DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.03.16

汾河上中游流域生态系统健康评价

刘 娟[1], 王 飞[2,3], 韩文辉[1], 赵 颖[1]

(1. 山西省环境科学研究院, 山西 太原 030027; 2. 山西大学 生命科学学院, 山西 太原 030006;
3. 山西大学 体育科学研究所, 山西 太原 030006)

摘 要: 为综合整治汾河流域生态环境,依据汾河流域2016年水生态监测数据,从涵盖水体物理化学和水生生物特性等方面构建生态系统健康的候选指标体系。采用主成分与相关性分析方法对评价指标进行筛选,得出包含底栖动物多样性指数、鱼类多样性指数、石油类、溶解氧、硝态氮、化学需氧量、五日生化需氧量、总氮、总磷、氟化物、阴离子表面活性剂、锌、铬、铜和镉这15个指标构成的河流健康综合评价指标体系。采用改进的灰色关联方法对河流生态系统健康进行评价,评判综合多指标条件下的河流健康等级情况。结果表明:汾河上中游流域的37个采样点中"健康"等级有12个,"亚健康"等级有1个,共占35%;"一般"等级有7个,占19%;"较差"和"极差"等级采样点为17个,占46%。其中健康与亚健康等级采样点均位于汾河上中游北部地区,较少受人类活动影响,而较差和极差等级主要位于汾河上中游流域南部河段,城市生活及工业畜牧业排污是导致河流健康受影响的主要原因。

关键词: 综合评价指标体系; 河流生态健康; 生态系统健康评价; 灰色关联度; 汾河中上游流域

中图分类号:X826 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2018)03-0091-08

The ecosystem health evaluation in the upper and middle reaches of Fen River Basin

LIU Juan[1], WANG Fei[2,3], HAN Wenhui[1], ZHAO Ying[1]

(1. *Shanxi Provincial Academy of Environmental Sciences, Taiyuan* 030027, *China*; 2. *School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*; 3. *Institute of Physical Science, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: In order to comprehensively renovate the ecological environment of Fen River basin, according to the water ecological monitoring data of Fen River in 2016, the candidate index system of ecosystem health was constructed from the water physical chemistry and aquatic biological characteristics aspects. The principal component analysis and correlation analysis method were adopted to screen evaluation indicators, and the river health evaluation index system of 15 indexes was obtained, which incorporated the benthic animal diversity index, fish diversity index, petroleum , dissolved oxygen, nitrate nitrogen, COD, BOD, total nitrogen, total phosphorus, fluoride, anionic surfactant, zinc, chromium, copper and cadmium. The improved grey correlation degree method was then used to evaluate the health of river ecosystem and the river health grade under the conditions of multiple indicators. The results showed that in 37 sampling points of the upper and middle reaches of Fen River, the number of the "healthy" level was 12 and the "sub-healthy" level was 1, accounting for 35%. The "ordinary " level was 7, accounting for 19% , and the other 46% was classified as the "sub-sick" and "sick" level. The health and sub-health level sampling points were located in the north of the upper and middle reaches of Fen River, which was less affected by human activities, while the sub-sick and the sick grades were mainly located in the south. The domestic sewage, industry and animal husbandry industry pollution were the main causes of river pollution.

收稿日期:2017-11-21; **修回日期**:2017-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41401020、41601202); 山西省青年科技研究基金项目(2015021173); 山西省科技攻关项目(20150313001-2)

作者简介:刘 娟(1992-),女,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事生态环境保护研究。

通讯作者:王 飞(1980-),男,山西平原人,副教授,博士,主要从事环境资源与利用研究。

Key words: comprehensive evaluation index system; river ecosystem health; ecosystem health evaluation; grey correlation degree; upper and middle reaches of Fen River basin

1 研究背景

流域生态系统是一个集合社会、经济和自然 3 个方面的复合生态系统。系统自身具有很强的环境适应能力和生态调节能力,然而近年来,由于人类活动的加剧对流域资源的过度开发和利用,超过了其本身的适应能力,流域生态环境遭到了严重的破坏,流域水体污染愈发严重,流域生态系统健康受到严重影响,并危及流域生态安全。

生态系统健康的概念起始于 20 世纪 70 年代,Schaeffer 等[1]于 1988 年提出并探讨了定义生态系统健康需要发展生态系统的诊断方法和具体的参数及标准。Rapport[2]于 1989 年论述了生态系统健康的内涵,认为生态系统健康是指生态系统具有稳定性和多样性或复杂性,具有平衡系统组成要素的能力,并拥有活力或增长的空间,能够对外界环境改变进行自我调节,具有对胁迫的恢复能力。由此,对生态系统健康的广泛研究得到人们关注,并应用于河流流域评价方向,通过流域生态健康评价,从生态系统健康的角度对流域环境进行综合整治。

国外较早开展流域生态健康评价的相关研究。Carles Ibáñez 等[3]主要研究河流生态系统健康评价的生态学指标,其重点在于单一性生物性指标的分析。Young 等[4]除分析水质及水生生物的分类组成外,还重点分析了有机质分解与生态系统代谢等指标的影响,对今后的河流生态系统健康评价有重要的参考意义。Heng 等[5]研究了污水排放影响下河流生态系统健康情况,主要对水体理化性质指标作了深入分析。而在我国,对生态系统健康的研究主要针对森林、农田、湿地、湖泊、河流等单个生态系统的健康状况研究较多[6-11],对流域尺度的生态健康评价研究及实践尚不多见,也未形成具有普适性的流域生态健康评价体系[12]。大多数研究是采用单指标分数加和的方法进行综合评价,对指标间相互关系的深入分析及科学的指标筛选过程都较为缺乏,多指标的综合评价方法也缺乏深入性研究。张楠等[13]从指标筛选及指标关系等角度构建了流域生态系统的多指标评价体系,在国内流域生态系统健康方面具有一定的指导意义。

目前,对汾河流域的研究主要集中于土地利用变化、湿地退化及恢复、生态环境动态监测、生态补偿机制以及水文水资源效应等方向,对汾河流域生态系统健康的综合评价暂无系统性研究。因此,本文选取汾河上中游流域为研究对象,借鉴张楠等[13]提出的流域生态系统健康的多指标评价体系,应用统计学基础分析,研究河流生态系统健康评价多指标的筛选方法,并采用改进的灰色关联度方法对河流生态系统健康进行综合评价,以期为汾河流域河流的生态管理提供技术支持和科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

汾河流域位于山西省中部,地理坐标 110° ~ 113°E,35° ~ 39°N,流经忻州、太原、吕梁、临汾、晋中和运城等 6 个地级市 40 个县,整体流域面积大约为 39 844 km^2,占山西省面积的四分之一。流域气候类型属于大陆性半干旱季风气候,年均降水量约为 489 mm,年均气温约为 6 ~ 13℃,春冬雨雪稀少,夏季炎热多雨。汾河干流纵向穿行于吕梁、太行与太岳山之间,主要支流有洪河、鸣河、东碾河、岚河和涧河。汾河流域集中了山西全省近一半人口以及丰富的煤矿资源,工业产值和农业产值占山西省突出位置,是山西省工、农业最为集中的地区[14]。

2.2 试验方法

研究区内共设置 37 个采样点,采样点布设位置见图 1,采样时间为 2016 年 5 月。现场采集约 1 L 水样进行水体理化指标监测,分析指标包括下列两类:

采样点编号、名称及所属类型详见表 1。

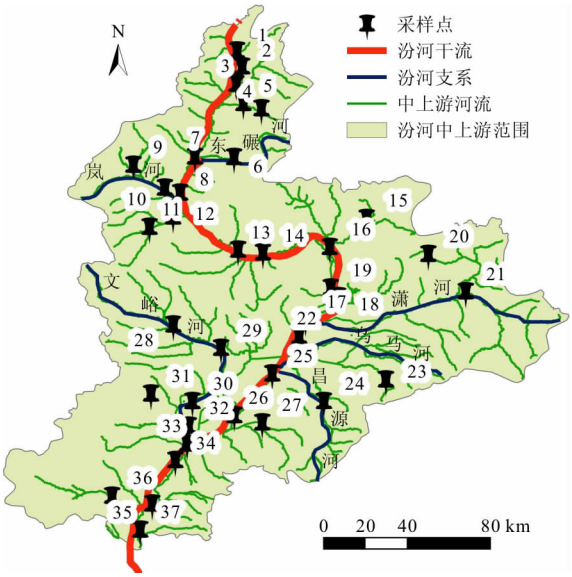

图 1 汾河上中游流域采样点分布图

表 1　汾河流域采样断面设置

编号	断面名称	编号	断面名称	编号	断面名称
S1	雷鸣寺	S14	寨上	S27	尹回水库
S2	头马营汇口下游	S15	阳曲上游	S28	文峪河上游
S3	洪河汇流下游	S16	柴村桥	S29	文水上游
S4	鸣水河上游	S17	萧河上游	S30	文水下游
S5	鸣水河污染源	S18	小店桥	S31	汾阳上游
S6	东碾河上游	S19	晋阳湖	S32	汾阳下游
S7	静乐监控点	S20	蔡庄水库	S33	孝义下游
S8	河岔	S21	晋中上游	S34	义棠
S9	岚河上游	S22	温南社	S35	灵石下游
S10	曲立	S23	庞庄水库	S36	段纯河上游
S11	涧河上游	S24	子洪水库	S37	南关
S12	涧河大桥	S25	祁县下游		
S13	古交上游	S26	平遥铁桥		

理化性质的指标包括五日生化需氧(BOD_5)、化学需氧量(COD_{cr})、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_3—N)、硝态氮(NO_3—N)、亚硝态氮(NO_2—N)、石油类、六价铬、砷(As)、锌(Zn)、铬(Cr)、镉(Cd)、铜(Cu)、镍(Ni)、汞(Hg)、铅(Pb)。以上参照《水和废水监测分析方法》进行现场采集和实验室内分析。

多环芳烃采用液液萃取和固相萃取高效液相色谱法[15]测定,氰化物采用容量法和分光光度法[16]测定,氟化物采用茜素磺酸锆目视比色法[17]测定,氧化还原电位采用电位测定法[18]测定,阴离子表面活性剂采用亚甲蓝分光光度法[19]测定。pH、电导率和溶解氧(DO)采用便携式水质仪进行现场测定。

反映河流生态系统状况的指标包括底栖动物多样性综合指数和鱼类多样性综合指数,其中生物的采集测定方法参照《流域生态健康评估技术指南》[20]。

2.3　研究方法

2.3.1　*候选指标的确定*　从水体理化特征和河流生态系统状况等两个方面选取了 27 个反映河流特征的状态指标作为河流健康评价的候选指标。其中,反映水体物理化学性质的指标共有 25 个,包括电导率、pH、DO、氧化还原电位、BOD_5、石油类、氟化物、氰化物、六价铬、总磷、氨氮、全氮、亚硝态氮、硝态氮、阴离子表面活性剂、PAHs、COD_{cr}、汞、砷、锌、铬、镉、铅、铜、镍;反映河流生态系统状况的指标有 2 个:底栖动物多样性综合指数和鱼类多样性综合指数。

候选指标中,底栖动物多样性综合指数和鱼类多样性综合指数需要通过计算获得,具体计算方法参见指南[20]。

2.3.2　*指标筛选方法*　具体筛选过程如下:(1)分析指标对河流健康等级判别的能力,将不敏感或有歧义的指标删除掉。(2)分析指标对河流生态系统的特征贡献率。利用 PCA 法对 27 项指标进行统计分析,按照累计方差超过 70% 的原则提取主成分,通过最大方差旋转法(Varimax)选择载荷值大于0.6的指标进入下一轮筛选。(3)分析指标的独立性。首先对余下的候选指标进行正态分布检验,然后分别采用 Pearson 相关性分析及 Spearman 秩相关性分析符合与不符合正态分布的候选指标,依据显著性水平来确定各指标间信息重叠程度。最后结合专家以及实际经验,选取其中相对独立且重要的指标作为评价指标。在 SPSS 19.0 统计软件中完成上述全部分析过程。

2.3.3　*多指标综合评价方法*　河流健康综合评价使用改进的灰色关联度方法。灰色关联度方法是一种多指标分析方法,关联度越大,说明样本越接近所表征的健康状态,反之亦然[21]。鉴于河流健康评价中评价标准不是一个具体数值,而是一个区间,因此本次评价采用文献[22]提出的基于点到区间距离关联系数公式的灰色关联度方法。

计算过程中,将河流健康具体分为 5 个等级:健康、亚健康、一般、较差和极差。将各采样点标准化后的实测数据作为参考数列,评价标准值作为比较区间,利用灰色关联度方法分别计算各采样点与 5 个健康等级标准间的灰色关联度值,依据最大隶属度的原则选择最大关联度值所属健康等级,便可确定所评价采样点的河流流域生态系统健康综合状况。

3　结果与讨论

3.1　基本数据

汾河上中游流域下游表现出典型的有机污染和营养物超标,主要污染物为硝态氮,亚硝态氮,BOD_5,COD_{cr},阴离子表面活性剂,总氮和总磷等,这些指标的最大值均以属于劣 V 类水质,详见表 2。

3.2　评价指标筛选

由于氰化物和六价铬含量在所有采样点中的变化范围较小,河流健康状况较难直接反映,故判定其不具备对河流健康状况的响应能力,将其从候选指标中删除。

采用 PCA 法分析余下 25 个指标,按照特征值大于 1 且累计方差大于 70% 的原则,提取到 6 个主

成分(见表3)。

根据上述分析,筛选出了共计23个指标,包括底栖多样性综合指数、氨氮、阴离子表面活性剂、总磷、总氮、砷、电导率、硝态氮、亚硝态氮、氟化物、铬、铜、COD_{cr}、BOD_5、汞、锌、镉、铅、PAHs、镍、DO、石油类、pH。这些指标都是对河流生态特征贡献率较大的指标。鱼类多样性综合指数载荷值较低,但是考虑到鱼类是汾河流域生态系统重要组成,同时也是国内外河流健康评价的常用指标,因此保留该指标,并与上述23个指标一并进入下一步筛选过程。

表2 候选指标信息表

指标类型	指标	最大值	最小值	平均值	标准偏差
生态系统指标	底栖动物多样性综合指数	0.89	0	0.30	0.20
	鱼类多样性综合指数	0.863	0.026	0.35	0.21
水体物理化学指标	石油类/(mg·L^{-1})	0.24	0	0.08	0.07
	硝态氮/(mg·L^{-1})	10.3	0.02	2.85	2.32
	亚硝态氮/(mg·L^{-1})	1.73	0.003	0.29	0.47
	氨氮/(mg·L^{-1})	46.4	0.033	6.72	11.46
	COD_{cr}/((mg·L^{-1})	205	0	46.89	50.32
	阴离子表面活性剂/(mg·L^{-1})	0.53	0	0.13	0.14
	BOD_5/(mg·L^{-1})	45.2	0	5.45	8.61
	总磷/(mg·L^{-1})	3.77	0.01	0.72	1.00
	总氮/(mg·L^{-1})	53.2	0	14.60	12.22
	氰化物/(mg·L^{-1})	0.015	0	0.00	0.00
	氟化物/(mg·L^{-1})	1.35	0.08	0.65	0.32
	六价铬/(mg·L^{-1})	0.073	0	0.01	0.01
	PAHs/(μg·L^{-1})	2.086	0.23	0.86	0.39
	汞/(μg·L^{-1})	1.79	0.11	0.51	0.37
	铬/(μg·L^{-1})	18.18	2.39	5.29	3.00
	镍/(μg·L^{-1})	29.72	0.23	4.97	5.93
	铜/(μg·L^{-1})	86.58	1.23	12.29	17.91
	锌/(μg·L^{-1})	12.72	0.07	1.03	2.82
	砷/(μg·L^{-1})	25.05	0.31	3.99	4.55
	镉/(μg·L^{-1})	0.77	0	0.06	0.19
	铅/(μg·L^{-1})	9.63	0.49	2.58	2.24
	pH	9.53	7.83	8.57	0.34
	电导率/(us·cm^{-1})	4540	329	1169.08	818.80
	DO/(mg·L^{-1})	14.8	0.9	6.67	2.78
	氧化还原电位/(mv)	281	23	212.89	62.21

对余下的24个指标进行正态分布检验,结果表明,鱼类多样性综合指数、亚硝态氮、氨氮、总磷、铬、铜、锌、砷、镉、铅、pH符合正态分布($P<0.05$),其余指标均不符合。分别采用Pearson相关和Spearman秩相关检验,分析指标的相关性见表4。结果表明,鱼类多样性指数、石油类和锌与其他指标间的相关性较差,说明这3类指标相对独立,可以保留。底栖动物多样性综合指数属于能够反映河流生态系统特征的极为重要的指标,因此也予以保留。在水体物理指标中,溶解氧与底栖动物多样性综合指数,BOD_5等显著相关,保留该指标。在水体化学指标中,总氮与氨氮,BOD_5等显著相关;硝态氮与亚硝态氮、铬等显著相关,COD_{cr}与总磷、电导率等显著相关。鉴于总氮、总磷、硝态氮、COD_{cr}、BOD_5能够较为全面地反映有机污染和营养物方面的特征,因此保留这些指标进入综合评价。阴离子表面活性剂与氨氮、总磷

等显著相关,氟化物与亚硝态氮,汞等显著相关,主要反映生活污染的特征。此外,污染指标中重金属铬,铜,镉与其他重金属之间的相关性较高,保留这些指标参与下一步综合评价。根据上述筛选过程,得到底栖动物多样性指数、鱼类多样性指数、石油类、溶解氧、硝态氮、COD_{cr}、BOD_5、总氮、总磷、氟化物、阴离子表面活性剂、锌、铬、铜、镉这 15 个指标进入河流健康综合评价。

表 3　候选指标主成分分析结果

指标类型	指标	1	2	3	4	5	6
生态系统指标	底栖动物多样性综合指数	-0.524	-0.204	-0.283	0.063	-0.314	-0.054
	鱼类多样性综合指数	-0.176	-0.305	-0.184	0.230	0.116	-0.433
水体物理化学指标	石油类	0.071	0.038	0.188	-0.142	-0.030	0.748
	硝态氮	-0.001	0.861	0.045	0.199	0.147	0.104
	亚硝态氮	0.224	0.831	0.143	0.211	0.245	-0.016
	氨氮	0.805	0.345	0.199	-0.079	0.083	-0.075
	COD_{cr}	0.205	0.082	0.779	0.165	0.054	-0.001
	阴离子表面活性剂	0.807	-0.099	-0.044	0.226	0.340	0.123
	BOD_5	0.222	-0.017	0.796	-0.054	0.277	0.004
	总磷	0.742	0.167	0.582	-0.072	0.071	0.041
	总氮	0.790	0.474	0.181	-0.063	0.046	0.020
	氟化物	0.432	0.665	0.032	-0.252	0.156	0.050
	PAHs	0.227	0.117	0.476	-0.024	0.568	0.068
	汞	0.435	0.413	0.642	-0.008	0.146	0.039
	铬	0.143	0.846	0.221	-0.024	-0.103	-0.087
	镍	0.255	0.405	0.296	0.145	0.542	-0.058
	铜	0.287	0.609	-0.326	-0.123	0.069	-0.094
	锌	-0.109	-0.023	-0.033	0.929	-0.151	0.085
	砷	0.816	0.121	0.330	-0.087	-0.174	0.082
	镉	-0.005	0.060	0.039	0.936	-0.082	-0.125
	铅	0.159	0.423	0.327	.666	0.176	0.081
	pH	-0.013	-0.120	-0.186	0.174	0.126	0.817
	电导率	0.527	0.477	0.389	0.070	0.202	0.025
	DO	-0.029	-0.191	-0.187	0.388	-0.744	-0.070
	氧化还原电位	0.132	0.183	0.143	-0.121	0.014	0.149
	方差贡献率%	35.058	11.620	9.315	6.419	6.192	5.162
	累积方差贡献率%	35.058	46.678	55.993	62.412	68.604	73.766

3.3　河流健康综合评价

按照熵值赋权法确定评价体系各指标权重,结果见表 5。

确定各指标的健康等级标准:依据《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002)[23] 确定水体理化指标,依据《流域生态健康评估技术指南》[20] 中的分级标准确定底栖动物多样性综合指数和鱼类多样性综合指数,根据灰色关联分析法进行河流健康综合评价。在评价过程中,灰色关联评价结果受分辨系数高低的影响,分辨系数高对应分辨率便低,本次计算分辨系数取 0.05,计算取得各采样点相对于 5 个健康等级的关联度矩阵,按照最大隶属度原则确定各采样点河流健康评价等级。如表 6 所示,汾河上中游流域“健康”与“亚健康”等级采样点为 13 个,占

35%,“一般”等级采样点为7个,占19%,“较差”和“极差”等级采样点为17个,占46%。

表4 Pearson相关和Spearman秩相关分析分析结果

	底栖多样性综合指数	鱼类多样性综合指数	石油类	硝态氮	亚硝态氮	氨氮	COD_{cr}	阴离子表面活性剂	BOD_5	总磷	总氮	氟化物	PAHs	汞	铬	镍	铜	锌	砷	镉	铅	pH	电导	DO
底栖多样综合指数	1.000																							
鱼类多样性综合指数	0.264	1.000																						
石油类	−0.038	−0.149	1.000																					
硝态氮	−0.293	0.036	0.237	1.000																				
亚硝态氮	−0.586**	0.053	0.245	0.762**	1.000																			
氨氮	−0.622**	0.036	0.226	0.517**	0.810**	1.000																		
COD_{cr}	−0.420**	0.033	0.170	0.255	0.529**	0.459**	1.000																	
阴离子表面活性剂	−0.456**	0.074	0.196	0.277	0.526**	0.619**	0.389*	1.000																
BOD_5	−0.601**	−0.240	0.110	0.272	0.447**	0.560**	0.441**	0.451**	1.000															
总磷	−0.698**	−0.090	0.245	0.404*	0.771**	0.802**	0.599**	0.637**	0.661**	1.000														
总氮	−0.594**	−0.339a*	0.158	0.488**	0.656**	0.709**	0.308	0.542**	0.546**	0.799**	1.000													
氟化物	−0.544**	−0.368a*	0.198	0.415*	0.575**	0.556**	0.441**	0.311	0.356*	0.565**	0.578**	1.000												
PAHs	−0.400*	−0.034	0.223	0.248	0.368*	0.435**	0.397a*	0.469**	0.543a**	0.391*	0.478**	0.181	1.000											
汞	−0.653**	−0.039	0.253	0.480**	0.833**	0.832**	0.632**	0.502**	0.559**	0.856**	0.667**	0.577**	0.360*	1.000										
铬	−0.318	0.067	0.114	0.623**	0.551**	0.504**	0.107	0.144	0.351*	0.463**	0.499**	0.501a**	0.339*	0.420**	1.000									
镍	−0.661**	−0.077	0.109	0.616**	0.816**	0.781**	0.548**	0.529**	0.690**	0.862**	0.753**	0.570**	0.386*	0.796**	0.538**	1.000								
铜	−0.269	−0.233	0.031	0.359*	0.401*	0.345*	0.244	0.303	0.190	0.398*	0.438**	0.428**	0.256	0.250	0.475a**	0.464**	1.000							
锌	−0.115	−0.015	−0.071	0.149	0.188	0.158	0.090	0.116	0.144	0.122	0.116	−0.069	0.084	0.137	0.186	0.146	−0.017	1.000						
砷	−0.547**	−0.179	0.266	0.301	0.647**	0.744**	0.381*	0.491**	0.649**	0.867**	0.796**	0.499**	0.315	0.779**	0.466**	0.711**	0.253	0.140	1.000					
镉	−0.117	0.111	−0.069	0.209	0.251	0.192	0.208	0.198	0.329*	0.220	0.174	0.042	−0.015	0.247	0.192	0.243	−0.072	0.504**	0.213	1.000				
铅	−0.551**	−0.163	0.013	0.439**	0.510**	0.521**	0.291	0.355*	0.456**	0.564**	0.477**	0.350*	0.222	0.564**	0.395*	0.585**	0.400*	0.436**	0.458**	0.542**	1.000			
pH	0.341*	−0.087	0.377a*	−0.226	−0.227	−0.267	0.181	−0.222	−0.173	−0.254	−0.283	−0.228	−0.078	−0.129	−0.394*	−0.365*	−0.120	0.047	−0.113	0.019	−0.295	1.000		
电导	−0.637**	−0.166	0.201	0.538**	0.789**	0.784**	0.622**	0.473**	0.595**	0.828**	0.682**	0.580**	0.486a**	0.828**	0.366*	0.880**	0.349*	0.122	0.700**	0.167	0.510**	−0.123	1.000	
DO	0.498**	0.114	−0.049	−0.183	−0.271	−0.368*	−0.212	−0.177	−0.390*	−0.308	−0.284	−0.427**	−0.477**	−0.365*	−0.129	−0.399*	−0.311	0.401a*	−0.218	0.347a*	−0.287	0.121	−0.320	1.000

注:** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; a 表示Pearson相关分析,其余为Spearman秩相关分析。

3.4 汾河流域河流健康状况分析

多指标评价结果中,“健康”和“亚健康”等级的采样点均位于汾河支流上游地区,这些区域离城市地区较远且处于城市上游,人类活动较弱,河流本身受工业和生活污水排放影响较小,但是表现出受到农业非点源污染的潜在威胁,表现为总氮类营养物含量较高,但从整体上看河流生态系统完整性较好,水体自净能力较强,健康状况良好。

在“较差”和“极差”等级采样点中,大部分采样点都位于汾河流域水系的支流上,受附近的工业企业排污影响较大,其中位于祁县、孝义、平遥、介休、义棠和灵石附近的S25、S26、S27、S32、S33、S34、S35、S37采样点污染最重,上游污染源的不断汇入造成污染物逐渐累积,入河排污口的散乱分布加之养殖厂、造纸厂、化肥厂及焦化厂等养殖及工业企业废水的多厂及生活污水混合排污的集中分布,导致汾河上中游地区的南部污染严重。

而S8虽位于汾河上游区,受人类活动影响相对较少,但该地区的水体有机污染严重,导致水中COD值很高,高COD值引起水体中溶解氧含量降低,继而导致水生生物缺氧以至死亡,水质腐败变臭,水体生物的生存环境和食物来源受到严重影响,河流健康状况极差。与此同时,S15、S17、S25、S26四处采样点也呈现出不同程度的水体富营养化趋势,总氮和总磷含量均偏高,造成营养盐富集的因素有很多,包括自然环境、工矿业及农业的影响,治理时需要分区域对待,并大力遏制营养盐排放。

3.5 汾河流域生态系统健康评价的不确定性

河流生态系统是一个不断变化的动态系统,所涉及的多种不确定性因素都会直接影响最终的评价结果,生态系统的动态性特征和生物多样性带来了生态系统评价中的不确定性[24]。评价过程中,监制定测方案、筛选指标、选择评价方法及评价标准等,也都会对评价结果的准确性造成影响。

汾河流域中上游生态系统健康评价结果的不确定性主要来源于两个方面:即指标的筛选和评价标准的选择。在评价指标筛选过程中,鱼类多样性综合指数这个比较重要的指标会因为载荷较小而被排除掉。这说明单纯使用统计学方法进行指标筛选可能会缺失某些重要的指标信息,而导致最终的评价结果存在不确定性,虽然可以加之专家经验来辅助指标筛选,尽量减少这种不确定性,但无法完全避免。

表 5　汾河上中游流域生态系统健康评价标准体系及各指标权重　　mg/L

指标类型	指标	权重系数	等级				
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
生物指标	底栖动物多样性指数	0.17	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
	鱼类多样性指数	0.14	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
有机污染指标	石油类	0.08	≤0.05	≤0.05	≤0.05	0.05~0.5	0.5~1.0
	COD_{cr}	0.05	≤15	≤15	15~20	20~30	30~40
	BOD_5	0.03	≤3	≤3	3~4	4~6	6~10
其他污染指标	阴离子表面活性剂	0.06	≤0.2	≤0.2	≤0.2	0.2~0.3	0.2~0.3
	氟化物	0.09	≤1.0	≤1.0	≤1.0	1.0~1.5	1.0~1.5
营养物指标	总磷	0.05	≤0.02	0.02~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4
	总氮	0.05	≤0.2	0.2~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
	硝态氮	0.05	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10
重金属污染指标	铬	0.03	≤0.01	0.01~0.05	0.01~0.05	0.01~0.05	0.05~0.1
	铜	0.04	≤0.01	0.01~1.0	0.01~1.0	0.01~1.0	0.01~1.0
	锌	0.03	≤0.05	0.05~1.0	0.05~1.0	1.0~2.0	1.0~2.0
	镉	0.04	≤0.001	0.001~0.005	0.001~0.005	0.001~0.005	0.005~0.01
生物生存指标	DO	0.09	≥7.5	6.0~7.5	5.0~6.0	3.0~5.0	2.0~3.0

表 6　汾河上中游流域生态系统健康综合评价结果

等级	采样点数量/个	采样点
健康	12	S1,S6,S9,S11,S16,S20,S21,S23,S24,S28,S29,S31
亚健康	1	S5
一般	7	S2,S3,S7,S10,S13,S18,S19
较差	6	S4,S8,S12,S22,S30,S36
极差	11	S14,S15,S17,S25,S26,S27,S32,S33,S34,S35,S37

评价指标的健康等级沿用了现有的地表水环境质量标准以及相关科技文献中已有的评价标准,具有一定的局限性。河流的区域性特点、河流所属类型以及人类对河流的社会期望等多个角度均需综合考虑,单纯采用现行标准或其他文献中提供的标准虽具较强的可操作性,但无法综合并客观的反映河流生态系统实际健康状况,这也会导致河流健康评价结果的不确定性。加之基础数据的采集只涉及某一个时期,无法对河流的长期变化做出准确的判断,因此综合评价仍需进行长期的观测及研究。

4　结　论

通过主成分分析法及相关性分析方法,从 25 个候选指标中筛选出 15 个指标进行汾河上中游流域生态系统健康的多指标评价研究。基于该方法所建立的综合评价指标体系能够从水体物理、化学、生态系统、水生生物生存环境等方面整体反映汾河流域生态系统的自然属性。利用灰色关联度方法构建河流健康评估系统,将采样点分为 5 个等级。评价结果显示:

(1)汾河上中游流域北部采样点属于“健康”和“亚健康”等级,这些区域离城区较远且处于城市上游,人类活动较弱,河流本身受工业和生活污水排放影响相对较小,除总氮类营养物含量稍高外,整体上河流生态系统较好健康状况良好。

(2)汾河上中游流域南部呈现不同程度的水体富营养化趋势,总氮和总磷含量均偏高,造成营养盐富集的因素有很多,包括自然环境、工矿业及农业的影响,治理时需要分区域对待,大力遏制营养盐排放。

(3)整体来看,汾河上中游流域生态系统总体状况较差,大多数采样点都属于“一般”、“较差”和“极差”等级,尤其是各支流显示水体污染严重,集

中分布的养殖厂、造纸厂、化肥厂及焦化厂等养殖及工业企业的多厂及生活混合排污,是导致汾河上中游地区生态健康退化的主要原因,建议对其周边污染负荷排放的控制予以关注和重视,从生态系统健康的角度对流域环境进行综合整治,以实现流域健康状况的改善。

参考文献:

[1] SCHASEFFER D J, HERRICKS D E, ADWIN E, et al. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health[J]. Environmental Management,1988,12(4):445 - 455.

[2] Rapport D J. Evolution of indicators of ecosystem health [M]. In: Daniel, H. (eds). Ecological Indicators. Elsevier Science Publishers Ltd, 1992:121 - 134.

[3] Carles Ibáñez, Nuno Caiola, Peter Sharpe, et al. Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health, Second Edition[M]. CRC Press, 2010:447 - 464.

[4] YOUNG R, MATTHAEI C, TOWNSEND C. Organic matter breakdown and ecosystem metabolism: functional indicators for assessing river ecosystem health[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2008, 27(3): 605 - 625.

[5] HENG L Y, ABDULLAH P, YI C S, et al. Development of possible indicators for sewage pollution for the assessment of Langat river ecosystem health[J]. Malaysia Journal of Analytical Sciences 2006,10 (1):15 - 26.

[6] 潘 磊,王晓荣,唐万鹏,等. 森林生态系统健康评价研究进展[J]. 湖北林业科技,2015,44(6):35 - 39.

[7] 李 琪,陈立杰. 农业生态系统健康研究进展[J]. 中国生态农业学报,2003,11(2):144 - 146.

[8] 吴良冰,张 华,孙 毅,等. 湿地生态系统健康评价研究进展[J]. 中国农村水利水电,2009(10):22 - 26.

[9] 魏金梅,何彤慧,程 志,等. 地表水生态系统健康评价研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(4):96 - 100.

[10] 沈颜奕,陈 星. 城市湖泊生态系统健康评价与修复研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):82 - 85 + 91.

[11] 石建华,喻理飞,孙保平. 陕北地区退耕还林生态健康评价分析研究——以吴起县为例[J]. 水土保持学报,2015,29(6):332 - 336.

[12] 徐 菲,王永刚,张 楠,等. 北京市白河和潮河流域生态健康评价[J]. 生态学报,2017,37(3):932 - 942.

[13] 张 楠,孟 伟,张 远,等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法[J]. 环境科学研究,2009,22(2):162 - 170.

[14] 薛占金,秦作栋,孟宪文. 2010年汾河流域土地退化经济损失评估[J]. 水土保持通报,2014,34(3):295 - 299.

[15] 中华人民共和国环境保护部. HJ478 - 2009 水质多环芳烃的测定. 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法[S]. 北京:中国环境科学出版社,2009.

[16] 中华人民共和国环境保护部. HJ484 - 2009 水质氰化物的测定. 容量法和分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社,2009.

[17] 中华人民共和国环境保护部. HJ488 - 2009 水质氟化物的测定. 茜素磺酸锆目视比色法[S]. 北京: 中国环境科学出版社,2009.

[18] 中华人民共和国国家能源局. DL/T1480 - 2015 水的氧化还原电位的测定[S]. 北京:中国电力出版社,2015.

[19] 中华人民共和国环境保护部. HJ826 - 2017 水质阴离子表面活性剂的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[20] 中华人民共和国环境保护部. 流域生态健康评估技术指南[G],2013.

[21] 秦昌波,郑丙辉,秦延文,等. 渤海湾天津段海岸带水环境质量灰色关联度评价[J]. 环境科学研究,2006,19(6):94 - 99.

[22] 沈珍瑶,谢彤芳. 一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用[J]. 水文,1997(3):13 - 15.

[23] 国家环境保护总局. GB3838 - 2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[24] 杨 馥,曾光明,刘鸿亮. 城市河流健康评价指标体系的不确定性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008,35(5):63 - 66.