

塔里木河下游间歇性输水对土壤水化学的影响

陈永金^{1,2}, 陈亚宁^{1,2}, 李卫红^{1,2}, 刘加珍³, 黄辉⁴

(1. 中国科学院绿洲与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

3. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059;

4. 新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 根据塔里木河下游 2000-2006 年 11 次间歇性输水影响下沿输水河道两侧地下水埋深、地下水化学组分变化的资料, 结合有关输水的基本资料和土壤盐分含量变化的适时监测数据, 分析了地下水化学特征的变化及影响其变化的各相关因子, 结果表明: 地下水化学特征的变化呈现明显的阶段性规律, 地下水化学组分的变化与距离输水河道的远近、地下水埋深、河道径流量以及土壤盐分含量之间具有较高的相关性; 地下水埋深在 5 m 及 5 m 以下时, 地下水化学组分含量较低, 水质较好。而埋深在 5 m 时的水位条件能够满足该区域建群种植物的生存, 为输水条件下的理想水位; 地下水化学特征变化的阶段性特点和土壤剖面盐分含量的分布规律及其相互关系说明, 在当前输水模式下配合面上输水将能更好地促进生态恢复。

关键词: 地下水化学; 地下水埋深; 塔里木河

水是干旱区绿洲生态系统构成、发展和稳定的基础^[1], 在区域经济和生态的健康稳定发展过程中起着决定性作用。加强地下水化学特征研究是水资源质量评价的重要内容, 对流域水资源利用方式、可持续发展、管理及生态环境的保护与建设都具有重要意义^[2]。地下水化学成分的形成与分布是在一定的自然地理和地质环境下经过漫长的地质历史过程的产物^[3], 地下水化学成分特征与地质、地貌、水文地质条件密切相关^[4-8], 即地下水中各元素的含量及迁移规律决定于当地的自然地理、岩性条件、地下水的补给、径流和排泄条件等因素^[9, 10]。在补给区, 以 Ca-Na-HCO₃ 型水为主; 而在排泄区, 地下水中 Na⁺ 含量占优势^[11]。地下水埋藏厚度也对水化学组分有影响, 埋深较浅时, 由于蒸发浓缩作用, Ca²⁺, Mg²⁺ 等离子含量增高^[12], 处在地下水流汇集的盆地中心地区, 地下水中化学组分含量要高于盆地边缘^[13]。以河水补给为主的地下水, 其化学特征受河道径流的影响^[14], 同时, 地下水的化学组成状况也会影响到地表水的化学组分^[15]。地下水化学成分的变化受到诸如岩石的化学成分, 地下水的径流条件、气候、地形、补给及排泄条件等的影响^[16], 而人类活动的影响尤其显著^[17]: 金属矿的开采往往导致地下水中某些离子及重金属含量剧增^[18, 19], 在河流源区, 受降水和冰雪融水的影响, 地下水化学组分含量相对较低, 沿河流从源流向中下游方向, 由于农业活动中化肥、农药的大量使用以及城市三废的排放, 地下水水质受到污染, 水质下降^[20-22]。在干旱区, 人类活动改变了水资源的分布状况, 使绿洲内部水质改善, 绿洲外部水质变差^[23]。

2000 年塔里木河下游生态输水工程开展以来, 有关输水对地下水化学的影响得到相

收稿日期: 2007-03-25; 修订日期: 2007-06-21

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-127; KZCX-XB2-03); 国家自然科学基金(90520004; 3050081) 资助。

[Foundation: Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-YW-127; KZCX-XB2-03); National Natural Science Foundation of China, No.90502004; No.30500081]

作者简介: 陈永金 (1968-), 男, 山东省苍山县人, 中国地理学会会员, 主要从事水质保护与生态保育研究。

E-mail: yongjinchen2004@yahoo.com.cn

通讯作者: 陈亚宁, 研究员, E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

应研究,张宏峰等用灰色关联法研究了地下水化学组分与地下水位的关系,发现化学组分的变化与地下水位具有一定的相关性^[24];徐海量通过对2000年至2002年的4次输水影响下地下水化学监测资料的分析,得出了地下水中盐分呈先升后降的变化特点^[25];通过对5次间歇性输水作用下地下水化学变化的研究,陈永金总结出了地下水化学特征表现为升-降-升阶段性变化的规律^[26,27]。但以上分析只是限于目前资料的分析,输水还将在一定时期内继续,地下水化学特征在以后的输水影响下将会发生怎样的变化?引起地下水化学变化的主要环境因素是什么?本文结合塔里木河下游最新监测资料结合已往地下水埋深、土壤盐分和地下水水化学等的监测数据,对输水条件下的地下水化学变化规律进行总结。

1 研究区概况

塔里木河位于新疆南部,全长1321 km。其上游为肖夹克至英巴扎段,中游为英巴扎至卡拉水库段,下游为卡拉水库至台特玛湖,流域气候极其干旱。水是塔河流域生态环境最敏感的因子^[28],近50年来,人们对土地的过度开垦和水资源的无序开发,导致下游来水量急剧减少^[29],依靠河道径流补给的地下水位日渐下降^[1],地下水矿化度升高。

研究区地势起伏和缓,平均海拔825 m,主要地貌类型有冲洪积、冲积、风积和河湖积地貌^[30,31],地层主要为第四系上更新统、全新统地层,地表岩性以砂、亚砂土和粘土为主。研究区分布有第四系孔隙水,含水层主要是粉砂、间有亚砂土和亚粘土。受沉积环境、含水层介质及补给源少等因素作用,区内潜水含水层富水性较差。由于本区年降水量仅40 mm,降水对地下水补给意义不大,地下水的补给主要靠河道径流和水库入渗及田间水的入渗。地下水在向下游缓慢运移过程中溶滤了河湖相地层中的盐分,使得化学组分含量沿径流方向逐渐增加,地下水水质变差、矿化度升高。

该区属于典型的暖温带大陆性干旱气候区^[32],根据铁干里克气象站的观测资料,年均气温10.5℃,平均年降水量17.4~42.0 mm,年潜在蒸发量2500~3000 mm,沙尘暴日数8.2 d,风沙危害严重。由于多年断流,地下水位大都下降到8~12 m。

2 资料采集与分析方法

2.1 输水统计

从2000年5月14日开始,每年向塔里木河下游断流河道1~2次输水,到2006年11月29日共实施了11次输水(表1)。

2.2 监测断面和监测井设置

在沿输水河道设置了9处监测断面(图1),用于监测生态输水后地下水位、水质以及植被的响应,在每个监测断面分别设置了3~8眼监测井,其中第2个断面亚合甫马汗断面4眼,第3个断面英苏断面8眼,第7个断面阿拉干断面6眼监测井,共计40眼监测井。文中选取了亚合甫马汗断面的B3和英苏断面的C1监测井为代表进行时间序列分析,并选

表1 塔里木河下游间歇性输水(2000~2006年)资料与水样采集
Tab. 1 Basic information of water delivery and water samples collection from 2000 to 2006 in the lower Tarim River

输水	开始日期	结束日期	水头	输水量(10 ⁸ m ³)	采样日期
第1次	2000.5.14	2000.7.12	阿布达勒	0.98	2000.9.10
第2次	200.11.3	2001.2.5	阿拉干	2.25	2001.3.3
第3次	2001.4.1	2001.7.6	考干	1.84	2001.9.3
第4次	2001.9.12	2001.11.1	台特玛湖	1.98	2002.7.18
第5次	2002.7.20	2002.11.10	台特玛湖	3.31	2003.2.14
第6次	2003.3.2	2003.6.15	台特玛湖	3.40	2003.6.18
第7次	2003.8.4	2003.11.3	台特玛湖	2.85	2004.4.20
第8次	2004.4.22	2004.6.25	台特玛湖	1.02	2005.4.3
第9次	2005.4.18	2005.6.7	台特玛湖	0.52	2005.7.20
第10次	2005.8.30	2005.10.31	台特玛湖	2.28	2006.3.22
第11次	2006.9.25	2006.11.29	台特玛湖	2.33	2006.12.14

取曾经受到河水漫溢的 B1 井为代表分析面上供水对地下水化学特征变化影响。B1 井距离输水河道 50 m, 处于河漫滩上海拔高度 839 m (坐标 $N40^{\circ}29.491'$, $E87^{\circ}50.136'$); B3 井距离输水河道 150 m, 海拔 848 m (坐标 $N40^{\circ}29.494'$, $E87^{\circ}50.267'$), C1 井距离输水河道 230 m, 海拔 841 m (坐标 $N40^{\circ}26.123'$, $E87^{\circ}56.535'$)。

2.3 监测内容

1) 地下水埋深; 2) 地下水化学成分: 矿化度、pH 值、总碱度、总硬度、电导率、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等 13 项指标; 3) 土壤盐分状况。

2.4 数据采集与分析方法

地下水埋深每月测一次, 测定方法为导线法, 地下水化学采样为每次输水后采 1~2 次, 考虑到地下水化学组分变化对输水的响应为一较缓慢的过程, 因此, 每次输水后的采样都尽量接近下一次输水开始时。每次地下水取样前先测量地下水埋深, 本文所采用的地下水埋深的资料皆与水化学取样日期相同。水样采集后当场密封, 送入实验室进行化学

分析, 其中矿化度—重量法; 总碱度、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} —双指示剂滴定法; Cl^- —硝酸银滴定法; SO_4^{2-} —EDTA 容量法和铬酸钡光度法; 总硬度—EDTA 容量法; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} —EDTA 容量法和原子吸收光度法; K^+ 、 Na^+ —火焰光度法和原子吸收光度法; PH 值—PHS-2C 型数字式酸度计测定; 电导率—DDS-307 型电导率仪测定。同时, 在监测井附件进行土壤取样, 分析其盐分状况。土壤总盐用重量法测定。数据分析采用 SPSS11.5, EXCELL 等完成。

3 结果与分析

3.1 地下水化学组分相关性分析

分析塔里木河下游间歇性输水影响下地下水化学组分之间的相关性 (表 2), 显示地下水化学特征随着地下水埋深的变化发生相应发生变化, 所以采用控制地下水埋深的偏相关分析。分析结果表明, 作为地下水化学特征代表的矿化度与 Cl^- 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 含量的相关性最强, 但是 SO_4^{2-} 含量在断流河道两侧地下水化学组分中占有相当重要的地位, Ca^{2+}

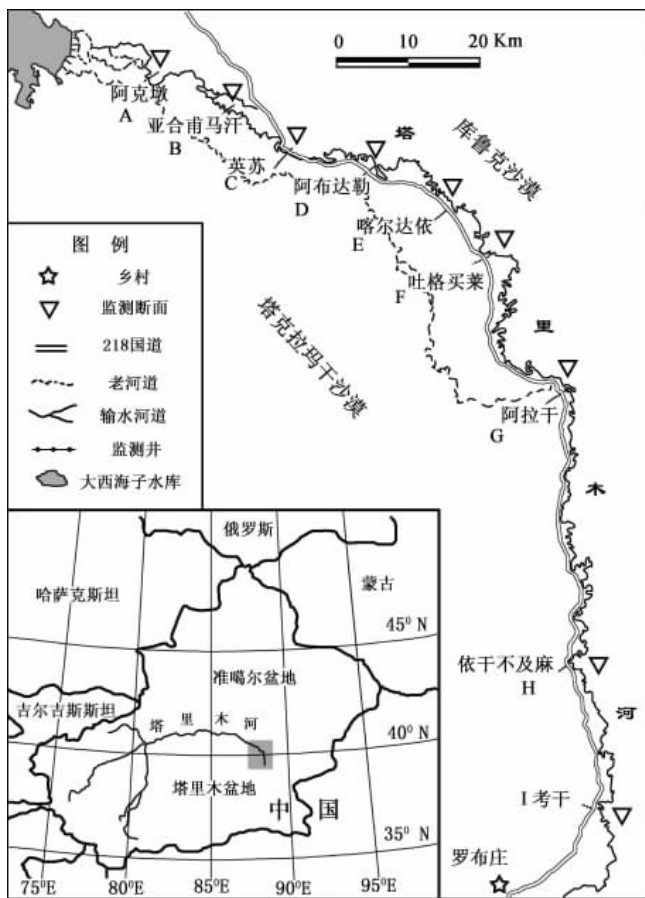


图 1 塔里木河下游监测断面和监测井布设示意图
Fig. 1 Sketch of monitoring transects and monitoring wells in the lower Tarim River

表 2 塔里木河下游地下水化学组分相互关系的偏相关分析

Tab. 2 Partial correlation of groundwater chemical properties in the lower Tarim River

	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
TDS	1.0000 P = .							
HCO ₃ ⁻	-0.0606 P = 0.302	1.0000 P = .						
Cl ⁻	0.9919 P = 0.000	-0.1014 P = 0.084	1.0000 P = .					
SO ₄ ²⁻	0.6925 P = 0.000	0.0982 P = 0.094	0.6043 P = 0.000	1.0000 P = .				
Ca ²⁺	0.8380 P = 0.000	-0.1462 P = 0.012	0.7971 P = 0.000	0.7994 P = 0.000	1.0000 P = .			
Mg ²⁺	0.7594 P = 0.000	0.1902 P = 0.001	0.6845 P = 0.000	0.9158 P = 0.000	0.7878 P = 0.000	1.0000 P = .		
Na ⁺	0.9931 P = 0.000	-0.0873 P = 0.137	0.9980 P = 0.000	0.6230 P = 0.000	0.7934 P = 0.000	0.6880 P = 0.000	1.0000 P = .	
K ⁺	0.0237 P = 0.686	-0.0107 P = 0.856	0.0285 P = 0.628	-0.0232 P = 0.693	-0.0135 P = 0.819	-0.0049 P = 0.934	0.0286 P = 0.627	1.0000 P = .

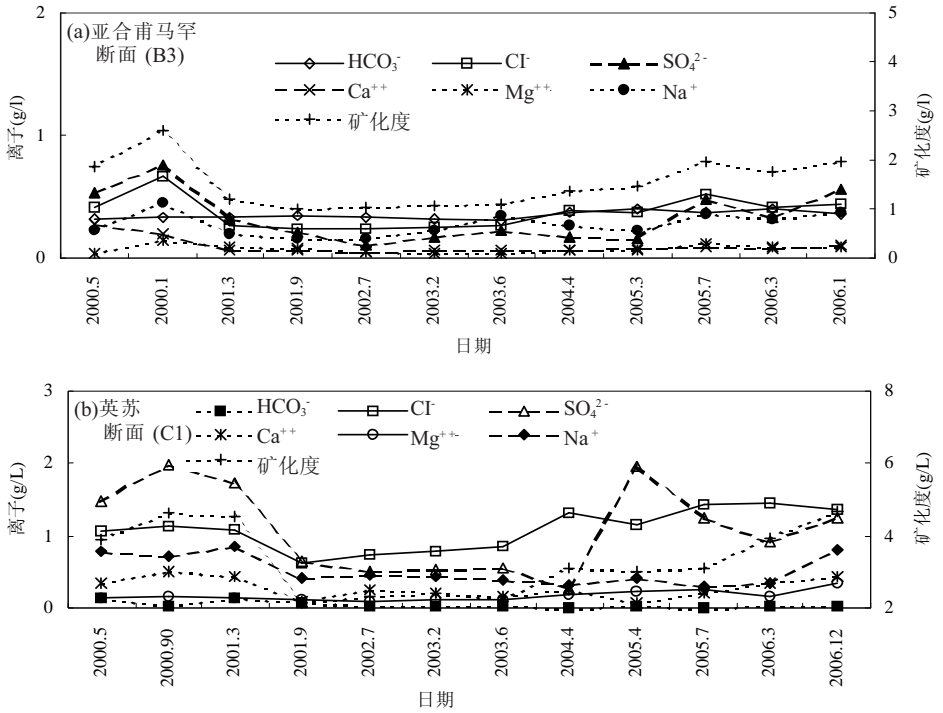


图 2 塔里木河下游亚合甫马罕断面 (B3) 和英苏断面 (C1) 地下水化学特征在输水影响下的变化

Fig. 2 Variations in groundwater chemistry at Yahepu (B3) and Yinsu (C1) transects

含量却比较低，因而文中主要对矿化度以及 Cl⁻、Na⁺ 和 SO₄²⁻ 的含量变化进行分析。

3.2 地下水化学特征变化规律

从塔里木河下游亚合甫马罕断面距离输水河道 150 m 的 B3 监测井地下水化学特征在 11 次输水影响下的变化(图 2), 可以看出在输水前地下水中各种离子含量和矿化度都比第一次输水后低,在随之而来的 5 次输水影响下, 保持着相对平稳的状态,直到 2004 年 4 月的第 7 次输水后开始上升, 在接下来的几次输水影响下虽然既有上升也有下降变化, 但整体态势是不断上升的; 英苏断面距离河道 230m 的 C1 监测井地下水中主要离子含量和矿化度在受到输水的影响后表现为上升变化, 但并没有象亚合甫马罕断面的 C3 井地下水

化学组分经过第一次输水后立即开始下降,而是直到第二次输水后才开始下降,经过接下来的4次输水的影响水质达到较优状态,后来逐渐上升。

因此,在11次输水的影响下,亚合甫马罕和英苏断面地下水化学特征都表现出明显的升降升的阶段变化特点,可见地下水化学特征对输水响应的三阶段规律的客观性。

3.3 地下水化学组分变化预测

ARIMA模型,亦称自回归整合移动平均数(AutoRegressive Integrated Moving Average),是通过历史数据的变动规律,找出数据变动模型(移动平均数、周期成分),从而对未来的预测。该模型具有预测准确,且具有灵活性高的优点。

利用时间序列ARIMA模型,我们对亚合甫马罕断面和英苏断面的两口监测井的地下水化学组分在输水影响下的变化进行了预测,结果表明,亚合甫马罕断面Cl⁻含量在当前变化的基础上,随着以后输水的继续进行将缓慢增加;Na⁺含量将会有明显的上升,SO₄²⁻含量将有所下降;而矿化度在经历几次下降后还将有所增加(图3)。因此,地下水化学特征的总体变化趋势将会继续增加,即在一定时期内还将处于所谓的后期阶段。英苏断面在将来输水影响下,Cl⁻含量将进一步增加;Na⁺含量呈下降变化;而SO₄²⁻含量则会在下降与上升的交替中以上升为主;矿化度的变化与亚合甫马罕断面基本相似,在经过一个较大上升跃动后回复到缓慢增加态势(图4)。

由以上分析可以看出,塔里木河下游地下水化学特征变化的阶段性划分是合理的。

3.4 地下水化学特征的三阶段分析

在生态输水作用下,输水河道两侧的地下水位逐渐提高,输水前整个断流河道两侧的平均地下水埋深为8.72 m,经过历时6年的11次间歇性输水的影响,平均埋深已经达到3.39 m,输水对地下水化学特征也产生了较深刻的影响:

比较初次输水前后塔里木河下游的各监测井的地下水化学状况,可以发现地下水中盐分含量有明显的上升变化(表3):SO₄²⁻的平均含量增加113%;Cl⁻的平均含量增幅高达148%;Na⁺含量增加143%;矿化度的增幅也达到126%以上。而中期阶段则表现为急剧下降变化:中期阶段Na⁺的平均含量比初期阶段下降了3.1 g/L(88%),Cl⁻的平均含量降幅高达91%;矿化度下降了11.2 g/L(86%)。相比较初期和中期阶段地下水矿化度和主要

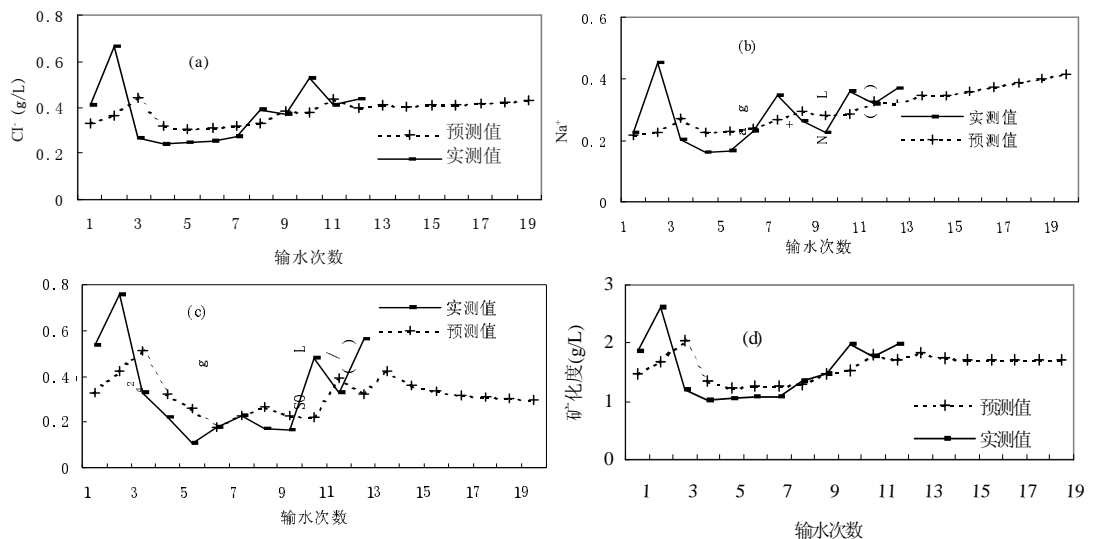


图3 亚合甫马罕B3监测井地下水化学组分变化预测

Fig. 3 Prediction of the groundwater chemical properties in B3 monitoring well, Yahepu Transect

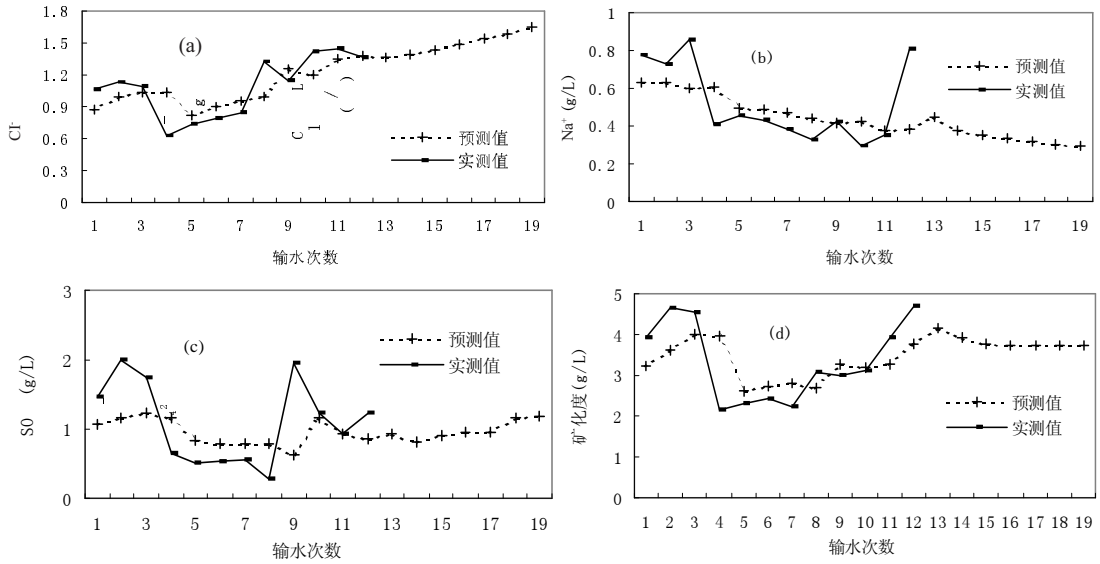


图 4 英苏 C1 监测井地下水化学组分变化预测

Fig. 4 Prediction of the groundwater chemical properties in C1 monitoring well, Yinsu Transect

表 3 地下水化学特征在受输水影响前及对输水响应的不同阶段的描述统计量

Tab. 3 Descriptive statistics of groundwater chemistry of different stages influenced by water delivery in the lower Tarim River

变量 Variable	阶段 Serie	样本量 N	均值 Mean	标准差 Std. Deviation	标准误 Std. Error	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 Conefficient of variation
TDS	1	30	5.7593	15.66785	3.41900	1.02	73.85	0.5936
	2	30	13.0678	30.54558	5.57683	1.34	155.25	0.4268
	3	25	1.8221	2.10066	0.42013	0.93	11.67	0.2306
	4	30	2.2499	0.84082	0.18348	1.10	4.26	0.0816
Cl ⁻	1	21	2.4017	7.90139	1.72423	0.23	36.80	0.7180
	2	30	5.9517	17.55405	3.20492	0.21	91.29	0.5385
	3	25	0.5616	1.00027	0.20005	0.22	5.33	0.3562
	4	21	0.6335	0.28371	0.06191	0.27	1.32	0.0978
SO ₄ ²⁻	1	21	0.8675	1.06786	0.23303	0.23	5.29	0.2686
	2	30	1.8496	1.77645	0.32433	0.28	7.44	0.1754
	3	25	0.3822	0.35305	0.07061	0.00	1.58	0.1847
	4	21	0.4870	0.28720	0.06267	0.14	1.39	0.1287
Na ⁺	1	21	1.4537	4.80823	1.04924	0.09	22.40	0.7218
	2	30	3.5270	10.23840	1.86927	0.21	53.25	0.5299
	3	25	0.4096	0.62723	0.12545	0.15	3.36	0.3062
	4	21	0.3820	0.15599	0.03404	0.09	0.75	0.0891

注：表中1为输水前，2为初期阶段，3为中期阶段，4为后期阶段

离子大起大落的变化，后期阶段表现为和缓的上升变化，平均增幅在 20%左右，最大增幅不超过 40%，而 Na⁺ 的含量还略有下降。

变异系数 (Conefficient of variation) 是离差相对于平均数的相对量，变异系数越大意味着变量的离散程度越大，通过地下水化学特征描述统计表可以看出，输水前矿化度和各离子的变异系数比输水影响下各阶段的变异系数都大，这说明在应急输水作用下，水土盐分得以交流，对不同断面及不同样点间的盐分起到了再分配和均衡效应。

3.5 地下水化学特征变化与河道距离关系

Cl⁻ 的含量在输水初期有明显的上升，上升的幅度和采样点与河道的距离成线性正相

关; SO_4^{2-} 的含量变化在初期表现为距离河道愈远其上升幅度愈大; 地下水中矿化度的增加量以距离河道 200 m 为临界点, 在小于 200 m 的范围内随着与河道距离的减小而增加, 在大于 200 m 的范围内随着与河道距离的增加而上升 (图 5a)。

中期阶段 Cl^- 的含量在该阶段的下降变化在近河道处呈平稳态势, 远离河道处则呈急剧增加的特点; SO_4^{2-} 的含量完全表现为下降趋势, 但与距离之间未有明显的相关; Na^+ 含量变化与 SO_4^{2-} 一样呈完全下降变化, 而且与距离呈现二次方的关系, 即近河道处下降幅度大, 然后下降至低谷, 在大于 400 m 以后又呈上升变化。矿化度的减少量与采样点距离河道呈三次方的关系 (图 5b):

Cl^- 的含量在后期阶段表现出明显增加趋势; SO_4^{2-} 含量在后期阶段以上升变化为主, 间有下降变化, 近河道处变化幅度大, 但变化幅度与距离间没有很强的相关性; 作为地下水化学特征的总代表的矿化度的增加量与采样点距河道远近呈指数相关 (图 5c):

纵观塔里木河下游断流河道两侧地下水化学特征对 11 次间歇性生态输水的响应, 其变化的阶段性较为显著, 地下水中各主要离子与矿化度的变化量在水化学对输水响应表现出与采样点距离输水河道的远近较强的相关性, 而距离河道的远近与接收输水影响的时间长度紧密相关, 与受到来水量多少的影响息息相关, 所以距河道不同距离处地下水化学特征变化的不同特点说明水量的多少是影响水化学变化的主要因素之一。

3.6 地下水化学特征与地下水埋深的关系

生态输水对地下水化学特征的影响是通过地下水位的抬升来实现的。利用 SPSS 统计软件对不同阶段地下水埋深与地下水化学特征的相关性进行分析发现, 矿化度和主要离子在初期阶段与地下水埋深都呈三次方关系, 地下水埋深在 5 m 以下时矿化度较低; 中期阶段地下水化学组分含量与埋深呈二次多项式相关, 且在埋深 5~6 m 时的含量最低; 后期阶段, 矿化度和主要离子含量则随着地下水位的抬升而增加 (图 6), 塔里木河下游河道两侧以胡杨和怪柳为主的河岸荒漠林植物群落在地下水埋深 5 m 以内时表现出较好的生长态势^[33], 即当地下水埋深不超过 5 m 时能保证绿色走廊不受生存的威胁。所以, 地下水埋深 5m 应该是塔里木河下游输水条件下的合理的水位。

3.7 地下水化学与土壤盐分关系

塔里木河下游地区由于处于塔里木盆地最低洼处和塔里木河的尾间, 是流域盐分的集聚地, 土壤盐分含量高。土壤剖面盐分含量状况与地下水埋深密切相关, 当地下水埋

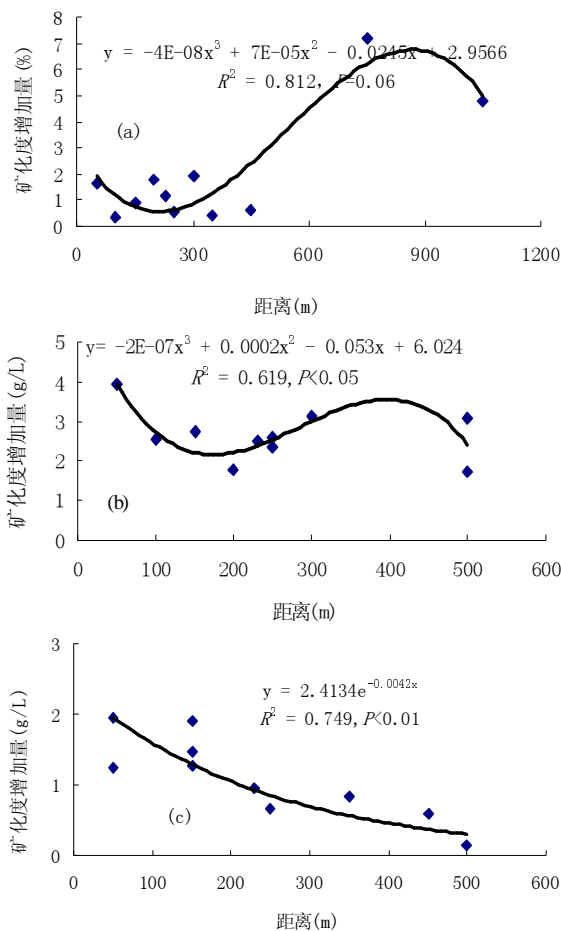


图 5 塔里木河下游输水的初期 (a)、中期 (b)、后期 (c) 矿化度变化幅度与距离河道远近的关系

Fig. 5 Relationship between variational range of chemistry and the distances from channel

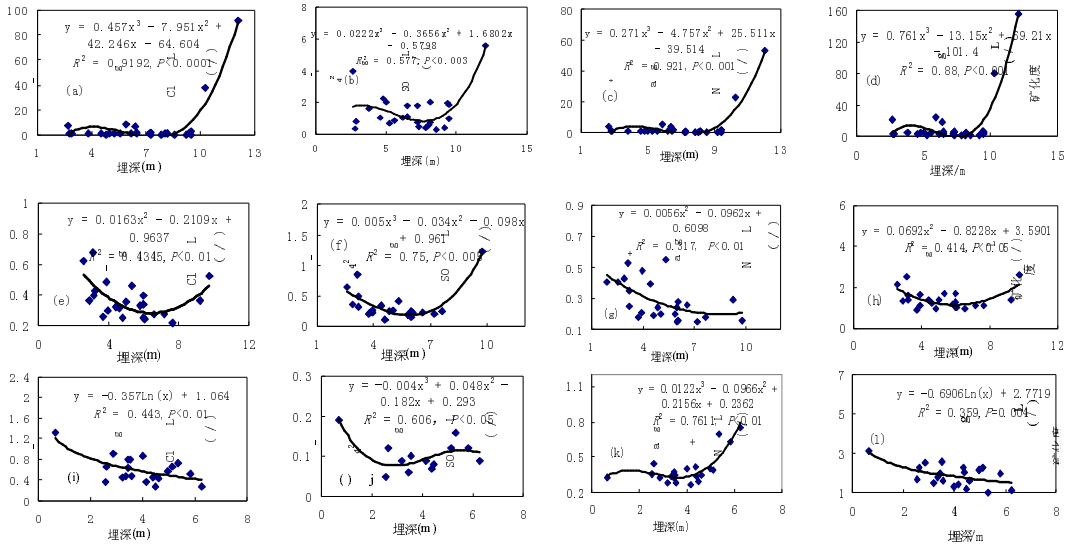


图 6 输水的初期 (a, b, c, d)、中期 (e, f, g, h) 与后期 (i, j, k, l) 化学组分含量与埋深的关系
 Fig. 6 Relationship between variational range of chemistry and the depths of groundwater at initial (a, b, c, d), intermediate (e, f, g, h) and late (i, j, k, l) stages

深大于蒸发极限深度时，盐分在土壤剖面呈菱形分布，即聚盐层在亚表层，当地下水埋深小于蒸发极限深度时，盐分集聚于表层呈 T 型分布^[33]。英苏断面输水前地下水埋深大于 9 m，土壤剖面 30~50 cm 层盐分含量最高；输水后，地下水埋深抬升至 4 m 左右，盐分集聚于地表。当地下水埋深大于 5 m 时，土壤表层盐分含量小于亚表层(表 2)，如果此时配合地面过水，则有利于植物种子的萌发成苗，为群落演替和真正的生态恢复之始。

地下水化学组成的变化是地下水位变化过程中，地下水与土壤剖面易溶盐类交换的结果，把地下水矿化度与土壤剖面电导率进行拟合发现，随着土壤剖面尤其是 0~30 cm 土层电导率的增加地下水矿化度逐渐上升，R 值高达 0.977 (图 7)。

3.8 地下水化学与河道水量的关系

在田间灌溉试验中，土壤盐分含量或地下水中矿化度与灌溉量之间表现为明显的负相关，即灌溉量越大，地下水中矿化度的含量应该越低。在塔里木河下游生态输水过程中，以矿化度为代表的地下水化学特征变化与河道径流也呈负相关关系 (图 8)，即随着河道径流量的增加，地下水矿化度呈下降变化。说明在一定地下水埋深范围内，在“盐随水来，盐随水去”的作用规律下的地下水水质得到了一定改善。

3.9 输水方式与水盐运移

河道输水对地下水化学的影响表现为以河道为中心向两侧渐进的过程。水分在土壤中运动，土壤中的易溶盐类溶解到水中，并随水体的运动被从距离河道较近处带到较远处，产生横向累积效应，我们把该过程称为地下水化学对输水响应

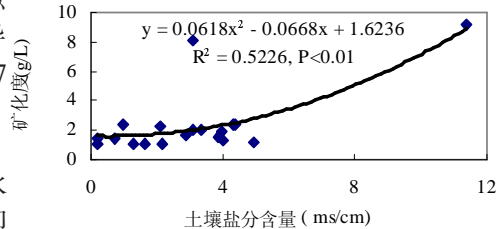


图 7 塔里木河下游地下水矿化度与土壤电导率关系
 Fig. 7 Relationship between total dissolved solids in groundwater and electric conductivity in soil profile in the lower Tarim River

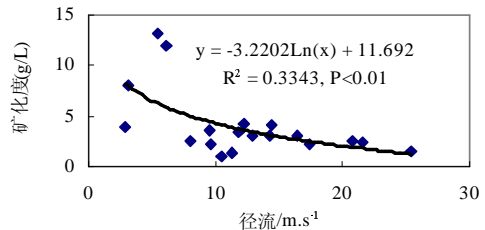


图 8 塔里木河下游地下水水质与水量关系
 Fig. 8 Relationship between the quality of groundwater and the flux in the lower Tarim River

的初期阶段;随着输水的继续进行,更多水补充过来,对原含盐较高的溶液起到淡化作用。地下水在水平侧向渗漏的同时,还在重力势作用下进行着垂直方向的下渗,下渗具有洗盐压盐作用。其共同作用使地下水中主要离子含量和矿化度不断降低,该过程为地下水化学对输水响应的中期阶段;当地下水位在输水的影响下逐渐升高离地表越来越近,蒸发积盐作用

变得愈发明显。另外,土壤剖面盐分的分布规律就是愈接近地表含量愈高,随着地下水位的升高,有更多盐分溶解到水中,从而使得地下水中离子含量和矿化度增加。此阶段为地下水化学对生态输水响应的后期阶段。根据水盐运移规律,在目前输水方式下,地下水化学对输水的响应将保持在后期阶段,各化学组分的含量将会继续增加。

亚合甫马汗断面 B1 监测井距离河道 50 m, 2005 年河水漫溢到该处,因此矿化度和主要离子都呈现出明显的下降变化(表 4),在植被样方调查中发现该处有大量的罗布麻、花花柴、牛皮消等草本植物。因此,如果在一定的断面利用河道漫溢的形式实施面上供水,土壤中的大量易溶盐分将会被下行运动的水流带动土壤剖面的下层,土壤表层含盐量的下降将为植被生长,尤其是种子萌发和幼苗生长提供必要条件。同时,面上供水使近地表层水分含量达到饱和状态,激发种子库,将为群落演替奠定坚实基础;面上供水能够促进浅根系草本植物恢复,保证下游地区的生物多样性,促进受损生态系统的恢复。

4 结论

(1) 塔里木河下游断流河道两侧地下水矿化度和主要离子含量在整体下降变化的趋势下呈现出阶段性变化的特点,地下水化学特征的这种阶段性变化与采样点距离输水河道的远近有较密切的关系,而距离河道远近的差异在于接收水量多少的不同,因此地下水化学特征的变化受水量的影响较大。

(2) 地下水埋深的变化是地下水化学特征变化的直接动力,当地下水埋深在 5 m 以下时地下水中矿化度和主要离子含量达到相对最佳状态,而此时的水位也能保证河道两侧的主要建群种胡杨和柽柳的生存,可以保证生态不再继续恶化和沙漠化土地的不再扩大。

(3) 土壤剖面盐分含量的变化是地下水化学特征变化的最主要因素。塔里木河下游地区是整个流域盐分的汇聚地,土壤剖面中盐分含量高,在生态输水影响下,土壤剖面盐分表现出从菱形分布向 T 型分布变化的态势,而这种变化不利于植物恢复过程中种子萌生和幼苗生长,从有利于植物群落更替角度看,适当实施面上漫灌输水比一味靠河道渗漏方式抬升地下水位更有利于生态恢复。

参考文献 (References)

- [1] Chen Yaning, Zhang Xiaolei, Zhu Xiangmin et al. Analysis on the ecological effects of eco-water delivery to the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(5): 475-482. [陈亚宁, 张小雷, 祝向民等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2004, 34(5): 475-482.]
- [2] Wen Xiaohu. Analysis on the spatial differentiation of hydrochemical characteristics in the Heihe River watershed. *Arid*

表 4 亚合甫马汗断面 B1 监测井地下水化学特征在输水时的变化
Tab. 4 Variations in groundwater chemistry of B1 at Yahefumahan Transect influenced by water deliveries

日期	矿化度	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
2000.5	1.865	0.314	0.411	0.533	0.280	0.036	0.226	0.020
2000.9	2.370	0.317	0.654	0.691	0.159	0.129	0.365	0.026
2000.11	3.280	0.290	0.981	1.031	0.239	0.176	0.65	0.037
2001.9	2.587	0.274	0.754	0.883	0.159	0.162	0.513	0.025
2002.4	2.175	0.343	0.569	0.474	0.105	0.088	0.425	0.024
2003.6	1.356	0.218	0.357	0.352	0.075	0.036	0.430	0.018
2004.4	1.615	0.335	0.433	0.305	0.070	0.050	0.365	0.022
2005.3	1.676	0.352	0.356	0.350	0.063	0.047	0.358	0.021
2005.7	1.460	0.365	0.381	0.220	0.077	0.05	0.293	0.024
2006.3	1.945	0.300	0.503	0.483	0.118	0.088	0.358	0.020
2006.12	1.790	0.262	0.387	0.523	0.101	0.067	0.349	0.016

- Area Research, 2004, 21(1): 1-6. [温小虎. 黑河流域水化学空间分异特征分析. 干旱区研究, 2004, 21(1): 1-6.]
- [3] Wang Guiling, Lin Wenjing, Zhang Fawang. The environmental evolution of groundwater in Taihang Mountain-footplain of North China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(3): 74-77. [王贵玲, 蒯文静, 张发旺. 太行山前平原地下水环境演化规律研究. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 74-77.]
- [4] Garrels R M, MacKenzie F T. Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. In: *Equilibrium Concepts in Natural Waters*, American Cancer Society, Washington, DC. 1967.
- [5] White A F, Claassen H C, Benson L V. The effect of dissolution of volcanic glass on the water chemistry in a tuffaceous aquifer, Rainer Mesa, Nevada. *US Geol. Surv. Water-Supply Paper*, 1980, 1535-1557.
- [6] Frapé S K, Fritz P, McNutt R H. Water-rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48: 1617-1627.
- [7] Hem J D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *US Geol. Surv. Water-Supply Paper*, 1989, 22-54.
- [8] Thomas J M, Welch A H, Preissler A M. Geochemical evolution of ground water in Smith Creek Valley: A hydrologically closed basin in central Nevada. *USA Applied Geochem.*, 1989, 4: 493-510.
- [9] Ciinevt Güiler, Geoffrev D Thyne. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*, 2004, 285: 177-198.
- 10 Kristmannsdóttir H, Ármannsson H. Groundwater in the Lake Myvatn area, northern Iceland: Chemistry, origin and interaction. *Aquatic Ecology*, 2004, 38(2): 115-128.
- [11] Zhou Changjin. Characteristics of the Heihe water resources and water environmental protection. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 721-728. [周长进. 黑河水资源特征及水环境保护. 自然资源学报, 2002, 17(6): 721-728.]
- [12] Guo Dongmei. Analysis on the reason of groundwater characteristics in Yaodu. *Ground Water*, 2004, 26(1): 20-22. [郭冬梅. 尧都区地下水化学特征成因分析与探讨. 地下水, 2004, 26(1): 20-22.]
- [13] Lou Z H, Zhang B J, Cai X Y. Chemical fields in Songliao continental oil-bearing sedimentary basin. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1999, 18(2): 163-171.
- [14] Wu Yaoguo, Li Yunfeng, Wang Huimin et al. Effect on the soil and groundwater along a polluted river. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2004, 26(1): 20-22. [吴耀国, 李云峰, 王惠民等. 污染河流对沿岸土壤和地下水化学环境的影响. 西安工程学院学报, 2004, 26(1): 20-22.]
- [15] Bayless E Randall. Acid-generating salts and their relationship to the chemistry of groundwater and storm runoff at an abandoned mine site in southwestern Indiana, U.S.A. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1993, 12(4): 313-328.
- [16] Li Xiangyun, Zhang Yushu, Wang Lixin et al. Analysis of the groundwater characteristics at the lower reaches of Tarim River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(2): 27-31. [李香云, 章予舒, 王玉立新等. 塔里木河干流下游地下水特征分析. 干旱区资源与环境, 2002, 16(2): 27-31.]
- [17] Chen Debin, Chen Xuguang, Gu Xinlu et al. Primary discussion on hydro-chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Awati County. *Arid Land Geography*, 2001, 24(4): 376-379. [陈德斌, 陈旭光, 顾新鲁等. 阿瓦提县地下水水化学特征及成因初探. 干旱区地理, 2001, 24(4): 376-379.]
- [18] Rodríguez R, Candela L. Changes in groundwater chemistry due to metallurgical activities in an alluvial aquifer in the Moa area (Cuba). *Environmental Geology*, 2004, 46(1): 71-82.
- [19] Leybourne Matthew I. Composition of groundwaters associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile: Elemental and isotopic constraints on water sources and water-rock reactions. *Geochimica*, 2006, 70: 1616-1635.
- [20] Liao Zisheng, Lin Xueyu. Chemical characteristics and variations of groundwater quality in Songnen Basin. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*. 2004, 29(1): 96-102. [廖资生, 林学钰. 松嫩盆地的地下水化学特征及水质变化规律. 地球科学 - 中国地质大学学报, 2004, 29(1): 96-102.]
- [21] Ghobadi, M.H., Khanlari, G. R., Djalaly, H., Seepage problems in the right abutment of the Shahid Abbaspour dam, southern Iran, *Engineering Gerlogy*, 2005, 82(2): 119-126.
- [22] Bai Yuhua. A study on chemical composition of alluvial plain phreatic water in Nanjing City. *Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute*, 1997, (1): 47-52. [白玉华. 南京市区冲积平原浅层潜水化学成分成因分析, 南京建筑工程学院学报, 1997, (1): 47-52.]
- [23] Li Xin, Nian Fuhua. Effect of human activities on groundwater in Alar irrigation area in Xinjiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(2): 41-47. [李新, 年福华. 人类活动对新疆阿拉尔灌区地下水的影响分析. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 41-47.]
- [24] Zhang Hongfeng, Li Weihong, Ge Hongtao et al. Compositor analysis on correlation between groundwater level and water chemical contents at the lower reaches of Tarim River. *Arid Land Geography*, 2003, 26(3): 260-263. [张宏锋, 李卫红, 葛洪涛等. 塔里木河下游地下水位与水化学成分关联度排序分析. 干旱区地理, 2003, 26(3): 260-263.]
- [25] Xu Hailiang, Song Yudong Li Weihong et al. The dynamics of water and salt after ecological water transport to the

- lower reaches of Tarim River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(3): 63-67. [徐海量, 宋郁东, 李卫红等. 生态输水后塔里木河下游地下水水盐动态变化. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(3): 63-67.]
- [26] Chen Y J, Chen Y N, Liu J J et al. Dynamical variations in groundwater chemistry influenced by intermittent water delivery at the lower reaches of the Tarim River. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 13-19.
- [27] Haimiti Yimiti, Yang Chuande. Analysis on the hydraulic effects of water resources utilization in Tarim River valley. In: *The Water Resources, Environment and Management of Tarim River Watershed*. Beijing: China Environmental Science Press, 1998. 84-91. [海米提·依米提, 杨川德. 塔里木河水资源利用所产生的水文效应分析. 见: *塔里木河流域水资源、环境与管理*. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 84-91.]
- [28] Sun Yongqiang, Yin Linke, Zhang Xiaofen. Status of eco-environment in middle and lower reach of Tarim River and the management countermeasures. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(5): 70-75. [孙永强, 尹林克, 张小芬. 塔里木河下游生态环境现状与治理对策. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(5): 70-75.]
- [29] Chen Yongjin, Chen Yaning, Li Weihong et al. The reaction of groundwater chemical characteristics to the eco-water conveyance in the lower Tarim River. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 309-318. [陈永金, 陈亚宁, 李卫红等. 塔里木河下游地下水化学特征对生态输水的响应. *地理学报*, 2005, 60(2): 309-318.]
- [30] Liu Peijun. The physical environment of Tarim River Valley. In: *Study on the Resources and Environment with the Help of Remote Sensing*. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1990. 13-16. [刘培君. 塔里木河两岸的自然地理条件. 见: *塔里木河两岸资源与环境遥感研究*. 北京: 科学技术文献出版社, 1990. 13-16.]
- [31] Yang Qing, He Qing. Relations of the changes in weather and eco-environment in Tarim River Valley. *Weather in Xinjiang*, 2000, 39(3): 11-14. [杨青, 何清. 塔里木河流域的气候变化与生态环境. *新疆气象*, 2000, 39(3): 11-14.]
- [32] Deng Mingjiang. Study on the reaction of plant restoration to water transport and ecological rebuild in the lower reaches of Tarim River. *China Water Resources*, 2004, 14: 15-18. [邓铭江. 塔里木河下游应急输水植被恢复响应及生态修复研究. *中国水利*, 2004, 14: 15-18.]
- [33] Fan Zili, Ma Yingjie, Zhang Hong et al. Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River drainage basin. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 8-13. [樊自立, 马英杰, 张宏等. 塔里木河流域生态地下水水位及其合理深度确定. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 8-13.]

Influence of Intermittent Water Deliveries on the Hydrochemistry of Soil in the Lower Tarim River

CHEN Yongjin^{1,2}, CHEN Yaning^{1,2}, LI Weihong^{1,2}, LIU Jiazhen³, Huang Hui⁴

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

3. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China;

4. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Based on the data of the groundwater buried depths, the chemical properties, salinity in soil profile and the basic information on each delivery of water collected from the year 2000 to 2006, the variational characteristics of groundwater chemistry and related factors were studied. The results confirmed the three stages of the variations in groundwater chemistry influenced by the intermittent water deliveries. The factors which had close relationships with the variations in groundwater chemistry included the distances of monitoring wells from water channel, the depths of groundwater, water flux in watercourse and the salinities in soils. The relationships between chemical variations and groundwater depths indicated that the water quality was the best with the groundwater ranging from 5 to 6 m. In addition, the constructive species in the study area can survive well with the depth of groundwater varying from 5 to 6 m, so the rational depth of groundwater in the lower Tarim River should be 5-6 m.

Key words: groundwater chemistry; depth of groundwater; Tarim River