

# 风化壳研究的现状与展望

李德文<sup>1)</sup> 崔之久<sup>2)</sup> 刘耕年<sup>2)</sup>

(1) 南京大学, 江苏 南京, 210093; (2) 北京大学, 北京, 100871)

**摘要** 风化壳是岩石圈、大气圈以及水圈、生物圈之间相互作用的界面,能够直接记录地球多圈层演化的信息。利用风化壳的地带性规律重建古环境是地貌学研究的传统内容之一。近年来,单晶矿物激光<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar测年技术、“双面”模式以及古地磁法等,在风化壳研究中的成功应用,在理论和技术上为恢复大陆剥蚀区高分辨率的环境演变历史创造了条件。利用风化年代学、风化地层学、古地磁学和地球化学等方法对风化壳进行综合研究,不仅可以建立剥蚀区的环境演变序列,为风化期次(事件)与其他全球性构造-气候事件的对比提供了广阔的前景,而且可以用于化学风化(强度和速度)的准确量化,有利于深入理解构造-剥蚀-风化-气候之间相互作用的反馈机制和正确评估人类活动对未来气候的影响能力。

**关键词** 化学风化 风化壳 风化年代学 风化地层学

## Present Situation and Prospects of Researches on Weathering Crust

LI Dewen<sup>1)</sup> CUI Zhijiu<sup>2)</sup> LIU Gengnian<sup>2)</sup>

(1) Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093; (2) Peking University, Beijing, 100871)

**Abstract** Weathering crust is an interaction interface between the lithosphere, the atmosphere, the hydrosphere and biosphere, and thus keeps abundant information concerning the evolution of the Earth's multi-spheres. It is a traditional work to reconstruct palaeogeographical conditions according to the zonal principle and the signals distilled from the weathering crust. Recent successful application of the laser <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating technique of single crystal and "double-surface" model to weathering study pioneers a new aspect of research on global change. The synthetical study of weathering crust can not only yield high-resolving records of environmental change in denudation areas of continents, which provide a wide perspective for comparison of weathering episodes (events) with others global tectonic-climate events, but also redound to an accurate quantification of weathering processes, which is in favor of a profound understanding of coupling relationship between tectonics, weathering, denudation and climate and an appropriate estimation of human impact on future climate.

**Key words** chemical weathering weathering crust weathering geochronology weathering stratigraphy

人类对风化作用和风化壳的早期认识可以追溯到19世纪, Rogers等(1848)用实验研究了纯水和含碳酸的水对岩石矿物的破坏和局部溶解; Chamberlin(1899)提出与主造山幕有关的化学风化作用的加强可以引起大气 $p\text{CO}_2$ 的下降, $p\text{CO}_2$ 将导致全球变冷。除了野外观察,早期的实验还确定了观察到的矿物风化与溶解化学之间的关系。Bude(1957)提出的“双面模式”首次揭示了风化壳发育与景观演化之间的内在联系。Ollier(1985)对风化作用、风化壳以及大量与风化作用有关的小尺度地貌景观做了详尽的论述,基本概括了20世纪80年代风化壳研究各个方面的进展。

20世纪90年代以来,风化速度(White等,1995;段雷等,2000)、冰前风化(Ollier,1988;Lidmar,1995;Bouchard等,1995)以及风化与地球各圈层之间的关系(Brady等,1994;Bloom,1998;黄镇国等,1999,2000;Kump等,2000)等方面得到广泛深入的研究,提出许多有关风化壳及其与形成环境关系的新模式、新概念(Horvath等,2000;Taylor等,2000;

Wiesner,1999)。风化壳是气候、构造及其他环境要素的函数,利用其蕴藏的环境信息(特别是成熟度较高的红色风化壳)重建古环境(特别是晚新生代环境)以及地球各圈层演化及其相互耦合模式是当前国际地学研究的一个热点。

## 1 风化地带性与古环境重建

Bel(1874)发现热带尼加拉瓜发育最好的风化壳位于森林区,认为这是岩石内部渗透流动的雨水中有植物分解形成的有机酸的参与。这可能是有关植被影响化学风化的最早的记录。1883年,Докучаев最早将土壤形成与环境条件联系起来,创立了土壤生成因子公式和土壤地带性学说,认为土壤是五大成土因素(母岩、气候、生物、地形、时间)综合作用下的产物。从发生学的观点来看,土壤和风化壳之间并没有本质的差别(Ollier,1985),都是指地球表面的松散层(前者强调生物作用的参与)。土壤地带性理论本质上也是关于风化壳与形成环境之间关系的系统理论。

本文由国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)、中科院青藏高原研究项目(KZ951-A1-204;KZ95T-06)、中国博士后科学基金资助。

改回日期:2001-9-13,责任编辑:宫月萱。

第一作者:李德文,1969年生,博士,地貌学与第四纪地质学专业,E-mail: lidewen@263.net。

决定风化壳性质的主要因素是气候条件。碎屑型风化壳发育于寒冷气候条件下;硅铝-硫(碳)酸盐型风化壳产于荒漠带或草原带,而硅铝粘土型风化壳和砖红土型风化壳大多分布在暖温带和亚热带(Strakhov, 1967; Nahon, 1991; Martini等, 1992; Robinson等, 1994)。总体上看,从热带到极地,风化壳的发育程度在降低,风化壳厚度在减薄。但在回归线附近的荒漠草原带,由于淋溶作用受限制,风化壳发育程度往往较南北两侧要低。在 Strakhov 等人工作的基础上, Селиверстов(1986)作了两点重要补充:①南北半球在海陆分布上的差异以及气候上的某些差别,导致南北半球风化壳发育特征并不是南北对称的;②风化壳发育最好的地带不是在赤道,那里生物产量高,云量较大(导致光照较南北两侧弱),腐殖质不能及时分解。风化地带性在小尺度上常被某些局部因素打乱,但在大的空间尺度上是重建古环境的重要理论基础之一。

从土壤学的角度看,能够反映风化壳形成环境的主要是风化壳组成物质中的细粒部分,后者主要由粘土矿物组成。Jenny 利用函数式对风化壳(土壤)性质与环境因素之间的关系进行广泛的定量分析(Jenny, 1941, 1983),建立了粘粒类型、含量、 $\text{CaCO}_3$ 淋溶深度等土壤属性与气候条件(温度、降水)之间区域性的定量关系。这些工作在今天的风化壳研究中仍然是经典性的,具有广泛的理论和实践意义。Bird等(1989, 1993)的工作显示风化壳中高岭石、水铝石和软铝矿可以保存古代的氧同位素信息而与现代环境处于不平衡状态。Girard等(1997)的研究显示,腐岩中的针铁矿可以保存其在风化前锋获得的原始同位素组成,即腐岩底部的针铁矿反映现在的氧同位素信号,而发育较早的上部显示的是化石态的氧同位素信息。化学风化过程中的这种不可逆性是利用风化壳重建古环境的前提和基础。

表生地球化学认为,风化壳粘土矿物组合主要取决于壳内水流速度(赵伦山等, 1988)。矿物物理化学则指示表生环境粘土矿物的种类主要取决于反应体系内水/岩比的大小(Right等, 1995)。高的水流速度或水/岩比意味着体系内硅的活度较低,脱硅富铝作用得以进行,有利于高岭石-水铝石类粘土矿物的形成;低的水流速度或水/岩比意味着体系内硅不能及时的迁移,结果只能形成以蒙脱石为主的粘土矿物组合。Sherman等(1968)的资料也表明,尽管在低纬低海拔和高降水条件下一般以形成高岭石为主,但如果排水不畅,高岭石在年降水量 900 mm 时含量最高,而在 1 000 ~ 1 100 mm 时消失。事实表明,粘土矿物组合与环境条件之间的关系是复杂的,在建立风化壳性质特征与环境条件之间的关系时,应该注意到除了气候条件外,母岩、地貌和水文条件等也具有重要的作用(龚子同, 1987)。

通过土壤学、粘土矿物学和地球化学(微量元素、同位素、水文地球化学)等方法来认识风化壳形成环境已经得到普及。激光粒度分析、光学显微镜、扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、X射线荧光分析(XRF)、电子探针、Mossbauer谱、差热分析(DTA)和傅立叶变换红外光谱(FTIR)等手段目前在风化壳研究中已经获得广泛应用,部分研究者还在同一样品不同粒级之间进行了对比(Smith等, 1995)。

关于南方红色风化壳性质、特征、发育模式及其环境意义的认识在 20 世纪 90 年代获得诸多进展,在方法上也由过去的土壤学方法为主转向以地球化学方法为主。熊尚发等(1999a, b, 2000)深入研究了南方网纹红土的性质和特征,提出网纹的形成与植物根系有关,并在红土与粉尘堆积之间进行了比较。黄镇国等(1999, 2000)建立了中国红土与自然地带变迁之间以及红土期与构造期之间的耦合关系。JiHB等

(2001)讨论了玄武岩风化壳中白云石的成因。关于南方风化壳的微量元素(Ma Yinjun等, 1999)、稀土元素(杨元根等, 2000)、磁性(卢升高等, 1999)、环境意义以及华南风化壳地球化学、矿物学特征及其环境意义(徐义芳等, 2000a, b)、岩溶风化壳的形成机制、结构、矿物学(李景阳等, 2000)、地球化学特征(JiHB等, 1999)及其阶段性(Wang SJ等, 1999)等方面都有比较深入的讨论。

利用各种手段和方法对风化壳进行综合研究,在区域地貌对比、风化作用机制及残积矿床成因研究等方面具有重要意义,尤其可用于古地貌面的研究。Marker等(1997)对南非开普顿南部 Albertinia 和 Mossel 海湾之间夷平面上的研究显示,该区 4 级夷平面上的风化壳具有不同的性质,表明风化壳可用于夷平面的重建和划分。在非洲,广泛分布的深风化腐岩是古地貌面(夷平面)的重要诊断标志,而夷平面又可以进行全球性的时空对比(Борисевич, 1989, 2000)。Soler(2000)利用化学、矿物和岩相以及流域水化学方法研究委内瑞拉某风化矿床的成因。黄镇国(1998)、王世杰等(1999)、杨元根等(2000)从土壤学的角度对中国南方红色风化壳做了深入细致的分析和对比。崔之久等(2001)通过对青藏高原及其东邻地区第二级夷平面上近 30 个红色风化壳剖面进行了详细研究,结果表明这些风化壳在性质特征上有很好的的一致性,普遍表现出粘粒含量高和淋溶程度较低的特点,反映其形成环境与夷平面景观条件下的水文地貌特征是一致的。

## 2 风化年代学

风化年代学是利用放射性同位素测年技术精确测定陆上土壤或风化剖面中表生矿物沉积时间的一种方法(Vasconcelos, 1999)。应用这种地球化学方法可以测定风化壳内由岩(土)-水相互作用引起的低温化学反应的时间。风化年代学的最终目的是确定整个剖面中风化前锋拓展的时间、速度和机制,揭示大陆风化壳演化的气候和地球化学历史(Vasconcelos等, 1994)。有关风化事件的定年问题一直受到地质工作者的关注。孙承兴等(1999)曾就有关的方法作过系统总结。传统的方法主要是根据风化壳上下层位得出风化作用的大致时间范围,如 Ding L等(2000)对藏北新生代火山岩及风化壳复合堆积物的研究结果认为,青藏高原主夷平面形成于中新世。

风化年代学的一个重要进展是 K-Ar 和 Ar/Ar 测年体系在风化壳中的成功运用。20 世纪 60 年代苏联学者开始注意到用表生过程中形成的某些具有持钾持氩能力的含钾矿物进行 K-Ar 测年,有可能解决风化壳及其相关过程的年代问题,并开始利用明矾石族矿物和含钾锰矿进行风化壳测年尝试(Chukhrov等, 1966; Shanin等, 1968),结果指示这两类矿物对 K-Ar 测年有很好的适宜性。但是风化壳测试样品本身的细粒特点和多期交生现象严重阻碍了此项技术的推广。

20 世纪 90 年代发展起来的单晶矿物激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年技术一方面克服了风化壳样品普遍存在的粒度较小的局限性(粒度可以小到 0.1 mm,部分达 0.066 mm)(Hautmann等, 2000);另一方面利用逐步加热技术获得的年龄谱,可以有效地识别样品的不同世代矿物的交生和深成矿物的污染,为风化壳测年问题的最终解决带来了广阔的前景(Vasconcelos等, 1992, 1994)。巴西 Carajás 地区的二级夷平面上风化壳的测年结果(Vasconcelos等, 1994)显示高原面(海拔 400 ~ 700 m)存在 3 个主要的风化期(65 ~ 69 Ma, 51 ~ 56 Ma, 40 ~ 43 Ma),表明这些剖面已经存在很长的时间,高原面至少在晚中生代就已存在。而切割面(海拔 200 ~ 300 m)的主要风

化期出现在中新世(这一时期的风化作用在高原面上也有微弱反映)。随后在澳洲也取得了类似的研究成果(Dammer等,1996)。Hautmann等(2000)利用同样的方法初步建立了中欧地区晚新生代以来的风化壳年龄框架(25~1 Ma)。

单晶矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年技术对风化壳乃至整个地貌学研究的重要性表现:①风化壳作为漫长地质历史时期环境演变的信息载体是客观存在的,冈瓦纳大陆风化壳测年结果显示某些风化壳剖面在中生代末就已存在(65~70 Ma),并且在整个地质历史时期连续暴露于地表;②证实了King(1949)等提出的某些假说,肯定了南半球某些克拉通上的红土高原和地貌面早在超级大陆解体以前就已存在,并首次从年代学的角度证实了King的“山麓夷平理论”的合理性。南美切割平原于高原面之间年龄分布特征的不同显示低位夷平面(切割平原)是以斜坡后退的方式形成的(Vasconcelos,1999);③风化历史可以进行全球性的对比,虽然风化作用本身是连续的,但在强度上存在明显的活动期次,这为风化壳、夷平面与其它全球性气候-构造事件之间的对比提供了广阔的前景;④风化年代学可以用于古地貌面的定年,Vasconcelos等(1994)对巴西风化壳的研究结果显示高位夷平面(高原面,即“南美面”)是白垩纪末期以前形成的,而切割平原形成于中新世;⑤针对某些红土剖面中含钾的锰结核,激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年技术可以获得其由里向外生长的高分辨率的同位素时间序列(Henocque等,1998)。此类研究结果表明,风化年代学结合微区测量技术进行岩相研究,完全有可能建立高分辨率的环境演变序列。

### 3 风化壳的垂向分带与风化地层学

Budel(1957)提出的“双面”理论认为,在厚层土壤或腐岩覆盖的热带地区,风化壳有2个活动的面(双层水平面):一个是暴露于气下的厚层腐泥土顶部的冲刷面;另一个是埋藏于腐岩底部,与未风化基岩接触的埋藏面,即风化前锋或初生面,在地貌演化过程中,在地表冲刷面遭受物理冲刷的同时,风化前锋也在不断向下拓展。双面模式对认识刻蚀平原、岛山等地貌单元的形成具有重要的指导意义,并已被用于青藏高原及其东邻邻区岩溶风化壳的形成和演化等问题的研究(Cui ZJ等,1997,1999;李德文等,1999,2000)。而其上、下2个界面同时降低的思想和风化年代学的研究进展为后来的风化地层学研究提供了理论基础。

当风化与侵蚀之间的平衡倾向于前者时,就可以发育在化学和矿物组成上具有层状特征的厚层风化壳剖面。De Oliveira等(1998)对巴西Parana盆地南部高原古老的玄武岩夷平面上的2个红土剖面进行光学显微镜、XRD、电子探针、FTIR和Mossbauer谱分析,结果表明,两剖面从下部杂色粘土和交代相到松散的红色粘性红壤在物理、化学性质和矿物组成特征等方面均存在有规律的变化,如粘土矿物垂向变化为基部蒙脱石混层矿物(蚀变基岩中绿色粘土)中部埃洛石、绿脱石过渡组合(粘性交代层)顶部高岭石(杂色粘土相);而在核岩风化中也存在一个明显的隐晶质序列。风化壳剖面的地层学研究显示某些大陆风化壳剖面记录着复杂的历史,可能包括几期风化、削蚀、局部埋藏和再风化等(Finkl,1984;Tardy等,1992)。地层学证据还表明,这种叠置关系可以作用几千万年到几亿年(Tardy等,1992)。

风化前锋从地表向下迁移,形成一个倒转的年龄剖面。这一点已经从测年数据得到证实,如Sillitoe等(1996)从智利某风化壳剖面上采集的明矾石测年结果从顶部到底部年龄依次是 $19.0 \pm 0.7$  Ma、 $18.1 \pm 0.7$  Ma、 $17.6 \pm 0.6$  Ma、 $16.8 \pm 1.2$  Ma、 $16.3 \pm 0.5$  Ma、 $15.2 \pm 0.5$  Ma,表明风化地层学所

研究的倒转年龄剖面是客观存在的。这一事实为建立精细的风化地层序列提供了可能。理论上老的风化矿物组合位于剖面上部,而较晚沉淀的表生矿物出现在剖面的下部,但是地表含氧水沿透水层和裂隙的差异性迁移可以使较早沉淀的老的风化矿物出现在剖面相对靠下的部位。而导致保存在剖面中的时间-地层学记录更为复杂,代表不同风化阶段的带可以出现在同一层次上。风化地层学为恢复剥蚀区的环境演变历史提供了理论上的支持,但是由于表生矿物的再溶解和再沉淀,叠置的风化事件使年龄模式更为复杂化,这些问题必须充分依靠年代学手段才能得到解决。

### 4 古地磁研究

风化壳古地磁研究基于这样一个假设:剩磁是从风化期间的化学作用获得的,而不是来自母岩。风化壳古地磁研究在2个方面取得了可喜的成果:一是基于视磁极漂移(APWP)的古地磁法测年,利用APWP法定风化剖面是西澳大利亚古生代和中生代岩石中交变磁化现象发现(Schmidt等,1976)以后兴起的。Idnurm等(1978)以及Schmidt等(1983)指出,硬壳中的赤铁矿可以保存晚白垩世或早第三纪的古地磁方向,通过对比古磁极位置和已经定义好的磁极参照曲线可以获得古地磁年龄。运用这种方法,Schmidt等(1976)、Idnurm等(1978)得到澳大利亚2个剖面的年龄是始新世和晚渐新世。Schmidt等(1983)、Idnurm等(1986)在印度研究鉴别出晚白垩纪和早第三纪2期古地貌面。随后在澳洲也有一系列类似的研究成果发表。但是,APWP方法的分辨率(不超过5~10 Ma)强烈依赖于风化作用启动以后研究区所在大陆的纬向漂移量,例如Gehring等(1992)在西非的类似研究中就没有获得成功。风化壳APWP古地磁定年方法本质上还限于澳洲和印度地区古老风化壳和地貌面的研究以及风化沉积序列中铁矿物的研究,这两个地区在过去 $1 \times 10^8$  a内都经历过明显的纬向漂移(前者超过 $30^\circ$ ,后者近 $90^\circ$ )。

风化年代学、地层学以及氧同位素等的研究结果表明,风化壳(除底部以外)腐岩内的大多数表生矿物(如铁锰氢氧化物、氧化物等)可以保存其形成时期环境的化石态信号,即氢氧化物和赤铁矿等在风化前锋沉淀时获得的特性在风化壳加厚过程中可以保留。根据双面模式的垂向拓展理论并考虑到赤铁矿等的封闭性,利用极性倒转序列指示极性时间内形成的腐岩的总量是可能的。其前提是腐岩化不仅现在仍在进行,而且在最近的几百万年里是以连续(而非时断时续)的方式进行的。红土化是一种垂向拓展的风化作用(Budel,1957;Macfarlane,1976;Nahon等,1970),剖面内部风化物质的理论年龄从下到上逐渐增加,只是顶部可能遭到退化和改造作用。Theveniaut等(1999)建立了法属圭亚那某风化壳的极性地层学剖面,认为该区风化壳的发育历史可以上溯到中新世。考虑到大部分大陆的演化历史并不适合APWP法古地磁测年(在最近的 $1 \times 10^8$  a或 $2 \times 10^8$  a里没有明显的纬向移动),利用极性地层学方法鉴别铁质物质组织过程中的各个步骤以及整个红土剖面的风化动力学是一种较好的选择。这样可以更好地理解红土过程中风化带的发育和时间。对风化壳前锋拓展过程中形成的向下变新的磁性地层剖面进行系统的研究,无疑是理解风化作用过程、标定风化事件以及准确量化风化作用(速度、强度)的一个强大工具。但是它很可能只适用于等体积风化类型的风化壳(如结晶岩地区),因为非等体积风化引起的剖面内部的扰动可能破坏过去的磁记录。

## 5 问题与前景

大陆风化包括无机的和由生物活动直接或间接引起的物理和化学风化作用。在大多数地区,风化盖层可以视为由气候、植被等外在条件维持的动力平衡系统(Lucas, 2001)。风化作用的最终结果是元素从陆到海的迁移(Meybeck, 1987)。而风化壳作为抗物理-化学风化的盖层相对稳定地存在,反映的是两种过程的平衡:一是促进风化盖层形成的物理化学风化,二是促成风化产物进入流域水系并最终搬运入海的物理化学侵蚀过程。构造运动是维持或破坏这一平衡的重要因子之一。

自1899年Chamberlin提出风化作用与构造运动、气候变化之间的相互反馈机制以来,有关全球性构造、气候事件之间的对比显示二者之间存在明显的相关性。大气圈层中CO<sub>2</sub>的积累引起的全球变暖是一个严肃的环境问题(Barker等, 1996)。控制大气圈层pCO<sub>2</sub>的主要反馈机制是Ca-Mg硅酸盐的风化以及随后的Ca-Mg碳酸盐岩的沉淀(Berner等, 1983)。化学风化特别是由生物引起的生物地球化学风化在C-Si循环中可能具有极为重要的缓冲作用,并影响pCO<sub>2</sub>和全球气候(Gwiazda等, 1994; Schwartzman等, 1991)。数字模型和地质记录的解释揭示了化学风化在维持长时期气候稳定性(如驱动气候变化响应构造)方面具有持续的作用(Kump等, 2000)。但是,现有的关于地史时期风化作用强度的认识大多来源于保存在海洋环境的海水和沉积物记录的变化(Robert等, 1987)。这些资料只能间接地反映风化作用的性质。而元素从陆到海的迁移仅能指示侵蚀(化学的或物理的)的增加(McCauley等, 1997),它与物理、化学风化作用加强的时间范围可能一致也可能不一致,风化年代学为全球性事件(火山、构造、海面变化、海水化学变化和消失事件以及物理海洋模式的变化等)与陆上保存的风化记录之间的对比提供必要的数据库记录。这种数据库有助于对全球变化作用过程和作用机制认识的深化,对建立全球事件与大陆风化作用之间的因果关系是非常必要的。

岩石圈、水圈、大气圈和生物圈相互作用的强度和速度控制了元素的全球性循环,也影响养分和温室气体在全球性的“库”中的积聚和停留时间(Berner等, 1983, 1994)。气候-风化反馈机制以及在预测人类活动对未来气候影响方面的能力依赖于化学风化的准确量化(Brady等, 1994)。土壤碳库因现在的土地利用而在赤道地区表现为大气CO<sub>2</sub>的源,而在北纬地区表现为局部的汇(Amundson, 2001)。获取有关地史时期风化作用强度和速度的信息,对理解构造-剥蚀-风化-气候之间的相互反馈机制和正确评估人类活动对未来气候的影响能力是非常必要的。

从环境科学的角度看,风化作用和整个地质历史时期内风化剖面内元素的分散速度在本质上类似于环境污染中有毒元素的分散。因此,模拟污染物在自然界中扩散速度和机制的模型的实用性可以通过自然风化过程的扩散机制和速度来评估。从矿床学的观点来看,很多重要的矿床(如铝土矿、红土型金、镍、稀土矿和表生富集的Fe、Mn、Co、Cu矿等)都与风化作用有关。目前国内学者在风化壳型金矿、稀土矿床的存在和成因(刘国平等, 1999;宋长春等, 1997;王银喜等, 2000;陈志澄等, 1997)埋藏古风化壳的性质及其与天然气富集的关系等(曹正林等, 1997;李任伟等, 2000;马振芳等, 1999)方面已经作了大量的研究工作。如能结合风化年代学研究来划分表生矿化地貌成矿单元,对地貌学和矿床学研究都具有积极的意义。

风化壳本身是一个开放的、不连续的多成因圈层,同时

又是联系地球岩石圈、水圈、生物圈、土壤圈和大气圈层的重要界面,是表生地貌学研究的核心内容(Селиверстов, 1986)。现已逐渐渗透到表生地球化学、环境科学、水文地质学等研究领域,成为地球科学众多学科交叉研究的重要内容,尤其对全球变化、环境变迁等方面的研究具有重要的理论和实践意义。风化壳作为地球不同圈层之间联系的纽带(Jacobson等, 2000),其蕴藏的环境信息不仅可以用于全球各大陆新生代(甚至晚中生代)以来气候-构造旋回的深层次研究,而且对建立和完善地球系统科学有着更为重要的意义。

## 参考文献

- 曹正林, 赵锡奎, 王英民等. 1997. 鄂尔多斯盆地北部古风化壳岩石-流体反应动力学模拟研究. 沉积学报, 15(4): 91~96.
- 陈志澄, 俞受均, 符群策等. 1997. 风化壳稀土矿有机成矿机理研究. 中国稀土学报, 15(3): 244~251.
- 崔之久, 李德文, 冯金良等. 2001. 覆盖型岩溶、风化壳与岩溶(双层)夷平面. 中国科学(D), 31(6): 510~519.
- 段雷, 郝吉明, 叶雪梅等. 2000. 中国土壤风化速率研究. 环境科学学报, 20(增刊): 1~7.
- 龚子同. 1987. 红色风化壳的生物地球化学. 见: 中国土壤. 北京: 科学出版社, 24~40.
- 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿. 1999. 中国红土与自然地带变迁. 地理学报, 54(3): 193~203.
- 黄镇国, 张伟强. 2000. 中国红土期气候期构造期的耦合. 地理学报, 55(2): 200~208.
- 黄镇国. 1998. 中国南方红色风化壳. 北京: 海洋出版社.
- 李德文, 崔之久, 刘耕年. 1999. 青藏高原古岩溶的存在及其与东邻地区岩溶的对比. 中国岩溶, 18(4): 309~318.
- 李德文, 崔之久, 刘耕年. 2000. 湘桂黔滇藏一线覆盖型岩溶地貌特征与岩溶(双层)夷平面. 山地学报, 18(4): 289~295.
- 李景阳, 朱立军, 梁风. 2000. 碳酸盐岩风化壳界面土层的结构和矿物学特征. 中国岩溶, 19(4): 301~307.
- 李任伟, 陈锦石, 陈志明. 2000. 蓟县早寒武-新元古不整合界面处风化壳碳酸盐碳-氧同位素组成特征. 地质科学, 35(1): 55~59.
- 刘国平, 汪东波, 徐勇. 1999. 中国红土型金矿类型成因和找矿. 地质与勘探, 35(3): 14~16.
- 卢升高, 董瑞斌, 俞劲炎等. 1999. 中国东部红土的磁性及其环境意义. 地球物理学报, 42(6): 765~771.
- 马振芳, 周树勋, 于忠平等. 1999. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系顶部古风化壳特征及其与天然气富集的关系. 石油勘探与开发, 26(5): 21~23.
- 宋长春, 张宝林. 1997. 黑龙江省北部风化壳的形成及其对砂金成矿的作用. 矿物岩石地球化学通报, 16(3): 183~185.
- 孙承兴, 王世杰, 刘秀明等. 2000. 风化壳剖面的定年研究. 矿物岩石地球化学通报, 19(1): 54~59.
- 王银喜, 李惠民, 杨杰东等. 2000. 华北古风化壳型稀有稀土矿床的发现及意义. 高校地质学报, 4(4): 605~606.
- 熊尚发, 刘东生, 丁仲礼. 2000. 南方红土的剖面风化特征. 山地学报, 18(1): 7~12.
- 徐义芳, 朱照宇, 文高国等. 2000. 雷州半岛南部若干红土剖面的地球化学与成土环境研究. 地球化学, 29(4): 402~408.
- 徐义芳, 朱照宇, 文启忠等. 1999. 英峰岭剖面红土的粘土矿物和化学特征与成土环境关系. 地球化学, 28(3): 281~288.
- 杨元根, 刘丛强, 袁可能等. 2000. 南方红土形成过程及其稀土元素地球化学. 第四纪研究(5): 471~480.
- 赵伦山, 张本仁. 1988. 地球化学. 北京: 地质出版社, 225~226.

## References

- Amundson R. 2001. The carbon budget in soils. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 29: 535~562.
- Barker WW, Welch SA, Banfield JF. 1996. Biogeochemical weathering of silicate minerals. In: Geomicrobiology: Interactions between microbes and minerals (Reviews in mineralogy) eds by Banfield JF and Nealon KH. Mineralogical Society of America, 391~428.
- Belt T. 1874. The naturalist in Nicaragua. Chicago: University of Chicago Press. 326.

- Berner RA, Lasaga AC, Garrels RM. 1983. The carbon-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *Am J Sci* 283 :641 ~ 683.
- Berner RA. 1994. Geocarb: a revised model of atmospheric CO<sub>2</sub> over Phanerozoic time. *Am. J. Sci* 294 :56 ~ 91.
- Bird MI, Chivas AR, Andrew A. 1989. A stable isotope study in lateritic bauxites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53 :1411 ~ 1420.
- Bird MI, Longstaffe FJ, Fyfe WS et al. 1993. An oxygen-isotope study of weathering in the Eastern Amazon Basin, Brazil. In: *Climate Change in Continental Isotopic Records*. *Geophys. Monogr.* 78 : 295 ~ 307.
- Bloom AL. 1998. *Geomorphology: A systematic analysis of late cenozoic landform*. Printice-Hall, Inc.
- Bouchard M, Jolicoeur S, Pierre G. 1995. Characteristics and significance of two pre-late-Wisconsinan weathering profiles (Adirondacks, USA and Miramichi Highlands, Canada). *Geomorphology*, 12 :75 ~ 89.
- Brady PV, Carroll SA. 1994. Direct effect of CO<sub>2</sub> and temperature on silicate weathering: possible implication for climate control. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58 :1853 ~ 1856.
- Budel J. 1957. Die dopplten einbnungsnflachen in den feuchten tropen. *Z. F. Geomorphologie*, 1(2) :223 ~ 225.
- Cao ZL, Zhao XK, Wang YM et al.. 1997. Modelling reseach on the rock-fluid reaction dynamics of the fossil crust of weathering in the north of Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(4) :91 ~ 96 (in Chinese with English abstract).
- Chamberlin TC. 1899. An attempt to frame a working hypothesis of the cause of glacial periods on an atmospheric basis. *Journal of Geology*, (7) :545 ~ 584.
- Chen ZC, Yu SJ, Fu QC et al.. 1997. Study on the organic metallogenetic mechanism of weathering crust REE deposits. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 15(3) :244 ~ 251 (in Chinese with English abstract).
- Chukhrov FV, Shanin LL, Yermilova HD. 1966. Feasibility of absolute-age determination for potassium-carrying manganese minerals. *International Geology Review* 8 :278 ~ 280.
- Cui ZJ, Gao QZ, Liu GN et al.. 1997. The initial elevation of palaeokarst and planation surfaces on Tibet plateau. *Chinese Science Bulletin* 42(11) :934 ~ 939.
- Cui ZJ, Li DW, Wu YQ et al.. 1999. Comment on planation surface. *Chinese Science Bulletin* 44(22) :2017 ~ 2022.
- Dammer D, Chives AR, McDougall I. 1996. Isotope dating of supergene manganese oxides from the Groote Eylandt Deposit, Northern Territory, Australia. *Economic Geology* 91 :386 ~ 401.
- De Oliveira MT, Formoso MLL, Trescases JJ et al.. 1998. Clay mineral facies and lateritization in basalts of the southeastern Parana basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(4) :365 ~ 377.
- Ding L, Zhou Y, Zhang JJ et al.. 2000. Geologic relationships and geochronology of the Cenozoic volcanoes and interbedded weathered mantles of Yulinshan in Qiangtang, North Tibet. *Chinese Science Bulletin* 45(24) :2214 ~ 2220.
- Duan L, Hao JM, Ye XM et al.. 2000. Study on weathering rate of soil in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 20(Sup. ) :1 ~ 7 (in Chinese with English abstract).
- Finkl CW. 1984. Chronology of weathered material and soil age determination in pedostratigraphic sequences. *Chem. Geol.* 44 :311 ~ 335.
- Gehring AU, Keller P, Heller F. 1992. Magnetic evidence for the origin of lateritic duricrusts in southern Mali (Western Africa). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 95 :33 ~ 40.
- Girard JP, Razanadronoroa D, Freyssinet P. 1997. Laser oxygen isotope analysis of weathering goethite from the lateritic profile of Yaou, French Guiana: paleoweathering and paleoclimatic implications. *Appl. Geochem.* 12 :163 ~ 174.
- Gong ZT. 1987. Biogeochemistry of the red weathering crust. In: *Soils in China*. Beijing: Science Press, 24 ~ 40 (in Chinese).
- Gwiazda RH, Broecker WS. 1994. The separate and combined effects of temperature, soil pCO<sub>2</sub>, and organic acidity on silicate weathering in the soil environment: Formulation of a model and results. *Global Biogeochem Cycles*, 8 :141 ~ 155.
- Hautmann S, Lippolt HJ. 2000. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of central european K-Mn oxides—a chronological framework of supergene alteration processes during the Neogene. *Chemical Geology*, 170 :37 ~ 80.
- Henocque O, Ruffet F, Colin F et al.. 1998. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of west African lateritic cryptomelanes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62 :2739 ~ 2756.
- Horvath Z, Varga B, Mindszenty A. 2000. Micromorphological and chemical complexities of lateritic profiles from basalt (Jos Plateau, Central Nigeria). *Chemical Geology*, 170 :81 ~ 93.
- Huang ZG, Zhang WQ, Chen JH. 1999. The Change of natural zones and the evolution of red earth in China. *Acta Geographica Sinica* 54(3) :193 ~ 203 (in Chinese with English abstract).
- Huang ZG, Zhang WQ. 2000. Coupling relationship between the red earth evolution, climate change and tectonic movement in China. *Acta Geographica Sinica* 55(2) :200 ~ 208 (in Chinese with English abstract).
- Huang ZG. 1998. *The red weathering crust*. Beijing: Ocean Press (in Chinese).
- Idnurm M, Schmidt PW. 1986. Palaeomagnetic dating of weathered profiles. *Geol. Surv. India Mem*, 120 :79 ~ 88.
- Idnurm M, Senior BR. 1978. Palaeomagnetic ages of late Cretaceous and Tertiary weathered profiles in the Eromanga basin, Queensland. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 24 :263 ~ 272.
- Jacobson MC, Charlson RJ, Rodhe H et al.. 2000. *Earth system science*. San Diego: Academic Press.
- Jenny H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York.
- Ji HB, Ouyang ZY, Wang SJ et al.. 2000. Element geochemistry of weathering profile of dolomite and its implications for the average chemical composition of the upper-continental crust—Case studies from the Xinpu profile, northern Guizhou Province, China. *Science in China (D)* 43(1) :23 ~ 3.
- Ji HB, Wang SJ, Ouyang ZY et al.. 2001. Paleogene origin of dolomite in a basaltic weathering profile, Kohala Peninsula, Hawaii: Comment. *Geology*, 29(6) :563 ~ 564.
- King LC. 1949. On the ages of African landsurfaces. *Q. J. Geol. Soc. London*, 104 :439 ~ 453.
- Kump LR, Brantley SL, Arthur MA. 2000. Chemical weathering, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28 :611 ~ 67.
- Li DW, Cui ZJ, Liu GN. 1999. Existence of palaeokarst on Tibet plateau and its correlation with the karsts of the Eastern District. *Carsologica Sinica*, 18(4) :309 ~ 318 (in Chinese with English abstract).
- Li DW, Cui ZJ, Liu GN. 2000. Feature and origin of covered karst on Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet. *Journal of Mountain Science*, 18(4) :289 ~ 295 (in Chinese with English abstract).
- Li JY, Zhu LJ, Liang F. 2000. Characteristics of structure and mineralogy of interface laterite in weathering crust of carbonate rocks. *Carsologica Sinica*, 19(4) :301 ~ 307 (in Chinese with English abstract).
- Li RW, Chen JS, Chen ZM. 2000. Characteristics of the C-and O-isotopic compositions of carbonates in the weathering profile at the unconformable boundary between the Early Cambrian and Late Proterozoic in Ji County, North China. *Scientia Geologica Sinica*, 35(1) :55 ~ 59 (in Chinese with English abstract).
- Lidmar-Bergstrom K. 1995. Relief and saporolites thoutn time on Baltic shield. *Geomorphology*, 12 :45 ~ 61.
- Liu GP, Wang DB, Xu Y. 1999. The types, metaiogeny, expioration of lateritic ddb depositsin, China. *Geology and Prospecting*, 35(3) :14 ~ 16 (in Chinese with English abstract).
- Lu SG, Dong RB, Yu JY et al.. 1999. Magnetic measurement characterization of red earth profile in Eastern China and its environmental implications. *Chinese Journal of Geophysics* 42(6) :765 ~ 771 (in Chinese with English abstract).
- Lucas Y. 2001. The role of plants in controlling rates and products of weathering: importance of biological pumping. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 29 :135 ~ 163.
- Ma YJ, Liu CQ. 1999. Trace element geochemistry during chemical

- weathering-As exemplified by the weathered crust of granite, Longnan, Jiangxi. Chinese Science Bulletin 44(24):2260~2263.
- Ma ZF, Zhou SX, Yu ZP et al. 1999. The weathered paleocrust on the Ordovician Ordos basin and its relationship to gas accumulation. Petroleum Exploration and Development 26(5):21~23 (in Chinese with English abstract).
- MacFarlane MJ. 1976. Laterite and Landscape. Academic Press, London.
- Marker ME, McFarlane MJ. 1997. Cartographic analysis of the African surface complex between Albertinia and Mossel Bay, southern Cape, South Africa. South African Journal of Geology, 100(3):185~194.
- Martini IP, Chesworth W et al. 1992. Weathering soils and paleosols: development in earth surface processes 2. Amsterdam: Elsevier Science Publishers 618.
- McCaughey SE, DePaolo DJ. 1997. The Marine  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $^{18}\text{O}$  records, Himalayan alkalinity fluxes, and Cenozoic climate models. In: Tectonic Uplift and Climate Change (eds. by Ruddiman W. F.). Plenum Press.
- Meybeck M. 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. American Journal of Science 287:401~428.
- Nahon D, Millot G. 1977. Enfoncement géochimique des cuirasses ferrugineuses par épigénie du manteau d'altération des roches mères gréseuses. Influence sur le paysage. Sci. Geol. Bull., 30(4):275~282.
- Nahon DB. 1991. Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. New York: John Wiley & Sons Inc. 313.
- Ollier CD. 1988. Deep weathering, ground water and climate. Geografiska Annaler 70A:285~290.
- Right D, Meunier A. 1995. Origin of clays by rock weathering and soil formation. In: Origin and mineralogy of clays (eds Velde B). Berlin: Springer-Verlag. 43~161.
- Robert C, Chamley H. 1987. Cenozoic evolution of continental humidity and paleoenvironment, deduced from the kaolinite content of oceanic sediments. Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol., 60:171~187.
- Robinson DA, Williams RBG et al. 1994. Rock weathering and landform evolution. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 519.
- Rogers WB, Rogers RE. 1848. On the decomposition and partial solution of minerals and rock by water and water charged with carbonic acid. Am. J. Sci. 5:401~405.
- Schmidt PW, Embleton BJJ. 1976. Paleomagnetic results from sediments of the Perth Basin, Western Australia, and their bearing on timing of regional lateritisation. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 19:257~273.
- Schmidt PW, Currey DT, Ollier CD. 1986. Sub-basaltic-weathering, damsites, palaeomagnetism and the age of lateritisation. J. Geol. Soc. Aust., 23:367~370.
- Schmidt PW, Ollier CD. 1983. Palaeomagnetic dating of late Cretaceous to Early Tertiary weathering in New England, N.S.W., Australia. Earth Sci. Rev., 25:363~371.
- Schmidt PW, Prasad V, Ramam PK. 1983. Magnetic ages of some Indian laterites. Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol., 44:185~202.
- Schwartzman DW, Volk T. 1991. Biotic enhancement of weathering and surface temperatures on Earth since the origin of life. Paleogeogr. Paleoclimat. Paleoecol., 90:357~371.
- Shannon LL, Ivanov IB, Shiptulin FK. 1968. The possible use of alunite in K-Ar geochronometry. Geokhimiya (1):109~111.
- Sherman GD, Ikawa H. 1968. Soil sequences in the Hawaiian Islands. Pacific Science 22(4):458~464.
- Sillitoe RH, McKee EH. 1996. Age of supergene oxidation and enrichment in the Chilean porphyry copper province. Econ. Geol., 91:164~179.
- Smith BJ, McAlister JJ. 1995. Mineralogy, chemistry and palaeoenvironmental significance of an Early Tertiary Terra Rossa from Northern Ireland: A preliminary review. Geomorphology, 1995. 12:63~73.
- Soler JM, Lasaga AC. 2000. The Los Pijiguos bauxite deposit (Venezuela): A compilation of field data and implications for the bauxitization process. Journal of South American Earth Sciences, 13(1~2):47~65.
- Song CC, Zhang BL. 1997. Formation of residuum and its role on the gold-placer mineralization in the north of Heilongjiang province. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 16(3):183~185 (in Chinese with English abstract).
- Strakhov NM. 1967. Principles of lithogenesis. V. 1 (transl. by Fitzsimmons JP.). Edinburgh: Oliver & Boyd Ltd. 245.
- Sun CX, Wang SJ, Liu XM et al. 2000. Review on the dating of the weathering profiles. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 19(1):54~59 (in Chinese with English abstract).
- Tardy Y, Roquin C. 1992. Geochemistry and evolution of lateritic landscape. In: Martini IP, Chesworth W. eds. Weathering, Soil and Paleosols. Amsterdam: Elsevier 407~443.
- Taylor R, Howard K. 2000. A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: Evidence from Uganda. Hydrogeology Journal 8:279~294.
- Theveniaut H, Freyssinet Ph. 1999. Paleomagnetism applied to laterite profiles to assess saprolite and duricrust formation process: the example of Mont Baduel (French Guiana). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 148:209~231.
- Vasconcelos PM, Becker TA, Renne PR et al. 1994. Direct dating of weathering phenomena by  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis of supergene K-Mn Oxides. Geochim. Cosmochim. Acta, 58:1635~1665.
- Vasconcelos PM, Becker TA, Renne PR et al. 1992. Age and duration of weathering  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis of K-Mn Oxides. Science 258:451~455.
- Vasconcelos PM. 1999. K-Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of weathering processes. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 27:183~229.
- Wang SJ, Ji HB, Ouyang ZY et al. 1999. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock. Science in China (D) 42(6):572~581.
- Wang YX, Li HM, Yang JD et al. 2000. Discovery of palaeoweathering type rare and rare earth element deposits in Northern China and its significance. Geological Journal of China Universities, 6(4):605~606 (in Chinese with English abstract).
- White AF, Brantley SL. 1995. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals (Reviews in Mineralogy, vol. 31). Chelsea: Book Crafters Inc.
- Wiesner E. 1999. Weathering beneath lateritic profiles. Bull. Eng. Geol. Env., 58:71~74.
- Xiong SF, Ding ZL, Liu DS. 1999. Comparisons of grain size characteristics of red earth from southern China with that of loess and dune sand from Beijing region. Chinese Sci Bull 44(18):1690~1693.
- Xiong SF, Ding ZL, Liu DS. 2000a. The worm-shaped veins in the red earth of South China-Pedological evidence for root traces of past forest. Chinese Sci Bull 45(19):1800~1804.
- Xiong SF, Liu TS, Ding ZL. 2000b. The weathering sequence of the red earth over southern China. Journal of Mountain Science, 18(1):7~12 (in Chinese with English abstract).
- Xu YF, Zhu ZY, Wen GG et al. 2000. Geochemistry and soil forming environment of the red soil section in the southern Leizhou peninsula, Guangdong Province. Geochimica 29(4):402~408 (in Chinese with English abstract).
- Xu YF, Zhu ZY, Wen QZ et al. 1999. Clay mineral, chemical characteristics and environmental record of the multi-stage laterite at Yingfengling section, Leizhou Peninsula. Geochimica, 28(3):281~288 (in Chinese with English abstract).
- Yang YG, Liu CQ, Yuan KN et al. 2000. Formation processes and REE geochemistry of red earth in Southern China. Quaternary Science (5):471~480 (in Chinese with English abstract).
- Zhao LS, Zhang BR. 1988. Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House. 225~226 (in Chinese).
- Борисевич ДВ. 2000. Поверхности выравнивания платформенных частей континентов: их корреляция и условия формирования. Геоморфология (1):1~13.
- Борисевич ДВ. 1989. Корреляция возрастов поверхностей выравнивания материков Северного Южного полушарий. Геоморфология (1):17~26.
- Селиверстов ЮП. 1986. Проблемы Гипергенной Геоморфологии. Л.: Изд-во Ленинград. Ун-ма.