

XIA Long-chao, YUAN Jin, DONG Jing, SUN Qi, ZHOU Yuan

(Innovation Institute of Environmental Industry, College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, P.R. China)

Abstract: Urban rivers in areas of water scarcity are characterized by small watersheds, seasonal interruption of flow, weak ecological function, and poor landscape effect, which combine to give a health evaluation that is different from other urban rivers. In this study, nine urban rivers in Taiyuan city were selected for research, and we evaluated the health status of the rivers based on an urban river health evaluation system developed for water scarcity areas. Our aim was to improve urban river health assessment methodology, theory and practice in areas of water scarcity, and to enrich the theoretical base for water system management and river ecological restoration in cities suffering from water scarcity. A total of 13 indicators from four aspects of river health (hydrology and water quality, morphology, biology, and socioeconomics) were selected for the construction of the river health assessment index system. The analytic hierarchy process and set pair analysis were used to determine the weight of each index and the health status of each river was then evaluated. Five grades of river health were set in the system: very healthy, healthy, sub-healthy, unhealthy, very un-healthy. Results show that the health status of the nine rivers were relatively similar and all had undergone large-scale alterations in the past five years. Among the rivers, the Beipaihongqu River was healthy, the Fengyu River was unhealthy, and the other seven rivers were sub-healthy. All nine rivers were in a healthy state socioeconomically, but most were sub-healthy in terms of biology and river morphology, and sub-healthy/unhealthy in terms of hydrology and water quality. The evaluation reveals the existing problems for the nine rivers of Taiyuan, and indicate that, presently, poor hydrology is the primary problem. Results demonstrate that the evaluation system established in this study is suitable for the health evaluation of urban rivers in water shortage areas. Based on the health evaluation results for the nine rivers, measures to improve the river health were discussed and ecological water replenishment at river scale is the most feasible near-term measure for improving river health. In the longer term, comprehensive management and restoration of the basin are needed to improve river ecological health, including water conservation, optimal allocation of water resources, ecological restoration of rivers and city construction designed to retain water.

Key words: river health assessment; urban rivers; water shortage areas; set pair analysis; the nine rivers in Taiyuan