

Relationship between River Water and Groundwater in the Main Stream of Naoli River in Sanjiang Plain

Shuang Liu^{1,2}, Haixing Liu¹, Xinqiang Du^{2*}, Xuezhi Gu¹, Hang Lv², Mingjun Wang¹, Xiuqiang Wang³, Qingpei Zhang^{4,5}, Yong Peng¹, Chi Zhang¹

¹School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, DUT, Dalian Liaoning

²College of Environment and Resources, Jilin University, JLU, Changchun Jilin

³Dalian Water Group, Dalian Liaoning

⁴Shenzhen Water Group, Shenzhen Guangdong

⁵Shenzhen Municipal Wastewater Treatment and Recycling Engineering Laboratory, Shenzhen Guangdong

Email: *duxq@jlu.edu.cn

Received: Jan. 21st, 2020; accepted: Mar. 9th, 2020; published: Mar. 16th, 2020

Abstract

In order to determine the relationship and transformation amount between the main stream of the Naoli River and groundwater in Sanjiang Plain, the hydrochemistry and $\delta^{18}\text{O}$ isotope samples of river water and surrounding groundwater in different sections and periods of the Naoli River main stream were calculated and analyzed quantitatively. The results show that the main stream of the river is similar to the groundwater. The isotope data of both are distributed near the local precipitation line, which is one of the main replenishment sources. In April, the upstream and middle reaches of the river were replenished with groundwater, accounting for 77.27% and 66.67%, while the downstream groundwater was replenished with river, accounting for 38.43%. In July, the upstream groundwater replenished the river; the upstream and downstream rivers replenished the groundwater; the proportion of replenishment was 15.04% and 11.82%; while the Naoli River was replenished by the Qixing River; the proportion of replenishment was 32.50%. In October, the upstream and middle and upper reaches of the river were replenished by groundwater with 15.95%; the middle and lower reaches of the river replenished groundwater with 16.18%; and the Qixinghe River was replenished by Naoli River with 18.99%. The results of this study can provide scientific basis for rational utilization of water resources in the river basin.

Keywords

Water Chemistry, Stable Isotope, Groundwater and River Water, Transformation Relationship, Naoli River

作者简介: 刘双(1996-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要从事地表水与地下水转化关系研究。

*通讯作者。

文章引用: 刘双, 刘海星, 杜新强, 顾学志, 吕航, 王明君, 王修强, 张庆珮, 彭勇, 张弛. 三江平原挠力河干流河水与地下水转化关系分析[J]. 水资源研究, 2020, 9(2): 159-168. DOI: 10.12677/jwrr.2020.92017

三江平原挠力河干流河水与地下水转化关系分析

刘双^{1,2}, 刘海星¹, 杜新强^{2*}, 顾学志¹, 吕航², 王明君¹, 王修强³, 张庆珮^{4,5}, 彭勇¹, 张弛¹

¹大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连

²吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春

³大连市自来水集团有限公司, 辽宁 大连

⁴深圳市水务(集团)有限公司, 广州 深圳

⁵深圳城市污水处理与再生利用工程实验室, 广州 深圳

Email: *duxq@jlu.edu.cn

收稿日期: 2020年1月21日; 录用日期: 2020年3月9日; 发布日期: 2020年3月16日

摘要

为了确定三江平原挠力河干流河水与地下水转化关系及转化量, 对挠力河干流不同区段、不同时期河水和周边地下水的水化学、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素样品进行了分析和定量计算。研究表明: 挠力河干流河水与地下水水化学类型相近; 两者的同位素数据均分布在当地大气降水线附近, 大气降水是主要补给源之一。4月上游及中游区段地下水补给河水, 补给比例为77.27%和66.67%, 下游河水补给地下水, 补给比例38.43%; 7月上游地下水补给河水, 中上游及中下游河水补给地下水, 补给比例为15.04%和11.82%, 同时挠力河受到七星河补给, 补给比例为32.50%; 10月上游及中上游地下水补给河水, 补给比例为15.95%, 中下游河水补给地下水, 补给比例为16.18%, 七星河补给挠力河, 补给比例为18.99%。说明挠力河干流不同河段河水与地下水的转化关系和转化量具有季节变异性, 研究成果可以为合理利用挠力河流域水资源等提供科学依据。

关键词

水化学, 稳定同位素, 河水与地下水, 转化关系, 挠力河

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

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

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



Open Access

1. 引言

水资源是人类赖以生存和发展所必需的资源, 自然界中地表水与地下水之间的密切作用, 直接导致两者的量与质的变化, 并对人类生活及社会发展产生影响。因此, 地表水与地下水之间的相互作用一直是地下水研究领域的一个重要课题[1]。系统地研究地表水与地下水之间的转化关系, 对水资源合理开发利用、水资源调控及水资源污染防治等都具有重要作用。

水化学是研究各水体成分的形成机理、发展趋势、演变规律及水文循环的基础工具和重要手段。自然状态下水体中的氢氧同位素具有稳定的化学性质, 是研究天然状态下水运动过程的理想示踪剂[2]。地表水与地下水相互作用影响着各自水化学成分分布和演变规律以及氢氧稳定同位素数值的变化, 因此国内外许多学者应用水化学方法和同位素技术研究流域内地表水与地下水之间的转化关系[3]-[9], 并利用同位素来定量计算转化程度[10][11]。

前人对挠力河流域内地表水与地下水的水化学及同位素的特征进行过分析[12],但对于两者间的转化关系多利用水位资料和模拟模型来确定[13][14],利用水化学和同位素手段在不同时空条件下分析转化关系的研究较少。因此,本文在前人研究基础上,通过水化学和氢氧稳定同位素的手段,对挠力河干流在不同区段、不同时期下的河水与地下水的转化关系进行分析,并定量计算转化程度,为合理利用挠力河流域水资源等提供科学依据。

2. 研究区概况

挠力河发源于长白山脉北延支脉——完达山,汇入乌苏里江,全长 596 km,为雨雪混合补给的河流,平均年径流量为 $19.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。三江平原挠力河流域位于黑龙江省东北腹地,属中温带湿润大陆性季风气候区,年内降雨分配不均,降雨多集中于夏季,多年平均降雨量为 534.5 mm,多年平均蒸发量约为 732.2 mm。地形主要呈西南高,东北低,上游为山丘区,河道坡度较大,河道曲折;中游为平原区,河道坡度极缓,河道呈现极度弯曲状,中游区域河曲、牛轭湖、湖泊及湿地较多;下游为平洼区,主槽坡降在 0.07‰~0.03‰。

挠力河流域,平原广袤农业发达,地下水开发利用程度较高,是农业用水的主要水源,地下水处于超量开采状态,部分地段地下水位埋深持续增加[15],地表水与地下水的联合利用和科学管理问题亟待解决。

3. 数据与方法

3.1. 采样与分析

2018年4、7和10月采集不同河段河水、近岸地下水及远岸地下水[16]各14个水样,采样点如图1所示。水化学数据由吉林大学测试中心及中国科学院东北地理与农业生态研究所测定,同位素数据由美国Beta Analytic公司进行分析, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的精度达到0.3‰,测量结果以相对维也纳标准海水(VSMOW)的千分偏差表示。

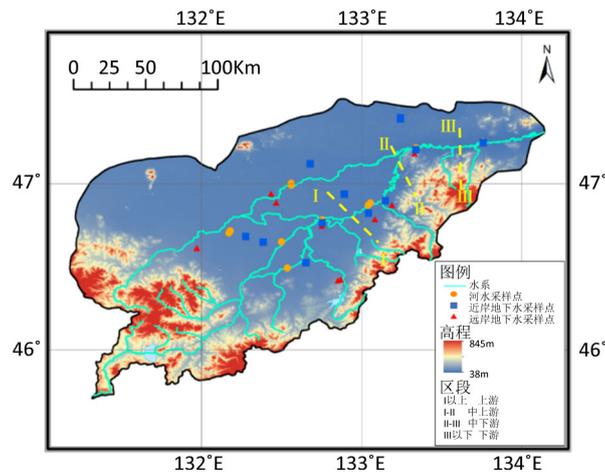


Figure 1. Distribution map of Naoli River basin and water samples

图 1. 挠力河流域及水样点分布图

3.2. 分析方法

整理水样点的水化学和同位素数据并绘制 Piper 图和 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系图,绘制沿挠力河流向的 TDS(总溶解固体)、 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化曲线和各区段各监测期水样点的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 Cl^- 分布图,考虑地形及水文地质条件等因素,分析不同区段、时期下挠力河干流河水与地下水之间的转化关系。根据质量守恒原理,利用同位素做示踪剂,定量估算河水与地下水之间的转化程度,公式如下:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \tag{1}$$

$$C_1 Q_1 + C_2 Q_2 = C_3 Q_3 \tag{2}$$

$$X = \frac{Q_1}{Q_3} \times 100\% = \frac{C_3 - C_2}{C_1 - C_2} \times 100\% \tag{3}$$

在计算河水入渗补给地下水时：式中 Q_1 为河水流量， Q_2 为远岸地下水流量， Q_3 为近岸地下水流量； C_1 为河水中同位素浓度， C_2 为远岸地下水中同位素浓度， C_3 为近岸地下水中同位素浓度， X 为河水入渗地下水的补给比例[17]。

在计算地下水补给河水时：式中 Q_1 为地下水流量， Q_2 为上游河水流量， Q_3 为下游河水流量； C_1 为地下水中同位素浓度， C_2 为上游河水中同位素浓度， C_3 为下游河水中同位素浓度， X 为地下水对河水的补给比例[18]。

4. 结果

4.1. 水化学组成

挠力河流域内，各水体的水化学数据分布如表 1 所示，全部水样点的 pH 值均分布在弱酸、弱碱性范围，TDS 均小于 1 g/L。挠力河流域的浅层含水层主要由砂砾石和细砂组成，上覆约 10 m 厚的粉质黏土[19]，流域内地表植被丰富，腐殖层较厚，降水入渗过程中的水岩作用复杂，导致地下水 TDS 含量明显高于河水。

Table 1. Statistics of chemical and isotopic data of samples from Naoli River

表 1. 挠力河水样点水化学和同位素数据统计

类型	统计值	pH	TDS/mg·L ⁻¹	水化学/meq·L ⁻¹						同位素/‰		
				K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	δ ¹⁸ O	δD
河水 (SW)	最小值	6.11	101.30	0.06	0.52	0.53	0.25	1.02	0.20	0.19	-13.32	-100.66
	最大值	7.96	239.98	0.17	1.54	2.08	1.11	3.14	0.80	0.66	-6.05	-58.45
	平均值	7.24	153.92	0.10	0.88	1.28	0.69	1.89	0.56	0.38	-9.88	-78.91
近岸地下水 (NGW)	最小值	6.45	108.05	0.01	0.62	0.79	0.44	1.74	0.05	0.00	-14.36	-105.00
	最大值	7.87	443.74	0.82	2.00	3.56	2.97	6.11	2.60	1.46	-10.52	-81.32
	平均值	6.91	213.09	0.11	1.11	1.94	1.15	3.20	0.56	0.27	-12.13	-91.03
远岸地下水 (FGW)	最小值	6.45	101.52	0.01	0.68	0.80	0.38	1.93	0.05	0.00	-16.79	-121.06
	最大值	7.30	698.57	0.29	3.73	8.64	4.34	7.20	5.10	1.67	-5.15	-60.29
	平均值	6.84	317.34	0.07	1.46	3.25	1.77	4.16	1.37	0.40	-11.76	-89.85

由 Piper 图(图 2 所示)看出，HCO₃⁻ 为河水和地下水的优势阴离子，占总阴离子的 40.23%~50%以上；阳离子以 Ca²⁺ 为主。除 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺ 外，河水水样点 SO₄²⁻ 和 Na⁺+K⁺ 含量相对较高，地下水 Cl⁻ 和 Mg²⁺ 含量相对较高。

4.2. 同位素组成

挠力河流域全部水样点均分布在当地大气降水线附近，表明大气降水是各水体的主要来源之一，河水水样点大多数分布在降水线的右下侧，且气温较高、蒸发更为强烈的 7 月同位素更为富集，10 月次之，4 月最为贫化，反映出河水在受当地降水补给过程中，受到更为显著的蒸发作用影响。通过图 3 可以看出，三种水体水样点分布区域大致相同，且河水水样点分布最为紧密。因近岸地下水较远岸地下水与河水联系更加紧密，故近岸地下水同位素分布较为分散，远岸地下水则较为紧密。

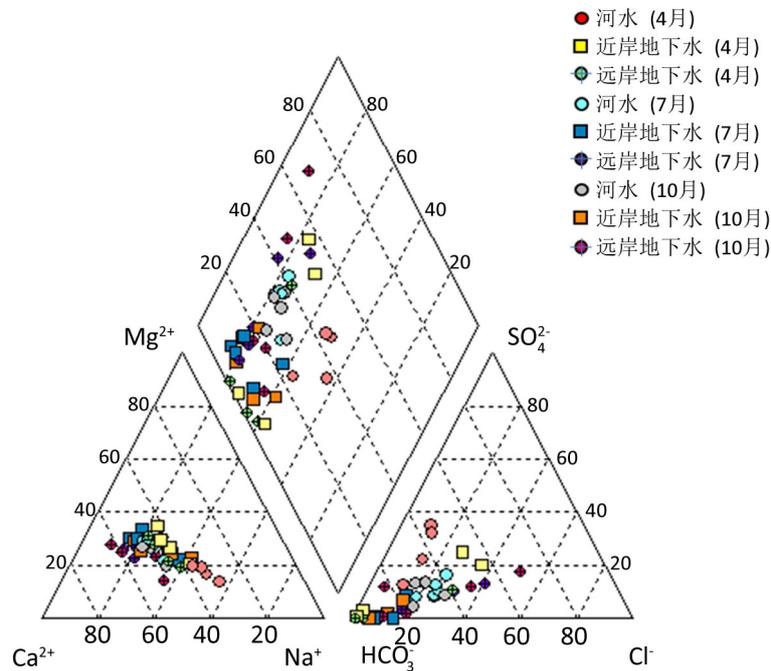


Figure 2. Piper diagram of all water samples

图 2. 全部水样点 Piper 图

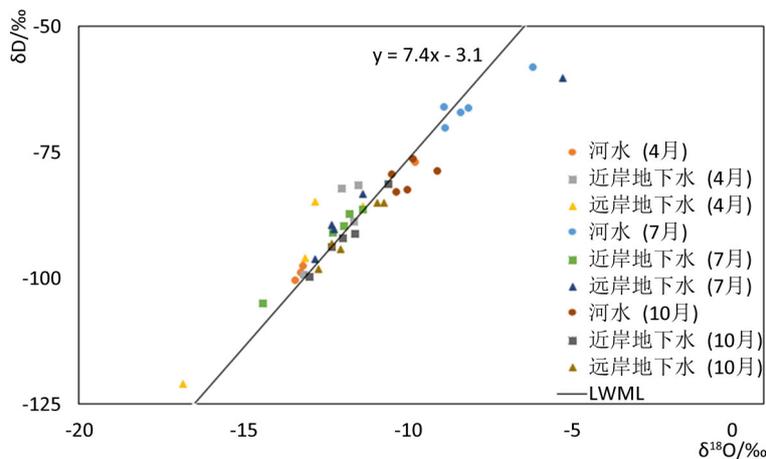


Figure 3. $\delta^{18}\text{O}$ - δD diagram of all water sample points

图 3. 全部水样点 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系图

5. 讨论

5.1. 不同区段河水与地下水转化关系

挠力河流域河水与地下水的转化关系具有空间变异特性。根据水化学和同位素数据，在同一监测期，沿挠力河流向绘制 TDS 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化曲线，如图 4 所示。

4 月，上游区段，起始断面处河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 数值高于地下水，沿河流流向，河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 下降明显，表明受到了同位素较为贫化的地下水的补给；近岸地下水受到离子浓度含量较低的远岸地下水的补给，TDS 出现下降趋势。中游区段，同位素方面，近岸地下水呈现增长趋势，河水受到较贫化的冰雪融水和大气降水的补给，弱化蒸发作用的结果，使河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值保持不变；水化学方面，因地形原因，近岸地下水受远端贫化地下水补给较

少, TDS 值出现较大幅度的增加, 同时侧向补给河水使其呈现增长趋势, 因此本区段为地下水补给河水。下游区段, 地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 TDS 数值迅速下降, 河水变化不大, 表明河水大量补给地下水。

7 月, 上游区段地下水 TDS 始终高于河水且呈增长趋势, 受到蒸发作用和降水入渗补给, 地下水同位素值出现升高趋势, 而受到蒸发作用大于降水补给的河水, 其同位素值未出现上升趋势, 表明河水受到较贫化的地下水补给。中上游区段, 河水的同位素富集作用强烈, 远大于近岸地下水, 近岸地下水受到远端贫化的地下水补给出现下降趋势; 水化学方面, 矿化度较高的地下水受矿化度较低的河水补给, 出现减小并趋近河水变化的趋势。中下游区段, 受到 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高的七星河补给, 挠力河河水同位素出现上升趋势, 两种水体水化学变化趋势不大, 考虑夏季人均用水量增加及左岸广阔的农耕区, 水田灌溉面积占总灌溉面积的 98%, 地下水开采量达 $54.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ [20], 并参考地形及水位曲线, 判断为河水补给地下水。

10 月水样点分布与 7 月相同, 河水与地下水的转化关系也具有相似性。上游区段, 地下水 TDS 受灌区农作物追肥等人类活动导致离子浓度增加, 且高矿化度的河水受到相对贫化的地下水补给, 出现下降趋势。中上游区段, 两种水体的 TDS 变化趋势不大, 同位素较富集的河水, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 随地下水出现下降的趋势, 说明地下水补给河水。中下游区段, 考虑地形和用水情况, 为河水补给地下水。

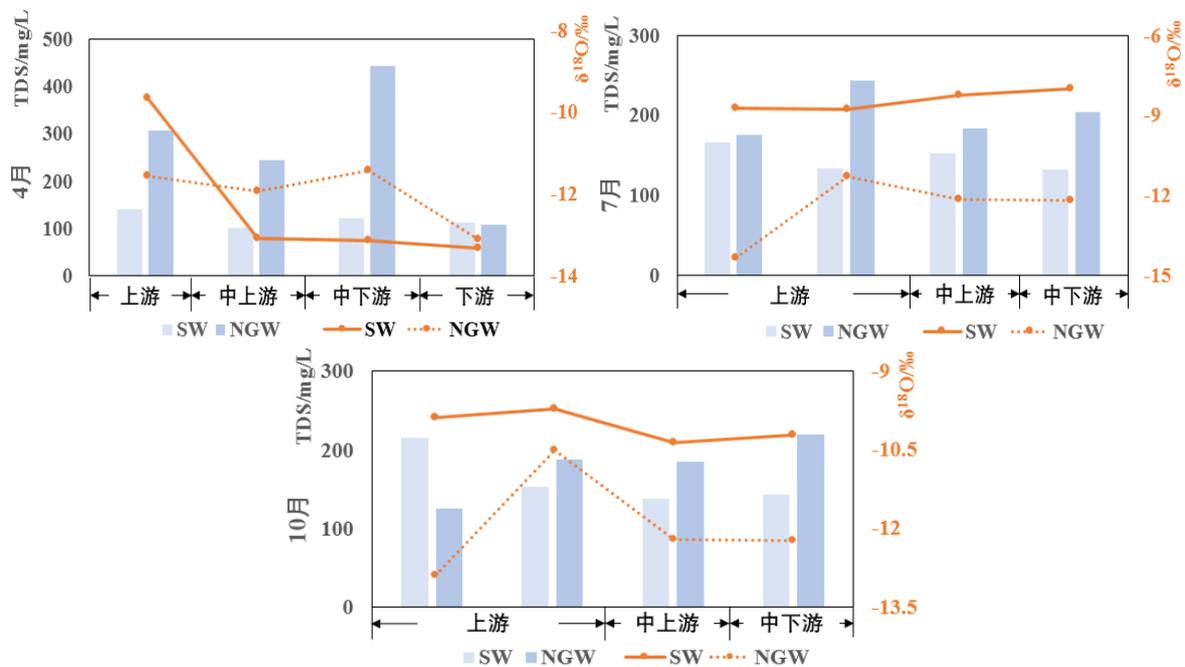


Figure 4. TDS and $\delta^{18}\text{O}$ curves of river and inshore groundwater during each monitoring period
图 4. 各监测期河水与近岸地下水 TDS 和 $\delta^{18}\text{O}$ 沿程变化曲线

5.2. 不同时期河水与地下水转化关系

挠力河流域内河水与地下水的转化关系具有时间动态变化性。在确定不同区段的转化关系后, 绘制各监测期各断面水样点 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Cl^- 分布图, 如图 5 所示。

上游区段, 7 月河水受蒸发作用远大于大气降水和地下水补给作用, $\delta^{18}\text{O}$ 变化不大, 以富集为主。4、10 月河水受到同位素较贫化的冰雪融水、大气降水和地下水的补给程度大于蒸发作用, 同位素出现贫化的趋势; 水化学方面, 河水离子浓度与地下水相类似, 出现贫化的现象, 说明受到了地下水的补给。表明 4、7 和 10 月上游区段为地下水补给河水, 且河水左右两岸地下水都向河水补给。

中上游区段, 4 月地下水受水岩作用及施肥等人类活动导致 Cl^- 较为富集; 同位素方面, 受到融雪水和地下

水补给,上游同位素较富集的河水出现贫化趋势。7月, $\delta^{18}\text{O}$ 从河水向两侧地下水逐渐减小,河水 Cl^- 含量最高。挠力河左岸地下水同位素和水化学指标较高于右岸,且有靠近河水的趋势。考虑近岸地下水与远岸地下水受山地丘陵地势的影响,水力联系相对不畅,使得近岸地下水各项指标最低,推测转化关系为挠力河右岸补给河水,河水补给挠力河左岸。10月同位素及水化学分布与7月呈现一致性, $\delta^{18}\text{O}$ 指标上河水最高,远岸地下水最低; Cl^- 指标上河水最高,近岸地下水最低。但河水同7月相比,与地下水在数值上较为相近,不仅由蒸发作用减弱导致,还与受到地下水补给有关。

中下游区段,4月中上游断面处 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Cl^- 数值较低的河水受到数值较高的地下水补给,在本区段河水的同位素和水化学都呈现增长趋势;7、10月中上游断面处 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Cl^- 数值较低的地下水皆因受到河水的补给,各项指标趋近与河水水体。

下游区段,仅涉及4月水样点,河水的 Cl^- 最高, $\delta^{18}\text{O}$ 最小,地下水与河水呈现相反的趋势。挠力河下游区域,因城市人口密集,农业水平发达,地下水用水量较大,考虑降落漏斗的出现,本区段为河水补给地下水。

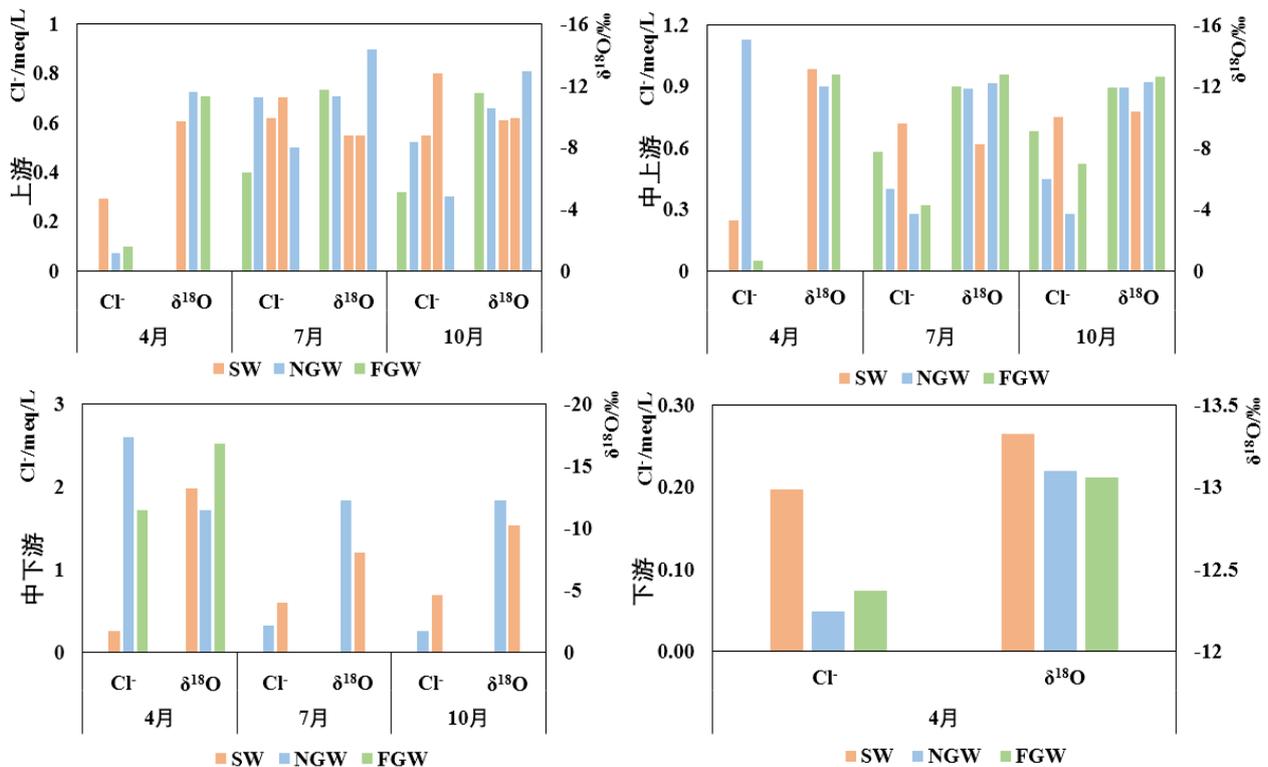


Figure 5. $\delta^{18}\text{O}$ and Cl^- distribution diagram of water samples in each section and monitoring period

图5. 各区段各监测期水样点 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Cl^- 分布图

5.3. 转化量计算

在确定转化关系的基础上,根据质量守恒原理,选择 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,利用公式(3)计算,可得各监测期各区段下河水与地下水的转化关系及补给比例,如表2所示。

4月上游、中游区段,以地下水补给河水为主,补给比例为77.27%和66.67%。因4月为非汛期,流域降水量甚少,河道基流主要由地下水补给,计算结果与正常认知相同。下游地下水开采量大,导致河水补给地下水,其补给比例为38.43%。7月为汛期,降水量较多,河流水位普遍高于地下水,因此中上、下游河水对地下水进行补给,补给比例为15.04%和11.82%。10月降水量略有减少,补给情况受地形条件的影响,故中上游地下水

补给河水，补给比例为 15.95%，中下游以河水补给地下水为主，补给比例为 16.18%。

Table 2. Transformation relationship and recharge ratio of every section in every monitoring period of Naoli River

表 2. 挠力河各监测期各区段转化关系及补给比例

月份	区段	X (补给比例)%	转化方向
4 月	上游	77.27	地下水→河水
	中游	66.67	地下水→河水
	下游	38.43	河水→地下水
7 月	中上游	15.04	河水→地下水
	中下游	11.82	河水→地下水
10 月	中上游	15.95	地下水→河水
	中下游	16.18	河水→地下水

6. 结论

挠力河干流河水与地下水水化学类型相近，优势阴、阳离子都为 HCO_3^- 、 Ca^{2+} ；同位素数据均分布在当地大气降水线附近。流域内湖泊湿地众多，河道中游及中下游坡度极缓，呈现极度弯曲状，河水与地下水交互频繁。两者的转化关系主要受地形地势及水文地质条件的影响，同时也受到补给源和补给量的影响，在非汛期转化关系主要由地势和水文地质条件决定，在汛期河水受大气降水及冰雪融水的大量补给，水位上升，改变了原有的转化关系。

1) 河水与地下水的转化关系具有时间和空间特性：4 月以地下水补给河水为主，7 月以河水补给地下水为主，10 月两者相近；上游区段为地下水补给河水，中游区段转化关系与季节相关，下游因地下水开采量大，为河水补给地下水。

2) 4 月上游及中游区段地下水补给河水，地下水补给比例为 77.27% 和 66.67%，下游河水补给地下水，其补给比例为 38.43%；7 月上游地下水补给河水，中上游及中下游河水补给地下水，河水补给比例为 15.04% 和 11.82%，同时挠力河受到七星河补给，其补给比例为 32.50%；10 月上游及中上游地下水补给河水，地下水补给比例为 15.95%，中下游河水补给地下水，河水补给比例为 16.18%，七星河补给挠力河，补给比例为 18.99%。

基于挠力河干流河水与地下水转化关系的确定，对当地水资源合理利用提出如下建议：河流上游河道受流水侵蚀作用较强，地下水补给河水，应注意植被保护，防止水土流失；中游转化关系受降雨等影响，可建立地下水-河水联合利用模式，并加强统一管理调度；下游因农业和生活用水，开采地下水导致降落漏斗，建议适度减少地下水开采、同时加强地表水灌溉规模，维持水资源与农业和生态环境的可持续发展。

基金项目

国家重点研发计划“大面积农业灌溉的地表水与地下水联合调控”(2017YFC0406002)。

参考文献

- [1] KALBUS, E., REINSTORF, F. and SCHIRMER, M. Measuring methods for groundwater-surface water interactions: A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(6): 873-887. <https://doi.org/10.5194/hess-10-873-2006>
- [2] 苏跃才, 王凤生. 同位素信息在松嫩平原地下水研究中的应用[J]. *吉林地质*, 1988(1): 22-39. SU Yuecai, WANG Fengsheng. The application of isotope information to research on the groundwater of the Songnen Plain. *Jilin Geology*, 1988(1): 22-39. (in Chinese)
- [3] 苏小四, 万玉玉, 董维红, 等. 马莲河河水与地下水的相互关系: 水化学和同位素证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,

- 2009(6): 1087-1094.
SU Xiaosi, WAN Yuyu, DONG Weihong, et al. Hydraulic relationship between Malianhe River and groundwater: Hydrogeochemical and isotopic evidences. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(6): 1087-1094. (in Chinese)
- [4] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 小昌马河流域地表水地下水同位素与水化学特征及转化关系[J]. *冰川冻土*, 2012(3): 698-705.
HOU Dianjiong, QIN Xiang, WU Jinkui, et al. Isotopic, chemical characteristics and transforming relationship between surfacewater and Groundwater in the Xiaochangma River basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012(3): 698-705. (in Chinese)
- [5] 焦艳军, 王广才, 崔霖峰, 等. 济源盆地地表水和地下水的水化学及氢、氧同位素特征[J]. *环境化学*, 2014(6): 962-968.
JIAO Yanjun, WANG Guangcai, CUI Linfeng, et al. Characteristics of hydrochemistry and stable hydrogen, oxygen isotopes in surface water and groundwater in Jiyuanbasin. *Environmental Chemistry*, 2014(6): 962-968. (in Chinese)
- [6] 王雨山, 刘蕴, 龚磊, 等. 水化学和同位素示踪卫宁平原地下水沿河排泄[J]. *干旱区资源与环境*, 2017(10): 77-82.
WANG Yushan, LIU Yun, GONG Lei, et al. Using water chemistry and isotopes to estimate groundwater discharge to rivers in Weining Plain. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017(10): 77-82. (in Chinese)
- [7] 文广超, 王文科, 段磊, 顾小凡, 李一鸣, 赵佳辉. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 734-743.
WEN Guangchao, WANG Wenke, DUAN Lei, GU Xiaofan, LI Yiming, ZHAO Jiahui. Quantitatively evaluating exchanging relationship between river water and groundwater in Bayin River basin of northwest China using hydrochemistry and stable isotope. *Arid Land Geography*, 2018, 41(4): 734-743. (in Chinese)
- [8] MATIATOS, I., PARASKEVOPOULOU, V., LAZOGIANNIS, K., BOTSOU, F., DASSENAKIS, M., GHIONIS, G., ALEXOPOULOS, J. D. and POULOS, S. E. Surface ground water interactions and hydrogeochemical evolution in a fluvio-deltaic setting: The case study of the Pinios River delta. *Journal of Hydrology*, 2018(561): 236-249.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.067>
- [9] VRZEL, J., SOLOMON, D. K., BLAZEKA, Z. and OGRINC, N. The study of the interactions between groundwater and Sava River water in the Ljubljansko polje aquifer system (Slovenia). *Journal of Hydrology*, 2018(556): 384-396.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.022>
- [10] 孙从建, 陈伟. 基于稳定同位素的海河源区地下水与地表水相互关系分析[J]. *地理科学*, 2018, 38(5): 790-799.
SUN Congjian, CHEN Wei. Relationship between groundwater and surface water based on environmental isotope and hydrochemistry in upperstream of the Haihe River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 790-799. (in Chinese)
- [11] Margalef-Marti, R., et al. Use of nitrogen and oxygen isotopes of dissolved nitrate to trace field-scale induced denitrification efficiency throughout an *in-situ* groundwater remediation strategy. *The Science of the Total Environment*, 2019, 686: 709-718.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.003>
- [12] 赵辉, 孟莹, 董维红, 吕颖, 武显仓. 挠力河流域水体氢氧同位素与水化学特征[J]. *人民黄河*, 2017, 39(1): 73-78.
ZHAO Hui, MENG Ying, DONG Weihong, LYU Ying and WU Xianchang. Hydrochemistry and stable isotopes characteristics of water within Naoli River basin. *Yellow River*, 2017, 39(1): 73-78. (in Chinese)
- [13] 顾学志. 挠力河流域地下水循环及其与河水转化关系研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
GU Xuezhi. Research on groundwater circulation and transform relationship with river water of Naoli River basin. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [14] 齐鹏. 基于地下水-地表水联合调控的挠力河流域水资源优化配置[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2018.
QI Peng. Optimized allocation of water resources based on conjunctive regulation of groundwater and surface water in the Naoli River basin, Northeast China. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- [15] 于丽丽, 唐世南, 丁元芳, 陈飞, 羊艳, 丁跃元, 何君. 东北地区地下水超采情况及对策建议[J]. *水利规划与设计*, 2019(4): 37-40 + 96.
YU Lili, TANG Shinan, DING Yuanfang, CHEN Fei, YANG Yan, DING Yueyuan and HE Jun. Groundwater overextraction in northeast China and its countermeasures. *Water Resources Planning and Design*, 2019(4): 37-40 + 96. (in Chinese)
- [16] 代雅建, 崔健, 王晓光. 应用环境同位素分析吉林市松花江水与地下水的联系[J]. *地质与资源*, 2011, 20(1): 62-66.
DAI Yajian, CUI Jian and WANG Xiaoguang. Application of environmental isotopes in the analysis of the relationship between the Songhuajiang River and groundwater in Jilin. *Geology and Resources*, 2011, 20(1): 62-66. (in Chinese)
- [17] SU, X., LU, S., GAO, R., et al. Groundwater flow path determination during riverbank filtration affected by groundwater exploitation: A case study of Liao River, Northeast China. *Hydrological Sciences Journal*, 2017(7): 1-17.
- [18] BUTTLE, J. M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of prevent water from drainage basins. *Progress in Physical Geography*, 1994, 18(1): 16-41. <https://doi.org/10.1177/030913339401800102>

- [19] 董维红, 孟莹, 王雨山, 等. 三江平原富锦地区浅层地下水水化学特征及其形成作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017(2): 542-553.
DONG Weihong, MENG Ying, WANG Yushan, et al. Hydrochemical characteristics and formation of the shallow groundwater in Fujin, Sanjiang Plain. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017(2): 542-553. (in Chinese)
- [20] 卢彦, 韩沂桦. 三江平原垦区水田灌溉用水分析[J]. 水利发展研究, 2017, 17(8): 51-54.
LU Yan, HAN Yihua. Analysis of irrigation water for paddy fields in reclamation area of Sanjiang Plain. *Water Resources Development Research*, 2017, 17(8): 51-54. (in Chinese)