

# 克拉玛依地区减排林地地下水动态变化及合理生态水位分析

吴明辉<sup>1</sup>, 宁虎森<sup>2</sup>, 王让会<sup>1</sup>, 吉小敏<sup>2</sup>, 闵首军<sup>3</sup>, 赵福生<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044;

2. 新疆林业科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:** 基于对克拉玛依地区减排林地地下水水位及水质的监测结果, 分析了减排林地地下水动态变化特征, 探讨了减排林地下水的合理生态水位。结果表明, 减排林区地下水埋深出现了规律性分布, 减排林区地下水埋深已由2005年的7.8 m减小为2009年的4.6 m, 呈减小趋势。减排林地下水的矿化度由2005年的22.67 g/L变化为2009年的5.35 g/L。并统计了减排林地地下水理化性质特征, 表明地下水的水溶性盐的空间变化明显。根据减排林区主要植被生长状况与地下水埋深关系, 得出减排林区地下水合理生态水位为2.5~5.0 m。

**关键词:** 减排林; 地下水; 动态变化; 生态水位

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0129-05

中图分类号: X523, F326

## Dynamic Change of Groundwater and Reasonable Ecological Groundwater Level in Karamay Artificial Carbon-Dioxide-Capture Forest

WU Ming-hui<sup>1</sup>, NING Hu-sen<sup>2</sup>, WANG Rang-hui<sup>1</sup>, JI Xiao-min<sup>2</sup>, MIN Shou-jun<sup>3</sup>, ZHAO Fu-sheng<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; 2. Xinjiang Forestry Academy, Urumqi, Xinjiang 830002, China; 3. Xinjiang Petroleum Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

**Abstract:** Based on the monitoring data of groundwater level and its quality in Karamay artificial carbon-dioxide-capture forest, the characteristics of groundwater dynamic change were analyzed. Meanwhile, the reasonable ecological water table of groundwater in the artificial carbon-dioxide-capture forest was discussed. Results show that buried groundwater depth in the artificial carbon-dioxide-capture forest was regularly distributed and it was reduced from 7.8 m in 2005 to 4.6 m in 2009. Groundwater mineralization changed from 22.67 g/L in 2005 to 5.35 g/L in 2009. Statistics of groundwater physicochemical properties indicated that the spatial variation of water-soluble salts in groundwater was obvious. According to relationship between the main forest vegetation growth conditions and buried groundwater depth, the reasonable ecological water table of groundwater in Karamay artificial carbon-dioxide-capture forest was 2.5~5.0 m.

**Keywords:** artificial carbon-dioxide-capture forest; groundwater; dynamic change; ecological water table

水资源已成为干旱区影响生态环境和经济发展的主要因素之一。地下水是水资源的重要组成部分, 其水资源量有限、补给速度慢、循环周期长<sup>[1]</sup>。在干旱区水资源的开发利用过程中, 地下水占有非常重要的地位, 与生态环境有密切的关系<sup>[2-3]</sup>。因此, 研究干

旱区地下水动态及其合理生态水位有很重要的现实意义。地下水动态是指在自然和人为因素下, 地下水的水位、流量、水温、化学成分和气体成分含量等随时间改变而发生的变化<sup>[4]</sup>。影响地下水动态变化的主要因素包括气象、水文及人为因素<sup>[5-7]</sup>。气象、水文因

收稿日期: 2010-01-19

修回日期: 2010-03-08

资助项目: 国家重点基础研究(973)发展规划项目“二氧化碳植物吸收减排的基础研究”(2006CB705809); 国家科技支撑项目(2006BAD26B0902); 中国科学院知识创新重大项目(KSCX-YW-09); 国家气象局软科学项目(QR2008-39); NUIST 科研基金项目(20070105)

作者简介: 吴明辉(1983—), 男(汉族), 河南省商城县人, 硕士研究生, 主要从事景观生态及生态水文方面的研究。E-mail: wuminghui2005@126.com。

通信作者: 王让会(1963—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态学、地理学等领域的研究工作。E-mail: rh-wang@ms.xjb.ac.cn。

素主要包括降水、蒸发、水文等;人为因素主要包括人工开采、灌溉、水利工程等。二者对地下水水位的升降有直接的影响。在中国干旱区,降水稀少,地下水与植被生长有密切关系<sup>[8]</sup>,通过对地下水的监测和分析,可以掌握地下水动态变化的特征和规律,对地下水资源的开发管理具有重要意义。目前,我国地下水监测的主要方法是建立监测井,形成监测网。20世纪50年代,我国地下水水位监测就已经开始<sup>[9]</sup>,其中大的区域性监测网(如黄河流域或华北平原)主要是在20世纪70年代初建立的<sup>[10]</sup>,这些监测网的建立为后期相关的研究工作奠定了基础。

地下水合理生态水位是指满足生态环境要求、不造成生态环境恶化的地下水水位<sup>[11]</sup>。地下水水位过深或过浅,都不利于植物的生长。地下水水位过深,会导致土壤干旱,植物生长受到水分胁迫,发生荒漠化;地下水水位过浅,会使土壤发生盐渍化,植物生长受到盐胁迫<sup>[12]</sup>。在中国干旱区,生态系统具备了脆弱生态系统的一切性质,对水土资源开发利用的干扰极为敏感<sup>[13]</sup>。因此,确定适宜的地下水水位,对地下水资源的合理开发利用具有重要意义。近年来,我国很多学者对干旱区地下水合理生态水位进行了研究。例如,郭占荣等人<sup>[14]</sup>利用平均土壤含水量与地下水埋深进行相关性分析,得出了西北内陆地区天然植被的合理地下水埋深;杨泽元等人<sup>[15]</sup>利用植被生长状况与地下水埋深的关系,分析了陕北风沙滩地区的适宜地下水埋深;王化齐等人<sup>[16]</sup>,根据石羊河下游民勤绿洲的具体特点,提出了恢复生态适宜地下水位的措施等。

减少大气中温室气体含量的一个重要方法就是增加碳的吸收,而森林是陆地生态系统中最大的碳库,树木可以通过光合作用把二氧化碳固定下来。实施植树造林是减少二氧化碳排放、应对全球变化的有效途径之一。克拉玛依地区二氧化碳减排林一期工程的完成,对阻风滞沙、涵养水源、调节区域小气候等具有重要作用,并对节能减排工作意义重大。

本研究在对克拉玛依地区减排林区地下水水位及水质监测的基础上,分析了克拉玛依减排林区地下水动态变化,并利用减排林区植被的生长状况与地下水埋深的关系,探讨了减排林区地下水的合理生态水位,为减排林区地下水资源的管理利用以及对下一期造林工程的实施提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

减排林毗邻克拉玛依市农业开发区,位于准噶尔盆地西北边缘的湖积平原,距离克拉玛依市区约20

km,面积 $6.67 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ,位于东经 $84^\circ 57' 1.8'' - 85^\circ 5' 19.5''$ ,北纬 $45^\circ 23' 15.24'' - 45^\circ 30' 38.7''$ ,最低海拔258 m,最高海拔276 m,高差为18 m,属典型的温带大陆性干旱荒漠气候。气候特点是寒暑差异悬殊,冬季严寒,年极端最低温度可达 $-35.9^\circ \text{C}$ ,夏季高温炎热,年极端最高气温可达 $42.9^\circ \text{C}$ ,降水稀少而蒸发强烈,日照时间长。年降水量多年平均为105.3 mm,潜在蒸发量多年平均为3 545 mm。无霜期长,年平均为225 d。

研究区外土地利用类型以林地,居民区,荒地为主。研究区内土地利用类型主要为林地,减排林营造时间为2001年,树种以俄罗斯杨(*P. russkii* Jabl.)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)、柽柳(*Tamarix* spp.)、芦苇(*Phragmites australis*)、新疆杨(*Populus bolleana* L.)、榆树(*Ulmus pumila*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为主。

### 1.2 研究方法

在克拉玛依农业开发区布设52眼地下水监测井<sup>[17]</sup>的基础上,2009年8月,对减排林区内的18眼监测井进行了地下水水位和水质的监测。根据监测结果,减排林区地下水埋深为0.85~17.90 m。同时,对减排林区地下水的水溶性盐分进行了测试分析,项目包括电导率,矿化度,全盐, $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{K}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ ,pH共12项指标,分析方法均采用常规分析法<sup>[18]</sup>。

利用研究区遥感影像,结合研究区自然地理本底特征,用便携GPS定位仪定位,在减排林区每个监测井旁设置 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 标准样地,在标准样地内,选取 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方,进行群落学调查。并调查标准样地内植被的种类、数量、胸径、高度、盖度等<sup>[19]</sup>。通过对减排林地下水以及植被的调查取样分析,研究生态水文与减排林内植被生长状况的密切关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 地下水动态变化

2.1.1 地下水水位变化特征 地下水按其埋藏条件主要可分为潜水和承压水,潜水面距地面的距离称为潜水埋藏深度,即地下水埋深。基于2009年减排林区内18眼地下水监测井对地下水水位的监测数据,通过IDM反距离权重法<sup>[20]</sup>进行插值,得到减排林地下水埋深等值线分布图(图1)。

从图1中可以看出,减排林区地下水埋深出现了规律性分布,即靠近 $10^\#$ 样地,地下水埋深较小;靠近 $S20^\#$ 样地,地下水埋深较大。主要原因可能是由于 $10^\#$ 样地靠近克拉玛依农业开发区,由于农业开发区长期的引水灌溉,导致该区域地下水埋深较小。

S20<sup>#</sup> 样地靠近克拉玛依市区(市区内可能由于地下水开采, 导致地下水埋深变大)和荒漠植被区(干旱少水, 地下水埋深较大)。因此, 从 10<sup>#</sup> 样地到 S20<sup>#</sup> 样地, 地下水埋深变大。从实地监测结果来看, 减排林地下水埋深最小值出现在 10<sup>#</sup>, 为 0.85 m; 最大值出现在 S20<sup>#</sup>, 为 17.90 m。

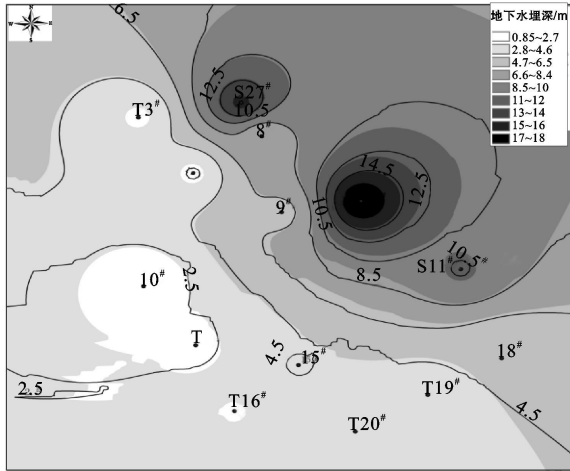


图 1 地下水埋深等值线分布图

基于 2005 年 8 月和 2009 年 8 月克拉玛依地区减排林地下水埋深的监测数据, 选取监测井 6 眼(8<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup>, 10<sup>#</sup>, 15<sup>#</sup>, 18<sup>#</sup>, 20<sup>#</sup>), 分别比较了同一监测井在 2005 年 8 月和 2009 年 8 月的地下水埋深(图 2)。

根据图 2, 减排林区地下水埋深 2009 年(平均值 4.64 m)明显小于 2005 年(平均值 7.78 m)。主要原因是由于减排林靠近农业开发区, 受农业开发区灌溉水的影响, 减排林地下水埋深有变小趋势。且减排林采取的是引水地面灌溉, 除蒸发和植物利用外, 大部分侵入地下, 补给了浅层地下水, 同时由于植被具有涵养水源的作用, 因此, 减排林区地下水埋深呈减小趋势。从图 2 中可以看出, 减排林 18<sup>#</sup> 处地下水埋深变小的幅度最大, 已由 2005 年的 12.61 m 变为 2009 年的 4.69 m。主要原因是由于 18<sup>#</sup> 靠近荒漠植被区, 开发前, 由于受荒漠气候的影响, 其地下水埋深较大, 开发后, 由于受植被和灌溉水的影响, 其地下水埋深变小幅度较大。由于 15<sup>#</sup> 处林区 95% 以上有虫害, 属严重虫害林区, 部分林木已被砍伐, 且受动物扰动较大, 减排林 15<sup>#</sup> 处地下水埋深有增大趋势。

2.1.2 地下水理化性质变化特征 基于 2005 年 8 月和 2009 年 8 月对克拉玛依地区减排林地下水水质的分析数据, 选取监测井 5 眼(9<sup>#</sup>, 10<sup>#</sup>, 15<sup>#</sup>, 18<sup>#</sup>, 20<sup>#</sup>), 比较了各监测井在 2005 年 8 月和 2009 年 8 月地下水的矿化度(图 3)。从图 3 中可以看出, 2009 年

减排林区地下水矿化度明显低于 2005 年(已由 2005 年的 22.67 g/L 变为 2009 年的 5.35 g/L)。其中, 减排林 15<sup>#</sup> 处地下水矿化度值降为 1.01 g/L, 已达到农用水标准<sup>[6]</sup>( $< 1.70$  g/L)。减排林 18<sup>#</sup> 处矿化度下降的幅度最大, 主要原因可能是 18<sup>#</sup> 处地下水埋深变小的幅度比较大(已由 2005 年 8 月的 12.61 m 变为 2009 年 8 月的 4.69 m)。这说明在减排林区地下水埋深变浅的同时, 地下水的矿化度也在变小, 对植被的生长具有正效应。

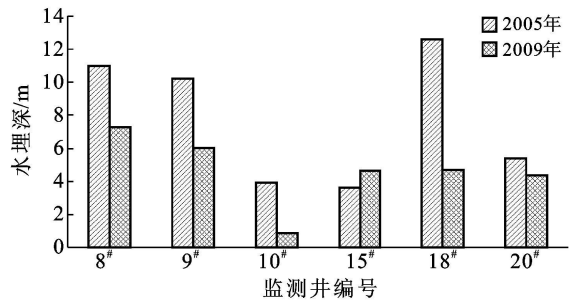


图 2 2005 年与 2009 年地下水埋深比较

根据 2009 年对减排林地下水水质的监测结果, 10<sup>#</sup>, 15<sup>#</sup>, 18<sup>#</sup>, 20<sup>#</sup> 处地下水矿化度分别为 2.722, 1.010, 5.434 和 1.924 g/L, 均已达到植被一般生长状态的需求<sup>[21]</sup>。减排林 9<sup>#</sup> 处地下水矿化度为 15.676 g/L, 主要原因是 9<sup>#</sup> 靠近荒漠植被区, 地下水埋深较大(6.01 m)。

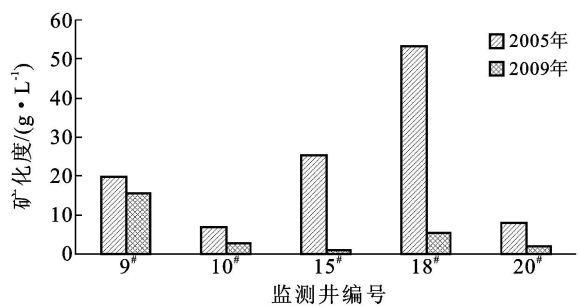


图 3 2005 年与 2009 年地下水矿化度比较

基于对减排林地下水水质的分析结果, 统计了减排林地下水理化性质特征(表 1)。从表 1 中可以看出, 地下水中的全盐,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  的变异系数属强变异性(变异系数小于 10% 属于弱变异性, 变异系数在 10%~100% 之间属于中等变异性, 变异系数大于 100% 属于强变异性<sup>[17]</sup>)。

地下水中  $\text{Mg}^{2+}$  (147.02%) 和  $\text{Cl}^-$  (145.11%) 的空间变异性最大, 表明地下水中的  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  的变化最明显。其次是  $\text{Na}^+$  (132.32%) 和全盐(128.27%), 再次是  $\text{Ca}^{2+}$  (110.62%) 和  $\text{SO}_4^{2-}$  (110.00%), 表明其

变化较为明显。减排林 T15<sup>#</sup> 处地下水中的  $Mg^{2+}$  ( $3.02 \text{ g/L}$ ),  $Cl^-$  ( $24.939 \text{ g/L}$ ) 以及全盐 ( $52.695 \text{ g/L}$ ) 含量均出现最大值, 可能原因是地下水埋深较大 ( $8.15 \text{ m}$ ), 矿化度 ( $54.464 \text{ g/L}$ ) 也较大, 且其  $Na^+$  含量为  $14.000 \text{ g/L}$ , 表明减排林地下水中阴

阳离子具有明显的耦合特征。

地下水中  $HCO_3^-$  ( $51.6\%$ ) 和  $K^+$  ( $66.67\%$ ) 属中等变异性, 其中  $K^+$  的最大值为  $0.028 \text{ g/L}$ , 均值为  $0.012 \text{ g/L}$ , 表明地下水中  $K^+$  含量缺乏。地下水的 pH 值属于弱变异性 ( $6.72\%$ ), 表明地下水的酸碱度变化不明显。

表 1 地下水理化性质特征

地下水特征参数	数值范围	平均值	标准差	变异系数/%
pH 值	6.060~8.090	7.440	0.500	6.72
全盐/( $g \cdot L^{-1}$ )	0.837~52.695	14.161	18.165	128.27
$K^+$ /( $g \cdot L^{-1}$ )	0.004~0.028	0.012	0.008	66.67
$Na^+$ /( $g \cdot L^{-1}$ )	0.169~14.250	3.898	5.158	132.32
$Ca^{2+}$ /( $g \cdot L^{-1}$ )	0.034~1.350	0.405	0.448	110.62
$Mg^{2+}$ /( $g \cdot L^{-1}$ )	0.012~3.020	0.570	0.838	147.02
$Cl^-$ /( $g \cdot L^{-1}$ )	0.268~24.939	6.096	8.846	145.11
$SO_4^{2-}$ /( $g \cdot L^{-1}$ )	0.044~9.431	2.901	3.191	110.00
$HCO_3^-$ /( $g \cdot L^{-1}$ )	0.043~0.551	0.281	0.145	51.60

## 2.2 合理生态水位分析

2.2.1 植被盖度与地下水水位的关系 植被盖度, 是指植物群落的总体或个体地上部分的垂直投影面积与样方面积之比的百分数<sup>[11]</sup>。植被盖度是衡量植被长势的一个重要指标, 一般来说, 植被盖度大, 表明植被生长处的地下水埋深适宜、植被长势好; 植被盖度小, 表明植被生长处的地下水埋深过大或过小, 植被长势差。

基于对克拉玛依地区减排林 14 个样地植被总盖度的调查, 建立减排林区植被总盖度与地下水埋深的关系(表 2)。从表中可以看出, 在减排林区内, 当地下水埋深在  $2.5 \sim 4.0 \text{ m}$  范围内时, 样方内植被的总盖度平均值达到最大值 ( $53.8\%$ ), 表明地下水埋深在此范围内, 植被的长势较好。当地下水埋深小于  $2.5 \text{ m}$  或大于  $4 \text{ m}$  时, 样方内植被的总盖度平均值均变小, 主要原因是地下水埋深过小, 植物的生长会受到盐胁迫; 地下水埋深过大, 植物的生长会受到水分胁迫, 二者都不利于植物的生长。平均盖度为  $53.8\%$  的 4 个样方对应的地下水埋深分别为  $2.67, 2.81, 2.93, 3.53 \text{ m}$ ; 平均盖度为  $47.5\%$  的 4 个样方对应的地下水埋深分别为  $4.06, 4.37, 4.64, 4.69 \text{ m}$ 。说明减排林在此地下水埋深范围内, 植被的长势较好。

2.2.2 植被生长状况与地下水埋深的关系 克拉玛依减排林, 降水稀少, 其植被的生长状况与地下水埋深密切相关。一般情况下, 地下水埋深过浅, 在蒸发作用下, 溶解在地下水中的盐分沿毛管上升水流在表土聚集, 使土壤发生盐渍化; 地下水埋深过大, 毛管上升水流不能到达植物根系层, 使土壤干旱, 发生荒漠化, 二者均不利于植物生长<sup>[12]</sup>。

表 2 地下水埋深与植被总盖度关系

地下水埋深/m	平均盖度/%	样方数量/个
< 2.5	42.5	4
2.5~4.0	53.8	4
4.0~6.0	47.5	4
> 6.0	40.0	2

2009 年 8 月, 对减排林区内不同水埋深的植被生长状况进行了系统的调查, 包括植被的胸径、盖度、冠幅等。把林区内植被的生长状况划分为 4 个等级。长势良好: 植被长势很好, 枝繁叶茂, 少数样方植被有轻微虫害; 长势较好: 植被生长状况较好, 大多数样方植被有轻微虫害; 长势一般: 植株稀疏, 虫害较严重; 长势差: 植株稀疏, 虫害严重, 叶子脱落严重。并总结了减排林区内 4 种主要代表性植物的生长状况与地下水埋深的关系(表 3)。

从表中可以看出, 当地下水埋深小于  $2.3 \text{ m}$  时, 4 种植物的长势均一般, 这与樊自立等人<sup>[12]</sup>的研究基本一致, 即当地下水埋深小于  $2 \text{ m}$  时, 地表蒸发强烈、土壤积盐量高, 不利于植物生长。当地下水埋深在  $2.3 \sim 4.0 \text{ m}$  范围内时, 4 种植物均长势偏好。当地下水埋深在  $4.0 \sim 6.0 \text{ m}$  范围内时, 4 种植物轻微虫害, 长势较好。当地下水埋深在  $6.0 \sim 8.0 \text{ m}$  范围内时, 地下水埋深较深, 地下水难以被植物根系很好的利用, 4 种植物长势一般。当地下水埋深在大于  $8.0 \text{ m}$  时, 地下水难以被植物根系吸收, 4 种植物均长势很差, 其植物植株稀少、虫害严重、且叶子脱落严重。

从表 2—3 对减排林地下水埋深与植物生长状况关系的分析结果可以看出, 克拉玛依减排林地下水合理生态水位为  $2.5 \sim 5.0 \text{ m}$ 。

表 3 主要植被生长状况与地下水埋深的关系

植物种类	地下水埋深/m	生长状况	植物名称	地下水埋深/m	生长状况
俄罗斯杨	< 2.3	长势一般	沙枣	< 2.3	长势一般
	2.3~ 4.0	长势良好		2.3~ 4.0	长势良好
	4.0~ 6.0	长势较好		4.0~ 6.0	长势较好
	6.0~ 8.0	长势一般		6.0~ 8.0	长势一般
	> 8.0	长势差, 虫害严重		> 8.0	长势差, 几乎无植株
怪柳	< 2.3	长势一般	芦苇	< 2.3	长势一般
	2.3~ 4.0	长势良好		2.3~ 4.0	长势良好
	4.0~ 6.0	长势较好		4.0~ 6.0	长势较好
	6.0~ 8.0	长势一般		6.0~ 8.0	长势一般
	> 8.0	长势差, 植株稀疏, 虫害严重		> 8.0	长势差, 植株稀疏, 受害严重

### 3 结论

(1) 减排林地下水埋深出现了规律性分布, 从 10<sup>#</sup> 样地到 S20<sup>#</sup> 样地, 地下水埋深变大。与 2005 年相比, 2009 年减排林区地下水的水位和矿化度呈减小趋势。

(2) 减排林地下水中的全盐, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的变异系数属强变异性, 空间变化最明显; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 K<sup>+</sup> 属中等变异性, 且地下水中 K<sup>+</sup> 含量缺乏; 地下水的 pH 值属于弱变异性。

(3) 通过建立减排林区主要植被的长势与地下水埋深关系可以得出, 克拉玛依减排林地下水合理生态水位为 2.5~ 5.0 m。

**致谢** 本研究的相关工作得到了张慧芝高级工程师、古丽尼莎高级工程师、徐德福副教授和李琪、郭靖、孔维财、吕妍、左成华等同志的帮助, 在此表示衷心的感谢。

#### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 秦秀梅, 何丽娟. 地下水动态变化规律分析[ J ]. 吉林水利, 2006( 1 ): 39-40.

[ 2 ] 张鸿义. 中国干旱区地下水资源及开发潜力分析[ J ]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 149-161.

[ 3 ] Maria V E, Carlos D D. Environmental effects of aquifer overexploitation: A case study in the Highlands of Mexico[ J ]. Environmental Management, 2002, 29( 2 ): 266-278.

[ 4 ] 李文智, 王勇. 浅析地下水动态变化特征及其应用[ J ]. 治淮, 2008( 5 ): 12-14.

[ 5 ] 杨建中. 地下水动态的影响因素分析[ J ]. 科技情报开发与经济, 2008, 18(9): 121-122.

[ 6 ] 陈素霞. 浅析临汾市地下水动态特征[ J ]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(22): 143-145.

[ 7 ] 刘猛, 王振龙, 章启兵. 安徽省淮北地区地下水动态变化浅析[ J ]. 治淮, 2008( 7 ): 8-9.

[ 8 ] Tyree. Use of positive pressures to establish vulnerability curve: further support for the air-seeding hypothesis and implications for pressure-volume analysis[ J ]. Plant Physiology, 1992, 100: 205-209.

[ 9 ] 周仰效, 李文鹏. 区域地下水位监测网优化设计方法[ J ]. 水文地质工程地质, 2007, 34( 1 ): 1-9.

[ 10 ] 王仕琴, 宋献方, 王勤学, 等. 华北平原浅层地下水水位动态变化[ J ]. 地理学报, 2008, 63(5): 462-472.

[ 11 ] 荣丽杉, 束龙仓, 王茂枚, 等. 合理地下水生态水位的估算方法研究: 以塔里木河下游为例[ J ]. 地下水, 2009, 31( 1 ): 12-15.

[ 12 ] 樊自立, 陈亚宁, 李和平, 等. 中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度的确定[ J ]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 1-5.

[ 13 ] 赵振勇, 王让会, 张慧芝, 等. 塔里木河下游荒漠生态系统退化机制分析[ J ]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 220-225.

[ 14 ] 郭占荣, 刘台台. 西北内陆盆地天然植被的地下水生态埋深[ J ]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 157-161.

[ 15 ] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[ J ]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34( 8 ): 67-74.

[ 16 ] 王化齐, 蔡焕杰, 张鑫. 石羊河下游民勤绿洲恢复地下水生态需水量研究[ J ]. 水土保持通报, 2006, 26( 1 ): 44-49.

[ 17 ] 姚晓蕊, 潘存德, 张荟荟, 等. 土地开发后克拉玛依农业开发区水土环境特征研究[ J ]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(1): 1-6.

[ 18 ] 南京农业大学. 土壤农化分析[ M ]. 北京: 农业出版社, 1998: 33-90.

[ 19 ] 刘建利, 李凯荣, 易亮, 等. 黄土高原丘陵区人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[ J ]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 49-52.

[ 20 ] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[ M ]. 北京: 科学出版社, 2006: 260-262.

[ 21 ] 王让会, 卢新民, 宋郁东, 等. 西部干旱区生态需水的规律及特点: 以塔里木河下游绿色走廊为例[ J ]. 应用生态学报, 2003, 14( 4 ): 520-524.