

文章编号: 1000-6524(2003)04-0416-05

粘土矿物对古气候指示作用浅析

陈涛, 王欢, 张祖青, 王河锦

(北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 由于粘土矿物的成分、组合、含量以及结晶度的变化可以反映母源区气候冷、暖周期性变化, 因此利用粘土矿物重建古气候环境近年来得到广泛的应用。然而, 由于粘土矿物的敏感性, 其气候记录的信息往往会被其他影响因素(如母源区、沉积环境、成岩作用等)掩盖。因此, 在利用粘土矿物重建古气候环境时, 需要综合考虑气候以及非气候的各种影响因素。

关键词: 粘土矿物; 古气候; 组合; 结晶度; 碎屑和自生粘土

中图分类号: P579; X16

文献标识码: A

Clay minerals as indicators of paleoclimate

CHEN Tao, WANG Huan, ZHANG Zuqing and WANG Hejin

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A number of recent papers have dealt with such properties of clay minerals as their compositions, assemblages, contents and crystallinities, which can reflect the periodic climate changes of the mineral sources and help to reconstruct paleoclimate. Due to the sensitivity of the clay minerals, however, any climatic influence upon the compositions of clay minerals can be easily covered up by extra-climatic events such as source rock, sedimentary environment, and diagenesis. Therefore, both climatic effects and extra-climatic influence should be considered when the clay minerals are used to reconstruct paleoclimate.

Key words: clay minerals; paleoclimate; clay assemblage; crystallinity; detrital and autogenic clay minerals

近年来,许多研究者利用粘土矿物的成分、组合、含量以及结晶度来研究古气候环境,并取得了许多成果。大量研究表明,粘土矿物分析结果与古生物遗迹、孢粉、氢氧同位素所反应的古气候信息吻合,因而该方法成为古气候研究的又一有效手段。由于粘土矿物分布的广泛性和取样的简易性(存在于地表和近地表),特别是当孢粉或氧同位素比值不可获得的情况下,粘土矿物组合及含量成为主要的气候环境标识(Singer, 1979, 1984; Deconinck *et al.*, 2000; Thiry, 2000)。因此,利用粘土矿物研究古气候环境的变迁越来越受关注。但是,由于粘土矿物颗粒极为细小($< 2 \mu\text{m}$),对周围环境的各种变化极为敏感,所以在利用粘土矿物对古气候解释时,需要综合考虑其他因素,如母源区、沉积环境、成岩作用等。笔者在总结前人利用粘土矿物分析古气候成果基础上,讨论目前存在的问题和应该注意的方向,以期使粘土矿物研究更好地用于古气候分析。

1 粘土矿物用于古气候分析的依据

大量的粘土矿物是在地表风化作用中形成的,在沉积作用和埋藏过程中可发生转变。它的形成和转化与其所处的环境关系密切(张乃娴, 1992)。控制粘土矿物形成和转化的因素可能有多种,但最重要的是气候条件。温度和湿度差异使地球表面形成不同的气候带,各气候带内风化作用的类型和程度明显不同,相应地形成了不同的风化复合体和土壤类型(Weaver, 1989),其中所含的粘土矿物组合及其结构特点等也有明显差异。

一般认为,高岭石是在潮湿气候、酸性介质中由长石、云母和辉石经强烈淋滤形成(汤艳杰, 2002),因此气候温暖潮湿有利于高岭石的形成和保存。当气候转为干燥时,粘土很可能保存形成高岭石的气候信息特征(Singer *et al.*, 1980;

收稿日期: 2003-07-24; 修订日期: 2003-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40272022)

作者简介: 陈涛(1979-),女,硕士研究生,从事粘土矿物学研究,电话:010-62750764, E-mail: summerjewelry@ccermail.net。

Singer, 1984; Chamley, 1989; 蓝先洪, 1990)。地层中粘土矿物以高岭石为主并含伊利石和绿泥石, 可反映气候变冷的环境(Cruz, 1999), 而碎屑高岭石则指示临区的多雨热带气候(Murru, 2003; Temgoua *et al.*, 2003)。

自生蒙脱石易形成于干湿交替的气候环境, 这种环境中阳离子可集中于干燥期(Dunoyer de Segonzac, 1970; Keller, 1970)。蒙脱石易在富盐基, 特别是贫 K^+ 而富含 Na^+ 、 Ca^{2+} 的碱性介质中形成。如风化强度增大, Na 和 Ca 就从蒙脱石的混层位置上剥离, 因此蒙脱石的存在反映了寒冷的气候特征。另外, 火山物质在碱性介质中很容易变成蒙脱石, 这已为许多研究者的资料所证实。Ehrmann(1998)在研究南极洲古气候时发现, 含量最高和结晶度最好的蒙脱石存在于南极洲上始新统, Jimenez-Espinosa等(2003)指出与赤铁矿共生的蒙脱石指示半干旱气候。

伊利石形成于温暖或寒冷少雨的气候条件下, 由长石、云母等铝硅酸盐矿物在风化脱 K^+ 的情况下形成。其晶格混层 K^+ 继续淋失, 则可向蒙脱石演化。如果气候变得湿热, 化学风化彻底, 碱金属(主要是 K^+)被带走, 伊利石将进一步分解为高岭石。因此, 气候干燥、淋滤作用弱对伊利石的形成和保存有利(Meunier, 1980)。

绿泥石中的主要阳离子为 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} , 形成环境为碱性。Bain(1977)发现绿泥石在风化剖面上部的氧化条件下不稳定, 这是由于在风化作用期间, 水镁石层内的二价铁容易被氧化, 所以绿泥石一般只能在化学风化作用受抑制的地区(像如冰川或干旱的地表)幸存下来(Quigley and Martin, 1963; Ducloux *et al.*, 1976)。一般认为, 绿泥石和伊利石含量增加代表逐渐变为干旱的气候条件(Vanderaverroet, 2000; Gingele *et al.*, 2001; Winkler *et al.*, 2002)。

不规则混层矿物在季节性温暖气候环境的有水源区中(Srodon and Eberl, 1984)形成于直接的陆地性侵蚀(Dunoyer de Segonzac, 1970; Ducloux *et al.*, 1976)。伊利石/绿泥石混层矿物(I/Ch)代表了温暖气候下季节性的干旱环境。I/Ch混层比值大时, 代表该时期为更冷湿、非季节性的气候环境(Yemane *et al.*, 1996)。干旱气候条件下形成的蛭石和蒙脱石, 在温暖湿润时转化成高/蒙混层矿物(Srivastava *et al.*, 1998; Grimley *et al.*, 2003), 而蒙脱石/绿泥石、伊利石/蒙脱石混层矿物代表气候逐渐转为潮湿的环境(Jain *et al.*, 2003)。

其他的粘土矿物, 如蛭石在干湿交替气候下形成, 因为排水性不好阻止了湿润时期从母岩和土壤中淋滤出的硅、碱、碱土元素的迁移(Paquet, 1969; Folkoff *et al.*, 1987)。自生二八面体蛭石在温暖、潮湿气候下由花岗岩风化形成(Jeong *et al.*, 2003)。Taylor(1996)认为蛭石向有序伊利石/蒙脱石的转变代表潮湿和干燥的气候循环。另外, 纤维状坡缕石、海泡石形成于干旱、半干旱的气候条件下(Tateo *et al.*, 2000; Khadkikar *et al.*, 2000), 并与高度可溶 Mg 的活性有关。因此, 古土壤中坡缕石是干旱或半干旱环境的良好指示剂

(Singer, 1979)。海洋沉积物中的坡缕石碎屑偶尔也能起到同样的作用。

在纵向分布的地层中, 单一粘土矿物很少出现, 一般为几种粘土矿物的组合, 并常含有混层矿物。因此, 一般应用粘土矿物的成分、组合和含量的综合信息来判断古气候环境。Singer(1980, 1984)在研究了全球不同气候带各种沉积类型中的粘土矿物组合后指出, 地表土壤、风化剖面 and 沉积物中的粘土矿物组合与气候条件及风化强度有密切的联系, 在不同气候条件下, 其组合类型不同, 因而粘土矿物组合特征是解释古气候的主要指征。

此外, 伊利石结晶度是气候变化的灵敏反映指标, 它可以反映出气候环境的短期变化, 在某些不易获得或没有古生物化石或古地磁证据时, 粘土矿物结晶度是确定古气候环境的有力证据(Pandarinath *et al.*, 1999; Lamy *et al.*, 2000)。由于伊利石结晶度(Chamley, 1980b)可以反映源区矿物环境水解能力, 因此, 高温和大的降雨量被认为导致矿物的强水解作用, 以致结晶程度差; 反之, 在低温和干燥的条件下, 矿物的结晶被保存下来。从而, 低的结晶度值指示低温和干燥的气候条件, 而高的结晶度值指示它们形成于低纬度、高降雨量(潮湿)和高温的气候条件。

2 粘土矿物对古气候解释的分析

沉积岩中粘土矿物组合及含量变化用于气候环境的解释目前尚存在一定的局限性(Singer, 1984; Chamley, 1989; Yemane *et al.*, 1996), 自生和碎屑粘土矿物之间的差异及判别尚存在疑问, 尤其是对蒙脱石。气候与粘土矿物之间的关系由于非气候因素的影响, 如地形、地势、源区岩石以及时间的介入, 而变得错综复杂, 搬运过程的粒度分级、凝聚差异以及搬运介质的不同都将影响粘土矿物的分布和含量的变化。因此, 利用沉积岩中粘土矿物解释古气候应该谨慎从事, 下面的影响因素应当给予考虑:

2.1 母源区

陆源沉积岩中粘土矿物的气候环境解释中存在的问题和困难早已引起注意(Ataman *et al.*, 1975; Slanska, 1976)。Ataman提出沉积岩中不同的粘土矿物组合并不只是由气候变化引起的, 至少还有两个经常变化的因素影响粘土矿物成分: 源区物质在不同沉积区的母源可能不一样; 风化阶段母源区的地形可能完全不同。

另外, 粘土矿物在形成过程中受母源区不同水介质的 pH 值、 EH 值和盐度等因素的影响, 可形成晶体结构、形态及类型各异的矿物(鲁春霞, 1997)。这些非气候因素对粘土矿物及其组合的形成都将产生不可忽视的影响。

2.2 自生和碎屑粘土矿物

当用土壤和风化剖面中粘土矿物的特性对古气候进行解释时, 只有形成于该地区的自生矿物才应该被考虑。然而在沉积岩中粘土矿物组合通常既含有自生矿物也含有碎屑矿

物,并且后者往往占大多数(Singer, 1984)。因此,一般认为,对于古碎屑粘土矿物,其古气候参数应该用于解释母源区气候变化;而对于古自生粘土矿物,古气候参数被用于解释沉积区气候变化。只有当粘土矿物形成中主要的气候因素已被确定,并且粘土矿物成分没有发生后埋藏成岩转变的前提下,这些解释才能被正确运用。

如何区分大陆沉积岩中的粘土矿物是碎屑的还是自生的还常存在疑问。例如蒙脱石,它是常见的碎屑矿物,其存在对气候环境的指示作用非常重要(Singer, 1984)。但是,蒙脱石也是重要的海洋自生粘土,主要为海解作用的转变物(halmyrolytic alteration),产生于玄武岩和海洋沉积的火山碎屑中。这两种类型的判别是对海洋粘土矿物组合做出正确古气候解释最重要的前提。自生和碎屑蒙脱石之间的鉴别可以用矿物的形态、结晶度、化学成分、REE含量和组合矿物特征等方面的差别来进行。然而,这种鉴别虽然有用,却也不是确定无误的。

2.3 沉积搬运环境

通过对南大西洋新生代沉积岩的粘土矿物数据的分析,Robert(1980)认为碎屑粘土矿物的成分和分布除了受气候的影响外,还受其他因素的影响。Chamley(1981)对海洋粘土沉积物的影响因素做了仔细地分析,并总结出了非气候影响因素主要有搬运介质水、冰、风,不同地区的侵蚀作用、粒度分异和凝聚作用等也都是影响粘土矿物形成和分布的重要因素。

大量研究表明,粘土矿物的粒度是影响其分布的重要因素,搬运过程中的粒度沉积分异可以作为沉积岩中粘土矿物分布的重要影响因素。由于颗粒细小($< 2 \mu\text{m}$),粘土矿物对水动力作用很敏感,能够被风和流水长距离搬运,所以沉积区的水动力作用无疑是影响粘土矿物分布的最主要因素(赵杏媛等, 1990; 辛春英等, 1998)。这种因颗粒大小造成的机械分异作用在一些河口地区更明显(刘光华, 1987)。

悬浮粘土粒级的颗粒受凝聚作用的影响而沉淀。凝聚的程度依赖于矿物的种类和环境因素,主要是电解质的成分和浓度。Whitehouse等(1960)通过实验研究发现,粘土矿物凝聚和沉积在盐溶液中具有不同速度,颗粒凝聚的速率不同,伊利石比高岭石稳定,高岭石比蒙脱石稳定(Edzward *et al.*, 1975)。凝聚作用对粘土矿物沉积分布方式的影响可能是最重要的。

2.4 成岩作用

粘土矿物的成岩作用可能早从搬运时期就已经开始(Singer and Stoffer, 1980)。Murad & Fischer(1978)报道,粘土矿物在流水中受搬运的影响较小。即使是表面的沉积岩,从蒙脱石到绿泥石/蛭石混层矿物的转变,也表明粘土矿物成岩转变已经发生(Huang *et al.*, 1975)。

各时代页岩中粘土矿物类型和分布研究表明(Garrels and McKenzie, 1971),蒙皂石及其混层矿物和高岭石的丰度随着年代的变老而减少,而伊利石和绿泥石的丰度则反之;大多数古生代岩石中缺失分散状蒙皂石,说明古老页岩中的原生

蒙皂石和高岭石早已成岩变成伊利石和绿泥石(赵杏媛, 1990)。

对于成岩作用的鉴定,笔者认为可以运用Kübler(1964)提出的成岩带、近变质带的结晶度指数进行划分鉴别,从而可以判断成岩变质以前的粘土矿物。另外,根据Eberl(1990)的粒度分析方法,同样可以找到适合进行古气候分析粒级的粘土颗粒。

综上所述,Yemane(1996)提出粘土矿物组合对古气候的正确解释基于以下几点:①所用粘土矿物是由岩屑形成的并且在从源区到最后的沉积环境的搬运过程中几乎没有发生改变;②碎屑源区已经知道,并且源区在沉积过程中仍保持稳定(Singer, 1980, 1984; Chamley, 1989);③作用于沉积后的热成岩作用没有改变初始的粘土矿物组合。

3 讨论

(1)从以上分析不难看出,记录于粘土矿物中的气候信息很容易被一些非气候的地质作用所掩盖或是消除。因此如何选取保存有古气候记录的粘土样品,是正确分析粘土矿物对古气候指示作用的前提。建议所选样品应该是地质作用过程比较简单,还没有达到成岩阶段的粘土矿物;在进行气候分析之前,应该首先分析粘土矿物本身的地质背景,如碎屑还是自生矿物,是否经历成岩作用过程等。

(2)粘土对气候的反应主要是其组合和含量的变化。但组合相同的粘土矿物其含量可能相差甚远,应该代表形成时期不同的古气候条件。因此含量的研究至关重要。目前在粘土剖面的研究中,还没有对粘土含量进行量化比较,因此所指示的气候必定存在一定问题。建议对剖面逐层(如每厘米)取样、鉴定,求出粘土的相对百分含量和全岩中的绝对百分含量,再用含量和组合进行气候推测。

(3)虽然伊利石结晶度可以作为环境水解能力的指征,然而,Ehrmann(1998)和Robert(1997)在研究南极洲粘土矿物时指出,大量伊利石为岩屑粘土,产生于物理风化过程,并可能来自于冰期。因此,物理风化作用对伊利石的形成不可忽视。伊利石结晶度大小反映环境水解能力的强弱,对气候干、湿做出的判断,是基于化学风化成因而言的,所以在利用伊利石结晶度指数来重建古气候环境时,不能简单的利用伊利石的结晶程度来分析古气候的潮湿期和干燥期,依赖物理风化形成的伊利石结晶度的分析可能会导致完全错误的结论。

4 小结

由于粘土矿物成分、结构和成因的复杂性及多变化特点,在恢复古气候时出现了不确定性和多解性。但是,粘土矿物组合反映了物源区气候冷、暖周期性变化,记录了沉积区域古

环境演化的重要信息,为古环境再造提供了有力证据。可以预见,随着粘土学科不断发展,将粘土矿物用于重建古气候必将受到越来越多的重视。

Reference

- Ataman G and Gokcen S L. 1975. Determination of source and paleoclimate from the comparison of grain and clay fraction in sandstones: a case study[J]. *Sediment. Geol.*, 13: 81~ 107.
- Bain D C. 1977. The weathering of chlorite minerals in some Scottish soils[J]. *J. Soil Sci.*, 28: 144~ 164.
- Chamley H. 1980. Clay sedimentation and paleoenvironment in the area of Daito Ridge (Northwest Philippine Sea) since the Early Eocene [A]. Klein G, de Kobayashi K V, *et al.* *Init. Rep. Deep Sea Drill. Proj.* [C], 58: 683~ 690.
- Chamley H. 1981. Long term trends in clay deposition in the ocean[J]. *Oceanol. Acta., Spec.*: 105~ 110.
- Chamley H. 1989. *Clay Sedimentology*[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- Cruz M. 1999. Clay mineral assemblages in flysch from the Campo de Gibraltar area (Spain) [J]. *Clay Miner.*, 34 (2): 345~ 364.
- Deconinck J F, Blanc-Valleron M M, Rouchy J M, *et al.* 2000. Palaeoenvironmental and diagenetic control of the mineralogy of Upper Cretaceous-Lower Tertiary deposits of the Central Andean basin of Bolivia (Potosi area) [J]. *Sediment. Geol.*, 132 (3~ 4): 263~ 278.
- Ducloux J, Meunier A and Velde B. 1976. Smectite, chlorite and a regular interlayered chlorite-vermiculite in soils developed on a small serpentinite body, Massif Central, France[J]. *Clay Miner.*, 11: 121~ 135.
- Dunoyer de Segonzac G. 1970. The transformation of clay minerals during diagenesis and low grade metamorphism: a review[J]. *Sedimentology*, 15: 281~ 346.
- Eberl D D. 1990. Ostwald ripening of clay and metamorphic minerals [J]. *Science*, 248: 474~ 477.
- Edzward J K and O'Melia C R. 1975. Clay distribution in recent estuarine sediment[J]. *Clays Clay Miner.*, 23: 39~ 44.
- Ehrmann W. 1998. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics[J]. *Palaeogeogr., Paleoclimatol.*, 139 (3~ 4): 213~ 231.
- Folkoff M E and Meentemeyer V. 1987. Climatic control of the geography of clay minerals genesis[J]. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 77: 635~ 650.
- Garrels R M and Mckenzie F T. 1971. *Evolution of Sedimentary Rocks* [M]. New York: W W Norton Co.
- Gingele F X, De Deckker P and Hillenbrand C D. 2001. Late Quaternary fluctuations of the Leeuw Current and palaeoclimates on the adjacent land masses: clay mineral evidence[J]. *Aust. J. Earth Sci.*, 48 (6): 867~ 874.
- Grimley D A, Follmer L R, Hughes R E, *et al.* 2003. Modern, Sangamon and Yarmouth soil development in loess of unglaciated southwestern Illinois[J]. *Quaternary Sci. Rev.*, 22 (2~ 4): 225~ 244.
- Huang Wen H, Doyle L, *et al.* 1975. Clay mineral studies of surface sediments from the shelf of the northeastern and eastern Gulf of Mexico[J]. *Int. Clay Conf.* 1975. *Applied Publ.*, 55~ 70.
- Jain M and Andon S K. 2003. Quaternary alluvial stratigraphy and palaeoclimatic reconstruction at the Thar margin[J]. *Curr. Sci. India.*, 84 (8): 1 048~ 1 055.
- Jeong G Y and Bin Kim H. 2003. Mineralogy, chemistry, and formation of oxidized biotite in the weathering profile of granitic rocks[J]. *Am. Mineral.*, 88 (2~ 3): 352~ 364.
- Jimenez-Espinosa R and Jimenez-Millan J. 2003. Calcrete development in mediterranean colluvial carbonate systems from SE Spain[J]. *J. Arid Environ.*, 53 (4): 479~ 489.
- Keller W D. 1970. Environmental aspects of clay minerals[J]. *J. Sediment. Petro.*, 40: 788~ 859.
- Khadkikar A S, Chamyal L S and Ramesh R. 2000. The character and genesis of calcrete in Late Quaternary alluvial deposits, Gujarat, western India, and its bearing on the interpretation of ancient climates[J]. *Palaeogeogr. Paleoclimatol.*, 162 (3~ 4): 239~ 261.
- Kübler B. 1964. Les argiles, indicateurs de métamorphisme[J]. *Rev. Inst. Franc. Petro.*, 19: 1 093~ 1 112.
- Lamy F, Klump J, Hebbeln D, *et al.* 2000. Late Quaternary rapid climate change in northern Chile[J]. *Terra Nova*, 12(1): 8~ 13.
- Lan Xianhong. 1990. Clay minerals as an index of paleoclimate[J]. *Geological Science and Technology Information*, 9(4): 31~ 35 (in Chinese).
- Liu Guanghua. 1987. Study of the relationship between characteristics of clay minerals and depositional environments[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(1): 48~ 55 (in Chinese).
- Lu Chunxia. 1997. Clay minerals indicators of paleoenvironment[J]. *Journal of Desert Research*, 17(4): 456~ 460 (in Chinese).
- Meunier A. 1980. Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystemes. Etude des arenas du massif granitique de Parthenay (Deux-Sevres)[M]. *Mém. Soc. Geol. Fr.*
- Murad E and Fischer W R. 1978. Mineralogy and heavy metal contents of soil and stream sediments in a rural region of western Germany [J]. *Geoderma*, 21: 133~ 145.
- Murru M, Errera C, Da Pelo S, *et al.* 2003. The Palaeocene-Middle Eocene deposits of Sardinia (Italy) and their palaeoclimatic significance[J]. *CR. Geosci.*, 335 (2): 227~ 238.
- Pandarinath K, Prasad S and Gupta S K. 1999. A 75 ka record of palaeoclimatic changes inferred from crystallinity of illite from Nal Sarovar, western India[J]. *J. Geol. Soc. India*, 54(5): 515~ 522.
- Paquet H. 1969. Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées[M]. *Sci. Géol. Strassbourg Mém.*, 30.
- Quigley R M and Martin R T. 1963. Chloritized weathering products of a New England glacial till[J]. *Clays Clay Miner.*, 10: 107~ 116.
- Robert C. 1980. Climats et courants cénozoïques dans l'Atlantique Sud d'après l'étude des minéraux argileux (Leg 3, 39 et 40 DSDP) [J]. *Oceanol. Acta*, 3: 369~ 376.

- Robert C and Kennett J P. 1997. Antarctic continental weathering changes during Eocene– Oligocene cryosphere expansion: Clay mineral and oxygen isotope evidence[J]. *Geology*, 25 (7): 587~ 590.
- Singer A. 1979. The Paleoclimatic Interpretation of Clay Minerals in Soil and Weathering—a Review[J]. *Eath_Sci. Rev.*, 15: 303~ 326.
- Singer A. 1984. The Paleoclimatic Interpretation of Clay Minerals in Sediment—a Review[J]. *Eath_Sci. Rev.*, 21: 251~ 293.
- Singer A and Stoffers P. 1980. Clay_mineral diagenesis in two East African lake sediment[J]. *Clay Miner.*, 15: 291~ 307.
- Slanska J. 1976. A red_bed formation in the South Bohemian Basins, Czechoslovakia[J]. *Sediment. Geol.*, 15: 135~ 164.
- Srivastava P, Parkash B and Pal D K. 1998. Clay minerals in soils as evidence of Holocene climatic change, central Indo_Gangetic Plains, north_central India[J]. *Quaternary Res.*, 50 (3): 230~ 239.
- Srodon J and Eberl D. 1984. Illite[A]. Bailey S W. Micas[C]. *Rev. Miner. Soc. Am. Short Course Notes*, 13: 495~ 544.
- Tateo F, Sabbadini R and Morandi N. 2000. Palygorskite and sepiolite occurrence in Pliocene lake deposits along the River Nile: evidence of an arid climate[J]. *J. Afr. Earth. Sci.*, 31 (3~ 4): 633~ 645.
- Taylor K G. 1996. Pedogenic clay mineral transformation in the Weald Basin: Implications for Early Cretaceous hinterland climate reconstructions[J]. *Cretaceous Res.*, 17 (1): 103~ 108.
- Temgoua E, feifer H, Bitom D, *et al.* 2003. Trace element differentiation in ferruginous accumulation soil patterns under tropical rainforest of southern Cameroon, the role of climatic change[J]. *Sci. Total Environ.*, 303 (3): 203~ 214.
- Thiry M. 2000. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: an outlook from the continental origin[J]. *Eath_Sci. Rev.*, 49(1~ 4): 201~ 221.
- Tang Yanjie, Jiajianye and Xie Xiande. 2002. Environments significance of clay minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337~ 344(in Chinese).
- Vanderaveroot P. 2000. Miocene to Pleistocene clay mineral sedimentation on the New Jersey shelf[J]. *Oceanol. acta*, 23 (1): 25~ 36.
- Weaver C E. 1989. Clays, Mud sand Shales, *Developments in Sedimentology*[M]. Amsterdam: Elsevier, 44, 126.
- Whitehouse G, Jeffrey L M and Debbrecht J D. 1960. Differential settling tendencies of clay minerals in saline water[J]. *Clays Clay Miner.*, 7: 1~ 79.
- Winkler A, Wolf_Welling T C W and Stattegger K. 2002. Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep_sea basins since the Middle Miocene (ODP Leg 151, NAAG)[J]. *Int. J. Earth Sci.*, 91 (1): 133~ 148.
- Xin Chunying, He Liangbiao and Wang Huiyan. 1998. Clay minerals in the surficial sediments from the Huanhe(Yellow River) estuary and its offshore areas[J]. *Journal of Oceanograph of Huanghai & Bohaisas*, 16(4): 23~ 27(in Chinese).
- Yemane K, Kahr G and Kelts K. 1996. Imprints of post_glacial climates and palaeogeography in the detrital clay mineral assemblages of an Upper Permian fluviolacustrine Gondwana deposit from northern Malawi[J]. *Palaeogeogr., Paleoclimatol.* 125(1~ 4): 27~ 49.
- Zhang Naixian. 1992. Clay minerals and Weathering[J]. *Non_metallic Geology*, 6: 1~ 6(in Chinese).
- Zhao Xingyuan and Zhang Youyu. 1990. *Clay Minerals and Clay Mineral Analysis*[M]. Beijing: Ocean Press, 67~ 70(in Chinese).

附中文参考文献

- 蓝先洪. 1990. 粘土矿物作为古气候指标矿物的探讨[J]. *地质科技情报*, 9(4): 31~ 35.
- 刘光华. 1987. 粘土矿物特征与沉积环境关系的初步探讨[J]. *沉积学报*, 5(1): 48~ 55.
- 鲁春霞. 1997. 粘土矿物在古环境研究中的指示作用[J]. *中国沙漠*, 17(4): 456~ 460.
- 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 粘土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 9(2): 337~ 344.
- 辛春英, 何良彪, 王慧艳. 1998. 黄河口及其近岸区的粘土矿物[J]. *黄渤海海洋*, 16(4): 23~ 27.
- 张乃娴. 1992. 粘土矿物与风化作用[J]. *建材地质*, 6: 1~ 6.
- 赵杏媛, 张有瑜. 1990. *粘土矿物和粘土矿物分析*[M]. 北京: 海洋出版社, 67~ 70.