

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0140

宗永臣,黄德才,段小龙,等. 组合的模糊 Borda 法在林芝市朗县农村饮用水安全评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2019,17(6):95-101. ZONG Y C, HUANG D C, DUAN X L, et al. Application of combined fuzzy Borda method for evaluation of rural drinking water safety of Lang County in Nyingchi City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019,17(6):95-101. (in Chinese)

组合的模糊 Borda 法在林芝市朗县农村 饮用水安全评价中的应用

宗永臣^{1,2,3,4,5,6}, 黄德才⁶, 段小龙⁶, 陆光华⁶

(1. 西藏农牧学院 高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 青藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 3. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000; 4. 西藏自治区高原森林生态实验室, 西藏 林芝 860000; 5. 西藏自治区生态安全联合实验室, 西藏 林芝 860000; 6. 西藏农牧学院 水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

摘要:以林芝市朗县 18 个村庄为评价对象, 采用综合污染指数法、主成分分析法两种评价法进行水质安全评价, 为避免各种评价法权重赋值对评价结果的影响, 将两种方法的评价结果运用组合的模糊 Borda 法进行了二次评价, 研究结果显示: 组合的模糊 Borda 法相对综合污染指数法、主成分分析法两种方法具有较高的区分度; 经评价结果和评价排序分析可以发现综合污染指数法、主成分分析法、组合的模糊 Borda 法 3 个排序具有相近的趋势, 较高的斯皮尔曼等级相关系数和肯达尔相关系数也证明了运用组合的模糊 Borda 法开展农村饮用水源安全评价是可行的。林芝市朗县 18 个村庄饮用水安全评价结果表明, 帮玛村、托麦村、冲康村、堆村、卓村、来义村、列村、秀村、扎西塘村、杰村、娘村、康玛村、嘎贡村、东雄村、多龙村、热米村、拉多村、桑木村等 18 个村饮用水源安全性依次递减。

关键词:综合污染指数法; 主成分分析法; 组合的模糊 Borda 法; 饮用水; 安全评价

中图分类号: TV68; X824 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of combined fuzzy Borda method for evaluation of rural drinking water safety of Lang County in Nyingchi City

ZONG Yongchen^{1,2,3,4,5,6}, HUANG Decai⁶, DUAN Xiaolong⁶, LU Guanghua⁶

(1. Research Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China; 2. Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Nyingchi 860000, China; 3. National Key Station of Field Scientific Observation & Experiment, Nyingchi 860000, China; 4. Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Tibet Autonomous Region, Nyingchi 860000, China; 5. United Key Laboratories of Ecological Security, Tibet Autonomous Region, Nyingchi 860000, China; 6. Water Conservancy Project & Civil Engineering College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China)

Abstract: Comprehensive pollution index and principal component analysis (PCA) method were used to perform water safety evaluation based on drinking water sources obtained from 18 villages of Lang County in Nyingchi City. In order to avoid the

收稿日期: 2019-01-25 修回日期: 2019-07-08 网络出版时间: 2019-07-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190717.1323.004.html>

基金项目: 西藏地区自然科学基金(XZ 2018 ZR G-20); 国家自然科学基金(51868069; 51769034); 西藏自治区高等学校科研创新团队项目; 西藏农牧学院研究生创新计划(STX2018-04)

作者简介: 宗永臣(1976—), 男, 河南内黄人, 副教授, 在读博士, 主要从事水污染控制工程研究。E-mail: zyc_2001@sohu.com

通信作者: 陆光华(1969—), 女, 吉林乾安人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水环境保护与水生态安全方面研究。ghlu@hhu.edu.cn

influence of weight assignment on single evaluation method, two methods were used by combining the evaluation method based on Fuzzy Borda. The results showed that the combined evaluation method based on Fuzzy Borda had higher discrimination compared to comprehensive pollution index and principal component analysis method. Results revealed that comprehensive pollution index assessment, PCA, combined evaluation method based on Fuzzy Borda had similar trend. The higher Spearman coefficient and Kendall correlation coefficient had also proven that the fuzzy Borda method was a feasible option for rural drinking water safety assessment. The results of drinking water safety evaluation assessment in 18 villages showed that the drinking source of villages such as Bangma, Tomai, Chongkang, Dui, Zhuo, Laiyi, Lie, Xiu, Zhaxitang, Jie, Niang, Kangma, Gagong, Dongxiong, Dorong, Remi, Lado and Sangmuin was turned decreasing gradually.

Key words: comprehensive pollution index assessment; principal component analysis (PCA); combined evaluation method based on fuzzy Borda; drinking water sources; safety evaluation

生活饮用水的卫生安全与人民的健康联系密切。保障饮用水安全应注重事前、事中和事后的全过程管控,而全过程管控的依据为饮用水安全评价,故饮用水安全评价是全过程管控的核心环节。目前,农村饮用水安全评价方法主要有层次分析法^[1]、模糊评价法^[2]、熵权法^[3]、主成分分析法^[4]等。大部分研究只使用一种方法评价饮用水安全问题,但由于不同的评价方法评价同一对象时往往得到不同的评价结果,而这个问题在农村饮用水安全评价中却未能得到足够的认识以及合理的解决,另外尚需考虑饮用水的安全特点及其区域差异性^[5]。在此,文中以西藏林芝市朗县 18 个村的饮用水安全评价为例,运用组合的模糊 Borda 法对其进行安全评价,并据此建立了组合的模糊 Borda 法模型,开展了 18 个村的饮用水安全评价,为饮用水源的选取和后续饮用水水源保护提供相关的决策依据。

1 材料及方法

文中以林芝市朗县 18 个村的饮用水现场监测数据为依据,采用了以水质综合污染指数法和主成分分析法为组合的模糊 Borda 法的评价模型。

1.1 区域概况

朗县作为林芝市的一个边陲县,位于西藏自治区东南部,林芝市西南部,地理坐标为 $92^{\circ}28' \sim 93^{\circ}31'E, 28^{\circ}40' \sim 29^{\circ}29'N$ 。其位于喜马拉雅山北麓,雅鲁藏布江中下游,面积为 4 200 多 km^2 ^[1]。全县辖 6 个乡镇,51 个行政村和 1 个居委会,总人口 1.8 万余人,其大部分行政村由于相对分散、地理位置偏远和人口数量相对较少,实现集中供水具有较大的难度。鉴于现阶段各村饮用水均为天然地表水,其水源各自独立(均为溪水或湖水),该区域植被覆盖率较低,天然饮用水季节性波动大^[6],故有针对性的开展农村饮用水安全评价并采用合理整治措施已经成

为今后农村饮用水水源选取的关键环节所在。

1.2 数据来源

本研究监测点依据 18 个村的饮用水工程建设需求布设(具体监测点位置见图 1)。监测时间为 2018 年 10 月,监测频率为一次,主要检测项目为锌、铜、铅、氟化物、挥发酚类、硒、DO、高锰酸钾指数、TN、TP 等 10 项^[7]指标,其检测项目的确定主要依据相关文献^[8-10]。相关监测项目的分析方法依据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和《水和废水监测分析方法》^[11]。

1.3 饮用水安全评价方法

目前,较为常见的饮用水安全评价方法主要有:综合污染指数法、主成分分析法、组合的模糊 Borda 法等,本文拟采用基于综合污染指数法和主成分分析法的组合的模糊 Borda 法开展饮用水安全评价。

1.3.1 综合污染指数法

综合污染指数法^[12]是针对各污染指标相对的污染指数开展统计,并算出能够代表取样水体污染程度的数值,该方法可得出所研究水体的综合污染程度。综合污染数值的计算是在各单项污染指数的基础上运算得到的。

1.3.2 主成分分析法

主成分分析法(PCA)^[13]能够从诸多变量中筛选出关键且独立的综合因子,在保留原始核心信息的同时,使彼此之间不相关联,比原始变量更具有优势,已被广泛应用于各类水质评价。

1.3.3 组合的模糊 Borda 法

组合的模糊 Borda 法^[14]可以提高组合评价结果的准确性和有效性,因此将组合的模糊 Borda 法用于组合评价,能更好的利用已有的评价信息。组合的模糊 Borda 法在进行评价结果组合时具体计算步骤如下。计算各单一评价方法对评价项目得分的隶属度,即该评价方法决定其得到好的评价结果的能力。

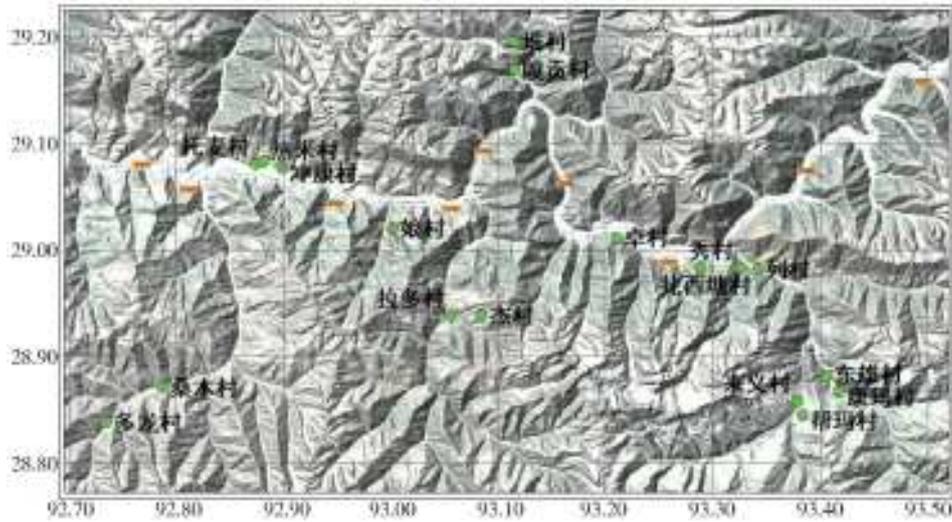


图 1 监测点位置

Fig. 1 Location map of monitoring points

$$\mu_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \times 0.9 + 0.1 \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 项在第 j 种方法的得分; μ_{ij} 为第 i 项在第 j 种方法下属于“优”的隶属度。计算第 i 项处于 h 位的模糊频数 P_{hi} 及模糊频率 W_{hi} 。公式为

$$P_{hi} = \sum_{j=1}^n \delta_{hi} \mu_{ij} \quad (2)$$

$$W_{hi} = \frac{p_{hi}}{\sum_h P_{hi}} \quad (3)$$

其中, n 为使用的单一评价方法数, $\delta_{hi} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 项排在第 } h \text{ 位} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$, 模糊频率 W_{hi} 反应了单一评价模型评价得分值的差异。将排序名次转化为得分

$$Q_{hi} = \frac{1}{2} (q-h)(q-h+1) \quad (4)$$

式中: Q_{hi} 为第 i 项在 h 位的得分; q 为评价项目总数。计算第 i 项的模糊 Borda 数得分为

$$B_i = \sum W_{hi} Q_{hi} \quad (5)$$

1.3.4 算法检验

各项的得分被用来开展项目评价, 为了便于验证算法的可靠性, 经常采用斯皮尔曼等级相关和肯达尔相关系数开展事前检验和事后检验。具体计算如下。

斯皮尔曼等级相关系数^[15]属于事前检验, 主要为了验证综合污染指数法和主成分分析法的评价结果是否具有 consistency, 具体计算公式为

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

式中: d_i 为各项的等级差值; n 为评价的项目数。

斯皮尔曼等级相关取值区间为 $[0, 1]$, 且当取值

越接近于 1, 其相关性越好。

肯达尔相关系数^[16]属于事后检验, 主要是为了验证组合的模糊 Borda 法结果的有效性, 即检验组合的模糊 Borda 法与单一评价法所得结果的差异性。具体计算公式为

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} K^2 (n^3 - n)} \quad (7)$$

式中: n 意义同上; K 为采用的评价方法数; S 的计算式为

$$S = \sum_{i=1}^n R_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i \right)^2 \quad (8)$$

肯达尔相关系数取值区间为 $[0, 1]$, 且当取值越接近于 1, 其相关性越好。

2 结果与分析

在此, 组合的模糊 Borda 法主要有以下步骤: 运用综合污染指数法和主成分分析法分别对监测数据开展安全性评价, 针对上述评价结果开展组合的模糊 Borda 法评价, 并运用斯皮尔曼等级相关和肯达尔相关系数对评价结果开展一致性检验。

2.1 综合污染指数法评价结果

根据《全国城市饮用水水源地安全状况评价技术细则》(2005) 的要求, 河流水源地水质评价从一般性污染物污染水平、有毒污染物污染水平两个方面进行综合评价。其综合评价指数表达式为: 河流型和地下水水源地水质状况指数 = $0.3 \times$ 一般污染物指数 + $0.7 \times$ 有毒污染物指数。其中: 一般污染物指数指标为锌、铜、DO、高锰酸钾指数、TN、TP 六项; 有毒污染物指数指标为铅、氟化物、挥发酚类、硒四项。具体运算过程从略, 计算结果详见表 1。

表 1 综合污染指数法评价结果

Tab. 1 Evaluation results based on comprehensive pollution index method

村庄	一般污染物指数	有毒污染物指数	综合污染指数	排序
冲康村	0.832 5	0.962 5	0.923 5	4
娘村	0.798 8	1.167 5	1.056 9	15
托麦村	0.783 6	0.982 5	0.922 8	3
卓村	0.787 5	1.045 0	0.967 7	7
扎西塘村	0.876 8	0.992 5	0.957 8	5
堆村	0.918 4	0.850 0	0.870 5	2
嘎贡村	0.662 8	1.237 5	1.065 1	16
热米村	0.840 1	1.302 5	1.163 8	18
桑木村	0.882 9	1.212 5	1.113 6	17
多龙村	0.921 3	1.102 5	1.048 2	12
拉多村	0.996 2	1.082 5	1.056 6	14
杰村	0.885 9	0.997 5	0.964 0	6
秀村	0.849 0	1.087 5	1.016 0	11
列村	0.872 6	1.035 0	0.986 3	8
来义村	0.867 0	1.042 5	0.989 9	9
帮玛村	0.720 0	0.867 5	0.823 3	1
康玛村	0.838 2	1.057 5	0.991 7	10
东雄村	0.894 3	1.122 5	1.054 0	13

由综合污染指数法评价结果表 1 可知,各村饮用水水源评价排序如下:帮玛村、堆村、托麦村、冲康村、扎西塘村、杰村、卓村、列村、来义村、康玛村、秀村、多龙村、东雄村、拉多村、娘村、嘎贡村、桑木村、热米村;朗县 18 个村一般污染物指数均属于 I 类水质,其整体水质较好;有毒污染物指数中属于 I 类水质的村庄有 6 个,其余均属于 II 类水质,即 18 个村总体上属于 1 至 2 级水平;综合污染指数中 10 个村庄属于 I 类水质,其余均属于 II 类水质,其总体上也属于 1 至 2 级水平,其中来义村、康玛村、列村、卓村评价结果略有不同。以上评价结果显示 18 个村庄的饮用水水源现状较好,其一般污染物、有毒污染物在安全范围内,可以作为饮用水水源使用;各水源地的一般污染物指数、有毒污染物指数和综合污染指数区分并不十分明显^[17-18]。

2.2 主成分分析法评价结果

运用主成分分析法对朗县 18 个村饮用水安全性开展相关评价,其中标准化矩阵、相关系数矩阵计算均从略。主成分提取原则:初始特征值不小于 1.00;累计方差不小于 85%。主成分分析法详细计算过程从略,朗县 18 个村庄的主成分分析法评价结果见表 2。

由表 2 可知,主成分分析法下各村水源评价排

表 2 主成分分析法评价结果

Tab. 2 Evaluation results based on Principal component analysis method

村庄	评价结果	排序	村庄	评价结果	排序
冲康村	-0.402 4	7	多龙村	0.494 1	14
娘村	-0.578 1	4	拉多村	1.071 2	18
托麦村	-0.673 3	3	杰村	0.774 0	16
卓村	-0.485 6	6	秀村	-0.233 5	8
扎西塘村	0.821 1	17	列村	-0.003 7	10
堆村	-0.203 2	9	来义村	-0.488 5	5
嘎贡村	-0.783 3	1	帮玛村	-0.716 1	2
热米村	0.170 5	11	康玛村	0.320 3	13
桑木村	0.596 8	15	东雄村	0.319 6	12

序为:嘎贡村、帮玛村、托麦村、娘村、来义村、卓村、冲康村、秀村、堆村、列村、热米村、东雄村、康玛村、多龙村、桑木村、杰村、扎西塘村、拉多村。嘎贡村的饮用水水源质量最好,而拉多村饮用水水源相对最差。从相关性分析来看,锌、铜、铅、氟化物、挥发酚类、硒、DO、高锰酸钾指数、TN、TP 等 10 个指标均大于 0.84,其中相关性最小是硒为 0.847,相关性最大是 TN 为 0.961。从主成分荷载大小来看,影响各村庄的水质因素可以归纳为如下几类:锌、铜、DO、挥发酚类与第一主成分的相关系数的绝对值达到了 0.536,说明各水源具有一定的有机物;铅、硒相关系数绝对值超过 0.753,说明了水中重金属污染状态;氟化物、TP 对第三主成分相关系数为 0.525,反映水中有机污染水平较为显著。另外 TN 和高锰酸钾指数对第四主成分和第五主成分的相关系数分别为 0.889 和 0.581,说明了水体中有机物水平,TN 作为水生生物的主要营养来源在水体中不断上升,会导致水生生物的数量增加,生化需氧量随之上升^[19-20]。各主成分的贡献率见图 2。

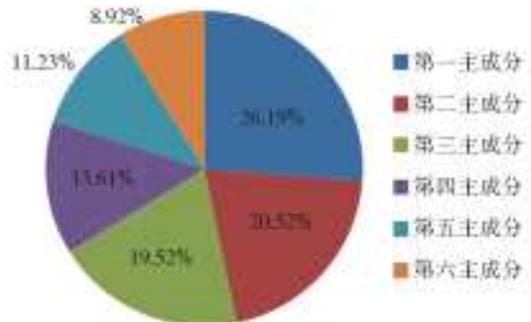


图 2 各主成分的贡献率

Fig. 2 Contribution rate of each principal component

2.3 组合的模糊 Borda 法评价结果

2.3.1 评价结果

运用组合的模糊 Borda 法分别计算隶属度、模

糊频数、模糊频率、排序得分、模糊 Borda 数得分并开展排序,得到的计算结果见表 3。

表 3 组合的模糊 Borda 法评价结果
Tab. 3 Results based on Fuzzy Borda method

村庄	综合污染指数法		主成分分析法		组合的模糊 Borda 法	
	评价结果	排序	评价结果	排序	评价结果	排序
冲康村	0.923 5	4	-0.402 4	7	87.903 0	3
娘村	1.056 9	15	-0.578 1	4	27.546 3	11
托麦村	0.922 8	3	-0.673 3	3	120.000 0	2
卓村	0.967 7	7	-0.485 6	6	70.038 9	5
扎西塘村	0.957 8	5	0.821 1	17	31.730 3	9
堆村	0.870 5	2	-0.203 2	9	78.7475	4
嘎贡村	1.065 1	16	-0.783 3	1	20.874 5	13
热米村	1.163 8	18	0.170 5	11	10.084 4	16
桑木村	1.113 6	17	0.596 8	15	3.350 9	18
多龙村	1.048 2	12	0.494 1	14	15.400 7	15
拉多村	1.056 6	14	1.071 2	18	4.175 0	17
杰村	0.964 0	6	0.774 0	16	29.662 0	10
秀村	1.016 0	11	-0.233 5	8	38.146 6	8
列村	0.986 3	8	-0.003 7	10	45.994 7	7
来义村	0.989 9	9	-0.488 5	5	59.273 1	6
帮玛村	0.823 3	1	-0.716 1	2	143.308 1	1
康玛村	0.991 7	10	0.320 3	13	24.696 4	12
东雄村	1.054 0	13	0.319 6	12	17.833 4	14

由组合的模糊 Borda 法评价结果表 3 可知,帮玛村、托麦村、冲康村、堆村、卓村等组合的模糊 Borda 法结果排序靠前,桑木村、拉多村、热米村、多龙村、东雄村等排序较为靠后。组合的模糊 Borda 法排序与综合污染指数法评价排序差别并不十分明显,但是主成分分析法的娘村、嘎贡村、杰村、热米村、堆村、扎西塘村等 6 个村与综合污染指数法、组合的模糊 Borda 法排序差别较大,上述 6 个村中娘村最大排序差值 11 名(主成分分析法综合污染指数法之差)、嘎贡村最大排序差值 15 名(主成分分析法综合污染指数法之差)、杰村最大排序差值 10 名(主成分分析法综合污染指数法之差)、热米村最大排序差值 5 名(主成分分析法综合污染指数法之差)、堆村最大排序差值 7 名(主成分分析法综合污染指数法之差)、扎西塘村最大排序差值 12 名(主成分分析法综合污染指数法之差)。以上各村最大排序差值均是产生于综合污染指数法和主成分分析法之间,而组合的模糊 Borda 法评价结果的合理性尚需进一步讨论和验证。

2.3.2 结果检验

为了检验综合污染法、主成分分析法、组合的模

糊 Borda 法评价结果的合理性与可靠性,需要分别对综合污染指数法和主成分分析法开展斯皮尔曼等级相关系数检验即事前检验^[21]以及对综合污染指数法、主成分分析法和组合的模糊 Borda 法进行肯达尔等级相关系数计算即事后检验^[22]。经计算得到综合污染指数法和主成分分析法的斯皮尔曼等级相关系数为 0.8368,其评价结果呈现密切的正相关性,即这两种评价方法所得评价结果具有较高的一致性,可以运用这两种方法开展组合的模糊 Borda 法。综合污染指数法、主成分分析法和组合的模糊 Borda 法的肯达尔相关系数为 0.710 1,即组合的模糊 Borda 法的结果与原始方法的结果密切相关,主要体现在综合污染指数法和主成分分析法的评价结果与组合的模糊 Borda 法的排名大致相当,有部分排序差别较大,其中综合污染指数法和组合的模糊 Borda 法呈现极高的一致性。

2.3.3 结果分析

为了对比综合污染指数法、主成分分析法与组合的模糊 Borda 法的评价结果的相关性,3 种评价方法的结果和排名的对比分别见图 3 和图 4。

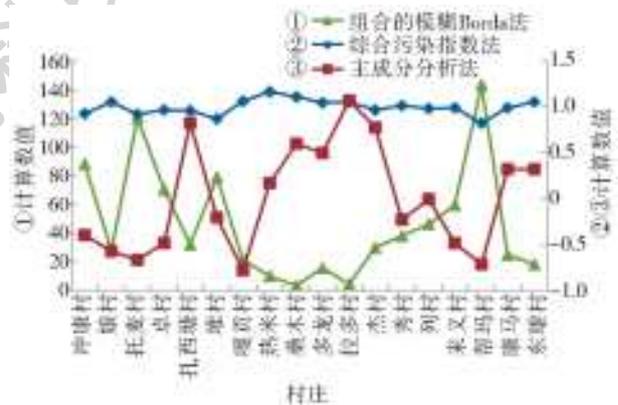


图 3 3 种评价结果对比

Fig. 3 Comparison plot of three evaluation results

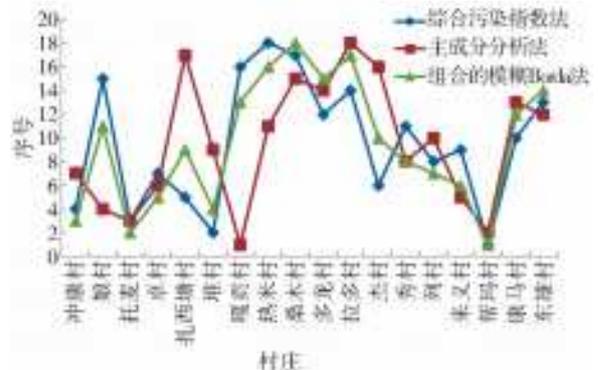


图 4 3 种评价排序对比

Fig. 4 Comparison plot of three evaluation ranks

根据 3 种评价结果对比图可以看出各村综合污染指数法所得评价结果较为接近,各水源地评价价值连线近似为直线,其区分度极其不显著;而各村的主

成分分析法评价结果波动较大,但是波动区间较狭小,其区分效应并不显著;而组合的模糊 Borda 法所得评价结果波动较大、波动区间较大,其区分效应较为显著。

由图 4 可知,综合污染指数法、主成分分析法、组合的模糊 Borda 法 3 种方法排序具有相近的趋势,这也可以从肯达尔相关系数为 0.710 1 得到验证。3 种评价方法中评价排名变化较大的为娘村、嘎贡村、杰村、热米村、堆村和扎西塘村,对比可以发现:娘村可能与主成分分析法中铜、溶解氧分别与第一主成分、第二主成分相关系数较大有关;嘎贡村是由于铅、TN 含量过高所致;杰村是由于铅、铜过高所致;热米村则是铅、氟化物浓度过高所致;堆村则 TN、TP 浓度过高所致;扎西塘村与主成分分析法中铜、锌分别与第一主成分、第二主成分相关系数较大有关。

3 结 论

本文以雅鲁藏布江流域的 18 个村饮用水源为研究对象,运用了综合污染指数法、主成分分析法、组合的模糊 Borda 法对水源地开展了安全评价。由于综合污染指数法和主成分分析法会由于权重赋值的不同而对评价结果产生影响,而组合的模糊 Borda 法则不受权重的影响,其评价结果具有相对的稳定性;为了确保组合的模糊 Borda 法的可靠性,文中分别应用斯皮尔曼等级相关系数和肯达尔相关系数对结果的相关性分别开展验证。其基于组合的模糊 Borda 法的饮用水源安全评价结果如下。

(1)综合污染指数法所得评价结果较为接近,各水源地评价价值连线近似为直线,其区分度并不十分明显;主成分分析法评价结果波动较大,但是波动区间较狭小;而组合的模糊 Borda 法所得评价结果区分效果较为显著。

(2)经评价结果和评级排名分析综合污染指数法、主成分分析法、组合的模糊 Borda 法 3 个排序具有相近的趋势,其斯皮尔曼等级相关系数和肯达尔相关系数较高,即利用组合的模糊 Borda 法开展农村饮用水源安全评价是可行的。

(3)组合的模糊 Borda 法饮用水源安全评价结果显示:帮玛村、托麦村、冲康村、堆村、卓村、来义村、列村、秀村、扎西塘村、杰村、娘村、康玛村、嘎贡村、东雄村、多龙村、热米村、拉多村、桑木村等 18 个村的饮用水源安全评价依次减弱。

参考文献(References):

[1] 李艳红,成静清. 基于 AHP 与 Delphi 法的河流型饮用

水水源地安全保障建设指标体系构建[J]. 江西水利科技, 2018, 44 (2): 140-145. (LI Y H, CHENG J Q. Building safety guarantee construction index system of river-type drinking water source based on the AHP and Delphi method, China[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2018, 44 (2): 140-145. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2018.02.13.

[2] 张德彬,刘国东,王亮,等. 基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 模型在地下水水质评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 46-50, 62. (ZHANG D B, LIU G D, WANG L, et al. Application of TOPSIS model based on game theory to groundwater quality evaluation, China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(7): 46-50, 62. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20161231.

[3] 杨咪,屈文岗,钱会. 基于熵权的贝叶斯模型及其在水质评价中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 85-90. (YANG M, QU W G, QIAN H. Bayesian model based on entropy weight and its application in water quality assessment, China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 85-90. (in Chinese)) DOI:1672-3317(2018)01-0085-06

[4] 宗永臣. 尼洋河流域饮用水水质综合评价[J]. 西藏科技, 2017 (8): 22-25. (ZONG Y C. Comprehensive evaluation of drinking water quality in Niyanghe River basin, China[J]. Tibet Science and Technology, 2017 (8): 22-25. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-3403.2017.08.008.

[5] 张建永,朱党生,曾肇京,等. 我国城市饮用水水源地分区安全评价与措施[J]. 水资源保护, 2011, 27(1): 1-5. (ZHANG J Y, ZHU D S, ZENG Z J, et al. Zoning security evaluation and countermeasures of urban drinking water sources for Chinese cities [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(1): 1-5. (in Chinese)) DOI:1004-6933 (2011) 01-0001-05.

[6] 鲍振鑫,张建云,严小林,等. 环境变化背景下海河流域水文特征演变规律[J]. 水电能源科学, 2014(10): 1-5. (BAO Z X, ZHANG J Y, YAN X L, et al. Evolution law of hydrologic elements under environmental change in Haihe River basin[J]. Water Resources & Power, 2014(10): 1-5. (in Chinese)) DOI:1000-7709(2014)10-0001-05.

[7] 常彩屏,郑楠,郑和平. 汉中市城区地下水水质评价与分析[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2009, 25 (2): 78-81. (CHANG C P, ZHENG N, ZHENG H P. Ground water quality evaluation and analyses in Hanzhong City, China[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 25 (2): 78-81. (in Chinese)) DOI:1673-2944(2009) 02-0078-04.

[8] 罗丹,黄川友,殷彤. 西藏自治区城镇饮用水水源地水

- 质现状与水质安全评价[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(4): 420-422. (DAN L, HUSNG C Y, YIN T. Assessment of water quality and water security on centralized drinking water sources in towns of Tibet[J]. Water Conservancy Science & Technology & Economy, 2010, 16(4): 420-422. (in Chinese)) DOI: 1006-7175(2010)04-0420-03.
- [9] 靳会姣, 黄娟, 黄川友, 等. 尼洋河流域水环境质量现状评价研究——基于模糊综合评价法[J]. 四川环境, 2014, 33(3): 120-126. (JIN H J, HUANG J, HUANG C Y, et al. Evaluation research on the water environment quality of Niyang River basin: Based on the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Sichuan Environment, 2014, 33(3): 120-126. (in Chinese)) DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2014.03.019.
- [10] 师红霞, 王姝, 黄川友, 等. 西藏自治区河流型饮用水水源地安全评价指标体系研究[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(3): 5-8. (SHI H X, WANG S, HUANG C Y, et al. Research on evaluation indices system of river drinking water-source region security in Tibet[J]. Water Conservancy Science & Technology & Economy, 2014, 20(3): 5-8. (in Chinese)) DOI: 1006-7175(2014)03-0005-04.
- [11] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. (The National Epa Book Editorial board. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989. (in Chinese))
- [12] 孟春芳, 陈宁锦, 叶炳效. 综合污染指数法评价焦作及新乡主要河流水质[J]. 河南水利与南水北调, 2014(23): 51-52. (MENG C F, CHENG N J, YE B X. Comprehensive pollution index method was used to evaluate water quality in Jiaozuo and Xinxiang, China[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2014(23): 51-52. (in Chinese)) DOI: 1673-8853(2014)23-0051-02.
- [13] 郝凯越, 陈相宇, 李远威, 等. 林芝市紫外辐射与空气质量的相关性分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(7): 103-106. (HAO K Y, CHEN X Y, LI Y W, et al. Correlative analysis of ultraviolet radiation and air quality in Linzhi, China[J]. Environmental Science & Technology, v. 2018, 41(7): 103-106. (in Chinese)) DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.07.018.
- [14] 徐林明, 林志炳, 李美娟, 等. 基于模糊 Borda 法的动态组合评价方法及其应用研究[J]. 中国管理科学, 2017: 155-163. (XU L M, LIN Z B, LI M J, et al. A dynamic combined evaluation method based on fuzzy Borda and its application, China[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017: 155-163. (in Chinese)) DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2017.02.018.
- [15] LI Y, ZHANG X, YI M, et al. Link prediction for the gene regulatory network[J]. Acta Mathematica Scientia, 2015, 35(5): 1018-1024. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3998.2015.05.017.
- [16] PUTH M T, NEUHÄUSER M, RUXTON G D. Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits[J]. Animal Behaviour, 2015, 102: 77-84. DOI: 10.1016/j.anbehav.2015.01.010.
- [17] 孙涛, 张妙仙, 李苗苗, 等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 185-190. (SUN T, ZHANG M X, LI M M, et al. River water quality evaluation based on correspondence analysis and comprehensive pollution index method, China[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(4): 185-190. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2014.04.036.
- [18] 王益昌, 李瑞娇, 问思恩, 等. 用综合污染指数法分析评价黄河陕西段的水环境[J]. 水产学杂志, 2017, 30(5): 87-90. (WANG Y C, LI R J, WEN S E, et al. Assessment of water quality in shaanxi section of the Yellow River by a comprehensive pollution index method, China[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2017, 30(5): 87-90. (in Chinese)) DOI: 1005-3832(2017)05-0047-04.
- [19] 左一鸣, 崔广柏, 顾令宇, 等. 太湖水质指标因子分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(2): 312-314. (ZUO Y M, CUI G B, WEN S E, ZHANG J Y, YU B, et al. Factor analysis of water quality in Tai Lake, China[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(2): 312-314. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2006.02.046.
- [20] 道里刚, 唐亚, 王安. 因子分析法在江安河地表水水质评价中的应用[J]. 四川环境, 2004, 23(2): 75-77. (DAO L G, TANG Y, WANG A. The application of factor analysis method in water quality assessment of Jiangan River, China[J]. Sichuan Environment, 2004, 23(2): 75-77. (in Chinese)) DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2004.02.021.
- [21] DIKBAŞ F. A new two-dimensional rank correlation coefficient[J]. Water Resources Management, 2018, 32(5): 1-15. DOI: 10.1007/s11269-017-1886-0.
- [22] VAN DOORN J, LY A, MARSMAN M, et al. Bayesian inference for Kendall's rank correlation coefficient[J]. American Statistician, 2016: 0-0. DOI: 10.1080/00031305.2016.1264998.