

刘瑾, 王永, 姚培毅, 等. 末次冰消期以来内蒙古东部气候变化——基于风成砂—古土壤序列的地球化学记录[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 1103–1114.

Liu Jin, Wang Yong, Yao Peiyi, et al. A study of paleoclimate changes in east Inner Mongolia since the Last deglaciation on the basis of aeolian sand–paleosoil series geochemical records[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 1103–1114(in Chinese with English abstract).

末次冰消期以来内蒙古东部气候变化——基于风成砂—古土壤序列的地球化学记录

刘瑾^{1,2} 王永¹ 姚培毅¹ 迟振卿¹ 李廷栋¹ 耿树方¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:通过对内蒙古东部现代东亚季风界线两侧的浑善达克沙地和呼伦贝尔沙地风成砂—古土壤剖面的光释光、¹⁴C 年代和沉积物主、微量元素地球化学的分析, 重建内蒙古东部末次冰消期以来气候变迁过程。浑善达克沙地的浩来呼热剖面(hshl-09)显示了末次冰消期以来 3 次暖湿气候期, 分别对应末次冰消期、全新世大暖期、中世纪暖期。呼伦贝尔沙地的嵯岗剖面(CG-09)表现了全新世大暖期和中世纪暖期两次的暖湿气候期。这一过程是对东亚夏季风的响应, 大致反映了内蒙古东部末次冰消期以来的东亚夏季风两次不同程度增强及大暖期结束的南退过程。通过对比前人研究结果, 全新世中期东亚夏季风较强, 在内蒙古东部大约距今 4 ka 开始减弱、南退; 中世纪暖期夏季风强度较弱, 持续时间短。

关键词:浑善达克沙地; 呼伦贝尔沙地; 古土壤; 季风演化

中图分类号: P534.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)04-1103-12

A study of paleoclimate changes in east Inner Mongolia since the Last deglaciation on the basis of aeolian sand–paleosoil series geochemical records

LIU Jin^{1,2}, WANG Yong¹, YAO Pei-yi¹, CHI Zhen-qing¹, LI Ting-dong¹, GENG Shu-fang¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Otindag sandy land and Hulun Buir sandy land belong to east Inner Mongolia and lie on the two sides of modern East Asian Monsoon (EAM) boundary. Based on optical stimulated luminescence (OSL) and ¹⁴C dating method combined with chemical elements analysis, regional paleoclimate was reconstructed. The results indicate that Otindag sandy land experienced three warm wet periods in the last deglaciation, Holocene optimum and Medieval warm period respectively. Whereas Hulun Buir sandy land only experienced the last two warm epochs. These periods were responses to the East Asian Summer Monsoon (EASM), roughly reflecting the EASM enhancement in two different degrees since the last deglaciation and the retreat process in the end of Holocene optimum. By contrast with previous studies, the EASM began to retreat at about 4 ka in east Inner Mongolia; the monsoon intensity

收稿日期: 2014-12-01; 改回日期: 2015-03-14

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011120142, 12120113005600)资助。

作者简介: 刘瑾, 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为第四纪环境变化; E-mail: liujin_1203@126.com。

通讯作者: 王永, 男, 1968 年生, 研究员, 主要从事第四纪地质和新构造研究; E-mail: wangyong@cags.ac.cn。

was weaker in Medieval warm period, and the duration was short.

Key words: Otindag sandy land; Hulun Buir sandy land; paleosoil; monsoon evolution

About the first author: LIU Jin, female, born in 1987, doctor candidate, majors in Quaternary environmental changes; E-mail: liujin_1203@126.com.

About the corresponding author: WANG Yong, male, born in 1968, senior researcher, engages in Quaternary geological and neotectonic study; E-mail: wangyong@cags.ac.cn.

1 引 言

古土壤是埋藏的自然土壤,是过去在地表形成,随后被较新的沉积物覆盖埋藏的土壤^[1],沙漠地区发育的古土壤通常指示当时暖湿的气候条件,是沙地不同程度的逆向发展的直接或间接标志^[2-5]。

内蒙古东部的沙地地区局部地段地层出露较好,可见较清晰的古沙丘结构特征,广泛发育了风成砂-古土壤的沉积序列,显示经历了多次气候的冷暖波动。前人对内蒙古东部沙地的风成砂-古土壤序列开展了广泛的研究^[6-11]。近年来研究趋向于定量化重建,包括对沙地的气温和降水的重建^[12]、沙地边界的重建^[13-15]等,但对不同地区沙地对比较少^[4]。尽管沙地沉积风蚀强烈,不同地貌部位的地层连续性有差异,但由于其形成动力条件相对简单,在空间上具有一定的可对比性^[5]。表生地球化学元素的组成和变化特征通常反映了气候环境的演化过程,气候和地形的差异影响了化学元素的积聚和迁移过程,不同层位的元素含量明显不同,目前多以其变化作为地层发育、气候环境变化的指标^[7, 16-20]。本文运用地球化学指标,对位于内蒙古东部现代东亚季风区界线^[21]两侧的风成砂-古土壤剖面进行分析,结合前人在该区域的研究成果,试图揭示末次冰消期以来内蒙古东部季风区的演化过程。

2 研究区概况

内蒙古东部浑善达克沙地和呼伦贝尔沙地分别位于现代东亚季风区界线南、北两侧,该区普遍发育晚更新世—全新世古沙丘。在上述两地分别选择发育完整的风成砂-古土壤沙丘剖面进行研究。

浑善达克沙地位于锡林郭勒高原中部,东起大兴安岭西麓达里诺尔以东的低山丘陵区,向西在苏尼特右旗北部一直延伸到集二铁路以西,面积为37100 km²^[13]。地处温带季风半干旱气候区,年平均

气温1.4℃,年降水350~400 mm,干燥度5~6^[22],现代植被主要为半干旱草原,固定、半固定沙丘占绝对优势。呼伦贝尔沙地位于大兴安岭西侧内蒙古呼伦贝尔草原上,沿东西方向分布有3条大的沙带:北部沙带分布于海拉尔河沿岸;中部沙带东起哈留内布拉格,西至英根庙一带;南部沙带东起伊敏河西岸,西至甘珠尔庙,沙漠化面积3859.6 km²^[23, 24]。气候具有半湿润、半干旱的过渡特点,年平均气温较低,年降水量220~290 mm,蒸发量1500~1800 mm^[25],干燥度6~7。

3 方法与结果

3.1 地层剖面、年代与实验方法

浩来呼热剖面位于浑善达克沙地东侧(42°55'20.9"N, 116°42'52.5"E),地表为固定-半固定沙地,剖面厚320 cm,发育6层黑色砂质古土壤,其中两层较厚,另外4层与风成砂呈互层分布,表层发育1层生草层。嵯岗剖面位于呼伦贝尔沙地西缘的嵯岗镇(49°13'37.8"N, 118°3'14"E),地表为固定-半固定沙地,剖面厚230 cm,由2层风成砂、2层黑色砂质古土壤和1层生草层组成。文中2个剖面所处的地貌部位均为固定沙丘顶部,具体位置如图1所示。

浩来呼热剖面采集光释光样品3块,¹⁴C样品1块,测年材料为全样,嵯岗剖面采集光释光年代样品3块。光释光样品由中国地质科学院水文地质环境地质研究所光释光实验室完成,根据样品特征分别用细颗粒样品和粗颗粒样品进行测年,细颗粒样品(4~11 μm)采用简单多片再生剂量法测定,粗颗粒样品(90~125 μm)采用单片再生剂量法测定,实验流程参考文献[26, 27],测试结果见表1。¹⁴C样品由北京大学年代学实验室完成并使用CalPal Online (<http://calpal-online.de/index.html>)进行在线校正^[28],实测年龄为(10.0±0.5) ka B.P.,校正后的年龄为(11.6±0.7) ka Cal.B.P.,文中所使用的年龄为校正

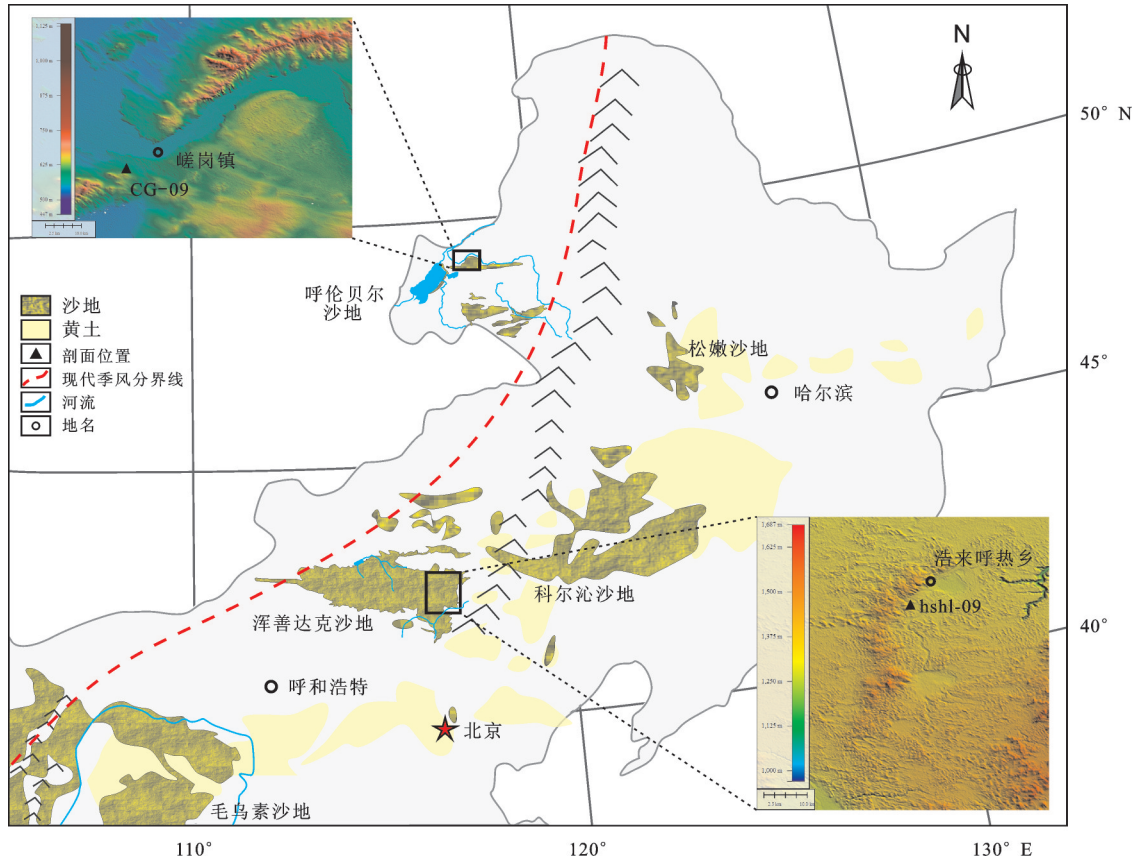


图1 浩来呼热剖面(hshl-09)、嵯岗剖面(CG-09)位置及现代季风界线^[21]分布图

Fig.1 Locations of Haolaihu section (hshl-09), Cuogang section (CG-09), and modern EAM boundary^[21]

表1 浩来呼热剖面(hshl-09)和嵯岗剖面(CG-09)光释光测试结果
Table 1 OSL dating results of Haolaihu section and Cuogang section

样品编号	深度/cm	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	K/%	等效剂量 E.D	年剂量 Dy/Ka	含水量/%	年龄/Ka	石英粒径/ μm
					/Gy				
CG-1	50	0.74	3.82	2.39	3.37±0.17	3.04	2.24	1.1±0.1	90~125
CG-2	151	0.96	4.40	2.61	8.36±0.41	3.33	2.9	2.5±0.2	90~125
CG-3	205	0.79	3.90	2.63	41.43±1.70	3.43	3.42	12.1±0.7	4~11
hshl-1	90	0.56	1.70	1.94	4.53±0.48	2.49	4.18	1.8±0.2	4~11
hshl-2	195	0.70	2.56	1.92	8.56±0.70	2.60	2.71	3.3±0.3	4~11
hshl-3	320	0.55	1.89	2.07	40.43±1.29	2.62	2.22	15.4±0.8	4~11

后的年龄。考虑到风成砂与古土壤的沉积速率不同,并可能存在剥蚀、缺失,本文通过计算不同岩性段的沉积速率,并与前人研究的多个剖面 and 实测年龄^[24, 29]进行对比,最终确定浩来呼热剖面的古土壤发育的年龄分别是 13 ka, 11.6~4 ka 和 1.3~0.6 ka, 嵯岗剖面的古土壤年龄分别是 9~4 ka 和 1~0.5 ka。

浩来呼热剖面按照 5 cm 间隔,嵯岗剖面按照 10 cm 间隔进行系统采样,分别采取样品 65 个和 24 个。地球化学元素测定由中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,主量元素分析用 X 荧光光谱仪(2100)测定,分析的相对标准偏差小于 2%~8%,微量元素分析用等离子质谱仪(X-series)测定,分

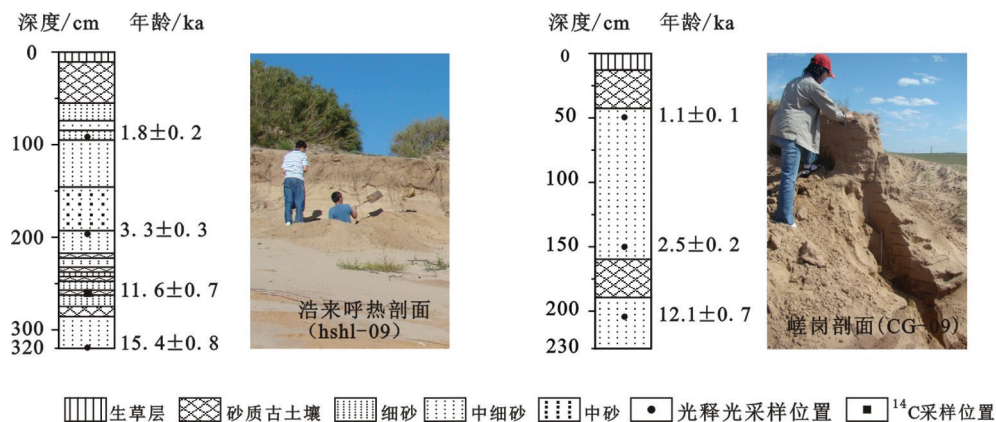


图2 浩来呼热剖面(hshl-09)、嵯岗剖面(CG-09)地层柱状图及其年代

Fig.2 Age and stratigraphic of Haolaihu (hshl-09) and Cuogang (CG-09) sections

表2 浩来呼热剖面不同岩性中主量元素含量(%)及比值

Table 2 Distribution and ratio of major elements in paleosol and aeolian sand in Haolaihu section

元素	全剖面		风成砂		古土壤	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
SiO ₂	86.83~89.88	88.58	87.21~89.88	88.84	86.83~88.93	87.77
Al ₂ O ₃	4.89~6.51	5.60	4.89~6.51	5.51	5.35~6.32	5.88
MgO	0.07~0.15	0.11	0.07~0.13	0.10	0.09~0.15	0.13
CaO	0.27~0.45	0.36	0.27~0.41	0.34	0.34~0.45	0.40
Na ₂ O	0.89~1.51	1.06	0.89~1.51	1.05	0.99~1.26	1.10
K ₂ O	1.87~2.55	2.23	1.87~2.45	2.20	2.11~2.55	2.34
TiO ₂	0.06~0.25	0.12	0.06~0.17	0.12	0.10~0.25	0.14
Fe ₂ O ₃	0.08~0.39	0.23	0.08~0.30	0.21	0.21~0.39	0.27
FeO	0.25~0.68	0.48	0.25~0.68	0.46	0.47~0.66	0.56
SiO ₂ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	6.36~17.85	15.29	12.96~17.85	15.71	6.36~15.20	13.46
Na ₂ O/CaO	2.13~4.31	2.99	2.68~4.31	3.06	2.13~3.18	2.71

析的相对标准偏差小于5%。

3.2 化学元素的分布特点

浩来呼热沙丘剖面主量化学元素分布特征如表2、图3。风成砂中SiO₂平均含量高于古土壤,古土壤中其余主量元素平均含量高于风成砂。

浩来呼热沙丘剖面微量化学元素分布特征如表3、图3所示。古土壤中所有微量元素平均含量均高于风成砂,Rb/Sr均值变化不大,古土壤中Zr/Rb均值大于风成砂。

嵯岗剖面主量化学元素分布特征如表4、图4。风成砂中SiO₂平均含量高于古土壤,Fe₂O₃平均含量的变化不明显,主要是第二期古土壤发育期含量较低。古土壤中其余主量元素平均含量均高于风成砂。

嵯岗剖面微量化学元素分布特征如表5、图4。除

表3 浩来呼热剖面不同岩性中微量元素含量(10⁻⁶)及比值

Table 3 Distribution and ratios of trace elements in paleosol and aeolian sand in Haolaihu section

元素	全剖面		风成砂		古土壤	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
Co	1.02~2.98	1.70	1.02~2.37	1.60	1.42~2.98	1.98
V	6.70~14.80	9.13	6.70~13.30	8.71	8.09~14.8	10.32
Cr	7.70~42.60	13.87	7.70~29.60	12.95	9.98~42.6	16.48
Ni	2.95~6.66	4.82	2.95~7.24	4.65	3.79~6.66	5.31
Zn	7.70~39.20	12.00	7.70~39.20	11.52	10.30~17.10	13.34
Rb	50~74	63.67	50~73.80	62.64	54~74	66.59
Sr	99~140	124.28	99~140	122.33	111~140	129.76
Zr	63~328	129.67	63~238	125.47	101~328	141.53
Cs	1.27~1.90	1.51	1.27~1.84	1.46	1.33~1.90	1.67
Pb	6.99~12.9	9.06	6.99~12.9	8.91	8.05~11.40	9.46
U	0.44~0.96	0.60	0.44~0.80	0.59	0.50~0.96	0.62
Th	1.81~9.59	2.57	1.81~9.59	2.47	2~4.67	2.87
Rb/Sr	0.47~0.72	0.51	0.48~0.72	0.51	0.47~0.53	0.51
Zr/Rb	1.10~5.20	2.05	1.10~3.60	2.02	1.50~5.20	2.10

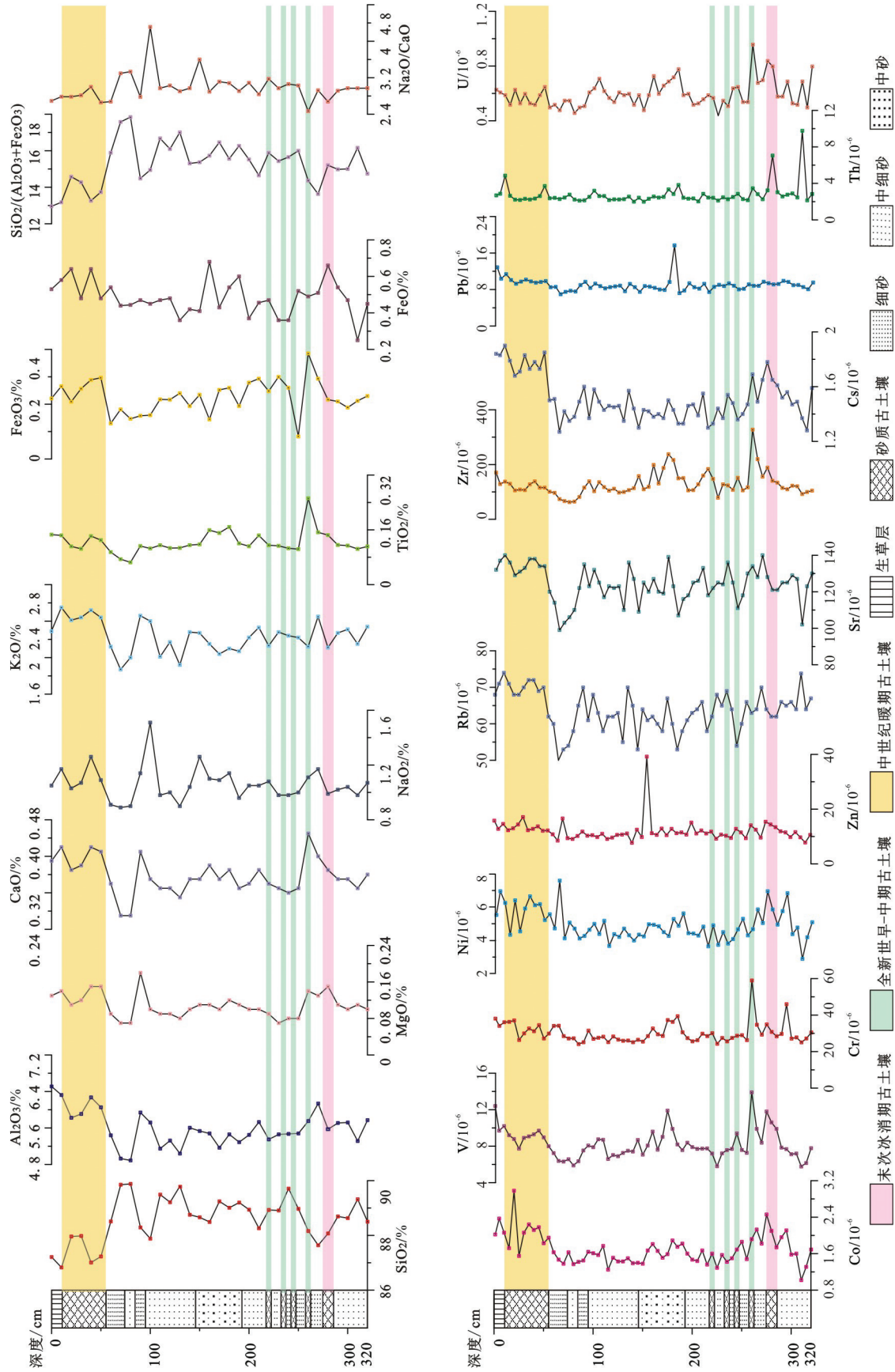


图3 浩来呼热剖面化学元素变化特征
Fig.3 Changes of chemical elements concentrations in Haolaihu section

表4 崆岗剖面不同岩性中主量元素含量(%)及比值

Table 4 Distribution and ratios of major elements in paleosol and aeolian sand in Cuogang section

元素	全剖面		风成砂		古土壤	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
SiO ₂	78.60~86.90	83	79.90~86.90	83.64	78.60~84.70	81.72
Al ₂ O ₃	6.46~10.25	8.34	6.46~9.71	8.11	7.37~10.25	8.78
MgO	0.12~0.31	0.18	0.12~0.24	0.17	0.14~0.31	0.21
CaO	0.30~0.72	0.50	0.30~0.67	0.47	0.41~0.72	0.57
Na ₂ O	1.27~2.12	1.78	1.27~2.06	1.75	1.57~2.12	1.86
K ₂ O	2.89~3.65	3.32	2.89~3.65	3.30	3.11~3.58	3.36
TiO ₂	0.10~0.28	0.17	0.10~0.23	0.15	0.13~0.28	0.20
Fe ₂ O ₃	0.21~0.67	0.46	0.31~0.67	0.46	0.21~0.66	0.45
FeO	0.46~0.86	0.63	0.43~0.75	0.57	0.61~0.86	0.74
SiO ₂ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	7.23~12.79	9.70	7.59~12.79	9.87	7.23~11.02	9.30
Na ₂ O/CaO	2.81~4.43	3.67	3.01~4.43	3.77	2.81~3.91	3.43

表5 崆岗剖面不同岩性中微量元素含量(10⁻⁶)及比值

Table 5 Distribution and ratios of trace elements in paleosol and aeolian sand in Cuogang section

元素	全剖面		风成砂		古土壤	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
Co	2.70~5.30	4.01	2.70~5.60	3.91	3.60~5.30	4.21
Cr	220~680	432.92	220~680	423.13	220~680	452.5
Ni	5.70~13.3	8.89	5.70~10.7	8.51	8~13.30	9.64
Zn	19.10~45.70	29.55	15.10~42.30	28.64	19.10~45.70	31.36
Rb	97.70~163.70	138.87	129.60~163.70	142.23	97.70~156.40	132.15
Sr	108.60~163.30	137.99	108.80~163.30	131.81	133.20~165	150.35
Zr	55~263.70	148.21	55~214.70	134.52	90.20~263.70	175.60
Ba	586.10~714.90	662.37	586.1~713.20	655.68	620.60~714.90	675.74
Rb/Sr	0.73~1.42	1.02	0.79~1.42	1.09	0.73~0.99	0.88
Zr/Rb	0.41~1.76	1.06	0.41~1.59	0.95	0.83~1.76	1.29

Rb元素平均含量在风成砂中高于古土壤外,古土壤中其余元素平均含量均高于风成砂,风成砂中Rb/Sr均值高于古土壤,古土壤中Zr/Rb均值高于风成砂。

3.3 化学元素指示的气候意义

元素分析结果表明,代表较湿润气候的黑色砂质古土壤发育时期,地表水分循环活跃,易溶元素流失较多,较不易溶解的元素则相对富集。表生地球化学元素中Ti、Al、Fe化学性质比较稳定,暖湿环境下由于其他元素的淋失导致它们相对富集,干旱环境下含量相对减少;Si多以氧化物形式存在,在温湿条件下先于Al、Fe淋失,故干冷的气候条件下相对富集^[30]。K、Na都是化学性质活泼的元素,容易产生淋溶迁移,由于植物对于K、Na具有一定的吸附作用,造成暖湿气候条件下K、Na的相对富集^[8,31]。Ca、Mg元素的化学性质介于K、Na与Ti、Al、Fe之间。除某种单一元素外,不同元素的比值也常用来作为反映气候变化的指标,例如硅铁铝率(SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃))和钠钙比(Na₂O/CaO)。前者在干旱气候条件下,由于Si富集而Fe、Al含量低,值较大,湿润气候条件下Si含量低,Fe、Al相对富集,值较小;后者常作为环

境荒漠化程度的指标,比值增大表明环境向荒漠方向发展,比值减小表明环境向干草原方向发展^[8]。崆岗剖面和浩来呼热剖面的硅铁铝率(SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃))和钠钙比(Na₂O/CaO)在古土壤中平均含量较低,风成砂中较高,能够较好地指示出环境变化特征。

微量元素含量在不同岩性中呈现明显的规律性,一般来讲,Cr、Rb、Co、U、Th等微量元素由于活动性较弱,或受植被及黏土矿物的吸附,在古土壤中的含量较高,而V、Ni、Sr、Zn、Pb、Cs、Ba等元素由于活动性较强,在古土壤中易于淋溶,在风成砂中表现出聚集的特征。Zr元素的含量一般与粗颗粒沉积物含量相关,黄土^[32]、湖泊^[33]、海洋^[34]沉积物中的Zr/Rb值,常用来指示冬季风强弱。Rb/Sr常用来作为反映夏季风强度的替代性指标^[35]。崆岗剖面和浩来呼热剖面中除稳定性较强的元素外,V、Ni、Sr、Zn等活性元素在古土壤中的平均含量也较高。研究表明,活性元素的异常高值可能与地表微地形有关,周围被淋滤的元素通过径流的搬运再次聚集^[36],也可能由于降水稀少,元素的淋溶作用不

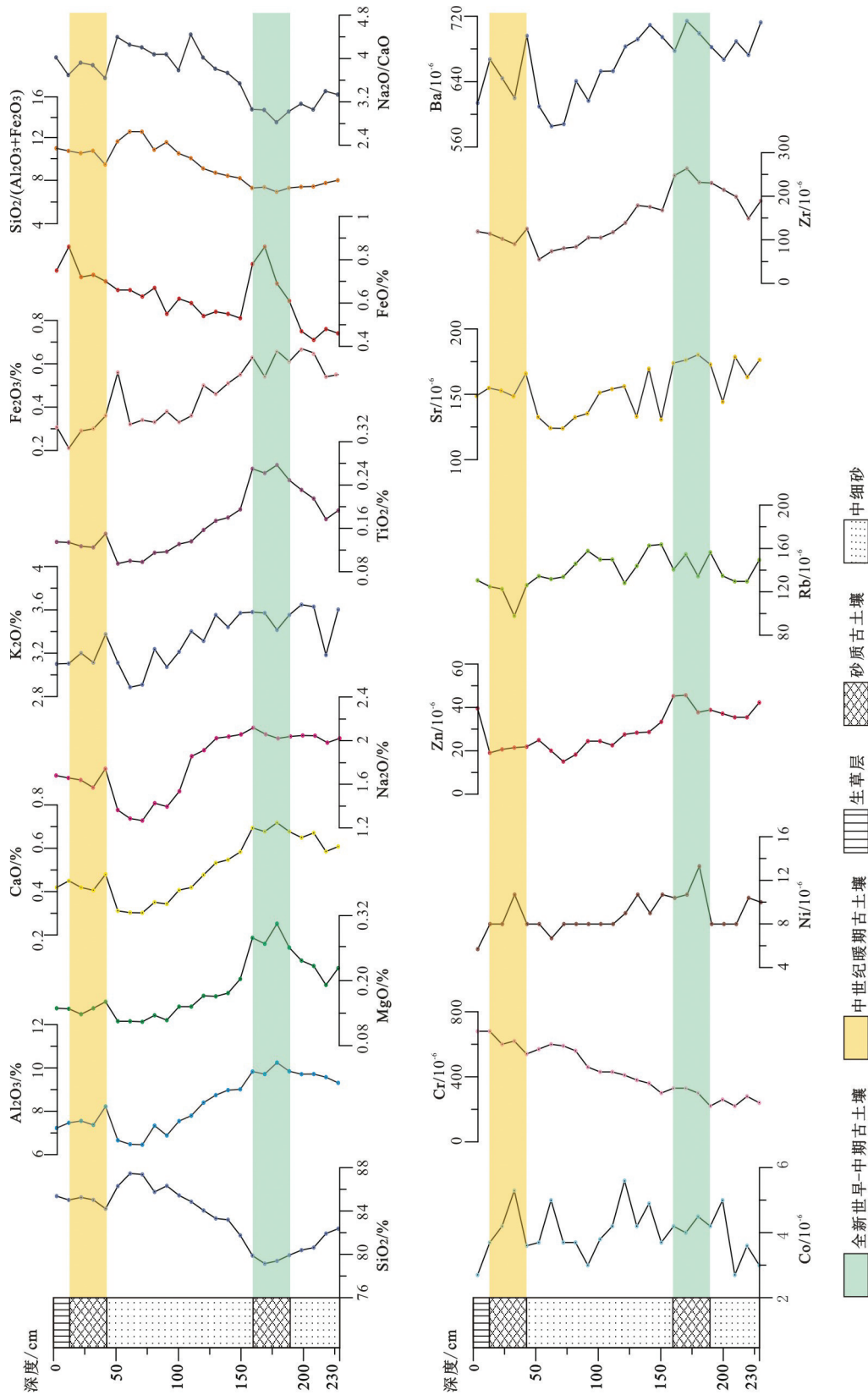


图4 嵯岗剖面化学元素变化特征
Fig.4 Changes of chemical elements concentrations with depths in Cuogang section

是很显著^[37]。考虑到两个剖面都位于沙丘部位,受微地形影响的可能性较低,笔者更倾向于后者。浑善达克沙地和呼伦贝尔沙地中Zr元素与岩性关系不明显且均值在古土壤中含量略高,周利亚等^[38]认为沙地物源可能是引起Zr含量异常的原因。Rb元素在浩来呼热剖面第三期古土壤中相对富集,但在第一期、第二期古土壤及嵯岗剖面的古土壤中含量偏低,可能也正是由于物源的不同造成的。因此,浩来呼热剖面 and 嵯岗剖面的Zr、Rb元素并不具有气候指示意义。Rb/Sr、Zr/Rb作为季风强弱的替代性指标应充分考虑微地貌、物源等因素^[39]。

4 区域气候的变化特征

结合浩来呼热剖面 and 嵯岗剖面的年龄、岩性、地球化学元素的含量及其比值,获得末次冰消期以来浑善达克沙地和呼伦贝尔沙地的气候变化过程。浩来呼热剖面显示的气候变化过程如下:(1) 15.4~11.6 ka,冷干气候为主,沉积物为黄色中细砂,除SiO₂平均含量较高外,其余主量元素平均含量较低,Cr、Co、U等微量元素平均含量低,硅铁铝率、钠钙比平均值较高。其中13 ka气候暖湿,发育一层黑色砂质古土壤,SiO₂平均含量降低,Cr、Co、U等微量元素平均含量增加,硅铁铝率、钠钙比平均值降低;(2) 11.6~6 ka,多层砂质古土壤与风成细砂交替发育,指示气候呈暖湿与冷干波动,有4个明显暖湿期且持续时间短、发育间隔小,古土壤层除SiO₂平均含量低外,其余主量元素平均含量较高,Cr、Co、Th、U等微量元素平均含量较高,而硅铁铝率、钠钙比平均值相对较低;(3) 6 ka以来,气候特征以冷干为主,沉积物为黄色中细砂与黄褐色、浅黄色细砂互层,除SiO₂平均含量较高外,其余主量元素平均含量都较低,Cr、Co、Th、U等微量元素平均含量也较低,硅铁铝率、钠钙比平均值高。其中1.3~0.6 ka气候好转,发育黑色砂质古土壤,SiO₂平均含量减少,其余主量元素平均含量增加,Cr、Co、Th等微量元素平均含量显著增加,硅铁铝率、钠钙比平均值降低,但土壤化程度低于前一时期。地表生草层沉积物为黄色中细砂,现代植物发育使其出现弱土壤化特征,SiO₂有所降低,Al、Cr、Co、Th、U等元素平均含量增加,硅铁铝率、钠钙比降低。

嵯岗剖面显示的气候变化过程如下:(1) 12.1 ka

之前至9 ka,气候寒冷干燥,沉积物为中细砂,SiO₂平均含量较高,其余主量元素平均含量较低,Cr、Co等微量元素平均含量也较低,硅铁铝率、钠钙比平均值较高;(2) 9~4 ka,气候温暖湿润,沉积物为黑色砂质古土壤,除SiO₂平均含量较低外,其余主量元素平均含量较高,Cr、Co等微量元素平均含量增加,硅铁铝率、钠钙比平均值低;(3) 4 ka以后气候再次转为冷干,沉积物为中细砂,SiO₂平均含量增加,其余主量元素平均含量减少,Co等微量元素平均含量减少,硅铁铝率、钠钙比平均值高,其中1~0.5 ka为暖湿期,发育黑色砂质古土壤,SiO₂平均含量减少,除Fe₂O₃异常外,其余主量元素平均含量增加,Cr、Co等微量元素平均含量有所增加,硅铁铝率、钠钙比平均值较低,但均指示土壤化程度低于前一时期。地表生草层沉积物为中细砂,SiO₂含量略有增加,Fe₂O₃含量增加,其余主量元素含量与前阶段持平或略有减少,Co元素含量减少,硅铁铝率和钠钙比有所增加,现代土壤化作用不明显。

考虑到风成砂与古土壤的沉积速率不同,并可能存在剥蚀、缺失,将本文实测剖面与前人的研究剖面进行对比。可能的沉积间断存在使得不同剖面的沉积有所差异^[13],但总体来说,除末次冰消期^[40,41]的古土壤记录较少外,浑善达克沙地各剖面全新世中期的大暖期^[42]普遍发育古土壤,中世纪暖期^[43]也有薄层古土壤发育;呼伦贝尔沙地全新世中期和中世纪暖期发育明显的古土壤。呼伦贝尔沙地普遍发育的古土壤表明当时该区处于东亚夏季风的影响之下,夏季风的界线在该区以北,这一结果与山丹—雅布赖山一带为全新世大暖期(7.5~4 ka B.P.)东亚夏季风北界的推测^[44]相一致。浑善达克沙地地区全新世中期古土壤的结束时间,虽然可能由于后期剥蚀,在浩来呼热剖面表现较早,但周亚利等^[29]的研究为2.7 ka;韩鹏等^[45]认为是2.8 ka B.P.;浩来呼热古湖显示全新世适宜期结束时间约为2.9 ka cal B.P.^[46]。在呼伦贝尔沙地,嵯岗剖面显示古土壤的结束约为4 ka;曾琳等^[24]、Li Shenghua等^[47,48]的研究剖面显示古土壤的发育约持续到4 ka;Yang Lirong和Ding Zhongli^[49]的研究剖面显示古土壤5 ka左右结束发育,这与呼伦湖记录的高湖面的结束约在5 ka B.P.^[50-52]较为一致。以上研究显示呼伦贝尔沙地全新世中期古土壤结束发育的时间略早于浑善达克

沙地,我们认为可能指示了全新世中晚期内蒙古东部夏季风逐渐减弱的过程。

浑善达克沙地和呼伦贝尔沙地中世纪暖期均发育砂质古土壤,但土壤化程度较全新世中期低,指示了中世纪暖期一次相对较弱的增温过程,东亚夏季风界线再次北移。就持续时间来看,在浑善达克沙地地区,浩来呼热剖面显示为1.3~0.6 ka,古土壤及河湖相沉积记录为1.5~0.9 ka B.P.^[53],张小艳等人^[54]认为古土壤发育时间为1.45~0.58 ka,靳鹤龄等^[55]认为1.3~0.7 ka B.P.发育古土壤但气候湿润度较低。呼伦贝尔沙地地区,嵯岗剖面显示中世纪暖期持续时间为1~0.5 ka B.P.,汪佩芳^[56]认为1 ka B.P.呼伦贝尔沙地相对固定, Li Shenghua等^[48]的研究认为弱土壤化发育时间为1.8~0.5 ka。总体来说,这一时期持续时间短,土壤化程度较低,东亚夏季风的强度较全新世中期减弱,可能在呼伦贝尔沙地持续时间较浑善达克沙地略短。

浑善达克沙地地表生草层的中SiO₂、Al₂O₃、Cr、Co、Th、U、硅铁铝率、钠钙比等的变化,指示了现代土壤化作用。而呼伦贝尔沙地除Cr、Fe₂O₃外的主、微量元素及其比值都未指示出明显的土壤化作用。这一特征可能暗示了现代东亚夏季风对两地的不同影响,但更为深入的研究还需要更多的面上调查和量化计算。

5 结 论

通过对现代季风界线两侧嵯岗剖面、浩来呼热剖面风成砂-古土壤剖面的地球化学分析,得出以下结论:

(1)剖面中的主量元素和Cr、Co、Th、U等微量元素的变化能够充分反映气候变化的规律,除SiO₂外均表现出暖湿时期富集,干冷时期含量较低的趋势。V、Ni、Sr、Zn等活动性元素在古土壤中的异常高值可能与降水稀少,淋滤作用不显著有关。在不同区域Zr、Rb元素可能受物源的影响较大,因此,Rb/Sr、Zr/Rb作为区域气候代用指标存在一定的局限性,使用时应充分考虑淋溶作用、物源等因素。

(2)全新世大暖期呼伦贝尔沙地和浑善达克沙地普遍发育的古土壤层指示了东亚季风强度增大,两地都处于东亚夏季风的控制之下,季风界线北移至呼伦贝尔沙地以北。呼伦贝尔沙地古土壤结束

时间略早于浑善达克沙地,可能指示约4 ka东亚夏季风逐渐减弱的过程。中世纪暖期时,古土壤的发育指示又一次增温,东亚夏季风界线再次北移,但持续时间短,土壤化程度低,说明此次东亚季风强度较全新世中期弱。

致谢:审稿专家和编辑部李亚萍老师提出了宝贵修改意见,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] Valentine K W G, Dalrymple J B. Quaternary buried paleosols: A critical review[J]. *Quaternary Research*, 1976, 6(2): 209-222.
- [2] 董光荣, 靳鹤龄, 王贵勇, 等. 中国沙漠形成演化与气候变化研究[J]. *中国科学院院刊*, 1999, 04: 276-280.
Dong Guangrong, Jin Heling, Wang Guiyong, et al. Study of China desert formation and climate evolution[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 1999, 04: 276-280 (in Chinese).
- [3] 董光荣. 中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 212-232.
Dong Guangrong. Study of China Desert Formation and Climate Evolution[M]. Beijing: Ocean Press, 2002: 212-232 (in Chinese).
- [4] 杨萍, 叶玮. 古土壤记录的内蒙古沙区全新世环境变化[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1670-1677.
Yang Ping, Ye Wei. Environment changes of sand fields in Inner Mongolia, China since the Holocene Recorded by Sandy Paleosol[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(6): 1670-1677 (in Chinese with English abstract).
- [5] 鹿化煜, 周亚利, Mason J, 等. 中国北方晚第四纪气候变化的沙漠与黄土记录——以光释光年代为基础的直接对比[J]. *第四纪研究*, 2006(06): 888-894.
Lu Huayu, Zhou Yali, Mason J, et al. Late Quaternary climatic changes in northern China——New evidences from sand dune and loess records[J]. *Quaternary Sciences*, 2006(06): 888-894 (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈渭南, 高尚玉. 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.
Chen Weinan, Gao Shangyu. On the Holocene Geochemical landscape characteristics and its paleoclimatic meaning, Mau Us sand sea[J]. *Journal of Desert Research*, 1994, 14(1): 22-30 (in Chinese with English abstract).
- [7] 高全洲, 陶贞, 董光荣, 等. 巴丹吉林沙漠查格勒布鲁剖面的沉积地球化学特征[J]. *地理学报*, 1998(S1): 44-51.
Gao Quanzhou, Tao Zhen, Dong Guangrong, et al. The characteristics of sediments geochemistry in Chagelebulu section in the Badain Jaran desert[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998(S1): 44-51 (in Chinese with English abstract).
- [8] 靳鹤龄, 苏志珠, 孙忠. 浑善达克沙地全新世中晚期地层化学元素特征及其气候变化[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 366-371.

- Jin Heling, Su Zhizhu, Sun Zhong. Characters of chemical elements in strata of middle and late Holocene in Hunshandake desert and the indicating climatic changes[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4): 366–371 (in Chinese with English abstract).
- [9] 周亚利, 鹿化煜, 张家富, 等. 高精度光释光测年揭示的晚第四纪毛乌素和浑善达克沙地沙丘的固定与活化过程[J]. *中国沙漠*, 2005(03): 342–350.
- Zhou Yali, Lu Huayu, Zhang Jiafu, et al. Active and inactive phases of sand-dune in Mau Us and Otindag sandlands during Late Quaternary Suggested by OSL Dating[J]. *Journal of Desert Research*, 2005(03): 342–350 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨利荣, 岳乐平. 光释光测年揭示的科尔沁沙地末次晚冰期-全新世沙漠空间格局变化[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 260–268.
- Yang Lirong, Yue Leping. Horqin dunefield in northeastern China in the last Late Glacial and Holocene as revealed by OSL dating[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 260–268 (in Chinese with English abstract).
- [11] 徐志伟, 鹿化煜, 弋双文, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期毛乌素沙地的空间变化[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 218–227.
- Xu Zhiwei, Lu Huayu, Yi Shuangwen, et al. Spatial variations of the Mau Us dune field (north central China) during the Last Glacial maximum and Holocene optimum[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 218–227 (in Chinese with English abstract).
- [12] 俞凯峰, 鹿化煜, Lehmkuhl F, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期中国北方沙地古气候定量重建初探[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 294–302.
- Yu Kaifeng, Lu Huayu, Lehmkuhl F, et al. Preliminary quantitative paleoclimate reconstruction of the dune fields of northern China during the Last Glacial maximum and Holocene optimum[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 294–302 (in Chinese with English abstract).
- [13] 周亚利, 鹿化煜, 张小艳, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期浑善达克沙地边界的变化[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 228–242.
- Zhou Yali, Lu Huayu, Zhang Xiaoyan, et al. Changes of the border of Otindag sand field (northern China) during the Last Glacial maximum and Holocene optimum[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 228–242 (in Chinese with English abstract).
- [14] 弋双文, 鹿化煜, 曾琳, 等. 末次盛冰期以来科尔沁沙地古气候变化及其边界重建[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 206–217.
- Yi Shuangwen, Lu Huayu, Zeng Lin, et al. Paleoclimate changes and reconstruction of the border of Horqin Dunefield (northeastern China) since the Last Glacial maximum[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 206–217 (in Chinese with English abstract).
- [15] 冯晗, 鹿化煜, 弋双文, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期中国季风区西北缘沙漠空间格局重建初探[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 252–259.
- Feng Han, Lu Huayu, Yi Shuangwen, et al. The border changes of the deserts/sand field in the east Asian monsoon marginal region during the Last Glacial maximum and Holocene optimum[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 252–259 (in Chinese with English abstract).
- [16] 庞奖励, 黄春长, 刘安娜, 等. 黄土高原南部全新世黄土-古土壤序列若干元素分布特征及意义[J]. *第四纪研究*, 2007(03): 357–364.
- Pang Jiangli, Huang Chunchang, Liu Anna, et al. Ba/Sr and Rb/Sr ratio of Holocene loess-palaeosol sequences and its significance in south Loess Plateau, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2007(03): 357–364 (in Chinese with English abstract).
- [17] 马龙, 吴敬禄. 内蒙古乌梁素海湖泊沉积物元素地球化学特征及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 3: 119–125.
- Ma Long, Wu Jinglu. Element Geochemical characteristic of lake sediments and its influence factors in Ulansuhai lake, Inner Mongolia[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 3: 119–125 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张玉芬, 李长安, 熊德强, 等. “巫山黄土”氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 352–360.
- Zhang Yufen, Li Changan, Xiong Deqiang, et al. Oxide geochemical characteristics and paleoclimate records of “Wushan loess” [J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 352–360 (in Chinese with English abstract).
- [19] 顾明光, 陈忠大, 汪庆华, 等. 杭州湘湖剖面全新世沉积物的地球化学记录及其地质意义[J]. *中国地质*, 2005, 32(1): 70–74.
- Gu Mingguang, Chen Zhongda, Wang Qinghua, et al. Geochemical records of Holocene sediments in the Xianghu section, Hangzhou, and their geological significance[J]. *Geology in China*, 2005, 32(1): 70–74 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李福春, 谢昌仁, 金章东, 等. 南京老虎山黄土剖面中铷锶地球化学和磁化率与古气候变化的关系[J]. *中国地质*, 2003, 30(1): 93–98.
- Li Fuchun, Xie Changren, Jin Zhangdong, et al. Rubidium and strontium geochemistry in the Laohushan loess section, Nanjing, and relation between magnetic susceptibility and paleoclimatic change[J]. *Geology in China*, 2003, 30(1): 93–98 (in Chinese with English abstract).
- [21] 高由禧. 东亚季风的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 49–63.
- Gao Youxi. Some problems of the east Asian monsoon[M]. Beijing: Science Press, 1962: 49–63 (in Chinese).
- [22] 王永利, 云文丽, 王炜, 等. 浑善达克沙地重度沙化区与干旱梯度空间相关性初探[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(4): 122–126.
- Wang Yongli, Yun Wenli, Wang Wei, et al. A primary study on the space correlation between serious sand damaged zone and drought gradient in Hunshandake Sand-land[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(4): 122–126 (in Chinese with English abstract).

- [23] Guo J, Wang T, Xue X, et al. Monitoring aeolian desertification process in Hulunbir grassland during 1975–2006, Northern China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 166(1–4): 563–571.
- [24] 曾琳, 鹿化煜, 弋双文, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期呼伦贝尔沙地的环境变化[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 243–251.
Zeng Lin, Lu Huayu, Yi Shuangwen, et al. Environmental changes of Hulun Buir dunefield in northeastern China during the Last Glacial maximum and Holocene optimum[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 243–251 (in Chinese with English abstract).
- [25] 赵慧颖. 呼伦贝尔沙地45年来气候变化及其对生态环境的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 11: 1817–1821.
Zhao Huiying. Recent 45 years climate change and its effects on ecological environment on Hulun–Buir sandy land[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 11: 1817–1821 (in Chinese with English abstract).
- [26] 赵华, 卢演涛, 尹金辉. 科尔沁沙地全新世风沙沉积物的石英单测片蓝光释光测年和风沙活动年代学[J]. *核技术*, 2005, 28(5): 367–374.
Zhao Hua, Lu Yanchou, Yin Jinhui. SAR dating of quartz and geochronology of Holocene sand dune activities in Horqin sandy field, China[J]. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(5): 367–374 (in Chinese with English abstract).
- [27] Zhao H, Lu Y C, Chen J, et al. Fine grain IRSL and GLSL dating of late Quaternary sediments from North China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(4): 334–337.
- [28] Yang X P, Ma N N, Dong J F, et al. Recharge to the inter–dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China[J]. *Quaternary Research*, 2010, 73(1): 10–19.
- [29] 周亚利, 鹿化煜, Mason J A, 等. 浑善达克沙地的光释光年代序列与全新世气候变化[J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 38(4): 452–462.
Zhou Yali, Lu Huayu, Mason J A, et al. OSL chronology sequence and climate change in Holocene in Otindag sand field[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(4): 452–462 (in Chinese).
- [30] Vital H, Statterger K. Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River[J]. *Chemical Geology*, 2000, 168(1/2): 151–168.
- [31] 鲁瑞洁, 王亚军, 张登山. 毛乌素沙地15 ka以来气候变化及沙漠演化研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 273–277.
Lu Ruijie, Wang Yajun, Zhang Dengshan. Climate changes and desert evolution of Mau Us desert since 15 ka BP[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 273–277 (in Chinese with English abstract).
- [32] 刘连文, 陈骏, 陈阳, 等. 最近130ka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 Lianwen, Chen Jun, Chen Yang, et al. Zr/Rb ratio changes in the loess and its significance to the instructions of the winter monsoon since 130 ka[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(9): 702–706 (in Chinese).
- [33] 陈诗越, 王苏民, 金章东, 等. 青藏高原中部2.8Ma以来的化学风化与环境演化的湖泊沉积记录[J]. *高校地质学报*, 2003, (1): 19–29.
Chen Shiyue, Wang Sumin, Jin Zhangdong, et al. Chemical weathering and environmental change records of the last 2.8 Ma in the central Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, (1): 19–29 (in Chinese with English abstract).
- [34] 梅西, 李日辉, 张训华. 南黄海DLC70–3孔晚更新世以来Rb/Zr值特征及环境意义[J]. *海洋地质前沿*, 2014, (2): 10–17.
Mei Xi, Li Rihui, Zhang Xunhua. Characteristics of Rb/Zr ratio of DLC70–3 core from south Yellow Sea and its environmental implication since Late Pleistocene[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, (2): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- [35] 陈阳, 陈骏, 刘连文, 等. 最近13万年来黄土高原Rb/Sr记录与夏季季风时空变迁[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(6): 513–519.
Chen Yang, Chen Jun, Liu Lianwen, et al. Rb/Sr record and the summer monsoon change of time and space in loess plateau in recent 130 ka years[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(6): 513–519 (in Chinese).
- [36] 杨艺, 李保生, 李云卓, 等. 巴丹吉林沙漠查格勒布剖面微量元素反映的150 ka BP以来的气候变化[J]. *中国沙漠*, 2007, (1): 1–8.
Yang Yi, Li Baosheng, Li Yunzhuo, et al. Palaeo–climate change indicated from fluctuations of trace elements since 150 kaBP in Chagelebu stratigraphical section, Badain Jaran desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, (1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [37] 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.
Liu Bing, Jin Heling, Sun Zhong, et al. Millennial scale climate change in the Holocene revealed by trace elements of aeolian deposits in northeastern Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(3): 423–433 (in Chinese with English abstract).
- [38] 周亚利, 鹿化煜, 弋双文, 等. 晚第四纪中国北方沙地风沙沉积的Zr/Rb比值特征及意义[J]. *中国沙漠*, 2013, (6): 1661–1669.
Zhou Yali, Lu Huayu, Yi Shuangwen, et al. Variation of Zr/Rb ratio from aeolian deposits and its implication in dune field in northern China during the late Quaternary[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, (6): 1661–1669 (in Chinese with English abstract).
- [39] 汪海斌, 刘连文, 冯兆东. 末次间冰期古土壤的Zr/Rb值时空分布特征及其影响因素[J]. *科学通报*, 2008, 2: 238–246.
Wang Haibin, Liu Lianyou, Feng Zhaodong. Time–space distribution characteristics and influencing factors of Zr/Rb ratio in paleosol in the last interglacial[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 2: 238–246 (in Chinese).
- [40] Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and

- volcanoes[J]. *Quaternary Research*. 1995, 44(3): 341–354.
- [41] An Z S, Porter S C, Zhou W J, et al. Episode of strengthened summer monsoon climate of younger dryas age on the loess plateau of central China[J]. *Quaternary Research*, 1993, 39(1): 45–54.
- [42] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, (8): 865–873.
Shi Yafeng, Sun Zhaochen, Wang Sumin, et al. Holocene climate and environment in China in Megathermal[J]. *Science in China (Series B)*, 1993, (8): 865–873(in Chinese).
- [43] Lamb H H. The early medieval warm epoch and its sequel[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1965, 1: 13–37.
- [44] 董光荣, 王贵勇, 李孝泽, 等. 末次间冰期以来我国东部沙区的古季风变迁[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, (5): 437–444.
Dong Guangrong, Wang Guiyong, Li Xiaozhe et al. Paleomonsoon changes since the last interglacial period of eastern sand area in China[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, (5): 437–444 (in Chinese).
- [45] 韩鹏, 孙继敏. 浑善达克沙地的光释光测年研究[J]. *第四纪研究*, 2004, (4): 480.
Han Peng, Sun Jimin. OSL dating research of Otindag sandy land[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, (4): 480 (in Chinese).
- [46] 关友义, 王永, 姚培毅, 等. 内蒙古克什克腾旗浩来呼热古湖泊全新世以来的环境演变[J]. *地质通报*, 2010, 29(6): 891–900.
Guan Youyi, Wang Yong, Yao Peiyi, et al. Environmental evolution since the Holocene in the Haolaihu ancient lake, Keshiketengqi, Inner Mongolia, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6):891–900(in Chinese with English abstract).
- [47] Li S H, Sun J M, Zhao H. Optical dating of dune sands in the northeastern deserts of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 181(4): 419–429.
- [48] Li S H, Sun J M. Optical dating of Holocene dune sands from the Hulun Buir Desert, northeastern China[J]. *The Holocene*. 2006, 16 (3): 457–462.
- [49] Yang L R, Ding Z L. Expansion and contraction of Hulun Buir Dunefield in north– eastern China in the last late glacial and Holocene as revealed by OSL dating[J]. *Environmental Earth Sciences*. 2013, 68(5): 1305–1312.
- [50] 张振克, 王苏民. 13 ka以来呼伦湖湖面波动与泥炭发育、风沙–古土壤序列的比较及其古气候意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2000, (3): 56–59.
Zhang Zhenke, Wang Sumin. Paleoclimate significance of lake level fluctuation, peat development and eolian sand– paleosoil series in Hulun Lake Area during past 13 ka [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, (3): 56–59 (in Chinese with English abstract).
- [51] 羊向东, 王苏民. 呼伦湖、乌伦古湖全新世植物群发展与气候环境变化[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 1: 67–72.
Yang Xiangdong, Wang Sumin. The vegetational and climatic– environmental changes in Hulun Lake and Wulungu Lake during Holocene[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 1: 67– 72 (in Chinese with English abstract).
- [52] 王苏民, 吉磊. 呼伦湖晚第四纪湖相地层沉积学及湖面波动历史[J]. *湖泊科学*, 1995, (4): 297–306.
Wang Sumin, Ji Lei. Sedimentology of late Quaternary lacustrine deposits and history of lake level fluctuation in Hulun Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1995, (4): 297–306 (in Chinese with English abstract).
- [53] 武健伟, 鲁瑞洁. 中世纪暖期浑善达克沙地空间格局与景观特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2005(S1): 110–113.
Wu Jianwei, Lu Ruijie. Spatial pattern and landscape characteristics in Otindag Sandy Land during the Medieval Warm Period[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005 (S1): 110–113 (in Chinese with English abstract).
- [54] 张小艳, 周亚利, 庞奖励, 等. 光释光测年揭示浑善达克沙地中世纪暖期和小冰期环境变迁与人类活动的关系[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(3): 535–546.
Zhang Xiaoyan, Zhou Yali, Pang Jiangli, et al. The relationship between environmental changes and human activities during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age in Otindag Sandland by OSL dating[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(3): 535–546 (in Chinese with English abstract).
- [55] 靳鹤龄, 苏志珠, 孙良英, 等. 浑善达克沙地全新世气候变化[J]. *科学通报*, 2004, (15): 1532–1536.
Jin Heling, Su Zhizhu, Sun Liangying, et al. Holocene climate changes in Otindag sandy land[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, (15): 1532–1536 (in Chinese).
- [56] 汪佩芳. 全新世呼伦贝尔沙地环境演变的初步研究[J]. *中国沙漠*, 1992, 12(4): 13–19.
Wang Peifang. Preliminary study on the environmental changes of Hulun Buir land since the Holocene[J]. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(4): 13–19 (in Chinese with English abstract).