

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.264>



# 孢粉证据揭示 MIS5a 以来福建东北沿海地区 人类活动、海平面及气候变化

于俊杰<sup>1</sup>, 彭博<sup>1</sup>, 兰佑<sup>2</sup>, 武彬<sup>1</sup>, 王继龙<sup>1</sup>, 丁大林<sup>1,3</sup>, 劳金秀<sup>1</sup>,  
李帅丽<sup>4</sup>, 戴璐<sup>4\*</sup>

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016
2. 福建省第四地质大队, 福建宁德 352000
3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100
4. 宁波大学昂热大学联合学院, 浙江宁波 315211

**摘要:** 通过获取了位于福建省宁德市海岸带的两个钻孔, 并使用孢粉分析的方法来重建古环境. 光释光和放射性碳十四测年结果表明, 钻孔中最老的沉积物来自于深海氧同位素 (MIS5a) 阶段. 孢粉组合中, 海相沟鞭藻出现在 MIS5a, MIS3 早期和早、中全新世阶段, 反映了这些时段的海侵事件. MIS5a 以来, 孢粉组合受控于常绿栎 (*Quercus*) 和松属 (*Pinus*), 指示了周边地区一直被亚热带阔叶林和松林所覆盖, 表现了偏暖的亚热带气候. 因此, 孢粉证据揭示了末次盛冰期时该地区不存在大幅度的降温. 芒萁属孢子和草本花粉的剧增指示了晚全新世以来宁德地区人类活动对天然植被的破坏.

**关键词:** 福建宁德; 孢粉; 人类活动; 海平面变化; 深海氧同位素 5a 阶段; 海洋地质.

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2021)01-281-12

收稿日期: 2019-10-21

## Palynological Record Revealed Anthropogenic Deforestation, Sea Level and Climate Changes since Marine Isotope Stage 5a in the Northeastern Coast of Fujian Province

Yu Junjie<sup>1</sup>, Peng Bo<sup>1</sup>, Lan You<sup>2</sup>, Wu Bin<sup>1</sup>, Wang Jilong<sup>1</sup>, Ding Dalin<sup>1,3</sup>, Lao Jinxiu<sup>1</sup>, Li Shuaili<sup>4</sup>, Dai Lu<sup>4\*</sup>

1. Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China
2. No.4 Geological Brigade of Fujian Province, Ningde 352000, China
3. Key Lab of Submarine Geoscience and Prospecting Techniques, MOE, Qingdao 266100, China
4. Angers Joint Institute of Ningbo University, Ningbo 315211, China

**Abstract:** In this study, we analyzed pollen samples from two drilling cores located on the coast near Ningde city of Fujian Province for reconstruction paleoenvironment. Optical stimulated luminescence (OSL) and AMS <sup>14</sup>C dating revealed that the oldest age in both cores was marine isotope stage (MIS5a). In pollen assemblages, marine dinoflagellate cysts occurred in MIS5a, early MIS3, early and middle Holocene, reflecting the transgression events in these phases. Since MIS5a, pollen assemblages were

**基金项目:** 中国地质调查局“宁德海岸带陆海统筹综合地质调查”项目 (No. DD20189505).

**作者简介:** 于俊杰 (1983-), 男, 高级工程师, 主要从事海岸带与第四纪地质调查、研究工作. ORCID: 0000-0002-8493-178X. E-mail: 25320701@qq.com

**\*通讯作者:** 戴璐, ORCID: 0000-0002-5883-9752. E-mail: dailu@nbu.edu.cn

**引用格式:** 于俊杰, 彭博, 兰佑, 等, 2021. 孢粉证据揭示 MIS5a 以来福建东北沿海地区人类活动、海平面及气候变化. 地球科学, 46(1):281-292.

dominated by evergreen *Quercus* and *Pinus*, indicating that surrounding area was consistently covered by subtropical evergreen broadleaved forest and pine forest, which associated with warm subtropical climate. Therefore, this study confirmed that not obvious cooling occurred during the last glacial maximum (MIS2). Strong increase of *Dicranopteris* spores and non-arboreal pollen reflected that the human activity destroyed natural forest since the late Holocene in Ningde area.

**Key words:** Ningde city of Fujian province; pollen; human activity; sea level change; early last glaciation; marine geology.

## 0 引言

在气候历史中,某一地区的气候变化往往与全球性的冰盖消长、海平面的升降和人类活动存在着强烈的交互作用关系(Ruddiman, 2008). 例如,多种古气候证据揭示了全新世气候与海平面变化促进了长江下游古文明的发展也导致了它的衰落(Liu *et al.*, 2018). 中国北方中全新世时的人类活动与季风变化存在着强烈的关联(刘林敬等, 2018). 冰期时的气候也与生物活动存在着紧密的相互影响关系(殷鸿福等, 2018). 因此,揭示第四纪气候变化的规律与机理对于正确认识全球气候变化与人类活动的关系具有重要的意义.

中国东部气候受到东亚季风的控制,该区域的石筭和深海沉积物古气候记录指示了第四纪中国热带和亚热带地区季风气候的演变同时受到极低和赤道地区的气候过程影响(Wang *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2005). 迄今为止,一些孢粉学研究聚焦于中国中、南亚热带的植被重建,目的在于揭示晚第四纪低纬度地区季风的变化规律,例如,福建南部和东部的孢粉组合反映了末次冰期时中亚热带山地地区落叶阔叶成分的增加,指示了更为寒冷的气候(Zheng and Li, 2000; Yue *et al.*, 2012). 这些记录与西太平洋的海洋孢粉组合相对应,例如,来自于冲绳海槽的深海孢粉记录展示了东亚低纬度地区冰期时温度的降低(Zheng *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2013). 福建东部海岸带是陆地与海洋的交互区,地质时期的海平面变化可以使得海岸带沉积物同时记录陆地与海洋的古环境变化信息,可为古环境重建的海陆对比提供依据(Rolett *et al.*, 2011). 本研究中,我们选取位于福建省东部宁德市附近的海岸带沉积物进行孢粉分析,试图揭示深海氧同位素(MIS5a)阶段以来中国东部亚热带地区的植被、气候、海平面变化与人类活动的历史.

## 1 区域环境

宁德市位于福建省东北部,邻接东海. 地形

以山地丘陵为主,境内千米以上山峰 696 座,最高峰海拔 1 649 m. 气候属于中亚热带季风气候,年均气温为 20 °C 左右,最冷月平均气温为 10 °C 左右,年平均降水量为 1 600 mm.

该地区地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,植物群落主要由壳斗科的栲属(*Castanopsis*)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)、杜英科(Elaeocarpaceae)等组成. 在内陆高海拔区域,少量分布着落叶阔叶植物,它们包括栓皮栎(*Quercus variabilis*)、白栎(*Quercus fabri*)、茅栗(*Castanea seguinii*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等. 在海拔 1 100 m 以下,马尾松(*Pinus massoniana*)、短尾越橘(*Vaccinium carlesii*)、白栎群落的分布是非常广阔的. 在沿海的三沙湾,零散分布着由秋茄(*Kandelia candel*)所组成的红树林. 该地区的常绿阔叶林被砍伐后,先锋草本植物包括芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)和五节芒(*Miscanthus floridulus*)等(林鹏等, 1990).

## 2 研究材料与方法

研究材料是位于宁德市东部三沙湾内的 NDGK2 和 NDQK5 钻孔. NDGK2 钻孔位于海湾的南部(26°36'24.89"N, 119°38'10.28"E),总长为 54.7 m. 在本研究中,我们选择 7.5~54.7 m 段的淤泥质粘土、粘土和粉砂质粘土样品进行孢粉分析,共取样 55 个. NDQK5 钻孔位于海湾的北部(26°42'18.47"N, 119°36'31.51"E),钻孔总长为 47.7 m. 在本研究中,我们选择 2.5~47.7 m 段的淤泥质粘土、粘土和粉砂质粘土样品进行孢粉分析,共取样 91 个.

对于年代框架的建立,我们使用光释光和 AMS <sup>14</sup>C 测年的方法. 光释光样品的测试分析在南京师范大学进行,共 8 个样品(NDGK2 孔 5 个, NDQK5 孔 3 个). AMS <sup>14</sup>C 测年工作在北京大学第四纪测年实验室进行,共 19 个样品(NDGK2 孔 10 个, NDQK5 孔 9 个). AMS <sup>14</sup>C 测年材料包括植物残体、碳化木碎屑、螺、贝壳等. 我们使用 IntCal13 atmospheric curve 树轮校

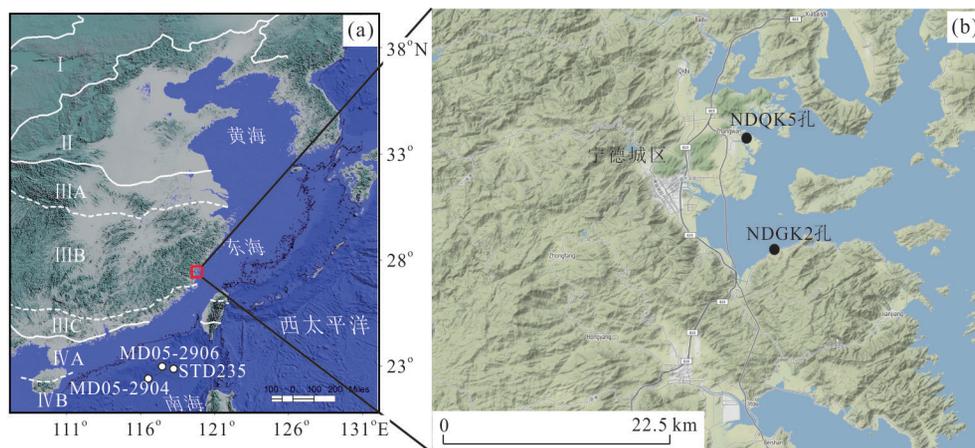


图1 中国东部植被区划(a)以及钻孔位置(b)

Fig. 1 Vegetation regionalization in eastern China (a) and location of sample sites (b)

图 a 中: I. 温带草原; II. 温带落叶阔叶林; III<sub>A</sub>. 北亚热带常绿-落叶阔叶混交林; III<sub>B</sub>. 中亚热带常绿阔叶林; III<sub>C</sub>. 南亚热带常绿阔叶林; IV<sub>A</sub>. 北热带季雨林和热带雨林; IV<sub>B</sub>. 南热带季雨林和热带雨林; 下部 3 个钻孔表示图 5 中所引用的钻孔的位置; 区划图数据引自吴征镒(1980); 图 a 中的红框表示图 b 中所显示的福建省宁德市的地理位置

正曲线对获得的测年数据进行校正,得到距今的日历年(Reimer *et al.*, 2013)(表 1)。

对于孢粉分析,我们鉴定两个钻孔的孢粉样品 146 个。所有样品被烘干称量,另外加入一片石松孢子(27 637±593 粒/片)用于计算花粉的浓度。我们使用氢氟酸和盐酸处理样品,用于去除样品中的硅质和钙质杂质。经化学处理后的样品残渣,放入超声波振荡器中,通过 7 μm 网筛除去剩余杂质,最后沉淀出花粉颗粒用于收集和鉴定。对于每个样品,至少 200 粒花粉和孢子被统计。花粉鉴定使用奥林巴斯 BX53 光学显微镜,放大倍率为 400~1 000 倍。我们使用 TILIA2.0.29 软件建立花粉百分比和浓度图,百分比是依据总的花粉和孢子数。浓度计算公式为:

$$\text{孢粉浓度(粒/克)} = \frac{\text{统计到的孢粉数量(粒)} \times 27\ 637}{\text{样品重量(克)} + \text{统计到的外加石松数量(粒)}}$$

花粉鉴定包括陆生植物花粉和孢子、水生植物花粉、淡水藻和沟鞭藻囊孢。

### 3 研究结果

#### 3.1 年代框架

**3.1.1 AMS <sup>14</sup>C 和光释光测年** NDGK2 钻孔顶部年代为 641~589 a B.P., 35.1 m 至底部的岩心年龄超过 AMS <sup>14</sup>C 测试范围,意味着超过距今 5 万年。全新世阶段的沉积物被很好的保存,20.9 m 处的年龄发生了明显的倒转,不能被使用(表 1)。由于低海平面,大多数末次冰期时的陆相沉积物被剥蚀,可能

存留一部分,例如 33.10~31.85 m。NDQK5 钻孔底部年代超过 5 万年,末次冰期时的沉积物被保留的较多,主要集中于 22.9~30.1 m 段(表 1)。

NDGK2 钻孔底部光释光测年结果出现多个倒转,大致的年龄年代范围为距今 9~6 万年左右。NDQK5 钻孔下部的光释光测年结果出现严重的倒转,这些数据不被使用(表 2)。

**3.1.2 NDGK2 和 NDQK5 孔的地层时代** 对于超出 AMS <sup>14</sup>C 测年范围的地层,我们通过钻孔中的高海平面阶段与全球深海氧同位素阶段对比来判断地层的时代(图 2)。原理在于,后者指示了全球气候的冷暖和冰盖规模,而冰盖规模与海平面变化紧密相关,钻孔中的高海平面阶段可被海相沟鞭藻所指示。NDGK2 钻孔下部 54.7~53.3 m 处,丰富的海相沟鞭藻指示了高海平面,这一时段处于距今 9~6 万年范围内(图 2),可能对应于 MIS5a 全球性高海平面阶段(图 6)。除此之外,NDGK2 钻孔底部孢粉组合(孢粉带 1)以松属花粉为主(图 3),这一组合特征与 MIS5a 阶段南海和冲绳海槽的孢粉组合极为类似(孙湘君和罗运利,2001;郑卓等,2013),进一步证明了孢粉带 1 处于 MIS5a 时段。NDQK5 钻孔下部地层超出 AMS <sup>14</sup>C 测年范围(表 2),海相沟鞭藻的缺乏指示该钻孔的底部可能仍为末次冰期时的低海平面阶段(MIS4),时代没有达到 MIS5a(图 2)。NDGK2 钻孔中部 38.5~35.5 m 处,海相沟鞭藻的出现指示了高海平面(图 2)。这个时段超出了 AMS <sup>14</sup>C 测年范围,但晚于 MIS4,所以这段地层

表 1 NDGK2 和 NDQK5 钻孔的 AMS  $^{14}\text{C}$  测年结果Table 1 AMS  $^{14}\text{C}$  and OSL dating samples and ages

样品号	深度(m)	样品	AMS $^{14}\text{C}$ 年代(a B.P.)	树轮校正后的年代范围 $2\sigma$ (95.4%)(a B.P.)
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -1	8.00	植物残体	580±20	641~589
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -2	14.70	螺	4 580±20	5 323~5 284
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -3	20.90	碳化植物残体	2 230±20	2 270~2 155
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -4	24.90	片状贝壳碎片	8 195±25	9 258~9 032
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -5	25.75	贝壳碎屑	8 225±25	9 290~9 090
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -5-2	25.75	植物残体	7 995±25	8 999~8 770
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -6	31.85	碳化植物残体	14 450±35	17 811~17 450
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -7	33.10	碳化植物残体	36 320±230	41 485~40 408
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -8	35.10	碳化植物残体	>43 320	超过测试范围
NDGK2 $^{14}\text{C}$ -9	39.00	碳化植物残体	33 960±180	38 885~38 001
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -1	7.35	螺	6 560±25	7 508~7 426
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -2	12.47	螺	7 330±35	8 200~8 024
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -3	13.40	螺	7 365±25	8 220~8 154
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -4	18.90	双壳	8 120±35	9 134~8 993
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -5	22.90	泥炭	22 280±70	26 852~26 206
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -6	23.60	碳化植物残片	29 660±120	34 061~33 586
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -7	30.10	碳化植物残体	41 500±300	45 541~44 376
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -8	34.35	炭化木块	>43 320	超过测试范围
NDQK5 $^{14}\text{C}$ -9	36.70	炭化植物根茎	>43 320	超过测试范围

表 2 NDGK2 和 NDQK5 钻孔的光释光测年结果

Table 2 NDGK2 and NDQK5 OSL dating results of the borehole

样品编号	深度(m)	Th ( $10^{-6}$ )	error ( $10^{-6}$ )	U ( $10^{-6}$ )	error ( $10^{-6}$ )	年龄 (ka)	误差 (ka)	粒径( $\mu\text{m}$ )
NDGK2-OSL-2	41.20~41.30	3.85	2.61	3.16	3.54	92.2	7.4	38~63
NDGK2-OSL-3	46.90~47.00	0.15	0.15	0.15	0.15			38~63
NDGK2-OSL-4	48.90~49.00	1.05	1.40	1.44	1.95	64.8	6.3	38~63
NDGK2-OSL-5	53.30~53.40	0.06	0.06	0.06	0.06	92.2	6.9	38~63
NDGK2-OSL-6	54.45~54.55	11.90	11.40	10.30	18.30	67.0	8.2	38~63
NDQK5-OSL-2	32.90~33.00	1.05	1.40	1.44	1.95	64.5	4.7	38~63
NDQK5-OSL-3	42.90~43.00	11.90	11.40	10.30	18.30	7.4	2.9	38~63
NDQK5-OSL-4	46.90~47.00	11.90	11.40	10.30	18.30	36.8	0.7	38~63

可能对应于 MIS3 早期全球性的海平面升高时期(图 6)。邻近的 NDQK5 钻孔 32.9~30.9 m 段地层出现少量的海相沟鞭藻,与 NDGK2 钻孔中部相对应,共同指示了 MIS3 早期的海侵地层(图 6)。

### 3.2 孢粉鉴定结果

**3.2.1 NDGK2 钻孔** 我们鉴定出 48 个科、属的花粉类型,另外还包括水龙骨科(Polypodiaceae)、芒萁属(*Dicranopteris*)等孢子,以及淡水的环纹藻和海相沟鞭藻(图 3)。孢粉组合中,木本花粉含量占据绝对优势,含量在 80% 左右,它们主要由热带、亚热带

阔叶成分组成,平均含量达到 57%。次要成分是松属(*Pinus*),平均含量为 23%。另外有少量的热带、亚热带针叶林以及高海拔的温带针叶林成分。在热带、亚热带成分中,常绿栎(*Quercus*)是最主要的,平均含量为 40%。在温带成分中,落叶栎(*Quercus*)、桤木(*Alnus*)和鹅耳枥属(*Carpinus*)花粉较为丰富。草本花粉含量远低于木本花粉,藜科(*Chenopodiaceae*)是主要成分(平均含量仅为 5.8%),其次是莎草科(*Cyperaceae*)、禾本科(*Poaceae*)和蒿属(*Artemisia*)等。在水生草本花粉中,香蒲属(*Typha*)花粉

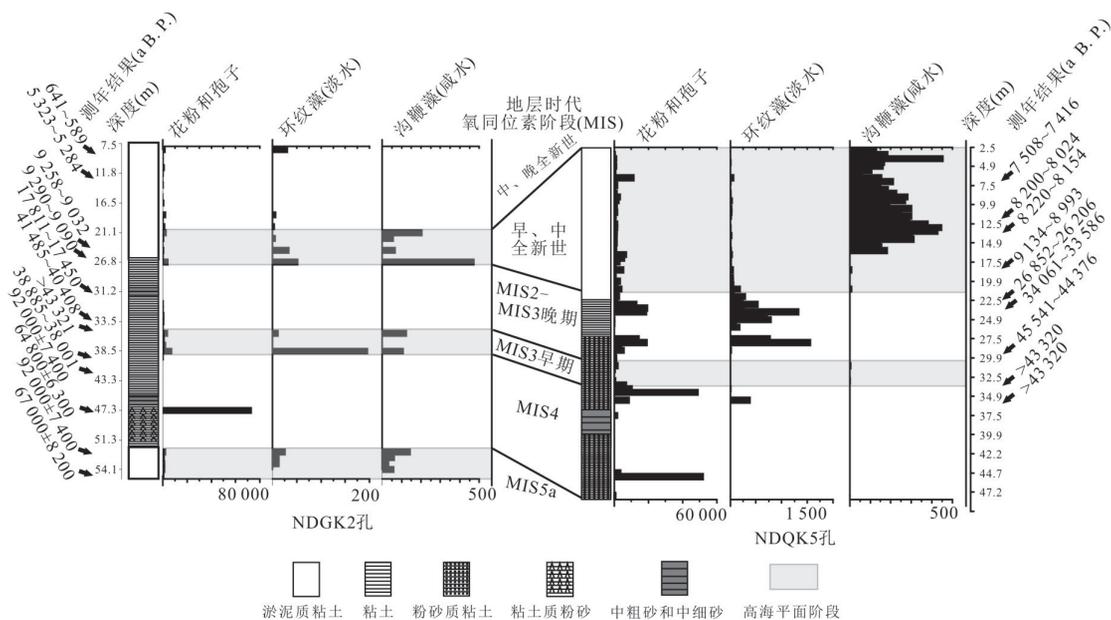


图2 NDGK2孔与NDQK5孔中孢粉和藻类的浓度及地层对比

Fig. 2 Stratigraphy and concentration of pollen, concentricytes and marine dinocysts of cores NDGK2, NDQK5 底部数字单位为粒/克

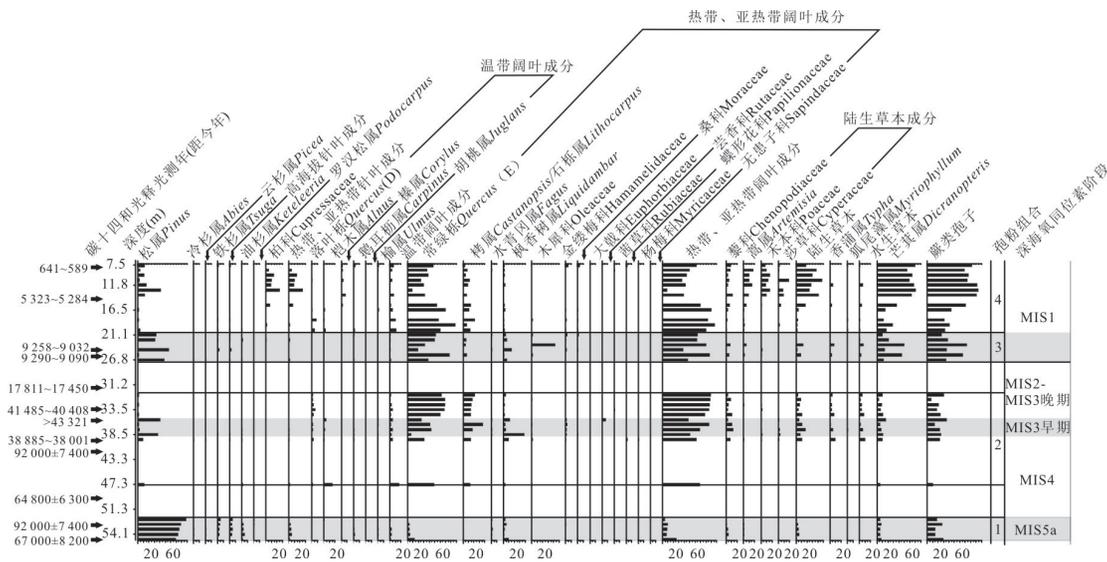


图3 NDGK2钻孔主要花粉类型百分比图

Fig. 3 Percentage of major pollen taxa of core NDGK2

花粉百分比基于总花粉数量,孢子百分比基于花粉和孢子总数,底部数字单位为%;在 Quercus 中,D代表落叶,E代表常绿;阴影表示高海平面阶段

最为丰富,但其总体含量极低(图3)。

根据孢粉百分比及浓度的变化,我们可以从孢粉谱中提取出4个不同的孢粉组合(图3)。

(1)孢粉组合1:松属—热带、亚热带阔叶林成分—蕨类孢子(54.7~53.3 m, MIS5a)。

本孢粉组合以木本成分为主(70%~99%),其中,松属花粉是最主要的成分,平均含量达到78%,

次要成分是常绿栎(5%)、枫香树属(Liquidambar)(4%)和油杉属(Keteleeria)(2.3%)等。高海拔针叶成分含量高于钻孔上部,平均含量为3.6%,其中最主要的成分是铁杉属(Tsuga)。温带阔叶成分零星出现,其中的榆属(Ulmus)是主要成分。草本花粉含量低于上部,最主要的成分是藜科(Chenopodiaceae),平均含量仅为3.6%。蕨类孢子的含量低于钻孔

上部,平均含量为 21%。本带含有海相沟鞭藻,集中在 54.1~53.3 m 处(图 2)。

(2) 孢粉组合 2: 栲属(常绿)–栲属/石栲属(*Castanopsis/Lithocarpus*)–蕨类孢子(47.3~31.8 m, MIS4-2)。

本孢粉组合以木本成分为主(平均含量为 88%)。与孢粉组合 1 不同的是松属花粉含量骤减至 8.5%,主要的木本成分是常绿栲,平均含量为 47.8%,次要成分是栲属/石栲属(15%)和枫香树属(7.1%)等。草本花粉含量较低,主要成分是藜科(6.1%),水生草本花粉含量为钻孔中最高(3.6%),孢子的含量较下部有所增加。孢粉浓度变化极大,最高浓度出现在 47.3 m 处。海相沟鞭藻出现在 38.5 m 和 35.5 m 处。

(3) 孢粉组合 3: 松属–常绿栲–蕨类孢子–刺甲藻属(*Spiniferites*)(26.8~21.1 m, 早、中全新世)。

本孢粉组合以木本成分为主(平均含量为 93.6%)。与下部孢粉组合不同的是,草本花粉含量减少至 6.4%,松属花粉含量有所增加,达到 28.3%。主要的木本成分是常绿栲,平均含量为 45%,次要成分是松属(28.3%)和枫香树属(7.1%)等。蕨类孢子含量较下部有明显的增加且有继续升高的趋势,平均含量达到 45.5%,芒萁属(*Dicranopteris*)是主要的成分。该孢粉组合普遍含有沟鞭藻囊孢,主要成分是咸水环境中的刺甲藻属,浓度为全钻孔最高。

(4) 孢粉组合 4: 常绿栲–栲属/石栲属–陆生草本–芒萁属孢子(20.5~7.5 m, 晚全新世)。

本孢粉组合以木本成分为主(平均含量为 77.6%),其中常绿栲是最主要的成分(45.7%),其次是栲属/石栲属(9.1%)和松属(8.6%)等。柏科花粉的含量较下部有大幅度的升高,平均含量达到 6%。草本花粉含量较下部大幅度升高,达到 22.4%,主要成分包括藜科、蒿属(*Artemisia*)与禾本科(Poaceae)等。孢子含量高于下部,平均为 66.3%,主要成分是芒萁属,平均含量为 46.7%。本孢粉组合不包含海相沟鞭藻。

**3.2.2 NDQK5 钻孔** 我们鉴定出 57 个科、属的花粉类型,另外还包括水龙骨属、芒萁属等 5 种类型的蕨类孢子,以及环纹藻、双星藻和海相沟鞭藻(图 4)。孢粉组合中,木本花粉含量占据绝对优势,含量在 87% 左右,它们主要由热带、亚热带阔叶成分组成,平均含量达到 52.2%。次要成分是松属,平均含量为 27%。另外有少量的热带、亚热带

针叶林以及高海拔的针叶林成分。在热带、亚热带阔叶成分中,常绿栲是最主要的,平均含量为 37%。在温带成分中,仅有鹅耳枥属花粉较为丰富。草本花粉含量远低于木本花粉,藜科是主导成分(平均含量仅为 3.8%),其次是莎草科、禾本科和蓼科等。在水生草本花粉中,香蒲属花粉最为丰富,但其总体含量极低(图 3)。根据主要孢粉类型百分比的有序聚类分析结果,NDQK5 孔的孢粉组合可被划分为 4 个孢粉带和 2 个亚带(图 4)。

(1) 1 带: 常绿栲–栲属/石栲属–蓼科花粉组合(47.7~34.9 m, MIS4)。该带的花粉比较贫乏,孢粉组合以木本为主(平均含量为 74%),其中常绿栲是最主要的成分(44.5%),次要成分是栲属/石栲属(11.6%),其他木本成分零星出现。陆生草本花粉含量低,主要成分是蓼科(9%)。蕨类孢子含量较低(19%),海相沟鞭藻囊孢是缺失的。

(2) 2 带: 松属–常绿栲–栲属/石栲属花粉组合(34.5~22.5 m, MIS3-2)。该带的孢粉浓度较高,孢粉组合以木本为主(平均含量为 78%),其中常绿栲是最主要的成分(39%),次要成分是松属(17%)和栲属/石栲属(8.5%)等。在陆生草本花粉中,藜科是最丰富的(6.1%),其次是禾本科(5.8%)、菊科(3.5%)和蓼科(3.0%)等。蕨类孢子含量较 1 带略微升高,达到 22.3%。在该带的上部(MIS3 晚期~MIS2),高海拔针叶成分中的铁杉属(*Tsuga*)花粉出现高值,含量达到 4.4%。在该带的中部(可能为 MIS3 中期),零星出现海相沟鞭藻,淡水环纹藻浓度达到全钻孔中最高(图 2)。

(3) 3 带: 常绿栲–栲属/石栲属–藜科花粉组合(21.9~15.9 m, 末次冰消期–早全新世)。该带的孢粉浓度较低,孢粉组合以木本为主(平均含量为 86.5%),其中常绿栲是最主要的成分(50.7%),次要成分是栲属/石栲属(15.8%)等。松属花粉含量较 2 带有大幅度的下降,仅为 6.1%。陆生草本花粉含量以藜科为主(7.9%),其他成分零星出现。蕨类孢子含量较 2 带更高(29.6%),主要成分为芒萁属和水龙骨科。在该带的上部(早全新世阶段),海相沟鞭藻零星出现(图 2)。

(4) 4 带: 松属–常绿栲–枫香树属花粉组合(15.5~2.5 m, 早、中全新世)。该带花粉浓度较低,孢粉组合以木本花粉为主(平均含量为 97.2%),其含量高于下部各带。根据花粉百分比的变化,本带可进一步被划分为两个亚带(图 4a, 图 4b)(图 4)。

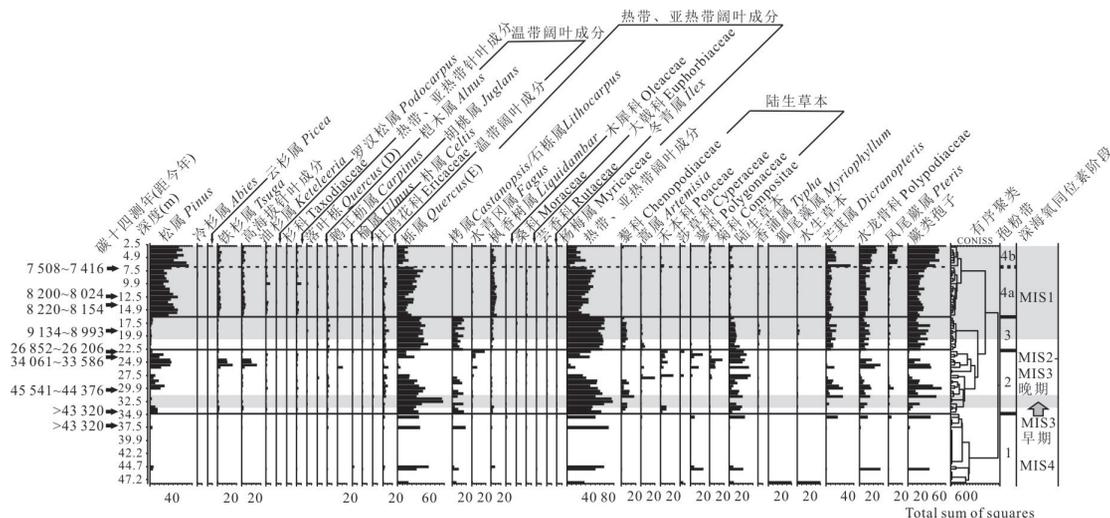


图 4 NDQK5 钻孔主要花粉类型百分比图

Fig. 4 Percentage of major pollen taxa of core NDQK5

花粉百分比基于总花粉数量,孢子百分比基于花粉和孢子总数;底部数字单位为%;在 *Quercus* 中,D 代表落叶,E 代表常绿;阴影表示高海平面阶段

(5) 4a 亚带 (15.5~6.5 m): 木本成分以松属花粉为主 (43.17%)。热带、亚热带阔叶花粉是次要的木本成分,主要由常绿栎 (32.2%) 和枫香树属 (7.7%) 所组成。蕨类孢子含量较上带高,达到 28.0%。该亚带的海相沟鞭藻浓度为全钻孔最高。

(6) 4b 亚带 (5.9~2.5 m): 木本成分以松属花粉为主,含量高于 4a 亚带,达到 66.8%。热带、亚热带阔叶花粉含量降低为 22.3%,温带阔叶花粉也低于孢粉带 3、2 和 4a 亚带。蕨类孢子含量较 4a 带有大幅度升高,达到 60.5%。该亚带有非常丰富的海相沟鞭藻。

## 4 讨论

### 4.1 MIS5a 以来福建宁德地区的海平面变化

第四纪时期,深海底栖有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  值曲线揭示了全球冰量存在着轨道时间尺度上的周期性变化。高纬度冰盖规模的变化直接导致海平面出现大幅度的波动,例如南中国海的沉积物记录了末次盛冰期时海平面较现在低 120 m 以上 (Hanebuth *et al.*, 2011)。在中国东南沿海,大量的研究揭示了晚第四纪以来海平面的变化,特别是早全新世 7 000 a 以来的海平面变化导致了人类的迁徙,促进了古文明的广泛传播。然而,构造运动和“均衡代偿”作用导致每个地区的相对海平面变化并不一致。例如 MIS3 阶段的沉积证据显示,北美地区的海平面较现代降低 25 m (Wright *et al.*, 2009),中国黄河三角洲地区的海平面较现代低 35~60 m (Liu *et*

*al.*, 2009)。Wang (2013) 识别了长江下游 MIS3 和 MIS5 阶段的海侵地层,并提出了地壳的抬升导致了全新世高海平面沉积物的缺失。

迄今为止,大量的古海平面证据揭示了福建沿海地区晚第四纪的海侵,它们包括全新世的“长乐海进”,晚更新世的“福建海侵”和“琅岐海侵”等 (王绍鸿等, 1994; 马明明等, 2016) (图 6)。这些研究证据主要基于古海岸线的标志物,例如海滩岩、盐沼泥炭等,少有孢粉证据。在本研究中,我们试图基于钻孔的海相沟鞭藻囊孢和易于被水流传播的松属花粉含量,连续的重建福建东部地区多个海侵事件。根据海相沟鞭藻的出现来判断海相沉积环境的方法广泛用于新生代的古环境重建工作中。本研究的两个钻孔均含有丰富的沟鞭藻,主要种类为 *Spiriferites* 和 *Operculodinium*, 它们属于咸水广布种 (吴国瑄和孙湘君, 2000)。因此,NDGK2 孔中的沟鞭藻可靠的指示了 3 个海侵阶段,包括早全新世, MIS3 和 MIS5a (图 2)。光释光测年结果显示,NDGK2 孔底部最老的年龄处于距今  $92\ 000 \pm 7\ 400 \sim 67\ 000 \pm 8\ 200$  a 之间,该孔的底部高海平面阶段可能对应于 MIS5a。在 NDQK5 孔,沟鞭藻出现在两个阶段,指示了早全新世和 MIS3 阶段的海侵 (图 2)。

在海洋孢粉组合中,松属花粉的丰度与海平面 (郑卓等, 2013) 和海岸线距离 (Dai *et al.*, 2014) 的关系已被讨论。基于最近发表的研究数据,我们发现,南海北部钻孔中松属花粉含量与海平面升高成正相关关系,这主要是由于松属花粉带有气囊,更

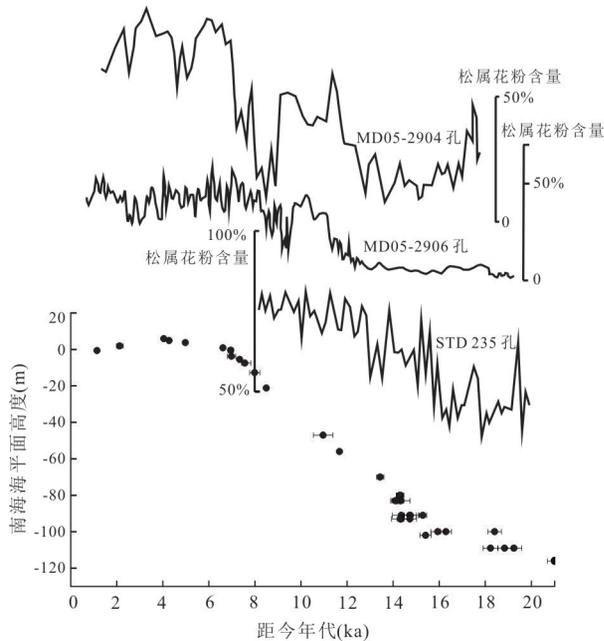


图5 南海北部3个钻孔松属花粉百分比与区域海平面重建的对比

Fig. 5 Comparison between *Pinus* pollen percentages of three cores in the northern South China Sea and reconstruction of regional sea-level

MD05-2906孔数来自 Dai *et al.* (2015); MD05-2904孔数据来自常琳等 (2013); STD235孔数据来自 Yu *et al.* (2017); 海平面数据来自 Geyh *et al.* (1979) 和 Hanebuth *et al.* (2011)

容易被风和水流远距离传播,这导致了松属花粉的相对含量随着与陆地距离的增加而增加(图5).因此,在中国东南地区海洋孢粉组合中,高含量的松属花粉可以指示沉积点与陆地较远的距离.在本研究的两个钻孔中,高含量的松属花粉分别出现在 MIS5a 和早全新世(图3,图4),这都对应于海相沟鞭藻所指示的高海平面阶段.在 NDGK2 钻孔下部 MIS5a 时段,松属花粉在孢粉谱中占据绝对优势(平均含量达 78%,孢粉组合 1)(图3),这高于该钻孔的上部,也高于临近 NDQK5 钻孔早、中全新世高海平面时期的松属花粉含量(平均为 50%)(图4).基于 NDGK2 钻孔高含量的松属花粉,我们推测 MIS5a 时的钻孔位置距离陆地较远,宁德地区存在着海侵现象,且相对海平面较高.在超出碳十四测年范围的 MIS3 早期,两个钻孔中均出现少量的海相沟鞭藻,这揭示了当时的高海平面阶段(图2).然而,较低的松属花粉含量指示了当时的海平面高度低于 MIS5a 和早全新世.在早全新世,两个钻孔中高浓度的海相沟鞭藻以及高含量的松属花粉含量均指示了高海平面阶段(图2~图4).本研究

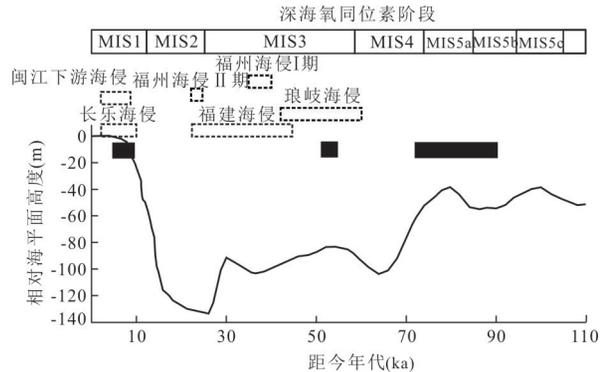


图6 全球平均相对海平面重建及福建沿海地区高海平面时段  
Fig. 6 Reconstruction of global sea-level and high sea-level intervals in coasts of Fujian Province

黑色棒和虚线框长度对应于下部年代,分别指示了本研究和其他人研究揭示的高海平面时段(王绍鸿等,1994;马明明等,2016).全球平均相对海平面重建结果修改自文献 Rohling *et al.* (2014)

的海平面重建显示,最近十万年以来宁德地区最高的相对海平面出现在 MIS5a 阶段(图6),这对应于全球平均海平面的变化.早、中全新世该区域出现相对海平面的高值,这也较好的对应于南海和福建沿海的海平面重建结果(图5和图6).

#### 4.2 MIS5a 以来闽东地区的植被与气候变化

根据中国植被区划,福建宁德地区处于中亚热带和南亚热带的边界地区(图1),这里的气候对全球气候变化可能非常的敏感. MIS5a 阶段, NDGK2 孔中松属花粉在孢粉谱中占据绝对优势,平均含量达 78%(孢粉组合 1). 因此,我们推测该时段宁德周边地区分布着茂密的松林,在高海拔地区零星分布着铁杉. 极少的温带阔叶成分证明了当时较为温暖的气候(图3). 孢粉组合特征也很好的对应于相邻区域 MIS5a 阶段的古气候重建(雒聪文等,2019). 例如,南海北部 ODP-1144 孔该时段松属花粉占主导,体现了高海平面(孙湘君和罗运利,2001). 冲绳海槽 MD98-2194 孔中,该时段孢粉组合受控于松属,指示了高太阳辐射量和强夏季风(郑卓等,2013). 在日本东部岸外的 MD01-2421 孔, MIS5a 晚期时突然增多的柳杉属 (*Cryptomeria*) 和金松属 (*Sciadopitys*) 花粉指示了当时非常温暖湿润的气候 (Igarashi and Oba, 2006).

在 MIS4 阶段(NDGK2 孔孢粉组合 2 下部, NDQK5 孢粉带 1 和孢粉带 2 下部),孢粉零星出现,但出现的孢粉样品具有极高的浓度,这对应于 MIS4 低海平面时的陆相沉积环境(图2~图4). 以常绿栎和栲属/石栎属为主导的孢粉组合指示了钻

孔周边陆地被茂密的亚热带常绿阔叶林所覆盖(图3,图4)。结合较少的温带阔叶成分,我们推测当时该区域受控于偏暖的亚热带气候,并没有明显的降温。对于 MIS4 阶段的气候,位于钻孔偏北纬度的冲绳海槽和偏南纬度的南海北部孢粉记录均显示草本花粉增加,指示气候有所变干(孙湘君和罗运利,2001;郑卓等,2013)。邻近纬度的海洋孢粉记录没有显示明显的变冷趋势,而在更为偏北的西太平洋 MD01-2421 孔孢粉记录中则记录了亚高山针叶林花粉略微增多,指示了变冷的气候(Igarashi and Oba, 2006)。我们的孢粉记录表明,末次冰期时 MIS4 冰盖扩张并未对位于亚热带南部沿海的宁德地区的气候产生明显的影响。

在 MIS3 早期(NDGK2 孔孢粉组合 2 上部, NDQK5 孢粉带 2 中部)对应于相对高海平面阶段,孢粉组合仍然受控于常绿栎和栲属/石栎属,但它们的含量更高(图3,图4),指示了周边地区茂密的亚热带常绿阔叶林,以及较为温暖的亚热带气候。这一结果很好的对应于宁德西部山地 SZY 孔的孢粉组合,那里 MIS3 早期时段的常绿栎花粉含量为全钻孔中最高,指示了温暖的气候(Yue *et al.*, 2012)。与此同时,位于福建省东部的台湾日月潭钻孔中,代表略高气温的冬青属(*Ilex*)和青冈属(*Cyclobalanopsis*)花粉同步地增加(Liew *et al.*, 2006)。类似的孢粉组合特征也出现在宁德南部的潮汕平原和南海北部的钻孔(Zheng and Li, 2000; Dai *et al.*, 2015)。MIS3 早期,中国南方石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录也显示了 MIS3 早期较强的夏季风(Wang *et al.*, 2001),南海北部表层海水温度也略有增加(Oppo and Sun, 2005)。我们推测, MIS3 早期阶段福建宁德发生海侵(图2),周边茂密的常绿阔叶林是对全球冰盖规模缩小以及较强的东亚夏季风的响应。

MIS3 中、晚期和末次盛冰期(MIS2)阶段处于低海平面期(NDGK2 孔孢粉组合 2 上部, NDQK5 孔孢粉带 2 中、上部和孢粉带 3 下部),两个钻孔位置均位于暴露的陆地上。其中, NDQK5 孔含有丰富的淡水藻,可能指示了湖泊沉积环境,这使得更长时间序列的沉积物得以保存(图2)。在 NDGK2 孔,该时段孢粉组合受控于常绿栎和栲属/石栎属,证明了周边存在茂密的亚热带常绿阔叶林(图3)。在 NDQK5 孔,铁杉属(*Tsuga*)为主导的热带针叶花粉成分突然增加。在福建省,铁杉属植物主要分布在海拔 1 200~1 800 m 以上(林鹏等,1990),其花粉数

量的增多指示了气候的转冷,分布在高海拔地区的铁杉向低海拔扩张。该钻孔中的陆生草本花粉含量增多,表现了钻孔周边存在着大面积的草地,可能由较为干旱的气候所导致的(图4)。两个钻孔的孢粉组合表明, MIS3 晚期和末次盛冰期期间,宁德地区山地仍然被亚热带阔叶林所覆盖,气候略微转冷和变干,然而,气候变化的幅度要小于中亚热带区域的山地孢粉记录。例如,在宁德西部山地的 SZY 钻孔,末次盛冰期时温带落叶阔叶花粉成分明显的增加(Yue *et al.*, 2012)。在更为偏西的大湖剖面,该时段的植被为落叶阔叶林,取代了现代的常绿阔叶林(萧家仪等,2007)。本研究与内陆地区古植被重建略有差异的原因可能在于,福建宁德地区北部存在着一系列的高山,高山的阻隔使得北来的冷空气对该地的影响有限。另外,靠近海洋受到暖湿气流的影响。现代的中国植被区划中,东部沿海地区中亚热带常绿阔叶林的南部界限较内陆地区明显的偏北,进一步证实了我们的推断(图1)。

早、中全新世,宁德地区受到海侵影响,钻孔地区均为海洋沉积环境(NDGK2 孔孢粉组合 3 和 NDQK5 孔孢粉带 3 上部和孢粉带 4)。两个钻孔的孢粉组合中,常绿栎和栲属/石栎属花粉含量达到了钻孔中的高值,指示了较为温暖的气候。类似的结果也出现在周边的孢粉记录中,例如,自距今 8 200 a 前亚热带常绿阔叶林开始扩张(Yue *et al.*, 2012),距今 8 000~4 000 a 时台湾中部山地的亚热带阔叶林处于扩张阶段(Liew *et al.*, 2006)。晚全新世的孢粉记录只存在于 NDGK2 孔,对应于孢粉组合 4(图3)。此时,以柏科(Cupressaceae)为主的热带、亚热带针叶成分和草本花粉含量增加,指示了温度和湿度的下降(图3)。然而, NDGK2 孔中晚全新世柏科花粉所指示的降温幅度小于 NDQK5 孔中 MIS3 晚期以铁杉扩张为特征的降温。原因在于,福建省现代的柏科植物自然分布海拔下限为 500 m,而铁杉为 700 m,铁杉属比柏科植物指示更为寒冷的气候。我们孢粉组合记录反映了,全新世早、中期较为温暖的气候,晚期略有降温,这一结果也较好地对应于全新世东亚季风强度的变化(Dykoski *et al.*, 2005)。

NDQK5 孔的孢粉组合出现了剧烈的变化,距今 8 000 多年前松属花粉开始突然增多(孢粉带 4a),距今 7 400 a 左右开始蕨类孢子开始增多(孢粉带 4b)(图4)。这些孢粉谱的突变可能关联

于高海平面,此时钻孔位置位于远离陆地,使得更容易被水流传播的松属花粉和水龙骨孢子具有更好的表现力.因此,孢粉谱的变化可能与气候波动无关,而是反映了海平面的变化.

#### 4.3 中、晚全新世植被变化对人类活动的指示

尽管全新世东亚季风和气候存在着波动和变化趋势(Dykoski *et al.*, 2005),但大幅度的气候变化证据是缺乏的.然而,在NDGK2孔,中、晚全新世时芒萁属孢子和草本花粉突然增多(孢粉组合4),并且成为孢粉谱中的主要成分(图3).这种孢粉谱的变化完全不同于相对温暖的MIS3早期和MIS5a阶段.我们推测孢粉谱的这些变化可能与人类活动对森林的干扰和破坏有关.因为现代福建省中亚热带阔叶林遭到人类破坏后,首先演替的植物包括芒萁、禾本科的五节芒等草本和灌木,随后生长的乔木包括马尾松、木荷等阳生性植物(林鹏等,1990).

大量的古环境数据揭示,古人类种植活动最早出现在早全新世时(距今10 000 a左右)中国东部的长江下游地区,随后向南传播,在中全新世时(距今6 000~5 000 a)出现在福建地区(Rolett *et al.*, 2011).闽江上游的南山遗址的大植物化石和植硅体表明,5 300~4 400 a B.P.南山遗址有水稻和黍粟的存在(Yang *et al.*, 2018),5 000~3 500 a B.P.时候,在庄边山、葫芦山、昙石山、黄瓜山和屏凤山等地,人类已开始种植水稻(Ma *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2018).福建省古人类活动对植被的干扰已有报道,例如,闽江下游6 000~5 500 a B.P.松属和禾本科花粉的增加与福州盆地人类活动有关(Yue *et al.*, 2012),在闽江下游晚全新世海退之后(距今1 900 a),人类对森林的破坏导致了芒萁、禾本科草本和松属植物的扩张(乐远福等,2016),同样的现象也出现在宁德西部的SZY钻孔(Yue *et al.*, 2012).基于NDGK2孔孢粉谱中芒萁孢子和草本花粉的剧增,我们判断NDGK2孢粉组合4上部可能表现了人类活动对天然森林植被的干扰(图3).结合测年数据可进一步得出结论,宁德沿海地区至少在晚全新世时就有人类开始在这里定居,这大大的扩展了我们对该地区古人类活动的认识.

## 5 讨论

福建宁德海岸带NDGK2和NDQK5钻孔中的

孢粉组合记录了MIS5a以来的古环境变化信息.基于孢粉组合与现代植被的对比,以及与周边孢粉证据的对比,我们可得出下列结论:

(1)MIS5a, MIS3早期和早、中全新世阶段,海相沟鞭藻的出现反映了宁德地区海侵事件的发生.其中, MIS5a和早、中全新世的相对海平面较高,海侵范围广.

(2)MIS5a以来,宁德地区一直被亚热带常绿阔叶林和松林所覆盖,表现了亚热带的气候.末次盛冰期时,该地区的降温幅度远小于近似纬度的内陆地区,证明了该地区气候对全球降温事件的响应并不敏感.

(3)晚全新世阶段,NDGK2孔中芒萁孢子和草本花粉的剧增指示了当时宁德地区古人类活动对森林的破坏.

## References

- Chang, L., Luo, Y.L., Sun, X.J., 2013. Paleoenvironmental Change Based on a Pollen Record from Deep Seacore MD05-2904 from the Northern South China Sea during the past 20 000 Years. *Chinese Science Bulletin*, 58(30): 3079–3087 (in Chinese with English abstract).
- Dai, L., Weng, C. Y., Lu, J., et al., 2014. Pollen Quantitative Distribution in Marine and Fluvial Surface Sediments from the Northern South China Sea: New Insights into Pollen Transportation and Deposition Mechanisms. *Quaternary International*, 325: 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.09.031>
- Dai, L., Weng, C. Y., Mao, L. M., 2015. Patterns of Vegetation and Climate Change in the Northern South China Sea during the Last Glaciation Inferred from Marine Palynological Records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 440: 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.08.041>
- Deng, Z. H., Hung, H. C., Fan, X. C., et al., 2018. The Ancient Dispersal of Millets in Southern China: New Archaeological Evidence. *The Holocene*, 28(1): 34–43. <https://doi.org/10.1177/0959683617714603>
- Geyh, M. A., Streif, H., Kudrass, H. R., 1979. Sea-Level Changes during the Late Pleistocene and Holocene in the Strait of Malacca. *Nature*, 278(5703): 441–443. <https://doi.org/10.1038/278441a0>
- Dykoski, C., Edwards, R., Cheng, H., et al., 2005. A High-Resolution, Absolute-Dated Holocene and Deglacial Asian Monsoon Record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1/2): 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.05.011>

- org/10.1016/j.epsl.2005.01.036
- Hanebuth, T. J. J., Voris, H. K., Yokoyama, Y., et al., 2011. Formation and Fate of Sedimentary Depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the Past Sea-Level Cycle and Biogeographic Implications. *Earth-Science Reviews*, 104(1/2/3): 92–110. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.09.006>
- Igarashi, Y., Oba, T., 2006. Fluctuations in the East Asian Monsoon over the Last 144 ka in the Northwest Pacific Based on a High-Resolution Pollen Analysis of IMAGES Core MD01-2421. *Quaternary Science Reviews*, 25(13/14): 1447–1459. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.11.011>
- Liew, P. M., Lee, C. Y., Kuo, C. M., 2006. Holocene Thermal Optimal and Climate Variability of East Asian Monsoon Inferred from Forest Reconstruction of a Sub-alpine Pollen Sequence, Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(3/4): 596–605. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.08.002>
- Lin, P., Qiu, X., Wu, Z.Q., et al., 1990. Vegetations of Fujian. Fujian Science and Technology Publishing House, Fuzhou, 91–116(in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Saito, Y., Wang, H., et al., 2009. Stratigraphic Development during the Late Pleistocene and Holocene Offshore of the Yellow River Delta, Bohai Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(4/5): 318–331. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2009.06.007>
- Liu, L. J., Li, C. A., Jie, D. M., et al., 2018. Paleoclimate Recorded by Phytolith in Anguli-Nuur Lake since Mid-Late Holocene. *Earth Science*, 43(11):4138–4148 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Sun, Q. L., Fan, D. D., et al., 2018. Early to Middle Holocene Sea Level Fluctuation, Coastal Progradation and the Neolithic Occupation in the Yaojiang Valley of Southern Hangzhou Bay, Eastern China. *Quaternary Science Reviews*, 189: 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.04.010>
- Luo, C.W., Ma, Y.Z., Wang, K. et al., 2019. Vegetation and Climate Inferred from Pollen Record in East Asian Region During MIS 5: A Review. *Advances in Earth Science*, 34: 540–551 (in Chinese with English abstract).
- Ma, M.M., Liu, X.M., Zhou, G.H., et al. 2016. A Review of Late Quaternary Transgression Studies and Some Basic Questions in Fujian Coastal Area. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 11(3): 9–19 (in Chinese with English abstract).
- Ma, T., Zheng, Z., Rolett, B. V., et al., 2016. New Evidence for Neolithic Rice Cultivation and Holocene Environmental Change in the Fuzhou Basin, Southeast China. *Vegetation History and Archaeobotany*, 25(4): 375–386. <https://doi.org/10.1007/s00334-016-0556-0>
- Oppo, D. W., Sun, Y. B., 2005. Amplitude and Timing of Sea-Surface Temperature Change in the Northern South China Sea: Dynamic Link to the East Asian Monsoon. *Geology*, 33(10): 785. <https://doi.org/10.1130/g21867.1>
- Rohling, E. J., Foster, G. L., Grant, K. M., et al., 2014. Sea-Level and Deep-Sea-Temperature Variability over the Past 5.3 Million Years. *Nature*, 508(7497): 477–482. <https://doi.org/10.1038/nature13230>
- Rolett, B. V., Zheng, Z., Yue, Y. F., 2011. Holocene Sea-Level Change and the Emergence of Neolithic Seafaring in the Fuzhou Basin (Fujian, China). *Quaternary Science Reviews*, 30(7/8): 788–797. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.01.015>
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., et al., 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50 000 Years Cal BP. *Radiocarbon*, 55(4): 1869–1887. [https://doi.org/10.2458/azu\\_js\\_rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947)
- Ruddiman, W. F., 2008. Earth's Climate Past and Future, Second Edition. W.H. Freeman and Company, New York, 261–268.
- Sun, X.J., Luo, Y.L., 2001. Records of Deep-Sea Pollen since 280 ka in Northern South China Sea. *Science China Series D: Earth Sciences*, 31(10): 846–853 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Clemens, S., Beaufort, L., et al., 2005. Evolution and Variability of the Asian Monsoon System: State of the Art and Outstanding Issues. *Quaternary Science Reviews*, 24(5/6): 595–629. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.10.002>
- Wang, S.H., Yang, J.M., Zeng, C.S., et al., 1994. Sea Level Changes since Late Pleistocene along Fujian Coast. *Taiwan Strait*, 13(2): 166–175 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., 2001. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 294(5550): 2345–2348. <https://doi.org/10.1126/science.1064618>
- Wang, Z. H., Jones, B. G., Chen, T., et al., 2013. A Raised OIS 3 Sea Level Recorded in Coastal Sediments, Southern Changjiang Delta Plain, China. *Quaternary Research*, 79(3): 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.03.002>
- Wright, J. D., Sheridan, R. E., Miller, K. G., et al., 2009. Late Pleistocene Sea Level on the New Jersey Margin:

- Implications to Eustasy and Deep-Sea Temperature. *Global and Planetary Change*, 66(1/2): 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.013>
- Wu, G.X., Sun, X.J., 2000. Distribution of Dinoflagellate Cysts in Surface Sediments from South China Sea. *Tropic Oceanology*, 19(1): 8–16(in Chinese with English abstract).
- Wu, W., 2018. New Thinking on the Transmission Route of Rice Agriculture in Southeast Coast of China During Neolithic Age. *Agricultural Archaeology*, (4): 61–65 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z.Y., 1980. Vegetation Atlas of China. Science Press, Beijing, 1–1375 (in Chinese).
- Xiao, J.Y., Lv, H.B., Zhou, W.J., 2007. Palynological Vegetation and Environmental Evolution of Taihu Lake in Jiangxi Province since the Last Glacial Maximum. *Science China Series D: Earth Sciences*, 37(6): 789–797 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D., Lu, H., Wu, N., et al., 2013. Asynchronous Marine-Terrestrial Signals of the last Deglacial Warming in East Asia Associated with Low- And High-Latitude Climate Changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(24): 9657–9662. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300025110>
- Yang, X. Y., Chen, Q. H., Ma, Y. C., et al., 2018. New Radiocarbon and Archaeobotanical Evidence Reveal the Timing and Route of Southward Dispersal of Rice Farming in South China. *Science Bulletin*, 63(22): 1495–1501. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.10.011>
- Yin, H.F., Yu, J.X., Luo, G.M., et al., 2018. Biotic Influence on the Formation of Icehouse Climates in Geologic History. *Earth Science*, 43(11): 3809–3822 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. H., Zheng, Z., Chen, F., et al., 2017. A last Glacial and Deglacial Pollen Record from the Northern South China Sea: New Insight into Coastal-Shelf Paleoenvironment. *Quaternary Science Reviews*, 157: 114–128. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.12.012>
- Yue, Y. F., Zheng, Z., Huang, K. Y., et al., 2012. A Continuous Record of Vegetation and Climate Change over the Past 50, 000 Years in the Fujian Province of Eastern Subtropical China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 365–366: 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.09.018>
- Yue, Y.F., Zheng, Z. Rolett, B.V., et al. 2016. Vegetation and Environmental Changes Inferred from a Holocene Pollen Spectrum in the Lower Reaches of Min River. *Tropical Geography*, 36(3): 417–426 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Z., Huang, K.Y., Deng, Y., et al., 2013. Palynological Records of 200 ka of Okinawa trough and Paleoenvironmental Reconstruction of Glacial-Interglacial Cycle. *Science China Series D: Earth Sciences*, 43(8): 1231–1248 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Z., Li, Q. Y., 2000. Vegetation, Climate, and Sea Level in the Past 55,000 Years, Hanjiang Delta, South-eastern China. *Quaternary Research*, 53(3): 330–340. <https://doi.org/10.1006/qres.1999.2126>
- Zheng, Z., Yang, S. X., Deng, Y., et al., 2011. Pollen Record of the Past 60 ka BP in the Middle Okinawa Trough: Terrestrial Provenance and Reconstruction of the Paleoenvironment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 307(1/2/3/4): 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.05.026>

#### 附中文参考文献

- 常琳, 罗运利, 孙湘君, 2013. 南海北部 MD05-2904 站位 2 万年以来孢粉记录的古环境变. *科学通报*, 58(30): 3079–3087.
- 林鹏, 丘喜昭, 吴志强, 等, 1990. 福建植被. 福州: 福建科学技术出版社, 91–116.
- 刘林敬, 李长安, 介冬梅, 等, 2018. 中一晚全新世以来安固里淖气候演变的植硅体记录. *地球科学*, 43(11): 4138–4148.
- 雒聪文, 马玉贞, 王凯, 等, 2019. 东亚地区 MIS 5 时期孢粉记录的植被与气候研究进展. *地球科学进展*, 34: 540–551.
- 马明明, 刘秀铭, 周国华, 等, 2016. 福建沿海地区晚第四纪海侵研究进展及存在的问题. *亚热带资源与环境学报*, 11(3): 9–19.
- 孙湘君, 罗运利, 2001. 南海北部 280 ka 以来深海花粉记录. *中国科学 D 辑*, 31(10): 846–853.
- 王绍鸿, 杨建明, 曾从盛, 等, 1994. 福建沿海晚更新世以来的海平面变化. *台湾海峡*, 13(2): 166–175.
- 吴国瑄, 孙湘君, 2000. 南海表层沉积沟鞭藻囊孢的分布特征. *热带海洋*, 19(1): 8–16.
- 吴卫, 2018. 新石器时代稻作农业在中国东南沿海传播路径的新思考. *农业考古*, (4): 61–65.
- 吴征镒, 1980. 中国植被. 北京: 科学技术出版社, 1–1375.
- 萧家仪, 吕海波, 周卫健, 2007. 末次盛冰期以来江西大湖孢粉植被与环境演变. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(6): 789–797.
- 殷鸿福, 喻建新, 罗根明, 等, 2018. 地史时期生物对冰室气候形成的作用. *地球科学*, 43(11): 3809–3822.
- 乐远福, 郑卓, Rolett, B.V., 等, 2016. 闽江下游全新世孢粉记录的植被与环境变化. *热带地理*, 36(3): 417–426.
- 郑卓, 黄康有, 邓韞, 等, 2013. 冲绳海槽 200 ka 的孢粉记录及冰期一间冰期旋回古环境重建. *中国科学: 地球科学*, 43(8): 1231–1248.