全球尺度海拔高度对陆地高等植物的叶蜡正构烷烃 δD 值的影响初探

刘金召^{1,2*}, 安芷生¹

1. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;

2. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061

* 通讯作者, E-mail: liujinzhao@ieecas.cn

收稿日期: 2020-05-27; 收修改稿日期: 2020-12-02; 接受日期: 2020-12-29; 网络版发表日期: 2021-03-19

中国科学院项目(编号: QYZDY-SSW-DQC001, 132B61KYSB20170005, ZDBS-LY-DQC033)和国家自然科学基金项目(批准号: 41420104008)资助

摘要 野外研究表明叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值可以作为古高度重建的代用指标. 然而, 由于缺乏全球范围叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值对高度的分析, 限制了全球范围内叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值作为古高度重建代用指标的可靠性. 基于全球植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的数据库, 分析了陆生高等植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值随海拔高度的变化. 叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值随高度增加而下降的趋势对应于降水 $\delta D(\delta D_{prec})$ 值随高度的变化, 表明叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值可以有效记录 δD_{prec} 值的变化. 当消除纬度效应时, 全部植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的递减率为 $(-1.01 \pm 0.10)\% (100m)^{-1}$, 而双子叶植物和单子叶植物分别为 $(-1.03 \pm 0.13)\% (100m)^{-1}$ 和 $(-0.47 \pm 0.13)\% (100m)^{-1}$. 我们的研究证实了利用叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值获取全球古高度变化的指标是可靠的, 全球叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的整体递减率为叶蜡未调查区域提供了古高度重建的一种选择.

关键词 高度, 叶蜡正构烷烃 δD , 全球尺度, 古高度

1 引言

地球表面高程的演变深刻影响大尺度排水模式、沉积物的风化和迁移、生物群落的分布、全球大气环流、降水和气候模式(Peterse等, 2009; Mulch, 2016). 因此, 古高度重建有助于理解和量化这些过程和降水/气候模式的时间演变(Rowley等, 2001; Schimmelmann等, 2006; Rowley和Garzione, 2007; Mulch, 2016). 一系列的参数, 如温度(Gregory-Wodzicki, 2000)、焓(Spicer等, 2003)、 P_{CO_2} (Beerling和Royer, 2002)、大气压(Sahagian等, 2002)以及降水稳定同位素(Garzione等,

2000; Gonfiantini等, 2001; Rowley等, 2001)和植物衍生的脂质生物指标(Jia等, 2008; Polissar等, 2009; Zhuang等, 2014; Nieto-Moreno等, 2016; Zhang等, 2017)都被用来重建古高度变化(古高程). 其中, 植物衍生的脂质生物指标(叶蜡正构烷烃)引起了学者的浓厚兴趣. 这种指标具有很多优点: 植物表层蜡质广泛分布在沉积物中(Eglinton和Hamilton, 1967), 这种蜡质在低温环境下不易交换, 具有高度稳定性(Schimmelmann等, 2006), 且对原有同位素值具有很好的保存(Polissar等, 2009).

叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值作为古高度重建的指标已经应用

中文引用格式: 刘金召, 安芷生. 2021. 全球尺度海拔高度对陆地高等植物的叶蜡正构烷烃 δD 值的影响初探. 中国科学: 地球科学, 51(5): 795–804, doi: 10.1360/N072020-0175

英文引用格式: Liu J, An Z. 2021. Global-scale altitude effect on leaf wax n-alkane δD values in terrestrial higher plants. Science China Earth Sciences, 64(5): 825–834, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9713-6>

于喜马拉雅山和青藏高原地区(Polissar等, 2009; Zhuang等, 2014; Bai等, 2015; Zhang等, 2017; Feng等, 2019)、北美洲山脉(Anderson等, 2015)、中美洲山脉(Douglas等, 2012年)以及南安第斯山脉(Nieto-Moreno等, 2016)。这些研究表明植物和沉积物中叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值与海拔高度呈负相关。然而, 一些研究也指出“反高度效应”: 叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值与高度成正相关, 该现象出现在海拔低于3300m的昆仑山和天山(Luo等, 2011; Bai等, 2015)。然而, 目前为止, 尚缺少全球尺度叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和高度之间的分析。再者, 局部和区域的研究呈现不同的叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的递减率。例如, 安第斯山脉中南部观察到显著的沉积物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值与高度相关性, 山坡区递减率为 -1.64‰ $(100\text{m})^{-1}$, 而山谷区递减率为 -0.95‰ $(100\text{m})^{-1}$ (Nieto-Moreno等, 2016)。青藏高原东南部, 海拔高度是决定土壤叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的关键因素, 其递减率为 -2.2‰ $(100\text{m})^{-1}$ (Bai等, 2015)。对于局部区域的古高度重建, 特定地点的递减率似乎是合理的。然而, 如果我们需要扩大范围以覆盖一些尚未调查叶蜡生物指标的地区(如, 非洲、北极、中东、南美洲; 图1a), 那么全球尺度的叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和高度的关系以及确定大尺度叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的递减率就变得非常重要。

基于叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和降水 δD_{prec} 值之间显著的相关性(Pagani等, 2006), 土壤和沉积物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值已经广泛用于研究古水文变化(Liu和Yang, 2008; Sachse等, 2012; Collins等, 2013; Liu等, 2016; Liu和An, 2019)。表观分馏值 ϵ_{app} (叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和降水 δD_{prec} 值之间的净分馏)受到土壤蒸发、植物蒸腾和生物合成过程的共同影响(Sachse等, 2012; Liu和An, 2018)。这些过程的同位素值取决于环境因子, 如温度、相对湿度(RH)、光照强度、盐度、干旱度和季节性(Kahmen等, 2008; Yang等, 2011; Romero和Feakins, 2011; Sachse等, 2009; Liu等, 2015), 以及与不同植物类型有关的生化因子(Smith和Freeman, 2006; Liu和Yang, 2008; Gao等, 2014)、叶片解剖结构(Gao等, 2014)和NADPH衍生的氢加成(Sessions等, 1999; Liu等, 2016)。这些因子之间复杂的相互作用使定量测定 ϵ_{app} 值变得复杂化, 进而限制了我們更好地理解叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和 δD_{prec} 值之间的关系。

大量研究表明大部分地区的平均表观分馏值 ϵ_{app} 是基本稳定的(Hou等, 2008; Feakins和Sessions, 2010;

Garcin等, 2012; Tipple和Pagani, 2013; Feakins等, 2016; Zhang等, 2017)。相反, 一些研究表明植物表观分馏值 ϵ_{app} 随着RH的下降而偏正(Hou等, 2008; Rao等, 2009; Sachse等, 2012)。在 $RH < 70\%$ 时, RH对表观分馏值 ϵ_{app} 的影响变得更加显著(Sachse等, 2012)。更重要的是, 近期研究表明表观分馏值 ϵ_{app} 在单子叶植物和双子叶植物之间存在显著差异(Liu和Yang, 2008; Sachse等, 2012; Gao等, 2014; Liu等, 2016; Liu和An, 2019), 北半球叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值统计分析发现单子叶植物比双子叶植物偏负约30‰(Liu等, 2016)。其中, 随着纬度的增加, 双子叶植物表观分馏值 ϵ_{app} 略有增加, 而单子叶植物表观分馏值 ϵ_{app} 略有下降, 两者混合作用造成植物和沉积物中表观分馏值 ϵ_{app} 基本保持稳定(Liu和An, 2019)。除纬度以外, 目前尚不清楚全球表观分馏值 ϵ_{app} 随高度是否保持稳定。因此, 验证 ϵ_{app} 随高度是否稳定是叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值进行古高度重建的理论基础(Anderson等, 2015), 将有助于叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和降水 δD_{prec} 值之间的转变。

基于已发布的陆生高等植物全球 $\delta D_{n-alkane}$ 值数据库(Liu和An, 2019), 便于分析全球叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值与海拔高度的关系。本研究的目的是: (1) 验证全球尺度下表观分馏值 ϵ_{app} 随海拔高度保持稳定的假设; (2) 分析影响 $\delta D_{n-alkane}$ 值与海拔高度关系的潜在因素; (3) 评估全球叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的递减率。这种全球尺度叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值与海拔高度的关系分析将为大尺度古高度重建提供可靠的生物指标。

2 方法

2.1 叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值数据集

本研究分析的叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值数据集在全球的分布如图1a, 该数据集源自对以前的数据集($n=300$; Sachse等, 2012)的扩展, 形成更大的全球数据集($n=891$; Liu和An, 2019)。所有的数据都直接取自源文献或者相关的补充资料。本文直接使用文献中提供的位置(纬度和经度)及海拔高度, 或者通过Google Earth确定相应的地理坐标。该数据集中在美洲、欧洲和东亚, 纬度从23.7°S到79.9°N, 海拔高度从0m到5243m。然而, 仍然存在较多尚未调查叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的地区, 如非洲、南美、中东、俄罗斯和加拿大北部等地区(图1a)。

图1 陆生高等植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的分布图和组成概况

(a) 全球陆生高等植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的分布图. (b) 该数据集由陆生高等植物中的三种主要植物类型组成(双子叶植物占55.67%, 单子叶植物占31.43%, 裸子植物占12.90%). (c) 双子叶植物/裸子植物与单子叶植物间叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值存在显著差异($p<0.05$), 双子叶植物与裸子植物间叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值差异不显著($p=0.09$), 暗示双子叶植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值可以代表裸子植物的变化. 全球叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的数据集来自自己发表的文章(Liu和An, 2019). DEM数据来自https://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/gmted2010_global_grids.php.

通过网络搜索引擎(如Google Wikipedia)获取每个植物特性(如, 科、植物生命形式和植物类型). 除了苔藓植物、真菌、蕨类植物等, 所有的物种属于陆生高等植物, 包括裸子植物($n=115$)、双子叶植物($n=496$)和单子叶植物($n=280$)(图1b; 网络版附表1, <http://earthcn.scichina.com>). 由于 $n-C_{29}$ 在不同植物类型(如双子叶植物、单子叶植物、裸子植物)中含量丰富, 且在大多数植物长链烷烃中浓度最高(Sessions等, 1999; Liu和Yang, 2008; Liu等, 2016), 因此本研究主要针对 $n-C_{29}$ 的 δD 值. 数字高程图(DEM)数据从美国地质调查局获取, 空间分析在ArcGIS10.1中完成. 年平均降水 δD_{prec}

值通过在线降水同位素计算器获取(OIPC; Bowen和Revenaugh, 2003).

2.2 数据分析

因为植物类型对陆生高等植物的叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值具有显著影响(Gao等, 2014; Liu等, 2016; Liu和An, 2019), 叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值按照植物类型(双子叶植物、单子叶植物、裸子植物)划分为三组进行分析. 依据Shapiro-Wilk检验每种类型叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 数据属于正态分布, 参数Pearson秩相关用来描述变量之间的关系. 通过单程方差分析评估叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值是否存在显著差

异。多元线性回归分析用来拟合纬度和高度对叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值整体影响。所有统计检验的显著性水平平均设为95%。

尽管有文献指出高纬度OIPC获取的月平均降水 δD_{prec} 值相比直接测量的值略微偏正(68.5°N; Daniels等, 2017), 然而通过OIPC获取的年平均降水 δD_{prec} 值在大尺度水平上是可信的(Tipple和Pagani, 2013; Feakins等, 2016; Liu和An, 2019)。叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和降水 δD_{prec} 值之间的表观分馏值 ϵ_{app} 的计算公式为

$$\epsilon_{app} = \left(\frac{\delta D_{n-alkane} + 1000}{\delta D_{prec} + 1000} - 1 \right) \times 1000(\text{‰}). \quad (1)$$

3 结果

3.1 全球 $\delta D_{n-alkane}$ 值数据集

在海拔7~1500m之内, 裸子植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值介于-229~-103‰之间, 平均值为 $(-159 \pm 28)\text{‰}$ ($n=115$); 在海拔1~4812m之内, 双子叶植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值介于-293~-95‰之间, 平均值为 $(-166 \pm 29)\text{‰}$ ($n=496$); 在海拔1~5243m之内, 单子叶植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值介于-308~-117‰之间, 平均值为 $(-194 \pm 30)\text{‰}$ ($n=280$) (网络版附表1)。裸子植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和双子叶植物相似($p=0.09$), 整体相对单子叶植物偏正($p<0.05$; 图1c)。该结果得到先前研究结果的支持(Gao等, 2014; Daniels等, 2017; Liu等, 2016; Liu和An, 2019)。因此, 为了研究方便, 本研究主要集中在对单子叶植物和双子叶植物的对比。

3.2 叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的高度效应

全部植物(包括双子叶植物和单子叶植物)叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值和对应点的降水 δD_{prec} 值随高度的增加而下降($p<0.05$; 图2a)。类似地, 双子叶植物(图3a)和单子叶植物(图3b)的叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值随海拔高度升高而降低, 对应于 δD_{prec} 值的降低趋势。我们发现表观分馏值 ϵ_{app} 值从-121‰(10hm, 百米)到-120‰(50hm)基本保持稳定(图2a)。表观分馏值 ϵ_{app} 值和高度之间没有显著相关性($p=0.99$; $n=891$; 图2b), 该结果与双子叶植物($p=0.12$; $n=496$; 图3c)和单子叶植物($p=0.09$; $n=280$; 图3d)保持一致。双子叶植物表观分馏值 ϵ_{app} 值相比单子叶植物偏正约30‰, 该结果支持植物类型在确定 ϵ_{app}

图2 降水 δD_{prec} 值和叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值以及表观分馏值随海拔高度的变化

(a) 降水 δD_{prec} 值(黑色圈)和叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值(黑色点). (b) 表观分馏值(ϵ_{app}). 灰色区域代表95%的置信区间

值时起着关键作用, 因此区分双子叶植物和单子叶植物是有必要的。

4 讨论

4.1 表观分馏值 ϵ_{app} 对高度的独立性

全球数据揭示全部植物表观分馏值 ϵ_{app} 对高度基本保持稳定(图2a), 该植物涵盖不同植物类型, 如双子叶植物(图3a)和单子叶植物(图3b)。这种相对稳定的表观分馏值 ϵ_{app} 和先前的研究结果一致(Garcin等, 2012; Liu等, 2016; Liu和An, 2019)。全部植物(图2b), 以及不同植物类型(双子叶植物, 图3c; 单子叶植物, 图3d)的表观分馏值 ϵ_{app} 和高度之间没有显著相关性, 暗示双子叶植物或单子叶植物的表观分馏值 ϵ_{app} 也对高度保持稳定。对高度保持稳定的表观分馏值 ϵ_{app} 也被观察在其

图 3 降水 δD_{prec} 值(黑色圈)和叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值(黑色点)以及表观分馏值 ϵ_{app} 随高度的变化

(a)、(c) 双子叶植物; (b)、(d) 单子叶植物. (a) 双子叶植物表观分馏值 ϵ_{app} 在10hm和40hm海拔高度分别为 -110‰ 和 -100‰ . (b) 单子叶植物表观分馏值 ϵ_{app} 在10hm和50hm海拔高度分别为 -139‰ 和 -127‰ . 灰色区域代表95%置信区间

他海拔样带, 如安第斯山脉和亚马逊(Feakins等, 2016)以及青藏高原(Zhang等, 2017). 除了与高度无关外, 表观分馏值 ϵ_{app} 与水文气候参数也无显著相关性, 如降水、RH、MAT(年平均温度)或VPD(饱和水汽压差)(Tippie和Pagani, 2013). 每个因素的贡献可能会不同(Liu和Yang, 2008; Sachse等, 2012; Zhuang等, 2014). 相对稳定的 ϵ_{app} 值解释为多效应抵消的结果, RH和植被变化(Hou等, 2008), 干旱条件下的蒸腾作用(Feakins和Sessions, 2010), 土壤蒸发和生物合成的抵消作用(Zhang等, 2017), 以及双子叶植物和单子叶植物的混合(Liu和An, 2019). 总体而言, 表观分馏值 ϵ_{app} 在不同气候和地形条件下是相对稳定的(Sachse等, 2006; Hou等, 2008; Feakins和Sessions, 2010; Garcin等, 2012; Tippie和Pagani, 2013; Daniels等, 2017; Zhang等, 2017;

Liu和An, 2019). 我们的结果证实了全球表观分馏值 ϵ_{app} 随高度也是基本保持稳定. 相对稳定的 ϵ_{app} 值为叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值作为古高度重建提供了理论基础(Hou等, 2008; Feakins和Sessions, 2010; Zhang等, 2017; Daniels等, 2017; Liu和An, 2019).

相反地, 一些研究指出 ϵ_{app} 值在某海拔地区间是不稳定的. 低海拔地区的 ϵ_{app} 值与高度不相关, 该结果与我们的结果一致. 然而, 一些偏负的 ϵ_{app} 值出现在某些海拔区间, 该结果出现在贡嘎山(Jia等, 2008)以及武夷山和神农架等地区(Luo等, 2011). 这些相对偏负的 ϵ_{app} 值可能与低海拔到高海拔的植被变化(Jia等, 2008)、高海拔地区OIPC模型对降水 δD_{prec} 值的高估(Daniels等, 2017)、水源变化等因素有关(Luo等, 2011). 首先, 植被变化支持 ϵ_{app} 值在单子叶植物和双子叶植物之间

的显著差异, 单子叶植物相比双子叶植物偏负(Polissar等, 2009; Gao等, 2014; Liu等, 2016; Liu和An, 2019). 第二, 高海拔地区OIPC评估的降水 δD_{prec} 值可能比实际 δD_{prec} 值偏高(Luo等, 2011), 因为高海拔或高纬度地区监测站比较稀疏(Bowen和Revenaugh, 2003), 北极阿拉斯加(68.5°N, 149.5°W)的结果发现OIPC估算的降水 δD_{prec} 值相对观测值略偏正(Daniels等, 2017). 然而, 木质水 δD 值和OIPC估算的年平均降水 δD 值的对应关系暗示OIPC估算值能够可靠地反映植物可利用的水源(Tipple和Pagani, 2013). 因此, 全球尺度上, OIPC估算年平均降水 δD_{prec} 值可以代表源水 δD 值(Sachse等, 2012; Liu和An, 2019).

4.2 影响高度与叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值关系的因素

随高度相对稳定的 ε_{app} 值说明利用叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值在大尺度重建古高度是可行的. 叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值随高度增加逐渐下降出现在全部植物($R^2=0.24$; $p<0.05$; 图2a)、双子叶植物($R^2=0.23$; $p<0.05$; 图3a)和单子叶植物($R^2=0.18$; $p<0.05$; 图3b). 这种下降的趋势对应于降水 δD_{prec} 值随高度的变化(图2、3). 然而, 全球叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值和高度的弱相关说明除了海拔高度外, 多种其他的因子共同作用于 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值. 众所周知, 叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值与高度的关系主要包含两个关键过程: (1) 空间上高度对降水 δD_{prec} 值的影响(图4a); (2) 多因子对 ε_{app} 值的控制(图4b, 网络版附表1). 第一, 高度对降水 δD_{prec} 值的影响已经在世界各地的许多山地样带上得到了很好的证明, 其随着海拔的增加而降低(Poage和Chamberlain, 2001). 降水 δD_{prec} 值随高度的增加而下降的趋势已经通过经验(Garzione等, 2000)和理论(Rowley等, 2001)的方法得到证实. 降水 δD_{prec} 值和海拔高度之间关系的原理主要基于瑞利分馏(Dansgaard, 1964), 即低海拔区沿斜坡向上的气团引起富集D和 ^{18}O 的降水, 而气团到达高海拔时引起贫瘠D和 ^{18}O 的降水(Gonfiantini等, 2001). 第二, 叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的控制因素已经被报道. Liu和Yang(2008)研究表明降水 δD_{prec} 值是叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的一级控制因子, 植物生命形式(乔木、灌木、草本等)和生理特性对 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值有显著影响. Sachse等(2012)阐明影响叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的因素包括降水 δD_{prec} 值、土壤和叶片的蒸腾蒸发作用以及生物合成作用. Sessions(2016)从环境、生物和物理/化学角度回顾了影响叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的因素. Liu和An(2018)提

图4 影响降水 δD_{prec} 值(a)和控制叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值(b)的概念图 (a) 全球降水 δD_{prec} 值随纬度和高度的变化受到瑞利分馏的影响(Dansgaard, 1964). (b) 陆生高等植物叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的合成过程受到水文气候因子和生理生物因子共同控制, 修改自Sachse等(2012)和Liu等(2016)

出了控制叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的层次控制框架. 尽管对叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的控制作用已经得到很好的研究, 但是控制叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的时空变异性尚需进一步的研究.

我们的概念模型揭示全球海拔高度对降水 δD_{prec} 值的影响也需要考虑“纬度效应”(图4a), 而对表观分馏值 ε_{app} 的影响主要包括水文气候因子和生理生物因子(图4b). 多项研究表明叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值受到纬度的影响(Liu和Yang, 2008; Sachse等, 2012; Tipple和Pagani, 2013). 评估全球叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值与高度的关系时, 必须考虑纬度对 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值的影响. 同时, 叶蜡 $\delta D_{\text{n-alkane}}$ 值反演降水 δD_{prec} 值时也受到多种因素的影响(图4b; Sachse等, 2012; Daniels等, 2017). 总之, 降水是大部分陆生植物的唯一水源(Sachse等, 2006); 土壤蒸发和叶片水蒸腾都将导致土壤水和叶片水中D富集, 而生物合成过

程使得叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值中D贫瘠(Smith和Freeman, 2006; Sachse等, 2012; Liu等, 2016). 尽管控制这些过程的因子尚需进一步确认(图4b), 但是这些合成过程(与水文气候和生理生物因子有关)会影响叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值; 反之, 植物会调整自身的生理机能去适应环境, 从而导致稳定的 ε_{app} 值.

4.3 全球叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的关系

叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值随纬度和海拔高度的升高而降低, 但最低值出现在高纬度和中海拔地区(约1~2km), 并非出现在纬度和高度的最大值处. 这种现象发生在双子叶植物(图5a)和单子叶植物(图5b)中. 这个结果暗示纬度和高度共同对叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值产生影响. 因此, 进行海拔高度对 $\delta D_{n-alkane}$ 值影响的评估时, 消除“纬度效应”是很重要的. 虽然大量研究评估了 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的递减率, 如在美国落基山脉、欧洲阿尔卑斯山、南美安第斯山和中国青藏高原等地区, 但是仍然有一些地区尚未进行叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值的调查, 如非洲、南美、中东、俄罗斯和加拿大北部等(图1a). 因此, 如果我们需要重建这些未调查地区的高程变化, 使用全球 $\delta D_{n-alkane}$ -

高度的递减率可能是不错的选择. 通过多元线性回归得到全球叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -纬度-高度的公式如下.

总体:

$$\delta D_{n-alkane}(\text{‰}) = (-0.46 \pm 0.07) \times \text{Latitude} (^{\circ}) + (-1.01 \pm 0.10) \times \text{Altitude (hm)} \pm (-149 \pm 3),$$

$$(p < 0.05; R^2 = 0.20). \quad (2)$$

单子叶植物:

$$\delta D_{n-alkane}(\text{‰}) = (-0.14 \pm 0.08) \times \text{Latitude} (^{\circ}) + (-1.03 \pm 0.13) \times \text{Altitude (hm)} \pm (-153 \pm 3),$$

$$(p < 0.05; R^2 = 0.18). \quad (3)$$

双子叶植物:

$$\delta D_{n-alkane}(\text{‰}) = (-1.03 \pm 0.15) \times \text{Latitude} (^{\circ}) + (-0.47 \pm 0.13) \times \text{Altitude (hm)} \pm (-148 \pm 6),$$

$$(p < 0.05; R^2 = 0.24). \quad (4)$$

不考虑纬度影响时, 我们得到的全球植物叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ -高度的递减率为 $(-1.01 \pm 0.10)\text{‰} (100\text{m})^{-1}$, 该结果在每100m下降1~4‰的范围之内(Jia等, 2008; Luo等, 2011; Nieto-Moreno等, 2016; Zhang等, 2017). 这个递减率为那些未调查区域提供了一个较好的

图5 叶蜡 $\delta D_{n-alkane}$ 值随纬度和高度的分布

(a) 双子叶植物; (b) 单子叶植物

选择.

双子叶和单子叶植物的全球叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ -高度的递减率分别为 $(-1.03 \pm 0.13)\%$ $(100\text{m})^{-1}$ 和 $(-0.47 \pm 0.13)\%$ $(100\text{m})^{-1}$. 这种递减率在双子叶植物和单子叶植物之间存在明显的差异. 双子叶植物和单子叶植物在不同的区域气候环境和地形条件下的分布特征可能是解释这种递减率差异的部分原因. 递减率受到气团的混合和路径、水汽来源以及凝结分馏的影响(Gat, 1996; Mulch, 2016), 不仅与地理位置、气候和水汽源有关, 而且受到气候梯度、垂直植被分布以及降水 δD_{prec} 值的影响(Luo等, 2011). 此外, 因为双子叶植物比单子叶植物叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值偏正(Gao等, 2014; Liu等, 2016), 生理特性也可能影响叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ -高度的递减率. 因此, 鉴于双子叶植物和单子叶植物叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ -高度的递减率的差异, 利用叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值进行古高度重建时, 评估某区域生态系统的优势种是有必要的(Liu等, 2018). 孢粉记录可以用来鉴别植物类型. 因为孢粉提可以提供生态系统植被变化的详细证据, 因此孢粉记录对于古生态研究非常有意义(Douglas等, 2012; Norström等, 2017).

沉积物通过落叶、颗粒蜡质沉积和土壤侵蚀在区域/生态系统上对叶蜡进行混合集成(Diefendorf和Freimuth, 2017), 而本地落叶输入可能是沉积物蜡质的主要来源(Seki等, 2010; Freimuth等, 2019). 为了更好地理解沉积物叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值的变化, 分析植物尺度叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值的时空变化是至关重要的. 本研究通过对全球植物叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值和高度之间关系的分析, 为沉积物叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值作为古高度重建提供深入的认识.

5 结论

本研究主要针对植物叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值随高度在全球的变化. 全部植物、双子叶和单子叶植物的叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值随高度的整体下降对应于降水 δD_{prec} 值随高度的变化. 全球叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ -高度的递减率为 $(1.01 \pm 0.10)\%$ $(100\text{m})^{-1}$, 该值将为叶蜡未调查区域古高度重建提供参考. 全球尺度上叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值随高度的弱相关可能是以下综合影响的结果: (1) 高度对降水 δD_{prec} 值的影响; (2) 叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值合成过程中复杂的分馏过程; (3) 叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值在不同植物类型之间的时空变化特征. 虽然多种因子影响叶蜡 $\delta D_{n\text{-alkane}}$ 值和海

拔高度的关系, 但是相对稳定的表观分馏值 ε_{app} 为该指标的古高度重建应用提供了理论基础. 多指标综合应用是未来古高度重建的趋势.

致谢 感谢张小龙博士、白艳副研究员和侯居峙研究员提供的宝贵意见.

参考文献

- Anderson V J, Saylor J E, Shanahan T M, Horton B K. 2015. Paleoelevation records from lipid biomarkers: Application to the tropical Andes. *Geol Soc Am Bull*, 127: 1604–1616
- Bai Y, Fang X, Jia G, Sun J, Wen R, Ye Y. 2015. Different altitude effect of leaf wax n -alkane δD values in surface soils along two vapor transport pathways, southeastern Tibetan Plateau. *Geochim Cosmochim Acta*, 170: 94–107
- Beerling D J, Royer D L. 2002. Fossil plants as indicators of the Phanerozoic global carbon cycle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 30: 527–556
- Bowen G J, Revenaugh J. 2003. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resour Res*, 39: 1299
- Collins J A, Schefuß E, Mulitza S, Prange M, Werner M, Tharammal T, Paul A, Wefer G. 2013. Estimating the hydrogen isotopic composition of past precipitation using leaf-waxes from western Africa. *Quat Sci Rev*, 65: 88–101
- Daniels W C, Russell J M, Giblin A E, Welker J M, Klein E S, Huang Y. 2017. Hydrogen isotope fractionation in leaf waxes in the Alaskan Arctic tundra. *Geochim Cosmochim Acta*, 213: 216–236
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436–468
- Diefendorf A F, Freimuth E J. 2017. Extracting the most from terrestrial plant-derived n -alkyl lipids and their carbon isotopes from the sedimentary record: A review. *Org Geochem*, 103: 1–21
- Douglas P M J, Pagani M, Brenner M, Hodell D A, Curtis J H. 2012. Aridity and vegetation composition are important determinants of leaf-wax δD values in southeastern Mexico and Central America. *Geochim Cosmochim Acta*, 97: 24–45
- Eglinton G, Hamilton R J. 1967. Leaf epicuticular waxes. *Science*, 156: 1322–1335
- Feakins S J, Bentley L P, Salinas N, Shenkin A, Blonder B, Goldsmith G R, Ponton C, Arvin L J, Wu M S, Peters T, West A J, Martin R E, Enquist B J, Asner G P, Malhi Y. 2016. Plant leaf wax biomarkers capture gradients in hydrogen isotopes of precipitation from the Andes and Amazon. *Geochim Cosmochim Acta*, 182: 155–172
- Feakins S J, Sessions A L. 2010. Controls on the D/H ratios of plant leaf waxes in an arid ecosystem. *Geochim Cosmochim Acta*, 74: 2128–

2141

- Feng X, D'Andrea W J, Zhao C, Xin S, Zhang C, Liu W. 2019. Evaluation of leaf wax δD and soil brGDGTs as tools for paleoaltimetry on the southeastern Tibetan Plateau. *Chem Geol*, 523: 95–106
- Freimuth E J, Diefendorf A F, Lowell T V, Wiles G C. 2019. Sedimentary *n*-alkanes and *n*-alkanoic acids in a temperate bog are biased toward woody plants. *Org Geochem*, 128: 94–107
- Gao L, Edwards E J, Zeng Y, Huang Y. 2014. Major evolutionary trends in hydrogen isotope fractionation of vascular plant leaf waxes. *PLoS ONE*, 9: e112610
- Garcin Y, Schwab V F, Gleixner G, Kahmen A, Todou G, Séné O, Onana J M, Achoundong G, Sachse D. 2012. Hydrogen isotope ratios of lacustrine sedimentary *n*-alkanes as proxies of tropical African hydrology: Insights from a calibration transect across Cameroon. *Geochim Cosmochim Acta*, 79: 106–126
- Garzione C N, Quade J, DeCelles P G, English N B. 2000. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from $\delta^{18}O$ vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya. *Earth Planet Sci Lett*, 183: 215–229
- Gat J R. 1996. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 24: 225–262
- Gonfiantini R, Roche M A, Olivry J C, Fontes J C, Zuppi G M. 2001. The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chem Geol*, 181: 147–167
- Gregory-Wodzicki K M. 2000. Uplift history of the Central and Northern Andes: A review. *Geol Soc Am Bull*, 112: 1091–1105
- Hou J D, D'Andrea W J, Huang Y. 2008. Can sedimentary leaf waxes record D/H ratios of continental precipitation? Field, model, and experimental assessments. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 3503–3517
- Jia G D, Wei K, Chen F, Peng P A. 2008. Soil *n*-alkane δD vs. altitude gradients along Mount Gongga, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 5165–5174
- Kahmen A, Simonin K, Tu K P, Merchant A, Callister A, Siegwolf R, Dawson T E, Arndt S K. 2008. Effects of environmental parameters, leaf physiological properties and leaf water relations on leaf water $\delta^{18}O$ enrichment in different Eucalyptus species. *Plant Cell Environ*, 31: 738–751
- Liu J, Liu W, An Z. 2015. Insight into the reasons of leaf wax δD *n*-alkane values between grasses and woods. *Sci Bull*, 60: 549–555
- Liu J, Liu W, An Z, Yang H. 2016. Different hydrogen isotope fractionations during lipid formation in higher plants: Implications for paleohydrology reconstruction at a global scale. *Sci Rep*, 6: 19711
- Liu J, An Z. 2018. A hierarchical framework for disentangling different controls on leaf wax δD -alkane values in terrestrial higher plants. *Quat Sci Rev*, 201: 409–417
- Liu J, An Z. 2019. Variations in hydrogen isotopic fractionation in higher plants and sediments across different latitudes: Implications for paleohydrological reconstruction. *Sci Total Environ*, 650: 470–478
- Liu J, An Z, Liu H. 2018. Leaf wax *n*-alkane distributions across plant types in the central Chinese Loess Plateau. *Org Geochem*, 125: 260–269
- Liu W, Yang H. 2008. Multiple controls for the variability of hydrogen isotopic compositions in higher plant *n*-alkanes from modern ecosystems. *Glob Change Biol*, 14: 2166–2177
- Luo P, Peng P A, Gleixner G, Zheng Z, Pang Z, Ding Z. 2011. Empirical relationship between leaf wax *n*-alkane δD and altitude in the Wuyi, Shennongjia and Tianshan Mountains, China: Implications for paleoaltimetry. *Earth Planet Sci Lett*, 301: 285–296
- Mulch A. 2016. Stable isotope paleoaltimetry and the evolution of landscapes and life. *Earth Planet Sci Lett*, 433: 180–191
- Nieto-Moreno V, Rohrmann A, van der Meer M T J, Sinninghe Damsté J S, Sachse D, Tofelde S, Niedermeyer E M, Strecker M R, Mulch A. 2016. Elevation-dependent changes in *n*-alkane δD and soil GDGTs across the South Central Andes. *Earth Planet Sci Lett*, 453: 234–242
- Norström E, Katrantsiotis C, Smittenberg R H, Kouli K. 2017. Chemotaxonomy in some Mediterranean plants and implications for fossil biomarker records. *Geochim Cosmochim Acta*, 219: 96–110
- Pagani M, Pedentchouk N, Huber M, Sluijs A, Schouten S, Brinkhuis H, Damsté J S S, Dickens G R. 2006. Arctic hydrology during global warming at the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature*, 442: 671–675
- Peterse F, van der Meer M T J, Schouten S, Jia G, Ossebaer J, Blokker J, Sinninghe Damsté J S. 2009. Assessment of soil *n*-alkane δD and branched tetraether membrane lipid distributions as tools for paleoelevation reconstruction. *Biogeosciences*, 6: 2799–2807
- Poage M A, Chamberlain C P. 2001. Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleoelevation change. *Am J Sci*, 301: 1–15
- Polissar P J, Freeman K H, Rowley D B, McInerney F A, Currie B S. 2009. Paleoaltimetry of the Tibetan Plateau from D/H ratios of lipid biomarkers. *Earth Planet Sci Lett*, 287: 64–76
- Rao Z, Zhu Z, Jia G, Henderson A C G, Xue Q, Wang S. 2009. Compound specific δD values of long chain *n*-alkanes derived from terrestrial higher plants are indicative of the δD of meteoric waters: Evidence from surface soils in eastern China. *Org Geochem*, 40:

- 922–930
- Romero I C, Feakins S J. 2011. Spatial gradients in plant leaf wax D/H across a coastal salt marsh in Southern California. *Org Geochem*, 42: 618–629
- Rowley D B, Garzione C N. 2007. Stable isotope-based paleoaltimetry. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 35: 463–508
- Rowley D B, Pierrehumbert R T, Currie B S. 2001. A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: Implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the High Himalaya since the Late Miocene. *Earth Planet Sci Lett*, 188: 253–268
- Sachse D, Billault I, Bowen G J, Chikaraishi Y, Dawson T E, Feakins S J, Freeman K H, Magill C R, McNerney F A, van der Meer M T J, Polissar P, Robins R J, Sachs J P, Schmidt H L, Sessions A L, White J W C, West J B, Kahmen A. 2012. Molecular paleohydrology: Interpreting the hydrogen-isotopic composition of lipid biomarkers from photosynthesizing organisms. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 40: 221–249
- Sachse D, Kahmen A, Gleixner G. 2009. Significant seasonal variation in the hydrogen isotopic composition of leaf-wax lipids for two deciduous tree ecosystems (*Fagus sylvatica* and *Acer pseudoplatanus*). *Org Geochem*, 40: 732–742
- Sachse D, Radke J, Gleixner G. 2006. δD values of individual n-alkanes from terrestrial plants along a climatic gradient—Implications for the sedimentary biomarker record. *Org Geochem*, 37: 469–483
- Sahagian D, Proussevitch A, Carlson W. 2002. Timing of Colorado Plateau uplift: Initial constraints from vesicular basalt-derived paleoelevations. *Geology*, 30: 807–810
- Schimmelmann A, Sessions A L, Mastalerz M. 2006. Hydrogen isotopic (D/H) composition of organic matter during diagenesis and thermal maturation. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 34: 501–533
- Seki O, Nakatsuka T, Shibata H, Kawamura K. 2010. A compound-specific n-alkane $\delta^{13}C$ and δD approach for assessing source and delivery processes of terrestrial organic matter within a forested watershed in northern Japan. *Geochim Cosmochim Acta*, 74: 599–613
- Sessions A L. 2016. Factors controlling the deuterium contents of sedimentary hydrocarbons. *Org Geochem*, 96: 43–64
- Sessions A L, Burgoyne T W, Schimmelmann A, Hayes J M. 1999. Fractionation of hydrogen isotopes in lipid biosynthesis. *Org Geochem*, 30: 1193–1200
- Smith F A, Freeman K H. 2006. Influence of physiology and climate on δD of leaf wax n-alkanes from C3 and C4 grasses. *Geochim Cosmochim Acta*, 70: 1172–1187
- Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M, Herman A B, Guo S, Valdes P J, Wolfe J A, Kelley S P. 2003. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 421: 622–624
- Tipple B J, Pagani M. 2013. Environmental control on eastern broadleaf forest species' leaf wax distributions and D/H ratios. *Geochim Cosmochim Acta*, 111: 64–77
- Yang H, Liu W G, Leng Q, Hren M T, Pagani M. 2011. Variation in n-alkane δD values from terrestrial plants at high latitude: Implications for paleoclimate reconstruction. *Org Geochem*, 42: 283–288
- Zhuang G S, Brandon M T, Pagani M, Krishnan S. 2014. Leaf wax stable isotopes from Northern Tibetan Plateau: Implications for uplift and climate since 15 Ma. *Earth Planet Sci Lett*, 390: 186–198
- Zhang X, Xu B, Günther F, Mügler I, Lange M, Zhao H, Li J, Gleixner G. 2017. Hydrogen isotope ratios of terrestrial leaf wax n-alkanes from the Tibetan Plateau: Controls on apparent enrichment factors, effect of vapor sources and implication for altimetry. *Geochim Cosmochim Acta*, 211: 10–27

(责任编辑: 张传伦)