doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.037

考虑水资源条件变化的民勤盆地生态环境演变分析

曹　引[1,2]　赵红莉[1,2]　冶运涛[1,2]　赵慧子[1]　张怀文[1]　华雯静[1]　干　雨[1]
（1.中国水利水电科学研究院水资源研究所，北京 100038；2.水利部数字孪生流域重点实验室，北京 100038）

摘要：分析区域生态环境演变过程，对指导区域生态环境保护具有重要意义。以石羊河下游民勤盆地为研究区，基于石羊河尾闾湖泊青土湖水体水量、民勤盆地地下水水位与水储量变化量、土地利用类型和归一化差异植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）等多源监测数据，从地表和地下水资源条件变化、土地利用类型和 NDVI 变化等多个视角综合分析了民勤盆地生态环境演变过程。研究结果表明，青土湖水体面积和蓄水量整体呈“干涸-增加-萎缩”变化趋势；民勤盆地地下水水位整体呈下降趋势，其中 2007—2013 年下降速度明显减缓；民勤盆地土地利用类型变化主要表现为耕地、草地和荒地之间转换，2017 年开始民勤盆地荒漠化加剧；民勤盆地 NDVI 呈不显著增加趋势。综合地表和地下水资源条件变化、土地利用类型和 NDVI 变化等多个视角分析结果，将 2003—2022 年民勤盆地生态环境演变过程划分为迅速退化（2003—2006 年）、开始复苏（2007—2013 年）和再次退化（2014—2022 年）3 个阶段；人类活动影响的水资源条件变化是影响民勤盆地生态环境演变的主要因素，建立与民勤盆地水资源承载能力相协调、相适应的区域经济社会发展模式是民勤盆地生态环境保护的重要方向。

关键词：生态环境演变；驱动因素；多源数据；水资源条件变化；民勤盆地
中图分类号：X171.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)04-0381-10　　**OSID**：

Analysis of Ecological Environment Evolution in Minqin Basin Considering Changes of Water Resources Condition

CAO Yin[1,2]　ZHAO Hongli[1,2]　YE Yuntao[1,2]　ZHAO Huizi[1]　ZHANG Huaiwen[1]　HUA Wenjing[1]　GAN Yu[1]
(1. *Department of Water Resources*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*
2. *Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Ecological environment is closely related to the development of society and economy. Analyzing the process of ecological environment evolution is of great significance for guiding regional ecological environmental protection. However, analysis of regional ecological environment evolution based on a single indicator such as surface water area, groundwater level, normalized difference vegetation index (NDVI), etc., has limitation in a single perspective. Taking the Minqin Basin in the lower reaches of the Shiyang River as the study area. Firstly, spatial and temporal changes of four indicators, including surface water area and storage of Qingtu Lake, the terminal lake of the Shiyang River, groundwater level and storage anomaly, land use, and NDVI in Minqin Basin were analyzed. Then a comprehensive analysis of ecological environment evolution was conducted for the Minqin Basin from multiple perspectives, including surface and groundwater resource variations, land use type changes, and NDVI dynamics. The results shown that the water surface area and storage of Qingtu Lake generally followed a trend of drying up, increasing and shrinking. The groundwater water level and storage anomaly in the Minqin Basin generally showed a downward trend, with a significant slowdown in the decline from 2007 to 2013. The changes in land use types in the Minqin Basin were mainly characterized by the conversion between cropland, grassland, and barren, and since 2017, desertification in the Minqin Basin intensified. The NDVI in the Minqin Basin showed a non-significant increasing trend with a rate of 0.000 5 a^{-1}. By integrating the characteristics of the changes of surface water and groundwater resources conditions, land use types, and NDVI changes, the process of the ecological environment evolution in the Minqin Basin from 2003 to 2022 was divided into three stages of rapid degradation (2003—2006),

收稿日期：2024-10-28　修回日期：2025-03-05
基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFF1304202）和国家自然科学基金项目（52309040、52279031）
作者简介：曹引（1991—），男，高级工程师，博士，主要从事水资源遥感研究，E-mail：caoyin@iwhr.com

recovery (2007—2013), and re-degradation (2014—2022) based on multi-perspective. Changes of water resources conditions induced by human activities constituted the primary factor influencing ecological evolution in the Minqin Basin. Establishing a regional economic and social development model that was coordinated with and compatible to the water resource carrying capacity of the Minqin Basin should be prioritized as a key direction for ecological conservation in the region.

Key words: ecological environment evolution; driving factors; multi-source data; changes of water resources condition; Minqin Basin

0 引言

“生态环境”一词目前并没有形成统一定义,王孟本[1]系统梳理了“生态环境”概念的起源和内涵,认为以人类为主体,可将生态环境定义为“对人类生存和发展有影响的自然因子的综合”,主张人与自然和谐相处,从而实现人类社会的可持续发展。遵循这一定义,开展区域生态环境质量动态评价,科学认识区域生态环境演变过程,对制定区域社会经济可持续发展规划和生态环境保护对策具有重要意义[2]。

区域生态环境质量评价的核心是科学合理地确定评价指标,评价指标类型和数量直接影响区域生态环境质量评价结果。根据评价指标数量,目前区域生态环境评价方法可分为单指标评价和多指标综合评价[3]。单指标评价方法主要利用土地利用类型[4]、归一化差异植被指数(NDVI)[5]等单指标变化评价区域生态环境质量变化,单指标评价方法视角单一,难以全面评价区域生态环境演变特征[6]。多指标综合评价方法采用多个评价指标,通过加权方式构建生态环境指数,利用生态环境指数变化综合评价区域生态环境演变特征,目前最具代表性的生态环境指数是徐涵秋[7]提出的基于湿度(土壤和植被湿度)、绿度(NDVI)、热度(地表温度)和干度(裸土和建筑指数)的遥感生态指数(Remote sensing ecological index, RSEI),直接利用该指数或在此基础上考虑荒漠化、盐碱化等指标改进形成的其他遥感生态指数,在流域[8-10]、行政区[11-13]、荒漠绿洲区[14]等不同空间尺度生态环境质量时空变化评估中得到广泛应用。现有基于遥感生态指数的综合评价方法主要从土壤湿度、植被生长状况和土地利用等视角综合评估区域生态环境质量,但没有考虑水资源条件这一对人类生存和发展具有重要影响的评价因子,考虑水资源条件变化的区域生态环境质量评价有待探索。

石羊河流域作为西北干旱地区内陆河流域中人口最密集、水资源开发强度最大、生态环境最脆弱、土地荒漠化问题最严重的地区之一,既是气候变化敏感区[15],又是生态环境变化脆弱区[16],其生态环境演变受到广泛关注[17]。目前,不同学者分别利用单指标评价和多指标综合评价方法开展了石羊河流域生态环境质量评价和演变分析。单指标评价方面,文献[18-21]分别利用石羊河流域土地利用类型、植被覆盖度、植被净初级生产力、地下水水位等单个指标分析了不同时间尺度下流域生态环境质量的时空变化特征。基于单指标开展流域生态环境演变分析存在局限性,不同视角分析结论可能差别较大,如从植被覆盖变化角度看,石羊河流域生态环境呈向好趋势,但从地下水储量变化视角看,石羊河流域生态环境整体呈恶化趋势[17,22]。多指标综合评价方面,石三娥等[14]和颉金凤等[23]分别利用改进遥感生态指数 RSEDI (Remote sensing ecological distance index)和 IRSEI (Improved remote sensing ecological index)分析石羊河流域生态环境的时空变化特征,发现流域生态环境质量整体呈改善趋势。石羊河流域是典型干旱地区,水资源条件变化对石羊河流域生态环境质量具有极强的表征作用[24],现有石羊河流域生态环境评价和演变分析研究没有充分考虑这一表征作用,考虑水资源条件变化的石羊河流域生态环境演变特征有待进一步研究。

民勤盆地位于石羊河流域下游,是流域内受人类活动影响剧烈、生态环境十分脆弱的典型区域。本文以民勤盆地为研究区,在保留现有生态环境质量评价广泛采用的土地利用类型和 NDVI 2 个指标基础上,引入表征民勤盆地水资源条件变化的石羊河尾闾湖泊青土湖水体水量和民勤盆地地下水储量变化量 2 个指标,利用 2003—2022 年青土湖水体水量、民勤盆地地下水储量变化量、土地利用类型和 NDVI 等评价指标,从水资源条件变化、土地利用类型和植被 NDVI 变化等多个视角综合分析民勤盆地近 20 年的生态环境演变特征和驱动因素,以期为民勤盆地生态环境治理与保护提供新的认知,同时为其他区域生态环境演变分析提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

民勤盆地位于石羊河流域下游的民勤县境内,西南以红崖山水库为界,其余被巴丹吉林沙漠

和腾格里沙漠包围，绿洲占比约 25%，是典型的荒漠绿洲区[25]（图 1）。民勤盆地属于典型的温带大陆性气候，干旱少雨，年降水量仅为 114 mm，年平均气温 8.4℃，年潜在蒸发量达 2 483 mm[26]。民勤盆地以灌溉农业为主，红崖山灌区坐落其中，设计灌溉面积约 58 607 hm^2，为地表水和地下水混合灌区，地表水灌溉主要来自红崖山水库下泄水量。20 世纪 50 年代以来，随着石羊河流域上中游水资源开发利用程度提高，通过红崖山水库进入民勤盆地的地表水量减少，加之民勤盆地灌溉用水需求不断扩张，导致民勤盆地地下水持续过量开采，地下水位急剧下降，下游尾闾湖泊青土湖干涸，生态环境逐渐恶化。随着石羊河流域气候的暖湿化发展[27]以及 2010 年开始实施的石羊河流域重点治理工程，石羊河流域生态环境恶化趋势有所减缓，局部生态呈复苏态势[28]。

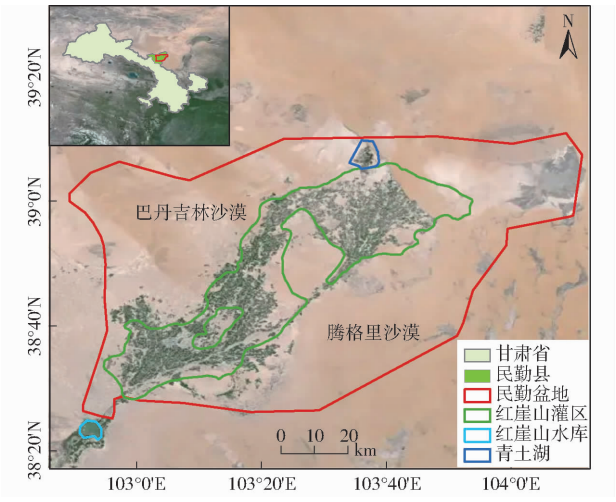

图 1　研究区

Fig. 1　Study area

1.2　数据来源

使用数据包括青土湖水体面积和蓄水量、民勤盆地地下水监测站点水位观测数据、民勤盆地陆地水储量变化量、地表水和土壤水储量变化量、土地利用类型和 NDVI 等数据集。不同数据集来源、年份和时空分辨率见表 1。

表 1　研究数据

Tab. 1　Research data

数据集	来源	年份	时间分辨率	空间分辨率
青土湖水体面积和蓄水量	自行监测	2003—2022	月	10 ~ 30 m
民勤盆地地下水水位	地下水监测站	2003—2022	月	
民勤盆地陆地水储量变化量	JPL（Jet Propulsion Laboratory）Mascon	2003—2022	月	0.5°
民勤盆地地表水和土壤水储量变化量	GLDAS（Global land data assimilation system）Noah	2003—2022	月	0.25°
民勤盆地土地利用类型	CLCD（China land cover dataset）	2003—2022	年	30 m
民勤盆地 NDVI	MOD13Q1	2003—2022	16 d	250 m

1.2.1　青土湖水体面积和蓄水量

基于几何精校正、辐射定标和大气校正后的 Landsat－5 TM、Landsat－8/9 OLI 和 Sentinel－2 MSI 等多源遥感影像，利用面向对象分割和双峰阈值法自动提取青土湖水体范围[29]，最后通过人工目视对青土湖水体范围进行逐期复核和修正以确保水体面积识别精度，获取 2003—2022 年青土湖时序水体面积数据，通过取月均值和线性插值统一时间尺度为月尺度，空间上利用监测得到的青土湖时序水体范围计算水体覆盖频次（Surface water occurrence，SWO）[30]，以表征青土湖水体的空间分布特征。利用 30 m 空间分辨率 SRTM（Shuttle radar topography mission）数字高程模型（Digital elevation model，DEM）构建青土湖水位－水体面积－蓄水量关系模型[31]，以青土湖月度水体面积作为输入，获取青土湖 2003—2022 年月尺度蓄水量变化数据。

1.2.2　民勤盆地地下水储量变化量

分别利用 GRACE（Gravity recovery and climate experiment）/GRACE－FO（Follow-on）JPL Mascon 产品和 GLDAS Noah 产品估算 2003—2022 年民勤盆地月度陆地水储量变化量（Terrestrial water storage anomalies，TWSA）和地表水储量变化量（Surface water storage anomaly，SWSA）、土壤水储量变化量（Soil moisture storage anomaly，SMSA），在此基础上，基于水量平衡原理，估算民勤盆地地下水储量变化量（Groundwater storage anomaly，GWSA）[32]。

为统一 JPL Mascon 产品和 GLDAS Noah 模拟产品空间分辨率，将 JPL Mascon 产品空间分辨率重采样为 0.25°，针对 GRACE/GRACE－FO 陆地水储量变化产品间存在的时间空缺问题，采用线性插值方法进行插补[33]。同时基于民勤盆地 96 个地下水监测站月均水位时间序列，利用相关分析法验证 GRACE 卫星估算地下水储量变化精度[34]。

1.2.3　民勤盆地土地利用类型

土地利用类型数据采用 YANG 等[35]基于 30 m 空间分辨率 Landsat 影像，利用随机森林分类器以及结合时空过滤和逻辑推理的后处理方法开发的全国土地利用类型产品（CLCD），产品精度优于

MCD12Q1、ESACCI_LC、FROM_GLC 和 GlobeLand30 等土地利用类型产品，时间分辨率为年，该产品将土地利用类型分为耕地、林地、灌木、草地、水体、雪/冰、荒地、不透水面和湿地。大尺度土地利用类型产品在较小区域尺度的分类精度往往有限，为了更加准确地获取民勤盆地土地利用类型时空变化情况，在 2003—2022 年民勤盆地年度 CLCD 土地利用类型产品基础上，结合民勤盆地 2003—2022 年 6—9 月 Landsat－5 TM、Landsat－7 ETM、Landsat－8/9 OLI 无云影像，对土地利用类型产品进行目视复核，对民勤盆地耕地、草地、荒地等主要土地利用类型错分和漏分区域进行人工修正。

1.2.4 民勤盆地 NDVI

NDVI 数据采用 2003—2022 年 MOD13Q1 产品，时间分辨率为 16 d，空间分辨率为 250 m。为消除云、大气以及太阳高度角等因素的干扰，对同一月内的 NDVI 采用最大值合成法（Maximum value composite，MVC）生成月尺度 NDVI，基于生长季的月尺度 NDVI 采用均值法生成年尺度 NDVI[19]。利用民勤盆地矢量裁剪得到 2003—2022 年民勤盆地年度 NDVI 数据。

1.3 生态环境演变分析方法

利用青土湖水体面积和蓄水量、民勤盆地地下水储量变化量/地下水水位变化量、土地利用类型和 NDVI 等时序数据，分别分析民勤盆地湖泊水体水量、地下水储量变化量、土地利用类型和 NDVI 等生态环境指标的时空变化特征，将民勤盆地不同生态环境评价指标变化过程划分为相对稳定、增加、减少等不同阶段，最后综合分析不同评价指标变化过程，将民勤盆地生态环境演变过程定性划分为相对稳定、退化或复苏等不同阶段。

2 结果与分析

2.1 民勤盆地生态环境时空变化特征

2.1.1 青土湖水体水量时空变化特征

2003—2022 年青土湖水体面积和蓄水量随时间变化如图 2 所示。由图 2 可以看出，2003—2022 年青土湖水体整体呈“干涸-增加-萎缩”变化趋势。2010 年 8 月之前，青土湖一直处于干涸状态，2010 年 8 月之后，为进一步改善区域生态，红崖山水库首次向青土湖生态补水，青土湖开始有水。2010—2022 年期间，红崖山水库每年持续向青土湖生态补水，2010—2017 年，青土湖水体面积整体呈增加趋势，最大水体面积约为 11.2 km^2，蓄水量约为 6×10^6 m^3；2018—2022 年青土湖水体面积迅速下降，2022 年最大水体面积仅为 3.2 km^2，蓄水量减少到 1.45×10^6 m^3。青土湖水体面积呈季节性波动，冬季水体面积最大，夏季水体面积最小。2010—2022 年青土湖水体频次空间分布如图 3 所示。由图 3a 可以看出，青土湖水域较为零碎，水体覆盖频次整体较低，大部分水域水体覆盖频次低于 50%；对比图 3b、3c 可以看出，与 2010—2017 年相比，2018—2022 年青土湖水域分布更加碎片化，青土湖水域萎缩明显。

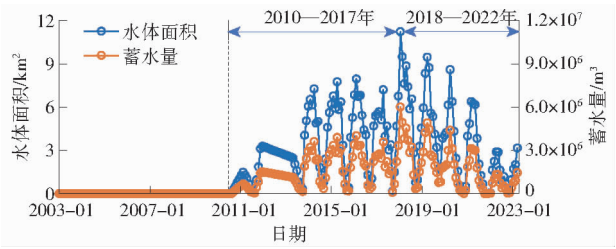

图 2 青土湖水体面积和蓄水量变化曲线

Fig. 2 Surface water and storage changes of Qingtu Lake

2.1.2 民勤盆地下水时空变化特征

2003—2022 年民勤盆地年尺度 TSWA、SWSA＋SMSA 和 GSWA 对应的等效水柱高（Equivalent water height，EWH）变化如图 4a 所示。由图 4a 可以看出，民勤盆地 SWSA 和 SMSA 累积变化幅度很小，TSWA 由 GWSA 主导，二者相关系数达到 0.95。利用民勤盆地 96 个地下水观测井地下水观测数据验证 GRACE 联合 GLDAS Noah 估算民勤盆地地下

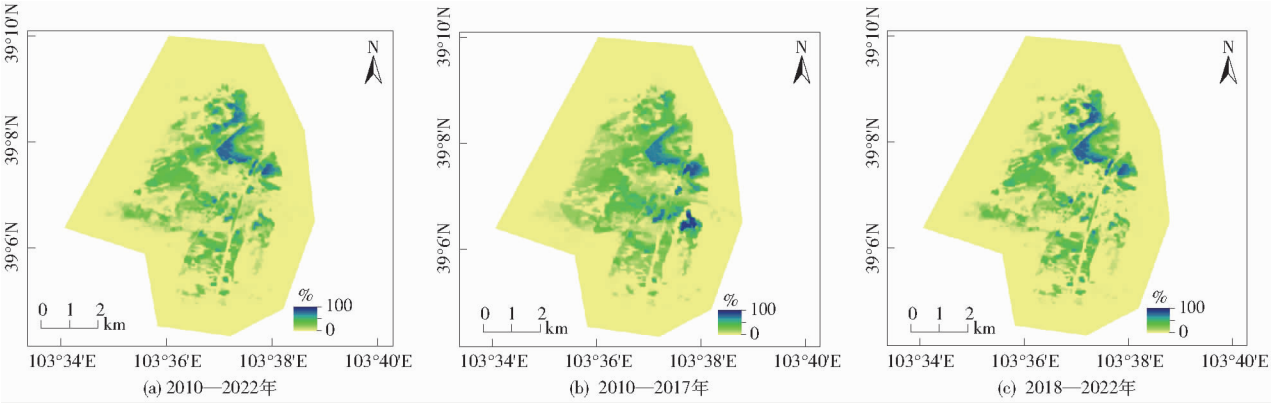

图 3 2010—2022 年青土湖水体频次分布

Fig. 3 Frequency distributions of surface water of Qingtu Lake during 2010—2022

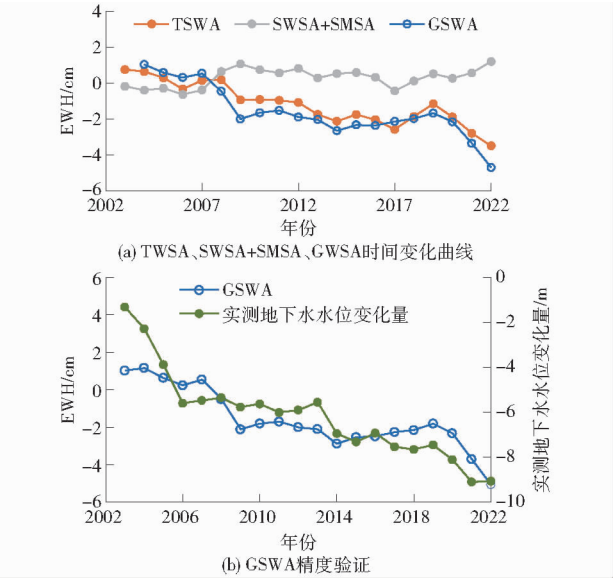

图 4　民勤盆地水储量变化和精度验证

Fig. 4　Water storage anomaly and validation in Minqin Basin

水储量变化精度，由图 4b 可以看出，民勤盆地 GSWA 和实测地下水水位变化幅度整体趋势保持一致，二者相关系数达到 0.89，证明 GRACE 联合 GLDAS Noah 可估算民勤盆地地下水储量变化。近 20 年来，民勤盆地 GSWA 整体呈下降趋势，GSWA 和地下水水位分别以速率 0.24 cm/a 和 0.32 m/a 下降，其中 2003—2007 年，地下水水位快速下降，地下水储量持续减少；2008—2013 年地下水水位和水储量下降速度有所减缓，逐渐趋于稳定；2014—2018 年，地下水水位又逐渐开始下降，2019—2022 年地下水水位和水储量下降速度明显加快。空间上，2003—2022 年民勤盆地 GSWA 整体呈下降趋势，其中民勤盆地西北部 GSWA 下降速率低于其他区域（图 5）。

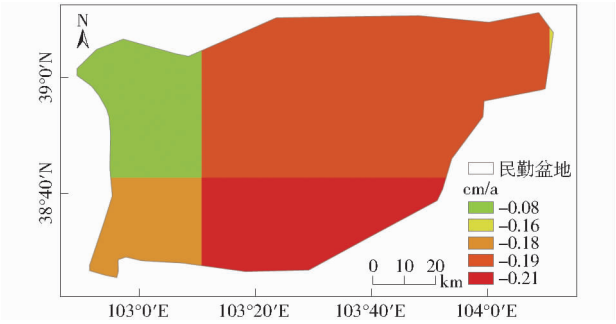

图 5　2003—2022 年民勤盆地地下水储量变化空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of groundwater storage anomaly in Minqin Basin during 2003—2022

2.1.3　民勤盆地土地利用类型时空变化特征

民勤盆地以耕地、草地和荒地 3 种土地利用类型为主，总面积占比接近 100%，图 6a ~ 6c 为 2003—2022 年民勤盆地耕地、草地和荒地面积变化曲线，图 6d 为 2003—2022 年 3 种土地利用类型面积归一化值变化曲线。由图 6a 可以看出，2003—2022 年民勤盆地耕地面积主要表现为“增加-减少-增加”3 个阶段，其中，2003—2006 年持续增加，2007—2013 年持续减少，2014—2022 年整体呈增加趋势，其中 2015—2018 年保持相对稳定。由图 6b 可以看出，2003—2022 年民勤盆地草地面积主要表现为“减少-增加-稳定-减少”4 个阶段，其中，2003—2006 年持续减少，2007—2011 年持续增加，2012—2016 年保持稳定，2017—2022 年快速下降。由图 6c 可以看出，2003—2022 年民勤盆地荒地面积主要表现为“缓慢增加-快速增加”2 个阶段，其中，2003—2016 年缓慢增加，2017—2022 年迅速增加。

综合对比图 6a ~ 6c 和图 6d 可以看出，2003—2006 年，民勤盆地耕地面积持续增加导致草地面积

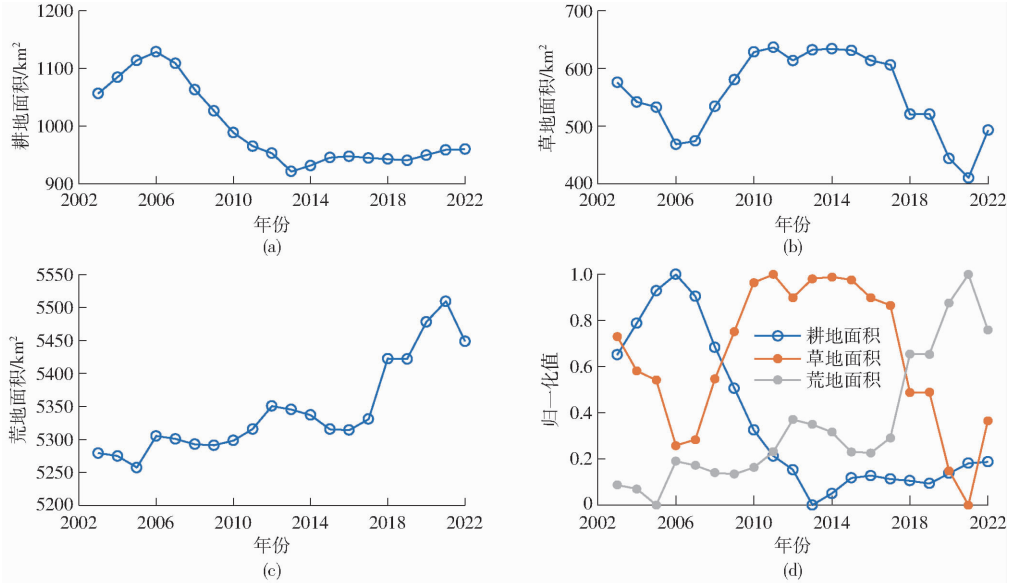

图 6　2003—2022 年民勤盆地主要土地利用类型面积变化曲线

Fig. 6　Changes of main land use types in Minqin Basin during 2003—2022

持续减少,2007—2011 年,随着《石羊河流域重点治理规划》中关井压田、退耕还草等措施实施,民勤盆地耕地面积持续减少,草地面积得以持续恢复;2012—2016 年,民勤盆地耕地、草地和荒地面积整体保持相对稳定;2017—2022 年,民勤盆地耕地面积逐渐增加,草地面积持续减少,荒地面积迅速增加,盆地荒漠化问题逐渐加剧。

图 7 和表 2 分别为 2003 年和 2022 年民勤盆地耕地、草地和荒地 3 种主要土地利用类型转换空间分布图和转移矩阵,可以看出,民勤盆地大量草地(268 km^2, 约占 47%)变为荒地,主要分布在灌区边缘及以外区域,同时存在较大面积荒地(122 km^2)变为草地,主要分布在灌区内;此外,部分耕地转变为草地(145 km^2)和荒地(66 km^2)以及部分荒地(42 km^2)和草地(79 km^2)变为耕地。

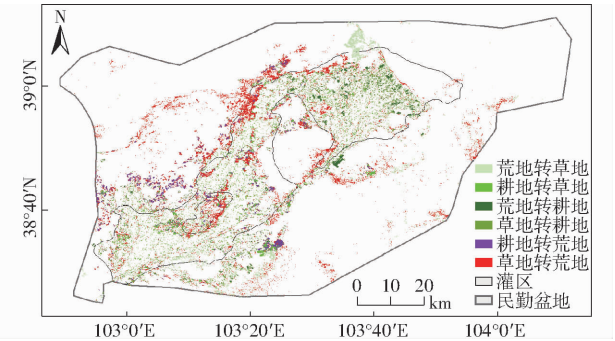

图 7 2003 年和 2022 年民勤盆地主要土地利用类型变化分布

Fig. 7 Spatial distribution of changes of main land use types in Minqin Basin in 2003 and 2022

表 2 土地利用类型转移矩阵

Tab. 2 Land use type transition matrix km^2

		2022 年			合计
		荒地	耕地	草地	
2003 年	荒地	5 102	42	122	5 266
	耕地	66	842	145	1 053
	草地	268	79	244	591
合计		5 436	963	511	6 910

2.1.4 民勤盆地 NDVI 时空变化特征

2003—2022 年民勤盆地 NDVI 随时间变化如图 8 所示。由图 8 可以看出,近 20 年来,民勤盆地 NDVI 以速率 0.000 5 a^{-1} ($p < 0.05$) 呈轻微增加趋势,但增幅较小,民勤盆地 NDVI 基本保持稳定。图 9 为2003—2022 年民勤盆地 NDVI 变化的空间分布特征,可以看出,民勤盆地 NDVI 同时存在明显增加和明显减少区域,结合 2003 年和 2022 年土地利用类型变化分布(图 7)和转移矩阵(表 2),发现民勤盆地 NDVI 减少区域土地利用类型变化主要为草地转为荒地(268 km^2),此外,约 66 km^2 耕地转换为荒地,主要分布于民勤绿洲和沙漠交接区域;民勤盆地 NDVI 增加区域土地利用类型变化主要为荒地转换为草地(122 km^2),其中,青土湖周边 NDVI 显著增加,此外,约 42 km^2 荒地转换为耕地。

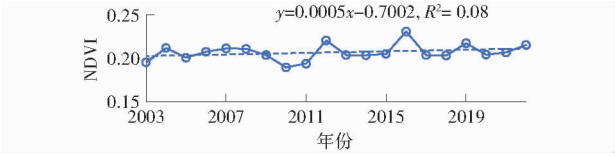

图 8 民勤盆地 NDVI 时间变化曲线

Fig. 8 Temporal changes of NDVI in Minqin Basin

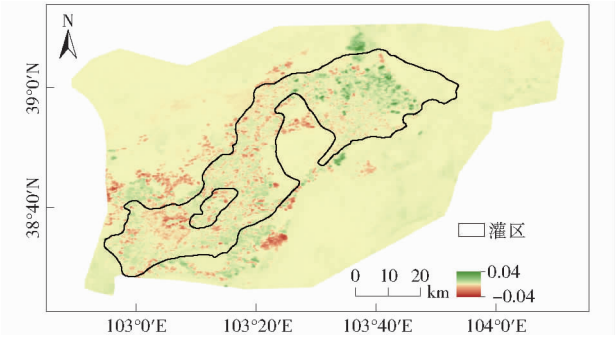

图 9 民勤盆地 NDVI 变化空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of NDVI change in Minqin Basin

2.2 民勤盆地生态环境演变

综合利用 2003—2022 年民勤盆地尾闾湖泊青土湖蓄水量和民勤盆地地下水水位、土地利用类型和 NDVI 时空变化特征,分析民勤盆地生态环境演变,将 2003—2022 年民勤盆地生态环境演变过程分为迅速退化(2003—2006 年)、开始复苏(2007—2013 年)和再次退化(2014—2022 年)3 个阶段(图 10)。

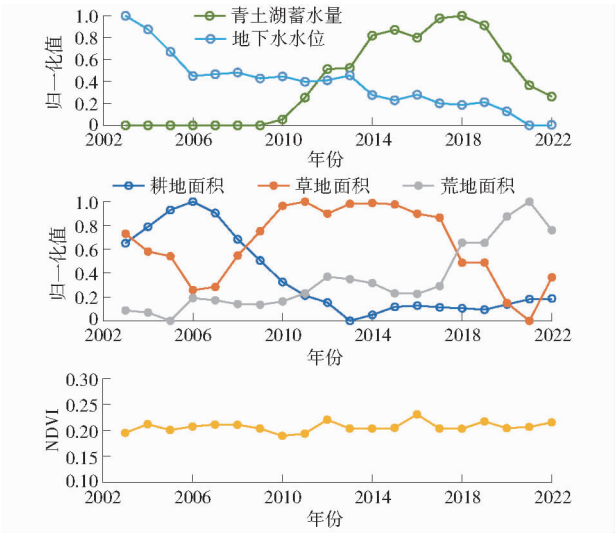

图 10 民勤盆地生态环境评价指标变化和演变阶段划分

Fig. 10 Changes of ecological environment evaluation indicators and classification of evolutionary phases in Minqin Basin

2003—2006 年,民勤盆地耕地面积持续迅速增加,草地面积持续减少,地下水水位快速下降,青土湖处于干涸状态,耕地面积增加和草地面积减少使得 NDVI 保持相对稳定。

2007—2013 年,随着石羊河流域重点治理规划

实施，通过关闭机井，压减农田等措施，民勤盆地耕地面积持续减少，草地面积持续增加，至 2011 年后保持相对稳定，期间地下水水位下降速率放缓并趋于稳定，NDVI 保持相对稳定；2010 年，红崖山水库开始向民勤盆地进行生态补水，干涸的青土湖开始逐渐恢复水体，蓄水量持续增加，民勤盆地生态环境状况整体呈复苏趋势。

2014—2022 年，民勤盆地耕地面积呈逐渐增加趋势，实测地下水水位开始持续下降，其中 2019—2022 年民勤盆地耕地面积持续增加，地下水水位下降速度较 2014—2017 年明显增加。伴随地下水水位持续下降，2015—2022 年，民勤盆地草地持续退化，草地面积迅速减少，荒地面积迅速增加；2018—2022 年青土湖蓄水量迅速萎缩，生态环境退化风险持续增加。

3　讨论

3.1　评价方法对评价结果的影响

目前部分学者利用地下水水位/埋深、土地利用类型和 NDVI/植被覆盖度等单个指标时空变化，开展民勤盆地或石羊河流域生态环境演变分析已取得众多成果，本文识别的民勤盆地单个指标时空变化特征和现有研究结论基本一致。从青土湖水体面积变化视角看，2003—2010 年青土湖一直处于干涸状态，2010—2017 年青土湖水体面积整体呈增加趋势，随后快速下降[36]；从地下水变化视角看，近 20 年民勤盆地地下水水位和水储量整体呈下降趋势，其中 2003—2006 年地下水水位快速下降，2007—2013 年下降速度有所减缓，随后下降速度明显增加[22,37]；从土地利用类型变化视角看，近 20 年民勤盆地土地利用类型变化主要表现为耕地、荒地和草地之间的相互转换，2003—2007 年民勤盆地耕地面积迅速增加，2007—2011 年民勤盆地耕地面积迅速较少，主要转换为草地和荒地[18]，2012—2022 年民勤盆地耕地面积呈先增后减趋势，整体保持稳定；从 NDVI 变化视角看，整个石羊河流域和民勤盆地 NDVI 呈增加趋势，其中青土湖区域增加最为明显，但民勤盆地灌区和荒漠交接处 NDVI 存在不同程度降低[17,20,38]。

从不同视角分析民勤盆地生态环境演变拐点可能存在差异。如从青土湖水体面积变化视角看，2010 年和 2017 年为民勤盆地生态环境复苏和再次恶化拐点（图 2）；从地下水变化视角看，2008 年和 2013 年为民勤盆地生态环境恶化趋势减缓和再次恶化拐点（图 4）；从土地利用类型变化视角看，2007 年和 2011 年为民勤盆地生态环境改善和稳定拐点（图 6）；从 NDVI/植被覆盖变化视角看，民勤盆地生态环境整体呈复苏趋势，无明显拐点（图 8），其中，青土湖周边生态环境复苏明显，但民勤盆地局部区域生态环境呈恶化趋势（图 9）。

仅采用单个指标分析民勤盆地生态环境变化存在一定局限性，本文基于石羊河尾闾湖泊青土湖水体水量、民勤盆地地下水水量、土地利用类型和 NDVI 变化等指标多维度时空变化信息，从水资源条件、土地利用类型和 NDVI 变化等视角，综合评估了民勤盆地生态环境演变过程，将 2003—2022 年民勤盆地生态环境演变划为迅速退化（2003—2006 年）、开始复苏（2007—2013 年）和再次退化（2014—2022）3 个阶段，其中持续恶化和开始复苏时间节点和现有研究结论基本一致[37]；但将 2014—2022 年划分为民勤盆地生态环境再次恶化阶段，因评估视角不同，与现有基于遥感生态指数的流域生态环境演变分析研究结论有所差异[14,23]。2014—2017 年，虽然通过持续生态补水，青土湖水体面积还在继续扩大，但民勤盆地耕地面积有所增加，草地面积开始下降，实测地下水位持续下降；2019 年以后，民勤盆地地下水下降速度进一步增加，草地退化明显，荒漠化逐渐加剧，青土湖水体面积也难以维持，民勤盆地生态环境全面恶化，因此，综合地表和地下水资源不同指标分析结果，本研究将 2014—2022 年划分为再次退化阶段。不同评价方法会产生不同评价结果，考虑水资源条件变化的民勤盆地生态环境演变分析为民勤盆地生态环境演变过程提供了新的认知。

3.2　民勤盆地生态环境演变驱动因素

近 20 年来，石羊河流域降水和气温整体呈不显著增加趋势[20]，民勤盆地生态环境演变主要受红崖山水库水量调控和农业发展等人类活动影响[25,39-40]。农业发展带来的耕地面积变化以及种植结构调整和节水技术应用，决定民勤盆地农业用水量变化；农业用水量变化和红崖山水库水量调控会影响盆地地表和地下水资源条件变化；水资源条件变化又会影响草地、荒漠等土地利用类型和 NDVI 变化[41-42]，此外，农业发展带来的耕地面积变化也会影响盆地土地利用类型和 NDVI 变化。地表水水体水量和地下水储量变化量、土地利用类型、NDVI 等评价指标虽相互关联，但并非呈绝对线性关系，利用这些指标可以从不同视角综合分析民勤盆地生态环境演变过程。2007 年以前，民勤盆地农业种植规模不断扩大，耕地面积持续扩张，加上红崖山水库下泄流量持续减少，为满足农业灌溉用水需求，民勤盆地持续超采地下水，导致地下水水位持续显著下降，

并诱发下游绿洲萎缩。为遏制流域生态环境严重恶化态势,国家于 2007 年开始实施《石羊河流域重点治理规划》,2007—2013 年期间,通过压减灌溉面积和节水以及红崖山水库持续向民勤盆地生态补水等一系列措施,民勤盆地地下水位下降速度明显减缓,青土湖水体面积逐渐恢复,周边区域地下水埋深在重点治理后以速率 0.089 m/a 回升[43],民勤盆地生态环境恶化趋势迅速减缓,呈现局部复苏态势。虽然通过一系列治理措施,民勤盆地生态环境有所好转,但 2014 年开始,随着民勤盆地耕地面积再次增加,加上民勤盆地生态环境问题结构性、根源性、趋势性压力总体上尚未根本缓解[20],2014—2022 年民勤盆地地下水水位持续下降,荒漠化逐渐加剧,青土湖水体难以维持,生态环境呈再次恶化趋势。

3.3 民勤盆地生态环境保护对策探讨

水资源是民勤盆地生态环境的重要组成部分,同时也是民勤盆地生态环境演变的重要约束因子,构建与民勤盆地水资源承载能力相协调、相适应的区域经济社会发展模式是民勤盆地生态环境保护的重要方向。考虑水资源条件变化的民勤盆地生态环境演变分析结果表明,民勤盆地生态环境进入再次退化阶段,其根源在于民勤盆地水资源开发利用严重超过其水资源承载能力,主要体现在为满足灌溉用水需求持续超采地下水,导致盆地地下水水位不断下降,引发盆地草地退化、荒漠化加剧、湖泊萎缩等一系列生态环境问题[24,44]。区域生态环境问题治理与保护是一项复杂的系统性工程,不能只关注地表生态环境因子状态变化,应统筹保护地表和地下生态环境因子,否则治理与保护效果难以持续。例如,2010 年以来,虽然通过红崖山水库持续向青土湖进行生态补水,青土湖水体水量呈现一定复苏趋势,但持续地下水超采使得青土湖水体复苏趋势难以维持,2017 年以后水面持续萎缩。

遵循系统治理原则,本文围绕“开源”和“节流”2 个角度探讨民勤盆地生态环境保护对策。开源方面,可加大跨流域调水工程外调水量,增加红崖山水库下泄水量,提高民勤盆地水资源承载能力[45];节流方面,以水资源作为社会经济发展的刚性约束,以水定地控制民勤盆地农业灌溉规模,同时通过作物结构调整和深度节水,减少农业用水量[43]。通过“开源节流”双管齐下,在增加民勤盆地水资源承载能力的基础上,优化水资源配置,通过水源置换,减少民勤盆地地下水开采量,加大生态补水力度,不断弥补地下水历史亏空,持续抬升盆地地下水水位,复苏地表生态环境。只有民勤盆地地下水水位恢复到合理阈值,盆地生态环境治理与保护成效方可维持,才能实现区域社会经济可持续发展。

4 结论

(1)2003—2022 年,民勤盆地不同生态环境指标变化趋势存在差异。其中,青土湖水体水量整体呈“干涸-增加-萎缩”变化趋势;民勤盆地地下水水位整体呈下降趋势,其中 2007—2013 年下降速度明显减缓;民勤盆地土地利用类型变化主要表现为耕地、草地和荒地之间转换,2017 年开始民勤盆地荒漠化加剧;民勤盆地 NDVI 呈不显著增加趋势。

(2)考虑水资源量变化的民勤盆地生态环境演变分析,将 2003—2022 年勤民盆地生态环境演变过程划为迅速退化(2003—2006 年)、开始复苏(2007—2013 年)和再次退化(2014—2022 年)3 个阶段。

(3)民勤盆地生态环境演变主要受红崖山水库水量调控和农业发展等人类活动影响,人类活动影响的水资源变化量是民勤盆地生态环境演变的重要表征指标和影响因子,以水资源作为刚性约束,建立与民勤盆地水资源承载能力相协调、相适应的区域经济社会发展模式是民勤盆地生态环境保护的重要方向。

参 考 文 献

[1] 王孟本. “生态环境”概念的起源与内涵[J]. 生态学报, 2003,23(9): 1910 - 1914.
WANG Mengben. The origin of the term “ecological environment (eco-environment)” in Chinese and its connotation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9): 1910 - 1914. (in Chinese)

[2] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7627 - 7636.
YANG Zekang, TIAN Jia, LI Wanyuan, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7627 - 7636. (in Chinese)

[3] GAN X, DU X, DUAN C, et al. Evaluation of ecological environment quality and analysis of influencing factors in Wuhan City based on RSEI[J]. Sustainability,2024, 16(13): 5809.

[4] 魏长晶, 王雨枫, 蔡学森. 山东省土地利用动态演变及生态环境研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(5): 1183 - 1189.
WEI Changjing, WANG Yufeng, CAI Xuesen. Study on dynamic change of land use and ecological environment in Shandong Province[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(5):1183 - 1189. (in Chinese)

[5] IVITS E, CHERLET M, MEHL W, et al. Estimating the ecological status and change of riparian zones in Andalusia assessed by multi-temporal AVHHR datasets[J]. Ecological Indicators, 2009, 9(3): 422 - 431.

[6] WANG C, JIANG Q, SHAO Y. et al. Ecological environment assessment based on land use simulation: a case study in the Heihe River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2019, 697: 133928.
[7] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889 – 897.
XU Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889 – 897. (in Chinese)
[8] 汪士为, 吴伟. 近 31 年嘉陵江流域生态环境质量时空演变及驱动因子探测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 427 – 439.
WANG Shiwei, WU Wei. Spatiotemporal variation of ecological environmental quality and its response to different driving factors in Jialing River Basin in recent 31 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 427 – 439. (in Chinese)
[9] 宗慧琳, 张晓伦, 袁希平, 等. 利用 GEE 进行 1990—2022 年小江流域生态环境质量时空格局与演变趋势分析[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4122 – 4136.
ZONG Huilin, ZHANG Xiaolun, YUAN Xiping, et al. Xiaojiang River Basin ecological environmental quality spatiotemporal pattern and evolutionary trend analysis using GEE from 1990 to 2022[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4122 – 4136. (in Chinese)
[10] 赵嘉丽, 李兴, 孙冰. 基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1598 – 1614.
ZHAO Jiali, LI Xing, SUN Bing. Spatial-temporal evolution and driving factors analysis of ecological environment quality in Daihai Basin based on AWRSEI[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1598 – 1614. (in Chinese)
[11] 胡盈盈, 罗红霞, 戴声佩, 等. 基于遥感生态指数的海南五指山市生态环境质量评价及成因分析[J]. 生态环境学报, 2024, 33(10): 1624 – 1633.
HU Yingying, LUO Hongxia, DAI Shengpei, et al. Evaluation of ecological environment quality and analysis of driving mechanism in Wuzhishan City of Hainan Island based on remote sensing ecological indices[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(10): 1624 – 1633. (in Chinese)
[12] 梁茂厂, 郭晓华, 张影, 等. 湖北省生态环境质量的时空演变特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2024, 33(10): 1634 – 1647.
LIANG Maochang, GUO Xiaohua, ZHANG Ying, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors analysis of eco-environmental quality in Hubei Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(10): 1634 – 1647. (in Chinese)
[13] 冯自贤, 佘璐, 王秀慧, 等. 基于改进遥感生态指数的宁夏生态环境质量时空变化[J]. 生态环境学报, 2024, 33(1): 131 – 143.
FENG Zixian, SHE Lu, WANG Xiuhui, et al. Spatial and temporal variations of ecological environment quality in Ningxia based on improved remote sensing ecological index[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(1): 131 – 143. (in Chinese)
[14] 石三娥, 魏伟, 杨东, 等. 基于 RSEDI 的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1152 – 1163.
SHI Sane, WEI Wei, YANG Dong, et al. Spatial-temporal evolution of eco-environmental quality in the oasis of Shiyang River Basin based on RSEDI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1152 – 1163. (in Chinese)
[15] 杨晓玲, 丁文魁, 杨金虎, 等. 河西走廊东部近 50 年气候变化特征及区内 5 站对比分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 259 – 268.
YANG Xiaoling, DING Wenkui, YANG Jinhu, et al. Change characteristics and 5 stations contrastive analysis of climate in eastern Hexi corridor in recent 50 years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 259 – 268. (in Chinese)
[16] 张存杰. 全球变暖对西北地区干旱气候变化的影响研究[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009.
ZHANG Cunjie. Research on the impact of global warming on the arid climate change in Northwest China[D]. Lanzhou: Institute of Environment and Engineering in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
[17] 王鹤龄, 丁文魁, 李兴宇, 等. 石羊河流域气候变化及其对植被指数的影响[J]. 农学学报, 2024, 14(4): 83 – 92.
WANG Heling, DING Wenkui, LI Xingyu, et al. Climate change in Shiyang River Basin and its influence on vegetation index [J]. Journal of Agriculture, 2024, 14(4): 83 – 92. (in Chinese)
[18] 刁维杰, 赵勇, 翟家齐, 等. 1987—2017 年民勤绿洲面积时空演变规律及驱动因素解析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 106 – 113.
DIAO Weijie, ZHAO Yong, ZHAI Jiaqi, et al. Temporal spatial evolution and driving force analysis of Minqin Oasis during 1987—2017[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(10): 106 – 113. (in Chinese)
[19] 方春爽, 朱睿, 卢睿, 等. 基于 GEE 的石羊河流域植被覆盖变化特征及其影响因素分析[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(5): 1167 – 1179.
FANG Chunshuang, ZHU Rui, LU Rui, et al. Analysis of vegetation cover change characteristics and influencing factors in the Shiyang River Basin based on GEE[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(5):1167 – 1179. (in Chinese)
[20] 任丽雯, 王兴涛, 刘明春, 等. 石羊河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 818 – 828.
REN Liwen, WANG Xingtao, LIU Mingchun, et al. Temporal and spatial changes and the driving factors of vegetation NPP in Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 818 – 828. (in Chinese)
[21] 魏士禹, 郭云彤, 崔亚莉, 等. 1985—2016 年民勤地下水位及储变量动态特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1272 – 1280.
WEI Shiyu, GUO Yuntong, CUI Yali, et al. Dynamic characteristics of groundwater level and storage variables in Minqin from 1985 to 2016[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1272 – 1280. (in Chinese)
[22] LIU M, NIE Z, LIU X, et al. Change in groundwater table depth caused by natural change and human activities during the past 40 years in the Shiyang River Basin, northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167722.
[23] 颉金凤, 赵军, 卿苗, 等. 基于 IRSEI 的石羊河流域生态环境质量时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(5): 104 – 111.
XIE Jinfeng, ZHAO Jun, QING Miao, et al. Changes in spatial-temporal patterns of ecological environment quality in Shiyang

River and driving forces: an analysis based on improved remote sensing ecological index[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(5): 104 - 111. (in Chinese)
[24] 方良斌. 石羊河流域生态治理 10 年回顾[J]. 甘肃水利水电技术, 2019, 55(8): 14 - 17.
[25] 李森, 王涛, 张志山, 等. 生态输水后民勤盆地绿洲适宜规模及结构变化[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 91 - 97.
LI Sen, WANG Tao, ZHANG Zhishan, et al. The suitable scale and structural change of oasis in Mingin Basin after ecological water conveyance project construction[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(6): 91 - 97. (in Chinese)
[26] 郝媛媛. 基于 GIS/RS 的西北内陆河流域生态恢复效果评价研究——以石羊河民勤盆地为例[D]. 兰州:兰州大学, 2017.
HAO Yuanyuan. Evaluation of ecological restoration effects based on GIS/RS for northwest inland river basin, China—a case study of Mingin Basin in the downstream of Shiyang River[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
[27] 薛文瑞, 杨自辉, 张永, 等. 民勤荒漠绿洲植被覆盖对地下水和降水变化的响应[J]. 中国农学通报, 2022, 38(8): 102 - 109.
XUE Wenrui, YANG Zihui, ZHANG Yong, et al. Vegetation cover response to groundwater and precipitation changes in Mingin Desert Oasis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022,38(8): 102 - 109. (in Chinese)
[28] 罗晓玲, 杨梅, 李岩瑛, 等. 基于 NDVI 的石羊河流域植被演变特征及其对沙尘暴的影响分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 84 - 91.
LUO Xiaoling, YANG Mei, LI Yanying, et al. Analysis on characteristics of vegetation evolution and its impact on sandstorm in Shiyang River Basin based on NDVI[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 84 - 91. (in Chinese)
[29] 王占玲. 基于 GF - 1/6 卫星影像的全国湖泊水体面积变化及成因分析[D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.
WANG Zhanling. Analysis of lake water area changes and causes in China based on GF - 1/6 satellite images[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
[30] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. Nature, 2016, 540(7633): 418 - 422.
[31] FANG Y, LI H, WAN W, et al. Assessment of water storage change in China's lakes and reservoirs over the last three decades [J]. Remote Sensing, 2019, 11(12):1467.
[32] 龙笛, 杨文婷, 孙章丽, 等. 海河平原地下水储量变化的重力卫星反演和流域水量平衡[J]. 水利学报, 2023, 54(3): 255 - 267.
LONG Di, YANG Wenting, SUN Zhangli, et al. GRACE satellite-based estimation of groundwater storage changes and water balance analysis for the Haihe River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(3): 255 - 267. (in Chinese)
[33] LI X, ZHANG Y, MA N, et al. Increased grain crop production intensifies the water crisis in northern China[J]. Earth's Future, 2023, 11: e2023EF003608.
[34] CHEN H, ZHANG W, NIE N, et al. Long-term groundwater storage variations estimated in the Songhua River Basin by using GRACE products, land surface models, and in-situ observations[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 372 - 387.
[35] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907 - 3925.
[36] QIAO S, MA R, SUN Z, et al. The effect of water transfer during non-growing season on the wetland ecosystem via surface and groundwater interactions in arid northwestern China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2516.
[37] LI P, LI J. Influence of ecological water diversion on the spatiotemporal distribution of groundwater in the Minqin Basin[J]. Desalination and Water Treatment, 2024,319: 100514.
[38] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108 - 1118.
LI Lili, WANG Dawei, HAN Tao. Spatial-temporal dynamics of vegetation coverage and responding to climate change in Shiyang River Basin during 2000—2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 1108 - 1118. (in Chinese)
[39] 王化齐, 黎志恒, 张茂省, 等. 石羊河流域水资源开发的生态环境效应与国土空间优化[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 207 - 217.
WANG Huaqi, LI Zhiheng, ZHANG Maosheng, et al. Eco-environmental impact caused by water resources exploration and land space optimization in Shiyang River Basin[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2):207 - 217. (in Chinese)
[40] WANG L, WEI W, SUN G, et al. Effects of inter-basin transfers on watershed hydrology and vegetation greening in a large inland river basin[J]. Journal of Hydrology, 2024, 635: 131234.
[41] LI X, WANG Y, ZHAO Y, et al. Research on the impact of climate change and human activities on the NDVI of arid areas—a case study of the Shiyang River Basin[J]. Land, 2024, 13: 533.
[42] 曹乐, 聂振龙, 刘敏, 等. 民勤绿洲天然植被生长与地下水埋深变化关系[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3):25 - 33.
CAO Le, NIE Zhenlong, LIU Min, et al. Changes in natural vegetation growth and groundwater depth and their relationship in the Minqin Oasis in the Shiyang River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3):25 - 33. (in Chinese)
[43] 缑天宇, 佟玲, 康德奎, 等. 中国西北干旱区石羊河流域重点治理综合效应评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 74 - 84.
GOU Tianyu, TONG Ling, KANG Dekui, et al. Evaluating the comprehensive effects of the key master plan of the Shiyang River Basin in arid areas of northwest China[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(12): 74 - 84. (in Chinese)
[44] 魏征, 李道西, 柳佳奇, 等. 石羊河流域水-作物-生态系统耦合协调度时空演变与调控潜力研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 142 - 151.
WEI Zheng, LI Daoxi, LIU Jiaqi, et al. Spatiotemporal evolution and regulation potential of water - crop - ecosystem coupling coordination degree in Shiyang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8) 142 - 151. (in Chinese)
[45] 闫沛鑫. 景电二期提质增效暨加大向石羊河流域调水工程必要性分析[J]. 中国水运, 2024(24): 86 - 87, 90.