

# 和田绿洲地下水埋深的自然影响因素分析\*

刘 敏<sup>1,2</sup> 黄领梅<sup>1</sup> 沈 冰<sup>1</sup> 沈彦俊<sup>2\*\*</sup>

(1. 西安理工大学水资源研究所 西安 710048;  
2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050021)

**摘要** 采用灰色关联分析方法研究自然因素对和田绿洲地下水埋深的影响，并建立多元线性回归模型进行检验。结果表明，气温、蒸发是地下水埋深的两个最重要的影响因子，埋深随蒸发增加、气温升高而增大。出山口径流(主要为冰雪融水)对地下水埋深的影响仅次于气温和蒸发，埋深随径流增大而逐渐减小，约有1~2个月的滞时。风速、水温和湿度对地下水埋深的影响相对较小，降水与地下水埋深的关系不太明显。影响因子与埋深的多元线性回归模型的拟合精度较高，且通过了置信水平 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

**关键词** 和田绿洲 地下水埋深 影响因子 灰色关联分析 多元线性回归模型

中图分类号: S273.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)01-0174-04

## Physical influencing factors of groundwater depth in Hotan Oasis

LIU Min<sup>1,2</sup>, HUANG Ling-Mei<sup>1</sup>, SHEN Bing<sup>1</sup>, SHEN Yan-Jun<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract** The influences of natural factors on groundwater depth in Hotan Oasis were analyzed by grey relational analysis and multiple linear regression models set up to test the precision of the analysis. The results show that temperature and evaporation are the most important influencing factors of groundwater depth. Groundwater depth sinks deeper with increasing temperature and evaporation. Runoff recharges groundwater and is the second important factor. Groundwater depth gets shallower with increasing runoff and groundwater response lags by one to two months. The influence of wind speed, water temperature or humidity on groundwater depth is relatively low. There is no significant correlation between precipitation and groundwater depth. The groundwater depth regression models have high precision with confidence levels above  $\alpha = 0.01$ .

**Key words** Hotan Oasis, Groundwater depth, Influencing factor, Grey correlation analysis, Multiple linear regression

(Received Oct. 16, 2007; accepted April 20, 2008)

地下水埋深动态变化是地下水动态的重要内容之一，是一个复杂的水文变化过程，受一系列自然和人为因素的影响<sup>[1]</sup>。气候是影响地下水动态的最积极因素之一<sup>[2]</sup>。降水、蒸发、气温的周期性变化引起地下水相应的变化；河湖水位升降、海岸附近涨落潮也常引起地下水埋深的变化。人为因素对地下水动态的影响则表现在抽水、排水工程降低地下水位，农田灌溉、修建水库增高地下水位等方面。由于地下水位埋深动态变化的复杂性，近年来关于地下水位埋深动态变化的预测模型及影响因素的研

究日渐增多。屈吉鸿<sup>[3]</sup>等提出了混合分层遗传算法，可显著提高地下水位预报精度。冯绍元等<sup>[4]</sup>建立了甘肃省石羊河流域下游地下水位动态的人工神经网络模型，表明人类活动及地表来水是影响地下水位动态的主要因子。韩育林等<sup>[5]</sup>对黑河山前平原地下水位动态进行了分析，发现除受黑河出山径流量的影响外，还与降水量、地下水位埋深及距黑河河床的距离有关。

在新疆和田，沈冰<sup>[1]</sup>等采用灰色自记忆模型预测了地下水位埋深动态变化，但只是单序列的预测

\* 国家自然科学基金(50579063)资助

\*\* 通讯作者：沈彦俊(1971~)，男，汉，研究员，博士，主要从事生态水文过程、遥感水文学研究。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

刘敏(1982~)，女，汉，硕士，主要从事干旱区水文水资源研究。E-mail: agnes0505@163.com

收稿日期: 2007-10-16 接受日期: 2008-04-20

模型, 并未考虑地下水位埋深的影响因素, 沈冰、黄领梅<sup>[6-8]</sup>等研究了和田绿洲水循环要素的变化特征、蒸发能力的影响因素及地表径流变化, 然而, 将气候水文要素等作为地下水位埋深自然影响因素来考虑的研究尚未进行。地下水是和田绿洲的重要水资源, 地下水埋深的变化对绿洲的灌溉农业和生态系统都至关重要, 因此很有必要研究和田绿洲地下水位埋深变化的影响因素, 建立预测模型。本文运用灰色关联方法分析研究气候水文等自然影响因素对和田绿洲地下水埋深的影响, 并建立多元线性回归模型进行检验, 以期为地下水位埋深影响因素更进一步的研究做铺垫, 起到抛砖引玉的作用。

## 1 资料来源和研究方法

### 1.1 研究区概况和资料来源

新疆和田绿洲位于昆仑山北麓, 塔里木盆地南缘, 地势南高北低, 由南向北倾斜, 冲积扇上部至昆仑山坡降较大, 北部地势平缓, 为冲积平原沙漠。和田绿洲海拔 1 250~1 350 m, 地貌类型属风积沙漠区, 岩性结构由单一卵砾石层过渡为沙砾石层及粉细砂层, 含水层颗粒逐渐变细。绿洲主要分布在冲积平原的中、下部, 并延伸至塔里木盆地腹地。受地形影响, 地下水位南部较深、北部较浅<sup>[9]</sup>。绿洲内气候干旱, 降水稀少, 蒸发剧烈, 基本不产流, 依靠上游山区融雪和降水补给。

为使气候水文资料与地下水位埋深资料一致, 且避免分析时地下水位埋深受灌溉等人为因素的干扰, 选取与墨玉、和田、洛浦 3 县县城距离较近且距离出山口较近的地下水长期观测井(下称长观井)的水位埋深资料。墨玉县选择长观井 GW1 和 GW7, 分别位于喀拉喀什河出山口附近和墨玉县城内, 资料系列分别为 2001 年 1 月~2002 年 12 月和 2001 年 7 月~2002 年 12 月; 和田县选择距离县城很近的长观井 GW9, 资料系统为 2000 年 1 月~2002 年 12 月, 洛浦县选择长观井 GW5, 位于玉龙喀什河出山口附近, 资料序列为 2001 年 1 月~2002 年 12 月。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 灰色关联度分析的基本原理

灰色关联分析方法是通过关联度表征事物间的密切程度, 根据序列曲线几何形状的相似程度判断其联系是否紧密<sup>[10]</sup>。常用的关联度有面积关联度、相对速率关联度、斜率关联度等<sup>[11]</sup>。其中斜率关联度由于具有可处理数据中的负数或零值以及关联度分辨率较高的优点而经常被使用。关联系数可用式(1)来确定:

$$\xi_{ij}(k) = \frac{1}{m} \left( 1 + \left| \frac{\Delta x_i(k)}{\sigma_i} - \frac{\Delta x_j(k)}{\sigma_j} \right| \right) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m)$$

式中,  $n$  为变量个数,  $k$  为样本容量,  $\sigma$  为  $x$  的标准差,  $\bar{x}$  为  $x$  均值。

采用平均值作为信息集中的一种处理方法:

$$r_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_{ij}(k) \quad (2)$$

式中,  $r_{ij}$  表示第  $j$  个变量对第  $i$  个变量的关联度, 其余符号意义同上。

#### 1.2.2 多元线性回归模型

在多要素的地理系统中, 多个(多于两个)要素存在着相关影响、相互关联的情况。因此, 多元线性回归模型更带有普遍性的意义<sup>[12]</sup>。假设某因变量  $y$  受  $k$  个自变量  $x_1, x_2, \dots, x_k$  的影响, 则回归方程为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (3)$$

式中,  $b_0$  为常数,  $b_1, b_2, \dots, b_k$  成为偏回归系数, 可采用最小二乘法求解。

多元线性回归模型的显著性检验采用统计量  $F$ :

$$F = \frac{U/k}{Q/(n-k-1)} \quad (4)$$

式中,  $U = \sum_{\alpha=1}^n (\hat{y}_\alpha - \bar{y})^2$ ,  $k$  是回归平方和  $U$  的自由度,

$$Q = \sum_{\alpha=1}^n (\hat{y}_\alpha - y_\alpha)^2, (n-k-1) \text{ 是剩余平方和 } Q \text{ 的自由度。}$$

$F$  越大意味着模型的效果越佳。在显著水平  $\alpha$  下, 若  $F > F_{(k, (n-k-1))}$ , 则回归模型效果在此水平下显著。反之, 不显著。

## 2 结果和分析

### 2.1 影响因子与埋深的关联度计算

根据斜率关联度分析法, 分析各气象因子与长观井 GW1 埋深的关联程度, 经计算, 气温(1)、湿度(2)、降水(3)、蒸发(4)、风速(5)和出山口径流(冰雪融水, 6)对埋深的关联度依次为:  $r_{e1} = 0.6628$ ,  $r_{e2} = 0.5816$ ,  $r_{e3} = 0.6145$ ,  $r_{e4} = 0.6928$ ,  $r_{e5} = 0.6486$ ,  $r_{e6} = 0.6689$  ( $r_{ei}$  表示第  $i$  个影响因子对地下水埋深的关联度), 其关联序为:  $r_{e4} > r_{e6} > r_{e1} > r_{e5} > r_{e3} > r_{e2}$ , 即各因子对地下水埋深的影响由大到小依次为: 蒸发>出山口径流>气温>风速>降水>湿度。其他各长观井埋深影响因子与埋深的关联度计算结果见表 1, 关联度顺序见表 2。

由表 1 和表 2 可知, 气温、蒸发是两个最重要的影响地下水埋深的气候因子。埋深随气温升高、蒸发增加而增大; 出山口径流(冰雪融水)对埋深的影响仅次于气温和蒸发, 埋深随出山口径流增大而减小,

表 1 影响因子与地下水埋深的关联度计算  
Tab.1 Relational degrees of influencing factors to groundwater depth

长观井 Long-term monitoring well	关联度 Relational degree						
	气温 Air temperature	湿度 Humidity	蒸发 Evaporation	降水 Precipitation	风速 Wind speed	出山口径流 Mountain-pass runoff	水温 Water temperature
GW1	0.662 8	0.581 6	0.692 8	0.614 5	0.648 6	0.668 9	
GW7	0.739 3	0.623 6	0.727 5	0.536 1	0.619 5	0.693 5	0.618 1
GW9	0.637 1	0.604 4	0.654 0	0.618 8	0.660 8	0.663 3	
GW5	0.735 0	0.653 2	0.692 2	0.583 2	0.614 9	0.666 6	

约有 1~2 个月的滞时。风速、水温、湿度和降水对地下水埋深的影响相对较小, 但也是地下水埋深不可缺少的影响因子, 风速增大、水温升高和湿度减小都会引起埋深增大, 降水与地下水埋深的关系不太明显。

表 2 长观井地下水埋深影响因子灰色关联度顺序  
Tab.2 Grey relational orders of influencing factors of groundwater depth

长观井 Long-term monitoring well	各影响因子对埋深影响大小排序 Orders of influencing factors of groundwater depth	
	$x_1$	$x_2$
GW1	蒸发>出山口径流>气温>风速>降水>湿度	
GW7	气温>蒸发>出山口径流>湿度>风速>水温>降水	
GW9	出山口径流>风速>蒸发>气温>降水>湿度	
GW5	气温>出山口径流>蒸发>湿度>风速>降水	

## 2.2 影响因子对埋深的多元线性回归模型

按照灰色关联度分析计算的关联度, 将各长观井地下水埋深的影响因子按大小逐步引入多元线性

回归模型。计算结果表明, 对于各长观井, 当全部影响因子都加入回归模型时模型精度最高。以墨玉县长观井 GW1 为例, 建立多元线性回归模型并进行显著性检验。长观井 GW1 地下水埋深的回归方程为:

$$y=36.66-0.094 9x_1+0.015 7x_2-0.209 4x_3+0.039 6x_4+0.051 1x_5+0.013 9x_6 \quad (5)$$

式中,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$  分别为湿度、蒸发、气温、降水、风速和出山口径流。

采用 F 检验法对模型进行显著性检验, 经计算  $F=7.47>F_{0.01}(6,17)=4.10$ , 故在  $\alpha=0.01$  置信水平下, 回归方程显著。模型拟合精度及效果见表 3。从表 3 可知, 除 2001 年 11 月外, 其余各月相对误差均在 5% 以内, 拟合精度较高。经分析, 由于 6 月份后融雪增大河流水量较多, 引入灌区水量也较多, 各种途径补给地下水的水量增加, 9~11 月是和田绿洲地下水埋深最小的时期, 因而计算的相对误差略大。

其他长观井影响因子回归模型拟合效果分别见图 1。由图 1 可知, 各长观井的回归模型拟合效果很好。由表 4 可知, 各长观井埋深的多元线性回归模型的相对误差均小于 3%, 均方根误差均小于 0.2,

表 3 地下水埋深长观井 GW1 模型拟合精度表  
Tab.3 Model fitting precision of groundwater depth of long-term monitoring well GW1

序号 No.	时间(年-月) Time (year-month)	实测 Measured (m)	拟合 Simulated (m)	相对误差 Relative error (%)	序号 No.	时间(年-月) Time (year-month)	实测 Measured (m)	拟合 Simulated (m)	相对误差 Relative error (%)
1	2001-01	34.17	32.92	3.64	13	2002-01	31.92	32.12	0.63
2	2001-02	34.55	33.35	3.47	14	2002-02	32.15	31.34	2.51
3	2001-03	35.46	34.76	1.97	15	2002-03	32.48	33.63	3.53
4	2001-04	35.20	34.04	3.27	16	2002-04	33.13	34.05	2.78
5	2001-05	35.03	33.08	5.57	17	2002-05	33.34	33.45	0.33
6	2001-06	35.16	33.82	3.81	18	2002-06	33.13	33.15	0.05
7	2001-07	34.07	34.01	0.19	19	2002-07	32.82	32.15	2.07
8	2001-08	32.08	32.06	0.07	20	2002-08	31.74	32.11	1.17
9	2001-09	30.43	30.59	0.53	21	2002-09	30.45	30.49	0.12
10	2001-10	30.15	29.71	1.44	22	2002-10	30.59	30.38	0.67
11	2001-11	30.40	32.05	5.42	23	2002-11	31.11	30.03	3.48
12	2001-12	31.05	31.64	1.90	24	2002-12	31.83	31.29	1.71

表 4 长观井回归模型精度检验  
Tab.4 Model precision test of long-term monitoring wells

长观井 Long-term monitoring well	GW1	GW7	GW9	GW5
平均埋深 Average groundwater depth (m)	32.60	10.61	6.86	22.19
相对误差 MRE (%)	2.10	0.78	2.19	0.54
均方根误差 RMSE	0.88	0.10	0.19	0.15
$F$	7.47	12.82	8.97	11.12
$F_{0.01}$	4.10	5.20	3.36	4.10

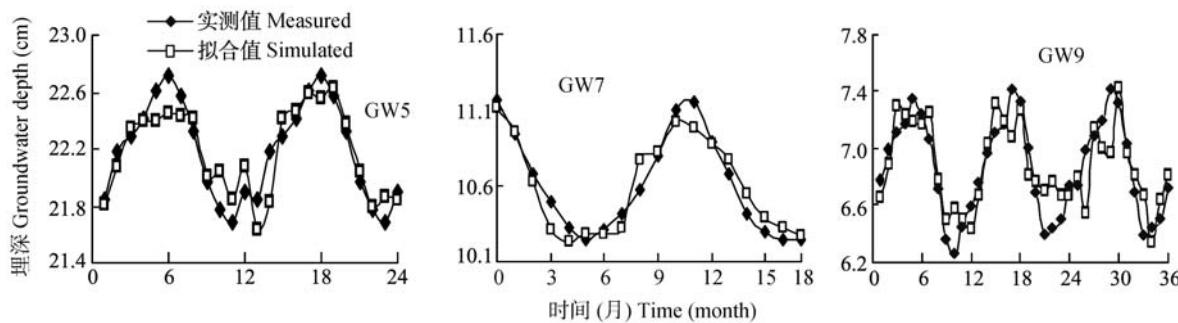


图 1 长观井 GW5、GW7、GW9 模型拟合图  
Fig. 1 Model fitting graphs of long-term monitoring wells GW5, GW7, GW9

模型拟合精度很高,且均通过  $\alpha = 0.01$  置信水平的显著性检验。

### 3 结语

本研究结果表明,在气候干旱、蒸发剧烈、降水稀少,地下水主要由冰雪融水补给的和田绿洲,气候水文要素是影响地下水埋深的重要方面,其中气温、蒸发是地下水埋深的最重要的两个影响因子,埋深随蒸发增加、气温升高而增大。出山口径流对地下水埋深的影响仅次于气温和蒸发,埋深随径流增大而减小,约有 1~2 个月的滞时。风速、水温、湿度和降水对地下水埋深的影响相对较小,但也是地下水埋深不可缺少的影响因子,风速增大、水温升高和湿度减小均会引起埋深增大,降水与地下水埋深的关系不明显。本文建立了影响因子与地下水埋深的多元线性回归模型,经检验,模型拟合精度较高,且通过了置信水平  $\alpha = 0.01$  的显著性检验。

干旱区绿洲的地下水埋深对维持绿洲生态系统的稳定和社会经济的繁荣有重要意义。和田绿洲地下水主要由冰雪融水补给,夏季河流径流增大时地下水埋深逐渐减小;而另一方面,夏季也是农业和自然植被耗水的高峰季节,蒸散发又使地下水埋深增大。因此和田绿洲地下水埋深的变化是自然和人类活动共同作用的结果。由于抽水、排水、农业灌溉和植被蒸散发等人为因素方面的资料不全,本文未将人类活动对地下水埋深的影响及其过程考虑在内,因而和田绿洲地下水埋深影响因子有待更进一

步的探索。

### 参考文献

- [1] 沈冰, 刘敏, 黄领梅.灰色自记忆模型及其在新疆和田地下水埋深预测中的应用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(11): 223~226
- [2] 吴光和, 田连恕, 胡双熙, 等.自然地理学[M].北京:高等教育出版社, 2000: 174
- [3] 屈吉鸿, 黄强, 陈南祥, 等. Groundwater level prediction based on hybrid hierarchy genetic algorithm and RBF neural network [J]. 煤炭学报: 英文版, 2007, 13(2): 170~174
- [4] 冯绍元, 霍再林, 康绍忠, 等. 干旱内陆区自然-人工条件下地下水位动态的 ANN 模型[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 873~878, 885
- [5] 韩育林, 程旭学, 温秋生, 等. 黑河山前平原地下水位动态分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(7): 38~39
- [6] 沈冰, 黄领梅, 阮本清, 等. 和田绿洲水循环要素变化特征[J]. 水利学报, 2003 (5): 78~83
- [7] 黄领梅, 沈冰, 尹如洪.和田绿洲蒸发能力及影响因素分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 181~185
- [8] 黄领梅, 沈冰, 宋孝玉, 等. 和田河流域地表径流变化分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35 (5/6): 513~515
- [9] 刘敏. 和田绿洲地下水时空分布规律及其生态环境效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007
- [10] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及应用(第 3 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 32~56
- [11] 尹子民, 罗丽玲. 灰色模型 GM(1,n)的变量选择及拟合度分析[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 11(11): 81~84
- [12] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004