

包芝林, 吴彬, 王翠, 等. 阿克苏河流域平原区地下水位动态变化及归因分析[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(2): 128–140. Bao Zhilin, Wu Bin, Wang Cui, et al. Dynamic change and attribution analysis of groundwater level in plain area of Aksu River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(2): 128–140.

阿克苏河流域平原区地下水位动态变化及归因分析

包芝林^{1,2}, 吴彬^{1,2*}, 王翠^{1,2}, 杜明亮^{1,2}, 班静雅^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 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, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 研究干旱区流域地下水位动态变化及其响应关系, 对加强地下水资源有效管控具有重要意义。该文以阿克苏河流域平原区为研究区, 基于2011–2022年地下水水位埋深、高精度降水数据集以及土地利用等数据, 采用重心迁移模型、冗余分析及随机森林模型等方法, 分析地下水位时空变化及驱动机制。结果表明: (1) 阿克苏河流域平原区的地下水以开采型为主, 地下水动态类型为慢速下降型。2011–2022年, 区域内地下水位总体呈现下降趋势, 其水位埋深呈现自平原区周边向中心逐渐增大趋势。地下水位变化与气象干旱的响应并不显著, 气象干旱并不是导致水位变化的主要原因; (2) 同期, 区域内土地利用类型发生了显著变化, 未利用地和草地面积呈现显著下降趋势, 分别下降2.53%和3.62%, 耕地面积呈现显著上升趋势, 上升10.11%, 耕地重心呈现先北后南的变化趋势, 结合相关性结果表明, 耕地的大量转化导致了流域用水需求的增加; (3) 归因分析表明, 在农业开发强度逐年提高的背景下, 流域内耕地面积的迅速增加导致农业用水需求的增加, 同时由于地下水开采量逐年增加, 地表引水量逐年减少, 导致阿克苏河流域平原区地下水位逐年降低。

关键词: 地下水位埋深; 气象干旱; 土地利用; 响应机制; 阿克苏河流域

中图分类号: X523 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.1447.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2025)02-0128-13

Dynamic Change and Attribution Analysis of Groundwater Level in Plain Area of Aksu River Basin

BAO Zhilin^{1,2}, WU Bin^{1,2*}, WANG Cui^{1,2}, DU Mingliang^{1,2}, BAN Jingya^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

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

Abstract: Researches of the dynamic changes and response correlations of groundwater levels in arid region watersheds are of crucial importance for the sustainable management of groundwater resources. In this paper, the research focused on the plain area of the Aksu River Basin; the spatial and temporal variations of groundwater levels and their driving factors were analyzed using annual data of 2011–2022, which involved groundwater depth, high-resolution precipitation datasets, and land use patterns, and the center-of-gravity migration model, redundancy analysis, and random forest model were employed as well. As a result of the research, it was showed that groundwater extraction was a dominant water-drawing means in this area, and the dynamic pattern of the groundwater was of the slow-descent type. During the period (2011–2022), the groundwater level within the region generally showed a downward trend; moreover, groundwater depth gradually increased from the periphery towards the center of the plain, and no weakening correlation was notably found between groundwater level changes and meteorological drought, suggesting that drought is not the primary driver of groundwater fluctuations. During the same period, substantial changes in terms of land-use pattern were observed. The areas of undeveloped land and grassland decreased by 2.53% and 3.62%, respectively, while cultivated land expanded by 10.11%. The center of gravity for cultivated land initially shifted northward, then southward. Correlation analysis suggested that the extensive conversion of land to cultivation has significantly increased water demand within the basin; and attribution analysis revealed that increased agricultural development, coupled with rising annual groundwater extraction and reduced diversion of surface water resulted to a continuous decline in groundwater levels in the plain areas of the Aksu River Basin.

Key words: depth to groundwater level; meteorological drought; land use; response mechanism; Aksu River Basin

在全球变暖背景下,区域水循环过程及水资源时空格局发生显著变化^[1-3]。尤其是在西北干旱区,地下水作为区域水循环中的重要组分之一,其水位的动态变化对区域社会经济发展和生态系统平衡有着重要作用^[4-6]。值得注意的是,由于气候变暖导致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^[7,8]。在农业开发大力发展的背景下,由于持续高温和降水短缺导致蒸发量与降水量之间收支不平衡而引发的气象干旱事件,这在一定程度会加剧区域农业发展的压力,同时使得西北干旱区成为依赖地下水作为重要水资源的区域^[9-11]。

地下水作为西北干旱区农业和生活的主要用水来源,在干旱时期对地下水的过量开采导致地面沉降和天然植被退化等一系列问题^[12,13]。然而,当前关于干旱区流域地下水位动态特征及其成因分析的研究中,主要集中在地下水位埋深监测数据的统计分析以及对驱动因素的定性识别^[14-16],或是采用遥感手段反演地下水储量变化联合气象干旱的研究^[17-19]。相较于西北干旱区的区域面积而言,在空间尺度上缺乏实测气象观测站点以及长时间序列的野外调查数据^[20-22],从而限制流域内地下水位动态变化及其成因的量化研究。因此,如何结合高精度气候产品数据集和遥感影像,在有限的实测数据辅助下对干旱区流域地下水动态变化、影响因素及其驱动模式进行量化研究是当前重要的难点之一^[23-25]。

阿克苏河流域平原区作为西北干旱区的重要农业区,流域水循环和水资源的变化直接关系到整个塔里木河流域乃至南疆地区的生态安全和区域水安全^[26,27]。由于阿克苏河流域平原区地表水资源季节性分配不

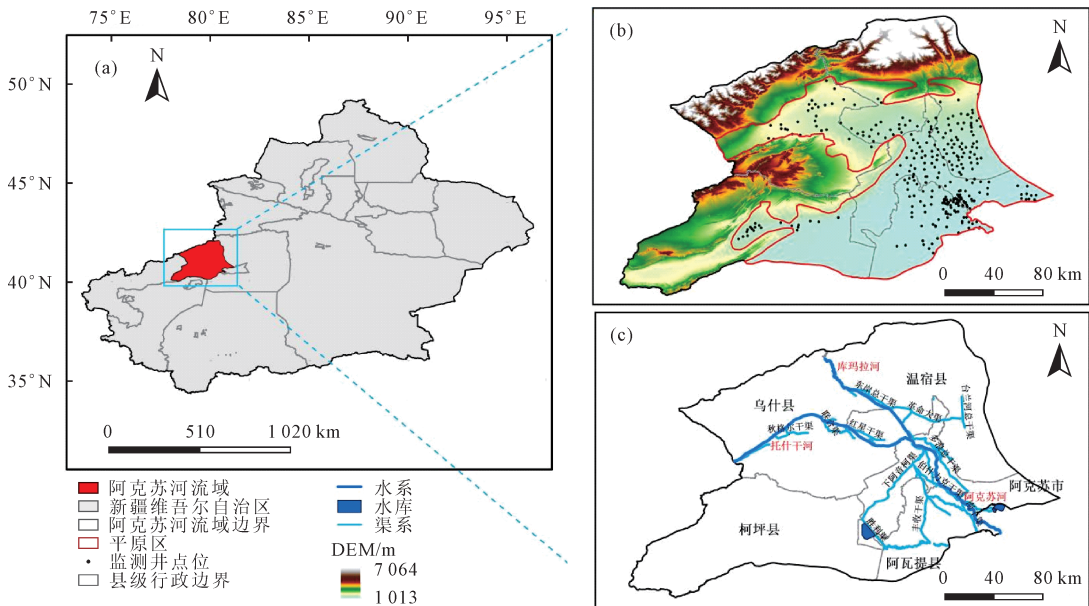
均,因此开采地下水也是维持农业和城市发展的重要手段之一^[28,29]。近十几年来,在全球变暖的影响下,伴随着流域水土资源的人为开发利用活动,以农田灌区为代表的荒漠区人工绿洲面积逐渐增大,这使得阿克苏河流域平原区的地下水分布和水循环过程发生显著变化^[30-32]。因此,对阿克苏河流域平原区地下水位变化的原因进行分析,探讨干旱区流域地下水位变化对气候与人类活动的响应关系,可为地下水资源的保护和合理利用提供科学依据,对干旱区流域地下水干旱监测及预警、地下水资源管理有着重要科学意义。

本文基于阿克苏河流域平原区2011-2020年实测月尺度地下水埋深数据、MSWEP多源融合降水产品数据集以及地下水开采量等数据,采用重心迁移模型、冗余分析及随机森林模型等方法,探讨在全球变暖背景下干旱区流域地下水位变化的驱动机制,以及人类活动对地下水位变化的影响作用。研究结果可为阿克苏河流域优化土地资源管理政策,以及提高地下水资源高效利用与合理分配提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿克苏河流域平原区位于天山南麓和塔里木盆地北缘,地势西北高、东南低,地形自西北向东南倾斜,地貌差异很大。平原区城镇集中、人口密集,农业耕作历史悠久^[33]。平均海拔1 030~1 060 m,多年平均气温10℃左右,多年平均降水量137.7 mm,属暖温带干旱性气候,具有大陆性气候的显著特征^[34]。阿克苏河流域平原区主要分布着乌什县、温宿县、阿克苏市、阿瓦提县、柯坪县等5个县市(图1)。



注: 审图号GS(2024)0650

图1 阿克苏河流域概况
Fig.1 Overview of Aksu River Basin

阿克苏河流域平原区地下水主要属于第四系松散岩类孔隙水(图2)。靠近山前地带含水层多为砂卵石砾石层,以赋存潜水为主,中部和南部为含土砂砾石和粉土、粉细砂,为冲洪积平原,而洪积层与上覆的冲积层组成强富水的潜水含水层。含水层岩性为砂、砾石和含土砂砾石,砂砾石层厚度在200~300 m,松散岩层一般赋存孔隙水,属于潜水赋存区^[35]。流域地下水呈现从北向南流向,平原上部水力坡度和渗透系数分别为2.5‰~

4.0‰(54.08~6.68 m/d)、中部为1.0‰(3.75~6.57 m/d)、下部为0.5‰(1.03~1.53 m/d)。其中,西大桥北部平原区地下水补给量最大的是渠系水渗漏和田间水的入渗补给。西大桥往南部分地下水的排泄方式以人工开采、排水渠排泄、潜水蒸发,以及新大河与老大河向河道的泄流为主,其次少量侧向排泄^[36]。此外,阿克苏河流域平原区地下水开采方式以农业分散式开采和城镇集中式水源地开采为主,主要开采浅层地下水。

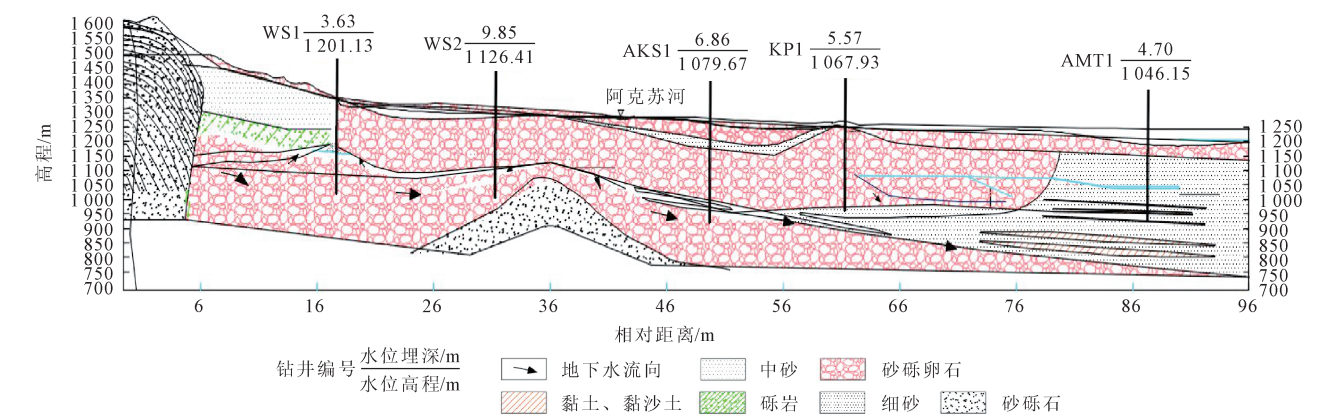


图2 阿克苏河流域水文地质剖面图
Fig.2 Hydrogeological profile of Aksu River Basin

1.2 数据来源和预处理

降水数据来源于MSWEP多源融合降水产品数据集,具有时间尺度长、空间分辨率高的特点^[37]。本研究使用的是MSWEP V2.2版本,3 h格网化的降水数据,空间分辨率为0.1°,时间序列为1979~2020年。该数据集满足缺资料区域使用需求,使用该数据集计算的标准化降水指数具有更良好的精度和更高的准确性。

遥感影像来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>(访问时间为2024年4月10日)),数据集采用Landsat 5和Landsat 8遥感影像。遥感影像分辨率为30 m,云覆盖率小于1%。为保证影像质量,采用几何校正和辐射畸变纠正的方法对遥感影像进行预处理。在1:20 000流域地形图的基础上,将流域内土地利用类型划分为6大类,分别为林地、耕地、草地、水域、未利用地和城乡居民用地;通过人机交互目视解译法与野外实地调查验证相结合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。

地下水位埋深数据由阿克苏地区水利局提供,共收集29眼监测井2011~2022年实测月尺度地下水位埋深数据,以及305眼机井2023年统测地下水位埋深数据。其中,地下水开采量、地表水资源量和地表水引水量等数据来源于阿克苏地区水资源公报,时间尺度均统一为2011~2022年。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水指数

标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)能表示不同时间尺度下的干旱,具有计算简单,多种时间尺度的特点。由McKee等^[38]在1993年提出,被广泛应用于气象干旱评估,计算公式如式(1)。其中, x 为某一时间尺度下的降雨量,假设其分布满足于Gamma分布,用 α 、 β 分别表示它的尺度和形状参数($x>0$ 、 $\alpha>0$ 、 $\beta>0$),参数可以通过极大似然法进行估算,则该时间尺度下降雨量的累积概率为:

$$F(x)=\int_0^x \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$$

(1)

此外,根据SPI指数的取值范围,可将干旱划分等级,如表1所示。

表1 基于SPI的干旱等级划分		
Table 1 Drought classification based on SPI		
SPI范围	干旱等级	干旱类型
-0.5<SPI	0	无旱
-1.0<SPI≤-0.5	1	轻旱
-1.5<SPI≤-1.0	2	中旱
-2.0<SPI≤-1.5	3	重旱
SPI≤-2.0	4	特旱

1.3.2 重心迁移模型

重心的空间变化可以直接反映研究时段内土地类型空间演变过程^[39],其公式为:

$$\overline{X_w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \overline{Y_w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

式中, $(\overline{X_w}, \overline{Y_w})$ 为重心坐标, 表示地理要素在二维空间上分布的相对位置, w_i 为权重值, (x_i, y_i) 为区域几何中心坐标。

1.3.3 冗余分析

冗余分析(redundancy analysis, RDA)是依据对应分析发展的一种排序方法,它是依据线性模型构建的一种约束化主成分分析。在排序图中,地下水位与影响因子指示线之间的夹角表示地下水位与影响因子的相关性大小,夹角小于90°,表示正相关性;夹角大于90°,表示负相关性;夹角等于或者接近90°,表示两者不相关。依据R语言中的Vegan包进行冗余分析^[40]。

1.3.4 随机森林模型

随机森林模型具有快速处理高维度数据和随机选择样本的算法特点^[41]。采用随机森林模型对影响平原区地下水水位变化的主要因素进行重要性排序,筛选出主导因素,评价指标包括决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE),重要性排序采用IncMSE法^[5]。具体计算过程如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=2}^N \frac{1}{N} (X_i - Y_i)^2} \quad (4)$$

式中, X_i 和 Y_i 分别为第 i 个实测值和拟合值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为实测值和拟合值的平均值;其中, R^2 越接近1, RMSE 越接近0, 代表模型中的解释精度越高。

2 结果与分析

2.1 地下水位埋深空间分布及动态变化特征

2.1.1 地下水埋深的多年动态变化

基于地下水监测井数据系列完整性及选点均匀性的原则,采用ArcGIS 10.8软件对305眼统测井的2023年地下埋深数据进行空间插值分析并绘制地下水等水位线(图3)。结果表明:地下水等水位线自北向南从1418 m到988 m逐渐减小,地下水埋深呈现出自北向南埋深逐渐变浅,埋深最浅区域和埋深最深区域主要集中在东侧。其中地下水埋深≤1 m的面积为144.39 km², 占比0.83%;埋深1~3 m的面积为2442.36 km², 占比14.02%;埋深3~6 m的面积为3071.68 km², 占比17.69%;埋深6~10 m的面积为3694.03 km², 占比21.21%;埋深10~20 m的面积为3474.73 km², 占比24.10%;埋深20~50 m的面积为3224.73 km², 占比18.66%;埋深>50 m的面积为

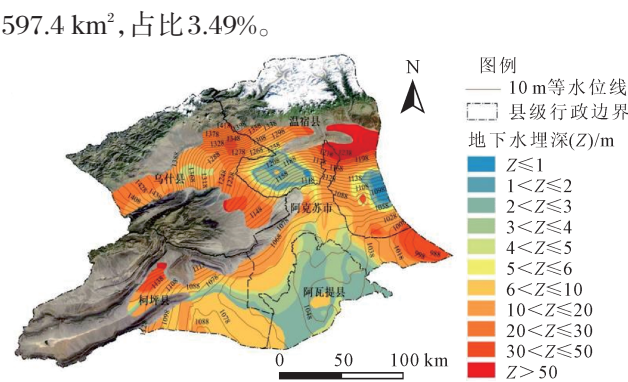


图3 阿克苏河流域平原区浅层地下水位埋深和等水位线图
Fig.3 Shallow groundwater level depth and contour map of the plain area in the Aksu River Basin

分析整理阿克苏河流域平原区各县市2011~2022年的29眼监测井地下水位埋深数据,其年际动态结果表明(图4(a)~(e)),除柯坪县(图4(c))呈显著上升趋势($k=-0.1295\text{ m/a}$, $R^2=0.9201$)外,其他县市地下水位总体呈现出下降趋势。地下水位埋深范围在2~20 m,以阿克苏市区域(图4(a))地下水位埋深最深($k=0.3268\text{ m/a}$, $R^2=0.8391$)。其中,靠近山区的乌什县地下水位埋深在过去10多年间总体保持在相对稳定状态($k=0.0432\text{ m/a}$, $R^2=0.2948$),这说明乌什县地下水补给与排泄处于相对平衡的状态(图4(d))。

基于《地下水保护利用管理办法》的规定原则,按照地下水位升降速率对地下水位多年动态类型进行划分。阿克苏河流域多年平均地下水位动态特征见表2,2011~2022年阿克苏市、阿瓦提县、温宿县的地下水的年下降速率分别为0.24、0.16、0.21 m/a,在0.1~0.5 m/a的范围内,地下水动态类型属于慢速下降;乌什县的年下降速率为0.01 m/a,在-0.1~0.1 m/a的范围内,地下水动态类型属于基本稳定;而柯坪县的年下降速率为-0.13 m/a,在-0.1~-0.5 m/a的范围内,地下水动态类型属于慢速上升。

2.1.2 典型监测井地下水位年内动态变化

地下水位动态受水文气象、人工灌溉和开采地下水等诸多因素影响。根据影响地下水位动态的因素可将其分为水文型、径流型、开采型和蒸发型4种基本类型。此外,已有研究结果^[24,25]表明,不同区域,影响地下水位的主导因素不同,从而呈现不同的动态特征,且往往呈2种或多种基本类型的组合类型。为解释阿克苏流域平原区的地下水动态类型,本文选取了不同县市的5眼典型监测井,其地下水位年内变化表明(图5),阿克苏市主要是开采型,3月由于人工开采水位开始下降,在6~7月达到谷底值后开始上升,总体呈单峰型;阿瓦提县属于开采型,但部分地区由于秋冬灌和洪流影响,在8月底至12月多数地区出现第2个洪峰期;柯坪县多呈径流型,地下水位受地下水

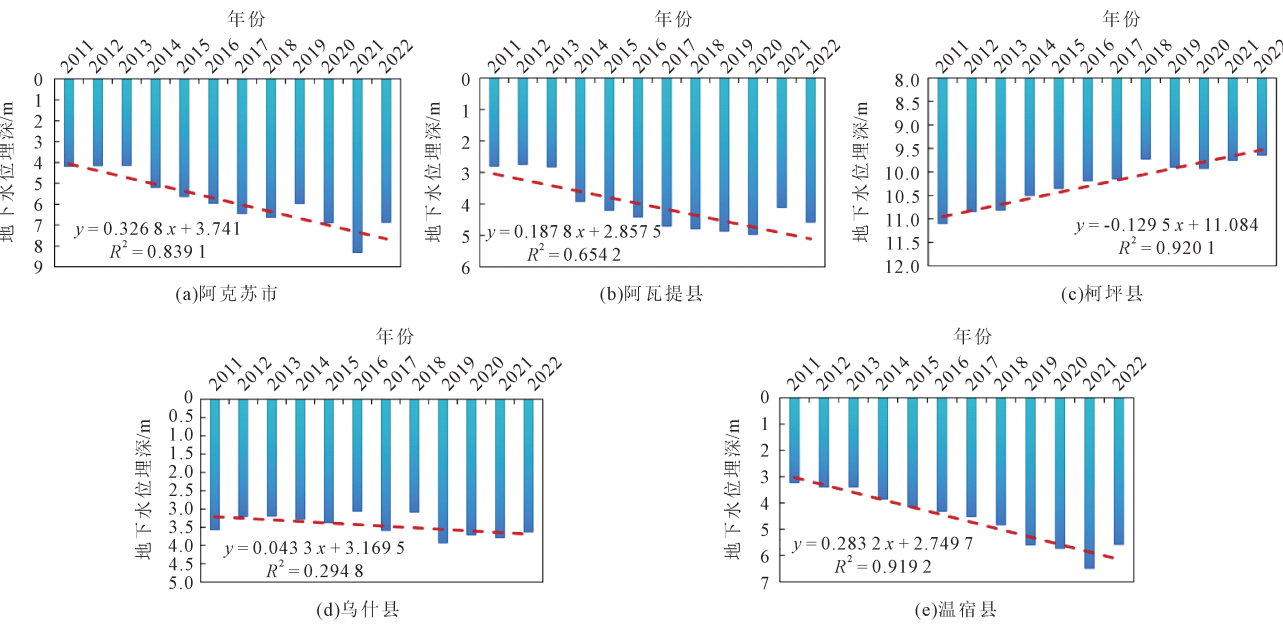


图4 阿克苏河流域平原区各县区地下水位埋深的年际动态变化
Fig.4 Interannual dynamic change of groundwater level depth in various counties of Aksu River Basin plain region

表 2 2011–2022 年阿克苏流域平原区地下水位变幅
Table 2 Ground water table variation in Aksu River Basin from 2011 to 2022

区域	年均地下水位变幅/(m·a ⁻¹)	地下水位下降速率/(m·a ⁻¹)	地下水动态类型
阿克苏市	-2.68	0.24	慢速下降
阿瓦提县	-1.78	0.16	慢速下降
柯坪县	1.46	-0.13	慢速上升
乌什县	-0.06	0.01	基本稳定
温宿县	-2.35	0.21	慢速下降
总体	-1.08	-0.10	慢速下降

径流强度影响,随水力坡度变化,水位变化相对平缓,起伏不大;乌什县、温宿县是径流-开采型,水位受径流补给和人工开采影响,主要补给源为上游侧向径流,主要排泄为人工开采,动态曲线呈 S 型。

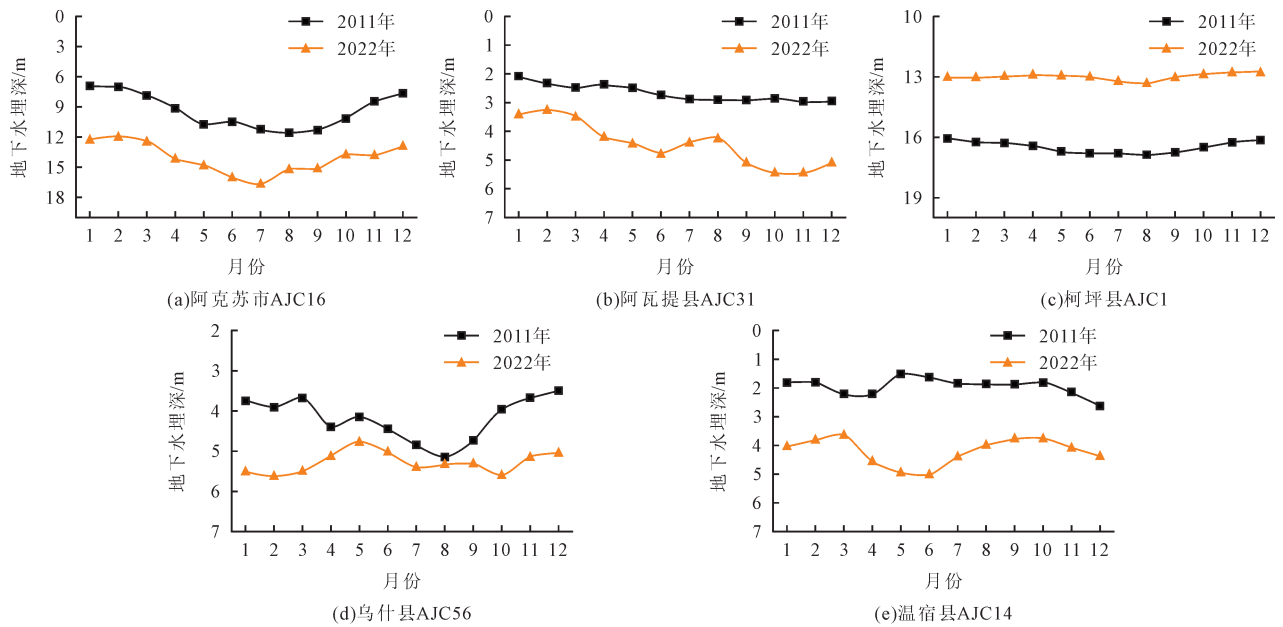


图5 阿克苏河流域5个县区典型监测井地下水位埋深的年内变化
Fig.5 Annual variation of groundwater level buried depth of typical monitoring wells in five counties of Aksu River Basin

2.2 地下水位变化对气象干旱的响应

2.2.1 气象干旱变化特征

图6的结果表明,2011–2020年阿克苏流域平原区气象干旱呈现阶段性变化,在Ⅰ阶段–Ⅱ阶段内发生轻旱,在Ⅱ阶段–Ⅳ阶段内没有发生干旱现象。具体可以划分为4个阶段:第Ⅰ阶段内UF<0且呈下降趋势,表明SPI值逐渐减小,流域气象干旱越发严重;第Ⅱ阶段内UF<0且呈上升趋势,表明SPI值逐渐增

大,流域气象干旱现象逐渐减轻;第Ⅲ阶段内UF>0同时UF值继续增加,接近1.96,达到显著水平,表明SPI值持续增大,流域气候呈现暖湿化现象;第Ⅳ阶段内UF>1.96,表明SPI值的增加趋势达到显著程度,流域气候的暖湿化趋势呈现常态化。总体而言,在过去10多年间,阿克苏河流域的气候演变主要分为4个阶段,第Ⅰ阶段为快速干旱阶段,第Ⅱ时段为干旱消减阶段,第Ⅲ时段为暖湿显现阶段,第Ⅳ时段为暖湿常态阶段。

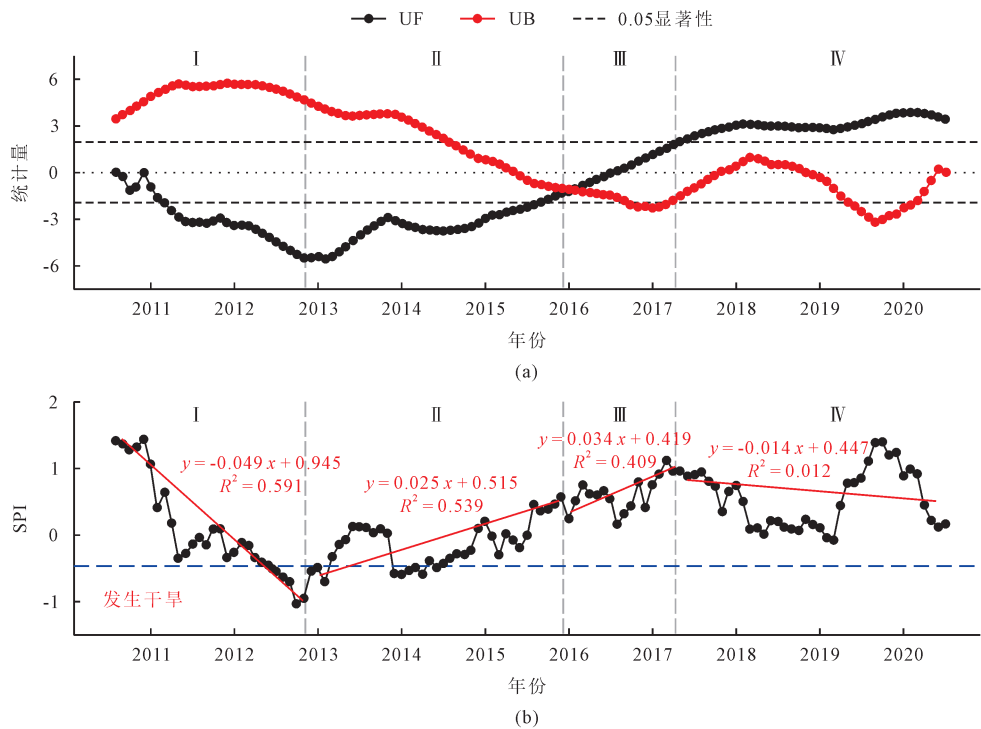


图6 2011–2020年阿克苏河流域平原区气象干旱(12个月尺度)的变化趋势
Fig.6 Variation trend of meteorological drought (12-month scale) in the Aksu River Basin during 2011–2020

2.2.2 地下水位变化对气象干旱的响应

从流域角度来看,柯坪县、乌什县区域位于山间盆地(谷地),各县市区域内的地下水水位埋深以及年际变化存在显著差异性(图4(c)~(e))。流域气象干旱的变化与柯坪县和乌什县的地下水位变化趋势是一致的,即气象干旱在逐渐减轻的同时,地下水水位呈现出上升的趋势。然而,阿克苏市、阿瓦提县和温宿县的地下水位却呈现出显著下降趋势,并且流域平原区的地下水位也呈现出显著下降趋势,这表明流域地下水水位变化对气象干旱的响应是不紧密的。结合相关研究^[37,38]和数据分析结果表明,在中国西北地区暖湿化趋势显著的背景下,近几十年来降雨和融雪对流域水资源的补给是相对较高的。阿克苏流域平原区的地下水位埋深总体上却呈现出较为显著的下降趋势,这意味着阿克苏流域平原区的地下水位埋深变化可能更多地与人类活动有关(如地下水的使用和土地利用方式的改变等),而与地下水

补给、径流和区域气候条件等的影响较低。同时,这也可能是中国西北干旱区流域地下水埋深变化的主要原因。

2.3 地下水位变化对土地利用变化的响应

2.3.1 土地利用的变化特征

基于Landsat 5和Landsat 8遥感影像将阿克苏流域平原区的土地利用类型划分为6大类,分别为耕地、草地、林地、水域、城镇居民用地和其他未利用土地6种类型。采用ArcGIS 10.8软件中的Spatial Analyst Tools工具箱对研究区内土地利用类型所占的面积进行分类统计,统计时间序列为2011–2020年。结果如图7所示,阿克苏河流域平原区以耕地、草地和其他未利用地为主。由于阿克苏流域平原区的林地、水域以及城镇居民用地面积占比相对较小,且在过去10年间的整体变化幅度较小,因此与研究区内地下水位埋深变化没有明显相关关系。此外,其他未利用地和草地的区域占比面积在2011–2020年呈现显著下降的趋

势(区域面积占比的下降幅度分别为:2.53%和3.62%)。而耕地呈现出显著上升的趋势(区域面积占比从15.81%增长为17.93%),这主要归因于研究区内的阿克苏市和温宿县在过去10年内大量开发未利用地和

草地将其转化为耕地资源,两个区域的耕地增长面积分别为404.94 km²和429.32 km²,这导致阿克苏市和温宿县在2020年的农业用水需求显著高于2011年,侧面促进区域地下水资源的开采。

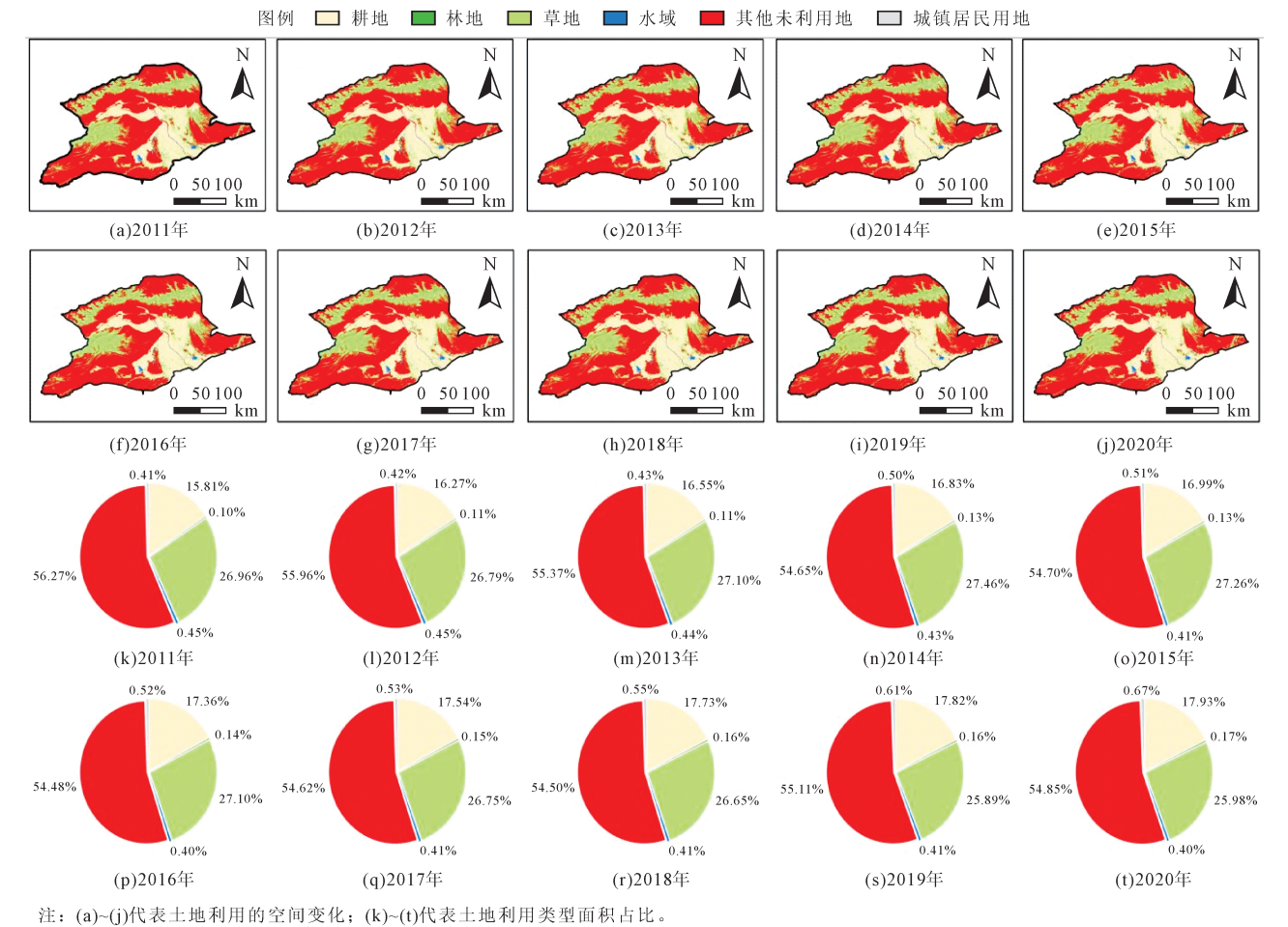


图7 2011–2020年阿克苏河流域土地利用类型的变化特征
Fig.7 Change characteristics of land use types in Aksu River Basin from 2011 to 2020

图2的研究结果表明,阿克苏流域平原区作为南疆地区四大绿洲区之一,其土地利用类型的转变对地下水埋深变化具有驱动作用。从土地利用类型转换数据分析可知(表3),2011–2020年阿克苏流域平原区土地利用转移以草地和未利用地的转出为耕地或是两者的互相转化为主。其中,过去10年中草地转为耕地的面积为1 115.99 km²,其他未利用地转为耕地的面积为258.99 km²。而草地

与其他未利用地两种土地类型的相互转化中,其他未利用地转化为草地的面积较大于草地转化为其他未利用地的面积(面积相差为422.28 km²)。综上结果表明,在2011–2020年期间,流域的草地和其他未利用地大量转化为耕地。从另一层面而言,草地和其他未利用地的用水需求是比较低的,为弥补流域中耕地面积扩张的需求,流域用水将呈现增加的趋势。

表3 2011–2020年阿克苏流域平原区土地利用类型转移矩阵
Table 3 Land use type transfer matrix in Aksu River Basin plain area from 2011 to 2020

		2011 年					
		耕地	林地	草地	水域	其他未利用地	城镇居民用地
2020 年	耕地	7 830.33	0.01	1 115.99	15.86	258.99	0.08
	林地	0.07	52.20	32.66	0.13	0.12	0
	草地	277.42	0	11 296.61	24.11	1 763.29	0.25
	水域	4.66	0	9.96	166.79	19.43	2.46
	其他未利用地	4.11	0	1 341.01	11.95	26 846.93	0.22
	城镇居民用地	13.09	0	66.71	14.29	47.61	203.93

2.3.2 地下水位变化对土地利用变化的响应

对不同土地利用变化与地下水埋深变化进行相关性分析(表4),研究发现不同土地利用变化与地下水埋深变化关系明显,不同地类变化对地下水埋深变化的影响排序依次为:耕地>城镇居民用地>林地>水域>其他未利用地>草地。其中,耕地、城镇居民用地

和林地与地下水埋深呈现正相关趋势,即耕地、城镇居民用地和林地不断增加,地下水埋深也呈不断增加的趋势。虽然森林对地下水有涵养和拦截作用,但是阿克苏流域平原区的林地大部分为经济型的人工果林,且区域内的林地分布稀疏,难以起到涵养水源和促进区域降水的作用,反而在一定程度上需要人工灌溉。

表4 阿克苏流域平原区地下水位埋深与各类土地利用变化的相关性分析
Table 4 Correlation analysis of buried groundwater level depth and various land use changes in Aksu River Basin plain area

指标	耕地	林地	草地	水域	其他未利用地	城镇居民用地
地下水位埋深/m	0.92**	0.46	-0.86*	-0.21	-0.84*	0.86*

注:*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$ 。

此外,根据不同时期耕地重心迁移轨迹结果显示(图8),阿克苏河流域的耕地重心位于阿克苏市。耕地重心在2018年之前呈现出北移的趋势,这与阿克苏河流域大规模进行农业开发显著相关,耕地逐渐往上游山区移动;耕地重心在2018年之后呈现出南移趋势,这与流域进行上游水源保护和退耕政策有关,导

致耕地往北扩张趋势减缓^[42,43]。因此,结合2.1节的结果表明,在过去十几年中,阿克苏流域平原区的耕地增长显著,导致流域平原区地下水灌溉面积的基数增大,造成区域地下水的开采量远大于区域地下水的可开采量,造成在过去10年间阿克苏流域平原区地下水埋深的持续增加。

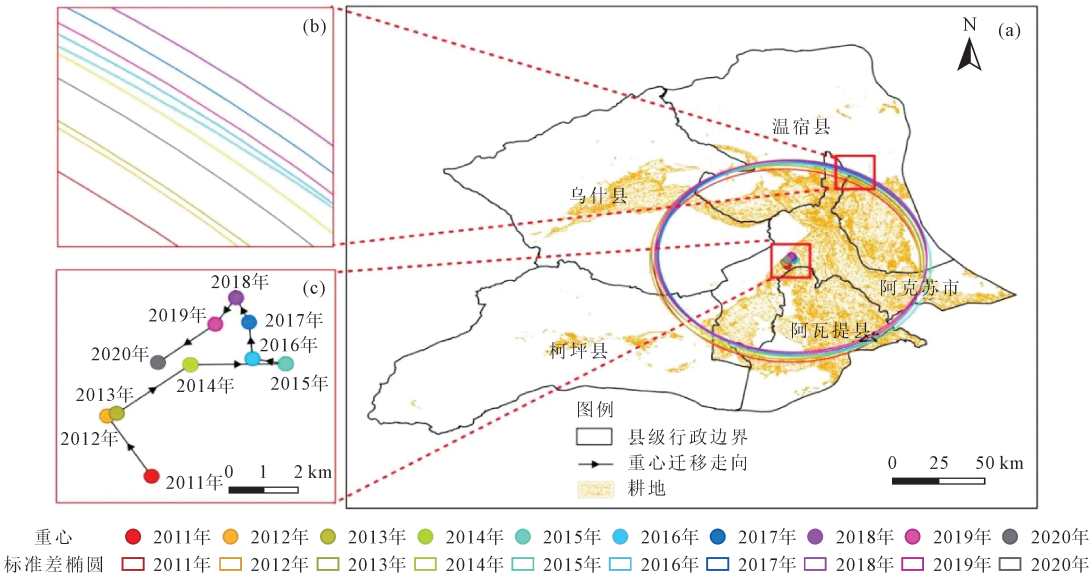


图8 阿克苏河流域平原区耕地的重心迁移轨迹
Fig.8 Center of gravity migration of cultivated land in the plain area of Aksu River Basin

2.4 阿克苏河流域地下水位动态变化的归因分析

2.4.1 阿克苏河流域地下水位动态变化的因素分析

地下水位主要由于是补给项和排泄项的不均衡而引起变动。地下水补给量是指天然状态或开采条件下,单位时间进入含水层的总水量,包括山前侧向补给量、降水入渗补给量、河流渗漏补给量、渠系渗漏补给量、田间灌溉入渗补给量、库塘渗漏补给量、地下水回归补给量等。这些补给源通过含水层进入地下,补充地下水储量。平原区地下水的总排泄量则包括自然排泄(如侧向排泄、泉水溢出、河流出水、潜水蒸发等)以及人为排泄(如农业灌溉、工业用水和城市供

水的开采)。而通过2021年地下水均衡计算(表5),可以看出在阿克苏市、阿瓦提县、温宿县的地下水是负均衡状态,地下水收入量少于地下水支出量,地下水总储量减少,地下水位下降。

地表水是地下水系统的重要补给源之一。河流、湖泊、降水等水体通过渗透作用为含水层提供持续的补给。人类活动对水文过程的影响主要是一方面通过水利工程等改变地表水的水循环参与过程,另一方面则是大规模的开采地下水会干扰地下水的补给和流动。阿克苏河作为塔里木河的主要源流,在水土扩张的趋势下,阿克苏河对塔河的地表水下泄

表 5 阿克苏河流域各县区浅层地下水的多年均衡分析
Table 5 Multi-year equilibrium analysis of shallow groundwater in various counties of Aksu River Basin

区域	总补给量/($\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	总排泄量/($\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	蓄变量/($\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	绝对均衡差/($\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	相对均衡差/%
阿克苏市	6.885 5	6.952 8	0.010 6	-0.077 6	-1.13
阿瓦提县	4.283 6	4.701 3	0.222 8	-0.194 8	-4.15
柯坪县	0.839	0.680 4	0.043	0.115 6	13.78
乌什县	7.637 2	6.816 1	0.010 5	0.810 6	10.61
温宿县	15.749 2	16.334 2	-0.463 7	-1.043 6	-6.42
合计	36.397 2	34.482 1	-0.176 8	2.092	5.75

量也在增加。而自 2001 年始,塔里木河流域严格实行《塔里木河流域近期综合治理规划报告》项目,阿克苏河的地表引水量不能超出控制指标,因此阿克苏河在增加下泄量的同时需要控制地表水引水量。然而,当地表水引水量下降时,地表水对地下水的补给能力随之减少,地下水的总补给量逐步降低,则会破坏原有的地下水均衡。由图 9(a)中可以看出,阿克苏河流域平原区的各县市 2011-2020 年的地表水引

水量都呈减少趋势,其中阿克苏市、温宿县、阿瓦提县的下降速率较大。而随着农业发展和工业需求的提升,地下水的开采量逐年增加(图 9(b)),地下水开采量成为地下水总排泄量占比最大的一项。当地下水的开采速度超过其补给速度时,地下水总排泄量超过总补给量,这种不平衡加剧了地下水资源的消耗,使得地下水系统长期处于非均衡状态,造成地下水位逐步下降。

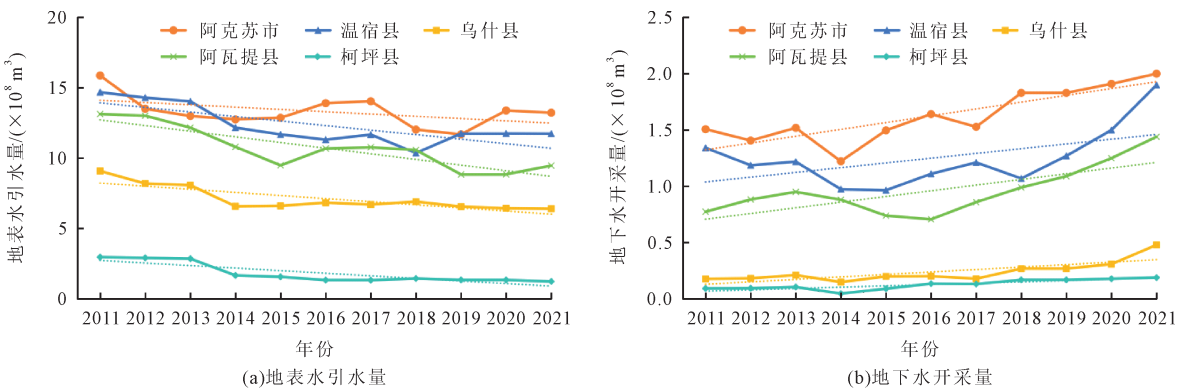


图9 2011-2020年阿克苏河流域平原区各县区地表水引水量及开采量的变化趋势
Fig.9 Change trend of surface water diversion and exploitation volume in Aksu River Basin from 2011 to 2020

2.4.2 阿克苏河流域地下水位动态变化的贡献度分析
为更好地分析研究阿克苏河流域平原区地下水位变化的影响因素,基于 2.2 和 2.3 节的研究结果,结合相关性和冗余分析的方法和已有的研究结果^[44,45],筛选了地下水位埋深变化的 7 个主要影响指标。此外,为消除统计分析中的异常值干扰以及区域异质性,以县级行政区为结构单元,年均数值变化为时间序列(2011-2020 年)进行数据处理分析,共得到 50 组区域样本,满足冗余分析的数理条件。图 10(a)的相关性分析结果显示,除其他未利用地之外,地下水位与其他变量之间均呈现负相关关系。即随着研究区地下水水位的升高,其他变量呈现出减少的趋势。这表明流域地下水动态变化受到这些因素的限制。

图 10(b)的结果表明,冗余分析第 1 轴的方差贡献率为 77.46%、第 2 轴的方差贡献率为 17.20%。前 2 轴的累计方差贡献率为 94.66%,反映了大部分区域地下

水位与土地利用和水资源之间的关系。其中,第 1 轴起决定性作用,表明前 2 轴能够反映地下水位与土地利用和水资源之间关系的全部信息。土地利用的变化与水资源之间存在显著的正影响,地下水位变化与水资源之间存在显著的负影响。结合图 11 中随机森林模型的结果表明,耕地和地表水引水量显著影响阿克苏河流域平原区地下水位变化,其是阿克苏河流域平原区 2011-2020 年地下水位显著下降的主要影响因素,这进一步佐证 2.2 节的研究结果。即在农业开发强度逐年提高下,耕地面积的迅速增加导致农业用水量的加大,在地表引水量逐年减少而地下水开采量逐年增加(图 11)的背景下导致阿克苏河流域平原区地下水位的逐年降低。

3 讨论

3.1 阿克苏河流域地下水位埋深动态的变化机制
通过 2011-2022 年阿克苏河流域平原区实测监

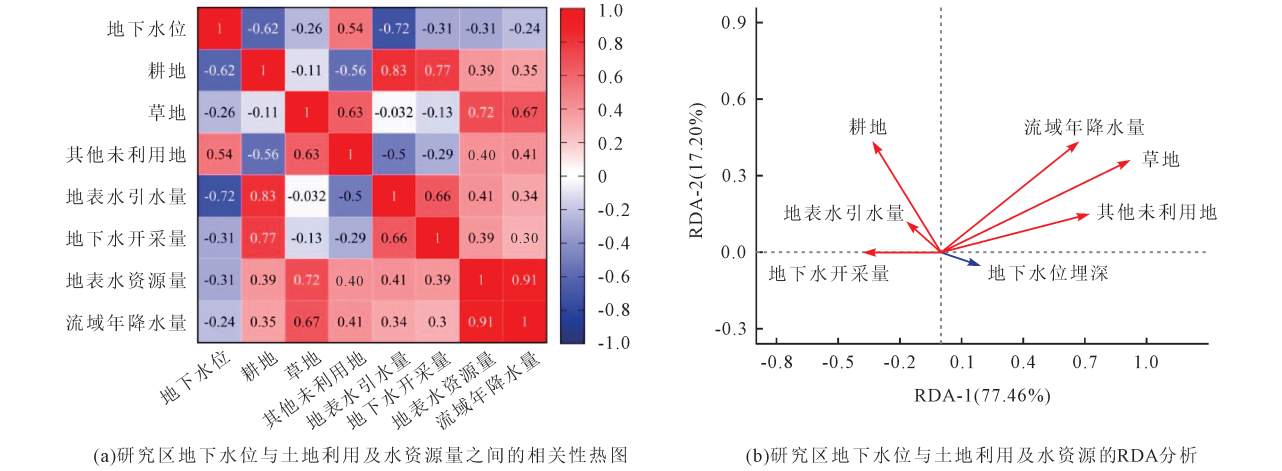


图10 研究区地下水位的影响因素分析
Fig.10 Analysis of influencing factors of groundwater level in the study area

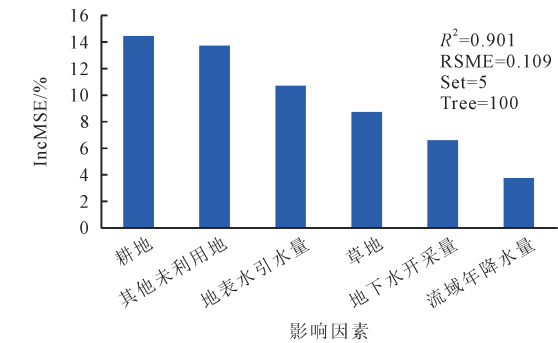


图11 研究区地下水位影响因素的重要性排名
Fig.11 The importance ranking of influencing factors of groundwater level in the study area

测井埋深数据和2011-2020年土地利用/覆被变化,并结合流域SPI的年际特征综合分析阿克苏河流域平原区地下水埋深变化的主要驱动因素,结果发现阿克苏河流域平原区在2013年发生了一次干旱,其后到2020年的干旱程度逐渐减轻,地下水位大部分都呈现下降趋势,说明研究区地下水位主要受其他因素影响,对气象干旱的相应变化并不灵敏,这与龚栋栋等^[44]对新疆平原区的地下水与气象干旱的响应研究结论一致。但不排除地下水位的变化与气象干旱的响应有一定的滞后效应,即使干旱程度减轻,恢复地下水位也需要一定的时间^[6]。

人类活动对流域地下水位埋深的影响主要表现在土地利用变化、灌溉面积扩张、地表引水以及地下水开采等^[45]。在以农业生产为主的阿克苏河流域平原区,耕地的扩张速度相对于其他土地类型扩张得更快,在严格的水资源管理制度下,地表水引水量逐年下降,灌溉用水则主要使用开采的地下水(图12),而地下水补给量和开采量之间的不平衡导致地下水位迅速下降^[46]。同时,草地和未利用地与耕地之间的相互转化会改变土壤下垫面性质,导致地下水循环发生变化,影响地下水的排泄与补给^[47]。

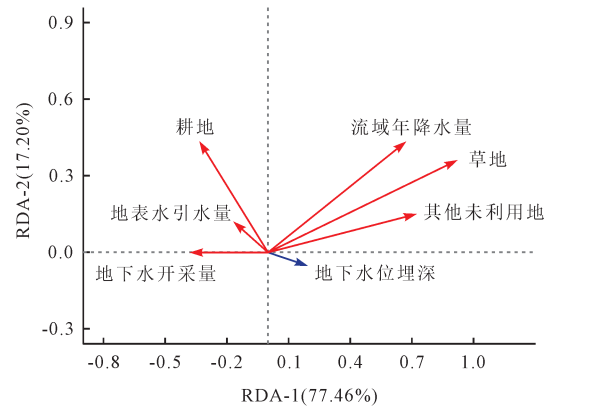


图12 2011-2020年阿克苏河流域平原区地表水引水量及地下水开采量的年际变化趋势
Fig.12 Interannual variation trend of surface water diversion and groundwater extraction in Aksu River Basin plain area from 2011 to 2020

以行政区域尺度来看,柯坪县的土地利用变化相对较小,同时耕地面积扩张不明显,在气象干旱程度减轻的情形下,降水量增多导致地下水的补给量增加,因此该区域的地下水位出现了回升现象;其他行政区的地下水位在气象干旱程度减轻的情形下逐年下降,这与耕地面积扩大导致的地下水开采量增加有显著关系。综上所述,过度开采地下水会导致地下水枯竭,而地下水的回补又主要受到气象干旱的影响^[48,49]。因此,在区域环境变化的背景下,流域地下水的动态主要受到人类活动影响,其次是气候变化影响。

3.2 研究局限性及展望

在干旱区流域水文地质条件的基础上,本文采用实测数据对流域平原区的地下水埋深动态和归因进行定量分析,研究结果在一定程度能以量化形式表明干旱区流域地下水埋深动态和影响因素。但是不同地区地下水埋藏条件和成因各不相同,本文的结果表明在耕地持续增长背景下,2020年之前流域地下水开采量上升趋势不显著,而引水量下降趋势显著导致了流域平原区大部分县区地下水位的持续下降。这与刘坤、胡鑫等^[48,49]的研究结果中地下水开采量的持续

上升导致流域平原区地下水位下降的原因有所差异。因此,在今后的研究和区域地下水位管控政策中,精确甄别地下水位埋深动态的原因是提高区域水资源使用效率和管理的重要手段。此外,气候预测存在极大不确定性,水文干旱与农业干旱通常滞后于气象干旱,却比地下水干旱的发生时间更早,进而导致其对地下水系统的影响不确定性也随之增大^[30,44,50]。同时由于地下水相关数据的限制,本文没有对地下水循环(如地下水转化补给量的变化过程及原因)进行深入细化,今后需要深入分析量化驱动机制与贡献率。

4 结论

(1)2011–2022年,阿克苏河流域平原区内地下水位总体呈现显著下降趋势,其水位埋深呈现自平原区周边向中心逐渐增加趋势,区域内地下水位大部分处于2~20 m。此外,阿克苏河流域平原区的地下水以开采型为主,地下水位变化与气象干旱的响应并不显著,气象干旱并不是导致其地下水水位下降的主要原因。

(2)阿克苏流域平原区以耕地、草地和其他未利用地为主,其他未利用地和草地的区域占比面积在2011–2020年呈现显著下降的趋势(下降幅度分别为2.53%和3.62%),耕地呈现显著上升的趋势(面积占比从15.81%增长为17.93%)。此外,在山区水源保护和退耕政策的背景下促使了耕地重心呈现先北后南的变化趋势,结合相关性结果表明,耕地的大量转化导致了流域用水需求的增加。

(3)耕地扩张和地表水引水量减少是阿克苏河流域平原区2011–2020年地下水位显著下降的主要影响因素。在农业开发强度逐年提高、地表引水量逐年减少以及地下水开采量逐年增加的背景下,流域平原区地下水灌溉面积的基数增大导致区域地下水位逐年降低。

【参考文献】

[1] Ding J Z, Wang T, Wang Y Y, et al. New understanding of the response of permafrost carbon cycling to climate warming[J]. Science Bulletin, 2022,67(13):1322–1325.

[2] 徐丽萍,李鹏辉,李忠勤,等. 新疆山地冰川变化及影响研究进展[J]. 水科学进展, 2020,31(6):946–959.

Xu Liping, Li Penghui, Li Zhongqin, et al. Advances in research on changes and effects of glaciers in Xinjiang Mountains[J]. Advances in Water Science, 2020,31(6):946–959.

[3] 丁永建,张世强,吴锦奎,等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J]. 水科学进展, 2020,31(5):690–702.

Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. Advances in Water Science, 2020,31(5):690–702.

[4] Konecky B L, McKay N P, Falster G M, et al. Globally coherent water cycle response to temperature change during the past two millennia[J]. Nature Geoscience, 2023,16:997–1004.

[5] Ren Y, Yu H P, Huang J P, et al. The projected response of the water cycle to global warming over drylands in East Asia [J]. Earth’s Future, 2024,12(4).

[6] Ji P, Yuan X, Ma F, et al. Accelerated hydrological cycle over the Sanjiangyuan Region induces more streamflow extremes at different global warming levels[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020,24(11):5439–5451.

[7] Kim J B, Kim S H, Bae D H. The impacts of global warming on arid climate and drought features[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2023,152(1):693–708.

[8] 顾磊,陈杰,尹家波,等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J]. 水科学进展, 2021,32(3):321–333.

Gu Lei, Chen Jie, Yin Jiabo, et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China[J]. Advances in Water Science, 2021,32(3):321–333.

[9] Wang Z W, Chang J X, Wang Y M, et al. Temporal and spatial propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought and influencing factors[J]. Atmospheric Research, 2024,299:107212.

[10] 冯凯,李彦彬,许桂平,等. 西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应[J]. 水资源保护, 2023,39(2):59–69.

Feng Kai, Li Yanbin, Xu Guiping, et al. Spaitotemporal and multi-angle response of agricultural drought to meteorological drought in northwest China[J]. Water Resources Protection, 2023,39(2):59–69.

[11] 任立良,沈鸿仁,袁飞,等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展, 2016,27(4):492–500.

Ren Liliang, Shen Hongren, Yuan Fei, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe Catchment in a changing environment[J]. Advances in Water Science, 2016,27(4):492–500.

[12] 王玉洁,秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017,13(5):483–493.

Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China:an overview[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2017,13(5):483–493.

[13] Lu C Y, Wu C, Sun Q Y, et al. Seasonal river–lake–groundwater coupling simulation and groundwater overexploitation and ecological environment assessment in the Aiding Lake

Basin, NW China[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130896.

[14] Kabir T, Pokhrel Y, Felfelani F. Climatic and anthropogenic controls on groundwater dynamics in the Mekong River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2023,622:129761.

[15] Lyu H, Li H, Zhang P, et al. Response mechanism of groundwater dynamics to freeze–thaw process in seasonally frozen soil areas: a comprehensive analysis from site to regional scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2023,625:129861.

[16] Sarma R, Singh S K. A comparative study of data–driven models for groundwater level forecasting[J]. *Water Resources Management*, 2022,36(8):2741–2756.

[17] Manzione R L, Castrignanò A. A geostatistical approach for multi–source data fusion to predict water table depth[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,696:133763.

[18] Stateczny A, Narahari S C, Vurubindi P, et al. Underground water level prediction in remote sensing images using improved hydro index value with ensemble classifier[J]. *Remote Sensing*, 2023,15(8):2015.

[19] 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.

Shu Longcang, Wang Zhe, Yuan Yajie, et al. Land use change and its impact on groundwater in the typical district of Sanjiang Plain during the past 40 years[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021,52(8):896–906.

[20] 吴彬,杜明亮,穆振侠,等. 1956–2016年新疆平原区地下水资源量变化及其影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2021,32(5):659–669.

Wu Bin, Du Mingliang, Mu Zhenxia, et al. Analysis on the variation of groundwater resources and influencing factors in Xinjiang plain area from 1956 to 2016[J]. *Advances in Water Science*, 2021,32(5):659–669.

[21] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. *水资源保护*, 2022,38(1): 34–42.

Su Xiaoling, Chu Jiangdong, Zhang Te, et al. Spatio–temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China[J]. *Water Resources Protection*, 2022,38(1):34–42.

[22] 姜田亮,栗晓玲,郭盛明,等. 西北地区植被耗水量的时空变化规律及其对气象干旱的响应[J]. *水利学报*, 2021,52(02): 229–240.

Jiang Tianliang, Su Xiaoling, Guo Shengming, et al. Spatio–temporal variation of vegetation water consumption and its response to meteorological drought in Northwest China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021,52(02):229–240.

[23] Lyu H, Wu T T, Su X S, et al. Factors controlling the rise and fall of groundwater level during the freezing–thawing period in seasonal frozen regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2022,606:127442.

[24] Secci D, Giovanna Tanda M, D’Oria M, et al. Artificial intelligence models to evaluate the impact of climate change on groundwater resources[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 627:130359.

[25] Yang G X, McCoy K. Modeling groundwater–level responses to multiple stresses using transfer–function models and wavelet analysis in a coastal aquifer system[J]. *Journal of Hydrology*, 2023,627:130426.

[26] Bai T, Tahmasebi P. Graph neural network for groundwater level forecasting[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616: 128792.

[27] Boo K B W, El–Shafie A, Othman F, et al. Groundwater level forecasting with machine learning models: a review[J]. *Water Research*, 2024,252:121249.

[28] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000–2020年中国地下水开采时空演变特征[J]. *水资源保护*, 2023,39(4):79–85.

Xu Lili, Shu Longcang, Li Wei, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020[J]. *Water Resources Protection*, 2023,39(4):79–85.

[29] 韩煜娜,左德鹏,王国庆,等. 变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因[J]. *水资源保护*, 2023,39(02):199–207, 214.

Han Yuna, Zuo Depeng, Wang Guoqing, et al. Evolution pattern and attribution analysis of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment[J]. *Water Resources Protection*, 2023,39(02):199–207,214.

[30] 李晓英,吴淑君,王颖,等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析[J]. *水资源保护*, 2020,36(6):80–85.

Li Xiaoying, Wu Shujun, Wang Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2020,36(6):80–85.

[31] Luo M, Liu Y Z, Shao T B. Response of drylands’ water–cycle to the global warming[J]. *International Journal of Climatology*, 2021,41(9):4587–4602.

[32] Li T H, Lyu A F, Zhang W X, et al. Spatiotemporal characteristics of watershed warming and wetting: the response to atmospheric circulation in arid areas of Northwest China [J]. *Atmosphere*, 2023,14(1):151.

[33] 姚小晨,高凡,韩方红,等. 2000–2020年阿克苏河流域土地利用强度变化及其对蒸散发的影响[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(6):951–963.

Yao Xiaochen, Gao Fan, Han Fanghong, et al. Changes of land use intensity and its influence on evapotranspiration in Aksu River Basin from 2000 to 2020[J]. *Arid Zone Research*, 2024,41(6):951–963.

[34] 韩方红,高凡,何兵,等. 1990–2020年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素[J]. *环境科学*, 2024,45(6):

- 3297-3307.
- Han Fanghong, Gao Fan, He Bing, et al. Spatial-temporal trajectory and influencing factors of carbon emission from land use in Aksu River Basin from 1990 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2024,45(6):3297-3307.
- [35] 王鹏寿,许民,韩海东,等. 天山南坡阿克苏流域冰川物质平衡及其融水径流对气候变化的响应研究[J]. *地学前缘*, 2024,31(2):435-446.
- Wang Pengshou, Xu Min, Han Haidong, et al. Study on the glacier mass balance and the response of meltwater runoff to climate change in Aksu Basin on the southern slope of Tianshan Mountain[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024,31(2):435-446.
- [36] Zhang Q F, Chen Y N, Li Z, et al. Glacier changes from 1975 to 2016 in the Aksu River Basin, central Tianshan Mountains[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019,29(6):984-1000.
- [37] 邓越,蒋卫国,王晓雅,等. MSWEP降水产品在中国大陆区域的精度评估[J]. *水科学进展*, 2018,29(4):455-464.
- Deng Yue, Jiang Weiguo, Wang Xiaoya, et al. Accuracy assessment of MSWEP over mainland China[J]. *Advances in Water Science*, 2018,29(4):455-464.
- [38] McKee T, Doesken N, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales[A]. in: *The Eighth Conference on Applied Climatology*[C]. Anaheim California, 1993,179-184.
- [39] 宋永永,薛东前,夏四友,等. 近40 a黄河流域国土空间格局变化特征与形成机理[J]. *地理研究*, 2021,40(5):1445-1463.
- Song Yongyong, Xue Dongqian, Xia Siyou, et al. Change characteristics and formation mechanism of the territorial spatial pattern in the Yellow River Basin from 1980 to 2018, China[J]. *Geographical Research*, 2021,40(5):1445-1463.
- [40] 李涛辉,张文翔,吕爱锋,等. 云南省农业生长季热量资源的时空特征[J]. *山地学报*, 2023,41(3):361-374.
- Li Taohui, Zhang Wenxiang, Lyu Aifeng, et al. Temporal and spatial characteristics of heat resources in growing season in Yunnan Province, China[J]. *Mountain Research*, 2023,41(3):361-374.
- [41] Yin J Q, Hu W L, Chen A Q, et al. Human-caused increases in organic carbon burial in plateau lakes: the response to warming effect[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 937:173556.
- [42] 倪明霞,普拉提 莫合塔尔,孙婷宇,等. 基于气候变化与人类活动双重作用的南疆水资源供需关系分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024,32(2):331-348.
- Ni Mingxia, Polat Muhtar, Sun Tingyu, et al. Analysis on the supply-demand relationship of water resources based on the dual role of climate change and human activities in Southern Xinjiang, China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024,32(2):331-348.
- [43] Wang Y, Xia T T, Shataer R, et al. Analysis of characteristics and driving factors of land-use changes in the Tarim River Basin from 1990 to 2018[J]. *Sustainability*, 2021,13 (18):10263.
- [44] 龚栋栋,高凡,吴彬,等. 基于GRACE的新疆平原区地下水干旱时空变化及其对气象干旱的响应[J]. *干旱区地理*, 2024,47(9):1496-1507.
- Gong Dongdong, Gao Fan, Wu Bin, et al. Temporal and spatial variation of groundwater drought and its response to meteorological drought in Xinjiang Plain based on GRACE[J]. *Arid Land Geography*, 2024,47(9):1496-1507.
- [45] Costantini M, Colin J, Decharme B. Projected climate-driven changes of water table depth in the world's major groundwater basins[J]. *Earth's Future*, 2023,11(3).
- [46] Kuang X X, Liu J G, Scanlon B R, et al. The changing nature of groundwater in the global water cycle[J]. *Science*, 2024,383(6686):eadf0630.
- [47] Zhang X L, Ren L, Kong X B. Estimating spatiotemporal variability and sustainability of shallow groundwater in a well-irrigated plain of the Haihe River Basin using SWAT model[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,541:1221-1240.
- [48] 刘坤,高凡,吴彬,等. 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[J]. *水土保持学报*, 2022,36(5):150-159.
- Liu Kun, Gao Fan, Wu Bin, et al. 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[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(5):150-159.
- [49] 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.
- Hu Xin, Wu Bin, Gao Fan, et al. Response of groundwater level dynamics to land use change in Hutubi County[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(5):227-234.
- [50] Hu K X, Awange J L, Kuhn M, et al. Spatio-temporal groundwater variations associated with climatic and anthropogenic impacts in South-West Western Australia[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,696:133599.