

DOI: 10.20103/j.stxb.202412253174

郝秀东, 王艾岚, 欧阳绪红, 李立学, 秦琳娟, 韦嘉胜, 陆雅娴. 桂西北环江下开喀斯特洼地地表土孢粉与现代植被的关系. 生态学报, 2025, 45(14): 6822-6832.

Hao X D, Wang A L, Ouyang X H, Li L X, Qin L J, Wei J S, Lu Y X. Relationship between topsoil pollen and modern vegetation in the Karst Depression of Xiakai, Huanjiang County, northwest Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(14): 6822-6832.

桂西北环江下开喀斯特洼地地表土孢粉与现代植被的关系

郝秀东^{1,2,3}, 王艾岚^{1,2}, 欧阳绪红^{1,2,*}, 李立学^{1,2}, 秦琳娟^{1,2}, 韦嘉胜^{1,2}, 陆雅娴^{1,2}

1 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001

2 南宁师范大学广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001

3 中国科学院南京地质古生物研究所古生物学与油气地层应用全国重点实验室, 南京 210008

摘要:厘清喀斯特洼地地表土花粉与现代植被的关系, 对准确运用沉积地层中的孢粉记录来解析过去植被动态与气候变化具有重要的指导意义。选取桂西北环江下开 6 种不同土地利用类型的喀斯特洼地, 系统开展表土花粉与现代植被关系研究, 结果表明: (1) 研究区共鉴定孢粉类型 46 科/属, 孢粉组合中以针叶类花粉占优势 (主要为松属), 含量为 29.02%—74.51%; 其次为草本植物 (含量为 19.89%—67.38%) 和蕨类植物 (22.75%—68.13%), 阔叶乔木类植物花粉含量最低, 为 2.58%—5.93%; 孢粉组合中以松属、柏/杉科、栗属、禾本科、菊科、苋科/藜科、十字花科、天南星科、芒萁属以及凤尾蕨属为主要孢粉类型, 但松属花粉的超代表性可能对群落优势种的孢粉含量判断造成一定的干扰性; 水稻田、玉米地、桑林、次生林都能较好反映其上及周边近距离植物组成特征, 但番薯地与大豆田与其植物组成相关性较差; (2) 土地利用强度与表土孢粉组合密切相关, 即随着土地利用强度的增加, 表土孢粉组合中的乔木和灌木花粉含量呈减少趋势, 而草本植物和蕨类植物孢粉含量却呈上升趋势; (3) 主成分分析可以较好的区分出不同土地利用类型下的孢粉组合特征, 但不能明显区分出番薯地和大豆田; (4) 表土和苔藓样品的孢粉平均浓度相近, 但不同土地利用类型孢粉浓度存在差异, 其中, 玉米地浓度最高 (62649 粒/g), 次生林最低 (21223 粒/g), 农用地的孢粉浓度普遍高于非农用地。研究结果可为我国西南地区生态保护与石漠化治理提供参考, 并为孢粉数据库、古植被与古气候重建工作提供更多的原始数据。

关键词:表土孢粉组合; 桂西北; 喀斯特; 下开洼地; 现代植被

Relationship between topsoil pollen and modern vegetation in the Karst Depression of Xiakai, Huanjiang County, northwest Guangxi

HAO Xiudong^{1,2,3}, WANG Ailan^{1,2}, OUYANG Xuhong^{1,2,*}, LI Lixue^{1,2}, QIN Linjuan^{1,2}, WEI Jiasheng^{1,2}, LU Yaxian^{1,2}

1 Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resource Utilization (Nanning Normal University), Ministry of Education, Nanning 530001, China

2 Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China

3 National Key Laboratory of Palaeobiology and Petroleum Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Understanding pollen-vegetation relationships in karst depression topsoils is critical for accurately reconstructing paleovegetation and climate dynamics from sedimentary palynological records for accurately utilizing palynological

基金项目:广西自然科学基金 (2023GXNSFBA026263, 2025GXNSFAA069308); 国家自然科学基金项目 (42001076); 中国科学院南京地质古生物研究所古生物学与油气地层应用全国重点实验室 (223109)

收稿日期: 2024-12-25; 网络出版日期: 2025-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: oy_xh@163.com

assemblages in sedimentary strata to interpret past vegetation dynamics and climate changes. This study selects six different land use types in the karst depression of Xia Kai, Huanjiang County, northwest Guangxi, and conducts systematic analysis of surface soil pollen-vegetation correlations across six land-use types. The results show that: 1) 46 families/genera of pollen types were identified, the pollen assemblage is dominated by conifers (mainly *Pinus*), with content of 29.02%—74.51%; followed by herbaceous pollen (19.89%—67.38%). Fern spore content ranged from 22.75% to 68.13%. The lowest content of 2.58%—5.93% was found in broad-leaved trees. The pollen assemblage is dominated by *Pinus*, Cupressaceae, *Castanea*, Poaceae, Asteraceae, Amaranthaceae/Chenopodiaceae, Brassicaceae, Araceae, *Dicranopteris*, and *Pteris*; however, the overrepresentation of *Pinus* pollen may introduce interference in assessing the pollen content of dominant species within the community. Paddy field, corn field, mulberry forests, and secondary forests effectively reflect the vegetation composition of their and nearby areas, while sweet potato field and soybean field exhibit poor correlation with their plant composition. 2) There is a close correlation between land use intensity and surface soil pollen assemblages: as land use intensity increases, the pollen content of arboreal and shrub plants decreases, while that of herbaceous plants and pteridophytes increases. 3) Principal Component Analysis (PCA) effectively differentiated pollen assemblages across land-use types, but could not clearly distinguish between sweet potato field and soybean field. 4) The average pollen concentrations in surface soil and moss samples are similar; however, significant differences exist among different land use types, with corn fields exhibiting the highest concentration (62,649 grains/g), secondary forests the lowest (21223 grains/g), and agricultural lands generally showing higher concentrations than non-agricultural lands. The findings of this study can provide references for ecological protection and rocky desertification control in Southwest China, and offer more original data for palynological databases, as well as for the reconstruction of ancient vegetation and paleoclimate.

Key Words: topsoil pollen assemblage; northwest of Guangxi; karst; Xiakai depression; modern vegetation

喀斯特地貌在全球分布广泛,因其独特的地质结构和丰富的生物多样性,在全球生态系统中占据了重要地位^[1]。我国喀斯特面积居世界首位,约占国土面积的三分之一^[2]。随着全球气候变化和人类活动的加剧,特别是高脆弱性的喀斯特生态系统,正面临着植被退化、水土流失、石漠化以及生物多样性锐减等一系列的生态问题,严重制约了喀斯特地区经济的持续发展^[3-4]。我国高度重视喀斯特生态环境的治理,“十一五”规划纲要就将石漠化综合治理作为生态保护的重点工程,“十二五”规划纲要提出继续推进荒漠化、石漠化和水土流失的综合治理,并相继颁布了《滇桂黔石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011—2020年)》、《西部地区重点生态区综合治理规划纲要(2012—2020年)》和《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》、《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》等一系列重要文件来推进石漠化的综合治理,石漠化扩展的趋势得到全面遏制,我国石漠化状况呈现出持续改善的良好态势。

喀斯特生态治理研究一直是学科的热点,前人分别从喀斯特生态系统的退化机理^[5]、石漠化治理的技术与模式^[6-7]、喀斯特景观的资源保护^[8-9]等多个角度进行深入研究,利用植被净初级生产力(NPP)^[10-11]、植被叶面积指数(LAI)^[12-13]、生长季植被归一化差值植被指数(NDVI)^[14-15]等指标来量化和评估喀斯特地区的生态修复的效果,但从孢粉学切入的研究相对较少,主要集中在重庆、贵州和广西^[16-20]。孢粉作为植物的重要组成部分,具有耐高温、高压和酸碱腐蚀的特性,能在地层中长期保存下来,已成为重建古环境、古气候的良好代用指标^[21-22]。尽管化石孢粉记录能够恢复和重建人类扰动前后的植被状况和演变过程,但由于不同植物的孢粉产量、传播能力和保存条件等不尽相同,使得孢粉与植被的关系往往较为复杂。因此,在准确解析地层孢粉记录时,厘清表土孢粉组合与现代植被的关系成为重要的前提条件。

近年来,国内外学者对表土孢粉进行了诸多研究,涵盖孢粉与植被的关系^[23-25]、孢粉-植被-气候的关系^[26-27]、孢粉的来源与分布^[28]、花粉的扩散机制^[29-30]、孢粉代表性问题及指示意义^[31-32]等方面,研究表明表土孢粉组合能够反映当地植被组成特征。喀斯特洼地作为重要的沉积物汇集地,其沉积物能够提供植被演替、人类活动、环境变化、气候变迁等记录^[33-34],加之其具有较高的沉积速率和分辨率,是喀斯特地区进行古环境重建的理想场所。基于此,本研究选取广西环江下开地区6个不同土地利用类型的洼地开展表土孢粉研

究,探讨不同土地利用方式下表土孢粉与现代植被之间的关系,评估主要孢粉类型的代表性,为准确解析钻孔孢粉记录,重建和恢复过去植被演替和环境变化提供参考依据,同时也为认识喀斯特地区生态规律,制定今后生态保护和可持续发展策略提供科学指导。

1 研究区概况

下开洼地(图 1; 107°59'E, 24°53'N)位于环江毛南族自治县下南乡南部,属于典型的峰丛洼地,周围群山环绕,中部为丘陵,略呈盆地状,海拔 149—1693 m^[35]。环江县内喀斯特地貌分布广泛,占全县面积的 72.2%^[36]。成土母岩主要由石灰岩和白云岩组成,土层较薄,空间上土壤发育具不连续性。地带性土壤以红壤为主,主要分布在东北部的土山上,西部与西北部的石山普遍为石灰土^[37]。研究区属亚热带季风气候,年均降雨量 1530—1820 mm,年平均气温 19.6—21.6 °C。地带性植被主要为亚热带常绿阔叶林,其中,乔、灌木优势种以青冈栎 (*Quercus glauca*)、厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*)、香椿 (*Toona sinensis*)、皂荚 (*Gleditsia sinensis*)、菜豆 (*Radermachera sinica*)、野独活 (*Milium balansae*)、红背山麻秆 (*Alchornea treuioides*)、灰毛浆果楝 (*Cipadessa baccifera*) 及盐麸木 (*Rhus chinensis*) 等为主,草本优势种主要为五节芒 (*Miscanthus floridulus*)、类芦 (*Neyraudia reynaudiana*)、白茅 (*Imperata cylindrica*) 和鬼针草 (*Bidens pilosa*),蕨类主要以肾蕨 (*Nephrolepis auriculata*)、卷柏 (*Selaginella tamariscina*)、渐尖毛蕨 (*Cyclosorus parasiticus*)、华南毛蕨 (*Cyclosorus parasiticus*) 和海金沙 (*Lygodium japonicum*) 等为主^[38—40]。

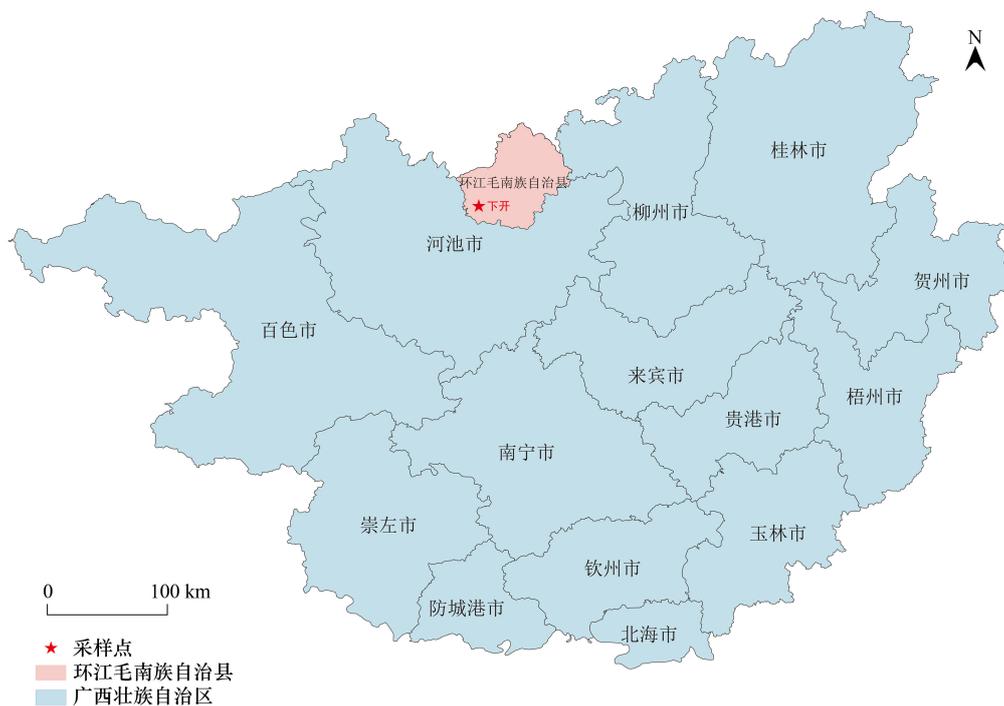


图 1 研究区和采样点

Fig.1 Study area and sampling sites

2 材料与方法

2.1 样品采集

2021 年 9 月,在环江县下南乡下开屯开展野外采集表土、苔藓孢粉样品工作。样品均以“梅花点”法进行采集,即在样方四个角和样方中间各取上部 0—1 cm 的表土或苔藓,混合成 1 个样品放入取样袋,避免单一物

种的过度代表性。选取水稻田、玉米地、桑林、番薯地、大豆田和次生林 6 种不同土地利用类型,共采集表土和苔藓样品 23 份,同时记录样方内植物的盖度、丰富度、种类等信息。利用 GPS 系统对每个样点进行精确定位,样品详细信息见表 1。野外采样时正值农作物的生长期,玉米地、番薯地和大豆田等的植被组成以其上农作物为主,仅在边缘有杂草分布;水稻田的上一期作物已收割完毕,田内零星生长着假臭草 (*Praxelis clematidea*)、喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 和鬼针草等杂草;桑林主要以桑树为主;次生林植被组成以灰毛浆果楝、香椿、皂荚、菜豆、红背山麻秆和白茅等为主。

表 1 表土样品采样点信息

Table 1 Sampling point information of topsoil samples

土地利用类型 Type of land use	样品编号 Sample number	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude/m	样品类型 Sample type
水稻田 Paddy field	XK-1	107°59'6"	24°53'46"	362	表土
	XK-2	107°59'14"	24°53'56"	362	表土苔藓混合
	XK-3	107°59'11"	24°53'32"	362	表土
	XK-4	107°59'20"	24°53'28"	362	表土苔藓混合
玉米地 Corn field	XK-5	107°59'3"	24°53'45"	360	表土
	XK-6	107°59'25"	24°53'30"	360	表土
	XK-7	107°59'13"	24°53'48"	361	表土
	XK-8	107°59'15"	24°53'52"	361	表土
番薯地 Sweet potato field	XK-9	107°59'6"	24°53'45"	375	表土
	XK-10	107°59'11"	24°53'49"	375	表土
	XK-11	107°59'8"	24°53'50"	375	表土
大豆田 Soybean field	XK-12	107°59'8"	24°53'43"	371	表土
	XK-13	107°59'20"	24°53'41"	371	表土
	XK-14	107°59'49"	24°53'20"	371	表土
	XK-15	107°59'45"	24°53'50"	371	苔藓
桑林 Mulberry forests	XK-16	107°59'8"	24°53'44"	363	表土
	XK-17	107°59'30"	24°53'25"	363	表土
	XK-18	107°59'18"	24°53'16"	368	表土
	XK-19	107°59'51"	24°53'29"	368	表土苔藓混合
次生林 Secondary forests	XK-20	107°59'19"	24°53'47"	405	表土
	XK-21	107°59'21"	24°53'41"	402	表土
	XK-22	107°59'24"	24°53'50"	398	表土
	XK-23	107°59'16"	24°53'44"	390	表土苔藓混合

样品编号 XK:下开 Xiakai

2.2 实验室处理与数据分析

孢粉实验室提取采用常规的酸碱法和过筛法,表土样品称取干样 30 g 左右,苔藓样品称取干样 3 g 左右,将一粒石松孢子(10315 粒/片)添加到每个样品中以计算孢粉浓度。依次加入盐酸去除碳酸钙,再加氢氟酸去除二氧化硅,用 7 μm 的筛网过筛,最后将孢粉富集于 5 mL 离心管中。

孢粉鉴定是通过 Leica DM4 B 显微镜在 200 倍和 400 倍下完成,每个样品鉴定孢粉 300 粒以上,同时计算孢粉含量百分比与孢粉浓度,孢粉含量百分比计算分两次进行,即先用花粉总数计算乔灌木、草本的花粉百分比,再用孢子和花粉总数来计算蕨类孢子的百分比。孢粉图谱使用 Tilia(1.7.16) 软件进行绘制,PCA 分析运用 Canoco5 完成。孢粉鉴定主要依据正式出版的《中国植物花粉形态(第二版)》、《中国第四纪孢粉图鉴》、《中国热带亚热带被子植物花粉形态》等工具书。孢粉实验室处理和鉴定均在南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室内完成。

3 结果与分析

3.1 表土孢粉总体特征

下开喀斯特洼地 23 份表土和苔藓样品共鉴定出孢粉类型 46 科/属,包括乔、灌木植物花粉 22 科/属,草本植物花粉 19 科/属、蕨类孢子 4 科/属和 1 种淡水藻类环纹藻属。其中乔、灌木植物花粉百分比含量(32.62%—80.11%)占绝对优势,平均为 53.73%,主要花粉类型有松属(*Pinus*)、柏科(*Cupressaceae*)、栗属(*Castanea*)、常绿栎属(*evergreen Quercus*)、豆科(*Fabaceae*)、蕈树属(*Altingia*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)及山麻秆属(*Alchornea*)等,花粉含量以松属花粉占比最高,平均含量为 45.58%,柏科花粉次之,为 3.82%,其余乔、灌木花粉含量均低于 1%;草本植物花粉平均含量为 46.27%,花粉类型以禾本科(*Poaceae*)、玉蜀黍属(*Zea*)、菊科(*Asteraceae*)、苋科(*Amaranthaceae*)、十字花科(*Brassicaceae*)和天南星科(*Araceae*)等为主,以禾本科含量最高,平均为 21.36%;蕨类孢子主要以芒萁属(*Dicranopteris*)、凤尾蕨属(*Pteris*)、三缝孢子和单缝孢子为主。主要孢粉类型百分比含量见图 2,孢粉浓度见图 3。

3.2 不同土地利用类型表土孢粉组合特征

3.2.1 水稻田

孢粉组合中草本植物花粉含量占绝对优势(平均含量为 67.38%,下同),以水稻型禾本科(53%)为主,其次为苋科(5.31%)、菊科(2.93%)和玉蜀黍属(1.52%),其余草本植物花粉含量均低于 1%;乔木、灌木花粉含量为 32.62%,主要为松属(27.99%)、柏科(1.04%)和栗属(1.01%),其它科属的花粉含量均未超过 1%;蕨类孢子含量为 22.75%,其中肾蕨属含量最高(10.2%)。孢粉平均浓度为 28319 粒/g。

3.2.2 玉米地

孢粉组合中乔、灌木花粉含量为 38.26%,其中松属以 32.22%占绝对优势,柏科为 3.46%;草本植物花粉含量为 61.74%,其中禾本科为 26.25%,玉蜀黍属含量为 20.25%,苋科花粉含量为 6.05%,菊科含量占 2.44%,十字花科含量为 2.14%,天南星科含量为 1.89%,其他科/属均未超过 1%;蕨类孢子含量占 24.13%,以芒萁属、水龙骨科为主。孢粉浓度达到研究区的最高值,为 62649 粒/g。

3.2.3 番薯地

孢粉组合中乔、灌木花粉含量达 39.35%,松属以 24.49%明显占优,其次为柏科的 5.36%和栗属的 1.92%;草本植物花粉含量为 60.65%,其中禾本科花粉为 23.45%,苋科和十字花科分别为 13.9%和 9.24%,玉蜀黍属和菊科的含量分别为 3.84%和 3.62%;蕨类孢子含量为 37.48%,其中以未定三缝孢子和芒萁属为主,含量分别为 13.9%和 12.89%。孢粉浓度较玉米地有所降低,为 25794 粒/g。

3.2.4 大豆田

孢粉组合中乔、灌木花粉含量达 58%,其中松属花粉含量最高,达 44.47%,柏科次之,为 9.71%;草本花粉含量为 42%,其中花粉含量大于 1%的有玉蜀黍属、菊科、禾本科、天南星科和十字花科,其花粉含量分别为 19.48%、10.13%、4.55%、2.78%、2.46%和 1.06%;蕨类孢子含量为 40.12%,以肾蕨属为主。孢粉浓度较番薯地略有增加,为 26114 粒/g。

3.2.5 桑林

孢粉组合中乔、灌木花粉含量为 70.45%,其中松属花粉含量最高,为 63.78%,豆科次之,为 1.16%;草本植物花粉含量为 29.55%,其中含量较高的为菊科(13.65%)、禾本科(6.9%)和玉蜀黍属(3.49%);蕨类孢子含量为 27.9%,以水龙骨科和芒萁属为主。孢粉浓度较大豆田略有降低,为 21625 粒/g。

3.2.6 次生林

孢粉组合中乔、灌木花粉含量达 80.11%,其中松属为 71.5%,其他花粉含量较高的有柏科、栗属、木兰科和大戟科,其花粉含量分别为 3.01%、1.47%、1.19%和 1.13%;草本植物花粉含量为 19.89%,其中禾本科为 14.54%,菊科为 2.69%,玉蜀黍属为 1.65%;蕨类孢子含量较高,达 68.13%,其中以肾蕨属、水龙骨科和三缝孢

子为主。孢粉浓度较桑林略有降低,为 21223 粒/g。

3.3 孢粉浓度

下开洼地整体孢粉浓度较低,平均为 30954 粒/g,表土样品与苔藓样品的平均浓度差异明显,分别为 28610 粒/g 和 87677 粒/g。不同土地利用类型的表土孢粉浓度差异也较大,孢粉浓度最低值出现在大豆田的 XK-5 样品中,为 4016 粒/g,最高值出现在玉米地中,达 113768 粒/g。在所有样品中,松属花粉浓度最高,达 8712 粒/g,其次为禾本科(5425 粒/g)和玉蜀黍属(3469 粒/g)。此外,蕨类孢子浓度相对较高,平均为 2229 粒/g。

3.4 主成分分析

为进一步探讨下开地区喀斯特峰丛洼地的表土孢粉的传播规律,对其 10 种主要孢粉类型进行主成分(PCA)分析(图 4),四个轴的特征值分别为 0.307、0.205、0.198 和 0.148,累计解释量达 85.8%,其中,前两轴解释量为 51.2%。因此,可以观察到孢粉组合具有较好的分散性,所反映的植被类型相对简单,且受环境影响因子的作用较小,从而能实现大致分类。松属分布于第一象限,肾蕨属与三缝孢子分布于第二象限,凤尾蕨科、芒萁属、柏科和栗属分布于第三象限,禾本科、菊科和玉蜀黍属分布于第四象限。不同土地利用类型中,次生林与肾蕨属和三缝孢子对应关系明显,能很好区分水稻田和玉米地,桑林也能较好区分,而番薯地与大豆田分布较为离散,难以区分。

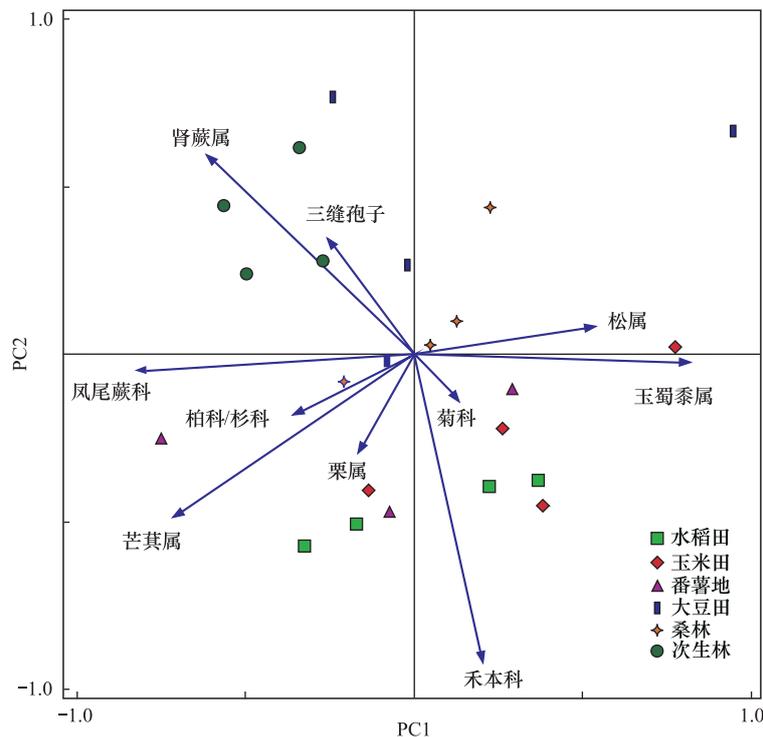


图 4 下开喀斯特洼地主要孢粉类型及样点的主成分分析(PCA)结果

Fig.4 The result of principal component analysis (PCA) for major pollen types and samples in the Karst Depression of Xiakai

4 讨论

4.1 表土和苔藓样品的孢粉组成对比

总的来说,表土孢粉组合与当地植被状况及沉积环境关系密切,代表当地多年植被花粉沉积的平均结果,因此能够反映现在及过去一段时间内的植被状况。而苔藓由于其生长年限较短,一般在 1—2 年,其收集的是近年植物产生的花粉,因而代表的是特定时间和空间范围内的花粉结果。此外,苔藓的孢粉源区受控于局地

植被的影响,因此与研究样地周围的植被类型关系更为紧密,能够更好地反映区域植被覆盖情况。通过对本次采集的 1 个苔藓样品、4 个表土苔藓混合样品和 18 个表土样品进行苔藓和表土的孢粉对比研究,发现苔藓样品的孢粉浓度波动较大,而表土孢粉组合较为稳定,如大豆田苔藓样品 XK-15 中玉蜀黍属花粉百分比含量为 37.66%,而其他 3 份表土样品(XK-12、XK-13 和 XK-15)的花粉百分比含量分别为 11.49%、12.99% 和 15.79%,可能与苔藓样品的采样点紧挨着玉米地有关。但在水稻田样品中,表土苔藓混合样品 XK-2 和 XK-4 禾本科花粉百分比含量分别为 52.51% 和 57.26%,其他表土样品 XK-1 和 XK-3 的花粉百分比含量分布为 53.45% 和 48.79%,四个样品的孢粉百分比含量变化不大。

4.2 孢粉组合与现代植被的关系

23 份表土样品中,针叶类花粉含量(49.4%)和草本花粉含量(46.27%),占绝对优势,而阔叶乔木类花粉含量最低(仅为 4.33%),但研究区属于亚热带季风气候,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,占据优势的阔叶乔木类花粉含量低,说明该地区植被退化严重。不同土地利用类型表土孢粉组合能较好反应周围的植被组成,水稻田孢粉组合以禾本科、苋科、菊科和玉蜀黍属为主,含量分别为 53%、5.31%、2.93% 和 1.52%,这与水稻田栽培作物及其伴生植物较为一致。其中,水稻型禾本科花粉含量占据半数以上,而在距离较近的玉米地其含量急剧下降为 26.25%,说明水稻型禾本科花粉传播距离短,多分布在母体植物周围。菊科、苋科是南方农田的主要杂草类型,采样期间,研究区的水稻作物已收割完,农田周围分布着假臭草、喜旱莲子草和鬼针草等杂草,这与花粉结果较一致。因此,水稻田花粉组合能较好反映母体植被的群落特征以及指示优势种和人类活动痕迹。玉米地表土孢粉组合主要为禾本科(26.25%)和玉蜀黍属(20.52%)。玉蜀黍属花粉在大豆田中含量也较高(19.48%),可能与大豆田外围玉米地的分布有关。但是,玉蜀黍属花粉整体含量较低,表明个体较大的农作物禾本科花粉不易保存^[41]。番薯地也有较高含量的禾本科花粉(23.45%),可能也与其周边种植了较高密度的禾本科植物有关,这进一步印证了水稻型禾本科花粉在近距离范围内均匀扩散的特征。大豆田除了较高含量的玉蜀黍属花粉外,还分布着菊科(10.13%)和苋科(2.46%)花粉,说明农田杂草类型组成有较高相似性。需要指出的是,大豆田的豆科花粉含量极低(0.97%),这可能与大豆虫媒授粉特性及其较低的花粉产量有关,使得其难以准确反映母体植被群落的特征,这一发现与前人研究结果一致^[42]。桑林表土孢粉组合中,松属含量为 63.78%,而桑科花粉含量仅为 0.96%,可能与其花粉外壁薄,层次不清楚,导致其不易保存有关。在次生林中,松属花粉含量最高(达 71.5%),禾本科花粉含量也达 14.54%,这与次生林下多为草丛较为一致。

4.3 主要花粉类型的代表性

研究区除次生林有零星的马尾松外,其他样点内均无松科植物分布,但松属花粉出现在所有样品中,且含量也较高(27.99%—71.50%,平均 45.58%),这可能与松属植物属于风媒,花粉产量大,且具有两个较发达的气囊,可以被传播到距离母体较远的区域有关^[43—45]。在研究区东北方向的华山林场以及西北方向的木论国家级自然保护区分布着大量的马尾松,成为研究区松属花粉的重要来源。因此,松属花粉具有超代表性,在孢粉组合中出现一定含量的松属花粉,不能作为判断其现代植被中是否生长松属植物的唯一标准。禾本科花粉平均含量为 21.36%,在水稻田样品中高达 53.00%,可能与禾本科花粉传播距离短有关。此外,禾本科植物花粉,特别是与人类活动息息相关的作物类,如水稻和玉米花粉含量的增加,可以指示森林退化或人类活动增强。苋科花粉含量在水稻田中相对较高,为 5.31%,而在其他土地利用类型中含量较少,表现出明显的水稻田伴生习性,且该类植物多生于池沼或水沟处,可将苋科花粉含量作为指示研究区地表水变化的一个指标。蕨类孢子含量在所有样品中含量都较高(平均为 36.72%),且多为喜钙生、旱生、石生的凤尾蕨属、芒萁属和肾蕨属,可能研究区地处喀斯特洼地有关,也说明在喀斯特地区,蕨类孢子具超代表性。

4.4 孢粉浓度差异

孢粉浓度对于植被状况和环境变化具有一定的指示意义。表土和苔藓孢粉平均浓度相近,或苔藓孢粉浓度稍高于表土,说明表土和苔藓孢粉浓度变化相似性较高,一定程度上都能反映植被变化。6 种不同土地利

用类型的孢粉浓度较低且数值相差不大(平均 30954 粒/g),其中玉米地>水稻田>大豆田>番薯地>桑林>次生林。这可能与玉米地和水稻田等均是人为干预的生态系统,主要种植高产的农作物,这些作物的花粉产量高,种植密集,使得其孢粉浓度明显高于桑林和次生林等非农用地。此外,松属花粉浓度远高于其他孢粉类型,可能与其花粉产量大、传播距离远有关,这与前人的研究结果相一致。

5 结论

桂西北环江下开地区喀斯特不同土地利用类型的 23 份表土孢粉研究表明:(1) 表土孢粉组合与各土地利用类型上植被对应关系良好,水稻田、玉米地、桑林、次生林都能较好反映其上及周边近距离植物组成,但番薯地与大豆田与其植物组成相关较差,可能与二者的花粉产量、采样时间、保存条件等有关;(2) 松属、柏/杉科、栗属、禾本科、菊科、苋科/藜科、十字花科、天南星科、芒萁属以及凤尾蕨属为该地区的主要孢粉类型。松属花粉含量高具超代表性,可能对群落优势种孢粉含量具一定干扰性,通过植被调查发现研究区除次生林分布有零星的松属植物外,其他样点并无松属植物分布,其可能来自于华山林场和木论国家级自然保护区;栗属花粉具有低代表性,花粉可能源自周边山地;禾本科,苋科/藜科和芒萁属可能产自于洼地内部、周围山地以及该地区农田;在研究区内,次生植被及其表土孢粉组合受到土地利用方式变化的显著影响。随着土地利用强度的增加,表土孢粉样本中的乔木和灌木花粉含量呈现减少趋势,而草本植物和蕨类植物的孢粉含量呈现上升趋势。这一变化揭示了土地利用强度与表土孢粉组合之间的密切相关。(3) 主成分分析(PCA)能够有效区分水稻田、玉米地、桑林和次生林的孢粉组合,但无法区分番薯地和大豆田的孢粉组合;(4) 表土和苔藓孢粉平均浓度相近,但不同土地利用类型孢粉浓度存在差异,玉米地平均浓度显著较高,水稻田、大豆田和番薯地次之,桑林和次生林平均浓度较低,农用地与非农用地孢粉浓度差异明显,与周边植被组成、孢粉保存条件及人类活动有关。

参考文献(References):

- [1] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨. 地学前缘, 2006, 13(3): 185-189.
- [2] 张国, 郑春燕, 李钰飞, 韩雪梅, 杨广斌, 逯非, 王效科. 喀斯特地区石漠化生态修复对土壤生物多样性的影响. 生态学报, 2023, 43(1): 432-440.
- [3] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势. 地学前缘, 2009, 16(6): 1-12.
- [4] 何茂林, 张玉珊, 高家勇, 吴清林, 李瑞. 喀斯特区土壤侵蚀与石漠化协同演变及交互关系. 水土保持学报, 2023, 37(1): 140-150.
- [5] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [6] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. 生态学报, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [7] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [8] 杨晓霞, 向旭, 袁道先, 黎健斌. 喀斯特洞穴旅游研究综述. 中国岩溶, 2007, 26(4): 369-377.
- [9] 石强, 高文举. 国内旅游生态环境研究进展及趋势. 旅游学刊, 2007, 22(8): 86-91.
- [10] 王栋华, 田义超, 张强, 张亚丽, 林俊良, 陶进, 黄亮亮. 2000—2021 年桂西南峰丛洼地流域植被净初级生产力演变特征及其归因. 中国岩溶, 2024, 43(2): 336-348.
- [11] Wang X F, Zhang X R, Feng X M, Liu S R, Yin L C, Chen Y Z. Trade-offs and synergies of ecosystem services in karst area of China driven by Grain-for-Green Program. Chinese Geographical Science, 2020, 30(14): 101-114.
- [12] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [13] 唐荣彬, 付梅臣, 王力, 黄妮, 连海峰. 喀斯特岩溶、非岩溶区植被总初级生产力与土壤呼吸的空间差异及其环境因子分析. 地球与环境, 2020, 48(3): 307-317.
- [14] 陈燕丽, 罗永明, 莫伟华, 莫建飞, 黄永璘, 丁美花. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1802-1812.
- [15] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 童晓伟, 廖楚杰, 张明阳, 姜岩. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性. 生态学报, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [16] 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.

- [17] 郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友, 魏兴萍, 罗伦德. 喀斯特山地典型植被恢复过程中表土孢粉与植被的关系. 生态学报, 2011, 31(10): 2678-2686.
- [18] 何永彬, 张信宝, 贺秀斌. 利用¹³⁷Cs 示踪和孢粉分析法对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积及侵蚀环境的研究. 水土保持通报, 2013, 33(1): 246-250.
- [19] 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 朱正杰. 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5kaB.P. 以来的气候变化. 生态学报, 2013, 33(12): 3783-3791.
- [20] 李立学, 郝秀东, 欧阳绪红, 薛美玲, 劳月英, 秦琳娟, 韦嘉胜. 桂西北喀斯特峰丛洼地区表土孢粉与现代植被关系研究——以环江县蒙峒洼地为例. 地理科学, 2023, 43(11): 2060-2068.
- [21] 王开发, 王宪曾. 孢粉学概论. 北京: 北京大学出版社, 1983.
- [22] 许清海, 李曼玥, 张生瑞, 张娅红, 张攀攀, 卢静瑶. 中国第四纪花粉现代过程: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(11): 1661-1682.
- [23] 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.
- [24] Yong Z J, Wang W, Chen D X, Liu L N, Ma Y Z, He J. Pollen reconstructed Holocene vegetation response to climate change and human activity in a semi-arid mountain area of North China. Catena, 2020, 195: 104878.
- [25] 张芸, 陈立欣, 西瑶瑶, 孔昭宸, 乔鲜果. 中国新疆南部地区表土孢粉与现代植被. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(2): 529-549.
- [26] 侯佳茗, 王萌萌, 马春梅, 袁储君, 王晓勇, 陈澍, 肖霞云, 郑卓, 赵艳. 降水梯度下中国表土花粉-植被-气候关系研究. 第四纪研究, 2024, 44(3): 623-637.
- [27] 何玲玲, 黄康有, 陈聪, 汤永杰, 张潇, 郑卓, 吕厚远, 马春梅, 肖霞云, 张芸, 赵艳. 中国亚热带表土孢粉分布规律及其与气候的关系研究. 第四纪研究, 2024, 44(3): 638-655.
- [28] 赵永涛, 蓝小玉, 雷艳, 王梓莎, 常婧, 陈雪梅, 张孜越, 王雪莲, 汪亘, 詹科杰, 苗运法. 青藏高原东北缘祁连山区现代孢粉空间分布与搬运过程. 第四纪研究, 2024, 44(3): 656-670.
- [29] Liao L L, Wei W, Wen Y Z, Huang C H, Bai T D, Jiang W X. Unique Geoclimatic Factors and Topography-Shaped Pollen Flow of *Pinus yunnanensis* var. *tenuifolia* Wild Populations in the Dry-Hot River Basin in China. Forests, 2024, 15(12): 2215.
- [30] Xie S Q, Li K H, Li F R, Yang X, Reitalu T. Modern pollen-plant diversity relationships for reliable pollen-based reconstruction of past plant taxonomic and functional diversity: a case study in southwest Shandong, China. Ecological Indicators, 2024, 167: 112739.
- [31] 姚付龙, 黄健, 闫俊杰, 刘海军, 唐国乾. 西天山北坡草甸群落表土花粉组合及其生态指示意义. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1350-1359.
- [32] 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.
- [33] Bai X Y, Zhang X B, Long Y, Liu X M, Zhang S Y. Use of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} measurements on deposits in a Karst depression to study the erosional response of a small Karst catchment in Southwest China to land-use change. Hydrological Processes, 2013, 27(6): 822-829.
- [34] Cao Z H, Ke Q H, Zhang K L, Zhang Z D, Liu Y N, Xiao S Z, Wei M Y. Millennial scale erosion and sedimentation investigation in Karst watersheds using dating and palynology. Catena, 2022, 217: 106526.
- [35] 曾成城, 苏天明, 苏利荣, 秦芳, 李琴, 何铁光, 俞月凤, 张雨, 徐亮, 冯倩. 广西典型喀斯特地区不同土地利用方式土壤养分特征. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 199-203.
- [36] 赵佳, 赵宇鸾. 1950—2010 年岩溶山区农作物结构演变的时空特征——以广西环江县为例. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2023, 41(3): 73-83.
- [37] 张明阳, 王克林, 陈洪松. 基于 RS 和 GIS 的喀斯特区域水土流失动态监测与分析——以广西环江县为例. 资源科学, 2007, 29(3): 124-131.
- [38] 张伟, 王克林, 刘淑娟, 叶莹莹, 潘复静, 何寻阳. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1801-1808.
- [39] Wei H, Deng Y S, Huang J, He L, Tang Q Y, Xiao Y. A quantitative study of the influence of soil organic carbon and pore characteristics on the stability of aggregates of the Karst peak-cluster depression area in Southwest China. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(1): 312-330.
- [40] 俞月凤, 何铁光, 杜虎, 韦彩会, 蒙炎成, 李忠义, 张野, 王瑾, 胡钧铭, 苏天明, 范适. 桂西北喀斯特地区不同退化程度植被群落物种组成及多样性特征. 广西植物, 2019, 39(2): 178-188.
- [41] 郑振华, 田芳, 曹现勇, 许清海, 李月丛, 阳小兰. 中原地区不同植被类型花粉组合特征及对周围植被的代表性. 地理与地理信息科学, 2008, 24(4): 92-97.
- [42] 许清海, 李月丛, 阳小兰, 郑振华. 北方草原区主要群落类型表土花粉分析. 地理研究, 2005, 24(3): 394-402.
- [43] 郝秀东, 欧阳绪红, 郑丽波, 钟华, 汪美芳. 浙江嵊州西白山表土花粉的初步研究. 地理科学, 2020, 40(6): 1010-1018.
- [44] 龙香月, 黄康有, 陈聪, 谢德豪, 水坤春, 李宏卫, 郑卓. 华南亚热带武夷山地区垂直植被带表土孢粉散布规律. 热带地理, 2023, 43(6): 1005-1020.
- [45] 李永飞, 贺杰, 李春海, 许斌, 谢贤健. 云南丽江老君山表土花粉与植被关系的研究. 微体古生物学报, 2018, 35(1): 51-64.