

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0139

张学静,王平,王田野,等.输水条件下额济纳绿洲浅层地下水水化学特征与水位埋深关系[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):86-94. ZHANG X J, WANG P, WANG T Y, et al. Relationship between chemical characteristics of shallow groundwater and water level depth in Ejina Oasis under water conveyance conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 86-94. (in Chinese)

输水条件下额济纳绿洲浅层地下水 水化学特征与水位埋深关系

张学静^{1,2}, 王平¹, 王田野^{1,2}, 于静洁^{1,2}, 刘啸³

(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; 3. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘要:浅层地下水水化学特征及水位埋深是干旱区地下水环境变化的重要指示,研究其时空变化对于干旱区绿洲生态环境修复及其可持续发展具有重要意义。以我国西北干旱区第二大内陆河——黑河下游额济纳绿洲为研究区,以2017年8月水化学组分分析数据为基础,结合水化学历史分析数据(2001年9月和2009年8月)及地下水位埋深自动监测数据,运用反距离权重(IDW)插值方法和水化学Piper图解法,分析了生态输水以来(2001—2017年)额济纳绿洲地下水水化学特征和水位埋深的时空变化特征及二者间的响应关系。结果表明,在空间上,地下水位从西南到东北逐渐降低,地下水总溶解固体(TDS)沿着地下水流向呈增加趋势。2001、2009及2017年地下水化学类型变化不明显,分别呈 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Mg} \cdot \text{Na}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg}$;地下水中TDS变化较为明显,即在2001年最高,2017年次之,2009年最低。TDS与地下水位埋深之间呈非线性统计关系,具体表现为:水位埋深在1.5~3 m及6 m以下范围内,TDS变化不大,稳定维持在2 000 mg/L左右;但在3~6 m范围内,TDS随地下水位埋深增大呈一定的增加趋势。

关键词:水化学特征;地下水;额济纳绿洲;干旱区

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Relationship between chemical characteristics of shallow groundwater and water level depth in Ejina Oasis under water conveyance conditions

ZHANG Xuejing^{1,2}, WANG Ping¹, WANG Tianye^{1,2}, YU Jingjie^{1,2}, LIU Xiao³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and 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; 3. Development Research Center of the Ministry of Water Resources of P. R., Beijing 100038, China)

Abstract: The chemical characteristics and water level of shallow groundwater is an important indicator of groundwater environment change in the arid area. Understanding its temporal and spatial variations are of key significance for the sustainable development in arid ecosystems. The Ejina Oasis in the lower reaches of Heihe River of the second largest inland river basin of northwestern China was selected as the study area. Based on the shallow groundwater sampling and water chemical composition analysis data of August 2017, the historical hydro-geochemistry data (September 2001 and August 2009) and groundwater table depth

收稿日期:2019-04-30 修回日期:2019-05-26 网络出版时间:2019-06-024

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190624.1038.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(41671023;41371059;41571029);中俄(NSFC-RFBR)项目(41811530084;18-55-53025 ГФЕН_а)

作者简介:张学静(1995—),女,宁夏固原人,主要从事水文与水资源研究。E-mail: zhangxj.17s@igsnr.ac.cn

通信作者:王平(1979—),男,安徽肥西人,副研究员,博士,主要从事干旱区地下水与生态水文过程研究。E-mail: wangping@igsnr.ac.cn

automatic monitoring data, the tempo-spatial variations of shallow groundwater's hydro-geochemistry in Ejina Oasis and the response to groundwater depth were analyzed using the Inverse Distance Weight (IDW) interpolation method and the Piper graphic method. The results showed that the shallow groundwater level in the Ejina Oasis gradually decreased from southwest to northeast; however, groundwater's TDS, in contrast, gradually increased in this direction. There was no obvious change in groundwater chemical types in 2001, 2009 and 2017, and the type of water chemistry in 2001, 2009 and 2017 were $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Mg} \cdot \text{Na}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg}$, respectively. The change of TDS in groundwater was more obvious, and the highest TDS was observed in 2001, followed by 2017, while the lowest was detected in 2009. A nonlinear relationship between TDS and groundwater table depth was detected. The water table depth ranged 1.5-3 m and below 6 m, TDS did not change much with a value of approximately 2 000 mg/L; however, at 3-6 m, TDS increased when the groundwater table depth was getting larger.

Key words: hydro-geochemical characteristics; groundwater; Ejina Oasis; arid area

额济纳绿洲位于中国西北极端干旱区第二大内陆河—黑河流域下游,沿河道两岸发育的绿洲是中国北方重要的生态屏障。该地区气候干旱,降水极少,多年平均降水量不足 50 mm,年均潜在蒸发量却高达 1 500 mm^[1];地表水资源匮乏,黑河是流入该地区的唯一地表河流。浅层地下水是该地区重要的水资源^[2],也是维持额济纳绿洲植被生长的关键^[3]。额济纳绿洲地下水资源主要依赖于黑河季节性过水渗漏补给^[4]。20 世纪 50 年代至 20 世纪 90 年代,由于黑河中游地区地表水资源的过度开发消耗,导致下游地表来水量锐减^[5]。受此影响,下游区域地下水位显著下降,进而引发了植被退化,绿洲区面积萎缩,沙尘暴出现频率增加,荒漠化加剧等一系列生态环境问题^[6-9]。与此同时,水资源短缺和环境恶化进一步限制了当地社会发展。为恢复下游地区持续下降的地下水位,遏制和修复退化的生态环境,国务院于 2000 年启动了黑河生态输水工程。

已有研究表明,额济纳绿洲生态环境的恢复主要依赖于浅层地下水环境的改善,特别是地下水位回升与水质改善^[11,15-18]。围绕额济纳绿洲浅层地下水环境变化及其对绿洲植被的影响,近年来国内外学者开展了对水位或水质变化分析^[10-12]以及植被空间分布格局对地下水位^[13]或盐分^[14]响应关系的研究。综合前人的研究结果得出,生态输水以来额济纳绿洲浅层地下水位整体上升^[15-16],地下水盐度呈现逐年降低趋势^[11];从补给区到排泄区,地下水盐度和水化学类型呈明显带状分布^[10]。浅层地下水的主要离子质量浓度、总溶解固体(TDS)含量及水化学类型具有一定的时间和空间异质性^[17],其中 TDS 和主要离子浓度沿着地下水流向逐渐增大^[18]。上述研究成果多以 2000—2010 年的野外实验与观测数据为基础。2010 年以来,额济纳绿洲水文情势与生态环境发生

了明显变化:一方面,进入黑河下游额济纳绿洲的地表径流量整体呈增加趋势,特别是 2016 年与 2017 年;另一方面,额济纳绿洲范围也呈现一定程度的扩张趋势。然而,针对 2010 年至今地下水环境变化的研究相对较少。

本文基于前人的研究基础,综合 2001 年 9 月、2009 年 8 月和 2017 年 8 月三期地下水水化学分析数据及 2010—2017 年地下水位埋深高频自动监测数据(30 min/次),运用 Piper 图解法、反距离权重(IDW)插值法和时序分析等方法,分析额济纳绿洲地下水水化学组分的时空变化特征和地下水位的年际变化趋势,为评估生态输水对额济纳绿洲地下水环境的影响提供依据;并进一步探析地下水 TDS 与水位埋深之间的空间响应关系,实现对额济纳绿洲地下水盐分动态的分区,为揭示干旱区内陆河下游典型区地下水变化提供研究案例。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

额济纳绿洲位于中国内蒙古自治区西部,南起狼心山,北至东、西居延海,地理坐标为 100°10′~101°20′E,41°00′~42°40′N^[16](图 1)。额济纳绿洲是由辐射扇状水系发育而成的广阔内陆河三角洲,地势低平,海拔高度为 820~1 127 m,地面坡降 1‰~3‰,总体上自西南向东北缓慢倾斜^[2]。额济纳绿洲处于极端干旱气候区,年均气温 9.09℃,最高气温 27.05℃,最低气温 -11.23℃^[19]。多年平均降水量 42 mm,最大年降水量 103 mm,最小年降水量 7 mm,年蒸发能力 1 400~1 500 mm^[20,22]。唯一地表河流黑河自狼心山处分为额济纳东河与额济纳西河,最终分别注入尾间湖泊东居延海和西居延海^[20-21]。该地区潜水含水层主要为第四系含水层,岩性结构较为单一,主要由细砂、粉砂、黏土

和亚黏土组成,由西南向东北颗粒逐渐变细,含水层的富水性逐渐变弱,水位埋深逐渐增大^[2]。额济纳绿洲的土壤属地带性灰棕荒漠土和石膏性灰棕荒漠土,天然绿洲内多是草甸土、盐化草甸土、

风沙土等,局部有盐化沼泽土和沼泽盐土出现。植物种类贫乏,以旱生、超旱生、耐盐碱的亚洲中部荒漠成分占优势,常见植被类型有胡杨、怪柳、沙枣、梭梭等^[23]。

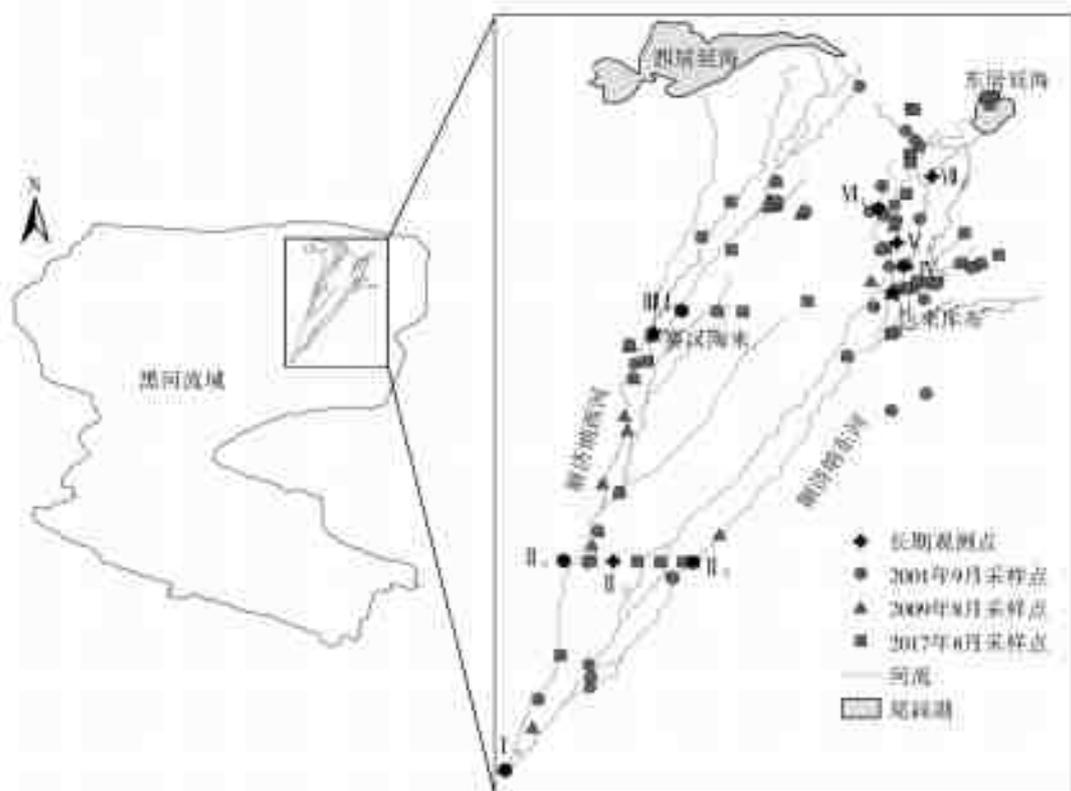


图 1 研究区地下水观测点及 2001、2009、2017 年采样点分布

Fig. 1 Location of groundwater observation wells and the points of water samples in 2001, 2009 and 2017

1.2 数据来源

为分析生态输水以来额济纳绿洲地下水水化学组分时空变化规律,选取 2001 年 9 月上旬,2009 年 8 月下旬和 2017 年 8 月下旬 3 次地下水野外采样的水化学分析数据为基础,采样点位置见图 1。其中,2001 年 9 月上旬采集水样 58 个,2009 年 8 月下旬采集水样 32 个,2017 年 8 月下旬采集水样 33 个,水样主要取自当地抽水灌溉的农田机井与民用水井。

此外,从研究区已布设的地下水长期监测网中^[16]选取了 9 眼典型位置观测井(I₁, II₁, II₃, II₇, III₁, IV₂, V₂, VI₁, VII₃),分析该地区 2010—2017 年地下水位埋深变化。所选观测井位置见图 1,其中 I₁ 观测井位于狼心山水文站; III₁、III₃ 和 III₇ 分别位于西河和东河河岸带; II₃ 位于戈壁带; IV₂、V₂、VI₁、VII₃ 位于绿洲区(天然绿洲区和人工绿洲区)。

1.3 分析方法

对所采集的地下水水样进行室内水化学离子分析,该实验在中国科学院地理科学与资源研究所理

化分析实验室完成。其中:主要的阴阳离子(Na^+ + K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 F^- 等)采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定; HCO_3^- 采用滴定法测定。

根据测定的阴阳离子质量浓度,计算 TDS(total dissolved solids, TDS),也称矿化度,其值常以 105~110 °C 下将水分蒸干后所留固体的量来表征,实践中多以主要阴、阳离子质量浓度之和来计算,即 $\text{TDS} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + 1/2\text{HCO}_3^-$ (由于: CO_3^{2-} 质量浓度极小,甚至为 0,所以忽略不计;蒸干过程有将近一半的 HCO_3^- 被蒸发消耗,所以上述公式中仅留存一半质量浓度的 HCO_3^-)^[24]。根据 TDS 值,可以将地下水划分为淡水、微咸水、咸水、盐水和卤水,即 $\text{TDS} \leq 1\,000 \text{ mg/L}$ 时,属于淡水; $1\,000 \text{ mg/L} < \text{TDS} \leq 3\,000 \text{ mg/L}$ 时,属于微咸水; $3\,000 \text{ mg/L} < \text{TDS} \leq 10\,000 \text{ mg/L}$ 时,属于咸水; $10\,000 \text{ mg/L} < \text{TDS} \leq 50\,000 \text{ mg/L}$ 时,属于盐水; $\text{TDS} \geq 50\,000 \text{ mg/L}$ 时,属于卤水^[25]。

为了对比分析 2001、2009 和 2017 年额济纳绿洲的地下水水化学特征的时空变化规律,本研究采用反距离权重(IDW)方法对点尺度上的 TDS 和主要离子浓度进行空间插值。IDW 是空间统计中最常用的内插方法之一,通过周围临近点的已知值的线性权重组合来估算未知值,两点间的距离越近,其值越相似^[26]。利用空间插值后的 TDS 和主要离子浓度值对比分析地下水水化学特征的时空变化规律。同时,对 TDS 和地下水位插值数据在空间上进行重采样(空间分辨率为 100 m),获取同一时期的 TDS 和地下水位埋深二者间的统计关系。

地下水水化学成分以 Piper 三线图来表示。该图由 1 个菱形和 2 个等边三角形组成,以 6 种阴阳离子(HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$)毫克当量百分数为基础,首先,通过阴阳离子质量浓度确定水样在两个三角形上的位置,然后过该点作平行于刻度线的延伸线,在菱形中的交点即可表示地下水的化学特征^[24,27]。

2 结果与分析

2.1 输水对地下水水位的影响

2.1.1 地下水流向

以 2017 年地下水位巡测数据为基础,对地下水位进行空间插值,获得区域整体地下水位空间分布特征(图 2)。整体上,从上段狼心山下至下段居延海方向,地下水位逐渐降低;地下水流向沿着西南至东北方向,与河流流向保持一致,这与前人的实测资料以及实验模拟结果相符合^[8]。截至 2017 年 8 月,区

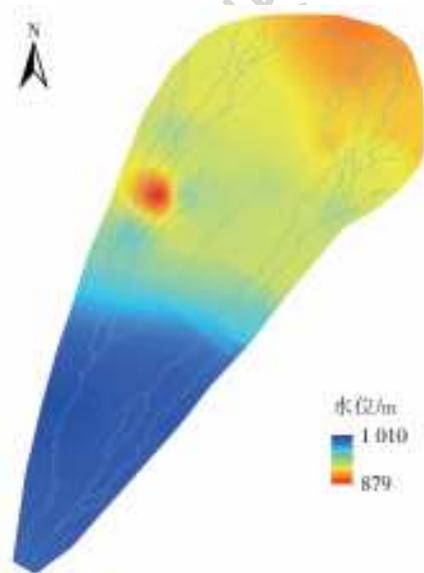


图 2 2017 年 8 月地下水位空间分布特征
Fig. 2 Spatial distribution characteristics of groundwater level in August, 2017

域平均地下水位约 943 m,其中地下水位最高值约为 1 010 m,最低值约为 879 m。受河道渗漏补给和相邻盆地地下水侧向补给影响,额济纳绿洲西南地区水位较高。额济纳绿洲尾间湖地区及下游农灌区地下水位则相对较低。特别是近年来随着地下水开采强度的增加,农灌区地下水位下降明显,甚至在局部区域已经形成降落漏斗(赛汉陶来)。

2.1.2 地下水位时空变化特征

地下水位变化是反应地下水储量时空动态最直接的指示因子。如图 3(a)至 3(e)所示,时间尺度上,随着黑河生态输水量逐年增加(图 4),各观测点水位埋深呈逐年变浅趋势。而在空间尺度上,沿着河流方向,位于河流上段观测井的水位埋深比下段观测井浅,例如,位于额济纳西河河岸的观测井 II_1 水位埋深比 III_1 水位埋深浅(图 3(c))。垂直河道方向上,河岸带观测井水位埋深比戈壁带的要浅。例如,观测井 II_1 、 II_3 和 II_7 位于东西向同一剖面上(图 1),从西向东依次跨越额济纳西河河岸带、戈壁带和额济纳东河河岸带。对比这三个观测井的水位埋深变化曲线(图 3(d))可以发现,河岸带观测井(II_1 和 II_7)水位埋深较浅,水位埋深在 1.5~2.5 m;而位于戈壁带的观测井(II_3)水位埋深在 3.5~4 m,比河岸带观测井的水位埋深大。该现象源于河岸带观测井更靠近河道,受河水补给较多,地下水水位回升较快;位于戈壁带的观测井远离河道,受到河道渗漏补给影响小,水位恢复较弱。

位于绿洲区的 IV_2 、 V_2 、 VI_1 、 VII_3 观测井的水位埋深变化具有一定的空间差异性(图 3(e))。 IV_2 、 VI_1 和 V_2 观测井位于人工绿洲区,其中, IV_2 、 VI_1 观测井的多年水位埋深为 1~3 m;而 V_2 观测井的多年水位埋深在 3~5 m。结合野外调查发现,由于受到地下水开采影响, V_2 观测井的水位埋深比 IV_2 和 VI_1 观测井大。 VII_3 观测井位于天然绿洲区,远离河道,地下水补给少且植被蒸散大,从而导致该井水位埋深较其它 3 眼井大,多年水位埋深在 5~9 m。但该观测井地下水位在 2014 年后有所回升,根据野外实地调查发现,该现象与天然绿洲区春季河水漫灌有关。

2.2 输水对地下水化学特征的影响

2.2.1 主要离子浓度变化

2001、2009、2017 年三期水样的主要阴阳离子($\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)的平均质量浓度见表 1。对比分析发现,从 2001 年至 2017 年,所有的阴阳离子含量均呈现先减小后增大的变

化趋势。由表 1 可见,2017 年水样中各主要离子的平均质量浓度均比 2001 年小,即生态输水 18 年来,主要离子质量浓度整体上是减小的。由此说明黑河

生态输水不仅引起额济纳绿洲区域整体地下水位抬升,而且对区域地下水的的水质起到了一定的改善作用。

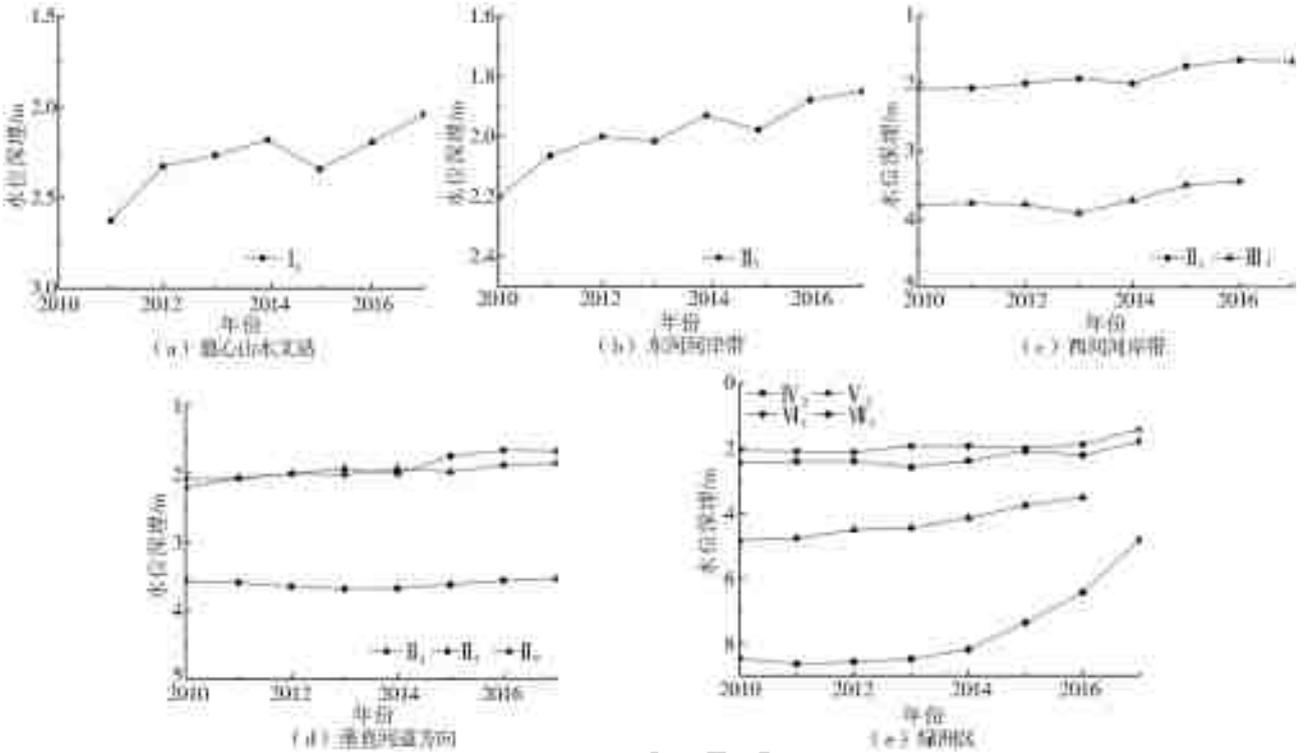


图 3 2010—2017 年额济纳绿洲典型观测井水位埋深变化曲线

Fig. 3 Depth variation curve of water level in typical observation wells of Ejina Oasis from 2010 to 2017

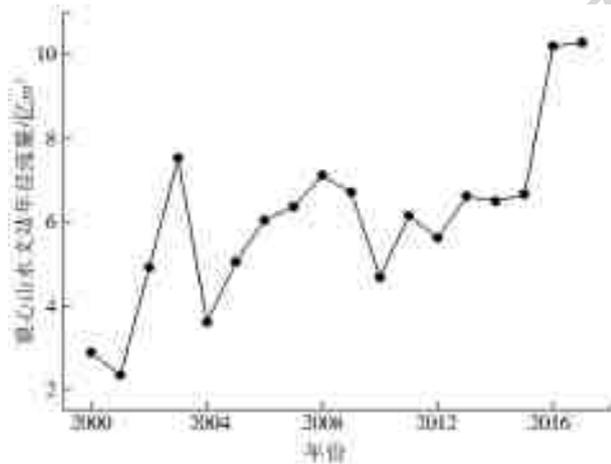


图 4 2000—2017 年狼心山水文站径流量变化

Fig. 4 Changes in river runoff at the Langxinshan hydrological station from 2000 to 2017

表 1 2001,2009 和 2017 年巡测水样水化学组分均值

Tab. 1 Average values of the chemical composition of water samples in 2001,2009 and 2017

年份	Na ⁺ +K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS
2001	562.00	241.00	136.00	637.00	1 387.00	442.00	3 184.00
2009	338.30	80.81	69.96	269.60	647.10	238.10	1 525.00
2017	494.90	158.30	113.80	387.00	1 046.00	331.50	2 575.00

单位:mg/L

2.2.2 TDS 空间分布特征

利用空间插值方法得到了区域地下水 TDS 的空间分布,见图 5。在空间尺度上,TDS 沿着地下水的流向呈现逐渐增大的趋势。综合三期地下水 TDS 的空间分布图可以看出:在河流上段,浅层地下水 TDS 多小于 1 000 mg/L,属于淡水;额济纳东、西河中段地区,浅层地下水 TDS 多介于 1 000~3 000 mg/L,属于微咸水;河流下段地区,地下水 TDS 多大于 3 000 mg/L,属于咸水,尤其在 2001 年,下段局部地区地下水 TDS 甚至高于 10 000 mg/L。地下水 TDS 的空间动态变化主要归因于区域地下水侧向流动和垂向蒸散发的共同作用。沿着地下水流方向,盐分随地下径流过程不断累积,而垂向蒸散发作用则进一步加剧了盐分累积过程,所以越往河道的下段,地下水 TDS 越大。

2.2.3 TDS 时间变化特征

随着自然环境的改变和人为活动的影响,地下水 TDS 随之发生变化,见表 1。2001、2009、2017 年三期地下水样的平均 TDS 分别为 3 184、1 525、2 575 mg/L。结合图 6 可知,与 2001 年相比,2009 年河道中上段地区地下水 TDS 呈减小或稳定趋势;下段大部分地区 TDS 减小(图 6(a))。然而,与 2009

年相比,2017年地下水 TDS 整体呈增大态势(图 6 (b)),其中下游农灌区地下水 TDS 增大尤为明显。

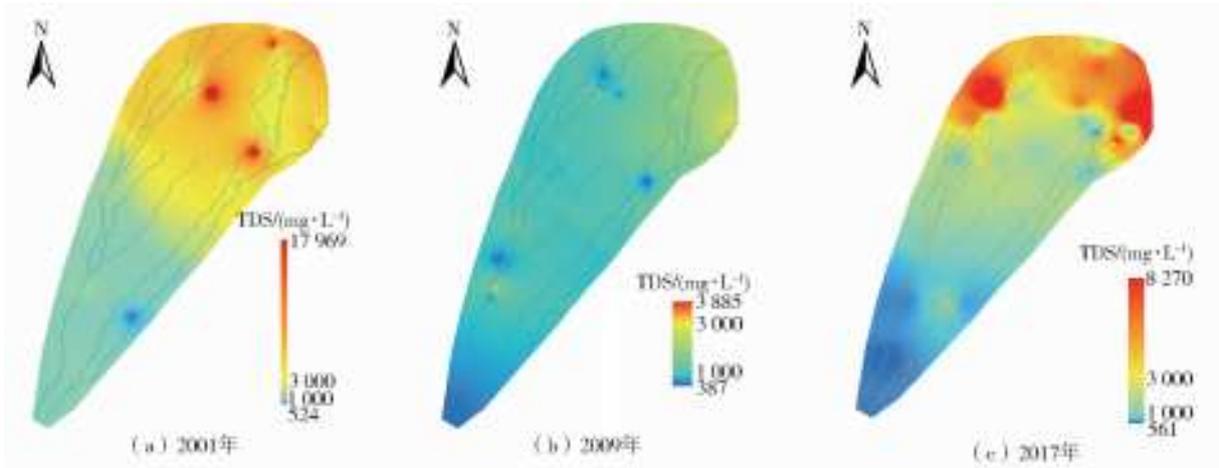


图 5 2001、2009 和 2017 年额济纳绿洲地下水 TDS 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of groundwater TDS in the Ejina Oasis in 2001,2009 and 2017

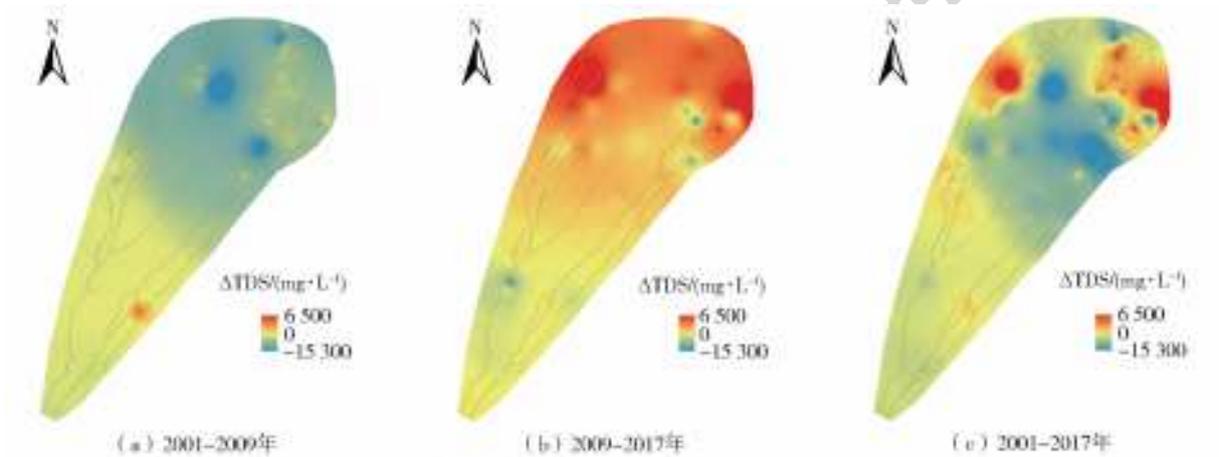


图 6 2001、2009 和 2017 年额济纳绿洲地下水 TDS 空间变化分布

Fig. 6 Spatial variation of TDS in groundwater in the Ejina Oasis in 2001,2009 and 2017

由于该地区常年干旱,降水极少,地下水主要靠河流生态输水补给。随着 2000—2017 年黑河生态输水量的逐年增加(图 4),额济纳绿洲浅层地下水获得的河道渗漏补给量也逐年增大,除部分人类活动影响区域外,其余地区浅层地下水中 TDS 整体上是减小的(图 6(c))。从时间上来看,2001—2017 年地下水 TDS 呈非单调变化趋势,即浅层地下水中 TDS 呈现先减后增的变化趋势。其可能的原因是,在 2001—2009 生态输水初期,生态来水量的急剧增加,地下水得到河水的补给,地下水中盐分得到稀释,TDS 呈减小态势。随着来水量的不断增加,在 2009—2017 年,地下水蒸发量也随之增加,此时,地下水中的盐分缓慢累积,从而导致 TDS 逐渐增大。

2.3 浅层地下水水化学类型变化特征

如图 7 所示,根据 Piper 图右下角阴离子三角形可知,2001、2009 和 2017 年所有的水样都落在 4 区,表明该地区浅层地下水中强酸根大于弱酸根。

根据左下角阳离子三角形可知,2001 年水样多分布在 1 区,说明碱土金属离子大于碱金属离子。该年水样中阳离子以 Mg^{2+} 为主,其次是 $Na^+ + K^+$; 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, Cl^- 次之。结合菱形图中水样的分布位置可知,2001 年地下水水化学类型主要为 $SO_4 \cdot Cl-Mg \cdot Na$ 。2009 年大部分水样落在 2 区,表明碱金属离子大于碱土金属离子。水样中 $Na^+ + K^+$ 质量浓度较 2001 年有所增加,而阴离子仍以 SO_4^{2-} 为主,水化学类型主要为 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$ 。2017 年水样落在 1、2 区的数量相差不多,说明地下水中碱金属离子和碱土金属离子质量浓度相近。2017 年较前期两年,水样中 SO_4^{2-} 质量浓度明显增加,阳离子以 $Na^+、Mg^{2+}$ 为主,则水化学类型主要为 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$ 。

当地下水中阴离子以 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 $Na^+ + K^+$ 为主时,说明 TDS 处于中等水平;当阴离子以 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Mg^{2+} 为主时,说明 TDS 处

于偏高水平^[23]。由此说明 2001 年水样 TDS 偏高,水质较差。与 2001 年相比,2009 和 2017 年地下水水样 TDS 处于中等水平,地下水盐分含量有所降低。

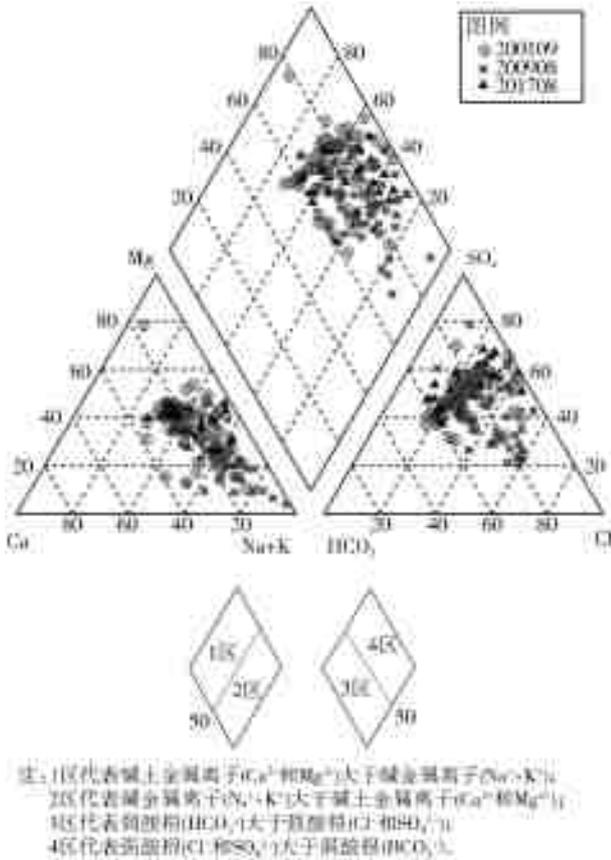


图 7 2001、2009 和 2017 年额济纳绿洲地下水样 piper 图
Fig. 7 Piper diagram of groundwater sample in the Ejina Oasis in 2001, 2009 and 2017

2.4 TDS 和地下水位埋深的统计关系

浅层地下水 TDS 动态主要受区域地下水侧向

补给、河流渗漏补给和地下水蒸发浓缩等多重影响,具有显著的空间差异性(图 8)。河岸带地区,地下水位埋深浅,在 1.5~3 m,地下水易受到河道渗漏补给,受河流淡水周期性稀释,地下水更新快,水质较好且稳定,TDS 多在 2 000 mg/L 以下。

戈壁带地下水位多处于中埋深区 3~6 m,由于距离河道较远,受河流的渗漏补给较弱,但是水位埋深在蒸发极限埋深 6 m^[8]以上,受蒸发浓缩作用影响,地下水盐分含量较高且空间差异性较大,多在 1 000~7 000 mg/L。前人的研究结果^[16]表明,人工绿洲区平均地下水位埋深为 4.6 m,恰好处于地下水位中埋区范围,受地下水开采和河水漫灌的双重影响,地下水位和盐分的动态变化较为强烈。

在地下水位深埋区大于 6 m,水位埋深位于蒸发极限埋深以下,地下水受地表水入渗补给和蒸发浓缩作用的影响微弱。在此情况下,地下水动态主要受区域地下水流场控制,更新速度缓慢,盐分含量较为稳定,大多在 1 000~3 000 mg/L。天然绿洲区的地下水位埋深相对较深,平均水位埋深为 8.6 m^[16],正是属于地下水深埋区,地下水更新速度慢,地下水盐分较高。

值得注意的是,2009 年地下水样中 TDS 多在 2 000 mg/L 以下,并未呈现出随地下水位埋深变化的态势。主要是因为 2009 年的采样点多分布在河岸带,样本盐分整体偏低,导致插值结果具有典型河岸带特征,对区域整体的代表性有所欠缺。这也可能是导致 2009 年整体 TDS 偏小的一个原因。

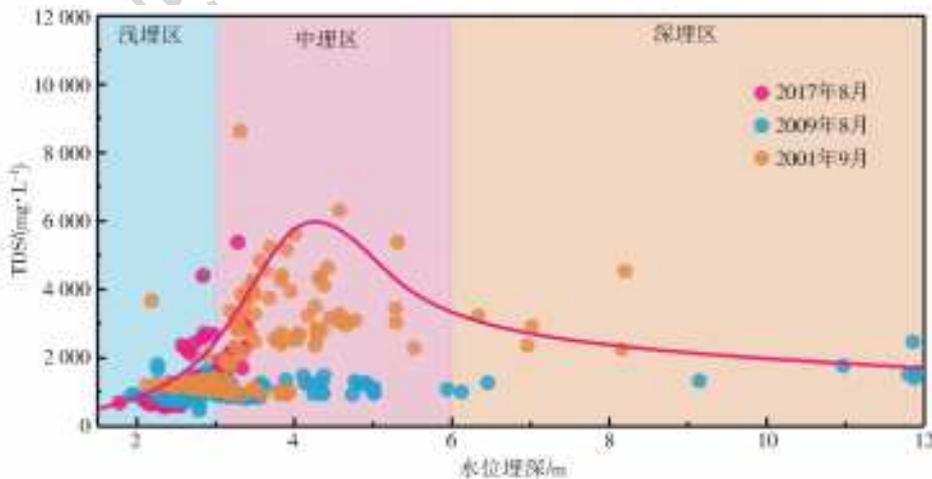


图 8 额济纳绿洲地下水位埋深与 TDS 关系曲线
Fig. 8 Relationship between groundwater table depth and TDS in the Ejina Oasis

3 讨论

地下水水化学组分变化受环境因素和人类活动

共同影响。额济纳绿洲地处于西北极端干旱气候区,降水极少,自然累积加上强烈的蒸发浓缩作用导致地下水 TDS 逐渐增大。该地区水化学类型主要

以 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型为主,由此也表征蒸发浓缩作用是该地区水化学特征变化的主导因素。额济纳绿洲地下水主要受黑河地表水的季节性渗漏补给,受地表水和地下水相互混合作用的影响,地下水水化学特征表现出明显的时空差异性。随着黑河生态输水量的逐年增加,区域地下水位整体得以抬升,盐分整体得以减小。但沿着河道方向,随着河道径流量的减少,地下水位埋深和盐分含量均随之逐渐增大。垂直河道方向上,在近河岸带受河水侧渗补给影响,地下水位埋深变浅,盐分也相应的呈现一个淡化带;随着距离输水河道越远,地下水位埋深越大,且盐分浓度越大。除此之外,该地区地下水水化学特征还受人类活动的影响。地下水开采以及东河下游农田灌溉用水的回渗补给改变了地下水径流条件,进而影响地表水和地下水的交互作用,造成局部地下水水化学特征发生变化。

需要指出的是,本文仅基于 3 期地下水水样的水化学分析数据,对研究区的地下水水位和水化学离子组分时空变化特征进行分析,并从统计上构建了地下水盐分(TDS)与地下水位埋深之间的关系。然而,本文所采用的地下水采样点空间分布不均且地下水水化学分析数据有限,因此该研究仍存在一定的局限性。在后续的研究中,需要通过优化野外采样设计方案,开展多年水样巡采和分析工作,揭示典型干旱区内陆河下游地区地下水动态及其控制因素,完善地下水 TDS 与水位埋深两者之间的关系。此外,可以借助地下水流数值模型模拟分析地下水和河水的交换量,刻画地表水和地下水的相互转化过程,定量分析河水渗漏补给对浅层地下水的影响,并开展干旱区内陆河下游“河流-含水层”系统水岩相互作用的基础研究。

4 结 论

本文分析了在黑河生态输水条件下,额济纳绿洲浅层地下水水化学组分的时空变化特征及其与地下水位埋深之间的关系。主要结论如下。

(1) 空间上,沿着河道方向,随着河流渗漏补给量的减小,地下水位逐渐降低,TDS 则相应增大。垂直河道方向,河岸带的水位埋深浅,水质好;戈壁带的水位埋深大,水质较差。

(2) 时间上,平均地下水位埋深逐年变浅。反映地下水盐分含量的 TDS 在 2001 年最高,2009 年最低,2017 年次之。该三年地下水水化学类型分别呈 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Mg} \cdot \text{Na}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Mg}$, 差异不明显。

(3) 随着水位埋深的变化,TDS 与地下水位埋深两者间呈现非线性响应关系,体现显著的空间差异性。河岸带浅埋区 1.5~3 m,受河水稀释作用影响,TDS 较小;水位埋深为 3~6 m 的中埋区,受地下水侧向补给与潜水蒸发双重影响,TDS 在空间上具有较大差异性;当水位埋深大于 6 m 时,由于地下水蒸发浓缩作用较弱,TDS 较小且较为稳定。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所张一驰与杜朝阳两位老师在本文写作过程中给予的悉心指导、支持和帮助,感谢匿名审稿人专业且富有建设性的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] WANG P, YU J J, ZHANG Y C, et al. Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina basin, northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 72-86.
- [2] 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 X M, SHI S S, LI Z H, et al. Study on groundwater system in Ejina basin in the lower reaches of the Heihe river in northwest China (I)[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2002(1): 16-20. (in Chinese))
- [3] YU T F, FENG Q, SI J H, et al. Hydraulic redistribution of soil water by roots of two desert riparian phreatophytes in northwest China's extremely arid region[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(1-2), 297-308.
- [4] 闵雷雷. 干旱区间歇性河流河水渗漏观测与模拟——以额济纳东河为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. (MIN L L. Experimental and numerical study on the river water leakage in an intermittent river in arid area; A case study of Ejina Donghe river [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese))
- [5] 肖生春, 肖洪浪. 近百年来人类活动对黑河流域水环境的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(3): 57-62. (XIAO S C, XIAO H L. The impact of human activity on the water environment of heiHe water basin in last century[J]. *Journal of Arid Resources and Environment*, 2004, 18(3): 57-62. (in Chinese))
- [6] 胡广录, 赵文智. 恢复生态地下水位的需水量及恢复方案研究——以额济纳盆地天然植被为例[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(1): 94-101. (HU G L, ZHAO W Z. The demanded water volume for restoring natural groundwater levels; A case study on natural vegetation in the Erjina basin [J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(1): 94-101. (in Chinese))
- [7] 徐永亮, 于静洁, 王平, 等. 额济纳三角洲地下水位年内动态变化特征分类分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(4): 135-140. (XU Y L, YU J J, WANG P, et al.

- Classification of annual dynamic of groundwater depth in Ejina delta [J]. *Journal of Arid Resources and Environment*, 2013, 27(4): 135-140. (in Chinese))
- [8] 徐永亮, 于静洁, 张一驰, 等. 生态输水期间额济纳绿洲区地下水动态数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(4): 11-18. (XU Y L, YU J J, ZHANG Y C, et al. Groundwater dynamic numerical simulation in the Ejina Oasis in an ecological water conveyance period [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, 41(4): 11-18. (in Chinese)) DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2014. 04. 006.
- [9] JIN X M, HU G C, LI W M. Hysteresis effect of runoff of the heihe river on vegetation cover in the Ejina Oasis in northwestern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 198-203.
- [10] WEN X, WU Y, SU J, et al. Hydrochemical characteristics and salinity of groundwater in the Ejina Basin, Northwest China [J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(6): 665-675.
- [11] WANG P, YU J J, ZHANG Y C, et al. 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] SU Y H, FENG Q, ZHU G F, et al. Identification and evolution of groundwater chemistry in the Ejin sub-basin of the Heihe River, Northwest China [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 331-342.
- [13] WANG P, ZHANG Y C, YU J J, et al. Vegetation dynamics induced by groundwater fluctuations in the lower Heihe River basin, northwestern China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(1-2): 77-90.
- [14] ZHU J T, YU J J, WANG P, et al. Distribution patterns of groundwater-dependent vegetation species diversity and their relationship to groundwater attributes in northwestern China [J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(2): 191-200.
- [15] 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 L L, LIU J, WANG K Y, et al. Study on groundwater level responses of water transfer along rivers area in Ejina Oasis [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2008, 29(2): 58-63. (in Chinese))
- [16] 王平, 于静洁, 闵雷雷, 等. 额济纳绿洲浅层地下水动态监测研究及其进展[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(5): 982-993. (WANG P, YU J J, MIN L L, et al. Groundwater regime and its driving forces in the Ejina Oasis [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5): 982-993. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-7410. 2014. 05. 08.
- [17] SI J H, FENG Q, WEN X H, et al. Major ion chemistry of groundwater in the extreme arid region northwest China [J]. *Environmental Geology*, 2009, 57: 1079-1087.
- [18] 王丹丹, 于静洁, 王平, 等. 额济纳三角洲浅层地下水化学特征及其影响因素[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 51-55, 66. (WANG D D, YU J J, WANG P, et al. Shallow groundwater chemistry characteristics and their controlling factors in the Ejina Delta [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2013, 11(4): 51-55, 66. (in Chinese))
- [19] WANG P, POZDNIAKOV S P, VASILEVSKIY P Y. Estimating groundwater-ephemeral stream exchange in hyper-arid environments: Field experiments and numerical simulations [J]. *Journal of Hydrology*, 2017(555): 68-79. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2017. 10. 004.
- [20] WANG P, YU J J, POZDNIAKOV S P, 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*, 2014, 28(3): 1539-1553. DOI: 10. 1002/hyp. 9682.
- [21] 王平. 西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 183-197. (WANG P. Progress and prospect of research on water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid regions of northwestern China [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 183-197. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2018. 02. 002.
- [22] LIU X, YU J J, WANG P, et al. Lake evaporation in a hyper-arid environment, northwest of China-measurement and estimation [J]. *Water*, 2016, 8(11): 527-548. DOI: 10. 3390/w8110527.
- [23] 朱军涛, 于静洁, 王平, 等. 额济纳荒漠绿洲植物群落数量分类及其与地下水关系分析[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 480-489. (ZHU J T, YU J J, WANG P, et al. Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater environment in the Ejin Desert Oasis of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(5): 480-489. (in Chinese))
- [24] 钱会, 马致远, 李培月. *水文地球化学* [M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-251. (QIAN H, MA Z Y, LI P Y. *Hydrogeochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-251. (in Chinese))
- [25] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. *水文地质学基础* [M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-199. (ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, et al. *Hydrogeological Foundation* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1-199. (in Chinese))
- [26] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 260-265. (LI X, CHENG G D, LU L. Comparison of spatial interpolation methods [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 260-265. (in Chinese))
- [27] PIPER A M. A graphic procedure in the geochemical interpretations of water analyses [J]. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1944, 25: 914-923.