

胡梦珩,庄静,孙文丽,等.青藏高原东北部全新世常量元素地球化学特征及环境演变[J].中国沙漠,2023,43(2):11-20.

青藏高原东北部全新世常量元素 地球化学特征及环境演变

胡梦珩,庄静,孙文丽,郑登友,吉天琪,许澳康

(西北师范大学 地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:对青藏高原东北部风成砂-古土壤序列泽库剖面(ZK剖面)常量元素氧化物含量及其比值进行分析,结合 ^{14}C 测年,揭示其常量元素地球化学特征,探讨了青藏高原东北部全新世环境演变。结果表明:(1)剖面沉积物的化学组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 为主,其中 SiO_2 和 CaO 的标准差较高,对气候变化较为敏感。(2)自剖面底部向上 SiO_2 含量和残积系数呈现先减少后增加的趋势,高值指示冷干的气候意义, CaO 含量和退碱系数则相反,高值指示温湿的气候意义。(3)9.4 ka BP以来青藏高原东北部的气候经历了由温湿向冷干的转变过程,可划分为9.4~4.2 ka BP气候温湿期和4.2 ka BP至今气候冷干期;其中在6.6~6.2 ka BP、2.4~2.0 ka BP和1.7~1.5 ka BP存在次一级的气候波动。

关键词:常量元素;全新世;环境演变;青藏高原东北部

文章编号:1000-694X(2023)02-011-10

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00103

中图分类号:P596

文献标志码:A

0 引言

青藏高原东北部位于亚洲季风区西北缘,受季风环流和西风环流的共同影响^[1-2],对气候变化极其敏感,特殊的地理背景使其成为研究气候变化的理想场所。全新世是人类文明发展的重要地质历史时期,与现代人类关系密切,对该时期气候环境演变的研究已经成为古气候研究的热点。研究表明,全新世的气候变化不稳定且存在周期性的气候波动^[3-4]。因此,研究全新世的气候环境演变,对于认识当前的气候变化和预测未来的气候变化具有重要意义。近几十年来,众多学者利用粒度、磁化率、元素和孢粉等多项气候代用指标分别对共和盆地^[5-7]、青海湖盆地^[8-11]和柴达木盆地^[12-14]不同类型沉积物进行了研究,重建了青藏高原东北部全新世千年尺度的气候变化过程。然而,由于气候代用指标和测年结果的差异性,青藏高原东北部全新世以来的气候变化仍然存在一定的争议性,如共和盆地风成沉积微量元素记录的青藏高原东北部9.2~4.6 ka BP气候相对冷干,4.6~0.7 ka BP气候相对暖

湿^[15];而青海湖湖东沙地风成沉积粒度和磁化率记录的青藏高原东北部9.0~4.2 ka BP水热组合条件较好,成壤作用较强,4.2 ka BP之后风沙活动增强,气候向干冷发展^[16]。可见,利用不同的气候代用指标研究青藏高原东北部全新世的气候环境演变在千年尺度上仍存在较大的差异。因此,仍需对青藏高原东北部全新世的气候变化开展研究,为其提供补充资料。本文选取青藏高原东北部风成砂-古土壤序列泽库剖面(ZK剖面)为研究对象,通过对剖面沉积物常量元素的地球化学特征进行分析,结合 ^{14}C 测年,对区域全新世千年尺度的气候环境演变进行进一步研究。

1 研究区概况

泽库县(34°45'—35°32'N,100°34'—102°08'E)位于青藏高原东北部,隶属于青海省黄南藏族自治州(图1)。地处昆仑山系西倾山北麓,全境东西较狭长,地势由东向西倾斜,境内大部分地区在海拔大于3 500 m。泽库县属高原大陆性季风气候,夏季短促凉爽,冬季漫长干冷、多大风。年均气温-2.4~

收稿日期:2022-04-20;改回日期:2022-07-07

资助项目:国家自然科学基金项目(41171018,41161036)

作者简介:胡梦珩(1974—),女,甘肃庆阳人,博士,副教授,主要研究方向为寒旱区环境演变与元素地球化学。

E-mail: lele200466@163.com

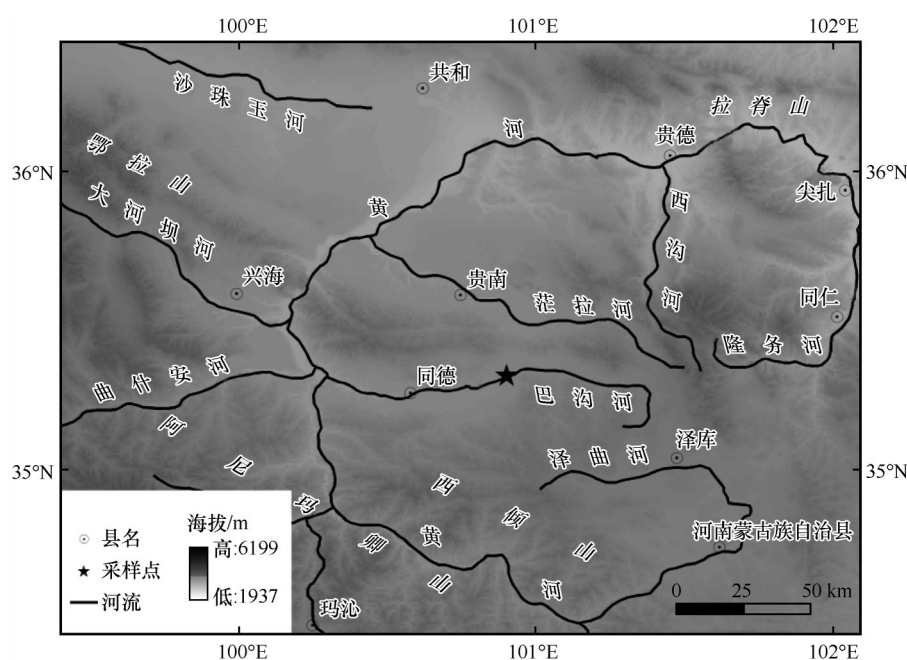


图1 研究区

Fig.1 Location of the studied area

2.8℃,年均降水量460 mm,年均蒸发量1 325.8 mm,年均日照时数2 566~2 675 h。水资源较为丰富,境内有主要河流13条,其中泽曲河属县内最大河流,最后汇入黄河。植被以高寒草甸为主,土壤类型多样,以高山草甸土、高山灌丛草甸土、山地草甸土和沼泽土为主。

2 数据来源与研究方法

2.1 剖面概况与采样方法

ZK剖面(35°19'N,100°54'E)为青藏高原东北部一山间盆地新月形沙丘,海拔3 312.74 m,厚度

338 cm。对ZK剖面进行高密度连续采样,按2 cm间隔共采集土壤样品169个,同时在剖面沉积质地明显差异处采集¹⁴C测年样品8个。根据野外观察剖面岩性特征及室内粒度分析,将ZK剖面划分为9层,具体形态特征描述如表1。

2.2 测定方法

样品在室内自然风干、去除植物根系和杂质,称取风干样品5 g,用振动磨研磨至粒径200目以下。取研磨后样品,用半自动压样机压制成药片,采用荷兰帕纳科公司生产的X-Ray荧光光谱仪进行常量

表1 ZK剖面地层特征

Table 1 Stratigraphic characteristic of ZK profile

| 深度/cm | 地层 | 特征描述 |
|---------|--------------|----------------------------|
| 0~34 | 表土层(ZK1) | 灰褐色粉砂-细砂,块状结构,稍紧实,多现代植物根系 |
| 34~73 | 风成砂层(ZK2) | 暗灰色,稍紧实,可见植物根系 |
| 73~99 | 弱砂质古土壤层(ZK3) | 暗褐色粉砂-细砂,块状结构,较紧实,可见少量植物根系 |
| 99~129 | 风成砂层(ZK4) | 浅灰色,稍紧实 |
| 129~176 | 弱砂质古土壤层(ZK5) | 暗褐色粉砂-细砂,块状结构,稍紧实,可见少量植物根系 |
| 176~213 | 风成砂层(ZK6) | 灰黄色,稍紧实 |
| 213~267 | 弱砂质古土壤层(ZK7) | 暗褐色粉砂-细砂,块状结构,稍紧实,可见少量菌丝体 |
| 267~282 | 风成砂层(ZK8) | 暗灰色,稍紧实 |
| 282~338 | 弱砂质古土壤层(ZK9) | 暗褐色粉砂-细砂,块状结构,稍紧实,可见少量菌丝体 |

元素含量测定(测定误差小于 5%)。常量元素分析结果以氧化物形式给出,单位为%。常量元素测定在中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室完成。

年代测定在中国科学院地球环境研究所加速器质谱中心完成,测年结果如表 2 所列。依据上述测年结果,计算出 ZK 剖面的沉积速率,进而推算出 129 cm 处的年代约为 2 002 a BP。

表 2 ZK 剖面 ¹⁴C 测年数据

Table 2 The data of ¹⁴C ages of the ZK profile

| 深度/cm | 样品编号 | $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ | | pMC/% | | ¹⁴ C 年龄/a BP | | 校正年代/a BP |
|---------|---------|--------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------|
| | | $\delta^{13}\text{C}$ | 误差(1 σ) | pMC | 误差(1 σ) | ¹⁴ C 年龄 | 误差(1 σ) | |
| 30~34 | XA12698 | -25.58 | 0.14 | 92.09 | 0.36 | 662 | 31 | 664 |
| 73~75 | XA12699 | -24.68 | 0.09 | 82.45 | 0.31 | 1 550 | 30 | 1 513 |
| 99~103 | XA12700 | -24.64 | 0.08 | 80.16 | 0.27 | 1 777 | 27 | 1 709 |
| 171~176 | XA12701 | -24.52 | 0.09 | 74.22 | 0.24 | 2 395 | 26 | 2 461 |
| 213~218 | XA12702 | -24.79 | 0.09 | 62.11 | 0.30 | 3 826 | 39 | 4 290 |
| 262~267 | XA12703 | -25.88 | 0.10 | 51.07 | 0.20 | 5 399 | 31 | 6 277 |
| 282~286 | XA12704 | -24.94 | 0.08 | 48.51 | 0.22 | 5 811 | 36 | 6 665 |
| 332~337 | XA12705 | -26.16 | 0.09 | 35.18 | 0.19 | 8 393 | 43 | 9 480 |

3 ZK 剖面常量元素地球化学特征及古气候意义

3.1 常量元素氧化物含量特征

常量元素的含量可以用来判定沉积物的物源及沉积环境等特征,对古气候环境具有指示意义^[17]。ZK 剖面常量元素氧化物含量的总体特征为(表 3): SiO₂、Al₂O₃、CaO 含量较高,范围分别为

63.73%~71.62%、9.44%~10.58%、3.49%~6.28%,平均值分别为 67.85%、9.91%、4.59%; Fe₂O₃、Na₂O、K₂O、MgO 次之,范围分别为 2.92%~3.42%、2.27%~2.55%、1.77%~2.00%、1.00%~1.47%,平均值分别为 3.13%、2.39%、1.90%、1.18%。全剖面中常量元素氧化物的平均含量呈现出 SiO₂>Al₂O₃>CaO>Fe₂O₃>Na₂O>K₂O>MgO 的规律。ZK 剖面中, SiO₂(1.85%)和 CaO(0.65%)的标准差较高,表明 SiO₂和 CaO 含量随气候波动变化明显,对气候变化敏感。

表 3 ZK 剖面常量元素氧化物含量(%)

Table 3 Content of major element oxides of the ZK profile

| 氧化物 | 地 层 | | | | | | | | | 全剖面 | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
| | ZK1 | ZK2 | ZK3 | ZK4 | ZK5 | ZK6 | ZK7 | ZK8 | ZK9 | 平均值 | 标准差 | 变化范围 |
| SiO ₂ | 68.92 | 69.83 | 69.31 | 69.42 | 68.65 | 67.76 | 65.72 | 65.71 | 66.23 | 67.85 | 1.85 | 63.73~71.62 |
| Al ₂ O ₃ | 9.72 | 9.92 | 9.90 | 9.70 | 10.03 | 9.94 | 10.06 | 9.89 | 9.90 | 9.91 | 0.27 | 9.44~10.58 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.02 | 3.07 | 3.09 | 3.09 | 3.21 | 3.12 | 3.14 | 3.17 | 3.21 | 3.13 | 0.10 | 2.92~3.42 |
| MgO | 1.08 | 1.09 | 1.10 | 1.07 | 1.17 | 1.19 | 1.30 | 1.26 | 1.24 | 1.18 | 0.11 | 1.00~1.47 |
| CaO | 4.22 | 3.92 | 3.97 | 3.84 | 4.31 | 5.10 | 5.44 | 5.09 | 4.90 | 4.59 | 0.65 | 3.49~6.28 |
| Na ₂ O | 2.39 | 2.37 | 2.41 | 2.40 | 2.38 | 2.37 | 2.40 | 2.40 | 2.40 | 2.39 | 0.03 | 2.27~2.55 |
| K ₂ O | 1.87 | 1.92 | 1.90 | 1.86 | 1.92 | 1.91 | 1.91 | 1.89 | 1.90 | 1.90 | 0.05 | 1.77~2.00 |

从垂直方向上看(图 2、表 3),ZK 剖面常量元素氧化物含量随深度的变化特征为: SiO₂ 含量自剖面底部向上呈现出波动性地先减少后增加的趋势; Na₂O 含量的波动变化相对较小; CaO 含量自剖面底部向上呈现出波动性地先增加后减少的趋势; MgO、K₂O、Al₂O₃、Fe₂O₃ 含量自剖面底部向上呈现出

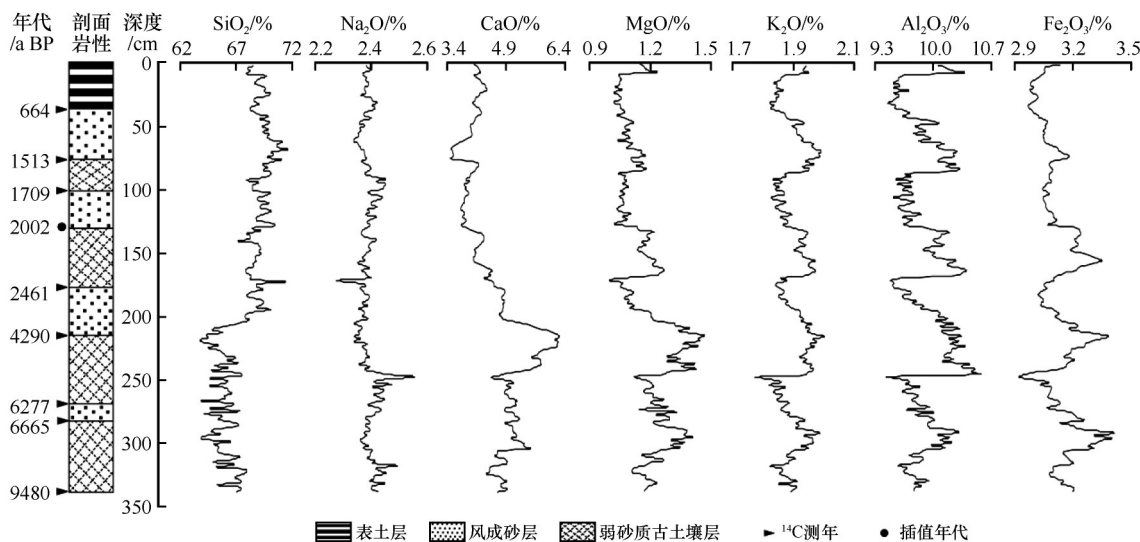


图2 ZK剖面常量元素氧化物含量变化曲线

Fig.2 Variation of major element oxides content of the ZK profile

峰谷交替的变化趋势,峰值多出现在弱砂质古土壤层,谷值多出现在风成砂层。以深度213 cm为界,在深度213 cm以下SiO₂含量的平均值(65.89%)低于深度213 cm以上SiO₂含量的平均值(68.98%);Na₂O(2.40%)、CaO(5.14%)、MgO(1.27%)、K₂O(1.90%)、Al₂O₃(9.95%)、Fe₂O₃(3.17%)含量的平均值均高于深度213 cm以上Na₂O(2.38%)、CaO(4.23%)、MgO(1.12%)、K₂O(1.89%)、Al₂O₃(9.87%)、Fe₂O₃(3.10%)含量的平均值。

SiO₂在风成砂层中含量(68.18%)较高,表现为相对富集,在弱砂质古土壤层中含量(67.48%)较低(表3);Na₂O(2.40%)、CaO(4.66%)、MgO(1.20%)、K₂O(1.91%)、Al₂O₃(9.97%)、Fe₂O₃(3.16%)则相反,在弱砂质古土壤层中含量较高,表现为相对富集,

在风成砂层中Na₂O(2.39%)、CaO(4.49%)、MgO(1.15%)、K₂O(1.89%)、Al₂O₃(9.86%)、Fe₂O₃(3.11%)含量较低。

3.2 常量元素氧化物比值特征

由于化学风化过程中活动性元素的迁移淋失会造成稳定性元素浓度的相对增加,使得单个元素的绝对含量不能真实地反映风化成壤过程中元素的地球化学行为^[18]。而地球化学元素综合参数可以克服单一元素对环境响应的不确定性^[19],能够更好地反映沉积物的化学风化程度和气候演变规律。本文选取了化学蚀变指数、钠钾比、硅铝比、残积系数和退碱系数对ZK剖面各地层沉积环境进一步深入分析(表4,图3)。

表4 ZK剖面常量元素氧化物比值
Table 4 Ratio of major element oxides of the ZK profile

| 元素比值 | ZK1 | ZK2 | ZK3 | ZK4 | ZK5 | ZK6 | ZK7 | ZK8 | ZK9 | 全剖面 | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| | | | | | | | | | | 范围 | 均值 |
| 化学蚀变指数CIA | 49.59 | 50.12 | 49.83 | 49.44 | 50.32 | 50.20 | 50.20 | 49.84 | 49.85 | 47.77~51.39 | 49.98 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 1.94 | 1.88 | 1.93 | 1.96 | 1.88 | 1.89 | 1.92 | 1.94 | 1.92 | 1.77~2.19 | 1.91 |
| Sa | 12.05 | 11.95 | 11.88 | 12.15 | 11.63 | 11.58 | 11.10 | 11.28 | 11.35 | 10.46~12.78 | 11.62 |
| Ki | 0.81 | 0.86 | 0.85 | 0.86 | 0.82 | 0.74 | 0.71 | 0.73 | 0.75 | 0.65~0.93 | 0.79 |
| W | 1.19 | 1.11 | 1.13 | 1.13 | 1.17 | 1.32 | 1.38 | 1.34 | 1.30 | 1.00~1.49 | 1.24 |

化学蚀变指数($CIA=Al_2O_3/(Al_2O_3+Na_2O+CaO^*+K_2O)\times 100$,CaO*为硅酸盐矿物中的CaO含量),反映沉积物的化学风化程度^[20],间接指示夏季风的强弱

程度^[21]。CIA值越大,说明化学风化越强,指示夏季风增强的暖湿气候,反之,则指示冬季风增强的冷干气候。ZK剖面CIA值47.77~51.39,平均49.98,仅

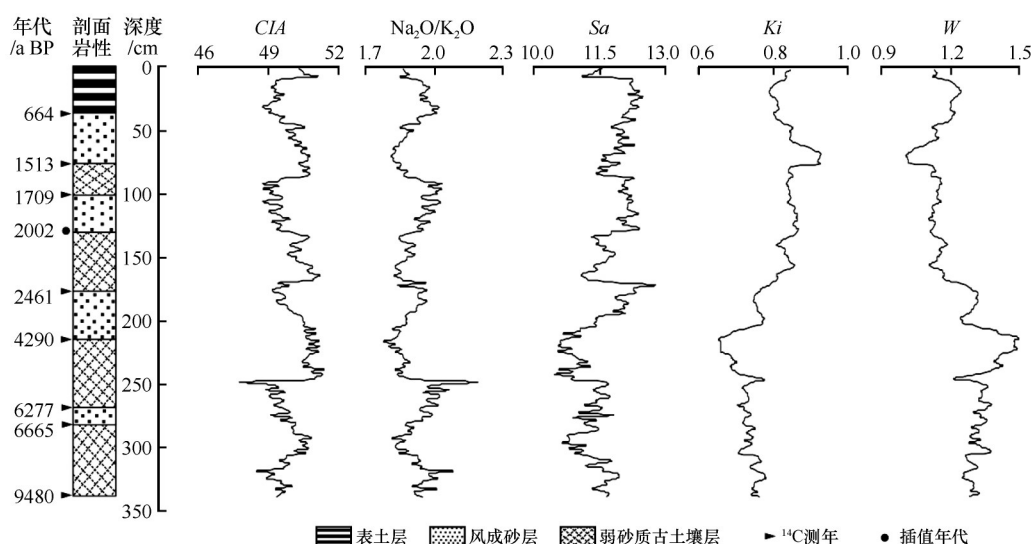


图3 ZK剖面常量元素氧化物比值变化曲线

Fig.3 Variation of major element oxides ratio of the ZK profile

有个别地层的均值在50之上,说明ZK剖面整体化学风化速率较慢,风化程度较弱,气候总体冷干。剖面各层CIA平均值ZK5>ZK6=ZK7>ZK2>ZK9>ZK8>ZK3>ZK1>ZK4,呈现出相邻的上层古土壤高于下层古风成砂的特征(ZK3>ZK4、ZK5>ZK6、ZK7>ZK8),各层CIA值的差异表明在整体冷干的环境下,气候出现了多次冷暖干湿波动。

钠钾比($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$)是衡量样品中斜长石风化程度的指标,与沉积物的化学风化程度呈反比^[22],随化学风化程度的加深而减小。ZK剖面 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为1.77~2.19,平均1.91,自剖面底部向上的变化趋势与CIA值相反,表明 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 和CIA值指示相反的气候信息。剖面中 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 在各层的平均值ZK4>ZK1=ZK8>ZK3>ZK7=ZK9>ZK6>ZK2=ZK5,呈现出相邻的上层古土壤低于下层古风成砂的特征(ZK4>ZK3、ZK6>ZK5、ZK8>ZK7),最高值出现在风成砂层(ZK4),说明ZK4形成时期的气候为全剖面最冷干时期。

硅铝比($\text{Sa}=\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)反映沉积物的淋溶状况,可以作为亚洲冬季风强度的替代性指标^[23]。随气温的升高和风化作用的加强而减小,比值减小,气候暖湿,反之,气候冷干。ZK剖面Sa值为10.46~12.78,平均11.62,自剖面底部向上呈现波动性的先减少后增加的趋势。剖面各层Sa平均值ZK4>ZK1>ZK2>ZK3>ZK5>ZK6>ZK9>ZK8>ZK7,总体风成砂层(11.74)高于古土壤层(11.49),说明风成砂形成时期水热组合状况不利于化学风化进行,风化程度较弱,气候冷干;剖面上部(11.87)高于剖面下部

(11.24),反映剖面沉积时期冬季风逐渐增强。

残积系数($Ki=(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O})$)反映沉积物成壤强度^[24]。Ki值越高,说明稳定性元素Fe、Al相对富集,易溶性元素Ca、Mg、Na淋溶作用较强,反映风化作用程度越高,成壤作用越强。ZK剖面Ki值为0.65~0.93,平均0.79,自剖面底部向上呈现波动性的先减少后增加的趋势。剖面中Ki在各层的平均值变化为ZK2=ZK4>ZK3>ZK5>ZK1>ZK9>ZK6>ZK8>ZK7,总体风成砂层(0.80)高于古土壤层(0.78),剖面上部(0.82)高于剖面下部(0.73)。

退碱系数($W=(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})/\text{Al}_2\text{O}_3$)反映黄土风化成壤过程中Ca、Na等易溶性元素的淋溶迁移程度^[25],与风化成壤强度呈反比。高值指示冷干的沉积环境,低值指示暖湿的沉积环境^[26]。ZK剖面W值为1.00~1.49,平均1.24,自剖面底部向上呈现波动性地先增加后减少的趋势,与Ki的变化趋势正好相反,表明其指示相反的气候信息。剖面中W在各层的平均值ZK7>ZK8>ZK6>ZK9>ZK1>ZK5>ZK3=ZK4>ZK2,总体风成砂层(1.23)低于古土壤层(1.24),剖面下部(1.34)高于剖面上部(1.18)。

3.3 常量元素氧化物及其比值古气候意义

在表生环境中,地化学元素的迁移淋失和富集,受气候、地形、风和元素自身理化性质等因素的影响^[27],元素的化学活动性 $\text{K}_2\text{O}>\text{Na}_2\text{O}>\text{CaO}>\text{MgO}>\text{SiO}_2>\text{Fe}_2\text{O}_3>\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[28]。一般地,Si的化学性质相对稳定,在冷干的气候环境下,表现为相对富集, SiO_2 含

量的增减可视为气候干冷、暖湿的波动指标^[29]。Al、Fe化学性质相似且比较稳定,不易迁移,在暖湿的气候条件下,Fe₂O₃、Al₂O₃富集,指示的气候意义与SiO₂相反^[30]。Ca、Mg属于碱土金属,活动性中等或较强,半湿润半干旱的过渡性气候有利于Ca、Mg的淋溶、迁移和富集^[31]。K、Na是化学性质极为活泼的元素,在干旱的气候条件下容易富集,在暖湿的气候条件下容易淋溶迁移^[32]。

ZK剖面中, SiO₂在风成砂层中含量较高,指示冷干气候; Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O含量变化基本一致,均在弱砂质古土壤层中含量较高,这可能是由剖面所在的特殊地貌位置所致。由于研究区所处的地形为山间盆地,且采样点位于盆地底部,受化学风化影响,盆地周围较高地貌部位的CaO、MgO、K₂O、Na₂O等活性相对较强的元素淋失迁移聚集在盆地中,同时稳定性元素Al₂O₃、Fe₂O₃在暖湿的气候条件下也表现为相对富集,使得CaO、MgO、K₂O、Na₂O、Al₂O₃、Fe₂O₃均在弱砂质古土壤层中含量较高,指示暖湿的气候意义。整体上, ZK剖面中对气候变化敏感的示干型氧化物(SiO₂)含量自剖面底部向上呈波动性地先减少后增加的趋势,示湿型氧化物(CaO)含量自剖面底部向上呈波动性地先增加后减少的趋势,表明ZK剖面的沉积环境总体上由温湿向冷干方向发展。

CIA值自剖面底部向上呈峰谷交替的变化趋势,峰值多出现在古土壤层,谷值多出现在风成砂层,表明其高值指示暖湿的气候意义; Na₂O/K₂O峰值多出现在风成砂层,谷值多出现在古土壤层,表明其高值指示冷干的气候意义。硅铝比(Sa)总体呈风成砂层高于古土壤层的特征,表明其高值指示冷干的气候意义。由于上述CaO、MgO、Na₂O受特殊地貌位置影响,指示湿润的气候意义,即气候暖湿程度越高,其含量越高。因此,在ZK剖面中,残积系数(Ki)增大,说明气候干旱,风化成壤作用较弱,反之,则气候湿润,风化成壤作用较强;退碱系数(W)越大,说明气候越湿润,反之,则气候越干旱。由Ki最大值出现在风成砂层(ZK2、ZK4),最小值出现在弱砂质古土壤层(ZK7),总体呈风成砂层高于古土壤层的特征; W最大值出现在弱砂质古土壤层(ZK7),最小值出现在风成砂层(ZK2),总体呈风成砂层低于古土壤层的特征,也可证明Ki高值指示冷干气候, W高值指示暖湿气候。自剖面底部向上,

高值示干的Sa、Ki呈现波动性地先减少后增加的趋势,高值示湿的W呈现波动性地先增加后减少的趋势,说明ZK剖面的沉积环境总体上由温湿向冷干方向发展。

4 全新世以来青藏高原东北部的环境演变

根据ZK剖面常量元素氧化物含量及其比值变化特征所记录的环境信息,结合¹⁴C测年,将青藏高原东北部全新世以来的环境演变划分为以下两个阶段,期间存在次一级的气候波动:

阶段I: 9.4~4.2 ka BP (337~213 cm), 气候温湿的固结成壤期。此阶段ZK剖面中高值示湿的CaO含量和退碱系数处在相对高值期,高值示干的SiO₂含量和残积系数处在相对低值期,表明该时期气候整体温湿,夏季风较强,水热组合状况有利于化学风化进行,成壤作用较强。该时期温湿的气候特征与9.4~3.9 ka BP共和盆地温度和湿度增加,森林发育^[5]; 8.3~3.6 ka BP柴达木盆地东部气候湿润稳定^[14]; 9.0~4.2 ka BP青海湖盆地水热条件较好,发育古土壤,为全新世气候适宜期^[16]; 8.4~4.1 ka BP是贵德盆地全新世土壤形成时期,气候暖湿^[33]; 4 ka BP前甘青地区气候温暖湿润,发育森林草原,盛行以种植业为主的马家窑文化^[34]; 8.8~3.3 ka BP新疆阿尔泰山双湖水生植被发育,气候湿润^[35]; 8.4~4.0 ka BP萨拉乌苏河流域进入全新世大暖期^[36]; 9.1~4.4 ka BP铜川地区气候温暖湿润^[37]相一致,说明该时期泽库剖面记录的青藏高原东北部的气候变化与其他区域记录的气候变化具有同步性。

但该阶段在整体温湿的背景下存在次一级的气候波动,体现在6.6~6.2 ka BP剖面发育风成砂,这与若尔盖高原泥炭沉积记录的6.4 ka BP青藏高原东部发生了一次干冷事件^[38]; 6.8~5.6 ka BP青藏高原中部气候极不稳定,寒冷且波动剧烈^[39]; 7.0~6.1 ka BP青藏高原东北缘冬给错纳湖气候相对冷干^[40]; 7~6 ka BP天水地区在总体暖湿的气候背景下出现气候波动^[41]; 7.4~6.0 ka BP毛乌素沙漠孢粉记录全新世大暖期内存在干冷波动^[42]; 7~6 ka BP淮河流域半湿润区出现气候波动,处于干冷期^[43]对应较好,说明此次气候波动存在一定的普遍性。

阶段II: 4.2 ka BP至今 (213~0 cm), 气候冷干的成壤作用较弱期。此阶段ZK剖面中高值示干的SiO₂含量和残积系数处在相对高值期,高值示湿的

CaO 含量和退碱系数处在相对低值期,表明该时期气候整体偏冷干,冬季风较强,水热组合状况不利于化学风化进行,成壤作用较弱。该时期冷干的气候特征与黏土矿物记录的共和盆地 5~0 ka BP 气候干冷^[44];4.2~0 ka BP 青海湖盆地气候较为干冷^[45];3.9~0.3 ka BP 柴达木盆地可鲁克湖西侧湿地荒漠草原扩张,降水量大幅度下降^[46];4.6 ka BP 至今冬给错纳湖气候干冷^[40];乌兰布和沙漠 5.5 ka 至近现代时期沙漠扩展^[47];4.5 ka BP 至今会宁地区进入现代气候时期^[48];4 ka BP 后甘青地区气候明显向干冷化方向发展,发育温带草原,盛行以畜牧业为主的齐家文化^[34];4.2 ka BP 以后中国北方季风边缘区湖泊沉积记录的集成湿度指数下降,并保持较低值,气候干旱化显著相一致^[49],说明该时期泽库剖面记录的青藏高原东北部的气候变化与其他区域具有较好的一致性。

但该阶段在整体冷干的背景下也存在次一级的气候波动,体现在 2.4~2.0 ka BP 和 1.7~1.5 ka BP 剖面发育弱砂质古土壤,这与青藏高原东北部共和盆地泥炭沉积记录的 2.5~1.4 ka BP 气候有所好

转^[6];共和-贵德盆地 2.6~1.2 ka BP 粉尘源区收缩,环境好转,处于夏季风小幅加强时期^[33];2.4~1.3 ka BP 青海湖剖面发育弱砂质古土壤,气候略有好转,但整体仍保持冷干趋势^[50];青藏高原中部色林错湖泊记录的 2.4~2.1 ka BP、1.7~1.5 ka BP 气候有所回暖,干旱趋势有所减弱^[51];新疆伊犁河谷风砂沉积记录的 2.6~1.5 ka BP 气候在总体干旱的背景下处于相对湿润期^[52];台湾头社盆地湖沼沉积孢粉记录的 2.2~1.9 ka BP、1.7~1.3 ka BP 气候温暖湿润^[53]对应较好,说明此次气候波动与其他区域记录的气候变化具有同步性。

将 ZK 剖面地球化学指标揭示的青藏高原东北部全新世以来的气候变化与贵州荔波董哥洞石笋氧同位素^[54]进行对比(图 4),发现两者的气候变化特征吻合度较高,说明地化学元素及其比值对气候变化响应灵敏,是良好的古气候重建指标。同时 ZK 剖面记录的青藏高原东北部全新世以来的气候变化特征与高原周边地区乃至全球的气候变化都具有较好的一致性,说明这一时期青藏高原东北部的气候变化对全球气候变化响应灵敏。

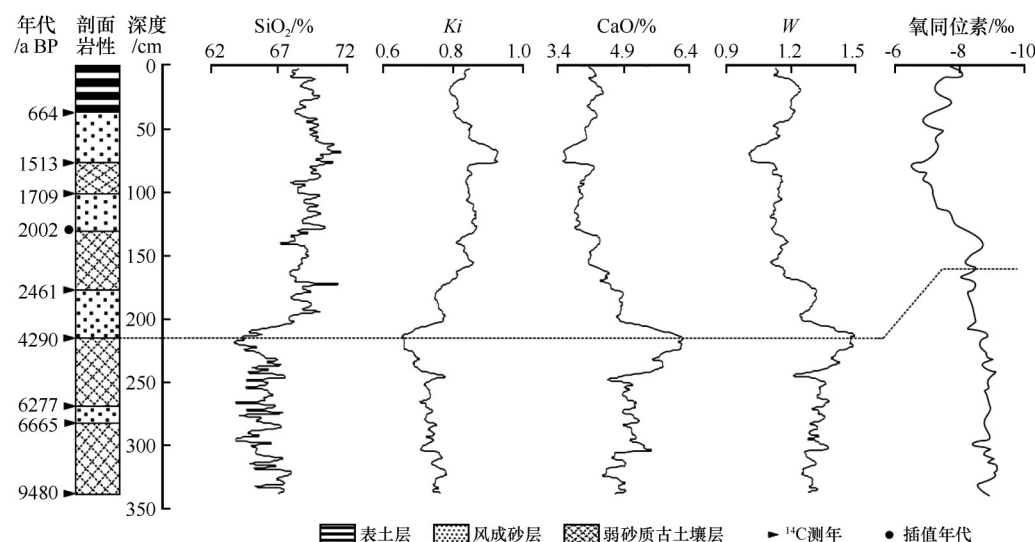


图4 ZK剖面地球化学指标与董哥洞石笋氧同位素^[54]揭示的气候变化

Fig.4 Climate change revealed by geochemical indexes of ZK profile and oxygen isotope from the stalagmite in Dongge Cave^[54]

值得注意的是,ZK剖面常量元素记录的青藏高原东北部9.4~4.2 ka BP夏季风强盛、气候温湿,4.2 ka BP至今冬季风强盛、气候冷干与青海湖湖东沙地风成沉积粒度和磁化率记录的青藏高原东北部9.0~4.2 ka BP水热组合条件较好,成壤作用较强,4.2 ka BP之后风沙活动增强,气候向干冷化方向发展^[16]较为一致;与共和盆地风成沉积微量元素

记录的青藏高原东北部9.2~4.6 ka BP气候相对冷干,4.6~0.7 ka BP气候相对暖湿^[15]存在差异性;但与其他学者利用孢粉^[5]、黏土矿物^[44]、粒度^[55]和常量元素^[56]等气候代用指标对青藏高原东北部共和盆地全新世环境演变的研究结果具有较好的一致性,据此认为不同气候代用指标对气候响应的差异性是导致这一现象的原因。

5 结论

通过对泽库剖面(ZK剖面)常量元素氧化物含量及比值的地球化学特征进行分析,结合 ^{14}C 测年,重建了青藏高原东北部全新世环境演变过程。

ZK剖面沉积物的化学组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 为主,占剖面常量元素氧化物总含量的82.35%,其中 SiO_2 和 CaO 的标准差较高,对气候变化较为敏感。

自剖面底部向上 SiO_2 含量和残积系数呈现先减少后增加的趋势,高值指示冷干的气候意义, CaO 含量和退碱系数呈现先增加后减少的趋势,高值指示温湿的气候意义。

9.4 ka BP以来青藏高原东北部的气候经历了由温湿向冷干的转变过程,可划分为9.4~4.2 ka BP夏季风强盛、气候温湿的固结成壤期和4.2 ka BP至今冬季风强盛、气候冷干的成壤作用较弱期;其中在6.6~6.2 ka BP、2.4~2.0 ka BP和1.7~1.5 ka BP存在次一级的气候波动。

致谢:对中国科学院地球环境研究所加速器质谱中心在 ^{14}C 年代测定、中国科学院西北生态环境资源研究院陈惠中研究员在野外考察及采样中给予的帮助与支持表示最诚挚的谢意!

参考文献:

- [1] Bryson R A. Airstream Climatology of Asia[M]. Boston, USA: American Meteorological Society, 1986.
- [2] Henderson A C, Holmes A, Leng M J. Late Holocene isotope hydrology of lake Qinghai, NE Tibetan Plateau: effective moisture variability and atmospheric circulation changes[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(17): 2215–2223.
- [3] 刘东生, 卢演涛, 郑洪汉, 等. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [4] 王昭武. 全新世气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 43–136.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 胡梦珩, 冯淑琴, 李向锋. 马四剖面揭示的共和盆地12 ka以来的环境演变[J]. 地层学杂志, 2019, 43(1): 101–108.
- [8] 杜乃秋, 孔昭宸, 山发寿. 青海湖QH85-14C钻孔孢粉分析及其古气候古环境的初步探讨[J]. 植物学报, 1989, 31(10): 803–814.
- [9] 陈发虎, 汪世兰, 张维信, 等. 青海湖南岸全新世黄土剖面、气候信息及湖面升降探讨[J]. 地理科学, 1991, 11(1): 76–85.
- [10] Lu R J, Jia F F, Gao S Y, et al. Holocene aeolian activity and climatic change in Qinghai Lake basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 430: 1–10.
- [11] 薛红盼, 曾方明. 青海湖东岸全新世风成沉积地球化学特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1198–1207.
- [12] 曹广超, 马海州, 张璞, 等. 11.5 ka BP以来尕斯库勒湖沉积物氧化物地球化学特征及其环境意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 360–366.
- [13] 王素萍, 贾国东, 赵艳, 等. 柴达木盆地克鲁克湖全新世气候变化的正构烷烃分子记录[J]. 第四纪研究, 2010, 30(6): 1097–1104.
- [14] Yu L P, Lai Z P. Holocene climate change inferred from stratigraphy and OSL chronology of aeolian sediments in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Quaternary Research, 2014, 81(3): 488–499.
- [15] 刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 等. 青藏高原东北部风成沉积微量元素揭示的全新世千年尺度气候变化[J]. 古地理学报, 2013, 15(3): 423–433.
- [16] 吕志强, 鲁瑞洁, 刘小楦, 等. 青海湖湖东沙地沉积记录的全新世以来风沙活动变化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 536–544.
- [17] Gordeev V V, Sidorov I S. Concentrations of major elements and their outflow into the Laptev Sea by the Lena River[J]. Marine Chemistry, 1993, 43(1/4): 33–45.
- [18] 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: 地球科学, 1997, 27(6): 531–536.
- [19] 刁桂仪, 文启忠. 黄土风化成土过程中主要元素迁移序列[J]. 地质地球化学, 1999, 27(1): 21–26.
- [20] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715–717.
- [21] 杨劲松, 王永, 赵红梅. 晚更新世以来萨拉乌苏河流域主元素的地球化学特征及古环境意义[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 148–153.
- [22] 陈旻, 陈骏, 刘连文. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征[J]. 地质力学学报, 2001, 7(2): 167–175.
- [23] 牛东风, 李保生, 王丰年, 等. 微量元素记录的毛乌素沙漠全新世气候波动: 以萨拉乌苏流域DGS1层段为例[J]. 沉积学报, 2015, 33(4): 735–743.
- [24] 杨红瑾, 黄春长, 庞奖励, 等. 宁夏长城源全新世黄土-土壤剖面元素地球化学特征研究[J]. 地理科学, 2010, 30(1): 134–140.
- [25] 陈玉美, 舒强, 张茂恒, 等. 南京下蜀黄土记录的250~100 ka期间的环境演化信息[J]. 地质科学情报, 2014, 33(6): 55–59.
- [26] 胡梦珩, 杨爱丽, 张文丽. 常量元素氧化物含量及其比值揭示的中晚全新世以来玛曲高原的环境演变[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 313–321.
- [27] 文启忠, 耿安松, 刁桂仪, 等. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1–285.
- [28] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 220 ka BP以来萨拉乌苏河流域地

- 质剖面地球化学特征及其对全球气候变化的响应[J].冰川冻土,2005,27(6):861-868.
- [29] Vital H, Stattegger K. Major and trace element of stream sediments from the lowermost Amazon River[J]. Chemical Geology, 2000, 168(1/2): 151-168.
- [30] 黄汝昌. 陆相沉积中古气候演变及元素的迁移、聚集和演化[C]//中国科学院兰州地质研究所所刊. 北京: 科学出版社, 1982: 137-160.
- [31] 高尚玉, 董光荣, 李保生, 等. 萨拉乌苏河第四纪地层中化学元素的迁移和聚集与古气候的关系[J]. 地球化学, 1985(3): 269-275.
- [32] 陈渭南, 高尚玉, 孙忠, 等. 毛乌素沙地全新世地层化学元素特点及其古气候意义[J]. 中国沙漠, 1994, 14(1): 22-30.
- [33] 秦小光, 殷志强, 汪美华, 等. 青藏高原东北缘共和-贵德盆地全新世气候变化[J]. 地质学报, 2017, 91(1): 266-286.
- [34] 侯光良, 刘峰贵, 刘翠华, 等. 中全新世甘青地区古文化变迁的环境驱动[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 53-58.
- [35] 赵佳玉, 王淑贤, Andrey Darin, 等. 新疆阿尔泰全新世双湖沉积物正构烷烃分布及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2021, 41(4): 965-975.
- [36] 陈璐, 鲁瑞洁, 刘小棣, 等. 萨拉乌苏河流域全新世气候变化的元素地球化学记录[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 308-315.
- [37] 周家兴, 吴利杰, 于娟, 等. 铜川地区 11.4 ~ 1.5 ka B.P. 期间黄土地球化学风化特征及其古气候意义[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 64-73.
- [38] Zhou W J, Lu X F, Wu Z C, et al. Climate change of Zoige Plateau since Holocene and AMS radiocarbon[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(12): 1040-1044.
- [39] 段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原中部全新世气候不稳定性的分辨率冰芯记录[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2012, 42(9): 1441-1449.
- [40] 张菡漪, 张静雅, 郑淇, 等. 青藏高原东北缘冬给错纳湖全新世湖面波动[J]. 第四纪研究, 2019, 39(4): 1018-1033.
- [41] 刘俊余, 查小春, 黄春长, 等. 甘肃天水全新世黄土粒度、磁化率特征及其古气候意义[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 180-186.
- [42] Sun A Z, Feng Z D. Holocene climatic reconstructions from the fossil pollen record at Qigai Nuur in the southern Mongolian Plateau[J]. Holocene, 2013, 23(10): 1391-1402.
- [43] 秦小光, 张磊, 穆燕. 中国东部南北方过渡带淮河半湿润区全新世气候变化[J]. 第四纪研究, 2015, 35(6): 1509-1524.
- [44] 赵黎, 孙庆峰. 青藏高原共和盆地 14.5 cal ka BP 以来粘土矿物响应的气候变化模式[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(4): 681-692.
- [45] 陈东雪, 鲁瑞洁, 丁之勇, 等. 青海湖湖东沙地河湖-风成沉积记录的中晚全新世以来环境变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 1-12.
- [46] 余英浩, 金映豫, 徐德克, 等. 青海可鲁克湖孢粉记录的 14 cal ka BP 以来植被和气候演化历史[J]. 第四纪研究, 2021, 41(5): 1229-1243.
- [47] 王娜, 春喜. 乌兰布和沙漠晚第四纪以来环境演化研究进展[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 175-183.
- [48] 王琳栋, 杨太保, 梁烨, 等. 会宁地区全新世黄土沉积粒度特征及其古气候意义[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1150-1156.
- [49] Wang W, Feng Z D. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: a synthesis of climatic records[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 122: 38-57.
- [50] 杜婧, 鲁瑞洁, 刘小棣, 等. 青海湖湖东沙地全新世风成沉积物磁化率特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 175-184.
- [51] 林勇杰, 郑绵平, 王海雷. 青藏高原中部色林错矿物组合特征对晚全新世气候的响应[J]. 科技导报, 2014, 32(35): 35-40.
- [52] 陈秀玲, 李志忠, 凌智永, 等. 新疆伊犁河谷晚全新世以来的风砂沉积与环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(6): 35-42.
- [53] 黄振辉, 马春梅, 齐士峥, 等. 台湾头社盆地湖沼相沉积孢粉记录的 6.2~1.3 cal ka BP 以来气候研究[J]. 高校地质学报, 2020, 26(5): 592-600.
- [54] 张美良, 程海, 林玉石, 等. 贵州荔波 1.5 万年以来石笋高分辨率古气候环境记录[J]. 地球化学, 2004(1): 65-74.
- [55] 刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 等. 共和盆地开额泥炭剖面粒度敏感组分提取与全新世气候环境变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 125-134.
- [56] 张亚云, 胡梦珺, 李娜娜, 等. 共和盆地马四剖面 12 cal ka BP 以来的成壤环境演变[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 66-75.

Geochemical characteristics of major elements and environmental evolution in the Holocene in the northeastern Tibetan Plateau

Hu Mengjun, Zhuang Jing, Sun Wenli, Zheng Dengyou, Ji Tianqi, Xu Aokang

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the analysis of the content and ratio of major element oxides from the aeolian sand-paleosoil sequence of Zeku profile in the northeastern Tibetan Plateau, combined with ^{14}C dating, the geochemical characteristics of major elements of Zeku profile are revealed, and the environmental evolution in the Holocene in the northeastern Tibetan Plateau is discussed. The results show that: (1) The chemical composition of the sediment is mainly SiO_2 , Al_2O_3 and CaO , of which the standard deviation of SiO_2 and CaO is higher and more sensitive to climate change. (2) From the bottom to the top of the profile, the contents of SiO_2 and K_2O decrease first and then increase, and the high values indicate a cold and dry climate, while the contents of CaO and W are opposite, and the high values indicate a warm and wet climate. (3) Since 9.4 ka BP, the climate of the northeastern Tibetan Plateau has undergone a transition from warm and wet to cold and dry, which can be divided into two stages: the warm and wet stage from 9.4 ka BP to 4.2 ka BP, and the cold and dry stage from 4.2 ka BP to now. There are sub-level climatic fluctuations in 6.6–6.2 ka BP, 2.4–2.0 ka BP and 1.7–1.5 ka BP.

Key words: major element; Holocene; environmental evolution; northeastern Tibetan Plateau