干旱和半干旱流域水环境质量评价模型及其应用

张 晨[1,2], 白继中[2], 刘璐瑶[3]

(1. 山西大学 资源与环境工程研究所 山西 太原 030006; 2. 山西水利职业技术学院, 山西 运城 044004; 3. 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘 要: [目的] 通过建立模型修复水生态系统,评价流域水环境质量,为生态系统修复提供实用工具。[方法] 以涑水河流域为例,采用了层次分析法(AHP),同时运用模糊隶属函数和综合指数法对影响水质因子的各个指标进行综合评价分析,建立干旱和半干旱流域水环境质量健康评价体系及评价模型。[结果] 涑水河流域 2008—2011 年水环境质量健康评价结果为Ⅲ级,状态一般,较健康,评价结果与实际生态情况相符。[结论] 所建立的干旱和半干旱流域水环境质量健康评价体系是合理的,能满足流域水环境质量健康评价需要。

关键词: 水环境质量; 层次分析法; 模糊隶属函数; 综合指数法

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2016)04-0036-05 **中图分类号**: X4

文献参数: 张晨, 白继中, 刘璐瑶. 干旱和半干旱流域水环境质量评价模型及其应用[J]. 水土保持通报, 2016,36(4):36-40. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.007

Evaluation Models and Its Application of Water Environment Quality and Health Status in Arid and Semi Arid Basins

ZHANG Chen[1,2], BAI Jizhong[2], LIU Luyao[3]

(1. *Institute of Resources & Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuang, Shanxi* 030006, *China*; 2. *Shanxi Conservancy Technical College, Yuncheng, Shanxi* 044004, *China*; 3. *State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: [Objective] The water quality of the river basin was evaluated through the establishment of related models in order to provide practical tool for ecosystem restoration. [Methods] Using analytic hierarchy process(AHP), fuzzy membership function and comprehensive index method, taking Sushui river basin as a study area, factors that influences water quality indexes were evaluated comprehensively. Evaluation system of water environment quality and was established and the models of the environmental health in arid and semi arid river basin was illustrated. [Results] In Sushui river basin from 2008 to 2011, the water quality environment was categorized as grade Ⅲ, at a status of ordinary health. The evaluation results were commonly the real status. [Conclusion] The health evaluation system of water environment quality in that arid and semi arid river basin proved reasonable, can meet the needs of health assessment of water environment quality in river basin.

Keywords: water environment quality; analytic hierarchy process; fuzzy membership function; index selection

流域是自然要素与人文要素组成的生态系统,其主要以水为纽带,是实现国民和区域经济可持续发展的空间载体,也是自然要素进行物质与能量循环和维持生态系统平衡的基本单元。因此对各流域的水环境质量评价的各种研究也逐渐展开。从 20 世纪 70—80 年代开始,人们对河流的关注由单一的水质保护转移到整个流域生态系统,而评价内容也开始转向环境质量评价,健康的内涵更为丰富,也因此出现了多种评价方法[1]。国内外也在水环境质量评价方面开展了大量的工作,其中具有代表性的评价方法有基于生物完整性指(IBI)的美国快速生物评价方案(RBPs)[2-3]、欧盟水框架指令(WFD)[4]、多指标评价方法(MMIs)[5]、澳大利亚的溪流状况指数(ISC)、澳大利亚河流评价计划[6-8]、英国的河流无脊椎动物预

收稿日期:2015-12-29 **修回日期**:2016-03-22

资助项目:山西省煤基重点科技攻关项目"干旱和半干旱流域水环境质量评价模型及其应用"(MJH2014-04)

第一作者:张晨(1986—),女(汉族),山西省太原市人,硕士,讲师,主要从事水环境工程方面的研究。E-mail:439400745@qq.com。

测、分类系统(RⅣPACS)[9]和南非的河流健康计划(RHP)[10-11]等。本研究建立干旱和半干旱流域水环境质量健康状态评价体系,以提供水环境质量健康定位指示,为进一步修复生态系统提供建议和实用工具。

1　干旱和半干旱流域水环境质量健康状况评价指标

1.1　流域水环境质量健康评价指标

根据干旱和半干旱流域特征,及河流上游、中游和下游水质变化特点,利用数理统计和相似类比法筛选出流域水环境指标,本研究选出流域水环境质量健康评价指标 26 项分别为:水温,流量,pH 值,电导率,溶解氧,COD_{Mn},BOD_5,氨氮,石油类,挥发酚,汞,铅,COD_{cr},总氮,总磷,铜,锌,氟化物,硒,砷,镉,六价铬,氰化物,LAS,硫化物,粪大肠菌群等指标。

1.2　评价指标的分级标准

根据以上 26 项评价指标及其测定结果,对干旱和半干旱流域水环境质量健康状况进行分级,各项评价指标分为 5 个级别,分别用≤20 分,20～40 分,40～60 分,60～80 分,≥80 分予以评分,评分越高,则说明在该项指标上水环境质量健康状况良好,应用模糊函数和属性函数的基本原理,建立各项指标模糊隶属函数和所对的打分标准,结果详见表 1。

表 1　干旱和半干旱流域指标模糊隶属函数和所对应的打分标准

指标	80 分	60～80 分	45～60 分	25～45 分	≤25 分
汞	≤0.000 1	0.000 1～0.001	0.001～0.01	0.01～0.1	≥0.1
铅	≤0.05	0.05～0.1	0.1～0.5	0.5～0.8	≥0.8
铜	≤0.5	0.5～1.0	1.0～3	3～8.5	≥8.5
锌	≤0.25	0.25～1.0	1.0～2.8	2.8～5.8	≥5.8
镉	≤0.005	0.005～0.01	0.01～0.05	0.05～0.15	≥0.15
六价铬	≤0.05	0.05～0.1	0.1～0.55	0.55～1.15	≥1.15
总氮	≤1.0	1.0～5.0	5.0～10	10～20	≥20
氨氮	≤1.0	1.0～2.0	2.0～4.0	4.0～6.5	≥6.5
总磷	≤0.2	0.2～2.0	2.0～20	20～30	≥30
粪大肠菌群	≤10 000	10 000～30 000	30 000～60 000	60 000～100 000	≥100 000
水温	26.2～35.3	21.5～26.2	14.8～21.5	2.8～14.8	≥2.8
流量	≥0.58	0.48～0.58	0.33～0.48	0.1～0.33	≥0.1
pH 值	7.0～8.0	6.0～7.0	5.3～5.9	2.5～5.3	≥2.5
电导率	≤220	220～380	380～550	550～800	≥380
溶解氧	≥5	3～5	1～3	0.5～1	≤0.5
COD_{Mn}	≤6	6～10	10～15	10～30	≥30
BOD_5	≤4	4～10	10～15	15～20	≥20
COD_{cr}	≤20	20～40	40～80	80～100	≥100
硒	≤0.005	0.005～0.01	0.01～0.15	0.15～0.95	≥0.95
砷	≤0.05	0.05～0.1	0.1～0.55	0.55～1.05	≥1.05
挥发酚	≤0.005	0.005～0.05	0.05～0.5	0.5～1	≥1
石油类	≤0.05	0.05～0.5	0.5～1.5	1.5～3.5	≥3.5
氟化物	≤0.75	0.75～1.0	1.0～1.85	1.85～3.55	≥3.55
LAS	≤0.2	0.2～0.55	0.55～1.05	1.05～1.55	≥1.55
氰化物	≤0.2	0.2～0.55	0.55～1.15	1.15～2.55	≥2.55
硫化物	≤0.2	0.2～0.78	0.78～1.35	1.35～2.45	≥2.45

2　干旱和半干旱流域水环境质量评价

2.1　评价方法

水环境质量指标包括重金属指标、总氮和氮化物指标、微生物生化特性指标等多种因子,如果全部因子都以数值表示,这样进行水环境质量健康评价时涉及到大量的数据,要想从这些纷繁的数据中找出它们内部联系,必须借助数学方法,从多因素角度对河流水质进行综合评价。为此采用层次分析法(AHP),同时运用模糊隶属函数和综合指数法对影响水质因子的各个指标进行综合评价分析。

2.2　评价步骤

干旱和半干旱水环境质量健康状况评价是对河流的各类指标情况进行健康评价。需采取 7 个步骤依次完成:(1) 确定评价区域。确定干旱和半干旱流域水环境质量健康状况评价区域,流域水环境质量健康状况评价区应该具有相似的河流状况、河流生物类型和水质特征。流域水环境质量健康评价的基本单

元—河流断面，主要是依据河流状况、河流中生物类型和水质来确定。(2) 确定健康评价参照区。确定流域水环境质量健康参照区，并建立与各种河流断面对应的水环境质量健康参照区内各项评价指标的本底数据库。在评价区域内或是相似河流断面的其他区域选择一块理想或接近于理想健康状况的水环境质量，作为健康评价的参照区。参照区最好是该种水环境质量健康状况顶级，或是接近于顶级的理想状态。参照区的26项健康评价指标的标准可以通过专家评分或是查阅历史文献资料获得。(3) 确定分级指标。在前两步的基础上对各项评价指标的测定结果进行分级，并给出相应的分值。(4) 权重确定方法。目前，指标权重确定方法可分为两类：一类是由专家根据知识、经济判断各评价指标相对于评价目的或者其他指标而言的相对重要程度，然后经过综合处理获得指标权重的主观权重确定法，如：专家调查法、层次分析法等；另一类是直接根据各被评对象指标数据的特征来确定各评价指标权重的客观权重确定方法，如：标准离差法、灰色关联法、熵权法等[12]。权重确定方法拟采用在专家打分的基础上采用层次分析法来确定环境质量健康指标体系中的指标权重。层次分析法又称AHP构权法，是将复杂的评价对象排列为一个有序的递阶层次结构的整体，然后在各个评价项目之间进行两两的比较、判断，之后运用数学与定性分析结合，计算各个评价项目的相对重要性系数，即权重(表2)。(5) 计算指数。计算影响干旱和半干旱流域水环境质量健康状况(重金属性状，总氮、氮化物和总磷指数，水环境、微生物生化特性，水环境化学需氧量和溶解氧量指数，硒、砷、挥发酚和石油类及硫、氯、氰等化合物指标情况)5个属性的健康指数。并计算干旱和半干旱流域水环境质量健康状况综合指数。(6) 综合水环境质量健康状况评价等级划分标准。将干旱和半干旱流域水环境质量健康状况评价标准划分为5个等级(表3)。综合评价值越大即综合健康得分越大，干旱和半干旱流域水环境质量表征状态就越健康。(7) 干旱和半干旱流域水环境质量健康状况调控对策。根据干旱和半干旱流域水环境质量健康状况中的属性健康得分、综合健康得分以及评价人员对参照区的综合比较，对干旱和半干旱流域水环境质量健康状况做出全面评价和描述，并且针对干旱和半干旱流域水环境质量健康状况出现的问题，提出相应对策。最后写出干旱和半干旱流域水环境质量健康状况评价报告。

表2 干旱和半干旱流域水环境质量健康评价指标权重系数

目标层	属性层	权重	指标层	权重
干旱和半干旱流域水环境质量健康评价 A	重金属性状 B_1	0.222	汞 C_1	0.222
			铅 C_2	0.192
			铜 C_3	0.104
			锌 C_4	0.159
			镉 C_5	0.188
			六价铬 C_6	0.134
	总氮、氮化物和总磷指数 B_2	0.208	总氮 C_7	0.398
			氨氮 C_8	0.323
			总磷 C_9	0.289
	水环境、微生物生化特性 B_3	0.172	粪大肠菌群 C_{10}	0.204
			水温 C_{11}	0.245
			流量 C_{12}	0.218
			pH值 C_{13}	0.139
			电导率 C_{14}	0.083
	水环境化学需氧量和溶解氧量指数 B_4	0.212	溶解氧 C_{15}	0.251
			COD_{Mn} C_{16}	0.261
			BOD_5 C_{17}	0.246
			COD_{cr} C_{18}	0.242
	硒、砷、挥发酚和石油类及硫、氯、氰等化合物指标情况 B_5	0.216	硒 C_{19}	0.123
			砷 C_{20}	0.131
			挥发酚 C_{21}	0.104
			石油类 C_{22}	0.125
			氟化物 C_{23}	0.138
			LAS C_{24}	0.131
			氰化物 C_{25}	0.126
			硫化物 C_{26}	0.122

表3 干旱和半干旱流域水环境质量健康状况得分划分标准

健康得分	≥80分	80～60分	60～45分	45～25分	≤25分
等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
系统状态	状态好，很健康	状态良好，健康	状态一般，较健康	状态恶化，病态	状态严重恶化，严重病态

3 干旱和半干旱流域水环境质量健康状况评价模型的应用

3.1 数据选取及评价和验证原则

按照前面建立的干旱和半干旱流域水环境质量健康状况评价体系，选取涑水河2008—2011年河流上游、中游和下游水质监测数据、涑水河流域水环境状态数据、涑水河流域地下水及地表水监测数据，尽量收集完整近3 a河流断面的26项数据资料。涑水河是黄河一级支流，发源于山西省运城市绛县横岭关

陈村峪,在永济市独头村汇入黄河,干流总长 196.6 km,纵坡 1/400,河床糙率 0.033。流域总面积 5 553.87 km^2。目前,涑水河已断流,形成 700 km^2 的闭流区,是山西惟一的内流区域[13]。

3.2　评价结果分析

使用提出和建立的干旱和半干旱流域水环境质量健康状况评价体系,对涑水河流域水环境质量健康状况评价结果详见表 4—5。从表 4 可见,使用本研究建立的干旱和半干旱流域水环境质量健康评价体系及评价模型,对涑水河流域 2008—2011 年水环境质量健康评价结果为Ⅲ级,状态一般,较健康,与该流域实际生态情况相符。从表 5 可见,2011 年 1—4,10 及 11 月综合评价指标均小于 45 大于 60,涑水河流域水环境质量健康级别为Ⅲ级,状态一般,较健康;而 2011 年 6—9 月综合评价指标均小于 70 大于 60,涑水河流域水环境质量健康级别为Ⅱ,状态良好,健康;但 2011 年 5,12 月综合评价指标均小于 45 大于 25,涑水河流域水环境质量健康级别为Ⅳ,状态恶化,病态。

经检验涑水河流域 2011 年各月水环境质量健康评价结果与实际生态状况相符,同时 4 a 评价均提供了基层指标、属性指标和综合评价结论,可以通过所提供的指标数应对各自基准项,为人们提供水环境质量健康定位指示,为进一步修复生态系统提供建议和实用工具。也表明本文建立的干旱和半干旱流域水环境质量健康状态评价体系能满足诸如涑水河类似的干旱和半干旱流域水环境质量健康状态评价需要,也进一步说明所建干旱和半干旱流域水环境质量健康评价体系是正确的、合理的,具有实用性和普适性。

表 4　涑水河流域 2008—2011 年水环境健康状况评价结果

年份	属性层指标	综合评价	健康状态、级别	评价结论(特征)
2008	$B_1=66.5$ $B_2=61.7$ $B_3=58.5$ $B_4=55.6$ $B_5=48.3$	59.88	Ⅲ级,状态一般,较健康	涑水河流域功能已有明显退化;水环境遭到破坏,但仍可维持其生态功能;水环境受到干扰后极易恶化,灾害时有发生。
2009	$B_1=68.4$ $B_2=61.2$ $B_3=58.6$ $B_4=54.8$ $B_5=46.6$	59.68		
2010	$B_1=64.6$ $B_2=62.8$ $B_3=51.6$ $B_4=47.6$ $B_5=62.8$	59.93		
2011	$B_1=46.4$ $B_2=60.8$ $B_3=65.4$ $B_4=51.4$ $B_5=43.8$	54.55		

表 5　涑水河流域 2011 年水环境健康状况评价结果

月份	属性层指标	综合评价	健康状态、级别	评价结论
1	$B_1=50.8$ $B_2=61.2$ $B_3=54.4$ $B_4=51.8$ $B_5=62.8$	57.91	Ⅲ级,状态一般,较健康	涑水河流域功能已有明显退化;水环境遭到破坏,但仍可维持其生态功能;水环境受到干扰后极易恶化,灾害时有发生。
2	$B_1=62.2$ $B_2=47.2$ $B_3=58.4$ $B_4=44.4$ $B_5=46.3$	53.08		
3	$B_1=66.2$ $B_2=51.2$ $B_3=48.4$ $B_4=54.4$ $B_5=53.3$	56.72		
4	$B_1=46.2$ $B_2=61.2$ $B_3=48.2$ $B_4=54.8$ $B_5=62.3$	56.35		

续表 5

月份	属性层指标	综合评价	健康状态、级别	评价结论
5	$B_1=44.2$ $B_2=31.2$ $B_3=38.4$ $B_4=44.4$ $B_5=23.8$	37.46	Ⅳ级，状态恶化，病态	涞水河流域功能严重退化，水环境受到较大破坏，水环境系统受到较大破坏，水环境受到干扰后不易恢复，且灾害时常发生。
6	$B_1=66.8$ $B_2=62.4$ $B_3=66.6$ $B_4=70.4$ $B_5=62.5$	67.69	Ⅱ级，状态良好，健康	涞水河流域河流功能较完善；水环境受到破坏较少，水环境结构和功能比较完整，水环境受到干扰后一般可恢复，灾害不太发生。
7	$B_1=66.8$ $B_2=67.2$ $B_3=60.4$ $B_4=58.4$ $B_5=69.3$	66.55		
8	$B_1=63.8$ $B_2=62.4$ $B_3=65.8$ $B_4=59.4$ $B_5=65.7$	65.24		
9	$B_1=61.5$ $B_2=62.6$ $B_3=68.5$ $B_4=57.4$ $B_5=61.8$	63.97		
10	$B_1=60.4$ $B_2=51.2$ $B_3=48.4$ $B_4=51.4$ $B_5=41.6$	52.27	Ⅲ级，状态一般，较健康	涞水河流域功能已有明显退化；水环境遭到破坏，但仍可维持其生态功能；水环境受到干扰后极易恶化，灾害时有发生。
11	$B_1=46.2$ $B_2=51.8$ $B_3=60.4$ $B_4=44.8$ $B_5=53.9$	52.56		
12	$B_1=36.2$ $B_2=41.2$ $B_3=50.6$ $B_4=34.8$ $B_5=42.8$	41.93	Ⅳ级，状态恶化，病态	涞水河流域功能严重退化，12月水环境受到较大破坏，水环境系统受到较大破坏，水环境受到干扰后不易恢复，且灾害时常发生。

4 结 论

（1）依据26项指标涞水河流域2008—2011年水环境质量健康评价结果为Ⅲ级，状态一般，较健康，而2011年1—4，10，11月水环境质量健康级别为Ⅲ级，状态一般，较健康，6—9月水环境质量健康级别为Ⅱ，状态良好，健康，5，12月水环境质量健康级别为Ⅳ，状态恶化，病态，与该流域实际生态情况相符。

（2）建立的干旱和半干旱流域水环境质量健康状态评价体系能满足诸如涞水河等类似的干旱和半干旱流域水环境质量健康状态评价需要，说明所建立的干旱和半干旱流域水环境质量健康评价体系是正确的、合理的，具有实用性和普适性。

［参 考 文 献］

[1] 王波，梁婕鹏. 基于不同空间尺度的河流健康评价方法探讨[J]. 长江科学院院报，2011，28(12)：32-35.

（下转第45页）

under the Auspices of the UNESCO. Oxford: Eolss Publishers, 2009.

[6] Kravčík M. Water for the Recovery of the Climate: A New Water Paradigm[R]. Typo: Typo Press, 2008.

[7] Haikai T, Sun Tuohuan, Zheng Zhili, et al. Auditing reforested watersheds on the loess plateau: Fangshan Shanxi [J]. Ecological Indicators, 2014, 41(6): 96-108.

[8] 杨朝飞. 善待洪水:还河流于自然[J]. 环境保护,2004(7):38-40.

[9] 王文科,李俊亭,王钊,等. 河流与地下水关系的演化及若干科学问题[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2007,37(2):231-238.

[10] 殷学文,俞孔坚,李迪华. 城市绿地景观格局对雨洪调蓄功能的影响[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[11] 黄威文,白晶. 北京山区小流域自然雨洪调蓄系统维护的景观途径:以沙涧河梁家园支流流域为例[C]//北京:2012 城市发展与规划大会论文集,2012.

[12] 王浩,王建华,秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展,2004,15(1):123-128.

[13] Haikai T. Landscape ecostructures for sustainable societies: Post-industrial perspectives[J]. New Zealand Journal of Soil and Health, 1999, 58(5): 19-21.

[14] Leo D, Nathan W, Jeff B, et al. Stream-bed and floodplain rehabilitation at Mulloon Creek, Australia: A financial and economic perspective[J]. The Rangeland Journal, 2013, 35(3): 339-348.

[15] 奥尔多·利奥波德. 沙乡年鉴[M]. 侯文惠译. 吉林长春:吉林人民出版社, 1997.

[16] Peter E Black. Watershed Hydrology [M] 2nd ed: New York: CRC Press, 1996.

[17] 肖长来,梁秀娟,王彪. 水文地质学[M]. 北京:清华大学出版社,2010.

[18] 吴保生,陈红刚,马吉明. 美国基西米河渠化工程对河流生态环境的影响[J]. 水利水电技术,2004,35(9):13-16.

[19] Edward A K. Environmental Geology[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1992.

[20] Roger H C, Peter G C, Sebastien L. Hyporheic zone exchange fluxes and residence times inferred from riverbed temperature and radon data[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(9): 1870-1881.

(上接第 40 页)

[2] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, et al. Rapid Bio-assessment Protocols for use in streams and wadeable rivers: Periphyton, Benthic Macroinver tebrates and Fish [M]. Washington D C: EPA841-B-99-002. US. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.

[3] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981,6(6):21-27.

[4] Martin Griffiths. 欧盟水框架指令手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[5] Kim J H, Oh H M, Kim I S, et al. Ecological health assessments of an urban lotic ecosystem using a multimetric model along with physical habitat and chemical water quality assessments[J]. International Journal of Environmental Research, 2013, 7(3):759-768.

[6] 曾小瑱,车越,吴阿娜. 3 种河流健康综合性评价方法的比较[J]. 中国给水排水,2007,23(4):92-96.

[7] Wright J F, Sutcliffe D W, Furse M T. Assessing the biological quality of fresh waters: RIVPACS, and other techniques[J]. Blood, 2000, 99(10):3493-3499.

[8] Smith M J, Kay W R, Edward D H D, et al. AusRivAS: Using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2):269-282.

[9] Wright J F, Armitage P D, Furse M T. Prediction of invertebrate communities using stream measurements [J]. Regul Rivers: Research & Management, 1989, 4(2):147-155.

[10] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术,2005,36(11):15-19.

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

[12] 李成,吴谦,胡满. 风险综合评价中指标权重确定方法对比研究[J]. 石油工业技术监督,2016,32(1):50-53.

[13] 武俊娴,毕如田,刘庚,等. 基于 DEM 的涑水河流域地表水文特征模拟与分析[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2009,29(5):397-399.