

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2017070

美国比格内尔山黄土的地球化学特征及其古气候意义

杨洋¹, 张瀚之², 刘连文^{1*}

1. 表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要: 黄土是美国内布拉斯加州地表分布范围最广的沉积物之一, 其中末次冰期形成的皮奥瑞亚黄土 (Peoria loess, PL) 质量累积速率 (Mass Accumulation Rate, MAR) 在比格内尔山 (Bignell Hill, BH) 达到世界最高。探究此地区黄土快速沉积的原因一直是北美中部大平原黄土研究的热点。本文通过对内布拉斯加州中部BH样品的Nd、Sr同位素、主微量和稀土元素的分析, 发现内布拉斯加黄土的化学成分相对均一, 与上部大陆地壳 (UCC) 和中国洛川黄土相比, Fe、Mg值较低, K、Na含量相对较高。BH黄土的化学风化指数 (CIA) 值平均为65.7, 小于洛川黄土, 显示出较弱的化学风化强度。Sr-Nd同位素结果显示, 除了普遍认为的怀特组沉积为黄土的主要源区外, 还存在另一个⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值更高, ε_{Nd} 更负的源区, 推测这个源区为北美劳伦冰盖冰川沉积, 其对黄土的贡献达30%~45%。BH黄土剖面的CIA、Na/K和碳酸盐含量变化表明, 在PL形成时期 (约25~18 ka), 化学风化较弱, 气候干冷, 有助于风尘产生与堆积。

关键词: 内布拉斯加; 黄土; 化学风化; Nd-Sr同位素

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2018) 01-0056-09

Geochemical Characteristics of the Loess in Nebraska, U.S., and Their Paleoclimatic Implications

YANG Yang¹, ZHANG Hanzhi², LIU Lianwen^{1*}

1. Ministry of Education Key Laboratory of Surficial Geochemistry, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Loess is one of the most extensive surficial geologic deposits in Nebraska, U.S.. The deposition rate of the Peoria Loess was extremely fast during the last glacial period, especially in Bignell Hill, the Mass Accumulation Rate is highest in the word. It is still controversial to interpret the cause of the mass dust in the central Great Plain. In this paper, the compositions of Nd-Sr isotopes, major, trace elements and rare earth elements of the loess deposit were investigated on the Bignell Hill section in Nebraska. The results suggest that chemical compositions of the Nebraska loess are relatively homogeneous. Compared with the upper continental crust and the Luochuan loess in China, the contents of Fe and Mg are relatively low, and the contents of K and Na are relatively high in the Nebraska loess. Nd-Sr isotopic compositions indicate there is another source with higher ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and lower ε_{Nd} , except the primary provenance of White River Group. The second source is likely to be glacial deposits which were derived from the area of Laurentide Ice Sheet, its contribution even as high as 30%~45%. The chemical index of alteration of Nebraska loess is about 65.7, lower than Luochuan loess in China, showing a weak chemical weathering intensity. The variation of CIA, Na/K and carbonate content in Bignell Hill section reveal a dry and cold climatic condition and weak weathering during Peiria Loess deposit (25~18 ka). This climatic condition was beneficial to the production and deposition of dust thus generated extremely high mass accumulation rate during that time.

Key words: Nebraska; Loess; Chemical wenthering; Nd-Sr isotope

Corresponding author: LIU Lianwen, Associate Professor; E-mail: liulw@nju.edu.cn

收稿日期: 2017-05-16; 修稿日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金 (41230526; 41690111)

作者简介: 杨洋, 女, 1990年生, 硕士研究生, 地球化学专业; E-mail: 1172646479@qq.com

*通讯作者: 刘连文, 副教授; E-mail: liulw@nju.edu.cn

1 前言

风尘沉积在世界各地均有分布, 以中国黄土高原的黄土—古土壤序列最为典型。北美的第四纪风尘沉积主要在末次冰期沉积在中部大平原和中西部地区, 受冰川控制。在北美劳伦冰盖西南和南部, 美国密西西比河流域和密苏里河附近形成了大量的较厚的黄土沉积 (Bettis et al., 2003; Follmer, 1996; Ruhe et al., 1983; Leigh and Knox, 1994; Muhs et al., 2013)。在内布拉斯加州中部和西部沉积了美国最厚的PL (最厚达50 m以上), 其MAR在深海氧同位素2阶段 (MIS2) 达到世界最高 (比格内尔山) (Roberts et al., 2003; Muhs et al., 2013; Pigati et al., 2013)。此地区末次冰期粉尘物质大量产生、黄土极快速沉积的原因及大量粉尘物质对当地气候的影响在北美中部大平原黄土研究中一直颇受争议。比如, 有研究表明这个时期大量粉尘颗粒悬浮于空气中, 反射太阳辐射, 使当地气候在末次冰期极盛期之后又持续冷了几千年 (Roberts et al., 2003)。而大量粉尘物质的产生主要是由于中部大平原在末次冰期干冷的气候, 增强的西风和黄土西北部未受冰川作用地区植物覆盖率低共同作用造成的 (Aleinikoff et al., 2008;

Muhs et al., 2008)。

比格内尔山是内布拉斯加州黄土最厚地区之一, 不同时期黄土地层连续且完整, 是理想的记录古气候变化的载体。另外比格内尔山黄土剖面定年信息较为完整, 有利于重建古气候时空变化。因此, 本文通过对美国中部大平原内布拉斯加州经典剖面比格内尔山黄土的Nd、Sr同位素、主微量和稀土元素的地球化学特征进行分析, 初步探讨黄土的地球化学特征和物质来源, 尝试重建当地古气候演化。

2 样品和实验

内布拉斯加州地层相对年轻, 主要为第四系。北部和西部为潜在黄土源区, 分布着怀特科组和厄里克勒组、皮埃尔页岩, 东南则沉积大量黄土。内布拉斯加州中部, 黄土和其潜在源区之间分布着范围很广的内布拉斯加沙山, 其面积大约是大于10 m厚黄土的5倍 (图1)。

样品采自内布拉斯加州中部的比格内尔山剖面 ($35^{\circ}45'N, 109^{\circ}25'W$) (图1)。该剖面厚约53 m, 由5个单元构成, 自下而上可划分为: (1) MIS6的吉尔曼组 (Gilman Canyon Formation, 简写为GCF), 沉积年龄大约为45~25 ka (Johnson et al.,

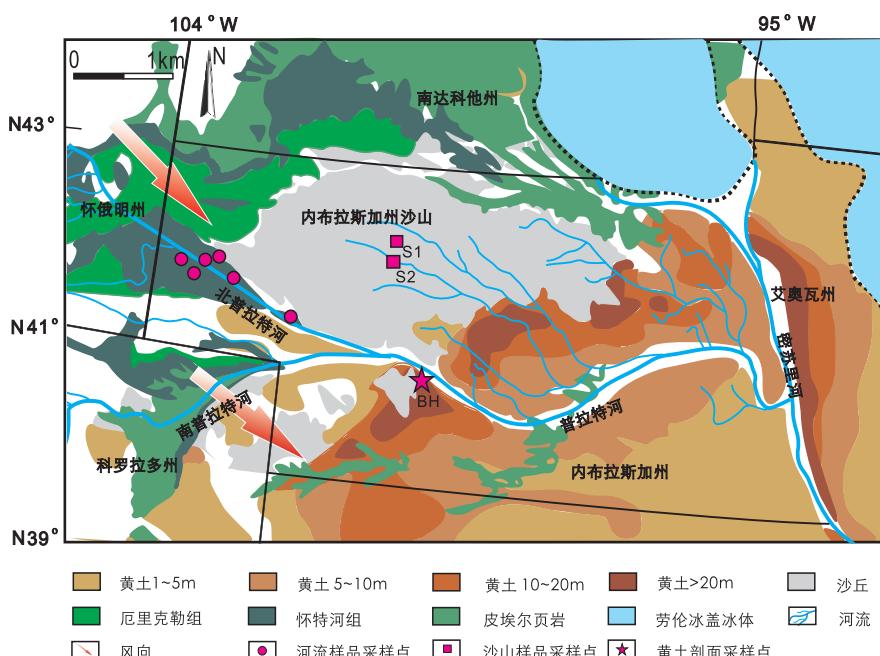


图1 内布拉斯加州及其邻区地质简图 (图中蓝色部分为末次冰期极盛期劳伦冰盖的位置; BH—比格内尔山剖面位置)

Fig. 1 Geological map of Nebraska and adjacent areas (Bettis et al., 2003; Mason et al., 2001; The blue area in map is the maximum extent of southern Laurentide Ice Sheet during Last Glacial Maximum Fullerton et al., 2003, 2004; BH—Bignell Hill)

2007)。(2)末次冰期形成的PL,沉积年龄约为25~13 ka (Mason et al., 2007; Roberts et al., 2003; Pigati et al., 2013)。(3)夹在PL之间的风成沙,大致年龄为22.7~21.7 ka (Mason et al., 2011)。(4)布雷迪古土壤 (Brady Soil, 简写为BS),沉积年龄大约为13~10 ka (Johnson and Willey, 2000; Mason et al., 2008)。(5)全新世 (<10 ka) 比格内尔黄土 (Bignell Loess,简写为BL) (Mason et al., 2003; Miao et al., 2005)。黄土剖面及具体定年信息见图6。

为了使测试样品比较有代表性,分别均匀地在不同黄土单元中取样。在BL(0~0.8 m)0.2 m和0.8 m处各采样一个; BS(0.8~1.8 m)1.8 m处采样1个,上部PL(1.8~8.8 m)2.8 m、3.8 m、4.8 m、5.8 m、6.8 m、7.8 m、8.8 m处各采样一个; 下部PL(42.8~49.5 m)42.8 m、43.8 m、44.8 m、45.8 m、46.8 m、47.8 m、48.8 m处各采样一个; GCF(49.5~53.3 m)50.8 m、51.3 m、53.3 m处各采样一个,共20个样品,进行主微量和稀土元素的测试。在BH剖面中0~8.8 m和42.8~53.4 m每隔10 cm采集一个样品,共198个样品进行碳酸盐含量的测试。

Sr-Nd同位素测试样品共有10个。样品采自内布拉斯加州中部和西部的河流、沙山和黄土剖面。其中3个样品分别来自阿什霍洛河 (Ash Hollow Creek, 41°31' N, 102°13' W)、布拉登河 (Braddon Creek, 41°74' N, 103°05' W) 和格林河 (Gering Creek, 41°72' N, 103°54' W)。这些区域广泛分布着怀特河组、厄里克勒组碎屑物质及皮埃尔页岩 (图1)。河流的沉积物来源于流域内的基岩碎屑,或者在基岩上发育的风化层,基本可以代表当地地表物质的平均组成。河流样品均位于BH剖面的上风区 (图1)。另1个样品位于内布拉斯加州沙山分布区,采自上新世基岩,可能也是黄土的一个源区。其他6个样品来自BH黄土剖面中各个时期黄土,取样位置为剖面0.4 m、1.8 m、7.8 m、43.8 m、47.8 m、51.3 m处。

所有的样品都选择小于75 μm 的部分进行实验。根据Chen等(2007)的方法,用0.5 mol/L醋酸对除碳酸盐含量测试以外的样品进行去碳酸盐处理,酸不溶物经烘干研磨后,主量元素采用X荧光光谱仪进行测试。微量元素和稀土元素用电感耦合等离子体发射质谱进行分析,以上两项分析均在澳实分析检测(广州)有限公司进行,分析精度优

于10%。Nd-Sr同位素的测试首先将前处理完的样品 (0.1 g) 在密封特氟龙容器中用 HNO_3+HF 溶液高温溶解。然后将样品离心取上清液通过特定离子交换树脂提纯Nd、Sr,将元素的高纯度溶液在加热板上蒸干,使用MC-ICP-MS仪器测量。碳酸盐含量利用傅立叶转化红外光谱 (FTIR) 进行定量分析 (Ji et al., 2009)。碳酸盐含量和同位素成分测试中所有样品的化学处理和仪器分析均在南京大学表生地球化学教育部重点实验室同位素实验室完成。

3 实验结果

3.1 Nd和Sr同位素

内布拉斯加州河流样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围为0.71095~0.71111 (平均值为0.71110), ε_{Nd} 值范围为-10.0~-12.2 (平均值为-11.3)。相对来说,所有的河流样品成分比较均一。内布拉斯加沙山的上新世沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.712729,与河流样品相似,但是其 ε_{Nd} 值较低,为-14.6 (表1, 图2)。黄土剖面中不同时期同位素成分变化范围相似, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围为0.715120~0.717766 (平均值为0.716082), ε_{Nd} 值范围为-13.6~-16.5 (平均值为-15.1)。与中国黄土的Nd-Sr同位素相比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 ε_{Nd} 分别约为0.722和-9; Chen et al., 2007),内布拉斯加黄土的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏低,而 ε_{Nd} 明显偏负 (表2)。

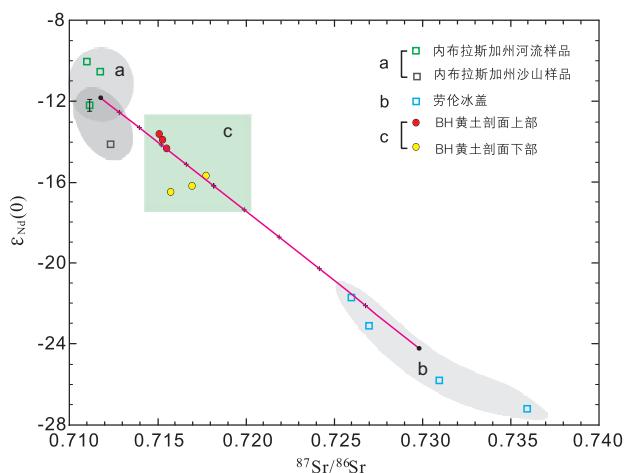


图2 内布拉斯加州河流及黄土样品Nd-Sr同位素成分分布及两端元的模拟曲线图 (劳伦冰盖Nd-Sr同位素成分来自 Farmer et al., 2003)

Fig. 2 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios vs. $\varepsilon_{\text{Nd}} (0)$ values for samples from Nebraska ephemeral streams and loess (Dates of Nd-Sr isotopic composition come from Farmer et al., 2003)

3.2 常量元素

内布拉斯加州黄土常量元素(氧化物)分析结果见表3和图3。从结果可以看出, 内布拉斯加州黄土的物质组成相对均一, 样品之间变化较小。内布拉斯加比格内尔山黄土经UCC标准化后的常量元素有三个主要特征(Taylor and McLennan,

1985)。(1) 常量元素的整体分布特征与洛川黄土相似, 但Si含量高于洛川黄土, 而Al、K、Na、Ti、Mn等元素的略低于洛川黄土(图3a)。(2) 其Fe、Mg的含量相对较低, 只有UCC和洛川黄土的一半左右(图4)。(3) 比格内尔山黄土Na、Ca含量比洛川黄土略微富集, 但与UCC相比均具有

表1 内布拉斯加州河流样品Nd-Sr同位素数据

Table 1 Dates of Nd-Sr isotopic composition in Nebraska loess potential source

编号	经度/°W	纬度/°N	样品类型 (<75 μm)	Sr/ $\times 10^{-6}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma \times 10^{-6}$)	Nd/ $\times 10^{-6}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma \times 10^{-6}$)	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ ($\pm 1\text{SE}$)
W1	102.13	41.31	基岩碎屑	244	0.711108±7	15.1	0.512013±14	-12.2
W3	103.05	41.74	细粒粉砂	354	0.710952±7	28.7	0.512101±5	-10.0
W5	103.54	41.72	基岩碎屑	358	0.711674±8	25.4	0.512124±5	-10.5
S1	101.04	41.85	上新世沙	357	0.712729±8	23.2	0.511891±10	-14.6

$\varepsilon_{\text{Nd}}(0) = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}/(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1) \times 10^4$, CHUR为球粒陨石均一系, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512638$ (Jacobsen and Wasserburg, 1980)

表2 内布拉斯加州BH剖面黄土样品Nd-Sr同位素数据

Table 2 Dates of Nd-Sr isotopic composition in Nebraska Bignell Hill loess

编号	深度/m	黄土类型 (<75 μm)	Sr/ $\times 10^{-6}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($\pm 2\sigma \times 10^{-6}$)	Nd/ $\times 10^{-6}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma \times 10^{-6}$)	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ ($\pm 1\text{SE}$)
L1	0.4	BL		0.715314±8		0.511924±2	-13.9
L2	1.8	BS		0.715540±10		0.511902±4	-14.4
L3	7.8	PL		0.715120±9		0.511939±3	-13.6
L4	43.8	PL	300	0.715772±6	25.1	0.511791±11	-16.5
L5	47.8	PL	254	0.716980±6	26.6	0.511805±9	-16.2
L6	51.3	GCF	257	0.717766±7	25.9	0.511832±7	-15.7

$\varepsilon_{\text{Nd}}(0) = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}/(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1) \times 10^4$, CHUR为球粒陨石均一系, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = 0.512638$ (Jacobsen and Wasserburg, 1980)

表3 内布拉斯加比格内尔山黄土主量元素数据(wt%)

Table 3 Dates of major element in Nebraska Bignell Hill loess

样品编号	深度/cm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	CIA
BN1	20	75.48	11.34	2.39	2.79	1.74	1.51	0.96	0.44	0.04	65.25
BN2	80	74.37	11.65	2.75	2.74	1.56	1.38	1.01	0.5	0.04	67.22
BN3	180	74.59	12.18	2.74	2.8	1.6	1.32	1.02	0.45	0.06	68.04
BN4	280	75.29	11.74	2.53	2.87	1.67	1.35	0.89	0.44	0.04	66.59
BN5	380	75.00	11.69	2.53	2.85	1.68	1.49	0.98	0.45	0.06	66.01
BN6	480	75.12	11.48	2.44	2.85	1.7	1.49	0.95	0.43	0.03	65.53
BN7	580	75.56	11.66	2.43	2.87	1.68	1.36	0.85	0.44	0.04	66.36
BN8	680	75.09	11.76	2.63	2.89	1.66	1.34	0.9	0.46	0.05	66.63
BN9	780	75.03	11.72	2.6	2.85	1.68	1.51	1.04	0.47	0.04	65.99
BN10	880	74.38	11.95	2.69	2.87	1.62	1.47	1.06	0.46	0.1	66.72
BN11	4280	76.52	10.97	2.24	2.88	1.88	1.57	0.85	0.42	0.04	63.41
BN12	4380	75.97	11.3	2.5	2.9	1.81	1.52	0.94	0.47	0.04	64.46
BN13	4480	75.72	11.2	2.38	2.85	1.82	1.49	0.9	0.43	0.04	64.52
BN14	4580	75.84	11.32	2.52	2.88	1.84	1.53	0.94	0.48	0.04	64.43
BN15	4680	75.08	11.41	2.64	2.9	1.78	1.49	0.99	0.51	0.04	64.90
BN16	4780	74.39	11.74	2.87	2.82	1.72	1.52	1.12	0.53	0.04	65.96
BN17	4880	74.67	11.38	2.88	2.88	1.76	1.51	1.1	0.54	0.05	64.92
BN18	5080	75.62	11.07	2.63	2.69	1.7	1.36	0.94	0.49	0.04	65.81
BN19	5130	75.32	11.21	2.75	2.75	1.74	1.44	0.99	0.49	0.06	65.40
BN20	5330	76.93	11.12	2.28	2.62	1.76	1.3	0.84	0.43	0.03	66.19
UCC		66.8	15.2	5	3.4	3.9	4.2	2.2	0.5	0.06	56.93
洛川黄土		66.4	14.2	4.81	3.01	1.66	1.02	2.29	0.73	0.07	71.39
洛川古土壤		64.85	14.93	5.17	3.18	1.39	0.82	2.21	0.76	0.08	73.47

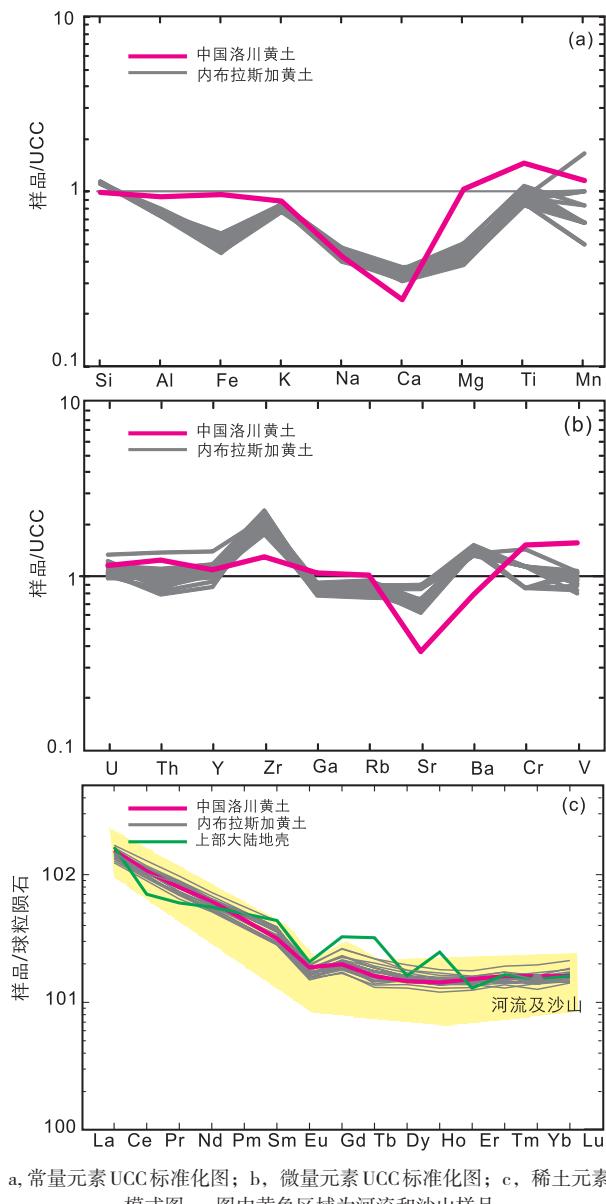


图3 内布拉斯加州黄土和中国洛川黄土主微量元素UCC标准化图及黄土和潜在源区稀土元素模式图

Fig. 3 Nebraska loess and Chinese Luochuan loess UCC standardized diagram as well as loess and potential source normalized spider diagram

明显的亏损特征(图3a)。

3.3 微量和稀土元素

内布拉斯加州黄土微量元素和稀土元素分析结果见表4、5。相对于常量元素,微量元素的配分模式与UCC和洛川黄土更为相似。从图3b中可以看出,不同时代的黄土样品,绝大多数微量元素的含量落在上部陆壳附近,仅Zr和Ba的含量偏高。值得注意的是,微量元素的UCC标准化图

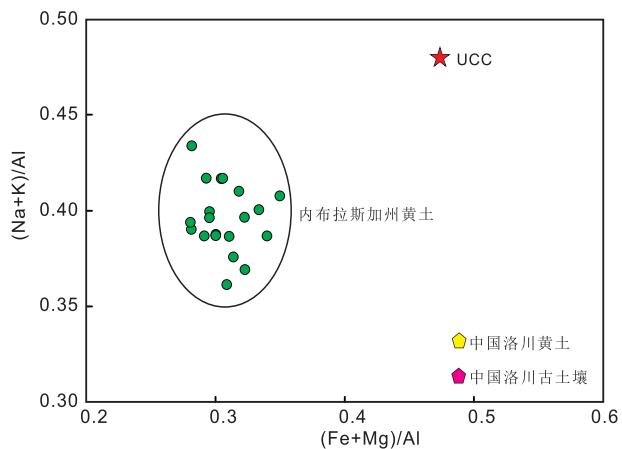


图4 内布拉斯加州黄土和中国洛川黄土、古土壤及UCC

$(\text{Fe}+\text{Mg})/\text{Al}$ vs $(\text{Na}+\text{K})/\text{Al}$ 图解
Fig. 4 Nebraska loess, Chinese Luochuan loess, paleosoil and UCC $(\text{Fe}+\text{Mg})/\text{Al}$ vs $(\text{Na}+\text{K})/\text{Al}$ diagram

中内布拉斯加州黄土与洛川黄土的Sr元素皆出现明显的亏损,且内布拉斯加州黄土的Sr元素含量介于UCC和洛川黄土之间。REE模式图中三者在均表现出明显的轻稀土(LREE)富集和Eu亏损,而内布拉斯加州黄土的Eu亏损比洛川黄土更为明显。上部陆壳中的轻微Ce、Dy亏损和Gd、Tb、Ho富集在内布拉斯加州黄土和洛川黄土中均没有出现(图3c)。

4 讨论

4.1 黄土的物源探讨

黄土往往是广大风蚀源区地表物质充分混合的产物,如中国黄土常用来代表上部大陆地壳的平均成分。比格内尔山黄土也显示类似的特点。Pb同位素数据(Aleinikoff et al., 1998, 2008)和其他的地球化学、矿物学证据(Muhs et al., 2008)表明内布拉斯加州中部和西部末次冰期形成的黄土主要受当地气候控制,其物质来源于大平原西部第三纪未受冰川作用的陆生物质。渐新世怀特河组(White River Group)和渐新世—中新世厄里克勒组(Arikaree groups)的物质为最主要源区,皮埃尔页岩(Pierre shale)也可能有一定的贡献。另外,黄土厚度和粒度分布均表明内布拉斯加州沙山(Nebraska Sand Hill)覆盖下的上新世风成物质也可能是皮奥瑞亚黄土的一个潜在源区(Aleinikoff et al., 2008; Mason, 2001; Muhs et al., 2008)。

REE非常稳定,常用于物源的示踪(杨守业

表4 内布拉斯加比格内尔山黄土微量元素数据($\times 10^{-6}$)

Table 4 Dates of rare element in Nebraska Bignell Hill loess

样品编号	深度/cm	U	Th	Y	Zr	Ga	Rb	Sr	Ba	Cr	V
BN1	20	2.93	8.43	19.2	436	13.4	94.7	295	722	40	58
BN2	80	2.85	8.77	20.7	360	14.6	104.5	259	745	40	63
BN3	180	2.84	10.95	22.5	352	15.1	91.5	253	743	40	63
BN4	280	3	11.65	25.1	360	14.3	90.7	257	807	40	59
BN5	380	3.07	11.75	26.1	377	14.3	91.1	258	819	30	60
BN6	480	2.89	11.2	23.2	353	13.8	88.6	254	788	40	55
BN7	580	2.8	11.2	23.6	379	13.9	89.5	257	771	40	57
BN8	680	2.78	11.15	23.7	371	14.3	91.2	239	784	40	60
BN9	780	2.95	11.4	23.2	374	14.2	89.6	241	802	40	60
BN10	880	2.75	10.6	22.4	335	14.2	90.1	228	783	40	62
BN11	4280	2.88	11.1	23.1	379	13.3	84.3	263	765	40	48
BN12	4380	3.39	10.3	21.7	392	14.8	99.9	300	773	30	53
BN13	4480	2.99	10.8	22.3	358	13.4	87.4	254	771	30	50
BN14	4580	3.35	9.34	22.6	454	13.8	99.4	315	792	30	64
BN15	4680	3.25	11.95	26	456	14.3	94.1	241	775	40	57
BN16	4780	3.43	10.1	21.9	383	15.3	106.5	254	735	40	65
BN17	4880	3.76	14.8	30.7	411	13.9	95.2	217	755	40	59
BN18	5080	3.18	9.4	22.8	379	14	97	257	735	40	55
BN19	5130	3.44	9.45	24.2	417	15.8	106.5	257	742	50	64
BN20	5330	2.83	9.08	24	449	14.6	100	308	838	40	55
UCC		2.8	10.7	22	190	17	112	350	550	35	60
洛川黄土		3.26	13.35	24.18	247.54	17.92	114.77	129	436	53	94

注: UCC 和陆源页岩数据来自 Taylor et al., 1985; 洛川黄土数据来自陈骏等, 2001

表5 内布拉斯加比格内尔山黄土与潜在源区稀土元素数据($\times 10^{-6}$)

Table 5 Dates of rare earth element in Nebraska Bignell Hill loess and potential source

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
BN1	29.4	54.8	6.12	23.9	4.31	0.87	3.54	0.49	3.28	0.68	2.06	0.35	2.15	0.36	19.2
BN2	32.1	59.9	6.67	24.6	4.34	0.90	3.46	0.51	3.50	0.73	2.16	0.40	2.47	0.37	20.7
BN3	37.4	67.8	8.12	29.9	5.42	0.95	4.36	0.65	4.06	0.81	2.40	0.38	2.37	0.37	22.5
BN4	37.4	68.3	8.41	30.2	5.98	1.03	4.72	0.69	4.09	0.89	2.62	0.39	2.51	0.39	25.1
BN5	38.7	71.7	8.53	31.7	5.94	1.07	4.77	0.72	4.32	0.87	2.49	0.41	2.68	0.42	26.1
BN6	35.0	64.4	7.74	28.0	5.60	0.97	4.19	0.66	4.12	0.84	2.26	0.36	2.42	0.40	23.2
BN7	35.2	64.3	7.81	29.0	5.52	0.97	4.43	0.70	4.03	0.84	2.45	0.36	2.50	0.37	23.6
BN8	35.3	66.3	7.87	28.8	5.49	0.93	4.30	0.66	3.86	0.86	2.42	0.40	2.42	0.40	23.7
BN9	35.7	66.6	7.93	29.1	5.52	1.04	4.34	0.66	4.02	0.84	2.34	0.37	2.42	0.40	23.2
BN10	34.2	63.1	7.54	27.3	5.18	0.97	4.05	0.66	3.80	0.80	2.45	0.36	2.48	0.37	22.4
BN11	34.5	63.9	7.41	27.3	5.06	1.01	3.95	0.64	3.96	0.80	2.59	0.39	2.51	0.39	23.1
BN12	31.5	58.3	6.86	25.1	4.57	0.99	3.84	0.56	3.76	0.77	2.38	0.39	2.62	0.42	21.7
BN13	33.4	62.3	7.48	27.5	5.10	0.90	3.86	0.62	3.67	0.78	2.28	0.33	2.39	0.39	22.3
BN14	33.2	63.6	6.96	26.7	4.94	1.11	4.21	0.52	3.77	0.78	2.38	0.41	2.53	0.43	22.6
BN15	36.2	70.0	8.21	29.9	5.71	1.09	4.61	0.76	4.51	0.92	2.64	0.41	2.90	0.46	26.0
BN16	33.6	64.0	7.02	26.6	4.81	0.99	3.77	0.58	3.61	0.80	2.38	0.41	2.56	0.40	21.9
BN17	40.3	78.6	9.25	33.8	6.63	1.12	5.42	0.82	4.99	1.02	2.92	0.49	3.34	0.54	30.7
BN18	30.4	57.2	6.53	24.3	4.39	0.91	3.68	0.55	3.87	0.81	2.50	0.39	2.72	0.44	22.8
BN19	32.2	60.9	6.62	25.9	4.47	0.94	3.78	0.54	3.80	0.86	2.63	0.44	2.75	0.47	24.2
BN20	36.7	65.1	7.56	29.0	4.83	1.09	4.08	0.60	3.72	0.81	2.52	0.41	2.72	0.41	24.0
W1	25.4	61.7	5.02	19.3	3.46	0.65	2.42	0.39	2.42	0.50	1.52	0.24	1.61	0.27	13.8
W2	24.7	50.9	4.37	15.1	2.35	0.54	2.01	0.29	1.87	0.42	1.21	0.20	1.39	0.24	11.0
W3	24.1	56.7	4.88	18.0	2.96	0.75	2.66	0.37	2.41	0.52	1.62	0.27	1.80	0.29	14.5
W4	32.2	60.6	6.72	25.6	4.28	0.90	3.54	0.53	3.41	0.76	2.21	0.38	2.56	0.42	21.0
W5	36.8	70.3	7.65	28.7	5.11	1.06	3.93	0.57	3.64	0.75	2.23	0.39	2.45	0.45	22.0
W6	28.5	64.0	6.01	22.6	4.18	0.84	3.59	0.50	3.25	0.71	1.99	0.34	2.24	0.35	19.0
W7	29.5	67.7	6.00	23.0	3.87	0.85	3.16	0.44	2.84	0.59	1.76	0.29	1.92	0.32	17.6
W8	25.7	61.1	5.03	18.6	3.22	0.71	2.94	0.43	3.03	0.65	1.89	0.31	2.11	0.36	16.9
W9	28.8	62.9	6.10	23.0	4.14	0.88	3.64	0.50	3.38	0.70	2.01	0.33	2.11	0.36	19.0
W10	31.9	67.7	6.68	25.4	4.66	0.99	3.81	0.54	3.55	0.67	2.06	0.35	2.27	0.37	19.7
W11	44.6	87.1	9.17	35.3	6.03	1.17	5.09	0.74	5.08	1.09	3.15	0.52	3.52	0.57	31.2
W12	28.8	59.4	5.83	21.6	3.83	0.83	3.19	0.42	2.83	0.59	1.77	0.29	1.94	0.31	16.8
S1	30.3	53.4	6.02	23.2	3.89	0.90	2.97	0.42	2.79	0.57	1.62	0.28	1.74	0.30	15.7
S2	28.7	51.5	5.97	22.1	3.89	0.90	2.95	0.41	2.62	0.53	1.52	0.25	1.59	0.26	14.7

等, 2000; 叶玮等, 2008; 张玉芬等, 2013)。BH剖面中各个时期黄土特征与其西北部未受冰川影响的河流沉积物和上新世沙REE相似(图3c), 显示黄土在成因上与其有着密不可分的联系。BH剖面的黄土Nd-Sr同位素与怀特科组的河流样品和内布拉斯加州沙山样品均较为接近(图2), 反映了其物质来源主要与这两个地区有关。然而, 黄土样品, 特别是在BH黄土下部, 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 ε_{Nd} 与河流沉积物和上新世沙山样品存在显著的差异。黄土的 ε_{Nd} 更偏负, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值更高, 表明黄土除了河流样品代表的怀特科组之外还有一个或者多个其他的源区, 其具有特别负的 ε_{Nd} 和特别高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 。第二个源区可能与周边其他黄土沉积来源一样, 来自北美古老地盾的劳伦冰盖冰川沉积, 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高达0.73, ε_{Nd} 低至-24(Farmera et al., 2003)。

锶同位素组成可以用来指示壳、幔物质或两端元物质的混合比例(Faure, 1986)。如果所研究样品是两个段元混合作用的产物, 则通过两个端元组分中同位素比值和元素含量求解两端元的混合比例。

本文将Sr、Nd同位素代入两元混合方程, 模拟出每一个端元从0到100%的两条曲线(图2)。模拟结果显示BH剖面下部, 即约25~19 ka时期, 冰川物质贡献达45%以上, 而在BH剖面上部, 即18 ka以来, 冰川物质贡献约30%。Johnson等(1997)和Fairbanks等(2005)的研究表明劳伦冰盖在25~20 ka期间快速扩张, 这个时间与BH剖面中出现高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低的 ε_{Nd} 的时间几乎一致。另一方面, 内布拉斯加州紧邻末次冰期极盛期的劳伦冰盖(图1)。因此, 劳伦冰盖与PL黄土的快速沉积存在成因上的联系。但是劳伦冰盖物质传输并沉积到内布拉斯加的过程还需要进一步的探讨。可能与冰盖扩张对当地风况影响有关, 也可能与末次冰期存在但现在已经消失的河流有关, 其中位于内布拉斯加州中部的沙山可能也起到了部分作用。

4.2 黄土的化学风化特征与古气候意义

相对于上部大陆地壳, 比格内尔黄土明显亏损Na、Ca, 表明黄土沉积物可能遭受大陆化学风化, 但内布拉斯加州黄土的风化程度弱于中国洛川黄土(陈骏等, 2001)。因为Sr与Ca地球化学性质相似, 黄土沉积物中Sr的亏损进一步证明了古风尘曾经遭受了脱Na、脱Ca的化学风化特点。

CIA值表示为 $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) * 100$ (Nesbitt and Young, 1982), 是一种化学风化指数。这个参数可以有效地指示样品中长石风化成粘土矿物的程度, 与样品中粘土矿物/长石比值呈正比。图5利用 $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}$ (A-CN-K)三角模型(Nesbitt and Young, 1984)和化学蚀变指数(CIA)对比美国中部大平原黄土、中国洛川黄土、陆源页岩(典型UCC风化产物)和UCC的化学风化强度。大多数情况下, CIA的值的大小代表着化学风化的强弱(McLennan, 1993)。内布拉斯加黄土和古土壤的平均值为65.7, 介于UCC(56.9)和陆源页岩(75.3)之间, 小于洛川黄土(71.4)和古土壤(73.5)(图5)。图5中UCC风化方向近于平行 $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ 和 Al_2O_3 的连线。内布拉斯加州黄土分布集中, 位于UCC和陆源页岩的线上, 且略低于中国洛川黄土和古土壤。

化学风化强度常用于古气候重建中(Harnois, 1988; Fedo et al., 1995; Yang et al., 2004)。图6给出了内布拉斯加BH剖面CIA值、Na/K比值与碳酸盐含量的变化。其中, CIA值反映了化学风化程度, Na/K比是衡量样品中斜长石风化程度的指标。由于斜长石的风化速率远大于钾长石, 因此, 风化强度越强, Na/K比值越低(Nesbitt and Markovics, 1980), 碳酸盐的含量也在一定程度上反映风化淋溶强度(Brantley, 2008), 较强的风化导致碳酸盐的淋失。从图中可以看出, 18 ka至25 ka之前形成

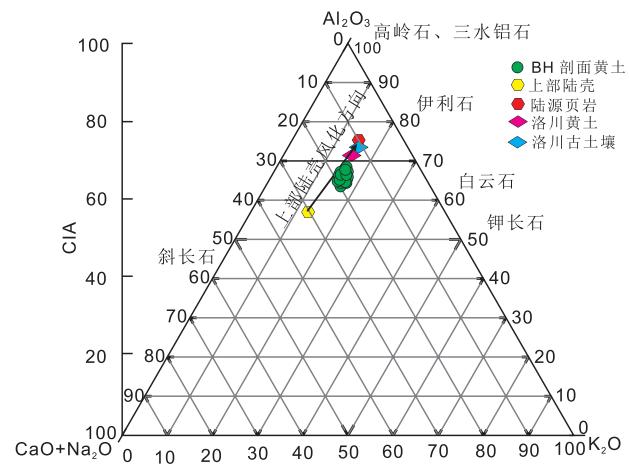
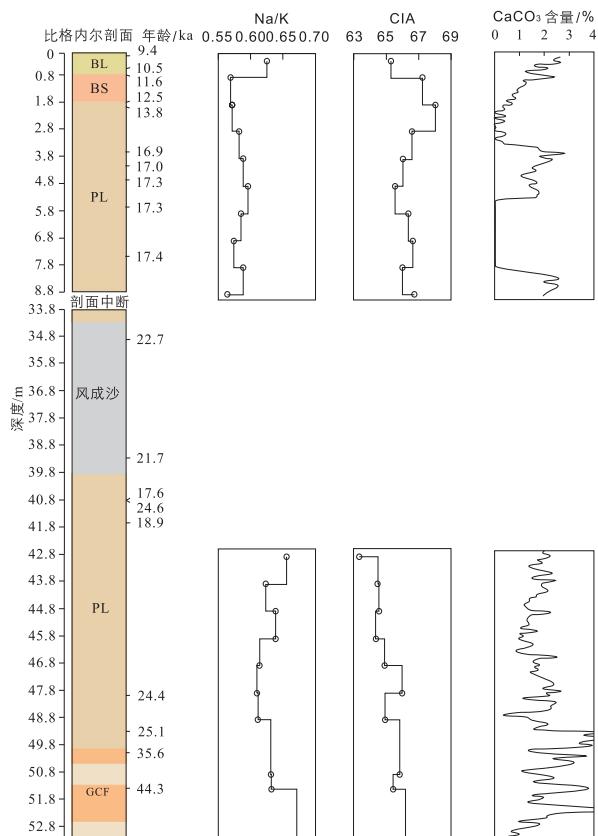


图5 内布拉斯加州黄土和中国洛川黄土、古土壤及UCC A-CN-K三角模型及CIA图解

Fig. 5 Nebraska loess, Chinese Luochuan loess and UCC A-CN-K triangular chart and CIA diagram



从左到右依次为: 黄土地层序, 测年数据, Na/K 比值, 碳酸盐含量及 CIA

图6 BH剖面中地层和测年数据(来自 Roberts et al., 2003; Mason et al., 2003, 2011; Muhs et al., 2008; Pigati et al., 2013and Mason et al., 2011)以及不同地球化学指标在BH剖面中的变化

Fig. 6 Loess unit and dating dates in Bignell Hill section, as well as different geochemical indicator change with time(Dating dates come from Roberts et al., 2003; Mason et al., 2003, 2011; Muhs et al., 2008; Pigati et al., 2013and Mason et al., 2011)

的BH下部黄土其CIA值较低, Na/K比值和碳酸盐含量较高, 反映了干冷的气候特点。值得注意的是, 末次冰期PL最高MAR时间正好发生在这段时期 (Roberts et al., 2003), 由此表明, 在该时期当地干冷的气候变得更有利大量粉尘物质的生成与堆积。而在18 ka以来形成的BH上部黄土, 其CIA值较高, Na/K比值和碳酸盐含量较低, 显示了气候趋于暖湿。

5 结论

内布拉斯加黄土的化学成分相对均一, 反映了风尘沉积的特点。黄土的Sr、Nd同位素与怀特

组的河流沉积和北部沙山较为接近, 说明怀特组沉积为黄土的主要源区, 锡同位素组成显示北美劳伦冰盖冰川沉积为黄土的另一个源区, 其对黄土的贡献达30%~45%。BH剖面的CIA、Na/K和碳酸盐含量变化表明, 在皮奥瑞亚黄土时期(约25~18 ka), 化学风化较弱, 气候干冷, 有助于风尘产生与堆积, 从而形成极高的质量累积速率。

致谢: 感谢国家自然基金(41230526; 41690111)对本文的资金支持。此外, 感谢美国威斯康星大学地理学院教授Mason对野外样品采集及区域地质背景认识的帮助和介绍; 感谢表生地球化学教育部重点实验室李高军老师、张文防博士、李涛、李乐、焦志敏等在实验测试上的帮助。

参考文献 (References):

- 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 2001. 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, 31(2): 136~145.
- 杨守业, 李从先, 张家强. 2000. 苏北滨海平原冰后期古地理演化与沉积物源研究[J]. 古地理学报, 2(2): 65~72.
- 叶玮, 杨立辉, 朱丽东, 等. 2008. 中亚热带网纹红土的稀土元素特征与成因分析[J]. 地理科学, 28(1): 40~44.
- 张玉芬, 李长安, 邵磊, 等. 2013. “巫山黄土”的稀土元素特征与成因[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 38(1): 181~187.
- Aleinikoff J N, Muhs D R and Fanning C M. 1998. Isotopic evidence for the sources of late Wisconsin (Peoria) loess, Colorado and Nebraska: Implications for paleoclimate [J]. Dust Aerosols, Loess Soils and Global Change. Washington State University College of Agriculture and Home Economics, Miscellaneous Publication No. MISC0190, Pullman: 124~127.
- Aleinikoff J N, Muhs D R, Bettis E A, et al. 2008. Isotopic evidence for the diversity of late Quaternary loess in Nebraska: Glaciogenic and nonglaciogenic sources [J]. Geological Society of America Bulletin, 120(11~12): 1362~1377.
- Bettis E A, Muhs D R, Roberts H M, et al. 2003. Last glacial loess in the conterminous USA [J]. Quaternary Science Reviews, 22(18): 1907~1946.
- Brantley S L. 2008. Kinetics of Mineral Dissolution [M]. Kinetics of Water-Rock Interaction. Springer New York, 151~210.
- Chen J, Li G, Yang J, et al. 2007. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: implications for the provenances of Asian dust [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71(15): 3904~3914.
- Fairbanks R G, Mortlock R A, Chiu T C, et al. 2005. Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals [J]. Quaternary Science Reviews, 24: 1781~1796.
- Farmer G L, Barber D and Andrews J. 2003. Provenance of Late Quaternary ice-proximal sediments in the North Atlantic: Nd, Sr and Pb isotopic evidence [J]. Earth and Planetary Science Letters, 209: 227~243.
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology [M]. Second edition. New York :

- John Wiley and Sons.
- Fedo C M, Nesbitt H W and Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. *Geology*, 23(10): 921–924.
- Follmer L R. 1996. Loess studies in central United States: Evolution of concepts [J]. *Engineering Geology*, 45(1–4): 287–304.
- Fullerton D S, Bush C A and Pennell J N. 2003. Map of surficial deposits and materials in the eastern and central United States (east of 102 degrees west longitude): U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I-2789 [C//G], scale 1: 2, 500, 000, 1 sheet.
- Fullerton D S, Colton R B, Bush C A, et al. 2004. Map showing spatial and temporal relations of mountain and continental glaciations on the northern plains, primarily in northern Montana and northwestern North Dakota [C] // U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 2843 scale 1:1,000,000, 1 sheet.
- Harnois L. 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering [J]. *Sedimentary Geology*, 55(3–4): 319–322.
- Ji J, Ge Y, Balsam W, et al. 2009. Rapid identification of dolomite using a Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR): A fast method for identifying Heinrich events in IODP Site U1308 [J]. *Marine Geology*, 258 (1): 60–68.
- Johnson W H, Hansel A K, Bettis III E A, et al. 1997. Late Quaternary temporal and event classifications, Great Lakes region, North America [J]. *Quaternary Research*, 47: 1–12.
- Johnson W C and Willey K L. 2000. Isotopic and rock magnetic expression of environmental change at the Pleistocene–Holocene transition in the central Great Plains [J]. *Quaternary International*, 67(1): 89–106.
- Johnson W C, Willey K L, Mason J A, et al. 2007. Stratigraphy and environmental reconstruction at the middle Wisconsinan Gilman Canyon formation type locality, Buzzard's Roost, southwestern Nebraska, USA [J]. *Quaternary Research*, 67(3): 474–486.
- Leigh D S and Knox J C. 1994. Loess of the Upper Mississippi Valley driftless area [J]. *Quaternary Research*, 42(1): 30–40.
- Mason J A. 2001. Transport direction of Peoria Loess in Nebraska and implications for loess sources on the central Great Plains [J]. *Quaternary Research*, 56(1): 79–86.
- Mason J A, Jacobs P M, Hanson P R, et al. 2003. Sources and paleoclimatic significance of Holocene Bignell loess, central Great Plains, USA [J]. *Quaternary Research*, 60(3): 330–339.
- Mason J A, Joeckel R M and Bettis E A. 2007. Middle to Late Pleistocene loess record in eastern Nebraska, USA, and implications for the unique nature of Oxygen Isotope Stage 2 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(5): 773–792.
- Mason J A, Miao X, Hanson P R, et al. 2008. Loess record of the Pleistocene–Holocene transition on the northern and central Great Plains, USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 27(17): 1772–1783.
- Mason J A, Swinehart J B, Hanson P R, et al. 2011. Late Pleistocene dune activity in the central Great Plains, USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 30(27): 3858–3870.
- Muhs D R, Bettis E A, Aleinikoff J N, et al. 2008. Origin and paleoclimatic significance of late Quaternary loess in Nebraska: evidence from stratigraphy, chronology, sedimentology, and geochemistry [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 120(11–12): 1378–1407.
- Muhs D R, Bettis E A, Roberts H M, et al. 2013. Chronology and provenance of last-glacial (Peoria) loess in western Iowa and paleoclimatic implications [J]. *Quaternary Research*, 80(3): 468–481.
- Miao X, Mason J, Goblet R J, et al. 2005. Loess record of dry climate and aeolian activity in the early-to mid-Holocene, central Great Plains, North America [J]. *The Holocene*, 15(3): 339–346.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- Nesbitt H W and Markovics G. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1659–1666.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 299 (5885): 715–717.
- Nesbitt H W and Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523–1534.
- Pigati J S, McGeehin J P, Muhs D R, et al. 2013. Radiocarbon dating late Quaternary loess deposits using small terrestrial gastropod shells [J]. *Quaternary Science Reviews*, 76: 114–128.
- Roberts H M, Muhs D R, Wintle A G, et al. 2003. Unprecedented last-glacial mass accumulation rates determined by luminescence dating of loess from western Nebraska [J]. *Quaternary Research*, 59(3): 411–419.
- Ruhe R V. 1983. Depositional environment of late Wisconsin loess in the midcontinental United States [J]. *Late-Quaternary environments of the United States*, 1: 130–137.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. London: Blackwell: 57–72.
- Yang S Y, Li C X, Yang D Y, et al. 2004. Chemical weathering of the loess deposits in the lower Changjiang Valley, China, and paleoclimatic implications [J]. *Quaternary International*, 117(1): 27–34.