

241-247

赤红壤, 黄红壤, 黄棕壤 矿物 风化

## 过渡性土壤的矿物风化和演变\*

④

罗家贤 马毅杰<sup>✓</sup> 杨德勇 蒋梅茵 包梅芬

(中国科学院南京土壤研究所)

S152.1

A

## 摘 要

研究了赤红壤、黄红壤和黄棕壤等过渡性土壤的长石、云母、角闪石、氧化铁以及过渡矿物的风化和演变。

过渡性土壤主要是指砖红壤与红壤之间的赤红壤；红壤与黄壤之间的黄红壤和黄壤与棕壤之间的黄棕壤。赤红壤主要分布南亚热带地区，黄红壤和黄棕壤主要分布在北亚热带和南温带之间，尤以长江流域一带较典型。

过渡性土壤的矿物风化演变程度主要受土壤环境的影响，尤其在成土过程中产生一系列的物理作用、化学反应和物理化学作用，直接控制着矿物的风化速率及风化产物的演变方向，而这些过程对土壤性质的影响是很重要的，过渡性土壤的矿物种类虽然较多，但对土壤性质有较大影响的矿物并不多，本文仅对以下几种矿物的风化和演变作一阐述。

## 一、长 石

长石是(Si, Al)O<sub>4</sub>四面体三度连成架状结构的铝硅酸盐矿物。由于部分 Si 被 Al 置换，为保持架状结构中的电荷平衡，便相应地由一价或二价阳离子加入，这些阳离子主要有 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cs<sup>+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Ba<sup>2+</sup>等，从而形成 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 比率不同的斜长石系列矿物；K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 比率不同的正长石系列矿物和 K<sup>+</sup>、Ba<sup>2+</sup> 比率不同的钙长石系列矿物。由于在长石架状结构中有不同的阳离子参加，所以各种长石的抗风化能力各异。例如，钾长石和钠长石的抗风能力较强，而钙长石的抗风化能力较弱。

长石是土壤中最常见的矿物之一。其含量变化与土壤的风化强度和发育程度有关，变化较石英快而明显，因此人们常用石英/长石比率来表征过渡性土壤的风化程度(用焦硫酸钠熔融法测定土壤中石英和长石)。由于本研究的供试土壤为山地土壤，含细砂级以下的组份占土壤组成的60%以上，所以我们以小于150微米的颗粒作为测定的土样；对于下蜀黄土发育的黄棕壤，因其粉砂级几乎占土壤组成的一半，因此则以10—50微米的颗粒作为测定土样。测定结果表明，若以母质中的石英和长石作为基准，随着风化和成土过程的进行，土壤中的石英和长石虽均在减少，但前者慢后者快。从表1看出，花岗岩发育的过渡性土壤，石英减少13—30g/kg 而长石减少35—42g/kg，可见，石英的风化比长石明显慢，从石英/长石比率就更能看出这种趋势。在赤红壤中，由于长石受强烈风化，石英的数量相对提高，花岗岩发育的赤

\* 国家自然科学基金项目。

表1 过渡性土壤的石英/长石比率

土 壤	发育母质	粒 级 (微米)	样 本	石 英 (g/kg)	长 石 (g/kg)	石英/长石
赤红壤	花岗岩	<150	土壤	300±21	127±20	2.38±0.2
			母质	330±13	169±15	1.95±0.2
	砂 岩	<150	土壤	438±48	29±13	15.7±10.0
			母质	527±20	86±10	6.13±3.0
黄红壤	花岗岩	<150	土壤	387±29	217±27	1.73±0.4
			母质	400±16	257±12	1.56±0.3
	砂 岩	<150	土壤	377±15	217±15	1.74±0.1
			母质	407±5	257±8	1.58±0.1
黄棕壤	花岗岩	<150	土壤	350±11	277±18	1.27±0.1
			母质	365±10	312±13	1.17±0.1
	砂 岩	<150	土壤	390±65	281±47	1.39±0.1
			母质	410±40	321±32	1.28±0.1
下蜀黄土	10—50	土壤	771±55	153±32	5.03±2.2	
		母质	774±60	166±55	4.66±1.8	

红壤其石英/长石比率达2.4左右,砂岩发育的赤红壤甚至高达16左右,远比母质中的石英/长石比值高。在黄红壤中,无论是花岗岩或砂岩发育的土壤,石英与长石之间比率明显下降,约在1.73左右,表明土壤中长石的风化减弱,含量增加,而石英的含量却相对减少。在黄棕壤中,花岗岩和砂岩发育的黄棕壤,其石英/长石的比率与母质接近,说明长石的风化不严重。下蜀黄土发育的黄棕壤,由于母质为风化沉积或冲积沉积,石英的含量一般都很高(可达600g/kg左右),而长石含量较低(约在160g/kg左右),因而石英/长石比率高,在10—50微米的粒级中,长石也受一定风化,但并不很明显,因此土壤与母质的石英/长石比率接近。

由于各种长石的结构为不同的阳离子所占据,因而彼此的抗风化能力差异很大。以花岗岩

表2 花岗岩和砂岩发育的土壤中K—,Na—,Ca—长石的含量(g/kg,&lt;150微米)

土 壤	K—长石		Na—长石		Ca—长石	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
黄棕壤	97	24	181	29	3	0.6
黄 壤	92	27	164	49	2	0.2
黄红壤	83	37	138	42	1	0.5
红 壤	51	15	101	17	0.4	0.1
赤红壤	33	12	45	9	0.3	0.2
砖红壤	2	0.6	8	0.5	0.2	0.1

表3 过渡性土壤的K—,Na—,Ca—长石的风化率\*

长石	黄棕壤→黄壤	黄红壤→红壤	赤红壤→砖红壤
K—长石	5	39	94
Na—长石	9	27	82
Ca—长石	33	60	100

\*  $\frac{\text{母岩中的长石} - \text{土壤中的长石}}{\text{母岩中的长石}} \times 100$

和砂岩发育的土壤为例,它们的长石含量列于表2。表中表明,在所有的土壤中以Ca—长石含量极低(<5g/kg);Na—长石含量较高,在黄棕壤可达181g/kg,但在砖红壤也仅为8g/kg,K—长石含量介于Na—长石和Ca—长石之间,以黄棕壤为最高(97g/kg),但在砖红壤中几乎没有。如果分别以黄棕壤,黄红壤和赤红壤三种过渡土壤的长石含量作基准,以黄棕壤→黄壤,黄红壤→红壤和赤红壤→砖红壤的长石含量之差作为长石风化结果,并相应除以黄棕壤、黄红壤和赤红壤的长石含量,计算成百分比,便可得出各种长石从黄棕壤到黄壤,黄红壤到红壤和赤红壤到砖红壤中的风化率。从表3可见,K—长石从黄棕壤到黄壤的风化很弱,仅5%,从黄红壤到红壤明显增加,达39%,从赤红壤到砖红壤接近全部被风化,达94%;Na—长石从黄棕壤到黄壤的风化也很弱,只有9%,从黄红壤到红壤风化明显,为27%,从赤红壤到

砖红壤其绝大部分均被风化, 达82%; Ca—长石的风化从黄棕壤到黄壤较明显, 达33%, 由黄红壤到红壤已有过半被风化, 从赤红壤到砖红壤几乎全部被风化。在同一剖面内, 也可看出(以花岗岩发育的黄棕壤和黄红壤为例, 表4), 从母岩到各个土层的长石变化表明, Ca—长石在黄棕壤中, 表层和B层风化较强, 在接近母质层也有近40%被风化, Na—长石的风化在表层为39%, 到B层明显减弱, 接近母质层几乎没有什么风化。K长石的风化在表层与Na—长石风化相近, 但在B层的风化比表层略有减弱, 而在母质层的风化却很低, 只有6%。在黄红壤中, Ca长石的风化无论是在表层或其它各层都有很明显的风化, 达65%以上。Na—长石的风化在表层为25%左右, B层以下有明显的减弱, K—长石在表层风化有的比Na—长石高, 有的低, 但在接近母质层中的风化要比Na长石高。综上所述, 各种长石的抗风化顺序是: Na—长石 $\geq$ K—长石 $\geq$ Ca—长石。

表4 花岗岩发育的黄棕壤和黄红壤剖面内各种长石的风化率

土壤	采集地点	采样深度 (cm)	钾长石 (g/kg)	风化率 (%)	钠长石 (g/kg)	风化率 (%)	钙长石 (g/kg)	风化率 (%)
黄红壤	湖北宜昌	3—20	54	39	111	39	3	63
		20—56	59	33	151	18	4	50
		56—90	61	31	175	4	5	38
		>90	73	6	180	2	5	38
		母岩	68	—	183	—	—	—
黄红壤	湖北宜昌	0—23	109	35	142	27	0.5	67
		23—42	110	35	186	6	0.5	67
		母岩	168	—	197	—	1.5	—
黄红壤	安徽广德	0—17	152	21	105	24	0.4	75
		17—90	160	17	116	16	0.4	75
		>90	164	17	124	10	0.4	75
		母岩	192	—	138	—	1.6	—
黄红壤	安徽泾县	0—18	81	45	123	23	0.7	79
		18—52	87	41	133	16	0.8	77
		>52	100	32	150	6	1.2	65
		母岩	146	—	159	—	3.4	—

长石风化后, 因土壤环境的不同, 可形成绢云母, 伊利石、蒙脱石、高岭石和三水铝石等。在本文论及到的过渡性土壤中只发现长石风化后有高岭石化作用。山地黄棕壤的高岭石含量并不高, 仅160g/kg, 但非晶物质含量与赤红壤较接近, 比黄红壤略低。长石含量约在250g/kg左右, 表明黄棕壤中的长石进行的高岭石化作用是较慢的, 而且直接从长石变为高岭石的可能性更大。黄红壤粘粒的高岭石含量约在400g/kg左右, 比黄棕壤明显高, 非晶物质的含量约200g/kg, 长石含量约200g/kg, 说明长石高岭化明显。高岭石的形成主要还是长石直接风化而成, 但可能有相当部分是非由非晶物质重新结晶而成, 或者二种作用兼而有之。赤红壤粘粒的高岭石含量很高, 比黄红壤约高出100g/kg左右。但非晶物质的含量较低, 约180g/kg左右, 长石含量也很低, 约50g/kg, 由此看出, 长石高岭石化很明显。高岭石的形成与长石风化后形成的非晶物质再重新结晶成高岭石这一过程的关系较密切。在一些较粗的粒级中, 尤其花岗岩发育的赤红壤, 常能看到长石颗粒内含有高岭石, 甚至可以看到全部高岭石化了的长石, 这显然是长石风化过程中受到强烈淋溶后而直接形成的高岭石。在强烈淋溶下长石风化直接形成高岭石是因为碱性阳离子的淋失, 铝的含量相对增加, 而硅的含量相对减少, 在硅铝比率适合(即 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 率在3以上)时即可形成。长石风化后形成非

晶物质能否在土壤中重新结晶形成高岭石,是受许多条件决定的,其中包括土壤溶液的反应、硅的浓度以及排水状况等。

## 二、云 母

在土壤中,云母矿物包括二八面体和三八面体两类云母,前者以白云母为代表,后者以黑云母为代表。云母的风化过程实际上是脱钾过程。云母风化后形成膨胀性和非膨胀性矿物,前者如蛭石和蒙脱石等,后者如绿泥石和有关的夹层矿物以及高岭石等。在过渡性土壤中,赤红壤含云母已很少,不足100g/kg,绝大部份云母已风化演变成高岭石。黄红壤和黄棕壤云母蛭石化相当明显,尤其是花岗岩发育的土壤,因为花岗岩含有许多黑云母,它演变成蛭石的过程是:

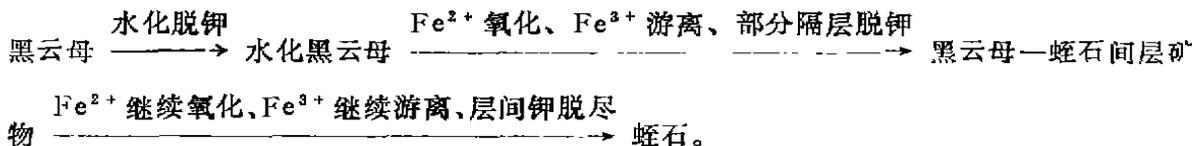


表5列出了花岗岩发育的黄棕壤及黄红壤的云母蛭石化状况。黄棕壤的云母蛭石化为43%。黄红壤达58%,均高于棕壤和红壤。

表5 花岗岩发育的黄棕壤和黄红壤的云母蛭石化\*

土 壤	云 母		蛭 石		云母 蛭石化
	$\bar{X}$	$\pm S$	$\bar{X}$	$\pm S$	
黄棕壤	14.0	6.0	10.5	5.0	42.9
黄红壤	10.9	5.0	14.9	7.0	57.8

\* 云母和蛭石均为颗粒%。

$$\text{云母蛭石化} = \frac{\text{蛭石}}{\text{云母} + \text{蛭石}} \times 100$$

右),其次是50—100微米的粒级(平均约53%),100—250微米的粒级中,蛭石化有明显减弱(平均在41%左右)。从剖面内的变化看,虽然表层的蛭石化程度最高,但随剖面深度的增加,蛭石化的减弱程度并不太大,即使在底层,土壤的云母蛭石化,仅较表层减少10—15%左右。表明云母蛭石化在整个土体内是比较一致的。

花岗岩发育的黄红壤和黄棕壤处在北亚热带和南温带之间的过渡地区,风化强度既不太强也不太弱,但雨量充沛,这对黑云母的脱钾有利,形成的蛭石既不可能像红壤那样向高岭石演变,也不可能像棕壤或褐土那样向蒙脱石演变,因此土壤中有较多的蛭石。

云母的蛭石化强度在不同粒级中有所不同,以花岗岩发育的黄红壤为例(表6),10—50微米粒级的云母蛭石化最高(平均达67%左

## 三、角 闪 石

在过渡性土壤中,角闪石的含量并不高,一般在100g/kg以下。角闪石的主要成分除Si和Al外,还有Ca、Na、Mg、Fe等,它是由硅氧四面体连接成的两条链所组合成的带状结构,因此较容易风化。按照Pettijohn的抗风化顺序,它较黑云母更易风化。角闪石风化后演变成高岭石、碳酸盐、褐铁矿和蛋白石等,而在过渡性土壤中,主要形成高岭石。我们的研究表明,赤红壤基本不含角闪石,黄红壤含角闪石约10%(颗粒%),花岗岩发育黄红壤的角闪石含量略高于黄红壤,约14%左右。下蜀黄土发育的黄棕壤含角闪石极低,不到3%。由于角闪石在土壤中的含量较低,它对土壤性质影响极微,但对一些幼年土壤及风化不很强烈的土壤,可以从它的形态特征和演变程度,来分析土壤的发生过程。

表6 花岗岩发育的黄红壤中各粒级的云母蛭石化状况

采集地	采样深度(m)	10—50微米			50—100微米			100—250微米		
		云母	蛭石	云母蛭石化	云母	蛭石	云母蛭石化	云母	蛭石	云母蛭石化
湖北宜昌	0—20	4.0	27.0	87.1	8.0	20.5	71.9	13.2	18.8	58.8
	23—42	4.5	23.0	83.6	9.1	18.2	66.7	14.2	16.3	53.4
湖北阳新	0—23	9.5	12.1	56.0	11.6	8.0	40.8	3.1	2.0	39.2
	23—60	10.9	12.5	53.4	15.1	10.0	39.8	3.2	1.2	27.3
	60—75	10.2	9.0	46.9	16.3	10.9	40.0	3.3	1.0	23.3
安徽广德	0—17	6.8	22.8	77.0	10.0	25.3	71.7	11.3	20.0	63.9
	17—90	7.5	19.9	72.6	12.1	26.6	68.7	18.4	20.3	52.5
	>90	8.4	19.4	69.8	13.8	22.8	62.3	19.0	18.3	50.9
安徽泾县	0—18	7.1	12.9	64.5	10.0	15.7	61.1	15.1	8.5	36.0
	18—52	7.3	12.5	63.3	11.1	14.0	55.8	20.8	7.6	26.8
	>52	7.5	12.3	62.1	13.8	14.5	51.2	21.8	7.1	24.6

#### 四、铁矿物和游离度

土壤中原生的铁矿物只有磁铁矿和钛铁矿等少数几种,而土壤中大多数铁矿物是由一些含铁矿物经风化后,从中游离出来的铁所形成的氧化物。这些氧化物中有的为结晶质,有的是非晶物质。常见的铁矿物有赤铁矿、针铁矿、磁铁矿、钒铁矿、水铁矿、钛铁矿和磁赤铁矿等。赤铁矿主要分布在热带和亚热带地区高度风化的土壤;针铁矿分布的范围较广,从寒带到热带地区的土壤中都有存在;钒铁矿多见于灰漠土和温带的弱酸性的水稻土中;水铁矿在热带雨林中的表层常有出现;磁铁矿在各气候带中都能看到;钛铁矿在亚热带地区较普遍,用连二亚硫酸钠—柠檬酸钠—重碳酸钠法(DCB)提取得出的游离铁是:磁铁矿为2.4%;赤铁矿和针铁矿为14—100%。可见用DCB法测得土壤中的游离铁和游离度能反映出一定的气候带特点。过渡性土壤和其它一些土壤的铁游离度列于表7。由表7可见,花岗岩发育的土壤,铁游离度较砂岩发育的土壤低,尤其在棕壤、黄棕壤、黄壤和黄红壤这些土壤中;红壤、赤红壤和砖红壤的铁游离度则较接近,说明花岗岩发育的土壤中,在风化不强的条件下,有许多含铁矿物的风化比砂岩弱,而在风化较强的土壤中,花岗岩和砂岩发育的含铁矿物风化都相当接近。下蜀黄土发育的黄棕壤,铁游离度较花岗岩和砂岩发育的高出12%以上,这可能是母质原来就已受到较强风化,继而经过搬运,沉积和土壤形成的一系列过程中,使其中的铁矿物受严重风化,产生以针铁矿为主的氧化铁,从而提高了游离度。

在过渡性土壤中,黄棕壤的铁游离度与棕壤和黄壤都较接近,花岗岩发育者约30%,砂岩为46%。黄红壤的铁游离度明显低于红壤,花岗岩发育的为36%,砂岩发育的约50%。赤红壤的铁游离度较砖红壤也低得多(约低10%),一般在63%。因为土壤中游离铁的变化与土壤的水热状况有很密切的关系。在许多情况下,它也能反映出地带性或区域性的变化规律。表7表明,从热带到南温带之间,土壤的铁游离度逐渐减少,而在同一纬度上,自西向东土壤中的铁游离度也显示出规律性,以长江沿岸花岗岩发育的黄红壤为例(表8),湖北宜昌、安徽泾县和广德虽均处于相同的纬度,但因经度不同,铁游离度变化是由宜昌的29%(表层土)向泾县的38%和广德的42%逐步增大。可见,由于长江中下游水热状况的差异,铁游离度是由西向东增加。铁游离度的地带性和区域性的规律变化是土类一级分类,乃至土壤系统分类的一个指标。

表7 过渡性土壤及其它一些土壤中氧化铁的含量

土壤	母质	样本数	全Fe (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,g/kg)	游离Fe (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,g/kg)	游离度 (%)
棕壤	花岗岩	6	58.3±9.0	17.4±9.9	29.01±13.81
	砂岩	3	116.0±37.7	51.7±15.9	44.74±1.26
黄棕壤	花岗岩	6	45.2±5.7	14.0±7.4	29.94±11.64
	砂岩	7	59.6±8.5	27.2±5.9	45.7±6.7
	下蜀黄土	8	52.6±8.4	31.5±3.7	57.8±7.9
黄壤	花岗岩	5	66.2±24.1	19.3±10.1	30.5±3.1
	砂岩	6	58.8±18.1	28.2±6.6	47.4±8.4
黄红壤	花岗岩	11	68.4±8.3	24.5±4.0	36.4±6.4
	砂岩	3	47.7±6.6	24.0±3.5	50.1±2.1
红壤	花岗岩	3	80.5±13.8	46.7±6.9	58.4±2.5
	砂岩	3	50.3±8.9	28.3±2.6	56.3±3.4
赤红壤	花岗岩	3	56.2±19.4	36.4±13.4	64.6±4.9
	砂岩	3	81.9±12.5	50.5±5.1	62.3±3.3
砖红壤	花岗岩	3	68.3±17.8	48.9±10.0	72.4±4.9
	砂岩	3	32.6±3.4	24.0±2.7	73.6±6.0

表8 不同经度的黄红壤样本的铁游离度

采集地	纬度	经度	采样深度 (cm)	全Fe (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,g/kg)	游离Fe (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,g/kg)	游离度 (%)
	N	E				
湖北宜昌	30.9	111.1	0—23	83.2	23.9	28.7
			23—42	77.2	20.9	26.8
安徽泾县	30.6	118.2	0—18	66.7	25.1	37.6
			18—32	60.0	21.6	36.0
			>32	66.5	22.0	33.1
安徽广德	30.8	119.5	0—17	73.6	31.0	42.1
			17—90	72.3	29.8	41.2
			>90	70.5	28.8	40.9

## 五、1.4 nm 过渡矿物

土壤中的 1.4nm 矿物包括蛭石、绿泥石和蛭石—绿泥石之间的过渡矿物。如前所述，土壤的蛭石主要是由黑云母脱钾风化而形成，绿泥石除来自母质残余外，还有来自角闪石、黑云母以及其它铁镁矿物的变化产物。在成土过程中，由蛭石演变成绿泥石也是经常出现的。蛭石—绿泥石之间的矿物只有在风化成土过程中产生，然而由于目前的分析手段和研究水平所限，对它们的中间产物难以区分，只能将它们当作一类矿物对待。蛭石—绿泥石之间的过渡矿物含有不同的羟基铝，它在改变土壤表面性质，阳离子交换量和矿物性质等方面有重要作用。土壤中粘粒羟基铝和溶液铝之间的平衡可反映土壤中磷的吸附、铝—磷不同组份的形成和三水铝石的形成等化学问题。

在赤红壤中，蛭石已全部风化成高岭石，亚铁高度氧化，镁也受严重淋失，因此也难形成绿泥石，所以只能以 1.4nm 的过渡矿物存在，这与砖红壤是相似的。各种 1.4nm 矿物在黄红壤和黄棕壤的出现因环境而异，经 K<sup>+</sup> 处理和 35℃ 加热处理后所得的 X 射线图谱见图 1，湖北宜昌的黄红壤，由于水热状况不同于长江下游地区的土壤，云母风化后大部分向蛭石化方向

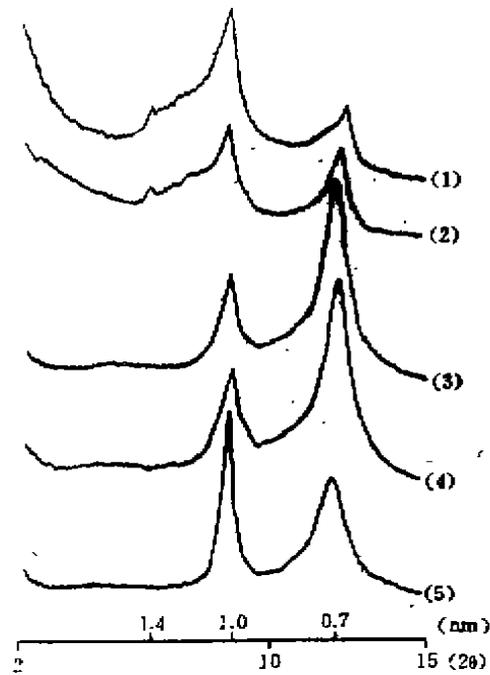


图1 钾饱和、350℃加热处理后粘粒( $< 2\mu\text{m}$ )的X射线衍射图谱(CuK $\alpha$ )

1. 湖北宜昌 黄红壤；2. 湖北宜昌黄棕壤；3. 湖北阳新黄红壤；4. 安徽广德黄红壤；5. 安徽泾县黄红壤；

转化，但也有部分形成“氢氧化铝层”产生绿泥石。因此，在X射线衍射谱上显示一个不对称的，向低角度扩散的1.0nm峰，表明有较多的蛭石—绿泥石之间的过渡矿物，同时又有一个1.4nm的小衍射峰，说明有少量绿泥石存在。湖北阳新，安徽广德和泾县的黄红壤，由于风化强度增大，云母矿物风化过程中的Mg和Al释出较快，Fe的氧化较强，在X射线图谱上原有的1.4nm衍射峰，经K<sup>+</sup>饱和和热处理后便消失了。说明这些土壤不含绿泥石，而是以蛭石—绿泥石之间的过渡矿物为主。泾县的黄红壤X射线图还显示出少量的蛭石。黄棕壤的1.4nm矿物也充分显示出我国南北过渡特性，酸性黄棕壤（花岗岩和砂岩发育）有较多的蛭石—绿泥石过渡矿物，有少量的蛭石和绿泥石，弱酸至碱性黄棕壤（下蜀黄土发育）含1.4nm矿物的种类复杂，但结晶都较差，其中的绿泥石可以是水云母直接风化而成，也可以是蛭石—绿泥石的中间过渡矿物演变而成。蛭石可演变成蒙脱石，但在弱酸性条件下主要演变成高岭石，同时出现一些蛭石向高岭石演变中的不规则混层矿物，这在江苏、安徽下蜀黄土发育的黄棕壤中较为多见。（参考文献略）