

DOI: 10.5846/stxb202001160134

李永飞, 李蓓蓓, 许斌, 刘水良, 凌超豪, 许建, 肖冰果, 董坚峰. 四川螺髻山表土和化石孢粉揭示的环境生态意义. 生态学报, 2021, 41(8): 3153-3169.

Li Y F, Li B B, Xu B, Liu S L, Ling C H, Xu J, Xiao B G, Dong J F. Ecological and environmental significance of the surface and fossil pollen in the Luoji Mountains, Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3153-3169.

## 四川螺髻山表土和化石孢粉揭示的环境生态意义

李永飞<sup>1</sup>, 李蓓蓓<sup>2,\*</sup>, 许斌<sup>3</sup>, 刘水良<sup>1</sup>, 凌超豪<sup>4</sup>, 许建<sup>1</sup>, 肖冰果<sup>1</sup>, 董坚峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 吉首大学旅游与管理工程学院 生态旅游湖南省重点实验室, 张家界 427000

<sup>2</sup> 南京信息工程大学 地理科学学院, 南京 210044

<sup>3</sup> 内江师范学院 地理与资源科学学院, 内江 641112

<sup>4</sup> 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

**摘要:**通过四川螺髻山(1984、2017年)表土和化石孢粉与植被的关系分析发现:孢粉组合中木本植物含量(91.0%)占绝对优势,松属、冷杉属、青冈属、常绿栎类、落叶栎类、桉木属、杜鹃花科、禾本科和蒿属为主要花粉类型;人工次生林花粉组合能很好地反映母体植被的群落特征,并可指示优势种的存在和人类活动痕迹;针阔混交林花粉组合能较好地反映群落整体特征,花粉类型能与母体植被中优势种较好地对应;常绿阔叶林、针叶林和灌丛草甸的花粉组合难以反映母体植被的群落特征。DCA表明,花粉谱的百分含量,能较好地地区分人工扰动植被和天然植被,但人工次生林、常绿阔叶林和针阔混交林之间以及针叶林和灌丛草甸之间未能区分。30年前后表土孢粉组合变化明显,1984年样品以松属、青冈属和桉木属等花粉为主,而2017年采样分析中松属、桉木属花粉占绝对优势。随着人类活动的加强,部分地区松树和桉木大面积飞播或种植,表土孢粉组合对当地植被指示意义与扰动强度呈负相关关系。现生植被与表土孢粉组合的差异能为恢复古植被和古环境提供参考,但原生植被已经被破坏地区的孢粉图谱,就很难作为重建历史时期植被的根据。本研究可以为亚热带山地利用孢粉学恢复第四纪时期植被与气候,探讨人类活动与环境的关系提供理论依据和实践参考。

**关键词:**四川螺髻山;表土和化石孢粉;孢粉组合;DCA;人类活动

## Ecological and environmental significance of the surface and fossil pollen in the Luoji Mountains, Sichuan

LI Yongfei<sup>1</sup>, LI Beibei<sup>2,\*</sup>, XU Bin<sup>3</sup>, LIU Shuiliang<sup>1</sup>, LING Chaohao<sup>4</sup>, XU Jian<sup>1</sup>, XIAO Bingguo<sup>1</sup>, DONG Jianfeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hunan Provincial Key Laboratory of Ecological Tourism, College of Tourism & Management project, Jishou University, Zhangjiajie 427000, China

<sup>2</sup> College of Geography, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

<sup>3</sup> College of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, China

<sup>4</sup> State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

**Abstract:** Surface pollen (sampled in 1984 and 2017) and fossil pollen, collected in the Luoji Mountains in Sichuan Province, Southwest China, were used to analyse the relationship between pollen assemblages and their associated vegetation. Arboreal pollen constituted 91.0%, and the main pollen taxa were *Pinus*, *Abies*, *Cyclobananopsis*, evergreen *Quercus*, deciduous *Quercus*, *Alnus*, Ericaceae, Gramineae, and *Artemisia*. On the whole, pollen assemblage-vegetation community associations were strong for artificial and secondary forests, moderate for coniferous-deciduous broadleaf mixed forest, and weak for evergreen broadleaved forest, coniferous forest and shrub-meadow. In addition, detrended

**基金项目:**国家自然科学基金(42067061, 41972193);湖南省教育厅重点项目(20A400);湖南省教育厅优秀青年项目(17B221)

**收稿日期:**2020-01-16; **网络出版日期:**2021-02-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: libeibei-sd@163.com

correspondence analysis showed that disturbed and natural vegetation can be effectively distinguished by pollen spectra. However, artificial and secondary forests, evergreen broadleaved forest, coniferous-deciduous broadleaf mixed forest, coniferous forest, and shrub-meadow were not accurately represented by their pollen spectra. There was a significant difference in surface pollen assemblages over the past 30 years. The main pollen taxa were *Pinus*, *Cyclobalanopsis* and *Alnus* in 1984, and *Pinus* and *Alnus* in 2017. Under increasing human activity, *Pinus yunnanensis* and *Alnus cremastogyne* have large-scale cultivation which has induced an inverse correlation of disturbance intensity between surface pollen assemblages and their associated vegetation. The relationship between surface pollen assemblages and the existing vegetation can provide a reference for reconstruction of palaeovegetation and the palaeoenvironment. However, pollen spectra where native vegetation has been destroyed cannot be used to reconstruct palaeovegetation. This study provides theoretical support and a practical reference for reconstructing the palaeovegetation and palaeoclimate of the Quaternary, and can also aid understanding of the relationship between human activities and the environment.

**Key Words:** Luoji Mountains in Sichuan Province; surface and fossil pollen; pollen assemblages; detrended correspondence analysis; human activity

孢粉分析是探讨古植被和古气候重要方法之一,受到生态学家和环境学家普遍重视<sup>[1-3]</sup>。现代花粉与母体植被之间关系的正确解释是分析地层孢粉组合和恢复历史时期植被的根据,但由于受区域自然环境、植物生态特性、花粉特征、花粉源距离、植物花粉的生产、传播、保存和埋藏环境等诸多条件的制约,表土花粉与母体植被之间的关系表现得十分复杂<sup>[4-6]</sup>。表土花粉与植被的关系分析,一直以来是孢粉学研究的重要内容,迄今为止仍然受到众多专家学者关注<sup>[7-9]</sup>。近些年来,中国孢粉学者对东北<sup>[10-12]</sup>、华北<sup>[13-14]</sup>、西北<sup>[15-17]</sup>、青藏高原<sup>[18-20]</sup>及华东<sup>[21]</sup>、华中<sup>[22-23]</sup>和华南<sup>[24-25]</sup>等地区的表土花粉研究仍然保持足够重视;西南地区现代花粉分析<sup>[26-28]</sup>也为该区古气候和古环境重建提供了重要基础资料<sup>[29-31]</sup>。前人对自然植被或人工植被的现代孢粉研究较多,但基于同一地区不同时期表土孢粉和表土与化石孢粉对比研究较少。本研究拟探讨 30 年前后螺髻山表土孢粉组合特征和差异,并对比分析表土和化石孢粉组合及其与植被的关系。研究结果可为亚热带山地利用孢粉学恢复第四纪时期植被与气候,探讨人类活动与环境的关系提供理论依据和实践参考。

螺髻山是第四纪以来强烈抬升的断块山,历史时期发生过多次古冰川作用而无现代冰川作用的中国最东山地,冰川地貌发育典型,类型齐全,保存完整,具有重要的美学价值、观赏价值和经济价值,在冰川地貌和第四纪地质科学研究中具有重要地位<sup>[32-33]</sup>。现有原始森林 190 km<sup>2</sup>,森林覆盖率 70%,高等植物 180 余科,2000 余种,属中国喜马拉雅—横断山植物区,是中国重要的生物基因库之一,在植物系统发育和地史变迁研究中有很高的学术地位<sup>[34]</sup>。螺髻山由于地势高差悬殊,受来自印度洋的西南季风和太平洋的东南季风环流影响,气候变化敏感,环境演变复杂,植被垂直带谱完整,在第四纪气候和古环境重建中具有重要科学意义和研究价值<sup>[29-30,35-36]</sup>。

## 1 研究区概况

螺髻山位于四川省凉山彝族自治州,西昌市、德昌县和普格县交界处,介于 27°24′07″—27°39′24″N, 102°15′27″—102°24′20″E 之间,总面积约 2240 km<sup>2</sup>;地处横断山脉东部中段,青藏高原向云贵高原和四川盆地的过渡地带,最高处螺髻峰 4359 m,与山麓白水河 1040 m 相对高差 3300 余 m;属亚热带高原季风气候,山麓摆摆顶 2640 m 年均气温 9.5℃,1 月平均气温 4.1℃,7 月平均气温 15.8℃,山顶螺髻峰年平均气温-1.8℃,1 月平均气温-3.1℃,7 月平均气温 9.7℃;年降水量约 1042 mm;植被垂直地带性分异显著,从山麓至山顶依次分布人工次生林—常绿阔叶林—针阔混交林—针叶林—灌丛草甸等类型,具有中国东部亚热带山地到青藏高原过渡地区的典型森林生态系统特征<sup>[37-38]</sup>,如图 1,2。

人工次生林 本带分布于海拔 1500—2500 m,原生植物已被严重破坏,代之以大面积次生云南松林

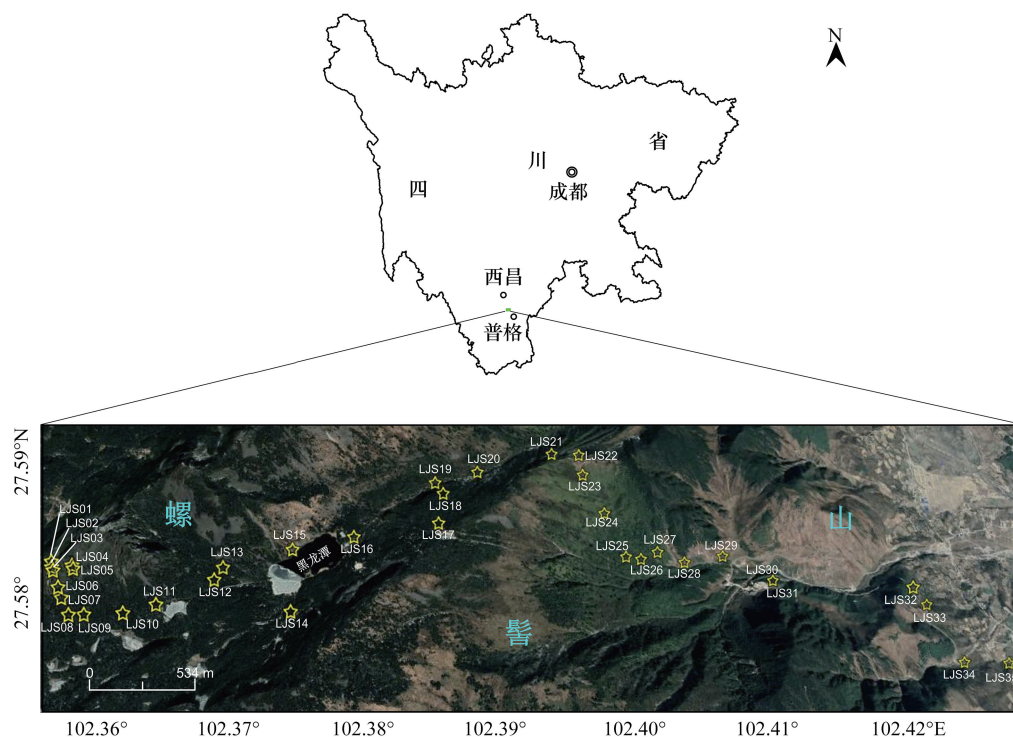


图 1 研究区和采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area and sampling sites

图中采样点 LJS:螺髻山,即 Luoji Mountain 的缩写

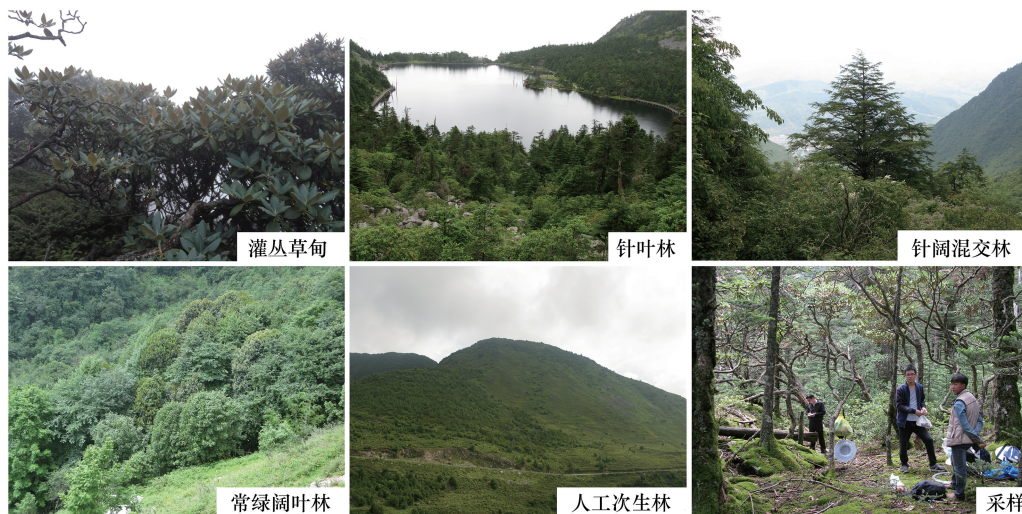


图 2 螺髻山各植被类型景观

Fig.2 Landscape of various plant communities in the Luoji Mountains

(*Pinus yunnanensis*)、桤木 (*Alnus cremastogyne*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)、云南油杉 (*Keteleeria evelyniana* Mast)、滇石栎 (*Lithocarpus dealbatus* (Hook. f. et Thoms. ex DC.) R)、华山松 (*Pinus armandii* Franch)、云南樟 (*Cinnamomum glanduliferum* (Wall.) Nees)、滇润楠 (*Machilus yunnanensis* Lec.) 及山茶科 (Theaceae) 为代表的常绿阔叶林或混交林。

常绿阔叶林 本带分布于海拔 2500—3000 m, 开始受到人工植被影响, 以高山栎 (*Quercus semicarpifolia*

Smith) 为主,混有鹅耳枥 (*Carpinus turczaninowii* Hance)、冷杉 (*Abies* spp.)、忍冬 (*Lonicera japonica* Thunb.)、榛 (*Corylus heterophylla* Fisch)、杜鹃 (*Rhododendron* spp.)、箭竹 (*Fargesia spathacea* Franch)、石栎 (*Lithocarpus glaber* (Thunb.) Nakai) 和云南松;草本植物较多。

针阔混交林 本带分布于海拔 3000—3500 m,阳坡以高山栎为主,阴坡以冷杉为代表,但灌木和草本植物增多,呈乔木状、灌木状的落叶阔叶林。

针叶林 本带分布于海拔 3500—4000 m,是川滇冷杉 (*Abies forrestii* Coltm.-Rog.)、混生长苞冷杉 (*Abies georgei* Orr.) 及少量乔灌木状亮叶杜鹃 (*Rhododendron vernicosum* Franch)、团叶杜鹃 (*Rh. orbiculare* Decne.)、红棕杜鹃 (*Rh. rubiginosum* Franch) 的冷杉林。

灌丛草甸 本带植被类型为高山灌丛草甸,分布于海拔 4000 m 以上,植被稀疏,种类较少,仅有香柏 (*Sabina pingii* var. *wilsonii*)、杜鹃、禾本科 (Poaceae) 和菊科 (Compositae) 等矮小灌木和草本植物。

2 研究方法

本研究表土孢粉样品采集和植被样方调查于 2017 年 8 月同时进行,林地样方调查面积为 10 m×10 m,灌丛为 5 m×5 m,利用全球定位系统 (GPS) 确定样点的经度、纬度和海拔,自山顶往山麓顺坡而下,海拔每下降约 50 m 遵照梅花 5 点法采集地表新鲜苔藓样品约 500 g/个,共采集 35 个样品,各采样点主要植物类型见图 1,表 1。表土孢粉样品前处理采用常规的氢氟酸 HF 法<sup>[39]</sup>,取样约 8 g,加入 1 片石松孢子((27637±563) 粒) 计算孢粉浓度,依次加入 10% 的 HCl、KOH、HF 等除去样品中碳酸盐、硅酸盐、腐殖质和有机质等,利用 8 μm 筛网收集孢粉,最后加入甘油保存,待制片鉴定。孢粉鉴定统计参照植物孢粉形态书刊<sup>[40-42]</sup> 以及现代花粉标准片置于德国蔡司 Zeiss 高分辨率生物显微镜下完成。每个样品统计孢粉 508—1549 粒,平均 782 粒。

表 1 螺髻山 35 个表土样点位置和植被类型  
Table 1 Site informations and vegetational zones of 35 samples in the Luoji Mountains

样号 Sample No.	经度 Longitude/E	纬度 Latitude/N	海拔 Altitude/m	植被类型 Vegetation zones	主要植物种类 Main plant species	备注 Note
LJS01	102°21'25.44"	27°34'33.96"	4099	灌丛草甸	杜鹃、香柏	
LJS02	102°21'25.80"	27°34'32.76"	4070	灌丛草甸	杜鹃、香柏	
LJS03	102°21'26.16"	27°34'32.16"	4054	灌丛草甸	杜鹃、香柏	
LJS04	102°21'29.70"	27°34'33.54"	4054	灌丛草甸	杜鹃、香柏	
LJS05	102°21'29.94"	27°34'33.00"	4051	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS06	102°21'27.36"	27°34'29.22"	3989	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS07	102°21'28.16"	27°34'27.36"	3895	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS08	102°21'29.90"	27°34'24.34"	3884	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS09	102°21'32.88"	27°34'24.70"	3855	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS10	102°21'40.90"	27°34'25.43"	3836	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS11	102°21'47.55"	27°34'27.56"	3802	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	仙草湖湖滨
LJS12	102°21'58.93"	27°34'33.70"	3782	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS13	102°22'00.00"	27°34'37.00"	3771	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	黑龙潭上方
LJS14	102°22'16.44"	27°34'28.09"	3672	针叶林	冷杉纯林、杜鹃、莎草	乌尔湿地旁
LJS15	102°22'14.10"	27°34'43.30"	3645	针叶林	冷杉纯林、杜鹃、高山柳	黑龙潭边
LJS16	102°22'28.23"	27°34'46.80"	3625	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS17	102°22'48.05"	27°34'51.84"	3547	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS18	102°22'48.28"	27°35'01.05"	3500	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS19	102°22'45.74"	27°35'04.91"	3479	针叶林	冷杉纯林、杜鹃	
LJS20	102°22'56.07"	27°35'10.68"	3308	针阔混交林	冷杉、杜鹃、高山柳、蔷薇	
LJS21	102°23'15.84"	27°35'19.03"	3214	针阔混交林	冷杉、高山栎、杜鹃、槭树、杉木、箭竹	

续表						
样号 Sample No.	经度 Longitude/E	纬度 Latitude/N	海拔 Altitude/m	植被类型 Vegetation zones	主要植物种类 Main plant species	备注 Note
LJS22	102°23'23.42"	27°35'20.03"	3160	针阔混交林	蔷薇、杜鹃、铁杉、桦、箭竹	山脊线
LJS23	102°23'24.47"	27°35'14.90"	3097	常绿阔叶林	高山栎、杜鹃、蔷薇、板栗、槭树、漆树	
LJS24	102°23'30.43"	27°35'05.93"	2993	常绿阔叶林	冷杉、铁杉、杜鹃、蔷薇、枫香、板栗	
LJS25	102°23'36.34"	27°34'56.14"	2836	常绿阔叶林	杜鹃、铁杉、桦树、石栎、蔷薇	铁杉出现
LJS26	102°23'40.59"	27°34'56.38"	2784	常绿阔叶林	高山栎、石栎、枫香、冷杉、枇杷、桦树、蔷薇、箭竹	冷杉出现
LJS27	102°23'45.49"	27°34'59.23"	2737	常绿阔叶林	高山栎、杜鹃、枫香、石栎、蔷薇	
LJS28	102°23'53.42"	27°34'58.24"	2631	常绿阔叶林	高山栎、杜鹃、槭树、漆树	
LJS29	102°24'05.29"	27°35'02.16"	2531	人工次生林	青冈栎、蔷薇、杜鹃、漆树、石栎	索道下站旁
LJS30	102°24'19.68"	27°34'56.40"	2476	人工次生林	青冈栎、杜鹃、高山栎、云南松	索道下站下部
LJS31	102°24'19.68"	27°34'56.44"	2283	人工次生林	桫木、云南松、杜鹃、蔷薇	
LJS32	102°25'02.96"	27°34'57.61"	2256	人工次生林	桫木、云南松	
LJS33	102°25'06.24"	27°34'53.11"	2249	人工次生林	桫木、柳杉	
LJS34	102°25'14.24"	27°34'37.48"	2176	人工次生林	桫木、漆树、柳杉	
LJS35	102°25'28.60"	27°34'38.41"	2121	人工次生林	桫木、柳杉	

LJS:螺髻山,即 Luoishan 缩写

1984 年表土样品数据由中国科学院南京地质古生物研究所李旭先生提供,其采样方式与本研究相同,由山坡往山麓海拔每降低约 50 m 采集苔藓样品一个,共采集样品 22 个,同时在摆摆顶、黑龙潭和仙草湖湖滨等对主要植被类型做了样方调查,见表 2;其孢粉鉴定没有区分青冈属和常绿栎类,统一为青冈属。两次表土样品采集路线相同,均为沿清水沟进行;本研究增补了灌丛草甸样品的收集。

孢粉百分含量采用其占陆生种子植物花粉总和为分母计算,孢粉图谱采用 Tilia 2.0 软件绘制<sup>[43]</sup>。文中使用 Canoco 软件对螺髻山表土和地层孢粉数据进行统计和排序分析,以探讨植被群落结构及其与环境的联系<sup>[44]</sup>。

表 2 螺髻山 3 个代表性样点植被和孢粉特征<sup>[45]</sup>

Table 2 Characteristics of vegetation and pollen of 3 typical samples in the Luoji Mountains<sup>[45]</sup>

样方号 Quadrat No.	地点 site	海拔 Altitude/m	面积 Area/m <sup>2</sup>	植物种类 Plant species/ No.	主要花粉类型 Main pollen types/%
LJSL1	仙草湖	3800	10×10	冷杉(27)、杜鹃(4)	松属(44.4)、青冈属(19.6)、桫木属(13.3)、冷杉属(5.6)、杜鹃花科(3.3)
LJSL2	黑龙潭	3660	10×10	冷杉(34)、杜鹃(4)	松属(44.4)、青冈属(17.4)、桫木属(11.6)、冷杉属(5.0)、杜鹃花科(4.3)
LJSL3	摆摆顶	2810	—	石栎	柯属(60)、青冈属(11.1)、桫木属(7.8)、松属(9.2)

3 结果与分析

螺髻山 35 个表土孢粉样品共鉴定出 96 科(属),其中乔木 30 科(属),灌木 30 科(属),草本 25 科(属)和蕨类孢子 11 科(属)等。主要孢粉类型有:针叶树花粉有松属(*Pinus*)和冷杉属(*Abies*)等;阔叶树花粉有青冈属(*Cyclobalanopsis*)、栲属/柯属(*Castanopsis/Lithocarpus*)、常绿栎类(*Quercus*(E))、落叶栎类(*Quercus*(D))、桫木属(*Alnus*)、桦木属(*Betula*)等;灌木植物花粉有鹅耳枥属/榛属(*Carpinus/Corylus*)、叶下珠属(*Phyllanthus*)、蔷薇科(*Rosaceae*)、杜鹃花科(*Ericaceae*)等;陆生草本植物花粉有禾本科、蒿属(*Artemisia*)等;水生植物花粉可见香蒲属(*Typha*)和慈姑属(*Sagittaria*)等;蕨类孢子主要有水龙骨科(*Polypodiaceae*)等(图 3—图 5)。

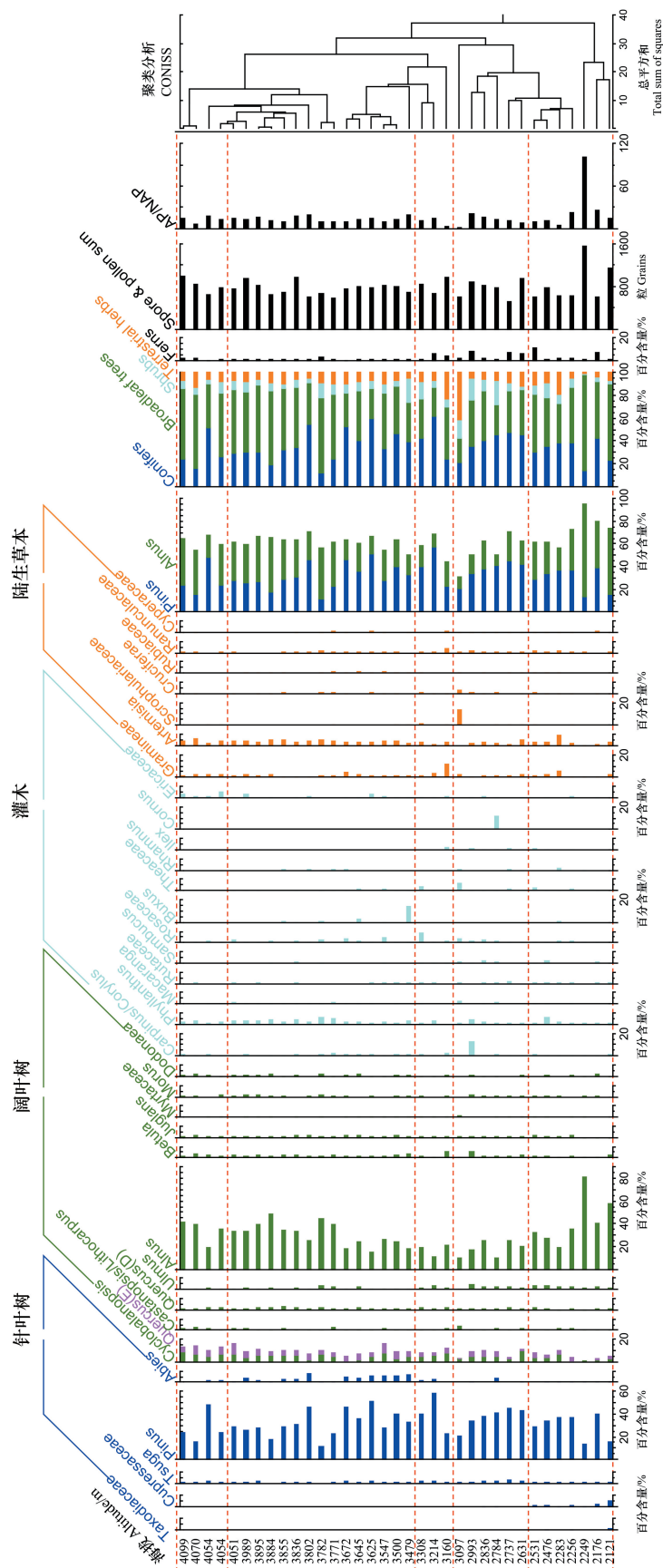


图 3 螺髻山表土孢粉百分含量图谱  
Fig. 3 Pollen percentage diagram of the surface samples from the Luoji Mountains

杉科: Taxodiaceae; 柏科: Cupressaceae; 铁杉属: *Tsuga*; 松属: *Pinus*; 冷杉属: *Abies*; 青冈属: *Cyclobalanopsis*; 常绿栎类: *Quercus*(E); 栲属/柯属: *Castanopsis*/*Lithocarpus*; 落叶栎类: *Quercus*(D); 榆属: *Ulmus*; 槭木属: *Alnus*; 桦属: *Betula*; 胡桃属: *Juglans*; 桃金娘科: *Myrtaceae*; 桑属: *Morus*; 坡柳属: *Dodonaea*; 冬青属: *Ilex*; 山茱萸属: *Cornus*; 杜鹃花科: *Ericaceae*; 木本科: *Gramineae*; 蒿属: *Artemisia*; 玄参科: *Scrophulariaceae*; 木犀科: *Rubiaceae*; 茜草科: *Ranunculaceae*; 莎草科: *Cyperaceae*; 针叶树: Conifers; 阔叶树: Broadleaf trees; 灌木: Shrubs; 陆生草本: Terrestrial herbs; 蕨类: Ferns; 孢粉总数: Spores & pollen sum; AP/NAP: 木本植物花粉与草本植物花粉比值, 即 Arboreal pollen/Nonarboreal pollen 缩写

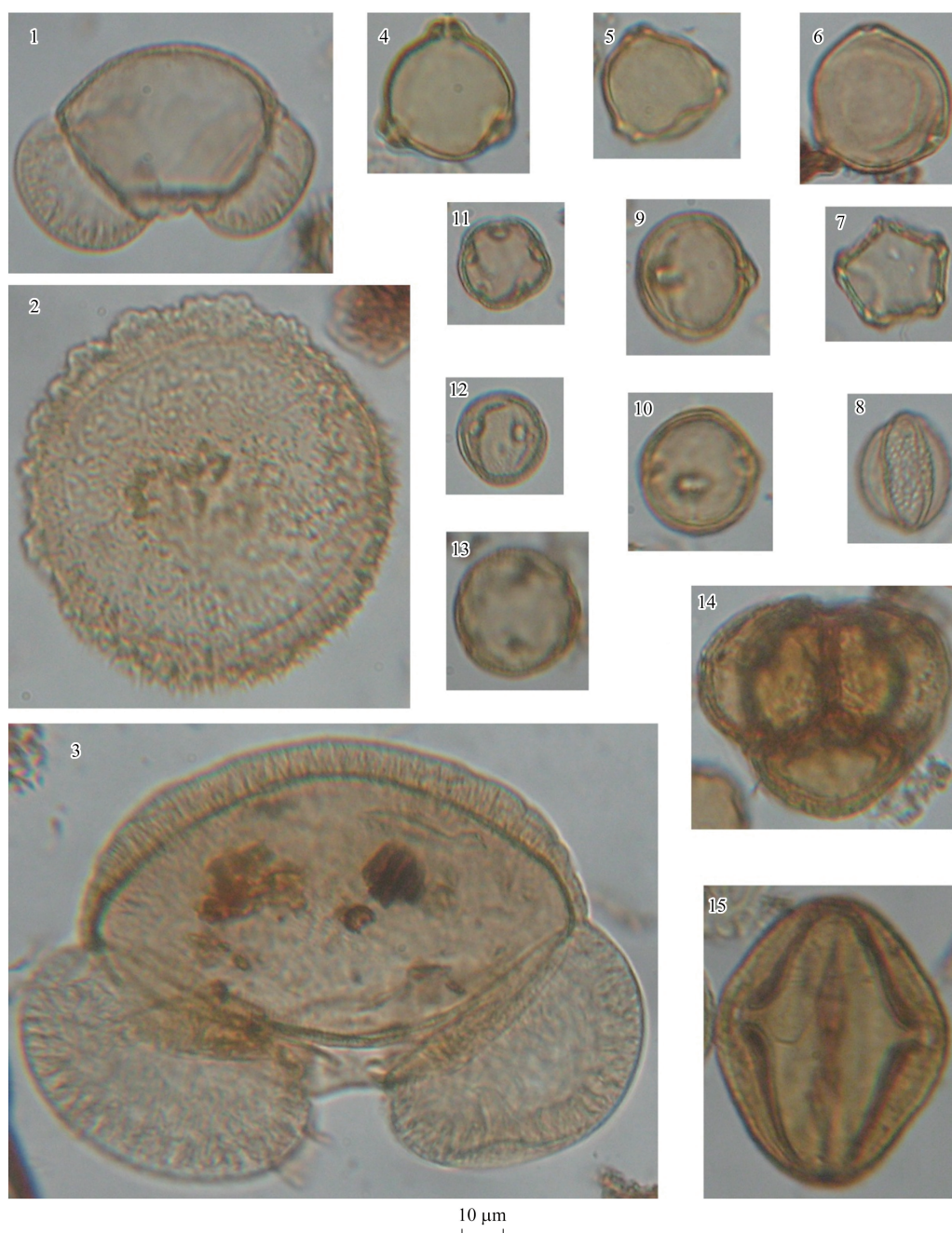


图 4 螺髻山表土花粉类型 ( I )

Fig.4 Types of surface pollen from the Luoji Mountains ( I )

1. 松属 *Pinus* (玻片号:4—244); 2. 云南铁杉 *Tsuga dumosa* (玻片号:11—331); 3. 冷杉属 *Abies* (玻片号:11—381); 4—5. 桦木属 *Betula* (玻片号:13—364, 27—421); 6. 榛属 *Corylus* (玻片号:15—384); 7. 桤木属 *Alnus* (玻片号:25—403); 8. 接骨木属 *Sambucus* (玻片号:4—240); 9—10. 坡柳属 *Dodonaea* (玻片号:6—306, 6—307); 11—12. 叶下珠属 *Phyllanthus* (玻片号:11—340, 11—338); 13. 蕈属 *Altingia* (玻片号:23—390); 14. 杜鹃花属 *Rhododendron* (玻片号:4—255); 15. 五加科 *Araliaceae* (玻片号:4—257); 图示标本保存在吉首大学生态旅游湖南省重点实验室微体生物室

### 3.1 孢粉组合与浓度整体特征

螺髻山所有样品花粉组合中木本植物百分含量 (59.2%—99.0%) 占绝对优势, 平均 91.0%, 其中针叶树、常绿阔叶树、落叶阔叶树和灌木花粉含量分别为 35.4%、9.9%、37.1% 和 8.7%; 草本植物花粉含量 9.0%。落叶阔



图 5 螺髻山表土花粉类型 ( II )

Fig.5 Types of surface pollen from the Luoji Mountains ( II )

1. 锥属 *Castanopsis* (玻片号:15—375); 2. 青冈属 *Cyclobalanopsis* (玻片号:4—250); 3—6. 常绿栎类 *Quercus* (E) (玻片号:25—405, 27—313, 11—311, 11—312); 7. 落叶栎类 *Quercus* (D) (玻片号:4—259); 8—10. 桃金娘科 *Myrtaceae* (玻片号:11—328, 13—367, 13—352); 11. 唇形科 *Labiatae* (玻片号:4—254); 12. 化香属 *Platycarya* (玻片号:4—413); 13. 青檀属 *Pteroceltis* (玻片号:15—384); 14. 榆属 *Ulmus* (玻片号:11—325); 15. 胡桃属 *Juglans* (玻片号:13—361); 16—17. 山茶科 *Theaceae* (玻片号:11—335, 11—360); 18. 山茱萸科 *Cornaceae* (玻片号:4—228); 19. 蒿属 *Artemisia* (玻片号:6—296); 20. 蒲公英属 *Taraxacum* (玻片号:25—392); 21. 石竹科 *Caryophyllaceae* (玻片号:27—416); 22. 柳叶菜属 *Epilobium* (玻片号:15—388); 23. 凤尾蕨属 *Pteris* (玻片号:25—394); 24. 金星蕨科 *Thelypteridaceae* (玻片号:27—422); 25. 里白属 *Hicriopteris* (玻片号:6—302); 26. 石韦属 *Pyrrosia* (25—396)

叶树花粉含量 (14.2%—83.2%) 最高, 以桉木属 (9.5%—81.3%) 为主; 针叶树花粉含量 (12.1%—61.7%) 次之, 主要有松属 (11.6%—57.9%), 冷杉属 (0—7.2%) 和柏科 (0—5.3%) 有一定含量; 常绿阔叶树花粉含量 (1.1%—17.4%) 较低, 以青冈属 (0.9%—9.7%) 和常绿栎类 (0—8.5%) 为主; 灌木植物花粉含量 (0.7%—21.0%) 最低, 主要见叶下珠属 (0—5.8%)、鹅耳枥属/榛属 (0—12.5%) 和杜鹃花科 (0—5.2%)。陆生草本植

物花粉(1.0%—40.8%)中禾本科(0.2%—11.4%)和蒿属(0—9.2%)含量较高。水生植物花粉含量(0.1%)很低;蕨类孢子含量(0.3%—11.2%)较低。木本植物花粉与草本植物花粉比值(AP/NAP)约为10.2。

螺髻山表土孢粉浓度(50187—1177336 粒/g)很高,平均 287293 粒/g,桉木属和松属花粉浓度最高,达到 94275 粒/g 和 78828 粒/g;其次是青冈属(14765 粒/g)和常绿栎类(11123 粒/g)浓度在 10000 粒/g 以上,蒿属(9272 粒/g)、桦木属(5276 粒/g)、叶下珠属(6821 粒/g)和禾本科(5124 粒/g)等浓度均超过 5000 粒/g;此外,杜鹃花科(2005 粒/g)、冷杉属(4345 粒/g)、栲属/柯属(2920 粒/g)、常绿栎类(2645 粒/g)、落叶栎类(3324 粒/g)和鹅耳枥属/榛属(2806 粒/g)等浓度均较高,也超过 2000 粒/g,如图 6。桉木属和松属花粉浓度远远超过其他孢粉类型,这可能是因为这两属母体植物花粉产量大及易散播的原因。

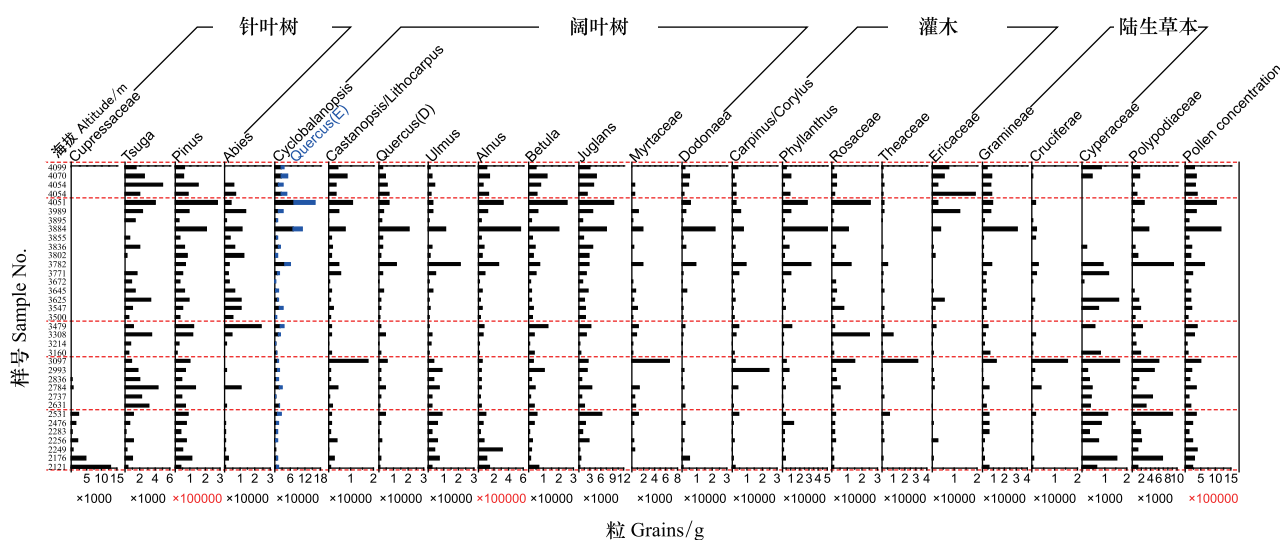


图 6 螺髻山表土孢粉浓度

Fig.6 Pollen concentration diagram of the surface samples from the Luoji Mountains

Cupressaceae: 柏科; *Tsuga*: 铁杉属; *Pinus*: 松属; *Abies*: 冷杉属; *Cyclobalanopsis*: 青冈属; *Quercus* (E): 常绿栎类; *Castanopsis/Lithocarpus*: 栲属/柯属; *Quercus* (D): 落叶栎类; *Ulmus*: 榆属; *Alnus*: 桉木属; *Betula*: 桦属; *Juglans*: 胡桃属; *Myrtaceae*: 桃金娘科; *Dodoneae*: 坡柳属; *Carpinus/Corylus*: 鹅耳枥属/榛属; *Phyllanthus*: 叶下珠属; *Rosaceae*: 蔷薇科; *Theaceae*: 山茶科; *Ericaceae*: 杜鹃花科; *Gramineae*: 禾本科; *Cruciferae*: 十字花科; *Cyperaceae*: 莎草科; *Polypodiaceae*: 水龙骨科; Pollen concentration: 孢粉浓度

### 3.2 花粉组合与植被类型的关系

根据螺髻山从山麓至山顶依次分布的 5 种植被类型的表土花粉组合,逐一讨论它们与植被的关系。

1) 人工次生林 花粉组合中阔叶树花粉含量(34.5%—84.3%)占优势,以桉木属(18.8%—81.3%)和青冈属(0.9%—7.5%)为主,见常绿栎类(0—3.7%)、落叶栎类(0.6%—1.5%)和桦木属(0.5%—2.7%)。针叶树含量(14.1%—42.2%)其次,以松属(13.8%—39.5%)为主,见杉科(0—1.2%)和柏科(0.1%—5.3%)。草本花粉含量(1.0%—18.6%)较低,主要见禾本科(0.4%—5.8%)、蒿属(0.2%—9.2%)。灌木花粉含量(0.7%—13.9%)最低,鹅耳枥属/榛属(0.1%—1.5%)和蔷薇科(0.1%—1.5%)有一定含量。AP/NAP 比值约为 12.2;孢粉浓度 258222 粒/g。

花粉组合中人工影响林木花粉含量(78.7%)占绝对优势,主要有松属、桉木属、杉科、青冈栎、常绿栎类、栲属/柯属、杜鹃花科和蔷薇科等,其中人工种植林木(松属+桉木属+杉科)花粉占 71.6%,这与母体植被中早冬瓜、云南松、柳杉、杜鹃、蔷薇、青冈栎、高山栎、石栎、漆树等分布较广对应很好,花粉组合中人工植被花粉与种植树种能很好地对应。因此,人工次生林花粉组合能很好地反映母体植被的群落特征,并可以很好地指示优势种的存在和人类活动痕迹。

2) 常绿阔叶林 花粉组合中针叶树含量(20.9%—47.7%)占优势,以松属(20.8%—45.3%)为主。阔叶

树花粉含量(21.8%—43.8%)其次,以桤木属(9.5%—25.3%)和青冈属(2.4%—9.7%)为主,见栲属/柯属(0.5%—3.6%)、常绿栎类(0.2%—5.0%)、榆属(0.7%—4.4%)和桦木属(0.7%—5.1%)。草本花粉含量(4.5%—40.8%)较低,主要见玄参科(0—13.8%)和珍珠菜属(0—19.0%)。灌木花粉含量(3.3%—21.0%)最低,鹅耳枥属/榛属(0—12.5%)、叶下珠属(0.4%—3.7%)和蔷薇科(0.2%—3.1%)等有一定含量。AP/NAP 比值约为 6.6;孢粉浓度 240999 粒/g。

花粉组合中阔叶树含量约为 34.9%,常绿阔叶树含量仅为 9.5%,主要见青冈属、常绿栎类、桃金娘科、栲属/柯属和坡柳属等。群落分布的优势树种有石栎和高山栎等,花粉组合中仅可见优势种类型,但含量较低,也不能反映群落总体特征。故常绿阔叶林花粉组合未能反映母体植被的植物组成特征。

3) 针阔混交林 花粉组合中针叶树花粉含量(23.8%—61.7%)占优势,以松属(23.0%—57.9%)为主,铁杉属(0.9%—1.6%)和冷杉属(0—2.2%)有一定含量。阔叶树花粉含量(25.3%—46.6%)其次,以桤木属(11.1%—21.2%)为主,青冈属(5.0%—8.4%)和常绿栎类(1.9%—3.3%)含量较高。草本花粉含量(6.9%—23.1%)再次,以禾本科(1.0—11.4%)为主。灌木花粉(6.1%—14.6%)中蔷薇科含量(0.5%—8.6%)较高。AP/NAP 比值约为 6.9;孢粉浓度 135977 粒/g。

花粉组合中乔木(78.3%)占绝对优势,针叶树花粉以松属、冷杉属和铁杉属为主,阔叶树花粉主要有青冈属、常绿栎类、桦木属、桤木属、榆属、槭属等,灌木花粉主要有蔷薇科、榛属/鹅耳枥属、柳属、杜鹃花科和山茶科,禾本科花粉含量也较高,这和母体植被中主要分布冷杉、铁杉、高山栎、槭树、蔷薇、桦和箭竹等能较好地对应,但群落中未见松和桤木分布,松属+桤木属花粉含量却达 57.2%。因此,针阔混交林花粉组合能较好地反映群落整体特征,花粉类型能与母体植被中优势种较好地对应。

针阔混交林的花粉组合与常绿阔叶林相比,前者的阔叶树花粉含量(35.6%)稍微比后者的(34.9%)多 0.7%,针叶树花粉含量前者的(42.7%)也仅比后者的(39.1%)多 3.6%;针阔混交林的灌木花粉含量(9.1%)少于常绿阔叶林的(12.9%),而陆生草本植物花粉含量两者仅相差 0.4%,前者和后者分别为 12.7%和 13.1%。针阔混交林的孢粉浓度(135977 粒/g)只及常绿阔叶林(240999 粒/g)的 1/2 左右。整体而言,针阔混交林与常绿阔叶林的孢粉组合非常相似,主要缘由是两者的松属和桤木属花粉含量均较高,前者的为 40.2%和 17.0%,共计 57.2%;后者的为 37.0%和 17.6%,共计 54.6%,均占一半以上。因此,受松属和桤木属花粉影响严重的西南山地,针阔混交林与常绿阔叶林的孢粉组合是难以区分的。

4) 针叶林 花粉组合中针叶树花粉含量(12.1%—59.5%)占优势,以松属(11.6%—51.4%)和冷杉属(0.4%—7.2%)为主。阔叶树含量(26.9%—66.5%)较高,以桤木属(15.3%—48.1%)为主,其次是常绿栎类(2.7%—8.5%)和青冈属(1.3%—8.1%)。灌木(4.1%—20.8%)和陆生草本(4.8%—10.1%)花粉含量均较低。AP/NAP 比值为 12.4;孢粉浓度 337746 粒/g。

花粉组合中针叶树含量(35.8%)较高,以松属为主,冷杉属(3.5%)含量较高,杜鹃花科花粉含量仅为 0.7%,这仅能指示冷杉林中建群种的存在,不能反映冷杉和杜鹃占绝对优势的特征。故针叶林花粉组合难以反映母体植被的群落特征。

5) 灌丛草甸 花粉组合中阔叶树占优势(39.0%—64.4%),以桤木属(19.4%—41.4%)为主,青冈属(4.7%—9.1%)和常绿栎类(4.2%—6.9%)含量较高。针叶树花粉含量(16.4%—51.4%)其次,以松属(15.7%—48.1%)为主,且含有少量的冷杉属(0—2.0%)。草本花粉含量(5.4%—12.8%)较低,以蒿属(1.7%—6.0%)和禾本科(1.6%—2.4%)为主。灌木花粉含量(4.3%—10.1%)最低,以杜鹃花科(0.8%—5.2%)为主。AP/NAP 比值约为 11.3;孢粉浓度 331898 粒/g。

花粉组合中乔木占绝对优势,灌木和草本植物含量仅为 15.0%,主要有杜鹃花科、禾本科和蒿属等,未见柏科花粉,这和植物群落中主要分布杜鹃、香柏难以对应,只能反映群落中部分母体植物,且百分含量较低。因此,灌丛草甸的花粉组合不能反映母体植被的群落组成特征。

### 3.3 DCA

利用 Canoco 4.5 软件对四川螺髻山表土花粉百分含量进行降趋势对应分析(DCA),从统计的 96 科(属)

中去掉含量低于 1% 和仅在个别样品中鉴定到的科(属),再对余下 43 科(属)中含量较少的科(属)降低权重进行 DCA (图 7)。

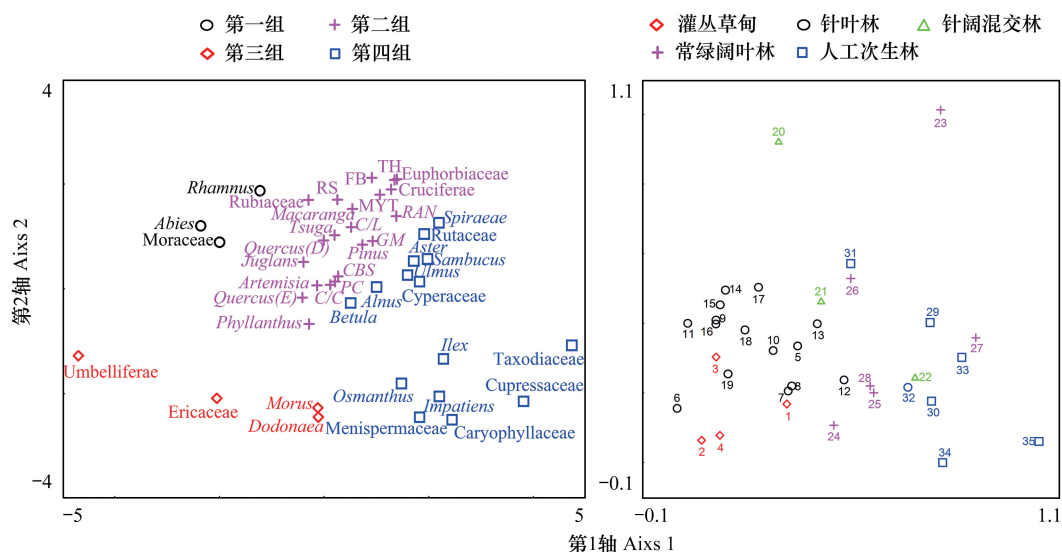


图 7 螺髻山表土花粉类型与样点的 DCA 排序图

Fig.7 DCA results of surface pollen taxa and pollen sampling sites from the Luoji Mountains

TH: 山茶科 Theaceae; FB: 蝶形花科 Fabaceae; RS: 蔷薇科 Rosaceae; MYT: 桃金娘科 Myrtaceae; RAN: 毛茛科 Ranunculaceae; C/L: 栲属/柯属 Castanopsis/Lithocarpus; GM: 禾本科 Gramineae; CBS: 青冈属 Cyclobalanopsis; PC: 青檀属 Pteroceltis; C/C: 鹅耳枥属/榛属 Carpinus / Corylus; Euphorbiaceae: 大戟科; Rhamnus: 鼠李属; Cruciferae: 十字花科; Rubiaceae: 茜草科; Macaranga: 血桐属; Spiraeae: 绣线菊属; Abies: 冷杉属; Tsuga: 铁杉属; Rutaceae: 芸香科; Moraceae: 桑科; Quercus (D): 落叶栎类; Aster: 紫菀属; Pinus: 松属; Juglans: 胡桃属; Sambucus: 接骨木属; Ulmus: 榆属; Artemisia: 蒿属; Quercus (E): 常绿栎类; Alnus: 桤木属; Cyperaceae: 莎草科; Betula: 桦属; Phyllanthus: 叶下珠属; Ilex: 冬青属; Taxodiaceae: 杉科; Umbelliferae: 伞形科; Cupressaceae: 柏科; Osmanthus: 木犀属; Morus: 桑属; Impatiens: 凤仙花属; Ericaceae: 杜鹃花科; Dodoneae: 坡柳属; Menispermaceae: 防己科; Caryophyllaceae: 石竹科

结果表明,前两轴累积方差贡献率为 22.4% (第一轴=13.0%,第二轴=9.4%)。第一轴正方向分布的样品主要为人工次生林+常绿阔叶林,负方向为针叶林+灌丛草甸,花粉类型正方向为人工种植树+阔叶树,负方向为灌木+针叶树类型,第一轴可能和温度变化相联系,这与螺髻山植物生长的影响因子有关,温度是控制植物分布的最主要因子;第一轴可能与海拔高度变化有关,反映螺髻山随海拔升高气温递减的规律。第二轴正方向为针阔混交林+针叶林样品,花粉类型主要有冷杉属、榆属、桑科、常绿栎类、胡桃属和栲属/柯属等,负方向样品为人工次生林+灌丛草甸,花粉类型为杜鹃花科、坡柳属、杉科、柏科等,第二轴可能与水分条件变化有关,反映螺髻山山坡大气降水量高于山顶和山麓的特征。DCA 表明,通过样品花粉百分含量,能较好地区分人工扰动林和天然林,但人工次生林、常绿阔叶林和针阔混交林难以区分,这可能由于其样品中松属和桤木属花粉占绝对优势,含量均很高,稀释了其他花粉类型含量的缘故;针叶林和灌丛草甸也较难区分,这可能源于灌丛草甸分布区邻近针叶林,其花粉相互影响明显,故部分样品花粉组合较为相似。

## 4 讨论

### 4.1 30 年前后表土孢粉变化

1984 年采集的螺髻山表土孢粉样品分析表明<sup>[45]</sup>,花粉组合中木本植物含量(93.9%)占绝对优势,其中针叶树、常绿阔叶树、落叶阔叶树和灌木花粉含量分别为 46.4%、25.0%、17.6% 和 4.9%;草本植物花粉含量 6.1%。针叶树花粉含量(31.4%—67.7%)最高,主要有松属(26.1%—61.6%),冷杉属(0—5.6%)和铁杉属(1.1%—6.0%)有一定含量;常绿阔叶树花粉含量(9.2%—47.4%)其次,以青冈属(7.2%—45.3%)和栲属/柯

属(0—8.9%)为主;落叶阔叶树花粉含量(4.3%—30.1%)较低,以桤木属(2.5%—22.6%)为主;灌木植物花粉含量(0.9%—9.5%)最低,鹅耳枥属/榛属(0—6.6%)和杜鹃花科(0—6.3%)有一定含量。陆生草本植物花粉(0.6%—17.6%)中菊科(0—10.7%)和蒿属(0—16.1%)含量较高。蕨类孢子含量(0—15.8%)较低;木本植物花粉与草本植物花粉比值(AP/NAP)约为15.5。1984年表土样品以松属+青冈属花粉(64.8%)为主,而2017年表土样品中松属+桤木属花粉(62.0%)占绝对优势;30多年来松属花粉含量由42.1%降至32.3%,青冈属花粉含量由22.7%降至8.7%,但桤木属花粉含量剧增,由11.5%增至29.7%。

冷杉林中1984年表土样品松属+青冈属花粉(63.3%)占优势,而2017年表土样品花粉组合以松属+桤木属(61.8%)为主;30多年来松属花粉含量由41.2%下降至31.5%,青冈属花粉含量由22.1%减少至9.6%,桤木属花粉含量激增,由13.8%增加至30.3%;此外,冷杉属花粉含量由2.7%增至3.5%,杜鹃花科花粉含量由1.8%下降至0.7%,铁杉属花粉由2.6%下降至0.7%,桦木属花粉含量由4.4%下降至1.9%,草本花粉蒿属含量由1.5%增加至3.8%。

30多年来表土孢粉变化最明显的是桤木属花粉含量,总体增加18.2%,冷杉林中其含量增加16.5%,这可能是近些年来螺髻山山麓地带大量种植早冬瓜林,因其花粉产量大,易散播,受上升气流影响,花粉被携带至山坡和山顶降落,导致花粉含量剧增。因此,20世纪60年代飞播云南松,以及2014年前后早冬瓜的大量种植等人类活动的干扰,都会大大改变表土孢粉的组合比例。

#### 4.2 表土和化石孢粉组合对比

螺髻山黑龙潭钻孔7.5 m岩芯孢粉与1984年<sup>[45]</sup>和2017年表土样品孢粉对比表明:3类样品松属花粉含量最高,钻孔(41.5%)和1984年(41.2%)表土样品相当,高出2017年表土样品(31.4%)约10%;青冈属含量钻孔(24.9%)和1984年表土样品(22.1%)较为接近,分别高出2017年表土样品(9.7%)15.2%和12.4%。桤木属含量差异最大,2017年表土样品含量(31.2%)最高,远远超过钻孔(1.4%)和1984年表土样品(13.8%)。冷杉属花粉含量钻孔(6.0%)最高,是1984年表土样品(2.7%)、2017年(3.3%)表土样品的两倍以上;杜鹃花科花粉含量1984年表土样品(1.8%)最高,分别高出钻孔和2017年表土样品0.7%和1.1%。落叶栎类花粉含量钻孔(8.6%)最高,大大超过1984年(2.2%)和2017年(1.3%)表土样品。铁杉属花粉含量钻孔(5.3%)最高,约为1984年表土样品(2.6%)的两倍,是2017年(0.7%)表土样品7倍多。桦木属含量钻孔和1984年表土样品相当,均为4.4%,超出2017年(1.8%)表土样品1倍多。鹅耳枥属/榛属花粉含量(2.4%)钻孔最高,是1984年(1.1%)和2017年(1.0%)表土样品的2倍多。栲属/柯属花粉含量3类样品相当,约为1.0%。陆生草本植物花粉蒿属含量差异较大,2017年表土样品含量(3.9%)最高,1984年表土样品含量(1.5%)其次,钻孔最低(0.5%),见图8。

螺髻山仙草湖钻孔4.5 m岩芯孢粉与1984年<sup>[45]</sup>和2017年表土样品孢粉对比可见:松属含量均很高,1984年表土样品最高(44.4%),其次为钻孔(39.0%),最低为2017年(29.2%)表土样品;青冈属含量钻孔最高,其次为1984年表土样品,最低是2017年样品,分别为33.6%、18.4%、10.3%。桤木属花粉含量2017年样品>1984年样品>钻孔,分别为35.1%、12.4%、1.8%,差异最大。冷杉属含量1984年样品含量(5.3%)最高,钻孔(2.7%)和2017年表土样品含量(2.8%)相当,只有1984年表土样品的一半;杜鹃花科花粉含量(3.8%)显著高于钻孔(0.5%)和2017年表土样品(0.7%)。铁杉属花粉含量钻孔(7.9%)大大超过1984年(1.8%)和2017年(0.6%)表土样品。桦木属花粉含量钻孔和1984年表土样品相当,均为3.3%,高于2017年表土样品(2.0%)。落叶栎类含量钻孔(5.1%)最高,其次为1984年表土样品(2.7%),最低为2017年表土样品,仅为1.4%。栲属/柯属和鹅耳枥属/榛属花粉含量差异较小,均为1%左右。陆生草本花粉中蒿属含量差异较大,2017年表土样品含量(4.0%)最高,其次为1984年表土样品(2.3%),钻孔最低(0.6%),见图9。

螺髻山黑龙潭和仙草湖钻孔分析中孢粉类型基本相似,均以松属+青冈属为主,其含量分别为66.4%和72.6%,铁杉属、冷杉属和落叶栎类等花粉含量均较高。2个钻孔中松属含量较为接近,约40%左右,仙草湖钻孔中青冈属花粉含量更高,超过黑龙潭钻孔8.7%,冷杉属和杜鹃花科花粉黑龙潭钻孔超过仙草湖钻孔1倍

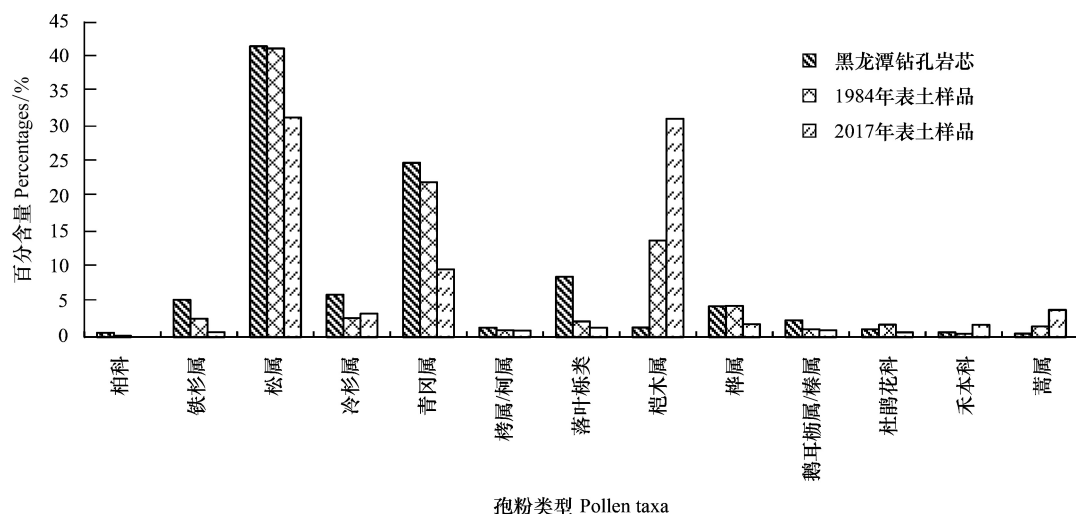


图8 黑龙潭钻孔及其邻近地表土样品主要花粉类型含量对比

Fig.8 Comparisons of main pollen taxa percentages of core from Heilong Lake and surface sample from its adjacent regions

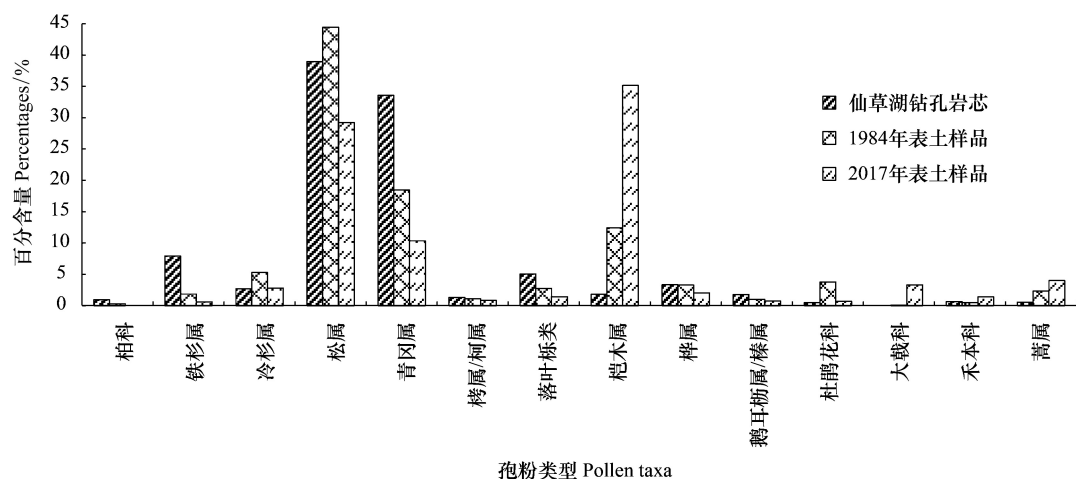


图9 仙草湖钻孔及其邻近地表土样品主要花粉类型含量对比

Fig.9 Comparisons of main pollen taxa percentages of core from Xiancao Lake and surface sample from its adjacent regions

多,铁杉属花粉含量仙草湖钻孔高出黑龙潭钻孔 2.6%,但落叶栎类黑龙潭钻孔比仙草湖钻孔含量高3.5%,桦木属、栲属/柯属、桉木属和柏科花粉含量较为相近。桉木属花粉两地均低于 2.0%,这可能指示螺髻山天然植被中桉木属花粉含量本底值,即不受大规模人类活动影响时,自然状态下冷杉林中桉木属花粉含量。黑龙潭钻孔中冷杉属和杜鹃花科花粉含量高于仙草湖钻孔,表明黑龙潭周边植物群落相对更稳定,仙草湖附近植被受气候变化影响更敏感;柏科和铁杉属花粉含量仙草湖钻孔更高,表明山坡上部植被对仙草湖影响较黑龙潭更大;松属、落叶栎类和桦木属花粉含量黑龙潭钻孔更高,反映山麓地区植被对黑龙潭影响更明显。

将黑龙潭钻孔和仙草湖钻孔样品分别与其附近 1984 年<sup>[45]</sup>和 2017 年采集的表土样品进行 DCA,结果见图 10,11。黑龙潭钻孔和邻近地表土样品反映晚冰期以来 (12.4—11.5 ka BP (样号 49—44)、11.5—10.0 ka BP (样号 43—35)、10.0—7.6 ka BP (样号 34—24)、7.6—2.0 ka BP (样号 23—7)、2.0—0 ka BP (样号 6—1))、1984 年和 2017 年螺髻山植被类型比较明显的变化。图 10a 第一轴主要反映人类活动的影响,第二轴可能指示温度的变化,随着钻孔深度的增加,温度逐渐降低。图 10b 第二轴可能体现湿度条件变化,随着晚全新世的到

来,气候逐渐变干。

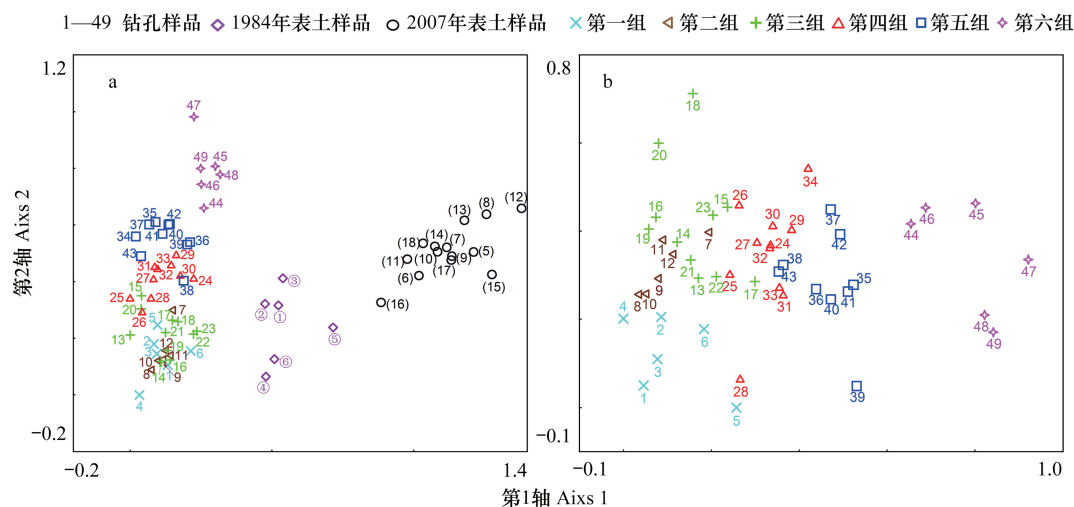


图 10 黑龙江钻孔和邻近地表土孢粉 DCA 排序图

Fig.10 DCA results of core from the Heilong Lake and surface sample from its adjacent regions

a: 螺髻山 1984 年表土样品+2017 年表土样品+黑龙江钻孔孢粉等 DCA 结果;b: 黑龙江钻孔孢粉 DCA 结果

仙草湖钻孔和邻近地表土样品反映了中晚全新世、1984 年和 2017 年螺髻山山坡上部植被类型比较明显的变化,但中全新世以来(8.6—0 ka BP(样号 40—1))植被演变比较复杂。图 11a 第一轴主要反映了人类活动的影响。图 11b 第一轴可能反映了温度条件变化,随着晚全新世的到来,气候逐渐转凉。

DCA 表明,通过钻孔和表土样品孢粉的百分含量,钻孔样品与表土样品区分非常明显,不同年份表土样品孢粉组合差异显著;人类活动扰动程度愈强,其孢粉组合对当地植被类型的指示意义愈弱。

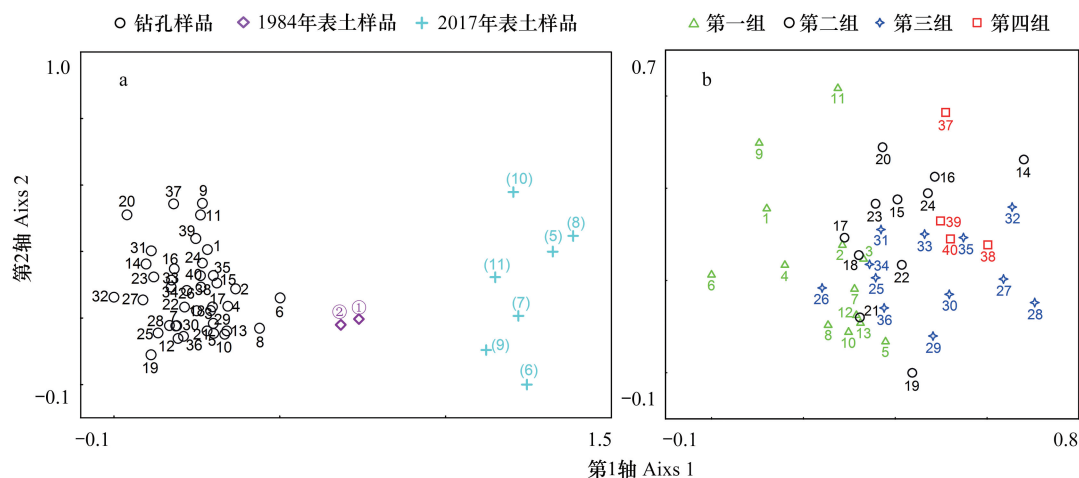


图 11 仙草湖钻孔和附近表土孢粉 DCA 排序图

Fig.11 DCA results of core from the Xiancao Lake and surface sample from its adjacent regions

a: 螺髻山 1984 年表土+2017 年表土+仙草湖钻孔孢粉 DCA 结果;b: 仙草湖钻孔孢粉 DCA 结果

#### 4.3 孢粉组合的环境和生态指示意义

螺髻山针叶林—冷杉林中表土样品孢粉组合未能反映母体植被的组成特征,这主要与群落的优势种冷杉和杜鹃的代表性有关。LJS5—LJS21、LJS24 和 LJS26 号样品样点附近有冷杉分布,冷杉属花粉含量 3.2% 左右;其他样点附近未见冷杉,其花粉含量为 0.4%。冷杉林中其花粉含量约为 3.5%,其中 LJS11 号样品含量

(7.2%)最高;冷杉混交林中其含量为 1.9%,LJS26 号样品含量(3.2%)较高。冷杉属花粉代表性较低,这与四川峨眉山研究结果相一致<sup>[46]</sup>,前人研究发现 R 值介于 0.1—0.5 之间,即使冷杉林中冷杉属花粉也不高于 20%<sup>[47-48]</sup>;也有研究显示冷杉花粉数量与其植物盖度接近,林外其花粉含量迅速下降,10 km 以外仅见个别冷杉属花粉<sup>[49]</sup>。

LJS1—LJS25 号和 LJS27—LJS31 号样品样点周围有杜鹃分布,杜鹃花科花粉含量约 0.7%左右;其余样品样点附近未见杜鹃分布,其花粉含量仅为 0.3%。灌丛草甸杜鹃花科花粉含量约 2.5%,最高可达 5.2%;乔木林下其花粉含量约 0.5%,最高可达 3.4%。杜鹃花科花粉代表性很低,R 值约为 0.17<sup>[48]</sup>,其传播距离近,主要散布在母体植物周围,对植被具有较好指示性<sup>[50-51]</sup>,受外来花粉百分比递减补偿作用影响较大<sup>[48]</sup>。

螺髻山所有样品花粉组合中桫欏木属和松属花粉占绝对优势,这与其代表性有关。所有样品中均有桫欏木属花粉(9.5%—81.3%)出现,平均 29.7%。LJS31—LJS35 号样品样点周围有人工种植的旱冬瓜生长,其花粉含量约为 46.7%;其余样品样点附近未见其母体植被分布,其花粉含量约为 26.9%。海拔 4000 m 以上的灌丛草甸,桫欏木属花粉平均为 33.8%,甚至可达 41.4%;高度 3500—4000 m 的冷杉林中桫欏木属花粉平均为 30.3%,最高可达 48.1%。桫欏木属花粉具超代表性<sup>[52]</sup>,R 值比松属还高,可达 6<sup>[53]</sup>;重庆缙云山地区的研究显示样点附近无桫欏木分布时其花粉也有出现(2.8%—10.5%)<sup>[51]</sup>。云南泸沽湖地区无桫欏木属分布时其花粉含量也达 9.0%<sup>[54]</sup>,四川峨眉山地区样点周围无母体植物生长时其花粉含量超过 13.6%<sup>[46]</sup>。所以,桫欏木属的超代表性不但表现在其花粉产量高,而且具有较强的传播能力。

全部样品均见松属花粉(11.6%—57.9%),平均 32.3%。LJS30—LJS32 号样品附近有云南松分布,其花粉含量为 36.2%,余下样点附近没有松树分布时其花粉含量为 32.0%;其中灌丛草甸中松属含量为 27.8%,最高可达 48.1%;冷杉林中松属含量为 31.5%,最高为 51.4%。松属花粉具超代表性,R 值约为 1.68<sup>[52]</sup>,纯松林松属花粉含量超过 90%,松林外松属花粉含量最大可达 30%以上<sup>[55]</sup>,松属花粉含量低于 30%时,周围没有松林存在<sup>[56]</sup>。本研究表明四川西南地区高山栎类硬叶常绿阔叶林中松属花粉超过 35%时,周围才可能有松林生长;松属花粉含量低于 30%时,可认为样点附近无松树生长。

冷杉林中桫欏木属和松属花粉含量分别为 30.3%和 31.5%,共占 61.8%;灌丛草甸中桫欏木属和松属花粉含量分别为 33.8%和 27.8%,共占 61.6%。外来花粉中仅此二者含量即超过 60%,这主要缘由可能为:(1) 桫欏木属和松属花粉的超代表性,其花粉产量高,易扩散;(2) 山体地势由西向东倾斜,受气候环流形势影响,每年 4—6 月的植物花期时受东南季风控制,上升气流将山麓地带的桫欏木和松花粉顺坡而上携带至山顶沉降;(3) 受人类活动强烈扰动影响,20 世纪 60 年代飞播松种子,近年来退耕还林,退草还林,大面积种植旱冬瓜,山麓地区云南松林和旱冬瓜林面积扩大;(4) 冷杉林和灌丛草甸中建群种冷杉和杜鹃的低代表性,放大了孢粉组合中桫欏木属和松属的含量。

因此,现生植被与表土孢粉组合的差异可以为古植被和古环境提供参考,但在人类活动的干扰下,尤其是原生植被已经被破坏殆尽的地区或第四纪早期沉积物的孢粉图谱,不能无条件地参考现代植被。研究者采用孢粉学资料进行植被保护与生态恢复和第四纪时期气候反演与环境重建时,应谨慎对待化石孢粉数据,力求与其他生物环境资料(植物大化石、气孔器和分泌细胞等)进行多指标对照和印证,最后获得正确的科学结论。

## 5 结论

通过四川螺髻山 1984 年与 2017 年表土孢粉、化石孢粉和植被之间的关系分析后,结果发现:

(1) 花粉组合中木本植物含量(91.0%)占绝对优势,松属、冷杉属、青冈属、常绿栎类、落叶栎类、桫欏木属、杜鹃花科、禾本科和蒿属为主要孢粉类型。

(2) 人工次生林花粉组合能很好地反映母体植被的群落特征,并可指示优势种的存在和人类活动痕迹;针阔混交林花粉组合能较好地反映群落整体特征,花粉类型能与母体植被中优势种较好地对应;常绿阔叶林、

针叶林和灌丛草甸的花粉组合难以反映母体植被的群落特征。

(3) DCA 表明,通过花粉百分含量,能较好地区分人工扰动植被和自然植被,但人工次生林、常绿阔叶林和针阔混交林之间,针叶林和灌丛草甸之间难以区分。

(4) 30 年前后表土孢粉组合差异较大,1984 年样品中孢粉以松属、青冈属、桤木属为主,而 2017 年采样分析显示松属、桤木属占绝对优势。

(5) 地层中孢粉组合是当时区域孢粉混合降落沉积的结果,可能与其附近植物群落组成有差异。

(6) 随着人类活动的加强,川西乃至西南地区松树和旱冬瓜大面积的种植,使得表土花粉组合对当地植被的指示意义下降,这要求在地层孢粉分析时应谨慎对待。

研究结果能为亚热带山地利用孢粉学恢复地质历史时期植被与气候,探讨人类活动与环境的关系提供理论依据和基础数据。

**致谢:**感谢中国科学院南京地质古生物研究所李旭先生提供部分孢粉数据。

#### 参考文献 (References):

- [1] Krüger S, Damrath M. In search of the Bølling Oscillation: a new high resolution pollen record from the *Locus classicus* Lake Bølling, Denmark. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2019, 29(2): 189-211.
- [2] Anderson R S, Berg E, Williams C, Clark T. Postglacial vegetation community change over an elevational gradient on the western Kenai Peninsula, Alaska: pollen records from Sunken Island and Choquette Lakes. *Journal of Quaternary Science*, 2019, 34(4/5): 309-322.
- [3] Ivanov D, Lazarova M. Past climate and vegetation in Southeast Bulgaria — a study based on the late Miocene pollen record from the Tundzha Basin. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 8(1): 3.
- [4] Pandey S, Holt K. Modern pollen distribution and its relationship to vegetation from the South-western part of the Ganges-Brahmaputra Delta, India. *Palynology*, 2018, 42(1): 20-27.
- [5] Sniderman J M K, Matley K A, Haberle S G, Cantrill D J. Pollen analysis of Australian honey. *PLoS One*, 2018, 13(5): e0197545.
- [6] Recio M, Picornell A, Trigo M M, Gharbi D, García-Sánchez J, Cabezero B. Intensity and temporality of airborne *Quercus* pollen in the southwest Mediterranean area: correlation with meteorological and phenoclimatic variables, trends and possible adaptation to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250-251: 308-318.
- [7] Ritchie J C, Hadden K A, Gajewski K. Modern pollen spectra from lakes in arctic western Canada. *Canadian Journal of Botany*, 1987, 65(8): 1605-1613.
- [8] Nosova M B, Severova E E, Volkova O A, Kosenko J V. Representation of *Picea* pollen in modern and surface samples from Central European Russia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2015, 24(2): 319-330.
- [9] Cui Q Y, Zhao Y, Qin F, Liang C, Li Q, Geng R W. Characteristics of the modern pollen assemblages from different vegetation zones in Northeast China: implications for pollen-based climate reconstruction. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10): 1564-1577.
- [10] Zhang Y, Kong Z C, Wang G H, Ni J. Anthropogenic and climatic impacts on surface pollen assemblages along a precipitation gradient in north-eastern China. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(5): 621-631.
- [11] Li M Y, Xu Q H, Zhang S R, Li Y C, Ding W, Li J Y. Indicator pollen taxa of human-induced and natural vegetation in Northern China. *The Holocene*, 2015, 25(4): 686-701.
- [12] Li Y Y, Nielsen A B, Zhao X Q, Shan L J, Wang S Z, Wu J, Zhou L P. Pollen Production Estimates (PPEs) and fall speeds for major tree taxa and Relevant Source Areas Of Pollen (RSAP) in Changbai Mountain, northeastern China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, 216: 92-100.
- [13] Ge Y W, Li Y C, Bunting M J, Li B, Li Z T, Wang J T. Relation between modern pollen rain, vegetation and climate in northern China: implications for quantitative vegetation reconstruction in a steppe environment. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 25-41.
- [14] Li Y C, Ge Y W, Jane B M, Zhang Z, Li J, Wang C Y, Li B, Li C Z. Relative pollen productivities and relevant source area of pollen in the forest-steppe ecotone of northern China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2017, 244: 1-12.
- [15] Qin F, Zhao Y, Li Q, Cai M T. Modern pollen assemblages from surface lake sediments in northwestern China and their importance as indicators of vegetation and climate. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(9): 1643-1655.
- [16] Wei H C, Zhao Y. Surface pollen and its relationships with modern vegetation and climate in the Tianshan Mountains, northwestern China. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2016, 25(1): 19-27.
- [17] Huang X Z, Chen X M, Du X. Modern pollen assemblages from human-influenced vegetation in northwestern China and their relationship with vegetation and climate. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2018, 27(6): 767-780.
- [18] Ma Q F, Zhu L P, Lu X M, Wang Y, Guo Y, Wang J B, Ju J T, Peng P, Tang L Y. Modern pollen assemblages from surface lake sediments and their environmental implications on the southwestern Tibetan Plateau. *Boreas*, 2017, 46(2): 242-253.
- [19] Zhang Y, Kong Z C, Yang Z J, Wang L, Duan X H. Surface pollen distribution from alpine vegetation in eastern Tibet, China. *Scientific Reports*,

- 2017, 7(1): 586.
- [20] Zhang Y J, Duo L, Pang Y Z, Felde V A, Birks H H, Birks H J B. Modern pollen assemblages and their relationships to vegetation and climate in the Lhasa Valley, Tibetan Plateau, China. *Quaternary International*, 2018, 467: 210-221.
- [21] 萧家仪, 吕燕, 祁国翔. 中国东部淤泥质海岸盐沼植被藜科花粉数量研究. *地理研究*, 2014, 33(11): 2157-2168.
- [22] Zhang W C, Li C H, Lu H Y, Tian X H, Zhang H Y, Lei F, Tang L Y. Relationship between surface pollen assemblages and vegetation in Luonan Basin, eastern Qinling Mountains, Central China. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(3): 427-445.
- [23] Fang Y M, Ma C M, Mao L M, Zhu C, Zhang W Q. Surface pollen spectra from Shennongjia Mountains, central China: an interpretation aid to Quaternary pollen deposits. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, 214: 40-50.
- [24] Yang S X, Zheng Z, Huang K Y, Zong Y Q, Wang J H, Xu Q H, Rolett B V, Li J. Modern pollen assemblages from cultivated rice fields and rice pollen morphology: application to a study of ancient land use and agriculture in the Pearl River Delta, China. *The Holocene*, 2012, 22(12): 1393-1404.
- [25] Luo C X, Lin G, Chen M H, Xiang R, Zhang L L, Liu J G, Pan A D, Yang S X, Yang M X. Characteristics of pollen in surface sediments from the southern South China Sea and its paleoclimatic significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 461: 12-28.
- [26] Jarvis D I, Clay-Poole S T. A comparison of modern pollen rain and vegetation in southwestern Sichuan Province, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1992, 75(3/4): 239-258.
- [27] Xiao X Y, Shen J, Wang S M. Spatial variation of modern pollen from surface lake sediments in Yunnan and southwestern Sichuan Province, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2011, 165(3/4): 224-234.
- [28] Shen H D, Li C H, Wan H W, Tong G B, Liu J S, Dan J. Relationships between vegetation and stomata, and between vegetation and pollen surface soil in Yunnan, Southwest China. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(15): 1775-1786.
- [29] Xiao X Y, Haberle S G, Shen J, Yang X D, Han Y, Zhang E L, Wang S M. Latest Pleistocene and Holocene vegetation and climate history inferred from an alpine lacustrine record, northwestern Yunnan Province, southwestern China. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 86: 35-48.
- [30] Xiao X Y, Haberle S G, Shen J, Xue B, Burrows M, Wang S M. Postglacial fire history and interactions with vegetation and climate in southwestern Yunnan Province of China. *Climate of the Past*, 2017, 13(6): 613-627.
- [31] Song X Y, Yao Y F, Wortley A H, Paudyal K N, Yang S H, Li C S, Blackmore S. Holocene vegetation and climate history at Haligu on the Jade Dragon Snow Mountain, Yunnan, SW China. *Climatic Change*, 2012, 113(3/4): 841-866.
- [32] 崔之久, 谢又予, 李洪云. 四川攀西螺髻山第四纪冰川作用遗迹与冰期系列. *冰川冻土*, 1986, 8(2): 107-118.
- [33] 刘雄, 沈穷竹. 螺髻山旅游地形形象定位及开发策略研究. *林业调查规划*, 2009, 34(5): 123-126.
- [34] 刘宇翔, 文绍琼. 螺髻山风景区旅游资源开发定位探讨. *西昌学院学报: 自然科学版*, 2006, 20(2): 102-105, 138-138.
- [35] 李旭, 刘金陵. 四川西昌螺髻山全新世植被与环境变化. *地理学报*, 1988, 43(1): 44-51.
- [36] Jarvis D I. Pollen evidence of changing Holocene monsoon climate in Sichuan Province, China. *Quaternary Research*, 1993, 39(3): 325-337.
- [37] 四川植被协作组. 四川植被. 成都: 四川人民出版社, 1980: 1-465.
- [38] 刘玉成. 西昌地区的地理概况与植被. *西南师范学院学报: 自然科学版*, 1982, (2): 38-69.
- [39] Faegri K, Iversen J. *Textbook of Pollen Analysis*. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1989: 1-328.
- [40] 中国科学院植物研究所古植物室孢粉组, 中国科学院华南植物研究所形态研究室. 中国热带亚热带被子植物花粉形态. 北京: 科学出版社, 1982: 1-672.
- [41] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 杨惠秋. 中国植物花粉形态(第二版). 北京: 科学出版社, 1995: 1-461.
- [42] 唐领余, 毛礼米, 舒军武, 李春海, 沈才明, 周忠泽. 中国第四纪孢粉图鉴. 北京: 科学出版社, 2017: 1-620.
- [43] Grimm E C. TILIA and TILIA-GRAPH: PC spreadsheet and graphics software for pollen data. *INQUA, Working Group on Data-Handling Methods, Newsletter*, 1990, 4: 5-7.
- [44] Ter Braak C J F, Smilauer P. *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5)*. Ithaca, New York: Microcomputer Power, 2002: 1-500.
- [45] 李旭. 四川螺髻山全新世植被和环境变化[D]. 南京: 中国科学院南京地质古生物研究所, 1986: 1-38.
- [46] 李永飞, 夏中林, 沈华东, 许斌, 陈发军, 凌超豪. 峨眉山世界遗产地表土孢粉组合及其生态和古环境启示. *生态学报*, 2020, 40(1): 181-201.
- [47] 赵先贵, 肖玲, 陈存根, 毛富春. 秦岭表土的花粉分析. *西北林学院学报*, 1999, 14(1): 1-5.
- [48] 许清海, 王子惠, 徐全洪, 夏玉梅. 长白山岳桦林带泥炭沼泽孢粉分析及其意义. *地理科学*, 1994, 14(2): 186-192.
- [49] 李文漪. 神农架巴山冷杉林花粉与植物关系及其森林植被之演替. *地理学报*, 1991, 46(2): 186-194.
- [50] 庞有智, 拉多, 张燕杰, 李春海, 唐领余. 青藏高原南部米拉山东、西坡表土花粉与现代植被关系研究. *微体古生物学报*, 2016, 33(1): 33-44.
- [51] 代然然, 韩晓丽, 张德怀. 重庆缙云山自然保护区表土花粉组合特征的初步研究. *西南大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(5): 159-165.
- [52] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 王昊, 赵东升. 云南亚热带南部表土孢粉组合与植被间的定量关系. *生态学报*, 2008, 28(12): 6061-6069.
- [53] 吴玉书, 孙湘君. 昆明西山林下表土中花粉与植被间数量关系的初步研究. *植物学报*, 1987, 29(2): 204-211.
- [54] 张华, 肖霞云, 羊向东, 隆浩, 张茂恒. 云南泸沽湖及周边山地表层孢粉与植被关系研究. *微体古生物学报*, 2016, 33(3): 304-315.
- [55] 李文漪, 姚祖驹. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究. *植物学报*, 1990, 32(12): 943-950.
- [56] Xu Q H, Li Y C, Yang X L, Zheng Z H. Quantitative relationship between pollen and vegetation in northern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(4): 582-599.