

呼图壁县地下水位动态对土地利用变化响应

胡鑫^{1,2}, 吴彬^{1,2}, 高凡^{1,2}, 杜明亮^{1,2}, 章文亭^{1,2}

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 研究干旱缺水地区地下水位(埋深)时空动态特征及对土地利用变化的响应, 对于加强农业地区土地利用和地下水资源管理具有重要意义。以呼图壁县平原灌区为研究区, 基于地统计学和 GIS 结合技术, 应用普通克里金插值拟合研究区 2000 年、2010 年及 2018 年地下水埋深时空分布, 并且利用同期遥感数据解译生成了土地利用类型图, 叠加分析不同时期地下水埋深变化与对应时期的土地利用类型转移之间的响应关系。结果表明: 呼图壁县地下水埋深的空间变化主要是由地形地貌、气候等结构性自然因素引起的, 空间相关性逐年增强, 空间异质性逐渐减弱; 地下水埋深在空间上主要表现为从南向北逐渐变浅, 时间动态上为 2000—2010 年地下水埋深值 < 10 m 的面积减小比例高达 86.61%, 2010 年后控制耕地面积的大幅扩张, 但由于耕地本身基数较大, 地下水开采量在 2014 年达到最大值后开始减少, 局部地区地下水位开始恢复; 研究区主要土地利用类型为耕地, 地下水中农业用水占比高达 84.68%, 地下水埋深动态变化与耕地面积变化高度相关。

关键词: 地下水位动态; 地统计学; 克里金插值; 土地利用类型

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0227-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.031

Response of Groundwater Level Dynamics to Land Use Change in Hutubi County

HU Xin^{1,2}, WU Bin^{1,2}, GAO Fan^{1,2}, DU Mingliang^{1,2}, ZHANG Wenting^{1,2}

(1.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052;

2.Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052)

Abstract: It is of great significance to study the temporal and spatial dynamic characteristics of groundwater level depth and its response to land use change in arid and water-scarce areas for strengthening land use and groundwater resource management in agricultural areas. Taking the plain irrigation area of Hutubi County as the research area, based on geostatistics and GIS, the spatial and temporal distribution of groundwater depth was fitted by ordinary Kriging interpolation in 2000, 2010 and 2018. Moreover, the land use type map was generated by interpreting remote sensing data during the corresponding period. Superposition analysis was conducted on the response relationship between the change of groundwater depth in different periods and the transfer of land use types in the corresponding periods. The results showed that space variation of groundwater depth in Hutubi County was mainly due to structural natural factors such as topography and climate. The spatial correlation of groundwater depth increased year by year, while the spatial heterogeneity weakened gradually. Spatially, the groundwater depth was gradually shallow from south to north, and from 2000 to 2010, the area with the groundwater depth less than 10 m decreased by 86.61%. The substantial increase of arable land was controlled after 2010. However, due to the large base of cultivated land, the amount of extracted groundwater began to decline from the maximum value in 2014, and the groundwater began to recover in some areas. The cultivated land was the main land use type in the study area, and the proportion of agricultural water in groundwater was as high as 84.68%. Therefore, the dynamic change of groundwater depth was highly correlated with the change of cultivated land area.

Keywords: groundwater level dynamic; geostatistics; Kriging interpolation; land use type

收稿日期: 2021-04-21

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01A99); 新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2021014)

第一作者: 胡鑫(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事干旱区地下水管理与保护研究。E-mail: huxinshd@163.com

通信作者: 吴彬(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事内陆干旱区水资源利用与环境保护研究。E-mail: wubinxi@163.com

在干旱地区,地下水资源是保障供水安全的重要组成部分,地下水埋深是影响生态环境的敏感因子。研究地下水埋深时空动态变化及其主要驱动因素对合理评估区域地下水资源量,并对“以水而定、量水而行”国土空间适宜开发策略具有重要的指导意义^[1]。地下水资源的合理开发是维护社会经济、生态安全可持续发展的不可缺少的条件之一,而针对地下水资源进行科学合理管理,需要对地下水埋深的时空变化特征和变化程度进行深度分析^[2-3]。地统计学区别传统统计学,有助于揭示区域变量的空间异质性和空间格局,在土壤学、生态学等领域上得到了很好的发挥,地统计学也逐渐应用于地下水模拟和空间变化分析中。基于此,诸多学者采用地统计学理论并与 GIS 相结合,来揭示地下水位动态的时空变化。如 Xiao 等^[4]基于地统计学理论,采用 7 种插值方法对北京山前平原区地下水埋深进行了建模分析,比较不同方法的预测精度,认为简单克里金法能够在保证局部精度的同时,对未知点进行无偏最优估计;Dinka 等^[5]针对处于长期灌溉农业的埃塞俄比亚的阿瓦土河上游糖业庄园,利用反距离权重插值法对其地下水位季节波动和空间变化进行分析,结果表明,平原区降雨入渗补给和周边陡坡径流渗漏补给是导致地下水位上升和波动的主要原因;蒙波等^[6]对比普通克里金插值中球状、指数、高斯 3 种模型,最终确定高斯模型为该地区的最优模型,定量分析地下水时空变异特征,并进行地下水监测点位优化,在不降低监测精度的同时降低监测成本。作为区域水文循环极为关键的构成部分的地下水资源对于土地利用类型的转变具有较为明显响应^[7]。Wang 等^[8]分析土地利用类型的时空变化对其地下水位的影响表明,土地利用/土地覆盖变化是地下水埋深变化的重要驱动力。刘建华等^[9]将遥感技术与地统计学理论相结合,利用内蒙古磴口县 2008 年与 2016 年的地下水埋深分布和两期景观格局演变数据,分析了地下水埋深空间异质性特征及其对土地利用变化的响应。Wang 等^[10]采用反距离权重插值法对塔里木盆地渭干河流域地下水埋深数据进行空间插值,分析归一化植被指数、降水量和土地利用类型对地下水动态的影响。

呼图壁县隶属新疆昌吉回族自治州,地处我国“一带一路”丝绸之路核心经济带。行政区内呼图壁河是天山北坡第二大河流^[11],地下水资源对于维持人工绿洲与天然绿洲和谐发展具有极为关键的制约作用。近几十年来,由于地下水资源持续超采,在大丰镇、呼图壁镇、五工台镇、二十里店镇附近出现地下水漏斗区^[12]。目前,围绕该区域地下水埋深空间分

布分异格局、分布规律及主要驱动因素之间的响应关系的研究较少,本文利用地统计学和 GIS 相结合的方法,分析地下水埋深空间分布分异格局和时空动态特征,定量研究地下水埋深时空变化与土地利用/覆被变化的响应关系,有助于地下水资源的高效管理和土地利用的合理规划,为研究区生态系统的稳定、地下水资源的合理开发及可持续发展提供研究依据。

1 研究区概况

呼图壁县处于天山北麓中段、准噶尔盆地南缘,位于东经 86°05′—87°08′,北纬 43°07′—45°20′。本文以呼图壁县平原灌区作为研究区(图 1)总面积为 2 030 km²,呼图壁县属温带大陆性气候,多年平均年降水量 219.00 mm,年内最低温度为-35.20℃,最高温度为 42.90℃,多年平均气温为 8.13℃,多年平均年蒸发量 1 127.70 mm。区内发育呼图壁河和军塘湖河两条河流,流经青年渠首和平原各类蓄、调、输、引水工程,最后消失于沙漠中。

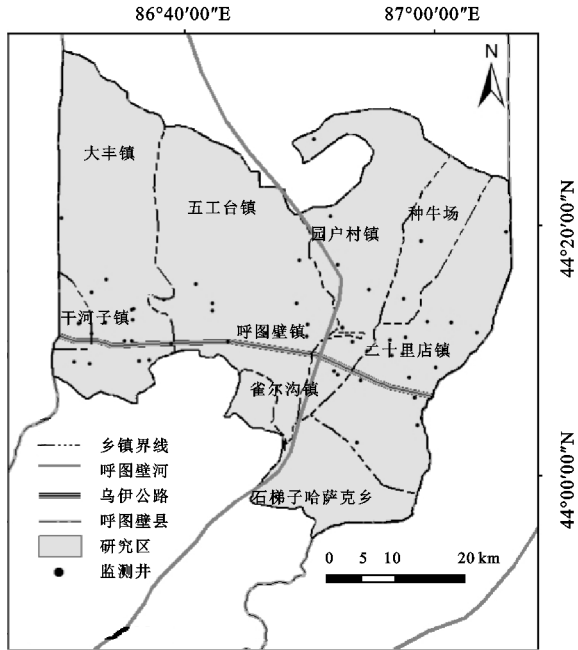


图 1 研究区位置及监测井分布

平原区广泛分布松散岩类孔隙水,以乌伊公路为界,分为单一结构潜水含水层和多层结构潜水承压水含水层。含水层厚度由南向北逐步变薄,岩性由卵砾石、砂砾石逐步过渡为含砾粗砂、中粗砂和细沙。平原区地下水主要接受河道水、渠系水、田间水及库塘水等地表水转化补给,少量的降雨入渗补给及山前侧向径流补给,其径流方向由山前倾斜平原,从南向北流至下游细土平原及沙漠区,潜水水力坡度为 2.00‰。地下水排泄主要方式为人工开采地下水,以及少量潜水蒸发及侧向排泄。从南到北为一个完整的水文地质单元。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

研究区 2000 年及 2010 年监测井有 29 眼,期间部分监测井坍塌或停止使用,2012 年增加了 9 眼监测井,故 2018 年可利用监测井数量为 38 眼,地下水位监测井分布见图 1。文中 2000—2018 年地下水埋深数据、呼图壁河年径流量、地下水开采量、降水量、地表引水量及农田灌溉面积均来源于昌吉州水资源中心。

遥感影像数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),以 Landsat-MSS 和 Landsat8 为影像数据源,空间分辨率为 30 m×30 m。通过几何校正和辐射畸变纠正对遥感影像数据进行预处理。在 1:20 000 地形图的基础上,将研究区域内土地利用类型主要划分为 6 类,分别为林地、耕地、草地、水域、城乡居民用地;并通过人机交互目视解译法与野外实地调查验证的方式保证土地利用数据处理的一致性和解译精度的可靠性。

2.2 研究方法

2.2.1 半变异函数 半变异函数是一个关于数据采样点的空间距离与其半变异值的函数,可以用来描述地下水位的空间变异性,假设区域化变量的均值是稳定的,而且变量只与样本的距离有关系^[9],其计算公式为:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}(Z(X_1)-Z(X_1+h))^2$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; h 为采样点空间距离(km); $N(h)$ 是空间距离为 h 的采样点对数; $Z(X_1)$ 为区域化变量 $Z(X)$ 在空间位置 X_1 处的观测值(m); $Z(X_1+h)$ 为区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 X_1+h 处的观测值(m)。

通过对地下水埋深数据进行数理统计分析,结果显示,埋深数据变异程度明显,受空间趋势影响较大^[13],因此通过对数变换的手段使得地下水埋深数据满足正态分布,使其适用于半变异函数分析。利用 GS⁺9.0 软件平台建立地下水埋深空间变化的球状模型、指数模型和高斯模型来拟合地下水埋深空间插值模型,通过比较发现,高斯模型具有最佳拟合效果,高斯模型的一般公式为:

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

式中:块金值 C_0 为随机因素(城建、农垦、种植制度、灌排强度等人为因素)在小尺度下引起的变异(km);基台值 $(C+C_0)$ 为结构性因素(地形、地貌、气候、土壤类型、含水层等自然因素)在大尺度下引起的变异(km); a 为变程,反映了地下水埋深的空间自相关尺

度(km)。结构因素和随机因素分别从不同尺度上影响着地下水埋深的空间相关性, $C_0/(C_0+C)$ 为基底效应,反映了地下水埋深的空间相关性:其比值 $<25\%$ 认为变量具有强烈的空间相关性; $25\%\sim75\%$ 认为变量具有中等的空间相关性; $>75\%$ 时被认为是为弱相关性。

2.2.2 克里金插值 克里金插值法又称为空间局部估计或空间局部插值,可以综合考虑变量的随机性和结构性,它是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,在一定区域内对数据进行无偏最优估计的插值方法之一^[14]。本研究采用普通克里金法,公式为:

$$Z(x_0)=\sum_{i=1}^N\lambda_iZ(x_i)$$

式中: $Z(x_0)$ 为位置 x_0 的克里金插值的估算值(m); $Z(x_i)$ 为位置 x_i 处的实测值(m); N 为参与计算的实测样本个数; λ_i 为第 i 个样本点的权重系数。

2.2.3 土地利用转移矩阵 利用 Landsat 影像的 3 张土地覆被分类图,将研究区土地利用类型划分为耕地、草地、林地、水体、城乡居民用地和未利用土地,通过 ArcGIS 软件,计算 2000 年、2010 年和 2018 年 3 个年份的土地利用类型面积,利用交叉分析方法建立土地利用类型间的转移矩阵,构建土地利用转化动态模型,将不同时期土地利用类型图进行叠加,得出土地利用类型的过渡矩阵^[15]。

3 结果与分析

3.1 自然因素对地下水位的影响

由图 2 可知,呼图壁县 2000—2018 年多年平均降水量 219.00 mm,最大值为 288.94 mm,最小值为 160.30 mm。与近 18 年多年平均降水量相比,2018 年降水量偏少 23.11%。呼图壁县 2000—2018 年多年平均年径流量为 $4.92\times10^8\text{ m}^3$,最大值为 $6.20\times10^8\text{ m}^3$,最小值为 $3.72\times10^8\text{ m}^3$,2018 年年径流量较多年平均值降低了 21.65%。从图 2 可以看出,当地降水量与年径流量的变化趋势基本保持一致,即年降水量增加,年径流量随之增加。呼图壁县地下水平均埋深在 2014 年随年径流量的骤减而加深,加之 2014 年起地下水开采量开始降低,所以地下水位逐渐保持稳定。研究区内地表水体转化补给量占 85%,因此,区域降水量增加,影响呼图壁河年径流量增加,地下水的补给量随之增加,所以降水量对地下水埋深的影响较大。

3.2 地下水埋深空间分布分异特征

利用 GS⁺9.0 软件对呼图壁县地下水埋深监测数据进行半变异函数建模,经过多次模拟试验调整函数的步长,及不同曲线模型拟合的残差平方(RSS)和决定系数(r^2)对比,最终确定最佳拟合模型为高斯模型(RSS 分别为 0.06,0.05,0.06, r^2 分别为 0.84,0.72,

0.82),地下水埋深可以以高度可信的程度建模^[16]。

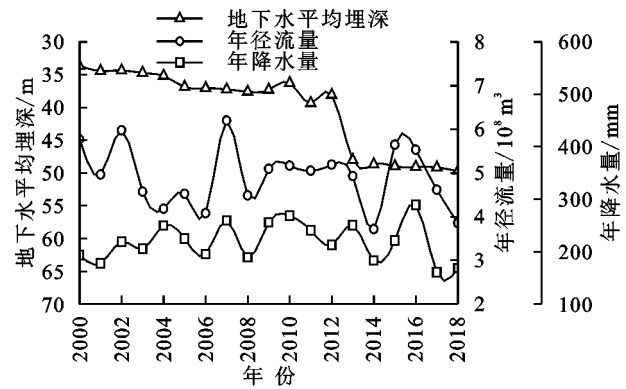


图 2 2000—2018 年地下水平均埋深、年径流量及年降水量趋势

由表 1 可知,研究期内地下水埋深块金值显著减

表 1 地下水埋深半变异函数相关参数

年份	块金值 C_0/km	基台值 $(C_0+C)/\text{km}$	基底效应 $(C_0/C_0+C)/\%$	变程 a/km	决定系数 r^2	残差平方和 RSS
2000	0.04	0.43	9.30	14.24	0.84	0.06
2010	0.04	0.39	10.26	12.54	0.72	0.05
2018	0.02	0.44	5.75	4.55	0.82	0.06

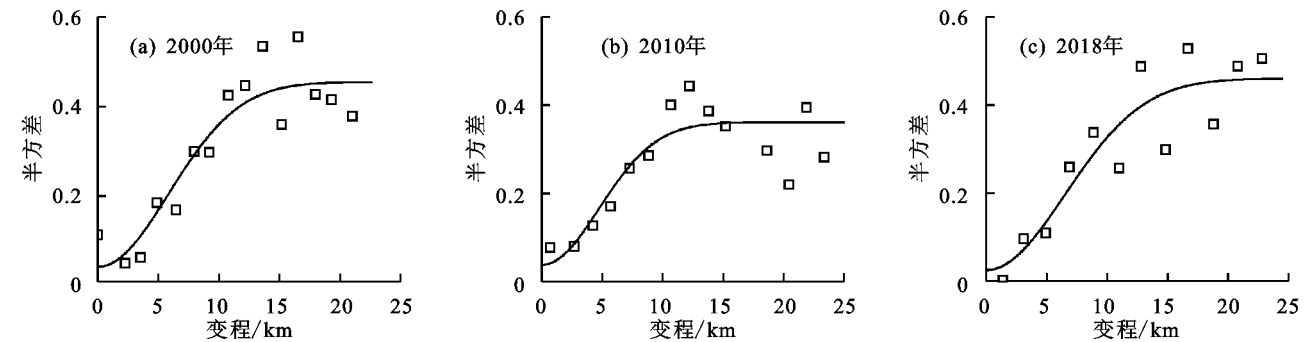


图 3 地下水埋深空间变异函数拟合模型

3.3 地下水埋深时空动态特征

基于高斯模型参数,在 ArcGIS 软件借助地统计模块生成地下水埋深的时空变化分布图。由图 4 可知,呼图壁县地下水埋深空间分布特征主要表现为南部冲洪积扇中上部埋深大,北部平原区埋深小,从南向北地下水埋深逐渐变小,符合呼图壁县地势南高北低的特征。2018 年地下水埋深明显比 2000 年和 2010 年增大,具有深埋区面积明显增大、浅埋区面积明显减小的特征。研究区地下水埋深较浅的区域主要位于呼图壁河中下游,范围在 3~30 m,其中种牛场附近地下水埋深较浅,位于 3~10 m。而乌伊公路两侧地下水埋深 50~90 m,二十里铺头工良种场附近超过 110 m,地区间地下水埋深差异较大。呼图壁县地下水埋深时间动态特征主要表现为:2000—2010 年由于耕地面积迅速扩张,地下水开采力度加大,从而导致地下水埋深<10 m 的面积从 2000 年 499.02 km²减少至 66.80 km²,减少 432.22 km²,减少比例高达 86.61%。2010—2018 年,控制灌溉面积的增长,并采取压减地下水开采量等控制措施,但由于灌溉面积

小,基台值变化不大,这一现象表明地下水在小尺度上因随机因素而产生了较大变化,在结构尺度上变化较小。各年地下水埋深的基底效应在 4.55%~10.26%,地下水埋深均表现为强烈的空间相关性。基底效应 2000 年为 9.30%,2010 年为 10.26%,2018 年降低到 4.55%,这说明研究区内地下水埋深的空间分布在地质、气候等结构性因素作用的影响下逐渐增大,即一个地区地下水埋深产生变化会对周围的地下水空间结构产生重大影响,表明该区域的地下水埋深空间相关性逐年加强,空间异质性逐渐减弱。变程由 2000 年的 14.29 km 增加至 2018 年的 15.96 km,空间最大相关距离增加,即随机因素影响的范围变大(图 3)。

基数大,地下水开采量仍然很大,直至 2014 年达到最大值后开始逐渐减少,所以五工台镇南部地下水埋深呈现上升趋势,其余地方地下水位仍然呈下降趋势。2000—2018 年,地下水埋深>80 m 的面积从 179.21 km²增加到 410.20 km²,增加了 230.99 km²,增加比例高达 128.89%,埋深>80 m 的位置主要集中在研究区南部的冲洪积扇中上部,其原因可能是含水岩性颗粒较大,储水能力较差,地下水流由南向北径流补给下游地下水。

依据研究区不同乡镇及均匀选点的原则,选取 5 眼典型监测井数据绘制地下水埋深多年动态变化曲线。由图 5 可知,2000—2018 年地下水埋深分布整体呈持续增大趋势,园户村镇十三户四队的监测井,距离河道较近,受河水渗漏补给影响,多年降幅较小。其余 4 眼监测井多年降幅均在 8 m 以上,其中乌伊公路两侧监测井多年地下水位下降幅度较大,为 29.50~30.34 m,平均年下降速率为 1.48~1.52 m/a。

3.4 研究区 LUCC 时空动态变化特征

为分析研究区土地利用类型在近 18 年间发生的

变化和相互转换,本文利用 GIS 分析工具制作了研究区 2000 年、2010 年和 2018 年土地利用类型分布图(图 6),并计算得出上述 3 个时期 6 种土地利用类型面积(表 2)及土地利用转移矩阵(表 3 和表 4)。

从图 6 可以看出,耕地主要分布在研究区的南部及中部,草地主要分布在东北部和西北部,水域主要为呼图壁河河道和水库。研究时段内土地利用类型中耕地、水域和城乡居民用地的利用面积逐年增加,草地、未利用土地和林地的利用面积逐年减少,

2000 年主要分布在西北地区的未利用土地渐渐被耕地和草地取代。其中,耕地、水域和城乡居民用地的利用面积从 2000 年所占研究区总面积的 42.27%,1.68%,2.20%增加到 60.05%,2.17%,4.02%;而草地、林地、未利用土地从所占总面积的 40.45%,0.95%,12.44%下降至 33.56%,0.15%,0.06%。其中研究区最主要的土地利用类型为耕地(2000 年 42.27%,2010 年 54.54%,2018 年 60.05%),从而导致较高的用水需求。

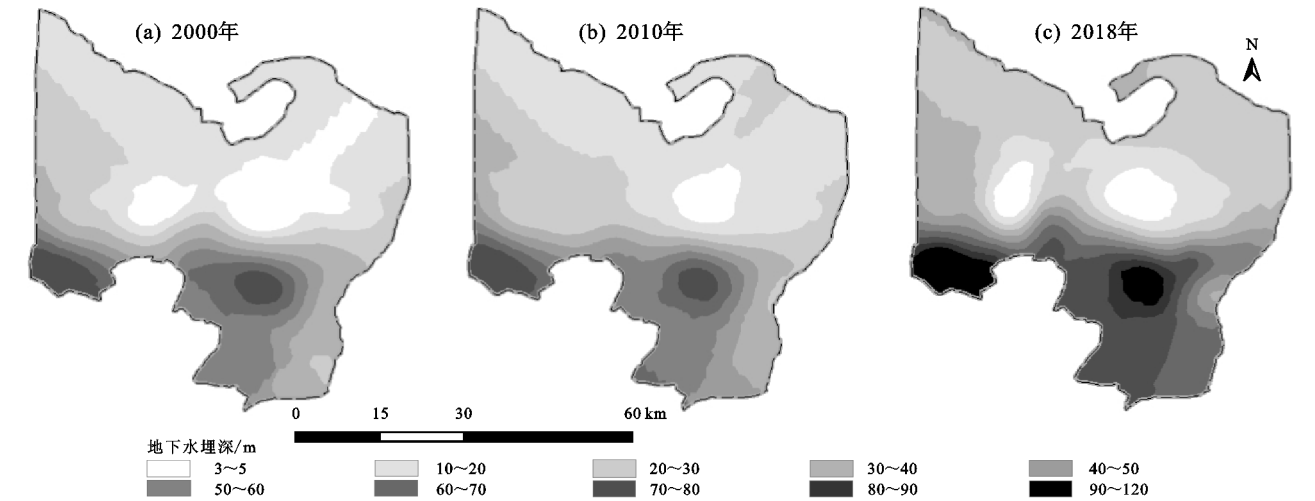


图 4 地下水埋深时空分布

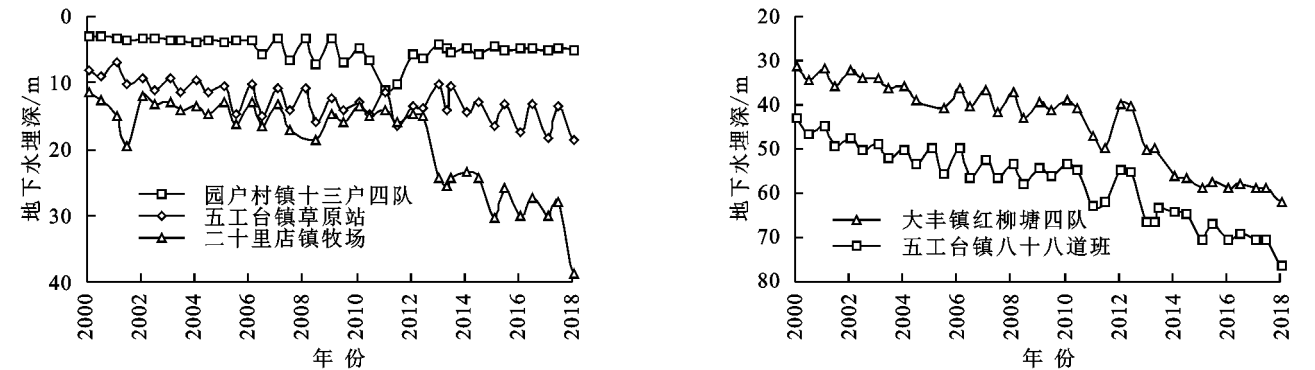


图 5 2000—2018 年典型监测井地下水埋深多年动态

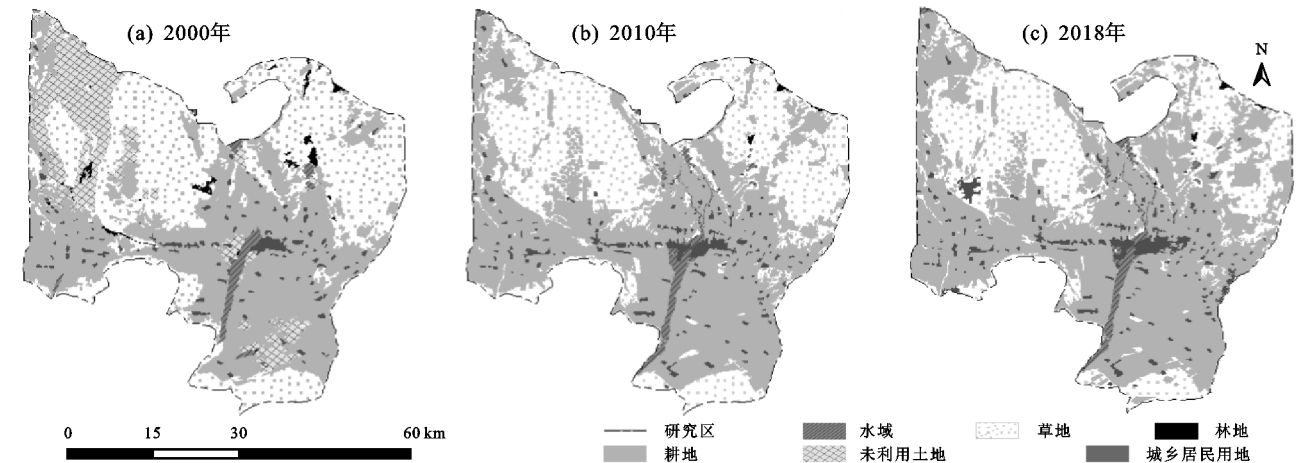


图 6 土地利用类型时空分布

由表 2、表 3 和表 4 可知,2010 年耕地面积比 2000 年增加了 249.96 km²,增幅为 29.01%,主要转

入来源是草地,转入面积达 177.39 km²;未利用土地面积减少 250.75 km²,主要转出类型是草地、耕地,

转出面积分别为 129.21,109.45 km²。表明在农业发展中,耕地面积对草地和未利用土地发生侵占。随着城镇化发展及人口数量增长等一系列因素,最直接的表现城乡居民用地不断侵占周围的未利用土地及耕地^[17],城乡居民用地增加面积为 15.90 km²,增幅

为 35.68%。2010—2018 年草地面积和耕地面积的相互转换较为明显,受地面坡度、温度的影响,研究区内适宜开垦的草地已被转移为新增耕地,转移面积为 132.75 km²。城乡居民用地由草地、耕地转化而来,面积净增 21.12 km²,增幅为 34.92%。

表 2 2000 年、2010 年、2018 年土地利用类型面积

土地利用 类型	面积/km ²			面积占比/%			变化面积/km ²		
	2000 年	2010 年	2018 年	2000 年	2010 年	2018 年	2000—2010	2010—2018	2000—2018
草地	821.32	814.50	681.25	40.45	40.12	33.56	−6.82	−133.25	−140.07
城乡居民用地	44.58	60.48	81.60	2.20	2.98	4.02	+15.90	+21.12	+37.03
耕地	858.26	1107.22	1219.16	42.27	54.54	60.05	+249.96	+111.94	+360.90
林地	19.20	2.95	3.03	0.95	0.15	0.15	−16.26	+0.09	−16.17
水域	34.19	43.15	44.03	1.68	2.13	2.17	+8.96	+0.87	+9.84
未利用土地	252.66	1.91	1.12	12.44	0.09	0.06	−250.75	−0.78	−251.53

表 3 2000—2010 年土地利用类型转移矩阵

单位:km²

年份	2000						
	土地利用类型	草地	城乡居民用地	耕地	林地	水域	未利用土地
2010	草地	632.34	0.55	37.28	7.98	7.13	129.21
	城乡居民用地	2.30	29.52	19.74	0.31	1.84	6.78
	耕地	177.39	14.48	794.15	8.69	3.06	109.45
	林地	0.67	0	0.19	2.09	0	0
	水域	8.25	0.03	6.89	0.13	21.49	6.35
	未利用土地	0.36	0	0	0	0.66	0.88

表 4 2010—2018 年土地利用类型转移矩阵

单位:km²

年份	2010						
	土地利用类型	草地	城乡居民用地	耕地	林地	水域	未利用土地
2018	草地	665.42	0.08	14.92	0.15	0.62	0.07
	城乡居民用地	13.62	56.97	9.19	0	1.83	0
	耕地	132.75	3.28	1081.71	0.12	1.28	0.02
	林地	0.06	0	0.04	2.68	0.01	0.24
	水域	2.62	0.15	1.29	0	39.41	0.55
	未利用土地	0.03	0	0.07	0	0	1.03

3.5 地下水埋深变化对土地利用类型的响应关系

土地利用类型的转变对地下水埋深变化具有驱动作用,将研究区 2000 年、2010 年与 2018 年普通克里金插值得到的地下水埋深分布图相减得到地下水埋深变化(图 7),利用 ArcGIS10.6 的空间叠加分析功能,提取土地利用类型产生转移的区位(图 8);图 9 为 2000—2018 年呼图壁县地下水开采量、地表水供水量与农田灌溉面积统计。

由图 7 和图 8 可知,从 2000 年到 2010 年,研究区西部、大丰镇和五工台镇周围地下水埋深增大,结合同期土地利用类型转换分析可知,大丰镇为发展经济、增加收入而大量开垦盐碱荒地,从而使得地下水加快开采,导致地下水埋深降幅达 9 m 以上。研究区中部呼图壁镇和五工台镇由于城镇面积不断扩大,使得大量人口和生产活动向其聚集,居民生活生产用水不断增加,因此城镇周边地下水位大幅下降。从 2010 年到 2018 年,因开垦荒地而使得地下水位大幅下降的大丰镇推进以先进的灌溉技术为背景的土地联营合作^[18]和以棉花为主

的节水灌溉技术的推广^[19],加之地下水开采量压减政策的实施,2014 年后地下水开采量开始逐渐减少,使地下水埋深值升高至少 7 m。从土地利用类型转换数据分析可知,2010—2018 年土地利用类型转换面积相对较少,主要变化为未利用土地转换为草地和耕地。但地下水埋深仍然明显增大,主要原因是本身地下水灌溉面积基数较大,地下水开采量远大于地下水可开采量,所以地下水埋深持续增加。

4 讨论

区域地下水位变化受自然和人为因素双重影响,地下水埋深变化是地下水补给项和排泄项动态变化的直接表现。降水量对地下水的直接补给量较小,但通过影响年径流量,从而影响地下水位变化,这与马欢^[20]对磴口县降水量与地下水埋深关系分析结论相符。年径流量来源于降水产流和冰川融雪,一方面受降水量影响,另一方面受气温影响,年径流量减少,会直接影响河道渗漏补给、田间渗漏补给、渠道水渗漏补给等。灌区输配水工程的日益完善和田间高效节水灌溉技术的改进,

也使得渠系渗漏和田间入渗补给量大幅减少。在人类活动影响因素中,2000—2018 年研究区耕地面积扩张 360.90 km²,耕地面积的扩张必然导致水资源消耗的

上升^[7];2002 年呼图壁县机电井数量为 796 眼,至 2018 年上升至 1 687 眼,增长幅度高达 111.93%,机电井数量增加,使得地下水开采量增大。

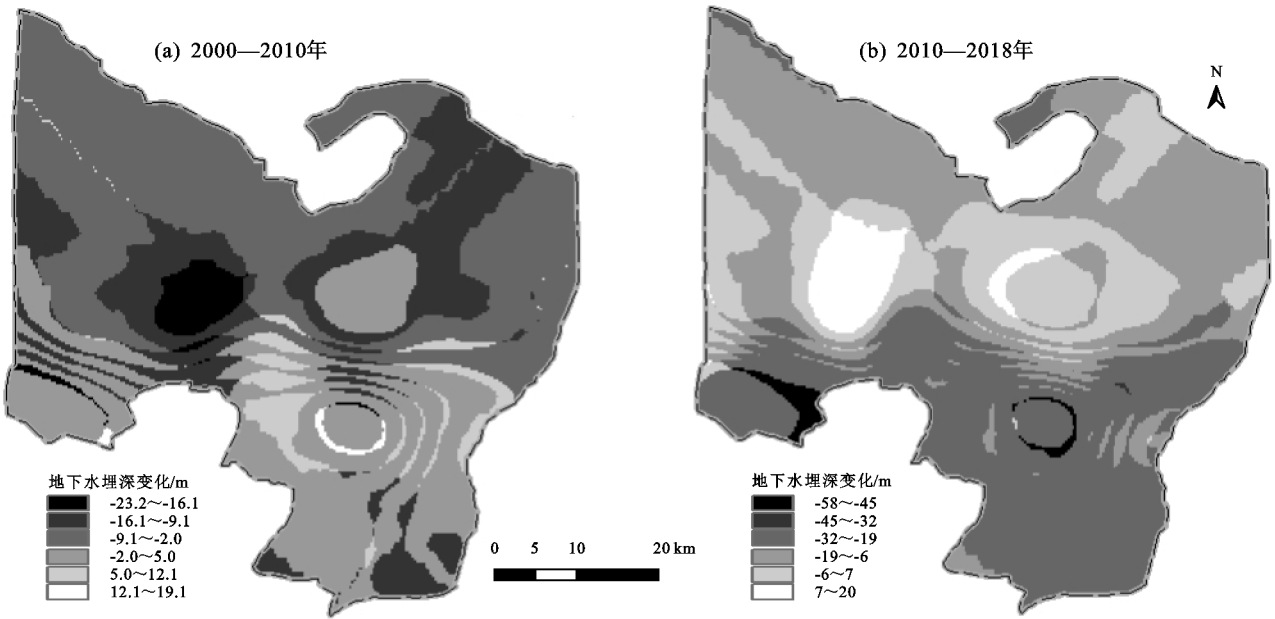


图 7 地下水埋深时空变化分布

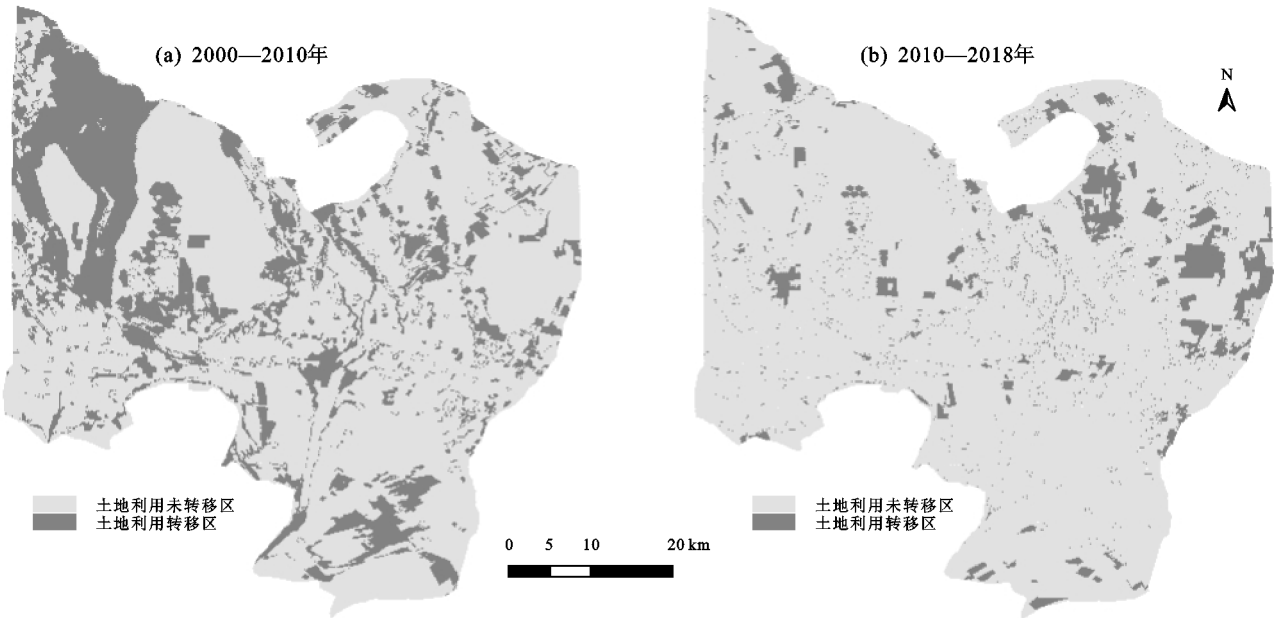


图 8 土地利用类型时空变化分布

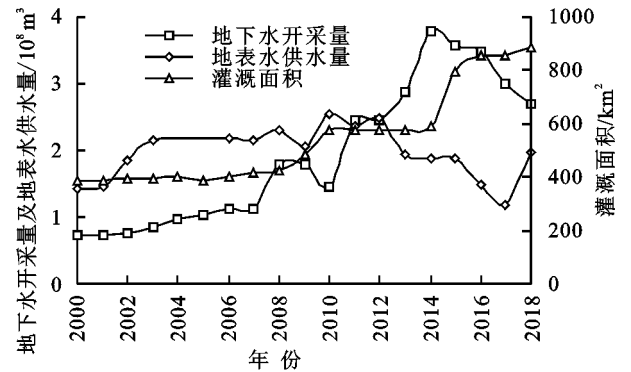


图 9 2000—2018 年呼图壁县地下水开采量、地表水供水及农田灌溉面积变化趋势

地下水水位变化与耕地面积变化相关程度较高,2018 年耕地面积占研究区面积的 60.05%。在灌溉季节,一定强度的降水量可直接起到灌溉作用,若降水量不足则需通过人工灌溉,便加大了地下水的开采量;灌溉面积过大,便需要更多的地下水满足灌溉,灌溉用水与水资源承载能力严重失衡是地下水位下降的根本原因,这与王利书等^[21]就石羊河流域提出地下水位持续下降的主要原因是地表径流减少引起地下水补给量减少和为提高作物产量大量开采地下水的结论基本一致。退减灌溉面积是治理地下水超采,遏制地下水位下降的根本措施。尤其呼图壁县的农

田灌溉用水主要依赖地下水资源,自 2011 年农业用水总量中地下水占比 49.15%~75.09%,所以研究区地下水埋深变化与农业用水密切相关,耕地面积的增加,会加剧地下水资源的供需矛盾。总体而言,研究区地下水埋深持续加深的主要原因是河道入渗量、田间及渠系入渗量的减少导致补给量减少和因大幅扩增农田开采地下水,导致地下水排泄量增加。

5 结论

(1)呼图壁县地下水埋深受降水量影响较大,并且其分布具有较为明显的空间特征,2018 年研究区地下水埋深比 2000 年和 2010 年明显增大。研究区地下水埋深具有很强的空间相关性,并且其空间分布在随机和结构性尺度上均有变化,地下水埋深空间分布变异主要是由地形、气候等结构性因素导致的,种植制度、灌溉方式等随机性因素的作用效果不明显。

(2)呼图壁县地下水埋深空间动态特征主要表现为北部平原区埋深小,南部冲洪积扇埋深大,从南向北地下水埋深逐渐变浅。时间动态特征主要表现为 2000—2010 年由于耕地面积的快速扩张、地下水开采量持续加大,地下水位发生大幅度下降。2010—2018 年由于控制耕地面积扩张,且地下水开采量在 2014 年达到最大值后开始减少,局部地区地下水埋深开始恢复,但总体而言地下水位依旧呈现下降趋势。

(3)呼图壁县最主要的土地利用类型为耕地,占研究区总面积的 50%左右(2000 年 42.27%,2010 年 54.54%,2018 年 60.05%)。农田灌溉面积从 2001 年的 387.43 km²增加至 2018 年的 885.27 km²,农田灌溉用水主要水源为地下水,所以研究区地下水埋深时空变化的响应是区内耕地面积不断增加的结果。

参考文献:

- [1] 张瑞美,王亚杰.经济社会发展中以水而定有关问题探析[J].人民长江,2020,51(增刊 2):71-74.
- [2] 刘伟坡,沙娜,程旭学.三江平原建三江地下水动态变化特征[J].灌溉排水学报,2020,39(5):96-101.
- [3] 唐敏,张峰,师庆东.克里雅河尾间绿洲浅层地下水位埋深变化特征研究[J].干旱区地理,2021,44(1):80-88.
- [4] Xiao Y, Gu X M, Yin S Y, et al. Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China[J].Springerplus,2016,5:e425.
- [5] Dinka M O, Loiskandl W, Ndambuki J M. Seasonal behavior and spatial fluctuations of groundwater levels in long-term irrigated agriculture: The case of a sugar estate[J].Polish Journal of Environmental Studies,2013,5(22):1325-1334.
- [6] 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.
- [7] 孙标,朱永华,张生,等.通辽平原区近 35 年地下水埋深及土地利用变化响应关系研究[J].中国农村水利水电,2019(8):15-19.
- [8] Wang J F, Gao Y C, Wang S. Land use/cover change impacts on water table change over 25 years in a desert-oasis transition zone of the Heihe River Basin, China[J].Water,2015,8(1):e11.
- [9] 刘建华,于强,Yang D,等.磴口县地下水空间异质性分析及其对景观格局变化的响应[J].农业机械学报,2019,50(12):205-212.
- [10] Wang W R, Chen Y N, Wang W H, et al. Evolution characteristics of groundwater and its response to climate and land-cover changes in the oasis of dried-up river in Tarim Basin[J].Journal of Hydrology, 2020, 594:e125644.
- [11] 王敬哲,刘志辉,塔西甫拉提·特依拜,等.呼图壁河基流变化及其影响因素[J].中国沙漠,2017,37(4):793-801.
- [12] 丰亚萍.干旱区最严格水资源管理制度下地下水演变数值模拟研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.
- [13] Machiwal D, Mishra A, Jha M K, et al. Modeling short-term spatial and temporal variability of groundwater level using geostatistics and GIS[J].Natural Resources Research,2012,21(1):117-136.
- [14] Kaur L, Rishi M S. Integrated geospatial, geostatistical, and remote-sensing approach to estimate groundwater level in North-western India[J].Environmental Earth Sciences,2018,77(23):e786.
- [15] 聂思雨,孙晓庆,卞建民.土地利用变化对地下水位空间分布的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(7):1060-1064.
- [16] 窦旭,史海滨,苗庆丰,等.盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):246-253.
- [17] 朱增云,阿里木江·卡斯木.基于 CA-Markov 模型的呼图壁县土地利用景观格局预测研究[J].生态科学,2020,39(1):136-145.
- [18] 刘荣.浅析干旱区灌区土地联营与节水技术推广:以新疆呼图壁县大丰镇为例[J].水利发展研究,2012,12(1):59-61.
- [19] 吴旭.呼图壁县棉花节水示范技术效益比较研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
- [20] 马欢.基于 GIS 的磴口县地下水埋深时空变化研究[D].北京:北京林业大学,2018.
- [21] 王利书,悦琳琳,唐泽军,等.气候变化和农业发展对石羊河流域地下水水位的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):121-128.