

塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究

陈永金^{1,2}, 陈亚宁^{1*}, 李卫红¹, 刘加珍^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过对塔里木河下游英苏断面地下水化学特征在生态输水作用下变化的观测资料研究发现, 地下水化学特征对间歇性输水的响应表现出阶段性的特点: 在受输水影响的初期地下水中矿化度和主要离子含量呈现上升变化, 随着输水的进行, 矿化度和主要离子的含量逐步下降, 最后又表现出上升态势. 根据地下水盐变化特点可将地下水化学对输水的响应划分为 3 个阶段: 初期阶段(盐分横向累积阶段)、中期阶段(淡化压盐阶段)和后期阶段(蒸发溶盐阶段); 输水间歇地下水化学特征的变化与地下水化学对输水响应表现出的阶段性特征相一致的特点. 在“盐随水来, 盐随水去”规律作用下, 地下水化学特征的阶段性变化受土壤盐分含量、与河道距离、输水水质、水量的影响, 其中土壤盐分、输送水的水质与地下水位的抬升是主导因素, 而距河道远近与水量的多寡则是导致与河道不同距离处阶段性变化时间差异的重要原因. 从水盐运移规律的角度考虑, 河道输水方式比面上输水方式更利于生态恢复.

关键词: 地下水化学特征; 阶段性; 输水; 塔里木河下游

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)07-1299-06

Three Stages of the Groundwater Chemical Properties Reacting on the Intermittent Water Deliveries in Lower Tarim River, China

CHEN Yong-jin^{1,2}, CHEN Ya-ning¹, LI Wei-hong¹, LIU Jia-zhen^{1,2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the monitored data of groundwater chemical properties and groundwater depth influenced by five intermittent water deliveries in the lower reaches of the Tarim River, the regulation of groundwater chemistry varying was analysed, the variations in groundwater chemical properties unfolded a clear three-stages changing character under the influence of water deliveries: the initial stage concentrations of major ions and total dissolved solids (TDS) increasing; the intermediate stage the concentrations decreasing; the late stage the chemical properties increasing once more. The variation of groundwater chemistry resulted from many factors, such as the salinities in soil profile, the quality of transported water, the distance from watercourse, the amount and the season of the delivery. However, “salts coming with the water flow, and leaving with it” is the main reason that led to the increase and decrease of chemical properties at first stage and second stage, and with the uprising water level, more and more salinities in soil profile dissolved into ground water and the severe evaporation resulted the concentrations of major ions and TDS increase at late stage. Furthermore, the variations of groundwater chemistry at the intermission of water deliveries have close relationship to the three stages. It should be pointed out that the mode of water transport in surface scope is infeasible due to the climate characteristics of the lower reaches of the Tarim River.

Key words: groundwater chemical characteristics; three stages; water delivery; Tarim River

地下水在干旱半干旱区经济和生态的健康稳定发展过程中具有举足轻重的作用. 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^[1]. 中外学者对蒸发、降雨、滴灌条件下的水盐运移, 以及水文环境变化条件下的地下水化学特征进行了大量的研究工作^[2~8], 揭示了地下水和土壤中的盐分之间相互影响、相互转换的规律. 在地下水流作用下, 土壤中的盐分运移具有“盐随水来, 盐随水去”的特点^[9~11]. 然而, 在干

旱内陆河流域断流河道间歇性输水条件下地下水化学特征变化规律及其影响因素的研究论文尚不多见. 本文结合塔里木河下游生态输水地下水埋深及水化学特征变化监测资料的分析研究, 试图揭示其变化规律, 以及引起这些变化的因素, 探讨更为有效

收稿日期: 2005-08-28; 修订日期: 2006-01-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目; 国家自然科学基金项目 (90520004, 3050081)

作者简介: 陈永金 (1968~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为干旱区生态保育, E-mail: yongjincheng2004@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

的输水方式,为合理利用宝贵水资源,促进受损生态恢复提供科学参考和指导。

1 数据收集处理

在研究区沿输水河道选择了 9 个观测断面,布设了 40 眼地下水位监测井,井深依距离输水河道近处的 10 m 到最远处的 20 m 不等,其中,英苏断面设有监测井 8 眼,分别距输水河道 150~1 050 m。定点、定期地取得地下水水样,密封后送入实验室进行化学分析,分析内容包括:矿化度、pH、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等 13 项指标。分析方法分别是:矿化度:重量法;总碱度、 HCO_3^- 和 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。

考虑到英苏在气候、地质、土壤、植被状况在整个下游具有典型性和代表性,选择英苏断面距河道 250 m(近)、450 m(中)与 750 m(远)的地下水化学数据作为研究对象。由于地下水化学特征对生态输水的响应是一个缓慢的过程,生态输水作用下的地下水化学特征变化受到诸如地下水位、输水量、土壤剖面含盐量等因素的制约。在对地下水化学取样分析时应尽量选取距离下次输水近的日期,以获取稳定的,能较好反映本次输水影响的数据。本文所采用的地下水化学资料分别采自 2000-11-01、2001-03-03、2001-09-10、2002-07-18 和 2003-06-18,取水样时地下水的埋深见图 1。

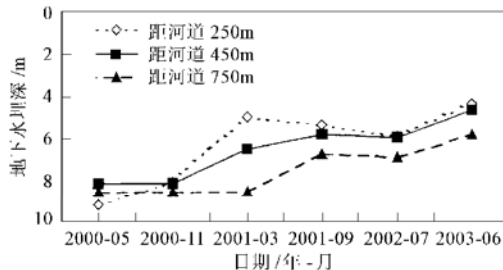


图 1 间歇性输水影响下英苏断面地下水埋深变化
Fig. 1 Variations in groundwater depths influenced by intermittent water deliveries at Yinsu Sector in the lower reaches of the Tarim River

2 结果与分析

2.1 输水作用下地下水埋深的响应

输水通过侧渗、下渗实现河道两侧的地下水位抬升。在水分的横向与垂直运动过程中,地下水和土壤中的盐分相互交换和转换,地下水化学特征随之发生变化。水分的运动过程中,河水的侧向渗透不能被直接监测分析,但地下水位的垂直抬升结果能被观测获得。输水前,英苏断面距离河道 250 m 的地下水埋深为 9.12 m,经过第 1 次输水后地下水位有非常明显的抬升。距河道 450 m 处的地下水位在第 2 次输水后开始上升,距河道 750 m 处地下水位则是在第 3 次输水后受影响。可见地下水位的抬升在空间上有一定的先后性(图 1)。

2.2 地下水化学特征对输水的响应

生态输水是先从博斯腾湖调往大西海子水库,再由大西海子水库泄洪闸向断流河道输送。生态输水期间,博斯腾湖湖水矿化度在 1.1 g/L 左右^[12]。较好的水质对大西海子水库水质起到了淡化作用(见表 1)。

表 1 生态输水期间大西海子水库水质状况/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Water chemical characteristics in Daxihaizi Reservoir during the water deliveries/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

日期/年-月	矿化度	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
2000-05	4.152	0.087	1.303	1.265	0.112	0.201	0.941
2000-08	3.675	0.096	1.183	1.121	0.102	0.187	0.845
2000-11	1.635	0.147	0.524	0.41	0.079	0.075	0.375
2002-07	1.735	0.104	0.488	0.479	0.069	0.093	0.35
2003-06	2.230	0.155	0.690	0.672	0.094	0.089	0.805

第 1 次输水后,英苏断面距离输水河道 250 m 处地下水中主要离子含量和矿化度比输水前都有明显上升;第 2 次、第 3 次输水后表现为下降变化,其变化幅度在 20%~50% 之间;而第 4 次后 Cl^- 、 Na^+ 的含量分别比第 3 次输水后上升 1.8% 和 1.25%, SO_4^{2-} 含量未发生明显变化;第 5 次输水后表现出显著上升的态势(图 2a)。

而距输水河道 450 m 处的地下水化学,未受到第 1 次输水的影响,在第 2 次输水的影响下,地下水中主要离子含量及矿化度才上升明显,上升幅度较距离河道 250 m 处更大,在 70%~110% 间;在经历第 3、第 4 次输水后的下降后,第 5 次输水后表现出微小的上升变化趋势(图 2b)。

距离输水河道 750 m 处地下水中主要离子及矿化度第 3 次输水后开始受到输水的影响,除 Ca^{2+} 含量稍有降低外, SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的含量与第 2 次输水后相比都呈现异常显著的上升,其上升幅度

分别为: 137.84%、126.51%、677%、12.90%, 矿化度的升幅也高达 96.8%; 第 4 次输水后 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量分别增加 83%、39%、83% 和 47%, SO_4^{2-} 含量变化微弱; 第 5 次输水后矿化度和各主要离子的含量呈现飙升现象, 矿化度和 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的含量与第 4 次输水后相比分别增加 389%、493%、488%、709%、310% (图 2c)。

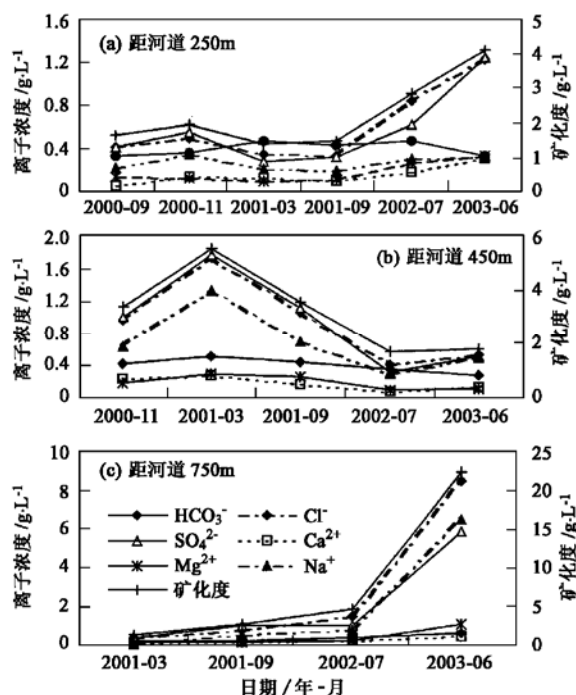


图 2 间歇性输水影响下距输水河道 250m(a)、450m(b)、705m(c) 处地下水化学特征的变化

Fig. 2 Variations in groundwater chemistry 250m(a), 450m(b) and 750m(c) from watercourse at Yinsu Sector in the lower reaches of the Tarim River

究其原因: 生态输水过程中, 河道中的水在势能梯度力作用下向河道两侧渗漏, 补充浅层地下水。水分在土壤中运动, 土壤中的易溶盐类溶解到水中, 并随水体而运动, 使水头所到之处在地下水位得以抬升的同时盐分含量也明显上升, 这就是盐随水来规律下的盐分横向累积效应^[10], 从而表现为第 1 次输水后距河道 250 m 处, 第 2 次输水后距河道 450 m 和第 3、4、5 次输水后距河道 750 m 处地下水中矿化度与主要离子含量上升。在水-土盐分交换过程中, 可溶盐类按溶解度法则进入水中, 即氯化盐、硫酸盐和硝酸盐的次序。从观测到的数据资料来看, 地下水中主要离子的含量也以氯离子和硫酸根离子的含量最大。矿化度是地下水各组分浓度的总指标, 在英苏

断面, 矿化度增幅与采样点距离河道远近的关系可表示为:

$$y = 8.0097 - 0.0901x + 0.0003x^2 - 1.5723 \times 10^{-7}x^3$$

$$R^2 = 0.897, p < 0.01$$

其中, y 为矿化度的增幅, x 为距离, 单位 m。

随着输水的继续进行, 更多水量补充过来, 对含盐较高的地下水起到淡化作用, 并且在地下水进行水平侧向渗漏的同时, 还有重力势作用下的下渗(下渗具有洗盐压盐作用), 更主要的是地下水盐运动不仅遵循“盐随水来”的规律, 也遵循“盐随水去”的规律, 即随着水头的前进, 盐分也被带往距离河道更远处。诸多因素的共同作用使地下水中主要离子含量和矿化度不断下降。 HCO_3^- 含量的增减反映了地下水质的优劣变化, 距离输水河道 250 m 处 HCO_3^- 的含量在输水前和第 1 次输水后的含量相对较低, 但在第 2 次和第 3 次输水后却上升为含量最大的离子; 同样道理, 距离河道 450 m 处地下水中 HCO_3^- 的含量在第 3 次和第 4 次输水后呈现出明显的相对上升态势, 反映了水质的优化。矿化度的下降幅度与采样点距离河道远近的关系可表示为:

$$y = 688.942 - 897.85x + 219.087x^2$$

$$R^2 = 0.996, p < 0.004$$

其中, y 为矿化度的降幅, x 为距离, 单位 m。

当地下水位在输水的影响下逐渐抬升, 越来越接近地表时, 蒸发积盐作用变得愈发明显^[13]。另外, 愈近地表, 土壤中的盐分含量愈高, 易溶盐类的溶解, 使得地下水中矿化度和离子含量再度升高。

根据地下水化学的变化特征, 可将此过程划分成不同的响应阶段: 初期阶段(盐分横向累积阶段), 中期阶段(淡化压盐阶段)和后期阶段(蒸发溶解阶段)。其中, 距离河道远近的不同, 地下水化学特征受输水的影响程度不同, 对生态输水的阶段性反应也不完全相同。远河道处(750m), 第 3 次输水后受到影响, 开始进入反应的初期阶段。但由于地处沿河淡化带外缘, 包气带中盐分含量较高, 随地下水位抬升大量易溶盐类溶解于水中; 加之受来水量的限制, 未能及时受大量“淡水”补充, 致使矿化度和主要离子含量持续上升的幅度异常显著。其地下水化学特征的阶段性表现出迟滞和微弱, 第 5 次输水后仍处于初期阶段(表 2)。

2.3 输水间歇地下水化学特征的响应

监测资料证明地下水埋深在输水的间歇是呈下降变化的, 地下水中矿化度和主要离子含量并没有

表现出随水位的下降而单调变化的特点:距河道 250m 处,第 3 次输水刚刚结束时 2001-11 地下水的埋深是 3.57 m,2002-04 降至 4.58 m,2002-07 进一步降低到 6.8 m,在此过程中矿化度和主要离子含量都呈现出明显上升变化;距离河道 450 m 处地下水化学特征在输水间歇地下水矿化度和主要离子的含量在第 3 和第 4 次输水的间歇则表现出下降-上升的变化特点,此时段为该处地下水化学对输水响应中期阶段的结束和后期阶段的开始;距河道 750m 处地下水矿化度和主要离子的含量也表现出先降后升的特点(表 3).由此可见,地下水化学特征的变化与盐分在水-土中的运动规律有关.

2.4 地下水化学特征的阶段性和输水方式的选择

水分和盐分是塔里木河下游地区植被生长的限制因素^[14],从地下水化学对生态输水响应的角度来说,响应的中期是最理想的,而继续沿着目前河道输水,在不能明显提高影响范围的同时,还将导致地下

表 2 英苏断面地下水化学特征对生态输水响应的阶段性

Table 2 Three stages of the groundwater chemistry reacting to the intermittent water deliveries at Yinsu Sector in the lower reaches of the Tarim River

输水次数	与河道距离/ m		
	250	450	750
第 1 次输水	初期		
第 2 次输水	中期	初期	
第 3 次输水	中期	中期	初期
第 4 次输水	后期	中期	初期
第 5 次输水	后期	后期	初期

水盐分含量的上升.基于地下水化学特征对输水的时空响应特点,改变单一河道输水方式,探讨有更有效的输水模式很有必要.一些学者提出面上输水的建议^[15~17],从水盐运动和植被生理特点,以及有效利用水资源的角度考虑,面上输水的建议并不可行,首先面上输水将造成水分更大的蒸发损耗,在“线

表 3 英苏断面距河道不同距离处地下水埋深及水化学特征在输水间歇的变化

Table 3 Variations of groundwater depths and groundwater chemistry at interval of water deliveries at Yinsu Sector, lower reaches of the Tarim River

日期	距离河道/ m	矿化度	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	地下埋深/ m
2001-11	250	1.146	0.442	0.332	0.255	0.069	0.1	0.225	0.018	3.57
	450	2.645	0.447	0.447	0.193	0.029	0.161	0.2	0.021	4.92
	750	2.855	0.474	0.843	0.619	0.182	0.261	0.31	0.02	5.74
2002-04	250	1.64	0.442	0.726	0.784	0.083	0.169	0.588	0.024	4.58
	450	1.695	0.436	0.391	0.248	0.061	0.095	0.275	0.02	5.01
	750	2.62	0.354	0.407	0.313	0.07	0.091	0.285	0.016	5.58
2002-07	250	2.865	0.226	0.786	0.956	0.113	0.154	0.613	0.033	6.8
	450	1.70	0.275	0.802	0.57	0.132	0.152	0.438	0.037	6.42
	750	4.57	0.394	1.437	0.98	0.214	0.258	0.8	0.03	6.66

型”输水模式下,根据河道水面蒸发公式:

$$Q_e = \varepsilon \cdot L_e \cdot B \cdot E_0$$

其中: Q_e 为河道水面蒸发量(10^8 m^3); L_e 为河道长度(m); B 为河道平均宽度(m); E_0 为 20cm 口径蒸发皿的日蒸发量; ε 为折算系数.5 次输水通过河面蒸发的水量为 $0.22 \times 10^8 \text{ m}^3$,加上通过植被和土壤蒸腾、蒸发的水分达到 $2.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,将近有 1/3 的水分蒸散掉,而要通过面上输水则会有更多的宝贵水分损耗;其次,尽管面上输水能增加土壤水分含量,降低土壤表层盐分,为植被种子萌生提供好的环境条件,一旦面上输水停止,在高强度蒸发作用下,水分会很快损失掉;再者,盐分随水分的蒸发重新积聚到土壤表层,而植物在其发育的早期阶段——种子萌发期和幼苗期是最脆弱的阶段^[18],即使此时有大量的实生苗出现,也很难保证这些幼苗能顺利发育成林.为了使珍贵水资源得到合理利用,促进下游

受损生态有效的恢复,在线形输水的基础上,通过河道河汉的疏浚,实施双河道或多河道输水,既减少水分的无效损耗又能扩大输水的影响范围和生态恢复的规模,是较理想的输水方式.

3 讨论

通过距河道不同距离处(远、中、近)地下水化学特征对输水响应的特征来看,尽管 5 次输水之间的输水量,持续时间及输水季节的选择各不相同,而距河道不同距离处地下水化学特征分别接受不同次输水的初次影响,但其变化规律却非常相似,即都表现出明显上升-下降-上升 3 个阶段,受输水影响初期的上升是由于水流在河床和测向渗透过程中,土壤中的易溶盐类溶解到水中并被水头携带所致,此阶段为盐分的横向累积阶段;中期阶段的下降则要归功于大量水分来到对原较高浓度的溶液起到了

“淡化”作用,与此同时,水头继续向前推进的结果也使盐分降低下来,此阶段为淡化压盐阶段;而后期阶段的再次上升是由于地下水抬升到一定高度后,蒸发积盐所使然,另外,越近地表土壤剖面的盐分含量越高,随着地下水位的上升,大量盐分被溶解到水中,对地下水中盐分的再度升高起到了关键作用,此阶段谓之蒸发溶解阶段。

从距河道远、中、近处地下水化学特征在 5 次水量各不相同的输水影响下的变化规律可以看出,输送水的水量决定输水对河道两侧地下水影响范围的大小,而对输水影响下地下水化学特征变化的阶段性没有明显的影响。而输水的水质只对地下水化学特征阶段性变化的程度有关,但并没有决定性影响。而距离河道的远近及土壤及原地下水中盐分含量却有着重大影响。而输水作用下地下水化学特征的阶段性反应的初期、中期阶段是“盐随水来,盐随水去”规律的直接体现。

塔里木河下游地处塔里木盆地的最低洼处,是流域盐分的聚集区,土壤和地下水中盐分含量都很高。由于降水稀少,蒸发强烈,河水成为地下水唯一的补给源,沿河道两侧形成一定宽度的淡化带^[19],根据英苏断面距离河道不同距离处地下水中矿化度及主要离子含量特征,英苏断面的淡化带的宽度在 700 m 左右。

不同输水方式下水盐运移的特征具有显著不同:以河道方式输水,水盐以水平运动为主,盐分在水流的携带下,自河道近处向远处运动,这样有利于近河道处生态的恢复和群落的演替;而采用面上输水方式,水盐以垂直运动为主,在输水进行期间,盐分在水流的携带下自地表向下层剖面移动,而输水的间歇,在蒸发作用下盐分又重新返回地表,既造成水分因强烈的蒸发而大量的散失,又不利于植物的生长和繁衍。综合考虑地下水盐运移特点和植物的生理生态特征对水盐的适应性以及塔里木河下游气候环境特点,面上输水方式不宜提倡。而通过实施双河道或多河道输水,可以扩大生态输水的影响面积,促进塔里木河下游受损生态系统恢复的规模和速度。

4 结论

(1) 始自 2000-05 的塔里木河下游断流河道的输水工程的实施对河道两侧的地下水位的抬升起到了积极而明显的影响,与地下水位的稳步上升不同,地下水化学特征对间歇性输水表现出阶段性特点:

受输水影响的初期为盐分横向累积阶段,地下水中矿化度和主要离子含量呈升高变化;中期为淡化压盐阶段,矿化度和主要离子含量都呈下降趋势;后期则属于蒸发溶盐阶段,矿化度和离子含量再度呈上升变化。输水间歇地下水化学特征的变化与地下水化学对输水响应表现出的阶段性特征相一致的特点。

(2) 在“盐随水来,盐随水去”规律作用下,地下水化学特征的阶段性变化受土壤盐分含量、与河道距离、输水水质、水量的影响,其中土壤盐分、输送水的水质与地下水位的抬升是主导因素,而距河道远近与水量的多寡则是导致与河道不同距离处阶段性变化时间差异的重要原因。

(3) 以河道方式输水,水盐以水平运动为主,盐分在水流的携带下,自河道近处向远处运动,这样有利于近河道处生态的恢复和群落的演替。而面上输水导致水盐以上下行运动为主,其结果不利于植被更新,更会引起水分的大量损耗,故面上输水方式不可取。

参考文献:

- [1] 温小虎, 仵彦卿, 常娟, 等. 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.
- [2] Malcom I A, Soulsby C, Youngson A F, *et al.* Heterogeneity in groundwater — surface water interactions in the hyporheic zone of a salmonid spawning stream [J]. *Hydrol. Proc.*, 2003, 17: 601~617.
- [3] Van der Hoven S J, Solomon D K, Moline G R. Natural spatial and temporal variations in groundwater chemistry in fractured, sedimentary rocks: scale and implications for solute transport [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(5): 861~873.
- [4] 吕殿青, 王全九, 王文焰, 等. 膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(6): 794~801.
- [5] Razowska L. Changes of groundwater chemistry caused by the flooding of iron mines (Czestochowa Region, Southern Poland) [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 244: 17~32.
- [6] Detry T, Malard F, Gibert J. Dynamics of solutes and dissolved oxygen in shallow urban groundwater below a stormwater infiltration basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 329: 215~229.
- [7] Banaszuk P, Wysocka-Czubaszek A, Kondratiuk P. Spatial and temporal patterns of groundwater chemistry in the river riparian zone. *Agriculture [J], Ecosystems and Environment*, 2005, 107(2~3): 167~179.
- [8] Sanchez Perez J M, Tremolieres M. Change in groundwater chemistry as a consequence of suppression of floods: the case of the Rhine floodplain [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(1-2): 89~104.
- [9] 李韵珠, 陆锦文, 黄坚. 蒸发条件下粘土层与土壤水盐运移 [A]. 见: 石元春, 李韵珠, 陆锦文, 等. 盐渍土的水盐运动 [C]. 北京: 北京农业大学出版社, 1986. 161~174.

- [10] 韩淑敏, 田魁祥, 刘小京, 等. 点源入渗与蒸发条件下土壤水盐运移试验研究[J]. 河北农业大学学报, 2002, **25**(1): 24~ 28.
- [11] Peck A J, Hatton T. Salinity and the discharge of salts from catchments in Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **272**: 191~ 202.
- [12] 兰文辉, 刘建平. 博斯腾湖水质变化分析与对策研究[J]. 重庆环境科学, 2002, **24**(4): 86~ 88.
- [13] 崔亚莉, 邵景力, 韩双平. 西北地区地下水的地质生态环境调节作用研究[J]. 地学前缘, 2001, **8**(1): 191~ 196.
- [14] Murgai R, Ali M, Byerlee D. Productivity growth and sustainability in post-green revolution agriculture: the case for the Indian and Pakistan Punjabs [J]. *World Bank Res. Observ.*, 2001, **16**: 199~ 218.
- [15] 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[J]. 中国水利, 2004, **14**: 15~ 18.
- [16] 徐海量, 陈亚宁, 杨戈. 塔里木河下游生态输水对植被和地下水位的影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 18~ 22.
- [17] 杨戈, 郭永平. 塔里木河下游末端实施生态输水后植被变化与展望[J]. 中国沙漠, 2004, **24**(2): 167~ 172.
- [18] Geraldine L. Dodd, Lisa A. Donovan. Water potential and ionic effects on germination and seedling growth of two cold desert shrubs [J]. *American Journal of Botany*, 1999, **86**(8): 1146~ 1153.
- [19] 李香云, 章予舒, 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.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8000 字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 来稿可用 A4 纸激光打印(一式 3 份), 寄至本刊编辑部; 或网上投稿. 稿件往来一般通过本刊编辑部, 请不要寄给个人, 以免耽搁或丢失.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页~ 止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页~ 止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页~ 止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地. 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问. 对未刊稿件一般不退, 请作者自留底稿.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn