

基于多源数据产品集成分类制作的 青藏高原现状植被图^{*}

张 慧^{1,2)} 赵涔良^{1,2)} 朱文泉^{1,2)†}

(1)北京师范大学地理科学学部, 遥感科学国家重点实验室, 100875, 北京;

2)北京师范大学地理科学学部, 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 100875, 北京)

摘要 充分利用多源植被分类/土地覆盖分类产品各自的优势, 通过专门设计与青藏高原植被类型相适应的植被分类体系, 选用集成分类方法, 在数据可靠性的基础上遵循一致性的原则, 制作了青藏高原现状植被图, 其在现势性、分类体系的针对性和分类精度上均表现更优. 从分类结果的现势性来看, 青藏高原现状植被图较早期中国植被图能更好地反映青藏高原植被覆盖现状; 从分类体系的针对性来看, 青藏高原现状植被图采用了针对青藏高原植被专门设计的分类体系, 有利于从多源数据产品中充分提取出具备高可靠性和一致性的植被覆盖信息; 从分类精度来看, 青藏高原现状植被图的总体精度(78.09%, Kappa 系数 0.75)较已有相关数据产品提高了 18.84%~37.17%, 特别是对草地、灌丛等植被类型的分类精度有明显提升.

关键词 青藏高原; 植被类型; 植被分类; 土地覆盖; 集成分类

中图分类号 K903

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021171

0 引言

青藏高原是中国气候变化的启动区^[1]、中国乃至全球气候变暖的敏感区^[2], 同时也是生态环境脆弱区^[3-5]. 近几十年来, 在气候变暖及人为影响的双重作用下, 青藏高原的植被覆盖、物种群落、土地覆盖等均发生了剧烈变化^[6-8], 这些变化又反过来影响着青藏高原的地气能量交换及生态过程^[9-10]. 而要研究青藏高原气候变化与植被相互作用, 评估其生态现状并制定相应的保护与规划方案, 则需要高精度的青藏高原现状植被图这一重要的基础数据^[11-13].

中国上一代植被类型图, 即 20 世纪 80 年代基于实地调查和专家知识制作的《1:1000000 中国植被图集》^[14], 自发布以来在青藏高原生态研究^[15-17]、高原气候研究^[18]、地表覆盖^[19]、生物多样性调查与评估等方面都发挥了重要作用. 然而, 该植被类型图发布 30 多年以来, 青藏高原的土地覆盖、植被分布和植被类型均发生了剧烈变化, 其时效性已不能满足当前研究和应用的需要^[20]. 另一方面, 近年来生产的全球或区域尺度的土地覆盖数据产品, 虽然其时效性满足现势性要求, 但其生产的目的是服务于大尺度的土地覆盖/利用现状变化监测^[21-23], 因此在分类体系设计、分

类精度等方面都无法满足当下青藏高原生态环境调查、植被生产力计算、植被物候调查等植被生态方面的应用需求.

目前已有部分学者基于遥感数据和机器学习方法生产了不同区域的植被分类产品^[24-25], 生产效率相较于实地调查有了大幅度提高^[23, 26-27], 但由于青藏高原地形地貌、生态环境的特殊性和复杂性, 以及地面调查数据的相对匮乏, 该区域的植被分类精度往往低于植被分类产品的整体精度. 因而有必要针对青藏高原的特殊环境, 充分利用已有相关数据产品来设计一套植被分类方案, 以期生产一套相较于当前数据产品更优的青藏高原现状植被图.

集成分类方法是融合多源分类产品, 形成一个比任何单一分类产品精度更优、信息更丰富的分类产品^[28-29]. 不同的植被或土地覆盖分类产品在数据源、分类精度、分类体系等方面具有不同的优势, 集成分类可以实现各分类产品之间的优势互补, 以获得更优的分类结果. 因此, 本文旨在充分利用多源植被/土地覆盖分类产品各自的优势, 通过专门设计与青藏高原植被类型相适应的植被分类体系, 选用集成分类方法来生产一套相较于当前数据产品更优的青藏高原现状植被图.

^{*} 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0606)

[†] 通信作者: 朱文泉(1975—), 男, 博士, 教授. 研究方向: 资源环境遥感. E-mail: zhuwq75@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-07-20

1 数据与方法

1.1 研究区概况 青藏高原位于亚洲中南部(图1), 平均海拔>4000 m, 植被覆盖以草地和高山植被(高山带上以垫状植被、地衣为主的植被群系)为主^[14, 30]. 由西向东, 青藏高原地势逐渐降低、温度逐渐升高、

降水逐渐增加. 中西部地区环境恶劣, 人烟稀少, 实地调查数据匮乏. 西北部无人区地势高且寒旱少雨^[31], 荒漠和高山植被广布, 其遥感探测的植被信号弱、光谱可区分性差. 东南部地势较低且气候较为温暖湿润, 植被类型以森林为主, 但云量明显高于中西部地区^[32], 不利于基于光学影像的植被分类.

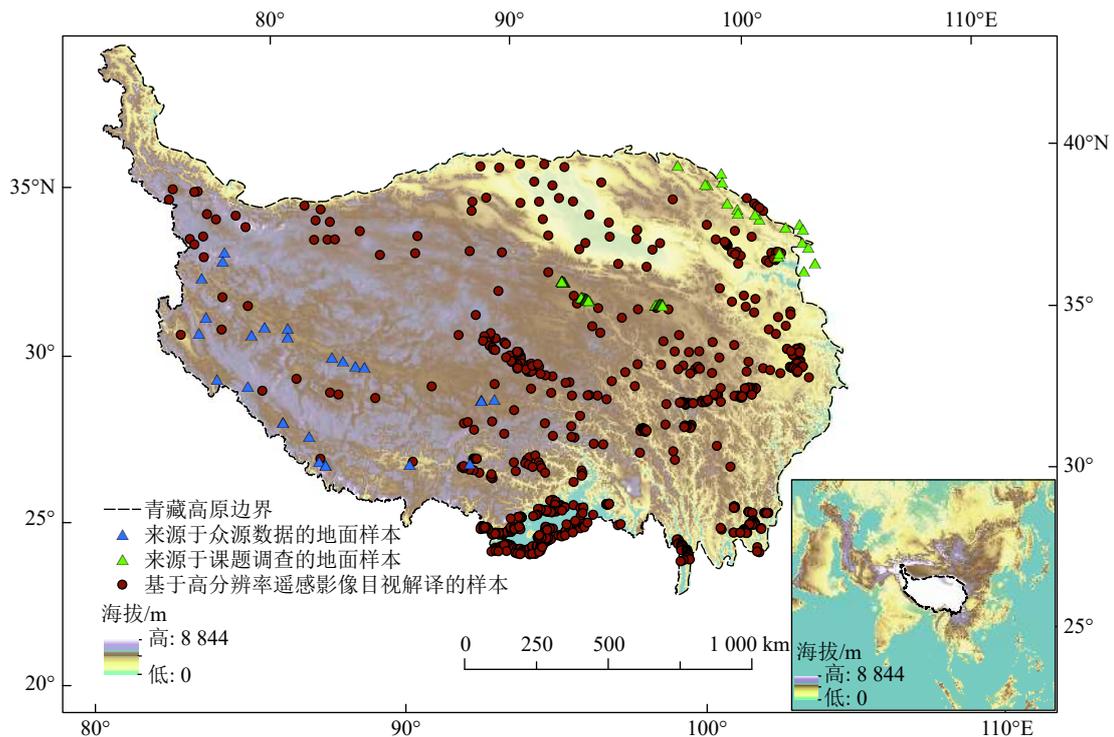


图1 青藏高原位置及植被类型标签样本数据的空间分布

1.2 数据

1.2.1 植被类型样本数据的来源与分布 植被类型标签样本数据来源于众源数据、课题组地面调查数据和基于 Google Earth 高分辨率遥感影像的目视解译数据. 各类型样本总计 936 个, 每种植被类型的样本均>50 个. 各类样本随机提取 50% 用于 MOD13Q1_VC 植被分类产品生产的分类器训练(附录 A), 其余 50% 用于集成分类结果的精度检验.

地面调查数据来源于课题组在 2020 年 7—8 月份的野外调查, 包含了祁连山和三江源地区的植被样本点数据, 共计 130 条记录, 标记的植被类型有灌丛、草地、湿地、高山植被、荒漠等类型.

众源数据来源于 Geo-wiki(<https://www.geo-wiki.org/>)和植物科学数据中心的“绿途”产品(<https://survey.chinavegetation.cn/>), 是由志愿者采集的开放地理数据集. 此外, 由于众源数据多沿交通干线分布且其记录结果的专业性不足, 因此我们结合中高分辨率遥感影像对样本数据进行了筛选, 最后有 27 条经过检验的

样本参与后续分析. 众源数据主要补充了部分高山植被、湿地、草地、灌丛等植被类型样本.

基于 Google Earth 高分辨率遥感影像的目视解译数据, 主要基于米级和亚米级空间分辨率影像, 并结合部分照片数据通过目视解译得到, 共有 779 个样本点.

1.2.2 植被类型及土地覆盖产品专题数据 选用了 7 个植被类型/土地覆盖产品(表 1), 它们是基于不同数据源和不同分类方法生产的植被类型/土地覆盖产品, 在集成分类中可以充分发挥各数据源在植被型组、植被型上不同的识别优势.

中国植被图于 20 世纪 80 年代基于实地调查和专家知识制作得到, 包含了详细的植被型组、植被型、植被群系和亚群系. 在本次集成分类中作为划分高山植被类型的基本参考数据.

从遥感数据源角度考虑, 本文选用的植被类型/土地覆盖产品分为 2 类, 即基于单时相遥感影像分类产品和基于时间序列遥感影像分类产品. 基于单时相遥感影像的土地覆盖分类产品(FROM-GLC 2017、

表 1 植被类型/土地覆盖产品

数据产品	年份	分辨率/m	分类系统	分类方法	数据源	文献
1 : 1 000 000 中国植被图集	2001	约 1 000	11 个植被型组	实地调查、专家知识	地面调查数据和遥感解译结果	[14]
FROM-GLC 2017	2017	30	10 类	随机森林	Landsat (TM、ETM+)	[23]
MCD12Q1 Land Cover Type 1	2019	500	IGBP (17 类)	决策树	MODIS (Terra 和 Aqua) 时序数据	[22]
CGLS-LC100	2019	100	23 类	随机森林	PROBA-V 时序数据和其他辅助数据	[33]
GLC_FCS30-2020	2020	30	30 类	局部自适应随机森林	Landsat、Sentinel-1 SAR、DEM 和其他辅助数据集	[34]
GlobeLand30 2020	2020	30	10 类	最大似然法、支持向量机法、阈值法及其改进法等	Landsat (TM5、ETM+、OLI)、HJ-1、GF-1	[35]
MOD13Q1_VC	2019	250	12 类	随机森林	MOD13Q1 时序数据	自己生产 (附录 A)

GlobeLand30、GLC_FCS30-2020), 其空间分辨率较高, 主要反映了地物在影像获取时刻的光谱和纹理差异, 有利于区分森林、灌丛、草地等植被类型; 基于时序遥感影像的植被类型/土地覆盖分类产品(MCD12Q1、CGLS-LC100-2019、MOD13Q1_VC), 其空间分辨率较低, 但时间分辨率较高, 主要反映了地物的季相差异, 有利于区分季相差异明显的常绿林和落叶林等植被类型。

1.3 方法

1.3.1 植被分类体系 参照《1 : 1 000 000 中国植被图集》中植被型组和植被型两级分类体系, 根据青藏高原植被分布特点以及它们在遥感数据上的可区分性(光谱和时谱差异), 设计了如图 2 所示的 2 级分类体系。其中, 由于草地类别中的草原、草丛、草甸仅在群系组成及局地景观上有差异, 但在粗于 100 m 空间分辨率的遥感影像上难以分辨, 所以在分类体系中草地

类别包含了以上 3 种类别的草地。其他类别指代所有非植被类型, 具体包括城镇、水体、冰雪、裸地等类型。

1.3.2 集成分类 青藏高原现状植被图集成分类流程如图 3 所示, 其中涉及数据预处理和集成分类 2 个核心步骤。

1) 数据预处理。针对不同空间分辨率的植被类型/土地覆盖产品, 高空间分辨率产品通过众数聚合、低空间分辨率产品通过最邻近采样至 250 m 空间分辨率, 并使所有产品具有一致的空间范围、投影坐标系统和类型代码(附录 B)。

2) 集成分类。其总原则是充分发挥各个产品的优势, 优先考虑各数据产品在具体某一植被类别上的可靠性, 然后再遵循数据产品之间的一致性原则进行集成。具体的集成分类过程包含 2 步: 首先, 若基于先验知识能明确某个像元的类别, 则直接采用该类别标

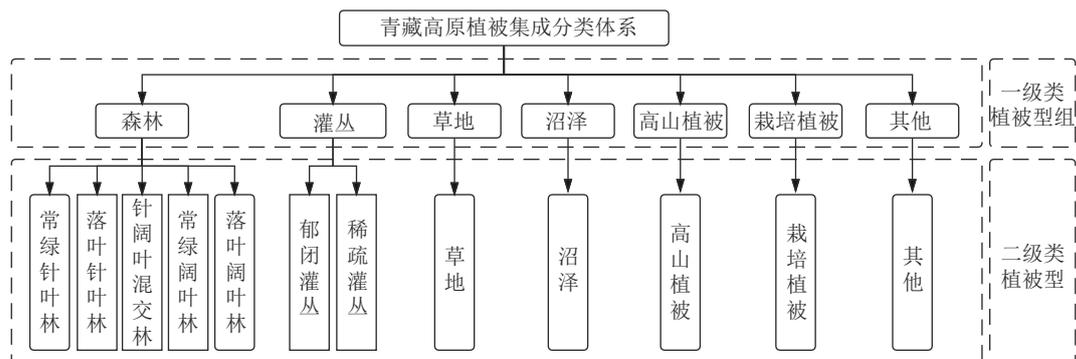


图 2 青藏高原植被集成分类体系

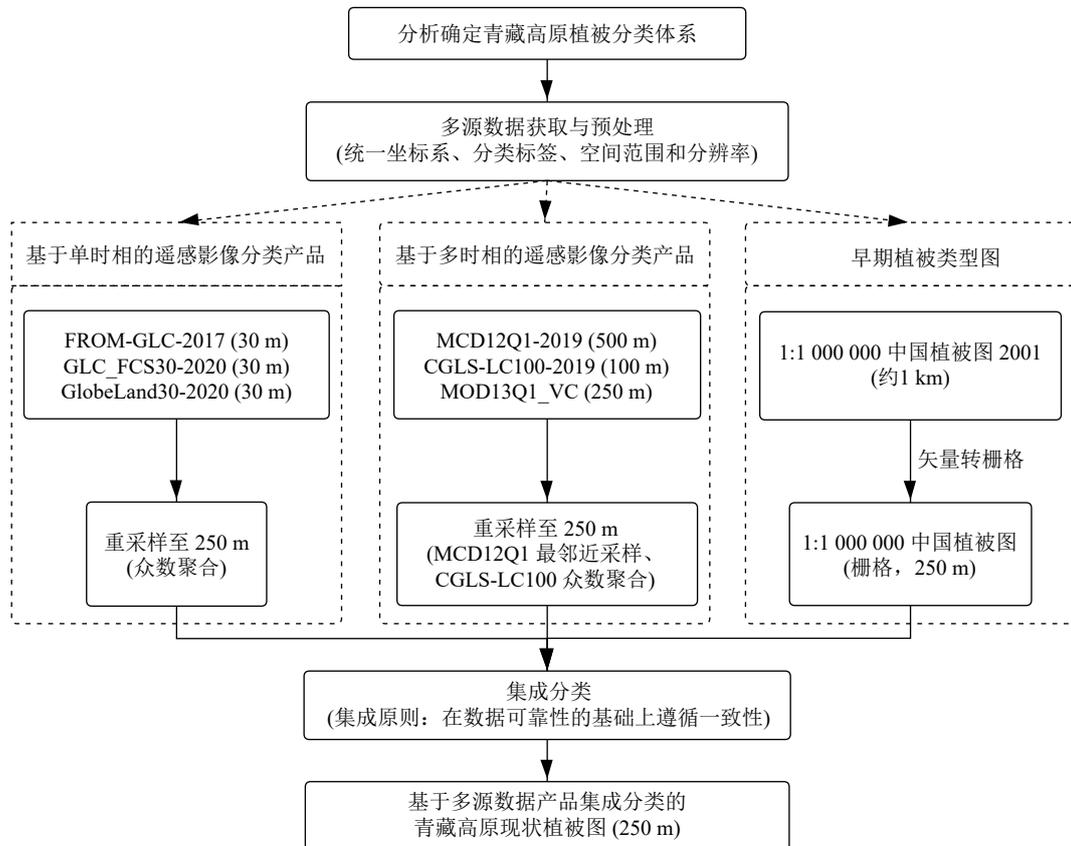


图 3 青藏高原现状植被图集成分类流程

类;其次,若基于先验知识不能明确某个像元的类别,则假定多源数据都认为一致的类别更为可靠.类别划分主要分为3步:①基于单时相的分类产品在区分植被一级类时更具有可靠性,因此优先考虑各基于单时相的分类产品来确定一级类类别,且其划定的类别至少需要受到半数产品的一致性支持;②基于多时相遥感影像的分类产品有利于反映植被的季相变化,在区分常绿、落叶等植被二级类时更为可靠,因此优先考虑各基于多时相遥感影像的分类产品来确定二级类类别;③当二级类的划分缺乏一致性时,划分各数据产品对确定该植被类别的可靠性程度(附录C),根据其优先级来确定二级类别.另外,由于高山植被在遥感影像上的植被信号较弱,致使各遥感分类产品的分类可靠性均较低,考虑青藏高原区域高山植被多年变化幅度较小^[36],所以针对前面划定各类别之后剩下的区域,主要参考已有的早期中国植被图来划分出其中的高山植被类型.

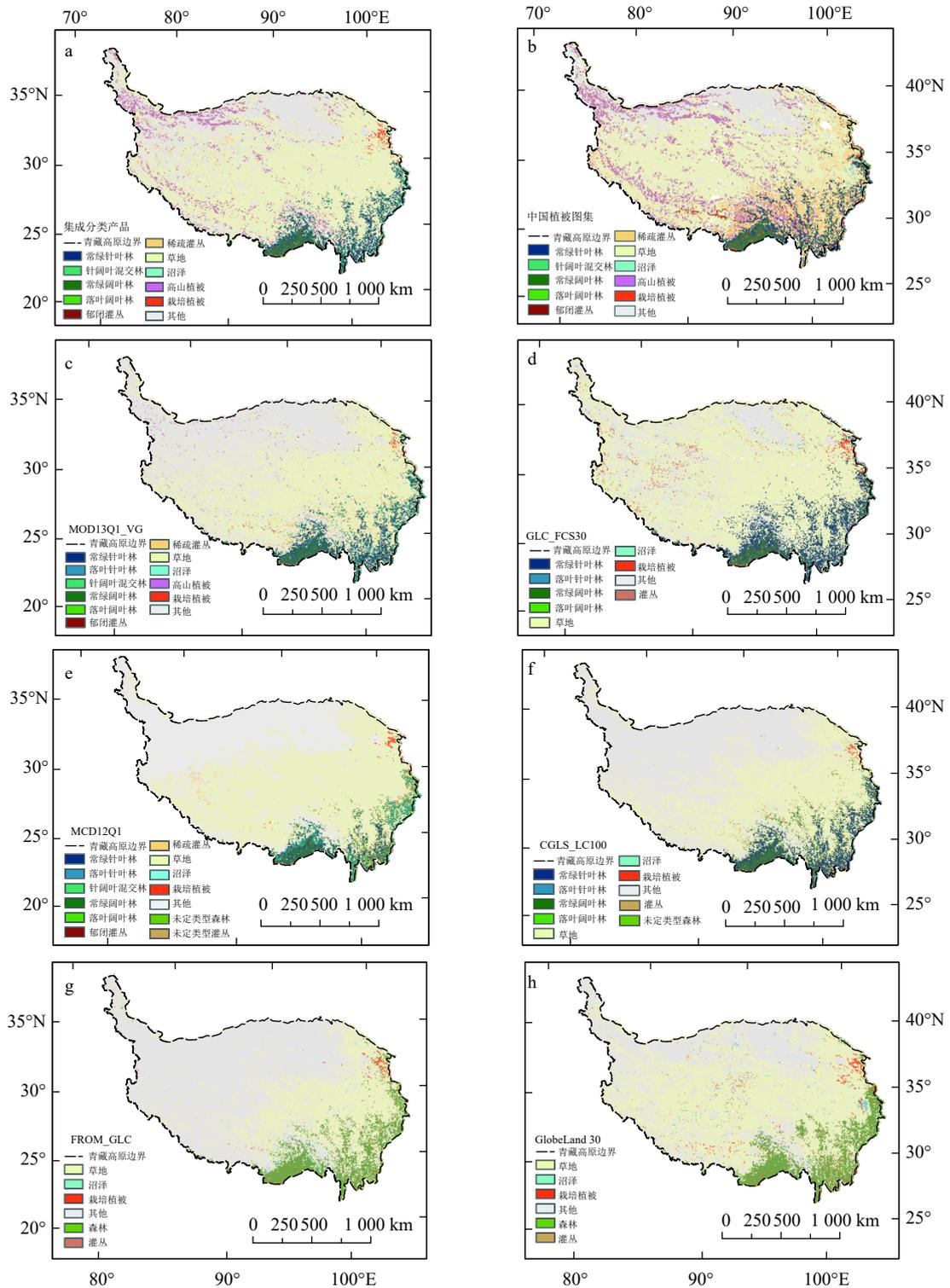
2 结果

各相关数据产品在森林、草地、非植被区上的总体空间分布基本一致,但因分类体系不同,因此在二级类的空间分布上也有着明显差异(图4).从集成分

类得到的青藏高原现状植被图和早期中国植被图2个植被分类产品来看,青藏高原现状植被图的中西部高山植被、东南部森林和灌丛较早期中国植被图有明显变化.其中,早期中国植被图西部部分高山植被在集成分类结果中变为草地,青藏高原现状植被图中高山植被的分布面积有所减少;早期中国植被图东南部部分郁闭/稀疏灌丛在集成分类结果中变为草地或森林,青藏高原现状植被图中灌丛的分布面积有所减少.

各数据产品的不同植被类型分布面积占比总体上基本一致(表2).由集成分类得到的青藏高原现状植被图,其不同植被类型的分布面积占比处于各相关数据产品对应植被类型分布面积占比的最大值与最小值之间,其中,青藏高原现状植被图与早期中国植被图的不同植被类型分布面积占比最为接近.

由集成分类得到的青藏高原现状植被图的总体精度为78.09%,Kappa系数为0.75(表3),其总体精度比参与集成的各个相关数据产品提高了18.84%~37.17%.各植被类型的生产精度和用户精度均接近或高于相关数据产品中的最高精度.其中:森林、灌丛和高山植被的生产精度有较大提升,漏分误差较低;森林、草地的用户精度有较大提升,错分误差较低.



注：未定类型森林，只能确定一级类植被型组而不能确定二级类植被型的森林；未定类型灌丛，只能确定一级类植被型组而不能确定二级类植被型的灌丛。

图 4 集成分类得到的青藏高原现状植被图与各相关数据产品的空间分布对比

3 讨论

3.1 青藏高原现状植被图的优势 相较于早期植被类型图或其他土地覆盖分类产品，青藏高原现状植被图在现势性、分类体系的针对性和分类精度上均表现更优。

青藏高原现状植被图与早期中国植被图相比现势性更强。早期中国植被图可以反映 20 世纪八九十年代的植被覆盖类型，但在气候变化与人类活动的影响下，青藏高原的植被覆盖类型已发生了很大变化。青藏高原现状植被图是基于 2017—2020 年多种相关

表 2 各数据产品的不同植被类型分布面积占比

植被类型	集成分类结果	中国植被图集	GLC_FCS30	MCD12Q1	CGLS-LC100	MOD13Q1_VC	%
1 常绿针叶林	4.21	5.37	8.67	1.81	5.43	4.17	
3 针阔叶混交林	2.03	0.05	—	2.11	—	2.62	
4 常绿阔叶林	1.63	2.17	1.69	1.19	1.78	1.62	
5 落叶阔叶林	0.14	0.40	0.59	0.31	0.01	0.16	
6 郁闭灌丛	0.01	0.70	—	—	—	0.13	
7 稀疏灌丛	1.07	9.96	—	—	—	2.86	
8 草地	58.12	53.52	66.53	52.70	44.58	48.56	
9 沼泽	0.03	0.19	0.18	0.06	0.03	0.07	
10 高山植被	5.89	11.36	—	—	—	0.90	
11 栽培植被	0.67	0.68	0.81	0.38	0.33	0.39	
12 其他	26.19	15.60	21.53	41.45	47.84	38.52	

注: Globeland30、From_GLC数据由于其森林和灌丛类型未有进一步细致的划分, 因此未纳入统计。

表 3 集成分类得到的青藏高原现状植被图与各相关数据产品的精度对比

植被类型	集成分类结果		GLC_FCS30		MCD12Q1		CGLS-LC100		MOD13Q1_VC	
	生产精度/%	用户精度/%	生产精度/%	用户精度/%	生产精度/%	用户精度/%	生产精度/%	用户精度/%	生产精度/%	用户精度/%
1 常绿针叶林	77.53	93.82	28.96	92.59	83.33	80.25	42.78	91.35	63.54	86.67
3 针阔叶混交林	88.68	75.80	—	—	90.90	81.45	—	—	70.12	65.2
4 常绿阔叶林	73.40	98.57	44.75	91.42	93.24	98.56	42.16	100.00	58.06	97.63
5 落叶阔叶林	98.15	67.95	74.19	29.48	100.00	94.80	100.00	1.28	96.01	62.5
6 郁闭灌丛	97.36	78.72	—	—	—	—	—	—	94.5	42.75
7 稀疏灌丛	94.73	78.26	—	—	—	—	—	—	62.83	41.33
8 草地	56.95	87.33	42.62	88.67	39.63	88.00	47.32	82.00	46.44	87.67
9 沼泽	94.00	69.11	100.00	19.17	100.00	8.04	100.00	13.23	92.13	34.71
10 高山植被	93.84	65.59	—	—	—	—	—	—	82.46	16.49
11 栽培植被	90.24	77.55	96.43	55.10	100.00	67.34	96.00	48.98	73.1	37.64
12 其他	78.89	66.35	48.00	56.07	40.76	70.93	42.49	76.63	48.26	65.35
总精度/%	78.09		42.20		59.25		40.92		56.67	
Kappa系数	0.75		0.35		0.54		0.34		0.61	

注: GlobeLand30、From_GLC数据由于其森林和灌丛类型未有进一步细致的划分, 因此未纳入统计。

数据产品集成分类得到, 较 20 世纪八九十年代生产的中国植被图能更好地反映青藏高原植被覆盖现状。在严格的集成分类规则下, 针对各个像元在各相关数据产品中筛选出一致性最高的植被类别, 削弱了由于分类方法识别精度、分类体系差异所导致的误差, 提高了植被分类的准确性。

青藏高原现状植被图的分类体系是在《1:1000000 中国植被图集》的基础上, 针对植被分类按照青藏高原实际植被覆盖类型设计的, 相较于服务于大尺度的土地覆盖/利用现状变化监测的土地覆盖数据集的分类体系更具有完整性和针对性, 能有效地指导青藏高原的植被与生态调查。例如, 青藏高原现状植被

图中“其他”类型的分布面积占青藏高原总面积的 26.19%, 低于其他大部分土地覆盖产品中“其他”类型的分布面积占比 (21.53%~64.79%)。这是因为集成分类将所有产品中的植被区提取了并集, 并在交集部分根据数据的可靠性及一致性进行了类别划分, 充分提取出了青藏高原地区的植被区。

经集成分类所得到的青藏高原现状植被图, 其总体精度较参与集成的相关数据产品提高了 18.84%~37.17%。由于青藏高原区域植被识别的困难与特殊性, 参与集成的各个相关数据产品在青藏高原区域的总体精度为 40%~60% (表 3), 低于它们在全球范围内的 60%~80% 的总体精度。从各植被类型来看, 集成分类

规则充分发挥了不同数据集的优势,明显提高了多种植被的分类精度,特别是灌丛和草地的分类精度较其他参与集成分类的相关数据产品有明显提升.另一方面,青藏高原现状植被图虽然在总体精度上占优,但并不是在所有植被类型上都是最佳.例如,针阔叶混交林及落叶阔叶林的集成分类精度略低于MCD12Q1产品对应类型的精度,这与集成分类规则中优先考虑基于单时相、高分辨率的土地覆盖产品作为划分植被一级类的原则有关.因此,集成分类规则的制定对植被分类精度的影响较大.

3.2 遥感识别存在的困难 集成分类过程反映出青藏高原区域植被遥感识别存在的一些困难,主要体现在以下3个方面:

1)高山植被类型在遥感识别中难以同荒漠、裸地等类型明显地区分.由于高山植被群系以垫状植被、地衣为主,其生长季较短且遥感信号较弱,使其在中高分辨率遥感影像中可区分性较差.

2)在粗于100 m空间分辨率下难以识别出草甸、草丛、草原之间的区别.虽然草地类型拥有数量最多且品质最优的地面实测样本,但是草地各二级类之间的混分、漏分现象较为严重,致使其分类精度仍低于通过遥感目视选取样本的常绿针叶、常绿阔叶森林类型.

3)青藏高原标签样本在空间分布上的均匀性、样本数量的充足性以及样本类型的均衡性方面都相对较差.虽然本研究补充了部分众源数据参与集成分类,但受限于众源数据集中于人类活动区域(无人区标签率极低)、采集人员非专业的植被分类知识(植被类型标签不准确)等因素,也使得样本集的质量未能达到理想标准.

3.3 研究的改进方向 本文基于集成分类生产的青藏高原现状植被图,虽然在一定程度上改善了已有分类产品在分类体系、分类精度等方面的不足,但受到植被标签样本、地形地貌和植被类型特殊复杂等方面的限制,未来可以从以下2方面进一步研究.

1)获取更多更高质量的地面调查数据.本文所使用的实地调查数据和众源数据,除了存在空间分布不均匀、标签质量较低的问题,还存在标签数据偏少、采集时间跨度大、采集标准不一致等方面的问题.

2)利用高空间分辨率、高光谱、激光雷达等多源数据参与集成分类.除本文采用的土地覆盖产品数据源可以提供光谱和纹理信息、季相变化信息外,高光谱数据更加丰富的光谱信息^[37]、激光雷达在植被高度方面的信息^[38-39]、非土地覆盖数据产品的辅助信息(如土壤水分数据产品可以用来区分草地类型中的

草原和草甸^[40]),均有利于区分不同的植被型、群系型和群系等更加精细的植被类别.

4 结论

本文基于集成分类方法,利用早期中国植被图、GlobeLand30、MCD12Q1等多种相关数据产品,制作了青藏高原现状植被图,其在现势性、分类体系的针对性和分类精度上均表现更优,可为青藏高原地区的生产实践与科学研究等提供更为可靠的植被分类信息.从分类结果的现势性来看,青藏高原现状植被图与早期中国植被图在森林、草地、非植被区上的总体空间分布基本一致,但局部地区有明显变化,能更好地反映青藏高原植被覆盖现状;从分类体系的针对性来看,青藏高原现状植被图采用了针对青藏高原植被专门设计的分类体系,有利于从多源数据产品中充分提取出具备高可靠性和一致性的植被覆盖信息;从分类精度来看,青藏高原现状植被图的总体精度(78.09%, Kappa系数0.75)较参与集成的各相关数据产品提高了18.84%~37.17%,特别是对草地、灌丛等植被类型的分类精度有明显提升.需注意的是,土地覆盖产品数据源的选择和集成分类规则的设定对植被分类精度有较大的影响.鉴于植被类别遥感识别存在的混分、漏分等困难,在未来研究中,可采用更高质量的地面调查数据、更加丰富的多源遥感数据来进一步提升植被图集成分类的精度.

5 附录

附录A MOD13Q1_VC植被分类产品制作(<http://www.bnujournal.com/cn/article/doi/10.12202/j.0476-0301.2021171>)

附录B 相关数据产品的分类标签统一化(<http://www.bnujournal.com/cn/article/doi/10.12202/j.0476-0301.2021171>)

附录C 各相关数据产品对确定不同植被类别的可靠性程度排序(<http://www.bnujournal.com/cn/article/doi/10.12202/j.0476-0301.2021171>)

6 参考文献

- [1] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. *科学通报*, 1998, 43(6): 633
- [2] 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. *科学通报*, 2000, 45(1): 98
- [3] JIN X Y, JIN H J, IWAHANA G, et al. Impacts of climate-induced permafrost degradation on vegetation: a review[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(1): 29
- [4] LU H, ZHENG D H, YANG K, et al. Last-decade progress

- in understanding and modeling the land surface processes on the Tibetan Plateau[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(12): 5745
- [5] WANG G X, LI Y S, WU Q B, et al. Impacts of permafrost changes on alpine ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(11): 1156
- [6] WANG S P, DUAN J C, XU G P, et al. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow[J]. *Ecology*, 2012, 93(11): 2365
- [7] CHEN H, ZHU Q A, PENG C H, et al. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940
- [8] MA Z Y, LIU H Y, MI Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15378
- [9] 邵天彬, 刘玉芝, 贾瑞, 等. 全球变暖背景下青藏高原地区的能量收支变化[C]//第34届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会, 2017
- [10] 柳艳香. 青藏高原地气系统辐射收支变化特征及其与气候变化的关系[J]. *高原气象*, 1998, 17(3): 37
- [11] IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P H, BIERKENS M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382
- [12] 马克平, 郭庆华. 中国植被生态学研究的进展和趋势[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(3): 215
- [13] ZHANG Y Y, HOU J J, MA G X, et al. Regional differences of water regulation services of terrestrial ecosystem in the Tibetan Plateau: Insights from multiple land covers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 283: 125216
- [14] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集(1: 1000000)[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [15] LI L H, ZHANG Y L, LIU L S, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation greenness change and associated climatic and anthropogenic drivers on the Tibetan Plateau during 2000-2015[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1525
- [16] ZHANG W J, YI Y H, SONG K C, et al. Hydrological response of alpine wetlands to climate warming in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 336
- [17] FENG Y H, ZHU J X, ZHAO X, et al. Changes in the trends of vegetation net primary productivity in China between 1982 and 2015[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12): 124009
- [18] LIU L L, ZHANG X Y, DONNELLY A, et al. Interannual variations in spring phenology and their response to climate change across the Tibetan Plateau from 1982 to 2013[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(10): 1563
- [19] WANG C, GAO Q, YU M. Quantifying trends of land change in Qinghai-Tibet plateau during 2001-2015[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2435
- [20] 郭庆华, 关宏灿, 胡天宇, 等. 新一代1: 50万中国植被图绘制方法探讨[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(3): 229
- [21] GONG P, CHEN B, LI X C, et al. Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): preliminary results for 2018[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(3): 182
- [22] FRIEDL M, SULLA-MENASHE D. MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land/d Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid V006[DB/OL]. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>. 2019
- [23] GONG P, LIU H, ZHANG M N, et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370
- [24] 王乐, 董雷, 赵志平, 等. 太行山生物多样性保护优先区域京津冀地区植被多样性与植被制图[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(3): 289
- [25] 杨小波, 陈宗铸, 李东海. 海南植被分类体系与植被分布图[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(3): 321
- [26] WANG Z W, WANG Q, ZHAO L, et al. Mapping the vegetation distribution of the permafrost zone on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(6): 1035
- [27] SU Y J, GUO Q H, HU T, et al. An updated vegetation map of China (1: 1000000)[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(13): 1125
- [28] GUAN X D, HUANG C, ZHANG R. Integrating MODIS and landsat data for land cover classification by multilevel decision rule[J]. *Land*, 2021, 10(2): 208
- [29] ZHANG J X. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2010, 1(1): 5
- [30] ZHANG Y, HU Q W, ZOU F L. Spatio-temporal changes of vegetation net primary productivity and its driving factors on the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2017[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1566
- [31] 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 基于TRMM数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. *地理科学*, 2013, 33(8): 999
- [32] 张雪芹, 彭莉莉, 郑度, 等. 1971—2004年青藏高原总云量时空变化及其影响因子[J]. *地理学报*, 2007, 62(9): 959
- [33] BUCHHORN M, LESIV M, TSENDBAZAR N E, et al. Copernicus global land cover layers-collection 2[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 1044
- [34] 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[EB/OL]. <https://>

- doi.org/10.5281/zenodo.3986872. 2020
- [35] JUN C, BAN Y F, LI S N. Open access to Earth land-cover map[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 434
- [36] 黄尤优, 刘守江, 王琼, 等. 近30年四川小相岭山系植被景观变化分析[J]. *草业学报*, 2010, 19(4): 1
- [37] 吴见, 彭道黎. 基于空间信息的高光谱遥感植被分类技术[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 150
- [38] 郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望[J]. *科学通报*, 2014, 59(6): 459
- [39] LEFSKY M A, COHEN W B, PARKER G G, et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies[J]. *BioScience*, 2002, 52(1): 19
- [40] 吴小丽, 刘桂民, 李新星, 等. CCI多传感器组合土壤水分产品在青藏高原不同地区的适用性[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 429

A new vegetation map for Qinghai-Tibet Plateau by integrated classification from multi-source data products

ZHANG Hui^{1, 2)} ZHAO Cenliang^{1, 2)} ZHU Wenquan^{1, 2)†}

(1) State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Aerospace Information Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract In this study, a vegetation classification system for the vegetation types in the Qinghai-Tibet Plateau was designed. The integrated classification method, taken into account of multi-source vegetation classification / land cover classification products, was used to produce the actual vegetation map. This integrated classification method followed the principle of data consistency, and the resultant vegetation map was superior over other vegetation maps in terms of reflection of current situation, classification system, and classification accuracy. This vegetation map is timely and could better reflect current vegetation distribution than earlier ones. This vegetation map could be conducive to fully extract vegetation information from multi-source data products with high reliability and consistency. Compared with previous data products, the overall accuracy (78.09%, kappa coefficient is 0.75) of this new vegetation map was found to increase by 18.84%-37.17%, especially for grassland and shrub.

Keywords Qinghai-Tibet Plateau; vegetation type; vegetation classification; land cover; integrated classification

【责任编辑: 刘先勤】