

# 南水北调对城市供水安全预测研究

万晓红, 李 昆, 张盼伟, 赵晓辉, 孔维玮, 吴文强

中国水利水电科学研究院, 北京  
Email: wanxh@iwhr.com

收稿日期: 2020年9月18日; 录用日期: 2020年10月8日; 发布日期: 2020年10月15日

## 摘 要

南水北调中线工程的顺利实施, 解决了沿线多数地区用水短缺、水质差等重大难题, 并对涵养地下水资源保护生态环境意义深远。但是如何保障受水地区供水水质, 保证人民的饮用水健康成为现在的重要工作。本研究通过对丹江口水库、密云水库水体混合试验发现, 南水与北水混合, 出现了较为鲜明的物理混合特征, 未发现沉淀絮凝现象, 混合水体各项水质指标满足饮用水源地水质要求; 混合水体用于衡量氯离子、硫酸根离子腐蚀性的拉森指数值相较于密云水库原水有所降低, 在一定程度上保证了南水入京对城市供水管网的影响, 确保了供水安全。

## 关键词

南水北调, 混合试验, 水质, 供水安全

# Predictive Research on the Safety of Urban Water Supply by South-to-North Water Transfer Project

Xiaohong Wan, Kun Li, Panwei Zhang, Xiaohui Zhao, Weiwei Kong, Wenqiang Wu

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing  
Email: wanxh@iwhr.com

Received: Sep. 18<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 8<sup>th</sup>, 2020; published: Oct. 15<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The Middle Route of South-to-North Water Transfer Project had solved major problems such as water shortage and water quality in most areas along the route. However, it was an important task that how to ensure the quality of water supply in the water-receiving areas and ensure the health

of the people's drinking water. The water of Danjiangkou Dam and Miyun Reservoir were mixed in this research. The results showed that the mixing of South Water and North Water showed physical mixing characteristics and the water quality indexes meet the water quality requirements of the drinking water source. The Larson Index of the mixed water was lower than the raw water of Miyun Reservoir which ensures the influence of the south water entering Beijing on the urban water supply to a certain extent and ensures the water supply security.

## Keywords

South-to-North Water Transfer Project, Mixing Test, Water Quality, Water Supply Safety

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

南水北调中线工程是改善国家水资源配置的重大基础性战略工程,关系国计民生,不仅能有效缓解京、津及华北地区日益严重的水资源短缺问题,还将改善北方地区的生态系统,支撑经济和社会的可持续发展。中线工程总干渠全长 1432 km,跨越河南、河北、北京、天津等多个省、市。这种建设规模大,人工干预强的长距离大型输水渠道不仅受外界影响的因素多,渠道本身也易产生内部演化,水质的影响因素可能比规划设计阶段考虑的影响因素更为复杂[1],因此,在南水与本地水源混合的情形之下,如何保障沿线城市供水管网安全,成为南水北调工程需要解决的重要问题之一。

天然水体的水化学过程是影响污染物迁移转化和水质状况的重要因素,常见的水化学过程包括沉淀和溶解、氧化和还原、吸附和解吸等。在天然河流中,沉淀和溶解过程控制了很多金属离子的浓度水平,比如钙、镁、铁、铝等。氧化还原过程在天然水体中更加普遍,它控制了有机污染物的降解和净化。吸附和解吸也是影响水体污染物分布和归宿的重要机制,超过 50%的污染物都与胶体和颗粒物通过吸附而结合在一起,当水体条件发生改变时,污染物可能重新释放进入水相[2]。当前,对于南水北调中线工程总干渠水化学过程以及与本地水源混合后的水化学过程的研究还非常有限,因此,本文以密云水库水质变化为例对南水来京后对供水管网影响进行预测研究。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料

#### 2.1.1. 原水采集方案

根据评价要求,按 GB/T 14581-93《水质 湖泊和水库采样技术指导》方法,在丹江口水库设置 6 个采样点:分别为陶岔 3 个点,坝前 3 个点,每个采样点水样为深度综合样,即在同一垂直线上,从表层到沉积层之间,不连续地采集 3 个样品,经混合后所得的样品;在密云水库设置 9 个采样点:密云进水口 3 个点、库中 3 个点和水源九厂取水口 3 个点,每个采样点水样为深度综合样,即在同一垂直线上,从表层到沉积层之间,不连续地采集 3 个样品,经混合后所得的样品。

#### 2.1.2. 两库原水混合方案

根据南水北调中线工程调水方案,从 2014 年到 2019 年将逐年向密云水库调水 3~4 亿  $m^3$ ,共计约 17.9 亿  $m^3$ 。密云水库原有库存约 10 亿  $m^3$ ,到 2019 年将达到防洪限制水位 152.0 m,按此调水方案确定混合

比例, 分别(丹江口水库水体: 密云水库水体)是 1:2、1:1 和 2:1, 进行 3 组混合试验。

根据水质测试次数和每个检测指标一次测试所需水样量, 每个混合水样配制 4 L。水样配制完毕后, 将配制的水样轮流放置在恒温水浴振荡器上摇匀 30 min, 之后静置 1 小时, 此时水温与实验室内温度基本一致, 保持在 20℃。

## 2.2. 试验方法

根据评价目的, 对丹江口水库和密云水库(以下简称“两库”)原水及两库原水混合水样进行检测, 指标包括 pH、色度、矿化度、高锰酸盐指数、总硬度、酸度、总碱度、碳酸盐、重碳酸盐、氨氮、总磷、总氮、氯化物、氟化物、硫酸盐、钾、钠、钙、镁、硝酸盐、硫化物等共计 21 项, 各项指标检测方法[3]见表 1。

**Table 1.** Testing methods for conventional physical and chemical indicators of water quality in the two reservoirs

**表 1.** 两库水质常规理化指标检测方法

| 序号 | 项目     | 检测方法 & 标准            | 序号 | 项目   | 检测方法 & 标准            |
|----|--------|----------------------|----|------|----------------------|
| 1  | pH 值   | 水质 pH 值的测定玻璃电极法      | 12 | 钾    | 水质-钾和钠的测定火焰原子吸收分光光度法 |
| 2  | 色度     | 水质色度的测定              | 13 | 钠    |                      |
| 3  | 矿化度    | 矿化度的测定(重量法)          | 14 | 钙    | 水质钙和镁的测定原子吸收分光光度法    |
| 4  | 总硬度    | 水质钙和镁总量的测定 EDTA 滴定法  | 15 | 镁    |                      |
| 5  | 高锰酸盐指数 | 水质高锰酸盐指数的测定          | 16 | 硫化物  | 水质硫化物的测定亚甲基蓝分光光度法    |
| 6  | 氨氮     | 水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法     | 17 | 硝酸盐  | 硝酸盐氮的测定(紫外分光光度法)     |
| 7  | 总磷     | 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法      | 18 | 酸度   | 酸度的测定(碱滴定法)          |
| 8  | 总氮     | 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光法 | 19 | 碳酸盐  | 酸碱指示剂滴定法             |
| 9  | 氟化物    |                      | 20 | 重碳酸盐 | 酸碱指示剂滴定法             |
| 10 | 氯化物    | 水中无机阴离子的测定(离子色谱法)    | 21 | 总碱度  | 酸碱指示剂滴定法             |
| 11 | 硫酸盐    |                      |    |      |                      |

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 两库原水与不同比例混合水样水质变化分析

针对两库原水检测结果不同的指标按不同比例混合后的水质变化情况, 绘制出不同比例混合后的水质变化图(图 1~5)。

结合图 1 和图 2 可以看出, 由于丹江口水库的硝酸盐氮和总氮浓度高于密云水库, 因此丹江口水库原水与密云水库原水混合比例由小变大时, 硝酸盐氮和总氮浓度呈显著上升趋势; 而丹江口水库氨氮浓度低于密云水库, 同一时刻丹江口水库原水与密云水库原水混合比例由小变大时, 氨氮浓度呈显著的下降趋势; 虽然丹江口水库总磷浓度略高于密云水库总磷含量, 但差值较小, 两库原水按不同比例混合后测得总磷浓度基本相同, 随测定结果在数值上不尽相同, 但均在测定误差范围内。因此, 通过混合试验营养盐的变化趋势表明两种水溶液混合后对于营养盐指标而言, 主要发生了物理机械混合作用。

由图 3 和图 4 阴阳离子浓度变化曲线可以看出, 密云水库的阴阳离子浓度高于丹江口水库, 因此, 丹江口水库原水与密云水库原水混合比例由小到大时, 氟离子、氯离子、硫酸根离子、钠离子、镁离子和钾离子浓度呈下降态势, 表明两库原水混合后, 主要的阴阳离子组分主要发生了物理机械混合作用。

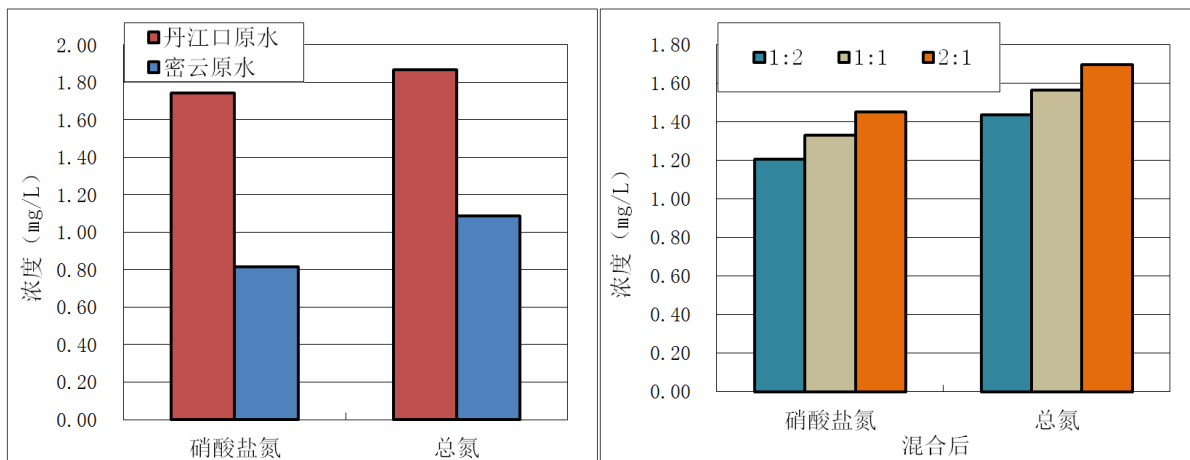


Figure 1. The change trend of nitrate nitrogen and total nitrogen in raw water and mixed experiment (Danjiangkou Reservoir: Miyun Reservoir)

图 1. 原水和混合试验硝酸盐氮和总氮变化趋势(丹江口水库: 密云水库)

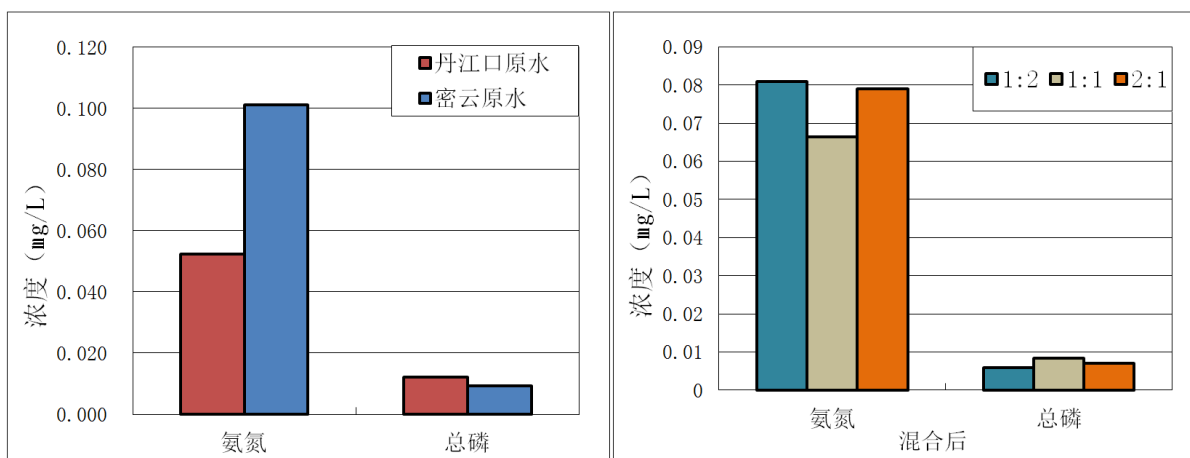


Figure 2. The change trend of ammonia nitrogen and total phosphorus in raw water and mixed experiment (Danjiangkou Reservoir: Miyun Reservoir)

图 2. 原水和混合试验氨氮和总磷变化趋势(丹江口水库: 密云水库)

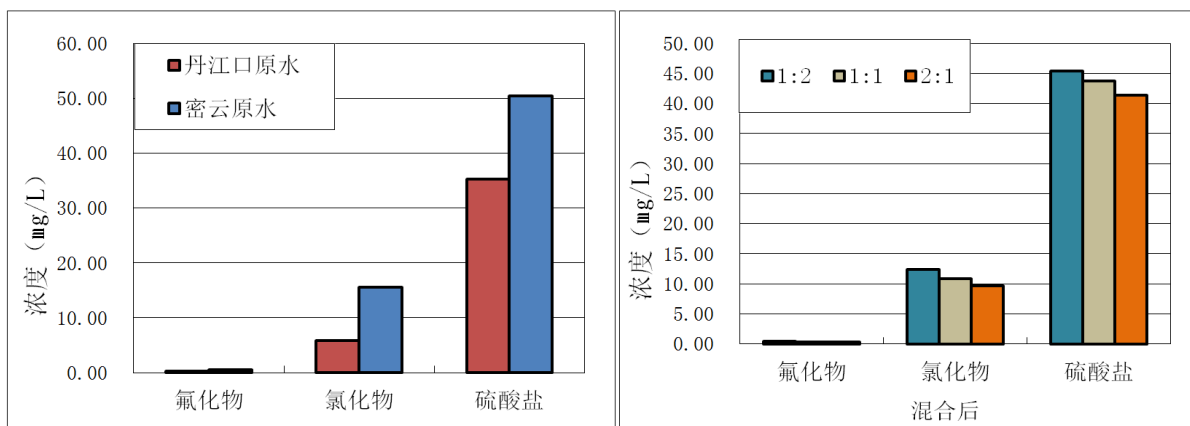
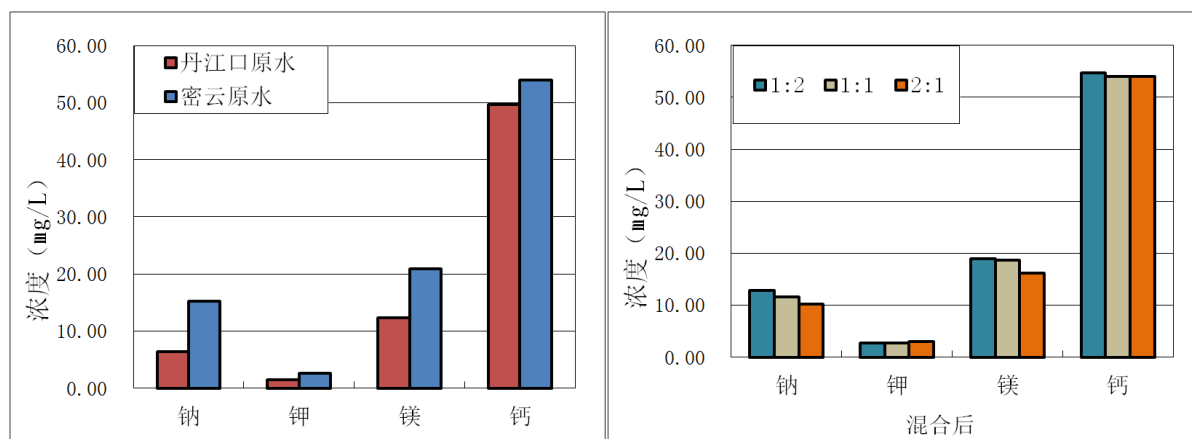
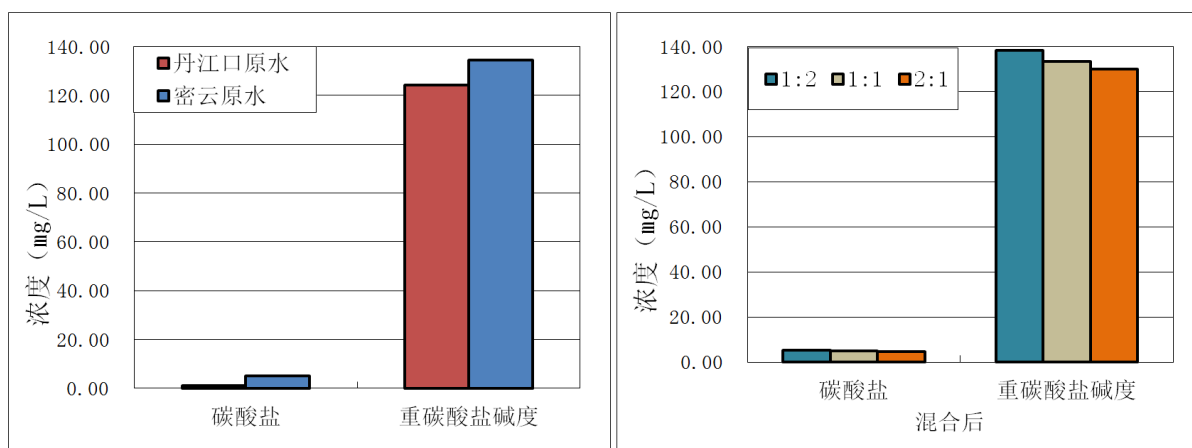


Figure 3. The change trend of raw water and mixed test anions ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) (Danjiangkou Reservoir: Miyun Reservoir)

图 3. 原水和混合试验阴离子( $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ )变化趋势(丹江口水库: 密云水库)



**Figure 4.** The change trend of raw water and mixed test cations ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) (Danjiangkou Reservoir: Miyun Reservoir)  
**图 4.** 原水和混合试验阳离子( $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ )变化趋势(丹江口水库: 密云水库)



**Figure 5.** The change trend of carbonate alkalinity and bicarbonate alkalinity in raw water and mixed test (Danjiangkou Reservoir: Miyun Reservoir)  
**图 5.** 原水和混合试验碳酸盐碱度和重碳酸盐碱度变化趋势(丹江口水库: 密云水库)

然而, 碳酸盐和重碳酸盐浓度的变化打破了上述物理机械混合的规律。由图 5 可以看出, 尽管密云水库碳酸盐和重碳酸盐浓度高于丹江口水库, 丹江口水库原水与密云水库原水混合比例由小变大时, 碳酸盐和重碳酸盐浓度也呈现逐渐降低的趋势, 但二者的浓度变化并没有完全遵循机械混合的规律, 在两水以 1:2 比例混合时, 碳酸盐和重碳酸盐浓度都高于原水浓度。原因主要是水样混合试验在大烧杯中进行, 原水水样中的化学稳定性发生变化, 混合水样中消耗  $CO_2$  的岩石化学风化作用大量减少, 而来自大气  $CO_2$  的溶解以及有机质的氧化过程产生的  $CO_2$  仍在进行, 这些过程使得混合水体中碳酸盐含量增加, 而碳酸盐含量的增加直接改变了碳酸氢钙的平衡:  $Ca(HCO_3)_2 \rightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} + H_2O + CO_2$ , 使得混合溶液体系中重碳酸根浓度也随之升高。为了维持方程的平衡, 水溶液中主要的络合离子对平衡也被打破, 如  $CaSO_4$  中的钙离子会不断补充到溶液中, 因此从表 1 中也可看出在两水以 1:2 比例混合时钙离子浓度也相应高于原水。由于总碱度是由碳酸盐碱度和重碳酸盐碱度共同构成, 因此总碱度的变化规律与碳酸盐和重碳酸盐相同。水体中总碱度升高, 相应 pH 值也增大。

### 3.2. 两库水样混合后水质特性变化对供水管网潜在影响预测评价研究

通常状况下供水管网在输水过程中会受到腐蚀, 腐蚀产物在管道内壁会形成管垢, 管垢具有分层的

结构特征,管垢内外层组成成分和特性存在较大差异。管垢表面是一层较薄的由三价铁氧化物例如 $\alpha$ -FeOOH 等组成的表面沉积层。表面沉积层下面是一层坚硬、致密的壳层,主要成分是 $\alpha$ -FeOOH (针铁矿)和 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (磁铁矿)。壳层与管材基质之间的管垢内层是以二价铁为主的疏松多孔的半固体物质,管垢内层主要成分为: $\gamma$ -FeOOH (纤铁矿)、 $\alpha$ -FeOOH (针铁矿)、 $\text{FeCO}_3$  (菱铁矿)等。如果管垢表面钝化层被破坏,管垢内层松散结构的二价铁和三价铁就会大量进入水流主体,其中的二价铁在主体水流中被余氯和溶解氧氧化成三价铁,形成不溶于水的氢氧化铁胶体颗粒,再凝聚为铁锈悬浮颗粒,增加了水的浊度与色度,即产生黄水问题[4]-[11]。而促使管垢壳层破坏的影响因子主要是供水的溶解氧、余氯、碱度、pH 值、氯离子、硫酸根离子六个主要影响因子。

### 3.2.1. 溶解氧、余氯对供水管网影响分析

溶解氧和余氯对输水管网产生影响的前提是必须在输水水质处于低溶解氧、低余氯的情况下,才能将管道表层钝化层三价铁还原成溶解性较大的二价铁,进而破坏管道表层钝化层,促进铁离子的溶解和释放,影响输水水质。而丹江口水库水体注入密云水库,水源九厂从密云水库引水进入水厂进行自来水厂处理工艺处理,整个过程中处于充分曝气状态,溶解氧保持较高的溶解度,不存在低溶解氧状态,而且自来水在出厂之前加氯消毒,因此自来水在输送过程中也不会处于低余氯状态。由此可见,溶解氧、余氯两个影响因素在本项目实施过程中,丹江口水库向密云水库中引水不会对供水管网产生不利影响。

### 3.2.2. 碱度、pH 对供水管网影响分析

当供水水质在处于低碱度、低 pH 值条件下时,才会加速管道表层钝化层三价铁的溶解,并阻碍致密壳层的形成。鉴于此,我们对丹江口水库源水、密云水库源水和两库不同比例的混合水样进行了碱度和 pH 值检测,检测结果见表 2。

**Table 2.** Analysis results of pH value and alkalinity of source water and mixed water samples from the two reservoirs  
**表 2.** 两库源水、混合水样 pH 值、碱度检测分析结果

| 水样名称              | pH   | 碱度(mg/L) |
|-------------------|------|----------|
| 丹江口水库源水           | 8.28 | 124.16   |
| 密云水库源水            | 8.32 | 139.11   |
| 丹江口水库:密云水库 1:2 混合 | 8.52 | 148.20   |
| 丹江口水库:密云水库 1:1 混合 | 8.51 | 146.55   |
| 丹江口水库:密云水库 2:1 混合 | 8.52 | 138.98   |

从上表分析检测数据可以看出,丹江口水库、密云水库源水 pH 值分别为 8.28、8.32,碱度分别为 124.16 mg/L、139.11 mg/L。而两库水样分别按比例(1:2, 1:1, 2:1)混合后形成的混合水样,通过检测分析表明,pH 值分别为 8.52、8.51、8.52,碱度分别为 148.20 mg/L、146.55 mg/L 和 138.98 mg/L。混合水样同两库源水相比,pH 值和碱度均略有增加或水平相当,未出现水样混合后 pH 值和碱度下降情况。水样混合试验在大烧杯中进行,原水水样中的化学稳定性发生变化,混合水样中消耗  $\text{CO}_2$  的岩石化学风化作用大量减少,而来自大气  $\text{CO}_2$  的溶解以及有机质的氧化过程和水生生物的光合作用仍在进行,使得混合水体中重碳酸盐含量增加,从而 pH、碱度升高。而碱度和 pH 值只有在大幅度降低的情况下,才会加速管道表层钝化层三价铁的溶解,并阻碍致密壳层的形成,而本研究结果表明两库水样混合未发生碱度和 pH 值大幅度下降情况,因此丹江口水库来水注入密云水库后在碱度和 pH 值未发生大幅度下降的情况下,不会对供水管网腐蚀层产生不良影响。

### 3.2.3. 氯离子、硫酸根离子对供水管网影响分析

对于硫酸根、氯离子等中性离子对供水管网的侵蚀性,目前国内外研究主要采用拉森指数(larson ratio)来判别。拉森指数是在国内外研究人员在自来水供水管道腐蚀试验的基础上提出的经验判别公式,使用离子活度进行计算。当拉森指数 > 1 时,水具有严重腐蚀性。拉森指数的计算公式[3]如下:

$$LR = \frac{2\{\text{SO}_4^{2-}\} + \{\text{Cl}^-\}}{\{\text{HCO}_3^-\}}$$

在北京供水切换河北水源导致的黄水事件中,国内研究人员成功应用拉森指数对黄水事件的原因进行了分析研究。水源切换后,管网水拉森指数由原来的 0.4 增加到 1.7~1.9 之间,拉森指数 > 1 说明新水源具有严重腐蚀性,因此当水源突然切换为新水源后,管网出现了黄水问题。研究人员通过水源混合比例实验,进一步验证了拉森指数对黄水问题的解释能力,随着新水源比例的调整,管网水拉森指数降低到 0.7~0.8 之间,用户水质略有好转,但仍超标严重并存在较大波动。换水 39 天后使用原有水源,进一步降低硫酸盐浓度,提高管网水碱度,拉森指数进一步降低到 0.4~0.5 之间,管网水质开始逐渐好转。因此对于旧管,拉森指数也可以作为硫酸盐、氯离子影响下铁释放判别指标,随着拉森指数的增加,管垢铁释放速率升高。同时由实际管网监测数据、实验室模拟试验以及上述分析,在这次黄水事件中可以确定水源切换造成管网部分地区用户龙头出现黄水问题的原因是:水源切换后水源水化学组分发生了很大的改变,特别是硫酸盐浓度大幅度增加,打破了供水管网中管道内的管垢与原有水质之间的平衡,高浓度硫酸盐会使管垢铁锈发生溶解,破坏表面钝化层,造成管垢过量铁释放,从而在管垢表面钝化层较为薄弱的地区产生了黄水问题,自来水管和入户管中管壁上原有的铁锈部分溶出,有的用户家中出现了自来水发黄发浑的现象。上述研究结果都进一步表明拉森指数对于管网钝化层铁离子的释放具有较强的表征判别作用。因此,在总结国内外研究成果的基础之上,本项目采用拉森指数作为两库水体混合后对自来水供水管网表面钝化层产生不利影响的可能性评价判别指标,以此来对调水完成后混合水体对供水管网潜在腐蚀可能性进行评价研究。

丹江口水库源水、密云水库源水、两库混合水样拉森指数计算结果见表 3。

**Table 3.** The calculation results of Larsen index for source water and mixed water samples of the two reservoirs

**表 3.** 两库源水、混合水样拉森指数计算结果

| 水样名称               | 拉森指数(LR) |
|--------------------|----------|
| 丹江口水库源水            | 0.62     |
| 密云水库源水             | 0.87     |
| 丹江口水库: 密云水库 1:2 混合 | 0.75     |
| 丹江口水库: 密云水库 1:1 混合 | 0.74     |
| 丹江口水库: 密云水库 2:1 混合 | 0.72     |

从上表可知,丹江口水库源水、密云水库源水拉森指数分别为 0.62 和 0.87,丹江口水库源水拉森指数明显小于密云水库,说明丹江口水库源水氯离子、硫酸根离子对供水管网的腐蚀性要明显小于密云水库。两库水样按比例(1:2, 1:1, 2:1)混合后的水样拉森指数值分别为 0.75、0.74 和 0.72,混合水样拉森指数值比丹江口水库源水拉森指数值略高,比密云水库拉森指数值略低,这也说明两库水样混合后,混合水样氯离子、硫酸根离子对供水管网的腐蚀性相对于密云水库源水而言是有所降低的,在一定程度上降低了密云水库氯离子、硫酸根离子对供水管网的腐蚀性,提高了供水水质保障。因此,本项目研究评价结

果表明,丹江口水库来水注入密云水库后,混合水体拉森指数值相较于密云水库源水有所降低,在一定程度上降低了密云水库作为水源地对供水管网的腐蚀性,有利于改善供水水质。由此可见,丹江口水库来水注入密云水库后,将会对供水管网腐蚀性产生有利影响,提高供水水质,不会产生不利影响。

#### 4. 结论

南水北调中线工程的顺利实施,解决了沿线多数地区用水短缺、水质差等重大难题,并对涵养地下水资源保护生态环境意义深远。但是如何保障受水地区供水水质,更好地保障人民的饮用水健康成为现在的重要工作。通过本项目研究,丹江口水库、密云水库水体混合试验表现出了较为鲜明的物理混合特征,水体混合后未发现沉淀絮凝现象,混合水体各项水质指标满足饮用水源地水质要求;丹江口水库、密云水库混合水样对供水管网腐蚀性预测评价研究表明,碱度、pH值、溶解氧、余氯不会对供水管网腐蚀性产生不利影响,而混合水体用于衡量氯离子、硫酸根离子腐蚀性的拉森指数值相较于密云水库源水有所降低,在一定程度上降低了密云水库源水对供水管网的腐蚀性,不会对供水水质造成影响。

#### 基金项目

国家重点研发计划(课题编号:2016YFC0401606)。

#### 参考文献

- [1] 尹炜,王超,辛小康.南水北调中线总干渠水质管理问题与思考[J].人民长江,2020,51(3):17-24.
- [2] 张晓健.污染物在河流中的混合过程[J].环境科学,1981(6):54-61.
- [3] GB/T 5750-2006,生活饮用水卫生标准检验方法[S].
- [4] 王洋,张晓健,陈超,等.水源切换引起供水管网黄水问题原因分析[J].环境科学,2009,30(12):3555-3561.
- [5] 牛璋彬,王洋,张晓健,等.供水管网中管内壁腐蚀管垢特征分析[J].环境科学,2006,27(6):1150-1154.
- [6] 牛璋彬,王洋,张晓健,等.供水管网中铁释放现象的影响因素研究[J].环境科学,2007,28(10):2270-2274.
- [7] 许仕荣,方伟,徐洪福,等.城市供水系统的水质化学稳定性变化规律研究[J].中国给水排水,2007,23(11):5-8.
- [8] 张雅君,杜婷婷,孙丽华,等.拉森指数对再生水管网腐蚀状况的影响研究[J].腐蚀科学与防护技术,2016,28(5):449-454.
- [9] 赵蓓,李礼,游晓旭.多水源供水模式下市政管网水质风险评估[J].城镇供水,2020(4):75-81.
- [10] 翟学东,闫学亚.供水系统水质变化对供水管网管道腐蚀影响[J].资源节约与环保,2018(12):26-27.
- [11] 赵欣,朱斌,沈元静,等.水源切换对上海郊区管网水质的影响分析[J].净水技术,2019,38(zl):108-111,142.