doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.023

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

刘建华[1]　于　强[2]　YANG Di[3]　岳德鹏[2]　张启斌[2]　武英达[4]

(1. 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100732; 2. 北京林业大学林学院, 北京 100083;
3. 弗罗里达大学地理系, 盖恩斯维尔 FL 326113; 4. 中国消防救援学院, 北京 102200)

摘要: 应用地统计学和地理信息系统方法,分析内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县地下水埋深对景观格局演变的响应。首先,通过半变异函数模型分析了磴口县地下水埋深的空间异质性特征,进而利用克里金插值对研究区 2008、2016 年的地下水埋深空间分布进行了拟合;其次,基于磴口县 2008 年与 2016 年的景观格局分布数据,研究了其景观格局演变特点;最后利用 GIS 叠加分析手段,将地下水埋深变化与景观格局演变数据进行耦合,分析了地下水埋深对景观格局演变的响应机制。研究结果如下:①空间上,磴口县地下水埋深大体遵循由东北向西南逐渐加深的趋势,研究时段内其空间异质性呈上升趋势,空间异质性中的随机扰动增强。②县域主要景观类型为林地,其次为沙地、裸地与水体,研究时段内建筑用地与水体增加明显,耕地与沙地略有减少。③景观格局演变对地下水埋深有较明显的影响,建筑用地的扩张使其加深,地表灌溉系统的不断完善使其上升。总体来看,磴口县地下水资源利用效率有较明显的提高。

关键词: 磴口县; 地统计学; 景观格局演变; 地下水埋深; 半变异函数

中图分类号: X17　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)12-0205-07

Spatial Heterogeneity of Groundwater and Its Response to Landscape Pattern Evolution in Dengkou County

LIU Jianhua[1]　YU Qiang[2]　YANG Di[3]　YUE Depeng[2]　ZHANG Qibin[2]　WU Yingda[4]

(1. *Institute of Quantitative and Technical Economics*, *Chinese Academy of Social Science*, *Beijing* 100732, *China*
2. *Forestry College*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Department of Geography*, *University of Florida*, *Gainesville FL* 326113, *USA*
4. *China Fire and Rescue Institute*, *Beijing* 102200, *China*)

Abstract: The geostatistics and geographic information system (GIS) were used to analyze the corresponding changes of groundwater depth to landscape pattern evolution in Dengkou County, Bayannur City, Inner Mongolia. Firstly, the spatial heterogeneity of groundwater depth was analyzed by the semiofficial model in Dengkou County, and the spatial distribution of groundwater depth of the research area in 2008 and 2016 was simulated by using Kriging interpolation. Secondly, characteristics of the landscape pattern evolution of Dengkou County in 2008 and 2016 were studied. At last, the variation of groundwater depth and landscape pattern evolution data was coupled by GIS overlay analysis, and the response mechanism of groundwater depth to landscape pattern evolution was analyzed. The results were as follows: The groundwater depth of Dengkou County, in general, followed the trend of increasing from northeast to southwest, both the spatial heterogeneity and the random disturbance in the spatial heterogeneity were increased during the study period. The main landscape types of the county were forest land, followed by sandy land, bare land and water, the construction land and waters were increased obviously while arable land and sand land were decreased slightly during the study period. The evolution of landscape patterns had an obvious effect on the groundwater depth, construction land expansion deepened it, and the continuous improvement of the surface irrigation system made it rise. In general,

收稿日期: 2019-09-18　修回日期: 2019-10-29

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2018M641218)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLX201806)和国家自然科学基金项目(41371189)

作者简介: 刘建华(1980—),女,博士后,主要从事水土保持与荒漠化防治研究,E-mail: ljhua678@126.com

通信作者: 于强(1987—),男,讲师,博士,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail: yuqiang@bjfu.edu.cn

the utilization efficiency of groundwater resources was obviously improved in Dengkou County. The study was of significance for the rational utilization of groundwater resources and the optimization of landscape pattern.

Key words: Dengkou County; geostatistics; landscape pattern evolution; groundwater depth; semivariogram

0 引言

根据国家标准《水文地质术语》,地下水指的是埋藏在地表以下各种形式的重力水。作为地球上重要的水体,地下水与人类社会关系密切[1-2]。在地下水资源较为丰富的地区,贮存于地下的水资源往往能为当地提供良好的水资源支持,与地表流水相比,地下水具有供水条件稳定、水质良好等优点,因此农业灌溉、工矿企业以及城市生活用水常以地下水作为重要水源[3]。尤其对于缺水的干旱与半干旱地区,有水则成绿洲,无水则成荒漠,水资源对当地生产生活与生态建设至关重要,而地下水以其自身的明显优点,往往成为当地的重要水源。

地下水埋深是描述地下水资源量的重要指标,往往受多种因素影响,地表景观格局作为人类活动对生态系统影响的综合反映,对地下水埋深的影响有着不可忽视的作用[4]。以往对于干旱半干旱区地下水的分析往往以人为开采为目标,研究内容主要集中于地下水开采利用的强度与合理性方面。如胡汝骥等[4]对中国西北干旱区的地下水资源及其特征进行了分析,张鸿义等[5]对中国干旱区地下水资源及开发潜力进行了分析,樊自立等[6]对中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度进行了确定。然而针对地下水埋深对景观格局演变响应的研究相对较少[7-9]。

乌兰布和沙漠位于内蒙古自治区西部,属于典型的干旱区[10]。磴口县处于乌兰布和沙漠与河套平原交接的地区,东依黄河,西接狼山,地理位置关键,生态环境脆弱,是生态建设与防沙治沙的前沿地带。水资源对于维持县域正常的生产生活具有极为重要的作用。研究磴口县地下水埋深对景观格局演变的响应,对合理利用地下水资源、合理规划县域景观布局具有重要意义[11-12]。本文借助地统计学与地理信息系统等多种分析手段,分析县域地下水埋深的空间异质性变化,研究其景观格局演变规律,并对两者进行耦合,分析地下水埋深对景观格局演变的响应机制。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县(107°5′E,40°13′N),地处内蒙古自治区西南部,面积4 166.6 km^2[13]。县域西缘为狼山山脉,东缘为黄河,河套平原与乌兰布和沙漠在县域内由东北向西南逐渐过渡,县域沙化风险较高,属典型的荒漠绿洲交错区,生态区位极为关键。磴口县大陆性气候特征显著,年均降雨量 144.5 mm,年均蒸发量 2 397.6 mm,地下水资源储量为 5.258×10^8 m^3,黄河水年侧渗量 4.9×10^8 m^3,可开采量 2.11×10^8 m^3,水资源较为丰富[14-15]。县域工农业发展与生态环境建设受地下水影响较为明显,研究地下水对不同土地利用类型的响应具有重要意义。磴口县区位图如图 1 所示。

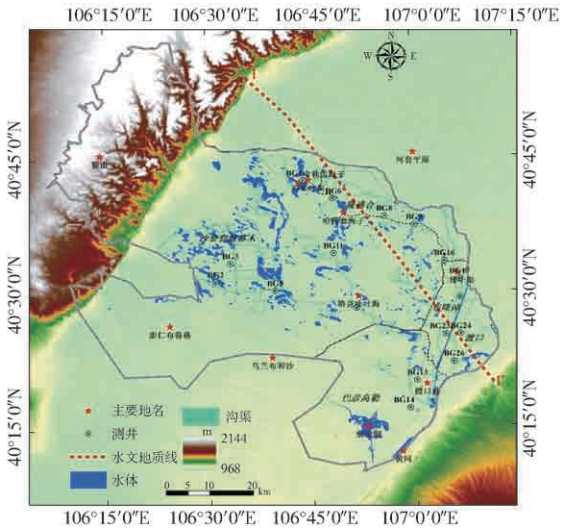

图 1 磴口县区位图

Fig. 1 Location map of Dengkou County

2 数据获取与预处理

研究区地下水埋深数据来自沙林中心、黄灌局、水务局的 100 个常年观测井,土地利用数据由 2008、2016 年夏季少云的遥感影像为基础数据源解译而来,其中 2008 年的影像来自 Landsat-5 TM 传感器,2016 年的影像来自 Landsat-8 OLI 传感器。影像经预处理后进行监督分类,本研究根据《生态环境状况评价技术规范》中的土地利用一级分类体系,结合研究区特点,建立分类体系如表 1 所示。对分类后的数据进行噪声数据消除、错分地区修改,得到研究区 30 m×30 m 分辨率图像,最终分类结果如图 2 所示,解译结果经实地验证,分类结果精度良好。

表 1　磴口县景观分类体系

Tab. 1　Dengkou County landscape classification system

景观类型	所包含土地利用类型
耕地	水浇地、旱地
水体	河渠、湖泊、水库、坑塘、滩地
林地	有林地、灌木林地、疏林地及其他林地
建筑用地	道路、居民点及其他人工建筑用地
沙地	沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石质地
裸地	磴口县域西侧狼山山脉分布区域

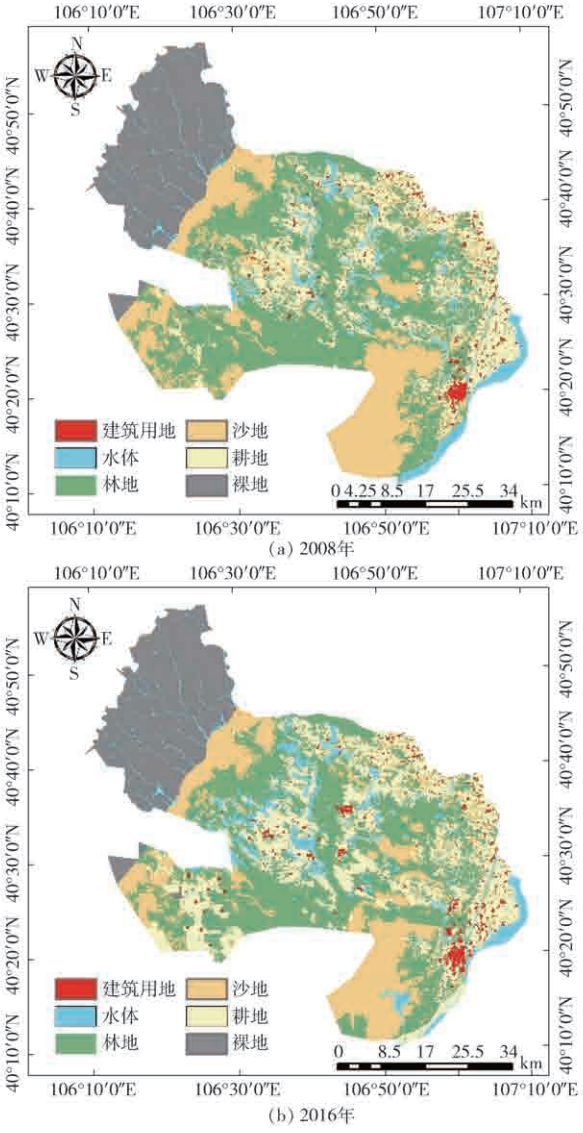

图 2　磴口县景观格局分布图

Fig. 2　Landscape type distribution maps of Dengkou County

3　研究方法

3.1　半变异函数

空间自相关是地统计学中一种测量某位置的观察值与其相邻空间内的观察值是否相关以及相关程度的空间数据分析方法[16]。半方差函数是空间相关性分析中最常用的工具，它不仅能体现空间变量的随机变异，又能体现其空间相关变异。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，假设区域化变量满足二阶平稳假设和本征假设，其计算公式为[17]

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

式中　$\gamma(h)$——半方差函数

h——采样点空间距离

$N(h)$——空间距离为 h 的采样点个数

$Z(X_1)$——区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 X_1 处的观测值

$Z(X_1+h)$——区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 X_1+h 处的观测值

本研究采用高斯模型拟合研究区地下水埋深的空间自相关特性，该模型的一般公式如下

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

式中　C_0——块金值，地下水埋深的随机变化值（不受空间变异影响）

$f(x)$——半变异函数

C——偏基台值，表示地下水埋深由空间结构引起的变异程度[19]

a——变程，表示变异函数达到基台值时的采样点间隔距离，反映了地下水埋深的空间自相关尺度[20]

一般的变异函数曲线如图 3 所示，其主要参数包括块金值 C_0、基台值 C_0+C 和变程 a[18]。基台值随 h 的增大而增大，从 C_0 达到一个相对稳定的值，它表示地下水埋深的空间变异，基台值越高，表示系统总的空间异质性越强。

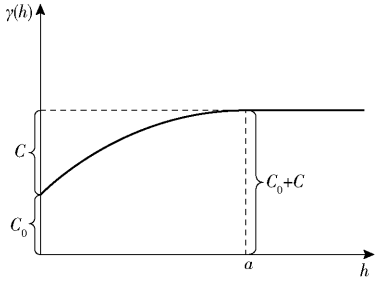

图 3　半变异函数曲线示意图

Fig. 3　Schematic of half variation function curve

3.2　克里金插值

克里金插值法又称空间自协方差插值法，它是由南非矿业工程师 KRIGE 提出的一种最优内插法[21]，在地下水模拟、土壤制图等方向有广泛的应用。该方法首先以半变异函数考虑某一空间变量在空间位置上的变异分布，确定对一个待插值点有影响的距离范围，然后以该范围内的样点来估计待插值点的属性值[22]。克里金插值的一般公式可表示

如下

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{N} \gamma_i Z(s_i) \tag{3}$$

式中 $Z(s_i)$——影响范围内第 i 个位置处的测量值

γ_i——第 i 个位置处的测量值的未知权重

s_0——预测位置

$\hat{Z}(s_0)$——预测位置的估计值

n——影响范围内的测点个数

s_i——第 i 个测量位置

3.3 景观格局动态演变分析

采用 GIS 空间分析方法对景观演变进行分析，包括景观格局转移矩阵、景观格局动态度。其中，利用景观格局转移矩阵分析两个时间节点间各景观类型的相互转移情况，景观格局动态度用来分析各景观类型和区域整体的景观格局演变剧烈程度。

4 结果与分析

4.1 磴口县地下水埋深空间异质性分析

在 ArcMap 10.2 平台下，利用 Geostatistical analysis 模块，对研究区 100 个地下水常年观测井在 2008、2016 年的平均三维空间趋势分析，结果如图 4 所示，其中 X 轴正方向为正东方向，Y 轴正方向为正北方向，Z 轴垂直 XY 平面。

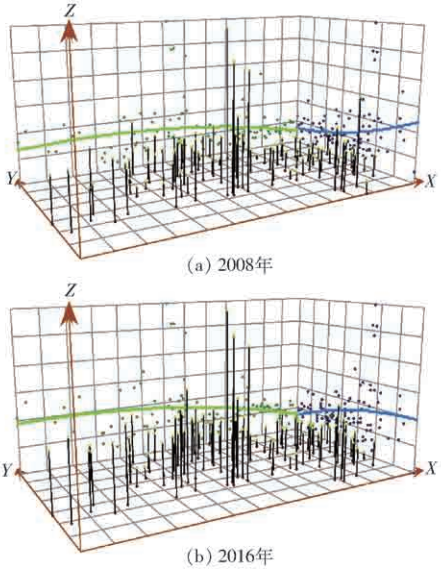

图 4 地下水埋深趋势分析

Fig. 4 Trend analyses of groundwater depth

由图 4 可知，磴口县地下水埋深数据的分布表现出较为明显的空间趋势。在东西方向上，2008、2016 年地下水埋深均呈现出由东向西逐渐加深的趋势，2016 年磴口县西部地下水埋深较 2008 年稍有变小，对比两年的土地利用数据可知，2016 年磴口县西部水体面积增加较为明显，且沙漠边缘人工草地面积也有所扩张，这反映出磴口县西部生态环境的改善是地下水位上升的重要原因。在南北方向上，地下水位在 2008、2016 年均呈现由北向南逐渐升高的趋势，然而 2016 年与 2008 年相比，磴口县南部地下水位下降较为明显，分析可知，2006 年建筑用地相比 2008 年有所增加，且磴口县南部的黄河河道有较大面积被开垦为耕地，这种土地利用上的变化对地下水埋深的变化产生了明显影响，使得县域南部地下水位变深。

通过 GS + 软件对地下水埋深测点数据采用半变异函数建模，并实现其空间插值预测及精度验证[23]。半变异函数的拟合采用高斯模型完成[24]，通过多次模拟试验调整函数步长，最终拟合结果如图 5 所示，2008、2016 年模型拟合的决定系数 R^2 分别为 0.975 和 0.938，均达到了较高的精度。

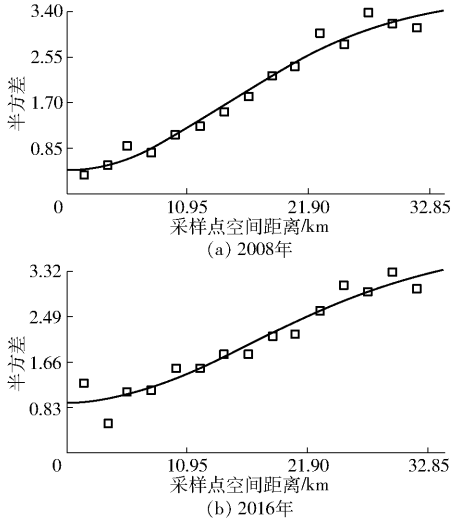

图 5 地下水埋深半变异函数拟合曲线

Fig. 5 Semivariograms of groundwater depth

由图 5 可知，2008、2016 年磴口县地下水埋深的偏基台值分别为 0.440 和 0.933，2016 年升高较为明显，基台值越高，表明地理变量由随机因素引起的空间异质性越高，因此与 2008 年相比，地下水埋深受人为随机影响的程度有所加深。块金值与基台值之比（$C_0/(C_0+C)$）称为基底效应，该指数常用来衡量由随机部分引起的空间变异，按照区域化变量空间相关性程度的分级标准，当 $C_0/(C_0+C)<25\%$ 时，空间变量的相关性强烈，当 $25\% \leqslant C_0/(C_0+C)<75\%$ 时，空间变量的相关性中等，当 $C_0/(C_0+C) \geqslant 75\%$ 时，空间相关性很弱，经计算可知，2008 年与 2016 年磴口县地下水埋深的基底效应分别为 12.2% 和 25%，表明研究时段内磴口县地下水埋深具有较强的空间相关性，但是 2016 年的基底效应有所升高，说明地下水埋深的空间异质性增强，随机权重逐渐增大。2008、2016 年地下水埋深半变异函数的变程分别为 20.74 km 与 23.90 km，空间的最大相

关距离略有增大。

利用高斯模型对 2008 年和 2016 年磴口县地下水埋深进行空间插值，结果如图 6 所示，对插值结果进行交叉验证，结果如图 7 所示，图 7 表明地下水埋深的空间预测精度基本满足研究需要，证明模型选取与参数设定均较为合理，拟合效果良好。

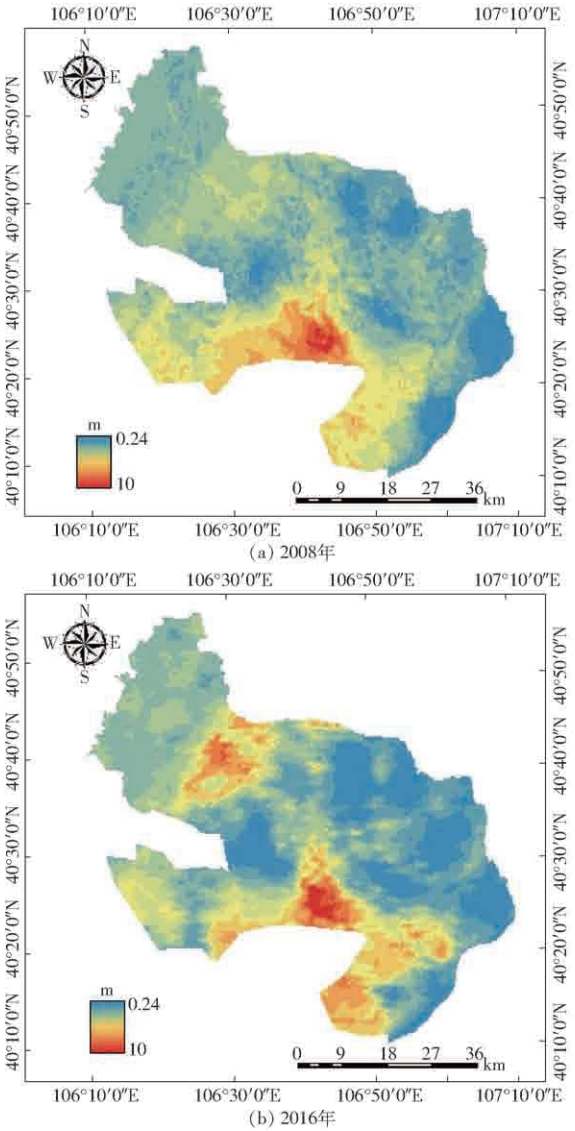

图 6　磴口县地下水埋深空间插值

Fig. 6　Spatial interpolation of groundwater depth

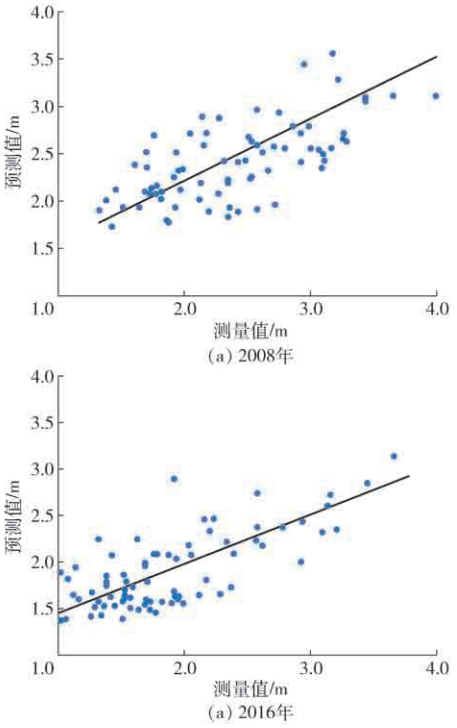

图 7　插值结果交叉验证

Fig. 7　Cross validation of interpolation results

4.2　磴口县景观格局演变分析

基于研究区 2008 年与 2016 年景观格局分布图（图 2），本研究利用 GIS 分析工具制作了研究区 2008—2016 年景观格局转移矩阵如表 2 所示，并分析了不同景观格局类型的转移动态度，如表 3 所示。

由分析可知，在研究时段内，研究区最主要的景观类型为林地，占县域面积的 30% 以上，其次为沙地、裸地与水体，占县域面积的 20% 左右，耕地与建筑用地面积相对较小，此种景观格局构成充分表现了磴口县防沙治沙与生态保护对河套平原起到了重要的屏障作用。分析 2008—2016 年的景观格局演变可知，研究时段内，建筑用地与水体发生了最为剧烈的变化，其中建筑用地变化速率为 69.79%，转移速率为 12.22%，新增速率为 57.57%，增加明显。由转移矩阵可知，建筑用地最大的转入来源为耕地，

表 2　2008—2016 年景观格局转移矩阵

Tab. 2　Transfer matrix of landscape pattern in 2008—2016　　km^2

		2016 年景观类型						合计	占比/%
		耕地	建筑用地	林地	沙地	水体	裸地		
2008 年景观类型	耕地	8.10	10.61	35.53	8.93	525.07	2.82	591.06	16.10
	建筑用地	43.10	1.25	3.33	0.81	7.11	0.01	55.62	1.52
	林地	9.38	35.55	1 053.02	50.37	160.67	0.60	1 309.60	35.68
	沙地	5.73	42.26	107.92	617.78	63.80	0.53	838.03	22.83
	水体	0.51	162.95	6.54	3.36	35.14	3.83	212.34	5.78
	裸地	0.09	4.77	3.07	1.86	0.34	654.09	664.22	18.09
	合计	66.91	257.39	1 209.41	683.11	792.14	661.90		
	占比/%	1.82	7.01	32.95	18.61	21.58	18.03		

表 3 2008—2016 年土地利用动态度

Tab. 3 Dynamic degrees of landscape in 2008—2016

%

景观类型	变化速率	转移速率	新增速率
耕地	13.57	12.33	1.24
建筑用地	69.79	12.22	57.57
林地	3.94	2.45	1.49
沙地	4.26	3.29	0.97
水体	54.99	10.43	44.56
裸地	0.34	0.19	0.15

由耕地转为建筑用地的面积达到 43.10 km^2，超过了其他景观类型的转移面积之和，这表明在城镇化过程中，建筑用地对耕地产生了较明显的侵占，当地耕地红线的保持可能面临一定压力；在研究时段内水体的总体动态度为 54.99%，其中转移速率为 10.43%，新增速率为 44.56%，该时段内水体面积急剧增加，主要是由于政府大力开展引黄与水土保持工程，尤其以磴口县东南部奈伦湖的建设为代表，灌溉工程的大力建设有效改善了当地的生态环境，然而灌区土地同样面临土壤盐碱化等问题，当地政府应注意治理。研究时段内，耕地面积减少较为明显，由研究初期的 591.06 km^2 减少到研究末期的 66.91 km^2，耕地景观的转出方向主要为水体（525.07 km^2）和林地（35.53 km^2），此种景观格局变化充分反映了当地决策者对荒漠绿洲区生态保护与防沙治沙工作的重视。研究时段内，林地面积基本保持不变，而沙地面积有所减少，由 838.03 km^2 减少到 683.11 km^2，反映了研究时段内防沙治沙工作的成效。裸地景观在研究时段内基本没有变化。

为了进一步分析研究时段内景观格局演变对地下水埋深的驱动作用，本研究用 2016 年地下水埋深插值数据减去 2008 年地下水埋深插值数据，得到两年间的埋深变动，如图 8a 所示。利用 ArcMap 10.2 空间叠加分析功能，提取研究时段始末景观格局产生转移的区位，如图 8b 所示。

相比 2008 年，2016 年地下水埋深在磴口县城、当前奈伦湖外围附近以及狼山山前有较为明显的加深。结合景观格局演变分析可知，研究时段内磴口县城发生了明显扩张，使得大量人口与生产活动向其聚集，造成了较大的用水压力，因此在县城附近形成了地下水漏斗。县域南部奈伦湖周边地下水位有明显上升，然而外围地区却下降明显，此种变化产生的原因可能是奈伦湖提供了较为充足的水源，使得当地发展了耗水较大的生产活动，反而使得地下水位有所下降。山前地下水埋深的加深最为明显，结合景观格局演变分析可知，此地东部耕地与建筑用地的扩张较为明显，用水量较之前有所增加，对地下水抽取使得山前地下水向东部补给，山前地下水位下降明显。县域西南部、沙金套海苏木周围、呼吉日忽热附近以及奈伦湖临近地区地下水位上升明显（图 8）。从景观格局的演变分析可知，县域西南发生了大量林草地向耕地的转移，实地调查发现耕地的扩张伴随了大量的水渠与灌溉设施的建设，耕地的灌溉水下渗，使当地地下水得到了地表水（黄河引水）的补充；沙金套海苏木周围与呼吉日呼热附近情况与县域西南较为相似，同样是灌溉设施的完善使得灌渠引水在浇灌耕地的同时对当地地下水进行了补充。

对比研究时段始末的地下水分布格局可知，伴随时间的推移，磴口县对水资源的利用效率有所升高，地下水位埋深本就较深的山前与沙漠腹地进一

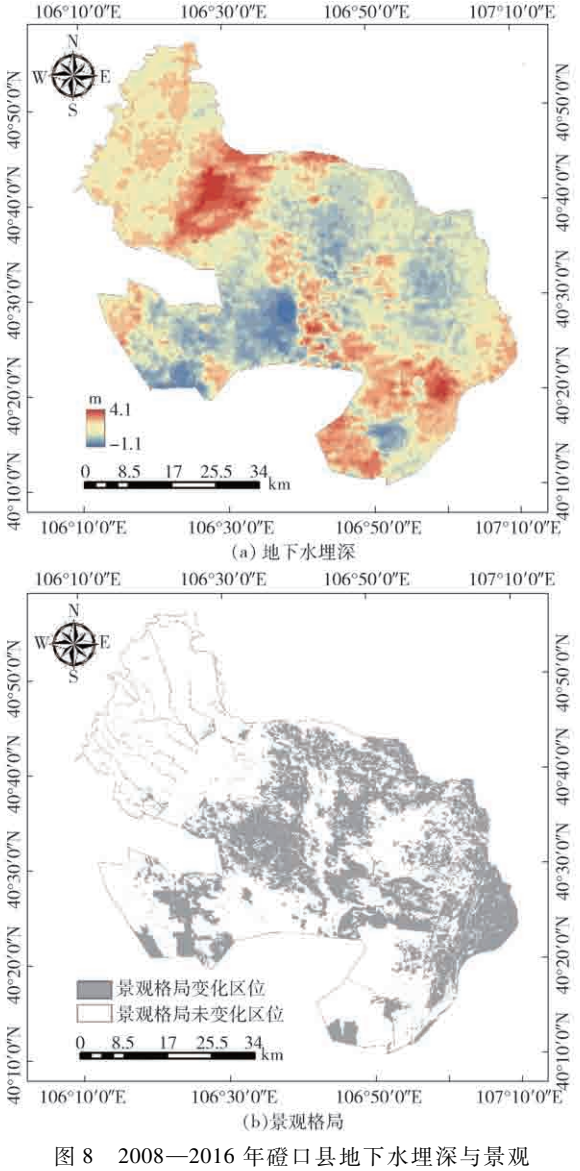

图 8 2008—2016 年磴口县地下水埋深与景观格局时空耦合变异分析

Fig. 8 Spatial and temporal coupling analysis on evolution of groundwater depth and landscape pattern of Dengkou County from 2008 to 2016

步加深，而具有生态与生产潜力的地区，地下水得到了明显补给，由此可得，当前磴口县地下水的利用方式较为合理。

5　结论

（1）磴口县地下水埋深大体遵循由东北向西南逐渐加深的趋势，县域中部沙漠分布区位也有较深的地下水埋深。磴口县地下水埋深空间相关性较强，研究时段内地下水埋深空间异质性中的随机扰动增强，基台值与变程均有所增加，空间异质性总体呈上升趋势。

（2）磴口县主要的景观类型为林地，其次为沙地、裸地与水体，研究时段内建筑用地与水体增加明显，耕地与沙地略有减少，景观格局的演变反映了磴口县防沙治沙工作的成效。

（3）从景观格局演变对地下水埋深的影响来看，建筑用地的扩张使得相应地区地下水位明显加深，而地表灌溉系统的不断完善使得耕地附近地下水位有所上升，在研究时段内，磴口县地下水资源的利用效率有较明显的提高。

参　考　文　献

[1] 程莉蓉，王金生，李云生. 关于我国地下水水质保护的思考与建议[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2009，45(5)：564－567.
CHENG Lirong，WANG Jinsheng，LI Yunsheng. On the groundwater protection strategies in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science)，2009，45(5)：564－567. (in Chinese)

[2] 鞠玉梅. 绵竹市地下水资源评价[D]. 南京：河海大学，2005.
JU Yumei. Appraisal of groundwater resources in the city of Mianzhu[D]. Nanjing：Hohai University，2005. (in Chinese)

[3] 邓卉，杨嘉. 地下水动态监测技术实例研究[J]. 价值工程，2015，34(29)：103－105.
DENG Hui，YANG Jia. Case study of groundwater dynamic monitoring technology[J]. Value Engineering，2015，34(29)：103－105. (in Chinese)

[4] 胡汝骥，樊自立，王亚俊，等. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J]. 自然资源学报，2002，17(3)：321－326.
HU Ruji，FAN Zili，WANG Yajun，et al. Groundwater resources and their characteristics in arid lands of Northwestern China[J]. Journal of Natural Resources，2002，17(3)：321－326. (in Chinese)

[5] 张鸿义，曾凡江，安海棠. 中国干旱区地下水资源及开发潜力分析[J]. 干旱区研究，2009，52(2)：3－15.
ZHANG Hongyi，ZENG Fanjiang，AN Haitang. Formation，distribution and transport of shallow groundwater in arid areas，China[J]. Arid Zone Research，2009，52(2)：3－15. (in Chinese)

[6] 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)：3－7.
FAN Zili，CHEN Yaning，LI Heping，et al. Determination of suitable ecological groundwater depth in arid areas in northwest part of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2008，22(2)：3－7. (in Chinese)

[7] 仪彪奇，王金生，左锐. 基于地下水水源地分类的保护区划分方法筛选[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2013，49(2)：246－249.
YI Biaoqi，WANG Jinsheng，ZUO Rui. Determination and delineation methods based on classification of wellhead protection areas[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science)，2013，49(2)：246－249. (in Chinese)

[8] 刘洪兰，张俊国，董安祥，等. 张掖市水资源利用现状及未来趋势预测[J]. 干旱区研究，2008，23(1)：35－40.
LIU Honglan，ZHANG Junguo，DONG Anxiang，et al. Analysis on the actuality of water resource utilization and its future prediction in Zhangye City，Gansu Province[J]. Journal of Arid Zone Research，2008，23(1)：35－40. (in Chinese)

[9] 陈燕，齐清文. 达拉特旗土地利用及水土保持措施现状遥感调查与制图[J]. 水土保持学报，2003，17(6)：137－139.
CHEN Yan，QI Qingwen. Investigation on land use and water and soil conservation measures by remote sensing-taking Dalate County，Inner Mongolia autonomous region for example[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2003，17(6)：137－139. (in Chinese)

[10] 韩永光. 乌兰布和沙漠绿洲沙产业可持续发展研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2012.
HAN Yongguang. Oasis deserticulture and sustainable development for Ulan Buh Desert[D]. Huhhot：Inner Mongolia Agricultural University，2012. (in Chinese)

[11] 苏慧艳. 朝阳市地下水开发利用与保护规划[J]. 地下水，2009，31(3)：64－65.
SU Huiyan. The development and utilization of groundwater in Chaoyang and the protection planning[J]. Journal of Groundwater，2009，31(3)：64－65. (in Chinese)

[12] CRONIN A A，BRESLIN N，GIBSON J，et al. Monitoring source and domestic water quality in parallel with sanitary risk identification in Northern Mozambique to prioritise protection interventions[J]. Journal of Water & Health，2006，4(3)：333.

[13] 姚辉. 乌拉尔甘草遗传多样性与品质评价及槲寄生的抗氧化活性成分[D]. 上海：复旦大学，2006.
YAO Hui. Genetic diversity and quality assessment of *Glycyrrhiza uralensis* and antioxidant constituents of *Viscum coloratum*[D]. Shanghai：Fudan University，2006. (in Chinese)

[14] 何恒斌, 张惠娟, 贾桂霞. 磴口县沙冬青种群结构和空间分布格局的研究[J]. 林业科学, 2006,42(10): 13 - 18.
HE Hengbin, ZHANG Huijuan, JIA Guixia. Population structure and spatial distribution pattern of *Ammopiptanthus mongolicus* in Dengkou County, Inner Mongolia autonomous region[J]. Journal of Forestry Science, 2006, 42(10): 13 - 18. (in Chinese)

[15] 肖太梁. 东北地区经济发展的空间关联分析[D]. 沈阳:辽宁师范大学, 2014.
XIAO Tailiang. Spatial correlation analysis of economic development in the northeast China[D]. Shenyang: Liaoning Normal University, 2014. (in Chinese)

[16] SHAO J, CUI Y, HAO Q, et al. Study on the estimation of ground water withdrawals based on groundwater flow modeling and its application in the North China Plain[J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(6): 1033 - 1042.

[17] RUUD N, HARTER T, NAUGLE A. Estimation of groundwater pumping as closure to the water balance of a semiarid, irrigated agricultural[J]. Journal of Hydrology, 2004, 297(124): 51 - 73.

[18] 杨柳, 陈喜, 章树安, 等. 基于地表-地下水文过程模拟的农业灌溉开采量估算[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 54 - 58.
YANG Liu, CHEN Xi, ZHANG Shu'an, et al. Estimation of groundwater withdrawal for agricultural irrigation based on surface groundwater hydro logical simulation[J]. South North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 54 - 58. (in Chinese)

[19] 张树军, 王光谦, 王芳, 等. 柴达木盆地植被生态需水研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(12): 26 - 29.
ZHANG Shujun, WANG Guangqian, WANG Fang, et al. Study on vegetation ecological water demand in Qaidam basin[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(12): 26 - 29. (in Chinese)

[20] 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.
ZHOU Jian, LI Xin, WANG Genxu, et al. The spatial-temporal variation analysis of groundwater and response to land-use change in the middle researches of the Heihe River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3): 498 - 506. (in Chinese)

[21] 陈朋. 传感器网络数据插值算法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
CHEN Peng. Studies of sensor network data interpolation algorithm[D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese)

[22] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 45 - 51.
YAO Rongjiang, YANG Jinsong. Quantitative analysis of spatial distribution pattern of soil salt accumulation in plough layer and shallow groundwater in the Yellow River Delta[J]. Transantions of the CASE, 2007, 23(8): 45 - 51. (in Chinese)

[23] 李润生, 龚忆清. 长江口北岸土地利用空间结构分析[J]. 现代测绘, 2009, 32(6): 33 - 35.
LI Runsheng, GONG Yiqing. Land-use spatial structure analysis of the north branch of Yangtze river estuary[J]. Modern Surveying and Mapping, 2009, 32(6): 33 - 35. (in Chinese)

[24] 常栋, 徐明康, 王勇, 等. 缓坡植烟田土壤微量元素的空间变异特征[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(3): 34 - 41.
CHANG Dong, XU Mingkang, WANG Yong, et al. Spatial variability of soil trace elements in gentle slope tobacco field[J]. Journal of China Tobacco, 2012, 18(3): 34 - 41. (in Chinese)