



湘桂黔滇藏红色岩溶风化壳的发育模式

作者: 李德文 等

基于对湘、桂、黔、滇、藏等地岩溶区红色风化壳的野外和室内研究, 从表生地貌学、粘土矿物学和地球化学角度分析红色石灰土性质与地貌演化的关系, 提出红色岩溶风化壳发育的二阶段模式: 1) 地貌夷平-风化物质积累阶段, 在地貌演化过程中溶蚀残余物质不断积累, 最后在夷平面上形成厚层连续的泥质风化壳。夷平面的地貌水文条件有利于粘粒的形成和保存, 但限制了富铝化作用的有效进行, 造就了岩溶风化壳粘粒含量高、富铝化程度低的特点。这与研究区23个红色岩溶风化壳剖面化学、粒度特征和粘土矿物组合特点一致。 2) 地貌切割-风化壳淋溶阶段, 原始夷平面上的风化壳大多呈灰色。只有在构造隆升和地表微切割导致地下水位降低、淋溶条件开始改善的情况下, 风化壳才有可能从根本上转为红色。

湘桂黔滇藏红色岩溶风化壳的发育模式 李德文¹, 崔之久², 刘耕年² (1. 南京大学城市与资源学系, 南京 210093; 2. 北京大学城市与环境学系, 北京 100871) 摘要: 基于对湘、桂、黔、滇、藏等地岩溶区红色风化壳的野外和室内研究, 从表生地貌学、粘土矿物学和地球化学角度分析红色石灰土性质与地貌演化的关系, 提出红色岩溶风化壳发育的二阶段模式: 1) 地貌夷平-风化物质积累阶段, 在地貌演化过程中溶蚀残余物质不断积累, 最后在夷平面上形成厚层连续的泥质风化壳。夷平面的地貌水文条件有利于粘粒的形成和保存, 但限制了富铝化作用的有效进行, 造就了岩溶风化壳粘粒含量高、富铝化程度低的特点。这与研究区23个红色岩溶风化壳剖面化学、粒度特征和粘土矿物组合特点一致。 2) 地貌切割-风化壳淋溶阶段, 原始夷平面上的风化壳大多呈灰色。只有在构造隆升和地表微切割导致地下水位降低、淋溶条件开始改善的情况下, 风化壳才有可能从根本上转为红色。关键词: 红色岩溶风化壳; 二阶段发育模式; 夷平面; 构造隆升; 青藏高原; 云贵高原中图分类号: P931.5 1 概述 风化作用在夷平面形成演化过程中占有重要地位。风化壳研究有助于确认夷平面的存在以及对夷平时期环境的恢复[1-4]。在青藏高原地区, 目前残留下来的红色风化壳多见于灰岩裂隙里, 其时代为中新生 (19-7 Ma BP), 但分布较为零星[5-7]。与其纬度相近的云贵高原和湘桂丘陵自新生代以来一直处于陆相环境, 发育了广泛分布的夷平面和红色风化壳[8-9]。将上述地区红色岩溶风化壳进行对比研究对认识青藏高原风化壳、夷平面以及相关的高原隆升与地貌演化问题无疑具有重要意义。红色岩溶风化壳主要由红色石灰土组成。其广泛的时空分布显示了这种红色土壤在地貌演化中所具有的悠久历史。如黑海沿岸瓦尔纳以北黄土中黑钙土下面[10]、北爱尔兰第三纪玄武岩之下[11]以及青藏高原安多、昂仁等地都有它的存在。Jenny认为, 它们是第四纪以前湿热气候下的产物[10]。从土壤学的角度来看, 红色石灰土是热带、亚热带生物气候环境下的产物[12], 而其与地貌演化之间的关系一直缺乏系统的研究。本文旨在通过对湘桂黔滇藏部分地区的野外调查和室内分析, 运用地貌学、地球化学和土壤学理论讨论岩溶区红色风化壳的发育和演化模式。其目的在于推动青藏高原及其东邻地区夷平面的对比, 以及岩溶夷平面性质和形成过程的深入探讨。 2 红色石灰土的性质本文讨论的红色岩溶风化壳剖面共23个(图1)。各剖面主要由红色石灰土组成。剖面结构大致可分3层。上部层位在青藏高原腹地大多为岩石碎屑; 从中甸往东主要为腐殖质含量较高的深色表土层。中部层位为红色粘土层, 质地粘重。在青藏地区该层内常含灰岩角砾, 中部地区该层底部常见CaCO₃淀积。下部为未风化的碳酸盐岩, 与上覆粘土层间界线清晰, 但起伏较大。样品采自中部红色粘土层。风化壳土样123个, 分析项目包括粘粒部分矿物含量、粒度分析和XRD分析。大部分剖面还采集了母岩样(21个)作矿物含量分析, 以便于对比风化壳的相对淋溶程度。 2.1 土壤化学性质粘粒部分主要化学成分SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃的相对含量见图2a。从图上可以看出风化壳粘粒部分主要化学成分(硅、铝、铁)变化不大, 在三角图上的投影集中在狭小区域; 同时投影区呈矩形, 明显沿Al₂O₃/Fe₂O₃ = 2的方向延伸(图2a), 表明Fe₂O₃、Al₂O₃的积累是同步的, 存在一定的富铝化作用(箭头方向表示脱硅富铝铁作用加强)。粘粒的硅铝分子比值(sa)是评估风化程度的常用指标之一[13]。sa < 2表示明显的富铝化趋势(图2a内直线sa = 2左侧)。本研究测试样品sa值大多> 2, 平均2.63, 反映研究区岩溶红色风化壳所经历的脱硅富铝作用并不强, 仅个别剖面表现出弱富铝化特征。于天仁等认为粘粒MgO含量可以反映土壤的成熟程度[12]: 红壤MgO含量0.65-1.7%, 砖红壤(或赤红壤) < 0.65%, 黄棕壤 > 1.7%。按照这个划分, 则本研究大部分样品落在红壤范围内(图2b), 另有一部分样品(> 1.7%)应属黄棕壤或成熟度更低的土壤; 也有少量位于砖红壤的上限, 如昭通大龙洞、滇西北中甸等地。盐基淋溶程度ba(也称淋溶率)为粘粒部分碱(土)金属氧化物与氧化铝的分子比。按以下公式计算: ba = (Na₂O + K₂O + CaO + MgO)/Al₂O₃; (2-1) 将各剖面土壤的风化淋溶系数除以各自母质的ba值, 得到的相对淋溶率(记为re.ba)可以用于不同剖面之间的横向比较。其计算公式为: re.ba = 淋溶层土壤的ba/母质层土壤的ba (2-2) 研究区红色石灰土ba值为0.0925-0.57, 平均0.2507, 显示盐基淋溶强度较大(虽然变异

大)。盐基相对淋溶率 $re.ba$ 值大致在 $n \times 10^{-1} \sim n \times 10^{-4}$ 之间,个别低至 $n \times 10^{-5}$,反映其盐基淋溶程度很高。土壤风化度(μ 值)表征土壤风化程度[14],计算方法为 $\mu = (\text{淋溶层}K20/Na20)/(\text{母质层}K20/Na20)$ (2-3) 由于胶体表面对钾的选择吸附大于钠,故此值随淋溶程度的增加而增加[14]。对研究区部分剖面(16个)的计算结果表明, μ 值变异极大。大多数样品大于1,部分达10以上,表明这些剖面的风化程度非常高。

2.2 土壤粒度特征

图2c为研究区红色石灰土的质地组成(砂粒1~0.02 mm,粉粒0.02~0.002 mm,粘粒<0.002 mm)。图上样品点有向粘粒端集中的趋势。另外,样品粉粒和粘粒的比值相对稳定(大致集中在粉粒/砂粒=2的直线上,见图中直线),表征风化壳剖面中粘粒的机械淋洗和粘化作用(arglification)非常明显(沿斜线向左下方逐渐加强)。大多数样品粘粒含量(<2%?)都很高,部分达90%以上,如昭通大龙洞、中甸益仁冈等。全剖面粘粒含量最高值以安多北山最低,仍达到64%(细粘粒58.6%)。对比南方同地带的其它土壤[15],可以看出研究区红色岩溶风化壳的粘粒含量较之后者高出2-3倍。因此粘粒含量极高是岩溶红色风化壳的共同特点。粉粒一般为化学风化及生物风化过程中尚未遭彻底破坏的、保存于细土粒中的原生矿物,粘粒主要是强烈化学风化形成的新生矿物。因此,风化程度可用粉粘比(粉粒与粘粒含量之比)来反映。粉粘比愈小,表明风化壳的风化程度愈高。厉仁安(1986)在浙江的研究结果(张建林提供)显示,红壤、黄红壤和黄壤的B层粉粘比均值分别为0.75($n = 26$)、1.15($n = 19$)和1.59($n = 19$) (图2c中的直线a、b、c)。本区红色石灰土粉粘比大多小于0.75(大多位于图中直线a左下方靠粘粒端元一侧)。如滇东北会泽剖面粉粘比为0.1-0.4。因此,单纯从粉粘比来看,研究区红色岩溶风化壳组成物质风化程度大多达到或超过东部地区的红壤。

2.3 粘土矿物组合

本区岩溶红色风化壳剖面粘土矿物组成(图2d)主要有两个特点:①2:1型粘土矿物含量(XRD分析结果)较高,大部分样品超过80%;以蒙脱石为主,伊利石次之(部分剖面还含有一定量的绿泥石)。总体上反映其粘粒级矿物风化序列并不高,与 sa 值以及 MgO 含量等反映的淋溶趋势基本一致。个别高岭石含量较高的剖面(如中甸、大龙洞等),其样品粘粒部分 MgO 含量也较低,甚至落在砖红壤区域(<0.65%)。②以高岭石/蒙脱石=1为界(图2c中直线),几乎所有样品都分布在蒙脱石一侧,显示蒙脱石是最主要的新成矿物(从成因上看,绿泥石、伊利石主要是从母岩继承而来的)。另外,从垂向上看,红色岩溶风化壳粘粒化学性质和粘土矿物组合在剖面上都比较稳定,而粒度组成从上到下逐渐变粘,粘粒含量从上向下逐渐增加。

3 岩溶风化壳发育特征

3.1 红色石灰土形成环境分析

从空间分布上看,所研究的剖面跨越经度约15度,而且从东到西目前已出现数千米的高差,但是岩溶红色风化壳的性质特征如 sa (图2a)、 MgO 含量(图2b)、盐基淋溶程度及相对淋溶率、 μ 、粘粒含量(图2c)、粉粘比和粘土矿物组合(图2d)等在区域上表现出明显的相似性。这反映他们具有相似的发育和演化历史。另一方面,岩溶红色风化壳与其它岩类的风化壳不同,表现出粘化作用强而富铝化程度弱的特点。粘粒含量主要受气候、母岩以及地貌条件等控制。Jenny[14]在北美的研究表明粘粒含量与成土环境温度呈正相关;而降水对粘粒含量的控制作用也非常容易理解,因为较高的降水量增加心土湿度,促成粘化作用的有效进行。因此粘粒含量在很大程度上反映了成土环境的湿热条件。本区红色岩溶风化壳粘粒含量异常之高,除了反映湿热的气候条件、长时间的粘化作用以及一定程度的继承性(来自母岩)以外,还应与特定的地貌水文条件有关。地貌条件不仅影响粘粒的运移和积累,而且通过影响地表和地下水文结构来影响壳内湿度。要造就高粘粒的风化壳,必须有特殊的地貌条件(地表起伏小,以保证土层的持续粘化而又不被剥蚀带走)和水文条件(地下水埋深浅)相配合。这种景观条件在大的时空尺度上当属夷平面无疑。藏北[2,5-7,9]、滇西北[16]、滇中[17]等地的野外观察也表明,厚层连续的红色岩溶风化壳一般只发育在夷平面上。红色岩溶风化壳粘粒部分主要化学组成、矿物组合以及 sa 值等并未反映出湿热土壤所具有的典型的强烈富铝化特征,这从另一个角度反映了夷平面上特殊地貌水文特征。夷平面接近侵蚀基准、地势和缓、地下水埋深很浅,导致地表排水不畅,地下水滞留。这些条件限制了淋溶作用的有效进行(特别是下部),导致脱硅富铝作用较弱(粘粒 sa 值较高)。因此,尽管其成土作用时间很长,淋溶程度仍很弱。其他学者[18-21]对碳酸盐岩风化壳的研究结果也表明,此类风化壳脱硅富铝作用较低。至于淋溶率、相对淋溶率和 MgO 含量所反映的淋溶程度之所以较高,可能是下列因素引起的:一是灰岩的主要成分 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 可以溶解搬运;二是K、Na、Ca、Mg等离子的淋溶相对容易,一般在风化作用的早期阶段即已大量流失。表生环境粘土矿物的种类主要取决于体系内硅的活度。高的地下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地迁移,结果更有利于形成以蒙脱石为主的粘土矿物组合[22-23]。从水文地质条件看,内排水不良还可以导致硅酸盐粘粒重新大量出现[14];在湿热的低海拔地区,如果排水不畅的话,高岭石在年降水量900 mm时含量最高,而在1000-1100 mm时消失,转而以蒙脱石为主[24]。因此,研究区以蒙脱石为主的粘土矿物组合反映的是一种滞水环境,后者正是由起伏较小的夷平面地貌条件派生出来的。

3.2 红色岩溶风化壳的地貌特征

碳酸盐岩的风化过程是一种典型的非等体积风化。这一过程决定了岩溶风化壳具有某些不同于常规风化壳的性质和特点。首先,在灰岩风化过程中,非等体积风化伴有频繁的上下扰动,导致岩溶风化壳的发育缺乏层次。这一点可以从红色石灰土粘粒部分化学性质在剖面上的稳定性得到印证。其次,风化壳的形成需要溶蚀掉巨厚的岩层。据桂西南地区的资料,以假定钛不发生移动为基础,计算出纯质灰岩风化后形成土壤的残留量为0.15%,即1 m风化壳需要627 m厚的基岩风化才能形成[25]。残余物质积累成风化壳必然伴有长时间的岩溶作用和夷平作用,导致地貌向准平原化方向发展,形成地势起伏和缓的夷平面。结合Curtis et al. [26]、Trudgill [27]以及作者等[28]对岩溶区风化壳发育与保存条件的研究结果,可以认为红色岩溶风化壳一般只出现在夷平面上。从地貌分布上看,红色岩溶风化壳与夷平面的关系也非常密切。青藏高原红色风化壳在大的地貌部位上与主夷平面是一致的,在局部的缓丘或山顶上连续分布,如定日、昂仁、安多、比如等地都可见到。云贵高原红色风化壳较连续,厚度一般3-5 m。在滇西一带大多位于宽阔平整的山顶面上(如白汉场以东地区);滇中和贵州西部一带所研究剖面大致位于高原面上(如宣威、威宁等地)。湘桂丘陵红色岩溶风化壳主要位于岩溶平原上(如桂林、永州、道县等地)。这些地区的岩溶风化壳主体基本上都与开阔平坦的地貌面联系在一起的。

4 红色岩溶风化壳发育的二阶段模式

4.1 夷平面景观制约下的风化壳特征

当碳酸盐岩地层在岩溶作用下向地貌终结阶段——夷平面发展时,地面高程将逐渐接近侵蚀基准。原岩溶蚀后剩下的非可溶性残余物不断积累成厚层的石灰土。如前所述,湿润的气候和和缓的地貌,有力地促进了粘化作用的进行(就地粘化作用);而在相对低洼的地貌部位,可能还部分接受异地粘粒的近距离迁移(异地粘化作用)。因此,在岩溶夷平

面发育的同时也发育了厚层的泥质风化壳,成壳期大体对应于地壳长时间稳定的夷平期。4.2 构造隆升与近地表水文结构夷平面的发育有利于厚层泥质风化壳的形成,但是地下水位上升不利于成熟土壤的发育。对大区域来讲,侵蚀基准下降(主要指构造隆升)是从根本上改变近地表水文结构的唯一方式。构造隆升导致地下水水位降低,地貌局部下切。地表水排泄条件改善为风化壳淋溶作用创造了必要的地下水循环条件,也为夷平面上的泥质风化壳从根本上由灰色转变为红色提供了可能。构造隆升在红色岩溶风化壳发育中的作用可以通过对比隆升较弱的湘桂丘陵和隆升较强的中西部岩溶区得到验证。在湘桂地区的岩溶平原上,地下水埋深浅,地表常见半季节性积水的池塘、浅洼地等。这种景观条件对淋溶作用(富铝化)非常不利。在桂林附近人工开挖的剖面上,覆盖在石牙之上的风化壳主体仍呈灰色,厚度约10 m(仅顶部约1-2 m呈红色)。反映其现代土下环境主体上仍处于还原状态。中西部地区(青藏高原、云贵高原)构造较快抬升以后淋溶条件已经改善,风化壳基部只能见到红色石灰土(如贵阳天河潭一带工程揭露的剖面)。不难想象,风化壳的红化应该是夷平面抬升到一定高度、导致近地表水文条件发生改变以后才进行的。

4.3 岩溶红色风化壳发育的二阶段模式

红色石灰土并非地貌夷平阶段的最终产物,而是夷平期后构造活动和剥蚀作用复活阶段的特点。因为只有这种构造背景才能导致区域性地表水文结构的改变,才能创造风化壳红化所需要的氧化条件和脱硅富铝所需的淋溶条件。泥质风化壳才能从整体上由灰色转变为红色。这与Селиверстов提出的红土发育与地貌演化之间的关系是一致的[4]。不过,由于细质土层的淋溶深度和强度远不如粗粒土层[14],土质粘重的岩溶风化壳在被抬升直至剥蚀、搬运以前的这段时间内一般很难达到较高的富铝化阶段。根据红色石灰土性质、岩溶风化壳的发育特征以及地貌作用特点,作者从地貌演化角度把岩溶区红色风化壳的发育过程划分为两个阶段:地貌夷平和风化物质积累阶段(夷平-成壳期)以及地貌切割和风化壳物质氧化淋溶阶段(切割-红化期)。

5 讨论与结论

有关岩溶风化壳发育阶段性问题的讨论已有不少。最近Twi dale有关地貌发育二阶段的讨论也涉及这一问题[29]。王世杰等[18]曾从矿物学和微量元素地球化学的角度把碳酸盐岩风化成土作用分为两个阶段。首先是基岩中“杂质或不溶物”在风化作用过程中逐步堆积形成残积土(残积土堆积阶段),然后再在残积土的基础上进一步演化成目前的土壤(残积土演化阶段);而残积土的演化类似于其他岩类的风化作用过程,尽管这一结论并没有与大尺度的区域地貌演化历史联系起来,但是这一基于时间的演化序列实际上从地球化学和矿物学的角度印证了我们的看法是合理的。堆积形成残积土阶段可能对应于本文提出的红色风化壳发育的第一阶段(即地貌演化的夷平期和成壳期),而残积土演化阶段则对应于前述模式的第二阶段(即淋溶条件改善的切割期和风化壳红化期和淋溶期)。夷平期、成壳期对应于构造稳定时期,形成厚层的泥质风化壳;切割期、红化期对应于构造抬升期,泥质风化壳从灰色转向红色。本文主要获得以下认识:

- (1) 组成红色岩溶风化壳的红色石灰土富铝化程度低、粘化程度高,反映其形成于排水不畅、地势和缓的湿热环境。这种景观条件从大的尺度上看当属夷平面。
- (2) 碳酸盐岩风化是一种典型的非等体积风化,风化壳的积累需要溶蚀掉厚厚的岩层,导致地貌向准平原化方向发展,形成地势起伏和缓的夷平面。厚层连续的红色岩溶风化壳一般只出现在夷平面上。野外观测结果支持这种看法。
- (3) 非等体积风化使得风化壳在积累过程中伴有频繁的重力扰动和混合,导致岩溶风化壳在剖面上普遍缺乏层次。这点可从红色石灰土化学性质的稳定性得到印证。
- (4) 原始夷平面上的岩溶风化壳剖面大多以灰色为主(还原环境),侵蚀基准下降是从根本上改变近地表水文结构、使风化壳从灰色为主转变到红色(氧化环境)的唯一原因。此种影响可以通过对比构造隆升较弱的湘桂丘陵和隆升较强的中西部岩溶区来认识。但岩溶风化壳过于粘重,因此很难在短时间内达到较高的富铝化阶段。
- (5) 岩溶区红色风化壳发育过程可以划分为两个阶段:地貌夷平和风化物质积累阶段(夷平-成壳期)以及地貌切割和风化壳物质氧化淋溶阶段(切割-红化期)。

参考文献(References) [1] Cui Zhijiu, Li Dewen, Wu Yongqiu et al. Comment on planation surface. Chinese Sci. Bull., 1999, 44(22): 2017-2022 [崔之久, 李德文, 伍永秋等. 关于夷平面. 科学通报, 1998, 43(17): 1794-1804.] [2] Cui Zhijiu, Li Dewen, Feng Jinliang et al. Feature of red karst weathening crust and formation environment of planation surface in , Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet. Sci. China (D), 2001, 44(suppl. 1). [崔之久, 李德文, 冯金良等. 湘桂黔滇藏红色岩溶风化壳的性质与夷平面形成环境. 中国科学(D), 2001, 31(增刊).] [3] Барышников Г Я. Древнние поверхности выравнивание и корообразовательные процессы на территории Горного Алтая. Геоморфология, 1989, (1): 57-61. [4] Селиверстов Ю П. Проблемы гепергенной геоморфология. Л: Изд-во Ленинград Ун-ма, 1986. [5] Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian et al. Planation surface, palaeokarst and uplift of Xizang (Tibet) Plateau. Sci. China (D). 1996, 39(4): 391-396. [崔之久, 高全洲, 刘耕年等. 古岩溶、夷平面与高原隆升. 中国科学(D), 1996, 26(4): 378-385.] [6] Cui Zhijiu, Li Dewen, Liu Gengnian et al. Covered karst, weathering crust and karst planation surface (of double levels). Sci. China (D), 2002, 45. [崔之久, 李德文, 刘耕年等. 覆盖型岩溶、风化壳与岩溶(双层)夷平面. 中国科学(D), 2001, 31(6): 510-519.] [7] Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian. Existence of palaeokarst on Tibet Plateau and its correlation with the karst of the eastern district. Carsologica Sinica, 1999, 18(4): 309-409. [李德文, 崔之久, 刘耕年. 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, 1999, 18(4): 309-409.] [8] Huang Zhenguang. Red Weatnering Crust in Southern China. Beijing: Ocean Press, 1996. 1-56. [黄镇国. 中国南方红色风化壳. 北京: 海洋出版社, 1996. 1-56.] [9] Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian. Features and origin of covered karst on Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet. Journal of Mountain Science, 2000, 18(4): 289-295. [李德文, 崔之久, 刘耕年. 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, 2000, 18(4): 289-295.] [10] Jenny H. The Soil Resource: Origin and Behavior. Springer-Verlag, 1983. [11] Smith B J, McAlister J J. Mineralogy, chemistry and palaeoenvironmental significance of an early Tertiary terra rossa from northern Ireland: a preliminary review. Geomorphology, 1995, (12): 63-73. [12] Guo Jingtang, Ouyang Jing. The Profile Atlas of Chinese Soils. Beijing: China Science and Technology Press, 1991. 52. [郭景唐, 欧阳菁. 中国土壤剖面图谱. 北京: 中国科技出版社, 1991. 52.] [13] Yu Tianren, Wang Zhenquan. Soil Analysis Chemistry. Beijing: Science Press, 1988. [于天仁, 王振权. 土壤分析化学. 北京: 科学出版社, 1988.] [14] Jenn

y H. The Factors of Soil Formation. New York: McGraw-Hill, 1941. [15] Li Qingkui, Xiong Yi (eds.). Soils in China (2nd edn.). Beijing: Science Press, 1987. [李庆逵, 熊毅 主编. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1987.] [16] Huang Peihua. Neotectonic features of Yunnan and its relationship with regional tectonics. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1958, (7): 51-64. [黄培华. 云南新构造运动特点与大地构造关系. 南京大学学报(自然科学版), 1958, (7): 51-64.] [17] Lin Junshu. Origin of stone pinnacles and environmental change in Lunan, Yunnan, China. Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 346-350. [林均枢. 路南石林形成过程与环境变化. 中国岩溶, 1997, 16(4):346-350.] [18] Wang Shijie, Ji Hongbing, Ouyang Ziyuan et al. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock. Sci. China (D), 1999, 42(6): 572-581. [王世杰, 季红兵, 欧阳自远 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究. 中国科学(D), 1999, 29(5): 441-449.] [19] Лапин А В. Редкие земли в корках выветривания карбонатитов: особенности распределения фракционирования минеральные формы. Геохимия, 1994, (3): 342-357. [20] Лапин А В. Дифференциальная подвижность компонентов в зоне гипергенеза как ведущий фактор формирования месторождений кор выветривания карбонатитов. Геохимия, 1995, (7): 933-949. [21] Zonn S V. Tropical and Subtropical Soil Science. Moscow: Mir Publishers, 1986. 243-247. [22] Right D, Meunier A. Origin of clays by rock weathering and soil formation. In: Velde B (eds), Origin and Mineralogy of Clays. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. 43-161. [23] Zhao Lunshan, Zhang Benren. Geochemistry. Beijing: Geological Press, 1988. 225-226. [赵伦山, 张本仁. 地球化学. 北京: 地质出版社, 1988. 225-226.] [24] Sherman G D, Ikawa H. Soil sequences in the Hawaiian Islands. Pacific Science, 1968, 22(4): 458-464. [25] Wei Qipan, Chen Hongming, Wu Zhidong et al. Geochemical features of terra rossa in Longgang Nature Reserve, Guangxi, China. Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(1): 30-41. [韦启蹯, 陈鸿鸣, 吴志东等. 广西弄岗自然保护区石灰土的地球化学特征. 土壤学报, 1983, 20(1): 30-41.] [26] Curtis L F, Courtney F M, Trudgill S. Soil in the British Isles. London: Longman Group Limited, 1976. 88-109. [27] Trudgill S T. Limestone Geomorphology. New York: Longman Inc., 1985. [28] Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian et al. Formation and evolution of karst weathering crust on limestone and its cyclic significance. Carsologica Sinica, 2001, 20(3): 183-188. [李德文, 崔之久, 刘耕年 等. 岩溶风化壳形成演化及其循环意义. 中国岩溶, 2001, 20(3):183-188.] [29] Twidale C R. The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea. Earth-Science Reviews, 2002, 57(1-2): 37-74. A Development Model of Red Weathering Crust on Limestones: an Example from Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet LI Dewen¹, CUI Zhijiu², LIU Gengnian² (1. Department of Geography, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Department of Geography, Peking University, Beijing 100871, China) Abstract: Based on research results of red weathering crust on limestones (WCL) in Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet, the authors analysed the relationship of red WCL and evolution of landforms using principles of geomorphology, clay mineralogy and geochemistry, and put forward a two-stage development model. Firstly, insoluble residual of carbonates have been accumulated in the later stage of geographical cycle and WCL was formed on planation surface (PS). This is called stage of lowering of landform and accumulation of residual or stage of planation and crustal formation. The gentle relief and backwater, derived from PS (in humid tropical), is available for the formation and preservation of clays (argillification), but restricts WCL to effective allitication. This accords with the characters of WCL in the study areas (including chemical composition and mineralogical assemblage of clays and granularity of 23 profiles). The second stage of the above model is incision of landform and allitication of WCL or incision-erubescence. The initial WCL located on PS is mainly gray due to reductive circumstance. WCL will have changed from gray (reductive) to red (oxidative) if only tectonic uplift and incision of rivers lower groundwater table, and geomorphologic and hydrogeological (hydrological) conditions have promoted to allitication. This is confirmed using material of field investigations. The WCL on the initial PS, such as Hunan and Guangxi, is mainly gray-color and those on the uplifted plateau, such as Yunnan-Guizhou and Tibetan plateaus, is red. In addition, red WCL is spatially located on PS. Key words: red weathering crust on limestones; development model of two-stage; planation surface; tectonic uplift; Tibetan Plateau; Yunnan-Guizhou Plateau

关键词: 红色岩溶风化壳; 二阶段发育模式; 夷平面; 构造隆升; 青藏高原; 云贵高原

