

额济纳三角洲浅层地下水化学特征 及其影响因素

王丹丹^{1,2}, 于静洁¹, 王平¹, 朱秉启¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以额济纳三角洲 2011 年生态输水期间(4 月)和生态输水间歇期(8 月)两次巡测水样的水化学数据为基础, 运用 Kriging 插值、Piper 图等方法, 综合分析单次生态输水情况下额济纳三角洲河岸带、戈壁带和农田绿洲区浅层地下水化学特征变化及其主要影响因素。结果表明: 与 4 月相比, 8 月研究区浅层地下水化学类型未发生明显改变, 但 TDS(总溶解固体)(2 211.7~2 974.3 mg/L)、总硬度(251.5~357.3 mg/L)以及各主要离子含量显著增加, 空间变异系数增大(112.6~157.5); 空间上, 地下水化学表现出明显的变化特征, 沿地下水径流方向, 地下水 TDS 由小于 1 000 mg/L 增高到大于 3 000 mg/L, 垂直河道方向, 距河道一定距离存在 TDS 峰值带; 额济纳三角洲浅层地下水化学特征的影响因素主要包括潜水蒸散发、生态输水和抽水灌溉等。

关键词: 浅层地下水; 水化学特征; 干旱区; 额济纳三角洲

中图分类号: X523; P641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0051-05

Shallow Groundwater Chemistry Characteristics and Their Controlling Factors in the Ejina Delta

WANG Dan dan^{1,2}, YU Jing jie¹, WANG Ping¹, ZHU Bing qi¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on hydrochemistry data of water samples collected during the ecologic water conveyance period in April and the intermission period in August, 2011 from fourteen observation wells in the Ejina Delta, the water chemistry characteristics of shallow groundwater and their controlling factors were analyzed synthetically with the influence of single ecological water conveyance in the riparian zone, gobi desert, and farmland oasis area using the methods of Kriging interpolation and piper diagram. The results indicated that (1) the shallow groundwater hydrochemistry type did not change significantly between April and August in the Ejina Delta, but the TDS(total dissolved solids)(2 211.7 to 2974.3 mg/L), total hardness(251.5 to 357.3 mg/L), and average content of main ions increased significantly from April to August, along with considerable increasing of space variation coefficient (112.6 to 157.5); (2) shallow groundwater chemistry showed spatial variation with the increasing of TDS from less than 1 000 mg/L to more than 3000 mg/L along the direction of groundwater flow and the existence of peak strip of TDS at a certain distance from the river; and (3) the main controlling factors for the shallow groundwater chemistry in the Ejina Delta included evapotranspiration, river water filtration, and groundwater pumping and irrigation.

Key words: shallow groundwater; water chemistry characteristics; arid region; Ejina Delta

浅层地下水是干旱区重要的生态水文过程要素^[1,2], 地下水位埋深及盐度大小直接影响干旱区生态植被的生

长^[1,3]。在我国极端干旱区, 如黑河下游具有重要生态防护功能的天然绿洲区, 浅层地下水化学的变化将直接影响整个

收稿日期: 2013-02-01 修回日期: 2013-06-10 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.040.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB421305); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91025023)

作者简介: 王丹丹(1989-), 女, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要从事地下水水质时空演化研究。E-mail: wangdd.11s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 王平(1979-), 男, 安徽肥西人, 助理研究员, 主要从事干旱区地下水水文过程研究。E-mail: wangping@igsrr.ac.cn

生态系统的动态平衡^[4]。额济纳绿洲区的生态环境问题已引起了国内学者的极大关注^[5,12],已有研究表明,自 2000 年实施黑河输水措施后,额济纳三角洲地下水整体趋于淡化,但部分地区地下水 TDS 持续增加,仍存在严重生态环境危机。前人对额济纳的地下水化学变化特征以及演化机理研究主要集中在实施生态输水工程前后浅层地下水化学的变化及影响因素分析^[6,9,11]。而长期影响效果是单次生态输水影响的累积,研究额济纳三角洲河岸带、戈壁带和农田绿洲区不同地带的地下水化学在单次生态输水情况的各主要影响因素,能更加深入了解生态输水对不同地区地下水化学恢复的影响程度及机理,为生态输水管理和生态环境恢复决策提供重要参考,也为进一步分析与预测自然因素与人类活动共同影响下的水质演化过程提供依据。

1 研究区概况

额济纳盆地地处我国西北河西走廊,黑河流域的最下游。南与甘肃省鼎新盆地相邻,西以马鬃山剥蚀山地东麓为限,东接巴丹吉林沙漠,北抵中蒙边境^[10,13],整体地势由西南向东北逐渐倾斜。该地区深居我国西北内陆腹地,为典型的大陆性干旱气候区,降水稀少,蒸发强烈,温差大,风大沙多。据额济纳旗气象站 1960 年-2011 年观测,额济纳绿洲区多年平均降水量为 34 mm,蒸发能力为 1413 mm^[4]。降水多集中在每年的 6 月-9 月,单次降水量 > 10 mm 的降水场次十分稀少,因此大气降水对地表径流、地下水的直接补给作用十分微弱^[5],但由于降水能有效抑制潜水蒸发作用,因此大气降水对研究区地下水补给作用不容忽视。额济纳三角洲地下水的补给,主要来自黑河水季节性垂向渗漏补给、大气降水的入渗补给、相邻鼎新盆地与额济纳盆地东南部巴丹吉林沙漠潜水的侧向径流补给。地下水系统的排泄主要包括潜水的蒸发、植被的蒸腾及工农业生产和居民生活对地下水的开采。本次研究区为额济纳旗境内狼心山以北的额济纳三角洲,介于东经 99°30' - 102°00',北纬 40°20' - 42°30' 之间,见图 1。

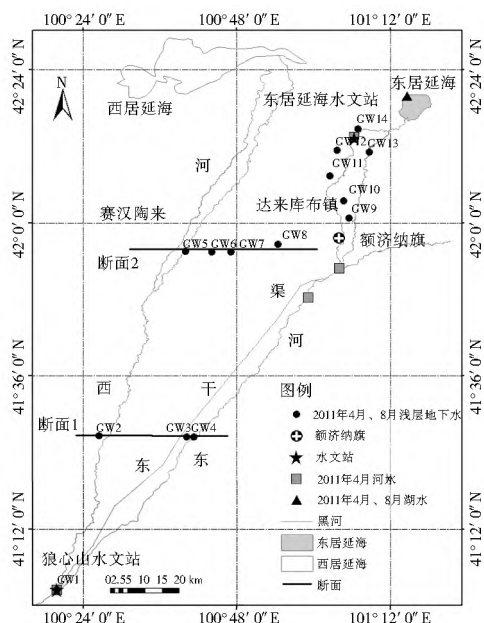


图 1 研究区位置及水样点分布

Fig. 1 Location of the study area and water sampling sites

额济纳盆地主要含水层为第四系含水层,根据垂直方向上的含水层结构分为单一结构含水层、双层结构含水层和多层结构含水层区。额济纳盆地西南部属于单层结构的潜水系统,向东北方向逐渐过渡为双层或多层结构的潜水-承压水系统^[13]。盆地自西南向东北,含水层岩性颗粒渐细,地下水水位埋深渐浅,含水层的富水性由强变弱,含水层层次增多^[16]。

2 研究方法

地下水监测点的布设应考虑监测结果的代表性、实际采样的可行性以及监测工作的连续性,宏观上能控制不同的水文地质单元,反映所在区域地下水质量空间变化。本次研究布设的地表水-地下水水样点,在空间分布上南起狼心山水文站,北至东居延海(图 1),水样点沿着额济纳东、西河的上、中、下游分布在典型的河岸带、戈壁滩与农田绿洲区,且均来自长期观测井,符合地下水监测点布设要求。共采集水样 34 个,其中 4 月和 8 月浅层地下水水样各 14 个(各观测井并深 4.8~15 m,均位于潜水含水层),居延海湖水水样各 1 个;4 月份生态输水河水水样 4 个。现场采用 CyberScanPC300 手提 pH/EC 测定仪测出 pH。水样的室内水化学简分析在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析中心完成,CO₃²⁻和 HCO₃⁻采用滴定法(0.01NH₂SO₄)实验分析,其他的阴阳离子分别利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定。TDS 为八大主要离子质量浓度之和。对于所分析的水样通过阴阳离子平衡计算验证,其实验误差不超过 5%。

3 浅层地下水化学特征

3.1 空间变化特征

额济纳三角洲浅层地下水化学特征在两次采样期的空间分布基本一致;从上游冲洪积扇区到下游东、西居延海附近呈现明显的水平分带性。南部的冲洪积扇区及河岸带,浅层地下水的 TDS < 1 000 mg/L,属于淡水,河岸带 TDS 空间变异小,均值也最小;中部及北部的大部分戈壁带,TDS 介于 1 000~3 000 mg/L 之间,属于微咸水,戈壁带 TDS 普遍较大,空间变异小;东河下游农田绿洲地区的部分 TDS > 3 000 mg/L,属于咸水,农田绿洲区 TDS 空间变异大,多出现极高值,见图 2。

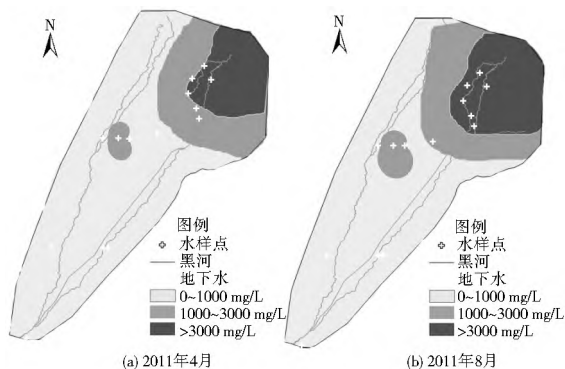


图 2 额济纳三角洲浅层地下水 TDS(mg/L) 分布

Fig. 2 Spatial variations of TDS(mg/L) of shallow groundwater in the Ejina Delta

3.1.1 沿河道方向

自额济纳三角洲南部的冲洪积扇区至东河下游农田绿洲区, 浅层地下水化学类型变化明显: 由狼心山水文站 (GW1) 的 $SO_4-HCO_3-Mg-Na$ 型渐变为 I 断面 (包括 GW2、GW3、GW4) 的 $SO_4-HCO_3-Na-Mg$ 型, 至 II 断面 (包括 GW5、GW6、GW7、GW8) 和东河下游额济纳农田绿洲区演化为 $SO_4-Cl-Na-Mg$ 型; 沿河道河水的水化学类型未发生改变, 均为 $SO_4-HCO_3-Mg-Na$ 型[东居延海湖水的水化学类型为 $Cl-SO_4-Mg-Na$ 型(4月20日水样) 或 $SO_4-Cl-Na-Mg$ 型(8月10日水样)]。可见沿河道地下水化学类型由南部与河水水化学类型相同逐渐变为下游农田绿洲区与东居延海湖水水化学类型相同, 浅层地下水沿河道 TDS (最大增幅 12 364 1 mg/L)、总硬度 (最大增幅 1 384 3 mg/L) 以及各主要离子沿河流方向显著增加。

3.1.2 垂直河道方向

以 0 断面为例, 在垂直河道方向上 TDS 在生态输水期间和生态输水间歇期变化趋势一致: 随着距河道距离的增加, 呈现出增加-减少-平稳的变化趋势, 见图 3。距西河 5 500 m 处的观测井 GW6 的 TDS 最高, 并显著高于其他 3 个观测井。有研究表明, 在极端干旱区的末端, 包气带中盐分因蒸发浓缩作用聚集而丰富, 生态输水的河水水质较好, 大量的河水补给导致近河床位置浅层地下水中 TDS 和离子含量下降, 但同时生态输水使河床上沉积的大量易溶盐类溶解在水中, 造成水头到达之处的地下水盐分升高^[17]; 而远离河道的戈壁带地区, 如 GW7 和 GW8 距东、西河均超过 9 000 m, 它们并不受生态输水的影响^[18], 地下水 TDS 较低且稳定, 因此呈现出上述增加-减少-平稳的变化趋势。综上所述, 在距西河一定距离的位置存在浅层地下水 TDS 峰值带, 即本次生态输水的河水影响范围边界^[17,19]。

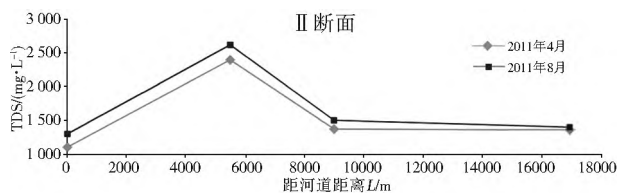


图 3 额济纳三角洲 0 断面各观测井距河道距离 (L) 和 TDS (mg/L) 之间关系

Fig. 3 Relationship between the distance to the Xihe river channel (L) of each observation well on section II and TDS (mg/L) in the Ejina Delta

3.2 时间变化特征

3.2.1 水化学特征分析

由额济纳三角洲河水、东居延海湖水及浅层地下水 Piper 图可以看出, 全部地表-地下水水样都分布在菱形图第 4 区, 其水化学特征为强酸>弱酸, 见图 4。

与 4 月相比, 8 月浅层地下水 pH 均值略有下降 (7.8~7.6); 总硬度均值增加 105 8 mg/L (251.5~357.3 mg/L); TDS 均值增加 762 6 mg/L。4 月的 TDS 均值为 2 211 7 mg/L, 最小值为 780.7 mg/L, 出现在西河上游河岸带的 GW2 观测井; 最大值为 10 229.6 mg/L, 出现在东河下游农田绿洲区的 GW13 观测井。8 月的 TDS 均值为 2 974 3 mg/L,

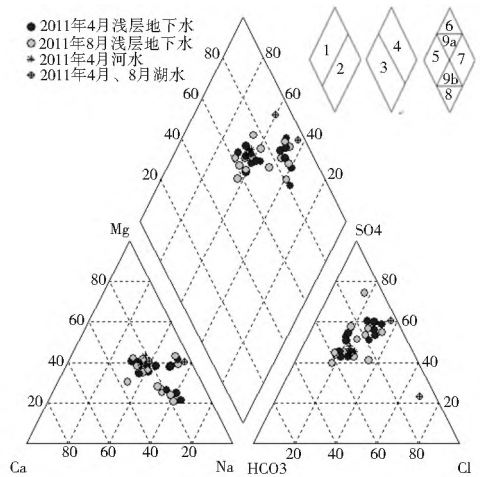


图 4 额济纳三角洲水化学类型 Piper 图

Fig. 4 Piper diagram of hydrochemistry type in the Ejina Delta

最小值 758 5 mg/L, 出现在东河下游农田绿洲区 GW9 观测井; 最大值为 13 122 5 mg/L, 出现在东河下游农田绿洲区的 GW10 观测井。8 月 70% 以上观测井的 TDS 呈现增加趋势, 尤其是断面 N 和断面 0, 除距离东河河道非常近的 GW4 略微下降, 其余所有观测井的 TDS 均显著增加。东河下游农田绿洲区部分观测井的 TDS 略显下降, 变化规律不显著。但浅层地下水化学类型在 Piper 图中的位置几乎无变动, 水化学类型中少量的变化并没有体现地下水盐化的趋势。其中, 50% 的观测井水化学类型完全没有改变, 发生变化的观测井有 GW2、GW5、GW10 和 GW12, 分别由 $Na-Mg-SO_4-HCO_3$ 型变为 $Na-Mg-HCO_3-SO_4$ 型、 $Na-Mg-SO_4-HCO_3$ 型变为 $Na-Mg-SO_4-Cl$ 型, $Na-Mg-SO_4-Cl$ 型变为 $Na-Mg-SO_4$ 型、 $Na-Mg-SO_4-HCO_3$ 型变为 $Ca-Na-SO_4-HCO_3$ 型。

3.2.2 主要离子特征分析

浅层地下水各主要离子与 TDS 变化规律相似, 见表 1。与 4 月相比, 8 月的主要离子成分最小值没有显著变化, 但最大值和平均值都不同程度增加。阴离子中 SO_4^{2-} 平均浓度增加 337 9 mg/L (885.2~1 223 0 mg/L), HCO_3^- 增加 73 6 mg/L (343.3~417.0 mg/L), Cl^- 增加了 63 2 mg/L (317.8~381.0 mg/L); 阳离子中 $Na^+ + K^+$ 平均浓度增加最多, 增加 190 5 mg/L (405 6~596 1 mg/L), Mg^{2+} 增加 72 5 mg/L (157 0~229 6 mg/L), Ca^{2+} 增加 33 3 mg/L (94.5~127.8 mg/L)。8 月各主要离子的变异系数也均增大, 变异系数反映单位均值上的离散程度, 变异系数增大, 表明生态输水间歇期, 额济纳三角洲浅层地下水各离子空间分布不均匀性增加。其中增加最多的是 $Na^+ + K^+$, 约增加 1 倍, 其次是 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} , 浅层地下水中含量较少的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的变异系数一直较小, 没有明显变化。

4 影响因素分析

观测井所处的位置及其地下水水位和河水的动态关系, 决定了观测井的类型, 按照戈壁带、河岸带和农田绿洲区三种不同类型具体分析地下水化学的影响因素, 见图 5。

4.1 戈壁带

在干旱区, 强烈的蒸发作用致使浅层地下水“水去盐

表 1 额济纳三角洲浅层地下水化学离子的统计特征值

Table 1 Statistics of groundwater chemical ions of shallow groundwater in the Ejina Delta

参数	2011 年 4 月浅层地下水					2011 年 8 月浅层地下水				
	最大值 /(mg · L ⁻¹)	最小值 /(mg · L ⁻¹)	平均值 /(mg · L ⁻¹)	标准差	变异系数 (%)	最大值 /(mg · L ⁻¹)	最小值 /(mg · L ⁻¹)	平均值 /(mg · L ⁻¹)	标准差	变异系数 (%)
Cl ⁻	1 572.1	74.0	317.8	400.1	125.9	2 264.9	69.2	381.0	598.3	157.0
SO ₄ ²⁻	4 499.0	225.5	885.2	1 138.8	128.7	6 540.0	231.0	1 223.0	1 937.8	158.4
HCO ₃ ⁻	1 067.5	176.9	343.3	228.6	66.6	1 125.0	200.4	417.0	291.2	69.8
Na ⁺ + K ⁺	2 042.5	87.8	405.6	518.0	172.3	3 136.1	83.9	596.1	976.5	322.5
Mg ²⁺	848.4	50.6	157.0	213.2	135.8	1 153.0	51.0	229.6	390.9	170.3
Ca ²⁺	200.0	52.0	94.5	43.5	46.0	340.4	56.0	127.8	85.6	67.0

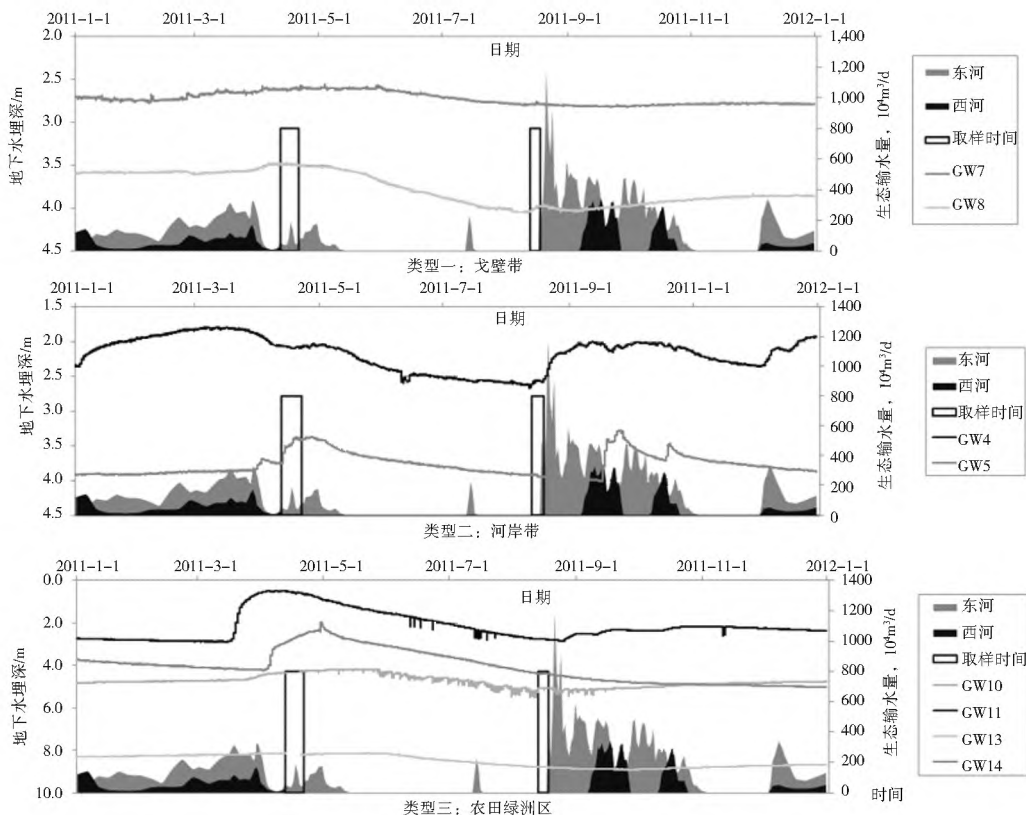


图 5 不同分区河水与地下水位动态变化特征

Fig. 5 Dynamic characteristics of river discharge and groundwater level in different zones

留”，盐分的不断积累导致水化学向盐化方向演化^[2-13]。额济纳三角洲戈壁带(观测井 GW7、GW8)地下水化学变化的主要影响因素是潜水蒸散发作用。如图 5 类型一所示，观测井地下水位在夏季缓慢下降，在蒸散发的持续作用下，戈壁带地下水 TDS 较高，并且随时间不断增大，与 4 月相比，8 月的 TDS 均值升高了 82.8 mg/L (1191.6~1274.4 mg/L)。

4.2 河岸带

2011 年 4 月 12 至 21 日采样时，东、西河已分别连续生态输水 97 d、120 d，处于该年第一次生态输水期间，此时，东、西河已分别输水 14 284 × 10⁴ m³ 和 5 869 × 10⁴ m³，约占全年输水总量的 1/3；8 月 13 至 18 日采样时，东、西河已分别停止生态输水 27 d、123 d，处于第一次生态输水间歇期。黑河间歇性生态输水的河道渗漏补给是研究区浅层地下水的主要补给源^[13]。在距河道 100 m 以内的河岸带(观测井 GW4、GW5)，如图 5 类型二所示，地下水位动态对生态输水

过程的响应显著，地下水位在两次来水期间均有不同程度的回升。因此，河岸带地下水化学变化在受到潜水蒸散发作用影响的同时，主要受到生态输水条件下的河流入渗补给影响，故与戈壁带相比，河岸带的浅层地下水 TDS 整体偏低。受生态输水分配的影响，东河沿岸地下水较西河沿岸更加淡化，TDS 也明显偏小。这主要是因为东河多年平均生态输水量是西河的 3 倍多，因此东河沿岸的地下水受入渗河水的淡化作用更显著。同时，在河水入渗补给地下水的过程中，河岸带地下水中的盐分成条带状向远离河道方向缓慢运动，并在距河岸带一定距离的位置存在一个浅层地下水 TDS 峰值带^[16]。

4.3 农田绿洲区

在农田灌区，春季河水漫灌和夏季地下水开采回灌是影响浅层地下水水位(如图 5 类型三所示)与水化学动态的主要因素，此外，作用于整个额济纳三角洲的潜水蒸散发作用

以及生态输水作用也对大部分位于河流附近的农田灌区地下水化学产生影响。与4月相比,8月灌区地下水的TDS平均增加了2411.2 mg/L(4823.0~7234.1 mg/L),但受灌溉面积及抽水量大小的影响,不同观测点的地下水TDS变化幅度差异较大。其中观测井GW10位于农田中,其控制灌溉面积约为2667 hm²,每年灌溉抽水量约为2.04×10⁴ m³,在地下水抽取-回灌的过程中,浅层地下水受到反复的蒸发浓缩作用,盐分不断淋滤累积,其TDS在4月至8月期间增加了9445.3 mg/L。

浅层地下水化学特征及其变化规律受气候、水文、地形特征、岩性等因素的综合影响,同时受地下水补给、径流、排泄条件的制约^[8]。结合研究区浅层地下水动态变化特征^[14],分析出额济纳三角洲河岸带、戈壁带和农田绿洲区地下水化学主要受到潜水蒸散发、生态输水、抽水灌溉等因素综合作用。

5 结论

(1) 自额济纳三角洲南部的冲洪积扇区至东河下游农田绿洲区,沿河流方向浅层地下水化学类型由SO₄HCO₃MgNa型变为SO₄ClNaMg型,TDS、总硬度以及各主要离子沿地下水径流方向显著增加。

(2) 与生态输水期(2011年4月)相比,生态输水间歇期(2011年8月)的地下水TDS、总硬度以及各主要的离子含量均显著增加,空间变异系数增大,但地下水化学类型并未发生改变。

(3) 在垂直河道方向上,地下水TDS随着距河道距离的增加,呈现出“增加-减少-平稳”的变化趋势,表明在距河岸一定距离的位置存在一个TDS最高的水平带。

(4) 额济纳三角洲浅层地下水化学特征变化的主要影响因素包括蒸散发、生态输水和抽水灌溉等。在戈壁带,潜水蒸散发使水化学盐化,而生态输水过程中的河水入渗补给使河岸带地下水化学得到淡化;在三角洲下游的农田绿洲区,由于抽水灌溉使地表水与地下水之间的多次转换,造成地下水TDS不断增加。

参考文献(References):

- [1] 赵文智,程国栋.干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J].科学通报,2001,46(22):1851-1857.(ZHAO Wen zhi, CHENG Guo dong. The Review of Some Problem on the Study of Ecological Hydrological Process in Arid Area[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(22): 1851-1857. (in Chinese))
- [2] 王平.生态输水下额济纳盆地地下水补给与水质演化研究[R].中国科学院地理科学与资源研究所博士后研究报告,2010.(WANG Ping. Recharge Mechanism and Hydrochemistry Evolution of Groundwater in Ejina Basin under Environmental Flow Controls[R]. Postdoctoral Research Report of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese))
- [3] 张一驰,于静洁,乔茂云,等.黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J].水利学报,2011,42(7):757-765.(ZHANG Yi chi, YU Jing jie, QIAO Maoyun, et al. Effects of Ecological Water Transfer on Changes of Vegetation in the Lower Heihe River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 757-765. (in Chinese))
- [4] 刘莉莉,刘静,王开云,等.额济纳绿洲沿河区地下水埋深对生态输水的响应研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2008,29(2):58-63.(LIU Li li, LIU Jing, WANG Kaiyun, et al. Study on Groundwater Level Responses of Water Transfer Along Rivers Area in Ejina Oasis[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2008, 29(2): 58-63. (in Chinese))
- [5] 苏永红,冯起,朱高峰.额济纳旗浅层地下水环境研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(8):158-162.(SU Yong hong, FENG Qi, ZHU Gao feng. Studies on Shallow Groundwater Environment in Ejina[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(8): 158-162. (in Chinese))
- [6] 苏永红,冯起,朱高峰,等.额济纳旗浅层地下水环境分析[J].冰川冻土,2005,27(2):297-303.(SU Yong hong, FENG Qi, ZHU Gao feng, et al. Hydrogeochemistry of Shallow Groundwater in Ejina Banner, Inner Mongolia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 297-303. (in Chinese))
- [7] 温小虎,作彦卿,苏建平,等.额济纳盆地地下水盐化特征及机理分析[J].中国沙漠,2006,26(5):836-841.(WEN Xiao hu, XU Yao qing, SU Jian ping, et al. Groundwater Salinization Characteristics and Mechanism in Ejina Basin[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 836-841. (in Chinese))
- [8] 张应华,作彦卿,苏建平,等.额济纳盆地地下水补给机理研究[J].中国沙漠,2006,26(1):96-102.(ZHANG Ying hua, XU Yao qing, SU Jian ping, et al. Mechanism of Groundwater Replenishment in Ejina Basin[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(1): 96-102. (in Chinese))
- [9] 席海洋,冯起,司建华,等.分水对额济纳绿洲浅层地下水水化学性质的影响[J].水土保持研究,2007,14(5):135-137.(XI Hai yang, FENG Qi, SI Jian hua, et al. Hydrochemistry of Shallow Groundwater Changes in Ejina Oasis of the Lower Reaches of the Heihe River After Its Water Import[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(5): 135-137. (in Chinese))
- [10] 苏永红,朱高峰,冯起,等.额济纳盆地浅层地下水演化特征与滞留时间研究[J].干旱区地理,2009,32(4):544-551.(SU Yong hong, ZHU Gao hong, FENG Qi, et al. Chemical Evolution of Shallow Groundwater and the Residence Time in the Ejina Basin[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 544-551. (in Chinese))
- [11] WANG Ping, YU Jing jie, ZHANG Yi chi. Impacts of Environmental Flow Controls on the Water Table and Groundwater Chemistry in the Ejina Delta, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(1): 15-24.
- [12] QIN Da jun, ZHAO Zhan feng, HAN Liang feng, et al. Determination of Groundwater Recharge Regime and Flowpath in the Lower Heihe River Basin in an Arid Area of Northwest China by Using Environmental Tracers: Implications for Vegetation Degradation in the Ejina Oasis[J]. Applied Geochemistry, 2012, 27(6): 1133-1145.
- [13] 武选民,史生胜,黎志恒,等.西北黑河下游额济纳盆地地下水系统研究(上)[J].水文地质工程地质,2002,(1):16-20.(WU Xuan min, SHI Sheng sheng, LI Zhi heng, et al. The Study of Groundwater System in Ejina Basin, Downstream of Heihe River Northwest China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, (1): 16-20. (in Chinese))

- 114-118. (REN Hong yan, ZHUANG Da fang, QIU Dong sheng, et al. Analysis of Visible and Near Infrared Spectra of As Contaminated Soil in Croplands Beside Mines [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(1): 114-118. (in Chinese))
- [11] Wu Y Z, Chen J, Ji J F, et al. Feasibility of Reflectance Spectroscopy for the Assessment of Soil Mercury Contamination [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(3): 873-878.
- [12] Ren H Y, Zhuang D F, Singh A N, et al. Estimation of As and Cu Contamination in Agricultural Soils Around a Mining Area by Reflectance Spectroscopy: A Case Study [J]. Pedosphere, 2009, 19(6): 719-726.
- [13] 崔邢涛, 栾文楼, 石少坚, 等. 石家庄污灌区土壤重金属污染现状评价 [J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 38-42. (CUI Xing tao, LUAN Wen lou, SHI Shao jian, et al. Soil Heavy Metal Pollution Assessment in the Sewage Irrigation Region of Shijiazhuang City [J]. Earth And Environment, 2010, 38(1): 38-42. (in Chinese))
- [14] 栾文楼, 温小亚, 崔邢涛, 等. 石家庄污灌区表层土壤中重金属环境地球化学研究 [J]. 中国地质, 2009, 36(2): 465-473. (LUAN Wen lou, WEN Xiaoya, CUI Xing tao, et al. Environmental Geochemistry of Heavy Metals in Surface Soils within Sewage Irrigation Areas of Shijiazhuang City [J]. Geology In China, 2009, 36(2): 465-473. (in Chinese))
- [15] 任红艳. 宝山矿区农田土壤—水稻系统重金属污染的遥感监测 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008. (REN Hong yan. Use of Hyper/Multiple Spectral Data on Monitoring Heavy Metal Pollution in Soil Rice System Near by Baoshan Mines [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008. (in Chinese))
- [16] 刘磊, 沈润平, 丁国香. 基于高光谱的土壤有机质含量估算研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 762-766. (LIU Lei, SHEN Run ping, DING Guoxing. Studies on the Estimation of Soil Organic Matter Content Based on Hyper Spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 762-766. (in Chinese))
- [17] 王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究 [J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 906-912. (WANG Lu, LIN Qizhong, JIA Dong, et al. Relationship Between Visible Near Infrared Reflectance Spectroscopy and Heavy Metal of Soil Concentration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 11(6): 906-912. (in Chinese))
- [18] 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 等. 利用光谱技术分析北京地区农业土壤重金属光谱特征 [J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 730-734. (LI Shu min, LI Hong, SUN Dan feng, et al. Characteristic and Diagnostic Bands of Heavy Metals in Beijing Agricultural Soils Based on Spectroscopy [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 730-734. (in Chinese))
- [19] 尹业彪, 李霞, 赵钊, 等. 沙质土壤含水率高光谱预测模型建立及分析 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(3): 355-359. (YIN Ye biao, LI Xia, ZHAO Zhao, et al. Predict Model and Analysis of the Sandy Soil Moisture with Hyperspectral [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(3): 355-359. (in Chinese))
- [20] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国科学出版社, 1990: 87-496. (China Environmental Monitoring Master Station. Elemental Background Values of Soils in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 87-496. (in Chinese))
- [21] 徐明星, 吴绍华, 周生路, 等. 重金属含量的高光谱建模反演: 考古土壤中的应用 [J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 109-114. (XU Mingxing, WU Shaohua, ZHOU Shenglu, et al. Hyperspectral Reflectance Models for Retrieving Heavy Metal Content: Application in the Archaeological Soil [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 109-114. (in Chinese))
- [22] Xie L J, Ying Y B, Ying T J. Rapid Determination of Rthylene Content in Tomatoes Using Visible and Short wave Near infrared Spectroscopy and Wavelength Selection [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2009.

(上接第 55 页)

- [14] WANG Ping, YU Jing jie, Pozdniakov SP, et al. Shallow Groundwater Dynamics and Its Driving Forces in Extremely Arid Areas: A Case Study of the Lower Heihe River in Northwestern China [J]. Hydrological Processes, 2012, DOI: 10.1002/hyp.9682
- [15] WANG Ping, YU Jing jie, ZHANG Yi chi, et al. Groundwater Recharge and Hydrogeochemical Evolution in the Ejina Basin, Northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 72-86.
- [16] 钱云平, 秦大军, 庞忠和, 等. 黑河下游额济纳盆地深层地下水来源的探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2006, (3): 25-29. (QIAN Yun ping, QIN Da jun, PANG Zhong he, et al. A Discussion of Recharge Sources of Deep Groundwater in the Ejina Basin in the Lower Reaches of Heihe River [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (3): 25-29. (in Chinese))
- [17] 陈永金, 陈亚宁, 李卫红, 等. 生态输水影响下地下水化学特征的时空变化分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 734-741. (CHEN Yong jin, CHEN Ya ning, LI Wei hong, et al. Spatial and Temporal Variations of the Groundwater Chemical Characteristics under Ecologic Water Conveyance in the Lower Reaches of Tarim River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 734-741. (in Chinese))
- [18] 武选民, 史生胜, 黎志恒, 等. 西北黑河下游额济纳盆地地下水系统研究 (下) [J]. 水文地质工程地质, 2002, (1): 16-20. (WU Xuan min, SHI Sheng sheng, LI Zhi heng, et al. The Study of Groundwater System in Ejina Basin, Downstream of Heihe River Northwest China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, (1): 16-20. (in Chinese))
- [19] 陈永金, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1299-1304. (CHEN Yong jin, CHEN Ya ning, LI Wei hong, et al. Three Stages of the Groundwater Chemical Properties Reacting on the Intermittent Water Deliveries in Lower Tarim River, China [J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1299-1304. (in Chinese))