

王 攀,董秋瑶,巩雪娇,等.黄土高原—毛乌素沙漠过渡带靖边地区全新世土壤元素地球化学特征及其环境意义[J].地球科学与环境学报,2020,42(5):678-687.
WANG Pan,DONG Qiu-yao,GONG Xue-jiao,et al. Geochemical Characteristics of Soil Elements in Jingbian Area of Loess Plateau-Mu Us Desert Transitional Zone,China During Holocene and Their Environmental Implications[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2020,42(5):678-687.

DOI:10.19814/j.jese.2020.05012

黄土高原—毛乌素沙漠过渡带靖边地区全新世土壤元素地球化学特征及其环境意义

王 攀^{1,2},董秋瑶^{1,2*},巩雪娇^{1,2,3},陈洪云^{1,2},宋 超^{1,2},郭 娇^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北 石家庄 050061; 2. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室,河北 石家庄 050061; 3. 河北地质大学 资源学院,河北 石家庄 050031)

摘 要:靖边地区位于黄土高原—毛乌素沙漠过渡带,对气候变化的响应更加敏感。利用元素地球化学指标综合分析靖边地区三道沟土壤剖面的化学风化程度、全新世环境变化及其驱动机制。结果表明:三道沟土壤剖面的化学蚀变指数和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值反映其处于初等化学风化作用阶段;三道沟土壤剖面形成于全新世 8.4~1.8 ka,平均沉积速率为 $19.9 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$;化学蚀变指数重建的靖边地区全新世平均降水量为 611 mm,平均温度为 11.7°C ;三道沟土壤剖面记录了靖边地区全新世经历了升温期(8.4~6.8 ka)、适宜期(6.8~4.2 ka)和降温期(4.2~1.8 ka)3 个阶段的环境变化,其变化与全球气候变化相一致,主要受控于太阳辐射量变化。

关键词:元素地球化学;全新世;土壤;风化程度;环境变化;驱动机制;黄土高原;毛乌素沙漠

中图分类号:P532;P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2020)05-0678-10

Geochemical Characteristics of Soil Elements in Jingbian Area of Loess Plateau-Mu Us Desert Transitional Zone, China During Holocene and Their Environmental Implications

WANG Pan^{1,2}, DONG Qiu-yao^{1,2*}, GONG Xue-jiao^{1,2,3}, CHEN Hong-yun^{1,2},
SONG Chao^{1,2}, GUO Jiao^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. School of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract: Jingbian area is located in Loess Plateau-Mu Us desert transitional zone, and is more sensitive to climate change. Element geochemical indicators from Sandaogou soil profile in Jingbian area were used to comprehensively analyze the chemical weathering intensity, Holocene

收稿日期:2020-05-12;修回日期:2020-08-14;网络首发日期:2020-09-16 投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费专项资金项目(SK201911,SK201310);

中国地质调查局地质调查项目(12120113005900)

作者简介:王 攀(1987-),男,甘肃庆阳人,中国地质科学院水文地质环境地质研究所助理研究员,E-mail:bjwp@live.com。

* 通讯作者:董秋瑶(1984-),女,蒙古族,内蒙古通辽人,中国地质科学院水文地质环境地质研究所助理研究员,
E-mail:64965341@qq.com。

environmental changes and driving mechanism. The results show that the chemical index of alteration and $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ of Sandaogou soil profile reflect that it is in the primary weak chemical weathering stage; Sandaogou soil profile is formed during the Holocene 8.4-1.8 ka with an average deposition rate of $19.9\text{ cm}\cdot\text{ka}^{-1}$; the Holocene average precipitation and temperature in Jingbian area reconstructed by chemical index of alteration are 611 mm and $11.7\text{ }^{\circ}\text{C}$; Sandaogou soil profile suffers three stages of environmental changes since the Holocene, which are warming (8.4-6.8 ka), suitable (6.8-4.2 ka) and cooling (4.2-1.8 ka); the changes are consistent with global climate, and are mainly controlled by insolation.

Key words: element geochemistry; Holocene; soil; weathering intensity; environmental change; driving mechanism; Loess Plateau; Mu Us desert

0 引言

黄土高原的黄土沉积具有沉积厚度大、沉积层序明显、分布面积广等特点。黄土层和不同发育程度的古土壤层蕴含着丰富的古气候信息,完整地记录了黄土高原第四纪以来的环境变化,黄土磁化率变化曲线可与深海氧同位素曲线良好对应,是陆相沉积物记录大尺度环境变化的理想载体^[1]。

黄土的地球化学研究一直是黄土研究的热点之一,不同学者围绕黄土的物质组成、物源、化学风化程度、气候和环境指标、表生地球化学行为、生物地球化学过程等方面开展研究,促进了黄土地球化学的发展^[2-5]。近年来,黄土的地球化学研究从黄土高原逐渐延伸到新疆^[5-6]、东北^[7-9]、长江中下游^[10-11]、青藏高原东北缘^[12-14]等黄土高原以外具有黄土沉积的区域。黄土沉积的元素分布规律特征与区域环境演化有着密切的关系。化学风化是地表圈层相互作用的主要形式,其产物是记录古气候变化的良好信息载体。因此,黄土的地球化学研究是揭示古气候变化的一种重要手段^[15]。

靖边地区位于黄土高原与毛乌素沙漠的过渡带、东亚季风的尾闾区和农牧交错带,对第四纪气候变化的响应更加敏感。本文基于靖边地区三道沟土壤剖面的年代学和元素地球化学特征,分析三道沟土壤剖面的化学风化程度,定量重建靖边地区的古气候信息,并探讨靖边地区全新世以来的环境变化及其驱动机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

靖边地区三道沟土壤剖面(37.46°N , 108.78°E)地处黄土高原西北缘和毛乌素沙漠东南缘,属于黄土高原和毛乌素沙漠的过渡带,行政上隶属于陕

西省榆林市靖边县镇靖乡三道沟村(图 1)。靖边地区属半干旱大陆性季风气候,年际温差大且冬春季多风沙。靖边县气象站 1981~2010 年记录的年均温为 $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 385 mm。研究区属于东亚季风的尾闾区,气候变化受东亚季风和西风的共同控制。

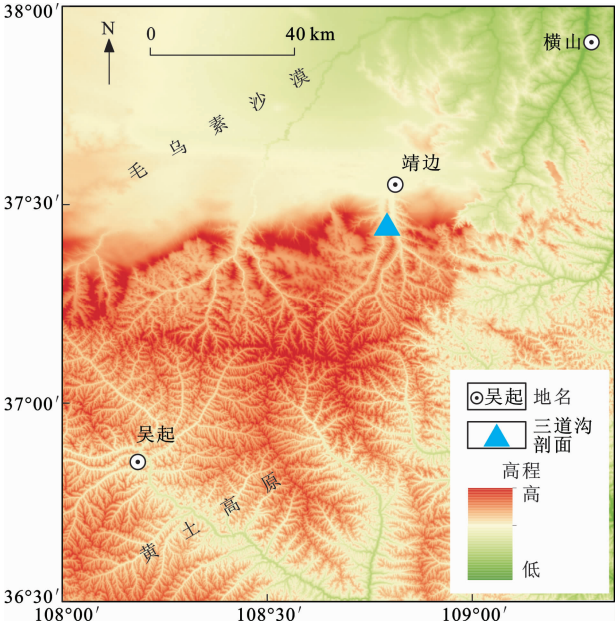


图 1 黄土高原—毛乌素沙漠过渡带靖边地区三道沟土壤剖面位置

Fig. 1 Location of Sandaogou Soil Profile in Jingbian Area of Loess Plateau-Mu Us Desert Transitional Zone

1.2 样品采集与分析方法

2013 年 6 月对三道沟土壤剖面进行野外观察和样品采集,顶部至 1.4 m 为黑垆土层,以下为黄土层。其中,0~50 cm 深度黑垆土层(SDG1 层)颜色发黑,菌丝体发育,根孔和虫孔发育,可见大量植物根系;50~96 cm 深度黑垆土层(SDG2 层)颜色比上层更深,土壤更加致密;96~140 cm 深度黑垆土层(SDG3 层)颜色渐变到比上层浅,空隙较发育。

以 2 cm 等间隔对黑垆土层取样,共采集 70 组样品。基于深度和岩性变化,共采集 4 件¹⁴C 样品。¹⁴C 样品测试在北京大学加速器质谱(AMS)实验室和 BETA 实验室完成,元素地球化学样品测试采用中国地质科学院水文地质环境地质研究所的 X 射线荧光光谱仪(PW4400 型)完成,具体分析方法见文献[16]。

2 结果分析

2.1 年代学特征

黄土高原—毛乌素沙漠过渡带靖边地区三道沟土壤剖面 4 件 AMS ¹⁴C 样品的年龄随深度增加而变大,未出现上下倒转,最老年龄为(8 189±141) cal. a BP,说明三道沟土壤剖面形成于全新世。根据 4 件 AMS ¹⁴C 样品的年龄,利用分段线性内插与外推方法计算出不同深度对应的年龄及沉积速率(图 2)。结果表明:0~60 cm 深度沉积速率为 22.2 cm·ka⁻¹;60~100 cm 深度沉积速率为 16.9 cm·ka⁻¹;100~140 cm 深度沉积速率为 29.4 cm·ka⁻¹。不同深度的沉积速率差别较大,反映出全新世气候的不稳定性。年龄与深度成显著线性相关关系,相关系数大于 0.99,拟合直线的斜率即三道沟土壤剖

面的平均沉积速率(19.9 cm·ka⁻¹)与相邻吴起地区(18.8 cm·ka⁻¹)^[17]和横山地区(21.3 cm·ka⁻¹)^[18]记录的全新世土壤剖面沉积速率一致。根据建立的年龄框架,三道沟土壤剖面记录了靖边地区 8.4~1.8 ka BP 期间的气候变化。

2.2 元素地球化学特征

靖边地区三道沟土壤剖面的常量元素含量(质量分数,下同)以氧化物形式统计,微量元素以单独元素形式统计(表 1)。常量元素在剖面中的平均含量从大到小为 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、K₂O、MgO、Na₂O,其中前 4 种氧化物平均含量之和超过 75%,氧化物含量排序与相邻的吴起地区全新世土壤剖面^[17]完全相同,反映了三道沟土壤剖面同样为风成沉积物。微量元素 Rb、Sr、Zr 在黄土研究中具有明显的古气候指示意义^[19-20],Rb、Sr、Zr 在剖面中的平均含量分别是 81.24×10⁻⁶、169.35×10⁻⁶、197.39×10⁻⁶,变异系数均较低。

元素由于自身性质的差异在化学风化过程中的表现不同。化学性质活泼的元素容易淋溶,稳定元素则会相对富集。为了更清楚地反映元素在化学风化过程中的富集或亏损程度,一般计算样品与地球上部陆壳(Upper Continental Crust,UCC)元素含量

表 1 靖边地区三道沟土壤剖面地球化学元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Geochemical Elements in Sandaogou Soil Profile of Jingbian Area

参数		w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(CaO)	w(Na ₂ O)	w(K ₂ O)	w(Rb)	w(Sr)	w(Zr)	化学蚀变指数
SDG1 层 (n=25)	最小值	57.58%	9.76%	3.36%	1.71%	4.23%	1.33%	2.20%	76.80×10 ⁻⁶	151.50×10 ⁻⁶	175.60×10 ⁻⁶	58.07
	最大值	59.44%	10.66%	3.96%	1.85%	5.20%	1.42%	2.38%	90.20×10 ⁻⁶	179.60×10 ⁻⁶	239.30×10 ⁻⁶	60.39
	平均值	58.41%	10.10%	3.71%	1.77%	4.56%	1.36%	2.29%	85.23×10 ⁻⁶	170.21×10 ⁻⁶	203.58×10 ⁻⁶	59.19
	变异系数	0.00	0.06	0.11	0.03	0.07	0.04	0.05	0.11	0.03	0.14	0.03
SDG2 层 (n=23)	最小值	58.65%	9.86%	3.40%	1.66%	2.57%	1.32%	2.33%	76.50×10 ⁻⁶	150.30×10 ⁻⁶	177.10×10 ⁻⁶	58.66
	最大值	62.15%	10.84%	4.03%	1.85%	4.44%	1.37%	2.46%	91.70×10 ⁻⁶	177.90×10 ⁻⁶	211.30×10 ⁻⁶	60.47
	平均值	60.50%	10.49%	3.79%	1.76%	3.43%	1.35%	2.40%	85.38×10 ⁻⁶	164.70×10 ⁻⁶	198.67×10 ⁻⁶	59.85
	变异系数	0.03	0.04	0.05	0.06	0.30	0.01	0.01	0.05	0.03	0.03	0.02
SDG3 层 (n=22)	最小值	50.97%	7.93%	2.71%	1.55%	3.73%	1.27%	1.93%	61.10×10 ⁻⁶	157.90×10 ⁻⁶	168.30×10 ⁻⁶	55.53
	最大值	59.38%	9.48%	3.57%	1.62%	8.63%	1.33%	2.27%	83.50×10 ⁻⁶	187.40×10 ⁻⁶	216.90×10 ⁻⁶	58.09
	平均值	53.24%	8.50%	3.15%	1.59%	7.33%	1.29%	2.04%	72.15×10 ⁻⁶	173.47×10 ⁻⁶	188.90×10 ⁻⁶	56.72
	变异系数	0.10	0.12	0.09	0.01	0.43	0.02	0.12	0.08	0.12	0.01	0.03
三道沟剖面 (n=70)	最小值	50.97%	7.93%	2.71%	1.55%	2.57%	1.27%	1.93%	61.10×10 ⁻⁶	150.30×10 ⁻⁶	168.30×10 ⁻⁶	55.53
	最大值	62.15%	10.84%	4.03%	1.85%	8.63%	1.42%	2.46%	91.70×10 ⁻⁶	187.40×10 ⁻⁶	224.10×10 ⁻⁶	60.47
	平均值	57.52%	9.74%	3.57%	1.71%	5.04%	1.34%	2.25%	81.24×10 ⁻⁶	169.35×10 ⁻⁶	197.39×10 ⁻⁶	58.65
	变异系数	0.06	0.09	0.09	0.05	0.37	0.02	0.07	0.09	0.05	0.06	0.02
上部陆壳(UCC) ^[21]		66.00%	15.20%	5.00%	2.20%	4.20%	3.90%	3.40%	112.00×10 ⁻⁶	350.00×10 ⁻⁶	190.00×10 ⁻⁶	47.92
澳大利亚后太古代平均 页岩(PAAS) ^[21]		62.80%	18.90%	7.22%	2.20%	1.30%	1.20%	3.70%	160.00×10 ⁻⁶	200.00×10 ⁻⁶	210.00×10 ⁻⁶	70.36

注:w(·)为元素或化合物含量;n为样品组数。

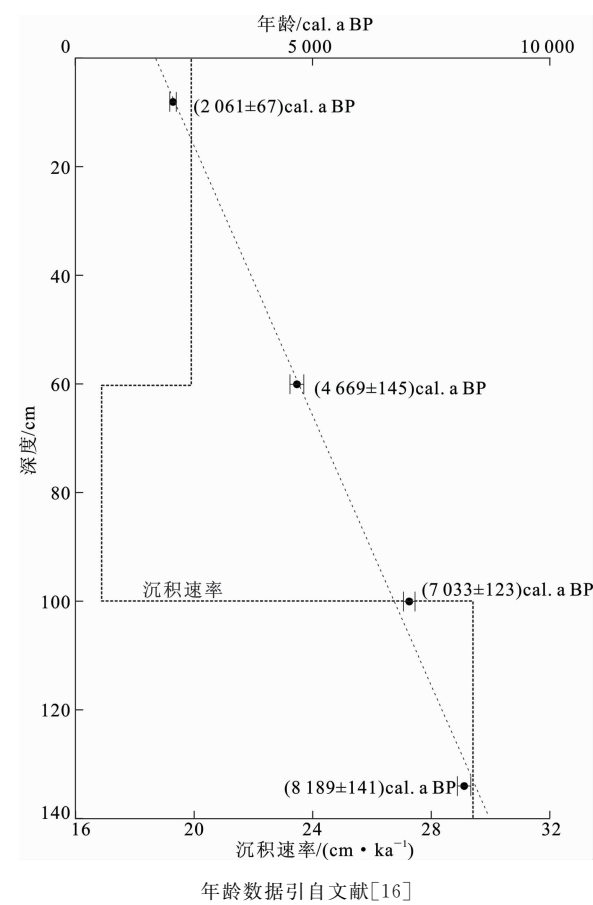


图 2 不同深度对应的年龄及沉积速率
Fig. 2 Diagram of Age and Deposition Rate
Corresponding to Different Depths

之比来评价某种元素相对的亏损与富集。该比值小于 1 为相对亏损,反之则为相对富集。靖边地区三道沟土壤剖面具有富 Ca, 贫 Na、Sr、Al、K 的特征, Fe、Rb、Mg、Si 呈现一定程度的亏损,但与上部陆壳元素含量接近,Zr 化学性质稳定,与上部陆壳元素含量基本相同(图 3)。

3 讨 论

3.1 化学风化程度

化学蚀变指数 (Chemical Index of Alteration, CIA, I_{CIA}) 首次被提出是用来判断物源区的风化程度^[22],之后发展到可作为黄土—古土壤序列化学风化程度的环境代用指标^[23]。化学蚀变指数越高,表明沉积物化学风化越强烈,所代表的气候暖湿程度也越高。化学蚀变指数低于 50 表示无化学风化作用;化学蚀变指数为 50~60 表示初等化学风化作用;化学蚀变指数为 60~80 表示中等化学风化作用;化学蚀变指数高于 80 表示强烈化学风化作用^[24]。靖边地区三道沟土壤剖面化学蚀变指数为 55.53~60.47,平均值为 58.65,处于初等化学风化

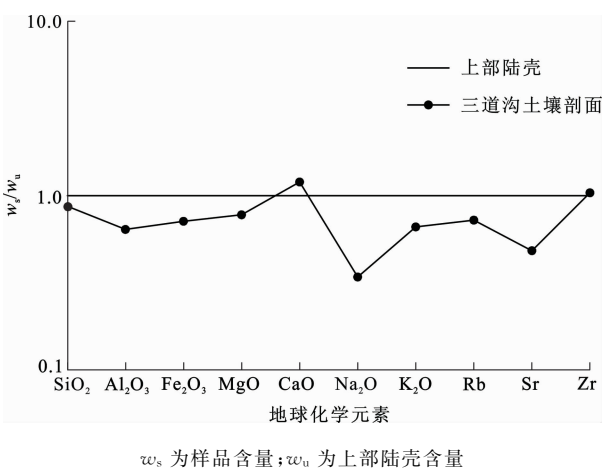


图 3 上部陆壳标准化地球化学元素蛛网图
Fig. 3 UCC-normalized Geochemical Elements
Spider Diagram

作用阶段(图 4),其值小于黄土高原腹地的洛川黄土^[25]和西峰红黏土^[26],与同样位于毛乌素沙漠东南缘的全新世吴起土壤^[17]和位于腾格里沙漠南缘的武威黄土^[27]类似。该结果与其所处的黄土高原—毛乌素沙漠过渡带的地理位置密切相关。

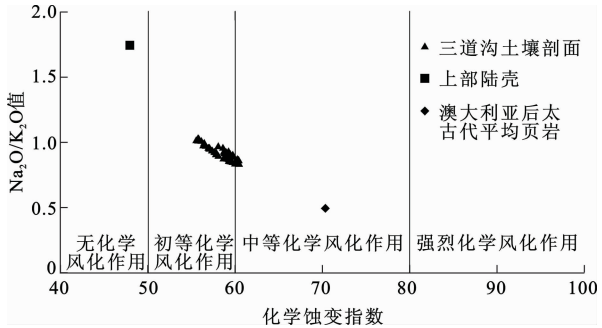


图 4 化学风化程度示意图
Fig. 4 Diagram of Chemical Weathering Intensity

Na_2O/K_2O 值利用 Na 和 K 迁移富集的差异来表示化学风化强度。Na 主要赋存于斜长石(钠长石)中,易受风化;K 主要赋存于正长石(钾长石)中,抗风化能力较强,不易风化迁移。因此, Na_2O/K_2O 值可以指代化学风化强度^[25,28-29]。 Na_2O/K_2O 值越高,风化程度越弱,与化学蚀变指数成反比。靖边地区三道沟土壤剖面 Na_2O/K_2O 值为 0.83~1.02,与化学蚀变指数成负相关关系(图 4)。这与化学蚀变指数表达了相同的环境意义,即三道沟土壤剖面处于初等化学风化作用阶段。

3.2 全新世古气候定量重建

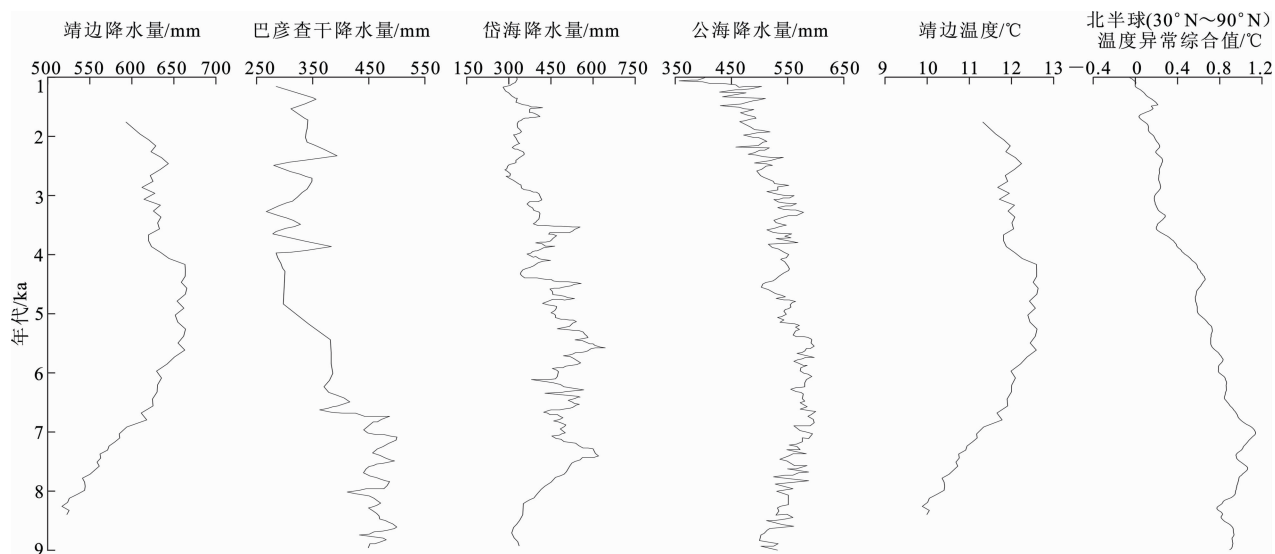
很多代用指标可以用来定量重建古土壤形成时期的古环境和古气候信息^[30]。欧阳椿陶等在研究毛乌素沙漠南缘萨拉乌苏河流域米浪沟剖面末次间冰期古土壤成壤环境时,利用化学蚀变指数与降水

量、温度的线性关系对古土壤层的古气候进行了定量重建,其中降水量 $P = -1\,162.9 + 30.248 I_{CIA}$, 温度 $T = -120.82 + 32.45 \ln I_{CIA}^{[31]}$ 。米浪沟剖面位于三道沟土壤剖面西北方向,与三道沟土壤剖面处于同一个气候带,其古土壤风化程度与三道沟土壤层相当,故本文选择此模型来定量重建靖边地区全新世的古温度和古降水量。靖边地区全新世的降水量为 516~666 mm,平均值为 611 mm,温度为 9.9 °C~12.7 °C,年均温度为 11.7 °C,高于靖边地区现今的降水量和温度。选择同样位于东亚夏季风边缘区的巴彦查干^[32]、岱海^[33]和公海^[34]3个湖泊重建的降水量进行比较(图 5),靖边地区的降水量大于巴彦查干、岱海和公海,但全新世的变化趋势大体一致,降水量的差异可能是不同重建指标本身的性质差异造成的,也可能与其所处的位置有关。靖边地区全新世温度与北半球(30°N~90°N)温度异常综合值^[35]相比,变化趋势总体一致。降水量和温度变

化趋势的一致性反映出总体都受到东亚夏季风的驱动控制。

3.3 全新世气候变化及其驱动机制

化学蚀变指数指示沉积物化学风化强度,是良好的夏季风代用指标^[36]。 SiO_2/Al_2O_3 值同小于 50 μm 颗粒粒级存在显著正相关关系,可基本反映原始风尘颗粒的大小,是良好的冬季风代用指标^[37]。Rb/Sr 值是利用 Rb 不易迁移和 Sr 易受淋溶迁移来指代环境变化,是常见的夏季风代用指标,在黄土高原地区广泛应用^[19,38-44]。Zr 常赋存在耐风化的锆石或钾长石中,而 Rb 赋存在钾长石中,且最外层电子数为 1,很容易被黏土吸附,Zr/Rb 值被认为是一种可靠的冬季风代用指标^[20,45-46]。本文利用化学蚀变指数、 SiO_2/Al_2O_3 、Rb/Sr、Zr/Rb、古温度、古降水量等指标综合研究靖边地区全新世的古气候演化过程。根据各指标随年龄的垂向变化,靖边地区全新世的气候变化可分为 3 个阶段(图 6)。



靖边降水量和温度是根据化学蚀变指数定量重建的;巴彦查干^[32]、岱海^[33]、公海^[34]降水量是根据孢粉定量重建的

图 5 不同区域全新世降水量、温度对比

Fig. 5 Comparison of Holocene Precipitation and Temperature in Different Areas

阶段 I (8.4~6.8 ka) 为全新世升温期。此阶段化学蚀变指数和 Rb/Sr 值处于波动上升状态,而 SiO_2/Al_2O_3 值和 Zr/Rb 值变化正好相反。这表明此阶段夏季风占主导地位,沉积物化学风化程度提升,气候转为暖湿。古温度和古降水量的变化可以直观反映该阶段的暖湿程度,年均温度为 9.9 °C~11.4 °C,年均降水量为 517~594 mm,处于早全新世的转暖期。

阶段 II (6.8~4.2 ka) 为全新世适宜期,又称全新世大暖期。此阶段化学蚀变指数和 Rb/Sr 值达到整个全新世的峰值, SiO_2/Al_2O_3 值和 Zr/Rb 值为

最小值,表明该阶段的气候较上一阶段更暖湿,沉积物化学风化程度进一步加强。年均温度为 11.7 °C~12.7 °C,较阶段 I 大幅提升,升温幅度约 1.7 °C,达到整个全新世的最大值,年均降水量为 612~666 mm,较阶段 I 增加了约 94 mm,已达到暖温带湿润一半湿润气候的温湿水平。

阶段 III (4.2~1.8 ka) 为全新世降温期。此阶段化学蚀变指数和 Rb/Sr 值开始波动下降, SiO_2/Al_2O_3 值和 Zr/Rb 值较阶段 II 有所上升。温度和降水量曲线清晰地记录了此次降温,降温对应了全新世 4.2 ka 冷事件。在整个全新世降温期,年均温

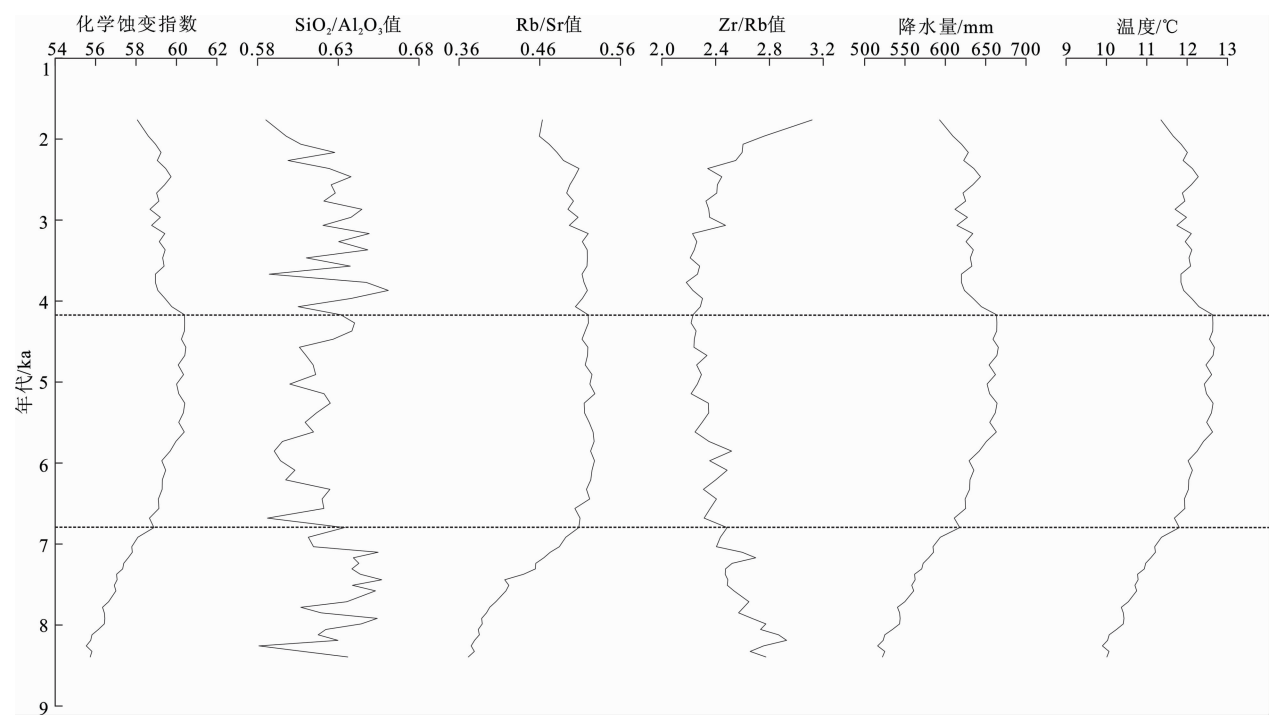


图 6 化学蚀变指数、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Rb/Sr 、 Zr/Pb 、降水量和温度随年代变化

Fig. 6 Changes of Chemical Index of Alteration, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Rb/Sr , Zr/Pb , Precipitation and Temperature with Age

度为 11.3℃~12.6℃,较阶段Ⅱ下降约 0.3℃,年均降水量为 593~664 mm,较阶段Ⅱ减少约 19 mm。

三道沟土壤剖面在全新世经历的气候变化,与毛乌素沙漠东南缘(锦界剖面^[47]、滴哨沟湾剖面^[48]、大保当剖面^[49]、大柳塔和牛滩剖面^[50])和萨拉乌苏河流域^[51-52]记录的全新世以来的气候波动相类似,表明地球化学特征良好地记录了靖边地区全新世以来的气候变化。

根据贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[53]、格陵兰 GISP2 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[54]、30°N 夏季太阳辐射量^[55]以及靖边地区三道沟土壤剖面古温度和古降水量曲线对比(图 7)发现,三道沟土壤剖面古温度、古降水量曲线变化与董哥洞石笋、格陵兰 GISP2 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 值曲线变化存在一致性,特别是在早中全新世,随着 $\delta^{18}\text{O}$ 值增加,温度和降水量同步增加,其变化的一致性表明三道沟土壤剖面记录的全新世气候变化主要受东亚夏季风的影响。早全新世太阳辐射量减少,三道沟剖面的温度和降水量相应增加;到中全新世,太阳辐射量减少到最小值,温度和降水量增加到最大值,对应全新世大暖期;到晚全新世,太阳辐射量增加到最大值,温度和降水量相应减少。30°N 夏季太阳辐射量与三道沟土壤剖面温度、降水量同步变化,表明靖边地区记录的全新世气候变化主要受太阳辐射量变化的控制。

4 结 语

(1)黄土高原—毛乌素沙漠过渡带靖边地区三道沟土壤剖面形成于 8.4 ka BP 左右,其平均沉积速率为 19.9 cm·ka⁻¹,与相邻吴起地区和横山地区记录的全新世土壤剖面沉积速率一致。

(2)三道沟土壤剖面化学蚀变指数为 55.53~60.47,Na₂O/K₂O 值为 0.83~1.02,处于初等化学风化作用阶段,与其所处的黄土高原—毛乌素沙漠过渡带有关。

(3)用化学蚀变指数重建得到靖边地区全新世的平均降水量和平均温度为 611 mm 和 11.7℃,比靖边地区现今的降水量和温度高。

(4)靖边地区三道沟土壤剖面全新世以来的气候变化可分为 3 个阶段:8.4~6.8 ka 的全新世升温期、6.8~4.2 ka 的全新世适宜期和 4.2~1.8 ka 的全新世降温期。全新世气候波动具有全球性,且主要受控于太阳辐射量变化。

自然资源部国土卫星遥感应用中心石迎春副研究员参与了野外样品的采集工作,在此表示感谢!

参考文献:

References :
[1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985.
LIU Dong-sheng. Loess and Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985.

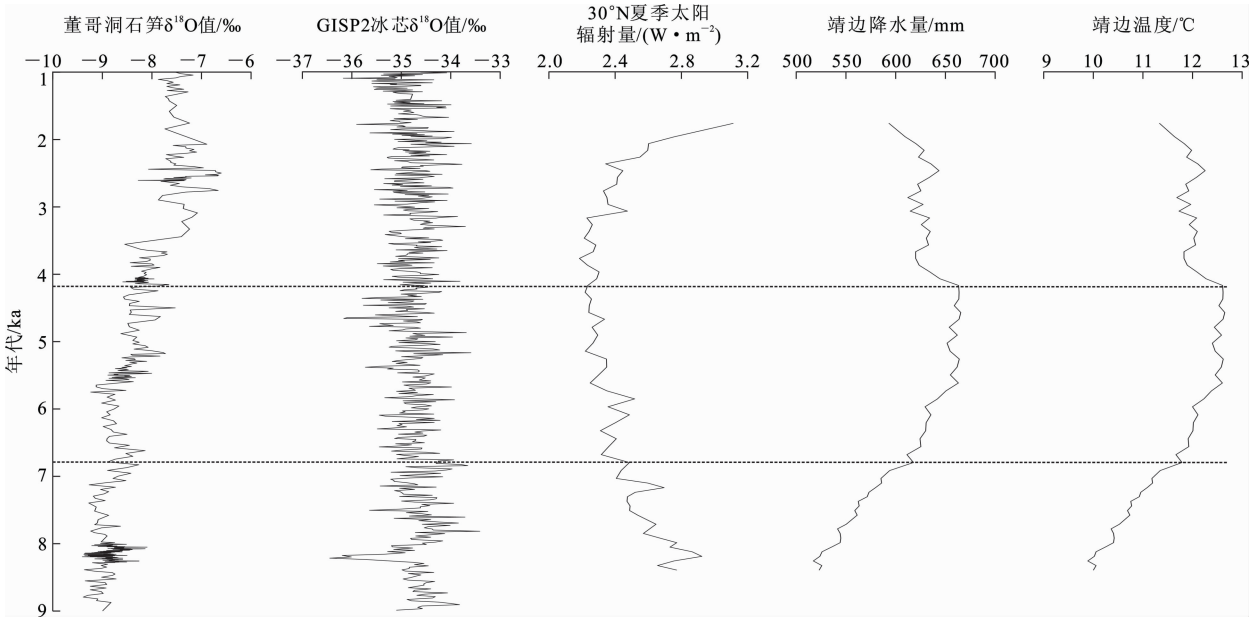


图 7 靖边降水量和温度与董哥洞石笋氧同位素、GISP2 冰芯氧同位素、30°N 夏季太阳辐射量记录对比

Fig. 7 Comparison of Precipitation and Temperature in Jingbian with Oxygen Isotope Records from Dongge Cave Stalagmite and GISP2 Ice Core, Summer Insolation Record for 30°N

[2] 顾兆炎,韩家懋,刘东生. 中国第四纪黄土地球化学研究进展[J]. 第四纪研究,2000,20(1):41-55.
GU Zhao-yan, HAN Jia-mao, LIU Dong-sheng. Progress in Geochemical Research on the Loess and Other Quaternary Deposits in China[J]. Quaternary Sciences,2000,20(1):41-55.

[3] MUHS D R. The Geochemistry of Loess: Asian and North American Deposits Compared[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2018,155:81-115.

[4] 赵万苍,刘连文,陈 骏,等. 中国沙漠元素地球化学区域特征及其对黄土物源的指示意义[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(9):1425-1438.
ZHAO Wan-cang, LIU Lian-wen, CHEN Jun, et al. Geochemical Characterization of Major Elements in Desert Sediments and Implications for the Chinese Loess Source[J]. Science China: Earth Sciences,2019,49(9):1425-1438.

[5] LI X J, ZAN J B, YANG R S, et al. Grain-size-dependent Geochemical Characteristics of Middle and Upper Pleistocene Loess Sequences from the Junggar Basin: Implications for the Provenance of Chinese Eolian Deposits[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,2020,538:109458.

[6] LI Y, SONG Y G, FITZSIMMONS K E, et al. Origin of Loess Deposits in the North Tian Shan Piedmont, Central Asia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,2020,559:109972.

[7] XIE Y Y, KANG C G, CHI Y P, et al. The Loess Deposits in Northeast China: The Linkage of Loess Accumulation and Geomorphic-climatic Features at the Easternmost Edge of the Eurasian Loess Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2019,181:103914.

[8] 吴 鹏,谢远云,康春国,等. 哈尔滨荒山黄土的成因:粒度、地球化学、磁化率、沉积和地貌特征的整合记录[J]. 地球学报,2020,41(3):420-430.
WU Peng, XIE Yuan-yun, KANG Chun-guo, et al. The Genesis of Huangshan Loess in Harbin: Integrated Evidence from Grain Size, Geochemistry, Magnetization, Sedimentation and Landform[J]. Acta Geoscientia Sinica,2020,41(3):420-430.

[9] ZENG L, YI S W, ZHANG W F, et al. Provenance of Loess Deposits and Stepwise Expansion of the Desert Environment in NE China Since ~1.2 Ma: Evidence from Nd-Sr Isotopic Composition and Grain-size Record[J]. Global and Planetary Change,2020,185:103087.

[10] 凌超豪,张 智,贾玉连,等. 元素地球化学揭示的长江中下游下蜀黄土物源及其环境意义[J]. 地层学杂志,2018,42(3):328-335.
LING Chao-hao, ZHANG Zhi, JIA Yu-lian, et al. Geochemical Evidence for Provenance of Xiashu Loess in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and Its Environmental Implication[J]. Journal of Stratigraphy,2018,42(3):328-335.

[11] HAN L, HAO Q Z, QIAO Y S, et al. Geochemical Evidence for Provenance Diversity of Loess in Southern

- China and Its Implications for Glacial Aridification of the Northern Subtropical Region[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 212: 149-163.
- [12] 梁敏豪, 杨胜利, 成婷, 等. 青藏高原东部黄土沉积元素地球化学示踪[J]. *沉积学报*, 2018, 36(5): 927-936.
- LIANG Min-hao, YANG Sheng-li, CHENG Ting, et al. Geochemical Evidence for the Provenance of Loess Deposits in the Eastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(5): 927-936.
- [13] 文星跃, 吴勇, 黄成敏, 等. 岷江上游晚更新世黄土粒度与元素组成特征及其物源指示意义[J]. *山地学报*, 2019, 37(4): 488-498.
- WEN Xing-yue, WU Yong, HUANG Cheng-min, et al. Grain Size and Elements Composition Characteristics and Their Implications for Provenance of the Late Pleistocene Loess in the Upper Reaches of the Minjiang River, China[J]. *Mountain Research*, 2019, 37(4): 488-498.
- [14] LI G Q, ZHANG H X, LIU X J, et al. Paleoclimatic Changes and Modulation of East Asian Summer Monsoon by High-latitude Forcing over the Last 130 000 Years as Revealed by Independently Dated Loess-paleosol Sequences on the NE Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 237: 106283.
- [15] GUAN H C, ZHU C, ZHU T X, et al. Grain Size, Magnetic Susceptibility and Geochemical Characteristics of the Loess in the Chaohu Lake Basin: Implications for the Origin, Palaeoclimatic Change and Provenance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 117: 170-183.
- [16] 王攀, 张培新, 杨振京, 等. 靖边黄土剖面记录的末次冰期以来的气候变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 162-170.
- WANG Pan, ZHANG Pei-xin, YANG Zhen-jing, et al. Climate Change Since the Last Glacial Stage Recorded in Jingbian Loess Section[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 162-170.
- [17] 王攀, 宁凯, 石迎春, 等. 吴起全新世土壤剖面常量元素地球化学特征[J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1261-1268.
- WANG Pan, NING Kai, SHI Ying-chun, et al. Geochemical Characteristics of Major Elements of Holocene Soil from Wuqi, Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1261-1268.
- [18] 刘刚, 许文年, 蔡崇法, 等. 基于黄土沉积速率的土壤侵蚀危险度评价[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 19-21.
- LIU Gang, XU Wen-nian, CAI Chong-fa, et al. Assessment of Soil Erosion Risk Based on Loess Deposition Rate[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(2): 19-21.
- [19] 陈骏, 安芷生, 汪永进, 等. 最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 1998, 28(6): 498-504.
- CHEN Jun, AN Zhi-sheng, WANG Yong-jin, et al. Distribution of Rb and Sr in the Luochuan Loess-paleosol Sequence of China During the Last 800 ka: Implications for Paleomonsoon Variations[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 1998, 28(6): 498-504.
- [20] 刘连文, 陈骏, 陈畅, 等. 最近 130 ka 以来黄土中 Zr/Rb 值变化及其对冬季风的指示意义[J]. *科学通报*, 2002, 47(9): 702-706.
- LIU Lian-wen, CHEN Jun, CHEN Yang, et al. Variation of Zr/Rb Ratios on the Loess Plateau of Central China During the Last 130 ka and Its Implications for Winter Monsoon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(9): 702-706.
- [21] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [22] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [23] GUO Z T, LIU T S, GUIOT J, et al. High Frequency Pulses of East Asian Monsoon Climate in the Last Two Glaciations: Link with the North Atlantic[J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12(10): 701-709.
- [24] FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [25] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近 2.5 Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2001, 31(2): 136-145.
- CHEN Jun, AN Zhi-sheng, LIU Lian-wen, et al. Variations in Chemical Compositions of the Eolian Dust in Chinese Loess Plateau over the Past 2.5 Ma and Chemical Weathering in the Asian Inland[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2001, 31(2): 136-145.
- [26] 陈畅, 陈骏, 刘连文. 甘肃西峰晚第三纪红黏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.
- CHEN Yang, CHEN Jun, LIU Lian-wen. Chemical Composition and Characterization of Chemical Weathering

- ering of Late Tertiary Red Clay in Xifeng, Gansu Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(2): 167-175.
- [27] 张虎才,李吉均,马玉贞,等. 腾格里沙漠南缘武威黄土沉积元素地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1997, 15(4): 154-160.
- ZHANG Hu-cai, LI Ji-jun, MA Yu-zhen, et al. A Study on Elemental Geochemical Characters of the Wuwei Loess Section in the South Vicinity of Tengger Desert [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(4): 154-160.
- [28] LIU C Q, MASUDA A, OKADA A, et al. A Geochemical Study of Loess and Desert Sand in Northern China; Implications for Continental Crust Weathering and Composition[J]. *Chemical Geology*, 1993, 106(3/4): 359-374.
- [29] 乔彦松,赵志中,王 燕,等. 川西甘孜黄土—古土壤序列的地球化学演化特征及其古气候意义[J]. *科学通报*, 2010, 55(3): 255-260.
- QIAO Yan-song, ZHAO Zhi-zhong, WANG Yan, et al. Variations of Geochemical Compositions and the Paleoclimatic Significance of a Loess-soil Sequence from Garze County of Western Sichuan Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(3): 255-260.
- [30] SHELDON N D, TABOR N J. Quantitative Paleoenvironmental and Paleoclimatic Reconstruction Using Paleosols[J]. *Earth-science Reviews*, 2009, 95(1/2): 1-52.
- [31] 欧阳椿陶,李保生,欧先交,等. 萨拉乌苏河流域末次间冰期古土壤化学风化与古气候[J]. *地理学报*, 2007, 62(5): 518-528.
- OUYANG Chun-tao, LI Bao-sheng, OU Xian-jiao, et al. Chemical Weathering of the Milangouwan Paleosols in the Salawusu River Valley and Their Paleoclimatic Implication During the Last Interglacial Period[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 518-528.
- [32] JIANG W Y, GUO Z T, SUN X J, et al. Reconstruction of Climate and Vegetation Changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene Variability of the East Asian Monsoon [J]. *Quaternary Research*, 2006, 65(3): 411-420.
- [33] XU Q H, XIAO J L, LI Y C, et al. Pollen-based Quantitative Reconstruction of Holocene Climate Changes in the Daihai Lake Area, Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(11): 2856-2868.
- [34] CHEN F H, XU Q H, CHEN J H, et al. East Asian Summer Monsoon Precipitation Variability Since the Last Deglaciation [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11186.
- [35] MARCOTT S A, SHAKUN J D, CLARK P U, et al. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11 300 Years [J]. *Science*, 2013, 339: 1198-1201.
- [36] 于英鹏,汪海斌,刘现彬. 末次间冰期以来沙漠边缘黄土沉积的地球化学特征初探[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 356-365.
- YU Ying-peng, WANG Hai-bin, LIU Xian-bin. Geochemical Characteristics of Loess Deposition Since Last Interglacial at Desert Margin and Its Provenance and Climatic Implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 356-365.
- [37] 彭淑贞,郭正堂. 风尘堆积中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值与粒度的关系及其对东亚冬季风的指示意义[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2001, 31(增): 209-214.
- PENG Shu-zhen, GUO Zheng-tang. Geochemical Indicator of Original Eolian Grain Size and Implications on Winter Monsoon Evolution [J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2001, 31(S): 209-214.
- [38] GALLET S, JAHN B, TORII M. Geochemical Characterization of the Luochuan Loess-paleosol Sequence, China, and Paleoclimatic Implications [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133(1/2/3/4): 67-88.
- [39] 陈 骏,仇 纲,鹿化煜,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 Hua-yu, et al. Variation of Summer Monsoon Intensity on the Loess Plateau of Central China During the Last 130 ka; Evidence from Rb and Sr Distribution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(21): 1963-1966.
- [40] 陈 骏,汪永进,季峻峰,等. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义 [J]. *第四纪研究*, 1999, 19(4): 350-356.
- CHEN Jun, WANG Yong-jin, JI Jun-feng, et al. Rb/Sr Variations and Its Climatic Stratigraphical Significance of a Loess-paleosol Profile from Luochuan, Shaanxi Province [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(4): 350-356.
- [41] CHEN J, AN Z S, HEAD J. Variation of Rb/Sr Ratios in the Loess-paleosol Sequences of Central China During the Last 130 000 Years and Their Implications for Monsoon Paleoclimatology [J]. *Quaternary Research*, 1999, 51(3): 215-219.
- [42] 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 Jiang-li, HUANG Chun-chang, ZHANG Zhan-ping. 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.
- [43] 陈骏, 汪永进, 陈旸, 等. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 259-266.
- CHEN Jun, WANG Yong-jin, CHEN Yang, et al. Rb and Sr Geochemical Characterization of the Chinese Loess and Its Implications for Palaeomonsoon Climate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 259-266.
- [44] 刘连文, 陈骏, 陈旸, 等. 黄土的连续提取实验及 Rb/Sr 值意义[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 65-70.
- LIU Lian-wen, CHEN Jun, CHEN Yang, et al. Sequential Extraction Procedure of Loess and Paleosol and the Implications of Rb/Sr Ratios[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 65-70.
- [45] CHEN J, CHEN Y, LIU L W, et al. Zr/Rb Ratio in the Chinese Loess Sequences and Its Implication for Changes in the East Asian Winter Monsoon Strength[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(6): 1471-1482.
- [46] 张文翔, 史正涛, 刘勇, 等. 新疆伊犁盆地黄土古气候记录与 Heinrich 事件对比分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 973-979.
- ZHANG Wen-xiang, SHI Zheng-tao, LIU Yong, et al. Climatic Record in the Loess-paleosol Sediment in the Hi Basin and Comparative Analysis with the Heinrich Events[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 973-979.
- [47] 杨帆, 靳鹤龄, 李孝泽, 等. 中晚全新世毛乌素沙地东南部气候变化过程[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(3): 431-438.
- YANG Fan, JIN He-ling, LI Xiao-ze, et al. Climate Change in the Southeastern Mu Us Sandy Land in Middle and Late Holocene[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(3): 431-438.
- [48] 舒培仙, 李保生, 牛东风, 等. 毛乌素沙漠东南缘滴哨沟湾剖面 DGS1 层段粒度特征及其指示的全新世气候变化[J]. *地理科学*, 2016, 36(3): 448-457.
- SHU Pei-xian, LI Bao-sheng, NIU Dong-feng, et al. Climate Variations Recorded by the Grain-size from the DGS1 Segment in the Southeast of China's Mu Us Desert During the Holocene[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 448-457.
- [49] 陈淑娥, 樊双虎, 刘秀花, 等. 陕西榆林风沙滩区全新世气候和环境变迁[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(1): 81-88.
- CHEN Shu-e, FAN Shuang-hu, LIU Xiu-hua, et al. Holocene Climate and Environmental Changes in the Eolian Sand Section of Yulin, Shaanxi Province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(1): 81-88.
- [50] 李想, 苏志珠, 马义娟, 等. 毛乌素沙地东南缘全新世气候不稳定性[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 109-117.
- LI Xiang, SU Zhi-zhu, MA Yi-juan, et al. Holocene Climatic Instability Record in the Southeastern Margin of Mu Us Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2): 109-117.
- [51] 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.
- NIU Dong-feng, LI Bao-sheng, WANG Feng-nian, et al. Holocene Climate Fluctuations from the Record of Trace Elements in the Mu Us Desert: Evidence from the DGS1 Segment of the Salawusu River Valley[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 735-743.
- [52] 陈璐, 鲁瑞洁, 刘小糠, 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.
- CHEN Lu, LU Rui-jie, LIU Xiao-kang, et al. Holocene Climate Changes Recorded by Elemental Geochemistry in the Salawusu River Region[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(3): 308-315.
- [53] DYKOSKI C A, EDWARDS R L, 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(1/2): 71-86.
- [54] GROOTES P M, STUIVER M. Oxygen 18/16 Variability in Greenland Snow and Ice with 10^{-3} - to 10^5 -year Time Resolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C12): 26455-26470.
- [55] BERGER A, LOUTRE M F. Insolation Values for the Climate of the Last 10 Million Years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.