

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.001.

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 Xiaotong, SUN Wenyi, MU Xingmin, 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.

多源土地利用/覆被产品在黄土高原应用和精度评估

丁晓彤¹, 孙文义^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 赵广举^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 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:为准确掌握黄土高原土地利用/覆被的时空格局,基于6种不同来源的土地利用/覆盖数据产品, MCD12Q1, ESA-CCI-LC, GlobeLand30, GLASS, CAS-LUCC 和 ChinaCover,开展了黄土高原地区退耕还林(草)实施以来土地利用/地表覆被时空格局和转类特征的研究,对不同来源数据产品的精度进行了验证分析。结果表明:(1)分类特征和变化趋势上, MCD12Q1 和 GLASS 产品与其他产品的差异最大,其次为 ESA-CCI-LC 产品, GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品的差异相对较小。(2)除 MCD12Q1 产品外,不同来源土地利用/覆被产品各类型面积随时间变化趋势基本一致。(3)空间转类上, GLASS 产品与其他产品的差异最大,解译类型明显错误;其次为 MCD12Q1 产品,转林类和转草类也存在明显错误,退耕还林(草)特征表现不明显; ESA-CCI-LC 和 GlobeLand30 在黄土丘陵沟壑区退耕还林(草)的转类特征表现不足; CAS-LUCC 和 ChinaCover 退耕还林(草)特征明显。(4)抽样精度上, GlobeLand30, CAS-LUCC, ChinaCover 产品的总体精度最高,分别为 86.61% ($K=0.84$), 91.68% ($K=0.90$), 89.45% ($K=0.87$);其次为 ESA-CCI-LC (73.83%, $K=0.69$); MCD12Q1, GLASS 产品的精度最低,分别为 59.43% ($K=0.51$), 36.31% ($K=0.24$)。 (5)土地利用/覆被多源数据产品的融合有利于提高产品的精度,与融合前产品 GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 相比,融合产品总精度可提高了 2.25%~7.30%。 综上, CAS-LUCC 产品的精度最高,且 2000—2010 年退耕还林(草)表现与实际较为相符。

关键词:土地利用/覆被产品;退耕还林(草);精度验证;黄土高原

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0201-10

Application and Accuracy Evaluation of Multi-source Land Use/Cover Products on the Loess Plateau

DING Xiaotong¹, SUN Wenyi^{1,2}, MU Xingmin^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, ZHAO Guangju^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To accurately capture changes in spatial and temporal patterns of land use/cover on the Loess Plateau, based on six different sources of land use/cover data products, MCD12Q1, ESA-CCI-LC, GlobeLand30, GLASS, CAS-LUCC and ChinaCover, a study on the spatial and temporal patterns and transhape characteristics of land use/surface cover in the Loess Plateau region since the implementation of fallowing to forest (grass) was carried out, and the accuracy of data products from different sources was verified and analyzed. The results showed that: (1) in terms of classification characteristics and variation trends, MCD12Q1 and GLASS products were the most different from other products, followed by ESA-CCI-LC products, GlobeLand30, CAS-LUCC and ChinaCover products. (2) except for MCD12Q1 product, the trend of area

收稿日期: 2022-01-28

修回日期: 2022-05-10

资助项目: 国家自然科学基金“以水定植与水土流失控制目标下的植被斑块格局调控机制”(42177328)

第一作者: 丁晓彤(1998—), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文遥感。E-mail: 1048425690@qq.com

通信作者: 孙文义(1983—), 男, 山西忻州人, 博士, 副研究员, 主要从事生态水文遥感研究。E-mail: sunwy@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

change over time was generally consistent for all types of land use/cover products from different sources. (3) in terms of spatial classification, the GLASS product was the most different from other products, and the interpretation type was obviously wrong; the second was MCD12Q1 products; there were also obvious errors in the conversion of forest and grass, and the features of fallow forest (grass) were not obvious; ESA-CCI-LC and GlobeLand30 showed insufficient characteristics of conversion from farmland to forest (grassland) in the loess hilly-gully region; CAS-LUCC and ChinaCover had obvious characteristics of returning farmland to forest (grassland). (4) In terms of sampling accuracy, GlobeLand30, CAS-LUCC and ChinaCover products had the highest overall accuracy, which were 86.61% ($K=0.84$), 91.68% ($K=0.90$) and 89.45% ($K=0.87$), respectively. followed by ESA-CCI-LC(73.83%, $K=0.69$); the accuracies of MCD12Q1 and GLASS products was the lowest, which were 59.43% ($K=0.51$) and 36.31% ($K=0.24$), respectively. (5) the fusion of land use/cover multi-source data products was beneficial to improve the accuracy of the products; compared with the pre-fusion products GlobeLand30, CAS-LUCC and ChinaCover, and the total accuracy of the fusion products could be increased by 2.25%~7.30%. In conclusion, the accuracy of CAS-LUCC product has the highest accuracy, and the changes in the conversion of farmland to forest (grass) from 2000 to 2010 are more consistent with the changes in the vegetation pattern of the Loess Plateau.

Keywords: land use/cover products; returning farmland to forest (grassland); accuracy verification; Loess Plateau

土地利用/覆被变化是表征人类活动对地球表层系统影响的最直接的表现形式,是“国际地圈与生物圈计划”(IGBP)、“全球变化人文因素计划”(IHDP)、“全球土地计划”(GLP)等全球变化研究的核心内容^[1]。土地利用/覆被变化是陆地生态系统变化的直接驱动力^[2],是研究碳循环、水循环、生态系统服务功能和国土空间规划的基础^[3],土地利用/覆被产品的精度直接关系到区域或国家尺度土地利用时空格局和变化特征监测的准确程度,对于科学认识生态系统结构和功能,制定国土空间管控策略和可持续发展战略具有重要意义。

随着多源多时相多分辨率遥感影像资源的不断丰富,以及遥感分类处理技术的日臻完善,国内外不同学者或研究机构生产了不同用途、不同分类体系和不同时空分辨率的土地利用/覆被产品。由于遥感数据源、国家分类体系、地表土地利用/覆被复杂程度、产品服务对象、监测尺度的差异,形成了种类较多且精度不同的土地利用/覆被解译数据。目前主流的且应用较为广泛的土地利用/覆被产品,如 MODIS 土地利用/覆被数据^[4],更适用于大尺度的土地利用方式及变化的监测分析^[5];全国土地利用遥感监测数据产品(CAS-LUCC)将林地和草地做了进一步的细分,对研究植被变化、土地退化和荒漠化具有重要的意义^[6];碳专题土地覆被数据(ChinaCover)^[7]更具中国区域特色,主要应用于生态系统评估、陆地碳收支、水循环等方面^[8];中国 30 m 全球地表覆盖遥感制图数据产品(GlobeLand30)^[9],主要应用于土地利用与变化、城市扩张、生态多样性

领域^[10];全球陆表特征参量产品(GLASS)应用于环境变化、城市发展、土地调查、生态环境监测^[11]。这些土地利用/覆被产品被广泛使用,可以提供土地覆盖类别的面积或其随时间的整体变化。大量研究调查土地用途的变化或土地覆盖类,如全国土地利用遥感监测数据产品(CAS-LUCC)表明,2000年后,由于退耕还林工程实施,全国林地面积增加 $2.37 \times 10^5 \text{ hm}^2$,主要集中在黄土高原、南方丘陵区等;草地面积减少 $1.89 \times 10^6 \text{ hm}^2$,主要表现为西北草地开垦为耕地、南方草地转化为林地^[12]。碳专题土地覆被数据产品(ChinaCover)显示,2000—2010年全国林地增加集中在山西、陕西、贵州等退耕还林工程集中实施区^[13]。因土地利用/覆被产品数据源不同,针对同一地区土地利用/覆被时空格局和变化信息的研究存在较大差异,基于特定区域多源土地利用/覆被产品精度评估的研究目前相对较少。

由于气候、物候和人类活动的影响,土地利用与土地覆盖是动态变化的,给土地利用与覆被监测和相关定量分析带来了巨大的挑战^[14]。数据源、分类系统、时空分辨率和制图方法的差异导致制图结果一致性差,缺乏可比性^[15]。不同的土地利用/覆被产品有其各自的适用性和解译精度,但很少有研究考虑其对特定应用的适用性。图像分类往往产生很大的偏差,导致与土地利用/覆盖相关的评估结果和模型模拟结果的不确定性。图像分类的不确定性可能会影响结论的准确性和真实性。因此,在使用土地利用/覆盖产品之前,必

须考虑数据本身的准确性是否能够满足我们评估的需要,否则可能会得出与实际不相符的结论。

黄土高原地形地貌复杂,土地利用类型变化多样,由于长期不合理的人类活动,黄土高原成为中国乃至世界水土流失最严重的地区^[16]。为扭转水土流失恶化的局面,黄土高原先后实施了一系列重大生态建设工程,如坡改梯、淤地坝建设、退耕还林(草)等^[17],其土地利用/覆被格局发生了重要改变。大量研究评估了土地利用/覆被变化对气候、生态和水文过程的影响,但很少有研究关注土地利用/覆被产品对其结果造成的不确定性^[18]。因此,开展黄土高原地区不同来源土地利用/覆被格局变化特征和数据精度评估研究十分必要。本研究以黄土高原为研究区,对 6 种不同来源的土地利用/覆被数据进行对比分析和精度评估,为准确掌握黄土高原土地利用/覆被时空格局研究提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

黄土高原位于黄河流域中部(100°54′—114°33′E, 33°43′—41°16′N),总面积约 $6.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。黄土高原地形复杂、沟壑纵横,地势西北高东南低,主要地形地貌类型有黄土丘陵沟壑区、黄土高塬沟壑区、河谷平原区、风沙区和土石山区^[19]。植被类型从东南到西北呈带状分布,依次为森林植被带、森林草原植被带、典型草原植被带、荒漠草原植被带、草原荒漠带^[8]。黄土高原地处干旱与半干旱气候区,加之人为干扰剧烈,生态破坏严重,植被覆盖率低。20 世纪 90 年代末,随着退耕还林草工程的实施,黄土高原进入

植被大规模快速恢复和重建的时期^[20],侵蚀面积从 $4.216 \times 10^5 \text{ km}^2$ 减少至 $2.662 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

1.2 数据来源

收集整理了国内外 6 套应用最为广泛的土地利用/覆被数据产品,用于比较分析各类产品分类体系、时空分辨率、分类精度差异和各自特点。数据产品包括:MODIS 土地利用与覆被产品(MCD12Q1)、欧空局全球陆地覆盖数据(ESA-CCI-LC)、国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据(GlobeLand30)、全球陆表特征参量产品(GLASS)、中国科学院全国土地利用遥感监测数据产品(CAS-LUCC)、碳专题土地覆盖数据(ChinaCover)。MODIS 地表覆盖数据集包含两个版本,即 MOD12Q1(1 km 空间分辨率)和 MCD12Q1(500 m 空间分辨率),本文选择了较高分辨率的产品 MCD12Q1。欧空局提供两种类型的全球陆地覆盖数据集,即 CCI-LC 和 GlobCover,本文选取了长序列的且应用较为广泛的 CCI-LC 数据集。GlobeLand30 是中国提供给联合国用于全球变化研究的 30 m 空间分辨率的全球高分辨率土地覆盖产品。GLASS 产品是利用谷歌地球引擎(GEE)平台开发的 1982—2015 年 5 km 分辨率的全球土地覆盖年动态产品。CAS-LUCC 是 20 世纪 80 年代末至 2015 年覆盖中国的 5 期 30 m Landsat TM 影像研发的,它的分类系统为 6 个一级类和 25 个亚类,为中国土地利用分类的标准体系。ChinaCover 与 CAS-LUCC 空间分辨率和遥感数据源一致。ChinaCover 数据集的分类系统是针对土地覆被进行的分类,用以提供生态系统碳收支服务,在植被分类特征上更为详细(表 1)。

表 1 不同土地利用/覆盖数据简要介绍

序号	产品名称	空间分辨率/m	分类系统	数据来源
1	MODIS 土地覆盖数据(MCD12Q1)	500	Type1 IGBP 17 类	NASA Land Processes Distributed Active Archive Center(https://lpdaac.usgs.gov)
2	欧空局全球陆地覆盖数据(ESA-CCI-LC)	300	LCCS 22 类	ESA Data User Element (http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php)
3	国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据(GlobeLand30)	30	10 大类	国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(http://www.globallandcover.com/)
4	全球陆表特征参量产品(GLASS)	5000	10 大类	国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
5	中国科学院土地利用遥感监测数据(CAS-LUCC)	30	6 个一级大类 27 个二级分类	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
6	碳专题土地覆盖数据(ChinaCover)	30	LCCS 6 个一级大类 38 个二级分类	寒旱所科学大数据中心(http://bdc.casnw.net/sjfw/sjk/index.shtml)

1.2.1 数据处理 6 套土地利用/覆被产品分类体系存在较大差异,针对不同数据来源产品分类体系共同

点和差异性,参照全国土地利用遥感分类系统标准,以及满足不同领域应用需求,为对比不同产品在黄土

高原地表覆盖特征的表达能力,将6套土地利用/覆被产品分类体系按一级大类分为6类:耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和其他用地。土地利用/覆被产品统一坐标系统为Krasovsky_1940_Albers等面积投影,并将不同空间分辨率的土地利用/覆被产品数据统一转换成30 m空间分辨率,用于对比分析。转换方式以300 m转30 m为例,见图1。

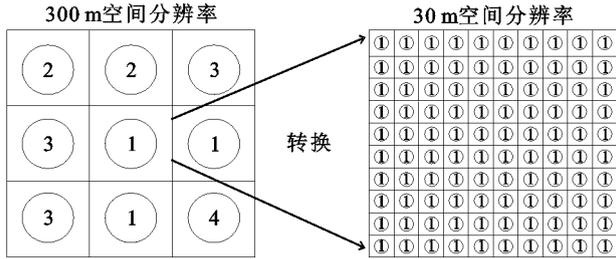


图1 空间分辨率的转换

1.2.2 土地利用/覆被时间变化趋势 土地利用/覆被产品来源不同,解译起始年份和时间分辨率差异较大。为便于对比分析土地利用变化趋势,用于反映不同产品在黄土高原退耕还林(草)时期土地利用变化的识别能力,本文以2000年为起点,一是分析黄土高原不同来源产品土地利用类型面积的变化趋势,二是分析退耕还林(草)典型时期土地利用的转类特征,重点分析退耕还林、退耕还草、建筑扩张、水域变化等主要特征。

1.2.3 土地利用/覆被时空变化特征 土地利用/覆被产品由于空间分辨率和解译侧重不同,空间分布特征差异较大。为了对比分析不同来源土地利用/覆被产品空间分布与变化特征差异,以相同年份最多为原则,选用了2010年产品数据,分析不同来源产品土地利用空间分布差异和各产品的优缺点。选用2000—2010年不同来源产品土地利用空间转类变化分析土地利用/覆被时空变化特征,重点关注退耕还林、退耕还草、建筑扩张、水域变化特征。

1.2.4 土地利用/覆被产品精度验证 采用高分影像与野外实地调查相结合手段,通过对土地利用/覆被产品进行空间抽样检查(图2),验证土地利用和地表覆被分类的准确性。抽样单元是通过谷歌地球上高分辨率图像的解译和结合现场调查收集的。精度度量是基于等面积空间单元样本的地图类和参考类之间的空间显式比较来估计的。考虑到不同来源产品影像分辨率和精度准确性问题,样点选用3~5 km²面积的均质地类作为验证样本来检验各分类产品精度,其中耕地、林地、其他用地采集了81个样点,草地83个样点,水域85个样点,城乡工矿居民用地

82个样点,共493个验证样点(图2)。精度评价方法为总体精度(Overall Accuracy, OA)、产品精度(Producer Accuracy, PA)、用户精度(User Accuracy, UA)和Kappa系数(K)的角度评价土地利用/覆被产品的质量,其计算公式分别为:

$$OA = \frac{X}{Y} \times 100\% \quad (1)$$

$$PA_i = \frac{X_i}{Y_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$UA_i = \frac{X_i}{Z_i} \times 100\% \quad (3)$$

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

式中:OA为总体精度,是指所有被正确识别的像元数X与总样本量Y的比值;PA_i为某地类i的产品精度;X_i为被正确识别为第i类地物的像元个数;Y_i为实际为i第类地物的样本量;Z_i为被分为第i类地物的样本量;UA_i为某地类i的用户精度^[21];N为参与评价的样本总数;n为矩阵中行列数;x_{ii}为矩阵中第i行、第i列上的样本数;x_{i+}和x_{+i}分别为第i行和第i列的样本总数^[22]。

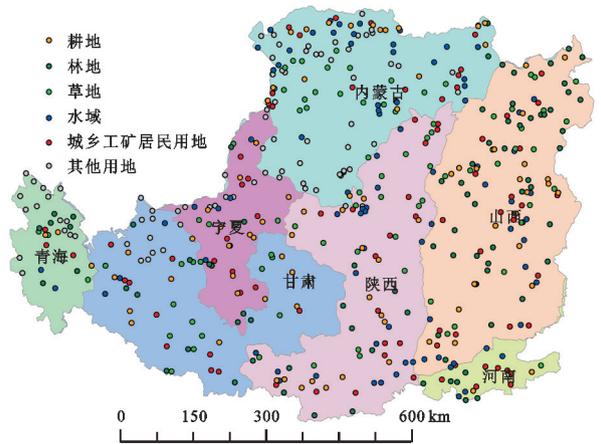


图2 样点空间分布

1.2.5 土地利用/覆被数据融合产品 以土地利用/覆被分类精度较高的3套产品GlobeLand30, CAS-LUCC和ChinaCover为基础,以耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和其他用地六大类土地利用为分类体系标准,以30 m空间分辨率为栅格单元,采用Krasovsky_1940_Albers坐标系,将同一栅格单元中2套及以上土地利用类型相同的地类作为该栅格单元的土地利用类型;若3套土地利用类型均不相同,则以精度最高的土地利用/覆被产品的土地利用类型为准,基于以上标准合成一套高精度的土地利用/覆被数据融合产品。

2 结果与分析

2.1 不同来源土地利用/覆被产品分类体系特征

土地利用/覆被产品数据源不同,分类体系存在较大差异(表 1)。各产品分类数量上,分类最为详细的是 ChinaCover 产品,6 个一级大类 38 个二级分类;其次为 CAS-LUCC,6 个一级大类 27 个二级分类;GlobeLand30 和 GLASS 分类数量最少,将地类划分为 10 大类。

各产品分类特点上,MCD12Q1,ESA-CCI-LC 和 ChinaCover 分类体系侧重于地表覆被类型,尤其对植被(林地和草地)的分类更为详细,如林地分类不仅体现在乔木林、灌木林的差异,还体现为针叶林、阔叶林还是混交林,甚至细分为常绿还是落叶。GlobeLand30,GLASS 和 CAS-LUCC 分类体系侧重于土地利用类型,对水域、城乡工矿居民用地以及其他用地的分类更为详细。

各产品地类差异上,耕地分类,CAS-LUCC 分类详细,将耕地分为水田、旱地,并进一步细分为山区、平地。林地分类,MCD12Q1,ESA-CCI-LC 和 ChinaCover 分类详细,MCD12Q1 和 ChinaCover 依据林种分为乔木林和灌木林;ESA-CCI-LC 依据林种的面积占比进行分类。草地分类,MCD12Q1 和 ChinaCover 根据草地类型的不同进行分类;ESA-CCI-LC 和 CAS-LUCC 根据草地覆盖度进行分类。城乡工矿居民用地和其他用地类型,CAS-LUCC 和 ChinaCover 分类详细,体现为 CAS-LUCC 和 ChinaCover 将城乡工矿居民用地分为居民用地、工业用地、交通用地等,而其他产品仅分为一类;其他用地细分为沙地、盐碱地、冰川、永久积雪、苔原、裸地等,其他产品分为 2~3 类。

2.2 不同来源土地利用/覆被产品各类面积差异与变化趋势

土地利用/覆被产品来源不同,各类面积存在较大差异(图 3)。耕地面积表现为 MCD12Q1 产品与其他产品的分类面积差异最大;ESA-CCI-LC, GlobeLand30, GLASS 产品之间差异相对较小;CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品差异相对较小。如 2000 年退耕还林(草)实施初期,MCD12Q1 耕地面积为 $1.323 \times 10^5 \text{ km}^2$ (21.2%);ESA-CCI-LC, GlobeLand30, GLASS 产品耕地面积分别为 $2.265 \times 10^5 \text{ km}^2$ (36.09%), $2.438 \times 10^5 \text{ km}^2$ (38.85%), $2.567 \times 10^5 \text{ km}^2$ (40.84%);CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品耕地面积为 $2.081 \times 10^5 \text{ km}^2$ (33.23%) 和 $2.107 \times 10^5 \text{ km}^2$ (33.74%)。2010 年退耕 10 a 后,MCD12Q1 耕地面积为 $1.459 \times 10^5 \text{ km}^2$ (23.30%);ESA-CCI-LC, GlobeLand30, GLASS 产品

耕地面积分别为 $2.242 \times 10^5 \text{ km}^2$ (35.72%), $2.396 \times 10^5 \text{ km}^2$ (38.18%), $2.376 \times 10^5 \text{ km}^2$ (37.81%);CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品为 $2.004 \times 10^5 \text{ km}^2$ (32.01%), $1.994 \times 10^5 \text{ km}^2$ (31.93%)。

林地和草地面积各类产品具有相似的特征。林地面积表现为 MCD12Q1 产品(6.05%)与其他产品的分类面积差异最大;其次为 ESA-CCI-LC(11.30%)、GLASS (10.93%)产品;GlobeLand30(16.62%)、CAS-LUCC (16.70%)和 ChinaCover 产品(19.29%)差异相对较小。草地面积表现为 MCD12Q1 产品(65.89%)明显高于其他产品;其次为 ESA-CCI-LC (49.64%)、GLASS (44.40%)产品;GlobeLand30 (37.33%)、CAS-LUCC(39.70%)和 ChinaCover 产品(38.33%)差异相对较小。

水域面积表现为 CAS-LUCC 产品水域面积最大(1.39%),约为其他产品平均水域面积的 2 倍,MCD12Q1 产品的水域面积最小(0.12%)。城乡工矿居民用地表现为 GLASS 产品(0.29%)低于其他产品(0.99%~3.12%)。其他用地类型 ChinaCover 产品(6.37%)和 CAS-LUCC(6.67%)明显高于其他产品(1.84%~4.16%)。

土地利用/覆被产品在变化趋势上,除 MCD12Q1 产品外,其余产品各类型面积随时间变化趋势基本一致,表现为耕地、草地和其他用地类型面积呈减少趋势,林地和水域面积呈上升趋势,城乡工矿居民用地呈急速上升趋势。

土地利用/覆被产品来源不同,转类面积也存在较大差异(图 4)。以退耕还林草初期 2000 年到退耕 10 年 2010 年为例,ESA-CCI-LC 产品转林地面积最小,为 $2.41 \times 10^3 \text{ km}^2$;GLASS 产品转林地面积最大,为 $2.226 \times 10^4 \text{ km}^2$;MCD12Q1, GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品转林地面积差异较小,分别为 7.28×10^3 , 9.18×10^3 , 7.98×10^3 , $7.36 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。GLASS 产品转草地面积最大,为 $7.207 \times 10^4 \text{ km}^2$;ESA-CCI-LC 和 GlobeLand30 转草地面积相似,分别为 4.27×10^3 , $4.51 \times 10^3 \text{ km}^2$;MCD12Q1, CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品转草地面积差异较小,分别为 1.167×10^4 , 1.261×10^4 , $9.21 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

GLASS 产品建筑面积扩张最小,为 $1.13 \times 10^3 \text{ km}^2$, CAS-LUCC 建筑面积扩张最大,为 $6.61 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。MCD12Q1,ESA-CCI-LC 和 GLASS 产品水域面积呈增加趋势,分别增加 1.89×10^3 , 1.1×10^2 , $1.2 \times 10^2 \text{ km}^2$;GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 水域面积呈下降趋势,分别减少 1.5×10^2 , 2.5×10^2 , $1.126 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

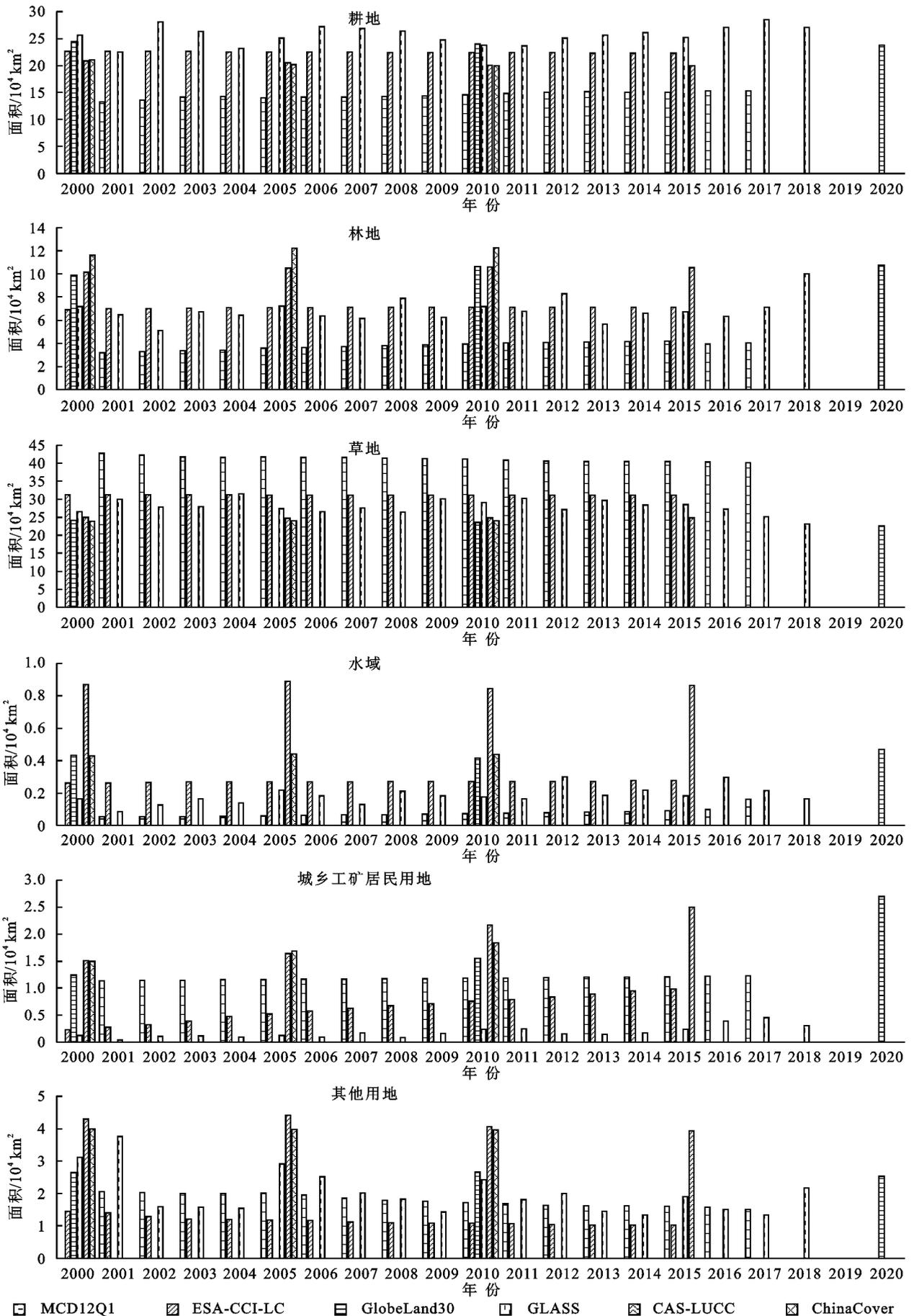


图3 6组产品不同土地利用类型面积对比

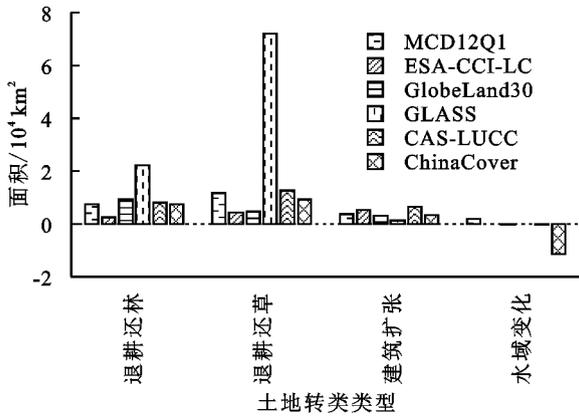


图 4 6 组产品不同土地利用类型转类面积对比

2.3 不同来源土地利用/覆被产品空间分布特征

以 2010 年数据产品为例,分析不同来源土地利用/覆被产品的空间分布特征及其差异(图 5)。MCD12Q1

产品与其他产品的差异最大,MCD12Q1 将黄土高原中部地区大面积耕地与林地解译为草地,陕西、山西、青海境内的林地也解译为草地。其次为 GLASS 产品,黄土丘陵沟壑区与高原沟壑区耕地与草地、耕地与林地镶嵌式的分布特征没有体现,表现为耕地连片化集中分布特征,林地面积解译不足,特别是林区的分布与其他产品差异较大。ESA-CCI-LC, GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品的空间分布特征较为相似,但也存在一些差异,表现为 ESA-CCI-LC 林地面积解译较少,尤其在吕梁山区和太行山区,内蒙古和宁夏交界处的其他用地类型大多解译为草地;ESA-CCI-LC 和 GlobeLand30 黄土高原中部耕地面积解译比 CAS-LUCC 以及 ChinaCover 偏多;ChinaCover 解译出的林地相比其他产品略多。

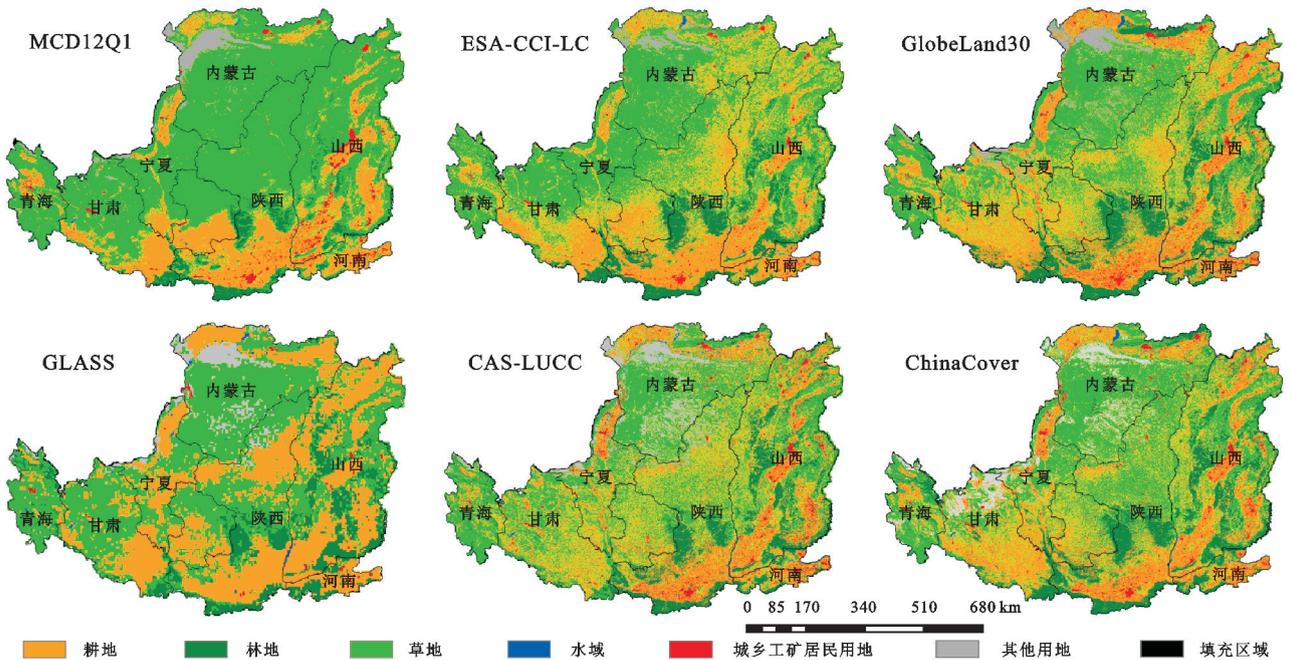


图 5 2010 年不同来源土地利用/覆被产品各类型面积

以退耕还林草初期 2000 年到退耕 10 a 2010 年为例,分析不同来源土地利用/覆被产品的空间转类特征及其差异(图 6)。空间转类上不同产品差异更为明显, GLASS 产品与其他产品的差异最大,表现出大量的转草类,解译类型明显错误;其次为 MCD12Q1 产品,转林类和转草类也存在明显错误,退耕还林(草)特征表现不明显;ESA-CCI-LC 和 GlobeLand30 在黄土丘陵沟壑区(陕北榆林、延安等地)退耕还林(草)的转类特征表现不足;CAS-LUCC 和 ChinaCover 退耕还林(草)特征明显,尤其是在黄土丘陵沟壑区。建筑面积扩张上,ESA-CCI-LC, GlobeLand30 和 CAS-LUCC 产品较为接近。水域变化各产品变化不同且分布面积较小。

2.4 不同来源土地利用/覆被产品精度评估

不同来源土地利用/覆被产品空间抽样的精度验证

结果(表 2)表明:GlobeLand30, CAS-LUCC, ChinaCover 产品的总体精度最高,分别为 86.61%($K=0.84$), 91.68%($K=0.90$), 89.45%($K=0.87$);其次为 ESA-CCI-LC(73.83%, $K=0.69$);MCD12Q1, GLASS 产品的精度最低,分别为 59.43%($K=0.51$), 36.31%($K=0.24$)。产品分辨率是造成验证精度差异的重要原因,分辨率越低,产品的分类精度也随之降低。

不同土地利用/覆被类型的制图精度和用户精度表明:耕地类型, GlobeLand30 ($PA=93.83\%$, $UA=78.13\%$)、CAS-LUCC ($PA=92.59\%$, $UA=89.29\%$)、ChinaCover ($PA=90.12\%$, $UA=84.88\%$) 的精度高, MCD12Q1 ($PA=61.73\%$, $UA=68.49\%$) 和 GLASS ($PA=61.73\%$, $UA=27.32\%$) 的精度较低,因为它们将大部分耕地和林地面积解译为草地。林

地类型,ChinaCover 产品精度最高($PA = 97.53\%$),其次为GlobeLand30($PA = 90.12\%$)、MCD12Q1($PA = 49.38\%$),GLASS($PA = 48.15\%$)精度较低;而用户精度中,MCD12Q1 精度高达 100% ,GLASS($PA = 68.42\%$)精度最低。草地类型,CAS-LUCC($PA = 92.77\%$, $UA = 78.57\%$)的精度最高,GLASS($PA = 63.86\%$, $UA = 25.98\%$)精度最低。水域类型,CAS-LUCC($PA = 98.82\%$)产品精度最高,其次为ChinaCover($PA = 95.29\%$),MCD12Q1($PA = 23.53\%$)和GLASS($PA = 5.88\%$)产品精度最低,而用户精度则

都为 100% ,原因是水域面积占地小,各类产品解译出的水域面积比实际面积小,而 MCD12Q1 和GLASS 中解译出的水体不连通,中小面积的水域没有解译出来。城乡工矿居民用地中,GLASS($PA = 10.98\%$, $UA = 69.23\%$)精度最低。其他用地类型中,GLASS($PA = 28.40\%$)产品精度最低,MCD12Q1($UA = 72.46\%$)用户精度最低。总体表明,GlobeLand30 对耕地的解译精度最高,CAS-LUCC 对草地、水域和其他用地的解译精度最高,ChinaCover 对林地和城乡工矿居民用地的解译精度最高。

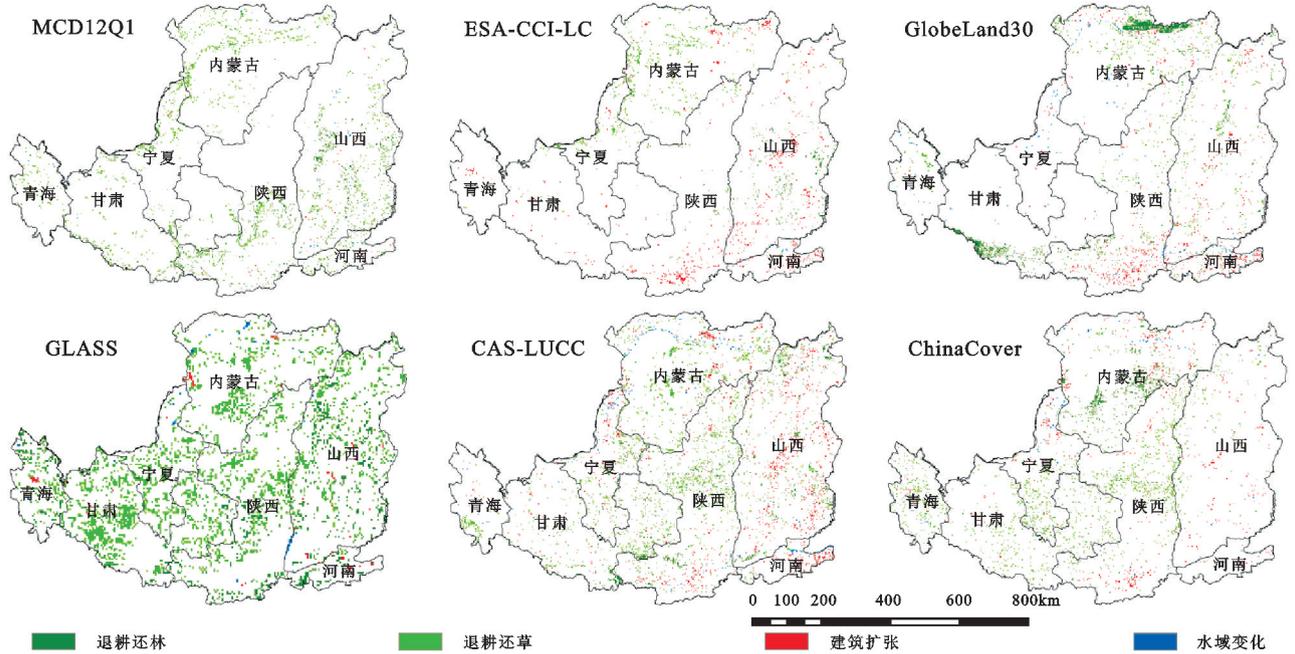


图6 不同来源土地利用/覆被产品空间转类变化分布

表2 各土地利用/覆被数据采点精度验证

项目	数据类型	MCD12Q1	ESA-CCI-LC	Globe-Land30	GLASS	CAS-LUCC	China-Cover
产品精度	耕地	61.73	79.01	93.83	61.73	92.59	90.12
	林地	49.38	82.72	90.12	48.15	87.65	97.53
	草地	81.93	81.93	87.95	63.86	92.77	85.54
	水域	23.53	60.00	90.59	5.88	98.82	95.29
	城乡工矿居民用地	79.27	85.37	91.46	10.98	96.34	97.56
	其他用地	61.73	54.32	66.67	28.40	81.48	70.37
用户精度	耕地	68.49	65.98	78.13	27.32	89.29	84.88
	林地	100.00	94.37	92.41	68.42	91.03	89.77
	草地	30.36	43.04	68.87	25.98	78.57	73.96
	水域	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	城乡工矿居民用地	97.01	98.59	97.40	69.23	97.53	94.12
其他用地	72.46	97.78	93.10	76.67	97.06	96.61	
总体精度		59.43	73.83	86.61	36.31	91.68	89.45
Kappa 系数		0.51	0.69	0.84	0.24	0.90	0.87

2.5 土地利用/覆被数据融合产品

以土地利用/覆被分类精度较高的3套产品GlobeLand30,CAS-LUCC 和 ChinaCover 为基础,合成一套高精度的土地利用/覆被数据融合产品(图

7)。以2010年为例,融合产品不同土地利用类型的精度表明:耕地 $PA = 92.59\%$, $UA = 67.57\%$;林地精度 $PA = 98.77\%$, $UA = 97.56\%$;草地精度 $PA = 95.18\%$, $UA = 82.29\%$;水域精度 $PA = 98.82\%$,

UA=100.00%;城乡工矿居民用地精度 PA=98.78%, UA=95.29%;其他用地精度 PA=79.01%, UA=98.46%;总体精度 93.91%, Kappa 系数为 0.93。与 GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 对比来看,总精度提高了 2.25%~7.30%,林地、草地和城乡工矿居民用地的精度大幅提高。

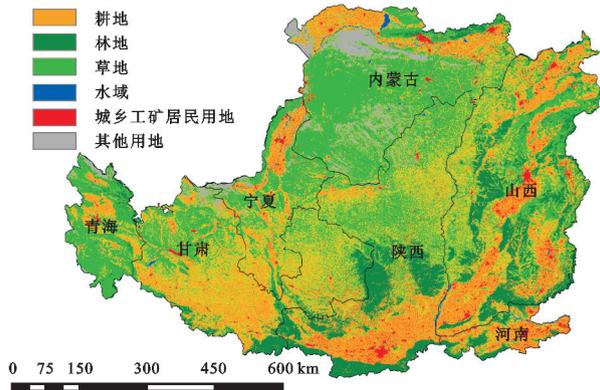


图 7 土地利用/覆被数据融合产品

3 讨论

土地利用/覆被数据作为气候、水文、生态等模型的输入参量,应考虑土地利用/覆盖数据精度在模型模拟过程造成的影响。土地利用/覆盖分类由于几何错误、错误分类和不同定义的类别而出现错误,这可能会导致模拟结果不同程度的不确定性。数据来源和制图方法是影响土地利用/覆盖分类结果一致性的重要因素^[23]。数据源影响图像本身性质,与地面特征的可识别性、图像质量和时空分辨率密切相关^[24]。分类器设计和分类方法影响着土地利用分类的性能^[25]。在一定程度上,分类质量的好坏不能完全依赖于分类技术,而是必须根据当地专家的经验 and 知识进行,否则在特定区域会出现不明确的类别或错误的分类。

黄土高原实施退耕还林(草)工程以来,土地利用/覆被空间格局发生了重大变化。土地利用/覆被产品来源不同,分类面积和空间转类特征差异较大。在研究中,我们验证了几种最广泛使用的全球或国家土地利用/覆盖产品在黄土高原的一致性 and 可靠性,不同产品在黄土高原地区土地利用/覆被变化的表现特征差异明显, MCD12Q1 和 GLASS 产品与其他产品的差异最大,其次为 ESA-CCI-LC 产品, GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品之间的差异相对较小。MCD12Q1 产品在黄土高原地区土地利用/覆被变化趋势上与其他产品不一致,难以反映黄土高原近 20 年来退耕还林(草)的实际变化过程。GLASS 产品尽管变化趋势上与其他产品保持相对一致,但其转林类和转草类空间转类特征解译出现明显

错误。ESA-CCI-LC 和 GlobeLand30 相对较好,但在黄土丘陵沟壑区退耕还林(草)的转类特征表现不足。CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品退耕还林(草)特征明显,其解译类型更符合实际情况。大量研究表明,退耕还林草以来,黄土高原植被格局发生显著变化。刘纪远^[12]和 Liu^[14]等研究表明,黄土高原由于退耕还林草工程的实施,林草地面积显著增加,地表覆盖状况明显改善^[26]。李庆云等^[27]研究表明,退耕减少的耕地以坡耕地为主,大量坡耕地转化为梯田和草地,转化为林地较少。黄土高原土地利用/覆被格局变化主要原因是退耕还林(草)政策的驱动^[28]。

分类体系、空间分辨率、产品数据源、解译标准等不同是造成土地利用/覆被产品产生差异的重要原因。本研究表明, MCD12Q1, ESA-CCI-LC, GlobeLand30, GLASS, CAS-LUCC 和 ChinaCover 6 种不同来源土地利用/覆被数据产品因分类体系的不同和对地类解译的侧重点不同,不同地类的解译精度也高低不同,对于耕地, GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 的分类精度最高;对于林地, ChinaCover 的分类精度最高;对于草地, CAS-LUCC 的分类精度最高。但整体而言,空间分辨率越低产品解译精度越差。CAS-LUCC 产品的精度最高,且 2000—2010 年退耕还林草表现与实际较为相符。土地利用/覆被多源数据产品的融合有利于提高产品的精度,本研究基于土地利用/覆被分类精度较高的三套产品 GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover,合成了一套高精度的土地利用/覆被数据融合产品,与融合前产品相比总精度可提高了 2.25%~7.30%,融合后产品更精确地表征了黄土高原土地利用和覆被变化的状况,为基于土地利用/覆被变化的研究提供科学依据和参考价值。

4 结论

(1) 土地利用/覆被产品来源不同,土地利用分类面积和空间转类特征差异较大。MCD12Q1 和 GLASS 产品与其他产品的差异最大,其次为 ESA-CCI-LC 产品, GlobeLand30, CAS-LUCC 和 ChinaCover 产品的差异相对较小。

(2) 除 MCD12Q1 产品外,不同来源土地利用/覆被产品各类型面积随时间变化趋势基本一致,耕地、草地和其他用地类型面积呈减少趋势,林地和水域面积呈缓慢上升趋势,城乡工矿居民用地呈急速上升趋势。

(3) 2000—2010 年不同来源产品土地利用/覆被的空间转类差异明显, GLASS 产品与其他产品的差异最大,解译类型明显错误;其次为 MCD12Q1 产品,转林类和转草类也存在明显错误,退耕还林(草)

特征表现不明显;ESA-CCI-LC 和 GlobeLand30 在黄土丘陵沟壑区退耕还(草)的转类特征表现不足;CAS-LUCC 和 ChinaCover 退耕还林(草)特征明显。

(4) 分类体系、空间分辨率、产品数据源、解译标准等不同是造成土地利用/覆被产品产生差异的重要原因。GlobeLand30, CAS-LUCC, ChinaCover 产品的总精度最高;其次为 ESA-CCI-LC;MCD12Q1, GLASS 产品的精度最低。

参考文献:

- [1] Turner B, Skole D L, Sanderson S, et al. Land-use and land-cover change: Science/research plan [J]. Global Change Report(Sweden),1995,43:669-679.
- [2] 李秀彬.全球变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J].地理学报,1996,51(6):553-558.
- [3] 刘纪远,邵全琴,延晓冬,等.土地利用变化影响气候变化的生物地球物理机制[J].自然杂志,2014,36(5):356-363.
- [4] Myneni R B, Ramakrishna R, Nemani R, et al. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models[J]. Ieee Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002,35(6):1380-1393.
- [5] 刘璐,申双和,杨舒畅.基于 MODIS 土地覆被数据的江苏省农地景观变化及其驱动因子分析[J].江苏农业科学,2019,47(12):274-280.
- [6] 刘纪远,徐新良,邵全琴.近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J].地理学报,2008,63(4):364-376.
- [7] Bartholome E, Belward A S. GLC2000: A new approach to global land cover mappings from earth observation data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005,26:1959-1977.
- [8] 吴炳方,苑全治,颜长珍,等.21 世纪前十年的中国土地覆盖变化[J].第四纪研究,2014,34(4):723-731.
- [9] 杜国明,刘美,孟凡浩,等.基于地学知识的大尺度土地利用/土地覆盖精细化分类方法研究[J].地球信息科学学报,2017,19(1):91-100.
- [10] 马京振,孙群,徐立,等. GlobeLand 30 和自发地理信息的对比分析研究[J].地球信息科学学报,2018,20(9):1225-1234.
- [11] Wang H, Zhao X, Zhang X, et al. Long time series land cover classification in China from 1982 to 2015 based on Bi-LSTM deep learning[J]. Remote Sensing, 2019,11(14):1639.
- [12] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].地理学报,2014,69(1):3-14.
- [13] 吴炳方,苑全治,颜长珍,等.21 世纪前十年的中国土地覆盖变化[J].第四纪研究,2014,34(4):723-731.
- [14] Liu H, Gong P, Wang J, et al. Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015[J]. Earth System Science Data, 2020,12(2):1217-1243.
- [15] 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 GLC-NMO[J]. Remote Sensing, 2018,10(11):1846.
- [16] 高健翎,高云飞,岳本江,等.人民治理黄河 70 年水土保持效益分析[J].人民黄河,2016,38(12):20-23.
- [17] 孙锐,陈少辉,苏红波.2000—2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化[J].地理科学进展,2019,38(8):1248-1258.
- [18] Martinez J M A, Suarez-Seoane S, Calabuig E D L. Modelling the risk of land cover change from environmental and socio-economic drivers in heterogeneous and changing landscapes: The role of uncertainty[J]. Landscape and Urban Planning, 2011,101(2):108-119.
- [19] 周志鹏,孙文义,穆兴民,等.2001—2017 年黄土高原实际蒸散发的时空格局[J].人民黄河,2019,41(6):76-80,84.
- [20] 刘宇,傅伯杰.黄土高原植被覆盖度变化的地形分异及土地利用/覆被变化的影响[J].干旱区地理,2013,36(6):1097-1102.
- [21] Fritz S, See L, Rembold F. Comparison of global and regional land cover maps with statistical information for the agricultural domain in Africa[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010,31(9):2237-2256.
- [22] 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.
- [23] Verburg P H, Neumann K, Nol L. Challenges in using land use and land cover data for global change studies [J]. Global Change Biology, 2011,17(2):974-989.
- [24] Lizundia-Loiola J, G Oton, Ramo R, et al. A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 236 (C): 111493.
- [25] Mas J F, Kolb M, Paegelow M, et al. Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages[J]. Environmental Modelling & Software, 2014,51:94-111.
- [26] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012,16:2617-2628.
- [27] 李庆云,吕素冰,刘蕾,等.黄土高原藉河流域近 35 年来土地利用/覆被变化过程[J].华北水利水电学院学报,2013,34(6):32-35.
- [28] 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.