

杨欢, 曾蒙秀, 彭海军, 等. 基于 XRF 岩芯扫描的贵州喀斯特地区晚全新世泥炭古环境研究[J]. 第四纪研究, 2020, 40(5):1154-1169.

Yang Huan, Zeng Mengxiu, Peng Haijun, et al. Application of XRF core scanning method in Late Holocene environment change study derived from a peat core from southwestern Guizhou, Southwestern China[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(5):1154-1169.

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2020.05.06

文章编号: 1001-7410(2020)05-1154-16

基于 XRF 岩芯扫描的贵州喀斯特地区 晚全新世泥炭古环境研究*

杨欢¹, 曾蒙秀¹, 彭海军², 李凯³, 李凤全¹,
朱丽东¹, 邓伯龙⁴, 廖梦娜³, 倪健³

(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. 浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004; 4. 贵州省湿地保护中心, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 文章选取发育于贵州喀斯特地区的兴义泥炭为研究对象, 对钻孔上部 300 cm 岩芯进行高分辨率 XRF 连续扫描, 并测定了样品含水量、色度(亮度 L^* 、红度 a^* 、黄度 b^*)和碳酸盐含量。通过对 Rb、Ti、Zr、Al、Si、Ca、Sr、Mg 等元素含量及其比值、色度和其他代用指标的综合分析, 结合主成分分析方法, 探讨 XRF 岩芯扫描在兴义泥炭研究中使用的可行性, 并进一步分析兴义泥炭化学元素的来源、指示意义及所记录的古环境演化过程。基于 AMS ^{14}C 测年构建的年代框架, 发现: 1) XRF 岩芯扫描的 Ca 元素含量与气量法测定的碳酸盐含量具有较好的一致性。XRF 岩芯扫描和分光测色计获得的 L^* 、 b^* 相关性高, 尽管这两种方法获得的 a^* 存在差异, 但其数值表现上相似性仍较高; 2) 晚全新世以来兴义泥炭的地球化学元素主要来源于周边碳酸盐岩风化、淋溶、随流水搬运而最终沉积到湿地的物质; 3) 兴义泥炭 Sr/Ca 比值处于高值, Si/Al、Rb/Sr 比值处于低值时, 气候偏干, 反之则指示气候偏湿润。此外, 兴义泥炭 Al、Si、Ca、Sr、Mg、Rb/Sr、Si/Al、Sr/Ca 的变化趋势与烧失量、腐殖化度等具有较好的一致性; 4) 晚全新世以来兴义地区总体上呈现出由湿润向干转变的趋势, 3270~2700 cal. a B. P. 由湿润持续转干, 2300~1670 cal. a B. P. 降水持续减少, 与西南季风主控区众多古环境记录能较好地对应, 并揭示了 2700~2300 cal. a B. P. 降水稳步增加的过程。对兴义泥炭进行 XRF 岩芯扫描能挖掘其蕴含的物质来源、物质变化特征等多方面信息, 有助于拓展 XRF 岩芯扫描分析方法在泥炭沉积中的应用, 并能深化对西南地区古环境演化历史的认识及丰富泥炭研究档案。

关键词: 贵州泥炭; XRF 岩芯扫描; 元素地球化学; 喀斯特地貌; 古环境重建

中图分类号: P534.63, P941.78

文献标识码: A

开放科学标识码 (OSID)



0 引言

X 射线荧光光谱 (X-ray fluorescence, 简称 XRF) 岩芯扫描分析方法具有快速、无损、高分辨率以及样品制备要求低等特点^[1]。对沉积物进行 XRF 岩芯扫描, 既可达到半定量分析要求, 又可高分辨率地重建古环境。目前在黄土^[2]、海洋^[3-4]和湖泊^[5-8]沉积物研究中已得到了广泛应用, 但在泥炭古环境研究中的应用有待进一步加强。由于泥炭沉积物具有富含有机质、含水量高且不同层位差异

大、多植物残体等特点, 增加了 XRF 岩芯扫描信号强度转化为元素含量的难度。鉴于 XRF 岩芯扫描优势明显, 如何充分发挥其优点和特色于泥炭研究中, 以进一步拓展其应用仍需要大量深入的研究。

泥炭具有沉积连续、分辨率高、蕴含信息丰富等特点^[9-11], 是恢复环境演变历史的重要载体。通过对 XRF 岩芯扫描获得的数据进行处理和分析, 对泥炭研究所要阐述的问题有很好的借鉴作用。如 Longman 等^[12]通过对罗马尼亚 Mohos 泥炭 XRF 和电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 测得元素

2020-03-12 收稿, 2020-06-28 收修改稿

* 国家自然科学基金面上项目 (批准号: 41971111 和 41773140) 和国家重点基础研究发展计划项目 (批准号: 2016YFC0502101) 共同资助

第一作者简介: 杨欢, 女, 25 岁, 硕士研究生, 自然地理学专业, E-mail: helenyang4@outlook.com

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

含量的比较,证实 Ti、Fe 等高浓度元素的相关性强,结果可信度高; Kern 等^[13]对德国 Füramoos 泥炭 XRF 和 ICP-OES 测得元素含量的比较,证实 Ti、Al、Ca、Fe、K、Mn、S、Si 元素的可信度高。基于上述研究,证实 XRF 岩芯扫描在泥炭古气候重建等方面能取得良好的效果。另外,泥炭沉积的 XRF 岩芯扫描结果数据处理方法多样,如通过删除总计数低于 40000 cps 和高噪声的数据来降低含水率的影响,证实了 Fe、Si、Rb、Ti 等元素能反映陆源输入^[14]; 泰国 Kumphawapi 泥炭钻孔研究中通过 Inc/Coh(非相干散射/相干散射)对 Si、Zr、K、Ti、Rb、Ca 元素含量曲线进行分割,得到标准化峰面曲线,能有效降低有机质含量、含水量对元素扫描结果的影响,并与总有机碳(TOC)含量、C/N 比值等代用指标共同反映了自 6500 cal. a B.P. 该区域由湖相沉积转为泥炭沉积^[15]; 同时,该泥炭沉积中的 Si、Zr、Sr、K 元素与 Ti 元素含量的比值可作为粒度变化的替代指标^[16]。此外,XRF 岩芯扫描结果与其他代用指标的对比性较好,如伊朗 Neor 湖泥炭的 Al、Zr、Ti、Si、Fe、K、Rb 元素和 TOC、有机碳稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)共同记录了研究区 13 ka 以来的降水和风成输入的变化^[17]; Si、S、K、Ca、Ti、Fe、Mn、Sr 元素与孢粉、C/N 比值等代用指标,共同表征了爱尔兰 Thomastown 泥炭地及邻近区域末次冰消期以来的气候变化过程^[18]; 西地中海地区 Padul 泥炭 Al、Si、S、K、Ca、Fe、Br、Sr、Zr 元素和 TOC、孢粉等指标清晰地记录了该区 200 ka 以来的气候变化过程^[19-20]。可见,选取泥炭 XRF 岩芯扫描结果中具代表性且高计数的数据,并经适当处理,可与其他代用指标所反映的古环境信息相互印证,并能揭示沉积区物质来源等多方面信息。然而,该方法在国内泥炭沉积物中的应用相对较少。

贵州地处云贵高原东侧,受东南季风与西南季风共同影响^[21],喀斯特地貌广布,生态环境脆弱,对气候和环境变化十分敏感。前人对贵州的古环境开展了大量研究,其中洞穴石笋是最主要的研究材料^[22-24]; 由于地质、地貌等因素的影响,使贵州境内的泥炭、湖泊沉积物等高分辨率材料的研究相对更为薄弱。若能找到发育和保存良好、受人类活动干扰小的泥炭沉积展开研究,不仅可以丰富贵州境内的古环境记录,而且可以与洞穴石笋等记录相互对比,以进一步厘清喀斯特地貌区的古环境演化过程。本文以黔西南喀斯特地区兴义泥炭钻孔为研究对象,引入 XRF 岩芯扫描技术,基于 AMS ^{14}C 测年,

及碳酸盐含量、色度等高分辨率序列,探讨晚全新世以来兴义地区地球化学元素的变化特征,并重建古环境,丰富我国季风区泥炭研究档案。

1 研究区概况

贵州省黔西南布依族苗族自治州兴义市西北方向 25 km 处的兴义湿地内,分布着喀斯特地区难得一见的、面积较大且保存良好的泥炭沉积。该湿地靠近黔、滇、桂三省的交界处,受西南季风显著影响(图 1a 和 1b)。兴义地区受中亚热带山地季风气候控制,年均温 17.6 °C,年降水量 1322 mm,年均湿度 80%^[25]。海拔 1000~1400 m,地势西北高、东南低,山峦起伏,喀斯特地貌面积占兴义市总面积的 73.6%^[26]。境内河流均属珠江流域南盘江水系,位于南盘江干流中游。处于亚热带常绿阔叶林区域,典型植被为中山常绿栎林、松栎混交林、云南松林等,在山坡上分布着稀树灌木丛和禾本科杂草丛等^[27]。该区出露地层主要为三叠系下统(T_1)灰岩及砂页岩、薄层灰岩、白云岩和砾屑灰岩、泥灰岩及页岩,中统(T_2)白云岩、灰岩夹页岩、碎屑灰岩、藻灰岩、石英砂岩及粘土岩和下统与中统并层(T_{1+2})(图 1c)^[28-29],典型土壤为酸性和微酸性红黄壤。

2 材料与方法

2.1 野外采样与沉积物特征

利用俄罗斯泥炭钻采集泥炭岩芯 XY1801 及其平行钻孔(25.28°N, 104.82°E; 海拔 1317 m),装入 PPC 管并使用保鲜膜覆盖、固定,快速送回实验室置于 4 °C 的冰箱低温保存。该钻孔深 650 cm,组成物质主要为泥炭,部分层位伴有白色碳酸盐颗粒(图 2a)。本研究针对已有较好研究基础、分辨率较高的钻孔上部 300 cm 柱样进行分析,主要岩性描述如下:

①0~30 cm 为表层褐黑色泥炭,有明显的红色灌木树枝或根系分布,且有肉眼可见的草本植物残体;

②30~120 cm 褐黑色泥炭,出现红色灌木树枝或根系,并伴有白色碳酸盐颗粒沉积;

③120~140 cm 棕色泥炭,出现红色灌木树枝或根系,并伴有白色碳酸盐颗粒沉积;

④140~150 cm 棕褐色泥炭,出现红色灌木树枝或根系,并伴有白色碳酸盐颗粒;

⑤150~170 cm 棕色泥炭伴棕褐色泥炭,也有少量红色灌木树枝或根系,伴有白色碳酸盐颗粒;

⑥170~205 cm 褐色泥炭,有红色灌木树枝或根系,伴

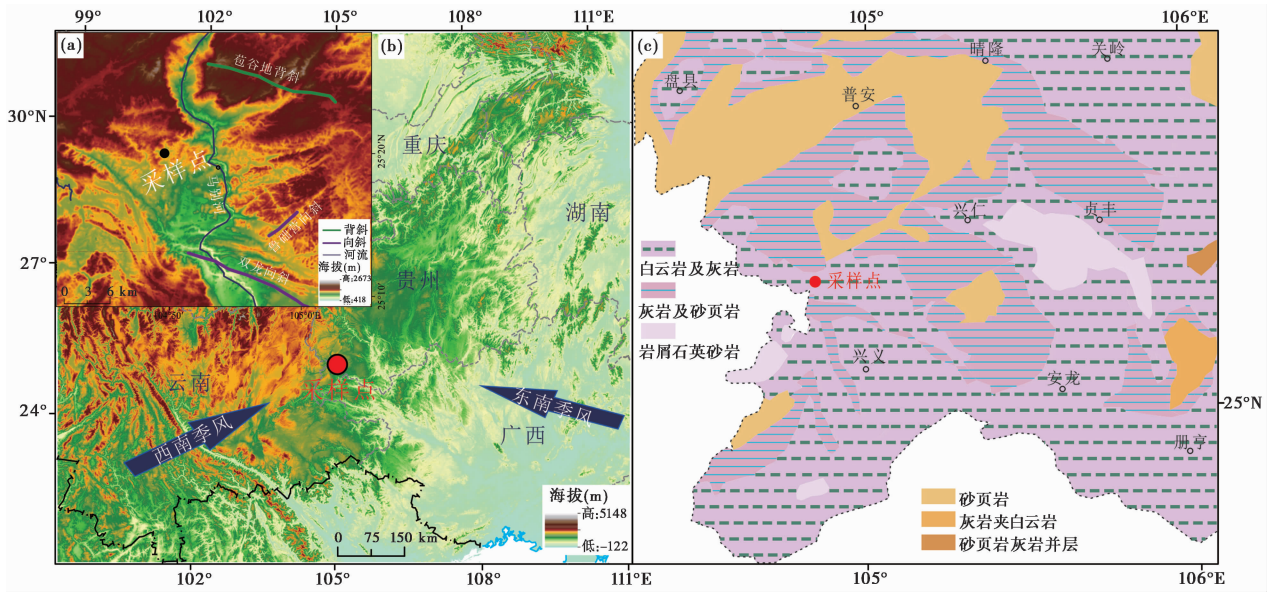


图1 兴义泥炭湿地的位置及地质背景

(a) 采样点构造条件; (b) 在DEM图显示的地理位置及气候系统; (c) 较大空间范围内的地质图^[28~29]

Fig. 1 The location, structural and stratigraphic setting of Xingyi peatland. (a) Structural setting of Xingyi peatland; (b) Location and climatic background of Xingyi peatland generated by the digital elevation model (DEM); (c) Geologic map in a large scale showing the distribution of stratigraphy in southwestern Guizhou^[28~29]

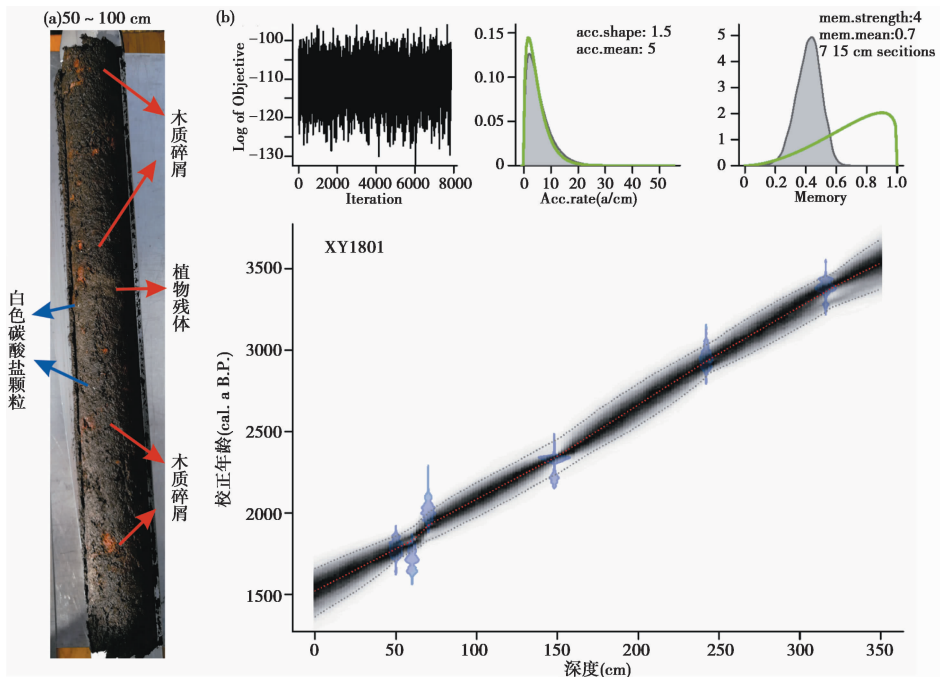


图2 兴义泥炭岩芯照片 (a) 及钻孔年代-深度 Bacon 模型 (b)

在图 2b 中, 左上角的小图显示马尔可夫链蒙特卡罗迭代 (大于 1000 次迭代) 的稳定性, 中间的小图显示沉积速率 (a/cm) 的先验 (绿色曲线) 和后验 (灰色填充) 分布, 右上角小图显示分段之间累积率的前 (绿色曲线) 和后 (灰色填充) 关系

Fig. 2 Core image (a) and age-depth model (b) of the upper section of XY1801 core, using WinBacon 2.2. R software. In figure (b), the upper left plot shows the stability of the Markov Chain Monte Carlo iterations (> 1000 iterations), the middle plot shows the prior (green curve) and posterior (grey fill) distribution for accumulation rate (a/cm), and the upper right plot shows the prior (green curve) and posterior (grey fill) dependence of accumulation rates between piece-wise sections

有少量白色碳酸盐颗粒;

⑦205~300 cm 棕褐色泥炭, 未见红色灌木树枝或根系, 但出现少量白色碳酸盐颗粒。

2.2 AMS ^{14}C 年代测定

除结合平行孔不同深度挑选的 5 个样品的植物残体测年结果^[30], 还将 316 cm 处获取的树根送交美国 Beta 实验室进行 AMS ^{14}C 年代测定, 以进一步检验钻孔岩芯的沉积年代并构建岩芯较高分辨率的年代控制。测年结果采用 OxCal 程序并利用 IntCal13 曲线校正, 通过基于 Bayesian 统计法的“WinBacon2.2”年代模型^[31], 结合 R 软件为不同的年代控制点选择合适的函数, 从而建立准确的年代-深度框架^[31]。

2.3 兴义泥炭环境代用指标的获取

在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室完成兴义泥炭岩芯扫描。实验仪器为英国 GEOTEK 公司生产的 MSCL (Multi-Sensor Core Logger) -S Specifications (GeoTek Ltd.) 高分辨多参数岩芯扫描仪, 以 1 cm 的分辨率进行测试。同时使用岩芯扫描仪附加的磁化率仪和色度仪测定了磁化率 (magnetic susceptibility, 简称 MS) 和色度 (包括亮度 L^* 、红度 a^* 、黄度 b^*)。选用 XRF 岩芯扫描结果中信号值 ≥ 2000 cps、总信号值 ≥ 40000 cps 的 Mg、Al、Si、Ca、Sr、Rb、Zr、Ti 元素进行分析。对台湾鲤鱼湖沉积物的研究表明, Al 元素可以用于高有机质沉积物 XRF 岩芯扫描结果的有机质校正^[32]。兴义泥炭有机成分丰富, 平行钻孔测得的泥炭烧失量较高, 因此本研究也选用 Al 元素进行校正。经校正后, 各元素含量应表示为 (Mg、Si、Ca、Sr、Rb、Zr、Ti)/Al。但为便于区分校正后元素含量和元素比值, 本文后续图表中使用 (Mg、Si、Ca、Sr、Rb、Zr、Ti)/Al 表示, 但正文中仍使用 Mg、Si、Ca、Sr、Rb、Zr、Ti 表示。

此外, 使用日本柯尼卡美能达公司制造的 CM-700d 型分光测色计对色度进行测定。同一样品在不同区域测试 3 次, 取其平均值, 获得 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值。在铝盒中加入一定量的原样, 通过 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 12 h 后计算得出含水量。此外, 采用气量法对碳酸盐含量进行测定。气量法测试原理是样品中 CaCO_3 与稀盐酸反应, 用碱式滴定管收集产生的 CO_2 气体并测定其体积, 结合当时的大气压、温度及加入的粉末样品重量计算 CaCO_3 的含量。以上实验均在浙江师范大学地理过程实验室完成, 每间隔 1 cm 取样, 分析了 150 个样品。

2.4 数理统计方法

利用主成分分析法可判别沉积物的不同组分和来源的贡献^[33]。本研究使用 SPSS24 软件对地球化学元素 (Mg、Al、Si、Ca、Sr、Rb、Ti、Zr)、色度数据进行主成分分析。将元素与其平均值之差除以该元素的标准差进行标准化, 抽取特征值大于 1 的主成分, 得到各个主成分载荷。

3 结果

3.1 年代框架

AMS ^{14}C 年代学结果 (表 1 和图 2b) 表明 XY1801 钻孔 60 cm 以下无地层倒置现象。根据重建的年代-深度序列, 该钻孔在 300 cm 处的沉积年龄为 3270 cal. a B.P., 30 cm 处沉积年龄为 1670 cal. a B.P., 且沉积速率较为稳定。根据代用指标的实验测定结果及考虑到年代框架的限制, 30 cm 以上的钻孔岩芯部分本文将不予分析讨论。

3.2 兴义泥炭环境代用指标的变化趋势

兴义泥炭钻孔中 Al、Si、Mg 元素总体呈相似的上升趋势 (图 3)。3270~2700 cal. a B.P. (第⑦层, 300~205 cm) 均较稳定略有减少; 2700~2300 cal. a B.P. (第

表 1 兴义泥炭 AMS ^{14}C 测年结果

Table 1 AMS radiocarbon dating results for Xingyi peat

实验室编号	样品编号	深度 (cm)	测年材料	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C 年龄 (a B.P.)	校正年龄 (cal. a B.P.)
Beta-469793	XY1	50	植物残体	-24.4	1850±30	1715~1865 (1767) ^[30]
Beta-470784	XY2	60	植物残体	-25.1	1790±30	1686~1817 (1820) ^[30]
Beta-478621	XY3	70	植物残体	-27.4	2050±30	1930~2115 (1915) ^[30]
Beta-469794	XY4	148	植物残体	-22.2	2300±30	2305~2356 (2337) ^[30]
Beta-469795	XY5	242	植物残体	-22.9	2840±30	2866~3039 (2933) ^[30]
Beta-541312	XY6	316	树根	-11.1	3160±30	3450~3339 (3394)

⑥~④层, 205~140 cm) 均快速增加; 2300~1900 cal. a B.P.(第③层、第②层下部, 140~70 cm) Si、Mg 元素含量缓慢下降, Al 元素含量发生短暂下降后回升; 1900~1670 cal. a B.P.(第②层上部, 70~30 cm) Si、Mg 元素含量继续缓慢下降, Al 元素含量发生明显波动略有减少。Rb 元素含量的变化较为稳定, 其中在 2700~2300 cal. a B.P. 显著增加, 其余时段均保持较低水平。Zr、Ti 元素含量的变化基本一致, 总体也较为稳定。在 3270~2700 cal. a B.P. 期间 Zr 元素含量基本稳定, Ti 元素先上升后下降而后再缓慢回升; 在 2700~2300 cal. a B.P. 期间两者均略有下降; 在 2300~1900 cal. a B.P. 期间两者均缓慢上升; 而在 1900~1670 cal. a B.P. 期间两者皆发生明显的波动。Ca、Sr 元素变化趋势也较一致, 总体呈减小趋势, 波动较明显。Ca、Sr 在 3270~2700 cal. a B.P. 总体呈高位波动状态, 在 2700~2300 cal. a B.P. 含量均较为稳定, 在 2300~1670 cal. a B.P. 呈现下降趋势且下降幅度较大。L* 总体呈下降趋势, 3270~2700 cal. a B.P. 高位稳定略有下降, 2700~2300 cal. a B.P. 保持稳定, 在 2300~1900 cal. a B.P. 波动下降, 而在 1900~1670 cal. a B.P. 略有回升。a*、b* 变化趋势较一致, 在 3270~2700 cal. a B.P. 总体呈上升后保持高位波动状态, 在 2700~2300 cal. a B.P. 均呈上升趋势, 而在 2300~1670 cal. a B.P.(第③~②层) 则呈明显下降趋势。通过岩芯扫描获得的 MS 在整个钻孔呈现负值(平均值为 -4.92×10^{-5} SI), 这可能是因为泥炭中的腐殖质等有机成分和/或水分、碳酸盐等稀释、降低了磁性矿物的相对浓度^[34]。由于没有其他磁学指标的支撑, 本文在后续将不再分析讨论 MS。

通过常规方法获得的 L* 与岩芯扫描结果较为接近, 均呈现下降趋势, 均值分别为 36.18 和 35.34, 相关系数 $R^2 = 0.99$, $P < 0.01$ 。两种方法获得的 a* 存在差异, 其中 XRF 岩芯扫描的 a* 均值为 1.20, 常规方法获得的 a* 均值为 2.76; 但经过含水量校正后, 常规方法测定的 a* 均值为 2.28, 两者在数值上较为接近, 相关系数 $R^2 = 0.92$, $P < 0.01$ 。两种方法获得的 b* 较为一致, XRF 岩芯扫描中 b* 均值为 3.56, 常规方法测定的 b* 均值为 4.65; 对常规方法测定结果进行含水量校正后 b* 均值为 3.75, 两者在数值上较为接近, 相关系数 $R^2 = 0.91$, $P < 0.01$ 。含水量的平均值为 81.5%, 在钻孔下部较低且变化明显, 但在钻孔中上部较高且变化较为稳定。碳酸盐含量总体呈下降趋势, 变化范围为 0.08%~53.29%, 平均值为 12.44%。

3.3 主成分分析

兴义泥炭的地球化学元素、色度可以识别出 3 个主成分为 F1、F2 和 F3, 它们的贡献率分别为 29.49%、27.51% 和 21.86%, 三者共同解释了总方差的 78.86% (表 2)。第一主成分 F1 中载荷值较大(绝对值 ≥ 0.5 , 下同)的有 Mg、Si、Al、L*, 第二主成分 F2 中载荷值较大的有 a*、b*、Ca、Sr, 第三主成分 F3 中载荷值较大的有 Rb、Zr、Ti。

4 讨论

4.1 兴义泥炭 XRF 岩芯扫描结果与常规测试方法的对比分析

虽然泥炭 XRF 岩芯扫描信号强度转化为元素含量具有一定的难度, 但通过一定的方法仍能很好地发挥该分析技术的优势^[12-20]。目前已有较多已公开发表成果将传统地球化学元素含量测定结果与 XRF 岩芯扫描结果进行对比分析, 发现 XRF 岩芯扫描结果的可靠度较高^[12-13, 35-36]。本研究则尝试通过常规测定方法获得的泥炭色度、碳酸盐含量及腐殖化度等古环境代用指标^[30]与岩芯扫描结果进行对比分析(图 4), 用以检验兴义泥炭 XRF 岩芯扫描结果的准确性和可运用性。

喀斯特地貌区具有代表性的 Ca 元素含量与碳酸盐含量一致性高, 与烧失量呈相反趋势。3270~2700 cal. a B.P.(第⑦层, 300~205 cm) 期间, Ca 元素含量与碳酸盐含量均呈下降趋势, 烧失量呈上升趋势; 2700~1670 cal. a B.P.(第⑥~②层, 205~30 cm) 期间, Ca 元素含量和碳酸盐含量均较低, 烧失量高位稳定(图 4)。两种方法获得的 L* 与碳酸盐含量、Ca 元素含量变化趋势一致, 与烧失量变化趋势相反(图 4)。从岩性特征来看, Ca 元素处于高值时, 碳酸盐含量高, 泥炭中白色碳酸盐物质较多, 颜色更偏白, 烧失量低, 有机质偏少, L* 也较高; 反之, 亦然。以上均说明 L* 与碳酸盐等成分相关, 受控于沉积物的碳酸盐和有机质含量变化^[37]。其中, 兴义泥炭剖面中伴有的白色碳酸盐颗粒(图 2a), 可能是由泥炭地周边物质经风化、侵蚀、搬运、堆积和淀积而来的。兴义湿地位于喀斯特盆地广泛发育的地区, 泥炭形成演化于喀斯特湖盆地^[38], 湿地周边的喀斯特山地(图 1a) 提供了大量碎屑来源; 且处于暖湿的亚热带季风气候区, 化学风化和物理侵蚀主要受降水影响, 降水量丰富时,

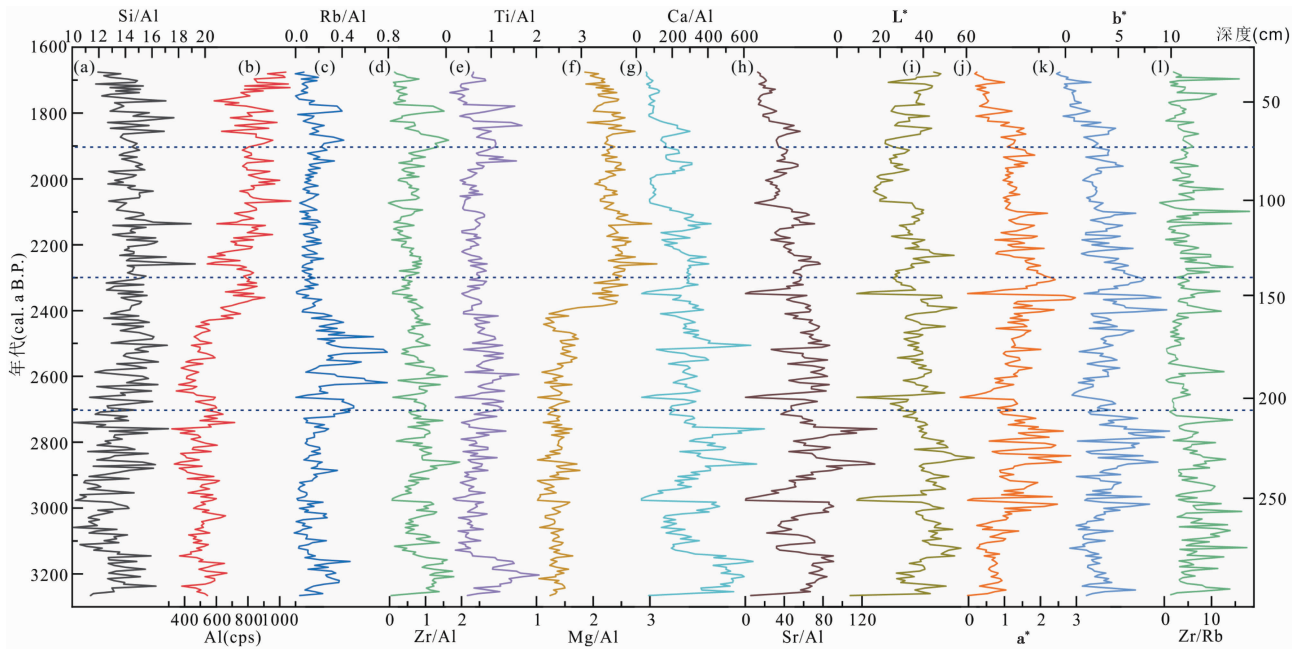


图 3 兴义泥炭 XY1801 钻孔地球化学元素、色度变化图

Fig. 3 Variation of geochemical element and chromatic from XY1801 core in Xingyi peatland obtained by XRF core scanning

表 2 主成分矩阵*

Table 2 Component matrix of selected elements in XY1801 core in Xingyi peatland

	Mg	Si	Al	L*	Ca	Sr	a*	b*	Rb	Zr	Ti	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
F1	0.97	0.97	0.95	-0.55	-0.10	-0.06	0.10	-0.10	0.07	0.07	0.32	29.49	29.49
F2	0.03	0.02	-0.06	0.16	0.79	0.83	0.86	0.90	-0.04	0.20	0.13	27.51	57.00
F3	0.02	0.10	0.10	-0.27	0.25	0.27	-0.10	-0.10	0.85	0.84	0.85	21.86	78.86

* 加粗数字代表此元素载荷值明显更大(绝对值 ≥ 0.5), 能很好地解释该主成分

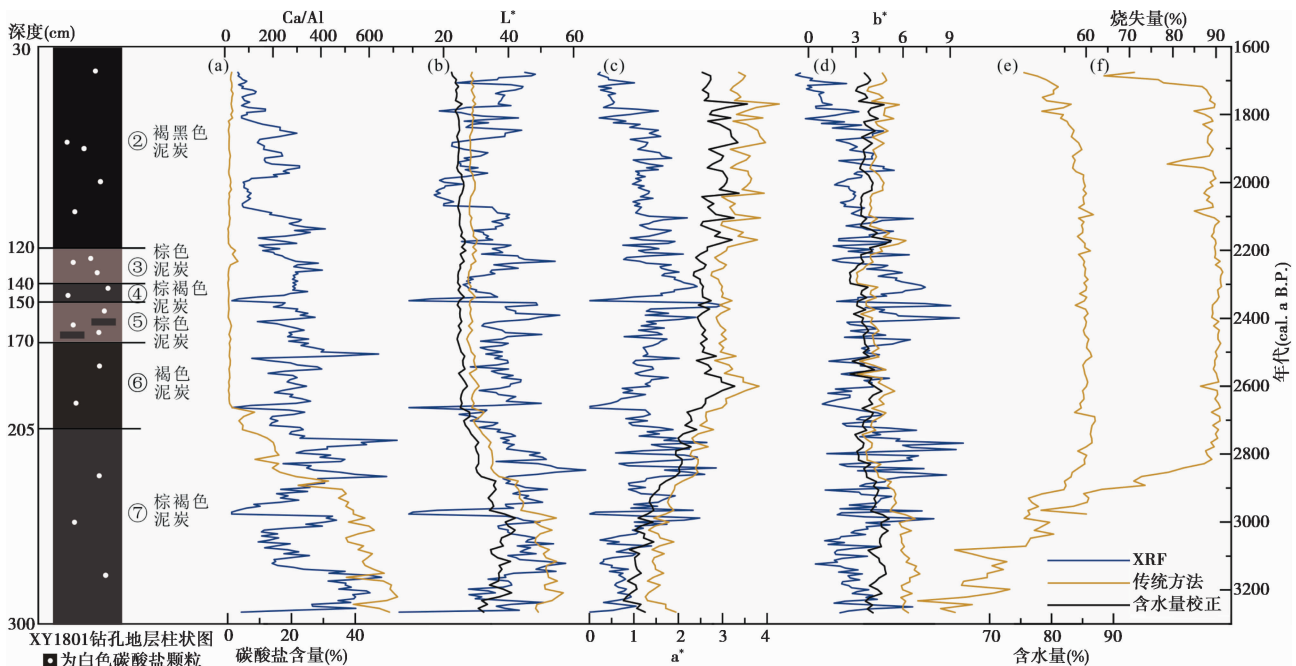


图 4 兴义泥炭 XY1801 钻孔地层柱状图及色度、碳酸盐含量、烧失量等代用指标随深度的变化

Fig. 4 Stratigraphy and the variations of chromaticity proxies obtained from different measurement methods, carbonate content, loss on ignition and other proxies along depth and age from XY1801 core in Xingyi peatland

会有部分周边物理侵蚀带来的碎屑物质直接汇入到盆地中^[39]。发育于喀斯特地貌区的云南湖泊沉积物碳酸盐研究也反映了该观点^[40]。此外,由于湿地 CO₂ 浓度、温度等条件的变化,可能也有少部分 CaCO₃ 被析出、淀积。

通过两种方法获得的 a* 变化趋势存在差异(图 4)。3270~2700 cal. a B.P. 期间,两条 a* 曲线均呈上升趋势;2700~1670 cal. a B.P. 期间,通过常规方法测定的 a* 均高于 XRF 岩芯扫描结果。其差异的产生原因可能是 2700~1670 cal. a B.P. 期间,泥炭沉积中红色灌木根系和树枝较多(图 2a),在分光测色计分析所使用样品的前处理过程中虽已挑出了绝大部分植物残体,但不免仍有少量残留;此外,在烘样及磨样前也挑出了可见的螺壳及其碎片。最终使烘干混合后的粉末样品更偏红,测定的 a* 较高。通过两种方法获得的 b* 在整个研究时段内均呈略下降趋势,差异不如 a* 明显(图 4)。

综上所述,兴义泥炭 XRF 岩芯扫描的 Ca 元素含量与碳酸盐含量、烧失量等高度一致;XRF 岩芯扫描与分光测色计测得的 L*、b* 相关性高;a* 可能由于样品特点和实验过程的影响,其结果有些许差异,但数值表现上相似性仍较高。因此,XRF 岩芯扫描的数据经过筛选和分析后可运用于兴义泥炭沉积研究中。本文接下来选择在泥炭研究中应用较广泛的 Mg、Al、Si、Ca、Sr、Rb、Zr、Ti 等元素^[13-15,18-20]进行详细的探讨。

4.2 兴义泥炭地球化学元素揭示的晚全新世古环境

4.2.1 兴义泥炭地无机物来源

兴义湿地周边基岩以白云岩、灰岩等碳酸盐岩为主(图 1c)^[28-29]。贵州碳酸盐岩风化过程中,Mg、Ca 元素的迁移系数均接近-1,几乎完全亏损,成土作用过程中 CaO、MgO 碳酸盐类强烈淋失,脱镁钙现象明显;Al 元素的迁移系数接近于 0,Si 元素迁移系数在-0.2 左右,最终使 Al₂O₃、SiO₂ 原地富集^[41-47]。碳酸盐岩的淋失与降水量有直接的关系,降雨量大,风化成土作用强,使碳酸盐岩中的易溶元素极易被淋滤迁移而导致含量相对亏损;且同一剖面的 Ca、Mg 亏损量与当时的降雨量基本成正比^[43,48-49]。此外,地形对碳酸盐岩风化、淋溶、淀积也存在重要影响^[44,50-52]。通过对贵州花溪党武、遵义虾子和安龙木咱碳酸盐风化成土的研究,认为山地斜坡排水快,易被侵蚀和搬运,故土壤物质易受淋溶使元素含量降低;而地形低洼处,易积水,

土壤物质较易累积,能汇集周边淋溶出来的元素^[44]。因此,处于谷地的安龙木咱土壤中由于周边高地迁移而来的 CaO 发生累积,其含量高于其他两个地区,SiO₂ 含量低于其他两个地区^[44]。花溪杨中石灰岩洼地剖面的地球化学元素变化也呈现出相同特点,其物质来源于表生流体携带及高地土壤侵蚀^[50]。黔西草海泥炭沉积物中 CaO 和 MgO 伴随着碳酸盐岩的风化,物源区发生强烈淋溶,随流水搬运到湖盆沉积,从而含量较高;同时,Al₂O₃、Fe₂O₃ 也具有明显的富集作用^[51-52]。位于低洼沉积区的兴义泥炭 XRF 岩芯扫描结果中 Ca、Mg 元素含量高于 Si、Al 元素,与同处于谷地的安龙木咱^[44]、杨中盆地^[50]和草海泥炭^[51-52]的化学元素组成相似。结合以上三地研究成果及碳酸盐风化理论,可以认为兴义泥炭中 Ca、Mg 元素含量高得益于周边碳酸盐风化过程中相关元素的大量淋溶而汇集在兴义泥炭地中;降水越丰富,相关元素的迁移量越高,从而最终汇集到泥炭地中的也越多。Si、Al 元素也同样来源于周边基岩的风化产物。由于 Si、Al 元素的迁移系数虽为负值但化学活动性不如 Ca、Mg 元素的强,当降水丰富时,物源区的强烈淋溶能使其汇入到泥炭地,但其淋溶迁移量远小于 Ca、Mg,故而在泥炭地的淀积量也远少于 Ca、Mg^[41-47,50-52]。因此,兴义泥炭中的无机化学元素主要得益于其能有效地汇集周边碳酸盐岩风化、淋溶、随流水搬运而来的物质,能在一定程度上反映当时的风化强度和气候条件。

元素比值往往能够消除由于粒度和矿物组成变化所造成的元素含量的变化^[51],从而气候环境指示意义较为清晰,能用于分析晚全新世以来兴义泥炭地球化学元素的物质来源及古环境指示意义。Zr 元素化学性质稳定,不易发生迁移;Rb 元素是稳定元素,风化过程中易被带负电荷的胶体粘土吸附而富集;Ti 元素化学性质稳定,迁移量少^[53]。在风化过程中,Rb 和 Zr 发生明显分离,Rb 相对富集于粘土等细颗粒矿物中,Zr 则相对富集于较粗颗粒矿物中。在降水丰富、化学风化强的条件下,侵蚀和搬运能力强,细颗粒物质较多,沉积区域 Rb 含量相对较高,Zr/Rb 比值较低;而在降水量少、物理风化强的条件下,侵蚀和搬运能力降低,粗粒矿物相对较多,沉积区域 Zr 含量相对较高,Zr/Rb 比值较高^[54]。兴义泥炭中这 3 种元素含量均较低,Ti、Zr 元素含量整体较稳定,Rb 元素除在 2700~2300 cal. a B.P. 期间出现高值外,整体也较为稳定;且 Zr/Rb 比值在 2700~2300 cal. a B.P. 期间出现低值与

Rb元素含量的高值相对应(图3)。反映了Zr/Rb比值受Rb元素的影响更为显著,即受化学风化的影响更为明显。可见,研究区在研究时段内以Ti、Zr元素为代表的物理风化变化不明显,而以Rb元素等为代表的化学风化变化较明显。这也能进一步佐证兴义泥炭中无机化学元素,是以周边原岩化学风化、淋溶迁移出的元素搬运至位于负地形的泥炭地后发生沉积为主,其大小波动能表现出地表化学风化强度的变化。

4.2.2 晚全新世兴义湿地及周边地区的环境变化过程

如前所述,贵州碳酸盐岩地貌区Mg、Ca元素为强迁移元素(迁移系数接近-1)^[41-42],降水丰富时,Mg、Ca元素在泥炭地的富集量增加;反之则富集量少。与封闭和干旱区湖泊中的Ca、Sr元素多为自生碳酸盐^[55]不同,在喀斯特开放沉积区其以外来输入为主^[56-57];Ca、Sr元素的化学性质类似,在暖湿地区均能发生充分的淋溶迁移^[41-43,58-59]。兴义泥炭中Ca、Sr元素变化曲线一致,Sr/Ca比值与两者变化相反(图5),说明降水的变化对Ca、Sr元素的影响十分相似,Sr/Ca比值的变化能体现出相对含量的变化。Sr/Ca比值与Ca元素含量的相关系数 $R^2 = -0.38 (P < 0.01)$,与Sr元素的相关系数 $R^2 = -0.03 (P < 0.01)$,表明Ca元素对Sr/Ca比值的影响更为明显。针对碳酸盐岩风化剖面已进行了较多的相关研究,如粤北碳酸盐岩风化剖面的Sr、Ca元素的迁移系数分别为-0.94~0.46和-1~0.54^[58];黔北喀斯特碳酸盐岩风化剖面Sr元素的迁移系数为-0.99~-0.84^[59-60],Ca元素迁移系数为-1~0^[60];黔中清镇白云岩风化剖面也显示出相似的迁移系数变化^[42]。因此,Sr、Ca元素迁移系数的差别可能是引起兴义泥炭中Sr/Ca比值变化的原因,降水丰富时,由于Ca元素迁移系数变率较大,其淋溶增加量大于Sr元素的,从而在泥炭盆地的积累量也更丰富,Sr/Ca比值低;同理,降水减少时,Ca元素淋溶量和积累量相对更少,Sr/Ca比值高。

湿润区Si、Al元素均以外来输入为主,反映流域化学风化强度^[61];该区域Si元素迁移系数为-0.2左右,Al元素在0附近^[41],Al元素的迁移量十分有限,Si元素受降水的影响更显著,普遍存在原地脱硅富铝化现象^[50]。因此,兴义泥炭中的Si/Al比值也可以反映淋溶程度,且分析发现其与Si元素的相关性($R^2 = 0.33, P < 0.01$)比与Al元素($R^2 = -0.02, P < 0.01$)的更强。这进一步印证了兴

义泥炭中的Si/Al比值受Si元素变化的影响更大。降水丰富时,周边区域化学风化强烈,Si、Al元素淋溶迁移量增加,在泥炭地的富集量也增加。其中Si元素淋溶量更大,在泥炭地的富集量也更大,从而Si/Al比值偏高;当降水减少时,Si、Al元素在泥炭地中的富集量减少,Si/Al比值偏低。以上分析,也符合处于亚热带季风区的江西定南大湖湖沼沉积^[61]及太湖沉积物^[62]的研究结果。此外,Rb和Sr均为微量元素^[63],Sr元素在一般的水热条件即可淋溶出来,而Rb元素迁移能力较弱(迁移系数-0.1左右)^[42,58],只有在湿润条件下,才能够从岩石中迁出^[64]。在兴义地区的水热条件下,降雨量的增加使Rb元素的迁移量增加^[65],而Sr元素淋溶量在降水量较大时相对于原先的变化幅度较小^[66]。兴义泥炭Rb/Sr比值曲线与Rb元素变化曲线也更一致(图3和5),相关性也稍高($R^2 = 0.3, P < 0.01$)。因此,降水量增加,在兴义泥炭盆地周边地区Rb元素的淋溶量增加,进而在泥炭地中的沉积量也增加,Rb/Sr比值升高;降雨量减少时,Rb元素在泥炭地汇集量少,Rb/Sr比值降低,这与同属湿润区且为沉积环境的太湖沉积物^[62]、大九湖泥炭^[64]和千亩田泥炭^[66]等的Rb/Sr比值研究结果相一致。综上所述,Ca、Mg、Al、Si这4种元素在碳酸盐岩风化过程中特征明显,在喀斯特地区具有代表性。故接下来选取此类元素及其比值,并结合平行钻孔的腐殖化度等相关代用指标^[30](图5)进行对比分析,探讨兴义泥炭记录的晚全新世古环境演化过程。

3270~2700 cal. a B.P.(第⑦层,300~205 cm)期间,Mg元素含量较低且略有下降;Ca、Sr元素含量变化一致,均较高且波动明显,Sr/Ca比值上升;Si、Al元素含量和Si/Al比值均呈略下降趋势;Rb/Sr比值处于稳定的低值。根据各元素含量及元素比值的指示意义,表明该时期兴义地区降水量减少,且泥炭盆地周边的淋溶作用减弱,外源物质在泥炭中的沉积量减少。当时碳累积速率下降,腐殖化度、烧失量升高^[30],也反映了降水量减少,有机质含量总体升高,泥炭分解程度增加,导致碳累积速率仍减少^[30]。地球化学元素各项指标与碳累积速率、腐殖化度、烧失量反映的气候变化^[30]过程一致,记录了兴义地区该时期呈现出由湿转干的趋势。

2700~2300 cal. a B.P.(第⑥~④层,205~140 cm)期间,Mg元素含量呈上升趋势;Ca、Sr元素含量较为稳定,Sr/Ca比值呈下降趋势;Si、Al元素含量均增加,Si/Al比值较高;Rb/Sr比值处于整

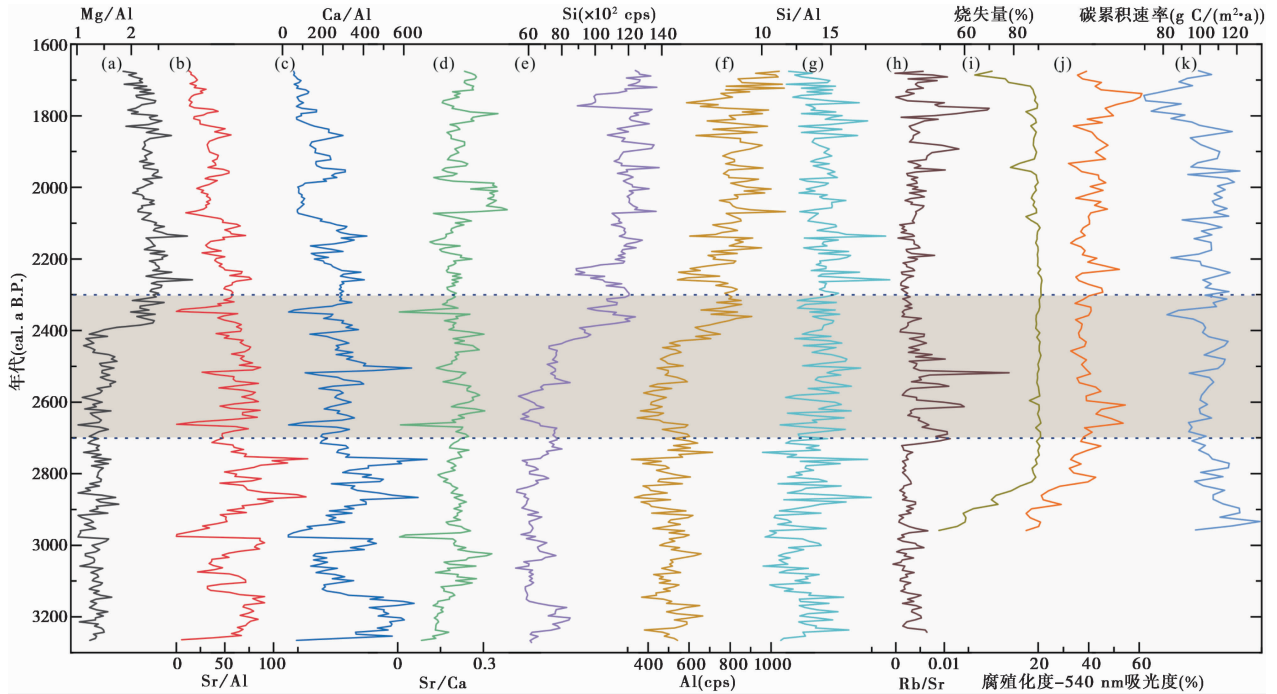


图 5 兴义泥炭地球化学元素含量与其他指标^[30]的对比

Fig. 5 The comparison of geochemical elemental contents and other environmental proxies^[30] from Xingyi peatland

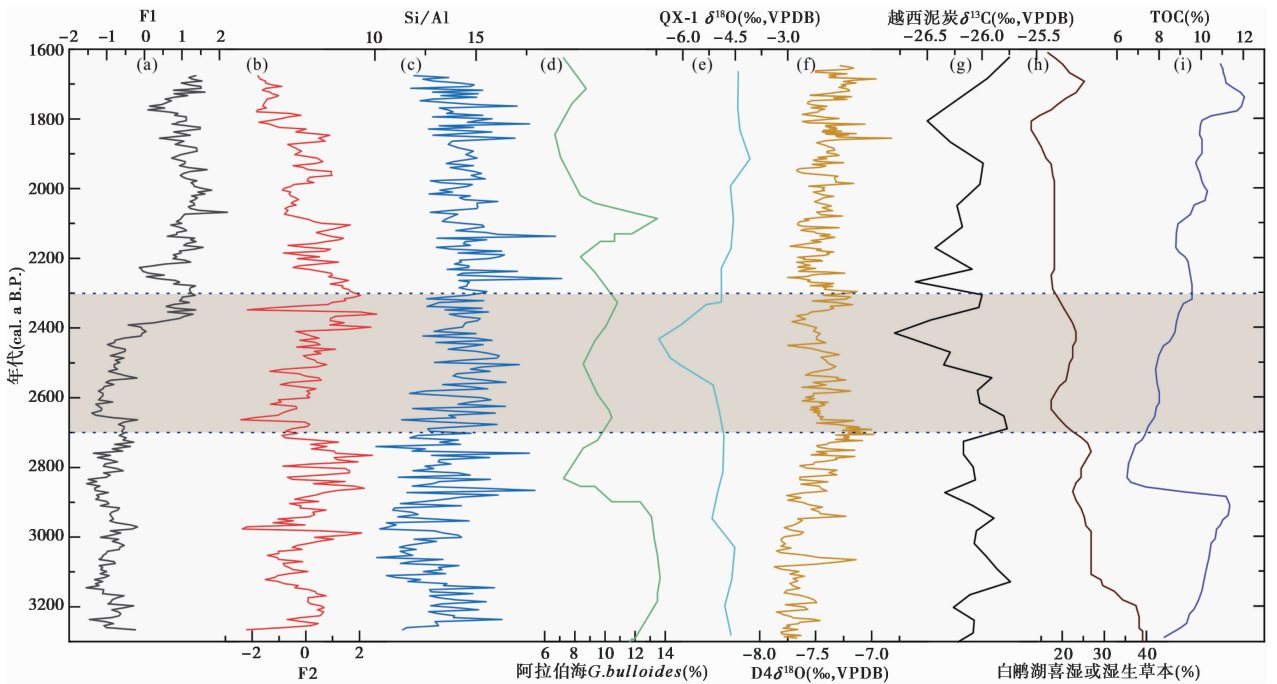


图 6 兴义泥炭古环境代用指标与其他记录的对比

(a)兴义泥炭地球化学元素主成分 F1; (b)兴义泥炭地球化学元素主成分 F2; (c)兴义泥炭 Si/Al 比值; (d)阿拉伯海 723A 孔浮游有孔虫 *G. bulloides* 含量(%)^[67]; (e)七星洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ ^[68]; (f)董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ ^[22]; (g)越西泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ ^[69]; (h)白鹇湖喜湿或湿生草本含量(%)^[70]; (i)泸沽湖 TOC 含量(%)^[71]

Fig. 6 Comparison between environmental indexes from Xingyi peat and other paleoclimatic records from southwestern monsoon region. (a)F1 and (b) F2 observed from the principal component analysis of geochemical element composition in XY1801 core from Xingyi peat; (c)Si/Al ratio in XY1801 core from Xingyi peat; (d)*G. bulloides* percentage in Hole 723A from the Arabian Sea^[67]; (e) $\delta^{18}\text{O}$ of QX-1 from Qixing Cave^[68]; (f) $\delta^{18}\text{O}$ of D4 from Dongge Cave^[22]; (g)Yuexi peat cellulose $\delta^{13}\text{C}$ ^[69]; (h)Pollen content of hydrophyte from the Baixian Lake sediments^[70]; (i)TOC content in sediments from the Lugu Lake^[71]

个钻孔的最高值。以上表明该时期兴义地区降水量较丰富, 化学风化较强, 原岩中元素的迁出量和在泥炭地的沉积量均增加。当时兴义泥炭碳累积速率略有下降, 腐殖化度略有下降, 烧失量处于较高水平, 也反映降水量增加, 泥炭地有机质含量总体仍较高; 但降水增加使泥炭地水位升高, 微生物活动性下降, 使泥炭分解度下降, 导致碳累积速率升高^[30]。基于以上元素含量、比值的变化和其他代用指标的分析结果, 得出该阶段降水量持续增加, 气候偏湿润。

2300 ~ 1670 cal. a B.P. (第③ ~ ②层, 140 ~ 30 cm) 期间, Mg、Ca、Sr 元素含量呈下降趋势, Sr/Ca 比值呈缓慢上升趋势; Si、Al 元素含量上升后又略有减少, Si/Al 比值呈持续降低趋势; Rb/Sr 比值处于稳定低值。各元素含量及元素比值的变化均表明, 此时兴义地区降水量减少。兴义泥炭碳累积速率略有下降, 腐殖化度升高, 烧失量仍较高, 三者在该阶段的波动幅度明显增加, 反映了降水量呈减少趋势, 且降水量波动显著, 有机质含量总体仍较高; 而降水的不稳定使泥炭地水位波动, 泥炭分解度总体增加, 导致碳累积速率略降低^[30]。其中在 1900 ~ 1670 cal. a B.P. 期间, Si、Al 元素含量及 Si/Al、Rb/Sr 比值发生较明显的波动, 可能说明该时期的降水波动较大。总之, 在 2300 ~ 1670 cal. a B.P. 期间降水量总体呈现下降趋势, 气候偏干。

4.3 区域对比

兴义泥炭第一主成分 F1 与 Al、Si、Mg 元素具有强正相关性, 解释变量高于其他成分(表 2), 因而该成分对兴义泥炭沉积物化学组成起主控作用。4.2 节反映了这 3 种元素在沉积过程中均受降水变化的影响, 说明该主成分可作为反映流域内降水量变化的因子。第二主成分 F2 中 Sr、Ca 元素载荷值分别为 0.83、0.79(表 2), 该类元素与周边基岩十分相关(兴义地区的基岩以白云岩、灰岩为主(图 1c)^[28-29])。因此, 第二主成分可作为碳酸盐外来输入的替代性指标, 但其贡献度不如第一主成分高, 对降水的响应不如第一主成分明显。以第一主成分 F1、第二主成分 F2 和 Si/Al 比值(图 6a ~ 6c), 作为取样点及其临近区域降水量和风化程度的代用指标, 并与西南季风区的阿拉伯海有孔虫丰度^[67](图 6d)、贵州七星洞石笋^[68](图 6e)和董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ ^[22](图 6f)、四川越西泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ ^[69](图 6g)、贵州白鹇湖湿生草本含量^[70]

(图 6h)、云南泸沽湖 TOC^[71](图 6i)等古环境记录进行对比, 探讨晚全新世以来兴义地区环境变化过程及其区域响应。

兴义泥炭 F1、Si/Al 比值在 3270 ~ 2700 cal. a B.P. 期间处于稳定低值且略有下降, 而 F2 在该时期值较高且波动明显。此时阿拉伯海 723A 孔沉积物浮游有孔虫丰度呈减少的趋势(图 6d)^[67]、七星洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 总体为高值略偏负(图 6e)^[68]、董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 呈偏正趋势(图 6f)^[22]、越西泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 呈稳定高值(图 6g)^[69]; 白鹇湖喜湿或湿生草本含量减少(图 6h), 木本植物也稍有减少, 旱生草本增加^[70], 泸沽湖 TOC 先增加后减小(图 6i)^[71]。以上记录均反映了西南季风减弱, 西南地区降水量减少, 气候偏干。2700 ~ 2300 cal. a B.P. 期间, 兴义泥炭 F1、F2 和 Si/Al 比值均升高, 表明该时段降水增加。阿拉伯海深海沉积物^[67]、七星洞^[68]和董哥洞^[22]石笋、越西泥炭^[69]、泸沽湖沉积物^[71]也均记录了该时段内西南季风总体略有增强的趋势(图 6)。白鹇湖沉积物孢粉中喜湿或湿生草本微弱增加(图 6h), 未明显表现出该湿润期, 但其喜湿喜热成分增加, 热带亚热带木本植物的花粉含量上升^[70], 能反映该暖湿阶段。2300 ~ 1670 cal. a B.P. 期间, 兴义泥炭 F1、F2 和 Si/Al 比值均下降, 显示兴义地区降水量持续减少, 与阿拉伯海有孔虫丰度^[67]、七星洞^[68]和董哥洞^[22]石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、越西泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ ^[69]、白鹇湖沉积物孢粉分析^[70]的研究结果相一致(图 6)。泸沽湖沉积物 TOC 含量仍呈增加趋势, 未能很好的反映出降水减少趋势(图 6i), 但其沉积物中常绿栎类孢粉含量处于较低值, 亦能表明气候总体偏干^[71]。除以上记录外, 贵州梵净山九龙池和云南天才湖沉积物孢粉分析显示该时期木本植物减少, 而草本植物增加^[72-73]; 此外, 贵州南屯泥炭烧失量也下降^[74]。以上记录均表明该阶段降水减少。

上述记录反映了兴义泥炭地及其邻近地区在研究时段内气候环境总体偏干, 在 3270 ~ 2700 cal. a B.P.、2300 ~ 1670 cal. a B.P. 期间降水持续缓慢减少, 2700 ~ 2300 cal. a B.P. 存在持续近 400 a 的湿润期。这与西南季风主控区众多古环境重建结果均一致(如图 6d ~ 6g)。然而梵净山在 4600 ~ 2600 cal. a B.P. 期间属于相对温暖湿润期, 2600 cal. a B.P. 后相对寒冷干燥^[72]; 天才湖沉积物孢粉记录显示 6170 ~ 2930 cal. a B.P. 是云南西北部全新世气候最适宜期, 此后气候逐渐干燥^[73]。以上两个记录与兴义泥炭古气候重建结果存在此许差

异,可能是由各记录的分辨率、年代框架等造成的。事实上,梵净山区域 3270~2600 cal. a B.P. 虽处于相对温暖湿润期内,但其温带木本植物增加,亚热带木本植物减少的孢粉特征能反映出此时气候开始转干^[72];天才湖区域虽在 3270~2930 cal. a B.P. 处于全新世气候最适宜期,但该时段内亚热带木本植物呈减少趋势,此时气候已经开始偏干^[73]。此外,天才湖、梵净山沉积物孢粉分析均涵盖整个全新世的气候变化,而本文仅研究晚全新世的气候变化且分辨率较高,因此气候演化阶段划分存在差异。2700~2300 cal. a B.P. 的湿润期在孢粉重建的结果中不甚明显^[71-73],可能由于其属于晚全新世气候快速波动内的一部分,其增温增湿的程度不如全新世大暖期明显,孢粉重建中并未对其详细分析,或是由于植被变化对其响应不够明显。除显示在图 6 的记录外,该湿润期在青藏高原色林错沉积物^[75]和红原泥炭^[76]中也有明显的表现。综上所述,兴义地区与西南季风主控区古气候重建结果整体上较为一致,均能证明晚全新世气候快速波动且偏干。但由于研究载体和分辨率差异等原因,使对晚全新世气候波动过程的反映存有差异。

5 结论

XRF 岩芯扫描分析方法在兴义泥炭中能取得较好的效果,其结果能与常规方法获得的色度、碳酸盐含量进行对比。其中,XRF 岩芯扫描的 Ca 元素含量与气量法测定的碳酸盐含量具有较好一致性。XRF 岩芯扫描和分光测色计获得的 L^* 、 b^* 变化趋势一致, L^* 的相关系数 $R^2 = 0.99 (P < 0.01)$, b^* 的相关系数 $R^2 = 0.91 (P < 0.01)$, 均呈显著相关;两种方法测得的 a^* 数值大小存在差异,但其数值表现上相似性仍较高, $R^2 = 0.92 (P < 0.01)$ 。基于对兴义泥炭元素含量及比值与喀斯特地区碳酸盐岩风化剖面等的分析,发现兴义泥炭的地球化学元素是由周边碳酸盐风化、淋溶后,随水沉积于泥炭地中。兴义泥炭 Sr/Ca 比值与 Ca 元素的相关系数 $R^2 = -0.38 (P < 0.01)$, Sr/Ca 比值与 Sr 元素的相关系数 $R^2 = -0.03 (P < 0.01)$, 表明 Ca 元素对 Sr/Ca 比值的影响更为明显; Si/Al 比值与 Si 元素的相关性 ($R^2 = 0.33, P < 0.01$) 比 Al 元素 ($R^2 = -0.02, P < 0.01$) 高, Si/Al 比值受 Si 元素的影响更显著; Rb/Sr 比值也与 Rb 元素更相关。Sr/Ca 比值处于高值, Si/Al、Rb/Sr 比值处于低值时,气候偏干;反之,则指示气候偏湿润。兴义泥炭 Al、Si、Ca、

Sr、Mg、Rb/Sr、Si/Al、Sr/Ca 的变化趋势与烧失量、腐殖化度等具有较好的一致性,反映晚全新世以来兴义地区总体上呈现出由湿润向干燥转变的趋势。在 3270~2700 cal. a B.P. 期间,兴义地区降水减少; 2700~2300 cal. a B.P. 期间,降水稳步增加; 2300~1670 cal. a B.P. 降水持续减少。

将兴义泥炭的气候重建结果与阿拉伯海有孔虫丰度及西南季风区多个古环境记录进行对比,发现区域气候变化具有一致性,均反映了研究时段内气候环境总体偏干。兴义泥炭能较明显地反映 2700~2300 cal. a B.P. 存在持续近 400 a 的湿润期,孢粉记录对该湿润期的反映不够明显。在后续研究中,应该进一步判别孢粉等环境代用指标蕴含的局地、区域或全球的植物、水位变化等环境信息。本项研究探讨了 XRF 岩芯扫描分析方法在喀斯特地区兴义泥炭沉积中的应用,有助于加深对西南地区古气候演化历史的认识并能丰富我国的泥炭研究档案。

致谢:衷心感谢审稿专家和编辑部杨美芳老师对本文的指导,所提的宝贵意见建议使本文得以进一步完善!衷心感谢遵义师范学院盛恩国副教授及两位志愿者、中国科学院地球化学研究所丁维寒博士、贵州师范大学高洋副教授、贵州民族大学罗达灿副教授及取样点村委会在野外工作中的支持和帮助!

参考文献 (References):

- [1] 陈宇亮,郑洪波. XRF 岩芯扫描在第四纪沉积物研究中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(4):51-59.
Chen Yuliang, Zheng Hongbo. The application of XRF core scanning to Quaternary sediments[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(4):51-59.
- [2] Liang L, Sun Y, Yao Z, et al. Evaluation of high-resolution elemental analyses of Chinese loess deposits measured by X-ray fluorescence core scanner[J]. Catena, 2012, 92:75-82. doi:10.1016/j.catena.2011.11.010.
- [3] Tian J, Xin X, Ma W, et al. X-ray fluorescence core scanning records of chemical weathering and monsoon evolution over the past 5 Myr in the southern South China Sea[J]. Paleoceanography, 2011, 26(4):PA4202. doi:10.1029/2010PA002045.
- [4] 吴东,刘焱光, Eiríksson Jón, 等. 3 万年以来挪威海南部冰岛-苏格兰溢流变化及其对海冰活动的响应[J]. 第四纪研究, 2019, 39(4):845-862.
Wu Dong, Liu Yanguang, Eiríksson Jón, et al. Changes of Iceland-Scotland overflow water in Southern Norwegian Sea and the responses to sea ice activities since 30 ka B.P. [J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(4):845-862.
- [5] 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.

- [6] 雷国良, 张虎才, 常凤琴, 等. 湖泊沉积物 XRF 元素连续扫描与常规 ICP-OES 分析结果的对比及校正——以兹格塘错为例[J]. 湖泊科学, 2011, 23(2):287-294.
Lei Guoliang, Zhang Hucai, Chang Fengqin, et al. Comparison and correction of element measurements in lacustrine sediments using X-ray fluorescence core-scanning with ICP-OES Method: A case study of Zigetang Co[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(2):287-294.
- [7] 崔巧玉, 赵艳. 大兴安岭阿尔山天池湖泊沉积物记录的全新世气候突变[J]. 第四纪研究, 2019, 39(6):1346-1356.
Cui Qiaoyu, Zhao Yan. Climatic abrupt events implied by lacustrine sediments of Arxan Crater Lake, in the central Great Khingan Mountains, NE China during Holocene[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(6):1346-1356.
- [8] 赵永涛, 安成邦, 赵家驹, 等. 亚洲内陆干旱区巴里坤湖记录的 H1 突变事件[J]. 第四纪研究, 2019, 39(4):916-926.
Zhao Yongtao, An Chengbang, Zhao Jiaju, et al. Vegetation and climate history in the arid inland area during the H1: Multi-proxy data of the Balikun Lake[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(4):916-926.
- [9] 马巧红, 钟巍, 薛积彬, 等. 晚更新世晚期以来雷州半岛北部泥炭腐殖化度的古气候意义[J]. 热带地理, 2008, 28(6):498-503.
Ma Qiaohong, Zhong Wei, Xue Jibin, et al. Palaeoclimatic significance of the peat humification degree in northern Leizhou Peninsula since Late-Pleistocene[J]. Tropical Geography, 2008, 28(6):498-503.
- [10] 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):1323-1332.
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.
- [11] 李凯, 金伊丽, 谭斌, 等. 浙江景宁县大仰湖沼泽泥炭地形成过程及气候背景[J]. 第四纪研究, 2019, 39(6):1384-1392.
Li Kai, Jin Yili, Tan Bin, et al. Development and climatic background of Dayanghu marsh peat from Jingning County, Zhejiang Province[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(6):1384-1392.
- [12] Longman J, Veres D, Wennrich V. Utilisation of XRF core scanning on peat and other highly organic sediments[J]. Quaternary International, 2019, 514:85-96. doi:10.1016/j.quaint.2018.10.015.
- [13] Kern O A, Koutsodendris A, Mächtle B, et al. XRF core scanning yields reliable semiquantitative data on the elemental composition of highly organic-rich sediments: Evidence from the Fűrmoos peat bog (Southern Germany) [J]. Science of the Total Environment, 2019, 697:110-134. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134110.
- [14] Chagué-Goff C, Chan J C H, Goff J, et al. Late Holocene record of environmental changes, cyclones and tsunamis in a coastal lake, Mangaia, Cook Islands[J]. Island Arc, 2016, 25(5):333-349.
- [15] Chawchai S, Chabangborn A, Kylander M, et al. Lake Kumhawapi—An archive of Holocene palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes in northeast Thailand[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 68:59-75. doi:10.1016/j.quascirev.2013.01.030.
- [16] Chawchai S, Kylander M E, Chabangborn A, et al. Testing commonly used X-ray fluorescence core scanning-based proxies for organic-rich lake sediments and peat[J]. Boreas, 2016, 45(1):180-189.
- [17] Sharifi A, Pourmand A, Canuel E A, et al. Abrupt climate variability since the last deglaciation based on a high-resolution, multi-proxy peat record from NW Iran: The hand that rocked the cradle of civilization[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 123:215-230. doi:10.1016/j.quascirev.2015.07.006.
- [18] Turner J N, Holmes N, Davis S R, et al. A multiproxy (micro-XRF, pollen, chironomid and stable isotope) lake sediment record for the Lateglacial to Holocene transition from Thomastown Bog, Ireland[J]. Journal of Quaternary Science, 2015, 30(6):514-528.
- [19] Camuera J, Jiménez-Moreno G, Ramos-Román M J, et al. Orbital-scale environmental and climatic changes recorded in a new ~200,000-year-long multiproxy sedimentary record from Padul, southern Iberian Peninsula[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 198:91-114. doi:10.1016/j.quascirev.2018.08.014.
- [20] Ramos-Román M J, Jiménez-Moreno G, Camuera J, et al. Millennial-scale cyclical environment and climate variability during the Holocene in the western Mediterranean region deduced from a new multi-proxy analysis from the Padul record (Sierra Nevada, Spain) [J]. Global and Planetary Change, 2018, 168:35-53. doi:10.1016/j.gloplacha.2018.06.003.
- [21] 赵恕. 季风与贵州的雨季[J]. 气象学报, 1965, 35(1):96-106.
Zhao Shu. Monsoons and rainy season in Kweichow[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1965, 35(1):96-106.
- [22] Dykoski C A, Edwards R L, Hai C, 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.
- [23] 王健, 程海, 赵景耀, 等. 小冰期多尺度气候波动: 贵州董哥洞高分辨率石笋记录[J]. 第四纪研究, 2019, 39(3):775-785.
Wang Jian, Cheng Hai, Zhao Jingyao, et al. Climate variability during the Little Ice Age characterized by a high resolution stalagmite record from Dongge Cave, Guizhou[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(3):775-785.
- [24] 覃嘉铭, 袁道先, 程海, 等. 贵州都匀七星洞石笋剖面晚更新世高分辨率的气候地层学[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3):318-324.
Qin Jiaming, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. A high resolution Late Pleistocene climato-stratigraphy of 4 stalagmites from Qixing Cave, Duyun, Guizhou[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(3):318-324.
- [25] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981-2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 2013, 58(30):3088-3099.
Zheng Jingyun, Bian Juanjuan, Ge Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1981-2010 [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30):3088-3099.
- [26] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. 地理研究, 2003, 22(6):733-741.
Lan Anjun, Zhang Baiping, Xiong Kangning, et al. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou Province[J]. Geographical Research, 2003, 22(6):733-741.

- [27] 黄威廉, 屠玉麟. 贵州植被区划[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1983, (1): 26-47.
Huang Weilian, Tu Yulin. Vegetation regionalization in Guizhou[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 1983, (1): 26-47.
- [28] 戴传固, 陈建书, 王雪华. 贵州省地质系列图及综合研究——新一代《贵州省区域地质志》[J]. 科技成果管理与研究, 2014, (5): 50-55. doi:10.3772/j.issn.1673-6516.2014.05.017.
Dai Chuangu, Chen Jianshu, Wang Xuehua. The Guizhou geological map series and integrative study on geology in Guizhou Province—A new vision of “Guizhou Regional Geology”[J]. Management and Research on Scientific & Technological Achievements, 2014, (5): 50-55. doi: 10.3772/j.issn.1673-6516.2014.05.017.
- [29] 李兴中. 晚新生代贵州高原喀斯特地貌演进及其影响因素[J]. 贵州地质, 2001, 18(1): 29-36.
Li Xingzhong. Evolution of karst geomorphology of upper-Cenozoic and its influential factors in Guizhou Plateau[J]. Guizhou Geology, 2001, 18(1): 29-36.
- [30] 杨欢, 曾蒙秀, 彭海军, 等. 晚全新世黔西南喀斯特地区兴义泥炭高分辨率腐殖化度记录研究[J]. 沉积学报, 2019: 1-14. doi:10.14027/j.issn.1000-0550.2019.107.
Yang Huan, Zeng Mengxiu, Peng Haijun, et al. High-resolution humification record of Xingyi peat since the Late Holocene in karst region, southwestern Guizhou[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019: 1-14. doi:10.14027/j.issn.1000-0550.2019.107.
- [31] Blaauw M, Christen J. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process[J]. Bayesian Analysis, 2011, 6(3): 457-474.
- [32] Löwemark L, Chen H F, Yang T N, et al. Normalizing XRF-scanner data: A cautionary note on the interpretation of high-resolution records from organic-rich lakes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(6): 1250-1256.
- [33] Loring D H, Asmund G. Geochemical factors controlling accumulation of major and trace elements in Greenland coastal and fjord sediments[J]. Environmental Geology, 1996, 28(1): 2-11.
- [34] 何报寅, 张穗, 蔡述明. 近 2600 年神农架大九湖泥炭的气候变化记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 109-115.
He Baoyin, Zhang Sui, Cai Shuming. Climatic changes recorded in peat from the Dajiu Lake basin in Shennongjia since the last 2600 years[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(2): 109-115.
- [35] Longman J, Veres D, Ersek V, et al. Periodic input of dust over the Eastern Carpathians during the Holocene linked with Saharan desertification and human impact[J]. Climate of the Past, 2017, 13(7): 897-917.
- [36] Schitteck K, Mächtle B, Schäbitz F, et al. Holocene environmental changes in the highlands of the southern Peruvian Andes (14°S) and their impact on pre-Columbian cultures[J]. Climate of the Past, 2015, 11(1): 27-44.
- [37] 吴艳宏, 李世杰. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 789-792.
Wu Yanhong, Li Shijie. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(5): 789-792.
- [38] 马学慧, 蔡省垣, 王荣芬. 我国泥炭基本性质的区域分异[J]. 地理科学, 1991, 11(1): 30-41.
Ma Xuehui, Cai Xingyuan, Wang Rongfen. Regional differentiation of basic properties of peat in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1991, 11(1): 30-41.
- [39] 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 prospective of Rb/Sr ratios in lake sediments as an index of paleoclimate/paleoenvironment[J]. Advances in Earth Sciences, 2011, 26(8): 805-810.
- [40] 王云飞, 胡文英, 张秀珠. 云南湖泊的碳酸盐沉积[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(2): 122-130.
Wang Yunfei, Hu Wenying, Zhang Xiuzhu. Carbonate sediments in lakes of Yunnan, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1989, 20(2): 122-130.
- [41] 张坤, 季宏兵, 褚华硕, 等. 黔西南喀斯特地区红色风化壳的物源及元素迁移特征[J]. 地球与环境, 2018, 46(3): 257-266.
Zhang Kun, Ji Hongbing, Chu Huashuo, et al. Material sources and element migration characteristics of red weathering crusts in southwestern Guizhou[J]. Earth and Environment, 2018, 46(3): 257-266.
- [42] 张莉, 季宏兵, 高杰, 等. 贵州碳酸盐岩风化壳主元素、微量元素及稀土元素的地球化学特征[J]. 地球化学, 2015, 44(4): 323-336.
Zhang Li, Ji Hongbing, Gao Jie, et al. Geochemical characteristics of major, trace and rare earth elements in typical carbonate weathered profiles of Guizhou Plateau[J]. Geochimica, 2015, 44(4): 323-336.
- [43] 李锐, 高杰, 张莉, 等. 黔北白云岩红色风化壳元素地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 396-404.
Li Rui, Gao Jie, Zhang Li, et al. Element geochemical characteristics of red weathering crust from dolomite, north Guizhou, China[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(4): 396-404.
- [44] 陈武, 任明强, 芦正艳, 等. 贵州典型喀斯特区土壤地球化学特征研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 246-252.
Chen Wu, Ren Mingqiang, Lu Zhengyan, et al. Research on the property of soil geochemistry in typical karst area in Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(3): 246-252.
- [45] 林进也, 朱立军. 贵州岩溶地区红土的地球化学特征及其意义[J]. 贵州工业大学学报, 1997, 26(2): 31-36.
Lin Jinye, Zhu Lijun. Geochemical characteristics and significance of laterite in karst area of Guizhou[J]. Journal of Guizhou University of Technology, 1997, 26(2): 31-36.
- [46] 李景阳, 朱立军, 王朝富, 等. 碳酸盐岩风化壳及喀斯特成土作用研究[J]. 贵州地质, 1996, 13(2): 139-145.
Li Jingyang, Zhu Lijun, Wang Chaofu, et al. Weathering crust of carbonate rocks and process of karst soil formation[J]. Guizhou Geology, 1996, 13(2): 139-145.
- [47] 李景阳, 王朝富, 樊廷章. 试论碳酸盐岩风化壳与喀斯特成土作用[J]. 中国岩溶, 1991, 10(1): 29-38.
Li Jingyang, Wang Chaofu, Fan Tingzhang. Weathering crust of carbonate rocks and process of karst earth formation[J]. Carsologica Sinica, 1991, 10(1): 29-38.
- [48] 耿安松, 文启忠. 陕西洛川黄土中碳酸盐的某些地球化学特征[J]. 地球化学, 1988, (3): 267-275. doi: 10.19700/j.0379-1726.1988.03.008.

- Geng Ansong, Wen Qizhong. Some geochemical characteristics of carbonates in Luochuan loess, Shaanxi Province[J]. *Geochimica*, 1988, (3):267-275. doi:10.19700/j.0379-1726.1988.03.008.
- [49] 陈骏, 仇纲, 季峻峰, 等. 最近 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据[J]. *科学通报*, 1996, 41(21):1963-1966.
- Chen Jun, Qiu Gang, Lu Huayu, et al. Geohistorical evidences of Rb and Sr element of summer monsoon variation in the Loess Plateau during the last 130000 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(21):1963-1966.
- [50] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 123-150.
- Liu Congqiang. Biogeochemical Processes and Cycling of Nutrients in the Earth's Surface; Cycling of Nutrients in Soil-Plant Systems of Karstic Environment, Southwest China[M]. Beijing: Science Press, 2009:123-150.
- [51] 孔凡翠, 杨瑞东, 沙占江. 贵州草海赵家院子晚更新世泥炭层地球化学特征及其环境意义[J]. *地质论评*, 2013, 59(4):716-730.
- Kong Fancui, Yang Ruidong, Sha Zhanjiang. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Epipleistocene peat on Zhaojiayuanzi sediment column in Caohai Basin, Guizhou Province[J]. *Geological Review*, 2013, 59(4):716-730.
- [52] 孔凡翠, 杨瑞东, 韩晓彤, 等. 贵州威宁窑上组沉积物物源特征及沉积控制因素分析[J]. *现代地质*, 2011, 25(3):464-475.
- Kong Fancui, Yang Ruidong, Han Xiaotong, et al. Analysis of sediment provenance and sedimentary control factors in Yaoshang Formation, Weining County in Guizhou Province[J]. *Geoscience*, 2011, 25(3):464-475.
- [53] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999: 5-171.
- Mou Baolei. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Peking University Press, 1999:5-171.
- [54] 陈诗越, 王苏民, 金章东, 等. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr/Rb 值及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(4):35-38.
- Chen Shiyue, Wang Sumin, Jin Zhangdong, et al. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the central Tibetan Plateau and its environment implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4):35-38.
- [55] 张晓楠, 张灿, 吴锋, 等. 基于 XRF 岩芯扫描的中国西部湖泊沉积物元素地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1):163-174.
- Zhang Xiaonan, Zhang Can, Wu Duo, et al. Element geochemical characteristics of lake sediments measured by X-ray Fluorescence core scanner in Northwest China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(1):163-174.
- [56] 沈德福, 李世杰, 蔡德所, 等. 桂林岩溶湿地沉积物地球化学元素变化的环境影响因子分析[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(4):517-526.
- Shen Defu, Li Shijie, Cai Desuo, et al. Element geochemistry of lake sediments from Sihua Lake in Guilin karst wetland region and its environmental effect[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(4):517-526.
- [57] 陈敬安, 万国江. 云南洱海沉积物粒度组成及其环境意义辨识[J]. *矿物学报*, 1999, 19(2):175-182.
- Chen Jing'an, Wan Guojiang. Sediment particle size distribution and its environmental significance in Lake Erhai, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1999, 19(2):175-182.
- [58] 虎贵朋, 韦刚健, 马金龙, 等. 粤北碳酸盐岩化学风化过程中的元素地球化学行为[J]. *地球化学*, 2017, 46(1):33-45.
- Mao Guipeng, Wei Gangjian, Ma Jinlong, et al. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during the process of moderate weathering of carbonates in northern Guangdong, South China[J]. *Geochimica*, 2017, 46(1):33-45.
- [59] 张风雷, 季宏兵, 魏晓, 等. 黔中白云岩风化剖面微量元素的地球化学特征[J]. *地球与环境*, 2014, 42(5):611-619.
- Zhang Fenglei, Ji Hongbing, Wei Xiao, et al. Geochemical characteristics of trace elements in a dolomite weathering profile in central Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(5):611-619.
- [60] 季宏兵, 欧阳自远, 王世杰, 等. 白云岩风化剖面的元素地球化学特征及其对上陆壳平均化学组成的意义——以黔北新蒲剖面为例[J]. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(6):504-513.
- Ji Hongbing, Ouyang Ziyuan, Wang Shijie, et al. Element geochemistry of weathering profile of dolomite and its implications for the average chemical composition of the upper-continental crust—Case study from the Xinpu profile, northern Guizhou Province, China[J]. *Science in China(Series D)*, 1999, 29(6):504-513.
- [61] 魏志强, 钟巍, 陈永强, 等. 亚热带季风区湖沼流域表生地球化学元素研究——以江西定南大湖为例[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(7):909-917.
- Wei Zhiqiang, Zhong Wei, Chen Yongqiang, et al. Supergene geochemical elements of swampy basin in the subtropical monsoon region: A case study of Dingnan Dahu in Jiangxi Province[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(7):909-917.
- [62] 吴永红, 郑祥民, 周立旻. 太湖 8000 年来沉积物元素变化特征及古环境指示[J]. *盐湖研究*, 2015, 23(1):16-21.
- Wu Yonghong, Zhen Xiangmin, Zhou Limin. Variation of elements in sedimentary and paleoenvironment indicators during the last 8000 years in Taihu Lake[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2015, 23(1):16-21.
- [63] 金章东, 张恩楼. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值的古气候含义[J]. *科学技术与工程*, 2002, 2(3):20-22.
- Jin Zhangdong, Zhang Enlou. Paleoclimate implication of Rb/Sr ratios from lake sediments[J]. *Science Technology and Engineering*, 2002, 2(3):20-22.
- [64] 马春梅, 朱诚, 郑朝贵, 等. 中国东部山地泥炭高分辨率腐殖化度记录的晚冰期以来气候变化[J]. *中国科学(D 辑)*, 2008, 38(9):1078-1091.
- Ma Chunmei, Zhu Chen, Zheng Chaogui, et al. High-resolution humification records of climate changes since late-glacial from the peat in Eastern China[J]. *Science in China(Series D)*, 2008, 38(9):1078-1091.
- [65] 张坤, 季宏兵, 褚华硕, 等. 利用 Rb/Sr 值、有机碳氮同位素及 ^{14}C 重建贵州喀斯特地区古环境变化[J]. *地球与环境*, 2018, 46(2):107-113.
- Zhang Kun, Ji Hongbing, Chu Huashuo, et al. Reconstruct paleoenvironmental changes based on the results of Rb/Sr, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ and ^{14}C in Guizhou karst area[J]. *Earth and*

- Environment, 2018, 46(2):107-113.
- [66] 张愈, 马春梅, 赵宁, 等. 浙江天目山千亩田泥炭晚全新世以来 Rb/Sr 记录的干湿变化[J]. 地层学杂志, 2015, 39(1): 97-107.
Zhang Yu, Ma Chunmei, Zhao Ning, et al. Late Holocene Rb/Sr ratios as a paleoclimate proxy in the Qianmutian peat of Tianmu Mountains, Zhejiang Province[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(1):97-107.
- [67] Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J T. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean[J]. Nature, 2003, 421 (6921): 354-357.
- [68] 蔡演军, 彭子成, 安芷生, 等. 贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化[J]. 科学通报, 2001, 46 (16): 1398-1402.
Cai Yanjun, Peng Zicheng, An Zhisheng, et al. The oxygen isotopic record of the Holocene stalagmite and its indication of monsoon climate variation in Qixingdong of Guizhou[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(16):1398-1402.
- [69] Hong B, Hong Y, Uchida M, et al. Abrupt variations of Indian and East Asian summer monsoons during the last deglacial stadial and interstadial[J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 97: 58-70. doi:10.1016/j.quascirev.2014.05.006.
- [70] 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州白鹳湖沉积物中孢粉记录的 5.5 ka B.P. 以来的气候变化[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3783-3791.
Du Rongrong, Chen Jing'an, Zeng Yan, et al. Climate change recorded mainly by pollen from Baixian Lake during the last 5.5 ka B.P. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (12): 3783-3791.
- [71] 郑茜, 张虎才, 明庆忠, 等. 泸沽湖记录的西南季风区 15000 a B.P. 以来植被与气候变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34 (6): 1314-1326.
Zheng Qian, Zhang Hucai, Ming Qingzhong, et al. Vegetational and environmental changes since 15 ka B.P. recorded by Lake Lugu in the southwest monsoon domain region[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(6):1314-1326.
- [72] 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.
- [73] Xiao X, Haberle S G, Shen J, et al. Latest Pleistocene and Holocene vegetation and climate history inferred from an alpine lacustrine record, northwestern Yunnan Province, Southwestern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 86:35-48. doi: 10.1016/j.quascirev.2013.12.023.
- [74] 牛蕊, 周立旻, 孟庆浩, 等. 贵州草海南屯泥炭记录的中全新世以来的气候变化[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6):1357-1369.
Niu Rui, Zhou Limin, Meng Qinghao, et al. The paleoclimate variations of the Nantun peat in the Caohai area since the middle Holocene[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(6):1357-1369.
- [75] 顾兆炎, 刘嘉麒, 袁宝印, 等. 12000 年来青藏高原季风变化——色林错沉积物地球化学的证据[J]. 科学通报, 1993, 38(1):61-64.
Gu Zhaoayan, Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, et al. The evolution of the Qinghai-Xizang Plateau monsoon: Evidence from the geochemistry of the sediments in Seling Co Lake[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(1):61-64.
- [76] Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211(3): 371-380.

APPLICATION OF XRF CORE SCANNING METHOD IN LATE HOLOCENE ENVIRONMENT CHANGE STUDY DERIVED FROM A PEAT CORE FROM SOUTHWESTERN GUIZHOU, SOUTHWESTERN CHINA

Yang Huan¹, Zeng Mengxiu¹, Peng Haijun², Li Kai³, Li Fengquan¹,
Zhu Lidong¹, Deng Bolong⁴, Liao Mengna³, Ni Jian³

(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. College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang; 4. Wetland Protection Center of Guizhou Province, Guiyang 550001, Guizhou)

Abstract

X-ray fluorescence(XRF) core scanning is a method that has been widely used in loess, marine and lacustrine sediments. The application of this method in peat needs to be further enhanced. In this study, a 300-cm peat drilling core XY1801 (25.28°N, 104.82°E; 1317 m. a.s.l.) from Xingyi peatland in karst region, southwestern Guizhou Province was selected to scan with high resolution XRF. Furthermore, the water content, chromaticity(L^* , a^* , b^*) and carbonate content in Xingyi peat were also measured. Based on the analysis of contents and ratios of Rb, Ti, Zr, Al, Si, Ca, Sr, Mg, chromaticity, humification and other proxies of Xingyi peat, and in combination of the principal component analysis method, this paper discussed the material source of elements, the environmental

significances of element contents/ratios, and the recorded paleoenvironment evolution history in and around Xingyi peatland during Late Holocene. Based on the chronological framework constructed by AMS ^{14}C dating, the results are shown below. (1) XRF core scanning analysis can achieve ideal results in the research of Xingyi peat, and the element records greatly corresponding to the data obtained by traditional methods. The content of Ca from XRF core scanning coincides well with the carbonate content measured by gas volume method. Furthermore, the variation trend of L^* and b^* obtained by XRF core scanning and colorimeter is also coincident. The correlation coefficient of L^* observed from these two methods is 0.99 ($P < 0.01$), and that of b^* is 0.91 ($P < 0.01$). Moreover, the measured results of a^* from these two methods have slightly different due to the influence of sample characteristics and the difference during experimental process. However, the numerical similarity of a^* is still high, the correlation coefficient is 0.92 at the 0.01 significance level. (2) Through the analysis of the contents of geochemical elements in Xingyi peat, carbonate weathering process and weathering profiles in karst region, it can be found that the sources of geochemical elements in Xingyi peat are mainly from proximal material. Geochemical elements separated out from the surrounding carbonate and eventually deposited in the peatland during the processes of weathering, leaching, transporting, depositing and illuviation. (3) The correlation coefficient between Sr/Ca ratio and Ca element content is -0.38 ($P < 0.01$), and the correlation coefficient of Sr/Ca ratio and Sr element content is -0.03 ($P < 0.01$), indicating that Ca element content has more significant influence on Sr/Ca ratio; the correlation between Si/Al ratio and Si element content in Xingyi peat ($R^2 = 0.33$, $P < 0.01$) is higher than that between Si/Al ratio and Al element content ($R^2 = -0.02$, $P < 0.01$), thus the ratio is more obviously affected by Si element; the Rb/Sr ratio is also more related to Rb element. It can be concluded that the climate is dry when Sr/Ca ratio is in high value, and the ratios of Rb/Sr and Si/Al are in low values; and vice versa. (4) Based on the comparative analysis of Ca, Mg, Al, Si, Rb/Sr, Si/Al, Sr/Ca, LOI, humification degree and carbon accumulation rate in Xingyi peat, it is found that the precipitation in Xingyi area decreased during 3270 ~ 2700 cal. a B.P., increased steadily during 2700 ~ 2300 cal. a B.P., and decreased continuously during 2300 ~ 1670 cal. a B.P. (5) Through the principal component analysis of the main elements in Xingyi peat, it can be observed that the first principal component (F1) of Xingyi peat includes Al, Si, Mg, is as ideal index can be considered as a comprehensive factor reflecting precipitation and runoff in the basin; the second principal component (F2) includes Sr, Ca and other elements, is closely related to carbonate input and bedrock in and around of the surrounding karst landform area; the third principal component (F3) includes Rb, Zr and Ti, is related to stable particles. (6) The climate evolution history reconstructed from Xingyi peat is consistent with *G. bulloides* percentage in Hole 723A from the Arabian Sea and several paleoenvironmental records from southwestern monsoon-dominated region, which all reflect that the climate environment is generally dry during the Late Holocene. Interestingly, the records of Xingyi peat reflect that 2700 ~ 2300 cal. a B.P. was a humid period lasting for nearly 400 years, which are also supported by many previous researches, while are not significant in some sporopollen records. XRF core scanning and the research of Xingyi peat in karst area is helpful to deepen the understanding of the paleoclimate in subtropical Southwest China, and extend the utilization of XRF core scanning in peat record.

Key words: Guizhou peat; XRF core scanning; element geochemistry; karst landscape; paleoenvironmental reconstruction