

# 基于PLUS模型的藏北高原植被类型演变特征及预测

张媛媛

(河北工程大学, 河北省邯郸市; zoo1898@163.com)

**摘要:** 藏北高原作为青藏高原生态屏障的重要组成部分, 其植被动态对区域生态安全至关重要。本研究基于2000—2020年多源遥感与气象数据, 结合植被类型动态度、转移矩阵及PLUS (Patch-generating Land Use Simulation) 模型, 分析了藏北高原植被类型的变化规律, 并预测了自然发展与生态保护双情景下2030年植被格局。结果表明: (1) 2000—2020年, 高寒草原和高寒草甸占主导地位, 但高寒植被持续退化, 综合动态度下降; (2) 植被类型间转换频繁, 高寒草原与高寒草甸双向转化显著; (3) PLUS模型预测显示, 生态保护情景下高寒草甸面积微增, 湿地与冰川持续退化。研究为藏北高原生态保护与草地承载力优化提供了科学依据。

**关键词:** 藏北高原; 植被类型动态; PLUS模型; 情景预测; 生态保护

## 引言

藏北高原(29°53'~36°32'N, 78°41'~92°16'E)是青藏高原生态屏障的核心区域, 其独特的高寒干旱环境, 使得该地区生态系统对全球气候变化高度敏感[1]。作为陆地生态系统的重要组成部分, 植被在水热环境调节、碳循环过程及气候反馈中发挥关键作用[2]。近年来, 气候变暖与人类活动加剧导致藏北高原植被状况发生显著变化, 威胁区域生态安全与可持续发展[3]。

当前针对青藏高原植被变化的研究多基于以归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [4]、植被覆盖度(Fraction Vegetation Coverage, FVC) [5]为主的遥感指数评估植被覆盖整体趋势[6], 而对土地覆被的时序研究则主要使用土地利用类型划分[7], 缺乏对高寒草甸、高寒草原等具体植被类型动态转换规律的分析。未来植被类型数据可以通过PLUS模型进行预测[8], 相比于其他模型, PLUS模型能更好地利用随机森林算法表达驱动因素与植被类型变化的关系, 在发展概率的约束下自动模拟斑块生成植被变化[9]。

本研究综合2000—2020年多源遥感数据与气象观测资料, 结合植被类型动态度模型与改进的PLUS (patch-generating land use simulation) 模型, 系统分析藏北高原16类植被的时空分异规律, 量化自然与人为因子对植被类型转换的贡献度, 并模拟自然发展与生态保护双情景下2030年植被格局。研究旨在揭示高寒生态系统对气候变化的响应, 分析未来区域植被变化情景, 为藏北高原生态可持续发展管理提供理论支撑与决策依据。

## 1 研究区概况与数据方法

### 1.1 研究区概况

藏北高原总面积约59.5万km<sup>2</sup>, 平均海拔4900m, 年均气温低于0℃, 年降水量50—600mm, 自东南向西北递减。植被类型呈梯度分异, 东南部以高寒草甸为主, 西北部以荒漠草原为主, 中部广泛分布高寒草原。区域生态系统脆弱, 物种多样性有限, 是研究高寒植被动态的天然实验室。

## 1.2 数据来源

本研究使用的植被类型数据来自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/product>) 发布的 2000—2020 年 30 米分辨率植被分类图, 涵盖高寒草甸、草原、荒漠等 16 类植被; 地形数据基于美国航天飞机雷达地形测绘任务 (SRTM) 的 30 米分辨率数字高程模型 (DEM)。气象数据方面, 整合了 ERA5-Land 月均土壤水分与太阳辐射数据 (空间分辨率  $0.1^\circ$ ), 与青藏高原科学数据中心下载的 1 公里分辨率降水及  $1/33^\circ$  气温数据。此外, 人类活动强度数据采用 1 公里分辨率综合数据集, 涵盖人口密度、GDP 密度等社会经济指标; 土壤类型数据则源自世界土壤数据库 (HWSD V1.2) 的 1 公里分辨率土壤质地分类。所有数据经空间配准、分辨率统一及标准化预处理后进行分析。

## 1.3 研究方法

动态变化率指数是指研究区一定时间某种植被类型变化的面积与变化前面积的比例, 可以定量地反映该地类变化的速度及剧烈程度, 可分为单一动态度和综合动态度。

单一植被类型动态度

单一植被类型面积动态度反映某一植被类型面积变化的速率, 其计算公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $T$  为时间长度,  $K$  为某植被类型面积动态度;  $U_a$ 、 $U_b$  研究初期和末期的某地类面积。

综合植被类型面积动态度

综合植被类型动态度是指一定时间内某一区域内植被类型面积动态变化的整体活跃程度或剧烈程度; 其计算公式如下:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $n$  为植被类型数;  $U_i$  为第  $i$  类植被初始时间的面积,  $U_{i-j}$  为植被类型  $i$  向  $j$  转移面积的绝对值。

PLUS 模型:

本研究采用 PLUS (Patch-generating Land Use Simulation) 模型模拟藏北高原植被类型时空演变。该模型由土地扩张分析策略 (LEAS) 与多类型随机斑块生成机制 (CARS) 两大核心模块组成, LEAS 模块能够有效捕捉高寒生态系统斑块级变化的复杂性。基于随机森林算法提取 2000 年与 2010 年两期植被类型数据, 结合高程、降水、气温、土壤含水量等 11 类驱动因子, 计算各植被类型的扩张概率分布, 并生成高寒草甸、高寒草原等 16 类植被的发展潜力图。CARS 模块采用元胞自动机 (CA) 框架, 通过设置邻域权重与全开放的转换规则矩阵, 模拟植被竞争中的随机种子触发机制。模型验证基于 2000—2010 年数据模拟 2020 年植被格局, 结果显示 Kappa 系数为 0.841、FOM 指数为 0.085, 符合可靠性标准 (Kappa > 0.75, FOM < 0.1), 表明 PLUS 模型适用于藏北高原未来植被动态模拟。

为预测未来变化, 研究设置自然发展与生态保护双情景。自然发展情景延续历史转换概率, 不施加人工干预; 生态保护情景则限制栽培植被扩张, 并提升荒漠向高寒草原的转化概率, 以模拟生态保护政策的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被类型变化特征

表 1 和表 2 说明了 2000 年、2010 年及 2020 年藏北高原 16 种植被类型面积是如何变化的。2000—2010 年, 面积占比最大的高寒草原动态度为 0.43%, 2010 年后转为微弱缩减; 占比第二大的高寒草甸由扩张 (0.44%) 转为收缩 (-0.10%)。高寒植被面积则是在 2010 年和 2020 年持续下降。在植被类型以外, 水体出现了持续的扩张, 而永久积雪/冰川有所减少。

表1 藏北高原各植被类型面积

植被类型	面积 (km <sup>2</sup> )		
	2000	2010	2020
常绿阔叶林	32	38	31
常绿针叶林	210	275	351
针阔混交林	31	16	38
落叶阔叶林	10	33	5
落叶针叶林	141	101	356
灌木丛	2403	2236	2561
高寒灌丛草甸	130	42	12
高寒草甸	151945	158652	157139
高寒草原	338824	353255	352887
高寒植被	123620	103254	103015
高寒荒漠	13777	16495	14932
栽培植被	235	196	391
湿地	916	891	751
水体	23247	25417	27778
永久积雪/冰川	19781	14412	14999
无植被区	65	54	121

表2 藏北高原多年植被类型动态度变化

植被类型类型	2000—2010年		2010—2020年		
	变化面积 (km <sup>2</sup> )	动态度 (%)	变化面积 (km <sup>2</sup> )	动态度 (%)	
常绿阔叶林	6	1.88	-7	-1.84	
常绿针叶林	65	3.10	76	2.76	
针阔混交林	-15	-4.84	22	13.75	
落叶阔叶林	23	23.00	-28	-8.48	
落叶针叶林	-40	-2.84	255	25.25	
灌木丛	-167	-0.69	325	1.45	
高寒灌丛草甸	-88	-6.77	-30	-7.14	
单一植被类型	高寒草甸	6707	0.44	-1513	-0.10
动态度	高寒草原	14431	0.43	-368	-0.01
	高寒植被	-20366	-1.65	-239	-0.02
	高寒荒漠	2718	1.97	-1563	-0.95
	栽培植被	-39	-1.66	195	9.95
	湿地	-25	-0.27	-140	-1.57
	水体	2170	0.93	2361	0.93
	永久积雪/冰川	-5369	-2.71	587	0.41
	无植被区	-11	-1.69	67	12.41
综合植被类型动态度		0.39%	0.06%		

## 2.2 植被类型转移特征

如图1所示, 2000—2020年藏北高原植被类型转移呈现显著动态特征, 高寒草甸与高寒草原相互转化面积较大, 两者间的频繁转换主导了区域植被格局变化; 此外高寒草原与高寒荒漠之间也存在着明显的相互转变关系。同时, 高寒植被在2000—2010年与2010—2020年两个时段内持续向高寒草甸和草原转移, 表明高

寒生态系统内部存在向优势植被类型的趋同性演变；此外，永久积雪/冰川消融导致其向高寒植被转化的趋势明显，凸显气候变化背景下，冰川积雪融化对植被扩张的直接作用。

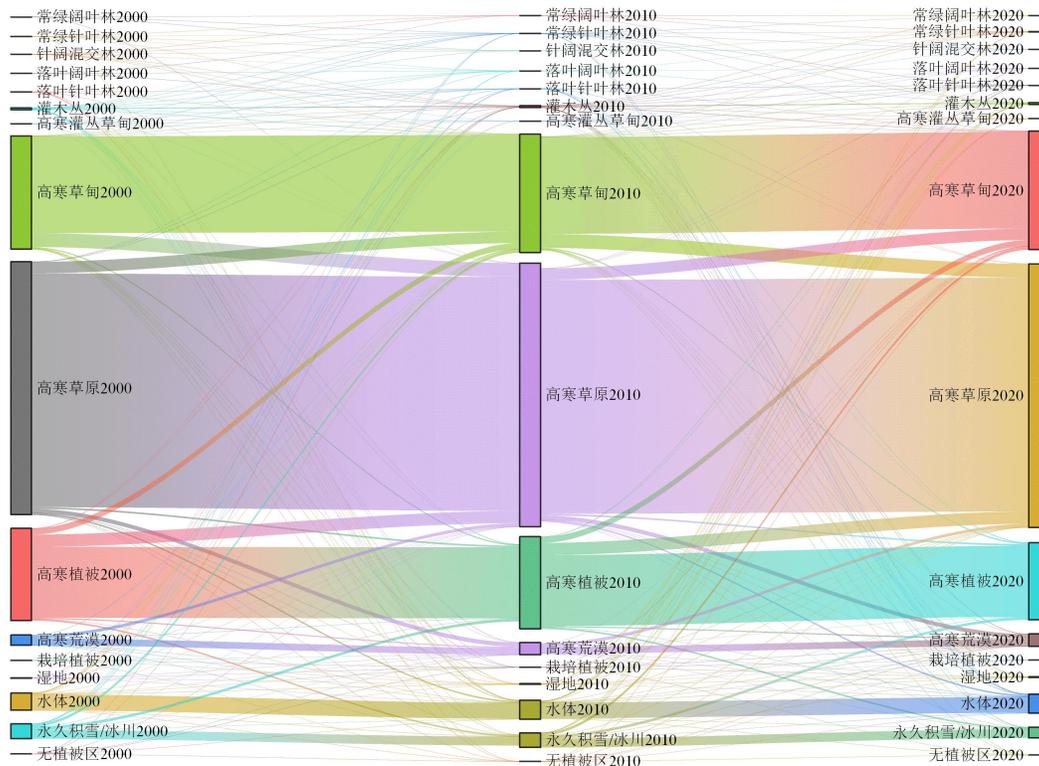


图 1 藏北高原多年植被类型转移矩阵

### 2.3 未来情景预测

表 3 对比了藏北高原 2030 年自然发展情景与生态保护情景下各植被类型的面积及占比预测。自然发展情景中，面积最大的高寒草原占 52.08%，达 351,732 平方公里，生态保护情景下面积略增至 352,142 平方公里，占比 52.141%。高寒草甸面积占比约 23%，两类情景差异较小。高寒荒漠面积在自然情景下为 15,445 平方公里，保护情景下减少至 14,880 平方公里。水体面积在两种情景下均超 4%，但自然情景中略高。两种情景均显示冰川持续消融，印证气候变化的不可逆性。数据整体显示，生态保护政策对部分植被类型面积有调控作用，但主导类型格局未显著改变。

表 3 未来发展情景不同植被类型所占面积

2030年自然发展情景		2030年生态保护情景	
面积 (km <sup>2</sup> )	占比 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	占比 (%)
23	0.003	14	0.002
383	0.057	301	0.045
39	0.006	49	0.007
4	0.001	2	0.000
468	0.069	478	0.071
2744	0.406	2479	0.367
9	0.001	9	0.001

表3(续表)

156015	23.101	160905	23.825
351732	52.08	352142	52.141
102864	15.231	101204	14.985
14374	2.128	13665	2.023
412	0.061	412	0.061
709	0.105	709	0.105
30027	4.446	28029	4.150
15445	2.287	14880	2.203
119	0.018	89	0.013

### 3 结论

本研究基于 PLUS 模型揭示了藏北高原植被类型的演变规律,并预测了未来不同情景下的植被格局变化,主要结论如下:

(1) 2000—2020年,高寒草原和高寒草甸始终为主要的植被类型,但高寒植被整体呈现显著退化趋势,此外植被综合动态度在2010年—2020年大幅下降。植被类型间转换频繁,高寒草原与高寒草甸双向转化面积超1.7万 $\text{km}^2$ 。

(2) PLUS 模型模拟显示,2030年自然发展与生态保护双情景下,高寒草原和高寒草甸的面积有所上升,但格局未发生显著改变。生态保护政策对局部植被类型具有调控作用,但难以逆转整体趋势。

(3) 本研究量化了自然与人为因子对植被类型转换的贡献,为藏北高原生态屏障保护与草地资源可持续管理提供了科学依据。未来需进一步耦合多尺度气候模型,探索极端气候事件对植被的突变影响,同时优化 PLUS 模型参数以提升预测精度,为区域生态修复政策制定提供更全面的数据支撑。

### 参考文献

- [1] 陈美祺,邵全琴,宁佳,等.青藏高原不同生态地理区生态恢复状况分析[J].草地学报,2023,31(04):1211-1225.
- [2] 陈甲豪,吴凯,胡中民,等.2000—2021年青藏高原生长季植被敏感性的时空变异[J].生态学报,2023,43(10):4054-4065.
- [3] 岳笑,张良侠,周德成,等.基于植被净初级生产力的青藏高原地区生态脆弱性及其控制因子分析[J].地理科学,2024,44(01):140-148.
- [4] 杜近芳,程江浩,刘悦俊,等.1982—2020年青藏高原植被生长季的月NDVI时空变化特征及其影响因素[J].高原科学研究,2024,8(02):40-49.
- [5] 郭建晓,桑会勇,翟亮.青藏高原植被覆盖度时空变化特征及其驱动因素[J].生态学杂志,2023,42(11):2665-2674.
- [6] 王蕾,赵昕奕.基于遥感植被指数的青藏高原生长季开始时间分析和模拟[J].高原气象,2024,43(05):1163-1176.
- [7] 彭海月,任燕,李琼,等.青藏高原土地利用/覆被时空变化特征[J].长江科学院院报,2022,39(08):41-49+57.
- [8] ZHANG J, WANG J, CHEN Y, et al. Spatiotemporal variation and prediction of NPP in Beijing-Tianjin-Hebei region by coupling PLUS and CASA models[J]. Ecological Informatics, 2024, 81:102620.
- [9] 于目良,刘悦俊,张燕杰.青藏高原未来土地利用变化与景观生态风险多情景预测[J].长江流域资源与环境,2024,33(10):2204-2218.