

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

陕西洛川黄土-古土壤剖面中伊利石结晶度

——黄土物质来源和古气候环境的指示

季峻峰 陈 骏 王洪涛

(南京大学地球科学系)

内容提要 伊利石是我国黄土和古土壤中最主要的粘土矿物。本文选择陕西洛川黄土-古土壤国际典型剖面为研究对象,通过测定伊利石的结晶度(Kübler 指数)、Srodon 峰强比值(Ir)和 $2M_1$ 多型含量,发现黄土物质的起源与中高温($>280^\circ\text{C}$)地质环境有关;黄土样品中伊利石结晶度值为 $0.25^\circ\Delta 2\theta(\text{Cu K}\alpha)$,古土壤样品中伊利石结晶度值大于 $0.27^\circ\Delta 2\theta(\text{Cu K}\alpha)$;黄土和古土壤中伊利石结晶度值的差别,是由于古土壤中伊利石含少量的膨胀层,而黄土样品中的伊利石不含有膨胀层而引起的。古土壤中伊利石的膨胀层的成因,与伊利石在温湿的气候环境下发生退变有关。伊利石的结晶度值和 Ir 值可作为研究古气候环境变化的定量指标。

关键词 黄土 古土壤 伊利石 结晶度 古气候

长期以来,有关我国黄土中粘土矿物特征及其古气候记录的研究一直是人们很感兴趣的问题。我国黄土及其伴生的古土壤中最主要的粘土矿物是伊利石。由于伊利石的结晶度能反映其形成时的地球化学环境以及后期变化过程,而被广泛研究和应用。Weaver 最先提出用伊利石1nm 衍射峰的形态,即1nm 和1.05nm 处的强度之比(Weaver 指数),来测量伊利石的结晶度^[1]。Kübler 则提出利用伊利石1nm 衍射峰的半高宽,即 Kübler 指数,反映伊利石的结晶度^[2,3]。目前 Kübler 指数已被广泛采用。刘东生等在研究我国黄土和古土壤时,采用伊利石1nm 衍射峰的高宽指数来表征它的结晶度,并利用它作为研究古环境变化的有效指标^[4-6]。

近年来的一系列研究表明,伊利石结晶度的测定,与各实验室所用的实验条件和制样方法密切相关^[7]。为了使各实验室测定的伊利石结晶度值可以比较,IGCP 294IC 工作组推荐了测定伊利石结晶度的方法和条件,并建议使用国际标样^[7]。本文采用国外近年来广泛应用的 Kübler 指数法,并利用国际标样进行标定,来研究我国陕西洛川黄土-古土壤典型剖面中伊利石的结晶度(IC),获得了一些新的认识。

1 样品制备和测试

样品(18块)均采自洛川黑木沟黄土-古土壤剖面。样品的制备和测试根据 IGCP 294IC 小组^[7]和 Warr 等^[8]所推荐的方法和条件进行。

首先把样品中所含碳酸盐、铁胶结物和有机质除去,然后按常规方法分散,用移液管吸出

注:本文为国家基金委优秀中青年专项基金资助项目。

本文1996年1月收到,11月改回,周健编辑。

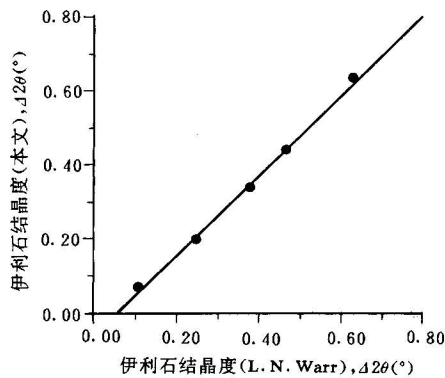


图1 Warr 标样对伊利石结晶度测定结果的标定

Fig. 1 Interlaboratory correlation of IC results using the crystallinity index standard (CIS) of Warr

$<2\mu\text{m}$ 的颗粒,并分成两组。第一组样品用于结晶度的测定,制成厚度大于 $3\text{mg}/\text{cm}^2$ 的自然风干定向片(AD),以消除样品的厚度对结晶度测定结果的影响^[8]。每块样品测定4次,再经乙二醇处理(GL)后测定4次。结晶度测定结果的误差 $<7\%$ 。第二组样品先经3N 盐酸加热(80 C)1h 除去绿泥石后,再制成定向片,用于样品中伊利石多型含量的确定。

样品采用理学 D/max-rA 型 X 射线衍射仪测定,Cu 靶,电压40kV,电流20mA,步宽 $0.01^{\circ}2\theta$,扫描速度 $1^{\circ}/\text{min}$,扫描范围分别为 $2\text{—}50^{\circ}2\theta$ (粘土矿物鉴定)和 $2\text{—}14^{\circ}2\theta$ (结晶度测定)。

伊利石的结晶度(IC)是测量伊利石1nm 衍射峰的半高宽,单位以 $^{\circ}\Delta 2\theta$ 表示。通过测定结晶度指数标样(CIS)将实验结果换算成 Kübler 标准(图1)。结晶度指数标样(CIS)由4块岩石样品(泥岩及板岩)和1块白云母晶体组成,由 L. N. Warr 提供^[8]。

伊利石的 Srodon 峰强比是通过计算伊利石的(001)和(003)衍射峰强度而获得^[9],即:

$$I_r = \frac{I(001)/I(003)(\text{自然风干样品})}{I(001)/I(003)(\text{乙二醇处理样品})}$$

样品中伊利石的 $2M_1$ 多型含量是据伊利石 $0.280\text{nm}/0.256\text{nm}$ 衍射峰的峰强比获得^[10]。

2 测试结果和讨论

有关洛川黄土-古土壤剖面中伊利石的结晶度(IC)、 I_r 和 $2M_1/(1M+2M_1)$ 值等列于表1。经盐酸处理后的样品 X 射线衍射图显示伊利石包含1M 和 $2M_1$ 多型(图2)。这些结果揭示了洛川黄土-古土壤剖面中黄土的物质来源和形成时的古气候环境特征。

2.1 黄土的物质来源

由表1可知,洛川黄土-古土壤剖面中伊利石的结晶度(IC)值变化在 $0.24\text{—}0.35^{\circ}\Delta 2\theta$ (AD)和 $0.24\text{—}0.30^{\circ}\Delta 2\theta$ (GL)之间,平均值分别为 $0.28^{\circ}\Delta 2\theta$ (AD)和 $0.27^{\circ}\Delta 2\theta$ (GL)。

已有的研究表明^[11],伊利石结晶度的高低取决于其生长环境的温度、压力、岩性和钾含量以及生长时间,其中温度的作用最为重要。伊利石的结晶度主要随温度的增大而变高,这已为浅变质岩区和现代活动地热带的调查研究以及一系列的室内水热实验研究所证实^[5-12]。伊利石的结晶度(Kübler 指数)是划分成岩带(diagenesis),近变质带(anchizone)和浅变质带(epizone)的主要指标^[11]。近变质带与浅变质带的界限为 $IC=0.25^{\circ}\Delta 2\theta$;与成岩带的界限为 $IC=0.42^{\circ}\Delta 2\theta$ ^[5-11]。近变质带温度范围一般认为是 $280\text{—}360^{\circ}\text{C}$ ^[13]。洛川黄土-古土壤剖面中伊利石结晶度值($0.24\text{—}0.35^{\circ}\Delta 2\theta$)落在近变质带伊利石的结晶度指数范围内($0.25\text{—}0.42^{\circ}\Delta 2\theta$)。

伊利石的多型主要有1M, $2M_1$ 和3T。Weaver 等^[13]认为在低温成岩阶段($<280^{\circ}\text{C}$)无 $2M_1$ 型伊利石形成,皆为1M 型伊利石;在近变质带($280\text{—}360^{\circ}\text{C}$)中, $2M_1$ 型伊利石的含量随温度的增高而增加;而在浅变质带($>360^{\circ}\text{C}$)中,伊利石都为 $2M_1$ 型。从表1中可以看出,洛川黄土-古土壤剖面中 $2M_1$ 型伊利石的含量为 $20\%\text{—}90\%$ (对全部伊利石而言),也与近变质带中伊利石

的多型特征相一致。

因此,洛川黄土-古土壤剖面中的伊利石的结晶度指标和多型特征说明伊利石起源于变质程度属近变质带的地质环境或类似的中高温($>280^{\circ}\text{C}$)地质环境,不可能是在黄土中自生的,也不会是在它们的可能源区沙漠中形成的^[11]。由于伊利石是黄土和古土壤中的重要矿物,由此反映了黄土的物质来源与近变质带或类似的中高温($>280^{\circ}\text{C}$)地质环境有着密切的成因联系。

2.2 黄土和古土壤形成时的古气候环境

表1表明,各黄土样品中伊利石的结晶度值非常相近,在 $0.24-0.25^{\circ}\Delta 2\theta$ 之间,平均值为 $0.25^{\circ}\Delta 2\theta$ 。黄土样品经乙二醇处理后伊利石的结晶度值没有发生变化。而各土壤样品中伊利石的结晶度值变化范围较大,为 $0.27-0.35^{\circ}\Delta 2\theta$ (AD)和 $0.27-0.30^{\circ}\Delta 2\theta$ (GL),平均值为 $0.30^{\circ}\Delta 2\theta$ (AD)和 $0.28^{\circ}\Delta 2\theta$ (GL)。古土壤样品在经乙二醇处理后伊利石的结晶度值变小,说明这些伊利石的结构中含有膨胀层。古土壤样品中伊利石的结晶度值明显较黄土样品的为大,与刘东生等^[4-6]利用伊利石的高宽指数研究黄土和古土壤中伊利石的结晶度而获得的结果一致。通常认为,这种差别是由于古土壤中伊利石膨胀层的含量较黄土中伊利石的为高而引起的^[1]。

所谓伊利石的结晶度,实质是反映伊利石的晶畴大小(domain size)和结构膨胀程度(swelling)^[14]。通常认为,晶畴大小主要取决于其形成温度,而结构膨胀程度由其所含膨胀层的多少决定。伊利石中是否含膨胀层可用 Srodon 提出的 Ir 值来进一步判断^[9],即如果 $\text{Ir}=1$,则不含膨胀层;如果 $\text{Ir}>1$,则表明存在膨胀层。从表1中可以发现,黄土样品中伊利石的 Ir 值都为1,而古土壤样品中伊利石的 Ir 值全部大于1,变化在 $1.05-1.33$ 之间。从而说明,古土壤中的伊利石含有少量的膨胀层($<3\%$),而黄土中的伊利石不含有膨胀层。因此,古土壤中伊利石所含有的膨胀层,是在黄土风化成土形成古土壤的过程中获得的,与古气候环境的变化有着密切的成因联系。

大量有关土壤中伊利石的研究结果表明^[9,15],在土壤中,碎屑成因的伊利石由于受淋溶作用,导致其结构中形成膨胀层,而引起伊利石发生退变。土壤中伊利石退变的程度随风化淋溶程度的增大而增高,并经伊利石/蛭石、伊利石/蒙脱石等混层矿物,最终导致蒙皂石的形成^[9,15]。在干冷的气候环境下,由于缺乏水,风化作用以物理风化作用为主,伊利石保存较好;而在温湿的气候条件下,年降水量为 $50-100\text{cm/a}$,伊利石由于受到淋溶,而发生结晶度降低、膨胀层含量增高,甚至完全转变为蛭石、蒙皂石等退变现象^[15]。

因此,黄土和古土壤中伊利石结晶度和膨胀层等特征的差别系气候环境的变化造成的,即

表1 洛川黄土-古土壤剖面中伊利石的结晶度, Ir 值和 $2M_1$ 多型含量

Table 1 The crystallinity index, Srodon Ir value and $2M_1$ polytype content of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence

样号	层序	结晶度($^{\circ}\Delta 2\theta$)		Ir 值	$2M_1$ 含量 (%)
		AD	GL		
LH008	S ₀	0.29	0.28	1.20	60
LH009	S ₀	0.27	0.27	1.12	60
LH012	L ₁	0.25	0.25	1.00	40
LH017	L ₁	0.25	0.25	1.00	90
LH022	L ₁	0.24	0.24	1.00	90
LH025	S ₁	0.27	0.27	1.11	65
LH027	S ₁	0.27	0.27	1.14	80
LH031	L ₂	0.25	0.25	1.00	50
940830	S ₂	0.27	0.27	1.05	90
LH032	S ₅	0.32	0.28	1.20	65
940828	S ₅	0.35	0.28	1.33	45
942825	L ₆	0.25	0.25	1.00	50
940821	S ₇	0.30	0.28	1.20	40
940818	S ₈	0.32	0.30	1.10	30
940816	L ₉	0.25	0.25	1.00	20
949799	W _{L-1}	0.25	0.25	1.00	90
9411200	W _{S-3}	0.31	0.30	1.08	90
9412095	W _{L-3}	0.25	0.25	1.00	90
黄土样品平均值		0.25	0.25	1.00	65
古土壤样品平均值		0.30	0.28	1.15	63
黄土-古土壤平均值		0.28	0.27	1.08	64

注:AD为自然风干样品;GL为经乙二醇处理样品。

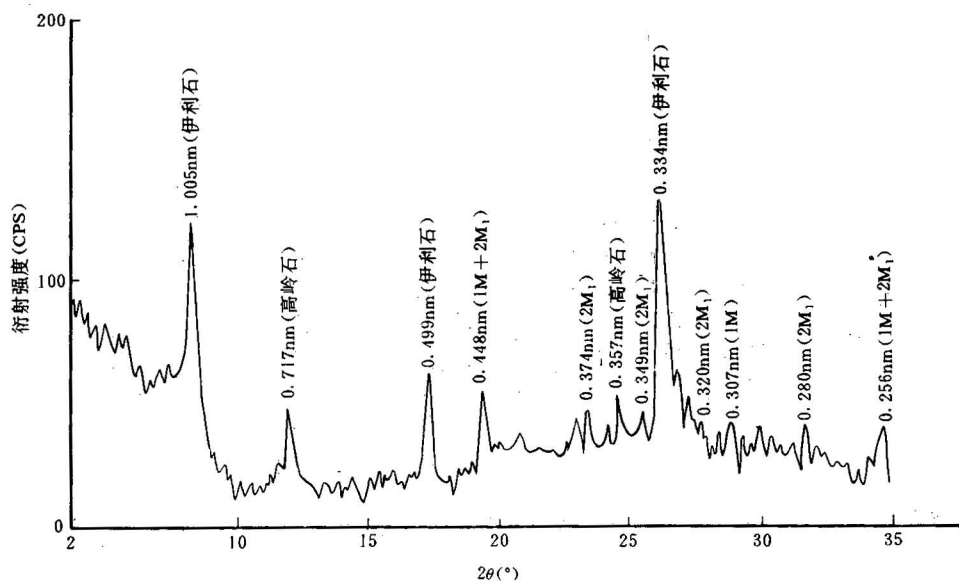


图2 LH012样品中粘土矿物的X光衍射图谱(经盐酸处理)

Fig. 2 XRD pattern of clay minerals from sample LH012(HCl-treated)

黄土是在寒冷-干燥气候环境下堆积,伊利石保存较好,没有发生退变;而古土壤则是在温湿的气候条件下形成的,伊利石受到淋溶而产生退变。古土壤中伊利石的退变程度越高(结晶度值变大和膨胀层含量增高),表明当时的古气候环境越较温暖和潮湿。就本文的古土壤样品而言,采自S₅古土壤层的样品,Ir值最大,样品经乙二醇处理后结晶度值变化也最大,表明其膨胀层含量最高,反映了S₅古土壤层形成时的古气候环境比其它古土壤层较为温湿的特点。

3 初步认识

根据以上研究,可以初步得出如下几点认识:

(1)洛川黄土-古土壤剖面中的伊利石起源于变质程度属近变质带(anchizone)的地质环境或类似的中高温(>280℃)地质环境。由于伊利石是黄土和古土壤中的主要粘土矿物,由此反映黄土物质的起源与上述地质环境有关。

(2)黄土样品中伊利石结晶度值(Kübler指数)为 $0.25^\circ\Delta 2\theta$,古土壤样品中伊利石结晶度值大于 $0.27^\circ\Delta 2\theta$ 。黄土和古土壤中伊利石结晶度值的差别,是由于古土壤中伊利石含少量的膨胀层,而黄土样品中的伊利石不含膨胀层而引起的。古土壤中伊利石的膨胀层的成因,与伊利石在温湿的气候环境下发生退变有关。

(3)以伊利石的结晶度值(Kübler指数),Srodon峰强比值(Ir)以及混层粘土矿物的数量为指标,深入研究古土壤中伊利石发生退变的程度,并与近代各类自然气候环境下发育的土壤中的伊利石的退变特征相对比,将为定量建立黄土-古土壤气候序列提供新的依据。

参 考 文 献

- 1 Weaver C E. Possible uses of clay minerals in research for oil. AAPG Bull., 1960, 44:1505—1518.
- 2 Kübler B. La cristallinité de l'illite et les zones tout a fait superieures du metamorphism. In: Etages tectoniques. Colloque de Neuchatel, 1967, 105—121.

- 3 Kübler B. Evaluation quantitative du metamorphisme parla cristallinite de I'illite. Bulletin du Centre de Recherches de pau-SNPA, 1968, (2):385—397.
- 4 刘东生等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 219—238页.
- 5 郑洪汉. 中国黄土中粘土矿物的古气候记录. 中国第四纪研究. 1985, 6(2):41—47.
- 6 文启中等. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 20—28页.
- 7 Kisch H J. Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. Journal of Metamorphic Geology, 1991, 9:665—670.
- 8 Warr L N, Rice A H N. Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. Journal of Metamorphic Geology. 1994, 12:141—152.
- 9 Srodon J, Eberl D D. Illite. In: Bailey S W, ed. Micas, Reviews in Mineralogy. 1984, 13:495—544.
- 10 Maxwell D T, Hower J. High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian belt serieis. Am. Mineral., 1967, 52:843—857.
- 11 Frey M. Low temperature metamorphism. London: Blackie & Son Limited, 1987, 1—58.
- 12 Ji Junfeng, Browne P R L. Experimental investigation on the illitization of mixed-layer I/S and the crystallinity of illite using samples from the Waiotapu geothermal system, New Zealand. Proceedings 17th NZ Geothermal Workshop. 1995:85—90.
- 13 Weaver C E, Broekstra B R. Illite-mica. In: Weaver C E, etc, eds. Shale slate metamorphism in southern Appalachians, Elsevier, Amsterdam, 1984, 67—199.
- 14 Eberl D D, Velde B. Beyond the Kübler index. Clay Minerals, 1989, 24:571—577.
- 15 Chamley H. Clay sedimentology. Springer-Verlag Berlin Heideberg. 1989. 21—50; 425—441.

CRYSTALLINITY OF ILLITE FROM THE LUOCHUAN LOESS-PALEOSOL SEQUENCE, SHAANXI PROVINCE

— Indicators Origin and Paleoclimate of Loess

Ji Junfeng, Chen Jun and Wang Hongtao

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu)

Abstract

Illite is the most common clay mineral found in Chinese loess and its associated paleosol. The crystallinity (Kübler index), Srodon Ir and $2M_1$ polytype of illite from the Luochuan loess-paleosol sequence indicate that the origin of loess-forming materials is related to the intermediate- and high-temperature ($>280^\circ\text{C}$) geological environments. The illite crystallinities of loess and paleosol are $0.25^\circ\Delta 2\theta$ and $>0.27^\circ\Delta 2\theta$, respectively. The difference in illite crystallinity between loess and paleosol is due to the presence of a few expandable layers in illite in paleosol, while illite in loess samples contains no expandable layer. The origin of the expandable layers in illite of paleosol is related to the degradation of illite at a warm-humid climate. Therefore the crystallinity and Srodon Ir can be used as quantitative indicators of paleoclimatic fluctuations.

Key words: loess, paleosol, illite, crystallinity, paleoclimate

作者简介

季峻峰,男,1962年生。1985年、1988年于南京大学地球科学系获学士、硕士学位。1994年6月—1995年6月在新西兰奥克兰大学合作研究流体/粘土矿物反应。现在南京大学地球科学系从事地球化学研究和教学。通讯处:南京汉口路南京大学地球科学系,邮政编码:210093。