

文章编号: 0379 - 1726(2003)04 - 0343 - 06

# 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

饶文波<sup>1,2</sup>, 罗泰义<sup>1</sup>, 高振敏<sup>1</sup>, 李晓彪<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 对末次间冰期以来洛川黄土进行了有机磷/无机磷( $P_{org}/P_{inorg}$ )比值测量。结果表明,黄土中  $P_{org}/P_{inorg}$  比值的分布主要受降水量和温度的影响,是有机磷和无机磷在不同时期随气候变化相互转化的结果。此指标的变化与黄土-古土壤的变化大致相关,与洛川黄土磁化率曲线相一致,与深海氧同位素可进行很好的对比。此比值与夏季风强弱程度乃至与全球气候变化有密切的联系。 $P_{org}/P_{inorg}$  比值可作为一种反映古气候环境变迁的新指标。

**关键词:** 有机磷/无机磷( $P_{org}/P_{inorg}$ ); 古气候; 13 万年; 黄土; 洛川

**中图分类号:** P593; P532      **文献标识码:** A

## 0 引言

洛川剖面是中国中部典型的黄土剖面,是重建第四纪古气候演化历史的重要信息库。到目前为止,研究者们对此剖面已进行了深入研究,建立了许多直接和间接的指示古气候环境变化的指标,如磁化率<sup>[1]</sup>、粒度特征<sup>[2]</sup>、C/O 同位素组成变化<sup>[3-5]</sup>、<sup>10</sup>Be<sup>[6]</sup>、化学组分<sup>[7,8]</sup>和植物孢粉<sup>[9]</sup>等。黄土粒度变化指示了冬季风的强度变化及沉积区与物源区的距离远近;磁化率反映了夏季风的强弱变化<sup>[1,10,11]</sup>。而现存的黄土-古土壤序列是东亚季风环流作用的产物<sup>[12]</sup>,其中的黄土是在冷干期由冬季风环流搬运堆积而形成,古土壤则是在暖湿期因夏季风增强而形成。因此,粒度、磁化率、游离铁/全铁比值<sup>[13]</sup>和 Rb/Sr 比值<sup>[14]</sup>等指标为解释东亚季风演化和全球气候变化的成因提供了依据。

以上成果侧重于黄土的物理和化学研究,而生物地球化学的工作一直是黄土研究中的薄弱环节。磷作为黄土中特征的活动性元素<sup>[15]</sup>,又是生物生长的必需元素,在整个生物循环中起着主导作用。众所周知,风尘物质堆积后,经受不同程度的风化成壤作用,在干冷的冰期形成黄土,在温湿的间冰期则发

育成古土壤<sup>[16]</sup>。在这种冷暖气候波动下,磷对古气候变化的信息可能被黄土-古土壤序列保存下来。在黄土堆积成壤过程中磷的地球化学行为受到风化成壤强度的制约,在很大程度上取决于夏季温度和降水量,而温度和降水量是东亚季风的主要标志。因此,洛川黄土中磷的地球化学行为不仅受到黄土高原小气候环境变化的制约,而且受到东亚季风乃至全球气候变化的影响。基于此,开展磷的生物地球化学研究将是一项对研究反映古气候环境变化很有意义的尝试性工作。

## 1 样品与方法

样品采自陕西省洛川县坡头村黄土-古土壤剖面(35°45'N, 109°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( $S_1$ )。 $S_0$ 、 $L_1$ 层段的采样方法遵循长×宽×高为 10 cm×10 cm×5 cm 一个样的原则,从上到下连续取样,每个样在野外用四分法挑取 500 g 左右。 $S_1$ 层段采样方法遵循长×宽×高为 30 cm×10 cm×5 cm 一个样的原则,从上到下连续取样,每个样在野外用四分法取 1 000 g 左右。共采集 95 个样品。将样品风干,混匀,取所需数量,在玛瑙研钵中磨细,使其粒径小

收稿日期: 2002 - 07 - 22; 接受日期: 2003 - 04 - 07

基金项目: 国家自然科学基金(49902024)

作者简介: 饶文波(1973 -),男,博士,第四纪地质学与地球化学专业。E-mail: raowenbo@163.com

于 0.149 mm, 备用。

总磷采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消煮 - 钼锑抗法<sup>[17]</sup>; 无机磷采用 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提 - 钼锑抗法<sup>[18]</sup>; 有机磷为总磷减去无机磷之差。所有样品均用日本产 UV-3000 型分光光度计测定。重复样品 (n = 15) 的测量结果显示, 总磷的标准偏差为 ± 2 × 10<sup>-6</sup>, 无机磷的标准偏差为 ± 1 × 10<sup>-6</sup>。在北京大学城市与环境学系 Barington MS2 磁化率仪上完成低频磁化率的测定。

## 2 结果与讨论

黄土层中 P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> 比值集中在 0.14 ~ 0.44 之间。S<sub>0</sub> 古土壤层中的 P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> 比值较高, 在 0.28 ~ 0.43 之间变化, 平均值为 0.36; 其次为 S<sub>1</sub> 古土壤层中的 P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> 比值, 在 0.13 ~ 0.42 之间变化, 平均值为 0.31; 马兰黄土中的 P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> 比值在 0.14 ~ 0.44 之间变化, 平均值为 0.25, 在三者中最低。而且此比值把马兰黄土层中末次冰期间冰阶形成的弱土壤化的黄土和末次冰期始冰阶和盛冰阶形成的黄土区别开来(图 1 和表 1)。

表 1 洛川黄土各层位的 P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> 比值

Table 1 Ratio of P <sub>org</sub> /P <sub>inorg</sub> in different layers of the Luochuan loess							
层位	样品数	变化范围	平均值	层位	样品数	变化范围	平均值
S <sub>0</sub>	10	0.28 ~ 0.43	0.36	L <sub>1</sub> LL <sub>1</sub>	21	0.14 ~ 0.28	0.21
L <sub>1</sub>	74	0.14 ~ 0.44	0.25	L <sub>1</sub> SS <sub>1</sub>	29	0.22 ~ 0.44	0.29
S <sub>1</sub>	11	0.13 ~ 0.42	0.31	L <sub>1</sub> LL <sub>2</sub>	24	0.17 ~ 0.34	0.24

### 2.1 黄土高原中磷的地球化学循环初步讨论

由于磷在表生条件下极少以气态 (PH<sub>3</sub>) 形式存在<sup>[19]</sup>, 并且黄土剖面从第四纪初就不受地下水的干扰<sup>[20]</sup>, 因此, 黄土剖面中磷基本上来源于黄土母质——粉尘。因而, 黄土体系与其他体系之间磷的循环机理较为单一(图 2)。在与其他体系进行物质交换的过程中, 黄土体系中磷的地球化学过程主要表现在两个方面: 首先是磷的来源——粉尘 (P<sub>入</sub>); 其次为磷的流失——径流或侵蚀 (P<sub>出</sub>)。

如果气候条件发生变化(变冷或变热), 各体系之间处于一个相对平衡状态的磷循环被打破。黄土体系与其他体系之间也不例外。例如, 在冷期, 东亚冬季风增强, 温度降低, 降水量减少, 某一单位时间内磷的输入量增加, 而磷的输出量减少; 在暖期, 东亚夏季风增强, 温度升高, 降水量增加, 某一单位时间内磷的输入量减少, 而磷的输出量增加。实际上, 磷的输入量与东亚冬季风有关, 而磷的输出量与夏季风有关。

相对于黄土体系与其他体系之间磷的循环, 黄土体系内部磷的地球化学循环显得复杂多变(图 3), 集中表现为有机磷和无机磷的相互转化过程。这一过程主要受两方面因素的制约: (1) 来自外部的因素, 即磷的输入量和磷的输出量; (2) 内部因素, 即有机磷的固定、分解作用和无机磷的释放、固定作用。

由于黄土在堆积以前就已经经历了搬运作用和沉积作用, 又由于黄土母质化学成分的均一性<sup>[21]</sup>, 黄土的 P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> 比值正好消除了粉尘粒度的影响, 因此, 磷的输入量对有机磷与无机磷相互转化没有多大的影响。另外, 磷的输出量, 其实就是由于降水导致的地表径流和侵蚀而损失的磷含量, 跟降水量呈正相关关系。降水量的大小直接改变土壤溶液中磷的浓度, 影响有机磷、无机磷转化为土壤可溶性磷的绝对速率, 因而也会影响有机磷与无机磷相互转化的相对速

度。另外, 磷的输出量, 其实就是由于降水导致的地表径流和侵蚀而损失的磷含量, 跟降水量呈正相关关系。降水量的大小直接改变土壤溶液中磷的浓度, 影响有机磷、无机磷转化为土壤可溶性磷的绝对速率, 因而也会影响有机磷与无机磷相互转化的相对速

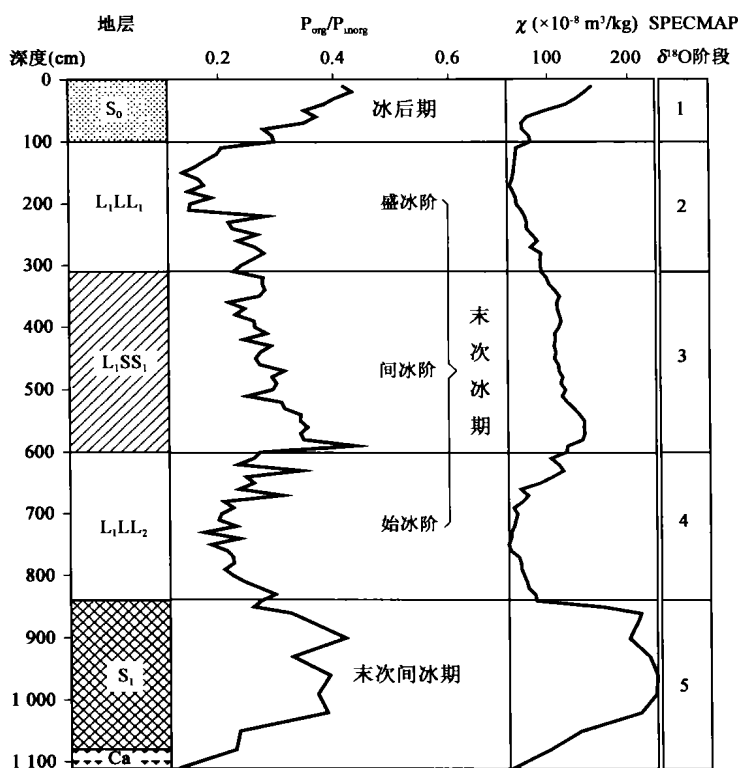


图 1 洛川黄土 - 古土壤序列中 P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> 比值和磁化率 χ 记录  
Fig. 1 Ratio of P<sub>org</sub>/P<sub>inorg</sub> and record of magnetic susceptibility in the Luochuan loess-paleosol sequence  
Ca. 钙结核层。

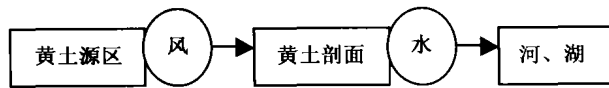


图 2 各体系之间磷的循环示意图

Fig. 2 Sketch map of phosphorous circle among systems

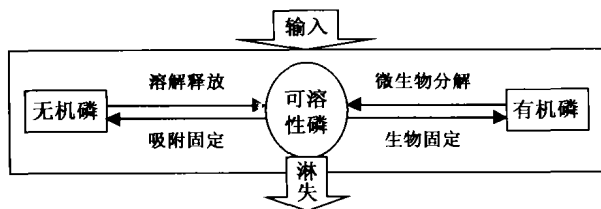


图 3 黄土体系内磷的地球化学循环示意图

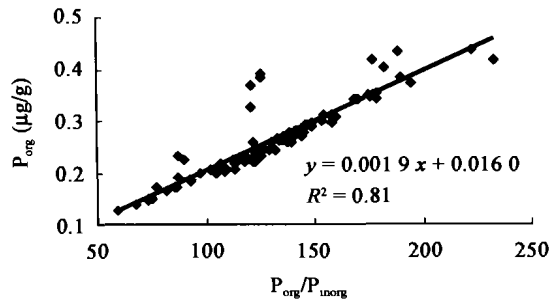
Fig. 3 Sketch map of phosphorous circle in loess system

率。温度也是一个极为重要的间接因素，因为在有降水量的情况下温度升高，土壤中的微生物活动能力加强，有机磷和无机磷相互转化的能力及有机磷和无机磷各自转化为土壤可溶性磷的能力得到加强。

## 2.2 $P_{org}/P_{inorg}$ 比值变化反映风化成壤作用程度

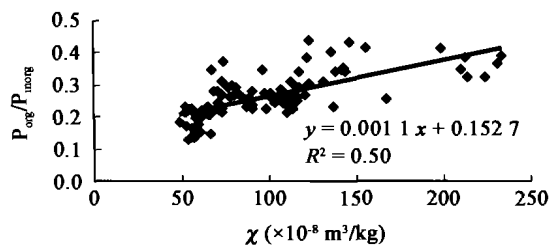
气候发生变化，黄土与其他体系之间原有的磷循环状态被打破，黄土体系内原有的磷循环平衡状态同样被打破。有机磷和无机磷的转化程度也要发生变化，其受控因素主要为温度和降水量。例如，在冷期 ( $L_1LL_1$  和  $L_1LL_2$ )，由于温度低，降水量少，植被发育差，有机质相对积累少，无机磷溶解速度慢，有机磷与无机磷的相互转化程度低， $P_{org}/P_{inorg}$  比值低，分别为 0.21 和 0.24；在暖期和较暖的时期 ( $S_0$ 、 $L_1SS_1$  和  $S_1$ )，由于温度高，降水量大，植被发育茂盛，有机质积累相对多，无机磷溶解速度相对快，有机磷与无机磷的相互转化程度高， $P_{org}/P_{inorg}$  比值高，分别为 0.36、0.29 和 0.31。洛川黄土中  $P_{org}-P_{org}/P_{inorg}$  之间极好的相关性 (图 4) 也证明了这一点。

综上所述，有机磷与无机磷的相互转化正是黄土体系内磷循环平衡状态的具体表现， $P_{org}/P_{inorg}$  比值可视为黄土某一层位磷循环平衡状态的量化指标。洛川黄土剖面中，成壤作用较强的古土壤有高的  $P_{org}/P_{inorg}$  比值，而成壤作用弱的黄土有低的  $P_{org}/P_{inorg}$  比值。这充分揭示了洛川剖面中  $P_{org}/P_{inorg}$  比值分布与黄土风化成壤作用的密切关系。因此， $P_{org}/P_{inorg}$  比值对黄土-古土壤中风化成壤作用具有有效的指示作用。

图 4 洛川黄土剖面  $P_{org}$  含量与  $P_{org}/P_{inorg}$  比值的相关性Fig. 4 Correlation between ratio of  $P_{org}/P_{inorg}$  and content of  $P_{org}$  in the Luochuan loess section

## 2.3 $P_{org}/P_{inorg}$ 比值分布曲线与磁化率曲线及 SPECMAP $\delta^{18}O$ 曲线的对比

洛川黄土剖面的  $P_{org}/P_{inorg}$  比值与磁化率分布曲线十分吻合，两条曲线具有几乎相同的峰谷变化，且两者的相关系数  $R^2$  为 0.50 (图 1 和图 5)。降水量和温度是衡量我国夏季风效应的主要标志<sup>[13]</sup>，而降水量和温度又是  $P_{org}/P_{inorg}$  比值变化的关键因素。随着气候冷暖振荡变化， $P_{org}/P_{inorg}$  比值也发生相应的变化。 $P_{org}/P_{inorg}$  比值的实际变化是对夏季风强度变化的响应。由于磁化率<sup>[22]</sup>与 Rb/Sr 比值<sup>[23]</sup>一样，是衡量东亚夏季风环流强度变化的指标，因此，剖面中  $P_{org}/P_{inorg}$  比值的实际变化也记录了夏季风场强变化的重要信息，可以视为指示夏季风场强变化的替代性指标。

图 5 洛川黄土  $P_{org}/P_{inorg}$  比值与磁化率  $\chi$  的相关性Fig. 5 Correlation between ratio of  $P_{org}/P_{inorg}$  and  $\chi$  in the Luochuan Loess section

另外，依据 Kukla *et al.*<sup>[24]</sup> 建议的方法计算得到洛川剖面末次间冰期以来  $P_{org}/P_{inorg}$  比值时间序列 (图 6)。 $P_{org}/P_{inorg}$  比值时间序列具有与 SPECMAP 极其相似的波动形式，同样表现出 100 ka 尺度上的古气候冷暖旋回，而且呈现出冷期向暖期的快速转换和暖期向冷期的逐渐过渡的特征<sup>[25]</sup>。 $P_{org}/P_{inorg}$  比值实质上是东亚夏季风环流强度的指标，而深海氧同位素曲线代表了北半球大陆冰量的变化<sup>[26]</sup>。这两种

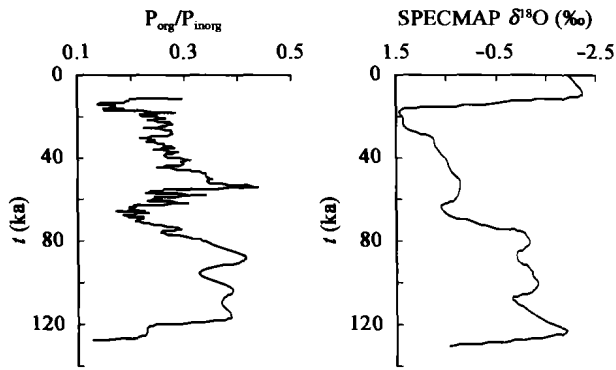


图6 13万年来洛川黄土  $P_{org}/P_{inorg}$  比值曲线与 SPECMAP  $\delta^{18}O$  曲线<sup>[24]</sup>的对比

Fig. 6 Comparison of  $P_{org}/P_{inorg}$  with marine oxygen-isotope records (SPECMAP  $\delta^{18}O$ ) during the last 130 ka

不同的气候曲线在最近 13 万年期间的同步变化表明,大陆冰量变化与东亚夏季风的发展演化之间存在成因上的联系。在冰期中,北半球冰流扩大,全球降水减少,冬季风强盛,引起受控于东亚季风的洛川黄土研究区降水量和温度降低,由此导致黄土成壤作用减弱和有机磷增加量减少。在间冰期,由于北半球冰流的退缩,海陆之间的差异感热作用增强,加强了东亚夏季风的环流强度,降水量增多,由此导致黄土成壤作用的加强和有机磷增加量的增加。因此,  $P_{org}/P_{inorg}$  比值曲线的波动与北半球大陆冰量变化的一致性提供了关于生物微循环对地质大循环响应理论的新根据。

### 3 结论

(1) 洛川黄土剖面中,成壤作用较强的古土壤具有高的  $P_{org}/P_{inorg}$  比值,而成壤作用弱的黄土具有低的  $P_{org}/P_{inorg}$  比值。 $P_{org}/P_{inorg}$  比值的变化受生物气候条件变化制约,是反映风化成壤强度的量化指标。

(2)  $P_{org}/P_{inorg}$  比值的分布与磁化率变化相似,记录了夏季风场强度变化的重要信息。

(3)  $P_{org}/P_{inorg}$  比值变化与深海氧同位素曲线可进行对比,揭示了地质大循环与生物微循环之间存在成因上的联系。

#### 参考文献(References):

[1] An Zhisheng, Kukla G J, Porter S C, *et al.* Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 years [J]. *Quatern Res*, 1991, 36 (1): 29 ~ 36.

- [2] 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).
- [3] 韩家林, 姜文英, 吴乃琴, 等. 黄土中钙结核的碳氧同位素研究(一)氧同位素及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 1995, 15 (2): 130 ~ 138.  
Han Jia-mao, Jiang Wen-ying, Wu Nai-qin, *et al.* Carbon and oxygen isotope compositions of carbonate concretions in loess (Part 1): Oxygen isotope and paleotemperature [J]. *Quatern Sci*, 1995, 15(2): 130 ~ 138 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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]. *Quatern Sci*, 1995, 15(4): 367 ~ 377 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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]. 2002, 31 (2): 105 ~ 112 (in Chinese with English abstract).
- [6] 沈承德, 刘东生, Beer J, 等. 晚更新世黄土堆积物中的  $^{10}Be$  记录[J]. *第四纪研究*, 1989, 9(2): 169 ~ 176.  
Shen Cheng-de, Liu Tungsheng, Beer J, *et al.*  $^{10}Be$  records of the Late Pleistocene loess deposits [J]. *Quatern Sci*, 1989, 9(2): 169 ~ 176 (in Chinese with English abstract).
- [7] 顾兆炎, 韩家林, 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 Tungsheng. Progress in geochemical research on the loess and other Quaternary deposits in China [J]. *Quatern Sci*, 2000, 20(1): 41 ~ 55 (in Chinese with English abstract).
- [8] 谭红兵, 马海洲, 鹿化煜, 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 Xi'ning Basin [J]. *Geochimica*, 2002, 31(5): 409 ~ 414 (in Chinese with English abstract).
- [9] 童国榜, 张俊牌, 范淑贤, 等. 中国 4 Ma 以来孢粉植物群与环境演变的趋势[A]. 佚名. 黄土第四纪地质全球变化(第四集)[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 32 ~ 45.  
Tong Guo-bang, Zhang Jun-pai, Fan Shu-xian, *et al.* Flora of pollen and environmental evolution in China since 4 Ma [A]. Anon. *Loess, Quaternary Geology and Global Change: Book 4* [C]. Beijing: Science Press, 1996. 32 ~ 45 (in Chinese).
- [10] Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, *et al.* Towards an orbital time

- scale for Chinese Loess deposits [J]. *Quatern Res Rev*, 1994, 13: 39 ~ 70.
- [11] Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 111 ~ 145.  
安芷生, 吴锡浩, 汪品先, 等. 最近130 ka中国的古季风——I. 古季风记录[J]. *中国科学(B)*, 1991, 21(10): 1 076 ~ 1 081.
- [12] An Zhi-sheng, Wu Xi-hao, Wang Pin-xian, *et al.* Paleomonsoon in China during the last 130 ka (Part 1): Records of paleomonsoon [J]. *Sci China (B)*, 1991, 21(10): 1 076 ~ 1 081 (in Chinese).
- [13] 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.
- [14] 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]. *Quatern Res*, 1999, 51(3): 215 ~ 219.
- [15] 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)*, 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 Asian inland [J]. *Sci China (D)*, 2001, 44(3): 403 ~ 413.
- [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. 44 ~ 302.  
Liu Tungsheng, Lu Yan-chou, Zheng Hong-han, *et al.* Loess and the Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985. 44 ~ 302 (in Chinese).
- [17] 孙鸿烈, 刘光菘. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996. 38 ~ 40.  
Sun Hong-lie, Liu Guang-song, *et al.* Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996. 38 ~ 40 (in Chinese).
- [18] 于天仁, 王振权. 土壤分析化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 113 ~ 114.  
Yu Tian-ren, Wang Zhen-quan. Analytical Chemistry in Soil [M]. Beijing: Science Press, 1988. 113 ~ 114 (in Chinese).
- [19] 张秀梅, 梁涛, 耿元波. 河口, 海湾沉积磷在全球变化区域响应研究中的意义 [J]. *地理科学进展*, 2001, 20(2): 161 ~ 168.  
Zhang Xiu-mei, Liang Tao, Geng Yuan-bo. The significance of sedimentary phosphorous in estuary-bay in studies on global change and regional response [J]. *Adv Geog Sci*, 2001, 20(2): 161 ~ 168 (in Chinese with English abstract).
- [20] 孙建中, 赵景波, 魏明健, 等. 黄土高原第四纪[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 113 ~ 120.  
Sun Jian-zhong, Zhao Jing-bo, Wei Ming-jian, *et al.* Quaternary of Loess Plateau in China [M]. Beijing: Science Press, 1991. 113 ~ 120 (in Chinese).
- [21] 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]. *中国科学(D)*, 1997, 27(6): 531 ~ 536.  
Chen Jun, Ji Jun-feng, Qiu Gang, *et al.* Geochemical studies on the intensities of chemical weathering in the Luochuan loess-paleosol sequence, Shaanxi, China [J]. *Sci China (D)*, 1997, 27(6): 531 ~ 536 (in Chinese).
- [22] 安芷生, 吴锡浩, 汪品先, 等. 最近130 ka中国的古季风——II. 古季风变迁[J]. *中国科学(B)*, 1991, 21(11): 1 209 ~ 1 215.  
An Zhi-sheng, Wu Xi-hao, Wang Pin-xian, *et al.* Paleomonsoon in China during the last 130 ka (Part 2): Change of paleomonsoon [J]. *Sci China (B)*, 1991, 21(11): 1 209 ~ 1 215 (in Chinese).
- [23] 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)*, 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]. *Sci China (D)*, 1999, 42(3): 225 ~ 232.
- [24] Kukla G, Heller F, Liu X M, *et al.* Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility [J]. *Geology*, 1988, 16(9): 811 ~ 814.
- [25] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, *et al.* Age dating and the orbital theory of the Ice Ages: Development of a high-resolution 0 to 300 000-year chronostratigraphy [J]. *Quatern Res*, 1987, 27(1): 1 ~ 29.
- [26] 刘东生, 丁仲礼. 中国黄土研究新进展(二)古气候与全球变化[J]. *第四纪研究*, 1990, 10(1): 1 ~ 9.  
Liu Tungsheng, Ding Zhong-li. Progresses on loess research in China (Part 2): Paleoclimatology and global change [J]. *Quatern Sci*, 1990, 10(1): 1 ~ 9 (in Chinese with English abstract).

## $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$ fluctuation in the Luochuan loess section during the last 130 ka and its paleoclimatic significance

RAO Wen-bo<sup>1,2</sup>, LUO Tai-yi<sup>1</sup>, GAO Zhen-min<sup>1</sup>, LI Xiao-biao<sup>1,2</sup>

(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:**  $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$  ratio in the Luochuan loess section during the last 130 ka is measured, which is affected by temperature and precipitation, resulting from conversion of both  $P_{\text{org}}$  and  $P_{\text{inorg}}$  each other with variation of paleoclimate during different geological periods.  $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$  ratio variation correlates with loess-paleosol sequence.  $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$  ratio is consistent with magnetic susceptibility in the Luochuan loess section. Variation of  $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$  ratio has an obviously close relation with intensity of summer monsoon, and can match well the marine oxygen-isotope records. Therefore, a new proxy recording paleoclimatic variation,  $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$  ratio, is established.

**Key words:**  $P_{\text{org}}/P_{\text{inorg}}$ ; paleoclimate; 130 ka; loess; Luochuan