

DOI: 10.20103/j.stxb.202504110853

沈亲,段艺璇,高光耀,余世有,郑桂姿,郭相茜,田本豪.基于 LandTrendr 算法的黑河中游绿洲耕地扩张动态监测.生态学报,2025,45(24):12278-12287.

Shen Q, Duan Y X, Gao G Y, Yu S Y, Zheng G Z, Guo X X, Tian B H. Dynamic monitoring of cultivated land expansion in the middle reaches of the Heihe River oasis based on the LandTrendr algorithm. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12278-12287.

基于 LandTrendr 算法的黑河中游绿洲耕地扩张动态监测

沈 亲¹,段艺璇¹,高光耀^{2,3,*},余世有¹,郑桂姿⁴,郭相茜¹,田本豪¹

1 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室,北京 100083

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

3 中国科学院大学,北京 100049

4 诸城市林业发展中心,诸城 262200

摘要:绿洲耕地在干旱、半干旱地区的农业生产中发挥着重要作用,支撑了当地的人口生活和经济活动,并对生态环境产生深远影响。然而,以往关于耕地动态变化的研究大多依赖于离散的多时相遥感影像解译,这种方法往往受到选取时段的限制,难以提供连续且动态的监测结果。为此,利用 Google Earth Engine (GEE) 平台上的 LandTrendr (Landsat based detection of Trends in Disturbance and Recovery) 算法结合归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),比较耕地与裸地的 NDVI 值域范围,通过设定阈值,得到裸地向耕地转换的模式,从而得到 1990 年至 2020 年间黑河中游地区耕地扩张的变化趋势。研究发现,在这三十年间,耕地面积增长了 560.72km²,年扩张速率呈上升趋势,特别是在 2011 年后增速加快,并于 2013 年达到顶峰,且近十年(2011—2020)新增耕地占到总扩张面积的 63%。耕地扩张主要集中在金塔县、甘州区和肃州区。相较于传统土地利用产品,LandTrendr 算法识别出的每年由裸地转为耕地的变化与现有土地利用数据得到的裸地转耕地面积比较一致 ($R^2 = 0.61$)。通过长时间序列的连续监测,本研究为理解和评估耕地扩张对土地资源管理和生态环境的潜在影响提供了重要的数据支持,对于制定科学的土地利用规划和生态保护措施具有重要的参考价值。

关键词:黑河中游;绿洲;耕地扩张;LandTrendr;时空变化;土地利用

Dynamic monitoring of cultivated land expansion in the middle reaches of the Heihe River oasis based on the LandTrendr algorithm

SHEN Qin¹, DUAN Yixuan¹, GAO Guangyao^{2,3,*}, YU Shiyou¹, ZHENG Guizi⁴, GUO Xiangxi¹, TIAN Benhao¹

1 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Zhucheng Forestry Development Center, Zhucheng 262200, China

Abstract: Oases are non-zonal ecological landscapes in arid and semi-arid regions, supporting approximately 90% of the population and 95% of the economic activities in these areas. Cultivated land, as the primary component of oases, significantly influences the ecological environment. While the expansion of cultivated land has driven socio-economic development, it has also intensified the challenge of water resource scarcity. Therefore, real-time dynamic monitoring of

基金项目:国家自然基金委青年科学基金(41807152);国家重点研发计划课题(2023YFF0804902);区域与城市生态安全重点实验室开放基金(KLESRC2024-2-3);中央高校基本科研业务费专项资金资助(BFUKF202505)

收稿日期:2025-04-11; **网络出版日期:**2025-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ggyao@rcees.ac.cn

cultivated land expansion is essential for ensuring the sustainable and stable development of oases. Prior research on the dynamics of cultivated land changes has primarily relied on the interpretation of discrete multi-temporal remote sensing imagery, which can be constrained by the selected time periods. This approach often fails to capture the continuous and dynamic nature of land use changes, particularly in rapidly developing regions. The Heihe River Basin (HRB) is the second-largest inland river basin in China. The middle reaches of the HRB contain approximately 80% of the total oasis area, 91% of the population, and 95% of the cultivated land. Agricultural expansion intensified desertification and degradation of forest and grasslands, posing serious challenges to the sustainability of the region. In this study, the Landsat-based Detection of Trends in Disturbance and Recovery (LandTrendr) algorithm on the Google Earth Engine (GEE) platform was employed to monitor and analyze the spatio-temporal dynamics of cultivated land expansion in the midstream basin of the HRB from 1990 to 2020. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to identify and quantify the transitions from bare land to cultivated land. LandTrendr is a powerful tool for detecting gradual and abrupt changes in land cover over extended periods, making it suitable for long-term monitoring studies. The results showed that over the study period, the area of cultivated land expanded by 560.72 km^2 , with an accelerating annual growth rate since 2010. Notably, the newly added area from 2011—2020 comprised 63% of the total expansion, indicating a significant intensification of agricultural activities in recent years. Cultivated land expansion was mainly concentrated in Jinta County, Ganzhou District, and Suzhou District. Compared with traditional land use products, the annual changes in bare land converted to cultivated land identified by the LandTrendr algorithm were highly consistent with the bare-to-cultivated land area obtained from existing land use data ($R^2 = 0.61$). The rapid expansion of cultivated land in the midstream basin of the HRB had profound implications for land resource management and ecological environments. The conversion of bareland to cultivated land can lead to soil erosion, loss of biodiversity, and reduced water availability, exacerbating existing environmental issues. Long-term continuous monitoring using advanced remote sensing techniques, such as LandTrendr, provided essential data support for understanding and assessing the potential impacts of cultivated land expansion. Through comprehensive and continuous monitoring, we can gain valuable insights into the dynamics of land use changes and their ecological consequences. This information was crucial for formulating scientific land use planning and ecological conservation strategies. By integrating remote sensing data with ground-based observations and modeling, policymakers can develop effective measures to balance socio-economic development with environmental sustainability, ensuring the long-term health and productivity of oases in such areas.

Key Words: Heihe River Basin; oasis; cultivated land expansion; LandTrendr; spatio-temporal change; land use

绿洲是干旱、半干旱区的一种非地带性生态景观,承载着干旱区90%的人口生活和95%的经济活动^[1]。绿洲变化直接影响着绿洲的稳定性及可持续发展,因此,绿洲土地覆被变化一直是绿洲研究的核心内容。作为绿洲主体的耕地,其动态变化不仅推动了社会经济发展,同时,也深刻影响周边生态环境^[2]。然而,过渡依赖耕地扩张的发展模式加剧了水资源压力,导致地下水位下降、荒漠—绿洲过渡带萎缩等问题。不合理的水资源利用进一步引发盐渍化和风蚀,使生态环境持续恶化^[3]。因此,实现耕地扩张的实时动态监测对于保障绿洲的健康发展有重要意义。

绿洲耕地动态变化研究主要基于多时期遥感影像解译。廖杰等以航空照片和Landsat影像为基础数据源,提取了黑河流域近55年来的绿洲演变特征,结果表明,研究时段内耕地和城镇居民地的变化相对平稳,多为单向转入^[4]。巩杰等用3期Landsat影像分析了肃州绿洲化过程,结果表明,绿洲面积变化以耕地、草地和城市建设用地等的增加为主^[5]。Moumane等利用4期Landsat影像,结合最大似然法和NDVI提取了近30年摩洛哥Ternata绿洲土地利用和土地覆被的动态变化特征,结果表明,绿洲沙化面积增加,耕地面积减少^[6]。通过多期Landsat卫星影像进行的土地覆盖解译能够揭示耕地的变化特征,但由于这一过程通常是基于离散

的时间点,其分析结果往往受到人为设定的时间段的影响,因而难以提供耕地扩张的连续动态监测,限制了对耕地变化精确时序的理解和分析。

近年来,一系列针对 Landsat 连续长时间序列变化检测的算法相继出现,弥补了以往离散化分析方法的不足,为耕地扩张的连续动态监测提供了更为有效的技术支持。这些算法包括 LandTrendr (Landsat based detection of Trends in Disturbance and Recovery)、VCT (Vegetation Change Tracker)、BFAST (Breaks for Additive Season and Trend)、CCDC (Continuous Change Detection and Classification) 等,其中, LandTrendr 由于其快速高效的变化检测得到广泛应用^[7-10]。Dara 等通过 LandTrendr 算法实现了哈萨克斯坦北部草原与耕地的转换情况,识别了 1988 年至 2013 年期间的撂荒和 1991 年至 2013 年期间的复垦^[8]。Yin 等通过 LandTrendr 算法检测了农业用地废弃的程度和确切时间,并在高加索地区进行了验证,结果表明,该算法能够准确地将农业废弃地与耕地、休耕地和再开垦区区分开来,总体精度($97\pm1\%$)% 高于像素级别的变化检测($82\pm3\%$)%^[11]。Hong 等利用随机森林和 LandTrendr 绘制了 2003—2018 年中国的撂荒耕地,结果表明,到 2018 年,中国有 37 万 hm²(约 15.54%) 的旧耕地被废弃,53 万 hm²(约 22.27%) 的旧耕地被用来造林^[10]。因此,利用 LandTrendr 可以快速准确获取耕地时空变化特征,进而实现耕地有效管理和综合利用。

黑河是我国第二大内陆河流,其流域中游集中了全流域约 80% 的绿洲、91% 的人口和 95% 的耕地^[12]。随着经济发展及农业开发,该区域的耕地面积迅速扩张,导致天然绿洲面积大幅减少,以农业化为主导的人工绿洲面积大幅增加,并伴随荒漠化加剧及林草地退化等生态问题^[13]。开展流域中游区域耕地扩张连续监测,对于实现掌握耕地利用动态、评估其对生态环境的影响至关重要。因此,本文利用 Google Earth Engine(GEE) 平台上的 LandTrendr 算法^[14],结合阈值判定方法,对 1990—2020 年该区域绿洲耕地扩张进行时空变化分析,旨在为土地资源管理和利用策略制定提供数据支持,以实现在水资源承载力约束下的农业生产与生态保护之间的协调发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于甘肃省中西部,涵盖张掖市的民乐县、山丹县、甘州区、临泽县、肃南裕固族自治区(以下简称肃南)、高台县,同时包括酒泉市的肃州区与金塔县,以及嘉峪关市。地理位置处于北纬 $38^{\circ}2'39''$ — $40^{\circ}55'11''$,东经 $97^{\circ}49'40''$ — $101^{\circ}42'51''$ 之间(图 1)。黑河中游深处欧亚大陆腹地,其气候类型属于温带大陆性干旱气候,年降水量为 104—328 mm,年蒸发量为 1639—2341 mm,地势南高北低,东高西低,中部为绿洲、戈壁相间分布的走廊平原。土地利用主要以耕地和裸地为主,耕地的主要作物为玉米、小麦、蔬菜和林果等,其中玉米占主导地位,是甘肃省重要的商品粮基地^[15]。随着该地区人口的不断增长,伴随着农作物经济发展的需求,自 1990 年以来,黑河中游地区绿洲整体呈现扩张趋势。

1.2 数据来源

在本研究中,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)用来分析绿洲植被的变化。NDVI 是通过计算近红外波段和红波段反射率的差异来获得,即 $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$,其中, ρ_{NIR} 和 ρ_R 分别表示植被反射的近红外波段的反射率和红波段的反射率。由于 NDVI 与生物量、叶面积指数和生产力具有良好的相关性,因此在区域和全球尺度的植被动态变化研究中,NDVI 常被表征陆地植被覆盖^[16]。年 NDVI 数据直接从 GEE 平台的 LandTrendr 算法中导出,其空间分辨率为 30 m × 30 m,时间序列为 1990—2020。黑河中游地区夏季作物生长旺盛,因此本研究选取夏季影像(6—9 月)利用最大合成法生成年 NDVI 以最大程度减少因物候变化而检测到伪变化。本研究采用分辨率为 30 m × 30 m 的中国土地覆被数据集(China Land Cover Dataset, CLCD)^[17],将土地利用数据分为林地、灌木林地、草地、耕地、水体或湿地、建筑面和裸地七大类(图 1)。

1.3 LandTrendr 算法及土地利用模式转换量化

LandTrendr 算法由 Kennedy 等于 2010 年开发^[18],该算法的核心是一种时间分割方法,用于捕捉短期的剧

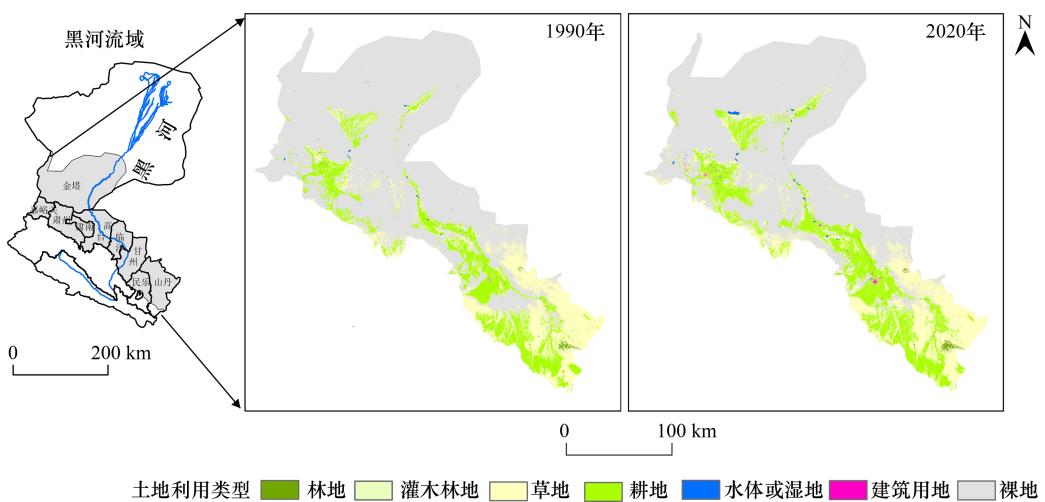


图 1 黑河中游 1990 年和 2020 年土地利用对比

Fig.1 Land use comparison in the middle Heihe River Basin between 1990 and 2020

烈变化或者长期的缓慢恢复。LandTrendr 算法通过时间序列中顶点的年份和光谱植被指数值组合来识别潜在的顶点。然后,联合基于点与点连线和基于回归连线进行拟合轨迹,剔除不合理的分割点。最后,对拟合的时序轨迹通过迭代的方式使用更少的分割段重新拟合时序轨迹来寻找最佳模型(图 2)。具体运算原理可参考 Kennedy 等^[18]。LandTrendr 算法中,提供了多种类型的指标用来捕捉变化发生的时间节点,其中,NDVI 被广泛应用。因此,本文也利用长时间序列的 NDVI 值来分析植被变化特征。

LandTrend 在参数设定过程中,可以通过改变变化前 NDVI 值、变化幅度和变化持续时间来确定不同变化模式。通常,耕地的扩张主要集中在绿洲—荒漠过渡带,

因此,本研究只考虑裸地转变为耕地的扩张模式,不考虑林地等用地类型向耕地的扩张。耕地扩张的转换模式用 NDVI 轨迹分布表征如图 3 所示。基于 1990 年的土地利用类型图,结合 1988 年至 1992 年五年间的 NDVI 均值数据,统计了耕地和裸地的 NDVI 分布区间,其中,裸地和耕地的 NDVI 众值分别为 0.025 和 0.402(图 4)。通过设定一个 NDVI 阈值,可以有效识别从裸地转变为耕地的变化。具体而言,当某个像元的 NDVI 值从较低水平(接近裸地的 NDVI 范围)上升并超过设定的阈值时,即认为该像元发生了向耕地的转变。这一阈值为后续应用 LandTrendr 算法提供了关键参数,确保能够准确捕捉土地利用变化的时间点和模式。

在本研究区内,NDVI 的增加,还存在裸地转变为草地和林地的情况。由于裸地转变为草地和林地时,植被通常是缓慢恢复的过程,NDVI 的增加会持续一段时间,而裸地转变为耕地时,NDVI 会急剧增加,表现为持续时间短,变化幅度大的特征。因此,本文只选取 NDVI 变化幅度 0.2 以上,变化发生前 NDVI 小于 0.1,且干扰时间在 1—3 年内事件作为分析对象,在一定程度上避免了将裸地向草地和林地转变模式纳入耕地扩张范围内的分析。

为了评估 LandTrendr 算法在检测“裸地转为耕地”变化中的有效性,本研究采取了一种综合的方法,结合了多源遥感数据与实地验证。首先,利用 LandTrendr 算法分析长时间序列的植被指数变化,识别出可能从裸

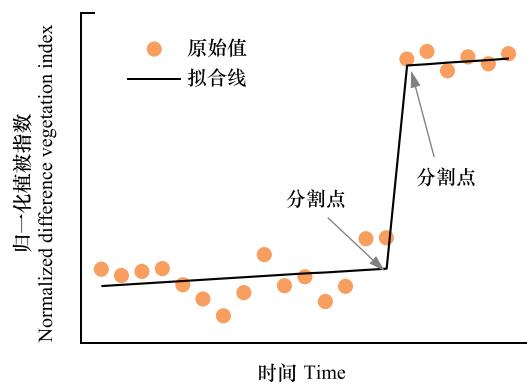


图 2 LandTrendr 算法时间轨迹图

Fig.2 Time trajectory of LandTrendr algorithm

地转变为耕地的区域,在此基础上,筛选出具有代表性变化特征的典型样点,用于后续精度验证与分析。考虑到 LandTrendr 算法本身依赖于时间序列拟合,可能存在误判或漏判的风险,因此引入多种辅助信息进行交叉验证。其中,Google Earth 提供的历史高分辨率影像作为重要的辅助数据源,被用于对算法识别出的变化样点进行目视解译。尽管 Google Earth 的影像时间覆盖有限,难以精确确定变化发生的年份,但其高空间分辨率有助于判断变化是否真实发生及其大致时间段,从而提升结果的可信度。为进一步验证 LandTrendr 算法的准确性,以 CLCD 作为参考。通过提取 CLCD 中每年的耕地范围,将其与 LandTrendr 算法得到的结果进行对比分析。

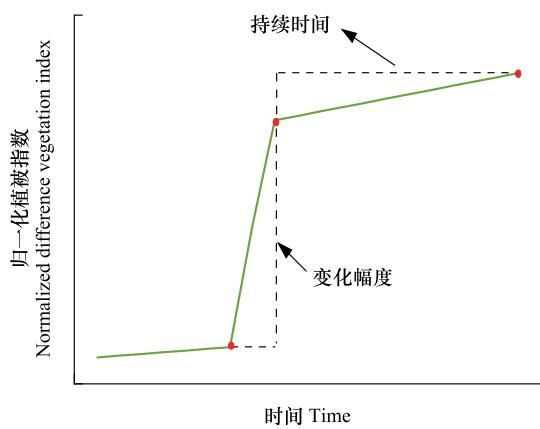


图 3 裸地转为耕地的归一化植被指数变化轨迹的概念模式

Fig.3 Conceptual model of normalized difference vegetation index trajectory for bare land to cultivated land conversion

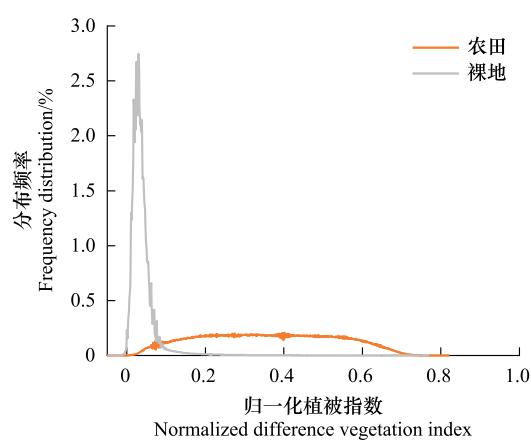


图 4 研究区耕地和裸地归一化植被指数分布范围

Fig.4 Normalized difference vegetation index distribution range of cultivated land and bare land in the study area

2 结果与分析

2.1 点尺度土地利用转化识别

图 5 展示了裸地转为耕地的历史影像及 LandTrendr 拟合结果,表明该点在 2015 年之前为荒漠,而在 2019 年之后转变为规则分布的耕地类型。通过 LandTrendr 导出该点的原始 NDVI 值及其拟合值,结果表明,土地利用类型的变化发生在 2016 年(裸地转耕地),与预期一致。这些发现证实了 LandTrendr 算法在识别土地覆盖变化时间点方面的有效性。

2.2 基于 LandTrendr 与 CLCD 的耕地扩张过程对比研究

根据 1990 至 2020 年间基于 LandTrendr 算法黑河中游地区耕地面积变化的数据表明(图 6),近 30 年内耕地总面积增加了 560.72 km^2 ,年均增加 18.69 km^2 。这一时期内,耕地面积的变化表现出明显的阶段性特征。首先,在 2011 年之前,耕地面积呈缓慢增加趋势,由 1991 年的 5.11 km^2 增加到 2010 年的 18.83 km^2 ,这 20 年间增加的耕地面积占整个研究期间耕地面积增长总量的 37%。2013 年上升到最高,其扩张面积达到 47.54 km^2 ,之后维持在 40 km^2 左右,近几年又持续降低,2020 年增加的面积不足 2013 年的一半,只有 22.81 km^2 。综上,耕地扩张主要发生在 2011 年以后,且 2011—2020 总耕地扩张面积占到全部增加面积的 63%。

为了进一步与土地利用产品 CLCD 比较,选取了 1990 和 2020 年 31 期土地利用数据,得到 1990—2020 年由裸地转为耕地的面积为 622.48 km^2 ,较 LandTrendr 得到的耕地扩张面积略高(图 6),但二者得到的由裸地转为耕地面积基本与 CLCD 得到的耕地增加面积在时间分布上趋势较为一致($R^2 = 0.61$)。

2.3 新增耕地的空间分布格局与区域差异分析

新增耕地呈现出南北聚集的特点,特别是在甘州区和金塔县等地,而中部地区如肃南和肃州区的新增耕地相对较少(图 7)。为了更精细地描述这一时期的耕地时空变化特征,本研究选取了图 7 中的四个典型区域进行详细分析。结果显示,这些区域的耕地增长呈现块状模式,与实际种植情况相符。典型区域 1 位于金塔

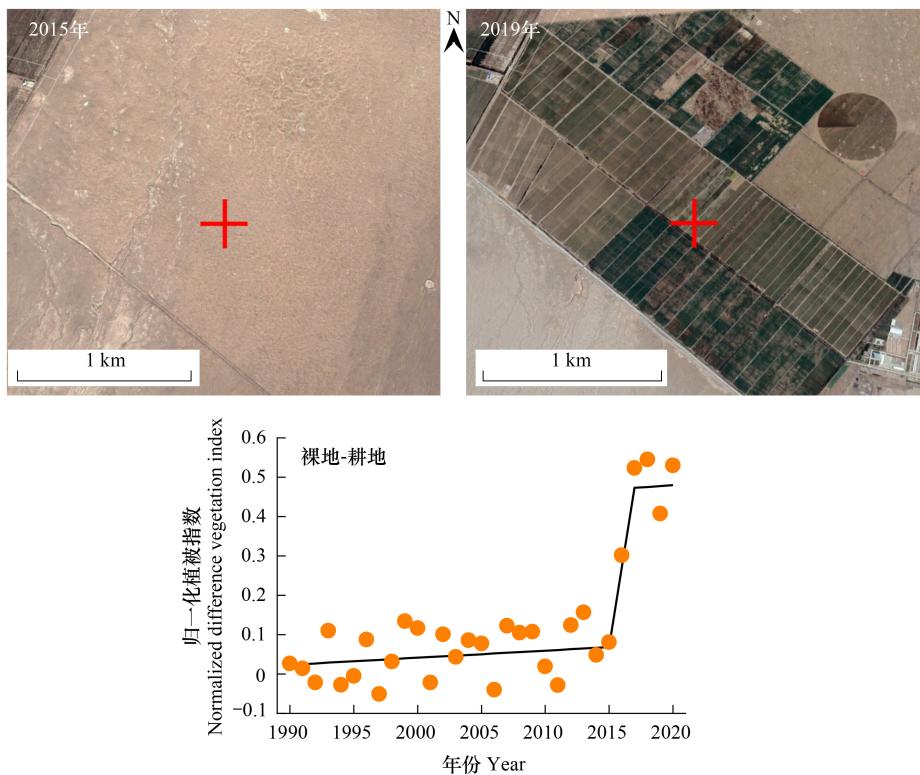


图 5 绿洲耕地扩张前后对比图

Fig.5 Comparison of cultivated land expansion

县鼎新镇,其耕地面积呈指数增长,由 1991 年不足 0.05 km^2 增加到 2020 年的 2.03 km^2 。典型区域 2 位于肃州区和肃南,其耕地面积在 2005 年前一直维持在较低的水平,平均值为 0.08 km^2 ,随后出现指数式增长,到 2013 年达到最大值(5.28 km^2),又出现急剧降低,到 2020 年只有 1.26 km^2 。典型区域 3 位于高台县,其耕地面积在整个研究期间处于较平稳波动状态,均值维持在 0.67 km^2 ,而峰值则出现在 2006—2007,2016—2017 和 2019 等时段,其开垦面积均大于 1 km^2 。典型区域 4 位于甘州区,其耕地面积变化则呈现明显的单峰曲线,峰值在 2014 年,达到 13.09 km^2 。综上,新增耕地主要集中在典型区域 1、2 和 4,这些区域耕地面积的变化反映了不同时期耕地扩展速度与规模的差异。

为深入分析研究期内各行政区域耕地扩张的动力学特征,本文对民乐县、山丹县、甘州区、临泽县、肃南、高台县、肃州区、金塔县和嘉峪关市九个地区的年度扩张面积进行了统计分析(表 1 与图 9)。结果显示,耕地扩张主要集中于金塔县和甘州区,其扩张面积分别为 150.18 km^2 和 99.19 km^2 ,分别占研究区总扩张面积的 26.8% 和 17.7%,是研究期内耕地扩张最显著的两个区域。金塔县和甘州区耕地扩张整体呈上升趋势,其中,金塔县在 2013 年和 2017 年出现两次明显扩张高峰,年扩张面积均接近 14 km^2 ;甘州区则在 2014 年达到峰值,扩张面积为 16.48 km^2 ,随后逐渐下降。除上述两个

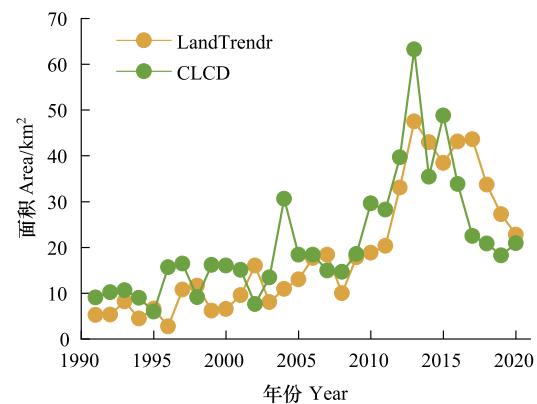


图 6 基于 LandTrendr 和中国土地覆被数据集(CLCD)的 1990—2020 年黑河中游地区耕地扩张面积动态

Fig.6 Cultivated land expansion dynamics in the middle reaches of the Heihe River Basin (1990—2020) based on LandTrendr and China Land Cover Dataset (CLCD)

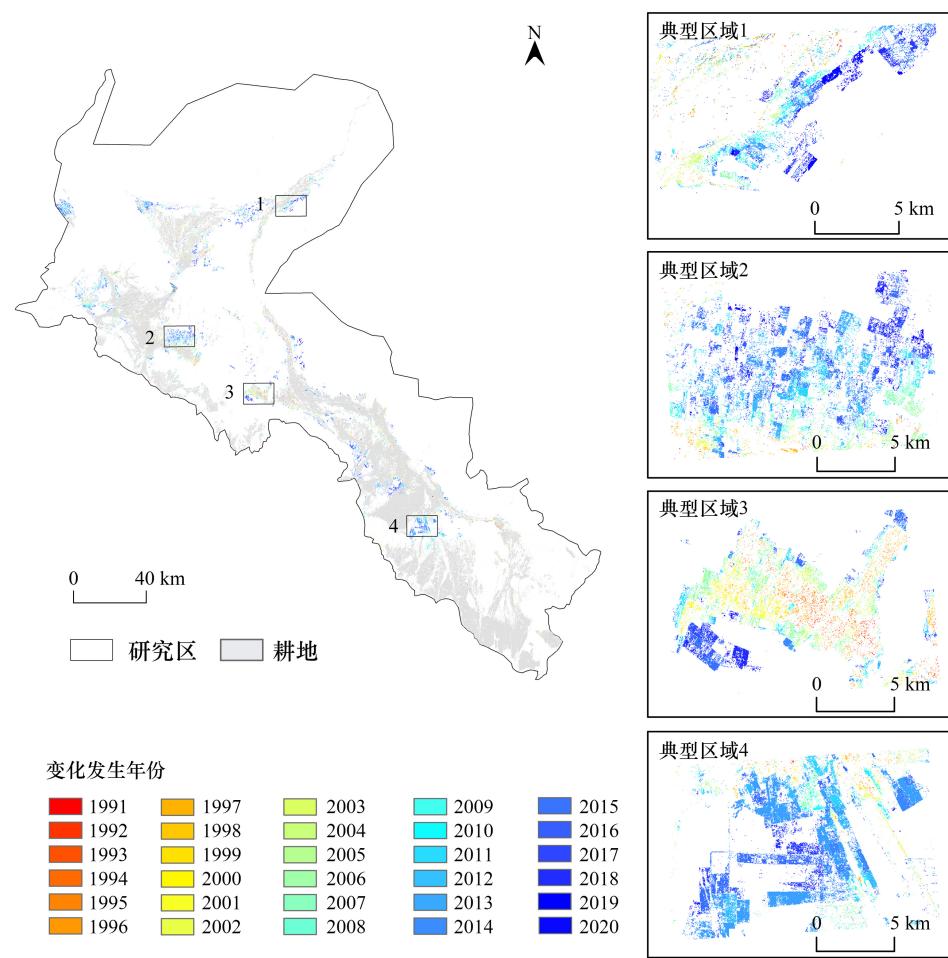


图 7 1990—2020 年黑河中游地区绿洲扩张时空分布图

Fig.7 Land cover map of the middle reaches of the Heihe River Basin in 1990

重点区域外,肃州区和高台县的扩张也较为显著,分别占全区总面积的 12.9% 和 11.2%。肃州区的扩张高峰出现在 2013 年,之后逐年递减;而高台县自 2013 年起维持较高扩张水平,年均约为 4 km^2 ,并于 2017 年达到最大值 5.60 km^2 。临泽县的扩张趋势与甘州区相似,呈明显的单峰曲线,最高值出现在 2017 年,达 6.82 km^2 。肃南的耕地扩张过程则表现为双峰型,两个峰值分别出现在 2013 年 (5.74 km^2) 和 2016 年 (5.00 km^2)。山丹县的耕地开垦过程具有阶段性波动特征,在早期(1993 年、1998 年、2002 年)出现三次明显高峰,2010 年后趋于稳定,年扩张面积维持在 $0.5\text{--}1 \text{ km}^2$ 之间。民乐县在整个研究期内共出现 4 个扩张高峰,分别发生在 1993 年、1998 年、2002 年和 2012 年,其中 2012 年达到最大值 3.45 km^2 。嘉峪关市的耕地扩张变化趋势与肃南类似,整体呈现两个明显的高峰,分别出现在 2013 年和 2015 年,峰值约为 4 km^2 。

表 1 黑河中游各区域耕地扩张面积统计

Table 1 Statistics of cultivated land expansion areas in different regions of the middle reaches of the Heihe River Basin

耕地新增面积/ km^2 (Increase in cultivated land area)	张掖市					酒泉市		嘉峪 关市	
	民乐县	山丹县	甘州区	临泽县	肃南	高台县	肃州区		
面积 Area/ km^2	25.00	24.93	99.19	43.07	46.47	62.72	72.26	150.04	36.84
占比 Percentage/%	4.4	4.4	17.7	7.7	8.3	11.2	12.9	26.8	6.6

3 讨论

1990 年至 2020 年间,基于 LandTrendr 算法的长时间连续变化检测结果表明,2011 年来耕地扩张面积增

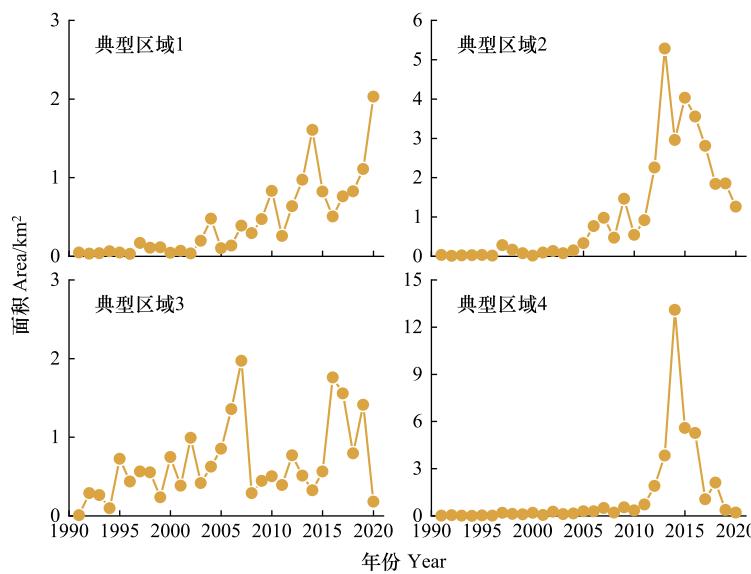


图 8 1990—2020 年黑河中游地区 4 个典型区域耕地扩张面积动态

Fig.8 Cultivated land expansion dynamics in four typical regions of the middle reaches of the Heihe River Basin (1990—2020)

加显著,整个黑河中游地区的耕地面积增加了近 560.72km^2 ,主要集中在金塔县、甘州区和肃州区等地。这一增长趋势可以从多个方面进行解释。自然条件如地形地貌、气候特征等对耕地扩张有着直接的影响。金塔县、甘州区和肃州区等作为主要的扩张区域,具有相对平坦的土地和较为适宜的气候条件,这为大规模农业开发提供了基础。相比之下,肃南由于地处祁连山脉,地形复杂,耕地扩张的空间受到较大限制,导致其扩张曲线呈现双峰型特征,且峰值较低。政策导向同样起到了关键的推动作用,自 20 世纪 80 年代起,“兴河西之利,济定西之贫”的战略部署加快了甘肃省河西地区与定西地区的扶贫开发工作,特别是通过近 20 年的“两西”移民安置与荒漠开垦项目,河西地区逐步转变为甘肃省的重要“粮仓”^[19]。截至 2010 年,甘肃省累计实施移民搬迁达 94.78 万人,其中超过 15 万人由政府组织迁往河西走廊^[20]。这些移民活动促使大量土地资源被开垦,绿洲范围随之扩张^[21]。为了安置移民,在河西走廊的戈壁滩新开垦了超过 2.67 万 hm^2 的耕地,尤其是在酒泉市,外来移民已占到全市农村总人口的四分之一^[20]。此外,2004 年《种子法》的颁布进一步促进了黑河中游地区玉米制种基地的建设,不仅提升了农民收入,也促使区域耕地面积持续扩展,并导致林草地、湿地等非农业用地向农业用地的转化^[22–23]。这一系列的措施也导致了 1990—2010 年和 2010—2020 开垦的差异。同时,分水政策的实施加快了中游地区土地利用类型的转型,使大量水资源优先用于农业灌溉^[24],这些灌溉用水主要依赖于黑河地表径流和地下水^[25],而气温升高导致黑河上游祁连山冰雪融化增加,黑河的地表径流量上升,又进一步促进了绿洲的发展和耕地面积扩张^[26]。综上所述,耕地面积的增长不仅是地形特征、移民政策和农业发展的直接结果,也是多种政策因素共同驱动下所引发的土地利用变化。

LandTrendr 通过对植被指数(如 NDVI)的时间序列进行分割和拟合,能够有效提取植被覆盖随时间变化

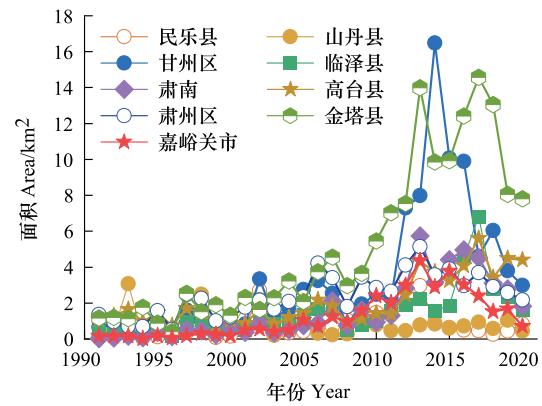


图 9 基于 LandTrendr 和中国土地覆被数据集 (CLCD) 的 1990—2020 年黑河中游地区耕地扩张面积动态

Fig.9 Cultivated land expansion dynamics in the middle reaches of the Heihe River Basin (1990—2020) based on LandTrendr and China Land Cover Dataset (CLCD)

的特征。此算法已广泛应用于植被覆盖变化监测^[27]、土地利用转换^[7]以及包括森林火灾和矿山开发等各种干扰识别^[28—29]。相较于传统的基于多时相影像的分段分析方法,LandTrendr 不仅提高了时间序列变化特征提取效率,还能揭示更为精细的变化模式^[30—31],从而为深入理解土地覆盖动态变化过程及其驱动因素提供有效手段。然而,相较于土地利用产品 CLCD,其检测到的变化时间有一定的漂移,其主要原因可能是本文中 LandTrendr 关注的是 NDVI 由低值到高值的转变,这种考虑植被变绿的方式忽略了耕地休耕的情况。同时,本研究仅分析了从 NDVI 值较低的裸地转变为耕地的情况,而未涵盖其他类型的土地利用转换,包括草地和林地等用地类型向耕地的转变,以及耕地向裸地的逆向转变,因此所得出的耕地扩张数据未能全面反映实际的土地利用变化状况,从而导致耕地扩张的程度与实际有一定的偏差。此外,基于 NDVI 阈值确定的转换模式可能还存在一定的误检情况,例如将建筑用地转变为绿地或耕地的变化以及轮作制度会错误地识别为裸地向耕地的转变。未来的研究应当考虑更广泛的植被指数阈值和更多种类的土地利用转换类型,以便提供一个更为全面和精确的土地覆盖动态变化模型。

4 结论

(1)相较于传统土地利用产品,基于 LandTrendr 算法得到的裸地转耕地的面积略偏低,但在时间分布上呈现高度一致($R^2=0.61$)。

(2)1990 年以来 30 年间,黑河中游绿洲农田扩张面积共增长 560.72 km^2 。2011—2020 年为绿洲扩张速率较快的时间段,新增耕地面积占总扩张面积的 63%,年均增加面积超过 35 km^2 。

(3)受地形和政策等多重因素共同影响,耕地扩张主要集中在金塔县、甘州区和肃州区等地,其耕地扩张面积占到研究区总耕地扩张面积的 26.8%,17.7 和 12.9%。

绿洲耕地的持续扩张在提升农业产出能力的同时,也加剧了水资源供需矛盾,进一步压缩了天然绿洲和荒漠生态系统的生存空间,可能诱发土地盐渍化、地下水位下降等一系列生态环境问题,进而威胁西北生态安全屏障的稳定。本研究通过揭示耕地扩张的时空演化过程,为后续开展水资源优化配置及适宜绿洲规模提供了基础数据支持。建议地方政府在制定国土空间规划和生态保护政策时,充分考虑绿洲扩张对水土资源与生态系统的综合影响,推动“生态-经济-社会”协同发展的绿色转型路径,实现人地关系的良性互动与长期平衡。

参考文献(References) :

- [1] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1-9.
- [2] 岳东霞, 杜军, 巩杰, 降同昌, 张佳静, 郭建军, 熊友才. 民勤绿洲农田生态系统服务价值变化及其影响因子的回归分析. 生态学报, 2011, 31(9): 2567-2575.
- [3] 钱大文, 巩杰, 贾珍珍. 绿洲化-荒漠化土地时空格局变化对比研究——以黑河中游临泽县为例. 干旱区研究, 2016, 33(1): 80-88.
- [4] 廖杰, 王涛, 薛娴. 近 55a 来黑河流域绿洲演变特征的初步研究. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1426-1441.
- [5] 巩杰, 孙朋, 谢余初, 钱大文, 贾珍珍. 基于移动窗口法的肃州绿洲化与景观破碎化时空变化. 生态学报, 2015, 35(19): 6470-6480.
- [6] Moumane A, Al Karkouri J, Benmansour A, El Ghazali F E, Fico J, Karmaoui A, Batchi M. Monitoring long-term land use, land cover change, and desertification in the Ternata oasis, Middle Draa Valley, Morocco. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2022, 26: 100745.
- [7] Yin H, Pflugmacher D, Li A, Li Z G, Hostert P. Land use and land cover change in Inner Mongolia-understanding the effects of China's re-vegetation programs. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 918-930.
- [8] Dara A, Baumann M, Kuemmerle T, Pflugmacher D, Rabe A, Griffiths P, Hözel N, Kamp J, Freitag M, Hostert P. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series. Remote Sensing of Environment, 2018, 213: 49-60.
- [9] de Castro P I B, Yin H, Teixeira P D Jr, Lacerda E, Pedroso R, Lautenbach S, Vicens R S. Sugarcane abandonment mapping in Rio de Janeiro state Brazil. Remote Sensing of Environment, 2022, 280: 113194.
- [10] Hong C Q, Prishchepov A V, Jin X B, Zhou Y K. Mapping cropland abandonment and distinguishing from intentional afforestation with Landsat time series. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 127: 103693.
- [11] Yin H, Prishchepov A V, Kuemmerle T, Bleyhl B, Buchner J, Radeloff V C. Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal

- segmentation of Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 12-24.
- [12] 蒙吉军, 汪疆玮, 周朕, 王雅. 黑河中游灌区水资源配置要素对生态用地变化的影响. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(2): 143-151.
- [13] Cai W J, Jiang X H, Sun H T, He J Y, Deng C, Lei Y X. Temporal and spatial variation and driving factors of water consumption in the middle Heihe river basin before and after the implementation of the “97 water diversion scheme”. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107727.
- [14] Kennedy R E, Yang Z Q, Gorelick N, Braaten J, Cavalcante L, Cohen W B, Healey S. Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 10.
- [15] 陈海志, 胡广录, 李嘉楠, 麻进, 焦娇. 1967—2020年黑河中游绿洲气候变化对玉米产量的影响——以临泽县为例. *甘肃农业大学学报*, 2023, 2: 137-144.
- [16] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [17] 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.
- [18] Kennedy R E, Yang Z Q, Cohen W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2897-2910.
- [19] 赵晓英, 侯扶江. 甘肃省“两西”地区草地退化的成因. *草业科学*, 2001, 18(6): 12-15.
- [20] 王海飞. 生态文明建设框架下少数民族社会发展相关问题思考——基于河西走廊各民族移民定居后的发展实践. *兰州大学学报: 社会科学版*, 2019, 47(2): 118-124.
- [21] 肖飞艳. 黑河中游土地利用和景观变化的时空特征与驱动因素[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [22] 李洁, 王福红, 宋晓渝, 石培基, 赵锐锋. 干旱区流域土地利用覆被空间转型模拟及热点探测——以黑河流域中游为例. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 187-196.
- [23] 赵锐锋, 王福红, 张丽华, 李鸿伟. 黑河中游地区耕地景观演变及社会经济驱动力分析. *地理科学*, 2017, 37(6): 920-928.
- [24] 康小虎. 近十年甘肃省河西走廊水资源利用分析. *甘肃水利水电技术*, 2023, 59(9): 5-8.
- [25] 李江, 郝新梅, 范琳琳, 毛晓敏. 黑河中游绿洲地下水位空间变异性研究. *水力发电学报*, 2015, 34(11): 106-115.
- [26] 王国华, 张妍, 缪倩倩, 张仲伍, 孙九林. 黑河流域中游绿洲边缘地表水和地下水水化学特征分析. *地理科学*, 2022, 42(10): 1818-1828.
- [27] Wang X Y, Huang H B, Gong P, Biging G S, Xin Q C, Chen Y L, Yang J, Liu C X. Quantifying multi-decadal change of planted forest cover using airborne LiDAR and landsat imagery. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 62.
- [28] Viana-Soto A, Aguado I, Salas J, García M. Identifying post-fire recovery trajectories and driving factors using landsat time series in fire-prone Mediterranean pine forests. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1499.
- [29] Xiao W, Deng X Y, He T T, Chen W Q. Mapping annual land disturbance and reclamation in a surface coal mining region using google earth engine and the LandTrendr algorithm: a case study of the Shengli Coalfield in Inner Mongolia, China. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1612.
- [30] Komba A W, Watanabe T, Kaneko M, Chand M B. Monitoring of vegetation disturbance around protected areas in central Tanzania using landsat time-series data. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1800.
- [31] Dara A, Baumann M, Freitag M, Holzel N, Hostert P, Kamp J, Muller D, Prishchepov A V, Kuemmerle T. Annual landsat time series reveal post-soviet changes in grazing pressure. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111667.