

文章编号: 0379-1726(2004)02-0185-06

最近 13 万年以来洛川黄土剖面中 固定铵态氮的古气候意义

饶文波^{1,2}, 罗泰义¹, 高振敏¹, 李晓彪¹

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 对 13 万年以来洛川黄土-古土壤序列中固定铵态氮进行了分析。末次间冰期 S_1 古土壤中固定铵态氮含量最高, 其次为冰后期 S_0 古土壤, 末次冰期形成的马兰黄土最低; 而且, 固定铵态氮的分布在马兰黄土中也能体现出三次小的低-高值的波动特征。洛川黄土 13 万年以来固定铵态氮的分布与磁化率和 $< 2 \mu\text{m}$ 组分的分布相似。在此基础上, 利用马兰黄土中粒度与固定铵态氮的相关关系, 计算了 S_1 古土壤中固定铵的分布, 并与实测结果进行了对比, 推测 S_1 古土壤中固定铵态氮有轻微的损失, 尽管如此, S_1 古土壤中固定铵态氮含量仍然高于黄土。鉴于黄土-古土壤序列中固定铵态氮的分布与粉尘粒度有密切的关系, 能与气候变化较好地对应, 它可视为反映黄土高原区东亚冬季风强-弱周期性变化较好的替代性指标。

关键词: 黄土; 固定铵态氮; 古气候; 洛川; 陕西省

中图分类号: P595; X142

文献标识码: A

0 引言

固定铵, 也称非交换性铵, 就是被吸持在(层状)硅酸盐矿物晶体结构中的 NH_4^+ 。这种内陷的 NH_4^+ , 像 K^+ 一样能填入由六个氧环形成的间隙晶格空隙中, 而且它能中和因同晶取代作用造成的负电荷(如 Mg^{2+} 取代八面体晶格层中的 Al^{3+} 和 Al^{3+} 取代四面体晶格层中的 Si^{4+} 所造成的负电荷)。由于其独特的地球化学性质, 固定铵的分析在地质学、环境学和农学等多领域都有成功的应用。在农学领域里, 固定铵的释放和固定机理的研究为解决土壤肥力提供理论依据^[1,2]; 在环境学方面, 特别是在海洋湖泊氮的富营养化和环境治理方面, 固定铵已成为专家学者们日趋关注的问题^[3]; 在地学领域里, 固定铵的分析在解决岩石成因和类型的判断^[4]、矿床成因及物质来源^[5]的确定等方面具有重要的理论指示意义。

中国西北的黄土是重建古气候古环境理想的信息库, 它完整地记录了 2.4 Ma 的古气候信息。到目前为止, 此方面的研究已涌现出许多宝贵的成果, 例如, 磁化率^[6]、粉尘粒度^[7]、同位素^[8,9]、元素地球化

学^[10-12]和 $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$ 比值^[13]等。而对于黄土中氮的古循环研究则十分缺乏。氮是植物生长的三大营养元素之一, 也是与全球气候变化联系最紧密的元素之一。固定铵作为土壤氮素的重要组分, 在氮循环过程中起着不可忽视的作用, 它被矿物固定或释放与生物产量和气候条件有着密切的关系。本文拟着重研究 13 万年以来洛川黄土-古土壤序列中固定铵态氮的含量变化特征及其古气候意义。

1 材料与方法

样品采自陕西省洛川县坡头村黄土-古土壤剖面 ($35^{\circ}45'N$, $109^{\circ}25'E$)。采样层位包括黑垆土 (S_0) 下部、马兰黄土 (L_1)、离石黄土第一层古土壤 (S_1)。 S_0 、 L_1 层段及 L_1 向 S_1 过渡处按 10 cm 间距采样, 每个样在野外用四分法挑取约 500 g; S_1 层段按 30 cm 间距采样, 每个样在野外用四分法挑取约 1 000 g。共采集 95 个样品。将样品风干, 混匀, 取所需数量, 磨细, 过 100 目筛, 保存。

固定铵态氮含量的测定有多种方法, 归纳起来, 主要有三种: 直接蒸馏法、高温预处理法和 HF 法。

收稿日期: 2003-05-07; 接受日期: 2003-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(49902024)

作者简介: 饶文波(1973-), 男, 博士, 地球化学专业。E-mail: raowenbo@163.com

Silva-Bremner 法^[14]是在前人基础上改进的测氮法, 由于没有明显的缺陷, 目前已被广泛用来测定矿物固定铵态氮的含量。此方法的基本内容是: 首先, 用 K₂OBr 溶液分解土壤中的有机氮; 其次, 用 KCl 溶液洗去土壤溶液中的交换性和水溶性铵离子; 再次, 用 5 mol/L HF 和 1 mol/L HCl 的混合液充分破坏土壤中的粘土矿物; 最后, 把处理好的土壤溶液装入蒸馏瓶中, 进行蒸馏, 滴定, 所测结果为固定铵态氮的含量。为保证数据的可靠性, 做如下条件实验: 一个样品分别取 2 g 和 1 g, 各测 10 次, 所测结果见表 1。从表 1 可知, 20 mL 的 HF-HCl 溶液能完全破坏掉 1 g 黄土-古土壤样品, 而不能完全破坏 2 g 的样品。样品量少 (0.5 g) 的话, 样品能被完全破坏, 但是可能会带来大的误差。另外, 试剂量变大, 给蒸馏带来很大的不便; 试剂量变小, 可能不完全破坏样品。因此, 本实验选取样品量为 1 g, 试剂不变的方案。本次实验的标准偏差为 1.8 μg/g。在北京大学城市与环

境学系 BaringtonMS2 磁化率仪上完成低频磁化率 (LF) 的测定, 测试所需的样品量为 10 g。

按五分法对洛川黄土 S₀-L₁-S₁ 序列进行划分^[15], 依次为 S₀ (全新世古土壤)、L₁LL₁ (末次冰期盛冰阶黄土)、L₁SS₁ (末次冰期间冰阶弱土壤化黄土)、L₁LL₂ (末次冰期始冰阶黄土) 和 S₁ (末次间冰期古土壤), 并将所测定的固定铵态氮、磁化率及粒度数据绘制成图 1。

2 结果与讨论

2.1 固定铵态氮的分布特征

在 S₀-L₁-S₁ 序列中固定铵态氮含量在 134 ~ 187 μg/g 之间, 平均为 160 μg/g。在古土壤中, 固定铵明显表现出高值, 相反, 在黄土中表现低值 (表 2)。整个剖面中固定铵态氮的分布曲线表现出三次大的

表 1 同一样品不同质量的固定铵态氮含量 (μg/g)

Table 1 Fixed-NH₄⁺-N content in different weights of the same sample

实测次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值	标准偏差
1 g	174.11	175.33	174.40	173.19	173.90	169.18	173.70	174.94	172.83	175.92	173.75	1.8
2 g	138.52	144.22	144.43	138.16	143.78	133.74	148.33	138.27	142.77	150.94	142.32	5.0

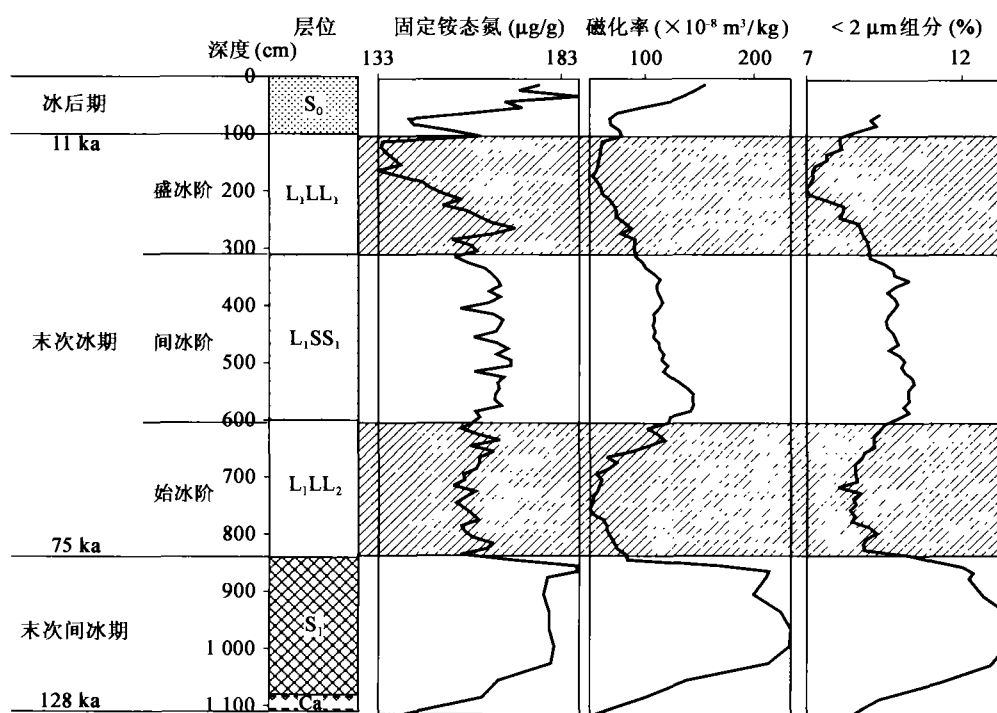


图 1 S₀-L₁-S₁ 序列中固定铵态氮、磁化率以及 < 2 μm 组分含量 (鹿化煜提供) 的分布

Fig. 1 Distribution of fixed-NH₄⁺-N, magnetic susceptibility and content of the < 2 μm fraction in the S₀-L₁-S₁ sequence
Ca. 钙结核层。

表 2 洛川黄土剖面中固定铵态氮、磁化率和 $< 2 \mu\text{m}$ 组分含量Table 2 Fixed- $\text{NH}_4^+\text{-N}$, magnetic susceptibility and content of the $< 2 \mu\text{m}$ fraction in the Luochuan loess section

层位(样品数)	固定铵态氮($\mu\text{g/g}$)		磁化率($\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)		$< 2 \mu\text{m}$ 组分(%)	
	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值
S_0 (10)	141 ~ 187	163	67.60 ~ 155.55	102.24	8.56 ~ 9.83	9.35
L_1 (74)	134 ~ 170	158	49.10 ~ 142.50	89.63	7.47 ~ 11.58	8.50
S_1 (11)	140 ~ 187	174	53.55 ~ 233.25	180.27	8.82 ~ 13.94	12.40
S + L(95)	134 ~ 187	160	49.10 ~ 233.25	101.45	7.47 ~ 13.90	9.87
L_1LL_1 (21)	134 ~ 170	149	52.15 ~ 91.15	70.03	7.47 ~ 9.50	8.50
L_1SS_1 (29)	155 ~ 169	164	97.50 ~ 142.50	118.22	9.96 ~ 10.92	10.40
L_1LL_2 (24)	153 ~ 169	159	49.10 ~ 117.60	72.22	8.47 ~ 10.80	9.39

波动特征,即 L_1 中固定铵态氮含量最低, S_0 中稍高,而 S_1 中最高。在 马 兰 黄 土 中,固 定 铵 态 氮 含 量 分 布 又 体 现 出 三 次 小 的 波 动 特 征,即 L_1LL_1 层 中 固 定 铵 态 氮 含 量 最 低, L_1LL_2 层 中 稍 高,而 L_1SS_1 层 中 最 高(图 1 和 表 2)。固 定 铵 态 氮 在 剖 面 中 的 分 布 与 磁 化 率、 $< 2 \mu\text{m}$ 组 分 含 量 的 分 布 有 相 似 性(图 1 和 表 2) 和 良 好 的 相 关 关 系(图 2)。因 此, S_0 - L_1 - S_1 序 列 中 固 定 铵 态 氮 的 分 布 与 气 候 条 件 的 变 化 能 较 好 对 应,在 一 定 程 度 上 反 映 了 古 气 候 周 期 性 振 荡 的 特 点。

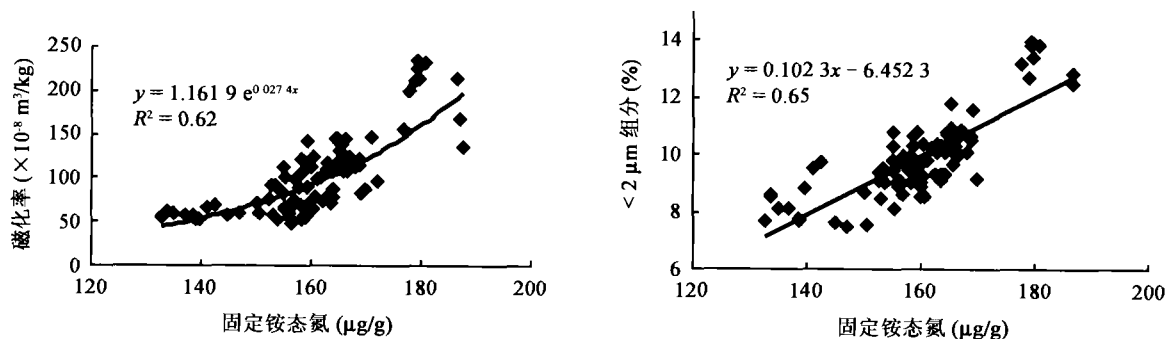
2.2 影响固定铵态氮分布的因素

综合黄土物质来源的分析^[16]和已有的土壤中氮循环研究成果^[17],黄土-古土壤中固定铵态氮的来源可能有三种:(1)黄土母质——粉尘中固有的铵;(2)土壤溶液中由大气降水带来的铵离子;(3)有机氮矿化产生的铵离子。粉尘中固有的铵是由黄土母质——粉尘携带而来的铵离子,这部分铵离子可能是粉尘在堆积成黄土以前在所经历的搬运和沉积过程中被固定下来的,也可能是沙漠、戈壁中各类岩石中固有的铵离子,或者两者兼而有之,与黄土母岩类型和东亚冬季风有关。由大气降水带来的铵离

子和有机氮矿化产生的铵离子是粉尘堆积成黄土后由生物气候条件的变化造成的,与东亚夏季风有关。因此,黄土-古土壤中固定铵态氮的含量主要受三个方面因素的影响:(1)黄土母质——粉尘中固有的铵含量;(2)粉尘堆积时的粒度;(3)粉尘沉积后遭受的风化成壤作用的强度。

黄土的来源及化学成分的均一性一直没有一个清晰的定论。到目前为止,大多数学者倾向于这样一种观点:黄土-古土壤主要来源于沙漠、戈壁等地区,并且其母质在堆积成黄土之前,就已经经历了沉积和搬运作用,而且,文启忠等^[18]通过大量的实际工作表明,粉尘的化学成分是均一的,并可视之为上地壳的平均克拉克值。因此,固定铵态氮含量在黄土剖面中的变化主要受粉尘粒度和粉尘堆积后风化成壤作用的制约。

粉尘堆积时的粒度主要取决于东亚冬季风的强弱,粉尘的粒度粗细常常决定了其中所含粘土矿物的多少。冬季风强盛,堆积的粉尘粒度粗,反之则细。堆积成黄土的粗颗粒粉尘含较多量的石英和长石等碎屑矿物;细颗粒粉尘以细粒物质为主,特别是以伊利石、绿泥石和蒙脱石等粘土矿物为主^[16]。而

图 2 固定铵态氮与磁化率、 $< 2 \mu\text{m}$ 组分含量(鹿化煜提供)的相关关系Fig. 2 Correlation between magnetic susceptibility and content of the $< 2 \mu\text{m}$ fraction and fixed- $\text{NH}_4^+\text{-N}$

矿物所固定的铵主要是被嵌入在层状硅酸盐等粘土矿物的层间之中,因此,粘土矿物是黄土中矿物固定态铵的主要载体。如果粉尘堆积时,细粒物质多,那么固定铵的含量相对高,反之则低。

粉尘堆积后风化成壤作用的强度受东亚夏季风强弱的控制,其作用的程度决定了次生粘土矿物的生成和原有粘土矿物的转变程度,从而注定了黄土剖面中粘土矿物固定铵的能力和释放铵的能力要发生变化。在黄土高原区东亚夏季风的强弱主要表现在区域性降雨量的多少和温度的变化上^[11]。一方面,降水量增加,土壤溶液中铵离子浓度降低,固定铵的释放速率相对高;同时,降水量增加,导致了堆积时粉尘中的矿物发生泥化,碳酸盐物质淋失,粘土矿物相对增多。另一方面,在有降水量的情况下,温度升高,微生物活动频繁,黄土与大气、水进行能量交换的强度就增加,黄土中固定铵所保持的原有动态平衡被破坏,继而建立新的动态平衡。

本质上,粉尘粒度和风化成壤作用两种因素对黄土中固定铵分布的影响程度集中表现在黄土-古土壤中粘土矿物的性质、类型以及含量的变化等方面。

2.3 固定铵态氮的分布与东亚冬季风的关系

不同土壤由于其矿物组成和粘粒含量不同,对铵的固定能力存在差异。研究表明^[19],伊利石固定铵的能力略小于蛭石,而大于蒙脱石;高岭石属于1:1型粘土矿物,不具有固定铵的能力;绿泥石属于2:1型粘土矿物,基本上不固定铵。

洛川黄土-古土壤中粘土矿物组成相似,只是含量不同。粘土矿物有伊利石、高岭石、蒙脱石、绿泥石、蛭石及少量无序和(或)有序混合层结构矿物^[16],其中,伊利石 > 50%,为碎屑成因^[20]。因此,洛川黄土中伊利石是粘土矿物的主要部分,与固定铵态氮的分布有密切的关系。

洛川马兰黄土中,在盛冰阶和始冰阶时期年平均温度在0℃左右,年平均降水量在200mm以下;在间冰阶时期年平均温度在3℃左右,年平均降水量在260mm左右^[16]。马兰黄土形成时期气候总体上干旱、寒冷,由于缺水,风化作用以物理风化为主,伊利石保存较好,没有膨胀层^[21]。因此,马兰黄土中固定铵态氮不受风化成壤作用的影响,而与粉尘粒度有关,因为粉尘粒度决定了粘土矿物的含量,而粘土矿物的含量常常又决定了固定铵态氮含量。在S₁层古土壤形成的末次间冰期时期平均温度为

12℃,年平均降水量在600~750mm之间^[15],此时期的气候温暖潮湿,伊利石含有少量的膨胀层(<3%)^[21]。因此,S₁层古土壤中固定铵态氮可能遭受了风化成壤作用的影响。

马兰黄土中固定铵态氮含量与粒度有较好的相关性, $R^2=0.54$,线性回归方程为 $y=6.8957x+92.215$ (图3)。在S₁古土壤中,如果不考虑粉尘沉积后风化成壤作用的影响,那么粉尘沉积后,固定铵态氮含量与粒度的关系也符合上述回归方程式。由此,可推算出S₁层古土壤中在不受风化成壤作用的影响下固定铵态氮的原始含量(表3)。S₁层古土壤中固定铵态氮的推算值与测定值之差就是粉尘堆积后受风化成壤作用影响而变化的固定铵态氮含量。从表3中可知,在S₁层古土壤的顶部(接近L₁的底部) Δ 为-9 $\mu\text{g/g}$ 和-6 $\mu\text{g/g}$,说明在此部位铵是

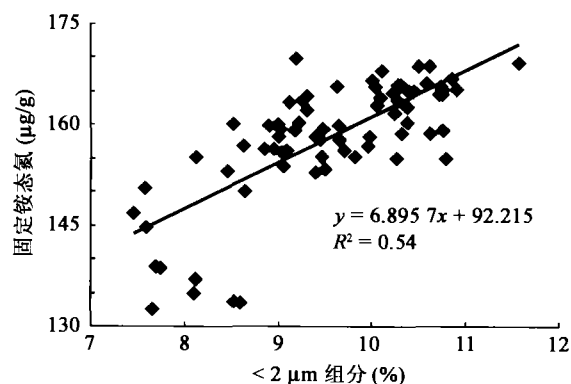


图3 洛川马兰黄土剖面中固定铵态氮与<2 μm 组分含量的关系

Fig. 3 Relationship between fixed- $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and content of the < 2 μm fraction in Malan loess, Luochuan

表3 S₁古土壤层中固定铵态氮的推算值和测定值($\mu\text{g/g}$)
Table 3 Calculated and measured values of fixed- $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in S₁ paleosol

样品号	推算值	测定值	Δ (推算值-测定值)
PTXS1-3	178	187	-9
PTXS1-4	181	187	-6
PTXS1-5	180	179	1
PTS1-1	183	178	5
PTS1-2	188	179	9
PTS1-3	187	179	8
PTS1-4	188	181	7
PTS1-5	185	180	5
PTS1-6	173	165	8
PTS1-7	160	161	-1
PTS1-L2	153	140	13
平均值	178	174	4

固定的;在中部和下部 Δ 基本上为正值,说明铵是相对释放的,或者说是损失的。总体上,整个 S_1 剖面中固定铵是损失的,暗示了在固定铵的固定和释放的过程中相对于固定速率来说,固定铵的释放速率快,原因主要是末次间冰期降水量大,稀释了土壤溶液中的铵离子浓度,促使了固定铵的释放,另外就是在有降水量的基础上,温度升高,植被发育,吸收土壤溶液中的铵离子;还有其他的一些原因,如硝化作用和氨的挥发等都有可能引起土壤溶液中的铵离子浓度降低,使粘土矿物固定的铵释放出来。

但是,在 S_1 层古土壤中, Δ 值的变化并不大,最大变化出现在 S_1 层古土壤底部,才 $13 \mu\text{g/g}$ (表 3),这说明了 S_1 层古土壤形成时,其所受的风化成壤作用强度并不大。这一结论与季峻峰等^[21]所认为的伊利石含有少量的膨胀层,少部分发生退变的论点一致。

综上所述,尽管有部分固定铵的损失,但是,在 S_1 层古土壤中固定铵态氮含量仍然明显高于马兰黄土(表 2 和图 1)。因此,在 S_0 - L_1 - S_1 序列中固定铵态氮的含量变化与粉尘堆积时粒度的变化有密切的成因联系,进一步反映了黄土高原区东亚冬季风强-弱的周期性变化。

3 结 论

13 万年以来洛川黄土-古土壤序列中固定铵态氮的含量在 $134 \sim 187 \mu\text{g/g}$ 之间变化,其分布曲线与磁化率、 $< 2 \mu\text{m}$ 组分的变化曲线相似,表明其在一定程度上反映了古气候的冷-暖周期性变化。

利用马兰黄土中粉尘粒度与固定铵态氮的相关关系,恢复了 S_1 层古土壤形成时期粉尘堆积时携带的固定铵态氮的原始分布特征。在 S_1 层古土壤中固定铵的释放速率稍大于固定速率,总体上,固定铵是亏损的。尽管这样, S_1 层古土壤中固定铵态氮含量仍然高于黄土。因此,13 万年以来洛川黄土剖面固定铵态氮与粉尘粒度有密切的关系,反映了黄土高原区东亚冬季风的强-弱周期性变化。

中国科学院地球环境研究所鹿化煜研究员提供了粒度数据,在此表示真诚的感谢。

参考文献(References):

[1] Schneiders M, Scherer H W. Fixation and release of ammonium in flooded rice soils as affected by redox potential [J]. *Eur J Agron*, 1998, 8(3-4): 181-189.

- [2] 汪晓丽,封克,汤炎,等. 土壤矿物层间电荷组成与固定态铵的释放 [J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2001, 4(3): 38-41.
Wang Xiao-li, Feng Ke, Tang Yan, *et al.* Composition of layer charge in clay mineral and the release of fixed ammonium [J]. *J Yangzhou Univ (Nat Sci ed)*, 2001, 4(3): 38-41 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王雨春. 贵州红枫湖、百花湖沉积物-水界面营养元素(磷、氮、碳)的生物地球化学作用[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2001. 180-183.
Wang Yu-chun. Biogeochemical processes of nutrients (P, N and C) at the sediment-water interface in two reservoirs: Hongfeng Hu and Baihua Hu, Guizhou, China [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2001. 180-183 (in Chinese with English abstract).
- [4] Cooper J E, Bradley A D. The ammonium content of granites in the English lake district [J]. *Geol Mag*, 1990, 127: 579-586.
- [5] 黄智龙,刘丛强,肖化云,等. 云南老王寨金矿煌斑岩固定铵(NH_4^+)地球化学特征[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 27-33.
Huang Zhi-long, Liu Cong-qiang, Xiao Hua-yun, *et al.* The NH_4^+ geochemistry of lamprophyres in Laowangzhai gold orefield, Yunnan Province [J]. *Geol Rev*, 2001, 47(1): 27-33 (in Chinese with English abstract).
- [6] An Zhisheng, Kukla G J, Proter S C, *et al.* Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 years [J]. *Quat Res*, 1991, 36(1): 29-36.
- [7] 鹿化煜,安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. *中国科学(D)*, 1998, 28(3): 278-283.
Lu Hua-yu, An Zhi-sheng. Paleoclimatic significance of loess granularity compositions in Loess Plateau [J]. *Sci China (D)*, 1998, 28(3): 278-283 (in Chinese).
- [8] 韩家林,姜文英,吕厚远,等. 黄土中钙结核的碳氧同位素研究(二)碳同位素及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 1995, 15(4): 367-377.
Han Jia-mao, Jiang Wen-ying, Lü Hou-yuan, *et al.* Carbon and oxygen isotope compositions of carbonate concretions in loess (Part 2): Carbon isotope and paleo-aridity [J]. *Quat Sci*, 1995, 15(4): 367-377 (in Chinese with English abstract).
- [9] 盛雪芬,陈骏,杨杰东,等. 不同粒级黄土-古土壤中碳酸盐碳氧稳定同位素组成及其古环境意义 [J]. *地球化学*, 2002, 31(2): 105-112.
Sheng Xue-fen, Chen Jun, Yang Jie-dong, *et al.* Carbon and oxygen isotopic composition of carbonate in different grain size fractions from loess-paleosol sequences, China [J]. *Geochimica*, 2002, 31(2): 105-112 (in Chinese with English abstract).
- [10] 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]. *Quat Res*, 1999, 51(3): 215-219.
- [11] 杨石岭,丁仲礼. 7.0 Ma 以来中国北方风尘沉积的游离铁/全铁值变化及其古季风指示意义[J]. *科学通报*, 2000, 45(22): 2 453-2 456.

- Yang Shi-ling, Ding Zhong-li. Seven million-year iron geochemistry record from a thick eolian red clay-loess sequence in Chinese Loess Plateau and the implications for paleomonsoon evolution [J]. Chinese Sci Bull, 2001, 46(4): 337 ~ 341.
- [12] 谭红兵, 马海州, 鹿化焜, 等. 高原黄土 Sr、CaO 的古气候意义以及记录的环境变化[J]. 地球化学, 2002, 31(5): 409 ~ 414.
- Tan Hong-bing, Ma Hai-zhou, Lu Hua-yu, *et al.* Paleoclimate significance of Sr and CaO in acid-soluble fraction of high plateau loess deposit in Xining Basin [J]. Geochimica, 2002, 31(5): 409 ~ 414 (in Chinese with English abstract).
- [13] 饶文波, 罗泰义, 高振敏, 等. 最近 13 万年以来洛川黄土剖面中 P_{org}/P_{inorg} 分布及其古气候指示意义[J]. 地球化学, 2003, 32(4): 343 ~ 348.
- Rao Wen-bo, Luo Tai-yi, Gao Zhen-min, *et al.* P_{org}/P_{inorg} fluctuation in the Luochuan loess section during the last 130 ka and its paleoclimatic significance [J]. Geochimica, 2003, 32(4): 343 ~ 348 (in Chinese with English abstract).
- [14] Page Al, Miller R H, Keeney D R. Methods of Soil Analysis [M]. 2nd ed. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1982. 595 ~ 624.
- [15] Yang J D, Chen J, An Z S, *et al.* Variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of calcites in Chinese loess: A proxy for chemical weathering associated with the East Asian summer monsoon [J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2000, 157(2): 151 ~ 159.
- [16] 刘东生, 卢演涛, 郑洪汉, 等. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 1 ~ 412.
- Liu Tungsheng, Lu Yan-chou, Zheng Hong-han, *et al.* Loess and the Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985. 1 ~ 412 (in Chinese).
- [17] Stevenson F J. Nitrogen in Agricultural Soils [M]. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1982. 950p.
- [18] 文启忠, 刁桂仪, 耿安松, 等. 中国黄土地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 1 ~ 285.
- Wen Qi-zhong, Diao Gui-yi, Geng An-song, *et al.* Chinese Loess Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989. 1 ~ 285 (in Chinese).
- [19] 朱维琴, 章永松, 林咸永. 土壤矿物固定态铵研究进展 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 333 ~ 335.
- Zhu Wei-qin, Zhang Yong-song, Lin Xian-yong. Advances in the studies of mineral nonexchangeable ammonium in soils [J]. Soil Environ Sci, 2000, 9(4): 333 ~ 335 (in Chinese with English abstract).
- [20] Ji Jun-feng, Chen Jun, Lu Hua-yu. Origin of illites in the Luochuan loess section: Evidence from TEM study [J]. Chinese Sci Bull, 1999, 44(4): 372 ~ 375.
- [21] 季峻峰, 陈骏, 王洪涛. 陕西洛川黄土 - 占土壤剖面中伊利石结晶度: 黄土物质来源和古气候的指示 [J]. 地质论评, 1997, 43(2): 181 ~ 185.
- Ji Jun-feng, Chen Jun, Wang Hong-tao. Crystallinity of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence, Shaanxi Province: Indicators origin and paleoclimate of loess [J]. Geol Rev, 1997, 43(2): 181 ~ 185 (in Chinese with English abstract).

Paleoclimatic significance of fixed- NH_4^+ -N in the Luochuan loess section during the last 130 ka

RAO Wen-bo^{1,2}, LUO Tai-yi¹, GAO Zhen-min¹, LI Xiao-biao¹

(1. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Fixed- NH_4^+ -N in the Luochuan loess section during the last 130 ka is investigated. The results show that fixed- NH_4^+ -N content is the highest in S_1 paleosol which formed in the last interglacial period, slightly lower in S_0 layer which formed in the post-glacial period, and the lowest in Malan loess which formed in the last glacial period. In addition, there are three low-high value fluctuations of fixed- NH_4^+ -N in the Malan loess. Distribution of fixed- NH_4^+ -N is similar to that of magnetic susceptibility and the $< 2 \mu\text{m}$ fraction in the S_0 - L_1 - S_1 sequence. The distribution of this type of N in S_1 paleosol is analyzed in detail using the relationship between granularity and fixed- NH_4^+ -N in the Malan loess of the Luochuan section. Although fixed- NH_4^+ -N is slightly depletion in S_1 paleosol, it is higher than that in loess. Consequently, distribution of fixed- NH_4^+ -N has close relationship with the $< 2 \mu\text{m}$ fraction of aeolian dust in the Luochuan loess-paleosol sequences, and is much matched to paleoclimatic change, which is regarded as a better proxy indicator recording the information of winter monsoon in the Chinese Loess Plateau.

Key words: loess; fixed- NH_4^+ -N; paleoclimate; Luochuan; Shaanxi Province

CLC number: P595; X142

Document code: A