

藏西南高原植被 NDVI 时空变化及其与海拔梯度的关系

李焱¹, 戴睿², 张云霞¹, 巩杰¹

(1.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2.西藏自治区气象局气候中心, 拉萨 850000)

摘要:青藏高原植被分布不仅与区域水热条件密切相关,而且受海拔和地形的共同影响,认知植被与海拔梯度的关系对青藏高原生态保护具有重要科学和现实意义。基于 MODIS NDVI 数据和植被类型数据,分析了藏西南高原近 21 年来不同植被类型生长季 NDVI 时空变化特征,探讨了植被覆盖与海拔梯度的关系。结果表明:藏西南高原植被类型有森林、荒漠、草原、草甸、高山植被、栽培植被、灌丛和其他植被 8 种;随时间推移,各植被类型 NDVI 均显著增加且在 2017 年达到最大值。研究区草原、草甸、灌丛和高山植被的增加速率依次为 0.006/10 a, 0.004/10 a, 0.01/10 a 和 0.006/10 a。除了局地植被呈退化趋势外,绝大部分植被覆盖不断改善。草原、草甸、灌丛和高山植被主要集中分布在海拔 4 000 m 以上的地区,NDVI 在各海拔梯度上均存在较大差异。不同植被类型 NDVI 随海拔升高均呈现不同的减小趋势,不同年份间同种植被 NDVI 随海拔梯度变化具有相似的变化趋势。研究结果可为藏西南高原生态建设、植被恢复和畜牧业发展提供一定的科学依据和决策支持。

关键词:青藏高原;归一化植被指数;时空分异;海拔梯度;MODIS NDVI

中图分类号:P95

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0215-08

Spatiotemporal Variation of Vegetation NDVI and Its Relationship with Altitude Gradient in Southwest Tibet Plateau

LI Yan¹, DAI Rui², ZHANG Yunxia¹, GONG Jie¹

(1.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.Climate Center of Tibet Meteorological Bureau, Lhasa 850000, China)

Abstract: Vegetation distribution in the Qinghai-Tibet Plateau is not only closely influenced by regional hydrothermal conditions, but also affected by the altitude and topography of the plateau. Understanding of the relationship between vegetation and altitude gradient is of great scientific and practical significance to the ecological protection of the Qinghai-Tibet Plateau. Based on MODIS NDVI data and vegetation type data, we analyzed the spatial and temporal variation characteristics of NDVI during the growing season of different vegetation types in the Southwest Tibetan Plateau in the past 21 years, then explored the correlation between vegetation cover and elevation gradient based on DEM data. The results show that there are eight vegetation cover types in the Southwest Tibet Plateau, including forest, desert, grassland, meadow, alpine vegetation, cultivated vegetation, shrub, and other vegetation types; the NDVI of each vegetation type kept increasing and reached their maximum value in 2017; the increasing rates of grassland, meadow, shrub and alpine vegetation in the study area were 0.006/decade, 0.004/decade, 0.01/decade and 0.006/decade, respectively; in addition to the local vegetation degradation trend, most of the vegetation coverage continued to improve; grassland, meadow, shrub and alpine vegetation mainly concentrate in the area with an altitude of more than 4 000 m, and NDVI has great differences in each elevation gradient; the NDVI of different vegetation types showed different decreasing trends with the increase of altitude, and the NDVI of the same vegetation had similar changing trends with the change of altitude gradient in different years. These results can provide the

收稿日期:2021-07-01

修回日期:2021-07-20

资助项目:第二次青藏高原综合考察研究“土地利用变化及其环境效应”(2019QZKK0603)

第一作者:李焱(2001—),女,甘肃兰州人,硕士在读,研究方向:草地生态。E-mail:liyan2019@lzu.edu.cn

通信作者:巩杰(1975—),男,甘肃宁县人,理学博士,教授,研究方向:景观生态学。E-mail:jgong@lzu.edu.cn

scientific support for decision-making for ecological construction, vegetation restoration, and animal husbandry in Southwest Tibet Plateau.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; normalized difference vegetation index; spatiotemporal differentiation; elevation gradient; MODIS NDVI

植被是自然环境和生态系统的必要组分,不仅参与生态系统物质循环、能量转化等生态过程,而且对土地覆盖、水循环及气候变化产生着重要影响^[1-2]。同时,降水、温度和太阳辐射等气候要素,以及土地利用、畜牧业发展等人为因素都会对植被物候和生长过程等产生影响,进而影响着植被生产力和分布格局^[3-5]。近年来,气候变暖带来了全球和区域生态环境的改变,青藏高原是全球气候变化的敏感区,研究表明青藏高原气候变暖尤为明显^[6]。伴随着高原地区人类活动的不断加剧,诱发草地退化、草地冻融和土地沙化、荒漠化等生态环境问题的出现^[7-9]。因此,在全球气候变暖和环境日益恶化的背景下,开展青藏高原植动态变化格局及其影响因素分析是目前全球变化研究热点和重点之一,对认知区域植被生长状况和生态环境评价具有重要意义。

随着观测技术和研究手段的不断进步,利用遥感数据研究植被生长状况及其对气候变化、人类活动的响应已经成功引起了国内外学者的广泛关注。其中,归一化植被指数(NDVI)与光合有效辐射、生物量、植被生产力等紧密相关,经常被广泛用作表征植被生长状态及植被覆盖度的指示因子^[10-11]。目前已有诸多研究成果表明植被对气候变化响应敏感^[12]。然而,植被生长过程不仅与水热条件有关,而且受制于其所处的地理环境。有研究表明地形因子(坡度、坡向和海拔等)是决定植被覆盖的最主要因素之一^[13-14],会对区域水热条件、光照、土壤养分以及人类活动造成不同程度作用,进而影响着植被空间分异格局^[15]。如 Lou 等^[16]研究发现高程梯度影响柴达木盆地植被动态变化对气候因素的响应;位宏等^[17]分析发现玛纳斯流域 NDVI 随海拔的升高呈现先升高后下降,然后缓慢增加到最高点开始持续下降的趋势。上述研究表明地形因子与植被关系研究对认知区域植被地域分布规律及未来演变趋势等具有重要意义。

藏西南高原位于青藏高原西南部,由喜马拉雅山脉与冈底斯山系组成,平均海拔在 4 000 m 以上,其高海拔的特点使该区域的生态环境极其脆弱、敏感,易受到海拔、气候条件等自然因素的影响^[18]。高原自然环境严酷,高寒草原、草甸是主要的植被类型,同时也支撑着高原畜牧业的发展,其植被状况好坏直接

影响生态环境及经济社会的稳定。因此,一些学者采用多源遥感数据和技术手段研究了青藏高原植被分布与变化特征,并探讨了高原植被与气候和人类活动的关系^[19-22],发现植被与气候及人类活动因子存在相关关系,还存在时滞效应^[23]。此外,植被变化特征也受到地形因子,特别是海拔的影响。复杂的地形和海拔等因素决定着高原气候条件,致使植被分布情况更加复杂,并形成明显的垂直地带性^[24],考虑到高原地区海拔高差大、植被类型多的特点,该地区是研究植被 NDVI 变化及其与海拔关系的理想区域^[25],但是针对高原地区探究植被覆盖度与海拔因子间相关关系的研究相对较少。因此,基于 MODIS-NDVI 数据,本文分析 2000—2020 年藏西南高原不同植被类型 NDVI 的时空变化特征,并结合 DEM 数据探究海拔梯度与不同植被类型 NDVI 的相关关系,研究结果可为高原不同海拔梯度下的生态环境保护及草地资源利用提供科学参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

藏西南高原(26°59′—33°97′N,78°28′—90°40′E)位于青藏高原西南部,隶属于西藏自治区,区内由阿里地区和日喀则市组成,国土面积约 30.89 万 km²(图 1)。研究区内包括喜马拉雅山脉和冈底斯—念青唐古拉山脉,重峦叠嶂,地势变化显著,地貌类型复杂多样,海拔 1 553~8 848.86 m,平均海拔 4 000 m 以上,呈现两头高,中间低的地势特点。该地区气候寒冷干燥,太阳辐射强,日温差较大,年降雨量仅为 180~300 mm,年均气温-2℃,加之高原及其周边地区显著的海拔差异,导致该区气候多样,使高原繁衍出丰富的植物种类,区内植被类型以草原、草甸和高山植被为主。

1.2 数据来源

归一化植被指数(NDVI)数据采用美国 LPDAAC (Land Process Distributed Active Archive Center)提供的 MODIS 数据,选择研究时段为 2000 年 3 月至 2021 年 2 月共 21 a 的 MOD13Q1 植被指数产品,空间数据分辨率为 250 m,时间分辨率 16 d。将 NDVI 数据在 GEE 平台(Google Earth Engine)调用、融合、裁剪,为消除数据误差干扰,采用最大值合成法 MVC(Maximum

Value Composites) 去除云和大气干扰, 得到逐月 NDVI 数据序列。参考卓嘎等^[19]划分方法, 本文将

4—9 月定为植被生长季, 对逐月数据进行计算得到植被生长季的逐年 NDVI 数据。

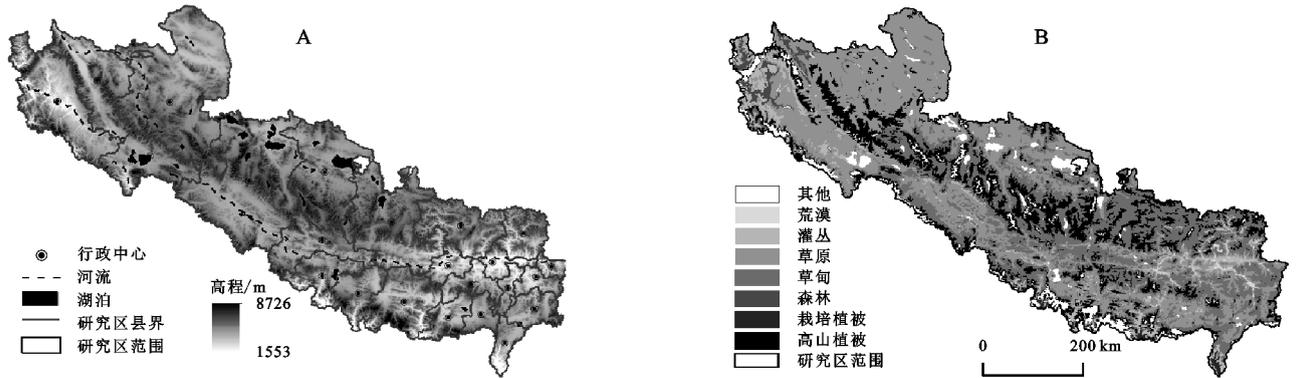


图 1 研究区概况及植被类型

植被类型数据(1:100 万植被图)主要来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>), 该数据将植被分为 11 种类型, 藏西南高原包含其中的 9 类(针叶林、阔叶林、荒漠、草原、草甸、高山植被、栽培植被、灌丛和其他)。由于针叶林和阔叶林在研究区中占比极少, 故而合为森林进行研究。因此本文将藏西南高原的植被类型划分为: 森林、荒漠、草原、草甸、高山植被、栽培植被、灌丛和其他植被等 8 种, 获得研究区植被类型(图 1B)。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 90 m), 为了和 MODIS 数据保持一致, 对该数据重采样为 250 m 后进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 趋势分析法也叫一元线性回归模拟, 主要运用最小二乘法模拟单个像元 NDVI 值随时间的变化规律从而反映整体的空间变化特征, 其计算公式如下^[21,26]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \bar{X}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \bar{X}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: θ_{slope} 是 NDVI 在研究时段内的趋势斜率; \bar{X}_i 为第 i 年 NDVI 的平均值; i 为研究时间的序列长度。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$, 说明像元内植被覆盖度呈上升趋势; 当 $\theta_{\text{slope}} \leq 0$, 说明像元内植被指数呈下降趋势, 植被覆盖度可能存在下降趋势, θ_{slope} 绝对值越大说明该地区植被活动越强, 变化趋势就越大^[27-29]。采用 F 检验法对植被 NDVI 生长季变化趋势进行显著性检验, 将检验结果划分为 5 类: 基本稳定 ($\theta = 0, p > 0.05$)、显著改善 ($\theta > 0, 0.01 < p < 0.05$)、极显著改善 ($\theta > 0, p \leq 0.01$)、显著退化 ($\theta \leq 0, p < 0.05$)、极显著退化 ($\theta < 0, p \leq 0.01$)。

1.3.2 海拔梯度分级 为探究不同植被类型 NDVI

与海拔梯度的关系, 以森林、草原、灌丛、高山植被、草甸、栽培植被、其他植被、荒漠 8 种植物类型作为研究对象, 参考相关文献^[25-26] 的分级方式以 100 m 为间距进行海拔梯度分级, 统计不同海拔区段 8 种植物类型在 2000—2020 年的年均生长季、2000 年生长季、2010 年生长季和 2020 年生长季 NDVI 变化趋势。利用趋势线分析法得到各海拔梯度上不同植被类型 NDVI 均值变化情况。

2 研究结果与分析

2.1 不同植被类型 NDVI 的时序变化特征

藏西南高原 2000—2020 年 8 种植物类型生长季年均 NDVI 呈波动增加趋势, 但不同植被类型 NDVI 变化特征不同(图 2)。由图 2 可见: 藏西南高原草甸 NDVI 最小值为 0.178(2015 年), 最大值为 0.210(2017 年), 增长速率为 0.004/10 a(图 2A)。草原 NDVI 最小值为 0.133(2005 年), 最大值为 0.161(2017 年), 增长速率为 0.006/10 a(图 2B)。森林 NDVI 最高, 最小值为 0.531(2000 年), 最大值为 0.640(2017 年), 增长速率为 0.02/10 a(图 2C)。灌丛 NDVI 最小值为 0.201(2002 年), 最大值为 0.233(2017 年), 增长速率为 0.01/10 a(图 2D)。高山植被 NDVI 受海拔的影响, 最小值为 0.105(2002 年), 最大值为 0.123(2018 年), 增长速率为 0.006/10 a(图 2E)。栽培植被 NDVI 最小值为 0.235(2005 年), 最大值为 0.275(2020 年), 增长速率为 0.014/10 a(图 2F)。荒漠和其他植被 NDVI 相对较小, 仅在 0.02~0.1 之间浮动。可见, 藏西南高原植被指数随时间的变化呈波动增加趋势, 并在 2017 年达到最大。不同类型植被覆盖度依次为森林(0.60) > 栽培植被(0.25) > 灌丛(0.21) > 草甸(0.20) > 草原(0.15) > 高山植被(0.11) > 荒漠(0.09) > 其他植被(0.03)(图 2)。

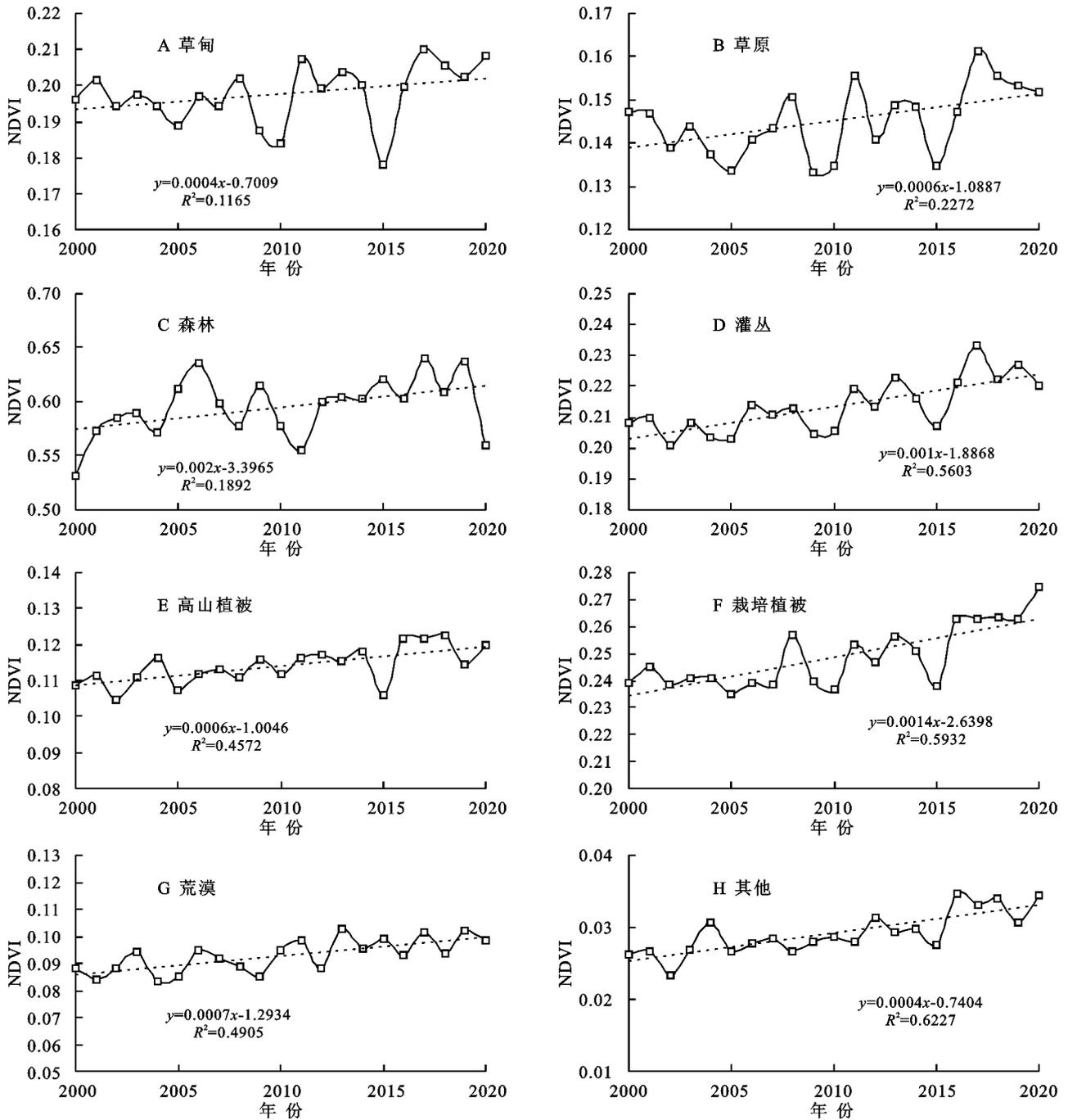


图 2 2000—2020 年藏西南高原不同植被类型 NDVI 随时序变化趋势分布散点

2.2 不同植被类型 NDVI 的空间变化特征

由藏西南高原不同植被类型面积占比及显著性检验结果可知(表 1),藏西南高原植被类型以草原、草甸、高山植被、灌丛为主(面积占比分别为 38.87%, 31.03%, 17.59% 和 5.17%),局部为森林、荒漠和栽培植被(面积占比分别为 0.42%, 1.29% 和 0.55%)。因此,本文主要讨论草原、草甸、高山植被及灌丛 NDVI 的空间分布及其变化趋势(图 3)。总的来说,藏西南高原大部分区域植被覆盖趋于好转,局部地区呈现退化趋势。

藏西南高原不同植被类型 NDVI 空间变化特征

不同,主要表现为(1)草原主要分布在藏西南高原西部和东南部,其变化速率为 $-0.0274\sim 0.1773/10\text{ a}$;大部分草原区域呈现显著改善(面积占比 32.37%),改善区域为藏西南高原西部。呈现显著退化草原面积占比 1.28%,主要分布在定结;不显著草原退化区域主要在藏西南高原东南部(占比 14.86%),如昂仁、仲巴、岗巴县等(图 3A, B)。(2)草甸主要分布在藏西南高原中部和东部,53.64%的草甸呈现不显著改善,且主要分布在高原中部。呈现显著退化草甸面积占比 1.53%,主要分布在定结和岗巴等;不显著退化区域主要分布在藏西南高原东北部(占比 26.83%),

如萨嘎、昂仁、谢通门、南木林等;其余地区草甸无明显变化(占比 5.22%)(图 3C,D)。(3) 高山植被主要分布在冈底斯和喜马拉雅山区,大部分呈现不显著改善(占比 59.97%);呈现显著改善面积占 16.77%,主要分布在革吉、仲巴、措勤、昂仁等;呈现不显著退化的面积占比 21.35%,分布在措勤和仲巴等;显著退化的面积占比仅达 0.52%,其余地区呈现无明显变化(图 3E,F)。(4) 灌丛主要分布在藏西南高原南部,大部分呈现不显著改善(占比 53.35%);呈现显著改善区域占 27.46%,主要分布在札达、桑珠孜区等;呈现不显著退化的面积占比 17.82%,主要分布在札达、谢通门、南木林等;显著退化的面积占比仅为 1.21%,其余地区呈现无明显变化(图 3G,H)。

表 1 不同植被类型的面积及显著性检验占比情况
%

植被类型 变化趋势	变化趋势面积占比%						
	草原	草甸	高山植被	灌丛	荒漠	栽培植被	其他
显著改善	32.37	12.79	16.77	27.46	—	—	—
显著退化	1.28	1.53	0.52	1.21	—	—	—
不显著改善	51.11	53.64	59.97	53.35	—	—	—
不显著退化	14.86	26.82	21.35	17.82	—	—	—
无明显变化	0.38	1.53	0.72	1.29	—	—	—
面积占比	38.87	31.03	17.59	5.17	1.29	0.55	5.17

2.3 不同植被类型 NDVI 随海拔梯度的变化规律

不同植被类型 NDVI 随海拔上升呈现不同的变化趋势,不同年份间同种植被 NDVI 随海拔梯度变化具有相似的变化趋势(图 4)。从图 4 可以看出,草甸、草原、高山植被和灌丛在各海拔梯度上虽具有显著差异,但随着海拔的升高,植被 NDVI 均呈现不同的减小趋势。概括来说,(1) 草甸主要分布在 3 100~6 400 m 海拔带,以 4 300~5 800 m 区段为主。2000—2020 年均生长季、2000 年、2010 年和 2020 年生长季 NDVI 均随着海拔升高而减小。3 100~3 600 m 区段 2020 年的草甸植被指数最低,这可能是受气候和人类活动的影响造成草甸植被受到一定的破坏(图 4A)。(2) 草原主要分布于 3 600~6 300 m 海拔区段,以 4 000~5 600 m 为主。2000—2020 年均生长季 NDVI 随着海拔升高呈现波动减小,2000 年、2010 年和 2020 年生长季 NDVI 随着海拔升高呈现先减后增再减趋势,4 000~4 500 m 海拔区段草原植被指数较大,说明该区段较适宜草原植被生长(图 4B)。(3) 高山植被分布于海拔 3 200~6 500 m 区

段,以 4 400~5 800 m 为主。2000 年、2010 年、2020 年和 2000—2020 年均生长季 NDVI 随着海拔升高呈现显著减小趋势(图 4C)。(4) 灌丛主要分布 2 300~5 900 m 海拔区段,以 3 800~5 400 m 为主。生长季灌丛 NDVI 随着海拔升高而减小,但在海拔 3 600 m 以下植被 NDVI 下降不明显,在 3 600~3 800 m 区间出现骤降,3 800 m 以上区段减小趋势显著(图 4D)。

3 讨论

海拔是影响植被类型及分布的重要因素,海拔升高不仅影响着地表水热状况,同时还会在一定程度上影响人类活动类型和范围,进而直接(或间接)影响植被 NDVI 的空间分异特征^[30]。基于 MODIS-NDVI 数据,本文开展了 2000—2020 年藏西南高原不同植被类型 NDVI 时空变化及 NDVI 随海拔梯度的变化规律。结果表明,近 21 a 藏西南高原不同植被类型 NDVI 呈现显著增加趋势,这与一些学者的研究结果基本一致^[19,31-32]。但 2000 年、2010 年及 2020 年生长季 NDVI 存在一定的波动,说明研究区生态环境脆弱,植被易受气候和人类活动的影响。

研究区内不同植被类型 NDVI 具有显著差异,并随海拔上升呈现不同的下降趋势。低海拔地区 NDVI 明显高于其他区段,这与植被类型在高程上的分布密切相关^[4],主要原因可能是低海拔区段水热状况和土壤养分较好,更适合植被生长发育。由于藏西南高原海拔普遍较高,植被多分布于 3 000~5 000 m 海拔区段,生态环境极易受气候变化和人类活动的影响而发生植被好转和(或)植被退化现象^[14]。有研究表明高原人口多集中于海拔小于 4 500 m 的地区,居住在 4 500 m 海拔以上的人们多以放牧活动来维持生存^[33]。因此,在生态环境建设和保护时,需要根据海拔梯度划分区段实施分区保护策略,强化低海拔片区的人工种草、退耕还林(草)及合理放牧等生态建设项目;高海拔区段应减少牲畜数量,合理放牧,防止过牧对生态环境的破坏。综上可知,在制定藏西南高原生态环境建设政策时,需因地制宜,针对地形特点和不同海拔梯度分布的植被及其特征,采取不同保护策略来恢复、建设和改善藏西南高原生态环境,支撑高原畜牧业可持续发展和国家生态安全迫在眉睫。

基于长时间序列 MODIS-NDVI 遥感数据,本文探讨了海拔梯度和不同类型植被 NDVI 的关系。但有研究表明坡度、坡向会对植被覆盖度产生一定影响^[34-35],因此在以后的研究中还需要综合考虑多

种地形因子对植被覆盖度的影响。不仅如此,海拔还会影响区域的水热分布,未来还需综合考虑影响植被 NDVI 变化的水热条件、土地利用、土壤养分等因素,以为藏西南高原草地资源的合理开发利用以及制定生态保护方案提供建议。此外,本文存在一些不确定性,如研究采用的植被类型数据虽是目前广泛

使用的权威,但数据精度较低。随着退耕还林还草和生态建设工程的实施,区域植被必然会受到气候、地形及人类活动等因素影响后发生植被类型的转变,这种变化会导致一定的分析误差。因此,未来应加强多源数据融合和集成分析,探究藏西南高原植被类型的分布现状。

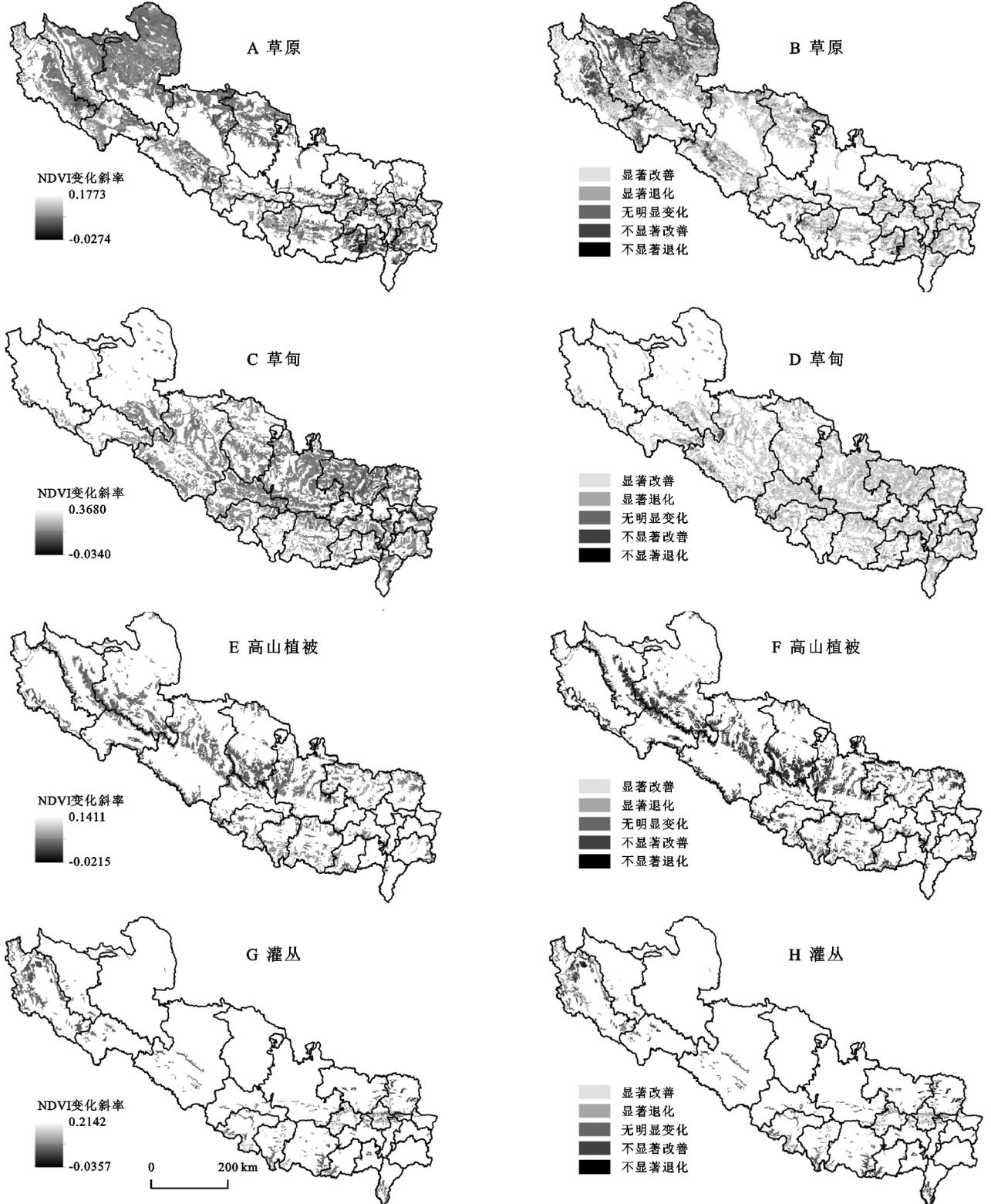


图 3 2000—2020 年藏西南高原不同植被类型 NDVI 变化趋势及显著性检验

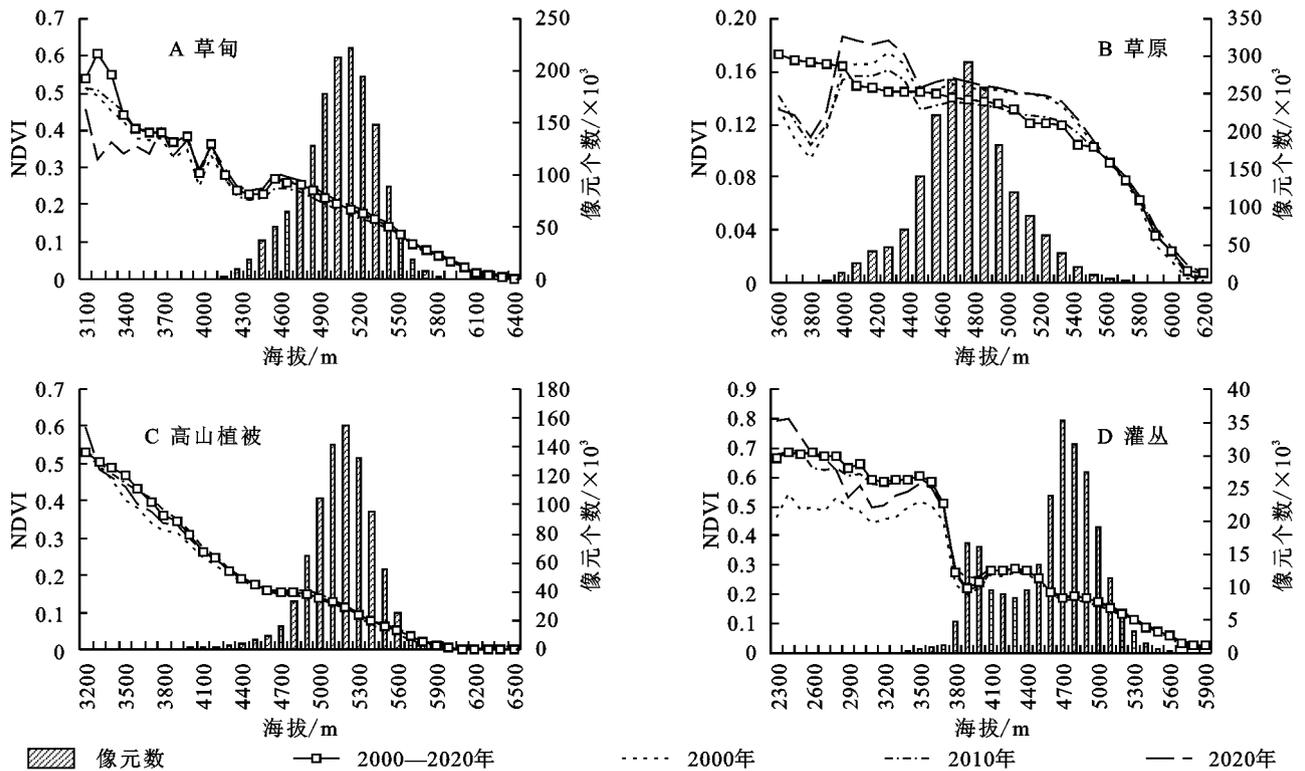


图4 不同植被类型的植被指数随海拔变化曲线及频率分布情况

4 结论

本文基于 2000—2020 年 MODIS-NDVI, DEM 和植被类型数据,分析藏西南高原近 21 a 来不同植被类型生长季 NDVI 时空变化特征,分析探讨了植被类型随海拔梯度的变化特征,初步结论如下:

(1) 近 21 a 来藏西南高原植被生长状况良好,8 种植被 NDVI 均呈现上升趋势,草甸、草原、高山植被及灌丛分别以 $0.004/10\text{ a}$, $0.006/10\text{ a}$, $0.01/10\text{ a}$, $0.006/10\text{ a}$ 的速率波动上升,并在 2017 年达到最大。不同植被类型年均生长季植被覆盖度依次为森林 > 栽培植被 > 灌丛 > 草甸 > 草原 > 高山植被 > 荒漠 > 其他植被。

(2) 藏西南高原大部分植被覆盖趋于好转,局地呈现退化趋势。藏西南高原植被类型主要为草原、草甸、灌丛和高山植被,草原主要分布在高原西部和东南部,草甸主要分布在高原中部和东部,高山植被主要分布在冈底斯山脉和喜马拉雅山系处,而灌丛主要分布在高原南部。

(3) 藏西南高原不同植被类型所处的海拔梯度具有明显差异,不同类型植被 NDVI 随海拔梯度的上升呈现不同的减小趋势;同一类型植被指数在不同年份随海拔梯度的变化趋势保持一致,但存在一定波动变化。上述发现可为藏西南高原生态建设、植被恢复和畜牧业发展提供一定的决策支持和借鉴。

参考文献:

- [1] Xiao L T, Howard E, Epstein, Bo L. Elevation and climate effects on vegetation greenness in an arid Mountain-Basin system of central Asia[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12 (10):1665-1684.
- [2] 方利,王文杰,蒋卫国,等.2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J].*地理科学*.2017,37(11):1745-1754.
- [3] Linscheid N, Estupinan-Suarez L M, Brenning A, et al. Towards a global understanding of vegetation-climate dynamics at multiple time scales[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17:945-962.
- [4] 张远东,张笑鹤,刘世荣.西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析[J].*应用生态学报*, 2011, 22(2):323-330.
- [5] Seddon A, Macias-Fauria M, Long P R, et al. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability [J]. *Nature*, 2016, 53:229-232.
- [6] Zhang Y L, Gao J G, Liu L S, et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 108:139-148.
- [7] Li X, Gao J, Zhang J, et al. Natural and anthropogenic influences on the spatiotemporal change of degraded meadows in southern Qinghai Province, West China, 1976—2015 [J]. *Applied Geography*, 2018(97):176-183.

- [8] 姚楠,赵英,张建国,等.不同放牧条件下内蒙古草原土壤冻融期水热动态[J].水土保持研究,2017,24(5):132-138.
- [9] Zhan Q Q, Zhao W, Yang M J, et al. A long-term record (1995—2019) of the dynamics of land desertification in the middle reaches of Yarlung Zangbo River basin derived from Landsat data[J]. *Geography and Sustainability*, 2021,2(1):12-21.
- [10] 孔冬冬,张强,黄文琳,等.1982—2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J].地理学报,2017,72(1):39-52.
- [11] Guan Q Y, Yang L Q, Guan W Q, et al. Assessing vegetation response to climatic variations and human activities: Spatiotemporal NDVI variations in the Hexi Corridor and surrounding areas from 2000 to 2010[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019,135(3/4):1179-1193.
- [12] Piao S L, Mohammat A, Fang J Y, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. *Global Environmental Change*, 2006,16(4):340-348.
- [13] Li J J, Peng S Z, Li Z, et al. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017,247:260-270.
- [14] 熊巧利,何云玲,李同艳,等.西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(6):259-266.
- [15] 张建香,张多勇,张勃,等.黄土高原植被景观多尺度变化及其与地形的响应关系[J].生态学杂志,2015,34(3):611-620.
- [16] Lou J P, Xu G Y, Wang Z J, et al. Multi-year NDVI values as indicator of the relationship between spatiotemporal vegetation dynamics and environmental factors in the Qaidam Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2021,13(7):1240-1259.
- [17] 位宏,徐丽萍,李晓蕾,等.玛纳斯河流域植被覆盖度随地形因子的变化特征[J].中国农业气象,2018,39(12):814-824.
- [18] 陆晴,吴绍洪,赵东升.1982—2013年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J].地理科学,2017,37(2):292-300.
- [19] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2018,38(9):3208-3218.
- [20] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J].应用生态学报,2021,32(4):1361-1372.
- [21] 柴立夫,田莉,奥勇,等.人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):390-396.
- [22] 张江,袁旻舒,张婧,等.近30年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应[J].生态学报,2020,40(18):6269-6281.
- [23] Yuan J, Xu Y P, Xiang J, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its associated influence factor analysis in the Yangtze River Delta, eastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019,26(32):32866-32879.
- [24] 李艳芳,孙建.青藏高原 NDVI 时空变化特征研究(1982—2008)[J].云南农业大学学报:自然科学,2015,30(5):790-798.
- [25] 万红,李希灿,万剑华,等.青藏高原地区不同植被类型 MODIS 植被指数与海拔高度的关系研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11):39-44.
- [26] 韩炳宏,周秉荣,颜玉倩,等.2000—2018年青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J].草地学报,2019,27(6):1651-1658.
- [27] 饶品增,王义成,王芳.三江源植被覆盖区 NDVI 变化及影响因素分析[J].草地学报,2021,29(3):572-582.
- [28] 吕洋,董国涛,杨胜天,等.雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系[J].资源科学,2014,36(3):603-611.
- [29] 魏榕,刘冀,张特,等.雅鲁江流域生长季植被时空变化特征及对气象因子的响应分析[J].生态环境学报,2021,30(3):512-522.
- [30] 张诗羽,张毅,王昌全,等.岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J].水土保持通报,2018,38(1):69-75,2.
- [31] Chen J, Yan F, Lu Q. Spatiotemporal variation of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau and the influence of climatic factors and human activities on vegetation trend (2000—2019) [J]. *Remote Sensing*, 2020,12(19):3150-3172.
- [32] 丁明军,张懿鲤,刘林山,等.青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征[J].地理科学进展,2010,29(4):507-512.
- [33] Li D, Luo H Y, Hu T S, et al. Identification of the roles of climate factors, engineering construction, and agricultural practices in vegetation dynamics in the Lhasa River Basin, Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2020,12(11):1883-1903.
- [34] 覃金兰,薛联青.西北干旱区玛纳斯河流域植被时空变化特征及其与地形因子的空间关系[J].生态环境学报,2020,29(11):2179-2188.
- [35] 银朵朵,王艳慧.温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J].生态学报,2021,41(3):1158-1167.