

策勒绿洲地下水和地表覆被时空变化的研究

高宇婷^{1,2,3}, 于洋^{1,2}, 孙凌霄^{1,3}, 范留飞^{1,3}, 于瑞德^{1,3,4}

(1.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;

2.新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,新疆策勒 848300;

3.中国科学院大学,北京 100049;4.烟台大学环境与材料工程学院,山东烟台 264005)

摘要:策勒绿洲是新疆典型的荒漠绿洲区,地下水是维持该绿洲及过渡带植被生长的关键因素,以绿洲灌区为主体,以2008—2015年地下水时空变化为主线,采用遥感、GS+地统计学、优化K-means聚类和空间信息叠加等方法分析绿洲地下水和地表覆被的变化特征。结果表明:(1)绿洲地下水埋深变幅最大是11号井,为9.66 m;变幅最小是25号井,为0.1 m;地下水埋深存在明显的空间自相关,相关距离为11.852 km;绿洲东北部地下水埋深明显下降,下降区域面积为184.85 km²,占绿洲面积的72%;(2)对绿洲地下水埋深进行优化K-means聚类分区,结果分为4个子区,其中第一、第二聚类中心的地下水埋深均呈现下降趋势;(3)2000—2015年绿洲土地覆盖类型发生较大转变,林地面积显著性减少了26.02 km²,草地面积增加了11.15 km²,农田向东北部明显扩增;(4)绿洲不同地表覆被类型的地下水埋深从深到浅依次为:农田>林地>草地。

关键词:地下水埋深;地表覆被;时空变化;K-means聚类;叠加分析;荒漠绿洲

中图分类号:S273.4;P641 **文献标志码:**A

Spatio-temporal variability of groundwater and land coverage in Qira oasis

GAO Yuting^{1,2,3}, YU Yang^{1,2}, SUN Lingxiao^{1,3}, FAN Liufei^{1,3}, YU Ruide^{1,3,4}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Qira, Xinjiang 848300, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract: Qira oasis is a typical desert oasis in Xinjiang and groundwater is the key factor to maintain vegetation growth in the oasis and transition zone. In this paper, oasis irrigation area as the main body and spatio-temporal variations of groundwater from 2008 to 2015 were taken as the main line, remote sensing, GS+ geostatistics, optimization K-means clustering and spatial overlay analysis were used to analyze the variations characteristics of groundwater and land coverage in oasis. The results indicated that: (1) The maximum variation of groundwater depth in oasis was well 11 (9.66 m). The minimum amplitude of variation was well 25 (0.1 m). The groundwater depth had obvious spatial auto-correlation, and the space-related distance was 11.852 km. The groundwater depth in the northeast of the oasis decreased significantly, the area of the descending area was 184.85 km², accounting for 72% of the oasis area. (2) Through the K-means clustering on the groundwater depth of oasis, it was divided into four sub-areas, among which the groundwater depth of the first and second clustering center all decreases. (3) From 2000 to 2015, the land cover type of oasis changed greatly, woodland area decreased significantly by

收稿日期:2020-03-12

修回日期:2020-05-02

基金项目:新疆维吾尔自治区高层次人才引进工程(Y942171);中国科学院“西部青年学者”B类(2018-XBQNXZ-B-017);中国科学院百人计划C类(Y931201)

作者简介:高宇婷(1995-),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为干旱区水文。E-mails: gaoyuting18@mails.ucas.ac.cn

通信作者:于洋(1986-),男,新疆乌鲁木齐人,副研究员,主要从事水文生态与建模研究。E-mails: yuyang@ms.xjb.ac.cn

26.02 km², while the grassland area increased by 11.15 km², farmland expanded significantly in the northeastern area. (4) The groundwater burial depth of different land coverage types in oasis was: farmland > woodland > grassland.

Keywords: groundwater depth; land coverage; spatio-temporal variability; K-means clustering; overlay analysis; desert oasis

干旱区水资源极其稀缺,存在水的地方就发育出绿洲,所以绿洲扩张的核心制约因素是水资源,然而大部分干旱区地表水供给不足,降水量小,因此绿洲对地下水的依赖愈发显著^[1]。在新疆绿洲生态保障的关键问题也归根于水资源,我国绿洲60%以上分布在新疆,新疆绿洲面积只占其总面积的8%,却承载了90%以上的耕地、人口及经济生产总值^[2]。在塔克拉玛干沙漠南缘,昆仑山积雪消融发育为季节性河流,为下游提供丰沛的水资源,形成了具有典型代表的策勒绿洲^[3]。策勒绿洲植被生存的水资源包括地表水、降水和地下水。由于地表水具有不均衡性和有限性,因此在很大程度上绿洲地表覆被主要利用降水和地下水来维持正常生长,但策勒绿洲降水对绿洲的补给作用微弱,且依据和田地区用水计划,策勒河季节变化性大,农田灌溉中须辅之于地下水的开采。策勒绿洲农业灌溉的水资源约18%从地下水中获取^[4],多年来策勒绿洲农田面积不断扩增,地下水的开采规模不断扩大,持续抽取地下水使得地下水位不断下降。带来的影响是绿洲边缘的天然植被面临生存的威胁、绿洲面临退化的风险^[5-8]。

目前国内外有许多关于绿洲动态及地下水的研究,地理信息系统、地下水建模、数值模拟、趋势分析、地下水干旱指数等多种方法均已经应用于分析地下水的时空动态变化^[9-11]。Langroodi等^[12]结合GIS和ENVI分析了1987—2010年间伊朗绿洲地下水和地表覆被的时空变化。Ainiwaer等^[13]应用地理加权回归和地统计网格法研究中国西北鄂尔多斯察河绿洲地下水位与地表覆被变化的时空动态,发现地下水位在绿洲大部分区域均呈现迅速下降趋势,且地下水位的下降与绿洲农田面积的扩增呈正相关。Liang等^[14]为实现地下水的综合利用,设定一套同时考虑地下水质量、地下水开采引起的沉降以及地表覆被现状的管理方案,以确保安全、可持续地利用地下水,满足当地需求。国内对于绿洲和地下水的研究主要集中在新疆、甘肃、宁夏等省、自治区,杨光和杨怀德^[15-16]利用地统计学分别分析了黑河下游和民勤绿洲的地下水埋深变化。金晓媚和席海洋^[17-18]利用modflow建模先后分析了

黑河下游绿洲地下水的动态变化。艾启阳等^[19]通过构建标准地下水指数分析了黑河中游多年地下水的时空变化。代述勇和蒙波^[20-21]将地统计方法应用于对新疆策勒绿洲地下水空间变异的研究。这些研究揭示了不同地区地下水和地表覆被的变化,同时为分析绿洲和地下水的变化提供了许多成熟的方法,但目前对于绿洲地下水在一定时间范围内的空间上的埋深变化、不同地表覆被类型和地表覆被的地下水、地表水分配特征的分析较少。

本文依托策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观察研究站长期监测资料,分析了策勒绿洲地下水的时空变化特征及绿洲不同地表覆被的地下水和地表水分配特征,为合理利用绿洲地下水和规划作物分布提供重要保证,同时为分析干旱区绿洲的地表覆被和水资源平衡提供了方法和科学依据,最终为绿洲水资源优化配置和可持续发展提供理论支撑。

1 研究区概况

策勒绿洲地处塔克拉玛干沙漠南缘,地理坐标为北纬35°18′~39°18′,东经80°03′~82°10′。绿洲主要位于冲洪积细土平原,该区域南部的潜水含水层较厚且富水性强,北部地区潜水含水层较薄且富水性一般,矿化度小于1.5 g·L⁻¹,水质较好。策勒地势南高北低,海拔在1 296.5~1 370.5 m之间,中部发育山麓倾斜平原。策勒河发源于昆仑山北端,是策勒绿洲唯一灌溉来源,年均径流量为1.28×10⁸ m³。策勒绿洲气候为暖温带干旱荒漠型,年均气温11.9℃,多年极端最高气温为42.0℃,极端最低气温为-23.9℃,年平均降水量仅为35.1 mm,蒸发量接近2 595.3 mm,全年无霜期在230 d左右,全年日照总时长在2 686 h以上。

2 材料与方法

2.1 数据来源

研究区建有策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观察研究站,地理坐标80°43′45″E,37°00′57″N,海拔高度1 318.6 m,在绿洲范围内目前共设有244个灌溉井,并建立了25个监测井,获取到监测井

2008—2015 年的地下水位数据。绿洲土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 策勒绿洲具体作物分布图通过遥感解译、实地勘测验证和 ArcGIS 软件生成。

2.2 研究方法

基于多年地下水位数据, 首先用 W 检验方法判断其正态性, 用于半变异函数拟合, 采用拟合的最优模型进行普通克里金插值分析得到地下水的时空变化图, 并利用 K-means 方法对绿洲地下水埋深进行聚类分区, 再进一步分析多年各聚类中心的变化趋势, 最后利用 ArcGIS 进行叠加分析得出策勒绿洲不同地表覆被的地下水、地表水分配特征。

2.2.1 W 检验 W 检验全称 Shapiro - Wilk 检验^[22], 适用于小样本容量 ($8 \leq n \leq 50$), 计算可得到一个相关系数, 越接近 1 就表明数据和正态分布拟合的程度越高。其检验步骤如下:

(1) 将样本按从小到大顺序排列, 使 $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n$;

(2) 计算 $W = \frac{(\sum_{i=1}^n k_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$, 其中 $\bar{y} = (y_1 + \dots + y_n)/n$ 是样本的平均值, $k = \frac{m'V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}}$, V 是有序统计量 (y_1, \dots, y_n) 的协方差矩阵, m 是变量 (y_1, \dots, y_n) 的期望组成的向量;

(3) 若 W 值小于判断临界值 (可查标准正态分布表得知), 则舍弃正态性假设; 若 $W > W_{\alpha}$, 接受正态性假设。

2.2.2 半变异函数 变异函数是指区域变量 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 之间增量平方的数学期望值, 即区域变量间的方差差值。由于实测的数据量有限, 因此通常应用半变异函数来分析空间格局。其表达式为:

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

式中, $\gamma(h)$ 为半变异函数, $Z(x_i)$ 为区域化随机变量, h 是滞后距即步长, $Z(x_i)$ 是空间点为 x_i 时的值, $Z(x_i + h)$ 是在 $Z(x_i)$ 偏离空间点 x_i 的 h 处的样本数据值, $N(h)$ 是样本数据对数。

通过半变异函数做出的曲线图反映了观测点与其附近观测点之间的空间关系, 其函数曲线图涉及到 4 个重要参数, 分别是: 块金值 (C_0)、基台值 (C)、变程 (a)、基底效应 (η)。块金值越大, 表明该研究区域上由于随机因素引起的空间异质性越大;

基台值越大则表明研究区空间变异程度越大; 而块金值和基台值的比值被称为基底效应, 该值能够定量地反映地下水埋深的空间相关性, 数值越大, 表明由于随机因素引起的空间异质性程度较高, 反之, 则是由于结构因素引起的空间异质性较高, 若基底效应值接近 1, 则表明该地区具有恒定的空间异质性。依据空间相关性的分级标准, 当基底效应小于 25% 时, 呈现为强烈的空间相关性, 当基底效应为 25% ~ 75% 时, 呈现为中等的空间相关性, 当基底效应大于 75% 时, 变量之间的空间相关性很弱^[23-24]。半变异函数最优理论模型的选择, 主要是取决于决定系数 R^2 和残差平方和 RSS , 决定系数越大, 残差平方和数值越小, 表明半变异函数模型的拟合效果越好^[25-26]。

2.2.3 克里金插值法 克里金插值是结合原始数据的区域特征和半变异函数原理对研究区域内未知点进行的无偏最优的地统计学估计方法。不仅考虑未知点位置与已知点的位置关系, 还考虑了待估计点与周围已知点的空间相关性。本次研究采用的普通克里金插值认为区域化变量的期望值是未知的, 通过确定待插点周围采样点的权重来求取待插点的近似值。适用于研究在空间分布上既有随机性又有结构性, 或空间相关性的区域化变量^[27-28]。

2.2.4 K-means 聚类 聚类分析是依据样本之间的相似程度或差异性, 对变量采样所获得的样本进行归组并类, 本文采用的是动态聚类中的 K-means 聚类, 判别准则函数定义为^[29-30]:

$$E = \sum_{i=0}^k \sum_{x \in C_i} |x - x_i|^2 \quad (2)$$

式中, E 为平方误差, k 为聚类数目, 原始数据分 k 类 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$, x 为类 C_i 内的任意样本点, m_i 为类内 C_i 所有样本点的平均值, 即聚类中心, 算法步骤如下:

(1) 首先用拐点图来确定聚类的数目 k , 基本原理是随着聚类数目的增加组内误差平方和发生变化, 关系图中存在的“肘点”即为最佳聚类数目。

(2) 计算其余样本数据与各选定类别中心的欧式距离, 按距离最短准则将样本数据划分为与其距离最短的聚类中心代表的类。

(3) 使用每个聚类中样本的均值为新的聚类中心, 重新计算各类别的聚类中心, 计算各类内所有数据到新聚类中心的距离平方和聚类中心未改变且准则函数趋于最小。

(4) 重复前两步, 直到聚类中心不再变化。

3 结果与分析

3.1 绿洲地下水埋深变化统计特征

策勒绿洲内 25 个监测井的地下水位数据统计分析如表 1 所示。地下水埋深最深的是 1 号井,为 71.95 m,最浅的是 18 号井,为 1.4 m。地下水埋深变幅最大的是 11 号井,为 9.66 m;变幅最小的是 25 号井,为 0.1 m。根据变异系数(CV)的划分等级为:弱变异性, $CV < 0.1$;中等变异性 $0.1 < CV < 1$;强变异性, $CV > 1$ 。从表 1 可以看出有 9 个监测井位地下水位表现为中等变异性,其中变异系数最大的为 7 号井位(0.311),最小变异系数为 25 号井(0.004),说明绿洲地下水埋深动态变化在时间上存在差异性。

3.2 绿洲地下水埋深时空变异性

将地下水埋深数据进行正态性检验,结果显示 $W = 0.87207$, $P = 0.0057 < 0.05$,所以拒绝原假设,分布不符合正态性,进行对数变换,然后用于半变异函数分析,通过交叉验证指标选择最佳的函数模型。由表 2 可知,高斯模型的均方根最小,标准化均方根误差和决定系数最接近 1,且模型的参数设定

和趋势线的拟合效果均好,这与蒙波等人^[21]的研究结果相符。因此选择高斯模型分析地下水埋深的空间异质性,从表 2 可以看出块金值和基台值的比值远小于 25%,则说明地下水的埋深存在明显的空间自相关,且自相关距离为 11.852 km,表示在这个范围内地下水埋深的空间异质性由结构性部分引起,超过这个范围则不存在相关性。

利用半变异函数和交叉验证得到的高斯模型对绿洲地下水埋深进行普通克里金插值,发现策勒绿洲地下水埋深呈现由南向北减小/变浅的趋势,与绿洲地形起伏变化较为吻合。分析 2008—2015 年绿洲地下水埋深空间变化特征,结果如下图 1 到图 3 所示。如图 1 所示,2008—2010 年地下水埋深下降区域集中在绿洲东南部,表明在此时间段内该区域地下水的开采程度较大,下降最大值达到 3.45 m。从图 2 可知,在 2011—2015 年期间地下水埋深下降区域占据绝大部分绿洲面积,下降最深处达到 3.56 m。如图 3 所示,在整个研究时段 2008—2015 年内地下水埋深下降最大值达到 3.18 m,下降区域的面积为 184.85 km²,占绿洲面积的 72%,而在绿洲南部和西北部地下水埋深有所回升。

表 1 2008—2015 年地下水埋深描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistical analysis of groundwater depth from 2008 to 2015

井号 Well number	变幅 Amplitude	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Average	标准差 Standard deviation	方差 Variance	变异系数 Coefficient of variation
1	9.150	62.800	71.950	66.702	3.266	10.667	0.049
2	3.070	29.000	32.070	30.185	1.157	1.338	0.038
3	3.770	36.080	39.850	37.830	1.829	3.344	0.048
4	4.300	38.950	43.250	41.028	1.633	2.666	0.040
5	2.220	38.500	40.720	39.893	0.838	0.702	0.021
6	2.080	18.070	20.150	19.078	0.841	0.708	0.044
7	9.350	9.820	19.170	11.750	3.653	13.343	0.311
8	3.100	17.400	20.500	19.187	1.061	1.126	0.055
9	2.470	20.100	22.570	21.348	1.085	1.177	0.051
10	3.558	23.813	27.370	25.177	1.446	2.091	0.057
11	9.660	16.800	26.460	23.038	3.271	10.700	0.142
12	4.450	11.550	16.000	14.275	1.479	2.186	0.104
13	2.990	4.920	7.910	6.723	1.239	1.534	0.184
14	3.550	18.350	21.900	20.082	1.388	1.926	0.069
15	2.290	14.800	17.090	15.822	0.915	0.836	0.058
16	3.340	8.600	11.940	10.593	1.195	1.429	0.113
17	5.480	3.850	9.330	6.048	1.825	3.330	0.302
18	0.980	1.400	2.380	1.915	0.425	0.181	0.222
19	2.020	14.050	16.070	14.741	0.720	0.518	0.049
20	0.850	4.400	5.250	4.807	0.347	0.120	0.072
21	1.570	1.750	3.320	2.518	0.557	0.310	0.221
22	3.680	4.850	8.530	6.393	1.502	2.256	0.235
23	1.380	8.420	9.800	9.298	0.570	0.325	0.061
24	0.550	4.300	4.850	4.475	0.260	0.068	0.058
25	0.100	11.950	12.050	12.013	0.048	0.002	0.004

表 2 地下水的半变异函数模型及其参数

Table 2 Semi-variogram model of groundwater and its parameters

模型 Model	块金值 Nugget	偏基台值 Partial sill	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill	变程 Range/km	决定系数 R^2	标准化均方根误差 RMSDE
球状模型 Spherical model	0.001	0.187	0.188	0.005	11.852	0.809	0.541
高斯模型 Gaussian model	0.003	0.253	0.256	0.012	11.852	0.879	1.253
指数模型 Exponential model	0.001	0.169	0.170	0.006	11.852	0.727	0.505

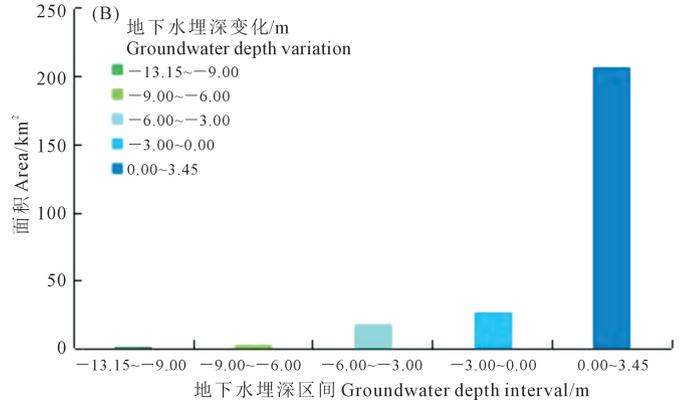
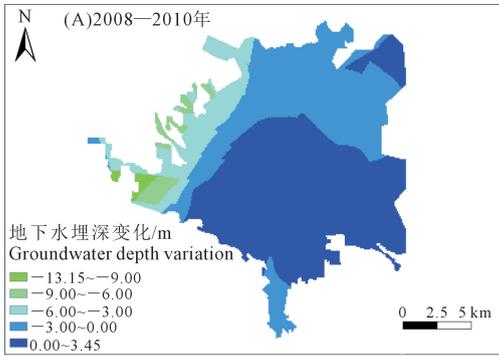


图 1 2008—2010 年地下水埋深变化空间分布 (A) 和地下水埋深变化面积统计 (B)

Fig.1 Spatial distribution of groundwater depth variation (A) and statistics of groundwater depth variation area (B) from 2008 to 2010

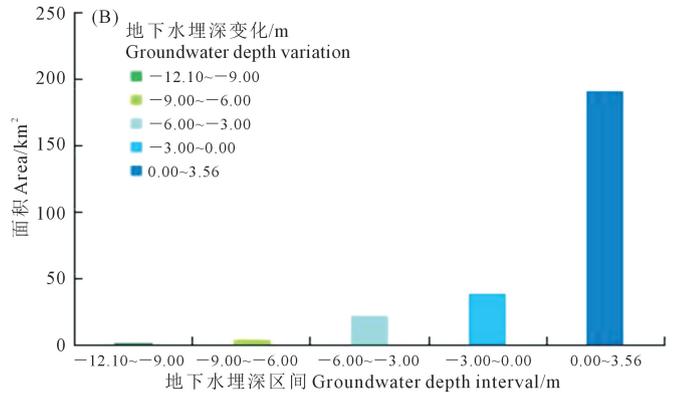
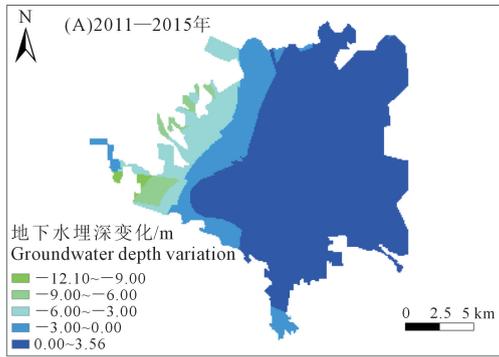


图 2 2011—2015 年地下水埋深变化空间分布 (A) 和地下水埋深变化面积统计 (B)

Fig.2 Spatial distribution of groundwater depth variation (A) and statistics of groundwater depth variation area (B) from 2011 to 2015

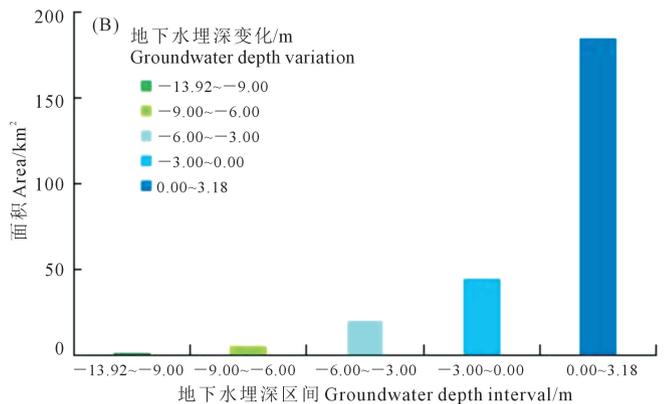
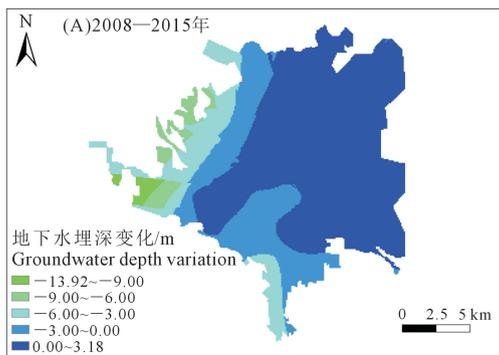


图 3 2008—2015 年地下水埋深变化空间分布 (A) 和地下水埋深变化面积统计 (B)

Fig.3 Spatial distribution of groundwater depth variation (A) and statistics of groundwater depth variation area (B) from 2008 to 2015

3.3 绿洲地下水埋深 K-means 聚类分区

基于策勒绿洲 25 口地下水观测井数据,通过优化 K-means 聚类将绿洲划分为图 4A 所示 4 个子区。第一聚类中心的均值为 6.96 m,第二聚类中心的均值为 19.19 m,第三聚类中心的均值为 37.23 m,第四聚类中心的均值为 66.7 m。从分区 1 到分区 4,地下水埋深依次增加,四个聚类中心的差值达到 59.74 m。通常考虑到不同地区植被种类、人为活动、作物需水量的不同,研究整个策勒绿洲地下水变化时,可以依据聚类结果划分为若干子区,以便更为细致、准确地反映地下水的变化特征,因为地下水埋深的变化总是遵循相邻区域内的变化是相互关联、具有一定相似性。根据聚类中心的趋势变化(图 4B)可以看出第一聚类中心的地下水埋深增加值为 1.25 m,第二聚类中心的地下水埋深增加值为 0.26 m,第三聚类中心的地下水埋深基本保持不变,而第四聚类中心的地下水埋深上升值为 3.91 m。

3.4 绿洲地表覆被时空变化特征

基于遥感解译和策勒站提供的资料,得到策勒绿洲地表覆被、农作物、灌溉渠系和机井分布如下图所示。由图 5A 和图 5B 可知绿洲内建有 244 口灌溉井和灌溉渠系,在绿洲西北部发育的梭梭、红柳等深根植物仅靠直接获取地下水维持生存,绿洲西北部的红枣种植区域未修建灌溉渠系,渠系与作物分布匹配程度较差。根据策勒绿洲地表覆被图(图 5C)所示,绿洲在 2000 年时耕地面积为 79.18 km²,林地面积 48.37 km²,高覆盖草地(植被覆盖率 60%~90%)面积为 29.32 km²,中覆盖草地(植被覆盖率 20%~60%)面积为 10.47 km²,低覆盖草地面积为 10.87 km²(植被覆盖率 5%~20%)。如图 5D 所示,2015 年策勒绿洲高覆盖草地面积为 32.78 km²,中等覆盖草地面积为 24.29 km²,低覆盖草地面积为 4.76 km²,林地面积为 22.35 km²,农田总面积达到 85.51 km²。种植的粮食作物主要为小麦和玉米,除单独种植外还与红枣、核桃、石榴这三种经济作物实行套种,其中红枣、核桃、石榴面积总和占绿洲农田总面积的 81.54%。最后,结合 2000 年和 2015 年的策勒地表覆被分布图,知 2000—2015 年间农田面积呈现出由中间向东北部扩增趋势,绿洲的林地面积减少了 26.02 km²,9.69 km²转换为耕地和 10.29 km²退化为沙漠,15 a 间策勒绿洲地表覆被各类型的面积和分布发生了很大的转变。

3.5 绿洲地下水、地表水的分配特征

依据绿洲渠系分布结构对流入绿洲 1.28×10^8 m³的策勒河流量进行分配,其中渠系耗损经验系数

设定为 0.8。利用空间分析工具得到绿洲地表水分配图如图 6A 所示,可以看出绿洲地表水从南到北逐渐减少,在边缘部分地表分配水量接近零,将严重影响分布在绿洲边缘的作物生长。根据绿洲灌区不同作物需水量绘制图 6B,在图中红色部分代表种植着高需水的作物,而对比图 6A 发现在绿洲边缘地表水分配量极少,可利用水资源量较小,无法获取足够的灌溉水,将对分布在该区域作物的生长和经济效益产生不利影响。

通过将策勒绿洲地表覆被和地下水水位空间信息进行叠加得到表 3。从表 3 可知,居民用地和农田所分布区域的地下水平均埋深最深,不同覆盖程度的草地地下水平均埋深最浅,均在 10 m 以内。再将策勒作物分布图与地下水水位分布图、地表水分配图空间信息叠加得到表 4,将地下水与地表水资源看作一个整体,有助于研究水资源的交互作用,维持生态用水平衡。得出芦苇的地下水平均埋深最浅,其次为草地的地下埋深较浅。绿洲灌区由于常年开采地下水,地下水埋深值均较大,红枣和玉米对应的地下水平均埋深最大达到 48.1 m,核桃和玉米、石榴对应的地下水埋深为 30 m 以下。据研究表明,玉米对水分的需求强烈,耗水量大,在考虑产量和利用效率的前提下,玉米应种植在地表水充足的区域。过渡带植被红柳、梭梭分布区域均无地表水,其中玉米和草地套种分布区域也基本无地表水,因为该区域无渠系分布,不能引策勒河水进行灌溉,无法满足红柳、梭梭、玉米的灌溉需求,只能依靠开采地下水。而石榴、红枣、核桃的分布区域有较充足的地表水,可以考虑适当增加作物面积,进一步充分利用绿洲地表水资源。

4 讨论

1) 策勒绿洲多年以来农田面积明显扩张,灌溉需求不断增加,且绿洲的地表水基本全部用于灌溉粮食作物和经济作物,而边缘分布的红柳、梭梭和部分草地的生长完全依靠地下水。但用水需求与供给时间不同步,导致在需水期大量开采地下水,地下水埋深不断下降。水位的持续下降使得过渡带的植被不断退化,绿洲沙漠化的问题也将愈发的凸显。应当减少对此区域地下水的开采量,防止地下水水位再次降低,并保证补排平衡。

2) 红枣是策勒绿洲当地的主要经济收入,红枣的种植面积超过灌区面积的一半,但目前红枣的种植区域与灌溉渠的匹配较差,需要调整灌溉渠系,使得灌区西部种植的红枣能得到充足的地表水灌溉,

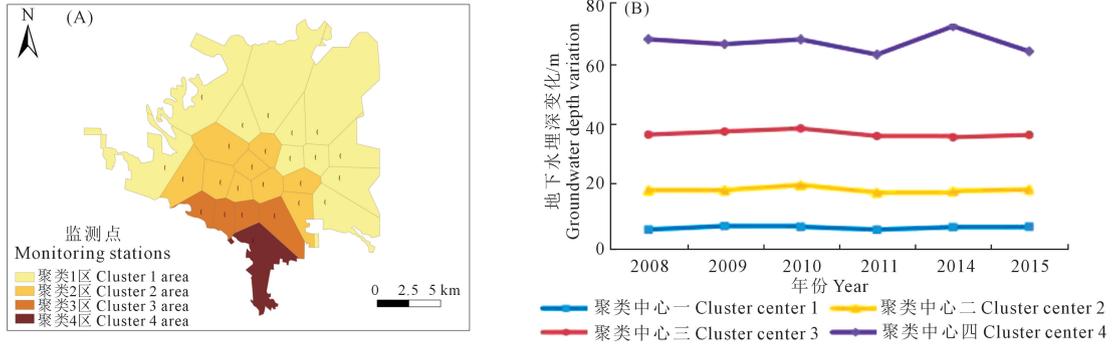


图 4 策勒绿洲地下水监测点 K-means 聚类分区 (A) 和聚类中心变化 (B)

Fig.4 K-means clustering partition groundwater monitoring point (A) and variation trend of cluster center (B) of Qira oasis

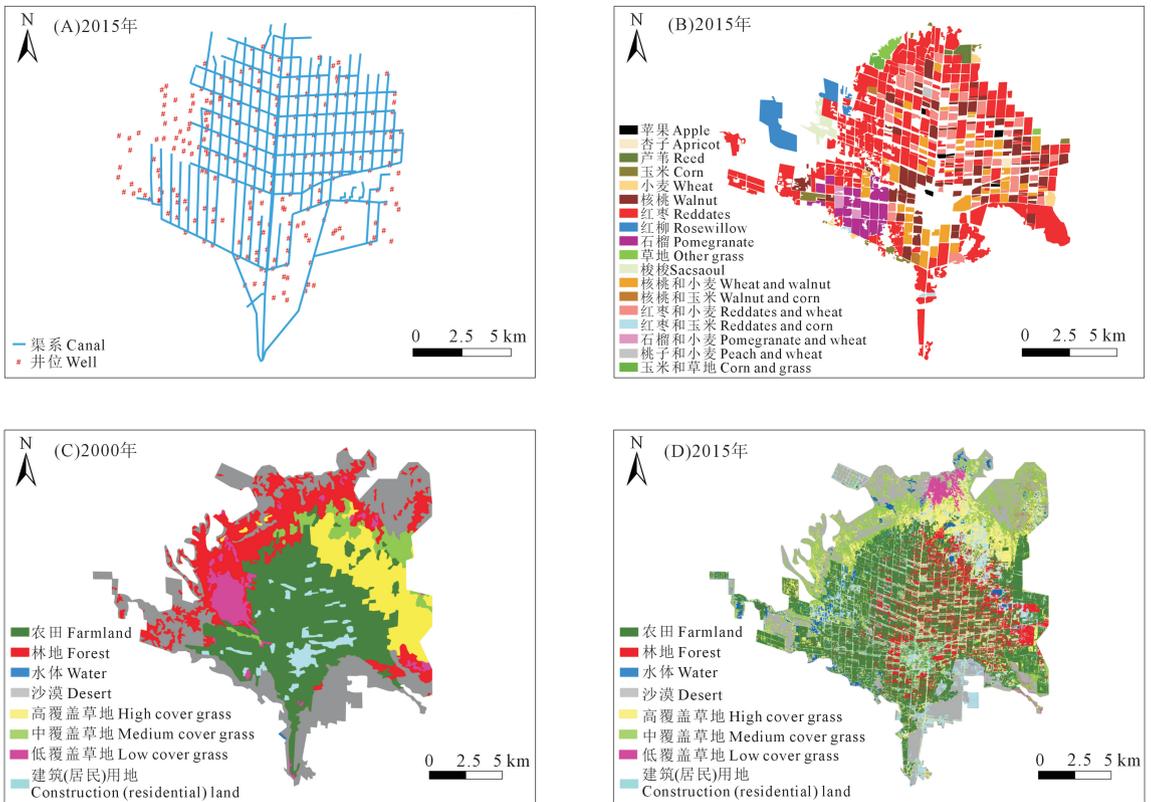


图 5 策勒绿洲地表覆被情况

Fig.5 Land coverage of Qira oasis

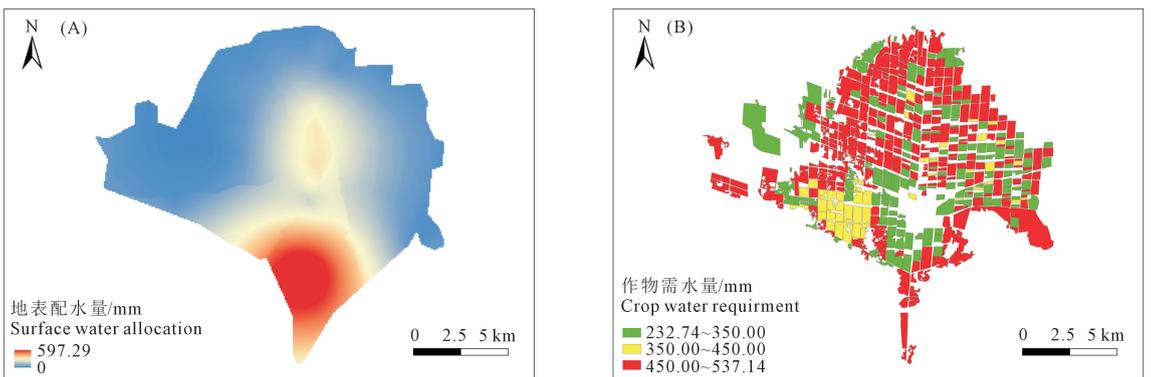


图 6 策勒绿洲地表水分配 (A) 和作物需水分布 (B)

Fig.6 Distribution of surface water (A) and distribution of crop water requirement (B) in Qira oasis

表3 不同地表覆被类型的地下水埋深

Table 3 Groundwater buried depth of different land use types

地表覆被类型 Land coverage type	面积 Area/km ²	地下水平均埋深 Average groundwater depth/m
高覆盖草地 High cover grass	63.42	9.96
中覆盖草地 Medium covered grass	63.83	8.89
低覆盖草地 Low cover grass	21.69	9.27
建筑(居民)用地 Construction (residential) land	49.74	17.50
林地 Forest	35.44	13.28
农田 Farmland	105.04	17.14
水体 Water	14.22	12.72

表4 不同植被对应的地下水埋深和地表水灌溉量

Table 4 Groundwater depth and surface water corresponding to different vegetation

作物类型 Crop types	面积 Area/km ²	地下水平均埋深 Average groundwater depth/m	地表水分配量 Surface water distribution/m ³	每 666.7m ² 灌溉量 Surface water irrigation per unit area/(m ³ · 666.7m ⁻²)
小麦 Wheat	0.68	13.81	1603750.72	333
玉米 Corn	1.06	27.02	5438843.87	508
核桃 Walnut	12.25	17.78	5520409.05	346
核桃和小麦 Walnut and wheat	8.40	25.93	8628260.10	
核桃和玉米 Walnut and corn	0.42	37.96	12974690.76	
红枣 Red dates	45.51	17.34	4162416.81	513
红枣和小麦 Red dates and wheat	8.82	24.46	15114019.64	
红枣和玉米 Red dates and corn	0.21	48.10	16884324.08	
石榴 Pomegranate	5.25	29.43	5526297.38	400
石榴和小麦 Pomegranate and wheat	0.68	26.13	3056377.08	
桃树和小麦 Peach and wheat	0.22	9.84	5910488.41	
苹果 Apple	0.55	15.35	6704833.17	400
杏树 Apricot	0.30	8.20	3049866.57	400
芦苇 Reed	0.77	5.03	203230.45	333
草地 Grass	0.83	5.21	161500.82	333
玉米和草地 Corn and grass	0.47	6.25	0	
红柳 Red willow	4.04	10.02	0	333
梭梭 Sacsaul	1.33	11.46	0	333

5 结论

1)通过对 2008—2015 年的策勒绿洲地下水进行半变异函数分析得知,策勒绿洲的地下水埋深在绿洲大部分区域呈现下降趋势,下降区域集中在东北部,地下水埋深下降面积达到绿洲面积的 72%。对应同时间段的绿洲地表覆被变化,发现农田在东北方向明显扩增,这与地下水埋深下降区域较为吻合。

2)策勒绿洲 2000—2015 年不同地表覆被类型之间发生了较大的转变,沙漠面积和林地面积减少明显,居民建筑用地、农田和草地面积增加,其中居

或者将红枣种植区集中在灌溉干渠附近。且在绿洲灌区内呈现出核桃种植区域较为分散零碎,而石榴种植区域较为集中的分布特点。

3)策勒县的经济收入主要以农业为主,农业人口占绝大部分,绿洲农田面积的扩张成为了满足生活生存需求的必经之路。随之而来的问题是灌溉需求量增大,但策勒河丰水期与作物需水期吻合程度低,为了满足作物的灌溉需求不断扩大地下水的开采程度。基于目前绿洲的地下水、地表水分配特点,应调整作物分布,缓减水资源亏缺并提高作物产量。因此在绿洲地下水埋深较低的区域,应尽量减少布局耗水量大的农作物面积,防止地下水位持续降低,而对于地下埋深较浅的绿洲区域,注意防治土壤的盐碱化,以实现绿洲的可持续发展。

民建筑用地增加最明显。由绿洲作物分布图得知,红枣、核桃、石榴种植面积达到绿洲灌区总面积的 81.54%。

3)对策勒绿洲地下水与不同植被类型的叠加发现,绿洲不同地表覆被类型的地下水埋深从深到浅依次为:农田、林地、草地。芦苇的地下水平均埋深最浅约为 5 m,红柳、梭梭的平均地下水埋深已经达到 10 m 多。有研究表明地下水埋深在 1.5~4 m 之间有利于荒漠自然植物的生长,红柳在地下水埋深增大到 7~8 m 时就严重退化,大部分将枯死^[31-33],可见策勒绿洲地下水埋深极不利于草地植被的生长。由绿洲地表配水和需水对比可知,分布

在边缘的玉米、草地、红柳和梭梭没有分配到地表水,无法满足灌溉需求。

参考文献:

- [1] 王永兴.绿洲生态系统及其环境特征[J].干旱区地理,2000,23(1):7-12.
- [2] 周立华,王伟伟,孙燕,等.近百年来中国西北地区绿洲兴衰演变及影响因素研究[J].环境保护,2019,47(5):39-42.
- [3] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等.塔里木河下游地下水位对植被的影响[J].地理学报,2003,58(4):542-549.
- [4] Xue J, Gui D W, Zhao Y, et al. A decision-making framework to model environmental flow requirements in oasis areas using Bayesian networks[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 1209-1222.
- [5] 钱剑平,赵建平,桂东伟,等.策勒绿洲生态与灌溉用水对地下水埋深的影响[J].水土保持通报,2018,38(1):96-102.
- [6] 代述勇,雷加强,赵景峰,等.策勒西部荒漠-绿洲过渡带地下水特征及生态影响分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(8):99-103.
- [7] Wang G X, Cheng G D. Water resource development and its influence on the environment in arid areas of China — the case of the Hei River basin[J]. *Journal of Arid Environments*, 1999, 43(2): 121-131.
- [8] Zhang X F, Zhang L H, He C S, et al. Quantifying the impacts of land use/land cover change on groundwater depletion in Northwestern China — a case study of the Dunhuang oasis [J]. *Agricultural Water Manage*, 2014, 146:270-279.
- [9] Yu Y, Disse M, Yu R D, et al. Large-scale hydrological modeling and decision-making for agricultural water consumption and allocation in the main stem Tarim River, China [J]. *Water*, 2015, 7(6): 2821-2839.
- [10] Theodossiou N, Latinopoulos P. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(7): 991-1000.
- [11] 黄玲,瓦哈甫·哈力克,卢龙辉.克里雅绿洲浅层地下水与土壤特征的局部空间关系[J].干旱地区农业研究,2018,36(6):255-262.
- [12] Langroodi S H M, Masoum M G, Nasiri H, et al. Spatial and temporal variability analysis of groundwater quantity to land-use/land-cover change in the Khanmirza agricultural plain in Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(10): 8385-8397.
- [13] Ainiwaer M, Ding J L, Wang J J, et al. Spatio-temporal dynamics of water table depth associated with changing agricultural land use in an arid zone oasis [J]. *Water*, 2019, 11(4): 673.
- [14] Liang C P, Xu W S, Chen Y C, et al. The combined use of groundwater quality, drawdown index and land use to establish a multi-Purpose groundwater utilization plan[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(12):4231-4227.
- [15] 杨光,栗晓玲.基于随机森林的黑河中游地下水埋深变化及成因[J].水土保持研究,2017,24(1):109-114.
- [16] 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):562-570.
- [17] 金晓媚,黑河下游额济纳绿洲荒漠植被与地下水水位埋深的定量关系[J].地学前缘,2010,17(6):181-191.
- [18] 席海洋,冯起,司建华,等.黑河下游绿洲 NDVI 对地下水水位变化的响应研究[J].中国沙漠,2013,33(2):574-582.
- [19] 艾启阳,栗晓玲,张喜喜.标准化地下水指数法分析黑河中游地下水时空演变规律[J].农业工程学报,2019,35(10):69-74.
- [20] 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.
- [21] 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——以策勒绿洲为例[J].水土保持通报,2016,36(2):209-215.
- [22] Mi L N, Tian J C, Si J N, et al. Evolution of groundwater in Yin-chuan oasis at the upper reaches of the yellow river after water-saving transformation and its driving factors [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1304.
- [23] 李小玉,宋冬梅,肖笃宁.石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异[J].地理学报,2005,60(2):319-327.
- [24] Grogan D S, Zhang F, Prusevich A, et al. Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 161-175.
- [25] Bhunia G S, Keshavarzi A, Shit P K, et al. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and irrigation using GIS and geostatistics techniques in semiarid region of Neyshabur, Iran[J]. *Applied Water Science*, 2018, 8(6):168.
- [26] 苏里坦,宋郁东,张展羽.新疆渭干河流域地下水含盐量的时空变异特征[J].地理学报,2003,58(6):854-860.
- [27] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(1-2): 113-129.
- [28] 刘海丽,齐善忠,刘丽娟,等.基于地统计的新疆阜康绿洲地下水埋深空间异质性[J].生态学杂志,2018,37(5):1484-1489.
- [29] 冯克鹏,田军仓,沈晖.基于 K-means 聚类分区的西北地区近半个世纪气温变化特征分析[J].干旱区地理,2019,42(6):1239-1252.
- [30] Kanungo T, Mount D M, Netanyahu N S, et al. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 881-892.
- [31] Bruehlheide H, Jandt U, Gries D, et al. Vegetation changes in a river oasis on the southern rim of the Taklamakan Desert in China between 1956 and 2000[J]. *Phytocoenologia*, 2003, 33(4): 801-818.
- [32] Yu Y, Yu R D, Chen X, et al. Agricultural water allocation strategies along the oasis of Tarim River in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 24-36.
- [33] 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.