

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.021

基于云模型的黑龙江上中游河流健康评价

耿 芳,董增川,徐 伟

(淮海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:以黑龙江上中游为例,研究国际界河的河流健康评价。为了全面衡量该过程中的随机性与模糊性,将云模型引入河流健康评价。基于水文特征、形态特征、水体特征等 7 个层面选取了 16 个指标构建了黑龙江上中游河流健康评价指标体系,以 2013 年为典型年对其进行了河流健康评价。结果表明:黑龙江上中游 2013 年河流健康等级为“中”。分析了影响河流健康的主要因素,并针对性地提出了一系列河流治理措施:加强水污染控制、加固沿岸堤坝、退耕还林恢复湿地、实施生态调度等。

关键词:河流健康评价;云模型;国际界河;黑龙江上中游

中图分类号:X82 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)06-0131-05

River health assessment of upper and middle reaches of Heilongjiang River based on cloud model

GENG Fang, DONG Zengchuan, XU Wei

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Using the upper and middle reaches of the Heilongjiang River as an example, we assessed the health status of international boundary rivers in this study. In order to comprehensively analyze the randomness and fuzziness during the assessment, we introduced the cloud model into the study and constructed a river health assessment system for the upper and middle reaches of the Heilongjiang River. The criterion layer of the system contained seven factors, including river hydrology, river morphology, and characteristics of water, and the index layer of the system contained 16 indices. The system was used to assess the river health in the typical year of 2013. The results show that the river health was at the middle level in 2013. We also analyzed the main factors that affected the river health and put forward a series of measures for river management improvement, including enhancement of water pollution control, reinforcement of dams along the river bank, reforestation of cultivated land and restoration of wetlands, and implementation of ecological operation.

Key words: river health assessment; cloud model; international boundary river; upper and middle reaches of Heilongjiang River

河流是生物圈中的重要组成部分,在生物圈物质循环中发挥着很多作用,也是人类社会生存和发展的基础^[1]。黑龙江是中俄界河,其流域生态环境变化更是对两国居民的生存、生产与发展有着直接影响。近年来,两岸边境地区工业化、城镇化速度加

快,加上长期以来治理与保护工作不到位,黑龙江流域的生态环境遭受了严重的干扰与破坏。2013 年黑龙江流域发生特大洪灾,中俄双方均遭受巨大损失,再次提醒两国应进一步深入研究解决黑龙江流域的河流健康问题,在界河流域的河流健康保护工

基金项目:国家自然科学基金(41471014)

作者简介:耿芳(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向为水资源规划与管理。E-mail: m15295502252_1 @ 163.com

通信作者:董增川,教授。E-mail: zcdong@hhu.edu.cn

作方面加强合作。而只有建立一个全面、客观的评价指标体系,并采用科学的方法对河流健康进行评估分析,才能做出合适的管理与保护方案^[2]。因此,对国际界河进行河流健康评价有利于更好地管理和保护国际界河,具有十分重要的战略意义。

目前,国内外学者提出的河流健康评价方法众多,应用较为广泛的有层次分析法、物元分析法、集对分析法、模糊综合评价法等^[3]。遗憾的是这些方法均不能同时兼顾河流健康评价中不可避免的随机性与模糊性。而新近发展起来的云模型通过期望、熵和超熵 3 个数字特征将模糊性与随机性完全集成到一起,因此成为河流健康评价的优选方法。乔丹颖等^[4]曾将云模型引入水安全评价中,并用此方法对中运河的水安全进行评价,且通过与已有的模糊综合模型和集对分析模型比较,发现云模型是一种可行的评价方法。

本文以黑龙江上中游为研究对象,在借鉴和吸收前人理论研究和实践经验的基础上,通过遥感影像分析、野外实际调研,针对黑龙江流域的特点,建立了一套适合黑龙江上中游的河流健康评价指标体系,对其 2013 年河流健康状况进行综合评价,并进一步分析造成河流健康危机的主要原因,以期为流域的河流健康保护及管理提供科学的理论依据。

1 河流健康评价指标体系的构建

1.1 黑龙江上中游概况

黑龙江是中国第 3 大河流,跨中国、俄罗斯、蒙古国、朝鲜 4 个国家。它有南、北两源头,分别为额尔古纳河与石勒喀河,两源头在中国黑龙江省漠河县以西的洛古河村附近汇合。汇合点以下称为黑龙江干流。干流的上中游大部分为中俄界河,长度约为 1887 km,是世界上最长的一条界河。下游全部在俄罗斯境内,在俄罗斯的尼古拉耶夫斯克注入鞑靼海峡。本文结合工作实际情况,选取黑龙江上中游作为试点河段研究其河流健康评价。

1.2 评价指标体系的确定

河流健康评价指标体系应由一系列可衡量的动态指标构成,这些指标在能完整反映河流结构和功能现状的前提下,还需从社会服务功能的角度体现其河流健康态势^[5]。

针对黑龙江上中游地理条件、水体条件、生态环境状况等自然条件,结合国内外最近研究成果并咨询国内专家意见,筛选了河流健康评价指标体系中的关键因子,最终构建了比较全面的黑龙江上中游河流健康评价指标体系(表 1),该体系分为 4 个层次,每一层又分别选择能反映其主要特征的要素作

为评价指标,以避免遗漏和重复。第 1 层是目标层,以河流健康为总目标;第 2 层是控制层,包括河流自然环境系统和社会服务功能;第 3 层是准则层,包括水文特征、形态特征、水体特征等,从各个角度反映黑龙江上中游的河流健康态势;第 4 层是指标层,由河流封冻期、水利干扰程度、岸坡稳定性指数、河流连通阻隔指数等 16 个评价指标组成。

表 1 黑龙江上中游河流健康评价指标体系

目标层	控制层	准则层	指标层
河流健康	自然环境系统	水文特征	河流封冻期 $C_1(-)$
			水利工程干扰程度 $C_2(-)$
		形态特征	岸坡稳定性指数 $C_3(+)$
			河流连通阻隔指数 $C_4(+)$
		水体特征	适宜生态流量保证率 $C_5(+)$
			水功能区达标率 $C_6(+)$
		生物特征	生物多样性指数 $C_7(+)$
			植被结构完整性指数 $C_8(+)$
		生态环境特征	水土流失率 $C_9(-)$
			湿地保留率 $C_{10}(+)$
	社会服务功能	水资源开发利用水平	养殖覆盖率 $C_{11}(-)$
			水能资源开发率 $C_{12}(+)$
			通航保证率 $C_{13}(+)$
			景观资源开发率 $C_{14}(+)$
			供水保证率 $C_{15}(+)$
		防洪安全——防洪减灾保证率 $C_{16}(+)$	

注:“+”表示越大越好;“-”表示越小越好。

a. 水文特征。黑龙江流域冬季寒冷,冬雪期长,每年封冻期长达 5 个月,对航运及渔业都造成了一定的影响。此外,黑龙江流域当前的筑坝、水电站建设等都显著改变了河流的流速、流量等自然水文特性,从而影响河流功能的正常发挥。为此,采用封冻期、水利工程干扰 2 个指标来反映河流水文状况。

b. 形态特征。受来水来沙的影响,黑龙江流域河床演变剧烈而复杂,同时,修筑水工建筑物等也会造成河床的变形。为反映黑龙江上中游形态特征,此项选取岸坡稳定性指数、河流连通阻隔指数 2 个指标。

c. 水体特征。水体特征能直接反映河流健康状况。这项用适宜生态流量保证率、水功能区达标率 2 个指标来反映。

d. 生物特征、生态环境特征。这 2 项能够反映黑龙江上中游河流系统自然演替及人类活动对其作用的综合结果。因此,分别用生物多样性指数、植被结构完整性指数和水土流失率、湿地保留率共 4 个指标来反映。

e. 水资源开发利用水平。安全的河流还应具有经济社会服务功能,通常表现在人类对水资源的开发利用上。为此,选取养殖覆盖率、水能资源开发率、通航保证率、景观资源开发率、供水保证率 5 个指标来反映水资源开发利用水平。

f. 防洪安全。黑龙江流域由于气候、地貌、土壤、植被等自然条件十分复杂,近年来洪水十分频繁。因此,此项从防洪减灾保证率的角度反映河流健康态势。

1.3 评价指标体系分级标准及权重的确定

根据国家和地方规定的相关标准、国家和地方发展规划的目标和要求、现有研究成果以及现状分析结果等确定了黑龙江上中游河流健康评价的标准。一些指标如河流封冻期、水土流失率等,可采用查阅历史资料、遥感数据分析的方式来确定分级标准;一些指标如水利工程干扰程度、岸坡稳定性指数,则需采用现场调查以及拍照对比的方式。结合国内外河流健康等级分级情况,该标准将河流健康等级划分为5个评价等级,即I(优)、II(良)、III(中)、IV(差)、V(极差)(表2)。

为避免河流健康评价指标赋权的不确定性,采用组合赋权法确定指标权重。组合赋权法是一种综合主观和客观赋权结果的赋权方法,使评价结果更加真实与可靠^[6]。先用层次分析法和熵值法分别从主观和客观角度计算黑龙江上中游河流健康评价指标体系的权重值,利用统计学中 spearman 秩相关系数对两种方法赋权结果进行一致性检验,在两者满足一致性的基础上,最后依照博弈论的均衡理论对两者进行合成,计算黑龙江上中游河流健康评价指标体系的组合权重值(表2)。

2 基于云模型的河流健康评价方法

2.1 基于云模型的河流健康评价方法思路

在已确定评价指标、指标权重及评价标准的基础上,基于云模型的河流健康评价方法思路如下:
①确定云模型的3个数字特征;②将河流的实测数据带入正态云发生器,生成该评价指标隶属于各个河流健康级别的确定度矩阵;③将该确定度矩阵乘以评价指标的权重向量 ω ,即得河流隶属于各个河流健康级别的确定度向量,确定度最大值所在的级别即为该河流的河流健康级别。

2.2 云模型参数确定

云模型有期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 3个基本数字特征。

可以根据下述方法确定云模型的3个数字特征:对于某个河流健康级别,若其评价标准具有上下边界,形如 $[B_{ij,\min}, B_{ij,\max}]$,云的3个数字特征一般通过式(1)计算:

$$\begin{cases} E_{x_{ij}} = \frac{B_{ij,\max} + B_{ij,\min}}{2} \\ E_{n_{ij}} = \frac{B_{ij,\max} - B_{ij,\min}}{6} \\ H_e = C \end{cases} \quad (1)$$

式中: $B_{ij,\max}$ 、 $B_{ij,\min}$ 分别为第*i*个指标、第*j*个级别的上、下边界; $E_{x_{ij}}$ 、 $E_{n_{ij}}$ 分别为第*i*个指标、第*j*个级别的期望和熵; H_e 为超熵,为常数,可根据变量的模糊阈值进行调整^[7]。

对于单边界的情况,形如 $(-\infty, B_{ij,\max}]$ 或 $[B_{ij,\min}, +\infty)$,可先根据数据的上下限确定其缺省边界参数或期望值,然后再参照式(1)计算云的数字特征^[5]。

2.3 云模型的确定度计算

读取河流的实测值,代入正态云发生器可生成确定度矩阵 $U = [u_{ij}(x)]_{M \times N}$ 。

对于越小越好的指标:

当 $E_{x_{i1}} \leq x_i \leq E_{x_{iN}}$ 时:

$$u_{ij}(x) = e^{-\frac{(x_i - E_{x_{ij}})^2}{2(E_{n_{ij}})^2}} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

当 $x_i < E_{x_{i1}}$ 时:

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = 1 \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

当 $x_i > E_{x_{iN}}$ 时:

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = N \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (4)$$

对于越大越好的指标:

当 $E_{x_{i1}} \leq x_i \leq E_{x_{iN}}$ 时:

$$u_{ij}(x) = e^{-\frac{(x_i - E_{x_{ij}})^2}{2(E_{n_{ij}})^2}} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

当 $x_i > E_{x_{i1}}$ 时:

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = 1 \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

当 $x_i < E_{x_{iN}}$ 时:

表2 黑龙江上中游河流健康评价指标标准及权重

等级	C_1/d	$C_2/\%$	C_3	C_4	$C_5/\%$	$C_6/\%$	C_7	$C_8/\%$	$C_9/\%$	$C_{10}/\%$	$C_{11}/\%$	$C_{12}/\%$	$C_{13}/\%$	$C_{14}/\%$	$C_{15}/\%$	$C_{16}/\%$
I	0	0	>0.8	>0.8	≥80	>90	>3	>70	<10	>90	≥50	>90	>95	>75	>95	>90
II	0~100	0~30	0.5~0.8	0.6~0.8	60~80	80~90	2.0~3.0	50~70	10~15	80~90	40~50	80~90	85~95	50~75	85~95	80~90
III	100~150	30~50	0.2~0.5	0.4~0.6	50~60	70~80	0.5~2.0	25~50	15~25	70~80	30~40	70~80	70~85	25~50	85~95	80~90
IV	150~200	50~70	0.05~0.2	0.2~0.4	30~50	60~70	0.5~1.0	10~25	25~30	60~70	20~30	60~70	60~70	15~25	60~70	60~70
V	>200	>70	<0.05	<0.2	<30	<60	<0.5	<10	>30	<60	<20	<60	<60	<15	<60	<60
权重	0.1	0.097	0.049	0.04	0.107	0.108	0.061	0.03	0.057	0.035	0.052	0.058	0.056	0.057	0.05	0.043

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = N \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (7)$$

式(2)和式(5)即为正态云发生器。

根据上述方法计算出确定度矩阵 $U = [u_{ij}(x)]_{M \times N}$ 后,必须对各个指标的确定度向量进行标准化处理,令

$$u_{ij}(x)^* = \frac{u_{ij}(x)}{\sum_{j=1}^N u_{ij}(x)} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

然后,根据式(9)利用权重向量和标准化后的确定度矩阵计算河流健康综合确定度向量 $v = [v_1, v_2, \dots, v_N]$,再结合最大确定度原则,判断河流健康等级。

$$v = \omega^T U \quad (9)$$

3 黑龙江上中游河流健康评价结果

3.1 河流健康评价结果及成因分析

结合资料搜集的情况,将2013年作为典型年对黑龙江上中游河流健康进行评价。根据文献[8-9]获取2013年黑龙江上中游河流健康评价各指标特征值,结合前文中介绍的正向云发生器,计算指标的确定度,得到的确定度矩阵 U 见式(10)。

$$U = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.32 & 0.68 & 0 \\ 0 & 0.81 & 0.1 & 0.09 & 0 \\ 0 & 0 & 0.56 & 0.32 & 0.12 \\ 0 & 0 & 0.64 & 0.16 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.51 & 0.39 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.66 & 0.34 & 0 \\ 0.03 & 0.91 & 0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0.82 & 0.13 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.65 & 0.15 & 0 \\ 0 & 0.28 & 0.62 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.54 & 0.35 & 0.11 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 & 0 \\ 0.72 & 0.26 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.63 & 0.32 & 0.05 \\ 0 & 0.93 & 0.07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0.86 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据各评价指标的确定度,对应上文指标体系分级标准,可以直观全面地对黑龙江上中游的河流健康状况进行分析。由式(10)可知,黑龙江上中游水文特征层面中,河流封冻期对“差”级的接近程度相对大些,为0.68,这说明黑龙江中上游河流封冻期时间较长,基本在100~200d范围内,实际上该区域每年大约有5个月左右的冰封期,这是由其位于中高纬度寒冷地区的地理位置决定的。水利干扰

程度对“良”级的接近程度较高,为0.81,说明该区域的生态环境受水利工程的干扰程度较小。形态特征下的各指标对“中”级的确定度较大,岸坡稳定性指数、河流连通阻隔指数主要反映了河岸的稳定和连通情况,表明该区域水利工程建设对河流地理空间的稳定性和连续性有轻微破坏。水体特征下的各指标最大确定度出现在“中”、“差”等级,这表明黑龙江上中游水体健康态势并不乐观。首先河道的生态流量得不到充分保证,这是因为黑龙江流域的社会、经济用水量增加以及水利工程的兴建,改变了河流的水文情势。其次,流域内水功能区达标率不高,究其原因,一方面是黑龙江流域地理位置较偏,城市基础设施建设缓慢,城市排水及工业污水得不到很好的处理;另一方面是松花江作为黑龙江流域最大的支流也是其最重要的污染源。生物特征下的生物多样性及植被结构完整性对“良”级的确定度均很大,说明这两项指标的安全态势较好,反映了河流现有物种丰富,完整性较高。生态环境特征下的各指标对“中”级的确定度较大。其中水土流失率和湿地保存率都反映了流域人类活动对河流生态健康的影响。黑龙江中上游沿江平原区植被、湿地遭到破坏被开垦为农田,导致该流域水土保持能力降低,水土流失还跟该区域的河床地质条件及寒冷气候有关。水资源开发利用水平下的养殖覆盖率指标和水能资源开发率、景观资源开发率指标基本上隶属于“中”等级,黑龙江流域的水资源极为丰富,水力动能资源也较为集中。通航保证率对“优”级的确定度较大,这是因为黑龙江流域水位比较稳定,水量丰富,水深均在2m以上,且河道比降小,是仅次于长江通航里程的深水航道。供水保证率对“良”级的确定度较大。以上这些指标值都反映了河流具有一定的社会服务功能水平。但黑龙江上中游防洪安全下的防洪减灾保证率指标对“差”级的确定度非常大,为0.86,说明黑龙江流域河流防洪能力不能够满足经济社会的要求,亟需采取工程措施,进一步提高防洪能力。最后,根据式(9)计算黑龙江上中游河流健康综合确定度向量见式(11)。

$$v = [0.042, 0.255, 0.401, 0.264, 0.037] \quad (11)$$

因此,根据最大确定度原则,黑龙江上中游2013年河流健康等级为“中”。通过研究发现,黑龙江上中游的河流健康状况虽然整体上属中等级别,但仍存在一些不可忽视的健康问题。综上,人类不合理的生产活动是造成河流健康状况不断恶化的主导因素。黑龙江上中游整体水质尚好,但流域内的一些支流却受到严重污染并对部分河段造成影响;湿地围垦、毁林毁草等造成流域内湿地减少、水土流

失问题严重;水利工程的兴建对河床的冲蚀也极易导致河道演变,水土流失;而由于过量捕捞、水环境污染及流域生态破坏等因素,流域内生物多样性也有所减少^[10]。

3.2 河流健康治理对策

如何对已经受损的河流自然环境系统和社会服务功能进行修复,使河流保持可持续发展状态已经成为两国河流管理者和公众面临的重要问题之一^[11]。针对黑龙江上中游河流健康问题,提出以下治理对策:

a. 加强各种水体污染源的控制。对流域内的采金作业采取污染防治措施,加强船舶运输管理,同时要控制流域内工业和生活污水的排放。

b. 抓紧时间采取切实有效措施进行沿岸堤坝加固,加强基础设施建设管理,防止新的洪水灾害发生。

c. 保护流域内的植被、森林、湿地和土壤,严禁大规模毁林开荒,按计划退耕还林还草,恢复湿地,建造防护林,严格控制因人为破坏而引起的水土流失。

d. 在节水体系建设的基础上,对水利工程的调度方式进行调整,实施生态调度,以满足流域主要河段的生态需水要求,从而达到黑龙江流域水生生态保护与修复的目的。

4 结 语

a. 针对黑龙江上中游实际特点,在考虑河流自然环境系统和社会服务功能的基础上,从7个层面选取了16个指标构建了黑龙江上中游河流健康评价指标体系,并把河流健康分为“优”、“良”、“中”、“差”、“极差”5个等级。

b. 根据建立的评价指标体系,采用层次分析法和熵值法组合赋权的方法确定其权重,并利用云模型方法对黑龙江上中游2013年河流健康状况进行评价,评价结果为“中”。

c. 影响黑龙江上中游河流健康的主要因素主要包括工农业开发、水利工程兴建、过度开采等人类干扰活动,而河流健康治理可以在加强水污染治理、沿岸堤坝加固、退耕还林恢复湿地、水利工程生态调度等方面采取措施。

参考文献:

[1] 戴艳文,贾生元. 国际界河水资源开发利用与保护战略[J]. 黑龙江环境通报, 2000, 24(2): 32-34. (DAI Yanwen, JIA Shengyuan. Discussion on exploitation of water resource in international boundary river and its

protection strategies [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2000, 24(2): 32-34. (in Chinese))

[2] 曹光兰. 图们江流域河流生态系统健康评价研究[D]. 延边:延边大学,2012.

[3] 王淑云,刘恒,耿雷华,等. 水安全评价研究综述[J]. 人民黄河, 2009, 31(7): 11-13. (WANG Shuyun, LIU Heng, GENG Leihua, et al Review of researches on water security assessment [J]. Yellow River, 2009, 31(7): 11-13. (in Chinese))

[4] 乔丹颖,刘凌,闫峰,等. 基于云模型的中运河水安全评价[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 26-29. (QIAO Danying, LIU Ling, YAN Feng, et al. Assessment on water security of Zhong Canal based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 26-29. (in Chinese))

[5] 王远坤. 水安全评价体系及其应用研究[D]. 济南:山东大学,2006.

[6] 山成菊,董增川,樊孔明,等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 622-628. (SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(6): 622-628. (in Chinese))

[7] 王国胤,李德毅. 云模型与粒计算[M]. 北京:科学出版社,2012,6-9.

[8] 黑龙江省水利局. 黑龙江水资源公报(2013年)[R]. 哈尔滨:黑龙江省水利厅,2013.

[9] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴(2013年)[M]. 北京:中国统计出版社,2013.

[10] 田坤. 黑龙江流域生态环境可持续发展战略研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.

[11] 朱卫红,曹光兰,李莹,等. 图们江流域河流生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3969-3977. (ZHU Weihong, CAO Guanglan, LI Ying, et al. Research on the health assessment of river ecosystem in the area of Tumen river basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3969-3977. (in Chinese))

(收稿日期:2016-06-14 编辑:徐 娟)

