



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.009

李宁, 岳德鹏, 于强, 等. 磴口县地下水埋深时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 49-54, 79.
LI Ning, YU De peng, YU Qiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics of groundwater depth in Dengkou County[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 49-54, 79. (in Chinese)

磴口县地下水埋深时空变化特征

李 宁, 岳德鹏, 于 强, 张启斌, 马 欢

(北京林业大学 林学院 精准林业重点实验室, 北京 100083)

摘要: 选取荒漠绿洲区磴口县 1988 年—2013 年 17 个观测站逐月水位埋深数据, 运用 kernel K-means 及经验模态分解(EMD)方法, 探索 26 年来研究区地下水埋深时空变化特征。结果表明: 17 个测站分为三个聚类中心, 第一聚类中心包括 6 个测站, 地下水平均埋深最大。第二聚类中心包括 4 个测站, 地下水平均埋深次之。第三聚类中心包括 7 个测站, 地下水平均埋深最小; 26 年来第一和第二聚类中心地下水埋深呈增大趋势, 增大幅度分别为 0.014 m、0.26 m。第三聚类中心地下水埋深呈减小趋势, 减小幅度为 0.08 m; 三个聚类中心地下水埋深年内变化趋势基本相同。

关键词: 经验模态分解; kernel K-means; 磴口县; 地下水埋深; 时空变化

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0049-06

Temporal and spatial variation characteristics of groundwater depth in Dengkou County

LI Ning, YUE De peng, YU Qiang, ZHANG Qi bin, MA Huan

(Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper selected the monthly observed groundwater depth data during 1988-2013 from 17 monitoring wells at Dengkou County in the desert oasis region, and explored the temporal and spatial variation characteristics of the groundwater depth in study area during the 26 years by using kernel K-means and Empirical Mode Decomposition method. The results indicated the following findings: Firstly, 17 monitoring wells can be divided into 3 clusters. The first cluster contains 6 monitoring wells with the largest average depth of groundwater. The second cluster contains 4 monitoring wells with the second largest average depth of groundwater. The third cluster contains 7 monitoring wells with the smallest average depth of groundwater. Secondly, during the past 26 years, the groundwater depths of the first and second clusters tend to increase, respectively up by 0.014 m and 0.26 m. The groundwater depth of the third cluster tends to decrease, down by 0.08 m. Thirdly, the groundwater depths of the three clusters basically show the same annual variation tendency.

Key words: EMD; kernel K-means; Dengkou County; groundwater depth; temporal and spatial variation

干旱地区水资源是制约区域经济发展的关键因素。干旱地区的水资源特性使得地下水成为干旱地区极为重要的水源之一, 如何合理、高效地利用地下

水资源成为解决干旱区生态、环境问题的核心所在^[1]。研究区磴口县位于乌兰布和东北缘, 属于典型的荒漠绿洲交错区, 生态环境十分脆弱, 黄河水侧

收稿日期: 2016-10-15 修回日期: 2017-01-07 网络出版时间: 2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1112.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371189);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAD16B00)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41371189); National Science & Technology Key Program during the 12th Five year Plan Period(2012BAD16B00)

作者简介: 李 宁(1992-), 男, 山西吕梁人, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究。E-mail: ningligis@163.com

通讯作者: 岳德鹏(1963-), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究。E-mail: yuedepeng@126.com

渗使得该区地下水资源较为丰富,地下水资源已经成为维持该区经济、社会以及绿洲可持续发展的重要因素^[2]。因此掌握研究区地下水埋深时空变化规律、变化趋势和变化幅度,进而能对当地地下水资源进行合理利用、区域开发战略制定及生态环境保护提供科学支撑。

地下水动态变化是地下水对各种自然和人为影响因素的综合响应,是地下水水资源量变的最直接反映^[3]。近年来诸多学者对地下水动态变化研究较多,如徐永亮^[4]对额济纳三角洲年内地下水水位进行动态分类,分析不同波动类型的地下水动态变化特征,赵洁^[5]分析了过去 20 年黑河中游地下水空间变异规律,杨怀德^[6]对民勤绿洲地下水年际尺度埋深变化进行趋势性分析,并探究了各相关因子与地下水埋深的敏感程度,肖彩虹^[7]对乌兰布和沙漠东北部人工绿洲七年来不同灌溉区地下水水位时空动态变化进行了研究,但对研究区磴口县地下水动态变化研究较少且时间尺度短。

以往在研究地下水埋深动态变化特征时,大多采用传统的描述性统计分析,而地下水埋深变化是一个非线性、非平稳的过程,伴随着各种尺度的震荡,由于传统方法本身的局限,并不能真实有效地提取出地下水埋深变化的自然变率^[8]。经验模态分解(EMD)是一种新的非线性、非平稳时间序列分析方法。它与其他的时间频分解方法(如小波分析)相比,完全摆脱了傅里叶变化的束缚,可根据时间序列局部时变特征进行自适应地时频分解,去掉持久稳固信号的噪声,得到极高的时频分辨率,非常适合对非平稳、非线性时间序列的分析^[9-10]。

本文基于荒漠绿洲区磴口县 1988 年-2013 年 17 个长观孔逐月观测水位埋深数据,采用 kernel K-means 聚类方法和经验模态分解法(EMD),分析了 26 年来研究区地下水埋深动态变化规律,以期为该区水资源与社会、经济和生态的可持续发展提供参考依据。

1 研究区域及资料来源

研究区磴口县地处乌兰布和沙漠与河套平原的结合部,地理坐标为 $106^{\circ}9' - 107^{\circ}10' E$, $40^{\circ}9' - 40^{\circ}57' N$,面积 $4\,166.6\text{ km}^2$,南与鄂尔多斯市杭锦旗及鄂托克旗隔河相望,西同阿拉善盟阿拉善左旗毗邻,北与巴彦淖尔市乌拉特后旗相连,东与巴彦淖尔市临河区接壤^[11-12]。该区域属温带大陆性季风气候,干旱少雨、风大沙多,盛行西南风,受高空西风环流控制,平均相对湿度 47%,多年平均降水量为

142.7 mm,沙区不足 100 mm,平均蒸发量 2 372.1 mm,为降水的 16.6 倍,水资源丰富,地下水资源储量 5 258 亿 m^3 ,大小湖泊 46 处,水域面积 3 61 万亩。磴口县地处河套黄骠上游,拦河闸控制着整个河套的灌溉,因此引黄灌溉较其他旗县条件优越,县内绝大多数耕地可引黄灌溉。黄河流经磴口县 52 km,年径流量 310 亿 m^3 ,年均流量在 580~1 600 m^3/s 之间,河套灌区水利大动脉总干渠及乌审干渠横穿县境而过,黄河水侧渗丰富,同时由于古地理环境及黄河改道,使磴口县地下水资源十分丰富,地下水埋深 2~9 m,单井出水量 80~120 m^3/h ,地下水资源分布状态较为稳定,埋深浅、极易开采^[13-14]。

本研究地下水埋深数据和位置资料来自内蒙古磴口县黄河管理局,包括 1988 年-2013 年逐月地下水埋深数据和 17 个观测站的空间坐标。

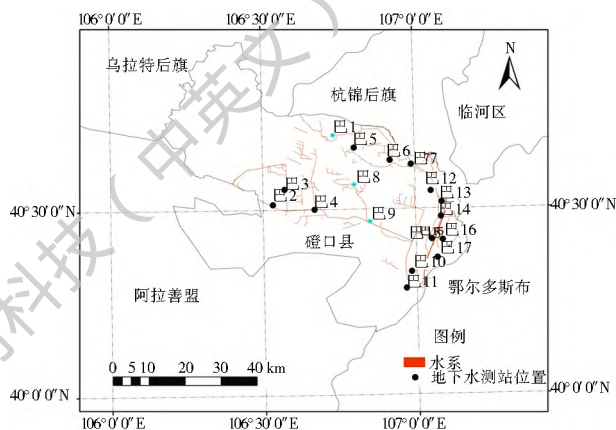


图 1 磴口县位置及地下水水位观测站分布

Fig. 1 Dengkou County and the distribution of groundwater monitoring wells

2 研究方法

2.1 kernel K-means 方法

每一个测站点地下水埋深数据共记录 312 个月,即有 312 个维度。通过探索 17 个测站的逐月观测数据,发现一些站许多数据记录交织在一起,并不总是高于或者低于其他站,这很难用一个线性的平面来区分。kernel K-means 是一个很好的聚类方法,擅长分离高维非线性分离数据。对于一个给定的集群数,它能够通过最大限度的减少集群内的平方和,并把它作为每个站和相应的集群中心之间的平方欧氏距离的总和,最终找到最佳的适当分区^[15]。它类似于经典的 k -均值,但所有的操作都在一个特征空间中进行。kernel K-means 方法将原始数据映射到一个更高维的特征空间,其中的数据可以很容易地分离成线性。在一个核特征空间中,原始数据 (x_1, \dots, x_n) 成为 $(\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n))$, 其中 $\varphi(\cdot)$ 是

映射函数。然后,数据可以通过以下步骤进行聚类。

(1) 初始化特征空间中的聚类中心 $m_k (k=1, \dots, K)$ 。

(2) 计算每个站 $\varphi(x_i) (i=1, \dots, N)$ 与聚类中心的距离 k , 根据最近邻原则将每个站分配到相应类中

$$k = \operatorname{argmin} \| \varphi(x_i) - m_k \|^2 \quad (1)$$

(3) 更新聚类中心并重新计算聚类变化之和 E 。

$$m_k = \frac{1}{N_k} \sum_{x_j \in \text{class } k} \varphi(x_j), E = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} \| \varphi(x_j) - m_k \|^2 \quad (2)$$

其中, N_k 是聚类中的站数。

(4) 重复步骤(2)和(3),直到连续 n 次迭代 E 值稳定为止。

然而,映射函数 $\varphi(\cdot)$ 的显式表达式很难在没有足够的先验信息的情况下确定。核函数提供了有效的映射函数替代,并且可以直接用于在特征空间中提供内积,而不需要显式映射函数^[16]。在本研究中使用高斯径向基函数,它是一个常用的核函数。对应的特征空间是具有无限维度的希尔伯特空间,其中原始维空间中的非线性分离数据可以使用线性分类器容易地分离:

$$\begin{aligned} \forall(x_i, x_j) &= \varphi(x_j)^T \varphi(x_i) = \\ & \exp\left[-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

参数 σ 可以通过由站之间的平均距离定义的启发式方法来确定。然后,等式(2)中的 $\varphi(x_i)$ 和聚类中心之间的距离可以表示为:

$$\begin{aligned} \| \varphi(x) - m_k \|^2 &= \| \varphi(x) - \frac{1}{N_k} \sum_{x_i \in \text{class } k} \varphi(x_i) \|^2 = \\ \forall(x, x) - 2 \sum_{i=1}^{N_k} \forall(x, x_i) + \sum_{i,j=1}^{N_k} \forall(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (4)$$

聚类中心的数量由 CH (Calinski-Harabasz) 指数确定。它是一个类间相似性与类内相似性的 F 统计量度。

$$CH(k) = [B/(k-1)] / [W/(n-k)] \quad (5)$$

式中: B 表示总距离平方距离之间的总和; W 是群内总和的平方距离; k 是聚类中心数; n 为测站的数量。 CH 值大表示是良好的聚类,其中聚类中心间的不相似性应该很大,而聚类中心内的相异性应该很小。选择由 CH 最大化的 k 值作为最终聚类中心数。我们使用统计软件 R2.15 运行聚类方法和包 kernlab。

2.2 EMD 方法

经验模态分解法(EMD)是一种自适应时间序列数据分析模型,它的提出是对傅里叶分析为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破^[17]。在 EMD

分析中,原始数据被分解成一系列的模式,而不需要事先知道。与傅立叶和小波分解相比,EMD 有自己的优势。傅立叶分析可以将数据转换成具有不同频率的正弦和余弦函数的组合,而小波分析需要小波函数。由于基础函数谐波特性的限制,这些类型的分解包含了许多杂散分量。经验模态分解法(EMD)将数据分解成若干本征模态函数(IMF)和一个残余信号,残留底层即是数据的趋势^[18]。

本征模态函数(IMF)需要满足两个条件:首先,极值的数目和在整个数据跨度过零点的数目之间的差应小于或等于 1。第二,由局部极大值和局部最小值确定的包络线所限定的包络线的平均值是在任何点为零^[19]。本研究使用筛选方法计算 IMF 和地下水埋深残差。

步骤如下。

(1) 初始化 $r(t) = x(t), i=0, k=1$, 其中 $x(t)$ 是时间序列地下水埋深向量,计算局部极大值和时间序列 $r(t)$ 的局部极小值。

(2) 计算通过内插极大值上包络线 $e_{\max}(t)$ 和下包络 $e_{\min}(t)$ 的经内插的局部最小值。

(3) 用公式计算局部平均值。

$$m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t)) / 2 \quad (6)$$

(4) 指定 $i = i + 1$, 则原模式功能(PMF)是通过下列公式计算:

$$p_i(t) = r(t) - m(t), r(t) = p_i(t) \quad (7)$$

(5) 终止条件。

$$SD = \sum_i \left[\frac{|p_i(t) - p_{i-1}(t)|^2}{p_{i-1}^2(t)} \right] \quad (8)$$

如果 $SD < \delta$ 则 $imf_k(t) = p_i(t)$, 继续下一步;否则,返回步骤(4)。

(6) 定义 $r(t) = r(t) - imf_k(t)$ 。当 r 的极值点 $r(t)$ 的计数是大于 N , 则 $k = K + 1, i = 0$, 并回到步骤 1; 否则, 停止筛选过程。

地下水埋深矢量 $x(t)$ 可以表达为

$$x(t) = \sum_{i=1}^K imf_i + r \quad (9)$$

式中: K 是本征模态函数的个数, r 是原始数据的趋势。第一本征模态函数(IMF1)是具有最高频率的分量,所有本征模态函数分量进行统计学零假设测试^[20]。在应用 EMD 方法时无法避免边界问题,因为构成上下包络线时,信号数据序列的两端会出现发散现象,并且这种发散会不断逐渐向内“污染”,使所得结果严重失真。本文在 MATLAB 软件中运行 Rilling^[21] 等人编写的 EMD 代码,采用镜像对称延伸方法进行包络拟合。

3 结果分析

3.1 1988 年-2013 年地下水埋深变化统计特征

通过对研究区 17 点测站点地下水埋深数据进行描述性统计分析可得(表 1), 测得地下水埋深最小的是巴 11 测站点, 为 0.09 m; 最大的是巴 10 测站点, 为 4.30 m。地下水埋深平均值巴 4 测站点最大, 为 2.65 m; 巴 6 测站点最小, 为 0.94 m。地下水埋深变化幅度最大的巴 10 测站点, 变化幅度为 3.81 m; 最小的为巴 6 测站点, 变化幅度为 1.45 m。根据变异系数(C_v)的大小可知, 17 个测站点都属于中等变异性, 其中巴 9、巴 11 变异性最大, 巴 5、巴 16 变异性次之, 巴 1 点变异性最小。

表 1 1988 年-2013 年地下水埋深描述性统计分析

Tab. 1 Descriptive statistics of groundwater level from 1988 to 2013

站点	最小值/m	最大值/m	平均值/m	标准差	C_v
巴 1	1.77	3.60	2.61	0.30	0.11
巴 2	0.66	2.77	1.55	0.40	0.26
巴 3	0.40	2.07	1.18	0.37	0.31
巴 4	0.79	3.82	2.65	0.70	0.26
巴 5	0.28	2.52	1.10	0.41	0.37
巴 6	0.31	1.76	0.94	0.32	0.35
巴 7	0.56	3.36	2.18	0.64	0.29
巴 8	0.50	2.94	1.90	0.55	0.29
巴 9	0.67	3.32	1.92	0.80	0.41
巴 10	0.49	4.30	2.16	0.75	0.35
巴 11	0.09	3.01	1.15	0.47	0.41
巴 12	0.31	2.95	1.25	0.44	0.35
巴 13	0.81	3.39	2.27	0.57	0.25
巴 14	0.75	3.49	2.33	0.64	0.28
巴 15	0.21	2.87	1.66	0.54	0.32
巴 16	0.26	2.59	1.43	0.53	0.37
巴 17	0.58	2.96	2.02	0.55	0.27

3.2 站点聚类的空间分布

利用 kernel K-means 方法对磴口县 17 个地下水埋深观测站进行聚类, 从 1 到 8 不同的集群数来计算 CH 值, 发现其达到最大值时集群数为 3, 表明此时各类内差异最小, 类间的差异最大。因此 17 个观测站被划分为 3 个聚类中心。第一聚类中心包含 6 个站: 巴 1, 巴 7, 巴 9, 巴 10, 巴 13, 巴 14。第二聚类中心包含 4 个站: 巴 4, 巴 8, 巴 15, 巴 17。第三聚类中心包括 7 个站: 巴 2, 巴 3, 巴 5, 巴 6, 巴 11, 巴 12, 巴 16。

第一个聚类中心中地下水埋深最大, 主要分布于磴口县北部及磴口县城附近。

第二个聚类中心中地下水埋深次之, 分布在磴

口县中部, 在第一聚类中心和第三聚类中心之间。

第三个聚类中心中地下水埋深最小, 分布在磴口县东北部和西南部。

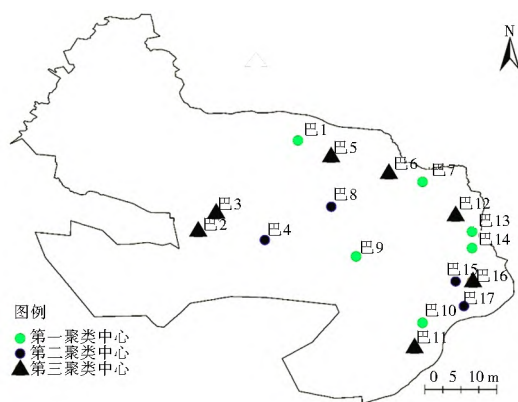


图 2 地下水观测站聚类空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of groundwater observation wells clusters

3.3 年际及年内变化趋势

利用 EMD 方法对三个聚类中心进行趋势性变化分析(图 3)。IMF1 具有最高的频率和最大的振幅, 而 IMF6 具有最低的频率和最小的振幅。当所有的周期从原始数据中去掉时, 即得到整个时间跨度的趋势。三个聚类中心变化范围分别为 2.2~2.214 m、1.80~2.06 m、1.19~1.27 m。从三条趋势线可以得出两个重要的不同。一个是变化幅度不同。第二聚类中心变化幅度最大, 为 0.26 m; 第三聚类中心次之, 变化幅度为 0.08 m, 第一聚类中心变化幅度最小, 仅为 0.014 m, 基本保持稳定。二是各个聚类中心趋势线的不同。第一聚类中心单调递增。第二聚类中心先缓慢增加而后趋于稳定。而第三聚类中心先增加, 到 1994 年时达到最大, 而后缓慢减小, 到 2008 年之后, 基本稳定不变。

对三个聚类中心 26 年来每个月地下水埋深观测值取平均(图 4), 从图中可以非常明显看出: 绿洲区内三个聚类中心地下水埋深虽然不同, 但年内变化特征基本相似: 从 2 月到 6 月, 地下水埋深逐渐减小; 从 6 月一直持续到 9 月, 地下水埋深开始逐渐增大, 从 9 月到 11 月地下水埋深又逐渐减小, 达到全年地下水埋深最小; 从 11 月开始地下水埋深又开始逐渐增大, 到第二年 2 月份左右达到全年最大。河套灌区年内有三次灌溉期, 分别是夏灌(4 月-6 月, 灌水 3 次)、秋灌(7 月-9 月, 灌水 3 次)、秋浇(10 月-11 月, 灌水 1 次)。灌溉回渗导致 3 月-6 月、9 月-11 月地下水埋深变小, 地下水蒸发、蒸腾以及人类的生活用水的增加使 6 月-9 月地下水埋深逐渐变大。

3.4 时间趋势分析

各观测站地下水埋深数据经过 EMD 方法处理

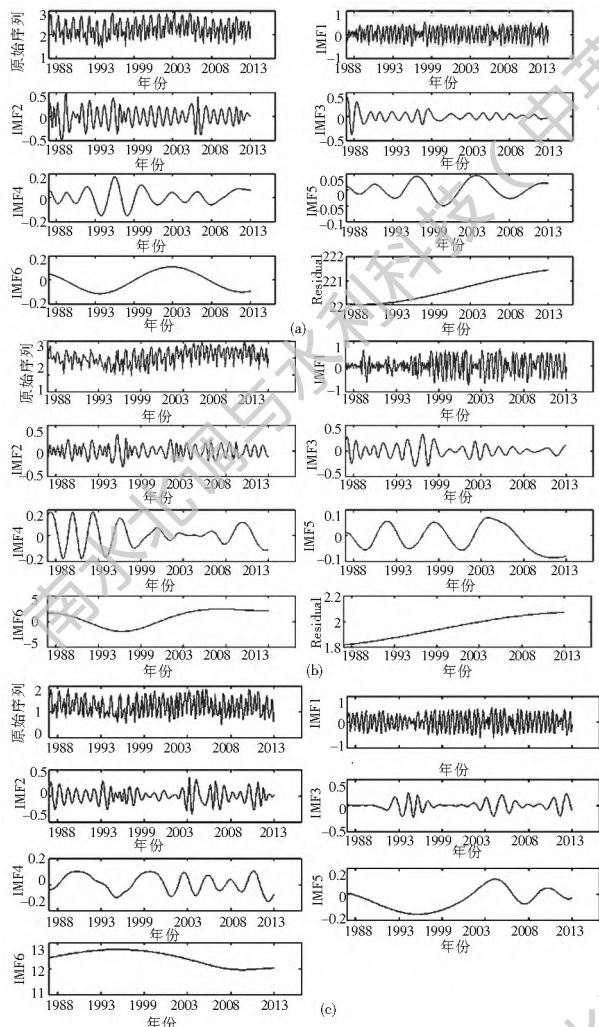


图3 三个聚类中心 EMD 分解:
(a) 第一聚类中心 (b) 第二聚类中心 (c) 第三聚类中心
Fig. 3 EMD decomposition of the three clusters:
(a) the first cluster; (b) the second cluster; and (c) the third cluster

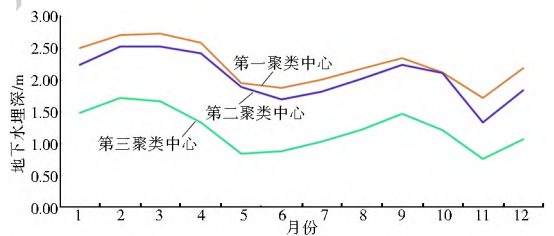


图4 三个聚类中心地下水埋深年内趋势变化
Fig. 4 Annual variation tendency of the groundwater depth of the three clusters

得到年变化趋势图(图5),所有分解的趋势图都是非线性的。分析17个站的年变化趋势图,巴9是变化最大的站(2.3 m),其次是巴10站(1.3 m)、巴4站(1.2 m)。根据趋势线的变化情况,分为四个类型(图5)。第一类(I)是单调上升的。地下水埋深逐渐变大,或短时间内保持不变。这类型包括7个站(巴2、巴3、巴4、巴7、巴10、巴15、巴17)。第二类(II)单调递减的。这类型地下水埋深逐渐变小,包括3个站(巴5、巴9、巴11)。第三类(III)先下降后上升再下降。地下水埋深先变小,而后逐渐变大最后再变小,包括5个站(巴1、巴6、巴8、巴16、巴14)。第四类(IV)先上升后下降。地下水埋深早期逐渐变大而后又变小,包括两个站(巴12、巴13)。

4 结论与讨论

(1) 从三个聚类中心趋势线分析可知,研究区地下水平均埋深大于1.8 m的测站地区,地下水埋深逐渐增大,地下水平均埋深小于1.8 m的测站地区,

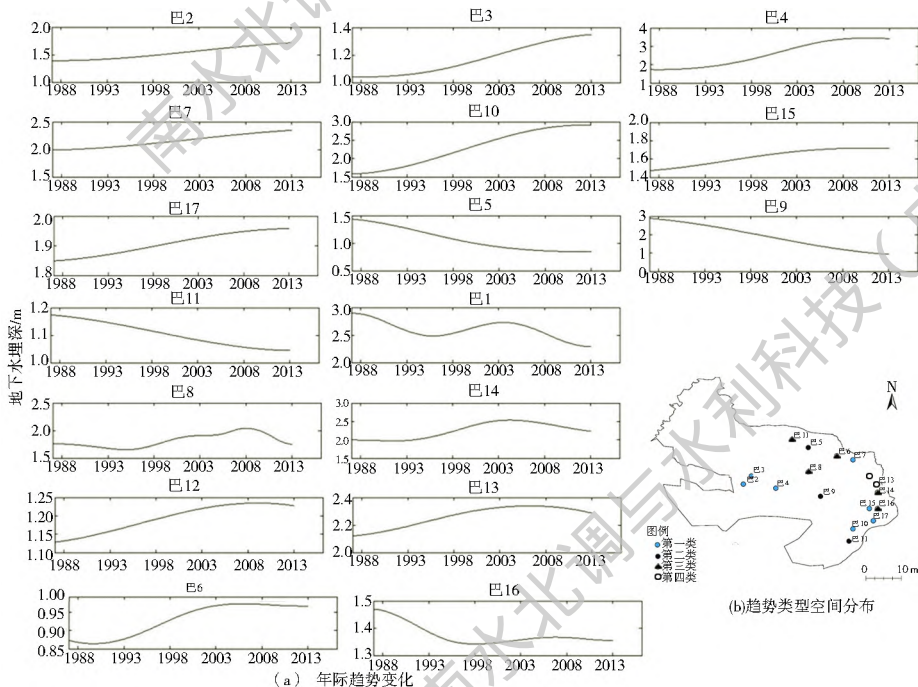


图5 各测站地下水埋深时间变化趋势和不同类型
Fig. 5 Tendency and types of temporal variation of groundwater level at each monitoring well
(a) inter annual trend and (b) spatial distribution of each type

地下水埋深从 1988 年—1993 年缓慢变大而后逐渐减小,到 2008 左右保持稳定。近些年随着磴口县人口的不断增长,加之不合理的利用开采地下水,造成地下水埋深有增大趋势。由于当地政府加强对湿地的保护,使靠近纳林湖等湖泊的测站点地下水埋深小、基本保持稳定。

(2) 绿洲区地下水埋深年内变化特征: 地下水埋深变小期发生在 2 月—6 月、9 月—11 月,埋深变大期发生在 6 月—9 月、11 月—2 月,其中最大值出现在 2 月份,最小值出现在 11 月份,造成这种变化的主要原因是河套地区一年三次的灌溉以及人类和动植物的活动。

(3) 各个测站点年际变化趋势呈现四种不同类型,分别为单调上升、单调递减、先下降后上升再下降、先上升后下降。从空间上分析 17 个测站,地下水埋深逐渐增加的站大都位于人口密集的地区,比如巴 10 点位于巴彦淖尔镇附近,离县城最近,其地下水埋深增加幅度最大,其次是巴 4 点,位于纳林套海农场。由于对湿地的保护,巴 5、巴 9、巴 11 测站地下水埋深均有不同程度的减小。

(4) 磴口县处于荒漠绿洲交错带,生态环境脆弱,一旦破坏难以恢复。降雨稀少,蒸发强烈,水资源大都由黄河侧渗的地下水进行补给,因此合理利用地下水资源,进一步加强对湿地的保护成为重中之重。

参考文献(References):

[1] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等.西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1295-1304.(CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295-1304. (in Chinese))

[2] 李慧卿,李慧勇,李清河,等.乌兰布和沙漠东北缘地下水对白刺生长的影响[J].林业科学,2011,47(11):25-30.(LI Huiqing, LI Huiyong, LI Qinghe, et al. Impact of groundwater depth on growth of *Nitraria tangutorum* on the northeast of ulanbuh desert[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 25-30. (in Chinese))

[3] 唐克旺,唐蕴,李原园,等.地下水功能区划体系及其应用[J].水利学报,2012,43(11):1349-1356.(TANG Kewang, TANG Yun, LI Yuan yuan, et al. Technical system of functional division for groundwater and its application in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(11): 1349-1356. (in Chinese))

[4] 徐永亮,于静洁,王平,等.额济纳三角洲地下水年内动态变化特征分类分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(4):135-140.(XU Yongliang, YU Jingjie, WANG Ping, et al. Classification of annual dynamic of groundwater depth in Ejina delta

[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(4): 135-140. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2013.04.035

[5] 赵洁,徐宗学,周剑.黑河中游过去 20 年地下水位空间变异性分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(8):172-178.(ZHAO Jie, XU Zongxue, ZHOU Jian. Spatial variation of groundwater in middle stream of The Heihe River Basin during past two decades[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(8): 172-178. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2011.08.027

[6] 杨怀德,冯起,郭小燕.1999-2013 年民勤绿洲地下水埋深年际变化动态及影响因素[J].中国沙漠,2017,37(3):1-9.(YANG Huai de, FENG Qi, GUO Xiaoyan. Variation of groundwater depth and its influence factors in the Minqin oasis in 1999-2013[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(3): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1009-694X.2016.00077

[7] 肖彩虹,郝玉光,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北部人工绿洲地下水位动态变化研究[J].防护林科技,2013,12(12):1-3.(Xiao Cai hong, Hao yu guang, Xin Zhi ming, et al. Dynamic Changes of Groundwater Level at Artificial Oasis in Northeastern Ulan Buh Desert[J]. Protection Forest Science and Technology, 2013, 12(12): 1-3. (in Chinese)) DOI: 10.13601/j.issn.10055215.2013.12.013

[8] 张殷钦,胡伟,刘俊民.基于 R/S 分析法的地下水位动态变化趋势分析[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(12):4912-4916.(ZHANG Yinqin, HU Wei, LIU Junmin. Groundwater level regime variation trend on basis of rescaled range analysis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(12): 4912-4916. (in Chinese))

[9] 孙娴,林振山.经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征[J].地理学报,2007,62(11):1132-1141.(SUN Xian, LIN Zhen shan. The regional features of temperature variation trends over China by empirical mode decomposition method[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(11): 1132-1141. (in Chinese))

[10] Huang J, Xia Z, Zhou S, et al. Spatiotemporal analysis of malaria vectors in national malaria surveillance sites in China[J]. Parasite Vector, 2015, 8(1): 146. DOI: 10.1186/s13071-015-0741-5

[11] 刘芳,郝玉光,张景波,等.磴口县土地景观变化遥感监测研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009(3):112-116.(LIU Fang, HAO Yu guang, ZHANG Jing bo, et al. Study on landscape changes for various land utilization types by using remote sensing in Dengkou county[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Science and Technology, 2009(3): 112-116. (in Chinese))

[12] 高儒,温俊,周敏,等.浅谈磴口县水资源现状及保护利用对策[J].内蒙古水利,2013(3):44-45.(GAO Ru, WEN Jun, ZHOU Min, et al. Protection and utilization of water resources in Dengkou county[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2013(3): 44-45. (in Chinese))

(下转第 79 页)

- IR in quantitative analysis of multi gases [D]. Taiyuan: North University of China, 2011. (in Chinese)
- [14] 方彩婷. 基于 BP 神经网络的图像识别与跟踪研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006. (FANG Cai ting. Study of image recognition and tracking based on BP neural network [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y858729
- [15] 张雨浓, 陈俊维, 刘锦荣, 等. 基于权值与结构确定法的单极 Sigmoid 神经网络分类器 [J]. 计算机应用, 2013, 33(3): 766-770, 809. (ZHANG Yu nong, CHEN Jun wei, LIU Jin rong, et al. Unipolar sigmoid neural network classifier based on weights and structure determination method [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(3): 766-770, 809. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1087. 2013. 00766
- [16] 束志恒. 化学化工数据挖掘技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (SHU Zhi heng. Research on the data mining in chemistry and chemical engineering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [17] 李辉. 提高密度泛函理论方法计算吸收能的精度: 神经网络和遗传算法[D]. 长春: 东北师范大学, 2009. (LI Hui. Improving the accuracy of density-functional theory calculation for absorption energies: neural network and genetic algorithm [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2009. (in Chinese))
- [18] 田志伟. 贝叶斯神经网络在股票预测中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2011. (TIAN Zhi wei. A pplication of Bayesian neural network on stock forecasting [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011. (in Chinese))
- (上接第 54 页)
- [13] 于强, 岳德鹏, 郝玉光, 等. 磴口县荒漠绿洲景观特征及时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 178-183. (YU Qiang, YUE De peng, HAO Yu guang, et al. The spatial and temporal variations of oasis desert landscape in Dengkou County [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(4): 178-183 (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2016. 133
- [14] 磴口编纂委员会. 磴口县志(1988-2010) [M]. 内蒙古文化出版社, 2014. (Dengkou Compilation Committee. Dengkou county annals(1988-2010) [M]. Hulun Buir: Inner Mongolia Culture Press, 2014. (in Chinese))
- [15] Hu M G, Jia L, Wang J F, et al. Spatial and temporal characteristics of particulate matter in Beijing, China using the Empirical Mode Decomposition method [J]. Science of the Total Environment, 2013, 458-460: 70-80. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2013. 04. 005
- [16] 赵睿. 扩散距离下的 kernel K-means 聚类算法的改进[D]. 清华大学, 2011. (ZHAO Rui. Clustering with kernel K-means and diffusion distance [D]. Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [17] 孙小龙, 刘耀辉, 晏锐. 经验模态分解法在地下水资料处理中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2011(2): 80-83. (SUN Xiao long, LIU Yao wei, YAN Rui. Application of empirical mode decomposition method to ground water data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011(2): 80-83 (in Chinese)) DOI: 10. 14075/j. jgg. 2011. 02. 034
- [18] 刘慧婷, 倪志伟, 李建洋. 经验模态分解方法及其实现[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(32): 44-47. (LIU Hui ting, NI Zhi wei, LI Jian yang. Empirical mode decomposition method and its implementation [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(32): 44-47. (in Chinese))
- [19] 王婷. EMD 算法研究及其在信号去噪中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010. (WANG Ting. Research on EMD algorithm and its application in signal denoising [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese))
- [20] Wang D, Tang L, Liu H, et al. Application of structural equation models for elucidating the ecological drivers of anopheles sinensis in the three gorges reservoir [J]. PLoS One, 2013, 8(7): e68766. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0068766
- [21] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. On empirical mode decomposition and its algorithms [C]. Proceedings of IEEE EURASIP workshop on nonlinear signal and image processing, 2003.