MSA 水质评价模型及其应用

李建林[1,2],张钰锋[1,3*],胡兴文[1],王路扬[1],孟亚周[4]
(1. 河南理工大学资源环境学院,河南　焦作　454000;2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心,河南　焦作　454000;3. 中国煤炭地质总局第三水文地质队,河北　邯郸　056000;4. 永城煤电控股集团登封煤业有限公司丰阳煤矿, 河南　郑州　452470)

摘　要:针对传统评价方法对长序列且样本分布在不同功能分区的水质评价的不足,提出 MSA(Markov-SFI-AHP)水质评价模型,并结合混匀浓度法(Well-mixed model calculation)在南水北调中线焦作段地下水水质评价中加以应用。首先,利用马尔科夫动态评价法(M)对干渠周边浅层地下水水质作评价,确定水质变差时段;然后,利用单因子指数法(S)和层次分析法(A)对该时段水质进行分析,确定水质变差的主控因素;最后,利用混匀浓度法(W)评价干渠周边浅层地下水对干渠水质的影响。结果显示:虽然 2015—2022 年浅层地下水水质整体变好,但各时段内水质变差的情况时有发生,2019 年和 2021 年水质变差,主要污染指标为总硬度、TDS、Cl^- 和 NO_3^-;水质变差的浅层地下水进入干渠后,干渠各项水质指标评价等级并未下降。MSA 模型为长序列水质监测数据的评价提供了新的方法。

关键词:浅层地下水;MSA 模型;水质评价;南水北调中线干渠
中图分类号:X824　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-2009(2025)06-0059-08

MSA Water Quality Evaluation Model and Its Application

LI Jianlin[1,2], ZHANG Yufeng[1,3*], HU Xingwen[1], WANG Luyang[1], MENG Yazhou[4]
(1. *School of Resources and Environment*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo*, *Henan* 454000, *China*; 2. *Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization*, *Jiaozuo*, *Henan* 454000, *China*; 3. *The Third Hydrogeological Team of China Coal Geology Administration*, *Handan*, *Hebei* 056000, *China*; 4. *Fengyang Coal Mine*, *Dengfeng Coal Industry Co.*, *Ltd. of Yongcheng Coal and Electricity Holding Group*, *Zhengzhou*, *Henan* 452470, *China*)

Abstract: Regarding the shortcomings of traditional evaluation methods for water quality evaluation in long time series and samples distributed across different functional zones, the MSA(Markov-SFI-AHP) water quality evaluation model was proposed and applied, in conjunction with the well-mixed model calculation to evaluate the groundwater quality in the Jiaozuo section of the South-to-North Water Diversion Middle Route. First, the Markow dynamic evaluation method(M) was used to evaluate the quality of shallow groundwater around the main canal and to identify the period of water quality deterioration. Then, the water quality during this period was analyzed by using the single-factor index method(S) and the analytic hierarchy method(A) to identify the main controlling factors responsible for its deterioration. Finally, the influence of shallow groundwater around the main canal on the water quality of the main canal was evaluated by using the well-mixed method(W). The results showed that although the overall quality of shallow groundwater improved from 2015 to 2022, periods of water quality deterioration still occurred intermittently. The water quality deteriorated in 2019 and 2021, with total hardness, TDS, Cl^- and NO_3^- identified as the primary pollution indicators. Even after the degraded shallow groundwater entered the main canal,

收稿日期:2024-10-14;**修订日期**:2025-09-09
基金项目:国家自然科学重点支持基金资助项目(U22A20566)
作者简介:李建林(1973—),男,甘肃天水人,教授,博士,主要从事水文地质专业的教学工作。
*通信作者:张钰锋 E-mail: 2637876020@qq.com

the evaluation grades for all water quality indicators in the main canal showed no decline. The MSA model provided a new approach for the evaluation of long time series water quality monitoring data.

Key words: Shallow groundwater; MSA model; Water quality assessment; Middle route of the South-to-North Water Diversion Project

我国现有 1.8 万个浅层地下水水质监测点和 3 000 个地表水水质监测点[1]，除此之外还有大量由科研机构、高校和企事业单位自行布设的水质监测点。随着高分辨率卫星遥感、无人机、无人船、智能传感器等现代遥感监测手段的发展[2]，此类长序列水质监测数据越来越多，为我国水质现状的监测和保护起到了重要的数据支撑作用。目前，对监测数据的处理主要采用单因子指数法、污染指数法和模糊综合评价法[3]等方法。单因子指数法虽然可以直接了解水质状况与评价标准之间的关系，但不能全面反映水体污染的综合情况[4]；污染指数评价法虽然便于比较同一水系或不同水系之间同一时间的基本污染状况和变化，但缺少完善的环境质量分级系统，无法与质量标准统一起来[5]；模糊综合评价法虽然理论严密，但工作量大、算法也较复杂[6]。此外，水质评价方法在对长序列数据的处理上存在不能充分显示水质变化和主要影响因素的问题。因此，建立适用于长序列新的水质评价模型，既可提升监测数据的利用效率，又为以后长序列数据处理研究提供参考方向。基于此，今聚焦长序列水质监测数据的处理，提出 MSA(Markov-SFI-AHP)水质评价模型，并在南水北调中线焦作段干渠周边浅层地下水水质评价中加以应用，为水质评价提供一种新的模型，同时也为南水北调水质保障提供有益的参考。

1　MSA 水质评价模型的建立

1.1　MSA 水质评价模型的构建背景与思路

1.1.1　模型的构建背景

随着全社会对生态环境越来越重视，常常需要对某一地区(包括不同的功能区，如工业区、农耕区、居民区等)的地表水、浅层地下水状态按照年(月)进行综合评价，并与之前的状态作比较[7]。传统的水质评价方法(如单因子指数法、污染指数法、模糊综合评价法等)[8]都是针对确定的取样点进行单一评价，无法达到综合评价和对比分析的目的[9]。况且，就整个区域而言，不同功能区对水质状态的贡献有差异，目前的水质评价方法也无法反映这种差异。

1.1.2　模型的构建思路

鉴于监测样本的选取历时长且分布在不同功能区，为了明晰研究区水质年(月)变化情况、找到引起水质变化的主控因子，首先利用马尔科夫动态评价法(M)针对各样品的所有监测指标构建状态转移矩阵，计算不同监测时段水质的进步度，量化水质整体的变化情况；再将单因子指数法(S)和层次分析法(A)结合，针对不同功能区的水质建立层次结构，通过各指标单因子指数构建判断矩阵，计算各指标权重，确定不同指标对水质变化的贡献率；在此基础上，针对不同地区、不同需求，提出相应的治理措施。

1.2　MSA 水质评价模型的构建步骤

1.2.1　问题的概化

设某研究区共分为 l 个功能区，每个功能区各取 U_f 个水质样本($f=1,2,\cdots,l$)，对每个样本选取 v 个指标，进行 m 年、每年 n 次共计 mn 次(此处表示 m 与 n 的乘积)监测。在监测数据中，如果发现缺失值，那么使用插值法插入近似值；如果发现异常值，那么调查确认异常值出现的原因，若是监测异常则删除异常值，使用插值法插入近似值，若是其他原因如某个点大量高污染废水导致监测指标浓度值过高则该浓度值不是异常值，正常用于计算。

通过对样本监测数据的处理须确定两点：一是 n 年内该研究区各年间水质状态的变化情况；二是在 mn 次监测中哪些指标是导致水质变化的主控因素，并提出相应的治理措施。

1.2.2　操作步骤

MSA 模型操作流程见图 1。

步骤 1：n 年内研究区水质变化的评价(M)。

(1)多年变化的评价。

首先，采用改进的 Zadeh 公式[10]对全部 mn 次监测指标标准化，其中第 k 个指标在监测时刻 s 时的监测数据标准化后的值为 $a_{sk}(s=1,2,\cdots,mn;k=1,2,\cdots,v)$。将标准化后的值划分为 11 个状态[11](见表 1)，并构建隶属矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{sk})_{mn\cdot v}$，第 k 个指

标在监测时刻 s 的监测数据的状态值即为隶属矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的元素的取值 r_{sk}。

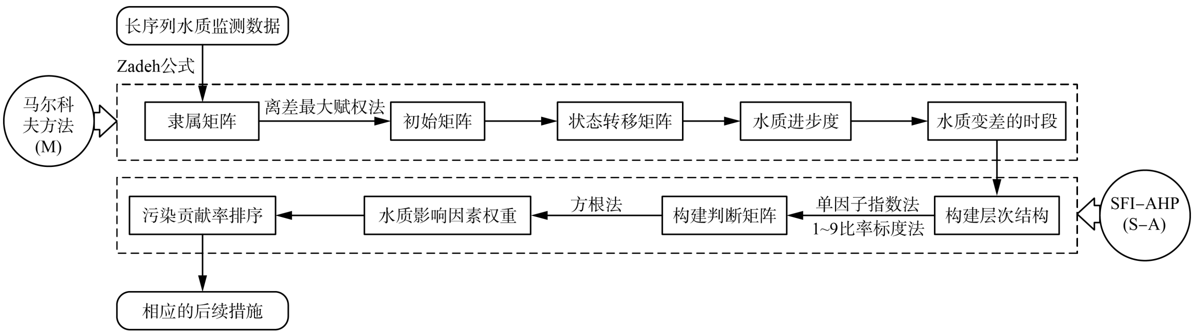

图 1　MSA 模型操作流程

Fig. 1　MSA model operation flowchart

表 1　指标状态的划分

Table 1　Classification of indicator status

区间	状态	区间	状态
[0,0.05)	1	[0.55,0.65)	7
[0.05,0.15)	2	[0.65,0.75)	8
[0.15,0.25)	3	[0.75,0.85)	9
[0.25,0.35)	4	[0.85,0.95)	10
[0.35,0.45)	5	[0.95,1.00]	11
[0.45,0.55)	6		

其次,利用离差最大赋权法[12]求出第 k 项指标的初始权重 w_k,进行归一化处理后得到第 k 项指标权重 w'_k,并计算得到初始矩阵 $\boldsymbol{E}=(e_{sk})_{mn\cdot v}$ 的元素的取值 e_{sk}。

$$w_k=\sum_{s=1}^{mn}\sum_{t=1}^{mn}\mid a_{sk}-a_{tk}\mid/\sqrt{\sum_{k=1}^{v}\Big(\sum_{s=1}^{mn}\sum_{t=1}^{mn}\mid r_{sk}-r_{tk}\mid\Big)^2}\qquad(1)$$

$$w'_k=w_k/w_{\max}\qquad(2)$$

$$e_{sk}=w'_k r_{sk}\qquad(3)$$

式中:w_k 为第 k 项指标初始权重;w'_k 为第 k 项指标权重;$w_{\max}$ 为所有指标初始权重的最大值;a_{sk}、a_{tk} 分别为第 k 个指标在监测时刻 s 和监测时刻 t 的监测数据标准化后的值;$k=1,2,\cdots,v$;$s,t=1,2,\cdots,mn$。

再次,利用初始矩阵 $\boldsymbol{E}$ 计算状态转移矩阵 $\boldsymbol{P}=(p_{ij})_{11\times11}$。$i$ 到 j 的状态转移概率 p_{ij} 为:

$$p_{ij}=x_{ij}/X\qquad(4)$$

式中:x_{ij} 为 v 项指标的 mn 次监测中相邻时刻状态 i 变为状态 j 的次数;X 为相邻时刻状态 i 变为某一状态的情况的总次数;$i,j=1,2,\cdots,11$。

最后,利用相对进步度 $D(s)$ 评价水质变化情况[13]:

$$D(s)=d(s)/(N-1)^2\qquad(5)$$

式中:N 为状态的总个数;$d(s)$ 为绝对进步度,$d(s)=\sum_{i,j}s_{ij}$;s_{ij} 为进步度矩阵 $\boldsymbol{D}=(s_{ij})_{11\times11}$ 元素的取值,$s_{ij}=\mid j-i\mid(j-i)p_{ij}$。相对进步度 $D(s)$ 可以反映水质的变化情况,其数值范围在 $[-1,1]$ 之间,$D(s)>0$ 说明水质变好,$D(s)<0$ 说明水质恶化。

(2)根据研究需求,可求出不同时段水质的进步度,计算步骤与上述求整体进步度步骤相同。

步骤 2:对以上水质变化的结果进行分析(假设从第 g 次到第 h 次的监测,水质状态整体变差),利用单因子指数法和层次分析法(S-A)确定引起水质变化的主控指标。

(1)建立层次结构。将研究区水质状态的整体评价作为目标层,各功能分区作为准则层,不同指标作为指标层,对研究区水质评价建立层次结构[14]。

(2)构建指标层对准则层的判断矩阵 $\boldsymbol{B}=(b_{kz})_{v\cdot v}$[15]。

首先,对不同功能区的各个指标,确定不同指标的平均监测值 $\bar{c}$:

$$\bar{c}=\sum_{q=g+1}^{h}\sum_{y=1}^{u_p}c_{qy}\Big/(h-g)u_p\qquad(6)$$

式中:u_p 为第 p 个功能区的取样点数,$p=1,2,\cdots,l$;c_{qy} 为某一指标在第 p 个功能区第 y 个取样点在监测时刻 q 的监测值,$q=g+1,g+2,\cdots,h$;$y=1,2,\cdots,u_p$。

其次,对不同功能区指标,求其单因子指

数 P[16]：

$$P = \bar{c} / c_0 \tag{7}$$

式中：c_0 为某一评价指标的最高允许标准值，通常为国家水质标准中规定的值。

最后，在同一功能区通过各指标的单因子指数两两对比得到指标层对该准则层的判断矩阵元素的取值 b_{kz}[17]：

$$b_{kz} = P_k / P_z \tag{8}$$

式中：P_k 和 P_z 分别为第 k 个和第 z 个指标的单因子指数，$k, z = 1, 2, \cdots, v$。利用算出的 b_{kz} 构建指标层对准则层的判断矩阵，所有判断矩阵须通过一致性检验。

（3）利用 1～9 比率标度法[18]构建准则层对目标层的判断矩阵 $\boldsymbol{A}$。

（4）得到指标对浅层地下水水质的污染贡献率排序。

首先，采用方根法[19]，计算指标层各个指标对准则层各个因素的权重 G_{kp} 和准则层各个因素对目标层的权重 F_p。

其次，计算组合权重 W_k，即指标层各个指标对目标层的权重：

$$W_k = \sum_{p=1}^{l} F_p G_{kp} \tag{9}$$

式中：W_k 为第 k 个指标的组合权重，$k = 1, 2, \cdots, v$；F_p 为第 p 个准则层因素对目标层的权重；G_{kp} 为第 k 个指标对第 p 个准则层因素的权重，$p = 1, 2, \cdots, l$。组合权重代表指标对水质状态变化的贡献率。

最后，对各个指标组合权重进行排序，得到各个指标对浅层地下水水质的污染贡献率排序。

步骤 3：根据研究区具体需求，采取相应的后续治理措施。

2　实例应用

2.1　研究区域与研究方法

2.1.1　研究区概况

焦作市位于河南省西北部，处在太行山脉与河南西北平原的交接地带，北部为太行山区，以南是黄沁河冲积平原，既拥有丰富的矿产资源，又是河南省主要的商品粮基地[20]。南水北调中线焦作段（以下简称焦作段）横跨农耕区、居民区和工业区。焦作段属于典型的内排段，干渠两侧浅层地下水可以通过逆止阀进入总干渠，而总干渠内的水则不能通过逆止阀渗入地下，故存在已污染的浅层地下水进入总干渠的风险[21]。对焦作段干渠周边水质进行长期监测和评价，并研究干渠周边浅层地下水水质对干渠水质的影响，对保障南水北调中线输水安全具有重要意义。

2.1.2　采样点分布

根据实地调查，将研究区划分为农耕区、工业区和居民区 3 个分区，在干渠两侧 1 km 范围内共计有 30 口浅层地下水水井，井中浅层地下水均为潜水，埋深在 1 m～5 m 之间，见图 2。2015—2022 年每年 4 月和 10 月在这 30 口水井中采集浅层地下水水样。受施工影响，共采集水样 11 次，测定指标为总硬度、pH 值、溶解性总固体（TDS）、氯化物（Cl^-）、硝酸盐（NO_3^-）、硫酸盐（SO_4^{2-}）、六价铬（Cr^{6+}），均为地下水水质常规监测指标。

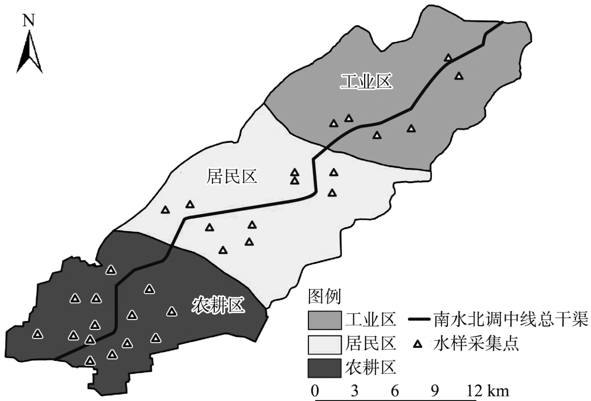

图 2　研究区域与地下水采样点分布

Fig. 2　Study area and distribution of groundwater sampling sites

2.1.3　焦作段 MSAW 模型的构建

以 MSA 水质评价模型为基础，结合混匀浓度法（W）建立 MSAW 模型对焦作段干渠周边水质进行综合评价，模型应用流程见图 3。

用混匀浓度法[22]计算干渠周边浅层地下水进入干渠后，干渠水质指标的质量浓度。

$$C = \frac{C_p Q_p + C_h Q_h}{Q_p + Q_h} \tag{10}$$

式中：C 为干渠水质指标质量浓度，mg/L；C_p 为污染物排放质量浓度，mg/L；Q_p 为污水排放量，m^3/s；C_h 为河流上游污染物质量浓度，mg/L；Q_h 为河流流量，m^3/s。

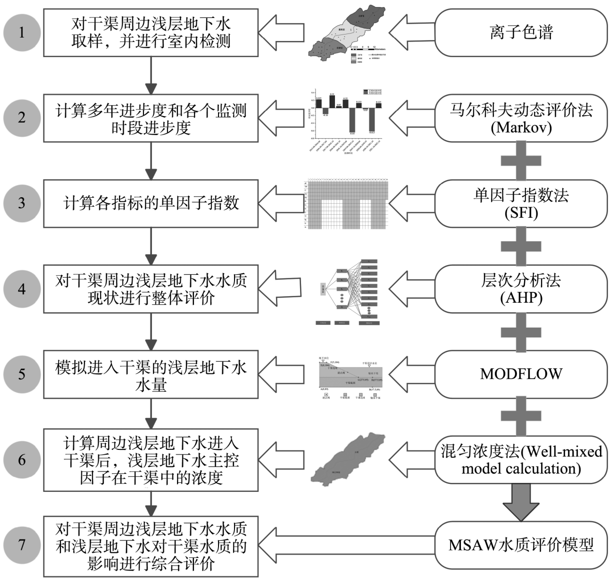

图 3　模型应用流程

Fig. 3　Model application flowchart

2.2　结果与讨论

2.2.1　干渠周边浅层地下水水质评价及污染来源分析

用马尔科夫动态评价法对 2015—2022 年焦作段干渠周边浅层地下水水质变化情况进行评价，由公式(1)—(5)得到浅层地下水水质相对进步度 $D(s)=0.258$，说明 2015—2022 年焦作段干渠周边浅层地下水水质整体变好。利用同样的方法，求得各监测时段浅层地下水水质相对进步度，见图 4。

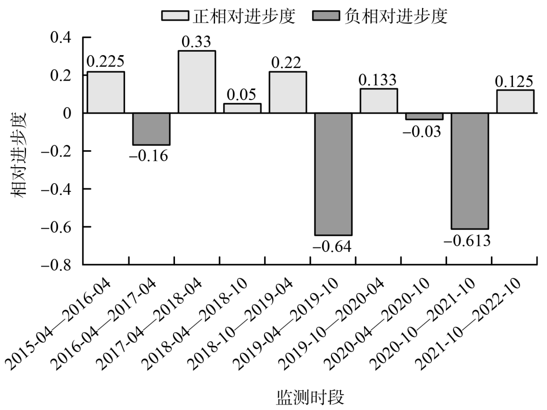

图 4　各监测时段浅层地下水水质相对进步度

Fig. 4　Relative improvement rate of shallow groundwater quality across monitoring periods

由图 4 可见，2016 年 4 月—2017 年 4 月(时段 1)、2019 年 4 月—2019 年 10 月(时段 2)、2020 年 4 月—2020 年 10 月(时段 3)、2020 年 10 月—2021 年 10 月(时段 4)4 个监测时段的水质相对进步度为负，说明在这 4 个监测时段内干渠周边浅层地下水水质变差。

为了确定以上 4 个时段水质变差的原因，采用单因子指数法与层次分析法结合来分析水质数据。由公式(6)—(9)得到 4 个时段水质变化中各指标的污染贡献率，并按此贡献率排序，结果见表 2。

表 2　浅层地下水水质指标污染贡献率排序

Table 2　Ranking of pollution contribution rates for shallow groundwater quality indicators

排序	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
1	总硬度	Cl^-	NO_3^-	NO_3^-
2	pH 值	TDS	TDS	总硬度
3	Cl^-	pH 值	pH 值	pH 值
4	SO_4^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}
5	Cr^{6+}	总硬度	总硬度	TDS
6			SO_4^{2-}	Cl^-

由表 2 可知：①导致时段 1 水质变差的主要影响指标为总硬度。总硬度是水中多价金属离子含量总和，一般为水中钙镁离子含量总和[23]。研究区内工矿企业活动频繁，居民生活垃圾、污水排放的不规范会产生大量的碳酸盐矿物和含钙、镁矿物，研究区含水层主要是第四系沉积物，上覆土层渗透性良好，使这些污染物更容易进入浅层地下水，最终导致浅层地下水中总硬度增大。②导致时段 2 水质变差的主要影响指标为 Cl^- 和 TDS。研究区内 Cl^- 和 TDS 的浓度变化均与工矿企业的污染物排放有关。当地下水中两种或两种以上组分浓度同时增大时，TDS 浓度也会增大[24]，研究区内大量工矿企业排放的污水中包含 Cl^- 等多种离子，大量排放导致 Cl^- 和 TDS 浓度升高。③导致时段 3 和时段 4 水质变差的主要影响指标为 NO_3^-。浅层地下水中 NO_3^- 主要来源是农业氮肥的施用。由于氮肥除了被植物所吸收利用外，大部分经淋溶进入浅层地下水环境中[25]，故浅层地下水中 NO_3^- 含量与氮肥施用量呈线性关系，研究区内大量取样点位于农田附近，受到灌溉用水长期浸溶，是 NO_3^- 超标的主要原因。④在干渠周边的浅层地下水评价中发现，焦作段干渠周边浅层地下水存在一定程度的污染，其中总硬度、Cl^-、TDS、NO_3^- 是对干渠周边

浅层地下水水质影响大的 4 项指标。

2.2.2　干渠周边浅层地下水污染对干渠水质影响

（1）浅层地下水进入干渠流量的确定。2015—2022 年研究区地下水水位为 95 m～109 m，周边浅层地下水水位取平均水位 102 m，进入干渠的流量主要由周边浅层地下水与干渠的水位差决定，总干渠的河底高程为 95 m，设计流量为 251.157 m^3/s。研究区岩性主要为粉质砂土，部分为黏质砂土，渗透系数为 6 m/d～10 m/d，焦作段干渠方向为南北向，研究区地下水流向由西至东，垂直于干渠方向。通过 MODFLOW 软件模拟内排段周边浅层地下水进入干渠时的流量。沿 AB 方向为 x 轴方向，沿 AE 方向为 y 轴方向，建立研究区简化模型，见图 5。取总干渠水位与周边浅层地下水水位差最大时进行模拟，得出浅层地下水进入干渠的流量为 0.004 79 m^3/s，此时干渠水位为 95 m，周边浅层地下水水位为 102 m。实际情况下，随着水位差增加，进入干渠的流量在 0～0.004 79 m^3/s 之间波动。

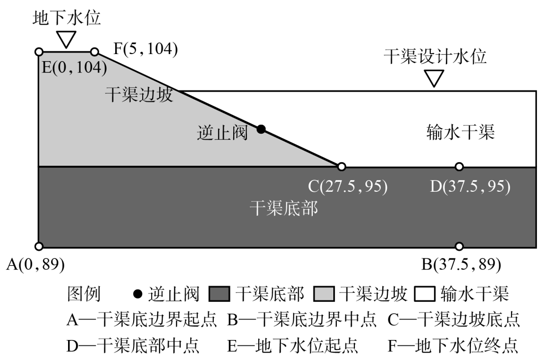

图 5　研究区简化模型

Fig. 5　Simplified model of the study area

（2）混合后干渠水质的确定。以 2021 年 10 月对干渠水质监测结果为例，利用混匀浓度法，根据公式（10）计算周边浅层地下水进入干渠后浅层地下水主控污染因子在干渠中的浓度。为最大程度地探讨周边浅层地下水对干渠水质的影响，选取 Q_p 为最大流量 0.004 79 m^3/s；Q_h 为上游来水流量，选取研究区干渠的设计流量 251.157 m^3/s；C_p 为劣质水污染物浓度，选取主要污染指标的最大值；C_h 为上游来水中浅层地下水主控污染因子的浓度，选取 2021 年 10 月监测的干渠指标浓度，计算结果见表 3。

表 3　浅层地下水进入干渠后干渠对应指标质量浓度

Table 3　Mass concentration of corresponding indicators in the main canal after the introduction of shallow groundwater

指标	当年最大质量浓度 ρ/（mg·L⁻¹）	干渠原质量浓度 ρ/（mg·L⁻¹）	混合后质量浓度 ρ/（mg·L⁻¹）	混合后水质等级
总硬度	801.52	70	70.01	Ⅰ类
TDS	1 985	215.58	215.61	Ⅰ类
Cl^-	292	5.92	5.93	Ⅰ类
NO_3^-	250.26	4.21	4.21	Ⅱ类

由表 3 可知，当干渠周边浅层地下水通过逆止阀进入干渠后，干渠周边浅层地下水污染的各项指标水质标准等级并未降级且混合后浓度与干渠原浓度几乎一致，说明干渠周边浅层地下水进入干渠对干渠水质影响不大。

2.3　讨论

2.3.1　MSA 模型优势分析

MSA 水质评价模型通过耦合马尔科夫动态评价法、单因子指数法和层次分析法，构建了一套动静结合的水质评价体系。该模型考虑了不同功能区的水质差异，使结果更贴合实际；在确定污染物权重时，引入单因子指数法，通过各指标单因子指数的两两对比，有效降低了层次分析法的主观性，提升了评价可靠性。同时，模型运用马尔科夫法构建状态转移矩阵并计算进步度，实现了对不同时段水质变化的动态量化，能够直观识别水质恶化的时段与主控因素，从而支撑针对性防治措施的制定。

该模型兼具客观性与全面性，数据处理流程简便、易于标准化，为南水北调工程水质安全的高效评估与保障提供了新的技术路径。

2.3.2　评价合理性分析

水质评价情况是否合理客观，关键在于评价指标和取样点位选取的合理性。具体表现在：①根据《地下水质量标准》（GB/T 14848—2017），文中选取的 7 项指标属于地下水质常规指标。另外，有研究表明，焦作地区主要水厂的总硬度自 1995 年以来上升趋势明显，Cl^- 含量自 1991 年以来也有大幅上升[26]，说明选取总硬度和 Cl^- 作为监测指标能够反映研究区主要水质问题。因此，水质评价指标选取合理。②30 个取样点分布于 3 类功能区内，能有效反映不同功能区的差异，也能避免评价结果仅体现单个功能区浅层地下水水质情况。同时，所有点位均设在距干渠 1 km 内，确保了监测结果代表

焦作段干渠周边浅层地下水水质。因此,取样点布设合理。

2.3.3　模型评价结果对比

将 MSA 模型与国内外使用较多的综合水质指数(WQI)法进行比较。确定 WQI 值范围在 0~300 之间,根据 WQI 值将水质分为 5 个等级:优秀($0 \leqslant WQI \leqslant 50$)、良好($50 < WQI \leqslant 100$)、差($100 < WQI \leqslant 200$)、非常差($200 < WQI \leqslant 300$)或不适合($WQI > 300$)。选取地下水中常见的水质指标 pH 值、TDS、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-,分别计算 2020 年 10 月研究区整体和各分区的 WQI 值并作评价。结果显示:研究区整体 WQI 值为 109.41,水质评价等级为差,农耕区、居民区、工业区的 WQI 值分别为 152.89、64.42、82.33,水质评价等级分别为差、良好、良好,其反映了水质的整体情况。

WQI 评价结果显示,农耕区地下水水质问题最为突出。然而,基于功能分区的治理方法虽具针对性,却难以揭示水质的长期演变规律与核心污染因子。相比之下,MSA 污染评价模型能有效处理长序列数据,动态追踪水质变化,并定量计算各水质指标的污染贡献率,从而精准识别导致污染的主要水质指标,该优势有助于制定靶向性治理方案,显著提升环境治理的效率与精准性。

2.3.4　干渠周边浅层地下水对干渠水质影响结果的对比验证

李建林等[20]采用最差分析法和逆推法定量分析焦作段干渠周边浅层地下水对干渠水质的影响,结果表明,在最差情况下当周边地下水进入干渠后,为保障干渠水质不降为Ⅲ类,原干渠中总硬度、TDS、Cl^- 的质量浓度应分别低于 232.09 mg/L、936.88 mg/L、232.46 mg/L。然而,在 2021 年对干渠水质的监测中总硬度、TDS、Cl^- 的质量浓度分别为 70 mg/L、142 mg/L、5.92 mg/L,均远低于上述所要求的浓度,说明周边浅层地下水进入干渠不会使干渠水质降级,这与本研究结果一致。因此,周边浅层地下水进入干渠对干渠水质没有影响的结论是合理的。

2.3.5　模型局限性、适用条件和改进方向

(1)局限性。MSA 模型虽然能够反映水质多年整体变化和年际变化,但未能体现具体时刻水体的水质类别。

(2)适用条件。研究区能够划分为若干个区域,并且每个区域都能布设若干个监测点多年持续取样。鉴于马尔科夫动态评价法的特点,研究数据是长序列水质数据,水质序列长度至少 5 a,每年至少监测 2 次,监测点覆盖研究区即可。

(3)改进方向。单因子指数法能够体现具体时刻水体水质类别,虽然 MSA 模型中也有单因子指数法,但是并未体现这点。因此,可以在通过 MSA 模型求得单因子指数后,利用单因子指数确定具体时刻水体的水质类别,从而使 MSA 模型也能体现具体时刻水体的水质类别。

3　结论

(1)针对目前水质监测数据时间长、数量大的现状,建立了 MSA 水质评价模型。该模型首先利用马尔科夫动态评价法(M)对干渠周边浅层地下水水质进行评价,量化水质整体的变化情况,确定水质变差的时段,再将单因子指数法(S)和层次分析法(A)结合,对该时段水质进行分析,确定水质变差的主控因素,在此基础上,针对不同地区、不同需求,提出相应的治理措施。

(2)将 MSA 模型进行改进后用于南水北调中线焦作段干渠周边浅层地下水水质评价,结果表明,2015—2022 年焦作段干渠周边浅层地下水水质整体有所改善,部分监测时间段水质状况变差,主要污染指标为总硬度、Cl^-、TDS、NO_3^-,周边浅层地下水对干渠水质影响不大。

(3)MSA 模型兼具客观性与全面性,数据处理流程简便、易于标准化,能够反映水质多年整体变化和年际变化,为便捷高效地处理水文数据提供了新的实现途径。然而,MSA 模型未能体现具体时刻水体的水质类别,下一步优化可以通过研究方法中求得的单因子指数来确定具体时刻水体的水质类别。

[参考文献]

[1]　中华人民共和国水利部. 2022 年水资源公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023.

[2]　陈鹏越,郜子奥,郜洪文. 基于快采快检的水质数字化系统设计及应用[J]. 环境监测管理与技术,2024,36(5):47-50.

[3]　鲁照,黄河清,徐力刚,等. 基于熵权的 WQI 法在鄱阳湖水质评价中的应用[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(4):30-34.

[4]　黄诚,黄廷林,李扬,等. 金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价[J]. 环境科学,2021,42(3):1380-1390.

[5]　尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(5):729-733.

[6] 宋玉庭,蒋名亮,徐力刚,等.基于博弈理论组合赋权的沱沱河流域模糊综合水质评价[J].环境监测管理与技术,2024,36(6):29-35.
[7] 韩聪,高宗军,刘久潭,等.郯城地区地下水化学特征及针对硝酸盐的健康风险评价[J].地球与环境,2021,49(4):436-446.
[8] 辛惠娟,苏思霖,周添红,等.基于不同评价方法的玛曲县饮用水水源地水质研究[J].给水排水,2023,59(S1):212-217.
[9] 张彪,姜春露,郑刘根,等.改进的模糊综合评价法在某煤矿区水质评价中的应用[J].环境监测管理与技术,2022,34(5):27-32.
[10] 张又,刘凌,姚秀岚,等."引江济太"调水中望虞河水质变化的规律[J].水资源保护,2013,29(2):53-57.
[11] 龙珂良,陈星,崔广柏,等.基于马尔科夫模型下的水质评价[J].水资源保护,2016,32(2):133-138.
[12] 白丽丽,白尚旺,党伟超,等.基于离差最大化组合赋权的煤矿安全评价研究[J].计算机应用与软件,2021,38(4):82-87.
[13] 范丽丽,邱利,田威,等.基于马尔科夫模型的太湖水质综合评价[J].水资源保护,2015,31(2):50-54.
[14] RAJKUMAR H,NAIK P K,RISHI M S. A comprehensive water quality index based on analytical hierarchy process[J]. Ecological Indicators,2022,145:109582.
[15] 张胜,张涛,段雯瑜,等.基于改进方法的承德地表水环境质量评价[J].干旱区研究,2024,41(1):50-59.
[16] 余明星,黄波,周正,等.基于走航巡测模式的长江重庆—武汉段水质调查与分析[J].环境监测管理与技术,2023,35(2):39-42.
[17] LI L J,MEN B H,PENG R. Water quality evaluation of Wenyu River based on single factor evaluation and comprehensive pollution index method[J]. Nature Environment and Pollution Technology,2021,20(3):1041-1046.
[18] LIU Y,ECKERT C M,EARL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements[J]. Expert Systems with Applications,2020,161:113738.
[19] 宋炳坤,刘俊,尹文昊,等.基于 AHP-熵权法的鄞西平原河网水环境改善效果综合评价[J].水电能源科学,2024,42(3):68-72.
[20] 李建林,林璐,王万雄,等.南水北调中线焦作段干渠潜在污染分析[J].甘肃农业大学学报,2018,53(4):124-129.
[21] 林涛,尹静,张博,等.改进综合水质标识指数法在珠江口水系水质评价中的应用[J].水资源保护,2022,38(4):166-173.
[22] 生态环境部.环境影响评价技术导则　地表水环境:HJ 2.3—2018[S].北京:中国环境出版社,2019.
[23] 倪鹏程,李名升,李宗超,等.国家地下水环境质量考核监测体系构建与应用[J].中国环境监测,2023,39(4):1-14.
[24] QIAN S Y,CHEN C J,ZHANG X D,et al. Groundwater hydrochemical characteristics analysis and water quality evaluation in the Jiaozuo area[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2020,794(1):012056.
[25] 刘鸿飞,潘维艳,田秀平,等.井灌区浅层地下水硝态氮含量时空分布特征[J].济南大学学报(自然科学版),2024,38(2):132-139.
[26] 谢洪波.焦作市地下水质量综合评价及污染预警研究[D].西安:长安大学,2008.

本栏目编辑　谢咏梅