

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.005

李舒畅, 郭正, 张风宝, 等. 基于多源数据融合产品的黄河中游多沙粗沙区耕地时空动态变化[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 139-150.

LI Shuchang, GUO Zheng, ZHANG Fengbao, et al. Spatiotemporal dynamic changes of cropland in rich and coarse sediment areas of middle Yellow River basin based on multi-source data fusion products[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 139-150.

基于多源数据融合产品的黄河中游多沙粗沙区耕地时空动态变化

李舒畅¹, 郭正¹, 张风宝^{1,2}, 罗佳茹¹, 李玄添¹, 申楠^{1,2}, 杨明义^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 黄河中游多沙粗沙区是我国典型的生态脆弱区, 准确量化该区耕地时空动态变化对评估区域粮食安全、生态修复效益、水土流失状况及黄河下游安澜等都具有重要意义。[方法] 基于 5 种 30 m 高分辨率土地利用/覆被数据集产品 (CNLUCC、GLC_FCS30、CLCD、AGLC-2000-2015、GlobeLand30), 运用耕地利用动态度、偏差系数、转移矩阵、空间一致性分析等方法对比分析多源产品耕地在多沙粗沙区的时空特征, 形成 30 m 分辨率高精度融合数据集产品, 并对其进行验证, 在此基础上基于融合产品分析 1990—2020 年黄河中游多沙粗沙区耕地的数量、分布、结构特征。[结果] 现有多源数据集产品之间耕地特征存在较大差异, 而融合产品精度均优于单独使用 5 种现有产品。基于融合产品分析发现, 1990—2020 年耕地面积呈先增加后波动式降低的趋势, 退耕还林(草)工程实施为分界线; 1990—2020 年耕地面积净减少 3 170.59 km², 减少 17.63%, 且 >15° 的坡耕地面积占比逐年减少; 耕地的动态转移类型主要为草地, 其次为人工地表。退耕还林(草)等生态工程的实施和城镇化建设是导致耕地减少的主要原因。[结论] 综合分析多源产品的优劣, 基于目标地类融合和解释多源数据探究的有效方法, 以深入研究某区域的地类特征, 从而获得更为精确的研究结论。

关键词: 耕地; 黄河中游多沙粗沙区; 融合产品; 多源数据; 时空变化

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0139-12

Spatiotemporal Dynamic Changes of Cropland in Rich and Coarse Sediment Areas of Middle Yellow River Basin Based on Multi-source Data Fusion Products

LI Shuchang¹, GUO Zheng¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, LUO Jiaru¹, LI Xuantian¹, SHEN Nan^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The rich and coarse sediment areas of middle Yellow River basin is a typical ecologically fragile area in China. Accurately quantifying the spatiotemporal dynamic changes of cropland in this region is crucial for evaluating regional food security, ecological restoration benefits, soil erosion conditions, and the downstream tranquility of the Yellow River. [Methods] Based on five high-resolution (30 m) land use/cover dataset products (CNLUCC, GLC_FCS30, CLCD, AGLC-2000-2015, GlobeLand30), this study employed methods such as cropland dynamic degree, deviation coefficient, transfer matrix, and spatial consistency analysis to comparatively analyze the spatiotemporal characteristics of cropland in the rich and coarse sediment areas. A high-precision fused dataset with a 30 m resolution was formed and validated. Based on this

收稿日期: 2024-03-05

修回日期: 2024-04-16

录用日期: 2024-04-28

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-07-25

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300805); 国家自然科学基金项目 (U22A20613, 42361144707, 42077071); 中央高校基本科研业务费专项 (2023HHZX001)

第一作者: 李舒畅 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事 GIS 应用与土地资源研究。E-mail: lishuchang21@163.com

通信作者: 张风宝 (1980—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀及其环境效应研究。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

fused product, an analysis of the quantity, distribution, and structural characteristics of cropland in rich and coarse sediment areas of middle Yellow River basin in 1990—2020 years was conducted. [Results] There are significant differences in cropland characteristics among existing multi-source dataset products, with the fused products demonstrating higher accuracy compared to using any of the five existing products individually. Analysis based on the fused products reveals a trend of initially increasing followed by fluctuating decline in cropland area in 1990—2020, with the implementation of the Grain for Green project serving as a turning point. In 1990—2020, there has been a net decrease of 3 170.59 km² in cropland area, representing a reduction of 17.63%. Furthermore, the proportion of cropland with slopes greater than 15° has been decreasing annually. The main types of dynamic transfer of cropland are into grassland, followed by artificial surfaces. The implementation of ecological projects such as the Grain for Green program, along with urbanization construction, is the primary cause of the decrease in cropland. [Conclusion] Researchers are encouraged to comprehensively analyze the strengths and weaknesses of multi-source products based on their research objectives. Exploring effective methods for fusing and interpreting multi-source data, with a focus on target land classes, can lead to a more in-depth understanding of the land characteristics in a specific region and, consequently, more precise research conclusions.

Keywords: cropland; the rich and coarse sediment areas of middle Yellow River basin; fusion products; multi-source data; spatiotemporal dynamic changes

Received: 2024-03-05

Revised: 2024-04-16

Accepted: 2024-04-28

Online(www.cnki.net): 2024-07-25

耕地是人类进行农业生产活动的基本资源,事关国家粮食安全和社会稳定大局。我国是农业大国和人口大国,拥有世界 8% 的耕地面积,养活了全球 22% 的人口^[1]。党的二十大报告强调“牢牢守住十八亿亩耕地红线”,意味着要保持耕地面积的稳定不减少。然而,在中国人口增长、城镇化和工业化高速发展的背景下,建设用无序扩张和耕地资源不合理利用(如粗放化、破碎化、边际化等)导致耕地数量快速减少,耕地时空格局发生复杂变化^[2]。在推进中国式现代化的关键时期,准确量化耕地面积动态变化,科学认识耕地时空格局变化特征,对科学统筹粮食安全、社会保障与生态保护之间的关系具有重要的现实意义。

近年来,遥感技术以及计算机储存处理技术的发展为准确量化和分析耕地面积及其时空格局变化提供了可能。由于多源产品数据源、分类系统和分类技术等因素的影响,各种土地利用/覆被产品在具体面积及空间分布等方面存在明显差异^[3]。ZHENG 等^[4]研究发现,高分辨率的产品能表现更多的土地覆盖细节,并在一定程度上提高分类精度。目前,国内外学者对多源土地利用/覆被数据集的精度评价大多涉及早期较粗糙分辨率的数据^[3,5-8],且大多数研究只针对某一年份的土地利用/覆被数据集^[3,9],缺乏连续时间序列数据。研究^[10]发现,单一数据源存在较大的不确定性,多个数据源的融合可提供更全面的理解,数据融合可以挖掘多源数据的优势,提高数据的潜在价值,解

释性能和数据质量^[7, 11]。如 CHEN 等^[12]比较 3 种降水数据产品,并利用地理差异分析(GDA)方法将最佳产品与实测数据融合,从而提高干旱监测的精度。评价多源土地利用/覆被产品并融合形成高精度产品为探究准确的土地利用时空格局变化奠定了基础。当前利用融合数据产品探究土地利用时空演变特征的研究较少,尤其是基于高分辨率(≤ 30 m)融合产品的研究几乎没有。如 WANG 等^[13]通过加权一致性方法融合多源数据集形成 1 km 分辨率的中国土地覆盖占比产品,并基于此产品分析了中国土地覆盖变化。据此,在开展特定区域与地类的土地资源研究前,有必要对所用数据集的实际精度进行分析和融合,以获得更为准确严谨的结论^[3, 14]。

黄河中游多沙粗沙区是我国水土流失最为严重和最难治理的区域之一,是黄河泥沙的主要来源区,也是一个典型的生态脆弱区,被划定为国家级水土流失重点防治区和生态功能区^[15-16]。包括退耕还林(草)在内的一系列生态工程导致该区域耕地面积和时空格局发生了剧烈变化^[16]。目前,大多数相关研究^[17-18]集中在黄土高原、黄河流域及其局部区域,且部分研究由于所用数据源不同对耕地面积变化特征的描述存在一定差异。针对黄河中游多沙粗沙区耕地时空动态变化的研究还鲜有报道,对准确评估该区域粮食安全、生态修复效益、水土流失状况及制定相关科学决策具有一定的影响。鉴于此,本文在比较分析 5 种 30 m 分辨率的土

地利用/覆被产品的基础上,融合多源数据形成 1990—2020 年黄河中游多沙粗沙区 30 m 分辨率耕地分布数据集,并基于融合产品系统分析该区域耕地时空动态变化特征,以期在气候变化、社会经济发展的大背景下,准确量化该区域耕地的时空变化特征,为黄河中游多沙粗沙区的综合治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河中游多沙粗沙区(106°57′—111°58′E,35°54′—40°15′N)涉及陕西、宁夏、甘肃、山西、内蒙古 5 个省(自治区)的 45 个县(市、旗),面积为 $7.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[19],海拔 470~2 000 m,年降水量 350~450 mm(图 1)。主要分布于黄河河口镇至龙门区间和泾河、北洛河上游^[20],以黄土丘陵沟壑和黄土高原沟壑为主,总体植被覆盖度较低,地表物质主要为沙黄土,极易发生土壤侵蚀^[16, 21]。

1.2 数据来源

1.2.1 土地利用/覆被数据集产品 本文选取目前

可获取的 5 种 30 m 空间分辨率的长时序土地利用/覆被数据集产品,具体信息见表 1。

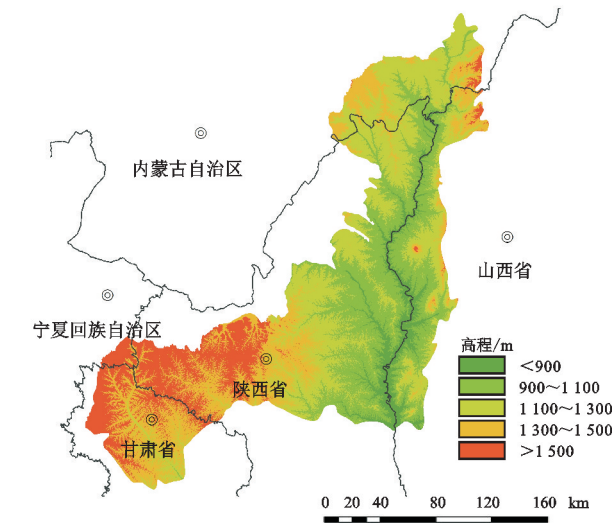


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表 1 多源土地利用/覆被数据产品主要信息

Table 1 Key information of multi-source land use/cover products

数据产品	时期	时间间隔/a	主要研发单位	分类方法	分类数量/个	传感器	制作区域	来源
CNLUCC	1990—2020	5	中国科学院地理科学与资源研究所	人工目视解译	25	Landsat	中国	https://www.resdc.cn/
GLC_FCS30	1990—2020	5	中国科学院空天信息创新研究院	监督分类	29	Landsat	全球	http://data.casearth.cn/
CLCD	1990—2020	5	武汉大学	随机森林	9	Landsat	中国	https://www.zenodo.org/
AGLC-2000-2015	2000—2015	5	中山大学	随机森林	10	Landsat	全球	https://datapane.com/u/xiacong/reports/glc/
GlobeLand30	2000—2020	10	国家基础地理信息中心	POK 法	10	Landsat/HJ-1	全球	http://www.global-landcover.com

1.2.2 DEM 数据 坡度与海拔数据提取自美国国家航空航天局 2020 年发布的 NASA DEM(<https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>)。

1.3 数据预处理

1.3.1 统一分类系统

统一将多源产品的土地利用/覆被类型分为 6 种,参照相关研究成果及数据产品分类说明^[22-24],将

5 种产品中过细分类的地类归并(表 2)。根据中国《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2017)^[25]:将多源产品中的“灌木”归为林地;CNLUCC 产品中的“44 永久性冰川雪地”、GLC_FCS30 产品中的“220 永久冰雪”归为水域;除 CNLUCC 产品外,其他产品分类中的“湿地”归为水域。另外,GLC_FCS30 产品中的“150 稀疏植被”在研究区表现为草地更占优势,故被分为草地。

表 2 5 种数据产品土地利用/覆盖类别代码对应关系

Table 2 Correspondence of land use/cover category codes for 5 types of products

数据产品	耕地	林地	草地	水域	人工地表	未利用地
CNLUCC	11,12	21~24	31~33	41~46	51~53	61~66
GLC_FCS30	10,11,20	52,61,62,71,72,81,82,120,122	130,150	180,210,220	190	200,202
CLCD	1	2,3	4	5	8	7
AGLC-2000-2015	10	20,40	30	50,60	80	90
GlobeLand30	10	20,40	30	50,60	80	90

注:表中的数字为多源产品在黄河中游多沙粗沙区出现的土地利用/覆被类型原始分类代码。

1.3.2 多源产品数据处理 数据处理基于 Arcgis 10.8 和 GEE 软件,主要工作包括研究区数据拼接合并与提取、统一投影坐标系(Krasovsky_1940_Albers)和重分类等操作,并将部分多源产品中未分类的 0 值设置为 Nodata。

1.4 研究方法

1.4.1 耕地面积数量特征

(1)单一土地利用动态度(K)是研究某一土地利用/覆被类型面积变化速率的重要指标^[4]。在本文中正(负)值表示耕地面积增加(减少),绝对值表明耕地面积变化程度,其值越大,变化越剧烈,能较好地比较各数据集耕地面积变化快慢及差异^[26]。计算公式^[27]为:

$$K_i = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_i 为产品 i 的耕地利用动态度; U_a 、 U_b 分别为产品 i 研究时段初期和末期耕地面积(km^2); T 为时间间隔,当以年为单位时, K 值是指耕地面积的年变化率。

(2)偏差系数(D)是衡量各产品中土地利用/覆被类型分类精度的有效指标^[28]。通过统计各数据集耕地面积,并以所有产品的平均值为标准来计算,本文中正(负)值表示该产品耕地面积相对于 5 种产品的平均值偏大(小),公式为:

$$D_i = \left(\frac{x}{\bar{k}} - 1 \right) \times 100 \quad (2)$$

式中: D_i 为产品 i 耕地面积的偏差系数; x 为产品 i 耕地的面积(km^2); $\bar{k}$ 为 5 种产品的耕地面积平均值(km^2)。

1.4.2 耕地转类特征 土地利用转移矩阵是根据同一地区不同时相土地利用/覆盖类型现状的变化关系求得的一个二维矩阵^[26],反映土地利用类型之间转换的方向与程度,从而揭示土地利用变化的结构特征,已被广泛应用于深入了解土地利用变化的演变过程^[29],公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S_{ij} 为地类 i 转换为地类 j 的面积(km^2); i 和 j 分别为转移前后的土地利用类型; n 为地类数量。

1.4.3 耕地空间一致性评价 为更直观分辨出多源数据集产品耕地的空间一致性情况,选取 5 种产品共有年份的耕地数据进行分析。以 2010 年为例,按照各产品重分类结果,在 Arcgis 10.8 软件中对 5 种产品进行空间叠置分析。借助 Python 工具逐像元统计该像元指示为耕地的产品数,之后根据输出结果生成

空间一致性地图,按一致性程度分为完全一致(即 5 种产品在该像元均指示为耕地)、高一致性(4 种指示为耕地)、中一致性(3 种指示为耕地)、低一致性(2 种指示为耕地)和完全不一致(只有 1 种产品指示为耕地),利用数据透视表统计每个产品的耕地一致性程度占比。之后进一步分析 5 种产品耕地空间混淆关系:若在 1 个叠置像元中有 4 种及以上产品指示为同一地类,则设该像元实际为该地类,统计叠置像元中各产品耕地混淆为某地类/某地类混淆为耕地的像元数占该产品对应总混淆像元数的比例,从而分析多源产品在研究区耕地混淆类型与程度。

1.4.4 数据融合 多源数据融合在一定程度上可挖掘多源数据的优势,弥补单一数据源的缺点和不足^[7]。摩尔投票法^[30](Boyer-Moore vote algorithm)又叫多数投票法(majority vote algorithm),是一种简单有效的决策级数据融合方法^[11]。该算法时间复杂度为 $O(n)$,空间复杂度为 $O(1)$,与投票过程类似,是一种在给定的数组中查找一个多数元素(出现次数大于 $N/2$)的算法。

本文基于多数投票法并结合前文多源产品耕地精度评价结果,借助 Python 工具对 5 种产品进行融合,获得一套研究区 1990—2020 年高精度耕地融合产品 CAGCG30。在本文中,对于存在 1 个多数元素的采用多数投票算法融合,对于不存在多数元素的叠置像元,则以出现次数多的相对较高精度产品指示的地类赋值。

1.4.5 产品的精度验证 基于辅助函数的面积验证,以 2015 年陕西省地理国情监测成果和 2020 年第三次全国国土调查数据中研究区部分县(市)域的耕地面积为验证数据,对 5 种现有产品和融合产品 CAGCG30 进行精度验证。分别以 2015 年和 2020 年验证数据耕地面积为自变量,待验证产品耕地面积为因变量获取散点图,待评价数据越集中于辅助函数 $y=x$ 附近,说明该产品耕地面积与验证数据的一致性越高,即其数据可信度越高。

基于相对误差的面积验证:相对误差能清晰地表述土地利用/覆被产品耕地面积精确度,其绝对值越小,表示该产品与验证数据耕地面积差异越小,耕地解译精确度越高。相对误差计算公式为:

$$RE = \frac{Q_i - Q_t}{Q_t} \times 100\% \quad (4)$$

式中: RE 为相对误差(%); Q_i 为某县(市)待验证产品的耕地面积(km^2); Q_t 为该县(市)验证数据的耕地面积(km^2)。

2 结果与分析

2.1 多源产品耕地面积特征分析

黄河中游多沙粗沙区 5 种产品耕地面积变化特征见图 2 和表 3。5 种产品在耕地面积及变化趋势方面差异很大。GLC_FCS30 显示,研究区耕地面积呈现递增趋势,1990—2020 年耕地面积净增加 7 801.45 km²,耕地利用动态度为 2.72%,而其他 4 种产品耕地面积均有不同程度的减少,说明 GLC_FCS30 产品耕地面积变化趋势与其他产品误差较大。CNLUCC 和 GlobeLand30 耕地面积数量明显高于其他 3 种产品,分别是其他 3 种产品的 1.45~3.43 倍和 1.60~2.42 倍。2000—2020 年,AGLC-2000-2015 与 GlobeLand30 耕地利用年动态度绝对值相对较小(GLC_FCS30 除外),分别为 0.11%和 0.05%,耕地面积减少幅度不明显;CLCD 耕地利用年动态度绝对值最大,为 1.72%,耕地面积减少幅度较大。2000 年与 2010 年,CNLUCC 与 GlobeLand30 耕地面积的偏差系数最大,AGLC-2000-2015 耕地面积的偏差系数最小,表明 2000 年和 2010 年 CNLUCC 与 GlobeLand30 的耕地面积远大于 5 种产品耕地面积的均值,而 AGLC-2000-2015 的耕地面积远小于 5 种产品耕地面积的平均值。

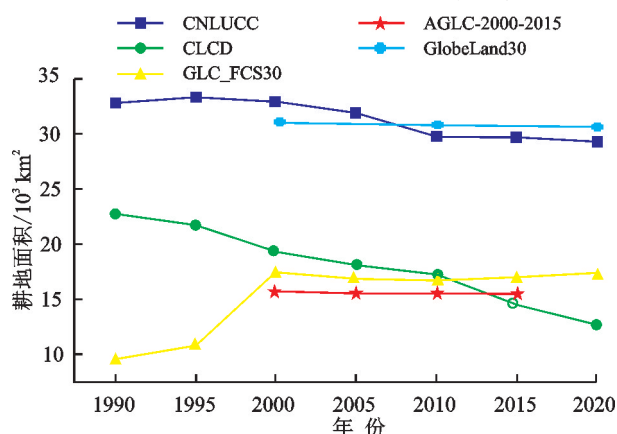


图 2 近 30 年 5 种数据产品耕地面积变化趋势

Fig.2 Trend of cropland area changes for 5 types of products over the past 30 years

2.2 多源产品耕地转类特征分析

由图 3 对耕地转移特征分 3 个时间段分析,以 2000 年、2010 年为重要时间节点。其中,2000 年是实施退耕的时间节点,2010 年为退耕还林(草)工程措施取得明显效果的时间节点,2020 年反映近期黄河中游多沙粗沙区的耕地情况。多源数据集产品在研究时段内主要转移类型都为草地,但不同产品在具体转移面积和转移类型方面差异很大。例如,1990—2000 年 CNLUCC 在耕地转移面积上与 GLC_FCS30、CLCD 存在较大差异,退耕面积仅为 113.39 km²,不足其他 2 个产品的 2.2%,而 CLCD 在 3 个时间段退耕面积均

最大;2000—2010 年,CNLUCC、GLC_FCS30 显示耕地主要流向草地、林地,而 CLCD、AGLC-2000-2015、GlobeLand30 显示耕地主要流向草地和人工地表。

表 3 多源数据产品耕地利用动态度和偏差系数

Table 3 Dynamic degree for cropland utilization and coefficient of deviation of multi-source products

数据产品	年份	耕地利用 动态度/%	2000 年耕地面 积偏差系数	2010 年耕地 面积偏差系数
CNLUCC	1990—2020	-0.36	41.18	35.10
	2000—2020	-0.54		
GLC_FCS30	1990—2020	2.72	-25.13	-23.92
	2000—2020	-0.01		
CLCD	1990—2020	-1.47	-17.03	-21.74
	2000—2020	-1.72		
AGLC-2000-2015	2000—2015	-0.11	-32.11	-29.39
GlobeLand30	2000—2020	-0.05	33.10	39.95

我国退耕还林(草)的实施分为 2 个阶段,第 1 阶段始于 1999 年,历时 15 年,共实施退耕面积 926.67 万 hm²;第 2 阶段为 2014—2019 年,共实施退耕面积 452.25 万 hm²。多源土地利用/覆被产品不同程度地显示了退耕还林(草)工程的生态效益,主要表现在大面积的耕地向草地、林地转移。2000—2010 年,CLCD 产品退耕面积最大,为 6 230.06 km²,其中 6 106.59 km²转为草地,15.39 km²转为林地;AGLC-2000-2015 产品退耕面积最少,仅有 338.67 km²的耕地转出,其中有 234.00 km²转为草地,17.80 km²转为林地;其他产品退耕面积均为 1 000~4 000 km²。黄河中游多沙粗沙区大部分区域位于黄土高原黄土丘陵沟壑区,该区域是退耕还林(草)工程实施之初的试点区,也是核心区^[31],然而 AGLC-2000-2015 显示 2000—2015 年耕地面积仅减少 252.58 km²。对比已有研究^[17-18, 29]可知,AGLC-2000-2015 产品指示的耕地面积变化量及转移量偏小。

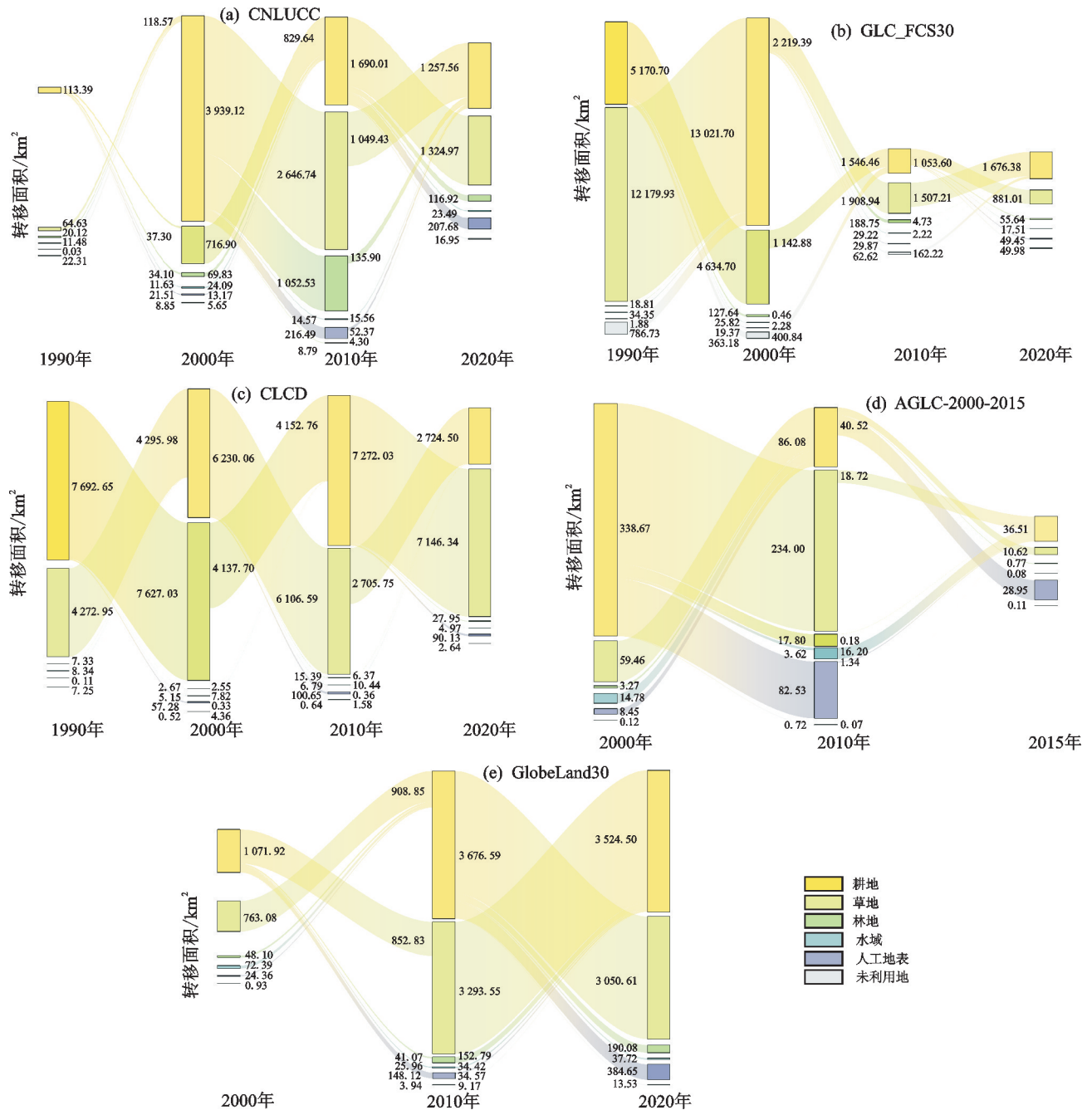
2.3 多源产品空间一致性和混淆关系

黄河中游多沙粗沙区多源数据集产品耕地空间一致性程度较低,其中完全不一致占比最多为 40.61%,完全一致和高一致性占比较少,分别为 5.95%和 11.77%。一致性较高的区域主要分布在研究区中部地区,包括榆林市东南部、吕梁市中部偏西、靖边县西北部等区域,这些区域耕地分布集中,边界较清晰,耕地分类一致性较强(图 4a)。

5 种产品耕地空间一致性程度从高到低依次为 AGLC-2000-2015>CLCD>GLC_FCS30>GlobeLand30>CNLUCC。AG17LC-2000-2015 产品的完全一致和高一致性程度占比之和最高,占其耕地总面积的 50%以上,其次为 CLCD(46.48%),这 2 种产品

完全不一致占比均在 8% 以下。相比之下, CNLUCC 与 GlobeLand30 这 2 种产品的完全一致和高一致性

程度占比均偏低, 完全不一致程度占比均偏高, 其中 CNLUCC 完全不一致程度占比达 33.79% (图 4b)。



注: 每组数据左列表示上一个时间点的某个(些)地类转入该时间点对应地类的面积, 右列数据表示该时间点对应地类转入下一个时间点的某个(些)地类的面积。

图 3 多源数据产品耕地转移特征

Fig.3 Cropland transfer characteristics of multi-source data products

分析耕地空间混淆关系发现, 各产品中有 98% 以上将耕地混淆为草地, 78% 以上将草地混淆为耕地, 其余混淆地类主要为林地或未利用地。主要与草地是研究区主要地类, 面积占比偏大, 加之草地、林地和未利用地与耕地有大体一致的覆盖特征, 分辨率较小有关。

此外, 由于水域、人工地表与耕地具有明显的光谱特征与边界, 它们之间的混淆比例均较低。

2.4 融合产品形成及耕地面积验证

根据前文研究结果, CLCD、AGLC-2000-2015 产品精度相对其他 3 种产品较高, 但 CLCD 精度最高且具有相对较长的时间序列。因此, 利用多数投票法, 并以 CLCD 为第 1 优先级、AGLC-2000-2015 为第 2 优先级对多源产品进行融合, 最终获得一套 1990—2020 年多沙粗沙区耕地融合产品 CAGCG30。对 6 种产品的耕地面积数量进行验证(图 5、图 6), 6 种产品均与各县验证数据

存在一定差异,但与 5 种多源产品相比,融合数据 CAGCG30 耕地面积与各县验证数据一致性程度最高,其次是 AGLC-2000-2015 与 CLCD,而 GlobeLand30 与 CNLUCC 则相对验证数据整体偏高,与其他数据差异较大。融合数据的点与 5 种多源产品相比较集中于 $y=x$

周围,且相对误差分布跨度较小,较集中分布在相对误差为 0 的直线。各数据在吴堡县的相对误差均较大,可能与吴堡县耕地面积较小、分母基数较大有关。

总体来看,融合数据集 CAGCG30 与验证数据耕地面积较一致,耕地面积可信度较高。

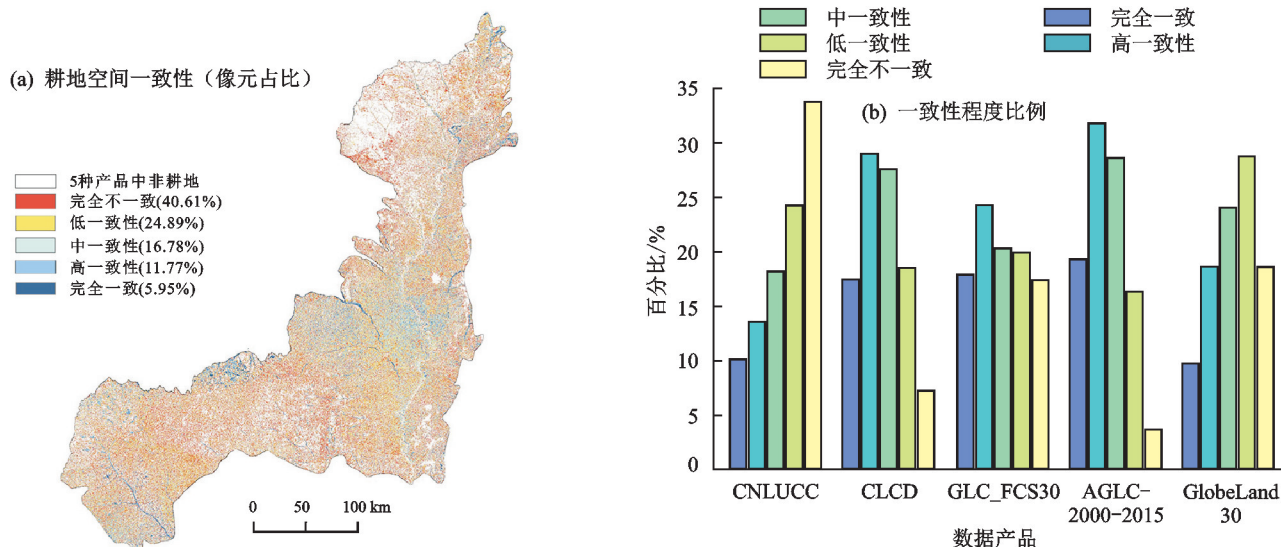
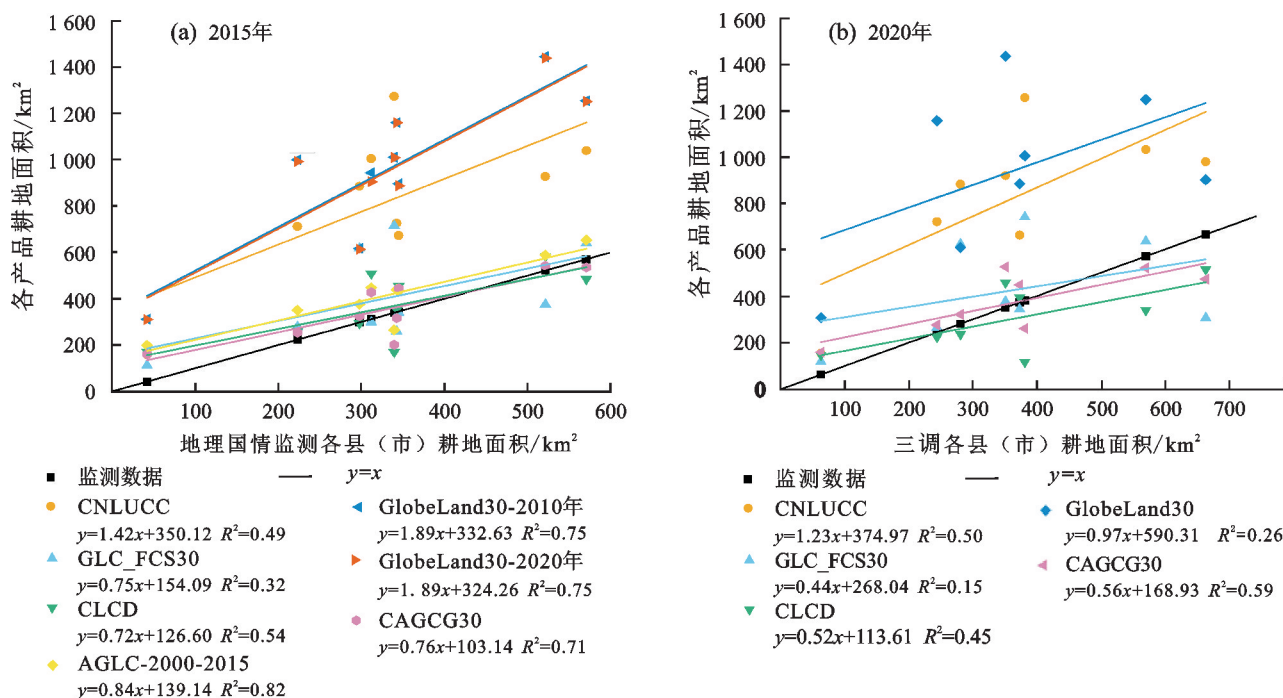


图 4 多源数据产品耕地空间一致性分布与一致性程度比例

Fig.4 Spatial distribution of cropland consistency for multi-source products and proportion of consistency levels



注:GlobeLand30 无 2015 年的数据,以 2010 年和 2020 年为参考。

图 5 2015 年和 2020 年多源数据产品耕地面积散点图

Fig.5 Scatter plot of cropland area for multi-source products in 2015 and 2020

2.5 1990—2020 年耕地时空动态变化

对比发现,融合产品 CAGCG30 与 5 种土地利用/覆被数据产品相比可信度较高,该产品依据研究目的综合对比分析 5 种产品耕地特征,并基于分析结果通过数据融合的方法挖掘多源数据集的优势,提高

了耕地精确度,因此,以融合产品 CAGCG30 为基础研究分析 1990—2020 年黄河中游多沙粗沙区耕地时空动态变化特征,以获得更为精确的研究结论。

2.5.1 耕地面积变化特征 1990—2020 年,研究区耕地间隔 5 年的面积分别为 17 985.84,18 237.62,19

450.49, 16 859.53, 18 185.24, 14 353.72, 14 815.25 km², 占黄河中游多沙粗沙区总面积范围为 19%~25%, 呈先增加后波动式降低趋势, 其中退耕还林(草)工程实施为分界线。1990—2020 年耕地面积净减少 3 170.59 km², 减

少 17.63%。而退耕还林(草)工程实施 20 年来, 耕地面积净减少 4 635.24 km², 减少 23.83%, 耕地利用动态度为 -1.19%。说明退耕还林(草)等一系列国家生态工程的实施是耕地面积剧烈变化的主要驱动力。

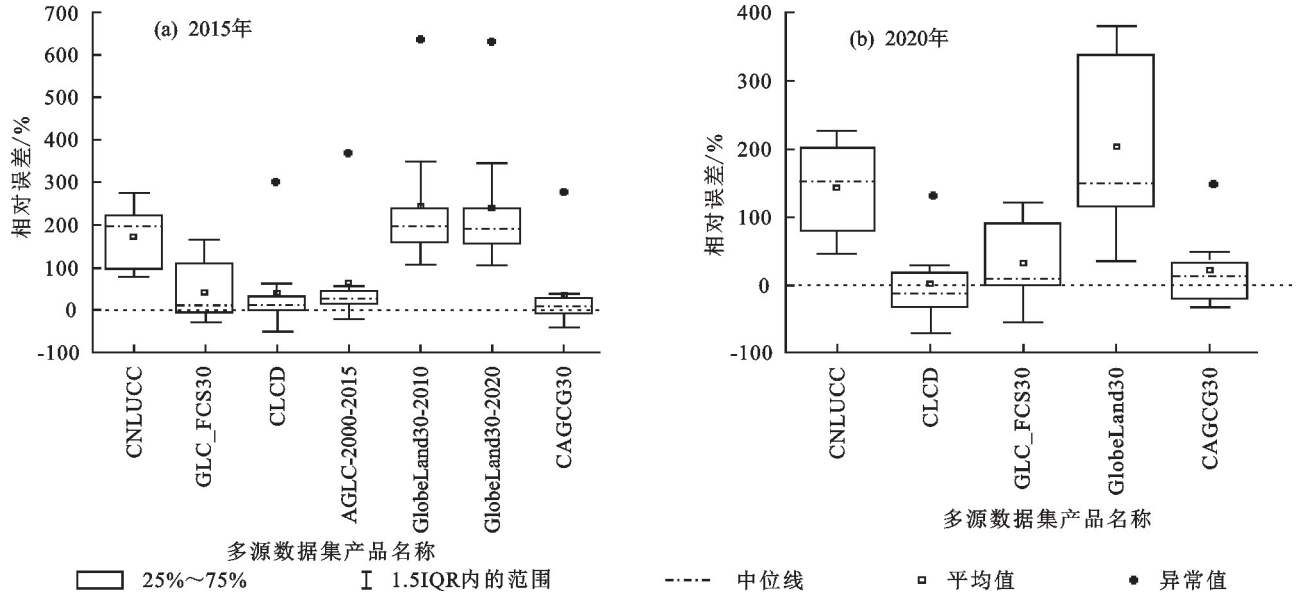


图 6 多源数据产品与验证数据各县(市)耕地面积相对误差箱线图

Fig.6 Boxplot of relative error in cropland area between multi-source products and validation data for each county (city)

2.5.2 耕地空间分布特征 黄河中游多沙粗沙区耕地主要分布在研究区中部, 包括榆林市东南部、吕梁市中部等地区。2020 年耕地面积相较其他年份明显减少(图 7)。

1990—2020 年, 85%以上的耕地分布在 1 500 m 海拔高度以下, 其中 60%以上的耕地分布在 900~1 300 m 的海拔高度, 在海拔偏低(<900 m)的地区

分布较小(9%以下)(图 8a)。65%以上的耕地分布在<15°的坡面, >25°的陡坡耕地占比较小, 在 7%以下。>15°的坡耕地面积占比在逐年减少, 减少 7.92%; 其中, >25°的陡坡耕地占比减少 2.81%(图 8b)。2000—2020 年, >15°的坡耕地面积净减少 2 317.56 km², >25°的陡坡耕地净减少 495.64 km², 主要与坡耕地退耕还林还草等生态政策的推进有关。

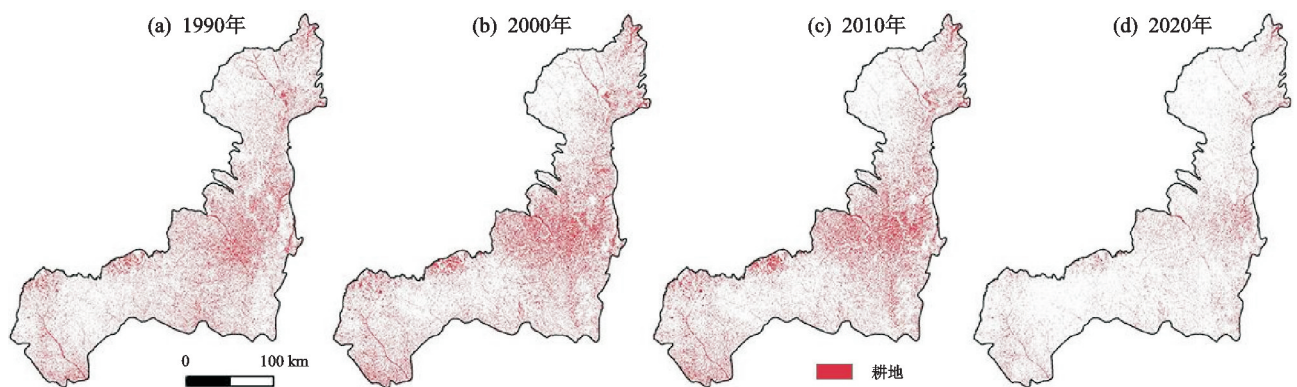


图 7 研究区耕地分布

Fig.7 Distribution of cropland in the study area

2.5.3 耕地转移特征 研究区耕地转移类型与面积见图 9。与 5 种多源数据集产品转移特征相似, 融合产品显示耕地动态转移类型也主要是草地, 1990—2000 年与 2010—2020 年耕地转出面积均在 6 000 km²以上。耕地转为人工地表的面积逐年增大, 这可能与快速城镇化背景下建设用地对耕地的占用有关。

耕地与草地的转化主要在 900~1 300 m 海拔高度和 5°~25°坡度的地区; 耕地转化为人工地表主要分布在海拔较低(900~1 100 m)、坡度小(0~5°)的平坦地区(图 10), 多集中在河流道路沿线。

3 讨论

不同的土地利用/覆被产品适用于不同的研究目

的,在不同的研究区域,产品的验证精度可能低于其官方公布的精度^[3-4]。本文获取的5种多源土地利用/覆被产品,就分类系统来说,除AGLC-2000-2015、GlobeLand30这2种产品对分类系统的个数和定义大体一致外,其余3种产品对地类的定义均有一定差异。例如,对于黄河中游多沙粗沙区的优势地类草地而言,CNLUCC和AGLC-2000-2015都将草地定义为草本植物为主的土地,但对覆盖度范围定义差异很大;CNLUCC将植被覆盖度高于5%的定义为草地,而AGLC-2000-2015将植被覆盖度高于10%的定义为草地,植被覆盖度在5%~10%则定义为裸

地。GLC_FCS30有30个精细分类,重分类容易受到研究者知识水平的影响^[3, 32]。例如,ZHENG等^[4]将“151 Sparse vegetation($fc < 0.15$)”重分类为林地,仝冉等^[33]则根据当地优势地类将其分为草地。有的学者^[4, 33-34]将该产品的“11 Herbaceous cover”重分类为耕地,WANG等^[3]则将其分类为林地;吴宗洋等^[9]将其重分类为草地。本文研究显示,黄河中游多沙粗沙区耕地的主要混淆类型为草地。因此,在未来研究中,改进并统一分类体系的定义,适当结合地形因子和植被物候信息等构建相对精确的训练样本是提高地类分类精度的重要方法。

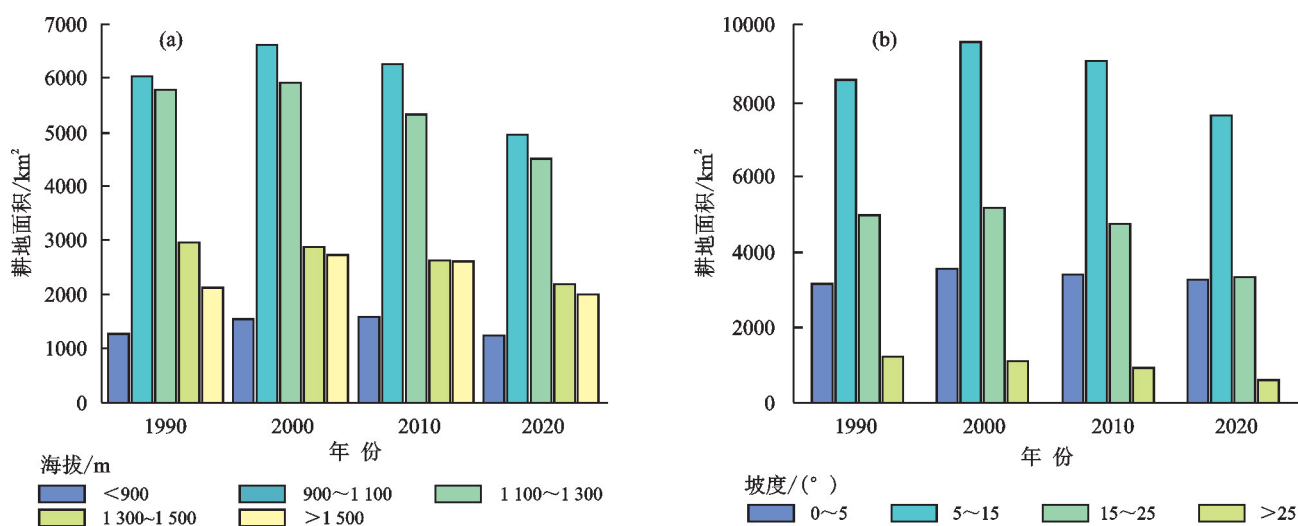


图8 研究区不同海拔和坡度等级下耕地面积

Fig.8 Cropland area under different elevation and slope grades in the study area

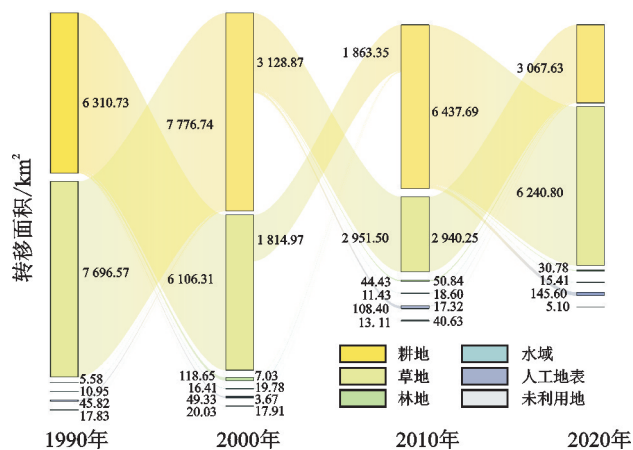
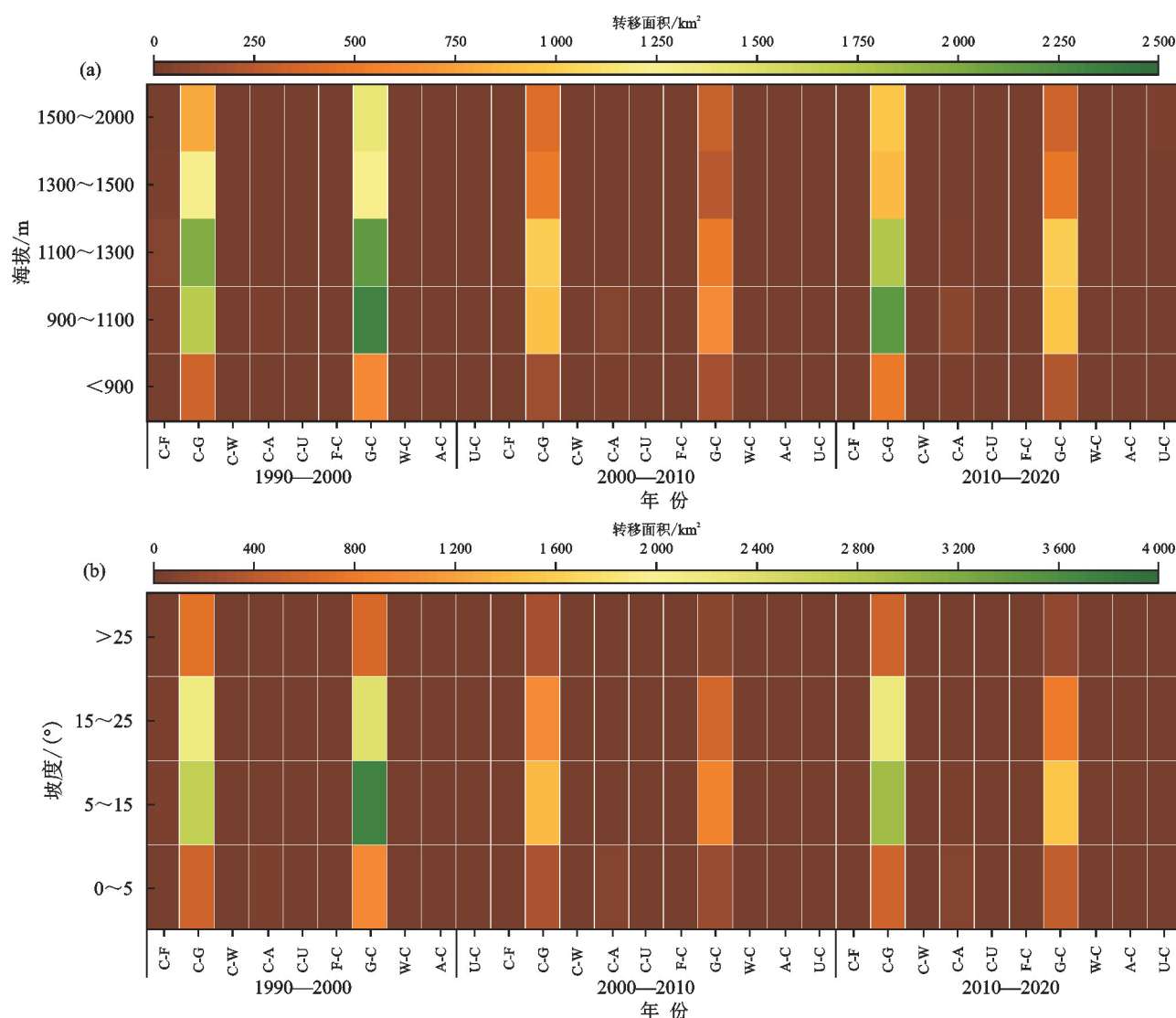


图9 研究区1990—2020年耕地转移特征

Fig.9 Characteristics of cropland transfer in the study area form 1990 to 2020

本文对比分析了5种产品的耕地在黄河中游多沙粗沙区的分类精度发现,CLCD、AGLC-2000-2015产品耕地分类精度较高,CNLUCC、GlobeLand30产品精度较低。这与陈逸聪等^[35]在长三角地区的评价结果一致($GLC_FCS30 > GlobeLand30$),但与吴宗洋等^[9]在黄河流域的评价结果($CLCD > GlobeLand30 >$

$GLC_FCS30 > CNLUCC$)有一定差异,但这2种结论均是针对其研究区所有地类的总体精度进行分析得出,且对地类的重分类方法与本文有差异。本文研究发现,形成的融合产品与验证数据一致性最高,且1990—2020年耕地面积变化趋势、主要转移类型与目前大多数针对黄河流域或黄土高原等较大范围研究区的研究结果基本一致^[17-18, 29, 36];退耕还林(草)生态工程实施等政策因素和城镇化建设等经济因素是导致1990—2020年黄河中游多沙粗沙区耕地减少的主要原因,与周书贵等^[37]、WANG等^[38]在黄土高原的研究结果基本一致,但本研究未考虑气候因子。本研究基于多源数据的高精度融合产品分析耕地数量、分布、转移特征,可为黄河中游多沙粗沙区的研究提供辅助决策支持,也可与其他区域土地资源的精确研究提供参考方法。在未来,研究者可以依据研究目的综合分析多源产品的优劣,探究更有效的方法基于目标地类融合和解释多源、多时间序列数据以研究某区域的地类特征,进而获得更为精确的研究结论。



注: C 为耕地 (cropland); F 为林地 (forest); G 为草地 (grassland); W 为水域 (waters); A 为人工地表 (artificial surfaces); U 为未利用地 (unused land); “-” 为地类之间的转移。

图 10 不同海拔和不同坡度下耕地转移面积

Fig.10 Cropland transfer area under different altitudes and slopes

4 结论

现有 5 种土地利用/覆被产品的耕地面积动态变化特征及转移特征差异较大,且其在黄河中游多沙粗沙区的空间一致性较低。整体而言,CLCD、AGLC-2000-2015 产品耕地精度相对较高,CNLUCC、GlobeLand30 精度较低。而融合产品 CAGCG30 精度均优于现有的 5 种产品,可信度较高;该产品依据研究目的综合对比分析 5 种产品耕地特征,并基于分析结果通过数据融合的方法挖掘多源数据集的优势,提高耕地精确度。因此,以高精度融合产品 CAGCG30 研究分析黄河中游多沙粗沙区耕地时空动态变化。

融合产品研究结果表明,1990—2020 年耕地面积呈先增加后波动式降低趋势,退耕还林(草)工程实施为分界线。1990—2020 年耕地面积净减少 3 170.59 km²,减少 17.63%。耕地面积在 2000 年增加到最高值 19 450.49 km²,在 2020 年减少到 14 815.25 km²,退

耕还林(草)等一系列国家生态工程的实施是耕地面积剧烈变化的主要驱动力。

耕地主要分布在研究区中部,包括榆林市东南部、吕梁市中部等地区。1990—2020 年,60%以上的耕地分布在 900~1 300 m 的海拔高度,65%以上的耕地分布在 <15° 的坡面,>25° 的坡面耕地占比在 7% 以下。>15° 的坡耕地面积占比在逐年减少,减少 7.92%;其中,>25° 的陡坡耕地占比减少 2.81%。2000—2020 年,>15° 的坡耕地面积净减少 2 317.56 km²,>25° 的陡坡耕地净减少 495.64 km²,主要与坡耕地退耕还林还草等生态政策的推进有关。

耕地的动态转移类型主要为草地,其次为人工地表,且耕地转为人工地表的面积逐年增大,说明退耕还林(草)等生态工程和城镇化建设是耕地减少的主要原因;耕地与草地的转化在 900~1 300 m 海拔高度和 5°~25° 坡面分布面积最大,耕地转为人工地表

则主要发生在海拔偏低(900~1 100 m)和坡度小(0~5°)的平坦区域。

参考文献:

- [1] 王金伟,孙洁,雷婷,等.中国粮食生产效率与旅游发展的耦合机制及时空分异[J].自然资源学报,2022,37(10):2651-2671.
WANG J W, SUN J, LEI T, et al. Coupling mechanism and spatiotemporal differentiation between grain production efficiency and tourism development in China[J].Journal of Natural Resources,2022,37(10):2651-2671.
- [2] 牛海鹏,赵晓鸣,肖东洋,等.黄河流域(河南段)耕地多功能时空格局演变及其权衡协同关系[J].农业工程学报,2022,38(23):223-236.
NIU H P, ZHAO X M, XIAO D Y, et al. Spatial-temporal pattern evolution and trade-off relationship of cultivated land multifunction in the Yellow River Basin (Henan Section)[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(23):223-236.
- [3] WANG H, YAN H M, HU Y F, et al. Consistency and accuracy of four high-resolution LULC datasets: Indochina Peninsula case study[J].Land,2022,11(5):e758.
- [4] ZHENG Q H, CHEN W, LI S L, et al. Accuracy comparison and driving factor analysis of LULC Changes using multi-Source time-Series remote sensing data in a coastal area[J].Ecological Informatics,2021,66:e101457.
- [5] HEISKANEN J. Evaluation of global land cover data sets over the tundra-taiga transition zone in northernmost Finland[J].International Journal of Remote Sensing,2008,29(13):3727-3751.
- [6] KAPTUE TCHUENTÉ A T, ROUJEAN J, DE JONG S M. Comparison and relative quality assessment of the GIC2000, GIOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2011,13(2):207-219.
- [7] HOU W, HOU X Y. Data fusion and accuracy analysis of multi-source land use/land cover datasets along coastal areas of the Maritime Silk Road[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2019,8(12):e557.
- [8] LIANG L, LIU Q S, LIU G H, et al. Accuracy evaluation and consistency analysis of four global land cover products in the Arctic region[J].Remote Sensing,2019,11(12):e1396.
- [9] 吴宗洋,蔡卓雅,郭英,等.黄河流域多源遥感土地覆被数据精度评价与一致性分析[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(6):917-927.
WU Z Y, CAI Z Y, GUO Y, et al. Accuracy evaluation and consistency analysis of multi-source remote sensing land cover data in the Yellow River Basin[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2023,31(6):917-927.
- [10] YANG J L, XIN Z B, HUANG Y Z, et al. Multi-source remote sensing data shows a significant increase in vegetation on the Tibetan Plateau since 2000 [J]. Progress in Physical Geography,2023,47(4):597-624.
- [11] ZHANG J X. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends[J].International Journal of Image and Data Fusion,2010,1(1):5-24.
- [12] CHEN S, LI Q, ZHONG W S, et al. Improved monitoring and assessment of meteorological drought based on multi-source fused precipitation data [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(3):e1542.
- [13] WANG H, WEN X J, WANG Y J, et al. China's land cover fraction change during 2001—2015 based on remote sensed data fusion between MCD12 and CCI-LC [J]. Remote Sensing,2021,13(3):e341.
- [14] CHEN B, HUANG B, XU B. Multi-source remotely sensed data fusion for improving land cover classification [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2017,124:27-39.
- [15] 殷宝库,苏鹏飞,张建国,等.1985—2020年黄河中游多沙粗沙区水土流失动态变化[J].水土保持通报,2021,41(5):123-126.
YIN B K, SU P F, ZHENG J G, et al. Dynamic changes of soil and water loss in rich and coarse sediment areas of middle Yellow River basin from 1985 to 2020[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2021,41(5):123-126.
- [16] 王敏,刘志刚,张攀,等.黄河中游多沙粗沙区水土流失治理面临的关键问题与发展对策[J].中国水利,2023(10):42-45.
WANG M, LIU Z G, ZHANG P, et al. Key issues and development strategies of soil and water loss control in the abundant and coarse sediment area of the middle Yellow River[J].China Water Resources,2023(10):42-45.
- [17] 王凤娇,梁伟,傅伯杰,等.近年来的黄土高原耕地时空变化与口粮安全耕地数量分析[J].干旱区地理,2020,43(1):161-171.
WANG F J, LIANG W, FU B J, et al. Spatial and temporal changes of cultivated land and quantitative analysis of ration safe cultivated land on the Loess Plateau in recent years[J].Arid Land Geography,2020,43(1):161-171.
- [18] 鲁亚楠,姚顺波,邓元杰,等.陕北地区土地利用及景观格局变化对生态服务价值的影响:基于退耕还林(草)背景[J].中国农业资源与区划,2019,40(11):180-192.
LU Y N, YAO S B, DENG Y J, et al. The effects of land use and landscape pattern change on ecosystem service values under the background of the sloping land conversion program in northern shaanxi[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2019,40(11):180-192.
- [19] 徐建华,高亚军,李晓宇,等.黄河中游多沙粗沙区治理对黄河水资源的影响[J].水土保持学报,2007,21(6):47-50.

- XU J H, GAO Y J, LI X Y, et al. Impact of controlling to sediment-laden and coarse sand area in middle Yellow River on water resource of lower Yellow River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 47-50.
- [20] 李素雅, 马红斌, 李红星, 等. 黄河中游多沙粗沙区基础边界数据集[J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2021, 6(3): 151-157.
- LI S Y, MA H B, LI H X, et al. The boundary dataset of high and coarse sediment yield in the middle reaches of the Yellow River[J]. *China Scientific Data*, 2021, 6(3): 151-157.
- [21] 李敏, 王白春, 许林军. 多沙粗沙区综合治理规划与减沙作用[J]. *人民黄河*, 2013, 35(10): 124-126.
- LI M, WANG B C, XU L J. Comprehensive control planning of the area with abundant and coarse sediment and the analysis of sediment reduction effect[J]. *Yellow River*, 2013, 35(10): 124-126.
- [22] ZHANG X, LIU L Y, CHEN X D, et al. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [23] 许晓聪, 李冰洁, 刘小平, 等. 全球 2000—2015 年 30 m 分辨率逐年土地覆盖制图[J]. *遥感学报*, 2021, 25(9): 1896-1916.
- XU X C, LI B J, LIU X P, et al. Mapping annual global land cover changes at a 30 m resolution from 2000 to 2015[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(9): 1896-1916.
- [24] CHEN J, CHEN J, LIAO A P, et al. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7-27.
- [25] 中华人民共和国自然资源部. 土地利用现状分类 (GB/T 21010—2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Current land use classification (GB/T 21010—2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [26] DONG J, YUN W, WU K, et al. Spatio-temporal analysis of cultivated land from 2010 to 2020 in Long'an county, Karst region, China[J]. *Land*, 2023, 12(2): e515.
- [27] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 81-87.
- WANG X L, BAO Y H. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 81-87.
- [28] 侯婉, 侯西勇. 全球海岸带多源土地利用/覆盖遥感分类产品一致性分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(7): 1061-1073.
- HOU W, HOU X Y. Consistency of the multiple remote sensing-based land use and land cover classification products in the global coastal zones[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(7): 1061-1073.
- [29] ZHOU X, ZHOU Y. Spatio-temporal variation and driving forces of land-use change from 1980 to 2020 in Loess Plateau of northern Shaanxi, China [J]. *Land*, 2021, 10(9): e982.
- [30] BOYER R S, MOORE J S. Mjrtv: A fast majority vote algorithm[M]. Springer Netherlands, 1991.
- [31] LIU Z J, WANG J Y, WANG X Y, et al. Understanding the impacts of 'Grain for Green' land management practice on land greening dynamics over the Loess Plateau of China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: e105084.
- [32] SU B F, NOGUCHI N. Discrimination of land use patterns in remote sensing image data using minimum distance algorithm and watershed algorithm[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2013, 6(2): 48-53.
- [33] 仝冉, 杨雅萍, 陈晓娜. 多源 30 m 分辨率土地覆被数据在蒙古高原的一致性分析和精度评价[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(12): 2420-2434.
- TONG R, YANG Y P, CHEN X N. Consistent analysis and accuracy evaluation of multisource land cover datasets in 30 m spatial resolution over the Mongolian Plateau[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2022, 24(12): 2420-2434.
- [34] HE S L, LI J, WANG J L, et al. Evaluation and analysis of upscaling of different land use/land cover products (FORM-GLC30, GLC_FCS30, CCI_LC, MCD12Q1 and CNLUCC): A Case Study in China[J]. *Geocarto International*, 2022, 37(27): 17340-17360.
- [35] 陈逸聪, 邵华, 李杨. 多源土地覆被产品在长三角地区的一致性分析与精度评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(6): 142-150.
- CHEN Y C, SHAO H, LI Y. Consistency analysis and accuracy assessment of multi-source land cover products in the Yangtze River Delta [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(6): 142-150.
- [36] SONG Y Y, XUE D Q, DAI L H, et al. Land cover change and eco-environmental quality response of different geomorphic units on the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 29-43.
- [37] 周书贵, 邵全琴, 曹巍. 近 20 年黄土高原土地利用/覆被变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(2): 190-199.
- ZHOU S G, SHAO Q Q, CAO W. Characteristics of land use and land cover change in the Loess Plateau over the past 20 years[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(2): 190-199.
- [38] WANG T, YANG M H. Land use and land cover change in China's Loess Plateau: The impacts of climate change, urban expansion and Grain for Green Project implementation[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(4): 4145-4163.