

DOI: 10.20103/j.stxb.202211163308

张慧, 朱文泉, 史培军, 赵涔良, 刘若杨, 唐海萍, 王静爱, 何邦科. 青藏高原各主要植被类型特征及环境差异. 生态学报, 2024, 44(7): 2955-2970.

Zhang H, Zhu W Q, Shi P J, Zhao C L, Liu R Y, Tang H P, Wang J A, He B K. The differences of vegetation characteristics and environmental conditions among main vegetation types on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2955-2970.

青藏高原各主要植被类型特征及环境差异

张 慧^{1,2,4}, 朱文泉^{1,2,4,*}, 史培军^{3,4,5}, 赵涔良^{1,2,4}, 刘若杨^{1,2,4}, 唐海萍⁴, 王静爱⁴, 何邦科^{1,2,4}

1 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

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, 北京 100875

3 北京师范大学应急管理部 教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875

4 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

5 青海省人民政府 北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

摘要: 青藏高原高海拔引起地形、气候和土壤空间差异造就了其独特的植被类型及其空间变化, 当前研究缺乏针对青藏高原全域范围内各植被类型特征和环境差异的定量与系统性分析。针对青藏高原特殊的地理环境和植被类型, 选用植被、地形、土壤、气候 4 个维度共计 58 个空间化指标, 采用频数分布统计方法对这些指标开展了定量分析, 系统揭示了青藏高原全域范围内各主要植被类型的特征及环境差异。通过定量分析发现, 大部分的环境及植被特征指标对青藏高原各主要植被类型的区分度较高, 其中, 遥感归一化植被指数、植被净初级生产力、裸地覆盖度、海拔、土壤温度、年最低温度、年总蒸散发 7 个指标对青藏高原各主要植被类型的区分度较高。揭示的青藏高原各主要植被类型的特征及环境差异, 可提高灌丛和草地之间、各草地类型之间、高山苔原-垫状-稀疏植被与其他植被类型之间的可区分性, 有助于解决青藏高原植被精细分类中广泛存在的灌丛和草地区分、草地类型细分、高山苔原-垫状-稀疏植被识别和山地垂直地带植被识别四个难点问题。研究结果一方面可服务于青藏高原的植被精细分类, 另一方面也可服务于青藏高原的自然地带划分、生物多样性和生态系统功能评估、地表物质循环研究等。

关键词: 青藏高原; 植被类型; 环境特征; 植被特征; 频数分布统计

The differences of vegetation characteristics and environmental conditions among main vegetation types on the Qinghai-Tibet Plateau

ZHANG Hui^{1,2,4}, ZHU Wenquan^{1,2,4,*}, SHI Peijun^{3,4,5}, ZHAO Cenliang^{1,2,4}, LIU Ruoyang^{1,2,4}, TANG Haiping⁴, WANG Jing'ai⁴, HE Bangke^{1,2,4}

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

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

3 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

5 Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810016, China

Abstract: The spatial differences of the Qinghai-Tibet Plateau in terrain, climate and soil caused by the high altitude have resulted in the unique species and spatial patterns of vegetation. However, existing research lacks comprehensive,

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0606); 国家自然科学基金重大项目 (42192580, 42192581)

收稿日期: 2022-11-16; **网络出版日期:** 2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuwq75@bnu.edu.cn

quantitative, and systematic analysis to the differences in the vegetation characteristics and environmental conditions of various vegetation types, especially for the entire Qinghai-Tibet Plateau. To address this issue in the unique geographic environment and vegetation types of the Qinghai-Tibet Plateau, this study utilized a wide array of 58 spatial indicators, organized into four dimensions: vegetation, topography, soil, and climate. Through the rigorous application of frequency distribution statistical methods, a quantitative analysis was conducted to systematically unveil the distinguishing of vegetation characteristics and environmental conditions among the primary vegetation types across the Qinghai-Tibet Plateau. The results of this quantitative analysis have revealed that a majority of the environmental and vegetation characteristic indicators exhibit a high level of differentiation among the primary vegetation types found on the Qinghai-Tibet Plateau. Notably, seven key indicators, including the remote sensing normalized vegetation index, vegetation net primary productivity, bare land coverage, elevation, soil temperature, annual minimum temperature, and annual total evapotranspiration, exhibit particularly exceptional discriminatory power in characterizing these diverse vegetation types. The findings of this study provide critical insights into the unique characteristics and environmental disparities within the major vegetation types across the Qinghai-Tibet Plateau. Moreover, they offer a pathway to enhance the differentiation between vegetation types that have historically been challenging to distinguish. These distinctions encompass separating shrublands from grasslands, providing a nuanced classification of various grassland types, and identifying alpine tundra, cushion, and sparse vegetation. Therefore, it is helpful to solve the four difficult problems of vegetation classification in Qinghai-Tibet Plateau: 1) the division of shrubland and grassland, 2) the subdivision of grassland type, 3) the identification of alpine tundra, cushion, and sparse vegetation, and 4) the identification of mountain vertical vegetation. The outcomes of this research have the potential to serve two significant purposes. First, they can substantially advance the precision of vegetation classification across the Qinghai-Tibet Plateau. Second, they can inform the delineation of natural zones, aid in assessing biodiversity and ecosystem functionality, and contribute to studies of surface material cycling in this high-altitude region. In summary, this comprehensive analysis bridges an important gap in our understanding of the Qinghai-Tibet Plateau's vegetation diversity and its complex relationship with environmental factors. By enhancing our ability to differentiate and classify vegetation types, this research is poised to make meaningful contributions to several studies on the ecology and environment in the Qinghai-Tibet Plateau.

Key Words: the Qinghai-Tibet Plateau; vegetation types; environmental characteristics; vegetation characteristics; frequency distribution statistics

环境差异造就了植被类型差异,青藏高原海拔变化引起地形、气候及土壤空间差异造就了其独特的植被类型(如高寒草甸、高寒草原)及其空间变化(如植被垂直分异、干热河谷)^[1-3]。因此,青藏高原的植被类型及其特征与其生态环境密切相关。受青藏高原特殊的地理环境影响,其植被类型的遥感精细分类主要存在灌丛和草地区分、草地类型细分(细分为草原、草丛、草甸等)、高山苔原-垫状-稀疏植被(分布于森林或灌丛线以上、冰雪带以下,由苔原、垫状植被、稀疏植被构成的植物群落)识别和山地垂直地带植被识别四方面难点问题^[4],单纯依靠更优的遥感数据或分类方法难以解决这些问题,需更多的分类特征参与以提高它们之间的区分度,而植被的特征与环境差异可增强青藏高原各植被类型的可分性、提高分类的精细程度^[5-6]。此外,揭示青藏高原植被类型的特征及环境差异可为青藏高原物种多样性研究^[7-9]、地表物质循环研究^[10-11]等提供理论支持。

现有关于各植被类型的特征及环境差异研究大多聚焦于气候、地形特征中的某一个或少量环境和植被特征,缺乏针对青藏高原全域范围内各植被类型特征和环境差异的定量与系统性分析。当前相关研究可大体归为两大类:一是基于空间化环境或植被特征数据的非量化植被类型差异应用研究^[5, 12-13],二是基于实测数据、针对局域小范围的定量植被类型特征差异研究^[14-15]。在基于空间化数据的定性研究方面,赵嘉玮等^[16]、

杨亮等^[17]发现了青藏高原的植被和群落类型与年平均温度、年总降水量、土壤含水量、遥感植被指数等环境因子密切相关,且其空间特征差异明显;Xu 和 Zhang^[5]、Zhang 等^[12]、贾伟等^[18]的研究表明,在植被分类中使用地形特征(数字高程模型,DEM)、气候特征(温度和降水)、土壤特征(土壤类型)、植被特征(归一化植被指数,NDVI)等,可以更有效地识别植被分布的空间细节、提高植被类型识别精度,但这些研究并未定量分析各植被类型的环境及植被特征差异,仅将这些特征作为辅助数据以提高植被分类精度。在基于站点观测数据的定量研究方面,杨新宇等^[19]、姚喜喜等^[20]、Wang 等^[2]基于野外实测数据,对祁连山、青藏高原干旱区等局域小范围内植被群落的植被与环境特征差异研究结果表明,植被群落的类型和分布与草地群落盖度、地上生物量、土壤物质含量、土壤含水量等植被与环境特征有关,且分析了对群落类型和分布的解释度最高的特征指标,但这些研究仅反映了站点尺度而不是空间全域的特征差异。

针对青藏高原特殊的地理环境和植被类型,非常有必要在现有研究基础上进一步开展各植被类型特征和环境差异的定量与系统性分析。为此,本研究基于空间化的环境及植被特征数据,采用频数分布统计方法对空间数据进行分析,旨在定量揭示青藏高原各主要植被类型在植被、地形、土壤、气候 4 个维度共计 58 个指标上的差异,为利用这些环境及植被特征参与青藏高原的植被遥感精细分类、自然地带划分、生物多样性和生态系统功能评估、地表物质循环等研究提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

青藏高原平均海拔在 4000 m 以上,其生态环境随海拔、纬度、经度等变化而呈现出巨大的空间差异,这一生态环境差异进一步导致了植被类型的变化(图 1)。青藏高原大部分区域气候寒冷干燥、地形起伏大、土壤贫瘠且极度缺氧^[21-22],与平原地区相比生态环境更为恶劣,这就决定了青藏高原的植被类型与平原植被类型有一定差异,青藏高原主要的植被类型是草甸、草原和高山苔原-垫状-稀疏植被,这些植被类型对生态环境的变化更为敏感^[23-24]。青藏高原具有地形起伏大且云雨多发、多种植被类型的特征相似(例如,草甸、草原与低矮灌丛)、高海拔区的植被稀疏等特点,这就决定了青藏高原遥感植被识别中存在多种问题^[4]。

1.2 数据及预处理

1.2.1 青藏高原植被类型图

(1) 1:100 万中国植被图

1:100 万中国植被图^[24]是 20 世纪 80 年代基于实地调查和专家知识生产的植被分类图,主要反映了 20 世纪末的植被覆盖情况,其空间分辨率约为 1 km。虽然各植被类型斑块的边缘区域可能发生了变化,但各植被类型分布的空间趋势没有发生变化。所以,1:100 万中国植被图用作合成本研究植被类型数据的本底数据。

(2) 基于集成分类生产的青藏高原 2020 年植被现状图

基于集成分类生产的青藏高原 2020 年植被现状图^[4]集成了多个分类产品的优势,较 1:100 万中国植被图更能反映青藏高原的植被类型现状,其原始空间分辨为 250 m,本研究通过众数聚合方法重采样为 1 km。该植被图中植被型组的类别精度较高且其空间分辨率较高。所以,该植被现状图主要用于修正 1:100 万中国植被图中的植被类型变化。

1.2.2 环境及植被特征数据

本研究中所涉及的环境及植被特征数据主要分为植被、地形、土壤、气候 4 类,共 58 个指标(表 1)。除土壤物质含量(全氮、全磷、全钾含量)数据外,所有空间化的环境及植被特征数据均下载自 Google Earth Engine 平台,土壤物质含量(全氮、全磷、全钾含量)数据下载自 GSDE(Global Soil Dataset for use in Earth System Models, <http://globalchange.bnu.edu.cn/research/soilw>)。所有数据均采用最近邻方法重采样至 1 km,并计算 2001—2020 年共 20 年的均值作为特征分析数据,但 DEM 数据和土壤物质含量数据只有单年数据,故选用单年数据作为其特征分析数据。由于土壤特征相关数据中最顶层数据的准确性最高^[26],且各土层的统计特征

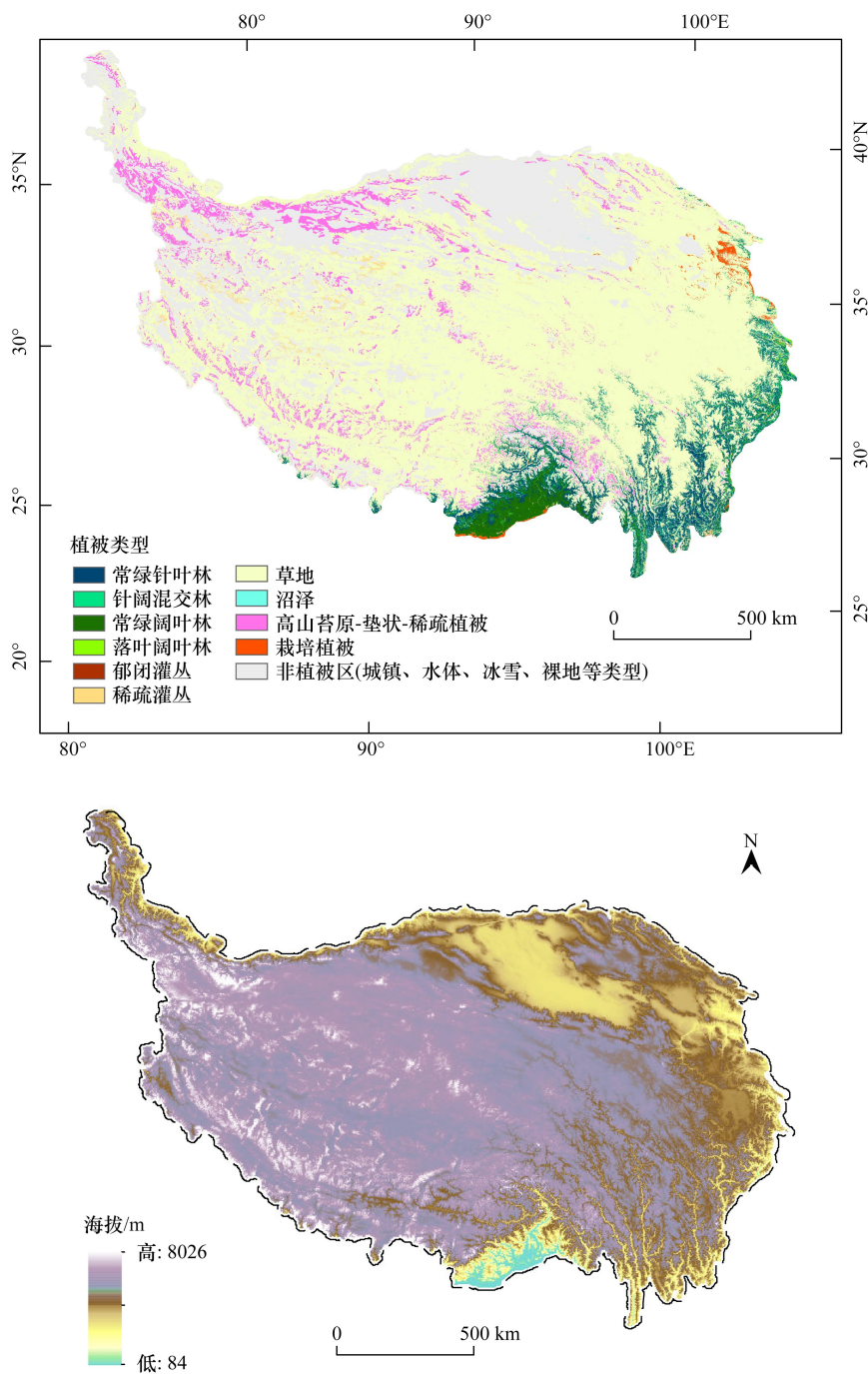


图 1 青藏高原 2020 年植被现状图^[4]

Fig.1 The status vegetation map for Qinghai-Tibet Plateau

上图沿用了青藏高原 2020 年植被现状图中的植被分类体系,是根据青藏高原植被分布特点和各植被类型遥感光谱可分性设计的分类体系;其中,植被现状图中的郁闭灌丛和稀疏灌丛合并为本文中的灌丛类型,植被现状图中的草地类型对应本文的草丛、草甸和草原

较为相似,所以,在结果分析中仅列出最顶层的特征统计结果。

1.3 方法

为定量、系统地分析青藏高原各主要植被类型的特征及环境差异,本研究分两步开展:(1)提取各主要植被类型空间分布的核心区域,以确保用于后续分析的各植被类型中无其它植被类型被混分进来;(2)基于频

数分布统计方法定量分析各植被类型的特征与环境差异。

表 1 参与特征分析的环境及植被特征数据

Table 1 Environmental and vegetation characteristic data participating in feature analysis

类别 Types	数据 Data	特征 Characteristics	数据源 Data source	分辨率 Spatial resolution	文献 References
植被 Vegetation	叶面积指数	叶面积指数	MOD15A2H(v006)	500 m	[25]
	净初级生产力	净初级生产力	MOD17A3HGF(v006)	500 m	[27]
	植被指数	归一化植被指数	MOD13Q1(v006)	250 m	[28]
		增强型植被指数			
	植被覆盖度	树冠覆盖度	MOD44B(v006)	250 m	[29]
		非树木植被覆盖度			
		裸地覆盖度			
	植被物候	生长季开始日期	MCD12Q2(v006)	500 m	[30]
		生长季结束日期			
		生长季长度			
地形 Terrain	DEM	海拔	SRTM Digital Elevation Data Version 4	90 m	[31]
		坡度			
		坡向			
土壤 Soil	土壤温度	第 1 层(0—7 cm)	ERA5_LAND/MONTHLY	11 km	[32]
		第 2 层(7—28 cm)			
		第 3 层(28—100 cm)			
		第 4 层(100—289 cm)			
	土壤含水量	第 1 层(0—7 cm)	ERA5_LAND/MONTHLY	11 km	[32]
		第 2 层(7—28 cm)			
		第 3 层(28—100 cm)			
		第 4 层(100—289 cm)			
	土壤物质含量	土壤含氮量(0—4.5 cm)	GSDE	1 km	[26]
		土壤含氮量(4.5—9.1 cm)			
		土壤含氮量(9.1—16.6 cm)			
		土壤含氮量(16.6—28.9 cm)			
		土壤含氮量(28.9—49.3 cm)			
		土壤含氮量(49.3—82.9 cm)			
		土壤含氮量(82.9—138.3 cm)			
		土壤含氮量(138.3—229.6 cm)			
		土壤含磷量(0—4.5 cm)			
		土壤含磷量(4.5—9.1 cm)			
		土壤含磷量(9.1—16.6 cm)			
		土壤含磷量(16.6—28.9 cm)			
		土壤含磷量(28.9—49.3 cm)			
		土壤含磷量(49.3—82.9 cm)			
		土壤含磷量(82.9—138.3 cm)			
		土壤含磷量(138.3—229.6 cm)			
		土壤含钾量(0—4.5 cm)			
		土壤含钾量(4.5—9.1 cm)			
		土壤含钾量(9.1—16.6 cm)			
		土壤含钾量(16.6—28.9 cm)			
		土壤含钾量(28.9—49.3 cm)			

续表

类别 Types	数据 Data	特征 Characteristics	数据源 Data source	分辨率 Spatial resolution	文献 References
气候 Climate		土壤含钾量(49.3—82.9 cm)	OpenLandMap Soil Organic Carbon Content	250 m	[33]
		土壤含钾量(82.9—138.3 cm)			
		土壤含钾量(138.3—229.6 cm)			
	温度	土壤有机碳(0 cm)	MOD11A1(v061)	1 km	[34]
		土壤有机碳(10 cm)			
		土壤有机碳(30 cm)			
		土壤有机碳(60 cm)			
		土壤有机碳(100 cm)			
		土壤有机碳(200 cm)			
	降水量 蒸散发	生长季平均温度(5—9月)	ERA5_LAND/MONTHLY	11 km	[32]
		年最高温度			
		年最低温度	MOD16A2(v006)	500 m	[35]
		年总降水量			
	饱和水气压差	年总蒸散发	TerraClimate	4638.3 m	[36]
		潜在蒸散发			

1.3.1 各主要植被类型空间分布的核心区提取

本研究基于 1:100 万中国植被图中的植被分类原则,同时参考植被类型在环境及植被特征上的可区分性,设计了本研究的植被分类体系。其中,一级类(植被型组)分为森林、灌丛、草地、沼泽、高山苔原-垫状-稀疏植被、荒漠,二级类(植被型)将森林和草地进一步细分,森林细分为针叶林、针阔混交林、阔叶林三类,草地细分为草原、草甸、草丛三类。

以 1:100 万中国植被图为基础数据、基于集成分类生产的青藏高原 2020 年植被现状图修正数据,综合其两者的植被信息,取两植被数据的交集,合成代表现状的植被分类数据(图 2)。其中,对于植被现状图分类系统中未细分的草地类别(草原、草甸和草丛),在筛选出植被现状图的草地类别的基础上,按照 1:100 万中国植被图中植被型信息划分出草原、草甸和草丛类别;对于植被现状图分类系统中缺少的荒漠类别,在筛选出植被现状图的其他类别的基础上,进一步筛选出 1:100 万中国植被图中的荒漠类别;对于植被现状图分类系统中有对应类别的森林、灌丛、沼泽和高山苔原-垫状-稀疏植被,则直接使用植被现状图中的植被类别。

为保证类别的准确性,本研究假定植被分类数据中各植被类型空间分布的内部核心区准确性最高,因此运用数学形态学的腐蚀操作以提取各植被类型空间分布的内部核心区来分析其环境空间特征(图 3),具体操作是针对每一种植被类型的各个图斑,将其边界均向内腐蚀 1 km,然后选用腐蚀后的区域参与后续分析。基于此方法提取的各植被类型空间分布的内部核心区在空间上是广泛分布的,所以在一定程度上综合了青藏高原不同地理位置的植被分布的特征差异。青藏高原各主要植被类型内部核心区的像元数量如表 2 所示,但由于针阔混交林和草丛在青藏高原的分布面积很小,导致提取其内部核心区后样本数少于 50 个,因此,本研究只分析除针阔混交林和草丛外的其他植被类型的特征统计结果。

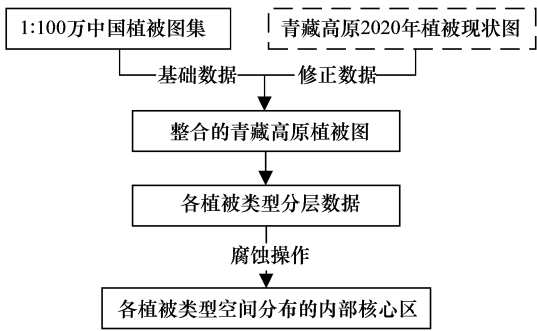


图 2 各植被类型空间分布的内部核心区提取流程图
Fig.2 Flowchart of the internal core area extraction for each vegetation type

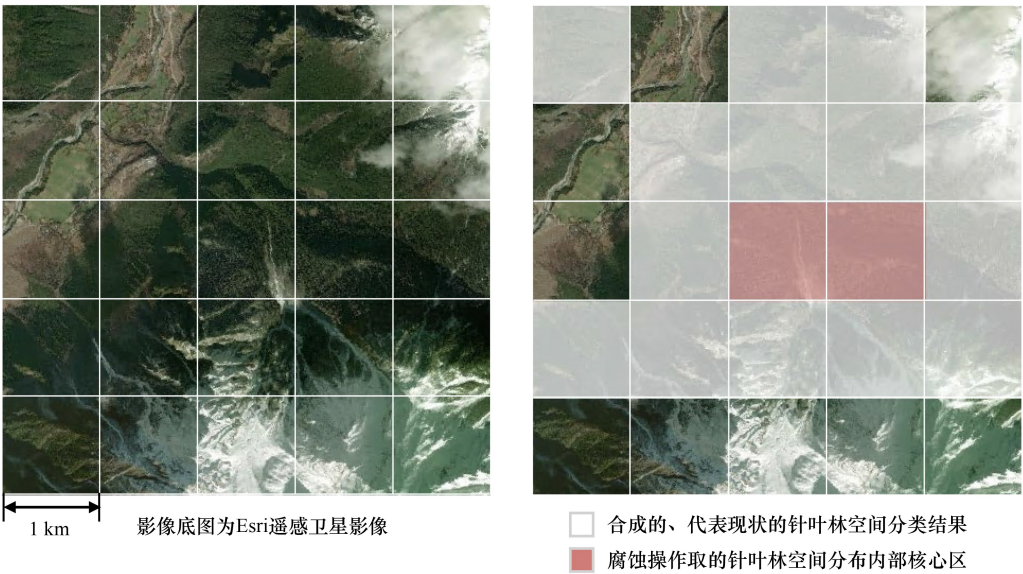


图3 植被类型空间分布的核心区提取示意图(以针叶林为例)

Fig.3 Schematic diagram of the internal core area extraction for each vegetation type (Take the needleleaf forests, for example)

表 2 青藏高原各主要植被类型内部核心区的样本数量

Table 2 Sample quantity of the internal core area for each vegetation type										
植被类型 Vegetation types	针叶林 Needleleaf forest	针阔混交林 Needleleaf and broadleaf forest	阔叶林 Broadleaf forest	灌丛 Scrub	草原 Steppe	草丛 Grass-forb community	草甸 Meadow	沼泽 Swamp	高山苔原-垫 状-稀疏植被 Alpine tundra- cushion-sparse vegetation	荒漠 Desert
样本数量 Sample size	29001	10	23489	52313	251744	50	336941	790	38604	150220

1.3.2 基于频数分布统计分析环境及植被特征

本研究基于小提琴图来分析各主要植被类型环境与植被的频数分布特征,小提琴图是箱线图和核密度图的结合(图4),除了具有箱线图可比较多组数据间差异的功能外,还可展示数据分布区间内部的情况(小提琴图的宽度表示分布概率密度)。本研究针对每个环境或植被特征,均绘制了各植被类型对应的小提琴图,对比各植被类型小提琴图所展示的四分位数(下四分位数:所有样本点数据从小到大排列后第 25%的数值,上四分位数:所有样本点数据从小到大排列后第 75%的数值)、离散程度、分布差异等统计特征,定量分析各植被类型的特征及环境差异。

2 结果

2.1 各植被类型的特征及环境差异

(1) 各植被类型的植被特征差异

从植被特征分植被类型统计结果(图5)来看,青藏高原各植被类型的净初级生产力、归一化植被指数、裸地覆盖度特征差异最为明显,叶面积指数、增强型植被指数、树冠植覆盖度、生长季开始日期和生长季长度次

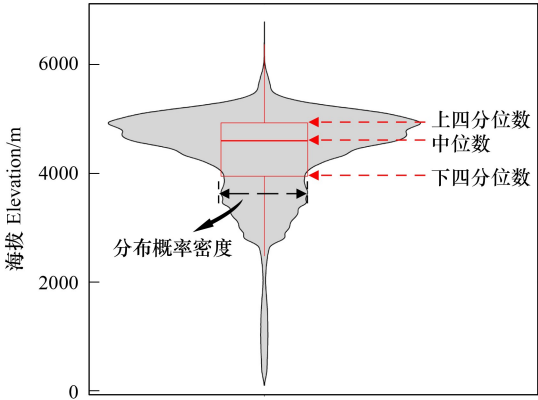


图4 青藏高原海拔特征的小提琴统计分析示意图

Fig.4 Schematic diagram of statistical analysis based on violin plot (take altitude characteristics on Qinghai-Tibet Plateau, for example)

之,非树木植被覆盖度和生长季结束日期的特征差异最小。对比发现,叶面积指数在森林、草地各二级类之间的特征差异明显;净初级生产力在除针叶林与针阔混交林外的其他各植被类型之间存在特征差异;对于植被指数来说,归一化植被指数对青藏高原各植被类型的区分度优于增强型植被指数,对青藏高原各植被类型的

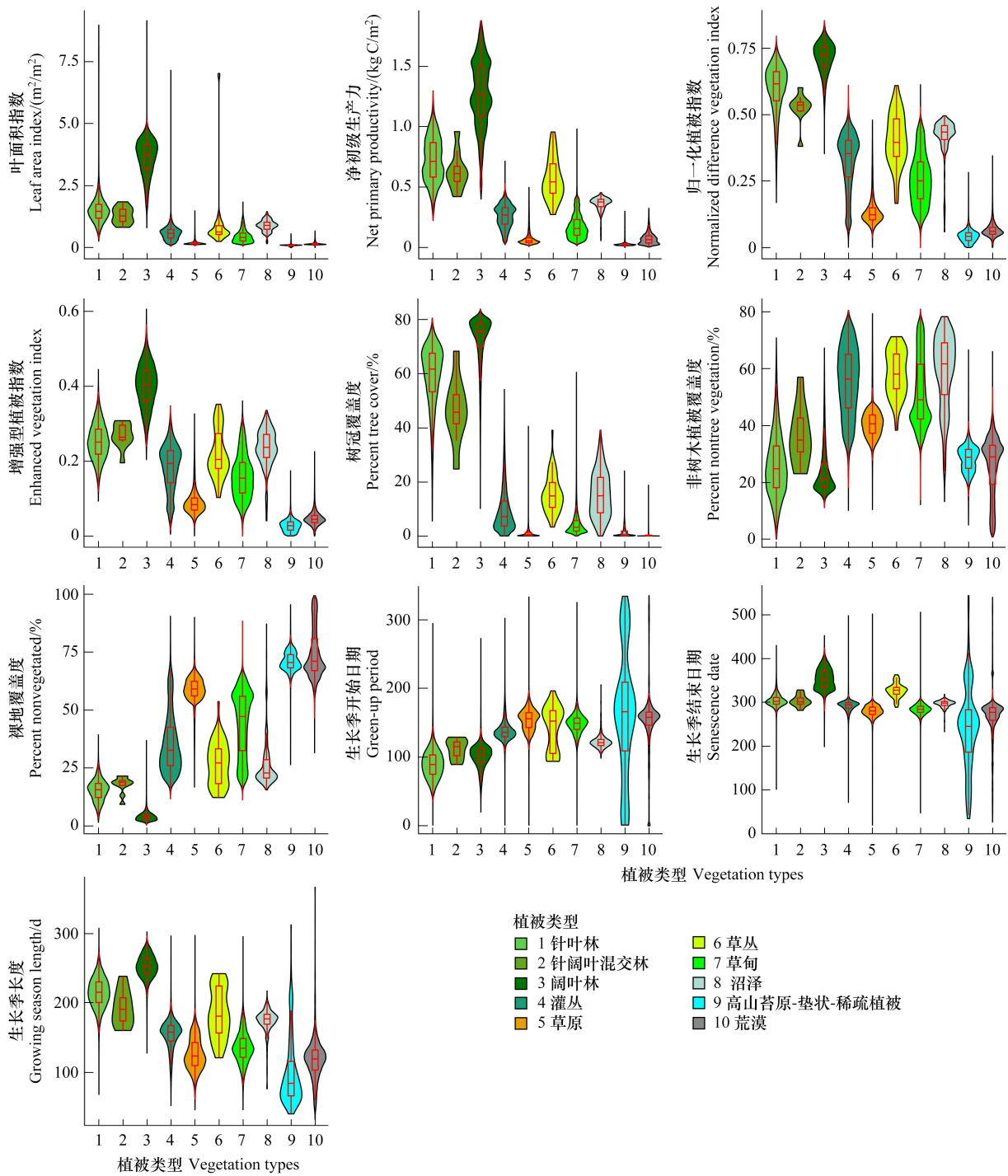


图 5 不同植被类型的植被特征统计结果

Fig.5 Statistical results of vegetation characteristics for different vegetation types

图中横坐标数字表示各植被类型,详见图例;生长季开始日期、生长季结束日期指标的纵坐标数据表示从 2022 年 1 月 1 日起第多少天;特征差异主要比较各植被类型在数据分布和四分位数上的差异,若各植被类型之间的数据分布和四分位数区间差异越大,则说明它们的特征差异越大,其余特征差异比较方法同理

特征差异明显;对于三个覆盖度特征来说,树冠植被覆盖度和非树木植被覆盖度在各一级类的特征差异较为明显,但树冠植被覆盖度对森林、草地植被型的区分度更好,裸地覆盖度对除高山苔原-垫状-稀疏植被和荒漠外的其他各植被类型的特征差异明显;对于植被物候特征来说,三个物候特征在森林和草地之间存在特征差异,其中,生长季结束日期的特征差异最小,生长季开始日期在森林、灌丛、草地和沼泽之间的特征差异明显,生长季长度在除草原、草甸和荒漠外的其他各植被类型之间存在特征差异。

(2) 各植被类型的地形特征差异

从地形特征分植被类型统计结果(图6)来看,青藏高原各植被类型的海拔特征差异最为明显,坡度次之,坡向的特征差异最小。对比发现,海拔特征对应的各植被类型间特征差异明显,可区分青藏高原各主要植被类型;坡度特征对应的部分植被类型间存在差异,数据分布较海拔特征更为离散,但对沼泽类型的区分度较高,且可以辅助草地(包含草原和草甸)与沼泽类型的区分;坡向特征对应的各植被类型间分布差异小,对各植被类型的区分度较低。

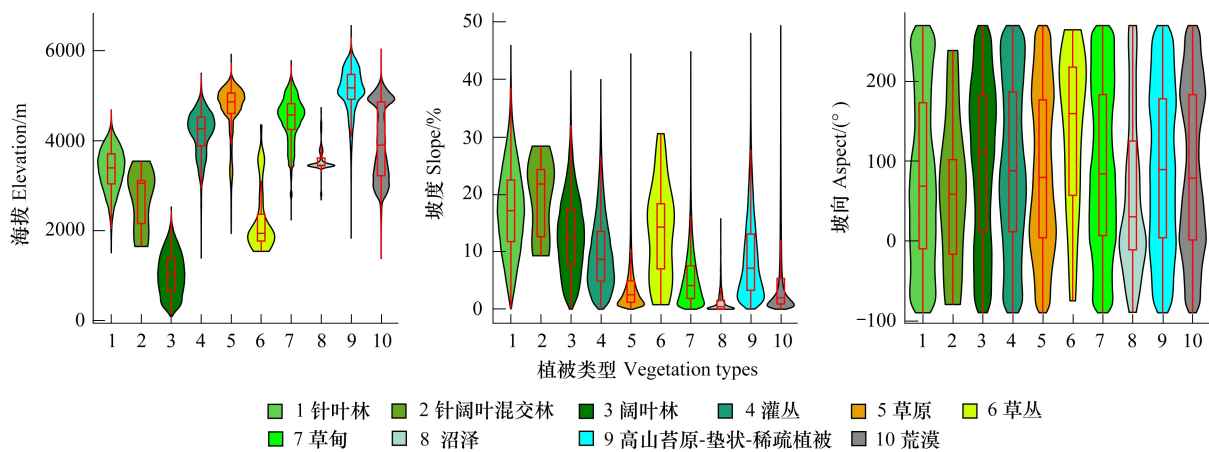


图6 不同植被类型的地形特征统计结果

Fig.6 Statistical results of terrain characteristics for different vegetation types

坡向的(0°)指向正北,顺时针为正值,逆时针为负值,值域为-90°—270°

(3) 各植被类型的土壤特征差异

从土壤特征分植被类型统计结果(图7)来看,青藏高原各植被类型的土壤温度特征差异最为明显,土壤含水量次之,土壤物质含量的特征差异最小。对比发现,不同深度各土壤特征的频数分布统计特征基本一致,其中,土壤温度在阔叶林与其他各植被类型之间、灌丛与其他各草地类型之间、高山苔原-垫状-稀疏植被与其他各植被类型之间的特征差异明显;土壤含水量在各草地类型之间、沼泽与其他各植被类型之间、荒漠与其他各植被类型之间的特征差异明显;土壤物质含量特征数据离散或组间差异较小,对青藏高原各植被类型的区分度较小,但可用于辅助部分植被类型的划分,例如,土壤含磷总量特征可用于辅助阔叶林的划分。

(4) 各植被类型的气候特征差异

从气候特征分植被类型统计结果(图8)来看,青藏高原各植被类型的年最低温度和年总蒸散发特征差异最为明显,生长季平均温度、年最高温度、年总降水量和饱和水汽压差次之,潜在蒸散发的特征差异最小。对比发现,在三个温度特征中,年最低温度对青藏高原各植被类型区分度高,生长季平均温度在森林各二级类之间、荒漠与其他各植被类型之间的特征差异明显,年最高温度在荒漠与其他各植被类型之间的特征差异明显,年最低温度在阔叶林与其他植被类型之间、灌丛与其他各草地类型之间、高山苔原-垫状-稀疏植被与其他各植被类型之间的特征差异明显;年总降水量和年总蒸散发在森林、草地各二级类之间的特征差异明显;潜在蒸散发对应的各植被类型间分布差异小,特征差异较小;饱和水汽压差对应的各植被类型间分布差异较小,但在森林各二级类之间的特征差异明显。

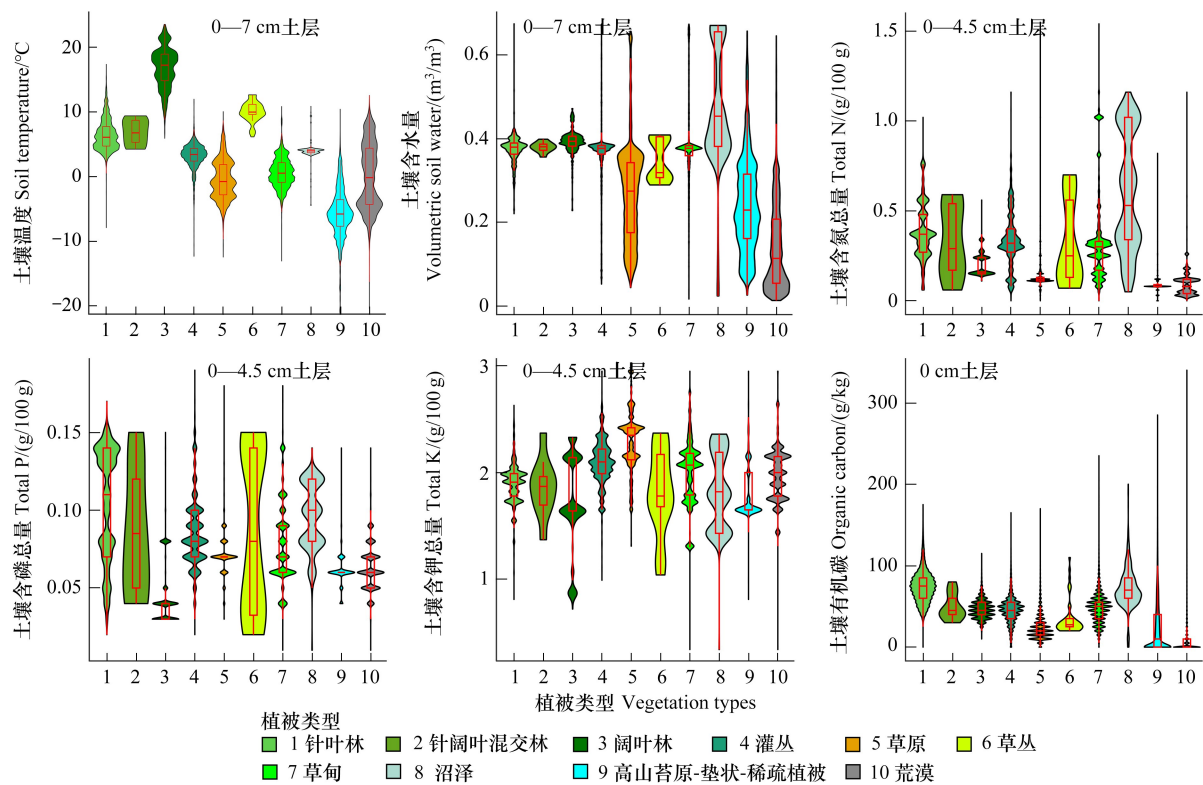


图7 不同植被类型的土壤特征统计结果

Fig.7 Statistical results of soil characteristics for different vegetation types

因此,针对灌丛和草地区分问题,土壤温度、年最低温度、年总蒸散发、净初级生产力、植被指数(包含归一化植被指数和增强型植被指数)、树冠植被覆盖度七个指标在灌丛和草地类型之间的特征差异明显,可以提高灌丛和草地之间的区分度。针对草地类型细分的问题,海拔、土壤含水量、年总降水量、年总蒸散发、叶面积指数、净初级生产力、植被指数(包含归一化植被指数和增强型植被指数)、树冠植被覆盖度、裸地覆盖度十个指标在草原、草甸类型上的差异明显,可以提高草原和草甸之间的区分度。针对高山苔原-垫状-稀疏植被识别的问题,海拔、土壤温度、年最低温度、净初级生产力、植被指数(包含归一化植被指数和增强型植被指数)六个指标在高山苔原-垫状-稀疏植被与其他植被类型特征差异明显,可以增强高山苔原-垫状-稀疏植被与其他植被类型的区分度。进一步分析发现,海拔、土壤温度、年最低温度、年总蒸散发、净初级生产力、归一化植被指数、裸地覆盖度七个特征对大部分植被类型的区分度较高,可增强青藏高原各主要植被类型的区分度,即可用于增强山地垂直地带植被的区分度。

2.2 青藏高原各植被类型在环境及植被特征上的数值范围

通过频数分布特征分析发现,大多数环境及植被特征对青藏高原植被都有一定的区分度,而且,箱线图的下四分位数-上四分位数的数值范围可以用以区分各植被类型。表3列出了青藏高原各植被类型对应环境及植被特征的数值范围,可以定量标识出各植被类型的特征及环境差异,如针叶林主要分布在海拔3035—3702 m的地带、阔叶林主要分布在海拔650—1400 m的地带,灌丛的净初级生产力主要为0.19—0.33 kg C/m²、草甸的净初级生产力主要为0.10—0.23 kg C/m²。

3 讨论

3.1 青藏高原各主要植被类型的环境和植被特征

在一些非青藏高原范围或青藏高原局部小范围的植被分类研究中,采用海拔、坡度、坡向等特征参与分

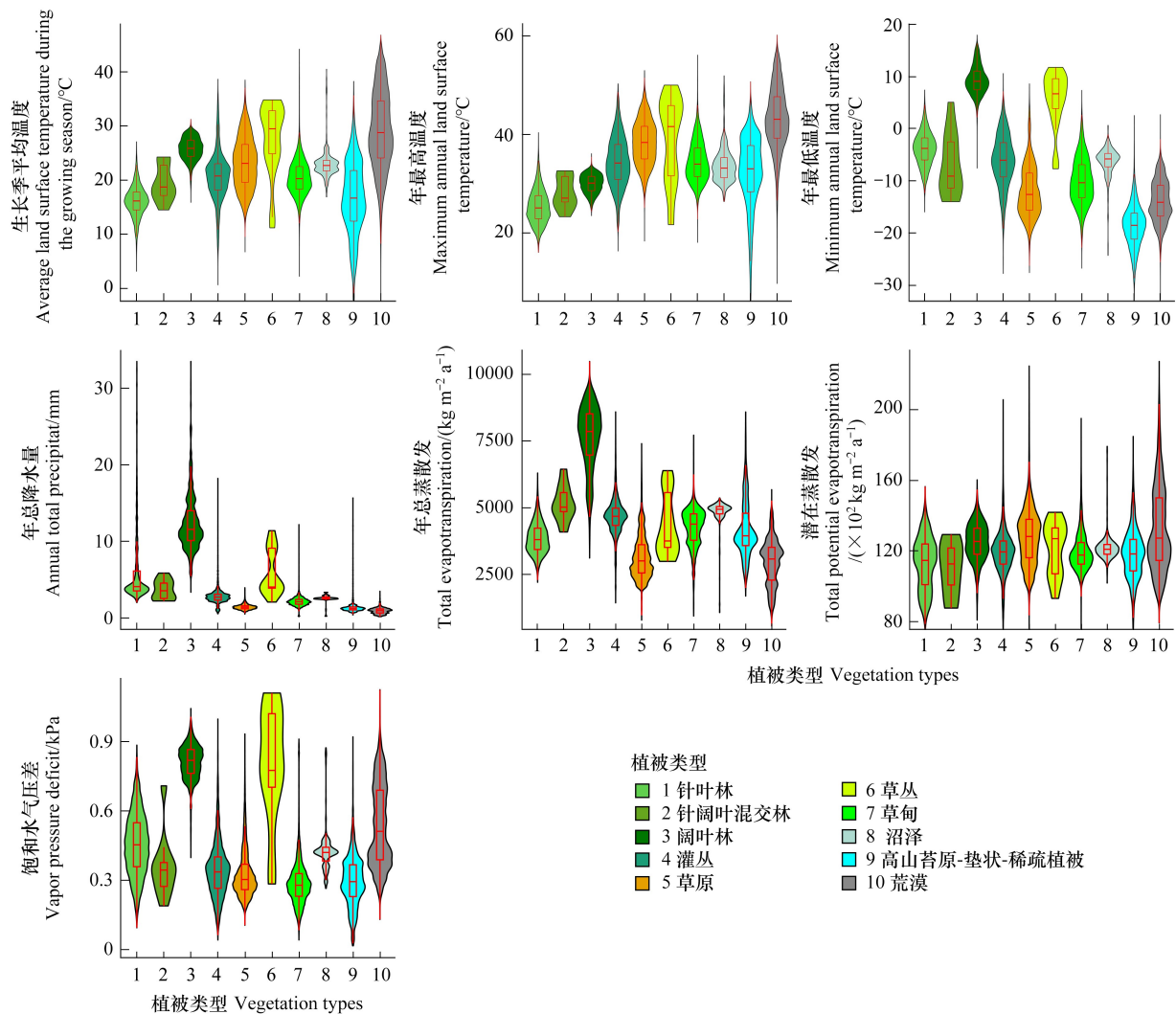


图 8 不同植被类型的气候特征统计结果

Fig.8 Statistical results of climate characteristics for different vegetation types

类^[5,12,30],发现他们有助于提高分类精度(相较于仅采用遥感光谱特征进行分类),但尚未对其在分类中的作用进行系统、定量化的分析,对环境及植被特征差异的认识和应用尚不充分。同时,由于青藏高原范围广阔、环境差异明显,不同区域、同一植被类型的植被与环境特征存在差异^[1-3],因此,若要揭示青藏高原植被类型的特征及环境差异,需要集合青藏高原各个区域样本进行环境与植被特征分析,而本研究中提取的各植被类型空间分布的内部核心区在空间上是广泛分布的,且样本量丰富。例如,课题组通过对青藏高原实地考察发现,祁连山区的针叶林主要分布在海拔 2800—3400 m 范围内,而在水热条件较好的横断山区,针叶林主要分布在海拔 3500—3800 m 范围内。因此,本研究系统、定量地研究了青藏高原各植被类型的植被与环境特征,在宏观尺度上揭示不同植被类型之间的植被与环境特征差异,并发现大部分环境及植被特征对青藏高原部分植被类型之间的区分度较高,为解决相对复杂的青藏高原植被遥感分类问题,提供了更多差异化的分类特征,可服务于灌丛和草地区分、草地类型细分、高山苔原-垫状-稀疏植被识别和山地垂直地带植被识别等分类的难点问题。

对于海拔变化跨度大、环境差异明显的整个青藏高原来说,并不是所有特征都能体现植被类型之间的特征差异。在非青藏高原范围或青藏高原局部小范围可以体现植被类型差异的坡向、土壤物质含量等特征,在青藏高原整体范围内的差异则较小。例如坡向特征,在山地植被分类中,坡向是区分植被类型的重要特征之

表 3 基于小提琴图分析提取的青藏高原各植被类型环境及植被特征的数值范围

Table 3 Numerical range of environmental and vegetation characteristics on the Qinghai-Tibet Plateau extracted based on violin plot analysis											
序号 Number	植被类型 Vegetation types	针叶林 Needleleaf forest	针阔混交林 Mixed Needleleaf and broadleaf forest	阔叶林 Broadleaf forest	灌丛 Scrub	草原 Steppe	草丛 Grass-forb community	草甸 Meadow	沼泽 Swamp	高山苔原-垫状-稀疏植被 Alpine tundra-cushion-sparse vegetation	荒漠 Desert
特征											
1	叶面积指数/(m²/m²)	1.19	1.05	3.18	0.38	0.14	0.53	0.26	0.74	0.07	0.12
2	净初级生产力/(kg C/m²)	1.74	1.54	4.16	0.73	0.20	0.88	0.58	1.02	0.10	0.16
3	归一化植被指数	0.58	0.55	1.09	0.19	0.04	0.45	0.10	0.34	0.02	0.04
4	增强型植被指数	0.87	0.67	1.50	0.33	0.08	0.69	0.23	0.40	0.03	0.10
5	树冠覆盖度/%	0.55	0.51	0.68	0.27	0.10	0.34	0.18	0.41	0.03	0.05
6	非树木植被覆盖度/%	0.66	0.55	0.76	0.40	0.15	0.48	0.32	0.46	0.06	0.08
7	裸地覆盖度/%	0.22	0.26	0.36	0.14	0.07	0.18	0.11	0.21	0.02	0.04
8	生长季开始日期	0.29	0.30	0.44	0.23	0.10	0.27	0.20	0.27	0.04	0.05
9	生长季结束日期	53.30	41.49	70.05	3.70	0.20	10.55	1.80	8.55	0.15	0.00
10	生长季长度/d	67.55	52.24	78.55	12.90	1.25	19.75	5.65	21.65	1.85	0.30
11	海拔/m	18.15	30.73	18.40	46.20	37.30	52.94	42.30	50.88	24.95	19.35
12	坡度/%	32.80	42.61	26.70	65.05	43.70	65.14	61.55	69.10	31.60	33.05
13	坡向/(°)	12.35	17.59	2.90	26.10	56.10	18.35	32.55	20.75	68.20	67.00
14	土壤温度_0—7cm/°C	18.40	19.58	5.00	42.65	62.40	33.33	55.95	28.63	73.90	80.75
		75.00	101.97	92.32	129.59	143.00	105.24	140.39	116.81	109.00	146.39
		103.06	121.93	112.05	143.74	164.67	167.57	156.79	125.56	209.00	165.49
		295.68	295.74	334.26	286.72	272.06	318.51	277.00	292.83	186.00	259.00
		310.95	310.17	370.95	298.94	288.89	333.97	290.75	301.72	283.00	287.67
		200.33	173.74	241.58	144.83	109.56	156.43	121.44	169.10	66.00	103.00
		229.92	207.22	263.58	167.11	142.53	224.07	148.44	183.33	115.50	131.94
		3035.00	2152.00	655.00	3882.00	4600.00	1764.25	4244.00	3435.00	4915.00	3215.00
		3702.00	3107.25	1385.00	4517.00	5053.00	2360.00	4818.00	3610.75	5469.00	4856.00
		11.76	12.62	7.74	4.88	1.22	7.02	1.86	0.06	3.29	0.90
		22.48	24.31	17.47	13.54	4.92	18.34	7.55	1.54	13.07	5.36
		-9.87	-16.50	11.68	11.68	4.13	57.20	6.85	-11.00	4.05	1.32
		173.32	102.03	182.26	186.94	176.85	217.83	183.50	125.31	178.28	183.41
		4.72	5.30	14.83	2.39	-2.82	9.59	-0.91	3.69	-7.68	-4.31

续表

序号 Number	植被类型 Vegetation types	针叶林 Needleleaf forest	针阔混交林 Mixed Needleleaf and broadleaf forest	阔叶林 Broadleaf forest	灌丛 Scrub	草原 Steppe	草丛 Grass-forb community	草甸 Meadow	沼泽 Swamp	高山苔原-垫 状-稀疏植被 Alpine tundra- cushion-sparse vegetation	荒漠 Desert
15	土壤含水量_0—7cm/(m ³ /m ³)	7.74	8.71	18.92	4.35	1.86	11.17	2.14	4.17	-3.57	4.39
		0.36	0.37	0.38	0.36	0.18	0.31	0.36	0.38	0.16	0.05
		0.39	0.39	0.41	0.38	0.34	0.40	0.38	0.66	0.31	0.21
16	土壤含氮总量_0—4.5 cm/(g/100g)	0.27	0.17	0.15	0.27	0.11	0.13	0.17	0.34	0.08	0.04
		0.48	0.54	0.24	0.40	0.13	0.56	0.33	1.02	0.09	0.12
17	土壤含磷总量_0—4.5 cm/(g/100g)	0.07	0.05	0.03	0.07	0.07	0.03	0.06	0.08	0.06	0.05
		0.14	0.12	0.04	0.10	0.07	0.14	0.09	0.12	0.06	0.07
18	土壤含钾总量_0—4.5 cm/(g/100g)	1.78	1.70	1.64	1.99	2.12	1.68	1.79	1.43	1.65	1.78
		1.99	1.96	2.14	2.22	2.42	2.17	2.18	2.19	2.00	2.15
19	土壤有机碳_0 cm/(g/kg)	60.00	40.00	40.00	35.00	15.00	25.00	35.00	60.00	0.00	0.00
		85.00	60.00	55.00	55.00	30.00	35.00	55.00	85.00	40.00	10.00
20	生长季平均温度/℃	14.50	17.16	24.38	18.17	19.60	24.86	18.31	21.70	12.42	24.09
		17.81	22.75	27.35	23.02	26.58	32.81	22.50	23.64	21.77	34.63
21	年最高温度/℃	22.91	26.32	28.62	30.88	35.03	31.60	31.46	31.21	28.38	39.23
		27.61	31.49	31.47	37.95	41.62	45.83	37.23	35.30	37.73	47.62
22	年最低温度/℃	-6.02	-11.42	7.47	-9.27	-15.65	3.84	-13.29	-7.33	-21.20	-16.78
		-1.79	-2.54	11.02	-2.69	-8.54	9.58	-6.92	-4.77	-16.21	-10.87
23	年总降水量/mm	3.49	2.50	10.08	2.29	1.16	3.85	1.75	2.44	1.01	0.60
		6.09	4.51	13.99	3.05	1.54	9.08	2.38	2.68	1.39	1.13
24	年总蒸散发/(kg m ⁻² a ⁻¹)	3433.63	4851.86	6971.07	4336.29	2554.40	3512.21	3779.07	4768.37	3580.17	2286.58
		4233.01	5564.73	8518.14	4983.58	3613.20	5566.38	4768.30	5041.90	4790.18	3515.30
25	潜在蒸散发/(×10 ² kg m ⁻² a ⁻¹)	100.87	100.70	118.09	112.50	116.10	107.01	112.47	118.09	108.65	114.57
		123.88	121.60	132.80	125.58	137.85	132.98	124.70	123.61	126.47	150.02
26	饱和水汽压差/kPa	0.36	0.27	0.76	0.27	0.26	0.70	0.23	0.38	0.23	0.39
		0.55	0.38	0.86	0.40	0.37	1.02	0.33	0.44	0.37	0.69

对于每一个环境及植被特征,第一行为对应植被类型特征统计的下四分位数,第二行为对应植被类型特征统计的上四分位数;生长季开始日期、生长季结束日期指标的数值表示从2022年1月1日起第多少天

一,但本研究发现,在青藏高原全域范围内各植被类型的坡向特征相似性很高(图6),这可能与研究的空间尺度有关,本研究是基于1 km的空间分辨率开展研究,在1 km以上的宏观尺度上可能难以体现出不同植被类型之间坡向特征差异。各植被类型的坡向、土壤物质含量等特征在青藏高原全域范围内的宏观尺度上差异较小,按气候、海拔等分区统计这些特征的频数分布特征可能会呈现出更明显的特征差异。这些特征虽然无法适用于宏观尺度上的青藏高原植被分类,但可用于辅助局域范围的青藏高原植被精细分类。

另外,对于植被与环境特征指标的选择上,应尽量选择遥感上容易获取且能更准确获取的特征指标,即能准确反映不同植被类型之间的特征差异。例如,土壤物质含量数据一般是通过实测数据插值得到的空间栅格化的数据,仅通过遥感数据很难准确反演,即使在土壤类型、植被类型等数据的辅助下反演得到的数据其精度和准确性一般较低,进而导致了分植被类型进行特征统计结果中数据分布离散、反映植被特征差异的能力差等问题(图7)。

3.2 应用价值及展望

青藏高原各主要植被类型的特征及环境差异研究可用于各网格单元的生态环境模拟,这对宏观尺度上(1 km及以上)青藏高原的植被精细分类、自然地带划分、生物多样性和生态系统功能评估、地表物质循环研究等都具有重要意义。在青藏高原植被精细分类中,环境及植被特征差异可作为分类特征来提高植被精细分类精度。青藏高原自然地带划分主要依据植被区系与类型、水热条件、地形差异等植被和环境要素差异^[22, 37—39],本文揭示的高原各主要植被类型的特征及环境差异可为青藏高原自然地带划分提供划分依据。在生物多样性和生态系统功能评估中,已有研究表明草原、草甸、沼泽生态环境状况(包含水质、净初级生产力、碳储量和栖息地质量四个方面)的差异与生态系统功能的差异高度相关^[40—41],环境及植被特征差异研究是进行生物多样性和生态系统功能评估的基础。地表物质循环及能量交换的相关研究表明,地表C、N、水循环受气温、降水、土壤温度、植被覆盖类型等环境及植被因素的控制^[42],本文揭示的青藏高原各主要植被类型的环境及植被特征,可为构建高精度的高寒山地水文模型、碳氮循环模型等提供参考^[10, 11, 43]。

本研究针对青藏高原全域,分析了单个特征对青藏高原各植被类型的区分度,在实际应用中可针对研究区内部的特点分区选择特征、多特征联合参与应用。例如,针对横断山区植被分类问题,其植被分布特点是植被的垂直地带性分布明显、各植被类型斑块破碎且混杂分布等,依据其植被分布特点,可以联合海拔、坡度、坡向、年最低温度、净初级生产力等多个特征开展分类。

本研究虽然在一定程度上揭示了青藏高原各主要植被类型的特征及生态环境差异,但受到植被分类数据、环境及植被特征数据等方面的限制,未来可从以下几方面进行改进:1)获取更高质量的植被分类数据。本研究中为提高各植被类别的准确性,选择了各主要植被类型核心区用于特征分析,导致原本分布面积较小的针阔叶混交林和草丛类别中可用于特征分析的像元数过少,其特征统计结果可信度较低。2)获取更高质量的环境及植被特征空间化数据。受限于大尺度土壤温度、土壤含水量、降水量等空间化数据产品的空间分辨率,它们主要反映了1 km及以上空间尺度的植被特征空间差异,模糊了其对应特征的局地细节特征,在更精细空间尺度的上应用需考虑其植被分布特点进行特征分析和选择。同时,受限于遥感物候数据在青藏高原西北部地区的物候有效提取率低,各植被类型参与统计分析的样本量减少,这可能是导致物候特征在各植被类型之间差异小的主要原因。未来研究中可结合更高空间分辨率、更高精度的相关空间化数据产品,以进一步细化各植被类型的特征及环境差异分析。

4 结论

本研究针对青藏高原特殊的地理环境和植被类型,选用植被、地形、土壤、气候4个维度共计58个空间化的指标,通过使用频数分布统计方法对这些空间特征数据开展了定量分析,获得了以下新认识:

(1)净初级生产力、遥感植被指数(包含归一化植被指数和增强型植被指数)、树冠植被覆盖度、土壤温度、年最低温度、年总蒸散发7个指标在灌丛和草地类型之间的特征差异明显,叶面积指数、净初级生产力、遥

感植被指数(包含归一化植被指数和增强型植被指数)、树冠植被覆盖度、裸地覆盖度、海拔、土壤含水量、年总降水量、年总蒸散发 10 个指标在草原、草甸类型上的差异明显,净初级生产力、遥感植被指数(包含归一化植被指数和增强型植被指数)、海拔、土壤温度、年最低温度 6 个指标在高山苔原-垫状-稀疏植被与其他植被类型特征差异明显。

(2)遥感归一化植被指数、裸地覆盖度、海拔、土壤温度、年最低温度、年总蒸散发、净初级生产力 7 个指标对青藏高原各类型植被的区分度较高。

(3)针对青藏高原全域范围内的单个特征来说,大部分环境及植被特征对青藏高原植被类型区分度较高,可提高灌丛和草地之间、各草地类型之间、高山苔原-垫状-稀疏植被与其他植被类型等多组植被类型之间的可区分性,有助于解决青藏高原植被精细分类主要存在的灌丛和草地区分、草地类型细分、高山苔原-垫状-稀疏植被识别和山地垂直地带植被识别四个难点问题。

本研究揭示的青藏高原各主要植被类型的特征及环境差异,可用于模拟青藏高原各网格单元的生态环境,从而可为宏观尺度上(1 km 及以上)青藏高原的植被精细分类、自然地带划分、生物多样性和生态系统功能评估、地表物质循环研究等提供理论依据。同时,在实际应用中,可针对研究区内部的特点分区选择特征、多特征联合参与应用。

参考文献(References):

- [1] 陈馨悦,张世挺,牛克昌. 性状关联跨尺度推演:高寒草甸植物种内及种间性状的协同与权衡. 科学通报, 2022, 67(10): 986-996.
- [2] Wang Z R, Yang G J, Yi S H, Chen S Y, Wu Z, Guan J Y, Zhao C C, Zhao Q D, Ye B S. Effects of environmental factors on the distribution of plant communities in a semi-arid region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Research*, 2012, 27(4): 667-675.
- [3] 李晓丽,徐满厚,孟万忠,刘琦,刘敏. 模拟增温对云顶山亚高山草甸水热因子及群落结构的影响. 生态学报, 2020, 40(19): 6885-6896.
- [4] 张慧,赵涪良,朱文泉. 基于多源数据产品集成分类制作的青藏高原现状植被图. 北京师范大学学报:自然科学版, 2021, 57(6): 816-824.
- [5] Xu Z G, Zhuang D F. The methodology of detailed vegetation classification based on environmental knowledge and remote sensing images. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 23-28, 2007, Barcelona, Spain. IEEE, 2008: 2074-2077.
- [6] 闫利,江维薇. 多光谱遥感影像植被覆盖分类研究进展. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 8-13.
- [7] Huang K L, Kardol P, Yan X B, Luo X, Guo H. Plant - soil biota interactions explain shifts in plant community composition under global change. *Functional Ecology*, 2021, 35(12): 2778-2788.
- [8] Carmona C P, Bueno C G, Toussaint A, Träger S, Díaz S, Moora M, Munson A D, Pärtel M, Zobel M, Tamme R. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function. *Nature*, 2021, 597(7878): 683-687.
- [9] Díaz S, Kattge J, Cornelissen J H C, Wright I J, Lavorel S, Dray S, Reu B, Kleyer M, Wirth C, Colin Prentice I, Garnier E, Bönisch G, Westoby M, Poorter H, Reich P B, Moles A T, Dickie J, Gillison A N, Zanne A E, Chave J, Joseph Wright S, Sheremet'ev S N, Jactel H, Baraloto C, Cerabolini B, Pierce S, Shipley B, Kirkup D, Casanoves F, Joswig J S, Günther A, Falczuk V, Rüger N, Mahecha M D, Gorné L D. The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 2016, 529(7585): 167-171.
- [10] 刘昌明,王中根,杨胜天,桑燕芳,刘小莽,李军. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展. 地理学报, 2014, 69(5): 579-587.
- [11] 刘放,吴明辉,杨梅学,陈生云. DNDC 模型的研究进展及其在高寒生态系统的应用展望. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1321-1333.
- [12] Zhang X A, Liu L Y, Chen X D, Gao Y A, Xie S A, Mi J. GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth System Science Data*, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [13] Buchhorn M, Lesiv M, Tsendbazar N E, Herold M, Bertels L, Smets B. Copernicus global land cover layers—collection 2. *Remote Sensing*, 2020, 12(6): 1044.
- [14] Tian L, Zhang Y J, Holzapfel C, Huang K, Chen N, Tao J A, Zhu J T. Vegetation pattern in northern Tibet in relation to environmental and geo-spatial factors. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(5): 526-537.
- [15] 兰爱玉,林战举,范星文,姚苗苗. 坡向对青藏高原土壤环境及植被生长影响的实验研究. 冰川冻土, 2023, 45(1): 42-53.
- [16] 赵嘉玮,杨海龙,曲梦雨. 黄土高原-青藏高原过渡带人工林植被数量分类及环境解释. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(9): 117-126.
- [17] 杨亮,刘丽男,孙少波. 1982—2015 年青藏高原植被变化的主导环境因子. 生态学报, 2023, 43(2): 744-755.

- [18] 贾伟, 高小红, 杨灵玉, 史飞飞, 何林华. 面向对象方法的复杂地形区地表覆盖信息提取. 兰州大学学报: 自然科学版, 2018, 54(4): 486-493.
- [19] 杨新宇, 林笠, 李颖, 贺金生. 青藏高原高寒草甸土壤物理性质及碳组分对增温和降水改变的响应. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(4): 765-774.
- [20] 姚喜喜, 宫旭胤, 白滨, 张利平, 郎侠, 吴建平. 祁连山高寒牧区不同类型草地植被特征与土壤养分及其相关性研究. 草地学报, 2018, 26(2): 371-379.
- [21] 郑度, 李炳元. 青藏高原地理环境研究进展. 地理科学, 1999, 19(4): 295-302.
- [22] 史培军, 胡小康, 陈彦强, 张慧, 杨合仪, 胡金鹏, 杨雯倩, 贾伟, 马伟东, 姜璐, 张钢锋, 蒲小燕, 郝力壮, 王静爱, 朱文泉, 马永贵, 唐海萍, 陈志. 青藏高原地表大气氧含量空间格局及自然地带“三维分异”的新认识. 地理学报, 2023, 78(3): 532-547.
- [23] 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. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1566.
- [24] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集(1:1 000 000). 北京: 科学出版社, 2001.
- [25] Myneni R, Knyazikhin Y, Park T. MOD15A2H MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015.
- [26] Wei S, Dai Y, Duan Q, Liu B, Yuan H. A global soil data set for earth system modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, 6(1): 249-263.
- [27] Running S, Zhao M. MOD17A3HGF MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2019.
- [28] Didan K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015.
- [29] DiMiceli C, Carroll M, Sohlberg R, Kim D, Kelly M, Townshend J. MOD44B MODIS/Terra Vegetation Continuous Fields Yearly L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015.
- [30] Friedl M, Gray J, Sulla-Menashe D. MCD12Q2 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2019.
- [31] Jarvis A, Reuter H, Nelson A, Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe version 4. CGIAR-CSI. 2008.
- [32] Muñoz Sabater, J. ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019.
- [33] Hengl T, Wheeler I. Soil organic carbon content in 5 g/kg at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution. Zenodo. 2018.
- [34] Wan Z, Hook S, Hulley G. MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021.
- [35] Running S, Mu Q, Zhao M, Moreno A. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2017.
- [36] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, Hegewisch K C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 170191.
- [37] 张新时. 西藏植被的高原地带性. 植物学报. 1978, 20(02): 140-149.
- [38] 郑度. 青藏高原自然地域系统研究. 中国科学: D 辑: 地球科学, 1996, 26(4): 336-341.
- [39] 郑度, 张荣祖, 杨勤业. 试论青藏高原的自然地带. 地理学报, 1979, 34(1): 1-11.
- [40] Wan H W, Li H X, Wu J H, Liu Y P. Spatial distribution pattern in mammal and bird richness and their relationship with ecosystem services in Sanjiangyuan National Park, China. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(6): 1662-1677.
- [41] 谢嘉淇, 徐曼, 王薇茜, 虞依娜. 国家公园生态系统服务研究与展望. 生态学杂志, 2023, 42(1): 219-227.
- [42] Yang K, Ye B S, Zhou D G, Wu B Y, Foken T, Qin J, Zhou Z Y. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2011, 109(3-4): 517-534.
- [43] 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 刘星才, 孙赫, 丁劲, 王磊, 冷国勇, 张永强, 桑燕芳, 方海燕, 张士锋, 韩冬梅, 刘小莽, 贺莉, 徐锡蒙, 唐寅, Chen D. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. 科学通报. 2019, 64(27): 2807-2821.