

汪洪娇, 曾蒙秀, 彭海军, 等. 红原泥炭记录的晚冰期以来若尔盖地区粉尘通量变率及其气候影响[J]. 第四纪研究, 2023, 43(1): 57-73.
WANG Hongjiao, ZENG Mengxiu, PENG Haijun, et al. Significance of climate conditions in the variability of eolian dust deposition since the last deglaciation in the Zoigê region recorded by the Hongyuan peat[J]. Quaternary Sciences, 2023, 43(1): 57-73.

doi: 10.11928/j.issn.1001-7410.2023.01.05

文章编号: 1001-7410(2023)01-57-17

红原泥炭记录的晚冰期以来若尔盖地区 粉尘通量变率及其气候影响*

汪洪娇¹, 曾蒙秀¹, 彭海军², 朱诚³,
李越⁴, 白勇勇¹, 曾巧¹, 孙静茹¹

(1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 4. 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, 陕西 西安 710061)

摘要: 由于高分辨率的气候重建记录, 尤其是粉尘通量重建结果仍然较少, 晚冰期以来东亚地区的气候突变机制存在很多争论。本研究对青藏高原东北部若尔盖红原泥炭 HY2014 剖面(深度 450 cm) 样品的灰分含量及其粒度组成和 K、Ti、Zr、Rb、Sr、V 等元素含量进行高分辨率测定, 基于 AMS ¹⁴C 测年结果, 重建了晚冰期以来该地区粉尘通量的变化动态, 并结合过去的研究结果综合探讨粉尘通量的影响机制。结果表明: 1) 红原泥炭中的 Ti、V、Sr、EF_{Zr}、EF_{Rb}、EF_K 等元素主要为风成输入, 可辅助粉尘通量来共同反映研究区大气粉尘沉积的变化历史。2) 14000~11600 cal. a B. P., 红原地区粉尘通量总体偏高, 其中 14000~12800 cal. a B. P. 期间由于红原地区发生特大古洪水事件使大气粉尘通量数值明显增加, 而 12800~11600 cal. a B. P. 期间气候冷干, 强劲的东亚冬季风和北半球西风急流将裸露的松散沉积物搬运沉积到红原泥炭地中, 导致红原大气粉尘通量增加; 11600~3100 cal. a B. P. 粉尘通量低, 其中在 11600~6400 cal. a B. P. 期间波动较为明显, 而在 6400~3100 cal. a B. P. 粉尘通量波动更为稳定。早中全新世气候总体暖湿, 受东亚冬季风和北半球西风急流影响较小且植被覆盖度较高, 粉尘通量总体较低; 3100 cal. a B. P. 以来东亚冬季风增强, 红原地区粉尘通量再次升高。3) 红原泥炭粉尘沉积通量记录了新仙女木事件, 还清晰地记录了此后发生的 7 次粉尘增强事件, 这在中国西北和北部的其他记录中也多有体现。粉尘增强事件发生时, 东亚冬季风增强, 粉尘源区干旱化, 植被覆盖面积减小, 粉尘释放增多, 红原泥炭中粉尘含量升高。

关键词: 红原泥炭; 粉尘通量; 元素地球化学; 气候突变; 东亚冬季风

中图分类号: P534.63⁺1, P532

文献标识码: A

开放科学标识码(OSID)



0 引言

矿物粉尘在全球气候系统中起着重要作用, 粉尘的释放、输送、沉降对辐射平衡、大气化学成分以及海洋和陆地生物地球化学循环具有重要影响^[1]。古粉尘记录是观察和理解这些相互作用的重要途径, 已被用作大气环流^[2]、风力强度^[3]、区域气候变化^[4]和干旱强度^[5]的代用指标。塔里木盆地中的塔克拉玛干沙漠、黄土高原等是亚洲地区重

要的粉尘源区^[6]。位于青藏高原东北部的若尔盖红原泥炭邻近这几个重要的粉尘源区, 通过亚洲冬季风、夏季风和北半球西风急流能将大气粉尘颗粒从不同源区输送到该地区。因此, 该区成为重建东亚地区过去大气粉尘沉积历史以及气候演化历史的关键区域。

由于泥炭沉积物易于精确定年且其代用指标的环境指示意义清晰, 泥炭记录被广泛运用于古气候和古环境重建的研究中^[7-9]。再加上泥炭生态系统

2022-04-05 收稿, 2022-08-15 收修改稿

* 贵州省科技计划项目(批准号: 黔科合基础[2020]1Y193)、国家自然科学基金项目(批准号: 42007400)和浙江省自然科学基金项目(批准号: LY22D020002)共同资助

第一作者简介: 汪洪娇, 女, 24岁, 硕士研究生, 自然地理学专业, E-mail: ivy7210@163.com

通讯作者: 曾蒙秀, E-mail: mengxiuzeng@zjnu.edu.cn; 彭海军, E-mail: penghaijun@mail.gyig.ac.cn

中生长的苔藓等植物可以捕获粉尘,因此泥炭记录的大气粉尘沉积历史较为清晰可靠^[10-11],使其成为研究过去环境和气候条件相互作用的重要地质载体^[12-14]。目前,基于泥炭沉积记录重建的历史粉尘通量变化研究工作集中在欧洲、美洲、澳大利亚-新西兰以及我国东北和青藏高原东北部等地区^[4,11],主要是通过挖掘泥炭中记录的典型地壳来源化学指标,包括微量元素^[15-16]、亲石元素^[17]、稀土元素^[18-19]、同位素(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)^[20]等,分析泥炭中的粉尘通量强度及其物质来源。这些研究取得了较大进展,但在重建古粉尘、古气候变化以及粉尘溯源等方面仍然存在年代精度控制、粉尘沉积增加的时间点等方面的不确定性。其中在我国东北地区,利用泥炭记录重建大气粉尘变化^[21-22]、大气金属污染^[23]以及与人类活动方面的关系^[24]已经比较系统。在青藏高原东北部,有关粉尘变化地质记录的研究大多基于红原泥炭展开,然而相关研究结果存在不一致之处^[2,25-26]。

Ferrat等^[2]通过微量元素和稀土元素(REE、Sc、Y、Th)恢复了红原地区过去9500 a B.P.以来大气粉尘沉积来源的变化及其与区域大气环流模式的关系。结果表明在9500~4900 a B.P.期间主要以本地源为主,此时印度季风较强,而在4900 a B.P.之后则以非本地源为主,对应了冬季风和西风急流的增强^[2];同时,基于铅同位素,重建整个全新世红原地区Pb沉积与大气环流历史,结果显示在7700~6900 a B.P.本地粉尘是Pb的重要来源,而在9200~3100 a B.P.、2700~1700 a B.P.和900~300 a B.P.红原泥炭中的Pb更多来自非本地粉尘^[25];此外,Yu等^[26]通过元素分析发现晚全新世以来红原泥炭记录了上风向区青海/甘肃人类活动的信息。可见,相关研究对红原地区全新世各阶段大气粉尘变化历史的记录仍不够详细,关于各个粉尘输入增强事件是否皆存在于各沉积记录中仍具有不确定性,直接对泥炭沉积中无机组分的地球化学元素、矿物、粒度组成等的研究少。因此,有必要开展更长时间尺度的泥炭研究,提高时间分辨率,加强各代用指标,尤其是针对直接源于大气沉降物质的研究来重建红原地区大气粉尘沉降历史及粉尘增强事件的细节信息,加强多套地层的对比研究,以增加解释大气环流小尺度变化的准确性。

本研究结合红原泥炭剖面的物理(灰分含量、粒度)和化学(微量元素)指标分析,对青藏高原东北部红原泥炭地过去14000 cal. a B.P.以来的粉尘

沉积历史进行重建。本研究的目标是:1)确定红原泥炭地Ti、V、Sr、EF_{Zr}、EF_{Rb}、EF_K等微量元素作为大气粉尘沉积记录的有效性;2)量化粉尘沉积通量并确定粉尘事件的年代;3)重建该区域粉尘沉积的主要阶段,探讨其不同阶段的潜在气候事件和控制因素。

1 研究区概况与野外样品的采集

青藏高原东北部若尔盖盆地(32°10′~34°10′N,101°45′~103°25′E)介于西北干旱区、东部季风湿润区和高原气候区之间(图1),当地气候类型为大陆性高原寒温带季风气候,该区气候寒冷,1987~2016年的年平均气温1.9℃,最冷月1月的平均温度为-9℃,最热月7月的平均气温为11.5℃^[27],大部分地区四季分异不明显,长冬无夏,春秋相连;年降水量为650~750 mm,全年降雨量的约80%集中在5~9月,而60%则集中于7~9月,雨热同季^[28]。若尔盖泥炭沉积覆盖数十公里的山谷,泥炭层的深度从3 m到7 m不等,最厚处出现在山坡的缓坡上,成为研究晚更新世以来环境演化的理想地质材料^[29]。红原泥炭地是若尔盖盆地的重要组成部分,位于川西高原红原县城西南2 km左右,平均海拔3400 m。泥炭地水源主要为降水直接补给,没有河流直接流入。该地植被表现出明显的垂直变化,海拔3800 m以上山地为高寒灌丛草甸,3000~3800 m覆盖的是高山针叶林,海拔3000 m以下是混交林^[30]。

2014年5月在红原泥炭地以开挖探槽的方式采集了一套底部深度为450 cm的泥炭地层剖面,记为HY2014。采样点的地理坐标为32°46′49.850″N,102°30′57.047″E,海拔高度3509 m。根据沉积物颜色、分解程度、包括植物残体多少等特点,从剖面顶部到底部共分为7层:

- 0~10 cm 为棕褐色表层土;
- 11~214 cm 为黄色草炭层;
- 215~320 cm 为黑黄交错泥炭层;
- 321~356 cm 为黑色草炭层;
- 357~366 cm 为灰色淤泥层;
- 367~390 cm 为黑色草炭层;
- 392~450 cm 为青灰色淤泥层。

2 材料与方法

2.1 AMS ¹⁴C 年代测定

选取HY2014剖面不同深度的13个样品在中

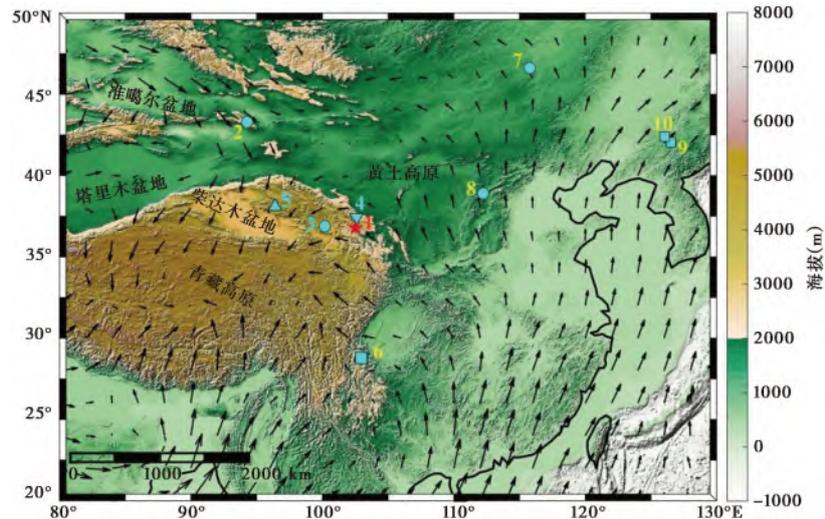


图1 研究区及文中涉及到的部分研究采样点所处的地理位置

1. 红原泥炭地(本研究); 2. 托勒库勒湖^[31]; 3. 青海湖^[32]; 4. 黄河^[33]; 5. 敦德冰芯^[34]; 6. 越西泥炭^[19]; 7. 夏日诺尔湖^[35]; 8. 公海^[24]; 9. 哈尼泥炭^[11]; 10. 孤山屯泥炭^[36]

黑色箭头代表 1851~2014 年夏季(6~8 月) 850 hPa 的平均风场(风场数据来源于 NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis V2c)^[37];

地形数据来源于 NOAA Data Announcement 88-MGG-02(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5>. HTML)

Fig. 1 Location of the study area and other reference sites. 1. The Hongyuan peatland(this study); 2. The Tuolekule Lake^[31]; 3. The Qinghai Lake^[32]; 4. The Huangyang River^[33]; 5. The Dunde ice core^[34]; 6. The Yuexi peatland^[19]; 7. The Xiarinur Lake^[35]; 8. The Gonghai Lake^[24]; 9. The Hani peatland^[11]; 10. The Gushantun peatland^[36]. The black arrows indicate averaged wind field at 850 hPa in summer(from June to August) from 1851 to 2014(wind field data retrieved from the NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis V2c)^[37]; and the terrain data retrieved from the NOAA Data Announcement 88-MGG-02(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5>. HTML)

中国科学院地球环境研究所加速器质谱中心进行 AMS ¹⁴C 年代测定,测年结果采用国际通用的程序 CALIB7.0.4 版本(<http://calib.org/calib/>)进行年代校正,通过 Bacon^[38]方法建立了 HY2014 剖面的沉积年代序列。该剖面沉积连续,没有出现年代倒置情况,也没有发生地层缺失等现象,底部 450 cm 的年代约为 14000 cal. a B.P.。详细的 AMS ¹⁴C 测年结果及其校正年代、年代-深度模型构建参见以前的文献报道^[28]。

2.2 实验室分析

样品的地球化学元素含量测定在中国科学院地球环境研究所完成。以 2 cm 间距对 HY2014 剖面进行连续取样,共获得 225 个泥炭样品。将经过烘干研磨后的样品过 200 目筛网并混合均匀;然后取 10 g 样品放入坩埚,在马弗炉中 550 °C 的环境下灼烧 4 h;从马弗炉取出灰分^[39](泥炭沉积中无机矿物组分,灰烬质量与干样质量之比即为泥炭灰分含量(%))至干燥皿中,待冷却至室温后测定其灰分含量,然后将灰分放入制样模具;之后在 20 t 的压

力下形成具镶边外径的牢固、平整、无裂痕圆饼状标本。将制备好的标本在 Innov-X 便携式 XRF 光谱分析仪(美国 Innov-X Systems 系列)的土壤模式下^[40]快速测定出 Ca、Fe、Mn、Ti、Zr、V、S、As、Zn、K、Rb、Sr 元素浓度含量。同样以 2 cm 为间隔,在浙江师范大学地理与环境科学学院对 225 个样品的粒度组成进行了测定。取 0.5 g 左右泥炭或草炭、0.2 g 左右淤泥层样品放置于坩埚中,并在马弗炉中以 250 °C 的条件加热 3 h(烧失温度小于 300 °C 时,烧失量与有机碳的相关性最大^[41],因此选取 250 °C 可以在最大程度上燃烧反应掉有机质,同时也避免产生矿物颗粒的团聚而影响样品粒度组成);将加热后的样品放入 100 ml 的烧杯中,加入 20 ml 浓度为 10% 的过氧化氢(H₂O₂),加热至样品中无气泡产生以去除有机质;之后在样品中加入 10 ml 浓度 10% 的盐酸(HCl),加热至无气泡产生以去除碳酸盐;在洗除碳酸盐的样品中加入 0.05 mol/L 六偏磷酸钠((NaPO₃)₆)分散剂 10 ml,并使用超声波震荡 20 min 后在激光粒度粒形分析仪上完成测定(型号: S3500 系列,美国 Microtrac

MRB/麦奇克), 粒径测量范围为 0.02~2000 μm 。

2.3 数据计算和分析

泥炭粉尘通量变率可通过计算样品中 Ti 元素浓度、干容重和沉积速率得出^[15]。因为粉尘中 Ti 的浓度等于地壳中 Ti 的丰度 (4010 $\mu\text{g/g}$ 或 0.40%) , 所以将泥炭中 Ti 的浓度除以矿物质粉尘 Ti 的浓度并通过泥炭灰分校正 Ti 浓度, 进而计算泥炭中粉尘的浓度 (CSD, 单位: $\mu\text{g/g}$) ; 根据泥炭粉尘的浓度和沉积速率计算粉尘通量变率^[4] (ASD, 单位: $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$) 。

$$\text{CSD} = \text{Ti} \times \text{ASH} \times 250 \quad (1)$$

$$\text{ASD} = \text{CSD} \times \text{DBD} \times \text{SD} \quad (2)$$

公式(1)和(2)中, Ti 元素浓度 (ppm, 1 ppm = 1 mg/kg) , ASH 为泥炭灰分含量 (%) , DBD 为泥炭干容重 (g/cm^3) , SD 为泥炭沉积速率 (cm/a) 。

前人研究中利用泥炭全样测定 Ti 元素浓度^[42] , 而本文中利用泥炭灰分测得 Ti 的浓度, 因此, 在利用前人的计算公式时略作修改, 即通过泥炭灰分含量校正 Ti 的浓度。鲍崑山等^[7,15] 已将本方法应用于大兴安岭摩天岭和长白山雨养泥炭大气粉尘沉积记录研究中。

富集因子 (Enrichment Factor, 简称 EF) 分析可用来消除由于矿物和粒度变化等因素所产生的影响^[43]。参比元素选择地球化学性质稳定, 不易受变

质、蚀变和风化作用影响的 Ti、Sc、Th、Nb 元素^[44]。本研究使用 Ti 作为参比元素, 将富集因子 (EF) 定义为:

$$\text{EF} = (\text{M}/\text{Ti})_{\text{Sample}} / (\text{M}/\text{Ti})_{\text{UCC}} \quad (3)$$

公式(3)中, $(\text{M}/\text{Ti})_{\text{Sample}}$ 是本研究中泥炭元素与参比元素的比值; $(\text{M}/\text{Ti})_{\text{UCC}}$ 指上陆壳元素与参比元素比值。

3 结果

3.1 两种方法获得的元素含量的对比

为了检验便携式光谱测试仪所测定的 HY2014 剖面元素数据的可靠性, 将其测定结果与传统 X 射线荧光光谱仪 (X-ray Fluorescence Spectrometer, 简称 XRF) 测定结果中获得的 Ti、Rb、Sr 元素含量^[28] 进行相关分析。结果表明, 便携式光谱测试仪和传统 XRF 所测定的 Rb、Sr 元素含量的相关性较高, 相关系数分别为 0.97、0.94; Ti 元素含量相关性相对更低, 为 0.89。在 HY2014 剖面中通过两种测定方法获取的 3 种元素含量在整个沉积序列上有相似的变化趋势 (图 2)。此外, Rb/Sr 比值与 Rb 元素间的相关性更高 (通过便携式光谱仪测试方法和传统 XRF 方法测定结果的相关系数分别为 0.97 和 0.89) , 而与 Sr 元素间的相关性则相对更低 (两种方法测定结果的相关系数分别为 0.58 和 0.46)。相比 Rb 和 Sr 元素的测定结果, 两种方法获得的 Ti

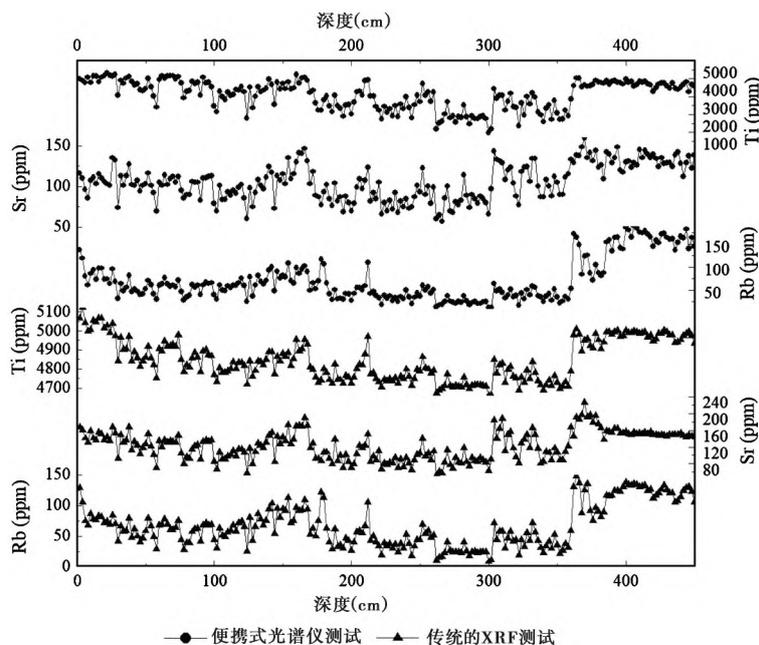


图 2 HY2014 剖面样品基于传统 XRF 和便携式光谱仪测试数据在整个沉积序列的变化

Fig. 2 Variations of trace element concentration measured by the traditional X-ray fluorescence spectrometer and portable spectrometer in the whole sedimentary sequence of HY2014 profile

元素含量相关性最低,可能与两种仪器的测试精度略微的不同以及 Ti 元素的物理化学性质差异相关。但通过两种方法获得的元素含量变化趋势是一致的,反映了基于这两种方法获得的数据差别不大,通过便携式光谱仪测定的 HY2014 剖面样品元素含量结果具有可靠性,可用以开展进一步的分析。

3.2 红原泥炭环境代用指标变化特征

HY2014 剖面的化学元素中 Zr、K、V 与元素 Ti、Rb、Sr 记录的变化趋势一致,这 6 种元素之间具有高相关性,且均与泥炭灰分含量吻合较好(图 3)。元素 Ti、V、Sr 与 3 个粒度参数(粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量、粒径 $<16\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量和平均粒径 Mz)相关性均低,而元素 K、Zr、Rb 与粒度参数相关性较高。因此,将元素 K、Zr、Rb 进行富集因子分析,结果表明,获得的 EF_K 、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 在整个剖面上的变化趋势与元素 K、Zr、Rb 含量的变化趋势基本一致。在各粒度参数中,粒径 $<16\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量与粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量及平均粒径均呈负相关($R=-0.83$, -0.97 , $P<0.01$, $n=225$),粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量与平均粒径呈正相关($R=0.92$, $P<0.01$, $n=225$)。

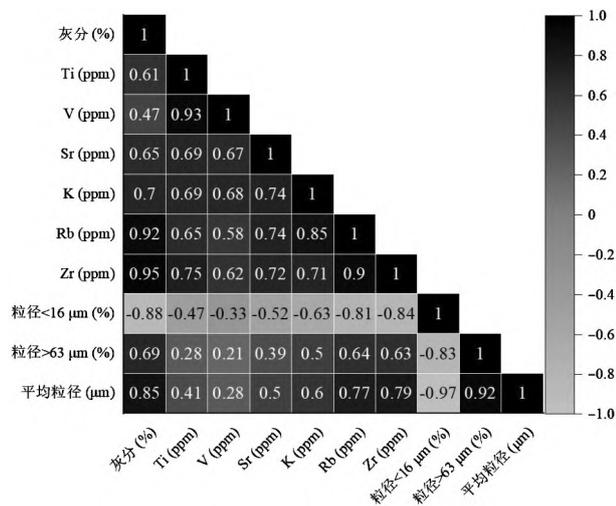


图 3 HY2014 剖面地球化学元素、灰分与粒度的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of geochemical elements, ash content and grain size composition in HY2014 profile

HY2014 剖面中元素和粒度组成总体呈相似的变化趋势(图 4)。在 11600 cal. a B.P. 之前, Ti、V 和 Sr 元素均呈现出高浓度, 平均值分别为 3206 ppm、73 ppm 和 124 ppm; 灰分含量、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 和 EF_K 也保持相对高值的趋势。各指标值在 11200~10800 cal. a B.P. 和 10600~9700 cal. a B.P. 出现明

显的波动。在 11600~6400 cal. a B.P. 期间, Ti、V 和 Sr 元素平均浓度分别下降至 2814 ppm、65 ppm 和 93 ppm, 呈低位波动状态; 灰分含量及 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 和 EF_K 也保持较低的趋势, 波动相对较小; 这一时期各代用指标分别在 8600~8200 cal. a B.P.、7600~7100 cal. a B.P. 以及 6500~5900 cal. a B.P. 出现较为明显的高值, 其中 EF_{Rb} 、 EF_K 在 6400 cal. a B.P. 附近峰值明显; 在 6400~3100 cal. a B.P. 期间元素浓度仍然较低但相对前一阶段略微有所升高且相对较为稳定, 灰分含量、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 和 EF_K 在此期间保持相对低位稳定状态。3100 cal. a B.P. 以来, Ti、V 和 Sr 元素浓度在波动中逐渐升高, 平均值分别上升至 3861 ppm、86 ppm 和 106 ppm, 在 3100~2300 cal. a B.P. 期间 K、Ti、V 和 Zr 平均浓度均较高。在 1400~700 cal. a B.P. 灰分含量、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 上升趋势更明显。

在各粒径参数中, 粒径 $<16\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量变化趋势与粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量及平均粒径的变化趋势相反。平均粒径和粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量在 11600 cal. a B.P. 之前均较高, 而粒径 $<16\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量整体较低; 三者 在 11600~3100 cal. a B.P. 之间变化较为平稳, 粒径 $<16\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量保持高值, 平均粒径和粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量则为低值, 其中在 6400 cal. a B.P. 出现明显波动; 3100 cal. a B.P. 以来, 粒径 $<16\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量再次下降, 平均粒径和粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量总体呈上升趋势。

3.3 红原泥炭记录的大气粉尘通量

HY2014 剖面晚冰期以来的大气粉尘沉积变化明显, ASD 波动于 $0.17 \sim 40.74\ \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ 之间(图 5)。14000~11600 cal. a B.P., ASD 均值为 $21.52\ \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 处于整个剖面的最高值但呈逐渐降低趋势; 11600~6400 cal. a B.P. 期间, 在剖面上呈低位波动状态, 均值为 $1.60\ \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 与前期相比, 6400 cal. a B.P. 以来 ASD 略微升高, 均值为 $1.78\ \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 3100 cal. a B.P., ASD 均值升高至 $3.55\ \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ 。此外, 晚冰期以来红原地区大气粉尘通量分别在 11200~10800 cal. a B.P.、10600~9700 cal. a B.P.、8600~8200 cal. a B.P.、7600~7100 cal. a B.P.、5900~5500 cal. a B.P.、3100~2300 cal. a B.P. 和 1400~700 cal. a B.P. 出现明显的粉尘峰值。

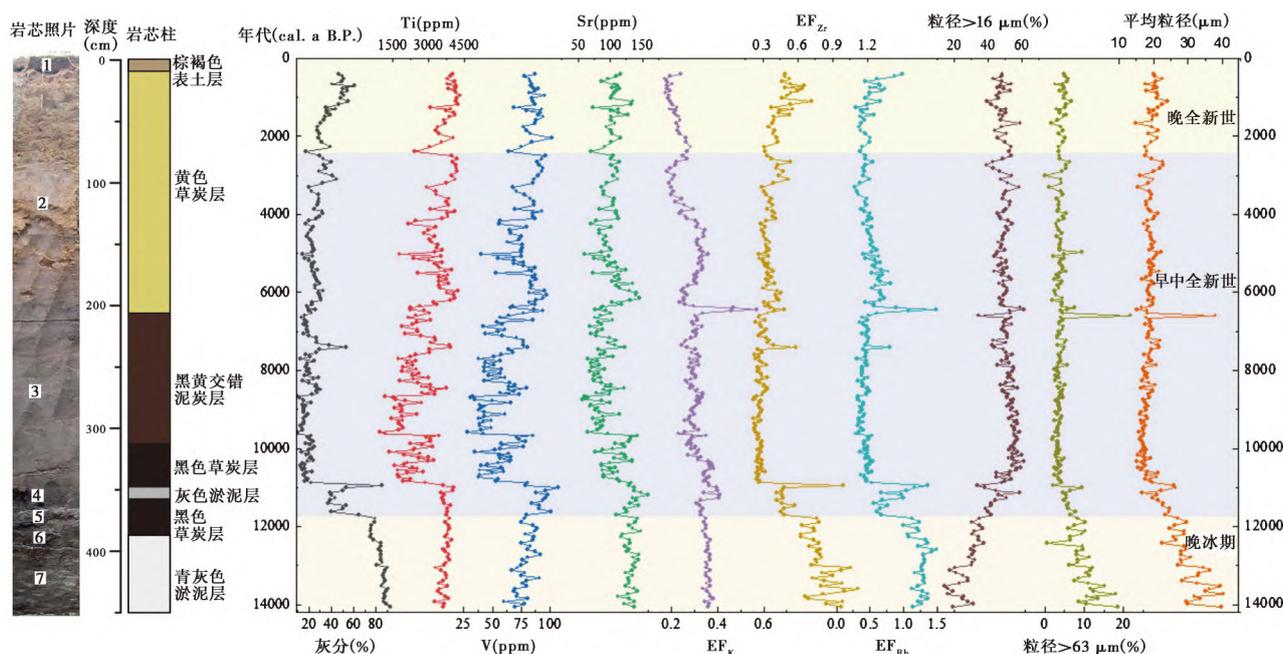


图4 HY2014剖面的现场照片、各深度地层性质以及地球化学元素、灰分、粒度随时间变化特征

Fig. 4 Field photos, stratigraphic properties and the variation characteristics of geochemical elements, ash content and grain size composition with the timeseries recorded in HY2014 profile

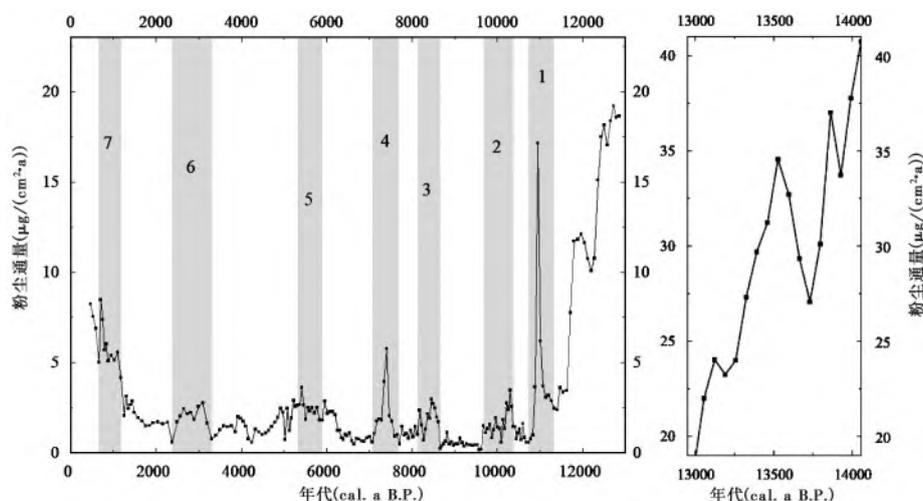


图5 HY2014剖面记录的大气粉尘通量历史变化

灰色区域及数字表示红原地区的粉尘增强事件

Fig. 5 Historical variation of atmospheric dust flux recorded by HY2014 profile. The grey shades represent the dust enhancement event

4 讨论

4.1 粉尘代用指标的提取

泥炭发育的重要水文条件是沉积环境水动力弱、水流速度缓慢^[45]。红原泥炭为典型的雨养型泥炭,而雨养型泥炭主要由有机质、矿物质和腐殖质组成,其中矿物质由流水输入的可能性较少,主要来自大气降尘^[46]。此前研究表明红原泥炭孔隙水

电导率极低,水中溶解物质非常少,不太可能有成岩矿物沉淀^[47]。矿物学分析也显示红原泥炭的主要成分为石英颗粒物,其表面具有贝壳状断口、蝶形坑、毛玻璃麻点等风成堆积特征,可能暗示该地区泥炭沉积物中含有风尘堆积组分^[48]。此外,Al、Ti、Sr、Ca等元素在泥炭垂直方向上迁移微弱^[2],HY2014剖面泥炭地层中Sr等元素的含量波动更不明显(图4),从而在泥炭的无机成分分析中具有重要意义。

为了提取红原泥炭中的风成元素以反映该区大气粉尘沉积变化,对 12 种元素进行聚类分析和因子分析(表 1)。结果显示可以将元素分为 3 类,其中 Ti、Zr、V、K、Rb、Sr 被归为一类,与因子 1 提取的元素 Ti、Zr、V、K、Rb、Sr 相一致。因子 1 的方差贡献率达 40.55%,远高于其他因子。为了确定这 6 个元素的实际意义,需要先对这些元素的地球化学性质进行分析探讨。研究表明含 Ti 矿物,如金红石抗化学风化能力强,Ti 可作为土壤和沉积物中的稳定参考元素^[49]。Shotyk^[50]在回顾泥炭的无机地球化学特征时,曾总结认为 Ti 主要来源于大气粉尘沉降;南美智利南部泥炭沼泽中 Ti 元素的分布,则表明过去 6000 年该区矿物累积以稳定的大气沉积为主^[17];Yancheva 等^[51]研究认为中国南方湖光岩玛珞湖沉积物中 Ti 含量的变化可以指示受东亚冬季风强度变化控制的粉尘变化。此外,通常认为 Zr 是保守的亲石元素,沉积后迁移微弱,在泥炭地中的含量可以用来指示大气粉尘沉积情况^[52]。东南亚加里曼丹岛泥炭^[4]、红原泥炭^[2]、北疆泥炭沉积^[18]以及老白山泥炭^[53]的研究中,也将 Zr 元素的含量用来反映风成输入以指示大气粉尘变化。因此,稳定元素 Ti 和 Zr 能很好地记录泥炭地周边地区的大气粉尘活动,与 Ti 和 Zr 元素显著相关的其他元素可能代表了相近的地球化学行为。相关分析显示 V、K、Rb、Sr 与 Ti、Zr 元素显著相关,这些元素的沉积后迁移很微弱,可以用来反映风成输入的粉尘变化。

为了避免对地球化学记录的误读,也需要进一步确定泥炭中的微量元素含量是否受到其他因素的影响。元素与粒度的相关分析表明(图 3),Ti、V、Sr 元素与粒度参数的相关性较小,说明元素含量变化受泥炭灰分粒度变化的影响弱;而 K、Zr、Rb 含量受到粒度组成的影响更为明显。富集因子(EF)可以用来消除粒度和矿物组成对元素含量的影响^[43]。在本研究中,采用 Ti 作为参比值,对元素 K、Zr、Rb 进行校正,校正后的变化趋势与原元素的变化趋势一致,且 EF_K 、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 值在整个剖面上都在 1 附近波动(图 4)。而研究认为如果元素的 EF 值接近于 1,最大值小于 5,则说明这些元素可能来自于大气粉尘沉积^[7],因而红原泥炭 K、Zr、Rb 元素来自于大气粉尘沉积。K 元素分布于硅酸盐矿物中,受化学风化影响,易于被粘土吸附且随粒度减小而增加^[54],其与粒径 $< 16 \mu\text{m}$ 的颗粒含量呈负相关,说明 K 元素可能是风力搬运过来赋存在泥炭矿

表 1 HY2014 剖面元素因子得分系数矩阵

Table 1 Element factor score coefficient matrix of the HY2014 profile

评价指标	F1	F2	F3
S	-0.342	0.694	0.531
K	0.857	-0.018	0.278
Ca	0.167	0.543	-0.693
Ti	0.900	-0.067	-0.031
V	0.843	0.042	0.098
Mn	-0.045	0.851	-0.154
Fe	0.313	0.705	-0.493
Zn	-0.174	0.360	0.404
As	0.098	0.712	0.371
Rb	0.900	-0.045	0.006
Sr	0.836	0.231	0.283
Zr	0.905	-0.171	-0.063

物中,后期没有接受化学风化改造。Rb 是典型的分散元素,在表生风化过程中释放出的 Rb 元素很快被富含 K 的粘土所吸附,其在风化成壤过程中不可能有十分强烈的淋溶迁移^[55],黄土中 Rb 元素在化学风化过程中很稳定^[56]。此外,元素 Sr 的浓度变化已被广泛用作判别泥炭养分指标^[4]。在整个 HY2014 剖面中,Sr 元素的变化范围相对较小,为 57~159 ppm,数值从顶部至 362 cm 的 98.6 ppm 增加到 362 cm 以下的 132.8 ppm,不到两倍,这远低于在一些矿养泥炭中观察到的 3~16 倍增长^[57]。因此红原泥炭中 Rb、Sr 元素沉积后迁移微弱,可以用作地球化学粉尘记录指标。针对陕西岐山黄土剖面研究表明,Rb、Sr 高含量指示冬季风占优势的干旱期^[58];东北哈尼泥炭中也将 Rb、Sr 作为大气粉尘输入的代用指标^[11]。然而此前针对若尔盖盆地的 ZB13-C1 湖泊沉积物钻孔的研究认为^[27],Rb/Sr 比值可指示若尔盖古湖流域内的化学风化强度,并且可以被进一步用作亚洲夏季风的替代指标;但在 0.3~25.0 m 和 47~56 m 沉积段的岩芯扫描 Rb/Sr 比值由于受“粒度效应”和测试精度限制,不适用于化学风化强度的重建。HY2014 剖面比 ZB13-C1 钻孔略微偏西南并且海拔高了近 500 m,由于海拔影响可能使研究区化学风化更弱。与 ZB13-C1 钻孔中 Rb/Sr 比值变化取决于 Sr 的活动性不同^[27],本研究中 Rb/Sr 比值与 Rb 元素相关性更高,说明 Rb/Sr 比值的变化主要取决于 Rb 元素的活动性,而 Rb 元素在一定程度上受到粒度效应的影响。综合认为,HY2014 泥炭剖面的 Rb/Sr 比值因化学风化较弱和粒度分选效应,可能更多反映源区物质变

化和沉积物粒度变化信息^[59-60]。

V 为铁族元素,多存在于基性-超基性岩和富含有机质的沉积岩中^[54];与 Ti 相似,其溶于酸的部分小于不溶于酸的部分^[7],化学性质稳定。植物对 V 有一定的吸收和富集作用,然而 V 元素在 HY2014 剖面上部接近地表处并未出现明显的富集(图 4)。因此,在红原地区植物的 V 生物吸收富集作用不明显。此外,V 为氧化还原敏感元素,通常在还原环境富集^[61]。HY2014 剖面中下部全新世范围内的黑色等暗色沉积物,反映的是还原环境,而剖面中上部的黄色等沉积物,反映的是氧化环境^[28]。而该剖面中下部 V 元素含量低于中上部,这与还原环境下富集 V 元素相矛盾。相关分析也表明,V 元素与不活泼元素 Ti、Zr 显著相关($R=0.93, 0.62, P<0.01, n=225$,见图 3),表明 HY2014 剖面元素 V 受氧化还原环境影响不明显。此前在红原泥炭研究中也显示稀土元素并未受泥炭沉积后氧化还原环境过程的影响^[2],这说明氧化还原反映对红原泥炭元素影响几乎不存在。而且 V 元素含量变化作为大气粉尘变化的指标已得到广泛应用^[26, 62]。

泥炭后沉积过程微弱,其中稳定微量元素能直接反映沉积粉尘的成分,在过去已有大量研究通过地球化学元素来追溯大气粉尘变化历史。如湖泊沉积物中 Al、Fe、Sr 含量的变化与强风-尘暴过程有关,指示了湖泊沉积碎屑颗粒风成输入的可能性^[63]。综上, HY2014 剖面中元素 Ti、V、Sr、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 、 EF_K 可作为粉尘变化代用指标,以探讨红原末次冰消期以来的粉尘变化历史。

4.2 粉尘沉积变化历史

在冰芯、深海沉积物、黄土以及泥炭研究中,粉尘通量作为大气粉尘变化的指标得到了广泛的应用^[1, 16, 18, 64-65]。而灰分含量的高低可以指示粉尘输入动力的大小,能反映东亚冬季风的强度^[66],可作为一个辅助指标来解释元素、粉尘通量等的变化。因此,本研究结合粉尘通量、反映风成输入的元素、粒度及灰分指标,探讨青藏高原东北部红原地区大气粉尘沉积变化历史(图 4~6)。

14000~11600 cal. a B.P. 期间,红原粉尘通量、反映风成输入的元素 Ti、V、Sr、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 、 EF_K 以及粒度和灰分均为剖面最高值。其中在 12800~11600 cal. a B.P. 时期,粉尘通量、各元素值、灰分含量、平均粒径和 $>63 \mu\text{m}$ 颗粒含量的高值记录了新仙女木事件(Younger Dryas, 简称 YD)。新仙女

木期间气候冷干,在青藏高原西北部的敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 中有记录^[34]。此时红原地区粉尘沉积增加(图 5 和图 6e),与四川越西^[19](图 6c)、东北哈尼^[11](图 6d)、中欧瑞士^[10]泥炭记录的大气粉尘沉积通量较高一致。从中国北方沙漠南缘的沙丘记录也推断得出晚更新世和 YD 期间风成活动增强^[67-70]。进入早全新世前期(11600~9600 cal. a B.P.) 粉尘通量、各元素值、灰分含量、平均粒径和 $>63 \mu\text{m}$ 颗粒含量开始逐渐下降(图 4) 红原地区粉尘沉积呈减少趋势(图 5 和图 6e)。内蒙古夏日诺尔湖^[35](图 6a) 和西北托勒库勒湖^[31]的粒度分析显示风成活动在早全新世较低,到中全新世达到最低。该时期在 11200~10800 cal. a B.P. 和 10600~9700 cal. a B.P. 出现两个明显的高峰,与红原泥炭温度定量重建显示 11000 cal. a B.P. 的百年尺度冷事件相对应^[71],与若尔盖盆地相距不远的共和盆地更尕海湖泊沉积物记录则显示 11200 a B.P. 和 10300 a B.P. 的风成活动异常强烈^[72]。

到早中全新世(11600~3100 cal. a B.P.), 粉尘通量、各元素值、灰分含量、平均粒径和 $>63 \mu\text{m}$ 颗粒含量呈低位波动状态,总体低于早全新世前期。早中全新世气候较为暖湿,这在红原孢粉^[30]、贵州梵净山^[73]、安龙泥炭地^[74] 等均有记录。在我们的研究中,早中全新世又可分为两个阶段,其中 11600~6400 cal. a B.P. 粉尘变化表现为频繁波动状态,而 6400 cal. a B.P. 之后粉尘略微增加且粉尘变化相对较稳定(图 6e)。这与更尕海记录的风成活动在 10300~6300 a B.P. 期间较弱,而在 6300 a B.P. 之后增强基本一致^[72]。在中国东北,四海龙湾玛珥湖粉尘沉积从早全新世到中全新世呈逐渐减少的趋势^[75],而孤山屯泥炭记录也显示中全新世风成活动最小^[36](图 6b)。此外,红原地区在 8600~8200 cal. a B.P. 和 7600~7100 cal. a B.P. 期间出现粉尘小高峰;此前红原泥炭研究中显示在 7900 a B.P. 非本地粉尘显著增加^[2],此时冬季风的影响增强;对红原泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ 研究发现 7800~7000 cal. a B.P. 期间水位下降,整体相对干燥且矿物层富集,可能是周围山丘的矿物质被搬运到泥炭表面^[47]。此外,红原泥炭温度重建中也明显记录了“8.2 ka”冷事件^[71]。

晚全新世(3100 cal. a B.P. 至今) 粉尘通量、各元素值、灰分含量、平均粒径和 $>63 \mu\text{m}$ 颗粒含量均较早中全新世高,红原粉尘沉积增加(图 6e)。同时,红原地区在 3100~2300 cal. a B.P. 和 1400~700 cal. a B.P. 出现主要的粉尘峰值,与先前红原

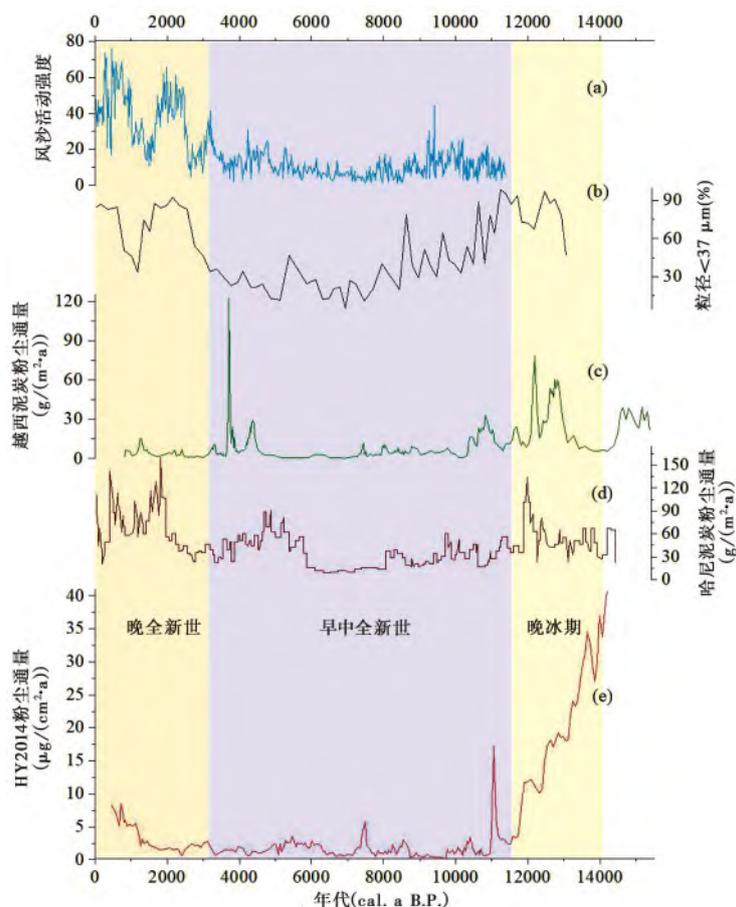


图 6 HY2014 剖面粉尘变化与晚冰期以来其他记录的比较

(a) 夏日诺尔湖风成活动指数^[35]; (b) 孤山屯泥炭地粒径组成(<37 μm)^[36]; (c) 西南越西泥炭粉尘记录^[19];
(d) 东北哈尼泥炭粉尘记录^[11]; (e) HY2014 泥炭粉尘通量(本研究)

Fig. 6 Comparison of the dust flux recorded in HY2014 profile with other paleoclimate records since the last deglaciation.

(a) Aeolian activity index from Lake Xiarinur^[35]; (b) Grain-size component (<37 μm) in Gushantun peatland^[36];
(c) Dust record from the Yuexi peat in Southwest China^[19]; (d) Dust record from the Hani peat in Northeast China^[11];
(e) The dust flux recorded in HY2014 profile(this study)

泥炭研究中出现的两个粉尘高峰 3100~2700 a B.P. 和 1300~900 a B.P. 基本对应^[25]。而黄土高原公海地区 2000 cal. a B.P. 以来粉尘呈现出高频变化^[24]，夏日诺尔湖在晚全新世以来风成活动再次增加^[35] (图 6a)。东北哈尼泥炭在 3400 cal. a B.P. 后粉尘沉积也增加^[11] (图 6d)。

可见,红原泥炭粉尘通量在晚冰期和早全新世前期非常高,但呈逐渐下降趋势;在早全新世后期和中全新世前期,粉尘量为全阶段最低,波动较为明显;到中全新世后期略微升高且相对较为稳定,但仍低于早全新世前期和晚全新世;晚全新世粉尘沉积较中全新世高但低于晚冰期和早全新世前期。此外,晚冰期以来红原大气粉尘在 11200~10800 cal. a B.P.、10600~9700 cal. a B.P.、8600~8200

cal. a B.P.、7600~7100 cal. a B.P.、5900~5500 cal. a B.P.、3100~2300 cal. a B.P. 和 1400~700 cal. a B.P. 沉积量增加,出现较为明显的粉尘峰值。

4.3 粉尘沉降机制

沉降区的粉尘通量与源区的气候条件和区域的风力强度有关^[76]。充足的物质和一定的风动力是大气粉尘释放的重要条件。然而,即使在气候湿润阶段粉尘源区的物源也是存在的;干旱的气候条件可能只是加剧粉尘事件的发生,而非导致粉尘沉积增加的主要原因^[77]。粉尘观测数据和黄土粒度分析表明,亚洲粉尘的释放和输送主要受高空西风 and 近地表东亚冬季风的影响,降尘事件主要发生在春季且源区主要集中在我国西北干旱区的沙漠和黄

土高原^[78]。东亚季风和北半球西风急流能够将我国西北干旱区的粉尘运输到红原地区,从而HY2014剖面记录的粉尘沉积通量变化可能反映了冬季风/北半球西风急流的强度变化(图7a)。在青藏高原泥炭沉积粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 颗粒含量可以作为区域沙地扩张和冬季风强度变化的替代性指标^[79]。本文也将红原泥炭灰分粒度中粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量作为冬季风强度变化的指标(图7b)。结合红原泥炭的风力强度^[80]和植被覆盖^[28],辅之以其周边地区及源区的气候条件和植被状况^[81-82],以期能更准确地探讨红原地区粉尘沉降机制。

晚冰期(14000~12800 cal. a B.P.)期间大致对应于波令-阿勒罗德暖期(Bølling-Allerød,简称BA)^[83]。HY2014剖面的粉尘通量、粒径 $>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量以及各元素值在BA暖期表现为高值,红原泥炭记录并未对BA暖期做出明显响应。这与在气候温暖湿润的条件下,粉尘沉积量应较低相矛盾,也与越西泥炭记录的BA暖期的低粉尘通量^[19]不一致。进一步查阅相关研究发现,在末次冰期BA暖期时若尔盖盆地上游广泛分布的高山冰川融化,大规模的冰雪融水会在黄河干流及若尔盖盆地形成特大洪水(发生时间为 $13600\pm 1200\sim 13000\pm 1100\ \text{a B.P.}$)^[84]。洪水携带的泥沙会在高水位滞流的情况下在河湖沿岸适当位置沉积下来,其中红原泥炭地沉积了大量河流携带的泥沙,形成淤泥层,使相应的粒度参数、元素及粉尘通量在这一时期均呈现高值。进入12800~11600 cal. a B.P.的YD时期,温度下降,上游的冰雪融水减少,若尔盖地区洪水水位下降,加之发生的黄河袭夺事件完全切穿了若尔盖古湖^[85],洪水得到疏泄而退出若尔盖地区,红原一带也逐渐向沼泽湿地转变。尽管此时洪水携带的泥沙量补给减少,但由于高原风力强劲,大面积裸露的松散沉积物被风力搬运沉积到沼泽湿地^[84],使得各元素值、粒度参数和粉尘通量仍处于高值且与BA暖期大致相当。而在HY2014剖面366~357 cm深度内发育的是淤泥层,对应AMS¹⁴C年代为11075~10780 cal. a B.P.,各代用指标均出现一个明显的峰值,推测可能是由于YD事件结束,温度回暖,冰川融水补给量增加,使得红原地区水位上涨,泥炭地再次被淹没,河水携带大量泥沙在此沉积。不过因河道的疏通以及全新世期间仍然在发生的构造作用使得盆地继续抬升^[28],红原地区被河水淹没的时间并未持续太久,因此这一时期的粉尘峰值短暂而明显。综上,红原地区晚冰期BA暖期

的高粉尘事件主要是受到黄河特大古洪水事件影响。

在早全新世的其他时段以及中晚全新世,红原泥炭记录的粉尘通量变化与粉尘源区和沉降区的湿度、植被变化有关,同时受到冬季风/北半球西风急流的调控作用。红原泥炭记录显示在早中全新世该区粉尘沉积量逐渐减少且持续保持低值(图7a),矿物粒径也变细,冬季风减弱。此前已有研究显示,若尔盖地区从11500 cal. a B.P.到大约8200 cal. a B.P.这一时段冬季风在振荡中逐渐退却(图7d)^[80]在中全新世受冬季风/北半球西风急流影响较小,以本地粉尘沉降为主^[2]。中全新世冬季风减弱也在位于红原上风向地带的西部戈壁沙漠南缘(图7e)^[33]和黄土高原西部^[86]的湖泊沉积物中有记录;同处于青藏高原东北部的青海湖湖泊沉积物记录显示中全新世西风减弱(图7f)^[32]。与此同时,气候模拟结果也表明^[87],青藏高原东北部在9500~6200 a B.P.期间夏季降水持续增强,东亚夏季风强劲,丰沛的降水使得中全新世气候湿润。董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 也显示中全新世东亚夏季风较强,降水较多(图7i)^[88];黄土高原西北部相关研究点在早全新世较为干旱,进入中全新世(9000~4000 a B.P.)气候湿润;内蒙古西部和新疆塔里木盆地一带在8500~5500 a B.P.湿度较高(图7c)^[81]。在源区气候湿润的条件下,沙漠沙丘减少,毛乌素、浑善达克、呼伦贝尔和科尔沁沙地几乎完全被植被覆盖^[89],青海湖沉积物的孢粉记录也显示,10800~3900 cal. a B.P.期间青海湖盆地森林扩张(图7g)与青海湖一山之隔的达连海周围山地全新世森林扩张发生在9400~3900 cal. a B.P.时期^[82]。此时红原的孢粉重建记录也显示该区乔木植物增多(图7h)^[28],植被覆盖增加,从而有利于削减粉尘的排放量和沉积量。综上,在早中全新世,尤其是中全新世时期,由于塔里木盆地、黄土高原一带粉尘源区湿度增加,森林扩张,粉尘释放量减少,再加上此时冬季风/北半球西风急流减弱,搬运粉尘的能力减弱,使位于下风向区的红原地区接受的大气粉尘沉积减少。

到晚全新世,红原地区大气粉尘输入量再次增加,矿物粒径增粗,东亚冬季风有所增强。该时段粉尘源区黄土高原和内蒙古西部至塔里木盆地一带的湿度均有所下降(图7c),气候条件趋于干旱化^[81],青海湖、达连海以及红原地区的森林覆盖减少(图7g和7h)^[82],为粉尘释放提供了充足的物

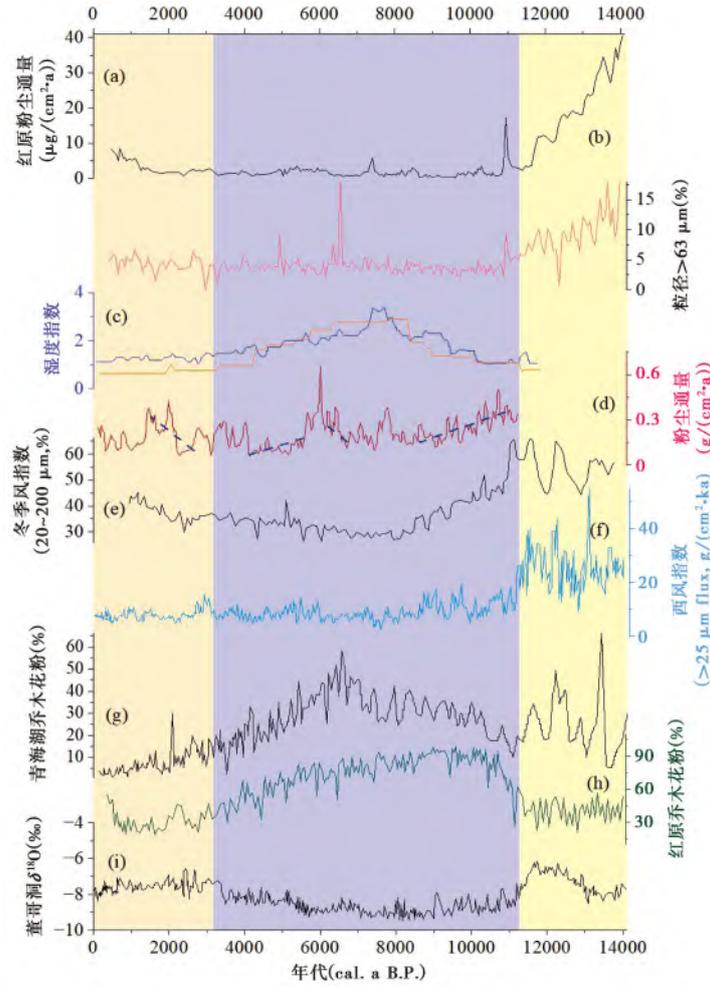


图 7 HY2014 剖面晚冰期以来气候代用指标变化特征及其与其他古气候记录对比

(a) HY2014 剖面粉尘记录(本研究); (b) HY2014 粒径>63 μm 的颗粒含量(本研究); (c) 内蒙古西部至新疆(蓝色线)和黄土高原西部(橙色线)基于孢粉记录合成的湿度指数^[81]; (d) HY2A 冬季风代用指标^[80]; (e) 冬季风指标(黄羊河 20~200 μm 组分)^[33]; (f) 青海湖西风指数(WI > 25 μm)^[32]; (g) 青海湖乔木花粉百分含量^[82]; (h) HY2014 乔木植物花粉百分比^[28]; (i) 董哥洞石笋 δ¹⁸O 记录^[88]

浅黄色阴影区代表晚冰期,浅蓝色阴影区代表早中全新世,粉色阴影区为晚全新世,蓝色虚线为曲线趋势

Fig. 7 Comparison of the climate proxies in HY2014 profile with other paleoclimate records since the last deglacial. (a) HY2014 profile dust flux(this study); (b) HY2014 profile grain size composition(> 63 μm , this study); (c) Moisture index synthesized from pollen-based records in western Inner Mongolia and Xinjiang(blue line) and the northwestern Loess Plateau(orange line)^[81]; (d) EAWM proxies derived from core HY2A^[80]; (e) The EAWM indicator(the 20~200 μm component for the Huangyanghe)^[33]; (f) Lake Qinghai Westerlies climate index(WI ,flux of >25 μm fraction)^[32]; (g) The trees pollen percentage in Qinghai Lake^[82]; (h) The trees pollen percentage in HY2014 peat^[28]; (i) Stalagmite δ¹⁸O from the Dongge Cave in South China^[88]. The light yellow shades indicate last deglacial , the light blue shades are the Early-Middle Holocene , the pink shades are the Late Holocene and the dashed lines are the trends of the curve

源。上风向一带西部戈壁沙漠南缘以及红原地区冬季风增强^[33 80],青海湖地区西风在这一时期仍处于较弱状态^[32]。增强的冬季风携带和搬运了更多粉尘至红原泥炭地,使粉尘沉积量增加。此外,Yu 等^[26]研究发现红原泥炭地 Pb、Cu 和 Zn 在 5400~4000 a B.P.、3000~2500 a B.P. 和 2000~1000 a B.P. 之间含量增加,认为其与附近甘肃/青海省的人类活

动强度相关。尽管红原地区因海拔较高而在晚全新世受人类活动的影响较小,但其粉尘源区如西北干旱区一带的人类活动强度增加,也势必会使粉尘释放量增加,进而被强劲的冬季风运输到红原泥炭地沉积,导致粉尘沉积量增加。

综上,粉尘源区的气候条件、植被覆盖情况与红原地区粉尘沉积密切相关,而该区冬季风/北半

球西风急流强度在红原粉尘沉积中起了主导作用。当源区干旱化程度增加, 植被覆盖减少, 增强的冬季风/北半球西风急流能搬运和输送更多的粉尘, 红原地区粉尘沉积增加, 反之则粉尘沉积减少。红原地区晚冰期 BA 暖期期间以及 11075 ~ 10780 cal. a B.P. 时期的高粉尘沉积主要是由于若尔盖地区发生的特大洪水事件导致的。此后 YD 时期以及整个全新世的粉尘通量高低则主要与粉尘源区和沉降区的气候条件、植被覆盖以及冬季风/北半球西风急流强度有关。本研究结合泥炭粉尘通量、粒度以及红原周边地区全新世冬季风/北半球西风急流的变化情况, 探讨了青藏高原东北部晚冰期以来冬季风/北半球西风急流的变化过程, 进一步明晰了该区大气环流的动态变化。需要注意的是, 学者们提出了大量有关千年尺度的东亚冬季风记录的研究, 并将不同沉积物类型成功应用于全新世东亚冬季风强度重建^[51, 80], 但对冬季风在全新世不同时期的强弱的认识仍存在一些差异^[33, 86, 90]。此外, 一些研究也提出粉尘源区的输出通量可能受夏季风主导, 而受冬季风影响较弱^[11, 91]。因此, 亚洲冬季风和夏季风的动态变化复杂, 涉及因素众多, 对其变化及具体机制需要开展更多的古气候重建研究和模拟研究。

5 结论

基于青藏高原东北部若尔盖盆地红原泥炭 HY2014 剖面地球化学元素的性质分析, 结合相关分析、聚类分析及因子分析等数理分析方法, 发现元素 Ti、V、Sr、 EF_{Zr} 、 EF_{Rb} 、 EF_K 可作为粉尘变化代用指标以反映红原地区的风成输入, 可辅助粉尘通量用于重建红原地区晚冰期以来的大气粉尘沉积变化历史。红原地区的粉尘通量变化为 0.17 ~ 40.74 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 其中在晚冰期(14000 ~ 11600 cal. a B.P.) 粉尘通量异常偏高, 均值为 21.52 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 早中全新世(11600 ~ 3100 cal. a B.P.) 粉尘通量逐渐下降至剖面低值, 其中前期 11600 ~ 6400 cal. a B.P. 粉尘通量总体偏低但波动较为明显, 均值为 1.60 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 而后期 6400 ~ 3100 cal. a B.P. 其均值略微升高至 1.78 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 到晚全新世(3100 cal. a B.P. 至今) 粉尘通量再次升高, 均值达 3.55 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ 。红原泥炭中各地球化学元素、灰分含量和粒度的变化与粉尘通量的变化具有较好的一致性。此外, 晚冰期以来红原地区在 11200 ~ 10800 cal. a B.P.、10600 ~ 9700 cal. a B.P.、8600 ~ 8200 cal. a B.P.、7600 ~ 7100

cal. a B.P.、5900 ~ 5500 cal. a B.P.、3100 ~ 2300 cal. a B.P. 和 1400 ~ 700 cal. a B.P. 这 7 个时期粉尘沉积量增加, 出现较为明显的大气粉尘峰值。晚冰期 BA 暖期由于该区特大古洪水事件导致粉尘通量出现异常高值, 而新仙女木事件以及全新世红原地区粉尘通量变化则与源区的气候条件、植被覆盖以及东亚冬季风和北半球西风急流相关。其中东亚冬季风和北半球西风急流强度变化具有主导作用, 与青藏高原东北部众多古环境记录能够较好地对应。在东亚冬季风和北半球西风急流增强时, 气候冷干, 源区气候干旱化、植被覆盖面积减少, 红原地区大气粉尘沉积增加; 而在东亚冬季风和北半球西风急流减弱时期, 气候较为温湿, 植被覆盖面积增加, 大气粉尘沉积量减少。因此, 气候变化在调节区域粉尘沉积方面有着重要作用。在后续研究中, 应该进一步判别红原泥炭地主要粉尘源区, 确定其主要粉尘来源。本项研究重建了红原地区晚冰期以来的大气粉尘沉积变化历史并探讨了粉尘通量的影响机制, 有助于加深对青藏高原东北部粉尘沉积历史的认识并能丰富泥炭研究中大气粉尘变化的档案。

致谢: 感谢贾天骄、徐佳佳、蔡天赦、陆福志、何锃宇、陈剑、黄明、曾广在野外采样过程中给予的支持和帮助! 感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议, 这些意见和建议对本文的完善至关重要! 感谢编辑部杨美芳老师的修改建议及细致的编辑工作, 使文章质量得以进一步提升!

参考文献(References):

- [1] Kohfeld K E, Harrison S P. DIRTMAP: The geological record of dust[J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54(1): 81-114.
- [2] Ferrat M, Weiss D J, Spiro B, et al. The inorganic geochemistry of a peat deposit on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau and insights into changing atmospheric circulation in Central Asia during the Holocene[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 91: 7-31. doi: 10.1016/j.gca.2012.05.028.
- [3] Björck S, Clemmensen L B. Aeolian sediment in raised bog deposits, Halland, SW Sweden: A new proxy record of Holocene winter storminess variation in Southern Scandinavia? [J]. *The Holocene*, 2004, 14(5): 677-688.
- [4] Shotyk W, Weiss D, Kramers J D, et al. Geochemistry of the peat bog at Etang de la Gruère, Jura Mountains, Switzerland, and its record of atmospheric Pb and lithogenic trace metals(Sc, Ti, Y, Zr, and REE) since 12,370 ^{14}C yr BP[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(14): 2337-2360.

- [5] Marx S K, Kamber B S, McGowan H A, et al. Palaeo-dust records: A window to understanding past environments[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 165: 13–43. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.03.001.
- [6] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(1): 1–31.
- [7] Bao K, Xing W, Yu X, et al. Recent atmospheric dust deposition in an ombrotrophic peat bog in Great Hinggan Mountain, Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 431: 33–45. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.05.014.
- [8] 乐秀琴, 吴海斌, 张文超, 等. 中国末次冰盛期以来泥炭发育与气候变化[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(4): 1021–1030.
Le Xiuqin, Wu Haibin, Zhang Wenchao, et al. Peatland initiation in China associated with climate changes since the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(4): 1021–1030.
- [9] 李艳梅, 李鸿凯, 董彦民. 长白山老里克泥炭地过去 2000 年以来古水位定量重建[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(5): 1170–1179.
Li Yanmei, Li Hongkai, Dong Yanmin. Quantitative reconstruction of the water table changes during the last 2000 years from Laolike peatland, Changbai Mountains[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(5): 1170–1179.
- [10] Le Roux G, Fagel N, De Vleeschouwer F, et al. Volcano-and climate-driven changes in atmospheric dust sources and fluxes since the Late Glacial in Central Europe[J]. *Geology*, 2012, 40(4): 335–338.
- [11] Pratte S, Bao K, Sapkota A, et al. 14 kyr of atmospheric mineral dust deposition in north-eastern China: A record of palaeoclimatic and palaeoenvironmental changes in the Chinese dust source regions[J]. *The Holocene*, 2020, 30(4): 492–506.
- [12] Vanneste H, De Vleeschouwer F, Bertrand S, et al. Elevated dust deposition in Tierra del Fuego (Chile) resulting from Neoglacial Darwin Cordillera glacier fluctuations[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2016, 31(7): 713–722.
- [13] 李泉, 赵艳. 青藏高原东部若尔盖盆地泥炭发育记录的全新世气候突变[J]. *第四纪研究*, 2019, 39(6): 3–1313232.
Li Quan, Zhao Yan. Abrupt climatic changes in the Holocene recorded by the history of peat formation in Zoigé Basin on the eastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(6): 1323–1332.
- [14] 郭海春, 田怡苹, 魏士凯, 等. 我国全新世泥炭 α 纤维素稳定碳同位素记录的对比与分析[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(5): 1136–1144.
Guo Haichun, Tian Yiping, Wei Shikai, et al. Comparison and analyses of the Holocene peat α -cellulose stable carbon isotopic records from China[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(5): 1136–1144.
- [15] 鲍昆山, 杨婷, 肖湘, 等. 基于泥炭记录的过去 150 a 东北山地大气粉尘沉降[J]. *地理学报*, 2021, 76(9): 2283–2296.
Bao Kunshan, Yang Ting, Xiao Xiang, et al. Atmospheric dust deposition history over the past 150 a recorded by mountain peatlands in Northeast China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(9): 2283–2296.
- [16] 张晓燕, 张春霞, 李佩. 青藏高原东缘若尔盖盆地表层沉积物粘土矿物组成及其环境意义探讨[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(2): 435–448.
Zhang Xiaoyan, Zhang Chunxia, Li Pei. Clay mineral composition and its environmental significance of the surface sediment in the Zoigé Basin on the eastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 435–448.
- [17] Sapkota A, Cheburkin A K, Bonani G, et al. Six millennia of atmospheric dust deposition in southern South America (Isla Navarino, Chile) [J]. *The Holocene*, 2007, 17(5): 561–572.
- [18] 刘英英. 全新世北疆泥炭沉积记录的大气粉尘变化[D]. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2016: 61–85.
Liu Yingying. Holocene Dust Variability Inferred from Peat Deposits in Northern Xinjiang[D]. Lanzhou: The PhD Thesis of Lanzhou University, 2016: 61–85.
- [19] Peng H, Bao K, Yuan L, et al. Abrupt climate variability since the last deglaciation based on a high-resolution peat dust deposition record from Southwest China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 252: 106749–106749. doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106749.
- [20] Fiałkiewicz-Kozieł B, Bao K, Smieja-Król B. Geographical drivers of geochemical and mineralogical evolution of Motianling peatland (Northeast China) exposed to different sources of rare earth elements and Pb, Nd, and Sr isotopes[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807(1): 150481–150481.
- [21] Xiao H, Cheng S, Mao X, et al. Characteristics of peat humification, magnetic susceptibility and trace elements of Hani peatland, Northeastern China: Paleoclimatic implications[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2017, 18(3): 140–150.
- [22] Shi G, Yan H, Zhang W, et al. The impacts of volcanic eruptions and climate changes on the development of Hani peatland in Northeastern China during the Holocene[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 210: 104691–104691. doi: 10.1016/j.jseaes.2021.104691.
- [23] Tang S, Huang Z, Liu J, et al. Atmospheric mercury deposition recorded in an ombrotrophic peat core from Xiaoxing'an Mountain, Northeast China[J]. *Environmental Research*, 2012, 118: 145–148. doi: 10.1016/j.envres.2011.12.009.
- [24] Chen S, Liu J, Wang X, et al. Holocene dust storm variations over Northern China: Transition from a natural forcing to an anthropogenic forcing[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(24): 2516–2527.
- [25] Ferrat M, Weiss D J, Dong S, et al. Lead atmospheric deposition rates and isotopic trends in Asian dust during the last 9.5 kyr recorded in an ombrotrophic peat bog on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 82: 4–22. doi: 10.1016/j.gca.2010.10.031.
- [26] Yu X, Zhou W, Liu X, et al. Peat records of human impacts on the atmosphere in Northwest China during the late Neolithic and Bronze Ages[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010,

- 286(1-2): 17-22.
- [27] 杨涵菲,赵艳,崔巧玉,等. 基于 XRF 岩芯扫描的 Rb/Sr 比值的古气候意义探讨——以青藏高原东部若尔盖盆地为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(1): 73-91.
Yang Hanfei, Zhao Yan, Cui Qiaoyu, et al. Paleoclimatic indication of X-ray fluorescence core-scanned Rb/Sr ratios: A case study in the Zoigê Basin in the eastern Tibetan Plateau[J]. Science China: Earth Sciences, 2021, 51(1): 73-91.
- [28] 曾蒙秀. 四川西部晚冰期以来植被和气候变化及其对人类活动的影响[D]. 南京: 南京大学博士学位论文, 2017: 1-186.
Zeng Mengxiu. The Variation of Vegetation and Climate and Its Impact on Human Activities from Late Deglacial Period in Western Sichuan, China[D]. Nanjing: The PhD Thesis of Nanjing University, 2017: 1-186.
- [29] 王燕,赵志中,乔彦松,等. 川北若尔盖高原原泥炭剖面孢粉记录的晚冰期以来古气候古环境的演变[J]. 地质通报, 2006, 25(7): 827-832.
Wang Yan, Zhao Zhizhong, Qiao Yansong, et al. Paleoclimatic and paleoenvironmental evolution since the Late Glacial epoch as recorded by sporopollen from the Hongyuan peat section on the Zoigê Plateau, Northern Sichuan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(7): 827-832.
- [30] 周卫健,刘钊,王浩,等. 13500 年以来青藏高原红原泥炭沉积的孢粉记录[J]. 地球环境学报, 2011, 2(5): 605-612.
Zhou Weijian, Liu Zhao, Wang Hao, et al. The pollen record from the Hongyuan peatland in the Tibetan Plateau since 13500 year[J]. Journal of Earth Environment, 2011, 2(5): 605-612.
- [31] An C B, Zhao J, Tao S, et al. Dust variation recorded by lacustrine sediments from arid Central Asia since ~15 cal ka BP and its implication for atmospheric circulation[J]. Quaternary Research, 2011, 75(3): 566-573.
- [32] An Z, Colman S M, Zhou W, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka[J]. Scientific Reports, 2012, 2(1): 619-619.
- [33] Li Y, Morrill C. A Holocene East Asian winter monsoon record at the southern edge of the Gobi Desert and its comparison with a transient simulation[J]. Climate Dynamics, 2015, 45(5): 1219-1234.
- [34] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Science, 1989, 246: 474-477. doi: 10.1126/science.246.4929.474.
- [35] Xu B, Wang L, Gu Z, et al. Decoupling of climatic drying and Asian dust export during the Holocene[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(2): 915-928.
- [36] Li N, Chambers F M, Yang J, et al. Records of East Asian monsoon activities in Northeastern China since 15.6 ka, based on grain size analysis of peaty sediments in the Changbai Mountains[J]. Quaternary International, 2017, 447: 158-169. doi: 10.1016/j.quaint.2017.03.064.
- [37] Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D. Feasibility of a 100-year reanalysis using only surface pressure data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(2): 175-190.
- [38] Blaauw M, Christen J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process[J]. Bayesian Analysis, 2011, 6(3): 457-474.
- [39] Bao K, Wang G, Jia L, et al. Anthropogenic impacts in the Changbai Mountain region of NE China over the last 150 years: Geochemical records of peat and altitude effects[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(8): 7512-7524.
- [40] Ao H, Liebrand D, Dekkers M J, et al. Eccentricity-paced monsoon variability on the northeastern Tibetan Plateau in the Late Oligocene high CO₂ world[J]. Science Advances, 2021, 7(51): 2318-2318.
- [41] Abella S R, Zimmer B W. Estimating organic carbon from loss-on-ignition in northern Arizona forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(2): 545-550.
- [42] Shotyk W, Krachler M, Martinez-Cortizas A, et al. A peat bog record of natural, pre-anthropogenic enrichments of trace elements in atmospheric aerosols since 12370 ¹⁴C yr BP, and their variation with Holocene climate change[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 199(1): 21-37.
- [43] Nolting R F, Ramkema A, Everaarts J M. The geochemistry of Cu, Cd, Zn, Ni and Pb in sediment cores from the continental slope of the Banc d'Arguin (Mauritania) [J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(5): 665-691.
- [44] 张华,宋传中. 大别山北麓黄土-古土壤地球化学元素特征及富集因子法物源研究[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3): 87-93.
Zhang Hua, Song Chuanzhong. Geochemical characteristics of loess-palaeosols from the northern slope of Dabie Mountain and research of its provenance in the enrichment factor way[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2013, 32(3): 87-93.
- [45] 柴岫. 泥炭地学[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-256.
Chai Xiu. Peatland[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 1-256.
- [46] William S. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: Geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentrations, and metal enrichment factors[J]. Environmental Reviews, 1996, 4(2): 149-183.
- [47] Large D J, Spiro B, Ferrat M, et al. The influence of climate, hydrology and permafrost on Holocene peat accumulation at 3500 m on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(27): 3303-3314.
- [48] 于学峰,刘钊. 红原泥炭颗粒物表面形态与矿物组成研究[J]. 地球环境学报, 2010, 1(2): 122-125.
Yu Xuefeng, Liu Zhao. Surface texture and mineralogical characters of the peat[J]. Journal of Earth Environment, 2010, 1(2): 122-125.
- [49] Nesbitt H W, Markovics G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(8): 1653-1670.
- [50] Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters[J]. Earth-Science Reviews, 1988, 25(2): 95-176.

- [51] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. *Nature*, 2007, 445(7123): 74– 77.
- [52] Shotyk W, Goodsite M E, Roos-Barraclough F, et al. Anthropogenic contributions to atmospheric Hg, Pb and As accumulation recorded by peat cores from southern Greenland and Denmark dated using the ¹⁴C “bomb pulse curve” [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(21): 3991– 4011.
- [53] 杨倩楠, 赵红艳, 李永锋, 等. 老白山泥炭沼泽元素地球化学特征及其记录的大气沉降 [J]. *湿地科学*, 2015, 13(4): 400– 409.
Yang Qiannan, Zhao Hongyan, Li Yongfeng, et al. Geochemical characteristics element and atmospheric deposition recorded by Laobaishan Bog [J]. *Wetland Science*, 2015, 13(4): 400– 409.
- [54] 刘英俊. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1– 281.
Liu Yingjun. *Elemental Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1984: 1– 281.
- [55] 黄明. 浅析 Rb/Sr 比值在第四纪古气候及古环境研究中的应用 [J]. *科协论坛(下半月)*, 2012, (3): 132– 133. doi: CNKI: SUN: KXLT.0. 2012– 03– 069.
Huang Ming. A brief analysis of the application of Rb/Sr ratio in Quaternary paleoclimate and paleoenvironmental research [J]. *Science & Technology Association Forum(Second half of the Month)*, 2012, (3): 132– 133. doi: CNKI: SUN: KXLT.0. 2012– 03– 069.
- [56] 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究 [J]. *中国科学(D 辑)*, 1997, 27(6): 531– 536.
Chen Jun, Ji Junfeng, Qiu Gang, et al. Geochemical study on the degree of chemical weathering of loess in Luochuan, Shaanxi [J]. *Science in China(Series D)*, 1997, 27(6): 531– 536.
- [57] Steinmann P, Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland) [J]. *Chemical Geology*, 1997, 138 (1): 25– 53.
- [58] 庞奖励, 黄春长, 张占平. 陕西岐山黄土剖面 Rb、Sr 组成与高分辨率气候变化 [J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 637– 641.
Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhang Zhanping. Rb, Sr elements and high resolution climatic records in the loess-paleosol profile at Qishan, Shaanxi [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4): 637– 641.
- [59] Ren X, Nie J, Saylor J E, et al. Provenance control on chemical weathering index of fluvio-lacustrine sediments: Evidence from the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(7): 3216– 3224.
- [60] 曾艳, 陈敬安, 朱正杰, 等. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 805– 810.
Zeng Yan, Chen Jing'an, Zhu Zhengjie, et al. Advance and perspective of Rb/Sr ratios in lake sediments as an index of paleoclimate/paleoenvironment [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 805– 810.
- [61] 冯东, 陈多福. 黑海西北部冷泉碳酸盐岩的沉积岩石学特征及氧化还原条件的稀土元素地球化学示踪 [J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 390– 396.
Feng Dong, Chen Duofu. Petrographic characterization and rare earth elements as geochemical tracers for redox condition of seep carbonates from northwestern Black Sea [J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 390– 396.
- [62] Krachler M, Mohl C, Emons H, et al. Atmospheric deposition of V, Cr, and Ni since the Late Glacial: Effects of climatic cycles, human impacts, and comparison with crustal abundances [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(12): 2658– 2667.
- [63] 强明瑞, 鲁瑞洁, 张家武, 等. 柴达木盆地苏干湖表层沉积与尘暴事件——元素示踪的初步结果 [J]. *湖泊科学*, 2006, 18(6): 590– 596.
Qiang Mingrui, Lu Ruijie, Zhang Jiawu, et al. Surface sediments of Lake Sugan and dust storm in the northern Qaidam Basin, China: Preliminary results of elemental tracers [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(6): 590– 596.
- [64] Derbyshire E. Loess, and the dust indicators and records of terrestrial and marine palaeoenvironments (DIRTMAP) database [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(18): 1813– 1819.
- [65] 陈海涛, 孔凡彪, 徐树建, 等. 庙岛群岛晚更新世以来黄土粒度端元揭示的粉尘堆积过程 [J]. *第四纪研究*, 2021, 41(5): 1306– 1316.
Chen Haitao, Kong Fanbiao, Xu Shujian, et al. Dust accumulation process indicated by grain size end-members of the coastal loess since the Late Pleistocene in Miaodao Islands of Shandong Province [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(5): 1306– 1316.
- [66] 于学峰, 周卫健, 刘晓清, 等. 青藏高原东部全新世泥炭灰分的粒度特征及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 2006, 24(6): 864– 869.
Yu Xuefeng, Zhou Weijian, Liu Xiaoqing, et al. Grain size characteristics of the Holocene peat sediment in eastern Tibetan Plateau and its paleoclimatic significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(6): 864– 869.
- [67] Stauch G. A conceptual model for the interpretation of aeolian sediments from a semiarid high-mountain environment since the late glacial [J]. *Quaternary Research*, 2019, 91(1): 24– 34.
- [68] Lu H, Yi S, Xu Z, et al. Chinese deserts and sand fields in Last Glacial Maximum and Holocene Optimum [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(23): 2775– 2783.
- [69] 范育新, 张青松, 蔡青松, 等. 光释光年代学对腾格里沙漠化机制及风沙物源的指示 [J]. *第四纪研究*, 2022, 42(2): 350– 367.
Fan Yuxin, Zhang Qingsong, Cai Qingsong, et al. OSL chronology of sediments in the Tengger Sandy Desert and its indication to aeolian sand source and desertification mechanism [J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 350– 367.
- [70] 胡梦珺, 李娜娜, 张亚云, 等. 近 32 ka 以来青海湖古风成砂-古土壤序列色度参数变化特征及环境演变 [J]. *第四纪研究*, 2020, 40(5): 1105– 1117.
Hu Mengjun, Li Nana, Zhang Yayun, et al. Variation characteristics of chromaticity parameters and environmental evolution of aeolian sand-paleosol sequence in Qinghai Lake during the past 32 ka [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(5): 1105– 1117.
- [71] Yan T, Zhao C, Yan H, et al. Elevational differences in Holocene

- thermal maximum revealed by quantitative temperature reconstructions at $\sim 30^{\circ}\text{N}$ on eastern Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 570: 110364. doi: 10.1016/j.palaeo.2021.110364.
- [72] Qiang M, Liu Y, Jin Y, et al. Holocene record of eolian activity from Genggahai Lake, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 589–595.
- [73] Gao Y, Xiong K, Quan M, et al. Holocene climate dynamics derived from pollen record of Jiulongchi wetland in Fanjing Mountain, Southwest China [J]. *Quaternary International*, 2019, 513: 1–7. doi: 10.1016/j.quaint.2019.01.009.
- [74] 杨欢. 黔西南 11.4–3.5 ka BP 植被和气候演化的泥炭记录 [D]. 金华: 浙江师范大学硕士学位论文, 2021: 45–66.
Yang Huan. 11.4–3.5 ka BP Vegetation and Climate Dynamics Derived from A Peat Record in The Southwest of Guizhou Province [D]. Jinhua: The Master's Thesis of Zhejiang Normal University, 2021: 45–66.
- [75] Zhu J, Mingram J, Brauer A. Early Holocene aeolian dust accumulation in Northeast China recorded in varved sediments from Lake Sihailongwan [J]. *Quaternary International*, 2013, 290: 299–312. doi: 10.1016/j.quaint.2012.10.057.
- [76] Rea D K, Leinen M, Janecek T R. Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation [J]. *Science*, 1985, 227(4688): 721–725.
- [77] Mischke S, Zhang C, Börner A, et al. Late glacial and Holocene variation in aeolian sediment flux over the northeastern Tibetan Plateau recorded by laminated sediments of a saline meromictic lake [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2010, 25(2): 162–177.
- [78] Sun J, Zhang M, Liu T. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960–1999: Relations to source area and climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D10): 10325–10333.
- [79] 刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 等. 青藏高原东北部泥炭沉积粒度与元素记录的全新世千年尺度的气候变化 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 609–620.
Liu Bing, Jin Heling, Sun Zhong, et al. Holocene millennial-scale climatic change recorded by grain size and chemical elements of peat deposits in Gonghe Basin, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 609–620.
- [80] Yu X, Zhou W, Liu Z, et al. Different patterns of changes in the Asian summer and winter monsoons on the eastern Tibetan Plateau during the Holocene [J]. *The Holocene*, 2011, 21(7): 1031–1036.
- [81] Zhao Y, Yu Z, Chen F. Spatial and temporal patterns of Holocene vegetation and climate changes in arid and semi-arid China [J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1): 6–18.
- [82] 程波, 陈发虎, 张家武. 共和盆地末次冰消期以来的植被和环境演变 [J]. *地理学报*, 2010, 65(11): 1336–1344.
Cheng Bo, Chen Fahu, Zhang Jiawu. Palaeovegetational and palaeoenvironmental changes in Gonghe Basin since last deglaciation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1336–1344.
- [83] 杨怀仁. 第四纪地质 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 61–63.
Yang Huairan. *Quaternary Geology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987: 61–63.
- [84] 黄春长. 若尔盖盆地河流古洪水沉积及其对黄河水系演变问题的启示 [J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 612–625.
Huang Chunchang. Palaeoflood deposits in the Zoigê Basin and the enlightening on the formation of the Yellow River drainage system on the Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 612–625.
- [85] 潘保田, 李吉均, 周尚哲. 黄河最上游发育历史初步研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1993: 17–21.
Pan Baotian, Li Jijun, Zhou Shangzhe. A Preliminary Study on the Development History of the Uppermost Reaches of the Yellow River [M]. Beijing: Seismological Press, 1993: 17–21.
- [86] Liu X, Sun Y, Vandenberghe J, et al. Centennial- to millennial-scale monsoon changes since the last deglaciation linked to solar activities and North Atlantic cooling [J]. *Climate of the Past*, 2020, 16(1): 315–324.
- [87] Zhang X, Jin L, Chen J, et al. Lagged response of summer precipitation to insolation forcing on the northeastern Tibetan Plateau during the Holocene [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50(9): 3117–3129.
- [88] Dykoski C, Edwards R, Cheng H, et al. A high resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1): 71–86.
- [89] Yang X, Wang X, Liu Z, et al. Initiation and variation of the dune fields in semi-arid China—With a special reference to the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 369–380. doi: 10.1016/j.quascirev.2013.02.006.
- [90] Kang S, Du J, Wang N, et al. Early Holocene weakening and mid- to Late Holocene strengthening of the East Asian winter monsoon [J]. *Geology*, 2020, 48(11): 1043–1047.
- [91] 张海霞. 青藏高原东北部黄土记录的释光测年及末次冰消期以来气候变化研究 [D]. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2020: 39–46.
Zhang Haixia. Paleoclimatic Changes Revealed by Luminescence Chronology and Proxy Indexes of Loess Records in the Northeastern Tibetan Plateau since the Last Deglaciation [D]. Lanzhou: The Master's Thesis of Lanzhou University, 2020: 39–46.

SIGNIFICANCE OF CLIMATE CONDITIONS IN THE VARIABILITY OF EOLIAN DUST DEPOSITION SINCE THE LAST DEGLACIATION IN THE ZOIGÊ REGION RECORDED BY THE HONGYUAN PEAT

WANG Hongjiao¹, ZENG Mengxiu¹, PENG Haijun², ZHU Cheng³,
LI Yue⁴, BAI Yongyong¹, ZENG Qiao¹, SUN Jingru¹

(1. College of Geography and Environment Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou; 3. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu; 4. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi)

Abstract

There are many debates on the mechanism of abrupt climate change in East Asia since the late deglacial period, due to the shortage of high-resolution climate reconstruction records. Meanwhile, few studies have been conducted on the eolian dust deposition in peat and little attention has been paid to long-term evolution of dust flux and its climate background in Zoigê region from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. In this study, a 450-cm peat profile HY2014 (32°46'49.850"N, 102°30'57.047"E; 3509 m a. s. l.) from Hongyuan peatland in Zoigê region, western Sichuan Province was selected as the research carrier. Here we analyzed the grainsize compositions and geochemical element contents (including K, Ti, Zr, Rb, Sr and V and others) of ash from 225 samples at 2-cm interval in HY2014 profile. Based on high-resolution AMS ¹⁴C dating results measured by 13 samples from different depth of this profile, the evolutionary history of dust flux since the late deglacial period is reconstructed and its dynamics is revealed. In combination of the previous studies that obtained from Hongyuan peat and other records, this study also aims to discuss synthetically the control mechanism of dust deposition in Hongyuan area. The results show that: (1) The geochemical elements such as Ti, V, Sr, EF_{Zr}, EF_{Rb} and EF_K in Hongyuan peat are mainly aeolian inputs, which can be used to assist to the explanation of dust flux in this area and to reveal the evolutionary history of atmospheric circulation. (2) The dust flux in Hongyuan area varied at 0.17~40.74 μg/(cm²·a) and was abnormally high during the last glacial period (14000~11600 cal. a B.P.), with the mean value of 21.52 μg/(cm²·a). The high value of dust flux during 14000~12800 cal. a B.P. was caused by the extraordinary palaeoflood events. During 12800~11600 cal. a B.P., the climate was cold and dry when the intensity of both the East Asian winter monsoon and the westerly wind were very strong. And a large area of exposed loose sediments were transported into the Hongyuan peatland by these two circulations. During 11600~3100 cal. a B.P., the dust flux showed an overall downward trend, in which fluctuated significantly during 11600~6400 cal. a B.P., and was increased and much stable between 6400 cal. a B.P. and 3100 cal. a B.P. The mean value of dust flux was 1.60 μg/(cm²·a) during 11600~6400 cal. a B.P., and slightly increase to 1.78 μg/(cm²·a) during 6400~3100 cal. a B.P. However, the dust flux increased again to 3.55 μg/(cm²·a) after 3100 cal. a B.P. The climate was generally warm and humid and the vegetation coverage in the dust source areas was high during the Early and Middle Holocene; meanwhile, East Asian winter monsoon and the westerly wind were weaker. Owing to these factors, the dust fluxes declined clearly. However, the westerly wind weakened, while the East Asian winter monsoon was stronger during the Late Holocene. The variations of ash content and its characteristics of geochemical element and particle size compositions in Hongyuan peat, were in good agreement with the evolution of dust flux along the timeseries. (3) The dust deposition flux of Hongyuan peatland clearly recorded the Younger Drays event and seven dust enhancement events, which can be also explored in other records from Northwest and Northern China. When the dust event occurred, the East Asian winter monsoon intensified, the climate condition in the dust source area deteriorated and the vegetation coverage reduced, so that more dust can be released into the Hongyuan peat.

Key words: Hongyuan peat; dust flux; element geochemistry; abrupt climate change; East Asian winter monsoon