

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0090

马浩, 孟德利, 赵勇, 等. 民勤绿洲植被变化与水资源结构响应关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 902-913. MA H, MENG D L, ZHAO Y, et al. Relationship between vegetation change and water resources structure in Minqin oasis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 902-913. (in Chinese)

民勤绿洲植被变化与水资源结构响应关系

马浩¹, 孟德利^{2,3}, 赵勇¹, 王浩¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用 1986—2020 年 Landsat 系列遥感数据和水资源数据, 基于趋势分析、相关分析和灰色关联分析等方法, 研究民勤绿洲植被变化与水资源结构变化的响应关系。结果表明: 民勤绿洲平均植被覆盖度和绿洲面积总体呈增加趋势, 总可用水量呈持续减少趋势; 民勤绿洲的发展可划分为 1986—2000 年、2001—2009 年、2010—2020 年 3 个阶段, 分别对应于绿洲面积快速扩张、高位维持、趋于稳定和总可用水量缓慢减少、迅速减少、趋于稳定的 3 个阶段; 绿洲面积变化受水资源和人为因素共同影响, 绿洲面积和水资源量在第一、第二阶段响应关系很弱, 对应于绿洲发展粗放扩张和剧烈调整的时期, 二者在第三阶段表现出较好的响应关系, 是绿洲发展进入良性阶段的反映; 根据民勤绿洲现状水平估计, 每 1 亿 m³ 供水量可支撑绿洲面积 277 km²。系统分析其植被变化与水资源的关系对未来西北地区绿洲的建设和发展具有重要参考价值。

关键词: 植被覆盖度; 绿洲面积; 水资源; 民勤绿洲; 西北地区

中图分类号: TV213 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



绿洲是干旱荒漠地区特有的非地带性地理单元, 生态系统脆弱, 在气候变化和人类活动的共同影响下, 不断发生着时空演变^[1]。植被是荒漠绿洲生态系统的重要组成部分, 它联系着水、土壤等环境要素, 能够直观地表征自然环境状况, 是维系生态环境的能动体^[2-3]。植被覆盖度是衡量绿洲生态的重要指标之一, 反映了植被生长的茂盛程度^[4]。水资源作为联系绿洲-荒漠系统最直接的纽带, 决定了绿洲的规模, 并通过地下水或地表水变化对绿洲的面积产生影响^[5]。在内陆干旱区通过引调水工程进行生态输水, 是绿洲生态系统恢复的重要手段^[6-7], 也是未来绿洲开发的基本条件。因此, 研究绿洲植被与水资源的关系对绿洲的发展和规划都有重要意义。

民勤绿洲是典型的干旱区荒漠绿洲和生态脆弱

区, 被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围, 是石羊河下游狭长而平坦的绿洲带^[8]。20 世纪 60 年代以来, 由于上游来水量减少、地下水严重超采和水资源不合理利用等原因, 民勤绿洲及周边地区植被退化、沙化加剧, 生态环境持续恶化^[8-9]。研究民勤绿洲植被覆盖度的时空变化规律及绿洲面积变化对水资源的响应, 不仅对该地区的可持续发展和绿洲生态建设具有重要意义, 也可为西北荒漠绿洲的调水规划与未来发展等提供参考^[10-11]。

目前, 在干旱区绿洲的时空演变规律、绿洲植被覆盖度和面积变化、水资源变化对绿洲的影响等方面, 众多学者^[12-19]已做了相关研究。鲁晖等^[13]基于解译分类和地学统计研究了民勤绿洲时空演变及其格局特征, 发现民勤绿洲面积整体呈现扩张趋势, 变化绿洲主要分布在绿洲外围及荒漠零星地区;

收稿日期: 2022-03-10 修回日期: 2022-09-14 网络出版时间: 2022-10-12

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20221011.1134.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204); 国家杰出青年科学基金项目(52025093)

作者简介: 马浩(1989—), 男, 山西晋城人, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: mahao@radi.ac.cn

通信作者: 孟德利(1991—), 男, 山东枣庄人, 博士, 主要从事水循环和遥感应用研究。E-mail: mengdl@aircas.ac.cn

李丽丽等^[14]利用2000—2015年中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据反演的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和气象数据进行了研究,结果表明石羊河流域绿洲植被受人类活动干扰的程度较大,植被覆盖度对气候因子的响应较低;滑永春等^[15]基于多种植被指数和驱动力指标研究,发现民勤县植被覆盖度增加、生态环境状况改善,主要受益于石羊河流域重点治理工程和其他生态工程;郭巧玲等^[4]利用遥感数据和水资源数据研究表明地下水位是导致额济纳绿洲植被覆盖面积变化的直接因素,但地下水的恢复得益于黑河生态输水和治理工程的补给;陈东等^[16]利用不同时期遥感影像研究了玛纳斯河流域绿洲面积变化过程,为绿洲在节水条件下适宜规模的确定提供了依据;杨怀德等^[17]基于计量统计和文献调查方法,研究发现民勤绿洲地下水位、土地资源利用和植被覆盖度对地表水资源调度表现为正向的生态响应;刁维杰等^[18]分析了影响民勤绿洲面积演变的主要驱动因素,表明水资源的开发利用程度是影响绿洲整体演变的主要因素,同时人口数量的增长也通过促进人工绿洲面积的扩大进而推动绿洲的扩张;王新源等^[19]采用灰色关联度分析方法,探讨了河西走廊绿洲面积动态变化的驱动要素,认为绿洲演化受农牧业等人类活动的影响为主、同时也受到自然因素影响。

尽管前人对民勤绿洲和绿洲植被与水资源的关系做了许多研究,但缺乏长时间序列下绿洲面积对

水资源响应的研究。开展绿洲面积和水资源相互关系的长序列、针对性研究,有助于定量阐明水资源对绿洲的支撑作用和承载能力。本文以民勤绿洲为研究区,分析1986—2020年植被覆盖度时空变化,同时结合历年地表来水量、地下水开采量和降水量数据,分析不同时期绿洲面积变化与水资源变化的响应关系,为绿洲区的水资源利用和绿洲可持续发展提供参考。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

民勤绿洲位于石羊河流域的下游地区,其周边地区大部分为荒漠和戈壁,西面是巴丹吉林沙漠延伸至马莲泉山的沙丘带,北面和东面被腾格里沙漠包围,南面与武威绿洲相连^[19]。民勤绿洲属于大陆性沙漠气候,气候特点为降水稀少、蒸发强烈、风大沙多、气候干燥;多年平均降水量115.41 mm,主要集中在7—9月,占年总降水量的60%以上,多年平均水面蒸发量2 664.0 mm^[8]。

综合考虑石羊河流域范围、民勤盆地地形特点、民勤绿洲及周边地区水资源供给结构和遥感影像解译,确定研究区域为民勤绿洲及其周边地区(图1),面积约7 658 km²,包含一个相对完整且典型的荒漠绿洲^[10]。南侧蔡旗水文站附近的红崖山水库为石羊河下游区域的控制性水库,也是支撑民勤绿洲生产和发展的唯一水库;北侧的青土湖作为石羊河的尾间湖,是绿洲生态环境变化的重要指示器^[20-21]。

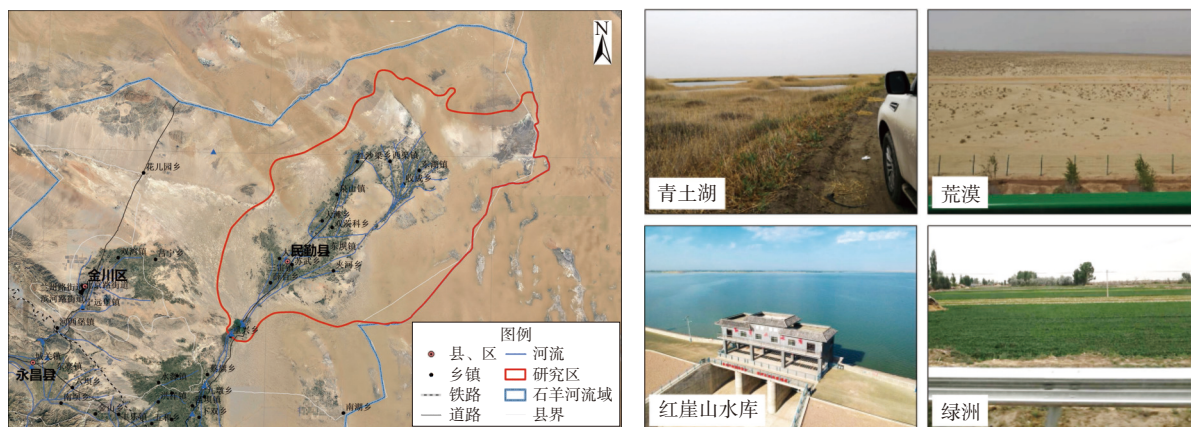


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 数据来源

使用的遥感数据为1986—2020年35年的Landsat系列多光谱影像(表1),是经过系统辐射校

正、地面控制点几何校正和数字高程模型(digital elevation model, DEM)地形校正的Landsat Level 1T数据产品,包括专题绘图仪(thematic mapper, TM)、

增强型专题制图仪(enhanced thematic mapper plus, ETM+)、陆地成像仪(operational land imager, OLI)传感器获得的不同时期影像,空间分辨率均为 30 m,

获取时间以 7、8 月植被旺盛期为主,缺少年份以 6 月和 9 月替代。遥感数据下载自美国地质调查局 Earth Explorer 网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。

表 1 采用的多光谱遥感影像信息(1986—2020 年)

Tab. 1 Multi-spectral remote sensing image used from 1986 to 2020

序号	日期	传感器	条带号/行编号	云量/%	序号	日期	传感器	条带号/行编号	云量/%
1	1986-07-13	TM5	131/33	15	19	2004-07-30	TM5	131/33	0
2	1987-06-30	TM5	131/33	2	20	2005-08-02	TM5	131/33	0
3	1988-07-02	TM5	131/33	0	21	2006-07-04	TM5	131/33	1
4	1989-09-23	TM5	131/33	0	22	2007-07-15	ETM+	131/33	0
5	1990-06-22	TM5	131/33	2	23	2008-07-25	TM5	131/33	0
6	1991-07-11	TM5	131/33	0	24	2009-08-13	TM5	131/33	4
7	1992-07-29	TM5	131/33	0	25	2010-07-15	TM5	131/33	2
8	1993-09-02	TM5	131/33	0	26	2011-07-18	TM5	131/33	4
9	1994-07-19	TM5	131/33	0	27	2012-08-29	ETM+	131/33	0
10	1995-07-06	TM5	131/33	2	28	2013-08-08	OLI	131/33	7
11	1996-09-26	TM5	131/33	1	29	2014-08-27	OLI	131/33	0
12	1997-07-11	TM5	131/33	0	30	2015-08-14	OLI	131/33	0
13	1998-08-15	TM5	131/33	18	31	2016-07-15	OLI	131/33	1
14	1999-07-17	TM5	131/33	3	32	2017-07-18	OLI	131/33	1
15	2000-07-19	TM5	131/33	0	33	2018-08-22	OLI	131/33	0
16	2001-07-22	TM5	131/33	0	34	2019-08-25	OLI	131/33	7
17	2002-07-17	ETM+	131/33	3	35	2020-07-21	OLI	131/33	1
18	2003-08-13	TM5	131/33	3					

降水量数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>);水资源数据包括民勤绿洲地表来水量(天然河流径流量、引调水工程来水量)和地下水开采量,数据来源为历年《民勤县统计年鉴》《甘肃年鉴》《甘肃水利年鉴》《甘肃省水资源公报》等。

DEM 数据来源于“地理空间数据云”(<http://www.gscloud.cn/>),数据类型为 ASTER GDEM V2 (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model version 2),水平空间分辨率为 30 m,垂直分辨率为 20 m。石羊河流域的基础地理信息数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn/>)和国家测绘地理信息局提供的 1:100 万全国基 7 地理数据库。

2 研究方法

2.1 数据预处理

遥感影像的预处理。包含辐射定标、大气校正和归一化等处理,旨在减少大气和太阳高度角变化等带来的误差。影像预处理利用 ENVI 5.3 软件完

成,原理和方法不再详述^[22]。

水体提取。将水体划归到绿洲类别,即植被覆盖度 100% 的绿洲。研究区的水体包括红崖山水库、青土湖、白碱湖和其他零散水域。采用基于阈值的多波段谱间关系法,即通过选取一定的阈值 T 进行水体的提取^[23]。其中, TM5 和 ETM+ 影像的水体提取模型为

$$(B2 + B3) - (B4 + B5) > T \quad (1)$$

OLI 影像的水体提取模型为

$$(B3 + B4) - (B5 + B6) > T \quad (2)$$

对于 TM5 和 ETM+ 传感器而言, B2~B5 依次是绿、红、近红外和短波红外波段; OLI 的 B3~B6 波段分别与 TM5 和 ETM+ 的 B2~B5 波段相近。

2.2 植被覆盖度

NDVI 是最为常用的表征植被生长状况的指标之一,与植被覆盖度密切相关。NDVI 值为近红外波段反射率与红光波段反射率之差与之和的比值,表达式为

$$I_{NDV} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (3)$$

式中: I_{NDV} 为 NDVI 值; ρ_{NIR} 为近红外波段反射率; ρ_R 为红光波段反射率。植被覆盖度反映了植物生长的茂盛程度,它与NDVI之间存在显著的相关关系。以像元二分模型^[24]为基础,利用NDVI进行植被覆盖度的计算。基于NDVI的像元二分模型为

$$F_c = \frac{Z - Z_{soil}}{Z_{veg} - Z_{soil}} \quad (4)$$

式中: F_c 为植被覆盖度; Z_{soil} 为纯裸土或者无植被区域的NDVI值; Z_{veg} 为纯植被区域的NDVI值。根据干旱区实际情况,取累计频率为 0.5% 的 NDVI 值为 Z_{soil} , 累计频率为 99.5% 的 NDVI 值为 Z_{veg} ^[14]。

结合研究区植被的基本特征,将植被覆盖划分为极低植被覆盖区、低植被覆盖区、中植被覆盖区、中高植被覆盖区和高植被覆盖区 5 个等级^[21],具体划分标准及覆盖特征见表 2。

表 2 研究区植被覆盖度等级标准

Tab. 2 Grade standard of vegetation coverage in the study area

等级	类型	植被覆盖度/%	覆盖特征
I	极低植被覆盖区	<10	强度沙漠化土地、盐碱地和裸土地等
II	低植被覆盖区	≥10~<30	中度沙漠化土地、疏林地、低产草地等
III	中植被覆盖区	≥30~<50	轻度沙漠化土地、低郁闭林地、灌木林地、中产草地等
IV	中高植被覆盖区	≥50~<70	中高产草地、林地和滩地等
V	高植被覆盖区	≥70~100	高产草地密林、水体、林地和耕地等

2.3 植被覆盖度年际变化趋势

利用一元线性回归进行植被覆盖度年际变化趋势的计算和分析,公式为

$$\theta_{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times C_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n C_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中: θ_{slope} 为趋势斜率; n 为总年数; C_i 为第 i 年的植被覆盖度。斜率为负表示植被覆盖度减少,反之表示植被覆盖度增加^[25]。为量化地评价研究区植被变化状况,参考相关研究^[21],将变化趋势分为 7 个等级(表 3),分别为严重退化、中度退化、轻微退化、基本稳定、轻微改善、中度改善、明显改善。

表 3 研究区植被覆盖变化趋势分类标准

Tab. 3 The classification standard for vegetation coverage changes in the study area

程度	θ_{slope}
严重退化	≤-0.008
中度退化	>-0.008~≤-0.0040
轻微退化	>-0.0040~≤-0.0005
基本稳定	>-0.0005~≤0.0005
轻微改善	>0.0005~≤0.0040
中度改善	>0.0040~≤0.0080
明显改善	>0.0080

2.4 绿洲面积和水资源的关系

根据石羊河流域土地利用/覆盖分类系统中绿洲含义^[26-27]、现有对民勤绿洲面积的研究^[18]和研究

区土地利用实际情况^[21],将植被覆盖度大于 30% 的区域作为绿洲,并计算逐年的绿洲面积。

利用灰色关联分析法分析地表来水量、地下水开采量和降水量对绿洲变化的影响。关联系数公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |z(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |z(k) - x_i(k)|}{|z(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |z(k) - x_i(k)|} \quad (6)$$

式中:参考序列(绿洲面积)为 $z = \{z(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, n 为总年数;比较序列(各种类型的水资源量)为 $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m\}$, m 为比较序列数量; $\xi_i(k)$ 为比较序列(x_i)对参考序列(z)在第 k 年的关联系数; $\min_i \min_k |z(k) - x_i(k)|$ 和 $\max_i \max_k |z(k) - x_i(k)|$ 分别为两级最小差和两级最大差; $\rho \in [0, 1]$ 为分辨系数, ρ 越大,分辨率越大,这里 $\rho = 0.5$ 。关联度公式为

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (7)$$

式中: r_i 为比较序列(x_i)对参考序列(z)的关联度。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度和绿洲面积时空变化

3.1.1 植被覆盖度空间分布特征

1986—2020 年民勤绿洲及周边地区夏季平均植被覆盖度为 16.1%, 总体呈现出绿洲内部高、周边地区低的空间特征见图 2(a)。绿洲内部土地类型

大部分为人造地表、耕地,以人工植被为主;绿洲周边地区以裸地为主,包含少量稀疏草地,人类活动较少。35 年平均植被覆盖度分级统计结果见图 2(b),从图中可以看出:极低植被覆盖度(<10%)区域占比很高,广泛分布在绿洲的最外侧地区,保证了待研究绿洲的完整性;低植被覆盖度面积 1561 km²,主

要分布在绿洲-荒漠过渡带;中植被覆盖度面积 265 km²,主要分布在绿洲灌区的外围地区;中高植被覆盖度面积 251 km²,主要分布在绿洲灌区内部、水库和湖区周围;高植被覆盖度面积 499 km²,主要分布在绿洲灌区的核心区、城镇生活区、库区、湖区、河道和引水渠附近。

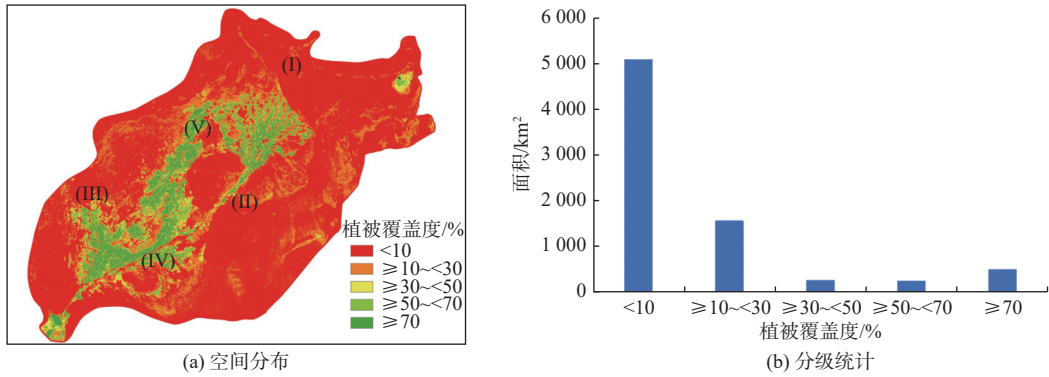


图 2 研究区植被覆盖度空间分布特征(1986—2020 年平均值)
Fig. 2 Spatial distribution of vegetation coverage in the study area (average from 1986 to 2020)

3.1.2 植被覆盖度时空变化分析

1986—2020 年,研究区植被覆盖度基本稳定的部分占总面积的 61.9%,植被覆盖度改善区域占 25.0%、退化区域占 13.1%,总体上稳定并有所改善见图 3。其中:轻微改善的面积最大,占比 13.9%,主要分布在中下游的绿洲和荒漠地区;青土湖周边地区的植

被覆盖度整体上增加,且越靠近湖区植被覆盖度越大^[25]。植被退化主要分布在绿洲-荒漠过渡带和城镇周边地区。总体来看,35 年来研究区植被覆盖度总体呈波动上升的趋势,范围 12.2%~19.5%,年平均增长率 0.10%,见图 4(a)。必须指出,平均植被覆盖度受研究区范围选择的影响,仅需关注其相对意义。

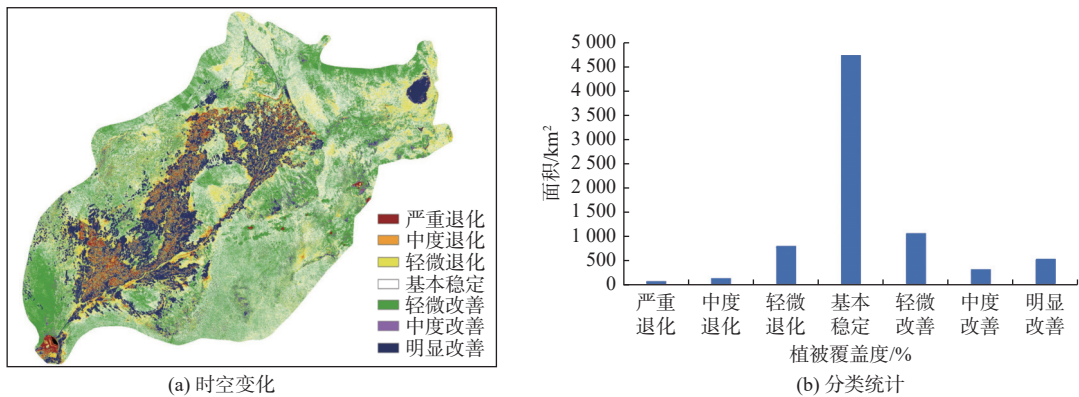


图 3 研究区植被覆盖度变化情况(1986—2020 年)

Fig. 3 The change of vegetation coverage in the study area from 1986 to 2020

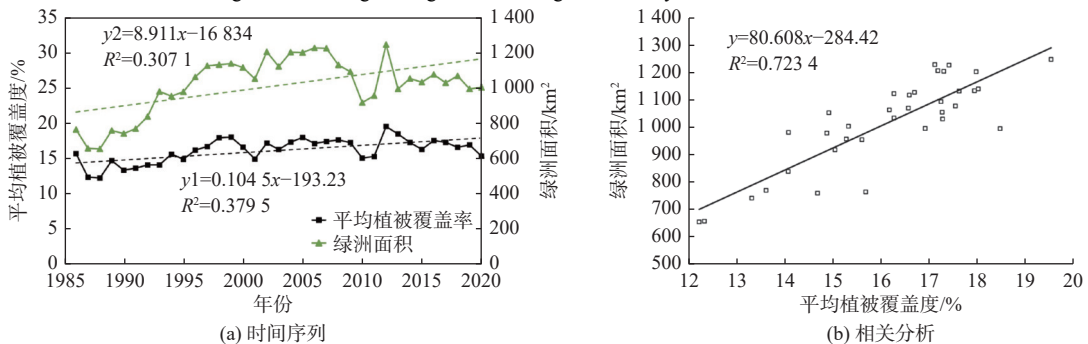


图 4 研究区植被覆盖度和绿洲面积的关系

Fig. 4 Relationship between vegetation coverage and oasis area in the study area

3.1.3 绿洲面积变化分析

研究区绿洲面积与平均植被覆盖度表现为较强的线性相关,见图4(b),且与已有文献和统计资料的绿洲面积数据^[14,26]相吻合,因此将30%以上植被覆盖度的区域作为实际绿洲面积是合理的。

研究区多年平均绿洲面积为1015 km²,总体呈增加趋势。其中:1986—2000年呈显著增加趋势,变化率为38.37 km²/a($R^2=0.91$);2001—2009年呈波动变化、总体缓慢增加的趋势,变化率2.83 km²/a($R^2=0.02$);2010—2020年总体基本稳定,变化率1.31 km²/a($R^2=0.06$)。具体来看:民勤绿洲面积由20世纪80年代中后期的708 km²增加到90年代的985 km²;2001—2009年继续增加,平均面积达1163 km²;2010—2020年基本稳定,平均面积1034 km²,其中2012年达到最大值。

3.2 水资源量变化

3.2.1 年降水量变化

降水通过对绿洲周边植被覆盖度的影响,进而影响根据植被覆盖度计算的绿洲面积。1986—2020年研究区年降水量呈缓慢增加趋势(图5),年平均降水量115.2 mm,以多年平均绿洲面积计算,折合同等降水量1.17亿 m³。长期来看,降水量增长率为6.47 mm/(10 a),折合0.07亿 m³/(10 a),变化不大;短期来看,降水量年际波动较大,最大可达102 mm。

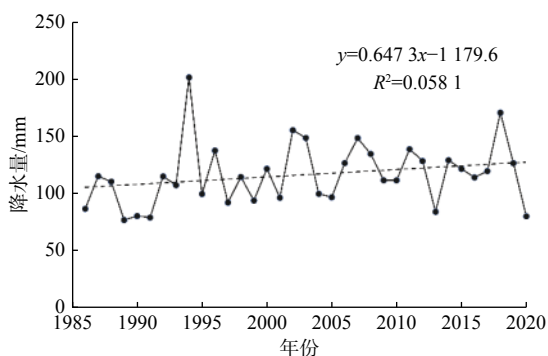


图5 研究区历年降水量

Fig. 5 Annual precipitation in the study area

3.2.2 地表来水量和地下水开采量变化

石羊河水系是民勤绿洲唯一的地表水源。20世纪60年代末至21世纪初,红崖山水库来水量不断减少,民勤绿洲大规模开采地下水以维持农业灌溉^[26-27]。为扭转民勤绿洲生态恶化的状况,甘肃省先后于2001年实现了景电二期延伸向民勤调水工程^[28]、2010年实现了西营河向民勤蔡旗专用输水渠工程^[17]。从水资源的角度出发,以2001年和2010

年为界,分3个阶段研究水资源与绿洲面积的关系,即第一阶段1986—2000年、第二阶段2001—2009年、第三阶段2010—2020年。由于调水工程是绿洲生态综合治理的标志性事件,因此绿洲面积变化、地下水变化等也表现出相似的阶段性。

地表来水量总体呈持续减少—显著增加—逐渐稳定的趋势,见图6。其中:第一阶段呈减少趋势,年际变化率为-0.08亿 m³/a($R^2=0.72$);第二阶段呈增加趋势,变化率为0.12亿 m³/a($R^2=0.62$);第三阶段趋于稳定。地下水开采量总体呈持续增加—迅速减少—基本稳定的趋势,其中:第一阶段呈增加趋势,变化率0.05亿 m³/a($R^2=0.60$);第二阶段呈减少趋势,变化率为-0.41亿 m³/a($R^2=0.83$);第三阶段基本稳定。地下水开采量在2003年前后达到峰值,2011年以后趋于稳定,控制在0.85亿 m³左右^[17]。

3.2.3 总水资源量变化

研究区总可用水资源量总体上不断减少,详见图6。其中:第一阶段呈缓慢减少趋势,变化率为-0.02亿 m³/a($R^2=0.04$);第二阶段呈显著减少趋势,变化率为-0.29亿 m³/a($R^2=0.70$);第三阶段仍呈缓慢减少趋势,变化率为-0.02亿 m³/a($R^2=0.02$)。但第一阶段的和第三阶段的缓慢减少原因不同,前者是高位维持、难以为继、被动减少,后者是在生态文明理念下主动控制绿洲规模;前者是地下水使用量远高于地表水,后者是地表水使用量远高于地下水,民勤绿洲的不合理用水结构已经逆转。

3.3 绿洲面积变化与水资源量变化的关系

对研究区历年绿洲面积和水资源量进行相关性分析和灰色关联分析,研究绿洲面积与水资源量的关系,并分析不同阶段总可用水资源量、地表来水量、地下水开采量和降水量对绿洲面积变化的影响。

3.3.1 总体情况

根据表4,在第一阶段,绿洲面积与总可用水资源量呈现较弱负相关,同时根据图6可知,总可用水资源量虽然在减少,但绿洲面积反而显著增加。这期间地表来水量逐渐减少,但地下水开采量逐渐增加且远大于地表来水量,因此地下水开采量增加可能是导致绿洲面积增加的主要因子。这一时期绿洲面积与地表水量呈现为负相关,也是地表水持续减少、大量超采地下水、农作物播种面积稳步增大、人口持续增加、人为推动绿洲扩张等复杂情况的反映^[8]。在第二阶段,绿洲面积与总可用水资源量的相关性仍然较弱,可用水资源量显著减少,绿洲面

积高位维持、波动变化。这期间地下水开采量显著减少、地表来水量显著增加,实施跨流域调水、调整产业结构、采取关井压田^[20]等措施起到了重要作用。该阶段可用水量、地表来水量与绿洲面积所呈现的弱相关性,是研究区用水策略和发展方式快速调整的结果。在第三阶段,绿洲面积与总可用水量

源量呈显著正相关。地下水开采量比较稳定且占比较小,地表来水量也趋于稳定但占比较大,因此绿洲面积也进入了稳定期。该阶段地表水与绿洲面积的相关性显著,标志着民勤绿洲逐渐进入良性发展的过程。在绿洲良性发展的阶段,用水量与绿洲面积呈显著的正相关。

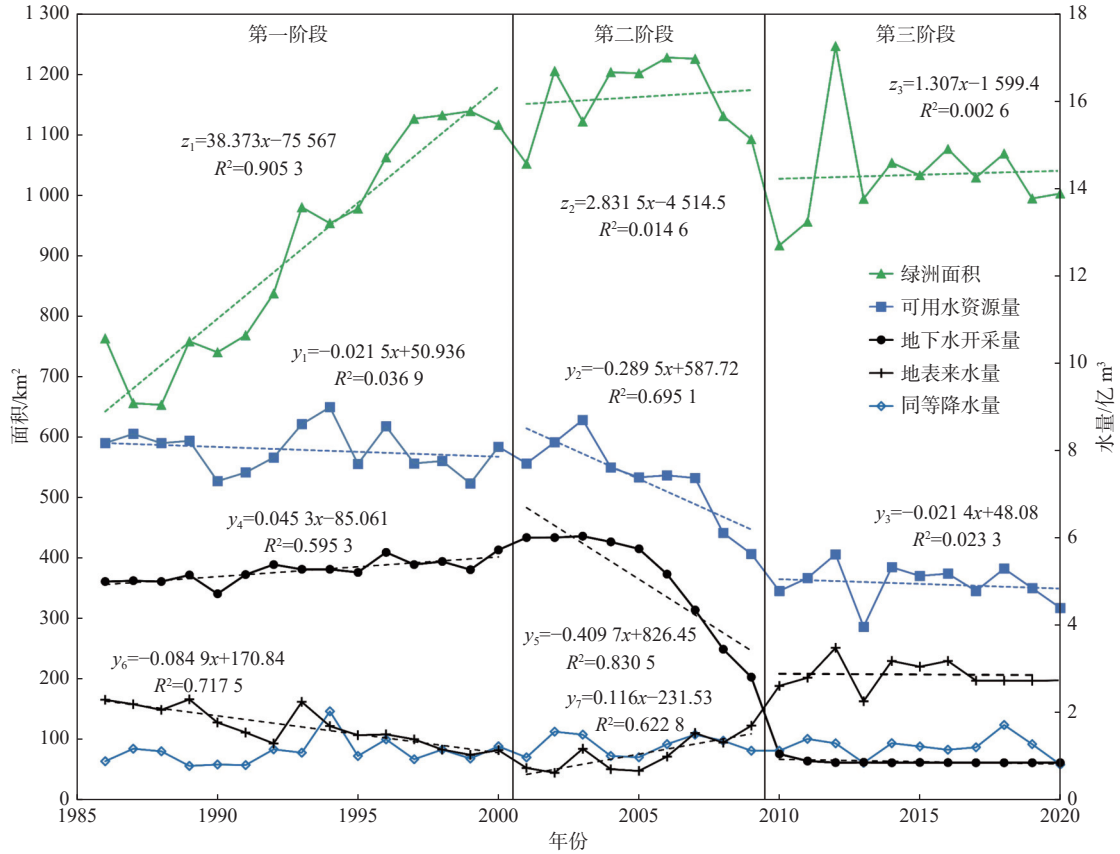


图 6 研究区水资源量和绿洲面积情况

Fig. 6 Water resources and oasis area in the study area

在水资源与绿洲面积变化响应关系的结构中,降水量与绿洲面积变化的相关性、关联度都最低,见表 4。可能的原因是:与地表水、地下水相比,降水量占比较低;降水对植被覆盖度的影响属于自然

过程,而民勤绿洲的植被覆盖度主要受人类活动控制。因此,研究绿洲的水资源与植被变化响应关系时有必要对降水的影响作单独分析。

表 4 研究区绿洲面积和水资源的关系 (1986—2020 年)

Tab. 4 Relationship between oasis area and water resources in the study area from 1986 to 2020

水资源	第一阶段 (1986—2000年)		第二阶段 (2001—2009年)		第三阶段 (2010—2020年)	
	相关系数	关联度	相关系数	关联度	相关系数	关联度
地表来水量	-0.726	0.814	-0.216	0.777	0.755	0.802
地下水开采量	0.772	0.748	0.203	0.718	-0.518	0.778
同等降水量	0.246	0.610	0.294	0.585	0.259	0.643
可用水量	-0.109	—	0.246	—	0.614	—

注:“—”为不做分析。

3.3.2 降水量的影响

对民勤绿洲这样人类活动强烈的系统,降水对

低植被覆盖度区域的影响可能更为明显。为了验证在民勤绿洲是否存在降水与植被覆盖变化的响

应关系,基于植被覆盖度设计了9个指标(表5),分别对绿洲总体情况、低植被覆盖区、中植被覆盖区进行分析,同时也对不同年代阶段进行分析。然而,统计分析表明,降水量与这9个指标的相关性都很弱($R < 0.30$)。为此,考虑到全年降水对植被覆盖影响的滞后性,又对遥感影像获取时间在8月15日以后的8个年份单独进行了分析,同时也对降水量

与表5的各指标的年际差分(各指标下一年相对当年的变化)进行了分析,结果表明,仅两组试验达到一定程度的响应关系:对当年8月15日以后的遥感数据,降水量与指标④(植被覆盖度 $>30\%$ 的面积)的相关性较高($R=0.55$);对年际差分数据,降水量与指标④的相关性显著($R=0.50$)。

表5 降水量与植被覆盖关系的研究中采用的不同指标

Tab. 5 Different indicators used in the study of the relationship between precipitation and vegetation coverage

总体情况	低植被覆盖度	中植被覆盖度
① 平均植被覆盖度	⑤ 植被覆盖度10%~20%的面积	⑧ 植被覆盖度30%~50%的面积
② 植被覆盖度 $>10\%$ 的面积	⑥ 植被覆盖度10%~30%的面积	⑨ 植被覆盖度30%~70%的面积
③ 植被覆盖度 $>20\%$ 的面积	⑦ 植被覆盖度20%~30%的面积	
④ 植被覆盖度 $>30\%$ 的面积		

降水量仅对指标④产生了较好的响应,有两个原因:该指标是反映绿洲总体情况的指标,而降水量对不同植被覆盖度区域的总体改善和使低植被覆盖度向更高植被覆盖度转变的作用,都可以在此指标上有所体现;理论上低植被覆盖度区域受降水的影响更大,然而,低植被覆盖度区域遥感反演的可靠性较差,与模型的性能有关(图7),植被覆盖度超过30%以后遥感反演的年际波动明显更小,而指标④植被覆盖度较高($>30\%$),遥感反演的可靠性也更高。此外,降水量对指标①(平均植被覆盖度)也有一定的响应($R=0.40$),产生响应的原理与指标④相同。相关性不高的原因包括:低植被覆盖度区域的面积很大,其对平均植被覆盖度的影响较大,但遥感反演对低植被覆盖度区域的可靠性较低;绿洲区域的平均植被覆盖度主要受地下水和地表水供水的影响,与降水影响的关联度较低。

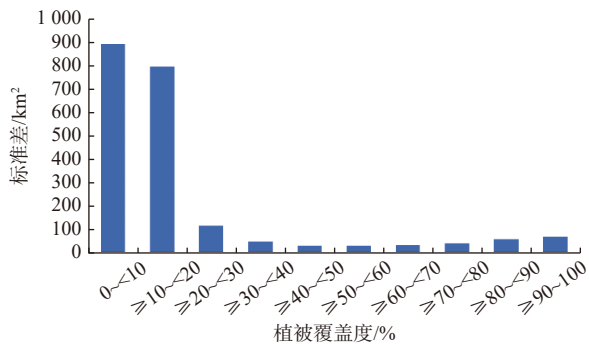


图7 不同植被覆盖度级别35年间面积变化的标准差
Fig. 7 Standard deviations of area change of each vegetation coverage level in the study area during the past 35 years

从总可用水量资源量的分析来看:应该把降水量数据延迟1年处理,这样对低植被覆盖度区域更为合理;对植被覆盖度较大的绿洲区,由于降水量占比较低、且相对稳定(图6),影响不大。因此在总水资源与绿洲面积变化关系的分析中不再做这样的处理。

3.3.3 水资源量与绿洲面积的定量关系

表6为民勤绿洲各个时期的平均水资源量和平均绿洲面积。根据表6,民勤绿洲的单位面积用水量持续降低。其中:第三阶段的民勤绿洲总体用水量仅478 mm,即1亿 m^3 总用水量维持绿洲面积209 km^2 ;去除降水量,用水量仅361 mm,相当于每1亿 m^3 用水量维持洲面积277 km^2 。根据当前趋势,其耗水量未来仍有可能继续降低。应该指出,本文的绿洲指植被覆盖度大于30%以上的地区,而植被

表6 研究区总水资源量和绿洲面积

Tab. 6 Actual total water resources and oasis area in the study area

项目	1986—1989	1990—2000	2001—2009	2010—2020
	年	年	年	年
地表来水量/亿 m^3	2.21	1.48	1.05	2.86
地下水开采量/亿 m^3	5.04	5.32	5.06	0.87
降水量/亿 m^3	0.99	1.14	1.25	1.21
总水量/亿 m^3	8.24	7.94	7.36	4.94
绿洲面积/ km^2	708	985	1163	1034
单位面积耗水/mm	1164	806	633	478
单位面积耗水(不含降水)/mm	1024	690	525	361

覆盖度为 10%~30% 的地区一般为中度沙漠化土地、疏林地、低产草地等,属于绿洲-荒漠过渡带,也具有有一些生态价值,然而,由于该部分遥感反演的可靠性不高,暂不讨论这部分面积。综上,以当前的、民勤绿洲的水平(平均降水量 115 mm、水面蒸发量 2664 mm),每 1 亿 m^3 来水量可维持绿洲面积 277 km^2 。

4 讨论与结论

4.1 讨论

为实现“决不能让民勤成为第二个罗布泊”的目标,民勤县自 2000 年开始实施了多种生态保护措施,包括建设引调水工程、实施“石羊河流域重点治理规划”、减少并控制地下水开采量、调整农业产业结构、实行退耕还林还草、向尾间湖生态输水等^[29-31],促进了民勤绿洲的良性发展,使得 2010 年以后绿洲面积与水资源量变化的正向响应显著加强。本文仅分析了总体上绿洲面积和水资源量的关系,以期对绿洲开发、发展、治理等提供参考,尚未研究水资源对绿洲面积变化影响的具体机制。

民勤绿洲的面积经历了 1986—2000 年的扩张阶段、2001—2009 年的高位维持阶段和 2010—2020 年的新常态阶段。第一阶段的绿洲扩张是由透支地下水支撑的,第二阶段的高位维持是在增加外调水的基础上实现的,而第三阶段面积稍微回落后新常态是在外调水、节水等条件下形成的良性发展。从第二阶段到第三阶段的变化体现了民勤绿洲多年来水资源调度和生态建设的成效,为未来的可持续发展、良性发展提供了经验。当然,当前民勤绿洲的地下水水位仍远远未能恢复,仍需长期坚持治理。未来可依托进一步抽取黄河水或者南水北调西线^[32]的相关规划等提高民勤绿洲的水资源保障程度。

从未来发展的角度来看,民勤绿洲 35 年来绿洲面积与水资源量相互关系的研究,也可以为推进西北地区绿洲开发提供定量的参考。王生霞等^[33]基于 MODIS 遥感数据、降水量和径流量数据研究认为 1 亿 m^3 耗水可维持石羊河流域 623 km^2 绿洲、黑河流域 541 km^2 绿洲和疏勒河流域 116 km^2 绿洲;本文研究表明以民勤绿洲的自然条件为参考,1 亿 m^3 供水可维持 277 km^2 绿洲以及附带的有生态价值的面积。综合对比来看,本结论对西北地区的调水和绿洲开发有一定的参考价值。

4.2 结论

基于民勤绿洲 1986—2020 年 Landsat 系列多

光谱遥感影像和水资源数据,分析民勤绿洲植被覆盖度的时空演化趋势和水资源利用特征,探讨不同时期绿洲面积对水资源的响应,研究绿洲面积与水资源的定量关系。研究表明:民勤绿洲及周边地区的平均植被覆盖度和绿洲面积总体呈增大趋势,具体可分为快速扩张、高位维持、趋于稳定 3 个阶段;总可用水资源量总体上持续减少,表现为缓慢减少、迅速减少和趋于稳定 3 个阶段;绿洲面积和水资源量在第一、二阶段基本不存在显著响应关系,在第三阶段则表现出了明显的相关性,标志着绿洲发展与水资源的关系进入良性阶段;降水量与绿洲面积的响应关系可被一定程度地验证,但限于模型精度和数据精度,可靠性较低;1986—2020 年,民勤绿洲面积的变化受水资源变化和人类活动的综合影响,是严重超采地下水、补充外调水、发展思路改变、用水方式改变等多种因素综合作用的过程。在 2000 年之前的粗放扩张阶段和 2001—2009 年的剧烈调整阶段,绿洲面积与水资源的关系均表现出很弱的相关性,而在 2010 年以后,水资源量特别是地表水资源量与绿洲面积表现出了较好的响应关系,二者相关关系的强弱反映着绿洲发展的健康程度,也是生态文明发展方式的一个指示。此外,由民勤绿洲 2010 年以来良性发展阶段的数据分析可知,现状相当于每 1 亿 m^3 供水量维持 277 km^2 的绿洲面积和一定量的有生态价值的低植被覆盖区。本研究初步揭示了民勤绿洲变化与水资源结构响应关系,这些可为未来西北地区绿洲的建设和发展提供参考。

参考文献(References):

- [1] XUE X, LIAO J, HSING Y, et al. Policies, land use, and water resource management in an arid oasis ecosystem[J]. *Environmental Management*, 2015, 55(5): 1036-1051. DOI: 10.1007/s00267-015-0451-y.
- [2] PETTORELLI N, VIK J O, MYSTERUD A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [3] WANG P, ZHANG Y, YU J, et al. Vegetation dynamics induced by groundwater fluctuations in the lower Heihe River basin, northwestern China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(1): 77-90.
- [4] 郭巧玲, 杨云松, 陈志辉. 黑河分水后额济纳绿洲天然植被覆盖变化遥感监测[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(5): 65-71. (GUO Q L, YANG Y S, CHEN

- Z H. Remote sensing monitoring vegetation cover change in Ejina oasis after Heihe river water was distributed[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(5): 65-71. (in Chinese))
- [5] CAO L, NIE Z, LIU M, et al. The ecological relationship of groundwater-soil-vegetation in the oasis: Desert transition zone of the Shiyang River basin[J]. *Water*, 2021, 13(12): 1642. DOI: [10.3390/w13121642](https://doi.org/10.3390/w13121642).
- [6] HAO Y, XIE Y, MA J, et al. The critical role of local policy effects in arid watershed groundwater resources sustainability: A case study in the Minqin oasis, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602: 1084-1096.
- [7] FANG X, WANG J, CAO Y. Response of vegetation restoration to water resources transfer policy in arid watersheds, northwestern China[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 428(1): 012077. DOI:[10.3390/su10124700](https://doi.org/10.3390/su10124700). DOI: [10.3390/su10124700](https://doi.org/10.3390/su10124700)
- [8] 康绍忠, 粟晓玲, 杜太生, 等. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (KANG S Z, SU X L, DU T S, et al. Water resources transformation law and water-saving regulation mode in basin-scale in arid regions of northwest China [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [9] SUN Y, KANG S, LI F, et al. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(10): 1163-1170. DOI: [10.1016/j.envsoft.2009.03.009](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.009).
- [10] WEI W, LI Z, XIE B, et al. Spatio-temporal change and driving force of oasis for desert reservoir from 1988 to 2016 in northwestern China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(1): 871-884. DOI:[10.15244/pjoes/100368](https://doi.org/10.15244/pjoes/100368). DOI: [10.15244/pjoes/100368](https://doi.org/10.15244/pjoes/100368)
- [11] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. *冰川冻土*, 2007(3): 380-386. (DENG M J. An appraisal of remote-sensing monitoring on vegetation restoration and ecological water-conveying in the lower reaches of Tarim River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007(3): 380-386. (in Chinese))
- [12] E Y H, WANG J H, GAO S Y, et al. Monitoring of vegetation changes using multi-temporal NDVI in peripheral regions around Minqin oasis, northwest China[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2007: 3448-3451. DOI:10.1109/IGARSS.2007.4423587. DOI: [10.1109/IGARSS.2007.4423587](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423587)
- [13] 鲁晖, 颀耀文, 张文培, 等. 1986—2015年民勤县绿洲时空变化分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(6): 1410-1417. (LU H, XIE Y W, ZHANG W P, et al. Spatiotemporal change of the oasis in Minqin county during the period from 1986 to 2015[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(6): 1410-1417. (in Chinese)) DOI: [10.13866/j.azr.2017.06.25](https://doi.org/10.13866/j.azr.2017.06.25).
- [14] 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 L L, WANG D W, HAN T. 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)) DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2017.00061](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2017.00061).
- [15] 滑永春, 李增元, 高志海. 2001年以来甘肃民勤植被覆盖变化分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 337-343. (HUA Y C, LI Z Y, GAO Z H. Variation of vegetation coverage in Minqin county since 2001[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(2): 337-343. (in Chinese)) DOI: [10.13866/j.azr.2017.02.13](https://doi.org/10.13866/j.azr.2017.02.13).
- [16] 陈东, 杨广, 李发东, 等. 节水条件下玛纳斯河流域绿洲变化及适宜规模分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 108-114. (CHEN D, YANG G, LI F D, et al. Change and suitable scale of oasis under water-saving condition in Manas River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(5): 108-114. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0131](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0131).
- [17] 杨怀德, 冯起, 黄珊, 等. 民勤绿洲水资源调度的生态环境效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(7): 68-73. (YANG H D, FENG Q, HUANG S, et al. Environmental effects of surface water reallocation in Minqin oasis[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(7): 68-73. (in Chinese)) DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.2017.214](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2017.214).
- [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 W J, ZHAO Y, ZHAI J Q, 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)) DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.20190028](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.20190028).
- [19] 王新源, 刘世增, 陈翔舜, 等. 河西走廊绿洲面积动态及其驱动因素[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(4): 212-219. (WANG X Y, LIU S Z, CHEN X S, et al. Dynamic changes and driving factors of oasis in Hexi

- Corridor[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(4): 212-219. (in Chinese) DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2019.00043](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2019.00043).
- [20] 张惠, 张志强. 西北内陆河流域生态补偿机制研究: 以石羊河为例[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (ZHANG H, ZHANG Z Q. Research on ecological compensation mechanism of northwest inland river basin: Taking Shiyang River as an example [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [21] 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: 以石羊河下游民勤盆地为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. (HAO Y Y. Evaluation of ecological restoration effects based on GIS/RS for northwest inland river basin, China: A case study of Minqin basin in the downstream of Shiyang River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017(in Chinese))
- [22] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019年中国陆表定量遥感发展综述[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6): 618-671. (LIANG S L, BAI R, CHEN X N, et al. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(6): 618-671. (in Chinese)) DOI: [10.11834/jrs.20209476](https://doi.org/10.11834/jrs.20209476).
- [23] 毕海芸, 王思远, 曾江源, 等. 基于TM影像的几种常用水体提取方法的比较和分析[J]. *遥感信息*, 2012, 27(5): 77-82. (BI H Y, WANG S Y, ZENG J Y, et al. Comparison and analysis of several common water extraction methods based on TM Image[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(5): 77-82. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.014).
- [24] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004(4): 153-159. (LI M M, WU B F, YAN C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004 (4): 153-159. (in Chinese)) DOI: [10.3321/j.issn.1007-7588.2004.04.022](https://doi.org/10.3321/j.issn.1007-7588.2004.04.022).
- [25] 赵军, 杨建霞, 朱国锋. 生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影响[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1251-1261. (ZHAO J, YANG J X, ZHU G F. Effect of ecological water conveyance on vegetation coverage in surrounding area of the Qingtu Lake[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6): 1251-1261. (in Chinese)) DOI: [10.13866/j.azr.2018.06.01](https://doi.org/10.13866/j.azr.2018.06.01).
- [26] 甘肃省水利厅, 甘肃省发展与改革委员会. 石羊河流域重点治理规划[R]. 2007. (Gansu Provincial Bureau of Water Resources, Development and Reform Commission of Gansu Province. Shiyang River Basin Major Harnessing Plan [R]. 2007. (in Chinese))
- [27] 文星, 王涛, 薛娴, 等. 1975—2010年石羊河流域绿洲时空演变研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 478-485. (WEN X, WANG T, XUE X, et al. Spatial-temporal evolution of the oasis in Shiyanghe River basin in 1975-2010[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 478-485. (in Chinese)) DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00065](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00065).
- [28] 王世金, 何元庆, 赵成章. 西北内陆河流域水资源优化配置与可持续利用: 以石羊河流域民勤县为例[J]. *水土保持研究*, 2008(5): 22-25, 29. (WANG S J, HE Y Q, ZHAO C Z. Optimized allocation and sustainable utilization of water resources in the inland river basin of northwest regions : Take Minqin county in Shiyang River basin as a case[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008(5): 22-25, 29. (in Chinese))
- [29] 王忠静, 张景平, 郑航. 历史维度下河西走廊水资源利用管理探讨[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 64(1): 7-11, 22. (WANG Z J, ZHANG J P, ZHENG H. A brief discussion on utilization and management of water resources under historical dimension in Hexi corridor, China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 64(1): 7-11, 22. (in Chinese)) DOI: [10.3724/SP.J.1201.2013.01007](https://doi.org/10.3724/SP.J.1201.2013.01007).
- [30] MA J, CHEN L, HE J, et al. Trends and periodicities in observed temperature, precipitation and runoff in a desert catchment: case study for the Shiyang River basin in northwestern China[J]. *Water & Environment Journal*, 2013, 27(1): 86-98.
- [31] ZHANG Y, MA J, CHANG X, et al. Water resources assessment in the Minqin basin: an arid inland river basin under intensive irrigation in northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(6): 1831-1839. DOI: [10.1007/s12665-011-1165-y](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1165-y).
- [32] 张金良, 景来红, 唐梅英, 等. 南水北调西线工程调水方案研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(9): 9-13, 24. (ZHANG J L, JING L H, TANG M Y, et al. Study on water diversion scheme of the western route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Yellow River*, 2021, 43(9): 9-13, 24. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.09.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.09.002).
- [33] 王生霞, 王飞. 河西内陆河流域绿洲面积对地表径流的响应[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 231-241. (WANG S X, WANG F. Response of oasis area to the surface runoff in Hexi inland river basin of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 231-241. (in Chinese)) DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00138](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00138).

Relationship between vegetation change and water resources structure in Minqin oasis

MA Hao¹, MENG Deli^{2,3}, ZHAO Yong¹, WANG Hao¹

(1. *The State Key Laboratory of Simulation and Regulations of Water Cycles in River Basins, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*;

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Minqin oasis is a typical desert oasis in arid area with strong independence. A systematic analysis of the relationship between vegetation change and water resources in Minqin oasis has important reference value for the future construction and development of oasis in the Northwest China. The above key issue is analyzed using the Landsat multispectral remote sensing data and water resource data from 1986 to 2020. These results are as follows.

The average vegetation coverage of Minqin oasis is low and its spatial distribution is generally high in the oasis and sparse at the edge of the oasis. Its vegetation coverage was generally stable from 1986 to 2020 with some improvements, and the areas with slight improvement were the largest. The oasis area and vegetation coverage showed a strong linear correlation, which demonstrated the technical rationality of defining oasis by vegetation coverage. For the period of 1986-2020, the area of oasis showed an overall increasing trend, which can be divided into three stages, rapid expansion, maintained in an oversized position, and stabilization.

From 1986 to 2020, the total amount of available water resources continued to decrease on the whole, and the process is embodied in three stages, slow decrease, rapid decrease and stabilization. Among them, before 2000, groundwater was mainly exploited for water use, and surface runoff continued to decrease and remained at a low level. From 2000 to 2009, the study area began to gradually reduce groundwater exploitation in a large amount, and at the same time constructed some projects to transfer water from other basins. Therefore, water resources show a trend of rapid reduction of groundwater consumption, gradual increase of surface water, and steady reduction of total water consumption. After 2010, the amount of surface water and groundwater exploitation has gradually stabilized, which is the result of great efforts in governance in recent years. The precipitation shows a fluctuating and slowly increasing trend, which is generally stable, but there will be violent fluctuations in different years, which will have a certain impact on the oasis area.

By analyzing the situation in different periods, the basic reasons are found for the different response relationship between oasis area and water resources and the indication function of this response relationship on the development status of oasis is put forward. Specifically, the change of the area of Minqin oasis from 1986 to 2020 was affected by the comprehensive influence of water resources and human factors. In the extensive expansion stage before 2000 and the drastic adjustment stage from 2001 to 2009, the relationship between oasis area and water resources showed high disorder, which was the result of man-made forced intervention. After 2010, the amount of water resources and the area of the oasis showed a good response relationship, which is also a reflection of the good development status of the oasis. In addition, the response relationship between precipitation and oasis area can also be verified at a reliable level.

The data analysis of the benign development stage of Minqin oasis since 2010 shows that, with the current conditions and level of Minqin oasis, every additional 100 million m³ of water resources can maintain an oasis area of 277 km² and a certain amount of attached ecological restoration areas. Compared with other current research results, the conclusions of this paper are more valuable. This is a preliminary quantitative reference for the bearing capacity of water resources to the scale of oasis when large-scale water transfer to Northwest China and then large-scale development of oases are carried out in the future.

Key words: vegetation coverage; oasis area; water resources; Minqin oasis; northwest China