日本中部地区上新世到更新世过渡时期的气候演变: 来自水杉叶片化石稳定碳同位素及其形态性状的证据^{*}

王雨晴^{①2} 百原新³ 孙 梅^{①2} 王 力^① Julie Lebreton-Anberrée^{①2} 周浙昆^{①4}

(①中国科学院西双版纳热带植物园,热带森林生态学重点实验室,勐腊 666303;②中国科学院大学,北京 100049;
 ③千叶大学,园艺学院,千叶 271-8510;④中国科学院昆明植物研究所,生物多样性与生物地理学重点实验室,昆明 650204)

摘要 晚上新世至更新世是地质历史时期中十分重要的阶段,2.7Ma之后北半球由温暖湿润的气候进入冰期, 水杉叶片化石稳定碳同位素值、叶片面积和叶片长宽比在地质历史时期的变化可以推测该时期内环境的变化趋势、探索植物对环境变化的响应。本研究选取日本中部地区的5个化石点(泉南郡、八王子市、东近江市、十日町 市和生驹市)的水杉叶片化石(3.00~0.95Ma)材料。这些化石点的化石叶片稳定碳同位素值在八王子市(2.6~ 2.7Ma,晚上新世)出现最低值(-29.05%±0.15%),明显低于其他化石点材料的稳定碳同位素值,并且在此期间 化石叶片的面积为7.45±1.31mm²,大于其他时期;同时,叶片的长宽比较大,为4.22±0.67。这些结果相互印证 共同指示出,上新世与更新世交界时期存在一个间冰期;之后,气候逐渐变冷变干。并且本研究结果与日本古植物群落演替得出的结论相一致。

主题词 水杉 上新世 更新世 古气候 叶化石 碳同位素 中图分类号 0914.87, P597⁺.2, P534.62⁺2, P534.63⁺1

1 前言

晚上新世-更新世交界处(2.7~2.4Ma)是地质 历史时期中的一个重要阶段,在北半球,喜马拉雅 和阿尔卑斯山脉的隆起以及第四纪冰期的形成,极 大地改变了全球的气候环境^[1]。有研究认为在 3.6Ma之后全球年均温逐渐下降,至2.7Ma时北极 冰川开始扩增^[2~4]。然而也有研究表明在2.7Ma前 后存在一个短暂的间冰期,之后全球温度才急剧下 降^[5]。但是这一观点并未得到广泛的认同,例如: 太平洋氧同位素的记录显示在2.7Ma前后气候已 经开始变冷,北半球冰川开始扩增^[6],并且日本海 的海平面在2.7Ma前后下降也反映出当时温度有 所降低^[7]。因此这一间冰期是否存在仍需更多的 研究证实,特别是利用不同技术手段得到的数据, 以求从不同的角度证实这一事件的真实性。

利用稳定碳同位素(δ¹³C)恢复古气候是当今地

球环境演变研究中的一个热点^[8,9]。但迄今为止, δ¹³C的研究多集中于利用黄土-古土壤^[10-14]、哺乳 动物骨骼、牙齿化石^[15,16]和湖泊相沉积中的δ¹³C 值[17-21]来重建古环境,叶片化石同位素能否作为 古气候重建的指标尚无定论。植物叶片化石中的 $δ^{13C}$ 值可以反映光合作用过程中碳固定的情况^[22], 而其光合作用又受环境因子如光照、温度、水分等 的影响,所以植物叶片化石的δ¹³C值可以用来指示 古气候。另外,植物化石的 δ^{13} C值能够记录和反映 地质历史时期植物的生理状况^[23,24]。在现生植物 研究中,植物组织中的 δ^{13} C值是评估 C,植物叶片中 胞间平均 CO, 浓度的有效方法, 而胞间平均 CO, 浓 度与水分利用效率密切相关,因此,现代植物叶片 中的δ¹³C 值被看作是反映植物水分利用效率的可靠 指标^[23,24],而水分利用效率也直接受环境变化的影 响。与古土壤与湖相沉积物的 δ^{13} C值不同,其反映 的不是植物群落的变化情况而是特定物种的生理状

А

文献标识码

第一作者简介:王雨晴 女 24岁 硕士研究生 古生态学专业 E-mail: wangyuqing@xtbg.ac.cn

^{*} 国家自然科学基金项目(批准号:31300188)、国家重点基础研究发展规划项目(973项目)(批准号:2012CB821901)和中国科学院 135项目(批准号:XTBG-F01)共同资助

态变化,因此可以从不同的层面反映古气候的变 化。前人研究得到的欧洲中部、日本新泻县和台湾 木化石δ¹³C变化趋势与同时期有孔虫稳定碳同位素 的变化趋势是一致的^[25,26],这也进一步说明了植物 组织的δ¹³C值可以记录气候的变化并且作为重建古 气候的代理指标。但到目前为止,古生物学上测定 植物化石δ¹³C用以恢复古气候环境的研究多集中于 木化石^[27-29],而在其他植物组织化石上的研究 较少。

叶片化石的形态性状能够反映气候特征及其演 化趋势,同一种植物在不同的气候环境条件下,形 态特征会发生相应的变化。反过来叶形态特征也就 能够用于古气候的重建。由于大小和形状(叶相) 在全球和区域尺度上也都与温度和湿度强相关,古 植物学家很久以前就将这些叶片-气候相关性作为 代理指标重建古气候^[30-32]。这些方法的基本原理 是将在现代植物群落中发现的规律应用于古植物群 落中,从而反推古气候的演化。根据前人研究结 果^[33]可知在湿润条件下,植物的叶片面积会增大, 并且在温暖条件下,植物叶片的长宽比会增加。由 此,根据叶片化石面积和长宽比在地质历史时期中 的变化可以推测出古气候变化的趋势。

水杉(Metasequoia glyptostroboides)是著名的活 化石,目前仅存于我国华中一带。最早的水杉化石 记录见于晚白垩世,之后的各地质时代均有水杉化 石的报道。发现和报道的化石点有 500 个之多, 范 围几乎遍及整个北半球^[34]。连续的化石记录和广 泛的地史分布使得水杉化石及其稳定同位素中隐含 了自晚白垩世以来的环境变化信息,使其成为研究 全球变化的理想材料^[34]。之前利用水杉化石重建 古气候的研究多集中于利用其叶片气孔指数重建古 大气 CO, 浓度^[35~37], 重建出的古 CO, 结果与利用 其他代理指标重建的结果较为一致^[36,38],说明水杉 化石可以有效的记录古气候的变化。例如,利用加 拿大北极地区水杉叶片化石的气孔指数重建的始新 世 CO₂ 浓度较高(约 424ppmv)^[36],而美国^[35]、中 国中新世(约 310~334ppmv)和日本更新世的 CO, 浓度则较低(约280ppmv)(王雨晴等未发表数据)。 过去也有研究分析过水杉叶片化石的δ¹³C值^[35-37], 但其所用材料的时代集中于始新世和中新世,未曾 有研究报道过晚上新世和更新世水杉叶片化石的 $δ^{13}C$ 用以指示古气候变化。

本研究所用材料均采集自日本中部地区,该地 区晚上新世-更新世古植物群落的变化已经有详细 报道^[39-44],可以推测出该阶段气候变化,但是依然 需要更多的证据支持,得到一个更加真实、准确的 气候演化历史。本研究选取来自晚上新世至更新世 5个化石点的水杉叶片化石为研究材料,测量其稳 定碳同位素、叶片大小和叶片长宽比作为古气候变 化的指示,综合这3种不同性状指标推测晚上新世 至更新世气候变化的趋势以检验2.7Ma 左右的间 冰期是否存在。

2 试验材料

本研究所用水杉叶片化石材料均采于日本 (图1)。根据叶片形态和其在小枝上对生的特点, 化石材料被鉴定为水杉属植物,且其所属年代也已 经过古地磁和钙质纳米浮游生物地层测年准确定年 (表1)。八王子市、东近江市和十日町市化石点水 杉叶片化石的凭证标本存放于中国云南省昆明市中 国科学院昆明植物研究所标本馆(KUN);泉南郡和 生驹市化石点水杉叶片化石的凭证标本存放于日本 千叶县千叶大学园艺学院研究生部。





Fig. 1 Five localities where fossilized *Metasequoia* were obtained in Central Japan. Different colors correspond to the different ages of the localities: black for Late Pliocene and grey for Pleistocene

3 试验方法

3.1 样品预处理

在实验室中,首先对待测水杉叶片化石材料进 行预处理。具体过程依次如下:1)10%~25%的稀 盐酸浸泡约2个小时;2)40%的氢氟酸浸泡约12

表1 本研究所用材料信息表

Table 1 Metasequoia samples used for reconstructing paleo-CO2

化石点	地点	经纬度	地质背景	时代	绝对定年	测年方法	凭证标本号	参考文献
泉南郡	日本,大阪府,泉南郡,	34°24'N 135°28'E	大阪层群	晚上新世	2.8~3.0Ma	古地磁和钙质纳米 浮游生物地层测年	FT001	[45~47]
八王子市	日本,东京,八王子市, 楢原,北浅川河河床	35°40'N 139°18'E	加住组	晚上新世	2.6~2.7Ma	古地磁和钙质纳米 浮游生物地层测年	BQC001	[48,49]
东近江市	日本,志贺县,东近 江市,爱知河河床	34°59′N 136°6′E	古琵琶湖层群	晚上新世	2.6Ma	古地磁和钙质纳米 浮游生物地层测年	SG001, SG002	[50]
十日町市	日本,新泻县, 十日町市	37°07′N 138°48′E	鱼沼层群	早更新世早期	1.85Ma	古地磁和钙质纳米 浮游生物地层测年	156u01	[46,51,52]
生驹市	日本,奈良县, 生驹市,高山村	34°44′N 135°43′E	大阪层群	早更新世晚期	0.95Ma	古地磁和钙质纳米 浮游生物地层测年	NR001	[53,54]

个小时;3)10%~25%的稀盐酸浸泡至少1个小时。 之后,用去离子水清洗至其pH值接近7,得到干净 的化石叶片。

3.2 准备同位素材料

为了保证结果的准确性,每个化石点视材料数 量的不同,准备1~5份样品(表2),每份样品包含 5~10片经预处理后的化石叶片(净重大于0.05g)。 用研钵将化石材料磨成粉末后,放入离心管内置于 50℃烘箱内烘干(24小时),然后寄送至德国 (GeoZentrum Nordbayern, Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg)利用与 ThermoFinnigan Delta V Plus 射频质谱仪相连的元素分析仪(CE1110)进 行化石叶片稳定碳同位素分析。同位素结果采用 V-PDB标准,分析误差小于0.07‰(1个标准差)。 由于生驹市的材料数量限制,该化石点只准备了1 份稳定碳同位素测量材料,故没有方差数据。

3.3 观察化石叶片

利用数码相机对化石材料进行拍照之后,照片 利用 ImageJ(1.43μ, Wayne Rasband, http://rsb. info.nih.gov/ij/)图片处理软件对化石叶片进行长 度和宽度的测量。每个化石点选取5片水杉叶片化 石(生驹市除外)进行测量(表2),化石叶片面积 (mm²)=化石叶片长度(mm)×化石叶片宽度 (mm)。由于生驹市化石点化石叶片较为破碎,故 无法获得叶片面积及叶片长宽比的数据。

4 试验结果

八王子市化石点和东近江市化石点水杉叶片化 石的δ^{l3}C 明显低于其他 3 个点,其中八王子市化石 点的水杉叶片化石的δ^{l3}C 为所有化石点中最低

表 2 本研究所用材料的样本量

Table 2 Sample size of this study							
化石点	δ^{13} C测定(份)	形态观察(片)*					
泉南郡	3	5					
八王子市	5	5					
东近江市	4	5					
十日町市	5	5					
生驹市	1	0					

*用于叶片形态观察的叶片化石取自不同的水杉化石小枝

(-29.05‰)。而泉南郡化石点的水杉叶片化石的 δ¹³C为本研究5个化石点中最高(-28.14‰)。东近 江市、十日町市和生驹市化石点水杉化石叶片的 δ¹³C分别为-28.95‰、-28.39‰和-28.58‰(表3 和图2)。

表 3 本研究所测不同地质时期 5 个化石点水杉叶片化石的 δ¹³C(A)、叶片面积(B)和叶片长宽比值(C)(平均值±标准差) Table 3 Leaf size, δ¹³C and leaf length/leaf width of fossilized *Metasequoia* during Late Pliocene to Pleistocene

化石点	时代	δ ¹³ C /‰	叶片面积 ∕mm ²	叶片 长宽比
泉南郡	晚上新世	-28.14 ± 1.75	5.34±1.84	3.76 ± 1.84
八王子市	晚上新世	-29.05 ± 0.15	7.45 ± 1.31	4.22 ± 0.67
东近江市	晚上新世	-28.95 ± 0.45	5.79 ± 2.41	5.31 ± 0.76
十日町市	早更新世早期	-28.39 ± 0.18	5.77 ± 1.50	4.40 ± 1.66
生驹市	早更新世晚期	-28.58±N/A	N/A	N/A

八王子市化石点的水杉叶片化石的叶面积 (7.45mm²)明显高于其他 3 个点,其中南泉郡化石 点的水杉叶片化石的叶面积为所有化石点中最小 (5.34mm²)。东近江市和十日町市化石点水杉叶片 化石的面积分别为 5.79mm² 和 5.77mm²(表 3 和图 2)。

水杉叶片化石的长宽比在晚上新世持续上升, 晚上新世的东近江市化石点水杉叶片化石的长宽比



图 2 水杉叶片化石的δ¹³C、叶片面积和叶片长宽比自晚上新世至更新世的变化趋势 水平误差棒为对应指标的方差,垂直误差棒为各化石点的定年范围

Fig. 2 Evolutionary trends of $\delta^{13}C$, leaf size and leaf length/leaf width of fossilized *Metasequoia* needles during Late Pliocene

to Pleistocene. Horizontal error bars: standard deviation of $\delta^{13}C$, leaf size and leaf length/leaf width of each locality,

and vertical error bars: standard deviation of materials' ages

(5.31)高于其他3个点,而南泉郡化石点的水杉叶 片化石的长宽比为所有化石点中最低(3.76)。八 王子市和十日町市化石点水杉叶片化石的长宽比分 别为4.22和4.40(表3和图2)。

5 讨论

植物叶片δ¹³C值的变化能够反映植物的生理变 化,并且与植物生长的外界环境差异,尤其是水分 和温度的差异紧密相关^[55-58]。植物叶片δ^{l3}C值代表 植物叶片在生长过程中吸收的¹³C与¹²C的比值,其大 小直接反映植物的长期水分利用效率,进而指示植 物生长的外界环境状况^[55,59]。生长环境适宜时,植 物能够吸收和同化更多的 CO2, 由于含12C的 CO, 被 优先吸收和同化,因此光合产物中¹³C与¹²C的比值 $(\delta^{13}C$ 值)较低;反之,植物在较恶劣的生长条件下, 叶片δ¹³C 值较高^[56,60]。过去很多研究表明, 植物的 $δ^{13C}$ 值与其生长地的降水状况显著相关。例如, Yang 等^[61] 指出植物 δ^{13} C 值与降水量呈负相关; Francey 和 Farquhar^[62]证明,降雨量越大,红松叶 子的δ¹³C值越低(负值越大);陈拓和马健^[63]对阜康 典型荒漠中 C, 植物 δ¹³C 值与环境间相关关系的分 析结果也表明:降水可以改变叶片稳定碳同位素值 的大小:降水越多,叶片δ¹³C 越负。由于降水影响 土壤含水量,所以植物叶片 δ^{13} C值与土壤含水量之 间也存在显著负相关。青藏高原北部植物叶片δ¹³C 值随土壤含水量和土壤温度的变化而变化,土壤含 水量越高,植物叶片δ¹³C值越小^[64]。已经发表的大 量研究都一致性地表明 C, 植物碳同位素值随降雨 或水分的增加而降低^[65]。另外, Farquhar 等^[56]和 Andreeva 等^[66]也指出: 生长于湿润和半湿润条件 下植物的δ¹³C值较低,这可能是由于降水增多导致 空气湿度、土壤含水量增加,植物叶片气孔导度增 大, 蒸腾速率增强, 从而降低 δ^{13} C值。植物叶片 δ^{13} C 值受温度影响也较明显^[67,68]。研究表明^[69],中国 北方多种 C, 植物的 δ^{13} C 值与温度呈负相关。青藏 高原现生禾本科植物的δ¹³C值随海拔的增加而升 高,温度是引起该δ¹³C 值随海拔高度变化的主要因 素之一^[70]。Yang 等^[71]指出现代水杉叶片的 δ^{13} C 值 为-28.93‰±0.15‰。该值略高于本研究中八王子 市和东近江市化石点(2.6~2.7Ma)水杉化石叶片 的δ¹³C值(表2),说明与现代水杉相比,晚上新世 时期水杉的光合作用产物中固定的¹³C更少,说明其 生长的环境较现代更为适宜,光合作用更为活跃。 植物的δ¹³C值与降水和温度的直接关系也表明晚上 新世的气候较现在更为温暖湿润。而与现在水杉叶 片的 δ^{13} C值相比,本研究中南泉郡(3.0~2.8Ma)、 十日町市(1.85Ma)和生驹市(0.95Ma)化石点水杉 化石叶片的 δ^{13} C(表 2)较高(更接近正值),意味着 这些时期的水杉植物叶片中δ¹³C较高,说明光合作 用较弱,生长环境(温度和水分)较现代恶劣,即,

当时的气候较现在气候更为寒冷干燥。水杉叶片化 石δ¹³C值表明:研究区在 2.7~2.6Ma 期间气候较为 温暖湿润,可能为一个间冰期;而这一时期相邻阶 段的气候则相对较为寒冷干燥。

植物叶片的大小和形态指标也可以反映植物生 长的外界环境状况以及植物对其所处环境变化的生 理响应^[72]。温度和降水是影响植物生长和植物叶 片形态性状变化的主要因素,较低的温度和降水往 往对应着较小的叶片面积^[33,73]。大多数植物叶片 面积随海拔的升高显著降低,这是对较高海拔地区 较低的温度和降水的典型响应^[74~76]。在全球范围 内,年均温和年降水量与植物叶片面积之间的正相 关关系已经多次被证实^[77-79]。Jacobs^[80]对靠近赤 道的30个植物群落植物叶片形态特征与气候因素 格局的关系研究也表明这一点,并且叶片长宽比与 年均降水量呈显著正相关。较低的温度和降水能够 直接限制叶片的扩展,导致较小、较短的叶 片[81,82];另外,低温增加水的粘性并减小酶的活性, 可能导致严重的生理水分亏缺和较低的光合作 用^[75]。降低叶片大小能够增加叶片与外界环境接 触的物理边界层导度,增加叶片的物理对流散热, 减少植物在缺水环境下的蒸腾散热,进而减少叶片 水分丧失[83]。对天山北坡不同种杨树功能性状的 分析表明,胡杨单叶面积较其他种类最小,这即是 该种为减少蒸发量,保存其植物体内水分,对外界 缺水环境的适应[84]。王力[85]对现生水杉同一植株 内叶片大小和形态变化的研究表明:由同一水杉植 株的下部至上部,单枝中部叶片的长度和长宽比有 减小的趋势。造成这种现象的原因主要可能是植株 上部可利用的水分较植株下部少。这也进一步印证 了前人的结论[77~79]:叶片的大小和长宽比与水分 可获得性呈正相关,干旱的情况下叶片倾向于变 小、变短。应用此规律于本研究结果(表 3和图 2), 在 2.7~2.6Ma 期间较大的叶片长宽比和面积说明 该阶段较其相邻时期更加的温暖湿润,这也与 δ^{13} C 值所推测的结果一致。研究区δ¹³C值和水杉叶片形 态演化的研究表明:晚上新世-更新世交界处是一 个较为温暖湿润的阶段,该阶段在约2.7Ma存在一 个间冰期, 而晚上新世之后, 气候开始变冷变干。

这一结果也得到了古植被演变和古气候重建结 果的证实。上新世-更新世交界处,大阪组植物群 包含了大量的喜温类群,并且几乎没有适应低温的 针叶类群,说明当时的温度可能较为温暖^[39]。利 用植物叶片化石气孔指数重建出的晚上新世-更新 世 CO_2 结果显示在 2.7Ma 时出现了一个峰值^[86], 而且这一短暂温暖的时期不仅仅在中纬度地区有报 道,高纬度地区俄罗斯埃利格格特根湖(Lake El'gygytgyn)的孢粉、生物硅等研究也表明了这样一 个温暖时期的存在[87]。之后,植物大化石记录显 示全球气候变冷。例如,晚上新世后,日本中部植 物群落中的许多中国中南部地区的特有种类逐渐灭 绝,而在现代寒冷地区和亚高山森林中占优势的物 种开始出现或增加^[40-42]:晚上新世柳杉属在大阪 组的出现也说明当时气候较为寒冷^[43]; 2.2Ma 时, 睡菜属植物(Menyanthes)在新泻县出现,表明该时 期温度降低^[88]; 1.7Ma 时, 东海组(Tokai Group) 植 物群的化石记录中包含了富士山云杉 (Picea maximowiczii), 鱼鳞云杉(Picea jezoensis), 和王桦 (Betula maximowicziana)等寒温性及亚北极的树种, 也表明该时期气候已经变冷^[40,44]。之后,约1.7~ 1.2Ma时,东海组植物群的优势种变为了分布于现 代寒带林的富士山云杉, 红松 (Pinus koraiensis) 和 睡菜,进一步证明在这一时期为冰期的寒冷气 候^[40]。

本研究利用采集于日本中部地区 5 个化石点的 水杉叶片化石的δ¹³C、叶片面积以及叶片长宽比作 为古气候的替代性指标,定性估测了晚上新世-更 新世期间的气候变化,认为在 2.7Ma 左右存在一个 间冰期,并且这一结果支持前人根据孢粉学和化石 叶片气孔指数的推测出的结果^[86,87]。并且日本中 部地区晚上新世-更新世期间植物群落的变化也可 以从侧面印证这一结论:2.7Ma 前后,日本中部地 区存有许多温带性的物种,而之后这些物种逐渐灭 绝,由更加耐寒的物种取代。

参考文献 (References)

- An Z, Kutzbach J, Prell W et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. Nature, 2001, 411(6833): 62~66
- 2 Bintanja R, Van de Wal R S W. North American ice-sheet dynamics and the onset of 100,000-year glacial cycles. *Nature*, 2001, 454 (7206): 869~872
- 3 Haug G, Ganopolski A, Sigman D et al. North Pacific seasonality and the glaciation of North America 2.7 million years ago. Nature, 2005, 433(7028): 821~825
- 4 Maslin M, Haug G, Sarnthein M et al. The progressive intensification of Northern Hemisphere glaciation as seen from the North Pacific. Geologische Rundschau, 1996, 85(3): 452~465
- 5 Lisiecki L, Raymo M. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ^{18} O records. *Paleoceanography*, 2005, **20**(1):

PA1003

 $187 \sim 196$

- 6 Hennissen J, Head M, Schepper S et al. Palynological evidence for a southward shift of the North Atlantic Current at ~ 2.6Ma during the intensification of Late Cenozoic Northern Hemisphere glaciation. Paleoceanography, 2014, 29(6): 564~580
- 7 Cronin T, Kitamura A, Ikeya N et al. Late Pliocene climate change 3.4 ~ 2.3Ma: Paleoceanographic record from the Yabuta Formation, Sea of Japan. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1994, 108(3~4): 437~455
- 8 王国安.稳定碳同位素在第四纪古环境研究中的应用.第四纪研究,2003,23(5).471~484
 Wang Guo'an. Application of stable carbon isotope for paleoenvironmental research. *Quaternary Sciences*, 2003,23(5): 471~484
- 9 沈 吉,王苏民,羊向东.湖泊沉积物中有机碳稳定同位素测定及其古气候环境意义.海洋与湖沼,1996,27(4):400~404 Shen Ji, Wang Sumin, Yang Xiangdong. Measurement of organic carbon stable isotope in lacustrine sediments and its significance on paleocliamte and environment. Oceanologia et Limnologia Sinca, 1996,27(4):400~404
- 10 饶志国,张 晓,薛 骞等.西峰红粘土/黄土剖面有机碳同位 素研究的初步结果.第四纪研究,2012,32(4):825~827 Rao Zhiguo, Zhang Xiao, Xue Qian *et al.* Primary organic carbon isotopic study result of Xifeng loess/red clay profile. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(4):825~827
- 11 张 晓,贾 鑫,饶志国等.陇西黄土高原东南部地区末次冰 期以来 C₃/C₄ 植物相对丰度变化及其区域性剖面的对比研究. 第四纪研究, 2013, **33**(1): 187~196 Zhang Xiao, Jia Xin, Rao Zhiguo *et al.* C₃/C₄ variation since the Last Glacial in the southeastern Longxi Loess Plateau and its comparison with other results. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(1):
- 12 张 普,刘卫国.西峰、洛川黄土碳酸盐根茎体碳同位素分布 特征及古环境意义探讨.第四纪研究,2013,33(1):179~186 Zhang Pu, Liu Weiguo. Carbon isotope composition and paleoenvironment information of rhizolith in Xifeng and Luochuan loess. Quaternary Sciences, 2013,33(1):179~186
- 13 张 瑜,熊尚发,丁仲礼等.中新世以来六盘山邻区黄土-红粘 土成土碳酸盐碳氧同位素记录及其对 C₄ 植物早期扩张的指示. 第四纪研究, 2011, **31**(5): 800~811

Zhang Yu, Xiong Shangfa, Ding Zhongli *et al.* Carbon-oxygen isotope records of pedogenic carbonate from the Early Miocene-Pleistocene loess-red clay in the vicinity of the Liupanshan region and its implications for the early origin of C_4 plants in the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(5): 800~811

 14 赵得爱,吴海斌,吴建育等.过去典型增温期黄土高原东西部C₃/C₄植物组成变化特征.第四纪研究,2013,33(5): 848~855

Zhao De'ai, Wu Haibin, Wu Jianyu *et al.* C_3/C_4 plants characteristics of the eastern and western parts of the Chinese Loess Plateau during Mid-Holocene and last interglacial. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(5): 848~855 15 王 宁, 胡耀武, 宋国定等. 古骨中可溶性、不可溶性胶原蛋白的氨基酸组成和 C、N 稳定同位素比较分析. 第四纪研究, 2014, 34(1): 204~211
 Wang Ning, Hu Yaowu, Song Guoding *et al.* Comparative analyses

of amino acids and C, N stable isotopes between soluble collagen and insoluble collagen within archaeological bones. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(1): 204~211

- 16 董明星,张艳红,张建国等. 石家庄地区早全新世冷湿气候的 牙齿微磨痕和同位素证据. 第四纪研究, 2014, 34(1): 8~15 Dong Mingxing, Zhang Yanhong, Zhang Jianguo *et al.* Cold and/or wet Early Holocene in Shijiazhuang district: Evidences from tooth microwear and stable isotopes analyses. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(1): 8~15
- 17 陈英勇, 鹿化煜, 张恩楼等. 浑善达克沙地地表沉积物有机碳 同位素组成与植被-气候的关系. 第四纪研究, 2013, 33(2): 351~359

Chen Yingyong, Lu Huayu, Zhang Enlou *et al.* The relationship between organic carbon isotopic composition of surface sediment and vegetation-climate in Otindag dune field, Northern China. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(2): 351~359

- 18 匡欢传,周浩达,胡建芳等.末次盛冰期和全新世大暖期湖光 岩玛珥湖沉积记录的正构烷烃和单体稳定碳同位素分布特征及 其古植被意义.第四纪研究,2013,33(6):1222~1233 Kuang Huanchuan, Zhou Haoda, Hu Jianfang *et al.* Variations of *n*-alkanes and compound-specific carbon isotopes in sediments from Huguangyan Maar Lake during the Last Glacial Maximum and Holocene Optimum: Implications for paleovegetation. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(6): 1222~1233
- 19 任雅琴, 王彩红, 李瑞博等. 有机质饱和烃和δ¹³C_{org.}记录的博斯 腾湖早全新世晚期以来生态环境演变. 第四纪研究, 2014, 34

 (2): 425~433
 Ren Yaqin, Wang Caihong, Li Ruibo *et al.* Ecological environment change recorded by sediment *n*-alkane and δ¹³C_{org.} of Lake Bosten since late of Early Holocene. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(2): 425~433
- 20 孙博亚,岳乐平,赖忠平等.14ka B. P. 以来巴里坤湖区有机碳同位素记录及古气候变化研究.第四纪研究,2014,34(2): 418~424

Sun Boya, Yue Leping, Lai Zhongping *et al.* Paleoclimate changes recorded by sediment organic carbon isotopes of Lake Barkol since 14ka B. P. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(2): 418~424

21 孙伟伟, 沈 吉, 张恩楼等. 日本大沼湖沉积物碳氮比值、有机碳同位素特征及其近 400 年的古气候环境意义. 第四纪研究, 2014, 34(6): 1306~1313

Sun Weiwei, Shen Ji, Zhang Enlou *et al.* Characteristics of organic stable carbon isotope and C/N ration of sediments in Lake Onuma, Japna and their environmental implicationd for the last 400 years. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1306~1313

- 22 Roy-Barman M, Jeandel C. Géochimie Marine Circulation Océanique, Cycle Du Carbone et Changement Climatique. Minster Jean-François: Vuibert Société Géologique de France, 2001. 1~362
- 23 Farquhar G, Richards R. Isotopic composition of plant carbon

correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11(6): 539~552

- 24 Flanagan L, Farquhar G. Variation in the carbon and oxygen isotope composition of plant biomass and its relationship to water-use efficiency at the leaf-and ecosystem-scales in a northern Great Plains grassland. *Plant*, *Cell & Environment*, 2014, **37**(2): 425~438
- 25 Bechtel A, Gratzer R, Sachsenhofer R et al. Biomarker and carbon isotope variation in coal and fossil wood of Central Europe through the Cenozoic. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 262(3~4): 166~175
- 26 Kobayashi Y, Hoyanagi K. Correlative relationship between stable carbon isotope ratios of fossil wood and global climate change. Journal of the Sedimentological Society of Japan, 2014, 73(1): 45~51
- 27 Duquesnay A, Bréda N, Stievenard M. Changes of tree-ring δ¹³C and water-use efficiency of beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France during the past century. *Plant*, *Cell & Environment*, 1998, **21**(6): 565~572
- 28 Zhao Xingyun, Qian Junlong, Wang Jian. Using a tree ring δ¹³C annual series to reconstruct atmospheric CO₂ concentration over the past 300 years. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 371~379
- 29 Tang Jingsong, Qian Junlong, Yin Zhuosi et al. Restructuring CO₂ concentration by the tree-ring carbon isotopic ratios of west Tianmu Mountain. Journal of Nanjing Forestry University, 2000, 24(3): 45~48
- 30 Wilf P. When are leaves good thermometers? A new case for leaf margin analysis. *Paleobiology*, 1997, 23(3): 373~390
- 31 Royer D, Wilf P. Why do toothed leaves correlate with cold climates? Gas exchange at leaf margins provides new insights into a classic paleotemperature proxy. *International Journal of Plant Sciences*, 2006, 167(1): 11~18
- 32 Bailey I, Sinnott E. A botanical index of Cretaceous and Tertiary climates. Science, 1915, 41(1066): 831~834
- Peppe D, Royer D, Cariglino B et al. Sensitivity of leaf size and shape to climate: Global patterns and paleoclimatic applications. New Phytologist, 2011, 190(3): 724~739
- 34 LePage B, Williams J, Yang H. The Geobiology and Ecology of Metasequoia. Netherlands: Springer, 2005. 1~434
- 35 Royer D, Wing S, Beerling D et al. Paleobotanical evidence for near present-day levels of atmospheric CO₂ during part of the Tertiary. Science, 2001, 292(2310): 2310~2313
- 36 Doria G, Royer D, Wolfe A et al. Declining atmospheric CO₂ during the late Middle Eocene climate transition. American Journal of Science, 2011, 311(1): 63~75
- 37 Maxbauer D, Royer D, LePage B. High Arctic forests during the Middle Eocene supported by moderate levels of atmospheric CO₂. Geology, 2014, 42(12): 1027~1030
- 38 Royer D. Stomatal density and stomatal index as indicators of paleoatmospheric CO₂ concentration. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2001, 114(1~2): 1~28
- 39 Momohara A. Stages of major flora and vegetation changes since the Latest Neogene in Central Europe and Central Japan in connection

with climatic changes. The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu), 2010, **49**(5): 299~308

- 40 Momohara A. Floral and paleoenvironmental history from the Late Pliocene to Middle Pleistocene in and around Central Japan. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1994, 108 (3~4): 281~293
- 41 Miki S. Floral remains in Kinki and adjacent districts since the Pliocene with description of 8 new species. *Mineralogy and Geology* (Kobutsu to Chishitsu), 1948, 2: 105~144
- 42 Miki S. On the change in flora of Japan since the Upper Pliocene and the floral composition at the present. Japanese Journal of Botany, 1938, 9: 214~251
- 43 Momohara A. Late Pliocene plant biostratigraphy of the lowermost part of the Osaka Group, Southwest Japan, with reference to extinction of plants. *The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu)*, 1992, **31**(2): 77~89
- 44 Momohara A, Mizuno K, Tsuji S et al. Early Pleistocene plant biostratigraphy of the Shobudani Formation, Southwest Japan, with reference to extinction of plants. The Quaternary Research, 1990, 29(1): 1~15
- 45 Itihara M, Ichikawa K, Yamada N. Geology of the Kishiwada District with Geological Sheet Map at 1:50,000. Tsukuba: Geological Survey of Japan, 1986. 148
- 46 Satoguchi Y, Nagahashi Y. Tephrostratigraphy of the Pliocene to Middle Pleistocene series in Honshu and Kyushu Islands, Japan. Island Arc, 2012, 21(3): 149~169
- 47 Tomita Y, Kurokawa K. A widespread volcanic ash layer of about 2.7Ma in Central Japan: Correlation of the Habutaki I (Osaka Group), the MT2 (Himi Group) and the Arg-2 (Nishiyama Formation) ash layers. Journal of the Geological Society of Japan, 1999, 105(1): 63~71
- 48 Horiuchi J. Neogene flora of the Kanto district. Science Reports of the Institute of Geoscience Geological Sciences, Tsukuba University, Section B, Geological Sciences, 1996, 17: 109~208
- 49 Kimura T, Ohana T, Yoshiyama H. Fossil plants from the Tama and Azuyama Hills, Southern Kwanto, Japan. Transactions and Proceedings of the Paleontological Society of Japan, New Series, 1981, (122): 87~104
- 50 Yamakawa C, Momohara A, Nunotani T et al. Paleovegetation reconstruction of fossil forests dominated by *Metasequoia* and *Glyptostrobus* from the Late Pliocene Kobiwako Group, Central Japan. *Paleontological Research*, 2008, **12**(2): 167~180
- 51 Niigata Fossil Plant Research Group. Plant megafossils and pollen fossils from the Uonuma Group, Niigata Prefecture. Association of Geological Collaboration in Japan, Monograph, 1983, 26: 103~126
- 52 Yanagisawa Y, Kayahara K, Suzuki Y et al. Geology of the Tokamachi District with Geological Sheet Map at 1:50,000. Tsukuba: Geological Survey of Japan, 1985. 104
- 53 Mitamura M. Stratigraphy and geologic structure of the Osaka Group (Pliocene and Pleistocene) in Keihanna Hills, Kinki District, Japan. The Quaternary Research, 1992, 31(3): 159~177

- 54 Yoshikawa S, Mitamura M. Quaternary stratigrapy of the Osaka Plain, Central Japan and its correlation with oxygen isotope record from deep sea cores. *The Geological Society of Japan*, 1999, 105 (5): 332~340
- 55 Ehleringer J, Cooper T. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants. Oecologia, 1988, 76 (4): 562~566
- 56 Farquhar G, O'leary M, Berry J. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Functional Plant Biology*, 1982, 9 (2): 121~137
- 57 Farquhar G, Hubick K, Condon A et al. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency. In: Rundel P, Ehleringer J, Nagy K eds. Stable Isotopes in Ecological Research. New York: Springer, 1989. 21~40
- 58 Kohn M. Carbon isotope compositions of terrestrial C₃ plants as indicators of (paleo) ecology and (paleo) climate. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(46): 19691~19695
- 59 Brienen R, Wanek W, Hietz P. Stable carbon isotopes in tree rings indicate improved water use efficiency and drought responses of a tropical dry forest tree species. *Trees*, 2011, 25(1): 103~113
- 60 Belmecheri S, Maxwell R, Taylor A *et al.* Tree-ring δ^{13} C tracks flux tower ecosystem productivity estimates in a NE temperate forest. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**(7): 074011
- 61 Yang Limin, Han Mei, Zhou Guangsheng et al. The changes in water-use efficiency and stoma density of Leymus chinensis along Northeast China Transect. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 16~23
- 62 Francey R, Farquhar G. An explanation of ¹³C/¹²C variations in tree rings. *Nature*, 1982, 297: 28~31
- 63 陈 拓,马 健. 阜康典型荒漠 C₃ 植物稳定碳同位素值的环境 分析. 干旱区地理, 2002, 25(4): 342~345 Chen Tuo, Ma Jian. Environmental analysis of stable carbon isotope values in typical desert C₃ plants of the Fukang, Xinjiang. Arid Land Geography, 2002, 25(4): 342~345
- 64 陈 拓,冰虎元.青藏高原北部植物叶片碳同位素组成的空间 特征.冰川冻土,2003,25(1):83~87 Chen Tuo, Bing Huyuan. Spatial features of stable isotope of leaves from northern Tibetan Plateau. Journal of Glaciology and Crypedolocy, 2003,25(1):83~87
- 65 Warren C, McGrath J, Adams M. Water availability and carbon isotope discrimination in conifers. Oecologia, 2001, 127 (4): 476~486
- 66 Andreeva D, Zechb M, Glaserc B et al. Stable isotope (δ¹³C, δ¹⁵N, δ¹⁸O) record of soils in Buryatia, southern Siberia: Implications for biogeochemical and paleoclimatic interpretations. Quaternary International, 2013, 290~291: 82~94
- 67 O'Leary M. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry*, 1981, 20(4): 553~567
- 68 胡启武,吴 琴,郑 林等.青海云杉叶片稳定性碳同位素组成对水分温度变化的响应.山地学报,2010,28(6):712~717

Hu Qiwu, Wu Qin, Zheng Lin *et al.* Responses of leaf δ^{13} C of *Picea crassifolia* to moisture and temperature variations. *Journal of Mountain Science*, 2010, **28**(6): 712~717

- 69 王国安,韩家懋,周力平.中国北方 C₃ 植物碳同位素组成与年均温度关系.中国地质,2002,29(1):55~57
 Wang Guo'an, Han Jiamao, Zhou Liping. The annual average temperature in Northern China. *Geology in China*, 2002, 29(1):55~57
- 70 旺 罗, 吕厚远, 吴乃琴等. 青藏高原现生禾本科植物的δ⁴³C 与 海拔高度的关系. 第四纪研究, 2003, 23(5): 573~580 Wang Luo, Lü Houyuan, Wu Naiqin *et al.* Altitudinal trends of stable carbon isotope composition for Poeceae in Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5): 574~580
- 71 Yang H, Pagani M, Briggs D et al. Carbon and hydrogen isotope fractionation under continuous light: Implications for paleoenvironmental interpretations of the High Arctic during Paleogene warming. Oecologia, 2009, 160(3): 461~470
- 72 Sack L, Scoffoni C, McKown A et al. Developmentally based scaling of leaf venation architecture explains global ecological patterns. *Nature Communications*, 2012, 3(837): 1~10
- 73 Uhl D, Mosbrugger V. Leaf venation density as a climate and environmental proxy: A critical review and new data. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 1999, **149**(1~4): 15~26
- 74 Cordell S, Goldstein G, Mueller-Dombois D et al. Physiological and morphological variation in *Metrosideros polymorpha*, a dominant Hawaiian tree species, along an altitudinal gradient: The role of phenotypic plasticity. *Oecologia*, 1998, **113**(2): 188~196
- 75 Kouwenberg L, Kürschner W, McElwain J. Stomatal frequency change over altitudinal gradients: Prospects for paleoaltimetry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2007, 66(1): 215~241
- 76 Bresson C, Vitasse Y, Kremer A et al. To what extent is altitudinal variation of functional traits driven by genetic adaptation in European oak and beech? Tree Physiology, 2011: tpr 084
- Wilf P, Wing S, Greenwood D et al. Using fossil leaves as paleoprecipitation indicators: An Eocene example. Geology, 1998, 26(3): 203~206
- 78 Webb J. Environmental relationships of the structural types of Australian rain forest vegetation. *Ecology*, 1968, 49(2): 296~311
- 79 Murphy M, Jordan G, Brodribb T. Acclimation to humidity modifies the link between leaf size and the density of veins and stomata. *Plant, Cell & Environment*, 2014, **37**(1): 124~131
- 80 Jacobs B. Estimation of rainfall variables from leaf characters in tropical Africa. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 145 (1~3): 231~250
- 81 Magnani F, Borghetti M. Interpretation of seasonal changes of xylem embolism and plant hydraulic resistance in *Fagus sylvatica*. *Plant*, *Cell & Environment*, 1995, 18(6): 689~696
- 82 Hovenden M, Brodribb T. Altitude of origin influences stomatal conductance and therefore maximum assimilation rate in Southern Beech, Nothofagus cunninghamii. Functional Plant Biology, 2000, 27(5): 451~456
- 83 Nicotra A, Cosgrove M, Cowling A et al. Leaf shape linked to

photosynthetic rates and temperature optima in South African Pelargonium species. Oecologia, 2008, **154**(4): 625~635

84 徐庆华, 臧润国,谢怀慈. 天山北坡 4 种栽培杨树的功能性状分析. 干旱区研究, 2012, 29(3): 425~431
Xu Qinghua, Zang Runguo, Xie Huaici. Analysis on plant functional traits of *Populus* species in the Tianshan Mountains. *Arid*

zone research, 2012, 29(3): 425~431

85 王 力.水杉属叶形态特征及其环境指示意义——来自化石和 活化石的证据.北京:中国科学院大学博士论文,2010.1~424 Wang Li. Morphology and Anatomy of *Metasequoia* Leaves and Their Environmental Indicative Values: Evidence from the Comparative Studies of "Living fossil" and Fossils. Beijing: The Ph. D Thesis of Chinese Academy of Sciences, 2010. $1\!\sim\!424$

- 86 Bai Yunjun, Chen Liqun, Ranhotra P et al. Reconstructing atmospheric CO₂ during the Plio-Pleistocene transition by fossil Typha. Global Change Biology, 2015, 21(2): 874~881
- 87 Brigham-Grette J, Melles M, Minyuk P et al. Pliocene warmth, polar amplification, and stepped Pleistocene cooling recorded in NE Arctic Russia. Science, 2013, 340(6139): 1421~1427
- 88 Arata Momohara. The Plio-Pleistocene floral exchange—A case of the Uonuma Group in the south-eastern part of Tokamachi, Niigata Prefecture. The Proceedings of the Japan Association for Quaternary Association Annual Meeting, 1988, 18: 140~141

CLIMATE CHANGE OF CENTRAL JAPAN DURING PLIOCENE TO PLEISTOCENE : EVIDENCE FROM STABLE CARBON ISOTOPE AND LEAF MORPHOLOGY OF FOSSIL *METASEQUOIA*

Wang Yuqing^{10,2} Arata Momohara⁴ Sun Mei^{10,2} Wang Li¹⁰ Julie Lebreton-Anberrée^{10,2} Zhou Zhekun^{10,3}

(①Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303; ②University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ③Graduate School of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Matsudo-Shi 271-8510, Japan;
 ④Key Laboratory of Plant Diversity and Biogeography of East Asia, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204)

Abstract

During the Plio-Pleistocene boundary $(2.7 \sim 2.4 \text{Ma})$, the glaciation of the Northern Hemisphere started. Previous research reported the expansion of northern hemispheric continental ice sheet and the climate deterioration began at around 2.7Ma. On the contrary, other studies argued that 2.7Ma was an interglacial period. Therefore, more evidences are necessary to clarify the debate. Here we use organic carbon isotope $(\delta^{13}\text{C})$, leaf size and leaf length/leaf width ratio of fossil *Metasequoia* needles as the proxy of paleoenvironment to assess if 2.7Ma ago was an interglacial period or not.

The fossil *Metasequoia* needles were collected from five localities in central Japan: Sennan, Hachioji, Higashiomi, Tokamachi and Ikoma. The ages of these materials varies from 3.00Ma to 0.95Ma (Late Pliocene to Pleistocene). For each locality, we prepared $1 \sim 5$ samples for $\delta^{13}C$ analysis, and 5 leaves for leaf size and leaf length/leaf width ratio measurements. These three characters have been shown to be mainly affected by temperature and precipitation of the growth environment. $\delta^{13}C$ values are negatively correlated with temperature and precipitation.

The results of this research show that: the lowest δ^{13} C value (-29.05‰) was measured for the period around 2.6~2.7Ma (Late Pliocene), indicating a warm and humid environment. The leaf area and leaf length/width ratio of fossil *Metasequoia* needles during 2.6 ~ 2.7Ma (Late Pliocene) are also larger (7.45mm² and 4.22 respectively), supporting that 2.6~2.7Ma is a warm and humid period. Thus, our results indicate that there is an interglacial period at the Plio-Pleistocene boundary (around 2.7Ma). After that period, the climate deteriorated, as the environment became cooler and dryer. This climate change is corroborated by the mega fossil records, as the succession of floral assemblages during Pliocene to Pleistocene also indicated a similar trend.