

青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉沿海拔变化规律研究

柯昌迪^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2025年3月13日; 录用日期: 2025年4月17日; 发布日期: 2025年4月27日

摘要

青藏高原东南缘地区作为横断山脉核心区, 是全球生物多样性热点和垂直自然带谱的典型区域, 其显著的海拔梯度为研究现代乔木花粉分布规律及其气候驱动机制提供了理想场所。本研究通过整合49个现代花粉样点(海拔3500~4500米)数据, 结合冗余分析(RDA)和气候因子, 系统揭示了主要乔木花粉沿海拔的分布模式及其与印度夏季风(ISM)的关联。结果表明: 低海拔(<4000米)以松属(34.2%)、落叶栎类(15.6%)为主, 其分布受温暖季节温度和干旱季降水驱动; 高海拔(≥4000米)则以云杉/冷杉属(9.1%)、桦木属(12.5%)占优, 与寒冷温度和湿润季降水显著正相关。铁杉属和桧木属受限于高海拔低温, 而桦木属表现出强抗寒适应性。ISM通过雅鲁藏布江河谷上升气流, 将低海拔松属、云杉属花粉远距离输送至高海拔区域, 其强度与花粉丰度呈正相关, 为古季风重建提供了生物气候档案。本研究填补了高海拔花粉现代过程研究的不足, 为区域生物多样性保护、古气候定量重建及生态走廊管理提供了科学依据。

关键词

现代花粉, 海拔梯度, 冗余分析, 印度夏季风, 青藏高原东南缘

Study on the Changes of Pollen of Main Modern Trees along Altitude in the Southeastern Margin of Qinghai-Xizang Plateau

Changdi Ke^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes & Environmental Changes, Kunming Yunnan

Received: Mar. 13th, 2025; accepted: Apr. 17th, 2025; published: Apr. 27th, 2025

文章引用: 柯昌迪. 青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉沿海拔变化规律研究[J]. 地理科学研究, 2025, 14(2): 348-356. DOI: 10.12677/gser.2025.142036

Abstract

As the core area of the Hengduan Mountains, the southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau is a global biodiversity hotspot and a typical area of the vertical natural zone spectrum. Its significant elevation gradient provides an ideal place to study the distribution of modern tree pollen and its climate driving mechanism. By integrating data from 49 modern pollen samples (3500-4500 m above sea level), redundancy analysis (RDA) and climatic factors, we systematically revealed the distribution patterns of major tree pollen along sea level and its association with the Indian Summer monsoon (ISM). The results showed that pine (34.2%) and deciduous oak (15.6%) were the main species at lower altitudes (<4000 m), and their distribution was driven by temperature in the warm season and precipitation in the dry season. At high altitudes (≥ 4000 m), spruce/fir (9.1%) and Betula (12.5%) were dominant, and there was a significant positive correlation between cold temperature and wet season precipitation. Hemlock and alder are limited to low temperatures at high altitudes, while Birch shows strong adaptability to cold resistance. Through the updraft of the Yarlung Zangbo River valley, ISM transported pollen of pine and spruce from low altitude to high altitude areas over a long distance, and its intensity was positively correlated with pollen abundance, which provided bioclimatic archives for the reconstruction of ancient monsoon. This study fills the deficiency of modern process research of high altitude pollen, and provides a scientific basis for regional biodiversity conservation, paleoclimate quantitative reconstruction and ecological corridor management.

Keywords

Modern Pollen, Elevation Gradient; Redundancy Analysis, ISM, Southeast of Qinghai-Xizang Plateau

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏高原东南缘横断山区是全球生物多样性热点区域之一，其独特的纵向岭谷地貌与垂直的海拔梯度塑造了完整的垂直自然带谱，为研究植被与气候的协同演化提供了天然实验室[1]。该区域位于印度夏季风(ISM)与西风带的交汇区，水热条件的垂直分异显著驱动了植被类型的空间分异，而现代花粉作为植被与气候关系的直接记录者，其沿海拔的分布规律对揭示生态响应机制和重建古气候环境具有重要价值[2]。近年来，针对青藏高原的花粉研究多聚焦于高原腹地草本植物组合，而对高海拔森林生态系统的现代花粉传播过程关注不足[3] [4]。尤其横断山区作为 ISM 影响的核心通道，其乔木花粉的分布不仅受局地水热条件调控，还可能受季风驱动的远程花粉输送影响[5]。然而，现有研究对海拔梯度下乔木花粉的气候驱动因子量化不足，且缺乏对 ISM 花粉传输机制的深入探讨，限制了该区域古植被重建的精度。本研究以青藏高原东南缘 3500~4500 m 海拔梯度内的 49 个现代花粉样点为对象，结合冗余分析(RDA)和气候因子，旨在解决以下科学问题：(1) 主要乔木花粉类型沿海拔的分布规律及其主导气候因子；(2) 印度夏季风对花粉空间分异的驱动机制。研究成果可为区域生物多样性保护、古季风强度重建及高山生态走廊规划提供科学依据。

2. 研究区概况

研究区位于青藏高原东南缘(26°45'~28°20'N, 97°50'~99°35'E, 海拔 2800~4800 m)，见图 1，地处三江

并流区(怒江、澜沧江、金沙江)核心带,属于横断山脉纵向岭谷地貌体系。区内地形破碎度极高,呈现典型的高山峡谷景观,山体坡度普遍超过 35° , 相对高差达 1500~2000 米,发育有冰川侵蚀形成的 U 型谷、角峰、冰斗等第四纪冰川遗迹。气候区划属高原季风湿润气候,受西南季风与西风带交替控制,年均温在 $-1^\circ\text{C}\sim 5^\circ\text{C}$ 之间,气温日较差可达 $20^\circ\text{C}\sim 25^\circ\text{C}$, 年降水量 800~1200 mm, 70%集中于 5~10 月,冬春季节多强辐射雾。独特的水热组合与地形梯度塑造了完整的垂直植被带谱,从河谷至雪线依次分布有针阔混交林、暗针叶林、高山灌丛草甸和高山流石滩植被,其中高寒草甸与高寒灌丛构成研究区主体生态系统 [6]。

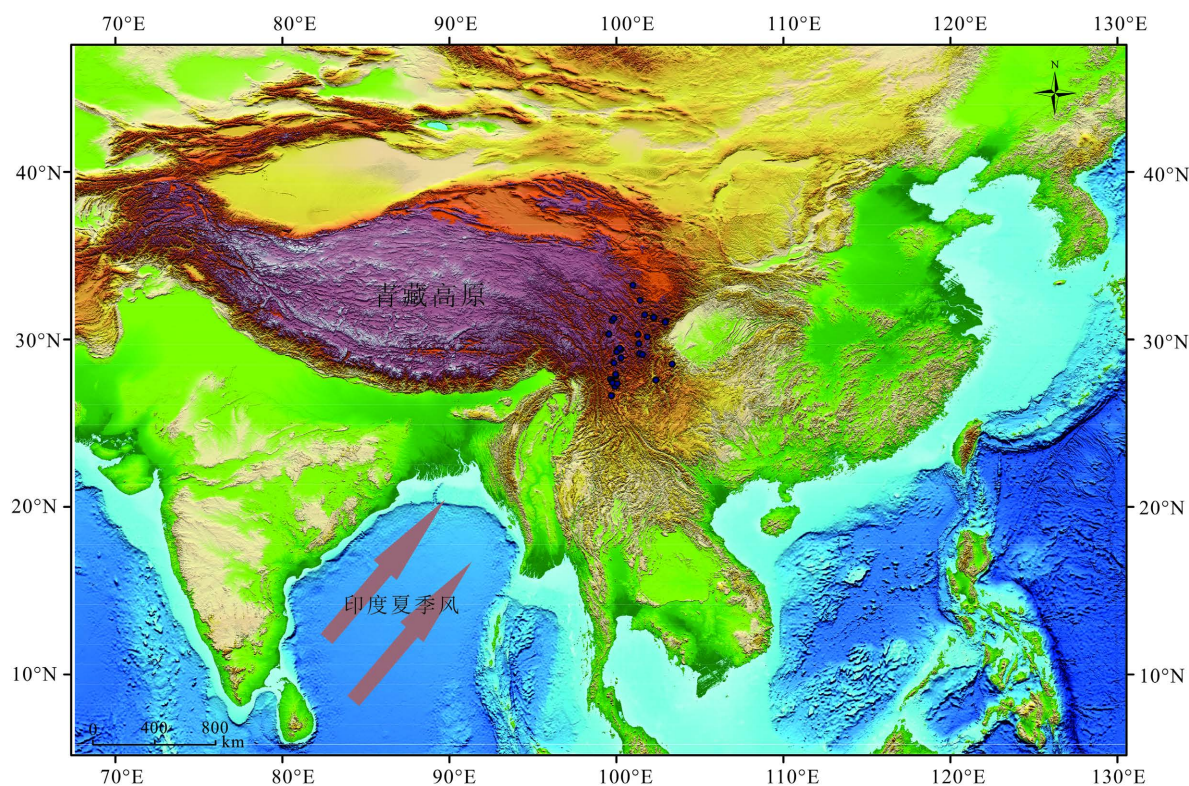


Figure 1. Overview of the study area, elevation data are from <https://www.gscloud.cn/> (the blue dots are the geographical locations of 49 modern pollen points collected in the paper)

图 1. 研究区概况, 高程数据来源于 <https://www.gscloud.cn/> (蓝色圆点为文中收集的 49 个现代花粉点的地理位置)

研究区植被垂直分异显著 [7]: 海拔 3000~3800 m 阴坡广泛发育冷杉(*Abies georgei*)、云杉(*Picea likiangensis*)为主的亚高山暗针叶林, 林下多见箭竹(*Fargesia* spp.)和多种杜鹃; 3800~4200 m 过渡带为高寒灌丛与草甸交错区, 植被呈现斑块化分布特征。高寒草甸以莎草科四川嵩草(*Kobresia setchwanensis*)和禾本科羊茅(*Festuca ovina*)为优势种, 伴生有报春花属(*Primula*)、绿绒蒿属(*Meconopsis*)、虎耳草属(*Saxifraga*)等典型高山花卉, 局部区域可见雪层杜鹃(*Rhododendron nivale*)灌丛侵入形成的灌草复合群落。此类草甸多分布于山脊线、古冰碛平台等相对平缓区域, 土壤类型以高山草甸土为主, 表层具 10~15 cm 厚草毡层。高寒灌丛生态系统集中分布于海拔 4000~4500 m 的冰缘地带, 优势灌木种呈现明显的生境分异: 阴坡以密枝杜鹃(*Rhododendron fastigiatum*)、髯花杜鹃(*R. anthopogon*)为主, 形成高度 30~50 cm 的垫状灌丛; 阳坡则发育以岩须(*Cassiope selaginoides*)、雪层杜鹃构成的稀疏灌丛, 植株多贴地生长以抵御强风。特殊生境中可见垂枝柏(*Sabina recurva*)、高山柳(*Salix paraflabellaris*)等乔木变种的灌木化形态, 反映了极

端环境的胁迫效应。在海拔 4300 m 以上流石滩前缘, 散见有红景天(*Rhodiola crenulata*)、水母雪兔子(*Saussurea medusa*)等高山冰缘植物, 其根系多深入岩缝以获取水分。河谷深切区(海拔 2800~3200 m)发育独特的干暖河谷灌丛, 以白刺花(*Sophora davidii*)、小叶栒子(*Cotoneaster microphyllus*)为建群种, 伴生有川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)的矮化植株, 呈现显著的旱生化特征。该植被类型与上部高寒生态系统形成鲜明对比, 其存在与河谷“焚风效应”导致的局地气候干旱密切相关[8]。研究区作为全球生物多样性热点地区, 保存有大量孑遗物种和特有种, 如独叶草(*Kingdonia uniflora*)、滇金丝猴(*Rhinopithecus bieti*)等, 同时作为亚洲主要江河的水源涵养区, 其生态功能具有全球尺度的重要意义。

3. 研究方法

本研究从青藏高原东南缘地区已发表的现代花粉数据记录收集了 49 个现代花粉样点[9]-[11] (见表 1), 其海拔跨度在 3500~4500 米之间, 而后通过 ArcGIS 对每个样点提取相应的 6 个气候因子, 分别是 Twarm (最温暖季节温度)、Pdry (干旱季节降水)、MAT (年平均温度)、Tcold (最寒冷季节温度)、Pwet (湿润季节降水)、MAP (年平均降水)。而后为了明确花粉组合与气候因子之间的关系, 我们又对环境变量和选定的主要花粉类型的百分比数据进行了冗余分析, 冗余分析在 R4.2.2 中完成[12]。

Table 1. Details of modern pollen sites
表 1. 现代花粉样点的详细信息

样点编号	海拔(m)	经度(°)	纬度(°)	区域植被类型	参考文献
1	3546	99.99	27.83	云/冷杉林, 常绿阔叶林	Xiao et al., 2011
2	3547	99.98	27.83	冷杉林, 杜鹃灌丛	陈海燕等, 2021
3	3611	99.95	27.91	云/冷杉林	陈海燕等, 2021
4	3681	102.37	27.58	云/冷杉林	Xiao et al., 2011
5	3706	101.40	29.16	云/冷杉林, 杜鹃灌丛	Xiao et al., 2011
6	3728	101.86	30.15	冷杉林	Li et al., 2015
7	3805	99.72	26.64	云/冷杉林	Xiao et al., 2011
8	3809	99.64	27.62	冷杉林, 杜鹃灌丛	陈海燕等, 2021
9	3820	102.93	31.04	高山灌丛	Li et al., 2015
10	3837	102.36	27.57	云/冷杉林	Xiao et al., 2011
11	3838	102.36	27.57	云/冷杉林	Xiao et al., 2011
12	3843	99.73	26.63	云/冷杉林	Xiao et al., 2011
13	3881	99.72	26.64	云/冷杉林	Xiao et al., 2011
14	3898	99.72	26.63	云/冷杉林, 杜鹃灌丛	Xiao et al., 2011
15	3916	103.35	28.53	冷杉林, 杜鹃灌丛	Li et al., 2015
16	3922	103.35	28.53	冷杉林, 杜鹃灌丛	Li et al., 2015
17	3939	99.74	27.50	冷杉林, 杜鹃灌丛	陈海燕等, 2021
18	3947	99.73	27.50	冷杉林, 杜鹃灌丛	陈海燕等, 2021
19	3957	99.92	27.18	冷杉林, 杜鹃灌丛	陈海燕等, 2021
20	3958	99.73	27.50	冷杉林, 杜鹃灌丛	陈海燕等, 2021
21	3959	99.71	26.63	云/冷杉林, 杜鹃灌丛	Xiao et al., 2011
22	3962	99.71	26.63	云/冷杉林, 杜鹃灌丛	Xiao et al., 2011

续表

23	3982	99.71	26.63	云/冷杉林, 杜鹃灌丛	Xiao <i>et al.</i> , 2011
24	3994	99.78	27.40	冷杉林, 杜鹃灌丛, 蒿草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
25	4059	101.00	33.24	高山灌丛和草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
26	4121	100.07	27.36	高山杜鹃灌丛, 蒿草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
27	4205	99.75	31.11	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
28	4237	101.70	31.47	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
29	4237	101.42	32.34	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
30	4244	102.22	31.30	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
31	4262	102.26	31.32	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
32	4282	102.96	31.08	高山灌丛和草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
33	4291	101.57	29.09	高山杜鹃灌丛, 蒿草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
34	4292	100.28	29.41	高山杜鹃灌丛, 蒿草杂草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
35	4299	101.30	30.30	高山灌丛和草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
36	4323	101.29	30.30	高山灌丛和草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
37	4357	100.28	28.90	高山杜鹃灌丛	Xiao <i>et al.</i> , 2011
38	4378	102.25	31.30	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
39	4389	100.09	29.39	高山蒿草草甸, 杂草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
40	4400	99.55	30.30	高山蒿草草甸, 杂草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
41	4438	100.10	29.39	高山蒿草草甸, 杂草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
42	4446	100.04	29.26	高山蒿草草甸, 杂草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
43	4450	101.36	29.74	高山灌丛和草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
44	4457	102.25	31.30	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
45	4467	99.87	31.25	高山草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
46	4483	99.56	30.32	高山蒿草草甸, 杂草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
47	4490	102.94	31.02	高山灌丛和草甸	Li <i>et al.</i> , 2015
48	4543	99.8654	28.5913	高山杜鹃灌丛, 蒿草草甸	Xiao <i>et al.</i> , 2011
49	4591	100.2066	29.4736	高山杜鹃灌丛	Xiao <i>et al.</i> , 2011

4. 研究结果

4.1. 青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉沿海拔变化规律

通过对青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉的分析(图 2), 我们发现在海拔 4000 米以下的区域, 松属花粉平均占比 34.2%, 变化范围 4.19%至 58.57%。其分布广泛, 但部分低海拔区域占比可达峰值(如 58.57%)。云杉/冷杉属花粉平均占比 8.7%, 部分区域占比为 0%, 最高值 27.35%。铁杉属花粉平均占比 4.3%, 变化范围 0%至 17.90%, 在中低海拔分布显著。桧木属花粉平均占比 3.8%, 最高值 13.77%, 部分区域完全无分布(0%)。桦木属花粉平均占比 8.2%, 变化范围 0.77%至 34.42%, 分布较分散。胡桃属花粉平均占比 1.8%, 最高值 9.62%, 部分区域无分布。常绿栎类花粉平均占比 2.0%, 最高值 7.69%。落叶栎类花粉平均占比 15.6%, 变化范围 1.94%至 41.60%, 为低海拔优势种属之一。而在海拔 4000 米以上的区域, 松属花粉平均占比降至 25.1%, 但个别区域出现极值(61.43%), 表明松属虽以低海拔为主, 但少数高海拔环境仍能适应。云杉/冷杉属花粉平均占比略升至 9.1%, 极值范围扩大(0%至 29.32%), 显示其对高

海拔冷湿环境适应性更强。铁杉属花粉平均占比骤降至 1.4%，且极值上限仅为 6.90%，表明其几乎不适宜高海拔生长。桧木属平均占比降至 1.5%，极值上限仅 5.68%，反映其对低海拔的依赖性较强。桦木属平均占比显著提升至 12.5%，极值范围扩大(0%至 38.11%)，说明其更适应高海拔环境，可能具备抗寒特性。胡桃属平均占比略降至 1.7%，极值范围与低海拔组相近(0%至 9.62%)，整体分布稳定。常绿栎类花粉平均占比降至 1.6%，极值上限仅为 4.23%，表明其分布随海拔升高而减少。落叶栎类花粉平均占比略升至 16.8%，但极值上限下降至 30.66%，显示其广布性，但高海拔区域分布更集中。

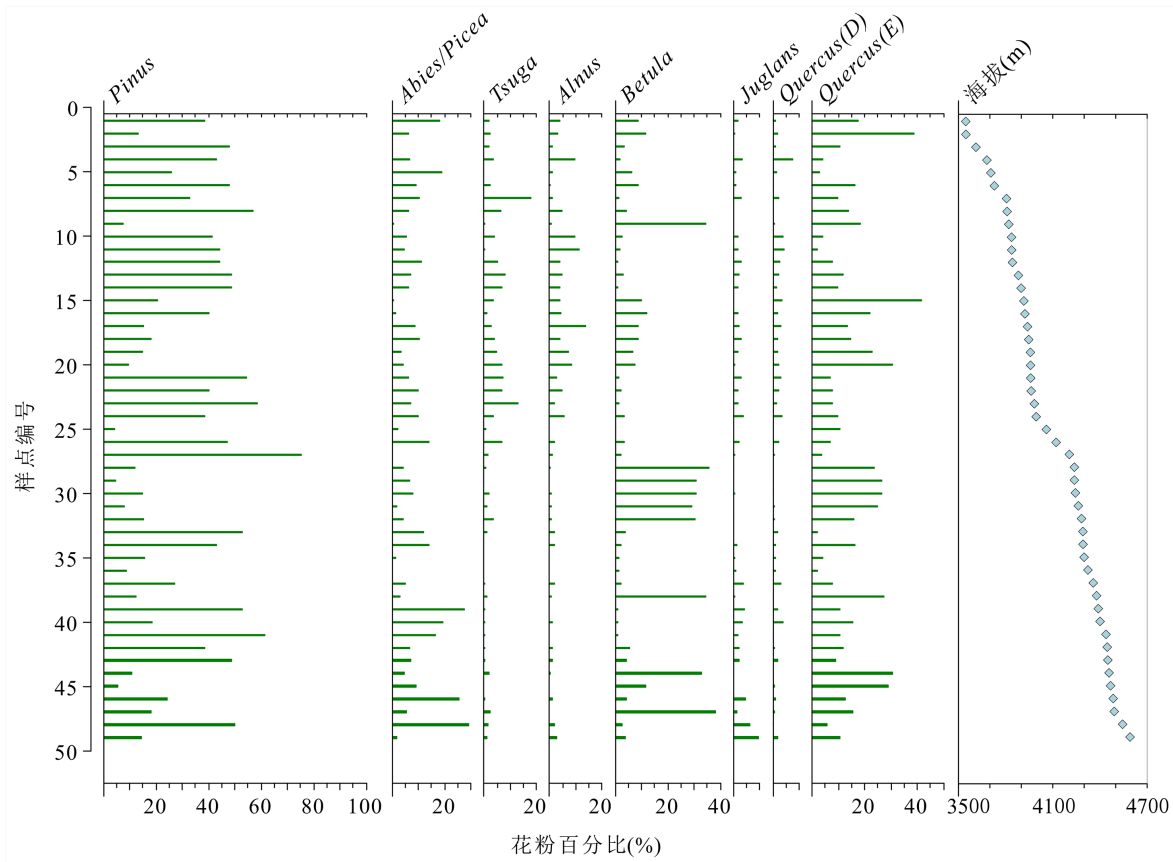


Figure 2. Changes of pollen percentage of major modern trees along altitude in the southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau

图 2. 青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉百分比沿海拔变化

松属在低海拔占主导地位，而云杉/冷杉在高海拔的极值更高，反映二者分别适应不同温度与湿度条件。但两者均呈现较广的分布潜力，表明其生态策略的灵活性。铁杉属和桧木属在低海拔平均值和极值均显著高于高海拔，表明其生长受限于高海拔的低温或资源条件，可能与温暖湿润环境相关。桦木属在高海拔的占比提升且极值范围扩大，可能与其抗寒能力或对高海拔开阔生境的适应性有关，成为高海拔植被的重要成分。落叶栎在两组中均保持较高占比，平均值相近且极值范围重叠，说明其对不同海拔的广泛适应能力，可能为跨海拔分布的广布种。胡桃属占比在两组中差异微小，常绿栎则随海拔升高占比下降，二者变化趋势较平缓，反映其对环境变化的敏感性较低。

4.2. 青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉冗余分析

根据 RDA 分析结果(图 3)，海拔 <4000 米和>4000 米的样点在花粉种属组成与气候因子的关联上呈

现显著差异，具体关系如下：高海拔样点(≥ 4000 米)，寒冷温度(Tcold)与湿润季节降水(Pwet)对高海拔样点影响显著。年平均降水(MAP)与高海拔样点呈正相关，表明高海拔区域整体降水充沛。优势花粉种属：冷杉/云杉和桦木与 Tcold 和 Pwet 高度正相关，显示其适应寒冷湿润气候。落叶栎在高海拔样点中与 MAT(年平均温度)呈负相关，可能受低温限制，分布比例较低。高海拔寒冷多雨的气候条件促进了耐寒、喜湿种属(如冷杉、云杉、桦木)的繁盛，而温暖适应性种属(如落叶栎)在此类环境中竞争力下降。低海拔样点(< 4000 米)，温暖季节温度(Twarm)与干旱季节降水(Pdry)是主要驱动因素。年平均温度(MAT)与低海拔样点正相关，反映整体气候偏暖。优势花粉种属：落叶栎和胡桃与 Twarm 和 Pdry 桤木属和铁杉属对中等降水条件(如 Pwet)有一定需求，但分布受限于低海拔的温暖气候。低海拔较温暖干燥的气候利于落叶栎、胡桃等喜温植物的生长，而桤木和铁杉可能依赖局部湿润微环境，整体受降水季节性影响较大。综上，RDA 分析表明，海拔差异通过温度与降水的空间分异塑造了花粉种属的分布格局，高海拔寒冷湿润区以冷杉、云杉、桦木为主，依赖低温与持续降水；低海拔温暖干燥区以落叶栎、胡桃为优势种，适应高温与季节性干旱；桤木、铁杉等种属对局部水热条件敏感，分布受限；常绿栎和桦木表现出跨海拔适应性，但其优势程度受气候因子强度调控。

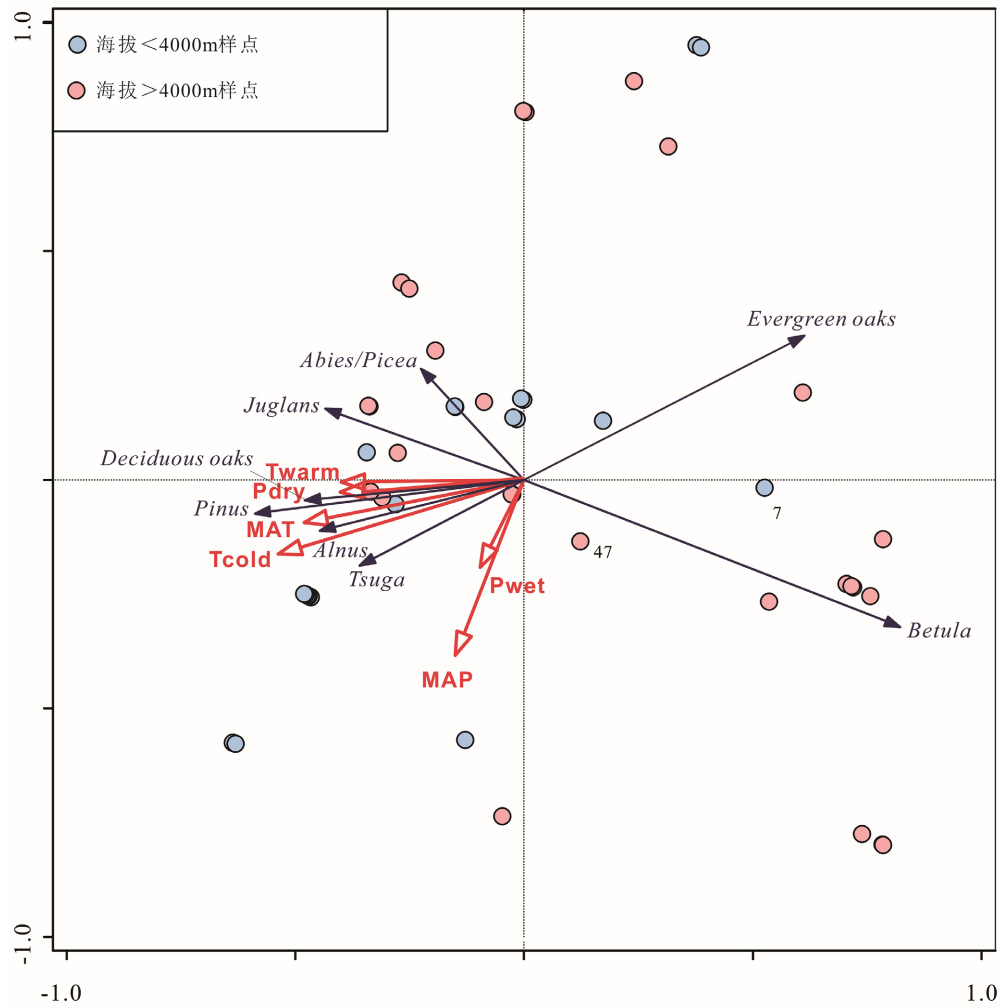


Figure 3. Pollen redundancy analysis results of major modern trees in the southeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau
图 3. 青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉冗余分析结果

4.3. 青藏高原东南缘地区主要现代乔木花粉沿海拔变化与印度夏季风的联系

印度夏季风(作为南亚夏季风的主要分支)携带大量水汽和气流,从印度洋向北推进至青藏高原东南缘时,形成显著的上升气流[13]。这一过程不仅带来强降水,还通过风力将低海拔森林植被(如松属、云杉属、桦木属等)的花粉颗粒远距离输送至高原内部[14]。雅鲁藏布江大峡谷是 ISM 侵入高原的关键通道,此处花粉相对丰度显著高于高原其他区域,表明 ISM 通过河谷地形将低海拔树花粉(如松属、云杉属)向高海拔地区扩散。这表明 ISM 不仅是水汽输送的载体,也是花粉传播的主要动力。此外,松属、云杉属等裸子植物花粉因具有气囊结构,更易随 ISM 气流长距离漂浮,成为高原内部主要的“外来花粉”[15]。东南缘因 ISM 直接入侵,树木花粉显著高于其他区域(如高原北部)几乎无树花粉,在 ISM 强烈影响的样点,松属花粉占比较高,反映了局部微环境(如河谷、向阳坡)对花粉沉积的放大效应[16]。

花粉沉积对 ISM 强度的指示意义,树木花粉的分布模式可作为 ISM 历史演化的潜在代用指标。例如,高分辨率花粉记录显示,树木花粉丰度与 ISM 强度呈正相关。在 ISM 强盛期,更多低海拔花粉被输送至高原内部;而在 ISM 减弱期,高原内部花粉组合则以本地草本植物为主。这一机制为重建地质历史时期 ISM 的路径和强度提供了新方法。ISM 驱动的花粉传播不仅改变了高原植被的表象,还可能影响生态系统的种间竞争[17]。例如,外来树花粉在高原内部的沉积可能干扰本地草本植物的花粉-植被-气候关系,但同时也记录了 ISM 的气候动力学特征。通过分析花粉组合中树花粉的时空变化,可间接揭示 ISM 与高原隆升的协同演化过程。印度夏季风通过雅鲁藏布江河谷的上升气流,将低海拔森林植被的花粉大规模输送至青藏高原东南缘,形成显著的花粉分布梯度。这一过程不仅塑造了高原内部的表土花粉组合特征,还为重建古季风演化提供了独特的生物气候档案。未来研究需进一步量化 ISM 强度与花粉丰度的定量关系,以提升其在古气候重建中的分辨率。

5. 结论

本研究揭示了青藏高原东南缘地区现代乔木花粉沿海拔梯度的分布规律及其气候驱动机制,主要结论如下:

花粉-海拔分异特征:松属和落叶栎类主导低海拔(<4000 米),适应温暖干燥气候;云杉/冷杉属和桦木属在高海拔(>4000 米)显著增加,依赖寒冷湿润条件。桦木属的广布性表明其对高海拔开阔生境的强适应性,而铁杉属和桧木属受限于低温与资源条件。气候驱动机制:冗余分析(RDA)表明,低海拔花粉组合受温暖季节温度(T_{warm})和干旱季降水(P_{dry})控制,高海拔则与寒冷温度(T_{cold})和湿润季降水(P_{wet})紧密关联。气候因子的垂直分异是花粉分布格局的核心驱动力。印度夏季风(ISM)的作用:ISM 通过雅鲁藏布江河谷输送低海拔花粉至高海拔区域,其强度直接影响高原内部花粉组合特征。松属和云杉属花粉的丰度可作为 ISM 强度的潜在代用指标,为重建古季风演化提供了新视角。

参考文献

- [1] Antonelli, A., Kissling, W.D., Flantua, S.G.A., Bermúdez, M.A., Mulch, A., Muellner-Riehl, A.N., et al. (2018) Geological and Climatic Influences on Mountain Biodiversity. *Nature Geoscience*, **11**, 718-725. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0236-z>
- [2] Chen, F., Ding, L., Piao, S., Zhou, T., Xu, B., Yao, T., et al. (2021) The Tibetan Plateau as the Engine for Asian Environmental Change: The Tibetan Plateau Earth System Research into a New Era. *Science Bulletin*, **66**, 1263-1266. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.04.017>
- [3] 秦锋. 青藏高原草原带和荒漠带湖泊表层沉积物现代花粉研究[J]. 中国科学: 地球科学, 51(3): 437-452.
- [4] 李怡雯, 许清海, 张生瑞, 等. 青藏高原高寒灌丛草甸花粉组合的植被指示性[J]. 科学通报, 2019, 64(20): 2141-2150.
- [5] Li, J., Xie, G., Wang, Y., et al. (2020) Pollen-Based Evidence of Coupling Mechanisms between Asian Summer

- Monsoon and Pollen Deposition on the Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, **210**, Article ID: 103352.
- [6] 吴征镒, 朱彦丞. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [7] 谭金凤, 肖霞云, 李艳玲, 等. 云南省香格里拉地区现代孢粉与植被关系研究[J]. 微体古生物学报, 2020, 37(1): 68-81.
- [8] 尹斌. 滇西北地区表层沉积物孢粉分析[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2017.
- [9] Xiao, X., Shen, J. and Wang, S. (2011) Spatial Variation of Modern Pollen from Surface Lake Sediments in Yunnan and Southwestern Sichuan Province, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **165**, 224-234.
<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.04.001>
- [10] Li, C. and Li, Y. (2015) Study of Modern Pollen and Stomata from Surficial Lacustrine Sediments from the Eastern Edge of Tibetan Plateau, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **221**, 184-191.
<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.07.006>
- [11] 陈海燕, 徐德宇, 廖梦娜, 等. 中国现代花粉数据集[J]. 植物生态学报, 2021, 45(7): 799-808.
- [12] Borcard, D., Gillet, F. and Legendre, P. (2011) Numerical Ecology in R, Use R! Springer.
- [13] Xu, J. and Hu, Z. (2014) The role of the Indian Summer Monsoon in the Pollen Transport and Deposition in the North-eastern Himalayan Region. *Pollen and Spores*, **56**, 121-134.
- [14] Böhner, J. and Antonic, O. (2009) Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) in Pollen Research. *Vegetation History and Archaeobotany*, **18**, 192-201.
- [15] Guo, Q., Nan, Z. and Geng, X. (2016) High Pollen Concentration and Diversity along the Yarlung Tsangpo River in Southeastern Tibet: Implications for Climatic and Environmental Changes. *Quaternary Research*, **85**, 67-76.
- [16] Prasad, V. and Bhatt, J.R. (2017) Pollen Records from the Indian Subcontinent: Implications for Monsoon Dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **470**, 289-299.
- [17] Zhang, Q. and Chen, F. (2018) The Influence of Monsoon on Pollen Distribution in the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, **31**, 7583-7596.