

罗光明, 施枫芝, 赵成义, 等. 1979~2010 年和墨洛绿洲区地下水时空演变与归因[J]. 第四纪研究, 2018, 38(2): 512-520.

Luo Guangming, Shi Fengzhi, Zhao Chengyi, et al. The spatio-temporal evolution of the groundwater system in relation to climate change and human activities in He-Mo-Luo oasis from 1979 to 2010[J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(2): 512-520.

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2018.02.21

文章编号: 1001-7410(2018)02-512-09

1979~2010 年和墨洛绿洲区地下水时空演变与归因*

罗光明¹, 施枫芝², 赵成义², 李新虎²

(1. 新疆和田水文勘测局, 新疆 和田 848000; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 地下水系统的演变机制对干旱区地下水资源的可持续管理至关重要。基于地下水观测数据、水文地质资料、气象资料和灌溉用水的统计数据, 运用 Mann-Kendall 趋势检验、地质统计学和地下水储量计算法, 研究了和田河流域 1979~2010 年地下水埋深和储量的时空变化, 并应用灰色关联法分析了地下水时空演变的影响因素。结果表明: 1979~2010 年和墨洛绿洲地下水埋深呈增大趋势, 枯水季增大趋势略大于丰水季。30 年间地下水储量减小的平均速率为 $2567 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 尤其是 2004 年以后地下水储量锐减, 2004~2010 年地下水储量的平均减小速率是 1979~2004 年的 8.16 倍。从空间分布上, 地下水埋深增加有从冲洪积扇缘向扇顶递减的趋势。地下水埋深增大、地下水储量递减主要是由于灌溉面积增加导致地下水开采增加引起的, 人类活动对地下水均衡变化的作用大于自然要素的影响。可持续的绿洲农业水资源管理, 是维持绿洲地下水安全的关键。

关键词: 地下水埋深; 地下水储量; 地下水利用; 气候变化; 统计分析; 和墨洛绿洲

中图分类号: P641.8, X143

文献标识码: A

0 引言

干旱半干旱地区随着人口的增长、灌溉农业和经济的发展, 由地下水的过度开发引发的地下水位下降、水质恶化、含水层枯竭等问题日益突出。Wada 等^[1]的研究表明, 全球干旱半干旱地区地下水位下降的面积 2000 年比 1960 年增加了 50% 以上。研究地下水位的时空变化和影响因素对实现地下水资源的可持续管理具有重要意义^[2]。目前各种分析技术已被用于地下水系统演变的评估之中。例如, 交叉理论方法^[3]、大气环流模型^[4-6]、地下水模型^[7]、水均衡法^[8]、地质统计法^[9-11]、数理统计法^[12]以及利用重力卫星数据解释地下水储量的变化^[13-14]。对于地下水数据不满足建模的数据要求时, 空间分析与数理统计方法的结合是诠释地下水时空变化、解释复杂的地下水资料和确定因素综合影响的一种有效可靠的方法。

在干旱内陆河流域, 水是维系绿洲稳定发展的纽带^[15-17]。来自山区的地表水流经冲洪积扇地带

时, 大量渗漏补给地下水, 在绿洲区经农业灌溉田间渗漏转化为地下水, 地下水自上游向下游多次转化^[18]。在干旱地区, 浅层地下水控制非饱和带的含水条件, 影响陆面蒸散和植被生态过程, 维持着依赖于地下水的干旱区生态系统的稳定^[19-20]。和田河流域属极端干旱区, 年均降水量小于 50 mm, 随着经济的发展, 以农牧业为主的高耗水传统产业加大了地下水资源的需求量, 直接影响地下水系统的演变和绿洲的稳定^[21]。研究地下水埋深的时空变化与成因, 是保证地下水的采补平衡和地下水资源的健康循环的基础^[22]。本文阐明了和墨洛绿洲区地下水时空变化的分异特征, 利用空间分析与灰色关联分析法揭示了气候变化和人类活动对和田河流域地下水位动态变化的影响, 定量评估各因子的影响及重要程度, 为内陆河流域的水资源利用、生态环境保护和社会经济可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于昆仑山北麓, 塔克拉玛干沙漠南缘

2017-09-27 收稿, 2017-12-08 收修改稿

* 中国科学院西部博士项目(批准号:XBBS-2014-15)和国家自然科学基金项目(批准号:41371011、U1403281 和 41671030)共同资助

第一作者简介: 罗光明, 男, 52 岁, 高级工程师, 水文水资源专业, E-mail: htlgm461@163.com

通讯作者: 施枫芝, E-mail: shifz@ms.xjb.ac.cn

的和田河流域绿洲。地处 $36^{\circ}50' \sim 37^{\circ}40'N$, $79^{\circ}20' \sim 80^{\circ}40'E$ 之间, 研究区面积为 4668 km^2 。和墨洛绿洲是昆仑山北坡最大的绿洲, 包括墨玉、和田、洛浦三县与和田市(图 1a)。气候干燥, 属于暖温带大陆性干燥荒漠气候, 光热资源丰富。多年平均气温 $12.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量 38.4 mm , 多年平均蒸发量 2646 mm 。水资源贫乏, 和墨洛绿洲的生存和发展主要依赖流经的和田河地表径流, 和田河由东西两支流组成(图 1b): 东支玉龙喀什河(简称玉河)长 504 km , 1960~2010 年多年平均径流量为 $22.71 \times 10^8 \text{ m}^3$; 西支喀拉喀什河(简称喀河)长 808 km , 1957~2010 年多年平均径流量为 $21.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。两支流于阔什拉什汇合后汇入和田河长 319 km 。2010 年和田地区供水以地表水引水工程为主, 占总供水量的 91.74% , 地下水开采占 8.26% [23]。

喀拉喀什河与玉龙喀什河水系源于昆仑山, 汇流于塔里木盆地, 自南至北横跨昆仑山褶皱带和塔里木地台两大构造单元。研究区主要处于其中的和田坳陷次级构造单元内 [24]。含水层主要由砾质平

原冲洪积含水层和冲洪积细土平原沉积层组成(图 2)。砾质平原冲洪积含水层主要由全新统冲积层(Q_4^{al})和上更新统冲洪积层(Q_3^{al+pl})的砂砾石、卵砾石夹薄层中细砂为主, 地下水类型为单一结构的孔隙潜水, 地下水径流大体由南向北流动, 透水性好, 水力坡度大, 地下水径流强烈。砾质平原区上部地下水埋藏较深, 潜水位埋深大于 20 m , 向下部潜水埋深逐渐变浅。随着地形坡度变缓, 冲洪积细土平原地层沉积颗粒变细, 含水层主要由上更新统的冲洪积层(Q_3^{al+pl})和全新统风积层(Q_4^{eol})组成, 岩性较细一般为中粗砂、细砂, 地下水水力坡度逐渐变小, 地下水水位埋深变浅。地下水的补给主要以河道、渠系渗漏补给和灌溉水入渗补给为主, 地下水排泄以植物蒸腾、潜水蒸发、泉水排泄及地下水开采为主。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究区 3 眼地下水长期观测井(G1、G2 和 G3)

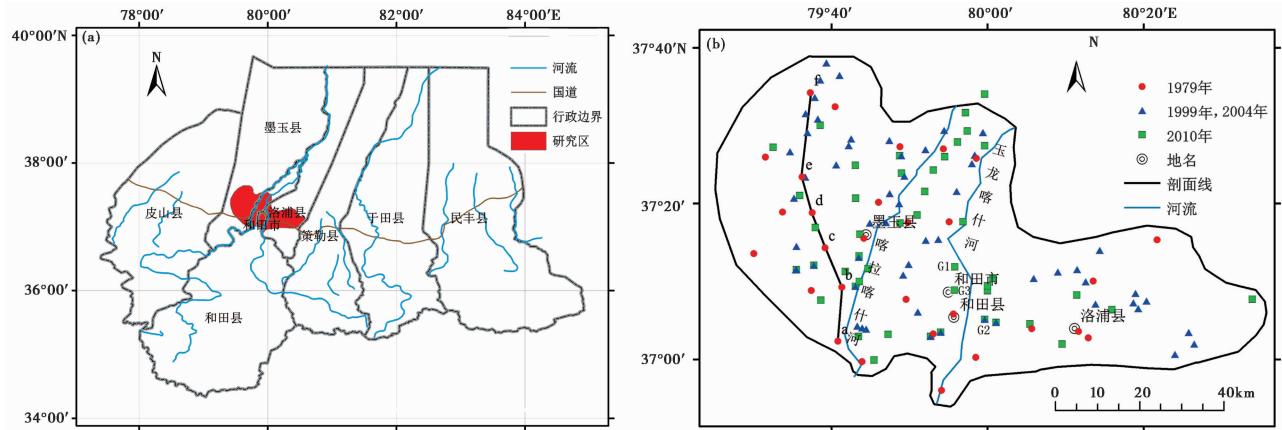


图 1 研究区位置图 (a) 与地下水观测井的分布图 (b)

标记字母 a~f 的红点为图 2 中地质钻孔位置

Fig. 1 Location of He-Mo-Luo oasis (a) and observation wells in the study area (b).

The red circles named a~f are the geological drillings in Fig.2

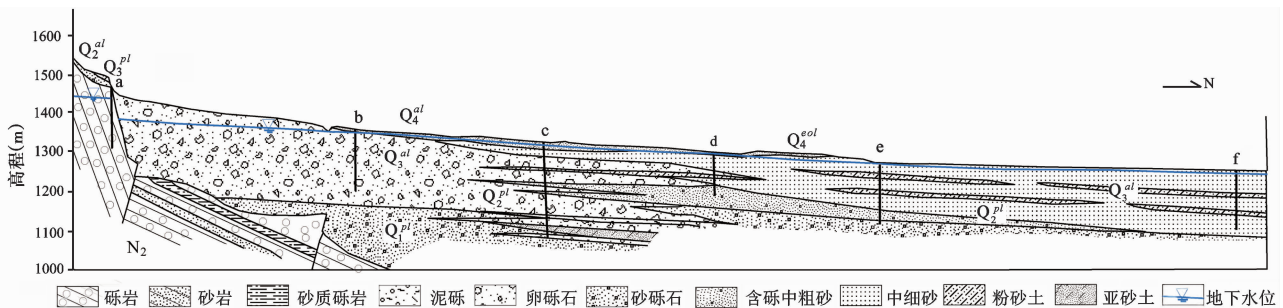


图 2 和田河流域冲洪积平原水文地质剖面图 [22]

Fig. 2 Hydrogeological profile of the alluvial plain of Hotan basin

月数据(1989~2015年)来自于新疆和田水文勘测局,1979年区域地下水埋深数据来自1981年《和田地区区域水文地质普查报告(1:200000)》^[24],1999年与2004年区域地下水埋深数据来自世界银行贷款项目子课题“和田子项目区水盐平衡与地下水模拟”^[21,25],2010年区域地下水埋深数据来自2013年《新疆和田地区地下水资源评价报告》^[26];表1为4期地下水埋深数据的统计特征,可以看出1979年地下水埋深空间分布呈强变异性,其他年份均呈中等变异。土地利用数据来自于中国科学院资源环境遥感调查项目的1980年、1990年、2000年和2010年的4期土地利用数据;气象数据来源国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>);灌溉引水数据、灌溉定额、渠系利用系数等数据来自和田地区水利局。

表1 地下水埋深数据来源与统计特征表

Table 1 Data sources and summary statistics of groundwater depth

年份	数据个数	所在地层	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	资料来源
1979	29	Q_4^{al}, Q_3^{al+pl}	18.95	0.28	4.09	4.19	1.02	文献[24]
1999	58	Q_4^{al}, Q_3^{al+pl}	18.50	0.80	4.13	3.52	0.85	文献[21,25]
2004	58	Q_4^{al}, Q_3^{al+pl}	19.70	1.40	4.22	3.51	0.83	文献[21,25]
2010	43	Q_4^{al}, Q_3^{al+pl}	26.30	2.24	6.51	5.58	0.86	文献[26]

2.2 研究方法

2.2.1 地下水埋深的时空动态变化

了解气候变化和人类活动影响下的地下水时空动态变化,是实现地下水可持续管理的关键^[5]。采用广泛应用于水文气象数据趋势检测的非参数法Mann-Kendall^[27]和线性回归法^[22],分别检测地下水埋深的月、季和年动态变化趋势,统计地下水埋深变化趋势在显著性水平 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 时的统计学意义。利用箱线图分析地下水埋深月变化的变异程度。

地下水埋深空间变化更直观的反映地下水系统的演化特征^[8]。利用1979年、1999年、2004年和2010年4期地下水埋深数据,应用ArcGIS软件的地统计模块中反距离权重插值法,获取研究区地下水埋深的4期空间分布图,并对其进行不同范围埋深($< 1\text{ m}$; $1\sim 3\text{ m}$; $3\sim 6\text{ m}$; $6\sim 10\text{ m}$; $10\sim 15\text{ m}$; $15\sim 20\text{ m}$; $> 20\text{ m}$)重新分类。生成各专题的直方图,计算不同埋深范围的区域面积,并分析其交叉变化。

2.2.2 地下水储量变化

地下水储量变化,应用下式计算^[28]:

$$\Delta Q_{\text{储}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot F_i \cdot \frac{\Delta \bar{h}_i}{\Delta t} \quad (1)$$

公式(1)中: $\Delta Q_{\text{储}}$ 为含水层系统地下水体积的变化量(m^3/a), μ_i 为各分区给水度, $i=1, \dots, n$; F_i 为各分区含水层分布面积(m^2); $\Delta \bar{h}_i$ 为计算期分区平均水位变化值(m); Δt 为时间(a)。给水度的取值为砂土0.1、亚砂土0.08以及壤土0.05^[29]。

2.2.3 地下水演变的影响要素分析

地下水时空动态演变主要受自然因素和人类活动的综合影响,自然因素一般包括气温、降水量、蒸发量、地表径流量等,人为因素主要为地下水开采,以及由灌溉活动产生的渠系渗漏、灌区入渗补给等引起的地下水位变化^[25]。采用灰色关联法^[30-32],定量分析各影响因素与地下水储量变化间的相关程度。灰色关联分析是用灰色关联度顺序来描述因素间关系的强弱和大小,通过数学的方法确定因素间的几何关系。设目标序列为 $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$ 和 m 个比较序列 $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$ ($i=1, 2, \dots, m$),对数据进行无量纲化处理后,计算目标序列 $X_0(k)$ 与比较序列 $X_i(k)$ 的点关联系数 $r(X_0(k), X_i(k))$ 为^[30]:

$$\gamma(X_0(k), X_i(k)) = \frac{\min_{i,k} |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_{i,k} |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_{i,k} |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (2)$$

公式(2)中: ρ 为分辨系数,取值范围为 $(0, 1)$,本研究取 $\rho = 0.5$; $k=1, 2, \dots, n$; $i=1, 2, \dots, m$ 。目标序列 $X_0(k)$ 与比较序列 $X_i(k)$ 的灰色关联度 $\gamma(X_0, X_i)$ 为:

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(X_0(k), X_i(k)) \quad (3)$$

灰色关联分析是综合考虑各影响因素的共同作用,可有效的进行横向对比,可以显示出各个因子对自变量的影响程度大小^[31]。

3 地下水系统的时空演变规律

3.1 近30年地下水埋深的动态变化

地下水潜水动态特征反映了含水系统的补排条件与开采程度^[28],本文分析了和田市周边的长观井1989~2015年地下水埋深的动态变化。结果表明,和田市周边地下水埋深有逐年增大的趋势。和田市北部细土平原区上部托甫卡村的观测井G1地下水埋深由1989年的5.92 m增加到2015年的9.77 m,水位下降值为3.65 m,下降幅度为0.089 m/a;洛

浦县玉龙喀什镇技校的观测井 G2 的 20 年内地下水水位下降值为 0.19 m, 下降幅度为 0.02 m/a, 地下水埋深变化不大; 和田市原自来水公司的观测井 G3 的地下水埋深由 1989 年的 6.09 m 增加到 2015 年的 8.16 m, 地下水水位下降 2.07 m, 下降幅度为 0.074 m/a。MK 趋势分析法^[27]的结果表明(表 2), 观测井 G1 的月、季、年地下水埋深均呈显著性增加 ($p < 0.05$); 观测井 G2 在 2~6 月和年均埋深呈不显著下降趋势, 而在 7~12 月、1 月及枯水季和丰水季呈不显著上升趋势; G3 除 3 月外, 其他月、季、年埋深呈增加趋势; 但仅有 9~12 月通过的置信水平 95% 的显著性检验。图 3 为 3 眼观测井的 1989~2015 年月序列变化和地下水月埋深的最大最小值、中位值及四分位值。从箱线图可以看出, 地下水埋深最大一般在 6 月和 7 月, G1 在 9 月变异程度最大, 1 月变异程度最小; G2 在 5 月变异程度最大, 1 月变异程度最小; G3 与 G1 相反, 1 月变异程度最大, 9 月变异程度最小。

表 2 1989~2015 年和田地区地下水埋深的变化趋势与显著性

Table 2 Significance of annual, seasonal and monthly trends in groundwater depth for observation wells(G1, G2 and G3) during 1989~2015

时间	G1(时间长度 1989~2015 年) (37.13°N, 79.93°E)			G2(时间长度 1989~2008 年) (37.11°N, 79.97°E)			G3(时间长度 1989~2014 年) (37.12°N, 79.91°E)		
	MK			MK			MK		
	Z	β	p	Z	β	p	Z	β	p
1	2.72**	0.06	0.00**	0.19	0.02	0.03*	0.25	0.07	0.00**
2	2.39*	0.05	0.00**	-0.15	0.02	0.15	0.11	0.07	0.00**
3	2.66**	0.05	0.00**	-0.62	0.02	0.12	-0.40	0.06	0.00**
4	2.63**	0.07	0.00**	-0.52	0.02	0.13	0.14	0.06	0.00**
5	3.18**	0.08	0.00**	-0.11	0.02	0.07*	0.61	0.06	0.00**
6	2.94**	0.09	0.00**	-0.11	0.02	0.04*	1.37	0.06	0.00**
7	2.53*	0.10	0.00**	0.49	0.02	0.02*	1.64	0.06	0.00**
8	2.42*	0.11	0.00**	0.21	0.02	0.01**	1.94	0.06	0.00**
9	2.87**	0.11	0.00**	0.75	0.02	0.01**	2.04*	0.07	0.00**
10	2.78**	0.10	0.00**	1.19	0.02	0.05**	2.60**	0.07	0.00**
11	2.71**	0.09	0.00**	0.70	0.02	0.07*	2.51*	0.08	0.00**
12	2.60**	0.09	0.00**	0.61	0.02	0.06*	2.19*	0.08	0.00**
4~9 月	2.93**	0.09	0.00**	0.14	0.02	0.02**	1.65	0.06	0.00**
10~3 月	3.06**	0.08	0.00**	0.23	0.02	0.04**	1.14	0.07	0.00**
年平均	3.11**	0.09	0.00**	-0.04	0.02	0.02**	1.39	0.05	0.14

MK 为 Mann-Kendall 趋势检验法的缩写, Z 为标准化统计变量值; LM 是线性回归法的缩写, β 为回归系数, p 是 F 检验的显著性水平 * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$

3.2 近 30 年地下水埋深的区域变化特征

1979 年、1999 年、2004 年和 2010 年 4 期地下水埋深空间变异如图 4 所示。1979 年地下水的埋

深分布, 基本反映了天然情况下冲洪积扇含水层地下水的分布规律, 受地形条件、含水层赋存条件及地下水补给条件的控制, 山前地下水埋深大于 10 m, 砾质平原区上部地下水埋深 6~10 m, 中部 3~6 m, 细土平原区与河道附近地下水埋深多为 1~3 m, 其面积超过了研究区总面积的 60%; 局部区域小于 1 m。随着农业经济的发展, 灌溉面积的增加, 地下水埋深呈逐年增大的趋势。1999 年地下水埋深比 1979 年 1~3 m 埋深范围面积减小了 15.41%, 而 3~6 m 和 6~10 m 范围埋深面积增加了 39.73% 和 48.03%。与 1999 年相比, 2004 年地下水 1~3 m 埋深范围面积减小了 17.24%, 而 3~6 m 和 10~15 m 范围埋深面积分别增加了 40.85% 和 33.46%, 6~10 m 范围埋深面积变化不大, 仅增加了 3.93%。2010 年地下水埋深较前期下降幅度较大, 埋深为 1~3 m 的区域基本上下降为 3~6 m, 而原 3~6 m 区域下降到 6~10 m, 埋深大于 10 m 的面积也有大幅度增加(表 3)。

3.3 地下水储量的变化

地下水储量的变化反映了长期地下水位变化和地下水均衡^[28]。我们根据地下水位的时空变化, 计算了和墨洛绿洲区 30 年间地下水储水量的变化。30 年间地下水储量呈减小趋势, 平均下降速率为 $2567 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。1990 年比 1979 年地下水储量减少了 $0.887 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2000 年比 1990 年减少了 $0.994 \times 10^8 \text{ m}^3$, 20 世纪 80~90 年代地下水储量下降速率缓慢而稳定, 平均下降速率为 $940.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 而 2000~2010 年地下水储量的下降速率为 $0.5821 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 后 10 年的下降速率是前 20 年的 6.19 倍。尤其是 2004 年以后地下水储量锐减, 2004~2010 年地下水位下降速率是 1979~2004 年的 8.16 倍。

4 地下水系统演变的成因分析

4.1 地下水埋深的主要影响因素

4.1.1 自然因素的变化

研究区地下水系统的主要补给来源于出山口径流的渗漏与转化, 主要排泄为蒸发。而气候变化直接影响着出山口径流和蒸发作用^[4]。气温、降水、蒸发、出山口径流等因素构成地下水时空演化的自然影响因素^[25]。气温变化虽与地下水变化无直接关系, 但气温变化影响潜水蒸发强度, 进而影响地下水位变化。气象因子年际变化(来源国家气象科

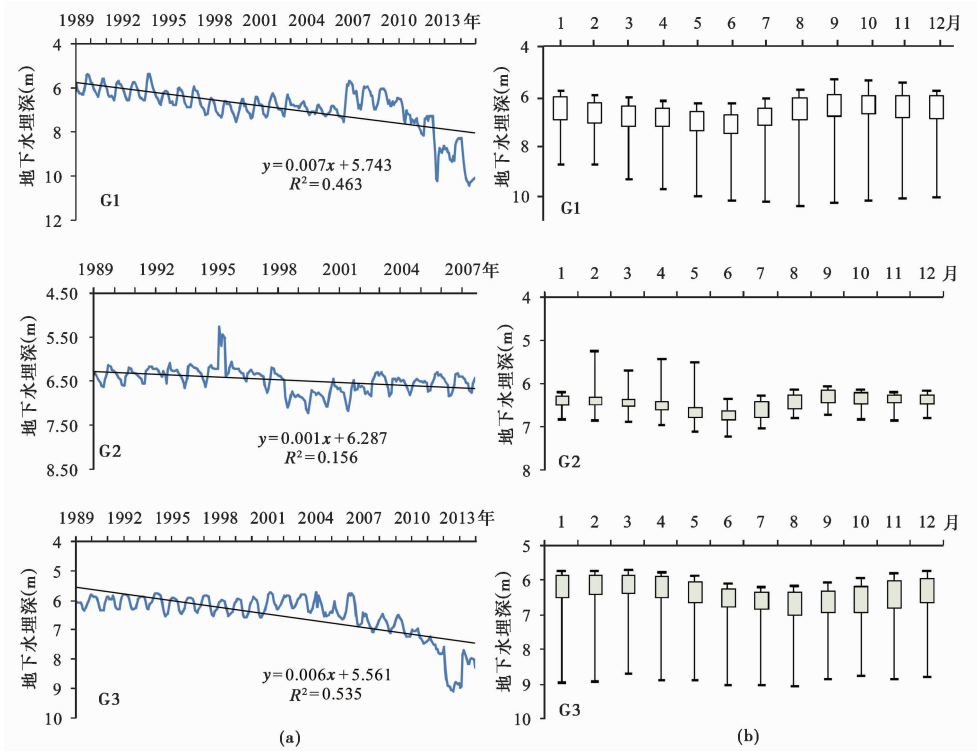


图3 1989~2015年和田观测井月地下水埋深曲线图(a)和箱线图(b)

图3a中的直线为地下水埋深的线性趋势线

Fig. 3 Monthly groundwater depths (a) along with box-plots of their monthly variation (b).

The straight line on the hydrographs indicate linear trends in groundwater depths

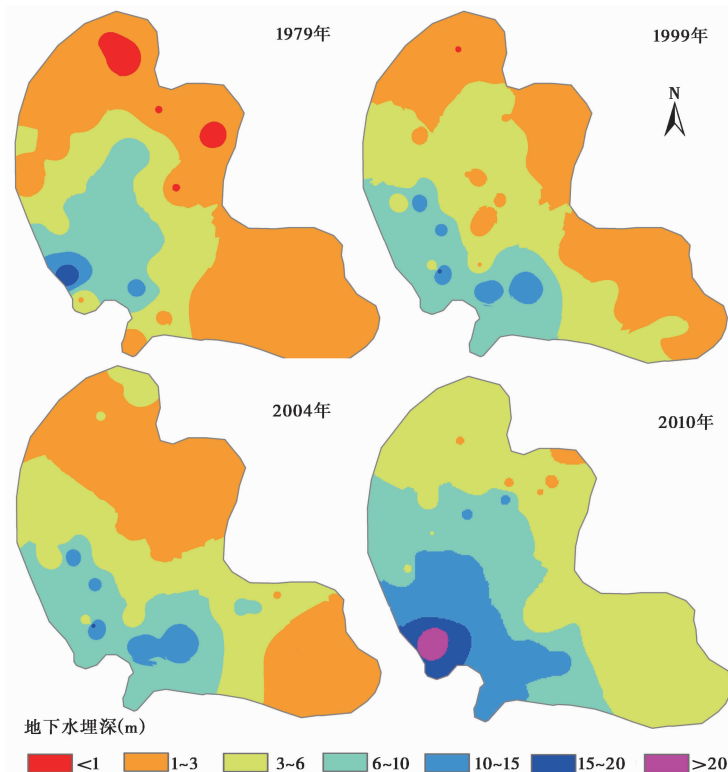


图4 研究区1979~2010年地下水埋深空间变化图

Fig. 4 Spatial variation of groundwater depth from 1979 to 2010

表 3 不同地下水埋深范围的面积 (1979~2010 年)

Table 3 Area under different depth zones (1979~2010)

地下水埋深 (m)	1979		1999		2004		2010	
	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)	面积 (km ²)	百分比 (%)
<1	71	1.5	1	0.0	0	0.0	0	0.0
1~3	3187	68.3	2696	57.7	2231	47.8	137	2.9
3~6	712	15.3	995	21.3	1401	30.0	2883	61.8
6~10	611	13.1	905	19.4	940	20.1	746	16.0
10~15	73	1.6	71	1.5	95	2.0	584	12.5
15~20	14	0.3	0	0.0	0	0.0	289	6.2
>20	0	0.0	0	0.0	0	0.0	29	0.6

学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/>) 可以看出, 研究区气温自 1979 年以来呈逐年上升的趋势, 20 cm² 的蒸发皿蒸发量呈先下降后上升的趋势。降水量的年际变化呈丰枯转换的规律性变化, 总体仍呈上升趋势。玉河与喀河的总径流量呈增加趋势(图 5 所示)。

4.1.2 人为因素的影响

人类活动对地下水系统演变的影响主要体现在地下水开采和农业引水灌溉造成的地下水的变化^[32]。1979~2010 年 30 年间和田流域总灌溉面积共增长 1261.93 km², 年均增长 40.70 km²(图 6); 灌溉引水量增加了 19.21%。农业灌溉工程也有了较大的

改善, 渠系利用系数从 20 世纪 80 年代的 0.3 提高到 2000 年代的 0.51; 灌溉定额从 1264 m³/亩减小到 910 m³/亩。随着灌溉过程引起地表水的再分配, 进一步影响了地下水的补给和排泄。随着灌溉面积的增加, 在地表水不足时, 通过开采地下水解决灌区的季节性缺水。地下水开采量从 0.29×10^8 m³ 增加到 2.1×10^8 m³, 增长了 7.2 倍。

4.2 影响因素的影响程度分析

应用灰色关联法^[30-32], 分析 1979~2010 年地下水储量变化与 4 个气象水文因子如气温、降水、蒸发和年均径流量, 3 个人类活动影响因子如灌溉面积、地下水开采量和灌溉渗漏补给的关联程度, 经计算, 各因子对地下水储量变化的影响由大到小依次为: 地下水开采量>灌溉面积>降水>蒸发>平均径流量>气温>灌溉渗漏补给(表 4)。

研究区降水相对贫乏, 大部分降水在未补给地下水之前已通过蒸发而消耗, 喀河和玉河水源是研究区地下水补给的重要部分, 并沿程与地下水进行反复转化; 但由于研究区绿洲垦殖农业的大发展, 一方面导致地下水位下降迅速, 另一方面由于渠系引水、灌区回渗改变了地下水的天然补给过程。研

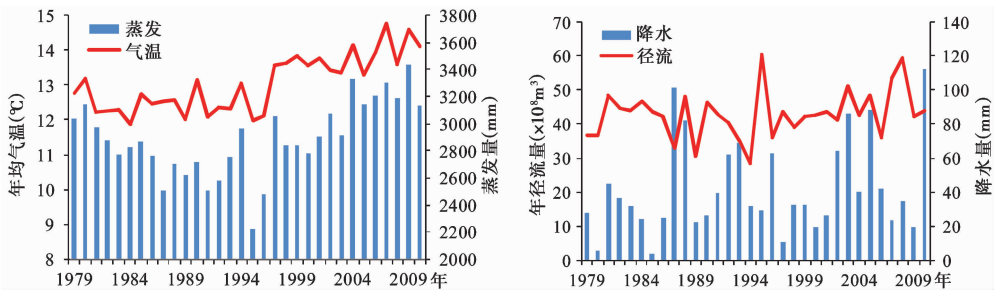


图 5 气象水文因子年际变化图

Fig. 5 Annual mean time series of hydrological and meteorological variables

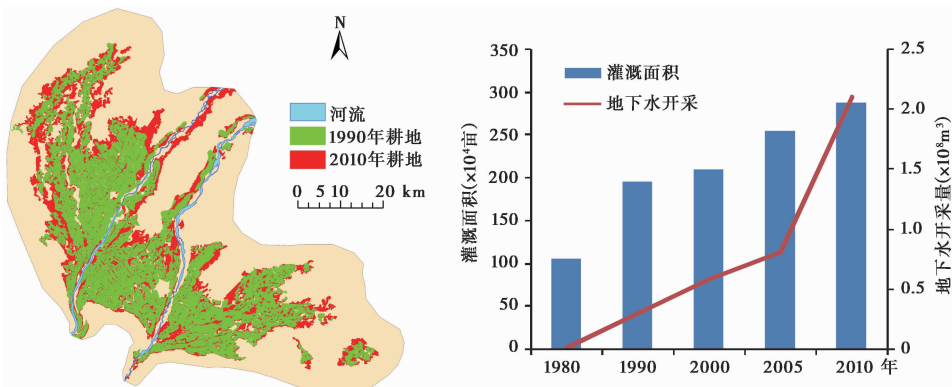


图 6 灌溉面积与地下水开采量变化

Fig. 6 The changes of abstraction and increase in irrigation area

表4 地下水储量与气象水文因子、
人类活动影响因子的关联度

Table 4 The correlation degree between groundwater
storage and human active factors

影响 因素	气温	降水	蒸发	年均 径流	灌溉 面积	灌溉渗 漏补给	地下水 开采量
关联度(R)	0.571	0.614	0.583	0.578	0.624	0.474	0.824

究结果表明,研究区人类活动对地下水均衡变化的影响是大于自然要素的影响。

5 结论

本文应用非参数法 Mann-Kendall 趋势检验法和线性回归法,分析了1989~2015年和墨洛绿洲区月、季和年尺度地下水埋深的变化趋势,应用地质统计法研究了1979年、1999年、2004年和2010年地下水埋深的空间分布特征,并估算了1979~2010年地下水储量的变化。结果表明,研究区地下水埋深呈总体增大的趋势,枯水季增大趋势略大于丰水季节。不同观测井月埋深的差异性较大。从空间分布上,1979~2010年地下水埋深增大的区域有从冲洪积扇缘地下水排泄区向扇顶地下水补给区逐渐变化的趋势,2004年之前地下水埋深增大的区域主要分布在细土平原区,而2004年以后砾质平原区和细土平原区地下水埋深均有不同程度的增加。1979年和墨洛绿洲区60%以上的区域地下水埋深在1~3m,而到2010年普遍增大到3~6m。地下水储量减小的平均速率为 $2567 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,2004年以后地下水储量锐减,2004~2010年地下水储量的减小速率是1979~2004年的8.16倍。应用灰色关联法分析气候水文条件和人类活动因素对地下水储量变化的影响,各因素的影响程度由大到小依次为:地下水开采量>灌溉面积>降水>蒸发>平均径流量>气温>灌溉渗漏补给。地下水埋深增大、地下水储量递减主要是由地下水开采和灌溉面积增加引起的,人类活动对地下水均衡变化的作用大于自然要素的影响。

由于绿洲垦殖农业的大发展,改变了地下水的天然补给机制和补给量,大规模拦蓄引用地表水、开采地下水和改变土地利用方式等活动使地表-地下水交互过程变得更为复杂。在过去的30年里,尤其是近10年中,地下水系统受到严重的威胁,地下水系统的时空变化受人类活动的影响越来越大,这也是内陆河流域地下水资源可持续管理中存在的普遍问题。如何通过地表水和地下水的联合管理,

合理的配置绿洲区水土资源,是维持内陆河流域未来地下水安全稳定的基本策略。

致谢:感谢同行评审专家和编辑部老师提出的宝贵修改意见!

参考文献 (References):

- [1] Wada Y, Van Beek L P H, Van Kempen C M, et al. Global depletion of groundwater resources [J]. *Geophysical Research Letter*, 2010, 37(20):114-122.
- [2] 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 Ping, Yu Jingjie, Min Leilei, et al. Shallow groundwater regime and its driving forces in the Ejina oasis [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5):982-993.
- [3] Eltahir E A B, Yeh P. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois [J]. *Water Resource Research*, 1999, 35(4):1199-1217.
- [4] Loaiciga H A, Valdes J B, Vogel R, et al. Global warming and the hydrologic cycle [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 174(1-2):83-127.
- [5] Allen D M, Mackie D C, Wei M. Groundwater and climate change: A sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada [J]. *Hydrogeology Journal*, 2004, 12(3):270-290.
- [6] Gunawardhana L N, Kazama S. A water availability and low-flow analysis of the Tagliamento River discharge in Italy under changing climate conditions [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2012, 16(16):1033-1045.
- [7] Islam M B, Firoz A B M, Foglia L, et al. A regional groundwater-flow model for sustainable groundwater-resource management in the South Asian megacity of Dhaka, Bangladesh [J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(3):617-637.
- [8] Goyal S K, Chaudhary B S, Singh O, et al. Thakur variability analysis of groundwater levels—A GIS-based case study [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2010, 38(2):355-364.
- [9] Moukhan J A, Koike K. Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with changes in land cover detected from analyses of satellite images [J]. *Computers & Geoscience*, 2008, 34(11):1527-1540.
- [10] Rakad A T, Alaeddin B T, Ghazi A S. Geostatistical analysis of spatiotemporal variability of groundwater level fluctuations in Amman-Zarqabasin, Jordan: A case study [J]. *Environment Geology*, 2009, 57(3):525-535.
- [11] Chen L J, Feng Q. Geostatistical analysis of temporal and spatial variations in groundwater levels and quality in the Minqin oasis, Northwest China [J]. *Environment Earth Science*, 2013, 70(3):1367-1378.
- [12] Huang H, Liang X J, Xiao C L, et al. Analysis and assessment of confined and phreatic water quality using a rough set theory method in Jilin City, China [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2015, 15(4):773-783.

- [13] Chinnasamy P, Agoramoorthy G. Groundwater storage and depletion trends in Tamil Nadu State, India[J]. *Water Resource Manage*, 2015, 29(7):2139-2152.
- [14] Cao Y P, Nan Z R, Cheng G D. Grace gravity satellite observations of terrestrial water storage changes for drought characterization in the arid land of Northwestern China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1):1021-1047.
- [15] 耿建伟, 赵晖, 王兴繁, 等. 历史时期额济纳盆地水系与绿洲演变过程及其机制研究[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(5):1204-1215.
Geng Jianwei, Zhao Hui, Wang Xingfan, et al. Oasis and drainage network evolution processes and mechanisms of Ejina Basin during historical period [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(5):1204-1215.
- [16] 李宗省, 李永格, 冯起, 等. 石羊河流域冰冻圈融水对出山径流的贡献及影响[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(5):1045-1054.
Li Zongxing, Li Yongge, Feng Qi, et al. Contribution from cryosphere meltwater to runoff and its influence in Shi Yang River basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(5):1045-1054.
- [17] 马金珠, 高前兆. 西北干旱区内陆河流域水资源系统与生态环境问题[J]. *干旱区资源与环境*, 1997, 11(4):15-21.
Ma Jinzhu, Gao Qianzhao. Water resources system and eco-environmental problems in the inland river basin of arid Northwest China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1997, 11(4):15-21.
- [18] 庞忠和. 新疆水循环变化机理与水资源调蓄[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(5):973-981.
Pang Zhonghe. Mechanism of water cycle changes and implications on water resources regulation in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5):973-981.
- [19] 敖菲, 于静洁, 王平. 黑河下游地下水位变化特征及其原因[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(4):686-695.
Ao Fei, Yu Jingjie, Wang Ping. Changing characteristics and influencing causes of groundwater level in the lower reaches of the Heihe River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(4):686-695.
- [20] 姚莹莹, 刘杰, 张爱静, 等. 黑河流域河道径流和人类活动对地下水动态的影响[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(5):973-981.
Yao Yingying, Liu Jie, Zhang Aijing, et al. Impact of stream runoff change and human activities on the groundwater regime in Heihe River basin, Northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5):973-981.
- [21] 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: 西安理工大学硕士学位论文, 2007:61-84.
Liu Min. Study on Groundwater Spatiotemporal Distribution Law and Its Environmental Effects in Hotan Oasis [D]. Xi'an: The Master's Thesis of Xi'an University of Technology, 2007:61-84.
- [22] 米丽娜, 肖洪浪, 朱文婧, 等. 1985~2013 年黑河中游流域地下水水位动态变化特征[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(2):461-469.
Mi Lina, Xiao Honglang, Zhu Wenjing, et al. Dynamic variation of the groundwater level in the middle reaches of the Heihe River during 1985-2013 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2):461-469.
- [23] 吐尔逊·买买提明. 和田地区水资源利用存在的主要问题及对策[J]. *水文*, 2015, 35(3):92-95.
Tursunmo Maimaitiming. How to utilize water resources in Hotan region[J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(3):92-95.
- [24] 陈连勤. 中华人民共和国区域水文地质普查报告(1:200000)新疆和田 J-44-(20, 26)[R]. 北京: 中国地质图制印厂清绘, 1980:92-103.
Chen Lianqin. The Regional Hydrogeological Survey Report in the People's Republic of China (1:200000) Hotan Width J-44-(20, 26) [R]. Beijing: Chinese Geological Map Printing Factory, 1980:92-103.
- [25] 黄领梅, 沈冰, 李怀恩, 等. 人类活动对旱区流域水文情势影响研究——以新疆和田河流域为例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010:55-67.
Huang Lingmei, Shen Bing, Li Huai'en, et al. Impacts of Human Activities on River Flow Regime in Arid Zones—Case Study of Hotan River Basin [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010:55-67.
- [26] 王明学, 李斌, 王菲, 等. 新疆和田地区地下水资源评价报告[R]. 石河子: 新疆水利水电勘测设计研究院石河子分院, 2013:82-93.
Wang Mingxue, Li Bin, Wang Fei, et al. The Report of Groundwater Resource Assessment in Hotan of Xinjiang [R]. Shihezi: Shihezi Branch of Xinjiang Hydropower Planning and Design Institute, 2013: 82-93.
- [27] Kendall M G. Rank Correlation Methods [M]. London: Charles Griffin, 1975:202.
- [28] 中国地质调查局. 水文地质手册(第2版)[M]. 北京: 地质出版社, 2012:692-694.
China Geological Survey. Handbook of Hydrogeology (2) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 692-694.
- [29] 赵长森, 黄领梅, 沈冰, 等. 和田绿洲散耗型水文模型(DHMH0)研究与应用[J]. *干旱区资源与环境*. 2010, 24(7):72-77.
Zhao Changsen, Huang Lingmei, Shen Bing, et al. The creation of the dissipative hydrological model for Hotan Oasis(DHMH0)[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(7):72-77.
- [30] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990:53-60.
Deng Julong. Grey System Theory Tutorial [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990:53-60.
- [31] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8):2041-2046.
Liu Sifeng, Cai Hua, Yang Yingjie, et al. Advance in Grey Incidence Analysis Modeling [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(8):2041-2046.
- [32] 黄鹤. 吉林地区地下水时空演化及多元控制管理研究[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2016:125-129.
Huang He. Research on Spatio-Temporal Evolution and Multiple Control Management of Groundwater in Jilin Area [D]. Changchun: The Doctoral Dissertation of Jilin University, 2016: 125-129.

THE SPATIO-TEMPORAL EVOLUTION OF THE GROUNDWATER SYSTEM IN RELATION TO CLIMATE CHANGE AND HUMAN ACTIVITIES IN HE-MO-LUO OASIS FROM 1979 TO 2010

Luo Guangming¹, Shi Fengzhi², Zhao Chengyi², Li Xihu²

(1. *Hotan Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Hotan 848000, Xinjiang*; 2. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, Xinjiang*)

Abstract

The impact of climate change and human activities on the evolution of groundwater systems is critical to the sustainable management of water resources in arid inland river basins. The Hotan River Basin is located in the west of the Taklimakan Desert and seated in the northern foothills of the Kunlun Mountains. The development of agriculture and animal husbandry increased the demand of groundwater resource, directly affecting the stability of He-Mo-Luo oasis and evolution of groundwater system. Based on groundwater observation data, hydrogeological data, meteorological data and irrigation statistical data, we use Mann-Kendall method, geostatistical analyses for the trends and the spatial distributions of the groundwater levels during the period of 1979~2010 in He-Mo-Luo oasis (36° 50' ~ 37° 40' N, 79° 20' ~ 80° 40' E). The change of groundwater storage was estimated. The gray correlation analysis was conducted to study the extent of correlation between natural and human factors and the spatio-temporal evolution of groundwater. The results showed that: (1) The groundwater level has generally fallen from 1979~2010, with the downward trend slightly larger in dry season than that in wet season. The largest groundwater depth appeared in June and July. (2) Comparison of 1979, 1999, 2004 and 2010 maps revealed a spatial distribution of groundwater level decline. The groundwater level falls down from the downstream discharge areas to the recharge areas of the Hotan River alluvial fan. Where as a regular decline was seen in more than 60% of the area, the range of levels were declined from 1~3 m to 3~6 m. (3) The groundwater storage dropped by an average of 2567×10^4 cubic meters per year in the past 30 years, especially decreasing sharply after 2004. The reduction rate of groundwater storage in 2004~2010 is 8.16 times that of 1979~2004 years. (4) During the last 30 years, farmland area increased by 1261.93 km² in He-Mo-Luo oasis, the amount of irrigation water was increased by 19.21%, and the groundwater exploitation has increased by 7.2 times. The natural and human factors affecting the change of groundwater storage arrangement by their decreasing importance are: Groundwater exploitation, irrigation area, precipitation, evaporation, runoff, temperature, irrigation leakage. Excessive groundwater depletion in major part of the district may be attributed to indiscriminate abstraction and increase in irrigation area. The effect of human activities on the groundwater balance is greater than that of natural factors. The sustainable management of the water and land resource is the key to maintaining groundwater security in oases.

Key words: groundwater depth; groundwater storage; groundwater utilization; climate change; statistical analysis; He-Mo-Luo oasis