

塔里木盆地南缘绿洲地下水时空变异与监测点位优化 ——以策勒绿洲为例

蒙波¹, 桂东伟^{2,3}, 曾凡江^{2,3}, 冯新龙¹

(1. 新疆大学 数学与系统科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830001; 3. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观察研究站, 新疆 策勒 848300)

摘要: [目的] 揭示塔里木盆地南缘绿洲地下水时空变异特征, 优化监测点位, 为实现水资源的合理利用与绿洲可持续发展提供依据。[方法] 基于 2008—2014 年地下水监测数据, 首先利用地统计学方法, 通过对球状、指数、高斯 3 种模型的系统分析, 确定适宜该地区的最优模型; 其次利用该模型定量分析区域地下水时空变异特征, 并进行地下水监测点位优化; 最后利用 Thiessen 多边形法计算地下水平均埋深, 对绿洲地下水水平平均埋深变化特征进行分析。[结果] 高斯模型为最优模型, 并且地下水的空间异质性和连通性增强; 在不影响监测精度前提下, 将原有 23 个监测点有效减至 12 个, 降低监测成本; 绿洲地下水水平平均埋深变化趋于稳定。[结论] 绿洲地下水尽管受绿洲扩张影响显著, 但因径流补给, 目前总体处于安全状况。为保障绿洲健康可持续发展, 需在目前绿洲规模基础上适当控制绿洲扩张。

关键词: 地下水; 高斯模型; 地统计学; Thiessen 多边形法; 监测优化; 策勒绿洲

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)02-0209-07

中图分类号: P641

文献参数: 蒙波, 桂东伟, 曾凡江, 等. 塔里木盆地南缘绿洲地下水时空变异与监测点位优化[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 209-215. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.040

Spatio-temporal Variability of Oasis Groundwater in Southern Rim of Tarim Basin and Monitoring Sites Optimization — A Case Study in Cele Oasis

MENG Bo¹, GUI Dongwei^{2,3}, ZENG Fanjiang^{2,3}, FENG Xinlong¹

(1. College of Mathematics and System Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi, Xinjiang 830001, China;

3. Cele National Station of Observation & Research for Desert-grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele, Xinjiang 848300, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal variation of groundwater in the south rim of Tarim Basin was explored to rationally arrange the monitoring well, and also to realize the rational utilization of water resource and the sustainable development of the oasis. [Methods] Geostatistical method was used to analyze the spatio-temporal variation of groundwater based on the data between 2008 and 2014. Firstly, Gauss model, Spherical and Exponential models were compared to determine which one performed best; Secondly, a chose model was used to analyze the spatio-temporal variation of groundwater in study area, and to optimize monitoring well; At last, Thiessen polygons method was used to calculate the average depth of groundwater and get the variation characteristics of groundwater depth from 2008 to 2014. [Results] Gauss model was the best model in analyzing groundwater change. The spatial heterogeneity and connectivity were enhanced, and the optimization of monitoring wells could be reduced from 23 to 12. The variation of mean groundwater depth was relatively stable. [Conclusion] Groundwater was influenced significantly by the oasis expansion. However, it was still in safe situation counterbalanced by runoff supply. In order to keep oasis development

收稿日期: 2015-03-25

修回日期: 2015-05-13

资助项目: 新疆自治区科技支撑计划项目“塔克拉玛干沙漠南缘骆驼刺植被修复技术研发与示范”(201433114); 国家自然科学基金项目(41471031); 中国科学院科技服务网络项目(KFJ-SW-ST5-176)

第一作者: 蒙波(1989—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 研究方向为地下水数值模拟。E-mail: future_bo@163.com。

通信作者: 桂东伟(1977—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 博士, 副研究员, 主要从事荒漠环境方面的研究。E-mail: guidwei@163.com。

sustainable, it is important to control oasis expanding based on the present oasis scale.

Keywords: groundwater; Gauss model; geostatistical methods; Thiessen polygons; monitoring optimization; Cele Oasis

绿洲作为干旱与极端干旱区人们生产与生活的重要载体,水资源成为其存在与发展的最重要限制因子。在地表水补给不足时,地下水成为绿洲水资源的重要补充部分,也成为绿洲社会、经济发展的重要制约因素^[1-2]。塔里木盆地南缘作为新疆绿洲重要分布区域,良好的光热资源及社会经济与人口增长压力,促使近 10 a 来绿洲面积始终处于高速增长^[3],致使绿洲地下水利用比例逐渐增加,很多地区已经接近并超过 50%。地下水的合理开发利用是维持绿洲社会经济可持续发展的必要前提^[4-5],因此,有必要对地下水埋深的时空变异特征、变化程度进行细致了解,进而服务于地下水资源的合理开发利用。此外,地下水研究离不开监测这一前提,基于地下水监测成本往往较高(如打井)这一现实背景,如何利用较少的监测井位满足监测要求与研究精度,即监测优化研究也需从现实层面上解决与应用。

地下水时空变异特征及监测优化研究中,地统计学方法得到广泛应用,并且不断深入^[6-12]。此外,地统计学在气象学、土壤学、生态学等领域也有着广泛的应用^[13-16]。该方法是以前区域化变量理论为基础,以半变异函数为主要工具,研究在空间分布上既有随机性又有结构性,或者具有空间相关性和依赖性的自然现象的一门科学^[17-18],能够有效地解释区域化变量在空间上的分布及其变异和相关特征。在地下水研究中,Theodossiou 和 Latinopoulos^[7]基于克里格方法,依据插值误差、交叉验证法和时空变异性等不同分析评价方法,对希腊北部的 Anthemountas 盆地上游区域地下水观测点进行了优化处理。周剑等人^[8]采用球状模型分析研究了黑河流域中游地下水时空变异性,结果表明该区域人为因素的变化对地下水水位的影响起着决定性的作用,并且地下水资源的连通性和脆弱性增加。代述勇等^[11]利用球状模型对塔里木南缘策勒绿洲地下水空间变异性进行分析。Yang 等^[12]利用普通克里格法对新疆柴窝堡盆地地下水监测布局进行了重构,并通过对比其他模型发现在该区域高斯模型的拟合效果是最佳的。但总体上,地统计学中更多的是运用球状模型分析区域化变量时空变异及分布特征,指数模型、高斯模型在地下水时空分异研究中的综合运用与对比研究较少,而且在进行监测优化时也是利用模型预测误差的标准来进行优化,利用监测点位的相关性来进行优化的研究还很匮乏。本

研究依托策勒国家野外研究站,选取策勒绿洲为典型研究区,基于地下水长期监测资料,首先通过比较现有的半变异函数模型拟合效果,选取最优模型对策勒绿洲地下水埋深的时空变异特性进行系统分析;其次对现有的监测井的分布和数量进行优化;此外,分析地下水平均埋深、策勒河年径流量、绿洲地下水开发量的年际变化特点及其变化原因,利用回归分析构建了 3 者的线性关系,为策勒绿洲合理开发地下水资源,绿洲可持续发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

策勒绿洲位于塔克拉玛干沙漠南缘中段,昆仑山北麓,隶属新疆和田地区策勒县,面积约为 97.68 km²,地理坐标为 36°57'25"—37°04'51"N, 80°42'42"—80°53'03"E,海拔为 1 296.5~1 370.5 m,年均降水量为 35.1 mm,而蒸发量达 2 595.3 mm,年均气温 11.9 ℃。发源于昆仑山的策勒河是绿洲主要的外来补给河流,多年平均径流量为 1.27×10⁸ m³。该区域地势南高北低,南部与流动沙丘和戈壁相连,东西两个方向被自然植被所包围,属于荒漠—绿洲型生态系统^[19]。研究区内呈现典型干旱区洪积扇地下水流特征,地下水流向由南向北,与地表径流方向一致。策勒河冲洪积扇内,地下水埋深小于 50 m,富水性好,含水层特征为第四系砂卵砾石单一孔隙潜水含水层。

1.2 数据来源

策勒国家野外研究站于 2008 年在策勒绿洲设立了 23 个长期地下水监测井,并对地下水埋深进行人工监测。监测井中任意相邻点位距离不超过 2 km,在绿洲区域基本为均匀分布;监测井深度为 10~80 m,以浅层地下水为主;监测时间为每月月初。此外,依托策勒水文站获取策勒河出山口径流的日、月、年尺度流量。图 1 为 23 个绿洲地下水长期监测井位观测点分布图。

1.3 研究方法

基于地下水埋深观测数据,采用普通克里格方法获得地下水埋深的变异特征和时空分布,并利用 Thiessen 多边形法计算地下水平均埋深,分析地下水平均埋深变化。

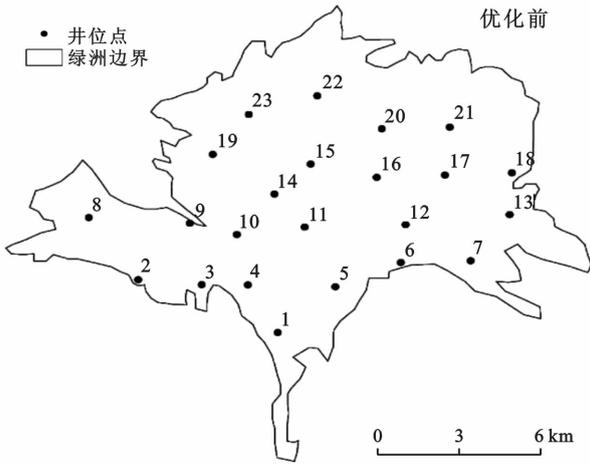


图 1 研究区优化前监测样点分布

1.3.1 区域化变量 区域化变量理论是地统计学的理论基础,其定义为:以空间 x 的 3 个直角坐标系 (x_u, x_v, x_w) 为自变量呈空间分布时, $z(x_u, x_v, x_w) = z(x)$ 就称之为一个区域化变量。

1.3.2 半变异函数 区域化变量 $z(x)$ 在 $x, x+h$ 两点处样本值之差的方差的一半定义为 $z(x)$ 在 x 方向上的半变异函数,记为

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} \text{var}[z(x) - z(x+h)] \quad (1)$$

在二阶平稳假设条件下,对任意的 h 则有

$$E[z(x+h)] = E[z(x)] \quad (2)$$

因此,公式(1)可以简化为:

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} E[z(x) - z(x+h)]^2 \quad (3)$$

从公式(3)可知,变异函数依赖于两个自变量 x 和 h ,当变异函数 $\gamma(x, h)$ 仅仅依赖于距离 h 而与位置 x 无关时,可记为 $\gamma(h)$,即

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[z(x) - z(x+h)]^2 \quad (4)$$

式中: $z(x)$ ——区域化随机变量,并满足二阶平稳假设; h ——两样本点空间分隔距离(m); $z(x_i), z(x_i+h)$ ——区域化变量在空间位置 x_i 和 x_i+h 处的实测值。那么根据上式的定义,半变异函数 $\gamma(h)$ 的离散公式为:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (5)$$

式中: h ——步长(m); $N(h)$ ——相同滞后距 h 的样品对数。

在定量描述研究区域化变量的变异特征时,还需要建立变异函数的理论模型,根据试验变异函数值,采用最小二乘法进行理论模型曲线的拟合,运用交叉验证的方法来确定模型和相关参数值的设定是否合理。常见的理论模型的为:

(1) 球状模型:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h=0) \\ C_0 + C \cdot \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & (0 < h \leq a) \\ C_0 + C & (h > a) \end{cases} \quad (6)$$

(2) 高斯模型:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h=0) \\ C_0 + C \cdot (1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) & (h > 0) \end{cases} \quad (7)$$

(3) 指数模型:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & (h=0) \\ C_0 + C \cdot (1 - e^{-\frac{h}{a}}) & (h > 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中: h ——步长(m); a ——变程(m),区域化变量在变程范围之内,具有相关性,之外则互不相关; C_0 ——块金值(m),表现在很短的距离内区域化变量有较大的空间变异性,它是由试验误差和区域化变量在小于抽样尺度时随机因素引起的变异; C ——偏基台值(m),变量大于取样尺度的结构性因素而引起的变异; $C_0 + C$ ——基台值(m),即变量在空间上的总变异大小;基底效应 $\eta = C_0 / (C_0 + C)$ 表示空间的变异程度,其比值越高,表明由随机因素引起的空间变异性程度越大,相反则由结构性因素引起的空间变异性程度越大。按照区域化变量空间相关性程度分级标准^[20],当 $\eta \geq 75\%$ 时,变量空间相关性很弱;当 $25\% < \eta < 75\%$,变量具有中等的空间相关性;当 $\eta \leq 25\%$,变量空间相关性很强。

1.3.3 普通克里格插值法 作为一种最佳空间局部估计方法,该方法最大限度的利用了空间取样所提供的各种信息,在估计未知样点时,不仅考虑待估点与邻近已知样点的空间距离,而且考虑了各邻近样点的位置关系。本文采用普通克里格方法,对研究区地下水埋深进行空间插值分析,并绘制等值线图。

区域化变量在 x_0 处的值 $z(x_0; \lambda_i)$ 可采用线性组合来估计,即

$$z(x_0, \lambda_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (9)$$

式中: x_1, \dots, x_n ——区域上的一系列观测点; $z(x_1), \dots, z(x_n)$ ——相应的观测值,根据其无偏性和最优性,可得 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$,为使逼近方差达到最小,采用拉格朗日乘数原理,并引进协方差表达式,可得

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i c(x_i, x_j) - \mu = c(x_0, x_j) \quad (j=1, \dots, n) \quad (10)$$

当区域化变量不满足二阶平稳假设,而满足内蕴(本征)假设时,可以用半变异函数来表示 $n+1$ 阶克里格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_0, x_j) & (j=1, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (11)$$

1.3.4 Thiessen 多边形法 Thiessen 多边形法比算术平均法较为合理和优越,其基本思想是每个样点上的地下水埋深并不只代表该点的地下水埋深,而是更多的也反映了它周围区域的地下水埋深,这些区域一般是不规则的多边形。具体步骤为:(1)将区域井位点的位置进行连线,形成三角网;(2)对每个三角形各边做垂直平分线;(3)将垂直平分线构成以每个井位点为核心的多边形。则地下水平均埋深可表示为

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i a_i}{A} = \sum_{i=1}^n \omega_i z_i \quad (12)$$

式中: a_i ——第 i 个井位点周围的多边形面积(m^2);
 A ——绿洲的面积(m^2); ω_i ——面积权重。

1.4 数据处理

基于塔里木南缘策勒绿洲 2008—2014 年监测数据,首先对监测数据进行了正态分布检验,对数转换之后的数据较好的服从正态分布。再次利用 GS⁺7

表 1 半变异函数决定系数及交叉验证结果

模型	2008 年 6 月		2011 年 6 月		2014 年 6 月	
	决定系数 R^2	均方根 RMSE	决定系数 R^2	均方根 RMSE	决定系数 R^2	均方根 RMSE
球状模型	0.888 0	5.931 5	0.888 0	5.452 3	0.823 0	7.226 3
高斯模型	0.980 0	2.296 0	0.933 0	3.807 1	0.962 0	3.290 7
指数模型	0.870 0	6.416 0	0.870 0	5.892 3	0.808 0	7.515 8

空间异质性是由尺度随机性因素和结构性因素共同作用的结果。

由表 2 可知,2008 年 6 月,2011 年 6 月,2014 年 6 月这三者的块金值都为 0.001 m,均未发生改变,说明近 7 a 时间中绿洲地下水埋深的变化在随机尺度上未发生改变。基底效应,从 2008 年 6 月的 0.049 7% 升高到 2014 年 6 月的 0.055 1% (1.11 倍),空间相关程度减弱,异质性增强,随机权重也越来越大,但

和 ArcGIS 10.0 进行时空变异性分析,具体为:利用离散半变异公式(5)计算离散半变异函数值,并且用理论半变异函数模型(6)~(8)进行最小二乘拟合,根据交叉验证结果选取出最优模型进行时空变异分析。采用普通克里格插值法计算未知区域的地下水埋深,进而绘制地下水埋深分布图。最后借助 ArcGIS 10.0 利用 Thiessen 多边形计算地下水平均埋深,获得地下水埋深变化特征。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深空间变异特征

由于每年 5—6 月是绿洲地下水抽采利用高峰期,故分别取 2008 年 6 月、2011 年 6 月、2014 年 6 月地下水埋深数据,进行时空变异分析。首先通过交叉验证结果选取最优半变异函数模型。由表 1 可知,高斯模型中决定系数(R^2)更接近于 1,而且均方根预测误差(RMSE)较小,模型及参数设定合理,拟合效果显著。并且和代述勇等^[11]一文使用的球状模型相比较,高斯模型拟合决定系数更大,均方根误差更小,说明对同一研究区高斯模型拟合效果更加显著,因此选取该模型作为最佳理论半变异函数模型,分析从 2008—2014 年绿洲地下水埋深空间变异特征。

是按照区域化变量空间相关性程度的评价标准,均小于 25%,3 a 均具有强烈的空间相关性。3 年的变程为 7.92,8.03 和 8.65 km,空间相关距离增大。可见近 7 年绿洲地下水埋深的变化主要集中在结构性尺度上,在中小尺度上(小于采样间距 1 km 尺度)并未发生改变,空间异质性在增强且空间的 最大相关距离也在增大,说明绿洲在一定尺度上地下水资源的连通性在增强。

表 2 地下水埋深高斯模型参数值

时间	块金值/m	基台值/m	基底效应/%	变程/km	决定系数	残差
2008 年 6 月	0.001 0	2.011 0	0.049 7	7.920 0	0.980 0	0.010 6
2011 年 6 月	0.001 0	1.942 0	0.051 5	8.030 0	0.979 0	9.404 E-03
2014 年 6 月	0.001 0	1.814 0	0.055 1	8.650 0	0.990 0	3.507 E-03

2.2 地下水埋深时空分布

为直观准确描述策勒绿洲地下水埋深的空间分

布,利用普通克里格插值绘制等值线图。从 3 a 地下水埋深分布图(图 2)可以看出,在策勒绿洲南部一带

的地下水埋深大于其他地区,埋深的最低值达到了 71.95 m(2014 年 6 月),其东南部和西南部也深于其他区域,绿洲北部一带地下水埋深相对较浅,东部是整个绿洲地下水埋深最浅的区域,埋深的最高值为 1.4 m(2011 年 6 月)。

引起地下水埋深这样分布的原因主要有:策勒绿洲位于昆仑山北麓,总体地势南高北低,西南向东北

倾斜,南部一带海拔是整个绿洲最高的区域,所以南部一带地下水埋深普遍比其他区域要深,北部地势较低,且东部地势属于低凹地带,地下水会流向该区域,属于地下水溢出地带;依据该区域水文地质资料可知,策勒河下游冲积扇上,从南向北依次属于强富水区、极强富水区、中等富水区,地下水埋深呈南低北高。

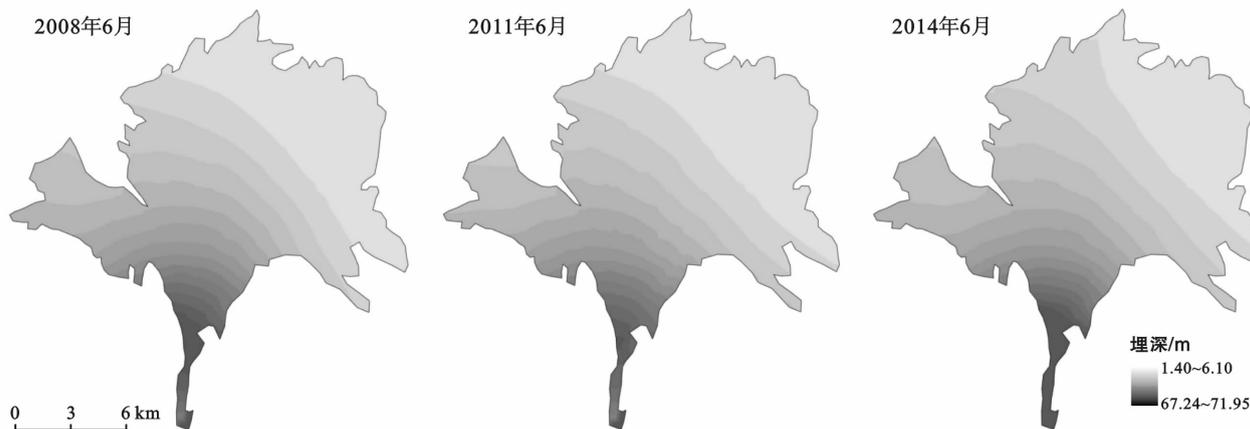


图 2 研究区优化前的地下水埋深分布

根据 Thiessen 多边形法计算出 2008—2014 年每年 6 月的地下水平均埋深(表 3),可以看出绿洲地下水埋深整体上变化微小,从 2008—2014 年也基本上维持在 20 m,说明策勒绿洲的地下水埋深基本上趋于稳定,未出现异常的波动。影响绿洲地下水埋深变化的主要因素有地表水来水量、绿洲地下水开发量等,图 3 为从 2008—2014 年策勒河年径流量以及策勒绿洲每年 6 月地下水开发量变化曲线图。由图 3 可以看出,在近 7 a 内地下水平均埋深随着地下水开

发量的增加而上下波动,但是整体上没有显著的下降,出现这样的原因有:尽管绿洲地下水的开发量有所增加,但是策勒河的年径流量也在增加,补给绿洲地下水的速度增大,所以地下水埋深未见显著下降。由多元线性回归分析结果可以看出,地下水平均埋深与绿洲地下水开发量属中度相关,当地下水开发量增加时,地下水埋深就升高;3 者的线性关系表明策勒河年径流量对绿洲地下水埋深的影响较弱,二者的变化趋势基本上一致。

表 3 优化前后地下水平均埋深

项目	2008 年 6 月	2009 年 6 月	2010 年 6 月	2011 年 6 月	2014 年 6 月
优化前地下水平均埋深/m	20.783 0	22.007 0	22.316 0	19.576 0	20.895 0
优化后地下水平均埋深/m	21.074 7	22.591 5	22.622 1	18.978 2	21.098 8

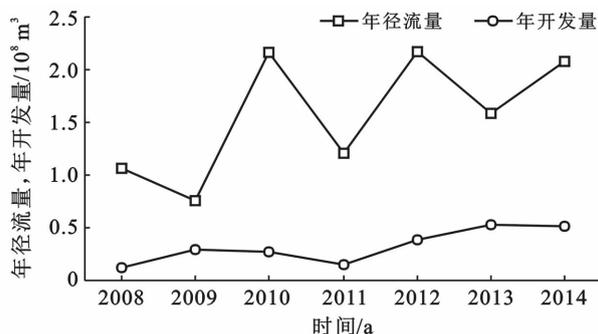


图 3 策勒绿洲水资源变化曲线

2.3 地下水监测井数量优化

针对目前塔里木盆地南缘绿洲地下水的利用比例逐渐增加这一现状,对地下水的长期动态监测成为绿洲水资源有效管理与合理利用的必要前提。考虑到地下水监测高昂的成本,势必需要在不影响监测精度的前提下,最大可能的减少监测点井位进而节省监测成本,因此进行监测点位优化对绿洲地下水监测有重要的应用价值。

由表 1 可知高斯模型是最优模型,但是 3 a 比较中 2011 年 6 月拟合均方根误差最大,因此对该月份

进行监测点优化,通过对数据的分析,发现 1 号、23 号监测点与邻近监测点相关性较大,因此邻近点的权重贡献较大,对 1 号、23 号的估计影响较大,为了更好的对其进行预测,保留其周围的监测点。再取两等值线靠近中间位置的监测井位点,最终得到优化之后的监测点为 12 个(如图 4 所示)。

利用这 12 个监测数据再次预测区域地下水埋深(图 5),与原来预测分布图相比,能够较好地预测地下水埋深空间分布,同时也预测了整个研究区的地下水平均埋深(表 3),与优化前比较,误差最大为 0.597 8 m,说明优化的监测井位能够很好的进行预测。

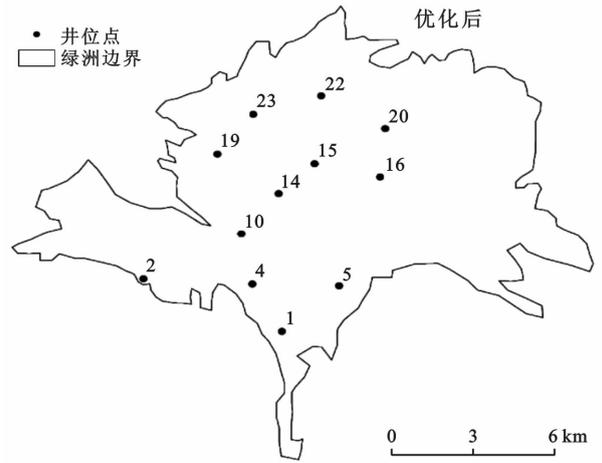


图 4 研究区优化后监测样点分布图



图 5 研究区优化后地下水埋深分布图

3 讨论与结论

运用地统计学理论中的半变异函数模型对策勒绿洲 2008 年 6 月,2011 年 6 月,2014 年 6 月的地下水埋深进行空间变异性分析。首先通过交叉验证结果表明,与代述勇等^[13]选取的球状模型相比,高斯模型拟合效果更加显著,预测精度更高,因此选取该模型对区域进行变异性分析,结果表明,绿洲地下水埋深的变化主要集中在结构性尺度上,在中下尺度上(小于采样间距 1 km 尺度)并未发生改变,空间异质性在增强且空间的最大相关距离也在增大,绿洲地下水资源的连通性在增加,同时脆弱性也在增加。此外高斯模型在策勒绿洲地下水模拟研究中的良好应用,基于塔里木盆地南缘地质环境演变的相似性,以及气候环境差异不大的特征,在该区域地下水模拟研究中,可以优先考虑高斯模型的运用。

通过 Thiessen 多边形法计算绿洲地下水平均埋深,并分析其变化特征,分析表明绿洲地下水整体上趋于稳定的变化趋势,而且通过多元回归分析,得到

三者的线性关系,地下水埋深和策勒河年径流量、绿洲地下水开发量的变化基本一致。虽然近些年绿洲地下水开发量整体上处于增加趋势,但是由于策勒河径流补给,使得地下水并未出现显著的下降,地下水资源相对稳定并可以支撑目前绿洲发展,但同时也应该注意到整个绿洲的地下水资源的连通性也在增强,随着绿洲面积进一步扩张引起的地下水的过量使用,势必会造成地势较高补给区的地下水埋深的下降,而且这种下降必将影响绿洲地下水的补给。此外,从长时间尺度看,地表水径流并非体现出稳定特征,当地表水径流严重减少时,地下水资源则会出现严重短缺,因此为保障绿洲可持续发展,仍然需要合理控制绿洲规模,并限定绿洲扩张,同时需要提高地下水资源的有效利用率。

通过研究发现,该区域现有的地下水监测站网布局存在不合理,进而进行优化调整监测方案,在选取的高斯模型基础上,对区域监测点进行优化处理,将最初设置的 23 个监测点减少至 12 个,同样能够较好地预测绿洲地下水埋深及其空间分布,并且降低了监

测成本,使得监测站网布局更加合理,这对其他绿洲地下水监测点位优化也具有重要的参考价值。同时建议有关部门在进行合理布置监测站(点)时,事前应综合考虑各方面因素,尽量避免事后进行优化调整,造成资源浪费或闲置等问题。

[参 考 文 献]

- [1] Mtembezeka P, Andrews A J, Appiah S O. Groundwater management in drought-prone areas of Africa[J]. *Water Resources Development*, 1997,13(2):241-261.
- [2] Alley W M, Reilly T E, Franke O L, Sustainability of groundwater resources[R]. U S: Geology Survey Circular, 1999.
- [3] Li Haifeng, Zeng Fanjiang, Gui Dongwei, et al. Effects of cutting and burning on regeneration of *Alhagi sparsifolia* shap on the southern fringe of the Taklamakan Desert, Northwest China [J]. *The Rangeland Journal*, 2012,34(1):389-397.
- [4] Sato K, Iwasa Y. *Groundwater Hydraulics*[M]. Tokyo: Springer Verlag, 2003.
- [5] Schwarts W F, Hubao Z. *Fundamentals of Groundwater* [M]. New York: John Wiley&Sons, 2003.
- [6] Elfadel M, Tomaszekiewicz M, Adra Y, et al. GIS-based assessment for the development of a groundwater quality index towards sustainable aquifer management [J]. *Water Resources Management*, 2014,28(1):1-17.
- [7] Theodossiou N, Latinopoulos P. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology [J]. *Environment Modelling & Software*, 2006,21(7):991-1000.
- [8] 周剑,李新,王根绪,等.黑河流域中游地下水时空变异性分析及其对土地利用变化的响应[J].*自然资源学报*, 2009,24(3):498-506.
- [9] Liu Chenwu, Jang Chengshin, Liao Chungmin. Evaluation of arsenic contamination potential using indicator Kriging in the Yunlin aquifer[J]. *Science of the Total Environment*, 2004,321(1/3):173-188.
- [10] Cinnirella S, Buttafuoco G, Pirrone N. Stochastic analysis to assess the spatial distribution of groundwater nitrate concentration in the Po cathment[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 133(3): 569-580.
- [11] 代述勇,雷加强,赵景峰,等.塔里木南缘策勒绿洲地下水空间变异性与土地覆盖关系研究[J].*冰川冻土*, 2009,31(6):1101-1109.
- [12] Yang Fengguang, Cao Shuyou, Liu Xingnian, et al. Design of groundwater level monitoring network with ordinary Kriging[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, 20(3):339-346.
- [13] Desbarats A J, Logan C E, Hinton M J, et al. on the kriging of water table elevation using collateral information from a digital elevation model[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1/4): 25-38.
- [14] Wang Genxu, Cheng Guodong. Water resource development and its influence on the environment in arid area of China: The case of the Hei River basin[J]. *Journal of Arid Environments*, 1999,43(2):121-131.
- [15] Zhang Xingyi, Sui Yueyu, Zhang Xudong, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2007,17(1):19-29.
- [16] Ahmed A E, Luis A G. Comparison of ordinary Kriging, regression Kriging, and cokriging techniques to estimate soil using LANDSAT images[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2010, 136(6): 355-364.
- [17] 侯景儒,尹镇南,李维明,等.实用地质统计学[M].北京:地质出版社,1998.6.
- [18] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:162-192.
- [19] 桂东伟,雷加强,曾凡江,等.绿洲化过程中农田土壤粒径分布性质变化[J].*中国沙漠*, 2010, 30(6):1354-1361.
- [20] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity[J]. *Oikos*, 1995, 73(2):280-284.