

DOI: 10.20103/j.stxb.202311242574

李姝明, 李泉, 秦锋, 赵文伟, 张以恒, 易桂田, 任维鹤. 衡山表土花粉与植被和气候的关系. 生态学报, 2025, 45(11): 5452-5465.

Li S M, Li Q, Qin F, Zhao W W, Zhang Y H, Yi G T, Ren W H. Relationships between modern pollen, vegetation, and climate in Hengshan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5452-5465.

## 衡山表土花粉与植被和气候的关系

李姝明<sup>1</sup>, 李泉<sup>2</sup>, 秦锋<sup>2</sup>, 赵文伟<sup>3</sup>, 张以恒<sup>3</sup>, 易桂田<sup>1</sup>, 任维鹤<sup>1,4,\*</sup>

<sup>1</sup> 衡阳师范学院地理与旅游学院, 衡阳 421002

<sup>2</sup> 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

<sup>3</sup> 南通大学地理科学学院, 南通 226019

<sup>4</sup> 衡阳师范学院古村古镇文化遗产数字化传承湖南省协同创新中心, 衡阳 421002

**摘要:** 山地花粉传播过程受多种因素的影响, 其散布规律较为复杂。厘清不同区域现代花粉的垂直散布规律与植被、气候的关系, 将有助于化石花粉的正确解译与定量重建。研究选取南岳衡山典型垂直植被带, 沿海拔梯度从山顶 1061 m 向山脚 202 m, 共采集了 21 个表土花粉样品, 运用花粉分析和数值统计等方法, 获得以下认识: (1) 衡山现代表土花粉组合中乔灌木类型以松属、杉科、壳斗科、木犀科和蔷薇科等占优势, 草本类型以禾本科、蒿属和莎草科等为主。(2) 本区域松属和蒿属可能具有超代表性, 杉科、蔷薇科、木犀科和盐肤木属代表性适中, 壳斗科、樟科、木兰属、槭属和禾本科具有低代表性。(3) 表土花粉组合在本研究区的四类植被带中有明显差异, 代表性的花粉类型与周边植物组合具有较好的一致性, 其中常绿阔叶树/落叶阔叶树和松属/杉科(*P/T*)的花粉比值在各植被带中差异显著。(4) 影响衡山表土花粉分布的主要气候因子为年均温, 且与 *P/T* 的相关性较强, 因此 *P/T* 或可作为区域地层花粉古气候重建的参考指标。

**关键词:** 衡山; 表土花粉; 植被; 气候

## Relationships between modern pollen, vegetation, and climate in Hengshan Mountain

LI Shuming<sup>1</sup>, LI Quan<sup>2</sup>, QIN Feng<sup>2</sup>, ZHAO Wenwei<sup>3</sup>, ZHANG Yiheng<sup>3</sup>, YI Guitian<sup>1</sup>, REN Weihe<sup>1,4,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Geography and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

<sup>3</sup> School of Geographical Science, Nantong University, Nantong 226019, China

<sup>4</sup> Cooperative Innovation Center for Digitalization of Cultural Heritage in Traditional Villages and Towns, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China

**Abstract:** Pollen dispersal in mountainous terrain is influenced by multiple factors, resulting in complex distribution patterns. Understanding the vertical distribution of modern pollen and its relationship with vegetation and climate across different regions is crucial for the accurate interpretation and quantitative reconstruction of fossil pollen. This study focused on the typical vertical vegetation types of Hengshan Mountain. A total of 21 surface soil pollen samples were collected along an altitudinal gradient from the summit (1061 m) to the foot (202 m) of the mountain. Pollen analysis and statistical methods were applied, yielding the following key findings: (1) The modern surface soil pollen assemblage of Hengshan Mountain was dominated by tree and shrub taxa, including *Pinus*, Taxodiaceae, Fagaceae, Oleaceae, and Rosaceae, while

**基金项目:** 国家重点研发计划(2022YFF0801504); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ40099); 国家自然科学基金项目(42107475); 湖南省教育厅项目(23B0678)

收稿日期: 2023-11-24; 采用日期: 2025-04-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: renweiheeee@outlook.com

the herbaceous taxa were primarily Poaceae, *Artemisia*, and Cyperaceae. (2) Within this region, *Pinus* and *Artemisia* were potentially over-represented, while Taxodiaceae, Rosaceae, Oleaceae, and *Rhus* demonstrate moderate representativeness. Fagaceae, Lauraceae, *Magnolia*, *Acer*, and Poaceae were underrepresented. (3) Surface soil pollen assemblages exhibited clear differences among the four vegetation types, with representative pollen taxa being consistent with surrounding plant communities. Notable differences were observed in the pollen ratios of evergreen broad-leaved tree pollen to deciduous broad-leaved tree pollen ( $E/D$ ) and *Pinus* to Taxodiaceae ( $P/T$ ) across the vegetation types. (4) The primary climatic factor affecting the distribution of surface soil pollen on Hengshan Mountain was the mean annual temperature (MAT). The strong correlation between  $P/T$  and MAT suggests that  $P/T$  could serve as a useful index for regional pollen-based paleoclimate reconstruction.

**Key Words:** Hengshan Mountain; modern pollen; vegetation; climate

IPCC 第六次评估报告强调了各大圈层的变化过程和机理,其中生态系统在全球变化背景下有显著且迅速的响应<sup>[1]</sup>,厘清区域植被的长期演化机制对未来生态系统的预测和保护尤为重要。全球已开展较多关于表土花粉的研究,而在我国主要集中于东北和青藏高原<sup>[2-6]</sup>,以及华东<sup>[7-8]</sup>、华中<sup>[9]</sup>和西南<sup>[10-11]</sup>等地区,南方亚热带研究相对薄弱,且缺少典型山地现代花粉散布规律的分析<sup>[12]</sup>,使得基于地层花粉的植被和气候变化的定量重建存在诸多不确定性<sup>[13-14]</sup>。

为了正确解译地层花粉数据,重建过去植被和气候,相关方法已逐步从定性分析发展到定量分析。早期的花粉比值和花粉代表性( $R$ 值)<sup>[15-16]</sup>可以半定量地研究现代花粉、植被与气候的关系,但具有区域差异性。现今熟知的生物群区法<sup>[17]</sup>,排序分析<sup>[18-19]</sup>,加权平均偏最小二乘法<sup>[20-21]</sup>,现代类比法<sup>[22-23]</sup>和随机森林机器学习法<sup>[24]</sup>等定量方法,可以为古植被与古气候重建提供更加准确的解释。然而,不同方法结果的可靠性始终依赖地层和现代花粉数据的准确鉴定,以及研究点周边更加丰富的表土样点数量。亚热带植被丰富,表土花粉种类复杂。通过结合多种数值分析方法探究花粉、植被与气候的关系,厘清不同方法在亚热带山地的适用性差异,有助于为化石花粉数据的解译提供科学依据。

衡山位于亚热带季风区,是国家级自然保护区,具有亚热带典型植物种类和大量第三纪孑遗植物。衡山垂直植被带谱较为明显,对气候变化响应敏感,是研究现代花粉与植被、气候关系的理想区。本研究将以沿海海拔梯度采集的表土样品为研究材料,进行花粉提取、鉴定和统计分析,以探讨花粉组合与植被及环境因子的关系,为中国南方及其周边地区第四纪花粉重建提供有益补充。

## 1 研究区概况

衡山位于中国湖南省偏东南部,介于北纬 27°4′—27°20′,东经 112°34′—112°44′之间(图 1)。衡山由峰林状花岗岩断块构成中山地貌,山体由东北向西南方向倾斜,最高峰海拔 1300.2 m。衡山为亚热带湿润气候,年平均气温为 11 °C,年均降水量为 2251.6 mm。气温垂直差异大,山顶多年平均气温为 11 °C,山脚可达到 17 °C<sup>[25]</sup>。

衡山主峰阳坡 200—300 m 为常绿阔叶林。乔木主要有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、樟树(*Camphora officinarum*)、多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)、槭树(*Acer miyabei*)、木犀(*Osmanthus fragrans*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)和枫香树(*Liquidambar formosana*)等。灌木常见檫木(*Loropetalum chinense*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)和柃木(*Eurya japonica*)等,并伴有藤本状的蛇葡萄(*Ampelopsis glandulosa*)和扁竹兰(*Iris confusa*)等。

在海拔 300—700 m 处为常绿与落叶阔叶混交林。针叶树种主要有马尾松、杉木和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等。常绿乔木主要有栲(*Castanopsis fargesii*)、多脉青冈、甜槠、石楠(*Photinia serratifolia*)、柏树(*Cupressus funebris*)和大花枇杷(*Eriobotrya cavaleriei*)等,多为各植被类型的建群种。落叶乔木以枫香树、木兰

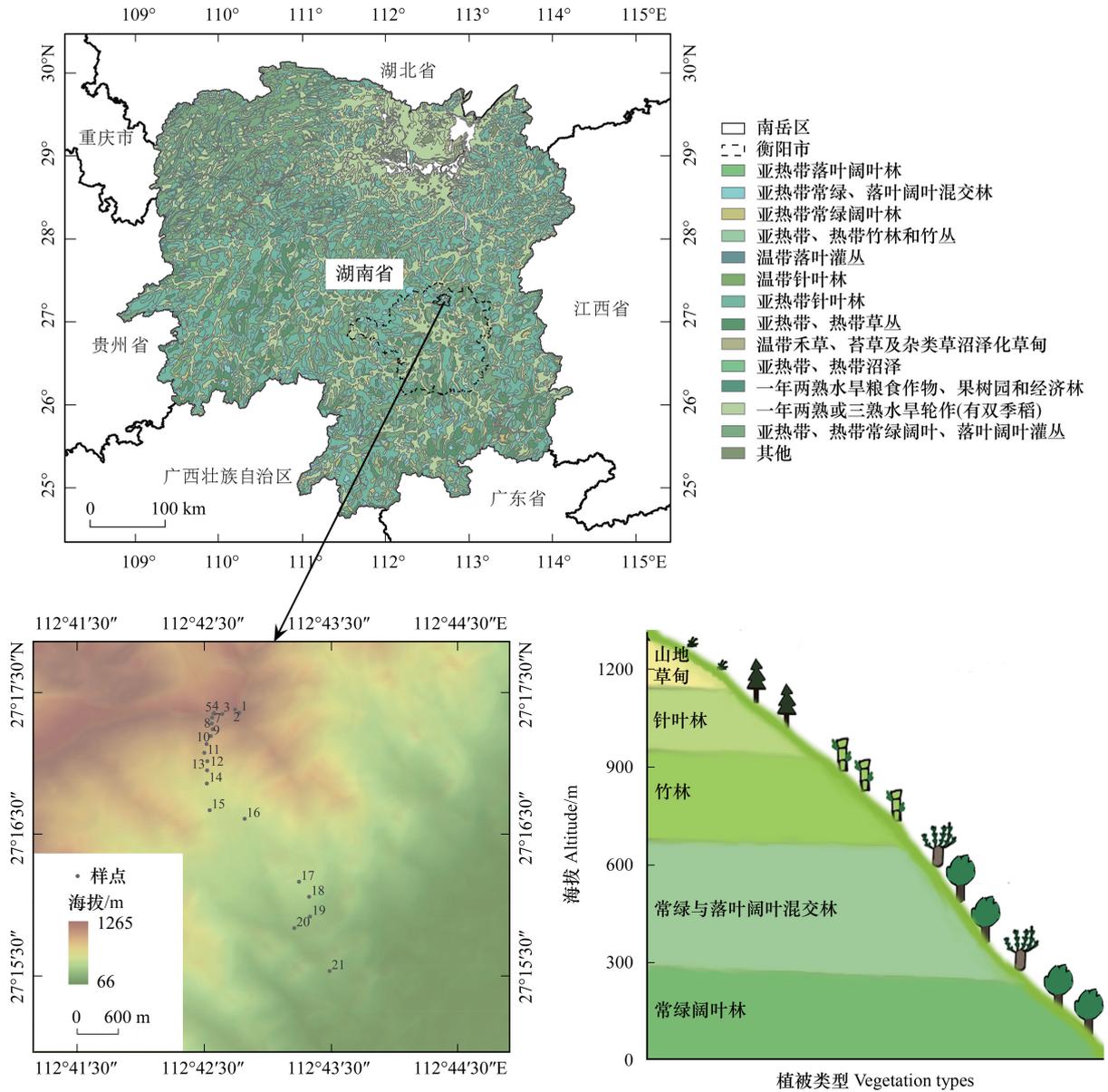


图 1 研究区示意图、采样点分布图及衡山主峰阳坡垂直植被变化图

Fig.1 The schematic diagram of the study area, distribution of sampling points and vertical vegetation zones on the sunny slopes of the main peak of Hengshan Mountain

(*Yulania denudata*) 和槭树 (*Acer miyabei*) 为主。常绿灌木有含笑 (*Michelia figo*)、木犀、山茶 (*Camellia japonica*) 和朱砂根 (*Ardisia crenata*) 等。落叶灌木以杜鹃花 (*Rhododendron simsii*) 和盐肤木 (*Rhus chinensis*) 占优势。在草本植被中, 双子叶植物居多, 其中以菊科和蔷薇科最为常见; 如菊科千里光 (*Senecio scandens*)、野茼蒿 (*Crassocephalum crepidioides*) 和蓬菜葛 (*Gardneria multiflora*) 等; 蔷薇科的川莓 (*Rubus setchuenensis*)、野草莓 (*Fragaria vesca*) 和山莓 (*Rubus corchorifolius*) 等。另外, 铁线莲属的铁线莲 (*Clematis florida*)、小檗科的黄连 (*Coptis chinensis*)、山茶科的艾纳香 (*Camellia oleifera*)、紫金牛科的九节龙 (*Ardisia pusilla*) 和漆树科的白酒草 (*Eschenbachia japonica*) 等亦有分布。单子叶草本植物主要含禾本科的荻 (*Miscanthus sacchariflorus*)、芒草 (*Miscanthus sinensis*) 和中华草沙蚕 (*Tripogon chinensis*)。藤本植物的毛鳞省藤 (*Calamus thysanolepis*) 也零星出现。

海拔 700—900 m 以毛竹林为主,出现甜槠和杜英 (*Elaeocarpus decipiens*) 等常绿乔木。常绿灌木以冬青 (*Ilex chinensis*)、柃木、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 和山茶占优势。草本植物主要有蔷薇科的寒莓 (*Osmanthus fragrans*)、山莓 (*Rubus corchorifolius*), 以及禾本科的拂子茅 (*Calamagrostis epigeios*)。

海拔 900—1200 m 为针叶林。柳杉 (*Cryptomeria japonica*)、金钱松 (*Pseudolarix amabilis*)、华山松 (*Pinus armandii*) 和马尾松等针叶树占据乔木层,林下常有胡枝子、花楸 (*Sorbus alnifolia*) 和薹草属 (*Carex*)。1200 m 以上为草甸层,分布着拂子茅 (*Calamagrostis epigeios*)、薹草属 (*Carex*) 和芒草 (*Miscanthus sinensis*) 等<sup>[25]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与实验分析

2020 年 10 月,本团队沿海拔梯度设置样点,由衡山 1061 m 至 202 m 共采集 21 个样品,用手持 GPS 记录采样点的地理位置。在每个样点处选择 1 m<sup>2</sup> 内的 5 个土壤样品(表层 1 cm 厚)采用梅花点状法混合为一个样品,并对以采样点为中心的 10 m×10 m 范围开展植被调查(表 1)。

表 1 衡山 21 个表土花粉样点及植被调查信息

Table 1 Information on 21 surface pollen sample sites and vegetation surveys in Hengshan Mountain

样品号 Sample No.	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude/m	植被类型 Vegetation types	主要植物类型 Major plant taxa
S1	112.713°	27.289°	1061	针叶林	柳杉 ( <i>Cryptomeria japonica</i> ); 胡枝子 ( <i>Lespedeza bicolor</i> ); 花楸 ( <i>Sorbus alnifolia</i> ); 薹草属 ( <i>Carex</i> ); 牡蒿 ( <i>Artemisia japonica</i> )
S2	112.712°	27.29°	1056	针叶林	金钱松 ( <i>Pseudolarix amabilis</i> ); 华山松 ( <i>Pinus armandii</i> ); 胡枝子 ( <i>Lespedeza bicolor</i> ); 芒草 ( <i>Miscanthus sinensis</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 映山红 ( <i>Rhododendron simsii</i> ); 鼠李科猫乳 ( <i>Rhamnella franguloides</i> ); 异叶梁王茶 ( <i>Metapanax davidii</i> ); 甜槠 ( <i>Castanopsis eyrei</i> )
S3	112.711°	27.289°	1002	针叶林	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 华山松 ( <i>Pinus armandii</i> ); 柳杉 ( <i>Cryptomeria japonica</i> ); 胡枝子 ( <i>Lespedeza bicolor</i> ); 野草莓 ( <i>Fragaria vesca</i> ); 常春藤 ( <i>Hedera sinensis</i> ); 牡蒿 ( <i>Artemisia japonica</i> )
S4	112.71°	27.289	980	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 芒萁 ( <i>Dicranopteris pedata</i> ); 柳杉 ( <i>Cryptomeria japonica</i> ); 拂子茅 ( <i>Calamagrostis epigeios</i> )
S5	112.71°	27.289°	975	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 野蔷薇 ( <i>Rosa multiflora</i> ); 牡蒿 ( <i>Artemisia japonica</i> )
S6	112.709°	27.289°	950	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 凤尾蕨属 ( <i>Pteris</i> ); 堇菜 ( <i>Viola arcuata</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 山茶 ( <i>Camellia japonica</i> )
S7	112.709°	27.288°	900	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 胡枝子 ( <i>Lespedeza bicolor</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 甜槠 ( <i>Castanopsis eyrei</i> ); 山矾 ( <i>Symplocos sumuntia</i> ); 绣线菊 ( <i>Spiraea salicifolia</i> )
S8	112.709°	27.287°	850	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 寒莓 ( <i>Osmanthus fragrans</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 山茶 ( <i>Camellia japonica</i> ); 木犀 ( <i>Osmanthus fragrans</i> )
S9	112.709°	27.287°	801	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 寒莓 ( <i>Osmanthus fragrans</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 苍耳 ( <i>Xanthium strumarium</i> ); 甜槠 ( <i>Castanopsis eyrei</i> )
S10	112.709°	27.286°	750	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 芒草 ( <i>Miscanthus sinensis</i> ); 寒莓 ( <i>Osmanthus fragrans</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 杜英 ( <i>Elaeocarpus decipiens</i> )
S11	112.708°	27.285°	702	竹林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 冬青 ( <i>Ilex chinensis</i> ); 柃木 ( <i>Eurya japonica</i> )
S12	112.709°	27.284°	648	常绿与落叶阔叶混交林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 甜槠 ( <i>Castanopsis eyrei</i> ); 冬青 ( <i>Ilex chinensis</i> ); 柃木 ( <i>Eurya japonica</i> )

续表

样品号 Sample No.	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude/m	植被类型 Vegetation types	主要植物类型 Major plant taxa
S13	112.709°	27.283°	602	常绿与落叶 阔叶混交林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 木犀 ( <i>Osmanthus fragrans</i> ); 盐肤木 ( <i>Rhus chinensis</i> ); 山茶 ( <i>Camellia japonica</i> ); 绣线菊 ( <i>Spiraea salicifolia</i> ); 甜槠 ( <i>Castanopsis eyrei</i> );
S14	112.709°	27.281°	552	常绿与落叶 阔叶混交林	毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 艾纳香 ( <i>Blumea balsamifera</i> ); 山茶 ( <i>Camellia japonica</i> ); 野草莓 ( <i>Fragaria vesca</i> ); 南天竹 ( <i>Nandina domestica</i> ); 白酒草 ( <i>Eschenbachia japonica</i> ); 多脉青冈 ( <i>Quercus multinervis</i> ); 异叶黄鹌菜 ( <i>Youngia heterophylla</i> ); 柃木 ( <i>Eurya japonica</i> ); 木犀科 ( <i>Osmanthus fragrans</i> )
S15	112.709°	27.278°	504	常绿与落叶 阔叶混交林	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 水杉 ( <i>Metasequoia glyptostroboides</i> ); 杉木 ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> ); 高粱泡 ( <i>Rubus lambertianus</i> ); 艾纳香 ( <i>Camellia oleifera</i> ); 九节龙 ( <i>Ardisia pusilla</i> ); 山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> ); 蓬菜葛 ( <i>Gardneria multiflora</i> ); 芒草 ( <i>Miscanthus sinensis</i> ); 苦槠 ( <i>Castanopsis sclerophylla</i> ); 铁杉 ( <i>Tsuga chinensis</i> )
S16	112.714°	27.277°	453	常绿与落叶 阔叶混交林	木兰 ( <i>Yulania denudata</i> ); 含笑 ( <i>Michelia figo</i> ); 槭树 ( <i>Acer miyabei</i> ); 柏树 ( <i>Cupressus funebris</i> ); 马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 日本柳杉 ( <i>Cryptomeria japonica</i> ); 千里光 ( <i>Senecio scandens</i> ); 多脉青冈 ( <i>Cyclobalanopsis multinervis</i> ); 牡蒿 ( <i>Artemisia japonica</i> )
S17	112.721°	27.269°	400	常绿与落叶 阔叶混交林	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 川莓 ( <i>Rubus setchuenensis</i> ); 黄连 ( <i>Coptis chinensis</i> ); 毛鳞省藤 ( <i>Calamus thysanolepis</i> ); 杉木 ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> ); 槭树 ( <i>Acer miyabei</i> )
S18	112.722°	27.268°	350	常绿与落叶 阔叶混交林	樟树 ( <i>Camphora officinarum</i> ); 杉木 ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> ); 马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 甜槠 ( <i>Castanopsis eyrei</i> ); 红花榿木 ( <i>Loropetalum chinense</i> ); 毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 枫香树 ( <i>Liquidambar formosana</i> ); 含笑 ( <i>Michelia figo</i> ); 杜鹃 ( <i>Rhododendron simsii</i> ); 大花枇杷 ( <i>Eriobotrya cavaleriei</i> ); 铁线莲 ( <i>Clematis florida</i> ); 荻 ( <i>Miscanthus sacchariflorus</i> ); 石楠 ( <i>Photinia serratifolia</i> )
S19	112.722°	27.265°	286	常绿阔叶林	樟树 ( <i>Camphora officinarum</i> ); 马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 红花榿木 ( <i>Loropetalum chinense</i> ); 毛竹 ( <i>Phyllostachys edulis</i> ); 棕竹 ( <i>Rhapis excelsa</i> ); 朱砂根 ( <i>Ardisia crenata</i> ); 中华草沙蚕 ( <i>Tripogon chinensis</i> ); 栲 ( <i>Castanopsis fargesii</i> )
S20	112.72°	27.264°	251	常绿阔叶林	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 槭树 ( <i>Acer miyabei</i> ); 红花榿木 ( <i>Loropetalum chinense</i> ); 地胆草 ( <i>Elephantopus scaber</i> ); 苕麻 ( <i>Boehmeria nivea</i> ); 野苘蒿 ( <i>Crassocephalum crepidioides</i> ); 石栗 ( <i>Aleurites moluccanus</i> )
S21	112.725°	27.259°	202	常绿阔叶林	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> ); 杉木 ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> ); 榿木 ( <i>Torreya grandis</i> ); 棕竹 ( <i>Rhapis excelsa</i> ); 枫香树 ( <i>Liquidambar formosana</i> ); 樟树 ( <i>Camphora officinarum</i> ); 柃木 ( <i>Eurya japonica</i> ); 苕麻 ( <i>Boehmeria nivea</i> ); 苦槠 ( <i>Castanopsis sclerophylla</i> )

实验前对每个样品称取 2 g, 并加入已知数量的石松孢子片 (9666 粒/片)。利用传统 HF 法对每个样品进行前处理<sup>[26]</sup>, 依次经过盐酸 (10%)、氢氧化钠 (10%)、氢氟酸 (40%)、醋解溶液 (醋酸酐和浓硫酸体积比 9:1 的混合溶液) 处理, 在超声波清洗器中通过 10  $\mu\text{m}$  筛布过滤, 离心获得花粉浓缩物, 用甘油密封保存备用。使用德国蔡司 ZEISS prime star 光学生物显微镜, 在 400 $\times$  和 600 $\times$  镜下进行花粉鉴定和统计, 花粉鉴定参考孢粉形态专著<sup>[27-28]</sup>, 及衡阳师范学院与南通大学制备的现代花粉参考片, 每个样品至少统计 1000 粒陆生植物花粉。花粉百分比基于陆生花粉总数计算, 利用 Tilia 软件绘制花粉图谱。花粉浓度是指单位质量的沉积物

中各科属花粉的个数<sup>[15]</sup>。计算公式为  $C=(LX)/(L'M)$ , 其中  $C$  为花粉浓度(粒/g),  $L$  为加入样品的石松孢子数,  $X$  为鉴定得到的某科属花粉数,  $L'$  为鉴定过程中样品得到的石松孢子数,  $M$  为样品质量(g)。孢粉代表性常用  $R$  值表示, 它是某一科属花粉百分比值与样方中相应科属植被盖度之商<sup>[15]</sup>。 $R$  值 $<1$ , 表明花粉具有低代表性;  $R$  值 $=1$ , 表明花粉代表性适中;  $R$  值 $>1$ , 表明花粉具有超代表性。另外计算了常绿阔叶树花粉/落叶阔叶树花粉(Evergreen broad-leaved tree pollen/Deciduous broad-leaved tree pollen,  $E/D$ )和松属花粉/杉科花粉(*Pinus* pollen/Taxodiaceae pollen,  $P/T$ )比值。

## 2.2 气候数据

为探讨衡山地区沿海拔梯度的现代表土花粉与气候之间的关系, 本研究选取不同气候参数与花粉数据进行分析。基于中国气象数据网的 1951—2020 年全国日值数据 (<http://www.nmic.cn/data/cdcindex/cid/6d1b5efbdcfb9a58.html>), 选取采样点周围 30 个气象站点, 使用克里金插值法<sup>[29]</sup>计算 21 个采样点的近四十年来的气候参数均值。在衡山, 随海拔升高, 温度逐渐降低, 而降水逐渐增加<sup>[30-31]</sup>, 采样点在垂直方向上气候差异较大。因此, 本研究引入衡山降水垂直递增率(59.1 mm/100 m)<sup>[31-32]</sup>和气温垂直递减率(0.65 °C/100 m)<sup>[33]</sup>, 并结合数字高程模型(DEM)修正克里金插值结果<sup>[29,34]</sup>, 最终得到具有代表性的年平均温度(Mean Annual Temperature, MAT)和年降水(Mean Annual Precipitation, MAP)数据。

## 2.3 数值分析

为探究不同海拔高度下花粉-植被-气候的关系, 使用 Canoco 5.0 软件<sup>[35]</sup>对百分比较高且具有代表性的 23 个花粉类群进行排序分析<sup>[36]</sup>。去趋势对应分析显示第一轴长度为 1.2 ( $<3$ ), 因此采用线性模型冗余分析(Redundancy analysis, RDA)来探讨表土花粉数据与主要环境因子海拔(Altitude, ALT)、年降水(MAP)和年平均温度(MAT)之间的关系。分析前, 原始花粉数据均进行了平方根转换。此外, 为进一步探讨衡山地区现代花粉与环境因子的相关性, 选取花粉类群与三个环境因子做相关性分析, 并绘制相关性热图。

## 3 研究结果

### 3.1 衡山表土花粉组合特征

本研究在衡山 21 个现代表土样品中鉴定出 90 个陆生花粉类型, 其中乔木和灌木花粉类型包括 49 个科(属), 草本类型包括 41 个科(属)。本区花粉组合总体特征是以乔灌木花粉占优势, 平均含量为 83.7%, 主要有松属(*Pinus*)、杉科(Taxodiaceae)、桦木属(*Betula*)、枫香树属(*Liquidambar*)、栎属(*Quercus*)、桤木属(*Alnus*)、蔷薇科(Rosaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)和木犀科(Oleaceae)等。松属在所有样品都有较高含量(最高 88.6%, 平均 49.3%), 杉科次之(最高 86.4%, 平均 18.9%)。草本花粉含量较低(平均 16.4%), 以禾本科(Poaceae)、蒿属(*Artemisia*)和莎草科(Cyperaceae)占优势, 蓼科(Polygonaceae)、毛茛科(Ranunculaceae)和十字花科(Brassicaceae)也常有出现。将花粉数据沿海拔梯度绘制花粉图谱, 基于聚类分析结果划分为 4 个花粉带(图 2)。

花粉组合带 I (202—286 m), 对应常绿阔叶林植被带。本带的花粉浓度在所有带中最低(平均为 14716 粒/g); 花粉含量以乔木花粉占主, 其次为灌木, 乔灌木花粉平均约 95.8%。本带的针叶树花粉含量最高, 以松属(平均为 84.9%)占绝对优势, 还出现杉科和铁杉属(*Tsuga*), 平均分别为 3.8%和 2.3%; 常绿阔叶树花粉以青冈属(*Cyclobalanopsis*)为主(平均为 0.5%), 出现少量山矾科(Symplocaceae)和杨梅科(Myrtaceae); 落叶阔叶树花粉含量较低, 以栎属为主(平均为 0.6%), 仅少量出现枫香树属、大戟科、落叶松属(*Larix*)和盐肤木属(*Rhus*)。本带中  $E/D$  值为 0.2—0.4, 平均为 0.3。本带的草本植物花粉平均仅 4.2%, 主要为禾本科(平均 1.4%)和蒿属(平均为 1.2%), 少量出现莎草科、蓼科和紫菀属(*Aster*)。

花粉组合带 II (350—648 m), 对应常绿与落叶阔叶混交林带。花粉总浓度(82189 粒/g)相对第一带明显上升。花粉组合中乔灌木花粉仍占优势, 平均为 82.0%。针叶树花粉中松属(49.5%)为优势类群, 但低于带 I; 杉科含量为 16.0%, 明显高于带 I。铁杉属(0.8%)相对第一带有所减少。常绿阔叶树花粉以木犀科(2.9%)

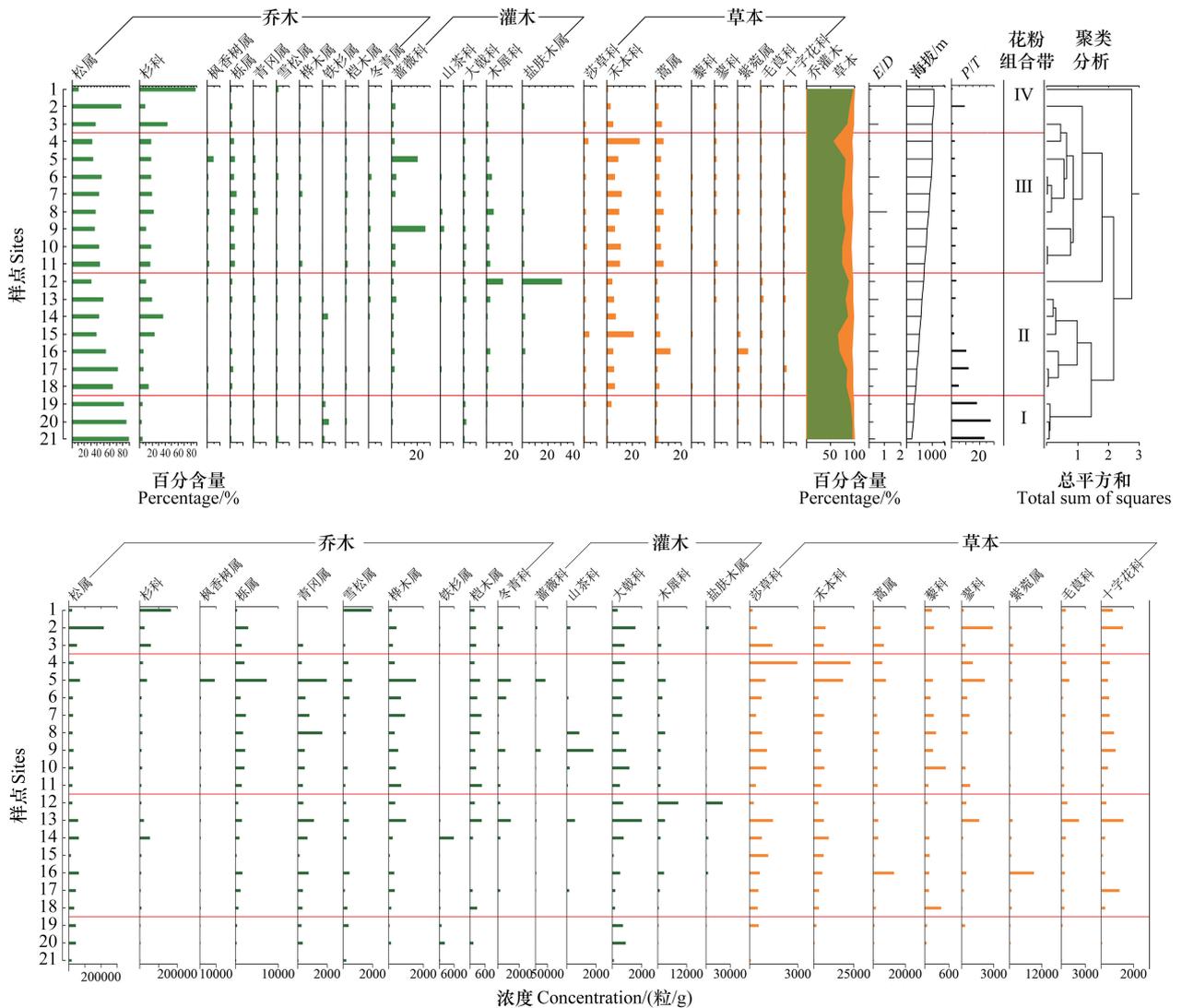


图2 衡山表土样品主要花粉类型百分比图谱和浓度图谱

Fig.2 Percentage diagram and concentration diagram of major pollen taxa in topsoil samples from Hengshan Mountain

E/D:常绿阔叶树花粉/落叶阔叶树花粉比值;P/T:松属花粉/杉科花粉比值

为主,还有少量青冈属、冬青属 (*Ilex*) 和山矾科。落叶阔叶树花粉在本带显著增加,盐肤木属、蔷薇科和栎属含量较高,平均分别为 5.1%、1.4%和 1.2%。本带中 *E/D* 的值为 0.3—0.6,平均为 0.4,高于第一带。草本植物花粉含量(18.2%)较第一带上升明显,禾本科(7.5%)是优势成分,另有莎草科(1.2%)、蒿属(3.5%)和紫菀(1.9%)花粉的出现。

花粉组合带Ⅲ(702—980 m)的样品多来自竹林。本带花粉总浓度(81051 粒/g)低于带Ⅱ。该带花粉组合中草本含量(22.9%)较前两带高,乔灌木花粉(77.5%)略有下降。针叶树花粉以松属(38.7%)和杉科(16.9%)为主,同时存在少量的云杉属(*Picea*)、雪松属(*Cedrus*)和铁杉属。常绿阔叶花粉仍以木犀科(2.2%)为主,青冈属和冬青属含量较少。落叶阔叶花粉中栎属含量(3.1%)为所有带中最高值。本带 *E/D* 值为 0.13—1.16,平均值为 0.40,低于第Ⅱ带。草本植物花粉以禾本科(10.8%)、莎草科(1.4%)和蒿属(4.4%)为主,而蓼科(1.0%)、紫菀(0.6%)和十字花科(0.3%)含量较低。

花粉组合带Ⅳ(980—1061 m),对应针叶林带,花粉浓度平均值为 200794 粒/g。该带花粉组合中草本花粉含量显著下降(7.4%),乔灌木花粉含量明显上升(92.5%)。乔灌木花粉主要以松属和杉科为主。本带样

点 1 的杉科含量 (86.5%) 在所有样点中最高,松属(9.8%)最低。本带  $E/D$  值为 0.14—0.62。草本植物花粉有禾本科(2.5%)、蒿属(2.3%)、毛茛科(0.2%)和十字花科(0.3%)等,但含量较低。

### 3.2 RDA 和相关性分析结果

表土花粉和环境要素的 RDA 分析结果(图 3)显示,前两轴总的解释量为 28.49%,其中第一轴为 24.57%。

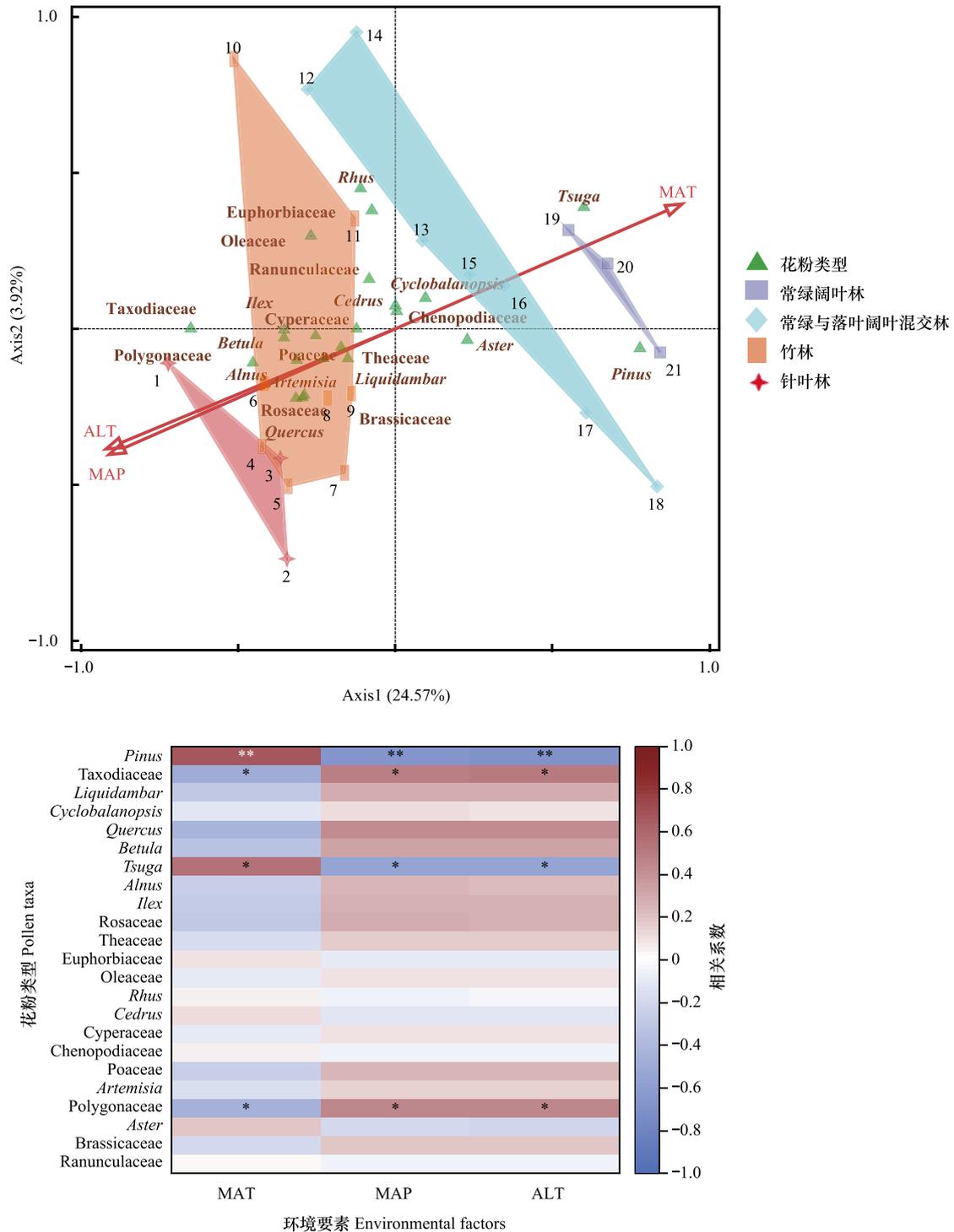


图 3 衡山花粉组合和气候变量的 RDA 分析结果和相关性分析结果

Fig.3 Results of RDA and correlation analysis between pollen assemblages and climatic variables in Hengshan Mountain

MAT: 年均温 Mean annual temperature; MAP: 年降水 Mean annual precipitation; ALT: 海拔 Altitude

MAT 位于第一、第二轴的正方向。MAP、ALT 位于第一轴和第二轴负方向,而且三个环境因子与第一轴相关性较高。RDA 第一轴得分与 MAT 的相关系数最高(0.8827),MAP 与第一轴负相关,相关系数值为 0.8813。

相关性分析结果(图 3)发现,松属和所有环境因子之间具有极显著相关( $P < 0.01$ ),杉科、铁杉、蓼科和所有环境因子之间具有显著相关( $P < 0.05$ )。松属、铁杉与 MAT 具有正相关,与 MAP 和 ALT 呈现负相关。杉科和蓼科与 MAT 具有负相关,与 MAP 和 ALT 呈现正相关。

## 4 讨论

### 4.1 衡山主要科属花粉的代表性

衡山表土花粉组合与采样点植被数据的对比,显示不同的乔木花粉类群对相应母体植物覆盖度的代表性存在差异,其中优势花粉类群松属具有超代表性。本研究所有样品均出现松属花粉(9.8%—88.6%,平均为 49.3%),当样点周围有少量马尾松分布时,表土花粉组合中松属均高于 30%。其中 7 个样点(S2、S16、S17、S18、S19、S20、S21)的周围 100 m 内有大量马尾松分布,样品中松属花粉含量均高于 50%。除此之外,衡山北坡坡顶的样点 1 无松属分布,但也发现少量松属花粉。研究区的松属花粉平均  $R$  值为 2.9。以上情况可能是由于松属花粉扩散能力较强,山谷风将低海拔的松属花粉搬运至高处,导致松属花粉的超代表<sup>[37—38]</sup>。这在云南省玉龙雪山等亚热带山地的表土花粉研究中得到过证实<sup>[39—42]</sup>。

本研究所有样品均出现杉科花粉(3.1%—86.5%,平均为 18.9%),杉科花粉能较好地反映样点周围杉科植物的覆盖度。样点 1 的周围分布大量杉木和柳杉,花粉组合中杉科花粉含量高达 86.5%。样点 3 和样点 14 周围杉木植物覆盖度约为 30%,杉科花粉含量分别为 43.3%和 35.8%。而在其余没有杉木分布的样点,杉科花粉含量均低于 20%。杉科的平均  $R$  值为 0.9。因此,本地区杉科花粉代表性较高,杉科花粉与母体植物的出现具有较好的一致性,这与李圆圆等<sup>[43]</sup>在江西南昌西山地区得到的结论一致。而且,其他亚热带表土花粉研究显示柳杉林内、外的杉科花粉含量有巨大差异,杉科花粉主要靠风媒传播<sup>[44]</sup>,与植被匹配度高。

壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、木兰属(*Magnolia*)、槭属(*Acer*)等花粉类群均表现出低代表性。甜槠和多脉青冈等壳斗科植物在常绿阔叶林和混交林带较常见,但栎属、青冈属和栗属等壳斗科花粉在整个研究区内含量均较低,壳斗科花粉平均  $R$  值为 0.46,表明壳斗科花粉具有低代表性。杨振京等<sup>[45]</sup>在华北地区的表土花粉研究中,发现栎属花粉在燕山地区各植被带中均具有低代表性。张华等<sup>[46]</sup>对云南泸沽湖周边的常绿栎林的表土花粉研究,发现栎属花粉代表性较低,认为可能是传播能力强和代表性高的松属花粉掩盖了栎属花粉的真实比例。在阔叶林带常见的樟科、木兰和槭树等植物,植被覆盖度大于 20%,其相应的花粉并未被发现,可能原因是其产量低和花粉壁薄等造成的花粉难以保存<sup>[47—48]</sup>。

灌木花粉类群大多具有适中的代表性。蔷薇科在样点 5 和 9 的花粉含量高达 19.5%和 26.1%,而木犀科(12.8%)和盐肤木属(30.7%)在样点 12 达到最高值。上述灌木类花粉的样点均位于灌木丛内,且相应植物的盖度较高,说明花粉含量对植物组成具有指示意义。另外,蔷薇科作为虫媒植物,仅能通过昆虫传播数公里<sup>[49]</sup>,这或许能解释本研究的蔷薇科花粉主要出现在灌木丛密集样点的现象。

草本植物中常见的禾本科具有低代表性,蒿属具有超代表性。衡山地区分布大量天然毛竹林,素有“竹海”之称,但竹林下禾本科花粉含量较低(0.3%—25.2%,平均为 7.2%)。在样点 4—13,竹林覆盖度最高(平均 > 50%),禾本科花粉平均含量仅为 9.6%,花粉平均  $R$  值为 0.41。因此,禾本科花粉含量远小于覆盖度,表明竹林的禾本科花粉具较低代表性<sup>[50—51]</sup>。有研究指出,禾本科花粉壁薄,而且毛竹为多年生一次开花植物,这两种因素可能是导致表土中禾本科花粉代表性低的原因<sup>[52—53]</sup>。蒿属植物是森林地区草本植被的主要类型之一,本研究的大多数样品中,蒿属花粉含量高,在高海拔地区也有明显出现,在常绿与落叶阔叶林带和竹林带蒿属含量均占显著优势,平均  $R$  值为 1.2,表明蒿属具有超代表性。可能由于蒿属花粉产量高且颗粒小,易被风携带,在山区随上坡风可远距离运输<sup>[54—55]</sup>。而且,在远离草原、距离大陆 2000 公里的太平洋地区,表层海水中仍发现了丰富的蒿属,表明蒿属的产量和传播能力极为突出<sup>[24]</sup>。

## 4.2 衡山表土花粉与植被群落

衡山地区花粉组合中松属和杉科为优势类群,伴有一定量的常绿阔叶类花粉,如木犀科、山茶科、青冈属、冬青属和杨梅科等,以及少量落叶阔叶乔木类群,如盐肤木属、大戟科、栎属、枫香树属等。野外植被调查发现衡山地区多属于常绿阔叶林植被,甜槠和多脉青冈是该地区的主要建群种,大戟科、樟树、盐肤木、枫香树为优势种。针叶林的建群种包括马尾松和杉木,以及少量日本柳杉。另外,竹林成片分布,常夹杂在阔叶林与针叶林之间。总体而言,衡山地区表土花粉有较好地对应该地区植被的组成。

常绿阔叶林带处于低海拔的山麓,生长有较多马尾松、樟树、木犀和槭树等。其花粉组合(图 2)以松属为绝对优势,也有一定的杉科、铁杉和蒿属,能较好地指示植被群落特征。常绿与落叶阔叶植被带主要有樟树、马尾松、水杉、多脉青冈、木犀科、槭树、铁杉、木兰、盐肤木和高粱泡等植被,乔灌木花粉中松属、杉科、木犀科、盐肤木和蔷薇科等含量较高,优势花粉类型与优势植物对应良好,能指示样点的植被群落组成。竹林带的花粉组合中除松属和杉科外,还出现大量禾本科、蔷薇科和蒿属,其中禾本科和蒿属花粉含量在此带均达到最高。花粉组合中比重较大的禾本科、蔷薇科和蒿属花粉与母体植被毛竹、拂子茅、山莓、牡蒿等很好地对应,因此竹林带的花粉组合能在一定程度上反映植被组成特征。针叶林带的花粉组合包括大量的杉科、松属和少量的雪松。杉科在此带含量达到最大,松属含量最小,杉科是本带的代表花粉类型,在该带中花粉组合特征能够反映植被群落的优势种(如杉木和柳杉),但不能清楚地指示群落外貌总体特征。衡山的表土花粉组合与同处于亚热带地区的江西西山<sup>[43]</sup>和四川峨眉山<sup>[56]</sup>较为相似,如松属和杉科花粉均为优势类型,其他乔灌木花粉如桦木属、壳斗科、木犀科和盐肤木属等均有出现,显示花粉组合与区域植被组成对应良好。

## 4.3 衡山表土花粉与环境因子

通过 RDA 排序分析可得,研究区表土花粉的分布规律与年均温、年降水和海拔有密切联系(图 3)。温度(MAT)指向第一轴正方向,降水(MAP)和海拔(ALT)指向负方向,说明降水量与海拔呈正相关,而与温度呈现负相关。RDA 第一轴上,从右到左,植被带从常绿阔叶林带到针叶林带变化,反应了低海拔植被带到高海拔植被带的梯度。通过置换检验发现环境因子与花粉组合均显著相关,温度和降水是决定衡山花粉和植被分布的重要因素,其中 MAT 与花粉组合的相关性最强( $R^2 = 0.7233$ ,  $P < 0.001$ ),MAP 与花粉组合相关性稍低。衡山位于亚热带山地,雨热同期,但降水的海拔梯度变化不显著,使得植被分布、花期和花粉季对温度响应更敏感。RDA 结果也表明,控制该地区植被带垂直分布以及高含量花粉类型(如松属和铁杉属)散布规律的主要气候参数之一为 MAT,这很好地反映了植被与气候在垂直梯度上的关系<sup>[57]</sup>。

## 4.4 花粉比值的植被与气候指示意义

地层的花粉比值常用作反映植被类型或环境状态的指标,比如在寒旱区,蒿属/藜科(*Artemisia/Chenopodiaceae*,  $A/C$ )和蒿属/莎草科(*Artemisia/Cyperaceae*,  $A/Cy$ )的值被认为可指示干湿程度<sup>[58-59]</sup>;而在亚热带地区,常绿阔叶树花粉与落叶阔叶树花粉的比值(Evergreen broad-leaved tree pollen/Deciduous broad-leaved tree pollen,  $E/D$ )可用来指示地带性森林植被的组成状况与温度变化<sup>[48]</sup>,并成功用于亚热带地区第四纪花粉化石的古生态解译中<sup>[9,60]</sup>。本文发现,松属花粉/杉科花粉(*Pinus pollen/Taxodiaceae pollen*,  $P/T$ )比值在研究区也有一定的变化规律,可能存在环境意义。本研究试图探讨  $E/D$  比值和  $P/T$  比值在衡山地区的变化特征和气候代表性。

衡山研究点的  $E/D$  值范围为 0.13—1.16(图 2),与前人在亚热带地区表土花粉研究的结果相近<sup>[60]</sup>。常绿阔叶林带的采样点海拔最低,其  $E/D$  值(图 4)却相对混交林偏低(平均 0.29),可能是高处的落叶树花粉自然沉降致使比值降低。常绿与落叶阔叶混交林带采样点的  $E/D$  比值(图 4)变化幅度较小(0.30—0.60,平均为 0.46),且明显高于其他所有花粉带。竹林样点的  $E/D$  平均为 0.4(图 4),其中样点 8 的  $E/D$  比值大于 1,可能因为此点周围生长着多株木犀科木本植物。针叶林带采样点的  $E/D$  值仅为 0.2(图 4),与周围植被组合基本一致。

除了常绿阔叶林带的异常低值, $E/D$  的比值随着海拔的升高逐渐降低(图 4),对植被类型有较好的响应。

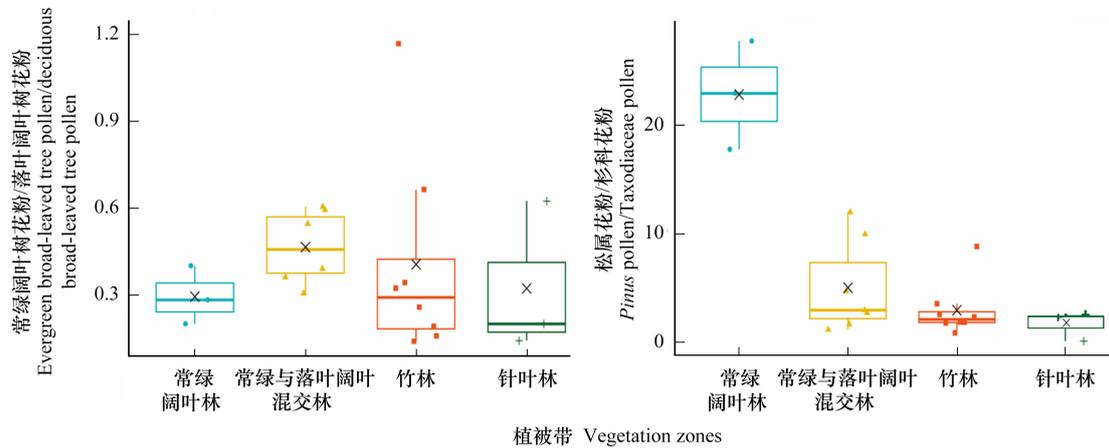


图4 常绿阔叶树花粉/落叶阔叶树花粉比值和松属花粉/杉科花粉比值的箱线图

Fig.4 Boxplots of  $E/D$  (Evergreen tree pollen/Deciduous tree pollen) ratios and  $P/T$  (*Pinus* pollen/*Taxodiaceae* pollen) ratios

Fang 等<sup>[9]</sup>和王秀梅等<sup>[60]</sup>的研究指出, $E/D$ 的均值在高于 900 m 的表土样品中随海拔升高呈现逐渐下降趋势。由于温度与海拔有显著的负相关,且是研究区植被带分布的主要影响因素(图 3),因而  $E/D$  在较高的海拔范围内对温度有一定的指示意义。

衡山表土样品中松属和杉科花粉占有绝对优势(图 2),且表现出此消彼长的变化特征,似乎对海拔(温度)变化有更敏感的反应。相关性分析结果(图 3)显示出松属花粉与年降水显著负相关,与温度呈显著正相关;杉科花粉与温度呈现显著负相关,与年降水正相关。其中,马尾松在温和的春秋季节出现生长高峰,且早季生长明显大于雨季<sup>[61-62]</sup>,支持本研究松属花粉与温度和降水的高相关性。另外,衡山地区生长的杉科主要为杉木和柳杉,其生长的温度范围较广,极少出现在干旱地区<sup>[63]</sup>。衡山不同植被带表土花粉组合中,松属/杉科( $P/T$ )比值差异较大(图 4)。 $P/T$ 比值从常绿阔叶林带(平均为 22.84)至阔叶混交林带(平均为 5.01)迅速下降,此后每一带均有降低。因此, $P/T$ 比值在森林植被带的梯度变化中也存在响应。

通过对花粉比值  $P/T$  与温度和降水气候参数线性拟合(图 5)发现, $P/T$ 值与年均温( $R^2=0.48$ )有明显的正相关关系,与年降水( $R^2=0.47$ )有负相关关系,其与温度相关性最强。并且, $P/T$ 均值从常绿阔叶林带(低海拔)向针叶林带(高海拔)逐渐降低(图 4)。因此,研究区的  $P/T$ 值与气候(尤其是温度)有明显的线性关系,或可成为亚热带地区地层花粉比值的参考,但仍需进一步探究。

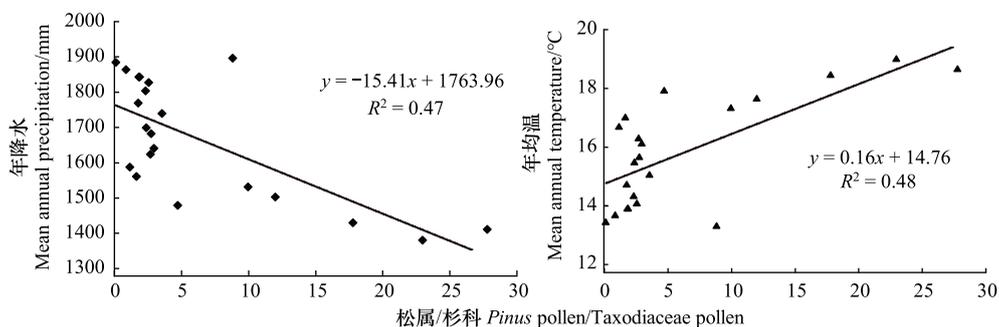


图5  $P/T$  比值与气候变量的散点图

Fig.5 Scatter plot of *Pinus* pollen/*Taxodiaceae* pollen ratios versus climate variables

## 5 结论

(1) 花粉组合中木本花粉占绝对优势,平均为 83.7%,主要为松属、杉科、桦木属、桤木属和栎属等;草本

花粉含量较低, 平均为 16.4%, 主要为禾本科、蒿属和蓼科等。

(2) 各植被带的花粉组合与植物组成有较好的相关性, 但是松属和蒿属花粉具有超代表性, 杉科、蔷薇科、木犀科和盐肤木属代表性适中, 壳斗科、樟科、木兰属、槭属和禾本科代表性偏低。

(3) 温度是控制该地现代花粉分布的主要气候因素。随着海拔的升高,  $E/D$  值先增后减,  $P/T$  值逐渐减小。 $P/T$  比值与年均温度呈显著正相关, 该比值在本区域地层花粉的气候解释中需要特别关注。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Calvin K, Dasgupta D, Krinner G, Mukherji A, Thorne P, Trisos C, Romero J, Aldunce P, Barrett K, Blanco G, Cheung W, Connors S L, Denton F, Diongue - Niang A, Dodman D, Garschagen M, Geden O, Hayward B, Jones C, Jotzo F, Krug T, Lasco R, Lee Y Y, Masson - Delmotte V, Meinshausen M, Mintenbeck K, Mokssit A, Otto F, Pathak M, Pirani A, Poloczanska E, Pörtner H, Revi A, Roberts D, Roy J, Ruane A, Skea J, Shukla P, Slade R, Slangen A, Sokona Y, Sörensson A, Tignor M, van Vuuren D V, Wei Y M, Winkler H, Zhai P, Zommers Z, Hourcade J, Johnson F X, Pachauri S, Simpson N, Singh C, Thomas A, Totin E, Alegría A, Armour K, Bednar - Friedl B, Blok K, Cissé G, Dentener F, Eriksen S, Fischer E, Garner G, Guivarch C, Haasnoot M, Hansen G, Hauser M, Hawkins E, Hermans T, Kopp R, Leprince-Ringuet N, Lewis J, Ley D, Ludden C, Niamir L, Nicholls Z R J, Some S, Szopa S, Trewin B, van der Wijst K I, Winter G, Witting M, Birt A, Ha M. IPCC, 2023: climate change 2023: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [ core writing team, H. lee and J. romero ( eds. ) ]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023
- [ 2 ] Shen C M, Liu K B, Tang L Y, Overpeck J T. Quantitative relationships between modern pollen rain and climate in the Tibetan Plateau. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2006, 140(1/2): 61-77.
- [ 3 ] Wei H C, Ma H Z, Zheng Z, Pan A D, Huang K Y. Modern pollen assemblages of surface samples and their relationships to vegetation and climate in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2011, 163(3/4): 237-246.
- [ 4 ] Han D X, Gao C Y, Li Y H, Liu H X, Cong J X, Yu X F, Wang G P. Potential in paleoclimate reconstruction of modern pollen assemblages from natural and human-induced vegetation along the Heilongjiang River basin, NE China. *Science of the Total Environment*, 2020, 745: 141121.
- [ 5 ] Cao X Y, Tian F, Li K, Ni J, Yu X S, Liu L N, Wang N N. Lake surface sediment pollen dataset for the alpine meadow vegetation type from the eastern Tibetan Plateau and its potential in past climate reconstructions. *Earth System Science Data*, 2021, 13(7): 3525-3537.
- [ 6 ] Zhao Y J, Li Y C, Zhang Z, Fan B S, Zhu Y C, Zhao H M. Relationship between modern pollen assemblages and vegetation in the Bashang typical steppe region of North China. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108581.
- [ 7 ] 舒军武, 王希琴, 秦际威, 王伟铭. 浙江宁波天童山国家森林公园表土花粉初步分析. *微体古生物学报*, 2010, 27(3): 253-262.
- [ 8 ] 袁储君, 马春梅, 李峰, 孙珏, 黄振辉, 孙佳. 巢湖地区现代花粉-植被-人类活动关系研究. *生态科学*, 2022, 41(3): 1-15.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 肖霞云, 童松梅, 沈吉, 王苏民, 羊向东, 童国榜. 云南省玉龙雪山表土花粉垂直散布与植被关系研究. *第四纪研究*, 2009, 29(1): 80-88.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 陈海燕, 徐德宇, 廖梦娜, 李凯, 倪健, 曹现勇, 程波, 郝秀东, 孔昭宸, 李升峰, 李小强, 刘光琇, 刘平妹, 刘兴起, 孙湘君, 唐领余, 魏海成, 许清海, 阎顺, 羊向东, 杨振京, 于革, 张芸, 张志勇, 赵克良, 郑卓, Ulrike HERZSCHUH. 中国现代花粉数据集. *植物生态学报*, 2021, 45(7): 799-808.
- [ 13 ] 李春海, 童国榜, 沈吉, 王苏民, 羊向东, 刘志明. 云南丽江-大理地区现代表土花粉垂直分布特征. *古生物学报*, 2008, 47(2): 168-175.
- [ 14 ] 汪啟容, 蒋勇军, 郝秀东, 马丽娜, 张彩云, 秦琳娟, 郑咏, 邱华. 重庆中梁山岩溶槽谷区表土孢粉与现代植被的关系研究. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 466-475.
- [ 15 ] Davis M B. On the theory of pollen analysis. *American Journal of Science*, 1963, 261(10): 897-912.
- [ 16 ] 郑卓, 黄康有, 许清海, 吕厚远, Rachid Cheddadi, 罗运利, Celia Beaudouin, 罗传秀, 郑艳伟, 李春海, 魏金辉, 杜春彬. 中国表土花粉与建群植物地理分布的气候指示性对比. *中国科学: D 辑*, 2008(6): 701-714.
- [ 17 ] 倪健. 孢粉生物群区化与古植被定量重建. *第四纪研究*, 2013, 33(6): 1091-1100.
- [ 18 ] Li Q, Ge Q S, Tong G B. Modern pollen-vegetation relationship based on discriminant analysis across an altitudinal transect on Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(35): 4600-4608.
- [ 19 ] Fang Y M, Bunting M J, Ma C M, Yang X P. Are modern pollen assemblages from soils and mosses the same? A comparison of natural pollen traps

- from subtropical China. *Catena*, 2022, 209: 105790.
- [20] Lu H Y, Wu N, Liu K, Zhu L P, Yang X D, Yao T, Wang L, Li Q L, Liu X Q, Shen C M, Li X Q, Tong G, Jiang H. Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30: 947-966.
- [21] Ladd M, Way R G, Viau A E. The impact of using different modern climate data sets in pollen-based paleoclimate reconstructions of North America. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 112: 78-85.
- [22] Overpeck J T, Webb T III, Prentice I C. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra; dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quaternary Research*, 1985, 23(1): 87-108.
- [23] Cao X Y, Herzsuh U, Telford R J, Ni J. A modern pollen-climate dataset from China and Mongolia: Assessing its potential for climate reconstruction. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2014, 211: 87-96.
- [24] Qin F. Modern pollen assemblages of the surface lake sediments from the steppe and desert zones of the Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(3): 425-439.
- [25] 杨一光. 衡山的植物区系和森林植被. *湖南师范大学自然科学学报*, 1984(1): 100-109.
- [26] Faegri K, Kaland P E, Krzywinski K. *Textbook of Pollen Analysis*. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1989: 1-328.
- [27] 王伏雄. 中国植物花粉形态. 2 版. 北京: 科学出版社, 1995: 1-461.
- [28] 唐领余. 中国第四纪孢粉图鉴. 北京: 科学出版社, 2017: 1-620.
- [29] 崔晓临, 程贇, 张露, 卫晓庆. 基于 DEM 修正的 MODIS 地表温度产品空间插值. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1768-1776.
- [30] 孙安健. 美国山地降水量垂直分布的研究. *地理研究*, 1989, 8(1): 32-39.
- [31] 阎育华, 赖洪年. 利用降水平均递增率求山地最大降水高度. *地理研究*, 1987, 6(1): 62-67.
- [32] 黄洲康. 旅游对南岳衡山生态环境的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009: 1-58
- [33] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 田连恕, 张建明. 自然地理学. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [34] 游松财, 李军. 海拔误差影响气温空间插值误差的研究. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 140-144.
- [35] Ter Braak C J F, Smlauer 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.
- [36] Ter Braak C J F, Prentice I C. A theory of gradient analysis//*Advances in Ecological Research Volume 18*. Amsterdam: Elsevier, 1988: 271-317.
- [37] Roy I, Ranhotra P S, Shekhar M, Bhattacharyya A, Ghosh R, Sharma Y K. Modern pollen-vegetation relationships along the vegetation gradient in the bhagirathi valley, western Himalaya, India. *Journal of the Geological Society of India*, 2021, 97(6): 571-578.
- [38] Zhang N, Ge Y W, Li Y C, Li B, Zhang R C, Zhang Z, Fan B S, Zhang W S, Ding G Q. Modern pollen-vegetation relationships in the Taihang Mountains: towards the quantitative reconstruction of land-cover changes in the North China Plain. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107928.
- [39] Li Y Y, Zhang X S, Zhou G S. Quantitative relationships between vegetation and several pollen taxa in surface soil from North China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(16): 1519-1523.
- [40] 童国榜, 羊向东, 刘志明, 王苏民, 赵鸿光. 云南玉龙山地区的表土花粉散布特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 103-107.
- [41] Cañellas-Boltà N, Rull V, Vigo J, Mercadé A. Modern pollen—vegetation relationships along an altitudinal transect in the central Pyrenees (southwestern Europe). *The Holocene*, 2009, 19(8): 1185-1200.
- [42] Webb T, Howe S E, Bradshaw R H W, Heide K M. Estimating plant abundances from pollen percentages: The use of regression analysis. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1981, 34(3/4): 269-300.
- [43] 李圆圆, 马春梅, 方伊曼, 崔安宁. 江西南昌西山地区表土孢粉与植被关系研究. *微体古生物学报*, 2016, 33(2): 138-151.
- [44] 郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友, 魏兴萍. 重庆喀斯特地区现代花粉组合与植被的关系. *生态学报*, 2020, 40(15): 5266-5276.
- [45] 杨振京, 许清海, 孟令尧, 阳小兰, 王开发. 燕山地区表土花粉与植被间的数量关系. *植物生态学报*, 2003, 27(6): 804-809.
- [46] 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.
- [47] 汤庚国, 向其柏. 樟科植物花粉形态研究. *植物分类学报*, 1995, 33(2): 161-170.
- [48] 舒军武, 王伟铭, 王爱根. 江苏宜兴龙池山现代植被表土孢粉的初步研究. *古生物学报*, 2007, 46(3): 340-346.
- [49] Wang Q, Li J F, Lu K Q, Xie G, Qin F, Ferguson D K, Wang G H, Yao Y F, Wang Y F. Pollen R-values in arid central Asia for quantitative Palaeo-vegetation reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 596: 110993.
- [50] Bush M B. On the interpretation of fossil Poaceae pollen in the lowland humid neotropics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 177(1/2): 5-17.
- [51] Luo C X, Jiang C C, Yang M X, Chen M H, Xiang R, Zhang L L, Liu J G, Pan A D. Transportation modes of pollen in surface waters in the South China Sea and their environmental significance. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2016, 225: 95-105.
- [52] 李月丛, 许清海, 阳小兰, 郑振华. 中国草原区主要群落类型花粉组合特征. *生态学报*, 2005, 25(3): 555-564.

- [53] 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.
- [54] 刘会平, 唐晓春, 王开发, 潘安定. 神农架北坡表土常见花粉的 R 值研究. *地理科学*, 2001, 21(4): 378-380.
- [55] Zhao Y T, Miao Y F, Fang Y M, Li Y, Lei Y, Chen X M, Dong W M, An C B. Investigation of factors affecting surface pollen assemblages in the Balikun Basin, central Asia: Implications for Palaeoenvironmental reconstructions. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107332.
- [56] 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.
- [57] Zhang R, Tian F, Xu Q H, Zhou X, Liu X Q, Cao X Y. Representation of modern pollen assemblage to vertical variations of vegetation and climate in the Yadong area, eastern Himalaya. *Quaternary International*, 2020, 536: 45-51.
- [58] El-Moslimany A P. Ecological significance of common nonaraboreal pollen: examples from drylands of the Middle East. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1990, 64(1/2/3/4): 343-350.
- [59] Herzschuh U. Reliability of pollen ratios for environmental reconstructions on the Tibetan Plateau. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(7): 1265-1273.
- [60] 王秀梅, 程波, 万金红. 宜昌大老岭表土孢粉组合与植被及环境因子的关系分析. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2023, 57(3): 412-422.
- [61] Liu X S, Nie Y Q, Wen F. Seasonal dynamics of stem radial increment of *Pinus taiwanensis* Hayata and its response to environmental factors in the Lushan Mountains, southeastern China. *Forests*, 2018, 9(7): 387.
- [62] Gu H L, Wang J, Ma L J, Shang Z Y, Zhang Q P. Insights into the BRT (boosted regression trees) method in the study of the climate-growth relationship of Masson pine in subtropical China. *Forests*, 2019, 10(3): 228.
- [63] 于永福. 杉科植物的起源、演化及其分布. *植物分类学报*, 1995, 33(4): 362-389.