

王维强, 韩晓东, 桂建业, 等. 南水北调中线干线水体特征指标筛查与动态分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 65-75.
WANG W Q, HAN X D, GUI J Y, et al. Screening and dynamic analysis of water body characteristic indexes in the middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 65-75. (in Chinese)

南水北调中线干线水体特征指标筛查与动态分析

王维强^{1,3}, 韩晓东², 桂建业^{1,3}, 宋洪伟^{1,3}, 陈希², 黄冠星^{1,3}, 赵伦², 母海东^{1,3}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国南水北调集团中线有限公司河北分公司, 石家庄 050035;
3. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 石家庄 050061)

摘要: 为掌握南水北调总干渠的水体特征指标情况, 对中线干渠 12 个断面的 99 项水化学指标和 5 项同位素指标在 2020—2021 年度的变化情况进行系统分析, 按照可以在干渠沿线普遍检出并能广泛使用(普适性)、干渠本身指标稳定(稳定性)、与周围水体有明显差异(差异性)的原则, 建立干线水体特征指标体系, 尝试识别出总干渠的特征指标, 进而评估特征指标的正常动态范围, 以期快速研判南水北调干渠边坡渗水、漏水等问题提供技术支撑。研究表明: 对于“普适性”, 中线干渠水体有 10 项水化学指标可以满足; 对于“稳定性”, 中线干渠水体中锶、钠、钾、钙、镁和氯等 8 项水化学指标总体稳定, 受季节变化影响具有一定的波动性, 氘(²H)、氧(¹⁸O)、锶(⁸⁷Sr)和硫(³⁴S)同位素具有较好的稳定性, 受季节影响较小; 对于“差异性”, 氯和钠两项单项指标及氯/镁离子比、钠/镁离子比与周围水体差异最为显著。结合多项原则和影响因素进行综合考虑, 最终选定氯、钠、锶、氯/镁离子比、钠/镁离子比以及氘(²H)、氧(¹⁸O)、锶(⁸⁷Sr)共 8 项指标作为具有普适性、稳定性和差异性的特征指标。发现边坡渗水的第一时间, 可以采用氯、钠、氯/镁离子比、钠/镁离子比以及氘(²H)、氧(¹⁸O)等 6 项特征指标为快速分析研判提供支撑。
关键词: 南水北调; 中线总干渠; 水化学特征指标; 离子比; 动态分析

中图分类号: TV68;X824 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0008

南水北调工程是实现我国水资源优化配置, 促进经济、社会和生态可持续发展, 保障和改善民生的重大基础设施。干渠堤外边坡渗水和漏水的溯源问题对于干渠工程安全和水质安全意义重大, 选取尽量少的具有代表性的“特征指标”实时快速监测对于紧急情况下的分析研判至关重要。南水北调中线干线工程自通水以来, 在总干渠沿线布设了 30 个水质固定监测断面。监测指标方面, 依据《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》的 24 项基本项目对干渠进行日常监测, 然而, 当前这些指标不足以反映总干渠的水质状况。为深入掌握总干渠的水质状况和时空分异特征, 多个研究团队对影响南水北调中线干渠水质的多类指标进行了扩展研究^[1-6], 如利用氨氮、五日生化需氧量、化学需氧量、总氮和高锰酸盐指数等数十项指标研究输水干线水质变化总体趋势。多年来的研究表明, 总干

线水质总体良好, 并初步总结了各段水质指标差异。同时围绕干渠沿线污染源分布及潜在水质风险^[7-8]、输水区域生态环境影响^[9-10]和水量输送规律^[11-12]等开展了详细研究, 研究表明部分渠段存在潜在的风险^[13-15], 然而利用这些指标针对具体情况进行分析研判时尚存在指标众多、测试时间过长和指标的有效性不强等问题。

外堤边坡渗水溯源问题是一个多学科交叉问题, 需要运用环境监测与溯源、水利工程、水文地质和水循环等学科的知识 and 手段, 前期的研究大多基于干渠的日常巡查、流量监测、地下水位观测和统计规律等手段^[16], 结果存在不确定性。从传统地球化学的角度来看, 氯离子的迁移性质与水极为相似, 在主要离子中只有氯的扩散系数与水最为接近, 而且氯离子并不参与含水层中常有的地球化学反应, 因此成为最优良的守恒性示踪剂。在研究河流和

收稿日期: 2022-03-16 修回日期: 2022-11-19 网络出版时间: 2022-12-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221227.1714.001.html>

基金项目: 中国南水北调集团中线有限公司科研专项项目(ZXJ/HB/YW/SZ-2020-007)

作者简介: 王维强(1984—), 男, 河北邯郸人, 工程师, 主要从事地下水调查与探测研究。E-mail: weiq0802@163.com

通信作者: 桂建业(1979—), 男, 河北衡水人, 研究员, 博士, 主要从事环境监测、方法开发与评价研究。E-mail: Agui_mail@163.com

地下水的补给关系时,氯和溴等多项水化学指标及其离子比均可以为研究提供有力证据。氢和氧等稳定同位素可以不受周围土壤易溶盐化学组分的影响,因此近年来在大坝渗水的水源判别和溯源方面提供了新证据^[17-19],近年来也有人尝试采用高密度电法等地球物理手段对大坝渗水等问题进行研究^[20]。但是对南水北调这一重大工程,尚未开展此类工作的系统研究。

本文以水化学和同位素两类指标为基础,在多期数据观测基础上,尝试筛选并识别出南水北调中线干渠水的特异性指标从而作为“天然示踪剂”为水体溯源提供技术支撑。本次指标筛选范围以 2017 年 10 月国家最新发布的《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)为基础,结合《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》,通过系统采样分析其中的 99 项指标,并对其中部分水化学指标的离子比和同位素信息进行深入挖掘,以期可以从中筛选出干渠的特征指标,为南水北调中线工程运行管理工作提供更为准确有效的实测依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

南水北调中线工程南起丹江水库陶岔渠首,途经河南和河北,北至北京和天津,总干渠长 1 432 km。沿途地形地貌复杂多样,地下水埋藏条件不一,跨越长江、黄河、海河和淮河 4 大流域^[21],穿越较大河流 28 条、中小河流 173 条,渠水与外水发生水力联系的隐患始终存在。干渠沿线分布着 700 多个村庄和较多关系国计民生的燃煤发电、金属采选、冶炼、化工和制药等企业,各类污染隐患不可能彻底消除,且干渠沿秦岭东段支脉和太行山脉的东麓北上,地下水埋深较浅,具有较强的污染脆弱性。因此,选取干渠沿线 12 个常规监测断面开展详细监测分析研究,涵盖渠首至渠尾不同类型水文地质断面,从南到北包括姜沟、宝丰、新郑、汤阴、磁县、邯郸、沙河、邢台、石家庄、唐县、易县和惠南庄,断面以河北段为主,兼顾源头和近北京地段。

1.2 监测指标研究过程

对干渠水质指标进行全谱扫描监测,依据检出率和指标质量浓度,找出普遍检出的指标,去除低检出率和低质量浓度指标,同时依据指标的稳定性去除高波动性指标。在剩余指标中比对于干渠水和地下水等外围水体的差异性,筛选出可识别干渠水和地下水差异的指标,进而根据研究结果进行综合

分析与遴选。

本次监测指标包括《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中的水化学指标,结合《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》,补充了钾、钙、镁、重碳酸根、碳酸根和游离二氧化碳 6 项指标,最终共计选择 99 项水质指标进行监测。其中的感观指标、物理指标、微生物指标和放射性指标等由于指标本身的原因不适合作为水体的溯源指标,不做进一步分析。在此基础上,通过去除未检出指标、低质量浓度指标及高波动性指标,筛选出能够稳定检出的重点指标并进行综合分析,主要包括渠首—河南—河北段 12 个水质监测断面干渠水中的主要阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Sr^{2+} 等)、主要阴离子(Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 F^- 和 SiO_3^{2-} 等)及同位素 $\delta(^2H)$ 、 $\delta(^{18}O)$ 、 $\delta(^{87}Sr)$ 、 $\delta(^{34}S)$ 和 $\delta(^{13}C)$ (溶解性总无机碳)等指标。

1.3 分析方法

样品来自于分 3 期采集的 12 个监测断面的干渠水样品,2020 年 4 月和 7 月为第 1 期,2021 年 5 月份为第 2 期,2021 年 12 月为第 3 期,数据跨年度且包含丰水期和枯水期。水化学参数温度(T)、电导率(γ)和 pH 值等在采样点现场测定。分析方法参照《地下水水质分析方法》(DZ/T 0064—2021)。主要分析方法简要描述如下: HCO_3^- 采用盐酸滴定法测定;溶解态 SiO_2 用硅钼蓝比色法测定; K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Sr^{2+} 质量浓度用电感耦合等离子原子发射光谱法测定,主要阴离子(Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})质量浓度用离子色谱法(Dionex ICS 1200)测定; $\delta(^2H)$ 和 $\delta(^{18}O)$ 测定采用波长扫描光腔衰荡光谱法;铷 $\delta(^{87}Sr)$ 测定采用热电离子质谱法测定其同位素比值;硫酸盐硫 $\delta(^{34}S)$ 采用化学沉淀元素燃烧气体同位素质谱法;溶解性总无机碳 $\delta(^{13}C)$ 采用在线磷酸解-气体同位素质谱法。

2 结果与讨论

2.1 干渠水化学特征概述

干渠水呈弱碱性,pH 值为 7.84~8.46,平均值为 8.16,较高的 pH 值反映了水源地流域内碳酸盐岩溶解对于干渠水化学性质的影响。总溶解固体(TDS)质量浓度为 134~168 mg/L,平均值为 155 mg/L。渠水的总阳离子当量浓度($TZ^+=Na^++K^++2Mg^{2+}+2Ca^{2+}$)为 1.39~1.72 meq/L,普遍高于世界河流的平均值(0.725 meq/L)^[22-23]。干渠水化学类型为 HCO_3^- -Ca-

Mg型,其中:阳离子以 Ca^{2+} 为主,占阳离子总量的68%~72%; Mg^{2+} 次之,占阳离子总量的14%~17%;阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,分别占阴离子总量的76%~80%和14%~17%。上述水化学特征反映了库区碳酸盐岩风化溶解对水化学组成的控制作用。渠水中 Sr^{2+} 质量浓度和 ^{87}Sr 同位素变化范围较小,较为平稳, Sr^{2+} 质量浓度为0.162~0.182 mg/L,平均值为0.176 mg/L,高于世界河流平均值(0.078 mg/L)^[24]。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为1.321‰~1.673‰,平均值为1.513‰。

2.2 干渠水体特征指标筛查与动态分析

2.2.1 干渠水体特征指标检出的普适性分析

“普适性”是指在干渠全线具有代表性,此类指标的要求是在干渠全线普遍检出并能在各渠段均具有推广使用的价值。因此对干渠从南到北空间跨度(从渠首大坝至北拒马水质固定监测点1 197.58 km,结合源头丹江和汉江上游上溯的空间范围),进行采样并做水质全分析。99项水化学指标中共检出19项,分别为硫酸盐、氟化物、氯化物、硝酸盐、重碳酸盐、钾、钠、钙、镁、锶、游离二氧化碳、偏硅酸、溶解性总固体、总硬、永硬、暂硬、总碱、总酸和耗氧量,其余指标均未检出或个别检出。其中,总硬、永硬、暂硬、总碱、总酸、溶解性总固体和耗氧量7项属于含量指标,重碳酸盐和游离二氧化碳2项易受大气二氧化碳与水体交换影响,不适宜作为特征指标。综上,选取硫酸盐、氟化物、氯化物、硝酸盐、钾、钠、钙、镁、锶和偏硅酸10项指标作为待选水化学特征指标,进行下一阶段的稳定性和差异性分析。

2.2.2 干渠水体特征指标稳定性分析

“稳定性”指标指在干渠水普遍检出的指标中质量浓度值或同位素比值波动较小且能够在一定时期内反映干渠水体自身特征的指标。

干渠水体水化学特征指标稳定性分析。对具有“普适性”的10项水化学指标进行稳定性统计分析,最小值和最大值反映指标变化幅度,相对标准偏差反映指标的分散度或偏离度。统计结果见表1。

根据统计分析结果,可将待选特征指标分为3类:稳定性较好的指标为锶、钠、钾、钙和镁;稳定性一般的指标为硫酸盐、氯化物和硝酸盐;稳定性较差的指标为偏硅酸和氟化物。其中偏硅酸和氟化物的最小值和最大值相差约10倍,且相对标准偏差大于50%,其数据分散、偏离大且稳定性很差,不适宜作为特征指标。对其余8项指标进行进一步考查。

表1 干渠水化学指标稳定性分析统计

Tab. 1 Statistical table for stability analysis of main canal for hydrochemistry index

指标	最小值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对标准 偏差/%
锶	0.162	0.182	0.176	3.3
钠	5.100	5.900	5.490	4.0
钾	1.720	2.200	1.980	6.0
钙	30.440	41.830	39.400	7.3
镁	7.160	8.900	7.760	7.7
硫酸盐	16.560	27.280	21.330	18.4
氯化物	3.460	6.270	4.470	20.9
硝酸盐	0.730	5.620	4.010	23.5
偏硅酸	1.140	11.020	5.580	50.9
氟化物	0.130	1.270	0.380	101.0

由于3期跨年度的稳定性数据信息中理论上包括了丹江口源头的季节变化因素、气候因素、不同组分分析方法本身精密因素及潜在的干扰因素等诸多信息,这些信息对于水体溯源会产生较大的负面影响,因此为研究清楚主要影响因素,项目组于2021年10月份参照干渠流速流量进行了1次随流采样,为期15 d,通过对随流采样的8项指标的统计分析发现,所有指标的相对标准偏差均有不同程度的降低,见表2。由此可以初步推测,干渠水化学指标变化主要是季节性波动,即由于库区源头的水质波动导致的,因此在实际场景作水体溯源研判时应重点考虑上游水体实时监测数据结合特征指标进行综合分析。

表2 10月份干渠8项水化学指标稳定性分析统计

Tab. 2 Statistical analysis of 8 hydrochemistry indexes in main canal in October

指标	最小值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对标准 偏差/%
钙	40.350	41.830	40.900	0.87
镁	7.160	7.550	7.280	1.34
钠	5.260	5.630	5.440	1.85
锶	0.169	0.182	0.177	2.11
钾	1.980	2.180	2.030	2.24
硫酸盐	17.910	19.410	18.530	2.62
硝酸盐	4.380	4.890	4.530	2.63
氯化物	3.540	3.970	3.740	4.00

干渠水体同位素指标稳定性分析。氢和氧2种元素共同构成“水”这一重要物质,2种元素的同位

素清楚地记录了水在迁移转化过程中的重要信息,并且氢和氧等稳定同位素可以不受周围土壤易溶盐化学组分的影响,因此近年来在大坝渗水的水源判别和溯源方面提供了更加有力的证据,为了验证其对南水北调应用方面的有效性,对 3 期样品进行了系统的数据分析,将样品根据不同采样时间段统计 $\delta(^2\text{H})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 值。统计结果表明, $\delta(^2\text{H})$ 值介于

-57.64‰~-48.92‰, 相对标准偏差为-3.18‰~-1.66‰, $\delta(^{18}\text{O})$ 值为-9.22‰~-7.43‰, 相对标准偏差为-1.59‰~-3.32‰; 干渠全线集中采集的 $\delta(^2\text{H})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 值曲线变化趋势稳定, 见图 1、2, 而不同季节之间有一定差异。由于氘和氧 2 种稳定同位素之间存在拟合关系, 并且只受蒸发和混合作用影响, 因此以此拟合系数的稳定性可以为水体溯源提供依据。

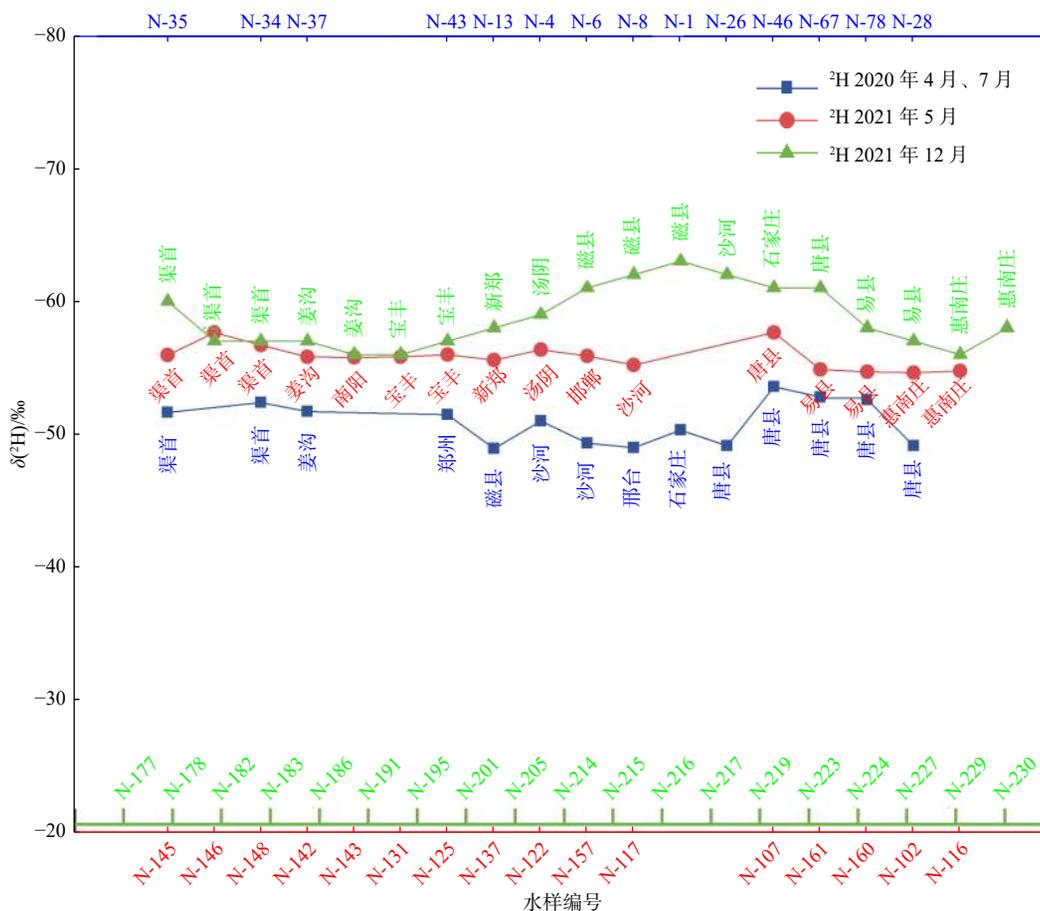


图 1 干渠全线氢同位素 δ 值变化趋势曲线

Fig. 1 Variation trend curve of Hydrogen isotopes along the main channel

全球大气降水的 $\delta(^2\text{H})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 之间存在线性关系, 即 $\delta(^2\text{H})=8\delta(^{18}\text{O})+10$ ^[25], 称为“全球大气降水线”(GMWL)。不同地区降水的 $\delta(^2\text{H})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 之间也存在类似的线性关系, 称为“当地降水线”(LMWL)。降水线的斜率和截距包含了关于水汽起源和运动方面的信息。当降水补给地表水或地下水时, 对于同一补给来源的地表水或地下水同位素组成特征包含补给区信息, 会沿某一 $\delta(^2\text{H})$ - $\delta(^{18}\text{O})$ 线分布。南水北调库区丹江口水库水主要受高山降水补给, 依据目前库区样品, 其 $\delta(^2\text{H})$ - $\delta(^{18}\text{O})$ 关系为: $\delta(^2\text{H})=5.09\delta(^{18}\text{O})-10.57$, 在 $\delta(^2\text{H})$ - $\delta(^{18}\text{O})$ 关系图中, 库区水分布于 $\delta(^2\text{H})=5.09\delta(^{18}\text{O})-10.57\pm 2$ 范

围内, 见图 3, 且干渠全线各期水亦分布于该范围内, 因此可以判断干渠水与库区水为同一补给源。若拟合曲线偏离平行线范围应考虑有外水侵入的可能。

水体中各溶解性物质的同位素对示踪水体来源均有一定的借鉴意义, 在各水源含量相近时利用同位素比值的差异可以区分不同水源。由于铯元素本身不易发生同位素分馏, 且其含量只与岩石矿物中 Rb 含量有关, 富 Rb 比贫 Rb 岩石中含有更多的放射性铯, 通常岩浆岩和变质岩较碳酸盐岩中含量更多, 因此铯同位素一般作为地下水水-岩作用的重要依据^[26-27]。在铯含量分析的基础上, 对 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 进行了考查, 结果显示, 干渠全线铯同位素值较为稳

定,且不受采样时间的限制。干渠全线不分时段采集样品 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 值最大为 1.673‰、最小为 1.321‰,平均值为 1.513‰,相对标准偏差为 6.862%,其 δ 值

变化趋势稳定、平缓。为了对干渠水同位素信息进行系统了解,还对硫酸盐硫同位素、溶解性总无机碳的碳同位素进行了系统考查。稳定性结果见表 3。

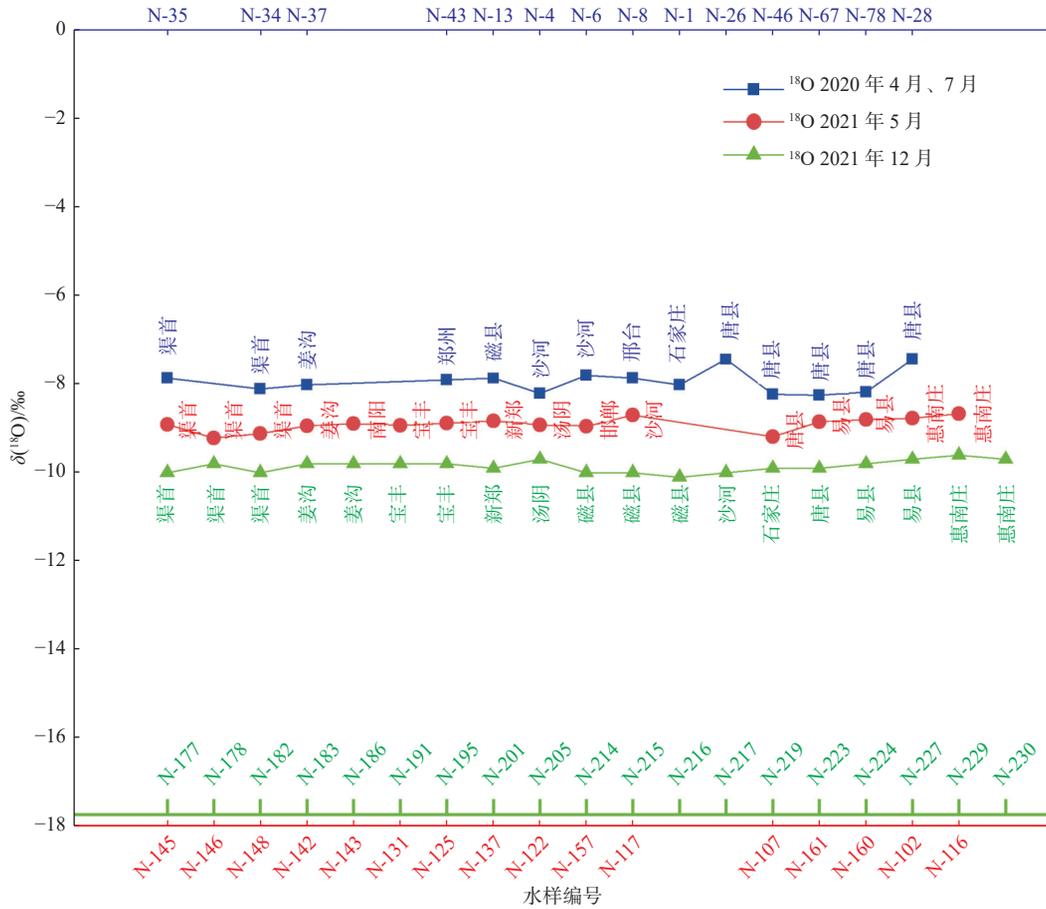


图 2 干渠全线氧同位素 δ 值变化趋势曲线

Fig. 2 Variation trend curve of oxygen isotopes along the main channel

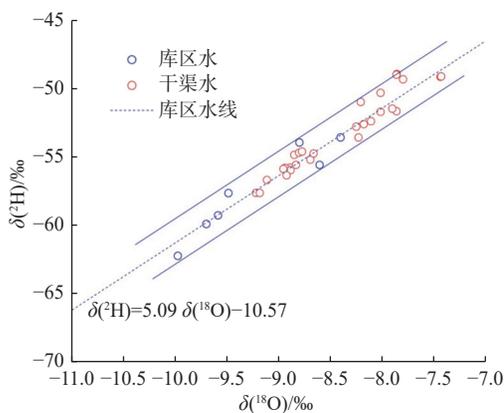


图 3 库区水及干渠水 $\delta(^2\text{H})-\delta(^{18}\text{O})$ 关系

Fig. 3 Plot of $\delta(^2\text{H})$ vs $\delta(^{18}\text{O})$ for water of reservoir and main channel

实验结果显示:硫 $\delta(^{34}\text{S})$ 、氘 $\delta(^2\text{H})$ 、氧 $\delta(^{18}\text{O})$ 和锶 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 的稳定性较好;碳 $\delta(^{13}\text{C})$ 的稳定性较差,这与干渠水中溶解的不稳定游离二氧化碳以及干渠与大气的交互影响等因素有关。

表 3 全年干渠 5 项同位素指标稳定性分析统计

Tab. 3 Statistics for stability analysis of 5 isotopic indexes in main canal in the whole year

指标	最小值/‰	最大值/‰	平均值/‰	相对标准偏差/%
$\delta(^{34}\text{S})$	8.10	9.00	8.40	3.04
$\delta(^2\text{H})$	-63.06	-48.92	-55.30	6.61
$\delta(^{87}\text{Sr})$	1.32	1.67	1.51	6.86
$\delta(^{18}\text{O})$	-10.09	-7.43	-8.93	9.38
$\delta(^{13}\text{C})$	-11.30	-7.80	-8.81	11.80

综合实验分析结果,锶、钾、钠、钙、镁、硫酸盐、氯化物和硝酸盐等水化学指标及氘 $\delta(^2\text{H})$ 、氧 $\delta(^{18}\text{O})$ 、锶 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 和硫 $\delta(^{34}\text{S})$ 等同位素可以满足特征指标稳定性需求。

2.2.3 干渠水体特征指标与外围水体指标的差异性分析

“差异性”分析是从干渠水中符合普适性和稳定性的指标中遴选出与周围水体差异化更明显的

指标。具体实施是将干渠水体指标与周围地下水、地表水及天然降水的分析数据按照统计学方式进行综合对比分析,从而进一步确定干渠水的特征指标。

水化学单指标差异性分析。将地下水 8 项水化学指标与干渠水进行差异性统计分析。低于干渠和高于干渠占比反映的是该指标地下水与干渠水偏离的一致性。普遍低于或高于干渠,更有利于研究后期做出差异判断。 $\bar{X}_{干渠}$ 为干渠该指标检测值平

均值, $S_{干渠}$ 为干渠该指标检测值标准偏差。按照统计学规律,干渠水中该指标检测值大概率在 $\bar{X}_{干渠} \pm 3S_{干渠}$ 内,而地下水中该指标在 $\bar{X}_{干渠} \pm 3S_{干渠}$ 内外占比,反映的地下水与干渠水的差异显著率。统计分析结果见表 4,地下水 8 项指标中:偏离一致性极显著的有钠、氯化物,显著的有钙、硫酸盐、锶;差异性极显著的有钠,显著的有钙、氯化物、锶、钾;其他指标均不显著。

表 4 干渠水与地下水 8 项水化学指标差异性分析统计
Tab. 4 Difference analysis of 8 hydrochemical indexes between main canal water and groundwater %

指标	地下水占比统计			
	低于干渠	高于干渠	$\bar{X}_{干渠} \pm 3S_{干渠}$ 内	$\bar{X}_{干渠} \pm 3S_{干渠}$ 外
钠	2	98	2	98
钙	10	90	8	92
氯化物	3	97	12	88
锶	13	87	13	87
钾	62	38	17	83
镁	23	77	21	79
硫酸盐	9	91	32	68
硝酸盐	34	66	48	52

钠离子偏离一致性和差异性均是极显著的,仅唐县和新郑断面地下水的钠离子质量浓度与干渠水和库区地表水略有交叉重叠,而其余断面地下水钠离子质量浓度范围均显著高于干渠水、库区地表水以及雨水,且 98% 的样品与干渠有可判别的极显著差异,见图 4。因此,钠离子指标可用于识别宝丰、磁县、惠南庄、姜沟、渠首、沙河、石家庄、汤阴以

及易县等绝大部分断面的地下水与干渠水之间的差异。同理,氯化物指标可用于识别磁县、石家庄和汤阴 3 个断面的地下水与干渠水之间的差异,见图 5。其他单离子识别部分断面水体的差异性是不显著的,此处不再详述。综上所述,就单指标而言,钠离子用于识别干渠水与不同断面附近其他水体之间的差异性极显著的。

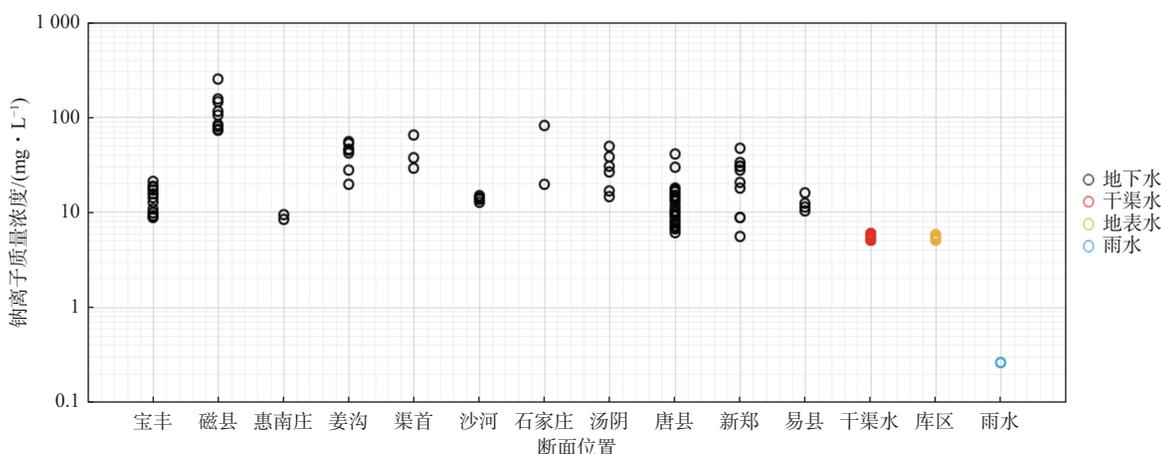


图 4 不同水体及各断面地下水钠离子质量浓度分布

Fig. 4 Distribution of sodium ion mass concentration in groundwater of different water bodies and sections

离子比差异性分析。基于上述单指标的差异性分析,离子比指标主要选取了钠离子、镁离子和氯化物

为基础指标的离子比指标(其他离子比在干渠水和各断面地下水之间的差异性不显著,因此未做展示)。

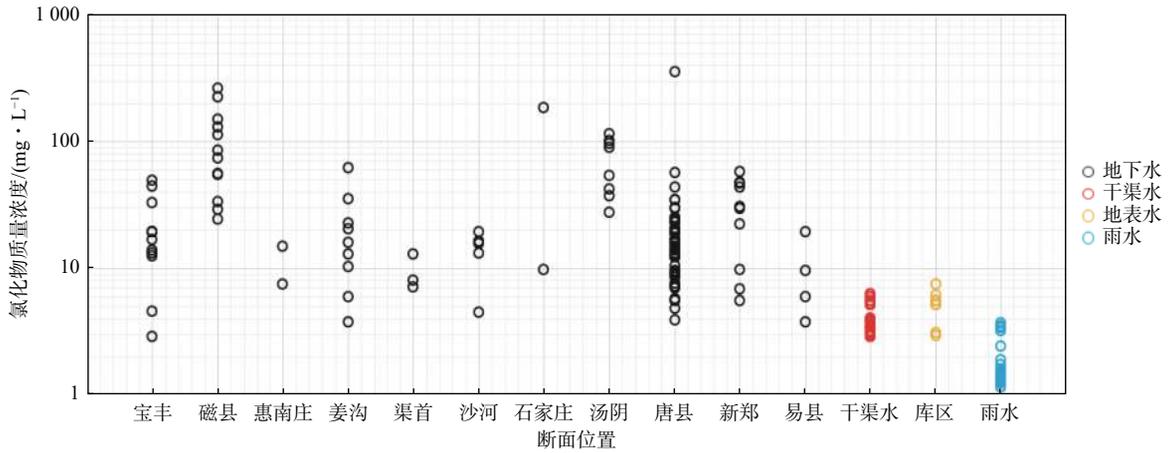


图5 不同水体及各断面地下水氯化物质量浓度分布

Fig. 5 Distribution of chloride mass concentration in groundwater of different water bodies and sections

宝丰、磁县、姜沟、渠首、石家庄和易县 6 个断面地下水钠/镁离子比范围高于干渠水、库区地表水以及雨水; 相反, 惠南庄断面地下水钠/镁离子比范围则低于干渠水、库区地表水以及雨水; 其余断面地下水钠/镁离子比与干渠水和库区地表水钠/镁离子比范围有所交叉, 见图 6。因此, 钠/镁离子比指

标可用于识别宝丰、磁县、惠南庄、姜沟、渠首、石家庄和易县 7 个断面地下水与干渠水之间的差异性。同理, 氯化物/镁离子比指标可用于识别宝丰、磁县、姜沟、沙河、石家庄、汤阴、唐县和新郑 8 个断面的地下水与干渠水之间的差异性, 见图 7。

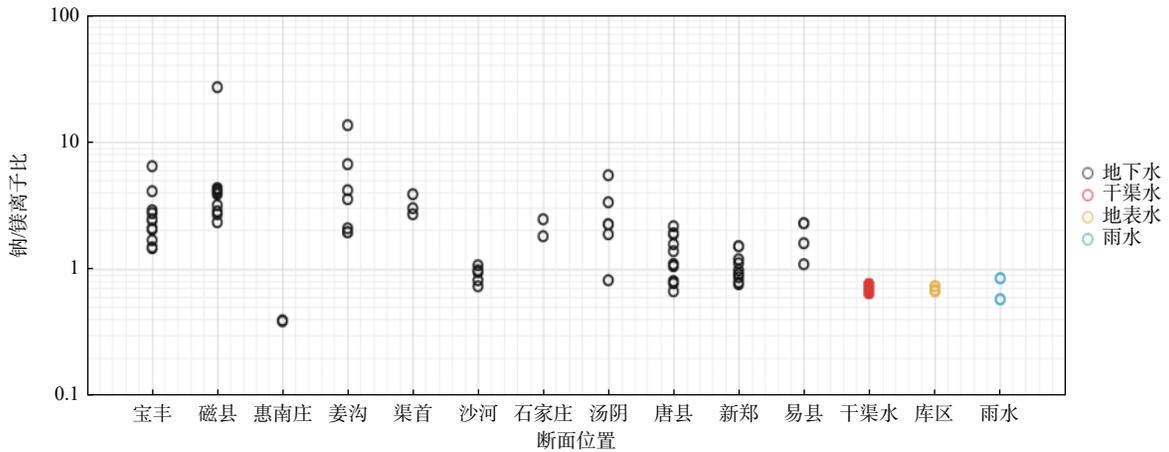


图6 不同水体及各断面地下水钠/镁离子比分布

Fig. 6 Distribution of sodium/magnesium ion ratio in groundwater of different water bodies and sections

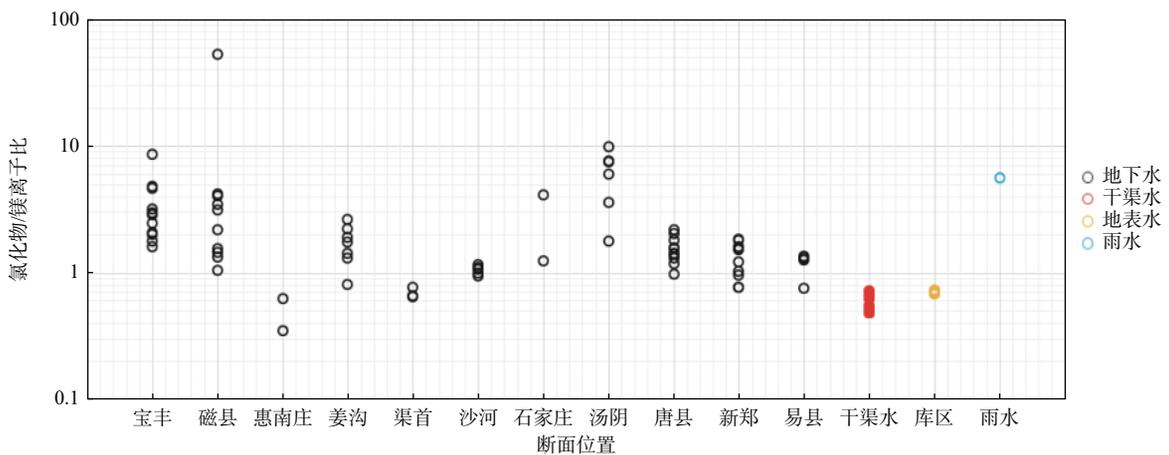


图7 不同水体及各断面地下水氯化物/镁离子比分布

Fig. 7 Distribution of Chloride/magnesium ion ratio in groundwater of different water bodies and sections

上述离子比指标中,氯化物/镁离子比这一项离子比指标可识别 8 个断面地下水与干渠水之间的差异性,紧随其后的是钠/镁离子比指标可识别 7 个断面地下水与干渠水之间的差异性。结合单离子指标,从满足南水北调干渠所有监测断面地下水与干渠水之间的差异性识别的广泛性来看,钠+氯化物/镁和氯化物/镁+钠/镁为识别干渠水的有效指标组合,其中钠+氯化物/镁为最优指标组合。此外,由于雨水中稳定检出的氯化物、硫酸盐、硝酸盐指标中,

仅氯化物质量浓度与干渠水交叉最少,其他指标均大幅度交叉重叠,因此,可选取氯化物指标用于识别南水北调干渠水和雨水之间的差异性。因此,最终有效的指标组合有 2 个,分别是钠+氯化物+氯化物/镁和氯化物+氯化物/镁+钠/镁。其中,钠+氯化物+氯化物/镁是识别干渠水的广泛性最优指标组合。

同位素指标的差异性分析。将地下水的 5 项同位素指标与干渠水进行差异性统计分析,分析统计方法与水化学指标相同,统计结果见表 5。

表 5 干渠水与地下水 5 项同位素差异性分析统计
Tab. 5 Difference analysis of 5 isotopes indexes between main canal water and groundwater

指标	地下水占比统计			
	低于干渠	高于干渠	$\bar{X}_{\text{干渠}} \pm 3S_{\text{干渠内}}$	$\bar{X}_{\text{干渠}} \pm 3S_{\text{干渠外}}$
$\delta(^{87}\text{Sr})$	25	75	8	92
$\delta(^{34}\text{S})$	38	63	19	81
$\delta(^{13}\text{C})$	78	22	67	33
$\delta(^2\text{H})$	67	33	73	27
$\delta(^{18}\text{O})$	37	63	94	6

根据统计分析结果,5 项指标中,锶 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 、硫 $\delta(^{34}\text{S})$ 这 2 项差异性极好,其他 3 项同位素差异性较好。但由于碳同位素容易受到水中溶解性游离二氧化碳和大气交换的影响,在特征指标选取中应该舍弃,而氢、氧作为构成水的基本元素最能反映水体内在的信息,应该予以保留。

2.2.4 指标选取的其他参考因素

土壤中易溶盐成分对水中溶解性离子的影响。

水体在渗透过程中会穿过包气带土壤层或岩石裂缝,不同土壤介质对水中溶解性离子的质量浓度产生影响,其中钙和镁等离子交换性更强的元素更易受到影响,因此在考虑特征指标时应该慎重,从稳定性、差异性 & 渗透性各角度考虑,舍弃钙离子和镁离子,但是考虑到氯/镁离子比和钠/镁离子比具有很好的差异性,因此保留了镁离子作为参照。另外,由于硫酸钙和碳酸钙等化合物均容易因饱和指数而在土壤渗透过程中形成沉积,因此尽管硫同位素在稳定性和差异性上均表现较好,在使用时也应慎重考虑。

时效性因素的考虑。当前水化学指标的分析仪器和分析方法均比较成熟,也比较容易原位或快速监测;同位素指标的分析周期仍然比较长,一般在 1 周以上,仅有氢、氧同位素通过波长扫描光腔衰荡光谱法等光谱法可以在 1 天内获得实验数据,因此

在做渗水问题的应急处理时,同位素指标中优先考虑这两项指标。

2.2.5 干渠水体特征指标的优化组合

综上所述,通过满足“普适性”、“稳定性”和“差异性”的原则,建立干线水体特征指标体系。根据干渠水的普适性原则,筛选出硫酸盐、氟化物、氯化物、硝酸盐、钾、钠、钙、镁、锶和偏硅酸 10 项指标作为待选水化学特征指标;对 10 项水化学指标进行稳定性分析,筛选出锶、钠、钾、钙、镁、氯离子、硝酸盐和硫酸盐等稳定性较好的水化学指标,并拓展 $\delta(^2\text{H})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 、 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 、 $\delta(^{34}\text{S})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 共 5 项同位素进行稳定性分析,分析表明前 4 项同位素均具有较好的稳定性并且受季节变化影响较小。将初选的干渠水体特征指标与周围地下水、地表水及天然降水进行差异性分析,建立干渠水体特征指标体系。水化学单指标差异性分析表明,钠和氯化物差异性极显著,钙、硫酸盐和锶的差异性显著,以此为基础的离子比差异性分析表明,有效的指标组合有 2 个,分别是钠+氯化物+氯化物/镁和氯化物+氯化物/镁+钠/镁。结合同位素指标差异性分析结果,5 项同位素指标中, $\delta(^{87}\text{Sr})$ 和 $\delta(^{34}\text{S})$ 2 项差异性极好,其他 3 项同位素差异性较好。但由于碳同位素容易受到水中溶解性游离二氧化碳和大气交换的影响,在特征指标选取中舍弃,硫同位素由于硫酸钙易沉

淀的原因舍弃,而氢、氧作为构成水的基本元素由于最能反映水体内在的信息,应予以保留,因此综合考虑,氯、钠、氯/镁离子比、钠/镁离子比以及氘(^2H)和氧(^{18}O)6项指标为识别边坡渗水的最优指标组合。

3 结论

在总结南水北调中线干渠水体总体水化学和同位素特征值的基础上,通过“普适性”、“稳定性”和“差异性”的水化学和同位素指标的动态分析与筛查,层层递进并综合考量,归纳出干渠最具有代表性的化学指标和同位素指标。

中线干渠水有硫酸盐、氟化物、氯化物、硝酸盐、钾、钠、钙、镁、锶和偏硅酸等10项水化学指标可以满足“普适性”要求。

10项指标中从数据的稳定性上分析,锶、钠、钾、钙、镁、氯离子、硝酸盐和硫酸盐等8项水化学指标稳定性较好,除了水中 $\delta(^2\text{H})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 同位素外,进一步对 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 、 $\delta(^{34}\text{S})$ 和 $\delta(^{13}\text{C})$ 同位素进行了考虑,其中前4项均具有较好的稳定性,并且稳定同位素数据受季节变化影响较小。

从干渠水与周围地下水等潜在干扰水体的指标差异性上,氯、钠、氯/镁离子比和钠/镁离子比4项水化学指标及 $\delta(^{87}\text{Sr})$ 、 $\delta(^2\text{H})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 和 $\delta(^{34}\text{S})$ 4项同位素指标差异性最明显。

结合多项原则和影响因素进行综合考虑,最终选定氯、钠、锶、氯/镁离子比、钠/镁离子比以及氘(^2H)、氧(^{18}O)、锶(^{87}Sr)共8项指标作为具有普适性、稳定性和差异性的特征指标。发现边坡渗水的第一时间,可以采用氯、钠、氯/镁离子比、钠/镁离子比以及氘(^2H)、氧(^{18}O)6项指标为边坡渗水等问题的快速分析研判提供帮助,特征指标的选定可以为干渠工程安全及水质安全的预警起到良好的支撑作用。

参考文献:

[1] 陈浩,靖争,倪智伟,等. 基于主成分-聚类分析的南水北调中线干渠水质时空分异规律研究[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(7): 36-44. DOI: 10.11988/ckyyb.20210272.

[2] 孙甲,韩品磊,王超,等. 南水北调中线总干渠水质状况综合评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(6): 102-112. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0141.

[3] 张婷婷,杨刚,张建国,等. 南水北调东线一期工程输

水干线水质变化趋势分析[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(1): 8-15. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202106290208.

- [4] NONG X Z, SHAO D G, ZHONG H, et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WOI) method[J]. *Water Research*, 2020, 178: 115781. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115781.
- [5] 夏青. 水质基准与水质标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [6] MAHAPATRA S S, SAHU M, PATEL R K, et al. Prediction of water quality using principal component analysis[J]. *Water Quality Exposure and Health*, 2012, 4: 93-104. DOI: 10.1007/s12403-012-0068-9.
- [7] 王卓民. 南水北调中线总干渠水质快速预测理论与方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [8] 梁建奎,辛小康,卢路,等. 南水北调中线总干渠水质变化趋势及污染源分析[J]. *人民长江*, 2017, 48(15): 6-9. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.15.002.
- [9] YANG L, LIU M C, MIN Q W, et al. Transverse eco-compensation standards for water conservation: A case study of the middle route Project of South-to-North Water Diversion in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(4): 395-406. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2018.04.007.
- [10] 王世猛,万宝春,王路光,等. 南水北调中线河北段水质保护环境风险分析研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(6): 123-125. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.029.
- [11] LIU H, YIN J, FENG L. The dynamic changes in the storage of the Danjiangkou Reservoir and the influence of the South-North Water Transfer Project[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8701-8722. DOI: 10.1038/s41598-018-26788-5.
- [12] 仲志余,刘国强,吴泽宇. 南水北调中线工程水量调度实践及分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 95-99,143. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180015.
- [13] 范傲翔,王智鹏,王超,等. 南水北调中线总干渠水体耗氧特征及成因[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3): 871-879. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0423.
- [14] 谢汶龙,田伟君,周建仁,等. 南水北调东线工程山东段输水期南四湖硫酸盐源解析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 572-580,605. DOI:

- 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0060.
- [15] 田壮壮. 南水北调高填方渠道渗漏监测的多源数据融合模型研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学. 2017.
- [16] 陶佳辉, 卞锦宇, 敖天其, 等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征[J]. 水资源保护, 2023, 39(1):133-141.
- [17] 陈毅良. 南水北调中线工程典型受水区地表水稳定同位素特征及其影响研究[D]. 昆明: 云南大学. 2019.
- [18] ZHANG H, CHEN Z Y, TANG C Y. Quantifying groundwater recharge and discharge for the middle reach of heihe river of china using isotope mass balance method[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(3): 225-232. DOI: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2021.03.00.
- [19] MA F, WANG G L, SUN H L, et al. Indication of hydrogen and oxygen stable isotopes on the characteristics and circulation patterns of medium-low temperature geothermal resources in the Guanzhong basin, China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2022, 10(1): 70-86. DOI: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.01.007.
- [20] 刘海心, 朱瑞, 王文甫, 等. 高密度电法在水库大坝渗漏勘察中的应用[J]. *人民黄河*, 2018, 40(10): 99-103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.10.022.
- [21] 唐剑锋, 肖新宗, 王英才, 等. 南水北调中线干渠生态系统结构与功能分析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5391-5402. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0596.
- [22] MEYBECK M. Pathways of major elements from land to ocean through rivers[C]// *River Inputs to Ocean Systems*. New York: United Nations Press, 1981.
- [23] 徐志方, 唐杨. 南水北调中线水源地河水地球化学特征与流域侵蚀[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(1): 26-30.
- [24] PALMER M R, EDMOND J M. Controls over the strontium isotope composition of river water[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, 56(5): 2099-2111. DOI: 10.1016/0016-7037(92)90332-D.
- [25] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702.
- [26] 仝晓霞, 马武明, 孙兴乐. 新疆帕米尔高原塔什库尔干地区冰川融水锶同位素特征及其环境意义[J]. *环境化学*, 2017, 36(4): 830-838. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.04.2016072207.
- [27] 叶萍, 金勤胜, 周爱国, 等. 河北平原地下水锶同位素形成机理[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2008, 33(1): 137-144.

Screening and dynamic analysis of water body characteristic indexes in the middle route of South-to-North Water Transfer Project

WANG Weiqiang^{1,3}, HAN Xiaodong², GUI Jianye^{1,3}, SONG Hongwei^{1,3},
CHEN Xi², HUANG Guanxing^{1,3}, ZHAO Lun², MU Haidong^{1,3}

(1. Institute of Hydrology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China; 2. China South-to-North Water Diversion Group Middle Line Co., Ltd. Hebei Branch, Shijiazhuang 050035, China; 3. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: The topographic features and rivers along the middle route of the South-to-North Water Transfer Project are complex and diverse, and the groundwater burial conditions are different. Once the canal water is mixed or exchanged with groundwater, it would constitute a potential hazard of canal water pollution. Therefore, the traceability of side slope seepage outside the embankment of the main canal is of great significance to the safety of the main canal project and water quality. It is important to select representative "characteristic indexes" as few as possible for real-time and fast monitoring in emergencies.

To master the hydrochemistry characteristic index system of the main canal, the changes of 99 hydrochemistry indexes and 5 isotope indexes in 12 sections of the main canal of the middle route of the South-to-North Water Transfer from 2020 to 2022 were systematically analyzed. Along the main canal for more than 1 000 km and according to three principles that can be widely used along the main canal (universality), the stability detection of

the main canal itself (stability), and obvious difference with the surrounding water body (difference), identified the specific indexes of the main canal, and then evaluated the normal dynamic range of the characteristic indexes, provided technical support for rapid study and judgment of side slope seepage and engineering safety of the main canal of South-to-North Water Transfer.

The results showed that there were 10 hydrochemistry indexes in the main canal water, which could meet the "universality". For stability, the eight hydrochemistry indexes of strontium, sodium, potassium, calcium, magnesium, and chlorine in the water body of the main canal were generally stable and had a certain volatility due to seasonal changes, deuterium (^2H), oxygen (^{18}O), strontium (^{87}Sr), sulfur(^{34}S) isotopes were the most stable, and were less affected by seasons. For the difference, it was finally determined that the four indexes of chlorine, sodium, chlorine/magnesium ratio, and sodium/magnesium ratio were the most different from the peripheral groundwater.

Based on summarizing the hydrochemistry and isotopic characteristic values of the main canal in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project, the most representative chemical and isotopic indexes of the main canal are briefed according to three principles for universality, stability, and difference. After comprehensive consideration of several principles and influencing factors, there were 8 indicators of chlorine, sodium, strontium, chlorine/magnesium ratio, sodium/magnesium ratio, deuterium (^2H), oxygen (^{18}O), strontium (^{87}Sr) as characteristic indicators with universality, stability, and difference. When water seepage was found in the slope, the chlorine, sodium, chlorine/magnesium ratio, sodium/magnesium ratio, deuterium(^2H), and oxygen (^{18}O) could help analyze and judge problems such as side slope seepage quickly. The selection of characteristic indicators could play a good supporting role in the early warning of the main canal project safety and water quality safety.

Key words: South-to-North Water Transfers; main channel; hydrochemistry characteristic index; ion ratio; dynamic analysis

.....

(上接第 47 页)

The WREI in the southern section of the Yinjiang-Huaihe River showed a fluctuating upward trend, with an average annual growth rate of 3.55%, of which the average annual growth rate of EEI(Ecological Environment Index) was the largest and the average annual growth rate of WRI(Water Resources Index) was the smallest. The proportion of ecological water use and per capita water resources are the main constraints on the improvement of WREI in water areas, and the main obstacles in some counties and districts are indicators such as urbanization rate and water production modulus. There is an obvious positive correlation effect on the water resource utilization efficiency in the water-receiving area, taking county continues to show a low-low agglomeration model, and in 2021, the high-high agglomeration model in Suiyang District will fade, and the high-low agglomeration model in Zhecheng County will show a high-low accumulation model.

Key words: henan section of the Yinjiang-Jinhuai Project; water resource utilization efficiency; SMI-P; disorder factor analysis; spatial autocorrelation