

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.024

陈乐, 卫伟. 多源土地利用产品在黄土丘陵沟壑区的精度评估[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):

CHEN Le, WEI Wei. Accuracy assessment of multi-source land use products in the Loess Hilly and Gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

多源土地利用产品在黄土丘陵沟壑区的精度评估

陈乐^{1,2}, 卫伟^{1,2,3}

(1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061)

摘要: [目的] 为评估多源土地利用产品在黄土丘陵沟壑区的精度。[方法] 以黄河二级支流关川河流域为例, 基于高精度 GCLUCC 土地利用数据, 从空间分布、面积特征、样本点精度和空间一致性 4 个方面评估空间分辨率为 10 和 30 m 的 6 种土地利用产品 (WorldCover 10 m、ESRI 10 m、GLC_FCS30-2020、GlobeLand30、CNLUCC 和 CLCD) 的准确性。GCLUCC 数据是基于 GF-2 (0.8 m)、DEM (5 m)、野外采样点 (6 400 个) 和 Google Earth 样本点 (2 320 个), 采用面向对象法和人工目视解译, 空间分辨率为 1 m, 整体精度超过 95%。[结果] (1) 分类特征方面, 多数产品能提取主要土地类别, 但提取效率和准确度存在明显差异, 特别是在耕地、林地和建设用地等地类的空间分布上; (2) 面积一致性上, 各产品与 GCLUCC 在不同地类的面积上存在显著差异。部分产品的草地面积是 GCLUCC 的 2 倍以上, 而林地和水域面积仅占 GCLUCC 的 0.13%~12.11% 和 1.41%~11.27%。 (3) 整体精度方面, GlobeLand30 和 WorldCover 10 m 展现较高精度, 空间图谱精度分别达到 58.21% 和 50.19%。而 CLCD 和 CNLUCC 的准确性相对较低, 其中, 林地与草地、耕地与草地以及建设用地与耕地间的分类混淆严重。 (4) 所有产品与实际地表间的空间误差显著, 尤其在对乔木、灌木、裸地和水体分类上面临挑战。[结论] 当前土地利用产品在黄土丘陵沟壑区精确表征地表覆盖特征方面存在挑战。未来的产品开发应更多地考虑地形和地理特征, 并加强对特定土地利用类型的识别。研究结果可为黄土高原生态保护和地表信息获取提供理论参考。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 土地利用/覆被产品; 精度评估; 面向对象分类

中图分类号: TP79

文献标识码: A

Accuracy Assessment of Multi-source Land Use Products in the Loess Hilly and Gully Region

CHEN Le^{1,2}, WEI Wei^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Field Scientific Observation and Research Station of Earth Key Belt in Shaanxi Loess Plateau, Xi'an 710061, China)

Abstract: [Objective] The study was aimed to assess the accuracy of multi-source land use products in the loess hilly and gully regions. [Method] Using the Guanchuan River Basin, a secondary tributary of the Yellow River, as a case study, this research evaluated the accuracy of six land use products with spatial resolutions of 10 and 30 m (WorldCover 10 m, ESRI 10 m, GLC_FCS30-2020, GlobeLand30, CNLUCC, and CLCD). The evaluation was based on high-precision GCLUCC land use data and focused on four aspects: spatial distribution, area characteristics, sample point accuracy, and spatial consistency. The GCLUCC data, with a spatial resolution of 1 m and an overall accuracy exceeding 95%, was derived from GF-2 (0.8 m), DEM (5 m), 6 400 field sampling points, and 2 320 Google Earth sample points, using an object-oriented approach and manual visual interpretation. [Results] (1) In terms of classification features,

收稿日期: 2023-11-12

修回日期: 2023-12-19

录用日期: 2024-01-23

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U21A2011; 41971129); 国家重点研发计划课题项目 (2022YFF1300403)

第一作者: 陈乐 (1993—), 女, 甘肃张掖人, 博士研究生, 主要从事景观生态与生态遥感研究。E-mail: 1113819261@qq.com

通信作者: 卫伟 (1978—), 男, 河南新乡人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事景观生态与生态水文研究。E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

most products could extract major land categories, but significant differences in extraction efficiency and accuracy were evident, especially in the spatial distribution of arable land, forest land, and construction land. (2) Regarding area consistency, significant variations were found between each product and GCLUCC in terms of area of different land categories. For instance, the grassland area in some products was more than double that of GCLUCC, while forest and water areas were only 0.13%~12.11% and 1.41%~11.27% of GCLUCC, respectively. (3) In terms of overall accuracy, GlobleLand30 and WorldCover 10 m showed relatively higher accuracy, with spatial map accuracy reaching 58.21% and 50.19%, respectively. In contrast, CLCD and CNLUCC had relatively lower accuracy, with significant classification confusion between forest and grassland, arable and grassland, and construction and arable land. (4) Significant spatial discrepancies existed between all products and the actual ground cover, particularly in the classification of trees, shrubs, bare land, and water bodies. [Conclusion] Current land use products face challenges in accurately characterizing surface cover features in the loess hilly and gully regions. Future product development should consider topographical and geographical features more thoroughly and enhance the identification of specific land use types. These results can provide a theoretical reference for ecological conservation and land resource information acquisition in the Loess Plateau.

Keywords: loess hilly and gully regions; land use/land cover products; accuracy assessment; object-oriented classification

Received: 2023-11-12

Revised: 2023-12-19

Accepted: 2024-01-23

土地是生态系统和社会经济的重要基石,其信息的精确性对资源管理和环境保护至关重要^[1-2]。在人工智能和遥感技术的推动下,新型土地利用产品不断涌现,其空间分辨率从 1 000 至 10 m 不等,覆盖范围从小流域到国家乃至全球尺度^[3-4],为可持续发展、生态安全和经济增长提供有力的数据支持。然而,产品在数据一致性、方法异质性、精度限制、应用局限性、标准化和资源需求以及环境和社会因素等方面面临诸多挑战^[1,5-6]。因此,严格评估和把控其精度显得尤为必要。

土地利用产品精度评估是探究地表分类准确性的核心环节。结合先进技术、精确数据和科学方法为决策者提供真实可靠的土地资源信息^[7-8]。评估方法主要包括基础地图法、专家判断法、统计学方法和机器学习技术^[9-10]。评估模型包括误差传播模型、变化检测模型和面向对象分析等^[11-12]。评估所依据的基准数据多样,包括地面观测、现场调查、Google 影像、高分辨率遥感影像及其他已发布的土地利用数据^[5-6]。然而,在评估过程中,样本点选择、土地利用产品的时空分辨率差异、分类方法的多样性、地面验证数据的准确性和影像质量问题等均可能导致评估结果出现误差^[5-6]。尽管努力提高土地利用产品的评估准确性,但仍面临诸多挑战。完全依赖 Google 或高分辨率遥感影像样本点的研究可能导致取样不足而引发误差;单纯依赖特定土地利用产品(如 30 或

10 m 空间分辨率)作为基准数据可能存在真实性问题;区域或流域尺度的研究常集中在平原地区,对复杂地形和破碎生境的丘陵沟壑区域的准确性尚未可知。

黄土丘陵沟壑区因其特有的地形特征和土地使用模式,在土地利用产品精度评估方面面临严重挑战^[13-14]。近年来,众多学者^[14]利用哨兵和 Landsat 影像发布多种较高分辨率(10~30 m)的土地利用产品。但因数据来源、分类方法、技术手段的差异及复杂地形的影响,产品在表征地表覆盖特征上存在显著差异。黄土高原西南缘的关川河流域是典型的黄土丘陵沟壑区,地形的高度碎片化特性构成对土地利用产品精度验证的重大挑战。因此,以关川河流域为典型案例,基于 GF-2 卫星图像、数字高程模型(DEM)数据、6 400 个野外样本点和 2 320 个 Google Earth 样本点,采用面向对象的分类技术结合人工视觉矢量化方法,制备一套高精度的土地利用数据(命名为 GCLUCC,空间分辨率为 1 m,流域及子流域精度均超过 95%)作为评估的基准数据。选择 WorldCover 10m、ESRI 10m、GLC_FCS30-2020、GlobleLand30、CNLUCC 和 CLCD 6 套国内外已发布的、认可度较高的土地利用产品作为被验证数据,从空间分布、面积特征、样本点精度和空间一致性 4 个方面进行综合评估,旨在为黄土丘陵沟壑区筛选优质的土地利用产品。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

关川河流域(35°17′—36°14′ N,104°11′—105°01′ E)位于黄土高原西南部,属于典型的黄土丘陵沟壑区^[15-16]。地貌主要由丘陵、沟壑和山谷组成(图 1)。该流域气候属中温带半干旱型,年均温 7.2℃,平均年降水量 370 mm,主要集中在 6—8 月,而年蒸发量超过 1 400 mm。由于地形破碎和生境脆弱,流域内面临干旱、少雨、弱产水和强产沙等多重生态挑战,水土流失问题严重,植被恢复困难。

在社会经济方面,该地区以农业为主,主要农作物有小麦、玉米和土豆。自 2000 年起,伴随社会经济发展和生态工程的推进,农耕模式发生显著转变^[17-18]。特别是机械化农耕梯田的建设和退耕还林政策的实施,不仅使耕地和林地面积显著增加,也深刻改变流域的地表覆盖特征。

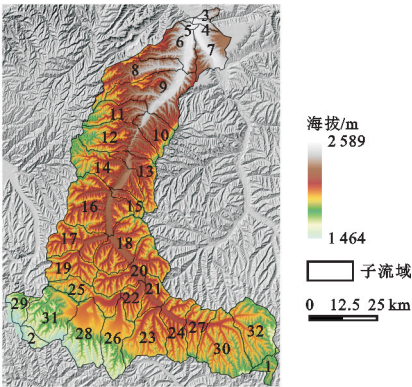


图 1 关川河流域地形

Fig. 1 Topographic map of the Guanchuan river basin

1.2 数据集

1.2.1 被验证土地利用数据集 6 套典型土地利用产品在数据源、分类系统、分类策略和精度方面各有特点。WorldCover 10 m(<https://esa-worldcover.org/en>)使用 Sentinel-1/2 卫星的多光谱及 SAR 数据,并结合机器学习算法和专家知识以及大量地面验证点,官方精度超过 74%。ESRI 10 m 基于 Sentinel-2 卫星图像,整体准确率达到 85%。GlobeLand30(<http://globeland30.org/>)通过 POK 方法和 Landsat 与 HJ-1 影像的融合,验证超过 15 万个样本点,全球整体准确率为 85.72%。GLC_FCS30-2020^[19]基于 GEE 平台构建和 Landsat 图像,结合全球训练数据集和 44 043 个验证样本点,全球整体准确率达到 82.5%。CNLUCC(<http://www.resdc.cn>)采用人工目视解译法记录土地利用变化,整体准确率超过 95%。CLCD^[4]基于 GEE 平台和 Landsat 数据,采用随机森林分类器,整体准确率为 80%。在分类系统方面,CNLUCC 以 6 个一级类别和 27 个二级类别对地表覆盖类型详细刻画。GLC_FCS30-2020 包含 10 个一级类别及 24 个二级类别。CLCD、WorldCover 10 m、ESRI 10 m 和 GlobeLand30 提供 9 至 11 个大类别。除 CNLUCC 外,其余产品在一级大类上均解译出耕地、乔木、灌木、草地、水域、建设用地和裸地。CNLUCC 数据在林地类型下细分出乔木、灌木、疏林地和其他林地 4 个二级类别。同时,CNLUCC 和 GLC_FCS30-2020 还在耕地中细分出旱地和水浇地 2 个类别。各产品的具体信息见表 1。

表 1 6 种土地利用产品主要信息

Table 1 Key information of 6 land use products

土地利用产品	卫星	年份	空间分辨率/m	方法	分类系统	总体精度
WorldCover 10 m	Sentinel-1/2	2020	10	POK 方法	11 个大类	74%
ESRI 10 m	Sentinel-2	2020	10	深度学习	10 个大类	85%
GLC_FCS30-2020	Landsat-8	2020	30	随机森林	10 个大类	83%
GlobeLand30	Landsat-8	2020	30	监督分类	24 个二级分类	86%
CNLUCC	Landsat-8	2020	30	人工目视解译	10 个大类	95%
CLCD	Landsat-8	2020	30	随机森林	6 个一级大类	80%

1.2.2 基准数据——GCLUCC 关川河流域核心的土地利用类型包括耕地、乔木、灌木、草地、水域、建设用地和裸地。为精确理解地类特性(表 2),进行广泛的野外考察和地理信息采集标注。研究区耕地类型包括旱地梯田和水浇地,考虑到二者在光谱特征、灌溉需求和作物种植方面的显著差异,在遥感影像解译时进行单独分类。在实地考察中发现,道路在各类土地利用中扮演着重要的分界线作用,因此,在影像分

类中被标注为独立类型。
取关川河流域的名称将创建的高精度土地利用数据集命名为 GCLUCC,其分类过程包括预分类准备、分类与结果验证 3 个核心阶段(图 2)。在预分类阶段,收集 2019—2021 年夏季的 10 幅 GF-2 卫星图像和 5 m 分辨率的 DEM 作为基础影像数据。在 2022 年夏季开展 40 天实地采样,收集 6 400 个野外样本点,并通过 Google Earth 采集 2 320 个 Google Earth 样本点。

表 2 关川河流域主要土地利用类型及其特征

Table 2 Major land use types and their characteristics in the Guanchuan river basin

地类	内涵	优势类型或特征
水域	表面水体覆盖	河流、湖泊、水渠
道路	用于运输通行的地面线路	具有平行边界、较大长度宽度比
川地	地面较平坦、坡度<2度的耕地	以蔬菜种植为主,集中分布
梯田	在丘陵坡地上修造的耕地面	平坦的田面,均匀的垄行,较宽阔的坡度
乔木	高大的树木,树干和冠层之间有明显的分隔	优势类型包括:杨树、柳树、华山松、冷杉、榆树、杏树、刺槐、柏树、桦树
灌木	矮生木本植物	以柠条为主
草地	自然生长或人为种植的草本植物	多分布在沟壑区、呈现均匀的绿色调,具有不规则或规则的纹理模式
建设用地	用于城市、农村和工矿等土地	形状特征明显,边界清晰,斑块较分散
裸地	表层为土质、岩石、石砾	缺乏植被覆盖

研究构建严格的分类体系,并采用面向对象的分

类手段与人工视觉矢量化结合的方式进行分层提取。在分类阶段将研究区划分为 32 个子流域进行分区分类。特别关注耕地、草地和林地的分布并不断强化和提取非耕地信息,逐层分离出非耕地层。结果验证阶段利用野外样本点、Google Earth 样本点和实地调查进行多方验证。包括类型、纹理特征、空间布局等,并进行必要的结果修正。关于梯田的利用情况,基于梯田图层,利用 DEM 边缘提取和人工视觉矢量化明确各梯田块的具体状态(种植或撂荒)。经过上述处理,GCLUCC 数据集的空间分辨率达到 1 m,流域及子流域总体精度均超过 95%,详见表 4、图 3。

1.3 分析方法

1.3.1 统一分类体系 考虑到被验证的土地利用产品在分辨率上的局限性,特别是在提取道路图层和区分耕地中的旱地梯田与水浇地方面的困难,在考虑优势类型情况下,使用 GCLUCC 的水浇地与道路图层作为掩膜层,从所有产品中排除水浇地和道路的分布区域。此外,为确保类型的整体一致性,研究以 GCLUCC 数据的分类代码为标准,统一各产品中每种类型对应的分类代码(表 3)。

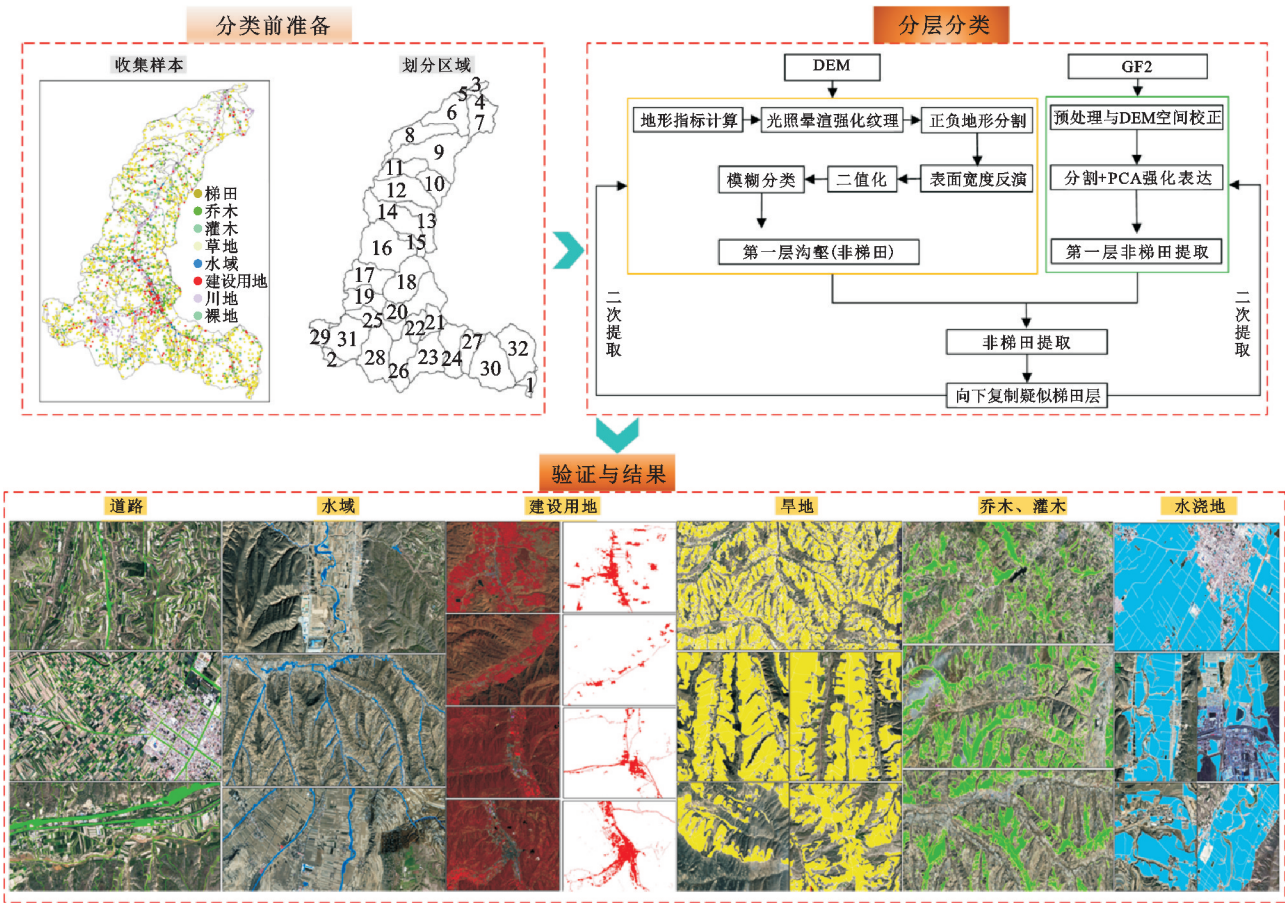


图 2 GCLUCC 数据集分类

Fig. 2 Classification framework of the GCLUCC dataset

表 3 多源土地利用产品地类代码

Table 3 Codes for land classes in Multi-source land use products

产品	耕地	乔木	灌木	草地	水域	建设用地	裸地
GCLUCC	1	2	3	4	5	6	7
WorldCover 10 m	40	10	20	30,90	80	50	60
ESRI 10 m	5	2	6	11	1	7	8
GLC_FCS30—2020	10	52,61,62,71,72	120,122	11 130 150	180,210	190	200,202
GlobeLand30	10	20	40	30	50,60	80	90
CNLUCC	12	21,23,24	22	31—33	43,46	51—53	65
CLCD	1	2	3	4	5,9	8	7

注:表中的耕地仅为旱地梯田,不包括水浇地。

1.3.2 混淆矩阵方法 混淆矩阵是评估土地利用产品精度的常用方法^[1],包括生产者精度(PA)、用户精度(UA)、总体精度(OA)和 Kappa 系数等指标。生产者精度衡量特定类别的正确识别率,用户精度反映分类结果的可靠性,总体精度表示整体分类的准确性,而 Kappa 系数则综合评估分类的准确性和一致性。各指标的计算公式为:

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii}}{N} \times 100\%$$
 (1)

$$PA = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \times 100\%$$
 (2)

$$UA = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \times 100\%$$
 (3)

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^n x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^n x_{i+} x_{+i}}$$
 (4)

式中: N 是样本的总数; n 是混淆矩阵的行数和列数; x_{ii} 是混淆矩阵中第 i 行和第 i 列的样本数; x_{i+} 和 x_{+i} 分别是第 i 行和 i 列的样本总数。

首先,利用混淆矩阵对 GCLUCC 数据进行基于野外和 Google Earth 样本点的精度验证,以确保其准确性和有效性。其次,使用样本数据和空间叠加技术,对 6 套土地利用产品进行样本点验证和空间类别

混淆验证,建立每个产品与 GCLUCC 间精确空间对应关系。最后,通过统计各土地利用类型的像素总数和进行空间混淆图谱分析,对各产品与 GCLUCC 间的土地利用类型进行定量的一致性和偏差评估。

2 结果与分析

2.1 GCLUCC 精度分析

在关川河流域及其 32 个子流域,对 GCLUCC 数据进行土地利用分类精度评估(表 4),GCLUCC 的总体精度(OA)和 Kappa 系数分别为 95.36% 和 0.947,表明总体精度和 kappa 系数在区分土地利用类型上具有极高的准确度。农田、草地、乔木和灌木的 UA 分别达到 97.56%,95.96%,94.93%,95.70%,凸显 GCLUCC 在关键类别上的精确分类能力。虽然存在耕地与建设用地、耕地与草地、草地与林地间的部分混淆误差,但小幅混淆并未显著影响 GCLUCC 的整体性能。

在各子流域中,GCLUCC 的总体精度(OA)均>95%,Kappa 系数在大多数情况下超过 0.94(图 3)。尤其在第 1 子流域和第 15 子流域,总体精度(OA)均>96.5%。即使在精度相对较低的第 4 子流域和第 25 子流域,Kappa 系数仍>0.935。结果表明 GCLUCC 数据能够准确地反映实际的土地利用类型,为土地利用产品验证、土地资源的监测与管理提供有力的技术支持。

表 4 GCLUCC 数据在关川河流域的整体分类精度

Table 4 Overall classification accuracy of GCLUCC data in the Guanchuan river basin

地类	耕地	建设用地	草地	乔木	水域	裸地	灌木	PA/%
耕地	3 432	64	50	34	0	0	8	95.65
建设用地	19	465	13	9	3	0	9	89.77
草地	33	15	2 112	18	0	0	4	96.79
乔木	22	18	15	1 329	0	0	9	95.41
水域	1	3	2	2	61	0	0	88.41
裸地	0	0	0	0	0	10	0	100
灌木	11	7	9	8	5	2	668	94.08
UA/%	97.56	81.29	95.96	94.93	88.41	83.33	95.70	95.36
OA/%					95.36			
Kappa					0.947			

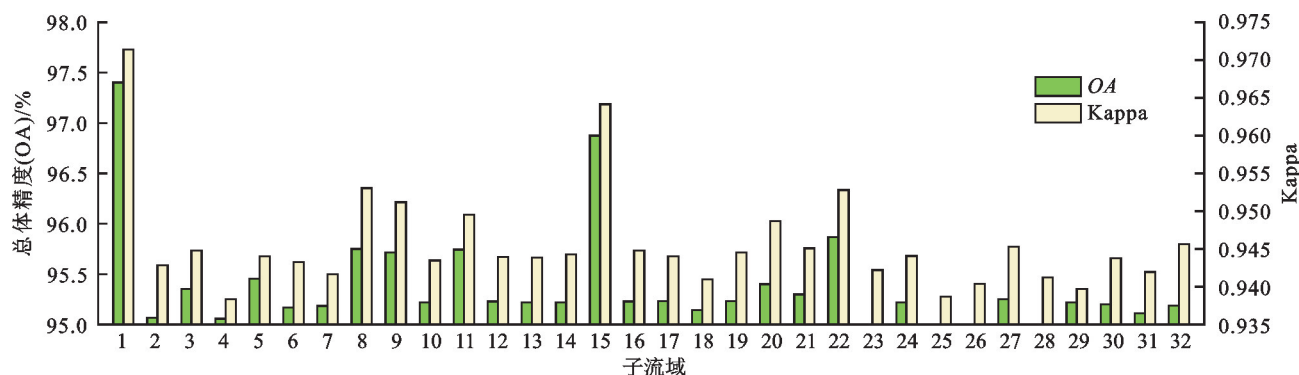


图 3 GCLUCC 数据在子流域的分类精度

Fig. 3 Classification accuracy of GCLUCC data in sub-watersheds

2.2 多源土地利用产品精度评估

2.2.1 空间分布与面积特征 各土地利用产品在关川河流域及 8 个面积较大的子流域(1:50 000 视图下)的空间分布见图 4。所有产品都能够识别耕地、林地、草地、水体和建设用地,但在空间精度、纹理特征和细节上存在显著差异。总体来看,GCLUCC 与 WorldCover 10 m 显示,耕地主要集中在流域的中南部,而北部分布稀疏;GLC_FCS30-2020 与 GlobeLand30 表明,耕地在流域内广泛分布。CNLUCC 中流域北部耕地分布密集,中南部较少,而在 ESRI 10 m 和 CLCD 中,耕地主要分布于南部。GCLUCC 展示林地的广泛分布,而其他产品中林地分布较为零散。此外,尽管所有产品都显示流域中部的建设用地分布具有一致性,但仅 GCLUCC 详细揭示乡镇及农村居民地的分布。

GCLUCC 数据显示,关川河流域的主要土地利用类型是耕地,占总面积的 42.88%,草地和林地分别占总面积 25.93%和 25.36%,而建设用地、水域和裸地占比较小。在 GLC_FCS30-2020、GlobeLand30 和 WorldCover 10 m 中,耕地面积是 GCLUCC 的 1.04~1.48 倍。而在 CNLUCC、CLCD 和 ESRI 10 m 中,草地是主要类型,其次是耕地。产品中的草地面积是 GCLUCC 的 2.272.94 倍。尽管大多数产品都进行林地、水域和建设用地的遥感解译。但各类型的面积仅占 GCLUCC 的 0.13%~12.11%,1.41%~11.27%和 2.88%~84.57%。

2.2.2 样本精度评价 由表 5 可知,GlobeLand30 在总体精度(OA)和 Kappa 系数方面表现最佳,分别达到 59.10%和 0.555,领先于其他产品。相比之下,CNLUCC 的总体精度和 Kappa 系数最低,分别为 37.79%和 0.320。在生产者精度(PA)方面,GlobeLand30 在耕地识别上表现最佳,PA 高达 95.92%,而其他产品的耕地 PA 为 38.93%~95.92%。草地

的 PA 在所有产品中均超过 58%,CLCD 中最高,达到 94.45%。建设用地在 ESRI 10 m 中的 PA 最高为 43.92%,但水域、乔木、灌木和裸地的 PA 在所有产品中均<5%。用户精度方面,各产品中耕地的 UA 均超过 51%。建设用地在 CLCD、GLC_FCS30-2020 和 WorldCover 10 m 中的 UA 分别为 81.25%,88.42%,86.15%,显示出较好的样本准确性。然而,大多数产品中灌木和裸地的 UA 为 0。样本精度显示不同产品在土地利用类型识别方面的差异和局限性。

2.2.3 空间一致性分析 空间类别混淆分析显示,在 6 种被验证的土地利用产品中,仅有 15.30%的像元类型是一致的,其中,草地和耕地分别占 10.84%,4.35%。叠加 GCLUCC 后,7 种土地利用产品中相同的像元类型降至 10.60%,草地和耕地分别占 7.10%,3.39%。表明产品间存在显著的空间图谱误差。在整体准确性方面(表 6),GlobeLand30 表现最好(OA = 58.21%,Kappa = 0.353),其次是 WorldCover 10 m(OA = 45.12%,Kappa = 0.288),而 CNLUCC 和 CLCD 的整体准确性相对较低。

在土地利用类型识别方面,现有产品面临 2 个主要问题。首先,无法全面识别所有类型,造成遗漏。从各类型的识别能力看,草地的识别能力最强(59.49%<PA<92.89%),其次是耕地和建设用地,但大多数产品中裸地和乔木的提取率极低,灌木提取率均为 0。其次,即使某类型被识别,解译的准确性也存在问题,导致错误分类。从高到低,各类型识别正确的能力排序为建设用地(51.43%~84.05%)>耕地(50.91%~67.9%)>水域(24.28%~63.42%)>林地(33.1%~64.01%)>草地(31.11%~42.55%)。结果揭示不同土地利用产品在识别和解译地类方面的局限性。

在空间类别混淆方面,各种土地利用类型间均存在不同程度的混淆(图 5),裸地主要被混淆为草地,如

CLCD 和 GLC_FCS30—2020 分别将 71.53%和46.71%的裸地混淆为草地,而 ESRI 10 m、CNLUCC 和 GlobleLand30 分别则将较大比例的裸地混淆为建设用地。耕地也是裸地的一种常见混淆类型,林地常被混淆为草地和耕地,其中 CLCD 在林地和草地混淆上最为严重,而 GLC_FCS30—2020 和 GlobleLand30 在林地和耕地混淆上较为显著。多数产品中水域和建设用地的主要混淆类型是耕地。另外,CLCD 将 64.24%的

水域和 60.95%的建设用地混淆为草地,WorldCover 10 m 则将 53.38%的水域和 37.85%的建设用地混淆为裸地。在耕地提取方面,WorldCover 10 m 和 Globle-Land30 相对准确,但草地是导致耕地面积被低估的主要因素。在 CLCD、CNLUCC、ESRI 10 m 和 GLC_FCS30—2020 中,草地也是耕地的主要混淆类型,导致实际耕地面积被显著低估。进一步揭示不同土地利用产品在识别和提取方面的挑战与局限。

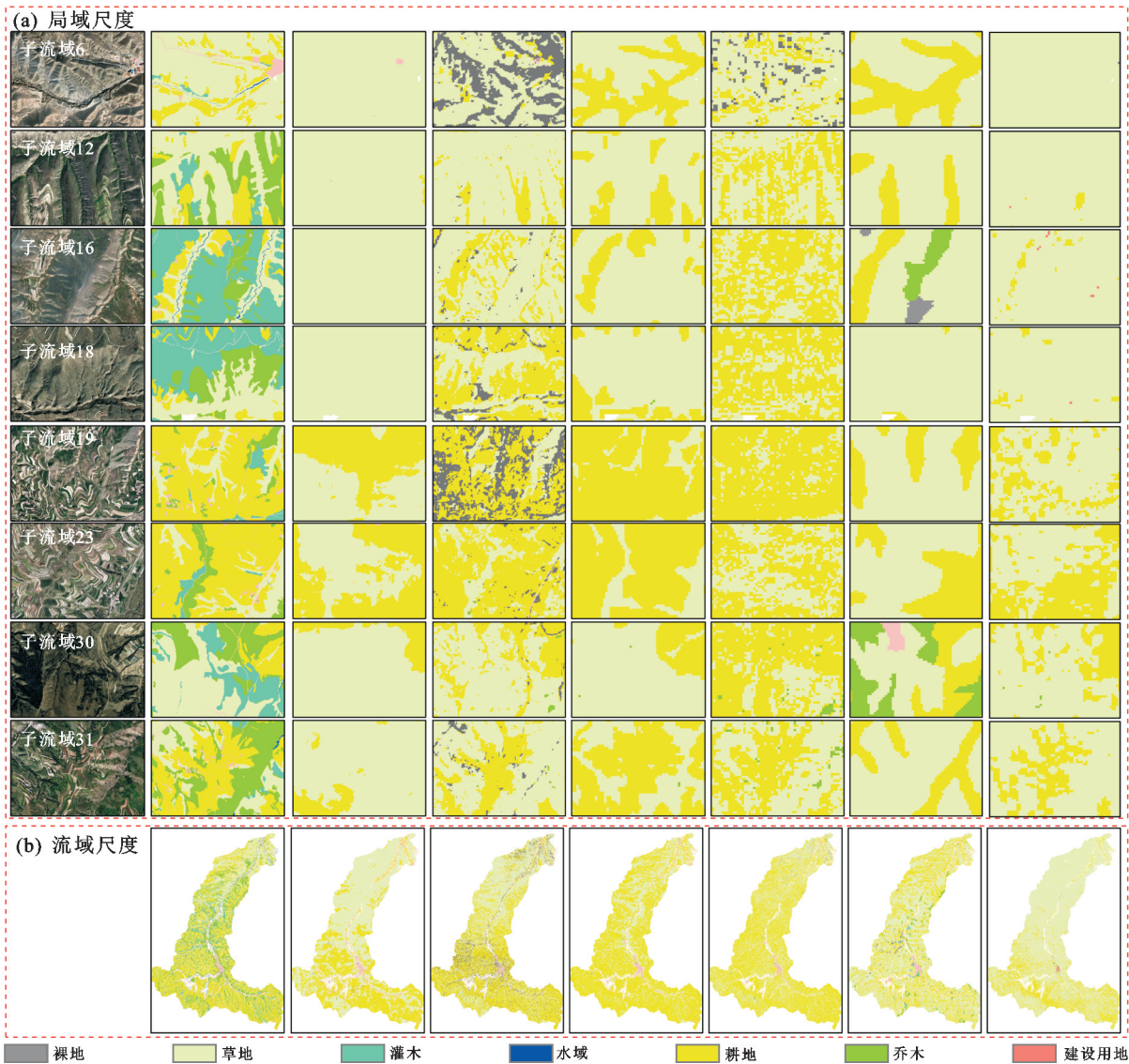


图 4 各土地利用产品在流域尺度和局域尺度下的空间异质性

Fig. 4 Spatial heterogeneity of various land use products at the basin and local scale

3 讨论

本研究以关川河流域为例,从空间分布、面积特征、样本点精度和空间一致性 4 方面评估 6 种土地利用产品在黄土丘陵沟壑区的精度。不同遥感数据源和处理技术对土地类别的识别有显著影响,尤其在山地和丘陵沟壑地区,微小的差异可能导致显著的分类偏差,与 CHEN 等^[5]、GRIFFITHS 等^[2]、YANG

等^[4]的研究结果一致。耕地由于其复杂的空间结构和高度异质性,在各产品中存在显著的不一致性,与 CAO 等^[20]研究结果相似。不一致性表现为某些产品中耕地分布密集,而其他产品中则分布稀疏,主要原因在于采用数据源的差异。因此,在生境破碎地区,高分辨率的遥感影像尤为重要^[21-22]。其次,地形对遥感解译有显著影响,甚至高于中等分辨率的遥感

影像,如 Landsat 和哨兵影像,在 HOPKINS 等^[23]和 DAI 等^[24]的研究有明显的体现,凸显复杂地形中土地利用类型分类的挑战。

另外,不同产品在识别不同土地覆盖类型方面存在显著差异。WorldCover 10 m 和 GlobleLand30 总体精度较高,而 CLCD 和 CNLUCC 相对较低,与丁晓彤等^[14]在黄土高原的研究结果不一致,后者认为 CNLUCC 的准确性更高,与吴宗洋等^[25]基于 Google Earth 验证点的验证结果也存在差异,后者认为 CLCD > GlobleLand30 > GLC_FCS30_2020 > CNLUCC-1000。造成差异的主要原因在于基准数据的准确性,本研究基于 GCLUCC 数据(空间分辨率为 1 m,OA>95%),后者分别基于 493 和 1 540 个野外或谷歌样本点。此外,研究还揭示地类面积一致性问题,尤其在林地、水域和建设用地比例方面。引发对特定土地利用类型面积可靠性的关注,差异受分类算法、地面真实数据质量和景观复杂性等因素的影响。

总之,大多数土地利用产品在丘陵沟壑区准确识别土地覆盖类型方面均面临挑战,特别是在区分草地和林地、耕地和草地、乔木和灌木等方面^[20]。不同产品间的空间一致性问题较复杂,存在明显的空间错误。本研究强调在环境管理中理解土地变化的重要性,同时,也强调在评估土地变化时需要谨慎选择数据源。未来的研究应重点关注改进分类算法和整合方法以解决不一致性问题,尤其是在复杂和异质的景观条件下。另外,土地利用产品的开发体现特定的技术路线和应用目标,各产品因为自身的特性使其应用的范围和目的也不尽相同。如仅仅在追求精细分类时,CNLUCC 和 GLC_FCS30-2020 是较优的选择。如果更多地考虑长时间序列时,CLCD 和 CNLUCC 更适用。若主要考虑精度时,WorldCover 10 m 或 GlobleLand30 则更适合。因此,在选择适宜的产品时需充分考虑研究目的、地域特性及所需的地类精度等级。

表 5 关川河流域各土地利用产品的样本验证精度

Table 5 Sample verification accuracy of land use products in the Guanchuan river basin											%	
地类	ESRI 10 m		WorldCover 10 m		CNLUCC		GLC_FCS30-2020		GlobleLand30		CLCD	
	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA
耕地	51.73	60.63	71.86	68.11	40.19	51.30	68.81	51.15	95.92	63.73	38.93	71.55
乔木	0	0	0.93	65.00	4.78	35.26	0.64	47.37	0.43	46.15	0.14	66.67
灌木	0	0	0	0	0.41	9.38	0	0	0	0	0	0
草地	78.39	34.10	72.75	43.05	73.48	30.97	58.74	36.78	64.83	49.86	94.45	31.92
水域	1.45	25.00	4.35	42.86	0	0	1.45	100.00	4.35	42.86	0	0
建设用地	43.92	62.92	21.96	86.15	16.08	43.16	16.47	88.42	28.82	67.12	2.55	81.25
裸地	0	0	50.00	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0
OA/%	44.79		50.68		37.79		45.35		59.10		41.08	
Kappa	0.396		0.452		0.320		0.403		0.555		0.373	

表 6 6 种被验证产品与 GCLUCC 的空间混淆分析

Table 6 Spatial confusion analysis of 6 validated products with GCLUCC											%	
地类	ESRI 10 m		WorldCover 10 m		CNLUCC		GLC_FCS30-2020		GlobleLand30		CLCD	
	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA
梯田	52.02	59.18	72.26	67.56	40.09	50.99	69.71	50.91	94.98	62.27	38.27	67.90
乔木	0.07	33.10	0.85	63.61	5.36	34.55	0.69	56.56	0.46	49.60	0.14	64.01
灌木	0	0	0	0	0.64	0	0	0	0	0	0	0
草地	78.30	34.42	71.45	42.55	73.45	31.11	59.49	37.72	64.90	49.94	92.89	31.64
水域	3.18	57.23	3.71	63.42	1.36	24.28	1.88	56.12	4.40	51.49	0.65	63.10
建设用地	41.09	60.24	22.28	82.00	19.48	51.43	18.35	89.97	27.20	67.31	2.00	84.05
裸地	2.17	0	52.50	0	0.69	0	2.08	0	0	0	3.47	0
OA/%	45.12		50.19		37.39		45.75		58.21		40.22	
Kappa	0.198		0.288		0.111		0.171		0.353		0.151	

注:ft 为 2 个数据集间的混淆关系。

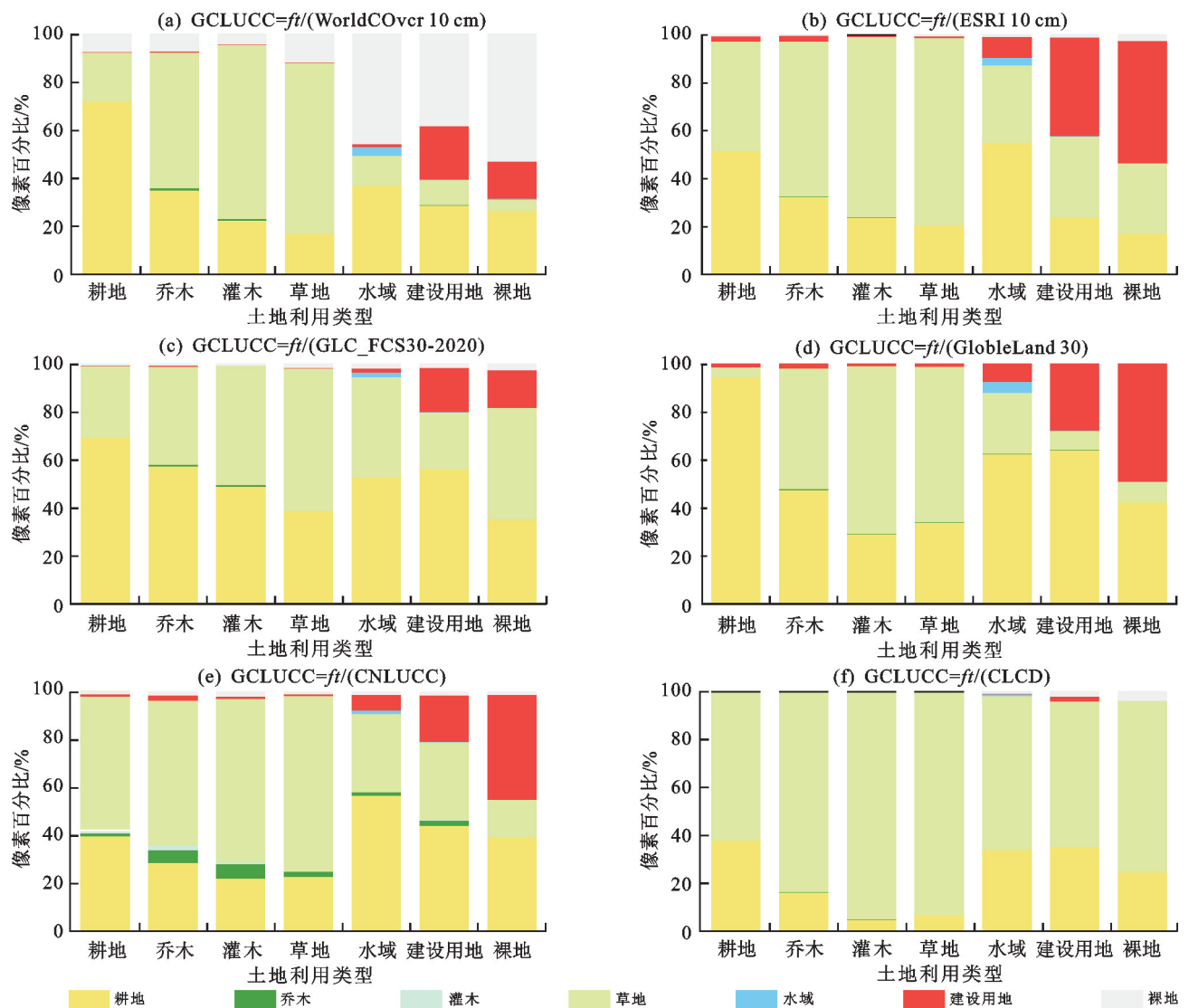


图 5 各产品与 GCLUCC 之间的地类空间混淆程度

Fig. 5 Spatial confusion of land use types between other products and GCLUCC

4 结论

各产品均能提取主要的土地类别,但其准确度和提取效率存在不同程度的差异,尤其在耕地、林地和建设用地等地类上。各产品中各地类的面积均与 GCLUCC 存在明显的差异。在整体精度方面, GobleLand30 和 WorldCover 10 m 相对优越,而 CLCD 和 CNLUCC 存在严重的分类混淆。另外,所有产品在空间准确性上都面临挑战,特别是对于乔木、灌木、裸地和水体的分类。研究凸显在丘陵沟壑地区准确地绘制土地利用类型的挑战性,强调在土地利用规划和生态系统管理中仔细筛选并改进特定土地覆盖识别技术的重要性。未来的土地利用产品开发应更多地考虑地形和地理特征,并加强对特定土地利用类型的识别,提升数据精准度为评估与决策提供更可靠的支持。

参考文献:

[1] YANG Y K, XIAO P F, FENG X Z, et al. Accuracy

assessment of seven global land cover datasets over China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 125: 156-173.

[2] GRIFFITHS P, NENDEL C, HOSTERT P. Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 220: 135-151.

[3] LIU H, GONG P, WANG J, et al. Production of global daily seamless data cubes and quantification of global land cover change from 1985 to 2020-iMap World 1.0 [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 258: e112364.

[4] 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.

[5] 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.

- [6] HUA T, ZHAO W, LIU Y, et al. Spatial consistency assessments for global land-cover datasets: A comparison among GLC2000, CCI LC, MCD12, GLOBCOVER and GLCNMO[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): e1846.
- [7] 李蓓蓓, 方修琦, 叶瑜, 等. 全球土地利用数据集精度的区域评估: 以中国东北地区为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(8): 1048-1059.
- LI B B, FANG X Q, YE Y, et al. Regional evaluation of global land use data set accuracy: A case study of Northeast China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2010, 40(8): 1048-1059.
- [8] 马京振, 孙群, 肖强, 等. 河南省 GlobeLand30 数据精度评价及对比分析[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(11): 1563-1572.
- MA J Z, SUN Q, XIAO Q, et al. Accuracy assessment and comparative analysis of GlobeLand30 dataset in Henan province[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(11): 1563-1572.
- [9] STEHMAN S V, WICKHAM J D, WADE T G, et al. Designing a multi-objective, multi-support accuracy assessment of the 2001 National Land Cover Data (NLCD 2001) of the conterminous United States[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2008, 74(12): 1561-1571.
- [10] STEHMAN S V, FOODY G M. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: e111199.
- [11] 史文中, 秦昆, 陈江平, 等. 可靠性地理国情动态监测的理论与关键技术探讨[J]. *科学通报*, 2012, 57(24): 2239-2248.
- SHI W Z, QIN K, CHEN J P, et al. Key theories and technologies on reliable dynamic monitoring for national geographical state[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 2239-2248.
- [12] 睦海刚, 冯文卿, 李文卓, 等. 多时相遥感影像变化检测方法综述[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 1885-1898.
- SUI H G, FENG W Q, LI W Z, et al. Review of change detection methods for multi-temporal remote sensing imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1885-1898.
- [13] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000-2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1568-1578.
- ZHAO A Z, LIU X F, ZHU X F, et al. Spatiotemporal analyses and associated driving forces of vegetation coverage change in the Loess Plateau[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(5): 1568-1578.
- [14] 丁晓彤, 孙文义, 穆兴民, 等. 多源土地利用/覆被产品在黄土高原应用和精度评估[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 201-210.
- DING X T, SUN W Y, MU X M, et al. Application and accuracy evaluation of multi-source land use/cover products on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 201-210.
- [15] 李海防, 卫伟, 邓居礼, 等. 关川河流域 1995-2010 年降雨特征及其水土流失效应[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 84-93.
- LI H F, WEI W, DENG J L, et al. Characteristics of precipitation and soil erosion from 1995 to 2010 in Guanchuan River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(6): 84-87, 93.
- [16] 赵传普, 徐学选, 陈天林, 等. 关川河流域土地利用变化对径流的影响[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 83-87.
- ZHAO C P, XU X X, CHEN T L, et al. Impact of land use changes on the streamflow in guanchuanhe watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 83-87.
- [17] 李海防, 卫伟, 陈瑾, 等. 定西关川河流域退耕还林还草对景观格局演变的影响[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 410-415.
- LI H F, WEI W, CHEN J, et al. Effect of grain-for-green project on evolution of landscape pattern in the Guanchuan River Basin, Dingxi[J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(3): 410-415.
- [18] 李玉婷, 张建军, 田宁宁, 等. 黄土高原半干旱区退耕还林对土壤微量元素的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 113-120.
- LI Y T, ZHANG J J, TIAN N N, et al. Effects of grain for green project on soil microelements in semi-arid area of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 113-120.
- [19] 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.
- [20] CAO B W, YU L, NAIPAL V, et al. A 30 m terrace mapping in China using Landsat 8 imagery and digital elevation model based on the Google Earth Engine[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(5): 2437-2456.
- [21] ZHAO H Q, FANG X, DING H, et al. Extraction of terraces on the Loess Plateau from high-resolution DEMs and imagery utilizing object-based image analysis[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(6): e157.
- [22] LUO L H, LI F Y, DAI Z Y, et al. Terrace extraction based on remote sensing images and digital elevation model in the Loess Plateau, China[J]. *Earth Science Informatics*, 2020, 13(2): 433-446.
- [23] HOPKINS A J, SNYDER N P. Performance evaluation of three DEM-based fluvial terrace mapping methods[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(8): 1144-1152.

- [24] DAI W, NA J M, HUANG N, et al. Integrated edge detection and terrain analysis for agricultural terrace delineation from remote sensing images[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2020, 34(3):484-503.
- [25] 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.