



福建琅岐岛表土孢粉与植硅体组合对农业活动的指示

刘 茜, 曾剑威, 王继龙, 戴 璐, 于俊杰

Pollen and phytolith assemblages in topsoil as indicators of agricultural activities in Langqi Island, Fujian Province

LIU Qian, ZENG Jianwei, WANG Jilong, DAI Lu, and YU Junjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022123101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[全新世以来福建宁德地区环境演变及人类活动的孢粉记录](#)

Palynological evidence for palaeoenvironmental change and human activity in Ningde of Fujian Province during Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 170-181

[渤海西部海域晚更新世以来的孢粉组合及古环境变化](#)

Pollen spore assemblages and induced palaeoenvironmental changes in the western Bohai Sea since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 115-128

[2.5 Ma以来中国陆地孢粉记录反映的古气候变化](#)

Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: Evidence from fossil pollen records

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 175-191

[云南新生代孢粉组合与气候环境演变](#)

Cenozoic palynological assemblages and their relations with climate-environment evolution in Yunnan

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 164-176

[琼东南盆地新生代孢粉组合及其古气候意义](#)

NEOGENE PALYNOLOGICAL ASSEMBLAGES FROM QIONGDONGNAN BASIN AND THEIR PALEOCLIMATIC IMPLICATIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 93-101

[西沙群岛东岛湖泊沉积记录的近1 000年来热带降雨与人类活动历史](#)

Tropical rainfall variations and human activities of last 1 000 years recorded by lake deposits on the Dongdao Island, Xisha Islands

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 182-192



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘茜, 曾剑威, 王继龙, 等. 福建琅岐岛表土孢粉与植硅体组合对农业活动的指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 55-66.
LIU Qian, ZENG Jianwei, WANG Jilong, et al. Pollen and phytolith assemblages in topsoil as indicators of agricultural activities in Langqi Island, Fujian Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 55-66.

福建琅岐岛表土孢粉与植硅体组合对农业活动的指示

刘茜^{1,2}, 曾剑威³, 王继龙³, 戴璐^{1,2}, 于俊杰³

1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211
2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016

摘要: 孢粉和植硅体是重建古人类农业景观及环境变化的重要指标, 明确它们在表土中的分布规律及其与现代植被组成之间的关系对于精确解释化石孢粉和植硅体数据具有重要的意义。本研究对福建琅岐岛3种土地利用类型的22个表土样品进行了孢粉与植硅体分析, 基于地理信息系统和遥感技术, 展示了不同类型孢粉百分比的空间分布及其与植被覆盖度间的数量对应关系。孢粉分析表明, 以松属 (*Pinus*) 为代表的外来花粉普遍存在于表土样品中, 这削弱了采样点周围植物的孢粉表现力, 导致了果园和农田植被组成与表土孢粉组合间的巨大差异。与此同时, 农业收割活动进一步降低了农田植物的花粉表现力。从遥感影像中提取的植被覆盖度数据仅与荒地上的木本植物花粉含量存在较强的相关性 ($R^2=0.7764$), 这显示茂密的草本植物降低了外来木本花粉的相对含量, 证明了该植被类型具有良好的孢粉表现力。植硅体分析表明, 表土样品含有丰富的竹亚科 (*Bambusoideae*)、水稻 (*Oryza sativa*) 和杂草的植硅体。与孢粉指标相比, 植硅体提供了更丰富的草本植物信息。

关键词: 孢粉; 植硅体; 农业活动; 表土; 琅岐岛

中图分类号: P532 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022123101

Pollen and phytolith assemblages in topsoil as indicators of agricultural activities in Langqi Island, Fujian Province

LIU Qian^{1,2}, ZENG Jianwei³, WANG Jilong³, DAI Lu^{1,2}, YU Junjie³

1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China
2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China
3. Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

Abstract: Pollen and phytolith are valuable proxies for reconstructing ancient agricultural landscapes and environmental changes. Understanding their distribution patterns in the topsoil and their relationship with vegetation composition is vital for accurately interpreting fossil pollen and phytolith data. We analyzed pollen and phytolith data from 22 topsoil samples representative of three land-use types in Langqi Island, Fujian Province. We presented the spatial distributions of different pollen taxa and their quantitative relationship with fractional vegetation cover (FVC) based on geographic information system and remote sensing techniques. Pollen analysis revealed that *Pinus* pollen, as an exotic species, were pervasive in the samples, which diluted the representation of local components, and generated obvious bias between pollen assemblages and vegetation composition of local agricultural lands. Furthermore, agricultural harvesting decreased the pollen representation of cultivated plants. The FVC extracted from remote sensing images is linearly correlated with the abundance of arboreal pollen in the uncultivated land ($R^2=0.7764$), implying that dense herbs on the uncultivated land decreased the share of exotic arboreal pollen, and confirming excellent pollen representation of this vegetation type. Phytolith analysis indicated that numerous phytoliths occurred in the samples, such as *Bambusoideae*, *Oryza sativa*, and weeds; they provided more detailed information on non-arboreal plants than pollen proxy.

Key words: pollen; phytolith; agriculture activity; surface soil; Langqi Island

近年来, 基于孢粉的古植被重建方法逐渐由定性转向定量, 例如利用多场景法^[1]和类比法重建过去的植被格局^[2]、利用花粉相对产量估算重建过去

的植被群落^[3]等。从全新世考古学角度来看, 探索基于孢粉和植硅体指标的古植被定量、半定量重建新方法对揭示古人类农业景观格局具有重要意义^[4-5]。

资助项目: 中国地质调查局南京地质调查中心项目“长江下游及东南沿海生态地质调查”(DD20221778)

作者简介: 刘茜(1999—), 女, 硕士研究生, 海岸海洋地理学专业, E-mail: 1596658360@qq.com

通讯作者: 戴璐(1981—), 男, 副教授, 研究方向为第四纪孢粉学, E-mail: dailu2288@163.com

于俊杰(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为海岸带与第四纪地质学, E-mail: 25320701@qq.com

收稿日期: 2022-12-31; 改回日期: 2023-03-10. 文凤英编辑

中国拥有悠久的历史文明和大量的考古遗址,但此类研究仍然非常稀少。

相较于孢粉指标,植硅体对于一些单子叶草本植物的鉴定分辨率更高,被广泛用于考古和古气候重建等研究领域。禾本科(Poaceae)植硅体可被鉴定到亚科、族、属甚至种一级^[6-10],并可以较好地分辨出水稻(*Oryza sativa*)、麦类等农作物^[6-7,11-13]。在低纬度地区,植硅体也被视为重要的古环境代用指标。例如,热带非洲的木本植硅体与禾本科短细胞植硅体的比值可以较好地指示当地植被的开放度^[14-16]。

本文试图通过植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)与花粉百分比数据的相关分析,定量地揭示福州琅岐岛上不同土地利用类型孢粉组合与植被间的关系。同时,我们进行了植硅体分析,探

讨了植硅体与孢粉在指示农业景观格局方面的互补性。本研究将为中国东南沿海地区的第四纪古环境重建工作提供支撑。

1 研究区概况

琅岐岛位于福建省福州市马尾区琅岐镇,地理位置为 $26.060^{\circ}\sim 26.132^{\circ}\text{N}$ 、 $119.538^{\circ}\sim 119.652^{\circ}\text{E}$,位于闽江入海口,三面环江,东临东海,属于冲积小平原海岛^[17]。该区域为中亚热带季风气候,年平均气温 $19\sim 20^{\circ}\text{C}$,岛上以农业种植为主,森林覆盖率低(图1)。

在福建省植被分区中,琅岐岛属于南亚热带雨林植被带-闽粤沿海丘陵平原南亚热带雨林区-闽江

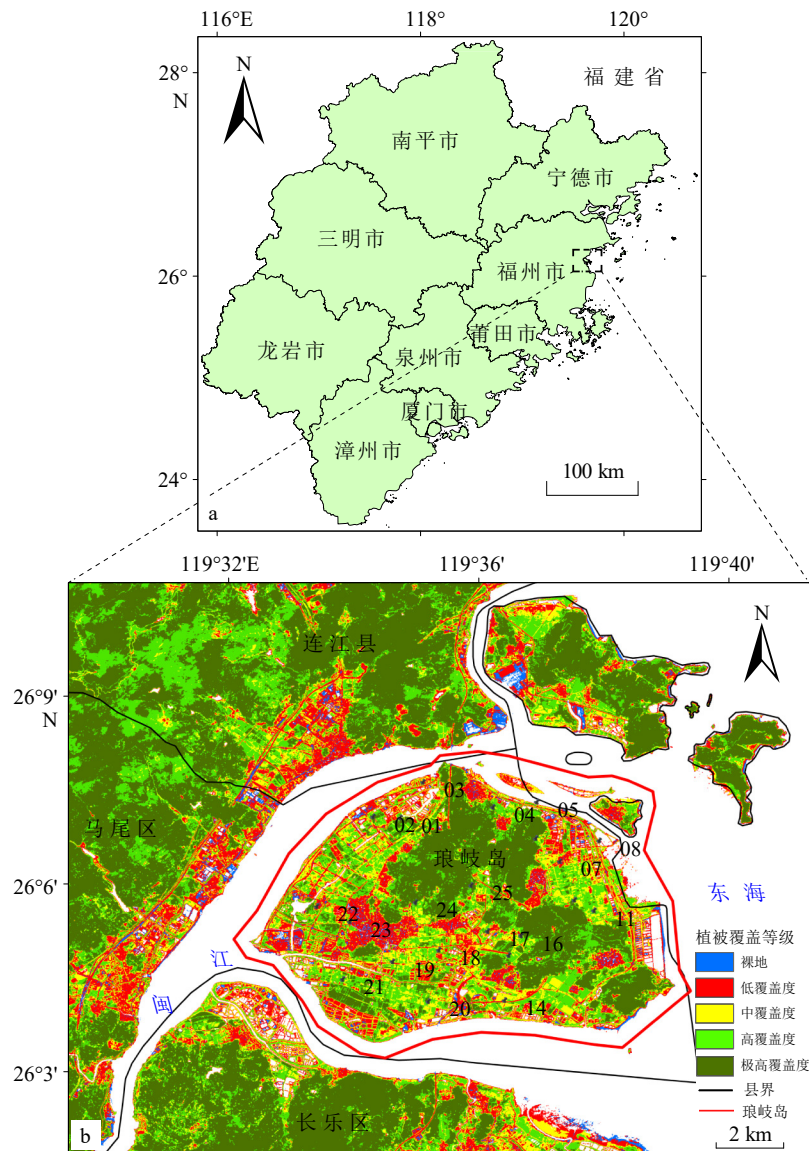


图1 福建琅岐岛地理位置(a)及植被覆盖度(b)

Fig.1 Location of Langqi Island, Fujian Province (a) and the FVC classification (b)

口鹭峰山南部潮暖亚热带雨林小区。主要树种有米槠(*Castanopsis carlesii*)、红勾栲(*Castanopsis lamontii*)、杜英(*Elaeocarpus decipiens*)、鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)等。目前,大部分土地为农业种植区,原生植被罕见(图1b)。在常绿阔叶林被砍伐破坏后,一般首先出现由芒萁(*Dicranopteris* spp.)构成的单优势种群落,其间混生五节芒(*Miscanthus floridulus*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、山乌柏(*Sapium discolor*)、九节木(*Psychotria rubra*)、梅叶冬青(*Ilex asprella*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa*)、白栎(*Quercus fabri*)等;在干燥处出现由芒萁、桃金娘、鹧鸪草(*Eriachne pallescens*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)等组成的旱生稀草丛。同时,琅岐岛位于滨海风沙区,分布着大面积的人工木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)林^[18]。

本区人工植被分为农作物、果园和经济林。栽培作物以水稻、大麦(*Hordeum vulgare*)、小麦(*Triticum aestivum*)、甘薯(*Dioscorea esculenta*)、花生(*Arachis hypogaea*)、甘蔗(*Saccharum officinarum*)、春大豆(*Glycine max*)、黄红麻(*Hibiscus cannabinus*)、冬烤烟(*Nicotiana tabacum*)为主,蔬菜栽培种类有花椰菜(*Brassica oleracea*)、甘蓝菜、白菜(*Brassica pekinensis*)、豌豆(*Pisum sativum*)、葱(*Allium fistulosum*)、蒜(*Allium sativum*)、韭菜(*Allium tuberosum*)、空心菜(*Ipomoea aquatica*)、芥菜(*Brassica juncea*)等;常绿性果园树种主要由龙眼(*Dimocarpus longan*)、杨桃(*Averrhoa carambola*)、香蕉(*Musa nana*)、柑橘(*Citrus reticulata*)、杨梅(*Myrica rubra*)、葡萄(*Vitis vinifera*)等组成;经济林树种大多属于山茶科(Theaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、樟科(Lauraceae)、桃金娘科(Myrtaceae)、棕榈科(Arecaceae)、胡桃科(Juglandaceae)、芸香科(Rutaceae)、桑科(Moraceae)等^[18]。

2 研究方法

2.1 样品采集

为了揭示人类不同种植活动下的孢粉和植硅

体组合特征及其与周围植被的关系,我们在福建琅岐岛上采集了22个表土样品,这些样品分布于9个人工林和果园以及7个荒地和6个农田(图1)。其中,孢粉样品采集自苔藓,植硅体样品取自苔藓和表层土壤(0~0.3 m)。与此同时,还记录了各采样点周边的植物种类(表1)。

2.2 实验方法

孢粉提取步骤:取10~20 g苔藓样品,加入适量的一定浓度的氢氧化钾试剂处理,以去除样品中的有机杂质;待充分反应后,用纯水洗至中性;用60目的分样筛过滤样品,去除样品中大于250 μm的杂质,然后在超声波振荡器中用7 μm的尼龙滤布过筛,离心沉淀富集到小试管中。

植硅体提取步骤:称取7 g干燥样品,加入浓硝酸,水浴加热(80℃, 3 h),盖上锡箔纸,静置一天;将反应完全的样品用纯水离心清洗至中性,加入30%的双氧水,水浴加热(60℃, 1~2 h),静置待反应完全,用纯水离心清洗;用密度为2.385的重液(HI+KI+Zn)浮选,离心后收集上层液体;纯水离心清洗4次去除残余重液,富集植硅体至小试管中。植硅体样品通过加拿大树胶固定在载玻片上,用于显微镜观察。

孢粉、植硅体鉴定统计工作在宁波大学孢粉实验室进行。使用光学显微镜放大400至1000倍对孢粉进行鉴定,每个孢粉样品统计200粒花粉(不包含蕨类孢子、藻类)。孢粉鉴定参考《中国植物花粉形态》^[19]、《中国第四纪孢粉图鉴》^[20]和《中国热带亚热带被子植物花粉形态》^[21]。木本、草本花粉百分比以总花粉数为基数,蕨类孢子、藻类以总孢粉数为基数进行计算。使用光学显微镜放大1000倍对植硅体形态进行观察,每个样品统计200粒(不包含海绵骨针和硅藻)。本研究采用International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0^[22]和《植物硅酸体的研究与应用》^[12]的分类标准对植硅体进行分类和命名,使用Tilia软件建立孢粉和植硅体百分比图谱。

2.3 植被覆盖度的提取

植被覆盖度的提取是基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台,利用Sentinel-2卫星数据(空间分辨率10 m×10 m)作为数据源,进行裁剪、去云处理。根据福建省植物生长时间^[23],计算4—11月归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)均值作为NDVI年平均值,

表1 采样点位置与周边植物以及植被覆盖度
Table 1 Location of samples, surrounding plants, and FVC

编号	采样点	土地利用类型	位置	海拔/m	主要植物种类	植被覆盖度
FJLQ01	棕榈林地1	人工林、果园	26.1158°N、119.5803°E	4	棕榈、桉树	0.502 961
FJLQ02	厚皮菜地	农田	26.1161°N、119.5731°E	4	枇杷、樟科、厚皮菜、莴笋、芭蕉、禾本科杂草	0.529 258
FJLQ03	干涸鱼塘	荒地	26.1253°N、119.5864°E	3	芭蕉、禾本科杂草	0.065 274
FJLQ04	白菜菜地1	农田	26.1186°N、119.605°E	5	桉树、白菜、橙子	0.543 917
FJLQ05	荒地	荒地	26.12°N、119.6167°E	2	禾本科、菊科野草	0.357 109
FJLQ06	龙眼果园	人工林、果园	26.1103°N、119.6164°E	8	龙眼、枫香属、棕榈、禾本科野草	0.491 367
FJLQ07	水稻田	农田	26.1042°N、119.6228°E	5	水稻、桉树	0.613 628
FJLQ08	芦苇荡	荒地	26.1097°N、119.6333°E	3	芦苇、禾本科杂草	0.518 772
FJLQ10	弃耕水稻田	荒地	26.0939°N、119.6267°E	4	水稻、禾本科杂草	0.469 033
FJLQ11	花椰菜地1	农田	26.0911°N、119.6319°E	4	花椰菜、禾本科杂草	0.491 376
FJLQ14	棕榈林地2	人工林、果园	26.0672°N、119.6081°E	5	菊科藜科野草、棕榈科刺葵林、雅榕林	0.732 174
FJLQ15	白菜菜地2	农田	26.0792°N、119.6092°E	3	白菜、红薯、豌豆	0.460 017
FJLQ16	枣树果园	人工林、果园	26.0844°N、119.6125°E	4	枣树、橘子	0.475 803
FJLQ17	撂荒地1	荒地	26.0856°N、119.6036°E	6	禾本科、菊科、蒿属野草	0.617 381
FJLQ18	撂荒地2	荒地	26.0806°N、119.5906°E	4	栎属、鹅耳枥属、禾本科、菊科、芭蕉、旋花科	0.547 991
FJLQ19	无花果果园	人工林、果园	26.0775°N、119.5783°E	3	无花果、柚子树、甘蔗、杨桃	0.427 494
FJLQ20	桔树林	人工林、果园	26.0669°N、119.5878°E	4	桔树、枫香林、菊科、禾本科、蕨类植物	0.696 931
FJLQ21	大花田菁林地	人工林、果园	26.0728°N、119.565°E	3	大花田菁、蓝花楹、香桃木、芭蕉、柳树	0.569 948
FJLQ22	撂荒地3	荒地	26.0922°N、119.5581°E	3	菊科、禾本科、乌桕、芦苇、白菜、红薯	0.511 86
FJLQ23	橘子、火龙果果园	人工林、果园	26.0881°N、119.5669°E	10	火龙果、橘子、豌豆、芭蕉、红薯、甘蔗	0.580 022
FJLQ24	橘子果园	人工林、果园	26.0933°N、119.5844°E	10	橘子、芋头、花椰菜、芭蕉、桉树、木麻黄	0.381 408
FJLQ25	花椰菜地2	农田	26.0978°N、119.5992°E	3	花椰菜、芭蕉、榕树、台湾相思树	0.609 647

并利用像元二分模型估算出年平均植被覆盖度。最后使用 Arcgis 软件计算出 2019—2021 年植被覆盖度的平均值,并将 FVC 值提取至采样点(表 1)。本研究依据《土壤侵蚀分类分级标准》^[24],将研究区植被覆盖度(F_C)分为 5 个等级^[25]: $F_C=0$ 为裸地, $F_C=(0, 0.25]$ 为低覆盖度, $F_C=(0.25, 0.5]$ 为中覆盖度, $F_C=(0.5, 0.75]$ 为高覆盖度, $F_C=(0.75, 1]$ 为极高覆盖度(图 1b)。

3 结果

3.1 表土孢粉组合特征

样品中鉴定出 69 个科或属的孢粉(图 2)。草本植物花粉含量较高(56%),其中的禾本科花粉平

均含量达 40%。木本植物花粉以松属(*Pinus*)为主导(24%),类型丰富的热带、亚热带阔叶花粉平均含量为 18%,而热带、亚热带针叶花粉(0.1%)和温带阔叶花粉(2%)的含量比较低。蕨类孢子平均含量达 25%,主要有芒萁属、水龙骨科(*Polypodiaceae*)等。少量的藻类(1.81%)可分为淡水藻和沟鞭藻(咸水),前者包括环纹藻属(*Concentricystis*)、双星藻属(*Zygnema*)、水网藻科(*Hydrodictyaceae*)等,后者主要是刺甲藻科(*Spiniferitaceae*)等。

人工林和果园中,木本植物花粉含量较高,平均含量为 44%,主要由松属(23%)、枫香树属(*Liquidambar*)(4%)、棕榈科(3%)、栎属(常绿类)(3%)、木麻黄科(*Casuarinaceae*)(1%)、无患子科(*Sapindaceae*)(1%)、桃金娘科(1%)组成。草本植物花粉含量略高于木本,平均为 56%,禾本科植物

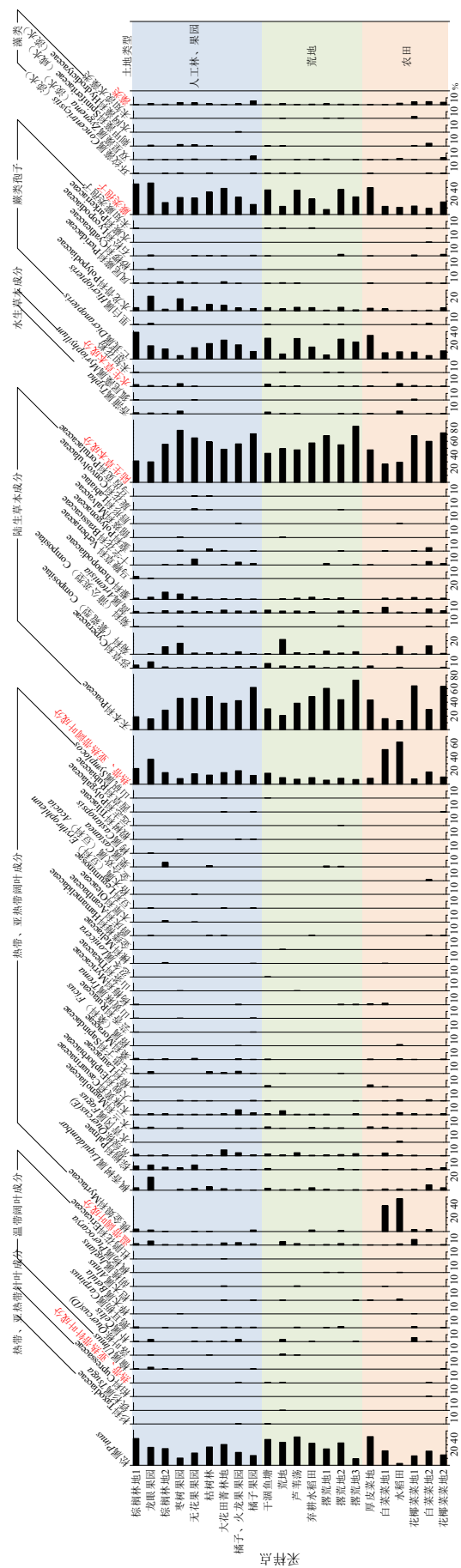


图 2 福建琅岐岛表土孢粉含量
Fig.2 Pollen percentage of surface samples in Langqi Island, Fujian Province

花粉占绝对优势(38%),菊科(Compositae, 紫菀型)(4%)、藜科(Chenopodiaceae)(3%)、蒿属(*Artemisia*)(3%)、莎草科(Cyperaceae)(3%)也较为常见。相较于另外两种土地利用类型,蕨类孢子含量更高(30%),主要为芒萁属(19.5%)和水龙骨科(9%)。

荒地中,木本植物花粉平均含量相较人工林和果园低(41% vs. 44%),主要由于热带、亚热带阔叶花粉含量低(9%)。草本植物花粉含量仅次于农田(58%),主要为禾本科(45%)、菊科(紫菀型)(5%)、蒿属(3%)、莎草科(3%)。蕨类孢子(25%)和藻类(0.9%)含量相对人工林(包括果园)较低,且不同采样点之间蕨类孢子含量相差较大(7.3%~36.8%)。

农田中,白菜地1与水稻田采样点的木本花粉含量较高(73%和67%),原因在于异常丰富的桃金娘科花粉(图2)。除去上述两个采样点外,其木本花粉(37%)和蕨类孢子(20%)平均含量为3种土地类型中最低,而草本花粉含量则是最高(63%),主要原因是禾本科花粉较为丰富(50%)。藻类含量相较人工林(包括果园)和荒地明显增加,主要为咸水藻中的刺甲藻(1.5%)以及淡水藻中的双星藻(1%)。

3.2 表土植硅体组合特征

表土植硅体可划分为19个类型(图3)。植硅体组合以不具有形态鉴定意义的块状(39%)和光滑

拉长型(34%)为主;具有形态鉴定意义的类型主要是禾本科短细胞植硅体和楔型泡状细胞(扇型植硅体)(两者总含量平均为11%),零星出现的类型包括指示莎草科的硅质突起(0.1%)、指示棕榈科的刺球型植硅体(0.7%)以及海绵骨针(4%)和硅藻(3%)(图4)。

禾本科特有植硅体包括树突拉长型(6%)、扇型(5%)、鞍型(2%)、帽型(2%)、双裂片型(2%)、十字型(0.2%)、圆齿边型(0.1%)、多裂片型(0.1%)(表2)^[22,26]。本研究使用OPLINIC Pro软件对扇型(扇长、扇宽、柄长、柄宽)、鞍型(长、宽、高)、双裂片型(铃长、柄长)植硅体的相关参数进行了测量,结合对植硅体形态、纹饰的观察,鉴定了禾本科中的6个亚科(表2)。具形态诊断特征的水稻植硅体包括产于叶片的水稻扇型,产于稃壳的双峰型,产于叶、茎的并排哑铃型^[27],本研究观察到了水稻扇型和并排哑铃型。麦类植硅体主要是源于长细胞植硅体的树突拉长型^[11](图5)。

4 讨论

4.1 表土孢粉组合与周边植被的关系

以松属为主导的孢粉组合与周边植被不存在

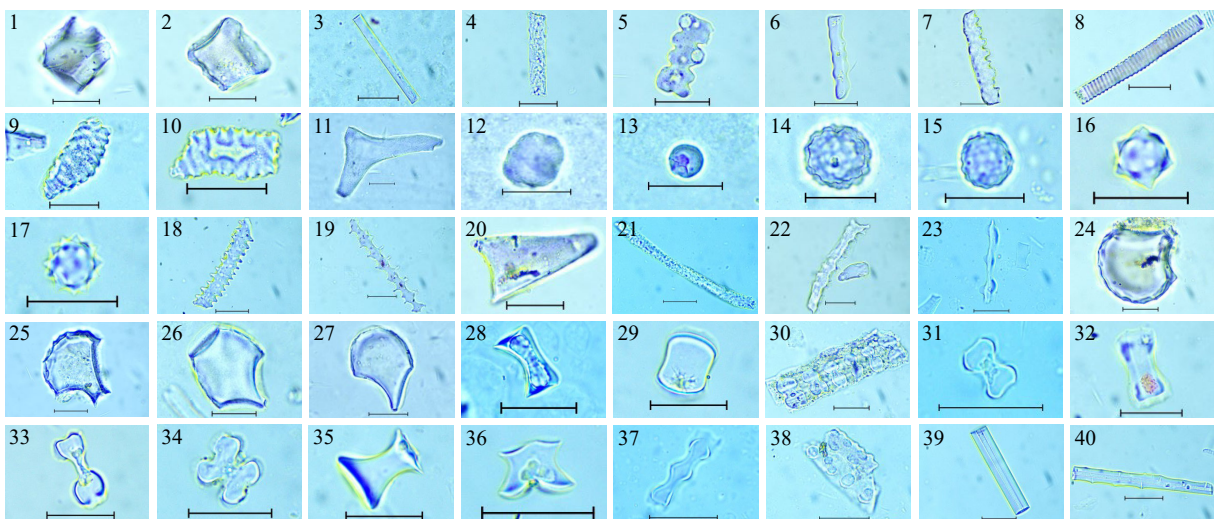


图3 福建琅岐岛表土植硅体形态

1-2.块状,3-4.光滑拉长型,5-7.波状拉长型,8-10.维管组织,11.石细胞,12-13.光滑球型,14-15.纹饰球型,16-17.刺球型,18-19.细齿拉长型,20.尖型,21-22.树突拉长型,23.圆齿边型,24-25.水稻扇型,26-27.扇型,28-29.鞍型,30.水稻并排哑铃型,31-33.双裂片型,34.十字型,35-36.帽型,37.多裂片型,38.硅质突起型,39-40.海绵骨针.图中比例尺为20 μm

Fig.3 Images of phytoliths from topsoil in Langqi Island, Fujian Province

1-2:Blocky, 3-4: Elongate entire, 5-7:Elongate sinuate,8-10:Tracheary, 11:Scleireid, 12-13:Spheroid psilate, 14-15:Spheroid ornate, 16-17:Spheroid echinate,18-19:Elongate dentate, 20:Acute bulbosus, 21-22:Elongate dendritic,23:Crenate, 24-25:Rice bulliform, 26-27:Bulliform flabellate, 28-29:Saddle,30:Rice bilobate, 31-33:Bilobate, 34:Cross, 35-36: Tower, 37:Polylobate, 38:Papillate, 39-40:Sponge spicule. Scale bar =20 μm

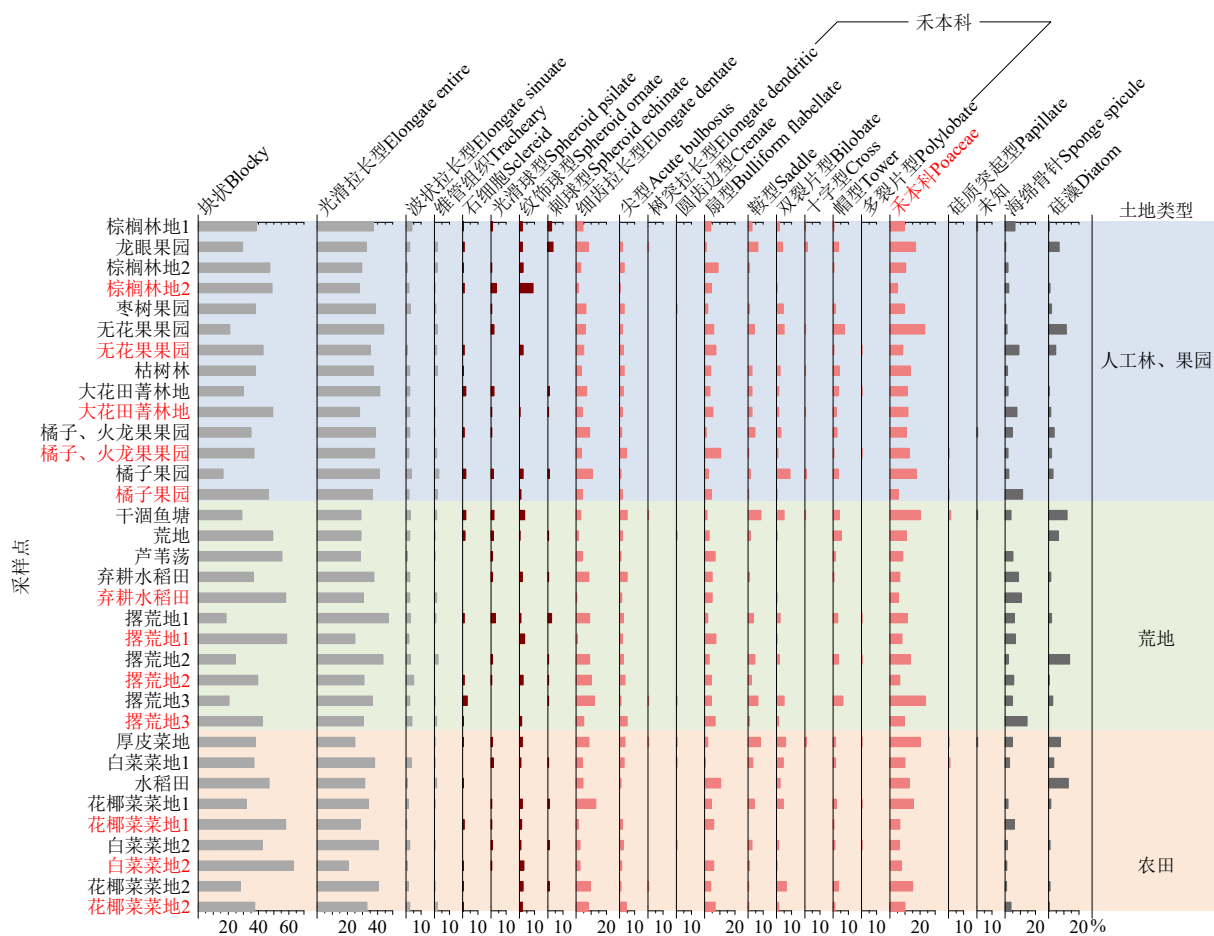


图 4 福建琅岐岛表土植硅体百分比图

图 4 和图 5 中黑色、红色采样点名称分别表示苔藓和土壤样品。

Fig.4 Phytolith percentage of topsoil samples in Langqi Island, Fujian Province

The black and red sample names in Figure 4 and Figure 5 indicate moss and soil samples, respectively.

表 2 禾本科植硅体的分类

Table 2 Classification of Poaceae phytolith

禾本科	特有植硅体类型及划分依据
稻亚科	扇型、双裂片型 ^[12]
竹亚科	扇型、鞍型 ^[12]
早熟禾亚科	帽型、圆齿边型 ^[12,22]
黍亚科、芦竹亚科、画眉草亚科	扇型、鞍型、双裂片型、十字型、多裂片型 ^[12]
水稻	水稻扇型 ^[12-13,28-29] (图3-24,25)、并排哑铃型 ^[12] (图3-30)
麦类	树突拉长型 ^[12,30-32]

数量上的对应关系,因为琅岐岛上并未广泛分布松属植物。草本花粉的数量和种类都非常丰富,例如禾本科的平均含量高达 40%,它们较好地指示了周边荒地和田间地头中的草本植物。然而,低含量的十字花科 (Brassicaceae) 和藜科 (Chenopodiaceae) 花粉没有较好地指示白菜与厚皮菜的种植。果树林

中,大量的龙眼树、橘子树、无花果树和枣树也没有在孢粉组合中得到较好的体现,特别是棕榈林下棕榈科花粉含量仅为 5.5%(图 2)。上述事实表明,十字花科、藜科、无患子科、芸香科、棕榈科等花粉是低表现力的,难以正确指示周围蔬菜、果树、经济林植物的种植规模。三种土地利用类型孢粉含量对比 (图 6a) 和聚类分析 (图 6b) 表明,人工林 (包括果园)、荒地和农田的孢粉组合没有较大的区别,相对明显的差异是蕨类孢子在农田中的含量比较低。

孢粉百分比与周边植被成分间的差异可能反映了两种孢粉传播规律: ① 区域性传播。例如,外来的松属花粉削弱了许多当地种植作物花粉的表现力。② 局部传播。某些类型花粉的传播仅限于周边,例如桃金娘科花粉在两个采样点周边的含量非常高,使得在水稻田中禾本科花粉的百分比并不高 (仅为 13.5%)。这一结果与亚热带和热带地区水稻田禾本科花粉的含量存在巨大差别^[33]。

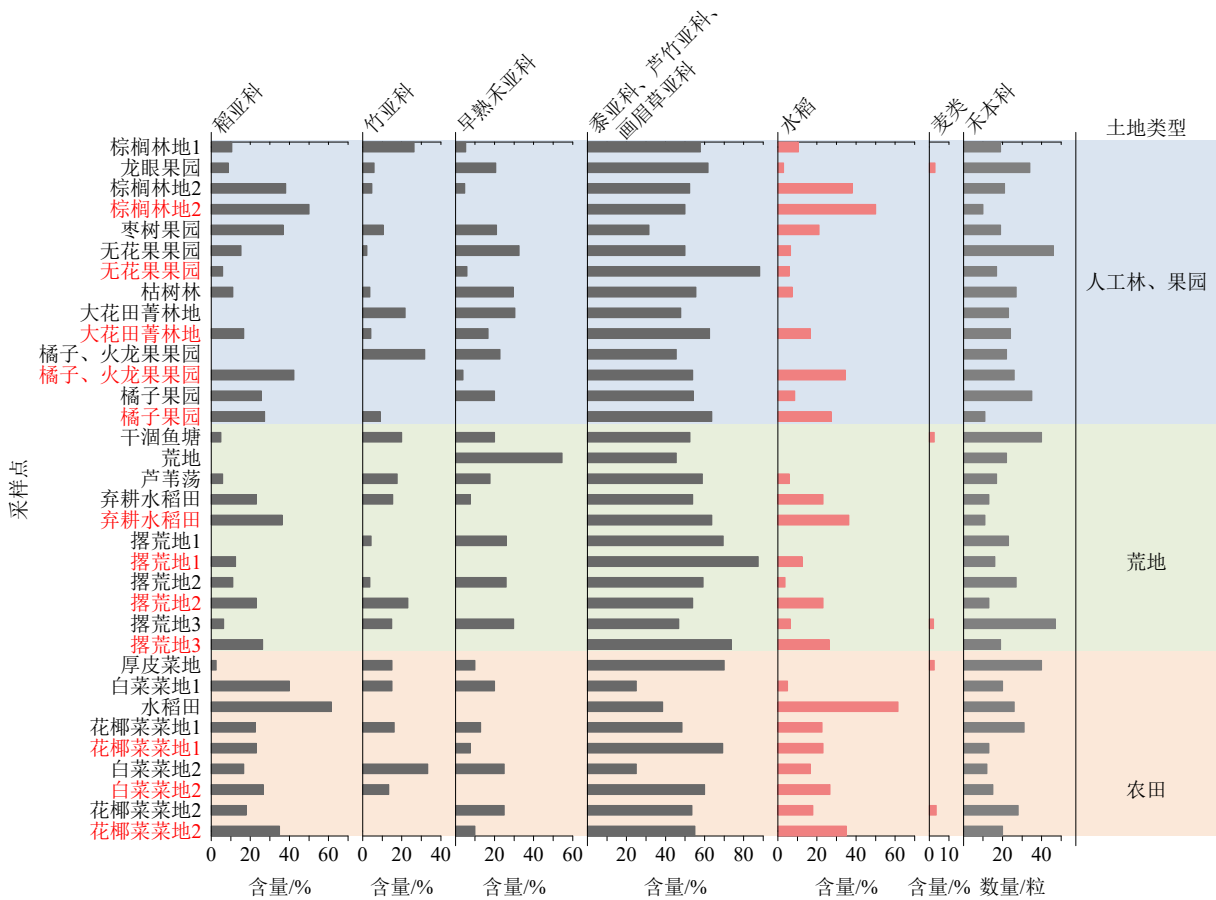


图5 福建琅岐岛不同类型禾本科植硅体百分比

Fig.5 Percentage of different Poaceae phytoliths in Langqi Island, Fujian Province

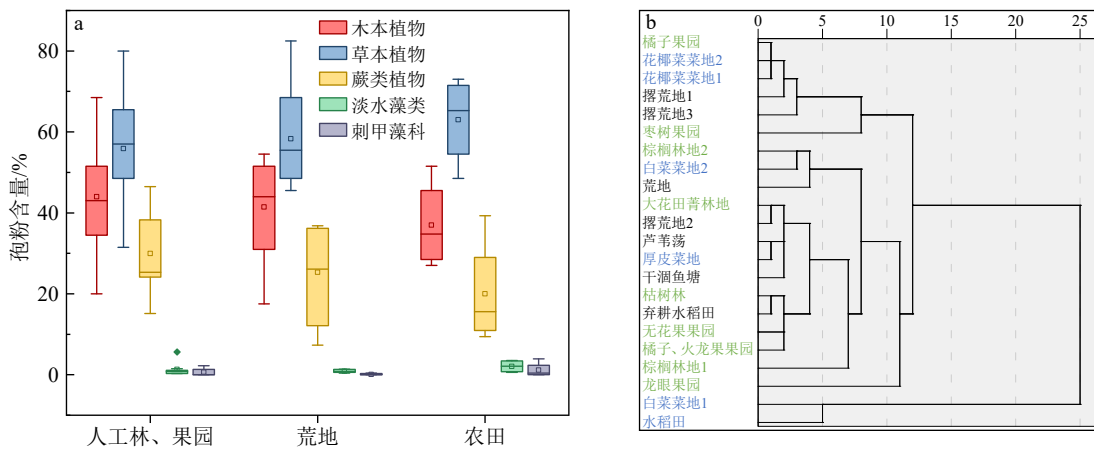


图6 3种土地利用类型孢粉含量对比 (a) 和聚类分析结果 (b)

(a)中农田不包括白菜菜地1与水稻田两个样点; (b)中绿色字体为人工林、果园, 黑色为荒地, 蓝色为农田。

Fig.6 Pollen percentages and standard deviations in three land use types (a) and cluster analysis of pollen percentages (b)

In Fig. 6a, farmland did not include cabbage and rice field samples; In Fig. 6b, the green, black, and blue texts indicate planted forest (and orchards), uncultivated land, and farmland, respectively.

4.1.1 区域尺度上风对花粉传播的影响

琅岐岛上的植被以农作物为主, 缺乏松林。因此, 大量的松属花粉并非来源于本岛。此外, 松属花粉百分比的空间分布展示了其含量在琅岐岛北

部较高(图7a), 与盛行的东北风相吻合(图7c)。结合松属花粉具有产量大、密度小、具双气囊, 更易传播的特点^[34], 我们推测松属花粉在该区域通过空气传播的方式大范围扩散, 强烈影响了琅岐岛的孢

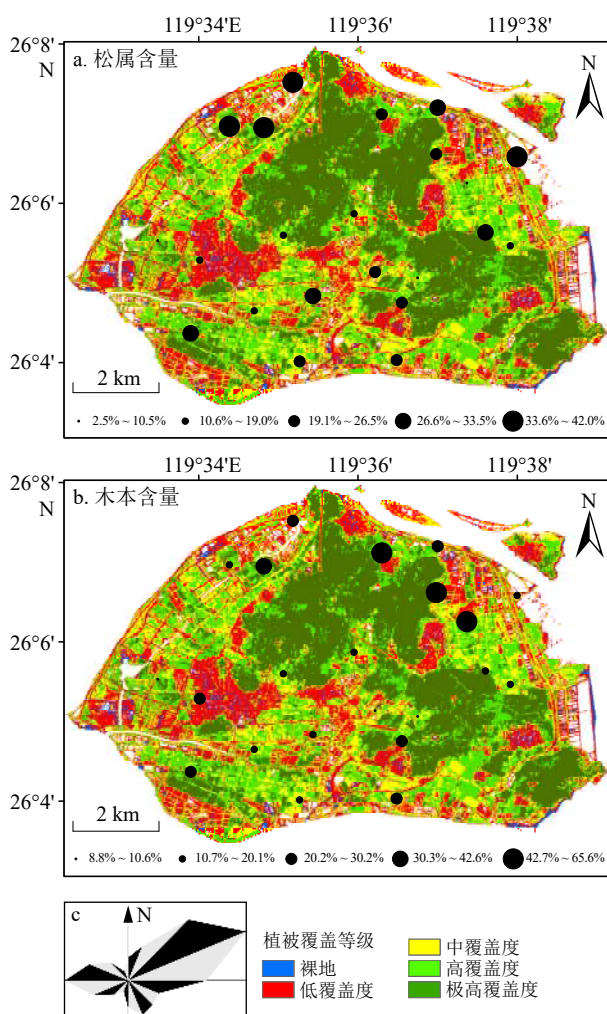


图 7 表土松属花粉 (a) 和不包含松属的木本花粉 (b) 的空间分布

风向玫瑰图(c)是基于年平均值数据,数据来自美国国家气候数据中心。

Fig.7 Spatial distribution of *Pinus* pollen (a) and arboreal pollen excluding *Pinus* (b) in topsoil samples

Figure 7(c) is the wind roses, and data are derived from the National Climatic Data Center of the USA.

粉组合特征,例如弃耕水稻田中大量的松属花粉削弱了禾本科花粉的表现力(图 2)。与之相反,其他木本植物花粉百分比的空间分布不具有明显的规律,说明风对它们的传播不起主导作用(图 7b)。

4.1.2 局部空间尺度上花粉的表现力

木本植物(不含松属)、草本植物、禾本科花粉含量与植被覆盖度之间的相关分析表明,荒地的植被覆盖度与木本花粉存在较强的负相关关系($R^2=0.7764$),与草本、禾本科花粉存在一定的正相关关系(图 8a)。这显示了荒地上高植被覆盖度对应于低的木本花粉含量以及高的草本和禾本科花粉含量,说明了荒地上草本植物越茂密,外来的木本花

粉相对含量越低,反映了在局部空间尺度上荒地草本植被具有良好的花粉表现性。

在局部空间尺度上,对其母本植物具有较为敏感指示的花粉类型还包括桃金娘科,例如桉树旁的 2 个表土样品(FJLQ04 和 FJLQ07),其花粉含量高达 38% 和 48%,表明当采样点周围有桃金娘科植物出现时,它会强烈影响孢粉组合^[35]。

4.1.3 农业活动对孢粉组合的影响

人工林(包括果园)和农田的植被覆盖度与其主要花粉含量的相关性十分微弱(图 8b、c),农作物花粉在孢粉组合中的表现力较差,可能的原因包括:① 农业活动对孢粉组合产生了影响。例如,农田中的白菜、花椰菜等农作物常在花期前被收割^[36-37],这使它们的花粉较少地沉积到表土中;② 部分农作物的花粉产量低,包括马铃薯、番茄、西葫芦和菜豆等^[38-39]。另外,果园种植的龙眼、橘子等果树为虫媒植物,花粉产量也较低^[35,40-41]。

芒其孢子的含量也可能受到农业活动的影响,因为芒其主要生长在受人类干扰破坏后的丘陵、荒坡或林下^[42],其孢子在农田中的含量相对较低,可能是由于频繁耕作的环境不利于蕨类植物生长。

4.2 表土植硅体组合与周边植被的关系

在表土植硅体组合中,具有形态区分意义的植硅体类型包括细齿拉长型、扇型、双裂片型、尖型和鞍型等(图 4, 图 5)。其中,主要产自于木本植物的植硅体含量较低(1.94%),例如石细胞(Sclereid)、光滑球型(Spheroid psilate)和刺球型(Spheroid echinate),这与琅岐岛上较低的森林覆盖率相对应。在 3 种土地类型中,农田中的木本植硅体含量最低(1.33%),这进一步表明了木本植硅体对于指示森林覆盖度具有潜在的意义。

岛上表土植硅体组合与周边植被的关系可以反映植硅体的传播与沉积特性:① 琅岐岛的禾本科植物种类繁多,包括稻亚科中的水稻,早熟禾亚科中的大麦、小麦和鹧鸪草,黍亚科中的甘蔗、五节芒、狗尾草、铺地黍和稗子,画眉草亚科中的盐地鼠尾粟、互花米草、狗牙根和蟋蟀草,芦竹亚科中的芦苇和芦竹,竹亚科中的毛竹和麻竹^[18,43],这些亚科或属在植硅体组合中均有所体现(图 5)。其中,水稻和麦类植硅体较好地指示了当地的水稻、大麦和小麦的种植。三种土地利用类型中,水稻植硅体在农田中的含量最高(23%),在人工林(包括果园)(16%)和荒地(12%)也有分布(图 5),这说明了水稻植硅体可能通过某种方式被搬运至水稻田外^[44-45],

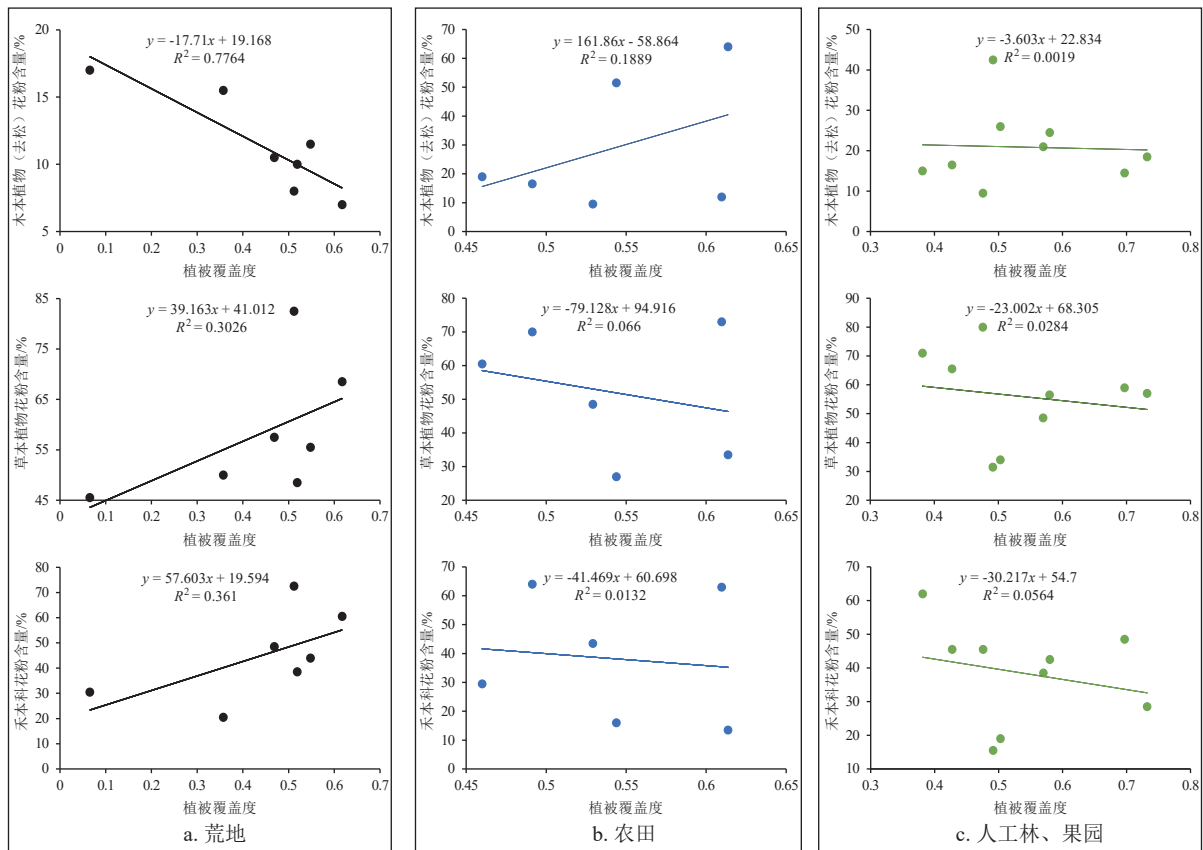


图8 三种土地利用类型的主要花粉与植被覆盖度间的回归分析

Fig.8 Regression analysis between main pollen and FVC in three land-use types

如台风和陆地水流。②在水稻田与弃耕水稻田中,水稻植硅体含量是完全不同的(61.54% vs. 29.72%),这可能指示了其在暴露的土壤中存在更强烈的侵蚀。除此之外,苔藓和土壤样品中的植硅体百分比存在差异,进一步证实了植硅体在不同环境下的差异侵蚀(图5)。

4.3 表土孢粉与植硅体组合对周边植被指示的对比

孢粉可被水或风远距离搬运的特点使其对植被的指示常常存在较大的偏差^[9]。除此之外,花粉指示草本植物的分辨率较低,例如禾本科,难以将其进一步区分。在此背景下,植硅体指标可以部分地弥补孢粉分析的缺陷。

首先,植硅体组合大大提高了草本植物的鉴定分辨率。在本研究中,禾本科花粉占比40%,指示了周边较为开放的植被环境(图2)。进一步,植硅体组合较为清晰地指示了一些杂草、竹子和水稻的存在(图5)。

其次,在木本植物植硅体组合中,除刺球型可以明确指示棕榈科之外^[46],光滑球型和褶皱球型等植硅体均有较为广泛的来源,难以专门指示某一科

或属的植物。因此,对于指示木本植物多样性,植硅体逊色于花粉指标。

最后,木本植物与禾本科植硅体含量的比值是0.2643,这与非洲开阔区域的比值相当^[47],可能成为热带、亚热带地区指示植被开放度的有用指标。

5 结论

(1)琅岐岛表土花粉组合的空间分布反映了以松属为主的外来花粉对该岛孢粉组合的强烈影响,盛行风对孢粉的区域传播起到了巨大的作用。在人工林(包括果园)、荒地和农田3种土地利用类型中,只有荒地的木本花粉含量与植被覆盖度呈显著线性关系($R^2=0.7764$),显示了荒地上草本植物越茂密,外来的木本花粉相对含量越低。这一结果可为古植被的定量重建提供依据。

(2)低花粉产量以及花期前的收割导致了某些农作物,如白菜、花椰菜和马铃薯所在科花粉的缺失或表现力低,从而形成了它们毫无规律的空间分布。

(3)在表土样品中,出现了丰富的扇型、双裂片型、鞍型和帽型等植硅体,它们分属于稻亚科、竹

亚科、早熟禾亚科,显示了比花粉指标更为丰富的禾本科植物信息。与之相反,木本植硅体的分辨率低,无法区分不同的科、属。木本与禾本科植硅体的比值对于指示该地区植被的覆盖度具有潜在的意义。

参考文献 (References)

- [1] Bunting M J, Farrell M, Bayliss A, et al. Maps from mud—using the multiple scenario approach to reconstruct land cover dynamics from pollen records: a case study of two Neolithic landscapes [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2018, 6: 36.
- [2] Caseldine C, Fyfe R, Hjelle K. Pollen modelling, palaeoecology and archaeology: virtualisation and/or visualisation of the past? [J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2008, 17 (5): 543-549.
- [3] Xu Q H, Cao X Y, Tian F, et al. Relative pollen productivities of typical steppe species in northern China and their potential in past vegetation reconstruction [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57 (6): 1254-1266.
- [4] Richer S, Gearey B. From Rackham to REVEALS: reflections on palaeoecological approaches to woodland and trees [J]. *Environmental Archaeology*, 2018, 23 (3): 286-297.
- [5] Farrell M, Bunting M J, Sturt F, et al. Opening the woods: towards a quantification of Neolithic clearance around the Somerset Levels and Moors [J]. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 2020, 27 (2): 271-301.
- [6] Kurmann M H. An opal phytolith and palynomorph study of extant and fossil soils in Kansas (U. S. A.) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1985, 49 (3-4): 217-235.
- [7] Horrocks M, Deng Y, Ogden J, et al. A reconstruction of the history of a Holocene sand dune on Great Barrier Island, northern New Zealand, using pollen and phytolith analyses [J]. *Journal of Biogeography*, 2000, 27 (6): 1269-1277.
- [8] Huang F, Lisa K, Xiong S F, et al. Holocene grassland vegetation, climate and human impact in central eastern Inner Mongolia [J]. *Science in China Series D*, 2005, 48 (7): 1025-1039.
- [9] 葛勇. 长白山西麓哈尼泥炭地全新世植硅体与孢粉信息记录的古环境重建[D]. 东北师范大学硕士学位论文, 2012. [GE Yong. Holocene paleoenvironment reconstruction by using pollen and phytolith records in Hanni peatland[D]. Master Dissertation of Northeast Normal University, 2012.]
- [10] 杜凯闯, 王文静, 吴克宁, 等. 河南仰韶村遗址原始农业活动研究[J]. 土壤, 2018, 50 (4): 832-840. [DU Kaichuang, WANG Wenjing, WU Kening, et al. Study on primitive agricultural activities of Yangshao village cultural site in Henan province [J]. *Soils*, 2018, 50 (4): 832-840.]
- [11] 张峻凡, 范保硕, 陈伟, 等. 唐代正定古城址形成时期的环境背景与人类活动[J]. 第四纪研究, 2021, 41 (5): 1489-1502. [ZHANG Junfan, FAN Baoshuo, CHEN Wei, et al. The environmental background and human activities for Zhengding ancient city site in Tang Dynasty [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41 (5): 1489-1502.]
- [12] 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体研究及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. [WANG Yongji, LÜ Houyuan. *Research and Application of Phyllosilicate*[M]. Beijing: Ocean Press, 1993.]
- [13] 吕厚远, 吴乃琴, 王永吉. 水稻扇型硅酸体的鉴定及在考古学中的应用[J]. 考古, 1996 (4): 82-86. [LÜ Houyuan, WU Naiqin, WANG Yongji. Identification of rice fan-type silicate bodies and its application in archaeology [J]. *Archaeology*, 1996 (4): 82-86.]
- [14] Barboni D, Bremond L, Bonnefille R. Comparative study of modern phytolith assemblages from inter-tropical Africa [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 246 (2-4): 454-470.
- [15] Bremond L, Alexandre A, Hély C, et al. A phytolith index as a proxy of tree cover density in tropical areas: calibration with Leaf Area Index along a forest-savanna transect in southeastern Cameroon [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 45 (4): 277-293.
- [16] Bremond L, Alexandre A, Wooller M J, et al. Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains [J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 61 (3-4): 209-224.
- [17] 龚家富. 琅岐岛农业生态经济系统能值研究[D]. 福建师范大学硕士学位论文, 2009. [GONG Jiafu. Energy study of agricultural economic system in Langqi Island[D]. Master Dissertation of Fujian Normal University, 2009.]
- [18] 林鹏, 丘喜昭, 吴志强, 等. 福建植被[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1990. [LIN Peng, QIU Xizhao, WU Zhiqiang, et al. *Vegetation of Fujian*[M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1990.]
- [19] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 中国植物花粉形态[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1995. [WANG Fuxiong, QIAN Nanfen, ZHANG Yulong, et al. *Pollen Morphology of Chinese Plants*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1995.]
- [20] 唐领余, 毛礼米, 舒军武, 等. 中国第四纪孢粉图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [TANG Lingyu, MAO Limi, SHU Junwu, et al. *The Quaternary Spore Pollen of China*[M]. Beijing: Science Press, 2016.]
- [21] 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[M]. 北京: 科学出版社, 1982. [Spore Powder Group, Paleobotany Unit, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, and Morphological Research Unit, South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. *Pollen Morphology of Tropical and Subtropical Angiosperms of China*[M]. Beijing: Science Press, 1982.]
- [22] International Committee for Phytolith Taxonomy (ICPT). International code for phytolith nomenclature (ICPN) 2.0 [J]. *Annals of Botany*, 2019, 124 (2): 189-199.
- [23] 徐凯健, 曾宏达, 张仲德, 等. 亚热带福建省森林生长季与气温、降水相关性的遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17 (10): 1249-1259. [XU Kaijian, ZENG Hongda, Chang C, et al. Relating forest phenology to temperature and precipitation in the subtropical region of fujian based on time-series MODIS-NDVI [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17 (10): 1249-1259.]
- [24] 中华人民共和国水利部. SL 190-2008 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 190-2008 Soil erosion classification and grading standard[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.]

- [25] 田地, 刘政, 胡亚林. 福州市植被覆盖度时空特征及与地形因子的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1158-1165. [TIAN Di, LIU Zheng, HU Yalin. Spatial-temporal characteristics of vegetation coverage and the relationship to topographic factors in Fuzhou City [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2019, 36(6): 1158-1165.]
- [26] 高桂在, 介冬梅, 刘利丹, 等. 植硅体形态的研究进展[J]. 微体古生物学报, 2016, 33(2): 180-189. [GAO Guizai, JIE Dongmei, LIU Lidan, et al. Advance in phytolith morphology research [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2016, 33(2): 180-189.]
- [27] 靳桂云, 燕生东, 宇田津彻郎, 等. 山东胶州赵家庄遗址4000年前稻田的植硅体证据[J]. 科学通报, 2007, 52(24): 3376-3384. [JIN Guiyun, YAN Shengdong, Udatsu T, et al. Neolithic rice paddy from the Zhaojiazhuang site, Shandong, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(24): 3376-3384.]
- [28] 王灿, 吕厚远. 水稻扇型植硅体研究进展及相关问题[J]. 第四纪研究, 2012, 32(2): 269-281. [WANG Can, LÜ Houyuan. Research progress of fan-shaped phytolith of rice and relevant issues [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(2): 269-281.]
- [29] 李仁成, 樊俊, 高崇辉. 植硅体现代过程研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1287-1295. [LI Rencheng, FAN Jun, GAO Chonghui. Advances in modern phytolith research [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(12): 1287-1295.]
- [30] Ball T B, Ehlers R, Standing M D. Review of typologic and morphometric analysis of phytoliths produced by wheat and barley [J]. Breeding Science, 2009, 59(5): 505-512.
- [31] 葛利花. 城子崖遗址史前生业经济的植硅体分析[D]. 山东大学硕士学位论文, 2019. [GE Lihua. Phytolith analysis of Prehistoric times living economics at Chengziya site[D]. Master Dissertation of Shandong University, 2019.]
- [32] 吴妍. 植硅体分析方法的应用与改进[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2008. [WU Yan. The application and improvement of phytolith analysis method[D]. Doctor Dissertation of University of Science and Technology of China, 2008.]
- [33] Yang S X, Zheng Z, Huang K Y, et al. 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 [J]. The Holocene, 2012, 22(12): 1393-1404.
- [34] 李宜垠, 张新时, 周广胜, 等. 中国北方几种常见表土花粉类型与植被的数量关系[J]. 科学通报, 2000, 45(7): 761-765. [LI Yiyin, ZHANG Xinshi, ZHOU Guangsheng, et al. Quantitative relationships between several common topsoil pollen types and vegetation in northern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(7): 761-765.]
- [35] Wan Q C, Zhang Y Z, Huang K Y, et al. Evaluating quantitative pollen representation of vegetation in the tropics: a case study on the Hainan Island, tropical China [J]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106297.
- [36] 庞瑞铭, 许清海, 丁伟, 等. 河北省中南部农田孢粉组合特征[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1345-1354. [PANG Ruiming, XU Qinghai, DING Wei, et al. Pollen assemblage of farmlands in central and southern Hebei Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(11): 1345-1354.]
- [37] 王学丽, 李月丛, 许清海, 等. 安阳地区不同农业单元表土花粉组合及空间分异[J]. 科学通报, 2010, 55(6): 544-554. [WANG Xueli, LI Yuecong, XU Qinghai, et al. Pollen assemblages from different agricultural units and their spatial distribution in Anyang area [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(6): 544-554.]
- [38] 张丽艳, 许清海, 李月丛, 等. 贺兰山表土花粉与花粉通量对比研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(4): 102-106. [ZHANG Liyan, XU Qinghai, LI Yuecong, et al. Pollen influx and surface pollen assemblages in Helan mountain [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(4): 102-106.]
- [39] 李曼玥, 李月丛, 许清海, 等. 东北地区人工扰动植被表土孢粉与植被和气候的关系[J]. 科学通报, 2012, 57(5): 535-547. [LI Manyue, LI Yuecong, XU Qinghai, et al. Surface pollen assemblages of human-disturbed vegetation and their relationship with vegetation and climate in Northeast China [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(5): 535-547.]
- [40] 王玮瑜, 宋长青, 孙湘君. 内蒙古中部表土花粉研究[J]. 植物学报, 1996, 38(11): 902-909. [WANG Fengyu, SONG Changqing, SUN Xiangjun. Study on surface pollen in middle inner Mongolia, China [J]. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(11): 902-909.]
- [41] 桑艳礼, 马玉贞, 高尚玉, 等. 甘肃兴隆山自然保护区表土花粉组合及数量分析[J]. 古生物学报, 2008, 47(4): 457-467. [SANG Yanli, MA Yuzhen, GAO Shangyu, et al. Pollen assemblages and numerical analysis of surface samples from Xinglong Mountain National Reserve, Gansu [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2008, 47(4): 457-467.]
- [42] Ma T, Rolett B V, Zheng Z, et al. Holocene coastal evolution preceded the expansion of paddy field rice farming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(39): 24138-24143.
- [43] 胡慧娟, 张烧挺, 陈剑榕. 福建闽江口外海岸植物生态[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 110-115. [HU Huijuan, ZHANG Yaoting, CHEN Jianrong. Plant ecology of the outer coast of the Minjiang River Estuary in Fujian [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(5): 110-115.]
- [44] Twiss P C, Suess E, Smith R M. Morphological classification of grass phytoliths [J]. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33(1): 109-115.
- [45] Madella M, Lancelotti C. Taphonomy and phytoliths: a user manual [J]. Quaternary International, 2012, 275: 76-83.
- [46] 徐德克, 李泉, 吕厚远. 棕榈科植硅体形态分析及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2005, 25(6): 785-792. [XU Deke, LI Quan, LÜ Houyuan. Morphological analysis of phytoliths in palmae and its environmental significance [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(6): 785-792.]
- [47] Astudillo F J. Soil phytoliths as indicators of initial human impact on San Cristóbal Island, Galápagos [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 490: 522-532.