

南方红土元素迁移特征及其古环境意义*

熊尚发 丁仲礼 刘东生

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 气候变化下土壤物质过程的响应特征是 global 变化研究的重要主题。本文选取江西九江剖面, 通过协变分析, 对其元素迁移特征进行了研究。结果显示, 剖面上部(褐黄色土层)和剖面下部(网纹红土层)的协变状态和元素迁移强度有明显的差别, 从盐基赋存状态看, 剖面下部元素迁移强度大大高于剖面上部, 同时, 不同元素的迁移模式的表现明显不同。研究表明, 剖面元素组成主要受古气候变化引起的风化强度差异的控制, 但也在一定程度上受母质物源变化的影响。

关键词 南方红土, 协变分析, 物质平衡, 风化特征

中图分类号 P59

南方红土是广泛分布于南方地区(江西、湖南、广东、广西、安徽、湖北等地)的第四纪沉积^[1-6], 是重建我国亚热带地区第四纪气候变化历史的关键记录之一。

由于南方红土具有古土壤特征^[3,6], 因此, 研究其风化特征和剖面变化就成为揭示其古气候变化记录的基础。以往有关古土壤风化特征的研究主要针对土壤剖面的元素相对含量变化进行讨论, 但是, 研究表明, 有诸多因素影响元素相对含量的变化^[7,8], 要了解剖面风化特征, 还要深入研究元素在剖面的迁移特征。

在此, 我们选择了江西九江典型的红土剖面, 通过协变分析和物质迁移的研究, 对南方红土剖面风化特征和元素的迁移特征进行了探讨, 以初步揭示红土沉积对古气候、古环境变化的响应特征。

1 地质背景与方法

1.1 地质背景与剖面特征

九江剖面位于九江市南, 北纬 29°40', 东经 116°01'。该地属中亚热带季风气候, 年降水为 1400mm, 夏季气温为 29.4℃, 冬季气温为 4.2℃。剖面厚 15.6m, 由上部褐黄色土层(0~649cm)和下部红色至砖红色网纹红土层(649~1558cm)组成。网纹红土层以下为砾石层(砾石最大直径可达 1m 以上), 二者界线分明。褐黄色土层呈披覆状覆盖于网纹红土层之上, 与北方马兰黄土产状相似。一般认为, 南方红土为中更新世的沉积^[2], 目前一些研究也认为它是 100 万年以来的沉积^[6]。

1.2 元素分析方法

我们对九江剖面进行了间隔为 3.33cm 的系统取样, 用于元素分析的样品(等体积样)取样间隔为

* 国家自然科学基金项目(批准号: 49702030)资助

收稿日期: 1999-07-16; 收到修改稿日期: 2000-04-17

50cm, 经 105℃ 烘干称重, 以确定样品的干容重。全量分析样经酸溶后与标样一起在 ICP—9000 型等离子光量计上测量。微量元素分析采用铟(In)为内标, 样品溶于 (HF+HClO₄+HNO₃) 混合液后, 通过 ICP—MS 进行了测量。参考样分析显示, 样品分析误差为 10%。全剖面共分析了 31 个样品。

1.3 协变与物质迁移的计算方法

成土协变 (Pedogenic strain) 分析是基于物质平衡原理, 用以计算土壤中化学成分得失的一种理化分析方法^[7~9]。考虑到 Zr 在剖面上最不易迁移, 以 Zr 为不变元素。首先计算协变系数

$$\epsilon_{Zr,w} = \rho_p C_{Zr,p} / \rho_w C_{Zr,w} - 1 \tag{1}$$

式中, ρ 为干容重 (g/cm³), p 代表母质, w 代表风化层, C 为元素化学组成 (%)。 $\epsilon_{Zr,w}$ 为正表示膨胀 (Dilation), 为负时表示塌陷 (Collapse)^[7,9]。通过协变系数, 计算单位容积母质中的净化学物质收支状况 (g/cm³)

$$\delta_{j,w} = (\rho_w C_{j,w} (\epsilon_{Zr,w} + 1) - \rho_p C_{j,p}) / 100 \tag{2}$$

和单位质量母质元素物质迁移状况 (%)

$$\tau_{j,w} = \rho_w C_{j,w} (\epsilon_{Zr,w} + 1) / \rho_p C_{j,p} - 1 \tag{3}$$

式中, j 为待计算的元素。

在本文的计算中, 由于红土风化前的母质成分事实上是不可能获知的, 因此以剖面上部 6m 风化较弱的褐黄色土层 (平均值) 代表母质成分。实际母质成分中易迁移元素含量应高于此值, 而难迁移元素含量可能低于此数值。

2 剖面风化强度特征

元素组成的剖面特征显示, 一些易迁移的组分含量从上到下都呈现明显降低的变化 (图 1)。Na₂O, K₂O 在剖面下部的含量均不足剖面上部的 50%, Sr 的含量在剖面下部也大

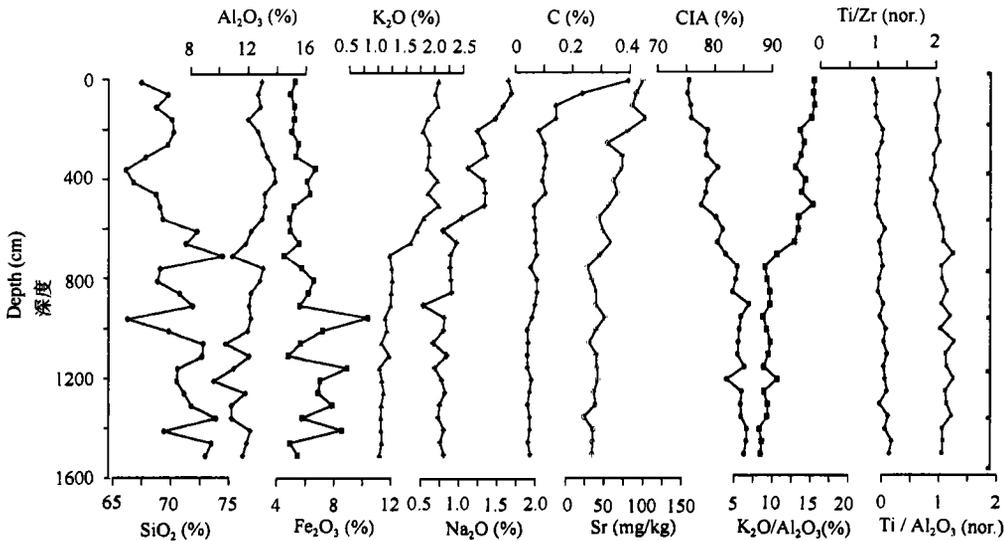


图1 南方红土元素组成的剖面变化

Fig.1 Sequential variations in chemical composition of the red earth in southern China

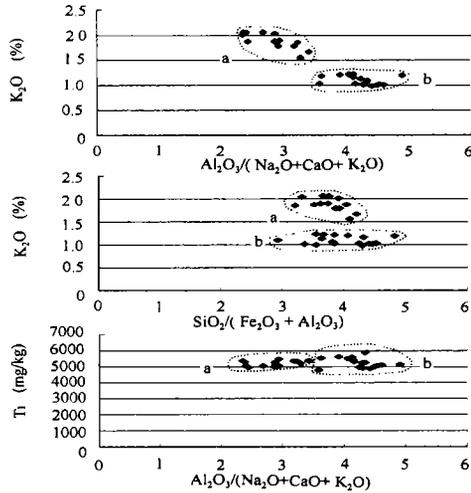
大低于剖面上部。SiO₂, Al₂O₃和 Fe₂O₃的含量在剖面上变化比较复杂,次一级的变化非常明显。从总的趋势看, SiO₂, Fe₂O₃含量在剖面下部略大于剖面上部,而 Al₂O₃在剖面下部含量则略低于剖面上部。

考虑到物源的重大变化对于考察沉积物风化强度变化的影响,我们对 Ti/ Zr, Ti/ Al₂O₃比值(标准化)进行了计算,结果显示其剖面变化非常小(图1)。由于这些组分都是迁移能力较弱的,因此其比值变化小从一定程度上说明剖面上下物源变化不影响根据风化指标来反映剖面风化强度变化。从 K₂O/Al₂O₃来看,剖面下部明显小于剖面上部,表明 K₂O的大量流失。CIA^[10] (CIA = Al₂O₃ / (Al₂O₃ + Na₂O + K₂O + CaO))的变化则显示相反的趋势,剖面下部(85%)高于剖面上部(75%),对比黄土沉积^[11](其CIA为50%~75%),如果二者物源可比⁽¹⁾,那么,红土的风化强度的确明显高于黄土了。在这些成分和指标的点聚图上(图2),可以看到风化强度的变化轨迹。剖面上部的样点和剖面下部的样点明显分为两个集合,其间的变化反映了剖面上下风化强度差异显著。

3 元素迁移的剖面特征

剖面元素组成的变化只能表明不同元素的相对含量的变化,要了解不同元素在剖面上的含量变化,还要对元素的迁移行为进行更深入的研究。我们通过协变与物质迁移的计算,对南方红土剖面的元素含量变化和物质迁移特征进行初步分析。

考虑到 Zr, Ti 属极难迁移的元素,协变分析采用 Zr, Ti 为参照^[7,9]。首先计算了协变系数 ε Zr 和 ε Ti(图3)。ε Zr 在剖面上的变化呈波动型,大致分为4段,剖面最底部有一段正值,剖面中下部为负值,剖面中上部复为正值,到剖面最顶部又变为负值。ε Zr 为正值代表膨胀,负值代表塌陷。造成协变塌陷的主要原因是风化作用较强,使得易迁移元素流失而致 Zr 相对含量增加。ε Ti 的剖面变化也说明这一点。ε Ti 除了在剖面中上部为正值外,皆为负值,显示风化作用对 Ti 形成的协变塌陷的影响。造成协变膨胀的原因主要是土壤的密度降低,可由扰动或植物根系发育,孔隙度加大而形成。剖面上 ε Zr 正值部分对应于古土壤发育较强,根系遗迹较多的层位,表明膨胀可能主要由根系发育而形成。由于红土的风化作用较强,其对土壤协变的影响抵消了古根系发育的影响,造成红土总体偏向 Zr



a 剖面上部褐黄色土层 (a) Represents the upper part of the sequence b 剖面下部网纹红土层 (b) Represents the lower part of the sequence

图2 南方红土化学组成聚点图

Fig.2 Chemical composition diagrams for the red earth

(1) 熊尚发,刘东生,丁仲礼. 南方红土风成成因的沉积学和地球化学证据. 1999, 待刊

和 Ti 的协变塌陷。

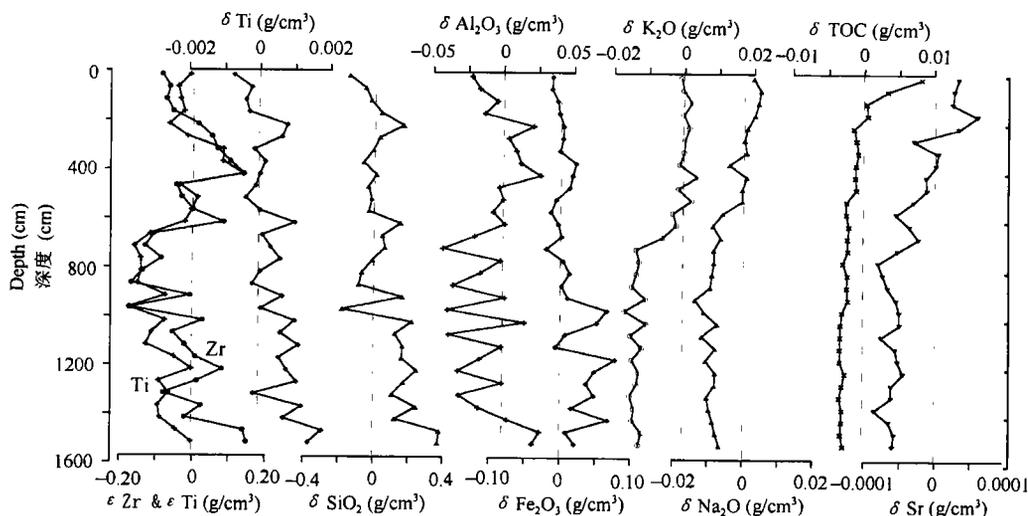


图3 南方红土元素迁移(单位体积迁移量)的剖面特征,以Zr为不变成分

Fig.3 Variations of elemental transport function δ with section depth using Zr to calculate strain

根据协变系数 ϵ Zr,计算了不同组分的单位体积迁移系数 δ 值(图3)。总的看来, δ 的变化有两种模式,其一以易迁移元素K,Na,Sr等元素为代表,表现为剖面下部组分的流失和剖面上部组分的净加入;其二以Ti,Si,Fe等迁移较弱的组分为代表,这些元素除了局部段落之外,几乎全剖面都为组分的净加入,其中尤以剖面下部为甚。 Al_2O_3 在剖面上有一些细小的变化。从易迁移元素在剖面的迁移状况看,不同成分之间也有迁移次序的差异,似乎存在从TOC-Sr- Na_2O 到 K_2O 渐变的迁移次序。 K_2O 最早结束净迁出状况,而TOC和Sr的净迁出到净加入的转换则要到此上3m才发生。

绝对迁移(或加入)量以Si最大,达 $0.1\sim 0.38g/cm^3$,其次Fe的绝对迁移(加入)量可达 $0.01\sim 0.06g/cm^3$,Al可达 $0.02\sim 0.04g/cm^3$,K,Na的迁移量在 $0.01g/cm^3$ 左右,C的迁移量在 $0.001\sim 0.004g/cm^3$ 之间变化,其它微量元素的绝对迁移量则非常小。

根据同风化强度对比来看,剖面下部K,Na,Sr等元素的流失可能主要是风化作用的结果,而Ti,Si,Fe等组分则在剖面下部出现净加入,看来风化作用对其的影响未能抵消物源变化的作用。

单位质量迁移系数 τ 反映的是各组分的相对迁移量,其变化趋势与 δ 相似(图4)。从图中可见,K,Na,Sr等元素在剖面下部相对迁出量可达40%~60%,C在剖面下部的相对迁出量则可大70%以上,这些元素的迁移行为主要反映了风化作用的影响。Al的相对迁移量一般在10%以内,Si相对迁移量为30%以内,而Fe的相对迁移量可达50%以上,这说明物源变化可能在这些元素的迁移中起了重要作用。

通过 ϵ Zr和各元素的 δ 值所作的聚点图(图5),可以对不同组分的风化模式与沉积模式进行分析。从图中见到,Si,Al,Fe,K,Na,C等元素迁移行为大体有3种模式。Si,Fe表现为从剖面下部向剖面上部,组分从Dilation(膨胀, $\epsilon_{z,w}$ 为正值)-Addition(加入, $\delta_{j,w}$ 为正

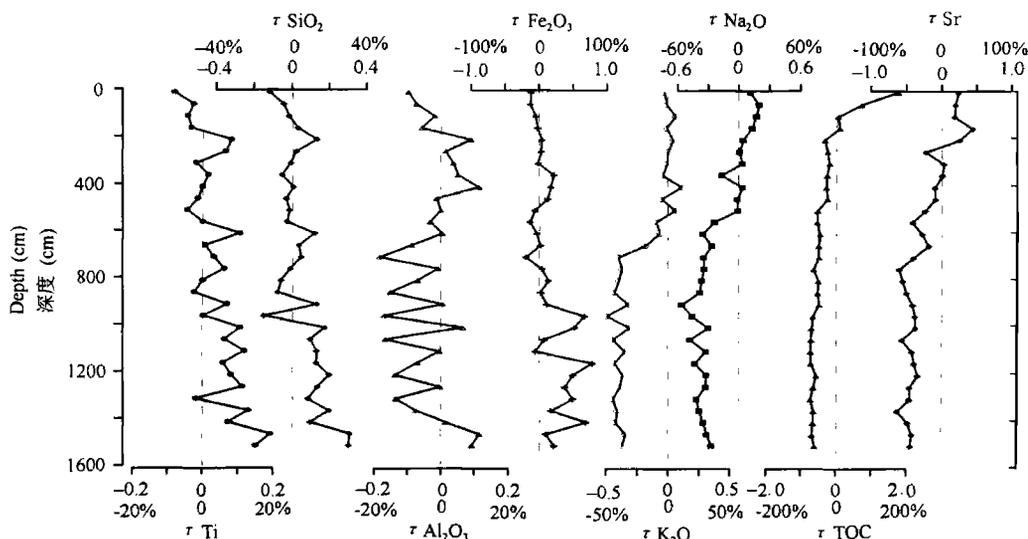
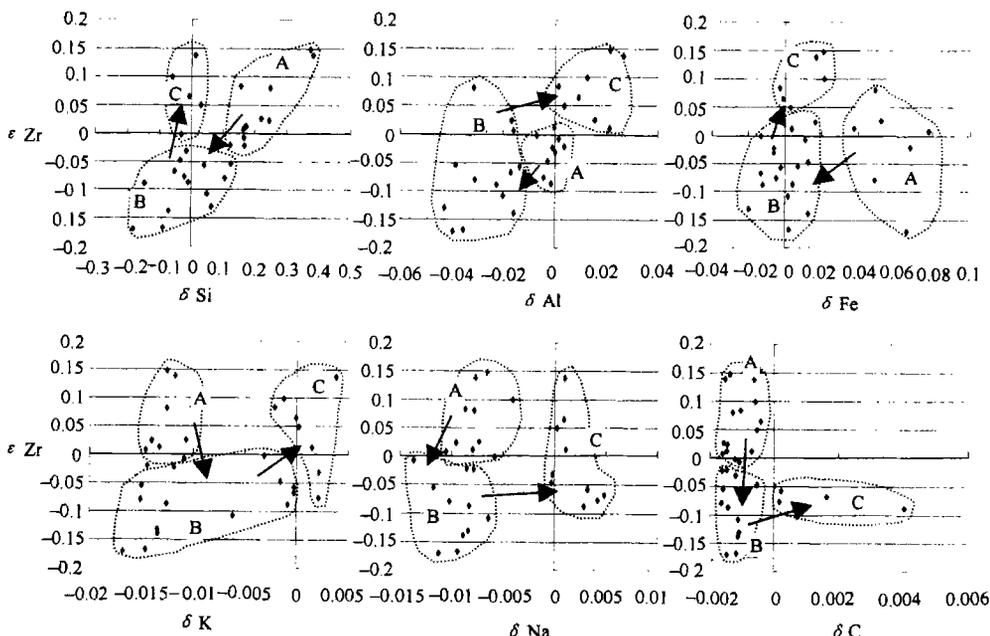


图4 南方红土元素迁移(单位质量迁移量)的剖面特征,以Zr为不变成分

Fig.4 Variations of elemental transport function τ with section depth, using Zr to calculate strain.



A,B,C 分别代表剖面下、中、上部 A,B and C represent the lower, middle and upper parts of the sequence respectively

图5 南方红土协变与元素净迁移轨迹图

Fig.5 Strain and mass transport diagrams of the red earth

值)先转为 Collapse(塌陷, $\epsilon_{Zr,w}$ 为负值)-Addition 和 Collapse-Loss(淋失, $\delta_{j,w}$ 为负值)状态,再进入 Dilation-Loss 和 Dilation-Addition 的状态。K, Na 则从 Dilation-Loss 转入 Collapse-

Loss,最后进入 Collapse-Addition状态,C的行为与 K, Na 相似,表现更为明显。Al 从剖面下部到剖面上部,则先是从近原点处进入 Collapse-Loss,然后又转至 Dilation-Addition 状态。总的看来,剖面中部各元素一般处于 Collapse-Loss 状态,而剖面上部和剖面下部,各元素的迁移行为则呈现显著的差别。

4 讨 论

上述红土剖面元素迁移分析显示,不同的组分迁移行为在剖面上表现有明显的差异,易迁移元素在剖面下部迁出量可达 40%~60%,而较难迁移元素在剖面下部则显示净加入的特征。考虑到不同风化指标均以显示红土剖面下部风化强度明显高于剖面上部,因而,可以认为,易迁移元素在剖面下部迁出应主要是风化作用的结果。相反,风化作用没有使难迁移元素在剖面下部出现净迁出,反而为净加入,表明出现物质加入的过程。从剖面上看,净加入的物质组成是有变化的,并且,上部净迁出物质无法抵销下部净加入,因此,不可能由剖面上部淋溶而来,而应该是反映物源的变化过程,即在剖面下部沉积时,母质中有较剖面上部更多的 SiO_2 , Fe_2O_3 等组分。这种物源变化引起的母质差异也掩盖了 Al_2O_3 - SiO_2 相对量的剖面变化。

但是,从另一个角度说,南方红土剖面的确存在风化强度的显著差异,剖面下部风化强度大大高于剖面上部,由于这一现象的普遍性,因此具有重要的古气候意义,也是研究土壤过程对气候变化响应的很好证据。从各种现象来看,剖面下部网纹红土层沉积期的古气候可能较剖面上部湿热得多。对于氧化铁游离度的测量显示⁽¹⁾,剖面下部游离度为 90% 左右,而剖面上部降为 45%,如果以现代土壤类比,相当于从砖红壤环境变化为红壤带北部环境^[12]。当然,剖面上下风化强度的变化也可能是由于风化时间影响而成,即剖面下部由于沉积速率较低,多期风化作用迭加,使得风化程度加深,而剖面上部由于沉积速率加大,风化持续时间较短,形成风化程度较低的状况。目前的研究还无法否定后一种可能性,不过,这一状况意味着粉尘加入的速率在剖面上部出现了大的变化,而粉尘产率也与环境变化有关,因此,也同样反映了气候恶化的趋势。

总之,南方红土风化强度的剖面差异非常明显,这种差异揭示了土壤过程对于古环境变化的显著响应,既可能反映剖面下部沉积时期古气候湿热状况大大高于剖面上部沉积时期,也可能反映剖面上部的沉积速率大于剖面下部,粉尘源区古气候出现长期的恶化趋势。要分清这二者的贡献,还有待进一步的研究。

参 考 文 献

1. de Chardin P T, Young C C, Pei W C *et al.* On the Cenozoic formations of Kwangsi and Kwangtung. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1935, 14(2): 179~205
2. 熊毅. 江西更新世粘土之性质及其生成. *地质论评*, 1944, 9: 109~120
3. 朱显谟. 中国南方的红土与红色风化壳. *第四纪研究*, 1993, (1): 75~84
4. 龚子同. 红色风化壳的生物地球化学. 见: 李庆远主编. *中国红壤*. 北京: 科学出版社, 1983. 24~40

(1) 熊尚发, 刘东生, 丁仲礼. 南方红土的剖面风化特征. 1999, 待刊

5. 席承藩. 论华南红色风化壳. 第四纪研究, 1991, (1):1~8
6. 赵其国, 杨 浩. 中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究. 第四纪研究, 1995, (2):107~116
7. Brimhall G H, Lewis C J, Ague J J et al. Metal enrichment in bauxites by deposition of chemically mature aeolian dust. *Nature*, 1988, 333:819~824
8. Bestland E A, Retallack G J, Rice A E et al. Late Eocene detrital laterites in central Oregon: mass balance geochemistry, depositional setting, and landscape evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108:285~302
9. Brimhall G H, Chadwick O A, Lewis C J et al. Deformation mass transport and invasive processes in soil evolution. *Science*, 1991, 255:695~702
10. Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, 299:715~717
11. Gallet S, Jahn B, Lanoe B V V et al. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156:157~172
12. 赵其国, 王振权, 刘兆礼. 我国富铝化土壤发生特性的初步研究. *土壤学报*, 1993, 20: 333~346

MASS BALANCE GEOCHEMISTRY OF THE RED EARTH IN SOUTHERN CHINA AND ITS ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS

Xiong Shang-fa Ding Zhong-li Liu Tung-sheng

(*Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Summary

The soil responses to climatic changes are a key problem in the studies of global change. Soils in the past provide a valuable record for the understanding of the relationship between the soil and the climatic changes. Here we report a case study to the red earth section at Jiujiang City in southern China. This section is about 15m in thickness, and consists of two pedogenic units. The upper part is a layer of yellowish silty clay, while the lower part a layer of red clay with yellow and white worm-shaped veins. Mass-balance equations applied to geochemical analyses reveal that the degree of weathering increased down-section and the concentration of resistate constituents decreased upward. A pronounced depletion of bases(Na, K) has been shown in the lower part of the section. This weathering trend is not observed in the loess sections in northern China, and is probably the results of Quaternary climatic changes in southern China and of the variations in dust input resulting from the deterioration over central Asia.

Key words Red earth in Southern China, Pedogenic strain analysis, Mass balance, Weathering features