

2000—2020 年昌吉州东部平原区地下水位埋深对 土地利用及干旱时空演变的动态响应

刘 坤^{1,2}, 高 凡^{1,2}, 吴 彬^{1,2}, 胡 鑫^{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: 联合土地利用与覆被变化及气象干旱综合分析区域地下水位埋深变化及其动态响应关系,明晰地下水位埋深变化的阶段性主导因素,对地下水超采地区综合治理和地下水资源有效管控具有现实意义。选取昌吉州东部平原区 2000—2020 年 78 眼地下水监测井月尺度地下水位埋深数据资料及 5 期遥感影像数据并结合同期多尺度标准化降水蒸散发指数 SPEI,分析不同时空尺度地下水位埋深对土地利用/覆被变化及 SPEI 的动态响应规律,探讨研究区土地利用变化与干旱变化趋势对地下水位埋深变化的综合影响。结果表明:研究区 21 年间地下水位埋深表现出不显著变化(2000—2005 年)—显著增大(2005—2014 年)—变缓(2014—2017 年)—持续增大(2017—2020 年)的变化特征,整体呈持续增大动态趋势,空间分布呈北向南逐渐增大特征;同期土地利用类型面积发生了显著变化,耕地为其主要的土地利用类型,面积呈持续增加趋势,分形维数呈现出先降低(2000—2005 年)后升高(2005—2010 年)再降低(2010—2020 年)的变化特征;SPEI 年际动态变化呈显著干旱趋势变化特征,年尺度序列在 2012 年、2017 年发生突变,2016 年开始气象干旱发生频次增加;2000—2015 年研究区地下水位埋深动态变化对土地利用变化尤其是耕地变化响应显著,2016—2020 年地下水位埋深动态变化是对土地利用变化与气候干旱因素的联合响应。

关键词: 地下水位埋深;地下水超采;土地利用;分形特征;气象干旱;联合响应

中图分类号:P933

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)05-0150-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.021

Dynamic Response of Groundwater Depth to Land Use and Temporal-Spatial Evolution of Drought in the Eastern Plains of Changji Prefecture from 2000 to 2020

LIU Kun^{1,2}, GAO Fan^{1,2}, WU Bin^{1,2}, HU Xin^{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: Based on Land Use and Cover Change (LUCC) and meteorological drought, comprehensively analysis of regional Groundwater Depth (GWD) change and its dynamic response, and clarifying the periodic leading factors of GWD change has practical significance for comprehensive management and effective control of groundwater resources in groundwater overexploitation area. Collecting the monthly-scale GWD data of 78 groundwater monitoring wells in the eastern plain area of Changji Prefecture from 2000 to 2020 and five phases of remote sensing image data, and combing with the multi-scale Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) during the contract period, the dynamic response of GWD at different spatial and temporal scales to LUCC and SPEI were analyzed, and the comprehensive influence of land use change and drought change trend on the change of GWD in the study area was discussed. The results showed that during the 21 years from 2000 to 2020, the GWD in the study area showed the change characteristics of no significant indigenous change (2000—2005)—significant indigenous increasing (2005—2014)—slowing down (2014—2017)—continuous increasing (2017—2020). The overall trend was increasing continuously, the spatial distri-

收稿日期:2022-02-21

资助项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01A99);2021 年研究生“新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室”研究项目(ZDSYS-YJS-2021-05)

第一作者:刘坤(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事内陆干旱区水文过程及水资源利用研究。E-mail:1595667313@qq.com

通信作者:高凡(1980—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水资源系统工程与河湖生态保护修复研究。E-mail:gutongfan0202@163.com

bution gradually increased from north to south. During the same period, the area of land use types changed significantly. Cropland was the main land use type, and its area increased continuously. The fractal dimension showed the change characteristics of first decreasing (2000—2005) then increasing (2005—2010), and then decreasing (2010—2020). The interannual dynamic change of SPEI showed a significant trend of indigenous drought. The annual-scale sequence mutated in 2012 and 2017, and the frequency of meteorological drought increased since 2016. From 2000 to 2015, the dynamic change of GWD in the study area responded significantly to land use change, especially cultivated land change. From 2016 to 2020, the dynamic change of GWD was a joint response to land use change and meteorological drought factors.

Keywords: groundwater depth; groundwater overexploitation; land use; fractal characteristics; meteorological drought; joint response

在年降水量 <500 mm的干旱半干旱地区^[1],水资源短缺是影响该地区灌溉农业可持续发展的关键约束^[2-3]。此类地区蒸发量大,地表水资源无法满足用水需求,地下水资源成为农业、生活和工业用水的主要水源^[4]。过度开采地下水导致地下水位下降,引起诸多地质与生态环境问题^[5-6]。地下水位埋深(ground water depth,GWD)对气候变化和人类活动较为敏感^[7],其变化可较好反馈地下水资源状况,是地下水资源管理的合理管控指标之一^[8]。影响地下水位埋深的自然因素包括降水、地表径流、蒸发、潮汐运动和地球板块挤压造成的地震等^[9-10],非自然因素主要指水土资源开发导致的土地利用与覆被变化(land use and cover change,LUCC)^[11]。值得关注的是,近年来全球和区域尺度的干旱特征呈增加趋势,干旱过程也发生了变化^[12]。如发生在作物生长季的降水亏缺同时伴随高温热浪,强烈的太阳辐射导致蒸散发增加、土壤湿度降低、径流量减少^[13-14],进一步增加地下水资源开采量。因此,基于上述背景,研究地下水位埋深变化对不同时间尺度干旱与LUCC变化的响应规律和时空差异特征,综合评估干旱和LUCC对区域地下水位埋深变化的影响尤为重要,可为区域地下水位管控和地下水资源的保护管理提供科学决策支撑。目前,关于区域地下水位埋深变化及其原因分析的已有研究成果中,主要集中在地下水位长系列监测数据的时间序列方法分析^[15]及以定性分析为主的驱动因素识别^[16],鲜有联合研究区域干旱特征变化和LUCC对地下水位埋深影响的综合效应及地下水位埋深变化对LUCC和干旱的时空动态响应关系。

新疆昌吉州东部平原区位于天山北麓、准噶尔盆地东南缘,新疆昌吉回族自治州东部,地处天山北坡经济带腹地,地表水资源匮乏,灌溉农业发达,地下水是主要灌溉水源,由于长期大量开采地下水,昌吉州东部为新疆划定的15个地下水超采区之一,为严重超采区,超采面积 $5\,895\text{ km}^2$,其中严重超采区面积 $4\,683\text{ km}^2$,超采量为 $43\,876\text{ 万 m}^3$ 。综合分析该区地下水位埋深变化对

LUCC及干旱时空动态响应关系,明晰地下水位埋深变化原因,对于当地地下水超采区综合治理和地下水资源有效管控具有突出现实意义和科学价值。基于此,本文选取昌吉州东部平原区2000年、2005年、2010年、2015年、2020年5期遥感影像数据进行土地利用动态与分形特征分析,结合研究区2000—2020年区域4个气象站统计的多尺度标准化降水蒸散发指数(standardized precipitation evaporation index,SPEI),依据同期78眼地下水监测井月尺度地下水位埋深数据资料,分析不同时空尺度下研究区地下水位埋深对LUCC及SPEI的动态响应特征和差异性规律,探讨研究区土地利用变化与干旱变化趋势对地下水位埋深变化的综合影响,为研究区地下水超采综合治理和地下水位管控提供决策支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昌吉州东部平原区位于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州东部,在3县(木垒县、奇台县、吉木萨尔县)、1市(阜康市,为县级市)行政区内(图1),属于典型大陆性干旱气候,年均气温 $6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 188.86 mm ,年蒸发量 $1\,988.5\text{ mm}$,生态环境敏感脆弱。由于天山北坡山前沉积了巨厚的第四纪松散堆积物,地下水主要储存在盆地南缘的松散堆积物中。沿天山北麓呈狭长带状分布着大小不等、新老重叠的冲洪积扇,地层岩性从冲洪积扇上部、中部到下部至扇缘,从卵砾石、砂砾石到粒径较小的粉细砂、粉土等,含水层富水性自南向北或东南向西北由强变弱,地下水位埋深也由高到低分布。平原区地下水补给主要接受地表水转化补给,山前侧向径流补给及少量的降雨入渗补给,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‰ 。在冲洪积扇缘,地下水径流受阻,多形成泉水溢出带,或通过中下部含水层向下径流。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。

1.2 数据来源与预处理

气象数据选取研究区内 2000—2020 年 4 个气象站点(阜康、吉木萨尔、奇台、木垒气象站)的日气象数据(包括累积降水、平均气温、平均相对湿度、逐日风速、日照时间等),气象数据来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn>)。

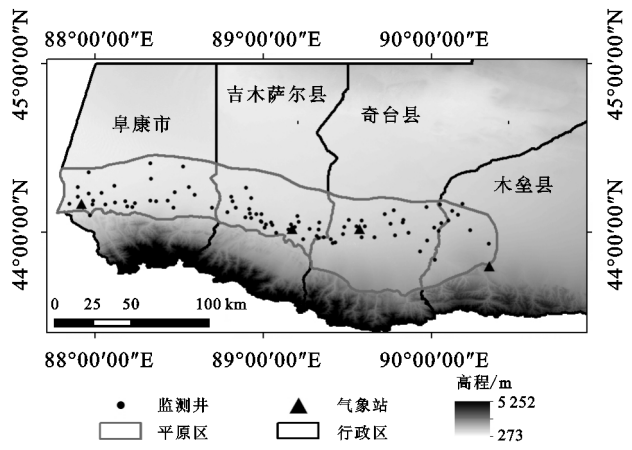


图 1 研究区地理位置、气象站及监测井分布

选取的遥感影像数据源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),分辨率 30 m,包括 2000 年、2005 年、2010 年的 Landsat—TM/ETM 遥感影像数据及 2015 年、2020 年的 Landsat8 遥感影像数据,根据中国土地利用/覆盖数据分类体系^[17],并考虑研究区实际地物分布与遥感影像解译的可能性,将其划分为耕地、林地、草地、水域、城镇用地、其他未利用地 6 类土地利用类型。

研究区地下水位埋深数据收集自研究区各地州(市)平原区 78 眼监测井 2000—2020 年实测月尺度埋深数据,以上地下水位埋深数据均由昌吉州水资源中心提供。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析

(1)土地利用动态度。土地利用动态度指在某一区域一定时间内不同土地利用类型和数量的变化情况,可以反映出区域内土地利用类型的变化剧烈程度^[18]。

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\% \quad (1)$$

式中: K 为研究时段内某一土地利用类型动态度; U_a 、 U_b 分别为研究期初及研究期末某一种土地利用类型的数量; T 为研究时段长,当 T 的时段设定为年时, K 的值就是该研究区某种土地利用类型年变化率。

(2)分形维数。分形维数是对某一结构的自相似性特征进行量化表达的指标,能够反映一个分形体的不规则程度^[18]。利用分形维数既可以对该结构的复杂性进行定量测度,也可以对其稳定性进行表征参量。研究土地利用空间结构的分形特征,主要是定量

描述其面积的大小及其边界线的曲折程度,基于已知的各土地利用类型的周长、面积等信息,采用周长—面积法拟合出面积关于周长的双对数回归分析模型,计算步骤为:

$$\ln A(r)=\frac{2}{D}\ln P(r)+C \quad (2)$$

式中: $A(r)$ 为斑块面积(m^2); D 为分形维数,一般情况下, $D\in[1,2]$, D 越大,该类用地规则程度越低,其结构越复杂; $P(r)$ 为斑块周长(m); C 为常数。

基于分形维数(D)计算得到稳定性指数(S),并进行显著性检验,确定系数(R^2)均大于 0.9 则结果可信,计算公式为:

$$S=|1.5-D| \quad (3)$$

式中: S 为稳定性指数, $S\in[0,0.5]$, S 越大,该类用地越趋于稳定状态; D 为分形维数。

1.3.2 标准化降水蒸散发指数的计算 标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)^[19]、Palmer 干旱指数(palmer drought severity index, PDSI)^[20]、标准化降水蒸散发指数(SPEI)^[21]被广泛用于监测和评估干旱程度,而标准化降水蒸散发指数(SPEI)的优势在于其结合了标准化降水指数 SPI 的多尺度效用与 Palmer 干旱指数对温度和降水的敏感性,因此本研究选用 SPEI 指标评估研究区气候的干旱程度。其计算步骤为:

- (1)计算潜在蒸散量。
- (2)确定不同时间尺度下降水量(P)与蒸散量(PET)的差值累积。
- (3)对(2)得到的结果使用 log-logistic 概率分布,得到 SPEI 系列数据。

根据国家气候干旱等级划分标准^[20],划分为 5 个等级,见表 1。

表 1 基于 SPEI 的干旱等级划分

等级	类型	SPEI
1	无干旱	$(0,+\infty)$
2	轻度干旱	$(-1,0]$
3	中度干旱	$(-1.5,-1]$
4	严重干旱	$(-2,-1.5]$
5	极端干旱	$(-\infty,-2]$

1.3.3 地下水位埋深空间插值 对研究区内 2000—2020 年 78 眼地下水位埋深监测井实测月均埋深数据进行统计,并采用 Kriging 插值方法对监测井实测埋深数据进行空间插值^[22-23],得到地下水位埋深时空分布的栅格数据。

1.3.4 Mann-Kendall 趋势检验法 Mann-Kendall 趋势检验法^[24](以下简称 M-K 法)是目前水文气象数据分析常用的一种检验时间序列的变化趋势特征、显著性及突变点的时间序列检验方法,具体步骤见文献^[24]。

1.3.5 相关性分析法 秩相关系数法又称等级相关系数法,是衡量时间序列变化趋势在统计上是否有显著性的常用方法,其原理是将两因子的样本值从小到大按顺序排列位次,以各因子样本值的位次代替实际数据加以计算,得到结果评价显著性^[25]。对于相关性分析,本文选用 Spearman 秩相关系数。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年研究区地下水位埋深时空动态变化

2.1.1 时间尺度变化 本着研究区地下水监测井长系列数据完整及选点均匀的原则,选择阜康市渔儿沟水源井(fk11)、吉木萨尔县基 18 监测井(jmse18)、奇台县乔仁乡农 3 村监测井及木垒县潜 23(ml23)为研究

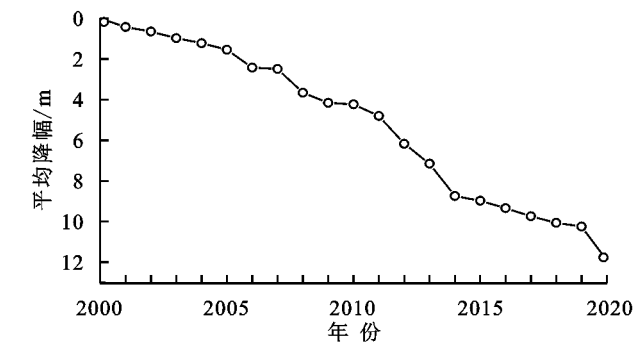


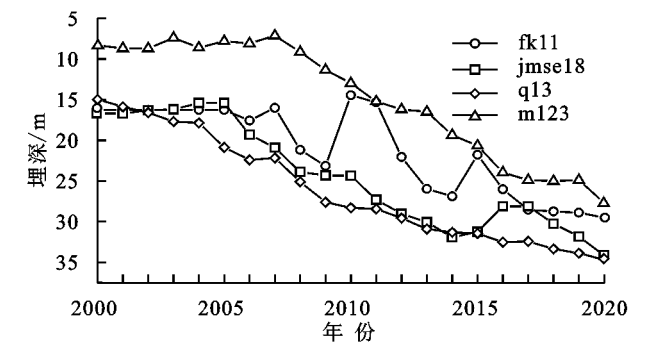
图 2 昌吉州东部平原区 2000—2020 年地下水位埋深平均降幅(较 2000 年)及典型监测井地下水位埋深变化

2.1.2 空间尺度变化 为分析地下水空间分布变化特征,将 2000—2020 年研究区地下水位埋深进行空间插值。由图 3 可知,研究区 2020 年地下水位埋深分布呈北向南逐渐增加特征,变化符合地形变化趋势,北部靠近山区,在冲洪积扇上部,以卵砾石、砂砾石为主,结构单一、颗粒粗大,含水层厚度大,中南部位于冲洪积扇中段、下部至扇缘,含水层颗粒逐渐变细,区域内地下水位埋深分布空间差异性较大,且东南部地下水位埋深>50 m 分布面积较大。对比分析 2000 年,2005 年、2010 年、2015 年及 2020 年地下水位埋深分布可以看出,2000—2005 年地下水位埋深分布无较大变化;2005—2010 年间研究区东南部地下水位埋深显著增加,21~30,31~40 m 地下水位埋深面积显著增加,且>80 m 地下水位埋深面积开始于研究区南部出现;2010—2015 年中西部、东南部 1~10,21~30 m 地下水位埋深面积显著减少,中西部>30 m、东南部 51~60,71~80,81~90,91~100 m 地下水位埋深面积显著增加;2015—2020 年研究区局部区域地下水位埋深呈恢复趋势,但其东部 21~30,41~50,51~60 m 地下水位埋深面积呈显著增加趋势。

2.2 研究区地下水位埋深对土地利用变化的响应

2.2.1 2000—2020 年研究区 LUCC 分析 基于 ArcGis 软件对研究区 Landsat 遥感影像中的土地覆

区典型监测井,并绘制 2000—2020 年地下水位埋深变化图。通过研究区 78 眼监测井地下水位埋深平均降幅变化及 4 眼典型监测井地下水位埋深年际变化(图 2)可以看出,研究区 2000—2020 年地下水位埋深平均降幅呈持续增加趋势,其中 2000—2005 年地下水位埋深平均降幅变化不显著,2006—2014 年平均降幅呈显著增加趋势,在 2014 年、2015 年下降趋势减缓,自 2017 年、2018 年下降速率开始增大;大部分监测井分布于昌吉州灌区内,地下水动态类型以开采型与径流—开采型为主,选取的 4 眼典型监测井下降幅度不尽相同,但地下水位埋深总体呈下降趋势,且多年降幅均在 10 m 以上,时间尺度变化特征与地下水位埋深平均降幅变化表现一致。



被影像图进行预处理,对土地利用类型进行解译并重分类为耕地、草地、林地、水体、城乡居民用地和未利用土地 6 种类型,统计各土地利用类型所占面积。

(1)动态度。研究区 2000—2020 年不同土地利用类型变化及土地利用动态度变化见图 4 和表 2,可以看出 2000—2020 年 21 年间城镇建设用地面积呈持续增加趋势;耕地面积在 2000—2015 年呈增长趋势,其中,2000—2005 年间动态度仅为 0.54%,面积变化较小,在 2005—2010 年增幅最大,面积增加 1 855.33 km²,动态度达峰值 4.64%,2010—2015 年面积增加 526.50 km²,仍呈增加趋势,在 2015—2020 年耕地面积略下降,趋于稳定;2000—2020 年间林地与草地面积整体呈下降趋势,其中,在 2005—2010 年降幅最大,动态度分别为-6.65%,-3.36%,主要转化为耕地,其后趋于稳定;其他未利用地面积 2000—2020 年间呈现出先增加后减少趋势,整体趋于稳定。

(2)分形特征。土地利用分形特征主要包括分形维数和稳定性指数,能较好地描述土地利用类型的空间分布和内在规律^[18]。在同一种土地利用类型中,不同时间内尺度的分形维数可以反映出该地类随时间变化的规律。通过统计 2000—2020 年研究区不同土地利用类型的斑块数、斑块周长、斑块面积等数据,对不同土地利用类型的斑块面积(A)与斑块周长(P)作双对数线性拟

合, (R^2)均达到 0.9 及以上(图 5),线性回归方程拟合效果较好,分形理论对其适用性良好。

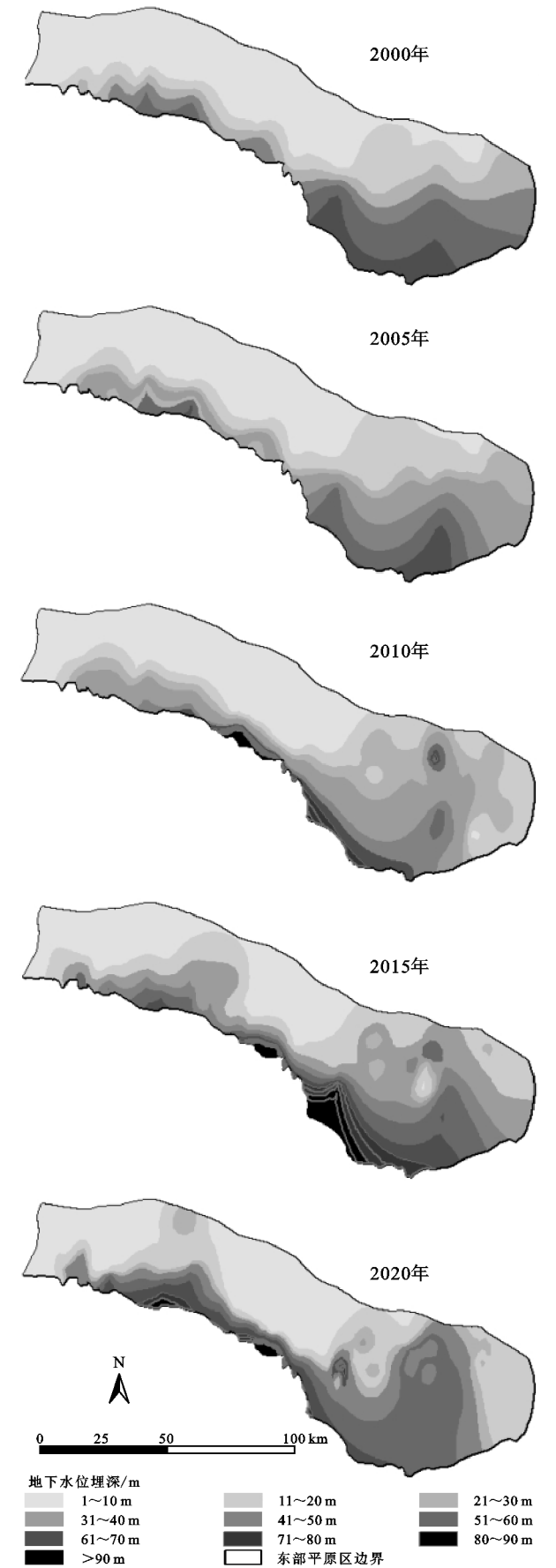


图 3 昌吉州东部平原区 2000—2020 年地下水埋深时空分布

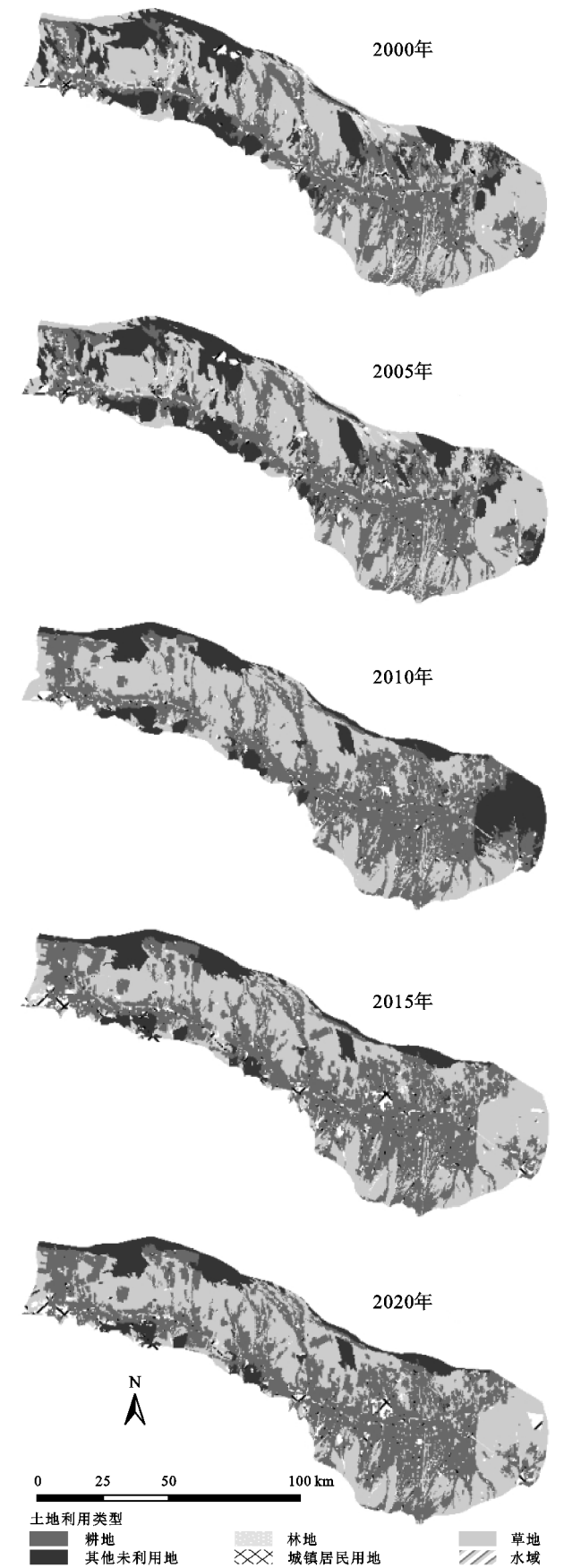


图 4 2000—2020 年不同土地利用类型变化时空分布

2000—2020 年研究区土地利用类型分形维数及稳定性指数计算结果见表 3,地下水开采是影响地下水位埋深及流域水均衡要素的主要因素之一,

由于耕地面积与机电井数量及地下水开采量之间存在直接关联^[26],本文土地利用类型分形特征研究主要考虑对地下水埋深影响较大的耕地。由表 3 可知,2000—2020 年,研究区耕地分形维数呈现出先降低(2000—2005 年)后升高(2005—2010 年)再降低(2010—2020 年),其中,2000—2005 年耕地面积增加了 209.05 km²,分形维数降低,复杂程度降低,稳定性增强;2005—2010 年耕地面积增加了 1 855.33 km²,分形维数达最高值($D=1.293$),耕地扩张,复杂

程度增加,稳定性降低($S=0.207$);2010—2015 年耕地面积趋于稳定,耕地布局趋于规则化,分形维数达到最低值($D=1.274$),复杂程度降低,稳定性增强,2015—2020 年耕地面积基本无变化,复杂程度降低,稳定性达到最高($S=0.226$)。新疆 2014 年以后实行最严格水资源管理制度,并对灌溉面积严格控制,耕地布局趋于稳定,对比分析可知,昌吉州东部平原区土地利用动态变化及耕地分形特征也表现出同步趋势。

表 2 昌吉州东部平原区土地利用动态度变化

土地利用 类型	2000—2005 年		2005—2010 年		2010—2015 年		2015—2020 年	
	变化	动态度/	变化	动态度/	变化	动态度/	变化	动态度/
	面积/km ²	%	面积/km ²	%	面积/km ²	%	面积/km ²	%
耕地	209.05	0.54	1855.33	4.64	526.50	1.07	−20.29	−0.04
林地	−16.43	−0.13	−823.77	−6.65	−56.90	−0.69	0.34	0
草地	−172.30	−0.12	−4899.71	−3.36	2323.60	1.92	−9.58	−0.01
其他未利用地	−23.27	−0.01	4129.34	2.56	−3209.07	−1.76	11.80	0.01
城镇建设用地	21.35	0.82	145.37	5.36	392.75	11.41	76.65	1.42
水域	−18.68	−0.39	−401.11	−8.61	21.11	0.80	−55.29	−2.01

2.2.2 地下水位埋深对耕地面积变化的响应 研究区地下水位埋深呈北向南递增趋势,2000—2020 年研究区地下水位埋深整体呈逐渐增加趋势,2000—2020 年耕地总面积整体也表现为增加趋势。研究区东南部地下水位埋深整体呈显著增加趋势,>90 m 地下水位埋深在东部出现,20~50 m 埋深面积显著增加,较 2000 年 0~10 m 埋深面积从 3 657.18 km²减少至 3 074.23 km²,20~50 m 埋深面积增加 1 774.63 km²,>70 m 埋深面积从 0 增加至 210.90 km²,西部埋深变化不显著,图 4 显示,同期耕地面积变化较大的区域位于研究区东部,且 2010 年研究区东部分布有大面积耕地,其基本由草地与未利用地逐渐转化,其中 2005—2010 年耕地面积增加最为显著,动态度达峰值,分形维数最大,稳定性最低,同期对比认为东部耕地面积增加,灌溉用水量增大导致地下水开采量增大是该区域地下水埋深增大的主要原因之一;2010—2015 年研究区 >50 m 的地下水位埋深面积增长 1 344.35 km²,中西部 20~60 m 地下水位埋深面积显著增加,东部地下水位埋深仍呈增加趋势,同期耕地面积总体仍呈持续增加趋势,但动态度变小,分形特征表现为逐渐规则化,稳定性增强,中西部耕地面积增加较显著,考虑为耕地面积增加,地下水开采量增大导致区域地下水位埋深增大;较 2015 年研究区 41~50 m 地下水位埋深面积增加 504.01 km²,>50 m 的地下水位埋深面积增长 471.79 km²,地下水位埋深仍呈增加趋势,同期 2015—2020 年耕地面积略减少,动态度变为负值,

分形维数达最低,稳定性达最高,地下水补给周期长,此阶段考虑为耕地面积与气象因素叠加导致开采量持续增大导致。

2.2.3 地下水位埋深对其他地类面积变化的响应 由图 3、图 4、表 2 可知,林地面积占比较小,且林地面积变化区域与地下水位埋深变化区域无明显相关;草地面积在 2000—2010 年呈减小趋势,主要转化为耕地,2010 年后变化不大;其他未利用地面积在 2000—2020 年整体变化不大,认为与地下水位埋深相关性较小;城镇居民用地在 2000—2015 年面积呈显著增加趋势,居民生活用水增加,对地下水位埋深有一定影响,但其面积约占耕地 1/10,面积较小。

2.3 研究区地下水位埋深对气象干旱 SPEI 的响应

2.3.1 2000—2020 年研究区不同时间尺度 SPEI 年际变化 由图 6 可知,1 个月尺度下,2000—2002 年、2005—2006 年、2008 年、2011—2012 年,2019 年研究区干旱频率较高,且 2008 年、2019 年的干旱频率接近全年,持续时间长,干旱程度在灌溉季节达到严重干旱等级;3 个月尺度下,2001—2002 年、2004—2006 年、2008—2009 年、2011—2012 年、2019—2020 年干旱频率较高,且 2008 年、2019 年灌溉季节干旱程度达极端干旱等级;6 个月尺度下,2001 年、2004—2006 年、2008 年、2011—2012 年、2019—2020 年干旱频率较高,持续时间长,2019 年干旱程度在下半年多达严重干旱与极端干旱等级。综合分析,1 个月、3 个月尺度下 SPEI 变化程度剧烈,6 个月、12 个月尺度下

SPEI 变化较为平稳,且在 6 个月、12 个月尺度下 2000—2020 年出现干旱的频率高于 1/2。在一定的 时间尺度下,研究区具有显著的干旱趋势变化特征。

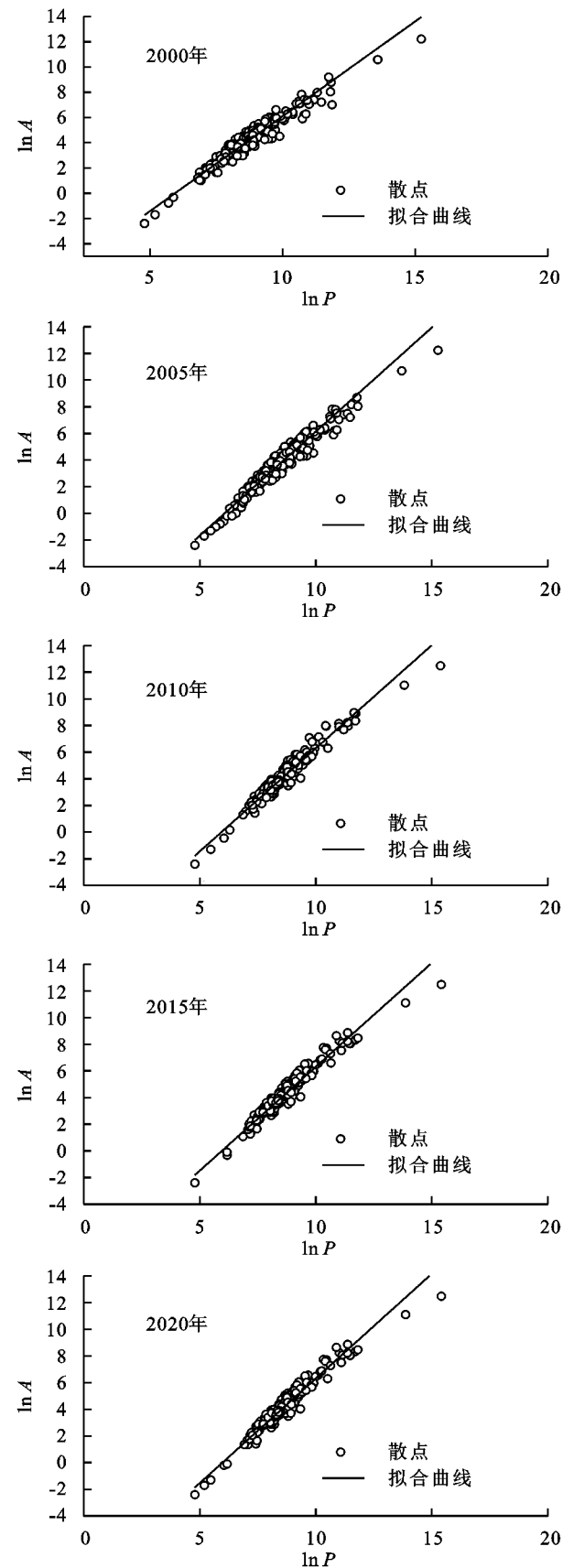


图 5 昌吉州东部平原区 2000—2020 年耕地斑块面积与周长的双对数散点图

利用 Mann—Kendall 非参数检验法对 SPEI 在 年尺度下时间序列进行突变点检测,由图 7 可知,结 合变化趋势,该 SPEI 序列在 2012 年和 2017 年发生 突变,故将 2000—2012 年分为第 1 阶段,2013—2016 年分为第 2 阶段,2016—2020 年为第 3 阶段(图 8)。 第 1 阶段干旱指数变化平稳,2001—2003 年、2005— 2006 年、2008 年、2011—2012 年发生干旱频率较高, 2005 年和 2012 年呈全年干旱,但多为轻度干旱等 级;第 2 阶段干旱指数呈上升趋势,大多数 SPEI>0, 表明此阶段干旱程度减轻,发生干旱频次减少;第 3 阶段干旱指数呈显著下降趋势,表明干旱程度为加重 趋势,且从 2017 年始呈全年干旱状态,阶段内 2018 年与 2020 年出现干旱频率较高,持续时间长,尤其在 其灌溉季节干旱程度呈现为严重干旱等级,与上述分 析中干旱程度变化剧烈年份基本一致。

2.3.2 地下水位埋深对 SPEI 的响应 2000—2010 年地下水位埋深变化剧烈区域对应于耕地面积增加 区域,此阶段 SPEI 基本无变化,表明气象干旱程度 基本无变化;2010—2015 年研究区耕地面积仍呈增 加趋势,SPEI 在该阶段呈现出上升趋势,意味着干 旱程度减轻;2015—2020 年研究区地下水位埋深>50 m 的面积显著增加,且地下水位埋深总体呈持续增 加趋势,同期耕地面积相比 2015 年略减少,而 SPEI 同期呈下降趋势,意味着气象干旱程度加重,且自 2017 年基本处于全年干旱状态,干旱程度不同时间 达到极端干旱等级,在时间尺度上气象干旱程度加重 时期,耕地面积变化不大,而地下水位埋深平均降幅 在此阶段速率开始增大,综合考虑耕地扩张、地下水 回复速率与气象干旱导致地下水开采量增加,使得此 阶段地下水位埋深仍呈增大趋势。

基于 Spearman 秩相关分析法的研究区地下水 位埋深变化与不同时序耕地面积与 SPEI 相关性分 析结果见表 4。可以看出 2000—2015 年地下水埋深 变化与耕地面积变化显著相关,第 3 阶段地下水埋深 变化与 SPEI 显著相关,2000—2015 年地下水位埋深 对土地利用变化响应最为显著,2016—2020 年地下 水位埋深受土地利用变化与气象干旱因素共同影响, 特别是 2017 年后,在研究区实施退地减水的同时地 下水位埋深整体仍呈增大趋势,与研究区气象干旱程 度增加具有一定相关关系。

3 讨论

本文利用 2000—2020 年昌吉州东部平原区实测 监测井埋深数据及同期土地利用/覆被变化并结合

SPEI 尝试综合分析昌吉州东部平原区地下水埋深变化化的主要驱动因素。

表 3 2000—2020 年不同土地利用类型分形维数及稳定性指数

土地利用 类型	分形维数(D)					稳定性指数(S)				
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	1.332	1.282	1.293	1.284	1.274	0.168	0.218	0.207	0.216	0.226
林地	1.320	1.321	1.259	1.334	1.267	0.180	0.179	0.241	0.166	0.233
草地	1.269	1.289	1.287	1.292	1.295	0.231	0.211	0.213	0.208	0.205
其他未利用地	1.238	1.239	1.196	1.210	1.212	0.262	0.261	0.304	0.290	0.288
城镇建设用地	1.291	1.271	1.303	1.330	1.335	0.209	0.229	0.197	0.170	0.165
水域	1.401	1.428	1.496	1.484	1.507	0.099	0.072	0.004	0.016	-0.007

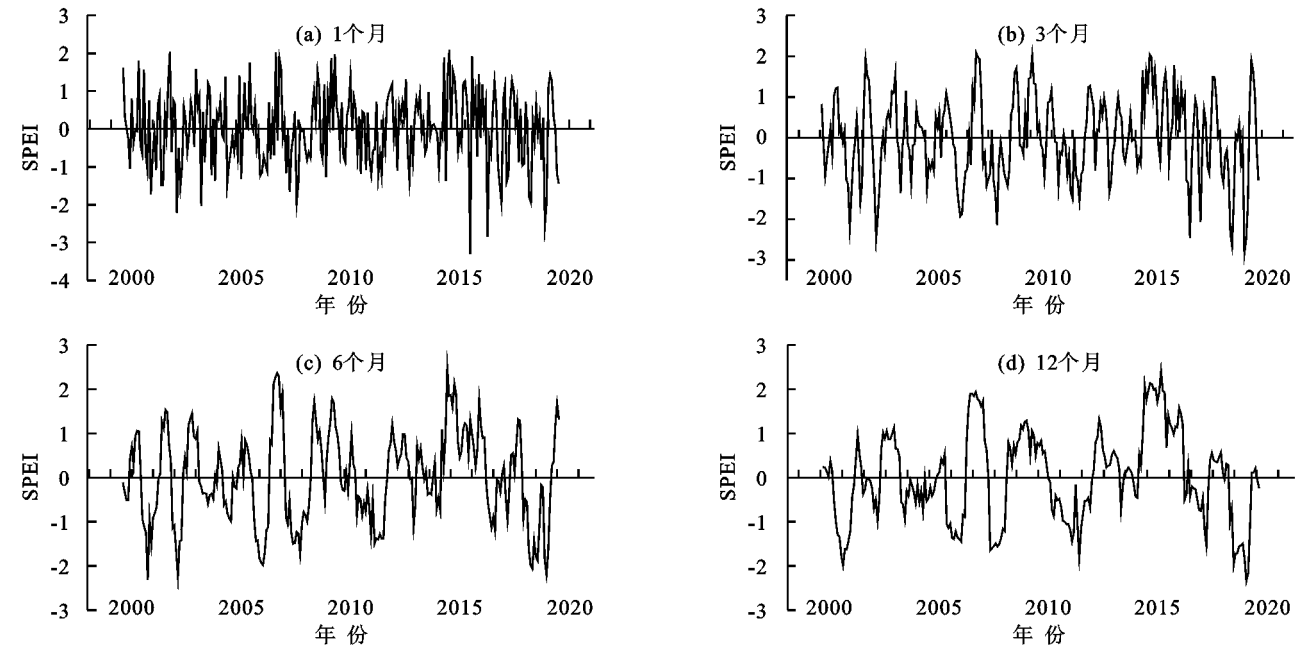


图 6 昌吉州东部平原区多时间尺度 SPEI 年际动态

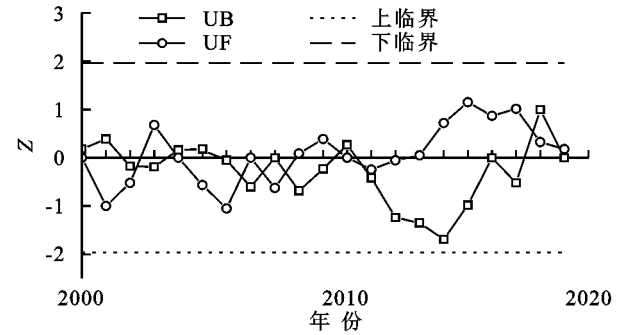


图 7 昌吉州东部平原区 2000—2020 年 SPEI 突变点检验

分析发现,研究区地下水位埋深变化与同期人类水土资源开发利用尤其是耕地的扩张密切相关,这与胡鑫等^[16]对昌吉州呼图壁县地下水埋深变化分析中得出耕地面积不断增加,地下水开采量增大导致地下水埋深增加的结论一致。我国 2014 年开始全面实行地下水严格管控,昌吉州东部平原区是新疆划定的 15 个地下水超采区之一,昌吉州 2016 年开始执行严格退地减水政策,本文分析发现,2015—2020 年在耕地面积基本稳定并退地减水背景下,地下水埋深仍呈

增大趋势,结合研究区实际,尝试采用气象干旱指数进行叠加分析,初步分析结果印证了研究区 2017 年之后地下水埋深变化是土地利用与气象干旱共同响应的结果。这与高宇星^[27]分析得出自 90 年代末期以来,降雨量与蒸发量年平均值的差额不断增大,是导致昌吉州灌区地下水补给量不断减少,排泄量增加,水位不断下降的主要原因基本一致。薛海容等^[28]通过实测资料分析发现,昌吉市 2020 年第 2 季度降水量大幅下降,直接造成昌吉市地下水降水入渗补给量减少,是昌吉市地下水水位下降的原因之一。综合看来,变化气候条件下,气候变化通过补给变化和灌溉需求增加直接影响地下水,由于气候预测存在极大不确定性,其对地下水系统的影响不确定性也随之增大。本文研究仅尝试结合人类活动和气候变化因素联合分析干旱区地下水系统的变化及其响应,今后还需要更加深入分析定量剖析驱动因素机制与贡献率,找出导致地下水埋深变化的关键因素,进行适应性管控。

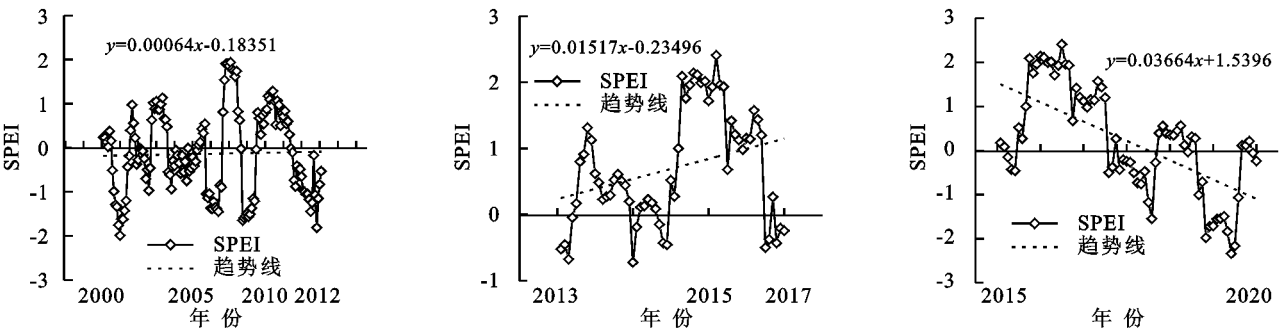


图 8 昌吉州东部平原区不同阶段 SPEI(12 个月)变化趋势

表 4 2000—2020 年研究区地下水埋深变化与耕地面积及 SPEI 相关性系数

指标	地下水埋深
2000—2015 年耕地面积	0.945**
2015—2020 年耕地面积	0.472
SPEI 第 1 阶段	0.084
SPEI 第 2 阶段	0.605*
SPEI 第 3 阶段	−1.000**

注：* 表示 $p<0.01$ 极显著水平；* 表示 $p<0.05$ 显著水平。

4 结论

(1)研究区 21 年间地下水位埋深整体呈增加趋势。时间尺度上,2000—2005 年变化不显著,2006—2014 年呈显著增加,2015 年下降趋势减缓,自 2017 年开始下降速率开始增大。空间尺度上,地下水位埋深分布呈北向南逐渐增大特征,较 2015 年、2020 年东部 21~30,41~50,51~60 m 地下水位埋深面积显著增加。

(2)研究区 21 年间土地利用类型面积发生了显著变化,耕地为主要的土地利用类型。耕地面积在 2000—2015 年呈增长趋势,其中,在 2005—2010 年增幅最大,面积增加 1 855.33 km²,动态度达峰值 4.64%,在 2015—2020 年耕地面积略下降,趋于稳定;林地与草地面积整体呈下降趋势,其中,在 2005—2010 年降幅最大,动态度分别为−6.65%,−3.36%,主要转化为耕地,其后趋于稳定;城镇建设用地呈现持续增加趋势;其他未利用地面积 2000—2020 年间呈现出先增加后减少趋势,整体趋稳定。

(3)研究区 21 年间不同时间尺度 SPEI 年际动态变化呈显著干旱趋势变化特征,SPEI 年尺度序列在 2012 年和 2017 年发生突变,将 2000—2012 年分为第 1 阶段(干旱指数变化平稳),2013—2016 年分为第 2 阶段(干旱指数呈上升趋势),2016—2020 年为第 3 阶段(干旱指数呈显著下降趋势),2018 年与 2020 年出现干旱频率较高,持续时间长,尤其在其灌溉季节干旱程度呈现为严重干旱等级。

(4)2000—2010 年研究区耕地面积增加区域对应于地下水位埋深变化剧烈区域,此阶段 SPEI 基本无变化;2010—2015 年耕地面积仍呈增加趋势对应于地下水位埋深持续增加,该阶段 SPEI 呈上升趋势,意味着气象干旱程度减轻;2015—2020 年耕地面积略减少,而地下水位埋深持续增加,同期 SPEI 呈下降趋势,意味着气象干旱程度加重。2000—2015 年地下水位埋深变化与耕地面积变化显著相关,2016 年后,在研究区实施退地减水的同时地下水位埋深整体仍呈增大趋势,结合 SPEI 显著下降特征,可考虑此阶段下地下水位埋深动态对土地利用及气象干旱因素共同响应。

参考文献:

[1] Zamanirad M, Sedghi H, Sarraf A, et al. Potential impacts of climate change on groundwater levels on the Kerdi-Shirazi plain, Iran [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(11): 1-10.

[2] Yue W F, Meng K K, Hou K X, et al. Evaluating climate and irrigation effects on spatiotemporal variabilities of regional groundwater in an arid area using EOFs [J]. Science of the Total Environment, 2020, 709: e136147.

[3] 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 Management, 2014, 146: 270-279.

[4] Lv C M, Ling M H, Wu Z N, et al. Analysis of groundwater variation in the Jinci Spring area, Shanxi Province (China), under the influence of human activity [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41 (2): 921-928.

[5] Akbari M, Shalamzari M J, Memarian H, et al. Monitoring desertification processes using ecological indicators and providing management programs in arid regions of Iran [J]. Ecological Indicators, 2020, 111: e106011.

[6] Bagheri R, Nosrati A, Jafari H, et al. Overexploitation

- hazards and salinization risks in crucial declining aquifers, chemo-isotopic approaches [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 369: 150-163.
- [7] Huo Z L, Feng S Y, Kang S Z, et al. Numerically modelling groundwater in an arid area with ANN-generated dynamic boundary conditions [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(5): 705-713.
- [8] 马欢,岳德鹏, Yang D, 等.基于数据同化的地下水埋深插值研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 206-214.
- [9] Wilopo W, Putra D, Hendrayana H. Impacts of precipitation, land use change and urban wastewater on groundwater level fluctuation in the Yogyakarta-Sleman Groundwater Basin, Indonesia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(2): 1-14.
- [10] Mcmillan T C, Rau G C, Timms W A, et al. Utilizing the impact of earth and atmospheric tides on groundwater systems: A review reveals the future potential [J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57: 281-315.
- [11] 张光辉,费宇红,刘春华,等.华北漳滙平原地下水位下降与灌溉农业关系[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 228-234.
- [12] Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [13] Mo K C, Lettenmaier D P. Precipitation deficit flash droughts over the United States [J]. *Journal of Hydrometeor*, 2016, 17(4): 1169-1184.
- [14] 袁星,马凤,李华,等.全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 225-237.
- [15] 何兵,高凡,闫正龙,等.叶尔羌河径流演变规律与变异特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 38-43, 49.
- [16] 胡鑫,吴彬,高凡,等.呼图壁县地下水位动态对土地利用变化响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 227-234.
- [17] 徐新良,刘纪远,庄大方.国家尺度土地利用/覆被变化遥感监测方法[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(4): 2365-2369.
- [18] 束龙仓,王哲,袁亚杰,等.近 40 年三江平原典型区土地利用变化及其对地下水的影响[J]. *水利学报*, 2021, 52(8): 896-906.
- [19] 杨肖丽,郑巍斐,林长清,等.基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. *河海大学学报*, 2017, 45(5): 377-383.
- [20] 张林燕,郑巍斐,杨肖丽,等.基于 CMIP5 多模式集合和 PDSI 的黄河源区干旱时空特征分析[J]. *水资源保护*, 2019, 35(6): 95-99.
- [21] 李艳菊,丁建丽,张钧泳,等.2001—2015 年天山北坡植被覆盖对干旱的响应:基于土地利用/土地覆盖分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6206-6217.
- [22] 张岳军,郝智文,王雁,等.基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1418-1424.
- [23] 齐蕊,王旭升,万力,等.地下水和干旱指数对植被指数空间分布的联合影响:以鄂尔多斯高原为例[J]. *地学前缘*, 2017, 24(2): 265-273.
- [24] 朱永华,张生,赵胜男,等.气候变化与人类活动对地下水埋深变化的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 199-205.
- [25] 杨盼,卢路,王继保,等.基于主成分分析的 Spearman 秩相关系数法在长江干流水质分析中的应用[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 76-80.
- [26] 高宇阳,杨鹏年,阚建,等.人类活动影响下乌苏市地下水埋深演化趋势[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 90-96.
- [27] 高宇星.昌吉州灌区地下水位动态变化特征及成因分析[J]. *陕西水利*, 2019(12): 52-53, 66.
- [28] 薛海荣,郭龙华.昌吉市地下水水位动态变化特征研究[J]. *地下水*, 2021, 43(5): 65-67.