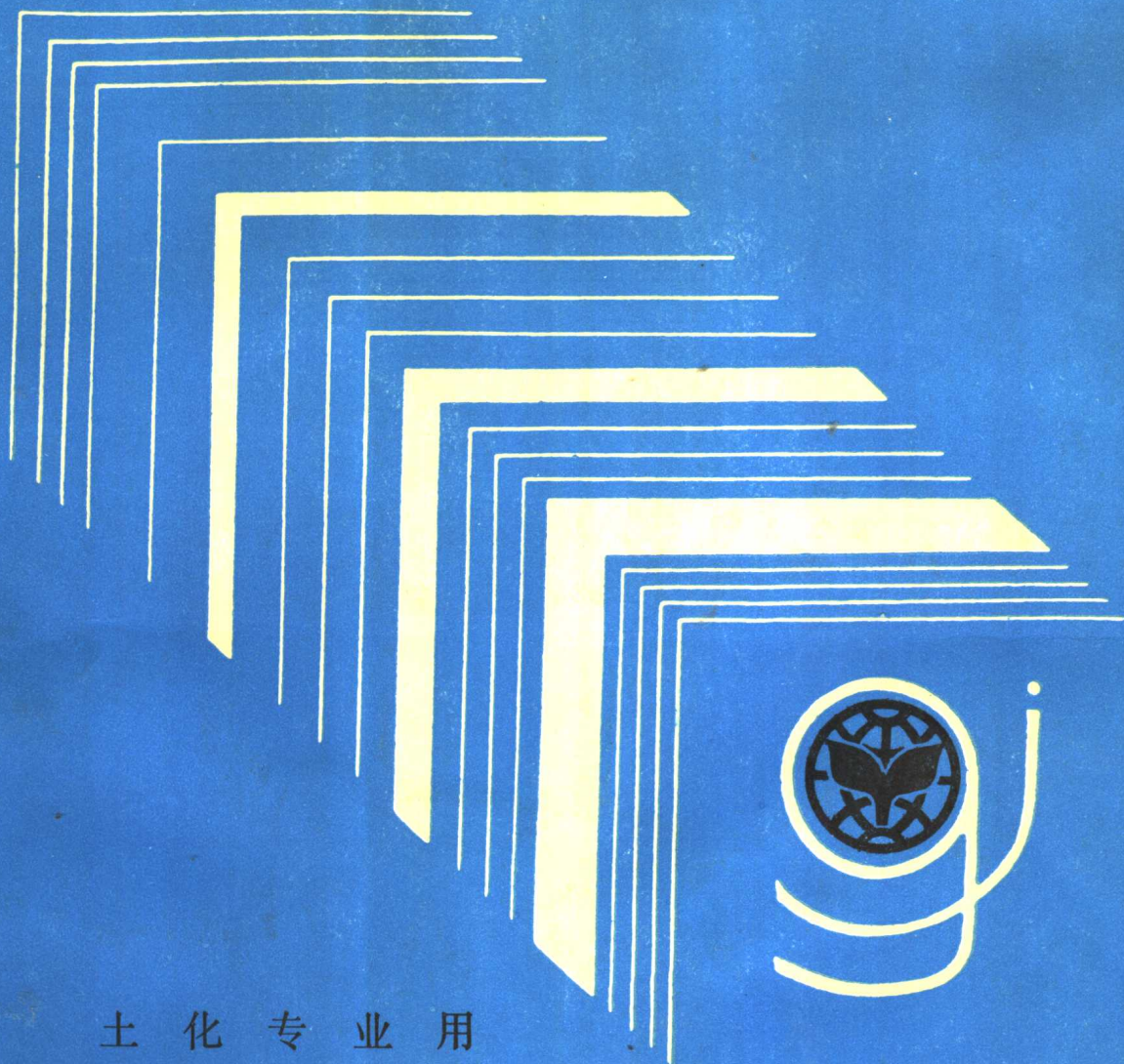


全国高等农业院校教学参考书



土 化 专 业 用

土 壤 发 育 及其鉴定和分类

俞震豫 主编

农 业 出 版 社



全国高等农业院校教学参考书

土壤发育及其鉴定和分类

俞震豫 主编

土化专业用

农业出版社

内 容 简 介

本书着重论述主要土壤类型的发育特征,阐明表征发育特征的发生学土层的鉴定指标和方法。第一、二两章讨论具体反映土壤发育的物质在土体中的转化及迁移;其后分章讲述灰壤、棕壤、红壤、水成土、酸性硫酸盐土的发育特性及鉴定指标;然后综述土壤粘化作用。全书主旨是阐述土壤实体的演化在于物质运动。在论述中,力求解脱只按成土因素推断土壤发育类型而忽视土壤实体为研究对象的桎梏。最后简要介绍和评述美国综合性土壤分类体制,较全面地讲述该体制所订的新的土壤命名,以期对读者在阅读西方近代土壤文献时有所裨益。

本书读者对象是大学土壤农化系、地理系的本科生和研究生。它可作为有关专业课的教材或参考书;对这些学科的科研人员也有参考价值。

全国高等农业院校教学参考书

土壤发育及其鉴定和分类

俞震豫 主编

* * *

责任编辑 罗梅健 封面设计 陈 英

农业出版社出版(北京市朝阳区农展馆北路2号)

新华书店北京发行所发行 天水新华印刷厂印刷

787×1092mm16开本 8印张 183千字

1991年10月第1版 1991年10月甘肃第1次印刷

印数 1—2,000 定价 2.25元

ISBN 7-109-01952-7/S·1294

前 言

本书系作者于80年代初对浙江农业大学土壤农化专业本科生及土壤学科研究生讲授土壤发生分类学所编写教材的主要部分。最初,它作为土壤农化专业土壤学专题讲座的讲义印发;以后应土壤学科研究生攻读硕士学位的需要,增补了一些讲授内容;到了80年代中期,全国土壤普查工作进入省、区、县级的全面总结和成果检查鉴定阶段,技术骨干要求对土壤发生学及土壤分类学在理论上得到提高,因此本教材相继在一些省、市及全国土壤普查会议或培训班上应用。这反映了我国有关科技界对土壤学的这一方面的理论,迫切要求普及与提高。1986年浙江农业大学土化系将本书初稿铅印成册,以供校内教学和校际教材交流以及土壤普查部门应用。

自从土壤形成因素学说在全球范围被普遍接受以来,得到了几代学者不懈努力,使这一学说的内容日益完善和宏达,成为土壤学最重要的理论基础,对土壤学的发展,影响至深。该学说的核心是承认土壤形成和发育过程,乃是土壤同它所处的环境,即各成土因素相平衡的过程。我们在研究任何类型的土壤发育及其性状时,都应以此一学说为指南,而不可须臾离之。

但是,成土因素既错综复杂,又处于动态,而且各因素状况的持续之久暂悬殊,如果对土壤与其环境的这种漫长的相互影响的演化,仅仅归结于目前可窥测的成土因素的作用,并固执这些因素的现状,借以推论该土壤发育的全过程,甚至据此而判定其发生类别,这就会造成因果倒置的错误,陷入逻辑学的困境。如果我们研究土壤发育只着眼于成土条件,而忽视土壤实体演变特征的检测,我们就不可能阐明与目前的成土条件相悖的一些土壤特征。因此,在运用成土因素学说时,应特别重视各因素的动态特征,还应全面考虑时间因素的意义。

作者在本书的取材和编写中,牢记以往文献上出现过的僵化论述的错误,力图免蹈覆辙,对一些空泛的推论性资料,尽量舍弃而不苟取。由于它作为教材或参考书出版,故在论述上应以引导式为主,以典型的研究成果为主,不求全面。因此,本书所论述的土壤发育特征和鉴定指标,暂限于灰壤、棕壤、红壤、水成土、酸性硫酸盐土等发育类型。这是因为这些土壤的研究资料丰富,面广而具体;其中很多是得之于对土壤实体的研究成果,较为可信。在另一方面,对一些有实地观测资料,又经实验验证,提出了新论点的一些学说,即使它还未得到公认,或尚处于初期研究阶段,例如R.Brinkman (1979)的铁解作用(ferrolysis)学说对水成土中的白土层形成过程作出的论述,在本书中也给予简要介绍。

本书对1975年正式问世的美国农业部土壤调查队编著的《土壤系统分类》(Soil Taxonomy U.S.D.A.)进行了简介和评述。其目的是试图了解以美国为代表的西方国家,对全球土壤进行统一或综合性分类的原则;参考它根据土壤具体属性进行土壤分类,而又鲜明地映示出土壤发生学原理的科学原则,这对于改进或改造我国现行土壤分类体制,将有所借

鉴。另一目的是由于美国这个分类系统，已被美洲、非洲、东南亚、澳洲等多数国家采纳，它们的学术专著和土壤、农学、林学期刊，多应用该分类制独创的土壤分类命名，我们了解和熟悉这些命名，在阅读有关文献时，将有很大方便。

由于近代科学的突飞猛进，科研手段不断更新，各分支学科日益茁壮，在这种形势下，试图对一个分支学科作出简明的综述，实在不是轻而易举之事。而作为大学的一门专业课程的教材或参考书，又限于作者的能力，本书自然是见绌之作。本书承沈阳农业大学土化系唐耀先教授、浙江农业大学王人潮教授详细审校；初稿刊印时得到浙江农业大学厉仁安副教授校勘，减少了不少纰漏。谨此深表谢意。

编著者俞震豫

1989.8.23

目 录

前言.....	1
第一章 土壤发育中土体内物质的转化	1
第一节 什么是土壤发育	1
第二节 主要的成土矿物及其构造	1
第三节 土壤发育中的两大类风化作用	5
第四节 土壤发育中粘粒的形成和它的新生作用	7
第二章 土壤发育中土体内物质的迁移	12
第一节 溶迁作用	12
第二节 螯迁作用	13
第三节 粘粒悬浮迁移作用	15
第四节 土壤物质的生物学集中和上迁作用	17
第三章 灰壤的发育及其鉴定	19
第一节 关于灰壤研究的沿革	19
第二节 灰壤的成土条件简析	20
第三节 灰壤淀积层的形态特征	20
第四节 灰壤淀积层的鉴定	21
第五节 灰壤淀积层形成的机制	24
第六节 灰壤发育中的生物学过程	28
第四章 欧洲温带棕壤的发育及其分类	30
第一节 棕壤概述	30
第二节 棕壤剖面的形态特征及其理化性质	30
第三节 棕壤的风化及发育	31
第四节 棕壤的分类	32
第五节 关于欧洲酸性脆盘棕壤的发育	32
第五章 强风化和强淋溶土壤的发育	34
第一节 引言	34
第二节 强风化和强淋溶土壤的基本特性	34
第三节 反映土壤风化度和淋溶度的指标	35
第四节 砖红壤的基本性状	38
第五节 氧化土和氧化层的鉴定	44
第六节 砖红壤的地理分布和肥力问题	46
第六章 关于我国红壤分类问题的商榷	49
第一节 广义红壤和它的三大土类	49
第二节 砖红壤类的概念和分类指标	49
第三节 红壤类的概念和分类指标	51
第四节 黄壤类的概念和分类指标	53

第五节 红壤类的主要亚类和土属	54
第七章 水成土的发育及其特征	59
第一节 水成土的基本概念	59
第二节 水成土的类别	61
第三节 水成土和自型土比较	62
第四节 水成土的氧化还原作用	63
第五节 水成土剖面中的白土层及其形成机制	66
第六节 水稻土发育中的主导成土作用	68
第八章 酸性硫酸盐土的发育及其鉴定	69
第一节 概述	69
第二节 土壤酸源	70
第三节 土壤酸化过程	71
第四节 酸性硫酸盐土的形态及化学组成	72
第五节 酸性硫酸盐土的形成及其鉴定	75
第六节 黄铁矿的微土壤学考察	77
第七节 酸性硫酸盐土的铝化学	78
第八节 荷兰酸性硫酸盐土调查的几点结论	79
第九节 关于铝离子对植物的毒害问题	80
第十节 酸性硫酸盐土的改良利用	81
第九章 粘化作用及其在土壤分类中的意义	83
第一节 粘化作用概述	83
第二节 粘化层形成的机制	83
第三节 粘化层的基本特性	85
第四节 淋淀粘粒和残积粘粒的鉴定	86
第五节 不同情况下的粘化指标	86
第六节 粘化现象在土壤分类中的意义	87
第七节 剖面中粘粒迁移量和残积量的推算	89
第十章 美国综合性土壤分类制的介绍和评述	92
第一节 引言	92
第二节 关于土壤分类系统的确立	93
第三节 成土作用的归类 and 说明	94
第四节 土壤水分状况在土壤发生分类上的意义	97
第五节 诊断层及诊断特征	99
第六节 美国综合性土壤分类系统简述	102
主要参考文献	121

第一章 土壤发育中土体内物质的转化

第一节 什么是土壤发育

地壳表面的岩石风化体及其再搬运的沉积体，接受其所处的环境因素的作用，而形成具有一定剖面形态和肥力特性的土壤，称为土壤发育。因此，土壤发育可以理解为土壤同它所处的环境相平衡的过程，而它的具体表现则是土壤物质的转化及其迁移。

所谓土壤环境乃是泛指诸成土因素以及它们相互关系和作用的总和。著名的土壤形成因素学说把自然成土因素概括为：气候（climate）、生物（organism）、地形（relief）、母质（parent material）和时间（time）。美国土壤学家汉斯·叶尼（Hans Jenny）取这五大因素英文字冠拼写成“clorpt”一词，并把它作为土壤的同义词来使用，这就使成土因素学说更为深入浅出，使土壤发育的意义更加明晰便于理解。

土壤物质的转化和迁移总称为土壤的物质运动，这是土壤发生发育及其各发育阶段土壤特征形成的总根源。研究土壤的发育，必须详尽地研究其物质及能量的转化和迁移的方式，可以说它们是土壤学的核心内容。本章着重讨论土壤发育中物质转化，且以矿物质的转化为主。

土壤物质的转化大量而主要的是矿物的风化和粘粒的新生作用（neogenesis），以及动植物有机质的分解和土壤腐殖质的合成。而土壤物质的迁移既包括物质的迁入和迁出土体，又涉及物质在土体内的分散和集中、淋溶和淀积以及在土内由上层迁至下层和由下层迁至表层等等。关于物质在土体内的迁移，将在第二章中加以论述。这里专门讨论土壤中的矿物及其风化作用和粘粒的新生及其主要类型。

第二节 主要的成土矿物及其构造

为便于了解矿物之风化，这里简要地回顾一下主要硅酸盐及铝硅酸盐类矿物的构造。

表1-1 硅酸盐矿物主要组成中的元素的化学价、配位数、离子半径及其相对含量表

元 素	化 学 价	配 位 数	离 子 半 径 (10^{-6}m)	原子相对含量 (%)
Si	4	4	0.41	20
Al	3	4,6	0.50	6
Fe ³⁺	3	6	0.64	1.9
Fe ²⁺	2	6	0.76	1.9
Mg	2	6	0.65	1.8
Na	1	8	0.95	2.6
Ca	2	8	0.99	1.9
K	1	8,12,14	1.33	1.4
O	2		1.40	60

一、硅酸盐类矿物的构造

硅酸盐和铝硅酸盐矿物都是以硅四面体为其构造基础。在硅四面体中，有四个氧原子处于四隅，而与中央的硅原子相键合。因为硅原子的半径最小（ $0.41\mu\text{m}$ ），恰好可以处在四个氧原子（半径为 $1.40\mu\text{m}$ ）最紧密的迭合下形成的空隙之内，并和四个氧原子相密接。在这种键合下，每个氧原子都剩余一价，可借此和其他四面体联结。由于硅原子的高电荷（四价）和小离子半径，故其晶格能特强，所构成的四面体是很稳固而不易被风化破坏的。

由硅四面体构成晶层或晶架的途径有二：一是通过氧原子共用，而把四面体联结起来；二是凭借多价正离子在不同的四面体之间搭桥，而把它们联接起来。这样，硅四面体就不再是一种单独的结构了。这是硅酸盐或铝硅酸盐矿物的极重要的构造基础。

以氧原子共用而结合的硅四面体层较为坚固，而以正离子架桥结合的四面体层则较弱。由于多价正离子种类不同，最常见的为钙、镁、铁，因而硅四面体层的组成是多种的。此外，硅四面体还可发生铝代硅的同晶替代而形成别的四面体层，但铝比硅原子稍大，不十分适合四面体中央的孔隙，所以这种同晶替代产生的四面体，其铝原子会把紧密迭合的4个氧原子稍稍推开一些，从而减弱一些键能。另一方面，由于铝取代了硅，而铝是三价的，比硅少了一价，这样所形成的四面体电荷呈不平衡态，其中剩余了一个负电荷。由于这个关系，某些一价正离子如 Na^+ 、 K^+ 等得以参与四面体的组成中，使晶体的元素组成较为复杂。

铝原子处于六配位，这是铝硅酸盐构造的重要特征。此构造是由硅四面体层和铝八面体层组合而形成的。在铝八面体中，铝原子处于8个氧原子构成的八面体的中心。这些矿物由于以次生矿物而存在于土壤中，故有其特别重要的意义。

硅酸盐类矿物的构造类别，有以下几种：

- （1）单独完整的硅四面体构造；
- （2）硅四面体成对联接的构造；
- （3）硅四面体三度向联结成环状的和直键状的构造；
- （4）硅四面体联结成的网状构造。

而铝硅酸盐类的构造乃是在上述（3）、（4）两构造中相应地配上铝八面体层而形成的。

单独的四面体硅酸盐主要的有以下两类：

（一）**橄榄石类** 它们是由二价钙、镁、铁把四面体联接而形成的。在这个构造中，不仅四面体内的氧原子呈最紧密的迭合，而互相联接的各四面体的迭合也同样是最紧密的方式（如匣子内装苹果那样）。在这种排列中，含硅质子的四面体孔同含有钙、镁、铁的六配位八面体孔相互交替出现。此构造很紧实，物理强度大，故橄榄石无解理，只有在八面网构的空间呈无规则断裂的倾向。由于含有一价正离子（用来稳固四面体），故易在其表面接受化学侵蚀，而遭风化破坏。

橄榄石是在基性岩浆结晶时早就形成了的，故在玄武岩中通常以斑晶（phenocryst）出现。当熔融态的熔岩（lava）沸腾而冲出火山口时，早就形成的橄榄石斑晶暴露于空气中，晶体表面的铁就被氧化。在此种氧化物表面，周围岩浆中的铝就侵入而参与结晶构造。在橄榄石外包盖了一层伊丁石（iddingsite），它是氧化铁和铝硅酸盐的混合物。在表观上尚未风化的老玄武岩中，常可看到橄榄石被蚀，而在伊丁石的包盖轮廓中，充满着绿色的铝硅酸盐

即绿泥石。

(二) **石榴石类** 它是由铝及高价铁把一些单独的硅四面体联结起来造成的。它们呈六配位体安置在八面体内，而呈最紧密的排列。

此外还有红柱石类等，不一一列举。

二、铝硅酸盐类矿物的构造

铝硅酸盐类的构造基础是〔硅〕四面体层和〔铝〕八面体层。其中，铝或镁和6个氧原子配位；而一部分氧原子又和氢相接触，故其形成物，毋宁说是氢氧化物而不是氧化物。由于四面体和八面体层的相互排列及其相互联结方式的不同，这就造成各类不同矿物。其中，如云母和绿泥石产生于岩浆岩和沉积岩中；而粘土矿物则是在风化作用，特别是成土作用中，由矿物蚀变和重新合成产生的。各类矿物的相互关系是很密切的，某些类别之间的转化不必通过构造体的重组。四面体层中的一部分硅原子被铝替代是在正规的构造模式下进行的，此时一、二价正离子介入其中，以维持构造的电荷平衡。

(一) **滑石和叶绿石** 最简单的铝硅酸盐类矿物是滑石和叶绿石。它们的四面体中没有铝的同晶替代(硅)。其构造层的排列是一个八面体层夹在两个四面体层中间，四面体的第四个氧原子和八面体共用，从而使它们联在一起。因为没元素的替代而产生剩余价，同时四面体向内接点上遗留下来的全部氧原子，都和中间的八面体层相联，所以在堆砌成晶体时，各个相连续的夹合层之间，就没有化学键结合。由于这个缘故，形成的矿物柔弱，易沿着层片解裂，而且在这些无化学键束缚的结构单位之间，就可滑动，晶体可被弯转。在滑石中，四面体层是氢氧化镁，在叶绿石中则为氢氧化铝。

(二) **云母** 其构造层的排列类似滑石和叶绿石，但它的四面体中，有 $1/4$ 硅被铝替代，所产生的空闲价，被介入的钾所用，并借以使构造层联在一起；铝和周围四面体上的12个氧原子形成配位。在这种构造单位之间，可被水分子侵入，从而成为水化云母和蛭石。含水云母风化时，将其所含的钾释出，同周围的钙、镁进行交换。

白云母和黑云母之区别在于八面体的化学组成。酸性火成岩和变质岩的白云母含铝八面体，因为铝是三价的，用一个铝离子造成的层次只占八面体有效空间(孔隙)的 $2/3$ ；而基性岩中铁、镁黑色矿物的黑云母中，其八面体层是由二价的镁和亚铁占据了八面体的全部有效空隙。

(三) **绿泥石** 此矿物在2:1构造之外，增加了额外的层次，这就是水镁石层(铝或镁氢氧化物层)。由于八面体层中的元素替代，一个像云母那样的夹合层构造，就有一个过剩的负电荷；而那个额外的八面体层(水镁层石)，由于系三价铝和二价镁的混合组成而有一个过剩的正电荷，因此这单位就会被电性相反的层次的静电引力拉在一起，构成一种多片夹层构造(multidecked sandwiches)。

绿泥石的组成颇有变异，因在八面体中，镁、铝、铁的成分是变化不一的。它们是在变质岩和火成岩中产生的，这是橄榄石和角闪石在风化中早期的蚀变产物(其他矿物尚未风化时就形成了)。这样，常把它看作土壤中的原生矿物。而严格地说，它是次生矿物。

(四) **伊利石和蛭石** 就八面体层的组成来看，粘粒矿物中的伊利石类(水化云母类)和蛭石相当于原生矿物中的云母类和绿泥石类；即伊利石相当于白云母，蛭石相当于黑云母。云母和这些次生矿物的基本区别是云母的夹层构造是牢牢连在一起的，而次生矿物因其

四面体层中的铝、硅比较低，故在它的构造单位之间存在的钾离子较少，而有水层在这个位置上参与结晶构造。在蛭石中，此水层是双重的。水进入晶体同淋洗而移走钾有关，其代换作用发生于钙或镁代换钾，在这个风化过程中，云母就转变为伊利石或蛭石。黑云母和蛭石或绿泥石和蛭石交迭成层时，形成了复合结晶。

这些晶体内含水和四面体及二价正离子两者有关的：这些水并不是定向自由水，而是定向水层，其中极性水分子的一端同四面体层的氧，另一端同存在于水分子双重中间的正离子连成键。蛭石和绿泥石的相互关系，可从云母夹层排列不单被钾离子，而且被氢氧化物层牢牢连在一起的这种现象看出来。

(五) 蒙脱石 在这些矿物中，其云母型夹层构造四面体的铝硅比蛭石低，所以用来使夹层联牢的表面电荷较少。蒙脱石构造中的水层是不定向水层，故其扩张不受固定，有较多的水可以进入（水层较厚）。蒙脱石的这种可变空间，在于湿变异时其胀缩较大。这一性质对土壤理化性状具有强烈影响。

由于铝被一部分镁或低价铁所替代，所以蒙脱石类矿物就具有种种不同的组成。在这类矿物中，云母、绿泥石和蛭石相互交迭的结构也是常见的。

以上所讲的各种片状构造全部是以云母夹层为基础的，所以这些矿物的相互关系密切乃是显然的。这些矿物的主要区别是在结构单位相互联接方法不同，这主要是因为其四面体上的金属元素替代的数目不同，从而使其联合的机制有所区别。这些矿物都属于所谓 2 : 1 型矿物，即在一个构造单位中，有两个四面体层同一个八面体层组成。

(六) 高岭石 高岭石类属于 1 : 1 型矿物，即它的构造单位是由一个四面体层同一个八面体层组成的。它是一组以次生为唯一特征的矿物，在原生矿物中没有和其相对应的构造。在这样的构造单位里，四面体层和氢氧化物八面体层束缚在一起，它们是由四面体上的第四个氧原子同八面体上的氢原子起联接作用。高岭石的八面体层并不像 2 : 1 型矿物那样呈对称性，所以它的两侧都和四面体直接相联，它同四面体相对的一边上，有一排氢氧离子突出，其晶体是由氢氧离子上的氢同四面体的氧原子形成一部分共价键造成的。虽然，所有四面体均已满价，而氢原子在其中共用，恰好可使构造单位连起来。

同高岭石相关联的（相当的）矿物是叙永石，它是一种在 1 : 1 构造单位之间介入一个双重水层，其情况有三种：即脱水型、部分水化型和完全水化型。叙永石有一个卷曲成管状而显纤维状外形的奇怪特性，而与一般片状构造不同。

在高岭石类晶体中没有铝替代硅的现象，所以没有其他正离子介入晶格的机会，因而其化学组成的差异就少，它是严格的铝硅酸盐而不含铁镁或碱金属成分。

(七) 铝硅酸盐类的非晶体物质 铝英石（allophane）中的硅为无定形，其含量与铝硅酸盐矿物成当量关系。它是土壤常见成分，在某些土壤中如火山灰始成土（andept），可被 4 MKOH 浸提的铝的含量及硅的含量都很高。非晶质铝硅酸盐类矿物中的硅也不同于无定形硅粉（它不常见于土壤中）。氧化铝、氧化硅的溶解度小，在风化成土作用中，当其他易溶矿质淋失后，它们可积存于土壤中。在火山灰中，由于多孔性关系，其大量原生物质呈无定形或不易蚀变的玻璃体，在强淋洗下，这些成分来不及重行组合为晶化的铝硅酸盐矿物，故铝英石得以残留在这种土壤中。

在铝英石中，硅四面体中的硅，大约有 1 / 4 被铝替代，四面体外，则为固结的、含铝很多的、分散的八面体相，这两相由于铝代硅造成四面体的负电性和八面体正电荷相平衡而

存在，否则将被 H^+ 平衡。

三、土壤中的其他矿物

(一) **氧化铝** 包括原生矿物刚玉及次生矿物三水铝石（系铝的水化合物，被禁锢在八面体内两个OH层之间的八面体孔中）。在土壤中，三水铝石仅仅比 SiO_2 呆钝，所以只有在 SiO_2 被淋失的条件下才可形成（否则产生铝硅酸盐类）。湿热酸性的成土环境中可以产生三水铝石（ $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ）。在地质时期的第三纪长期高温多雨的热带条件下，可以产生氧化铝（ Al_2O_3 ），并常形成铝矾土矿。

(二) **铁矿** 它在地壳中普遍存在。其形态以Fe-Mn矿为主。在基性岩中则为磁铁矿（ Fe_3O_4 ），而赤铁矿则系铁镁矿早期的（甚至在岩浆时）蚀变产物，它只要同大气接触后就可产生。它常在变质岩岩脉或接触带中产出而成为开采铁矿的重要资源。水化氧化铁为风化成土中广泛产出的矿物。它或者作为风化残余物而积聚于土中，或者在形成次生矿物进行晶体重组时被排出而积聚下来。

土壤中存在的氧化铁的形态，曾作过许多研究。原生矿物晶格上释出的铁，可能是一种无定形物质，同土壤溶液作用后，形成氧化态或水化凝胶。当它们晶化后，可形成针铁矿和纤铁矿。其成分均为水化氧化铁（ $FeOOH$ ），其晶体细小，可分散而包盖于土粒表面；或成为粉状体积聚。其多水化合物通称为褐铁矿，褐铁矿脱水后可形成针铁矿或赤铁矿。

此外尚有黄铁矿、兰铁矿、水化磷酸铁 $Fe_3P_2O_8 \cdot 8H_2O$ 等含铁矿物。

第三节 土壤发育中的两大类风化作用

水解作用是一切原生矿物风化的最基本的机制。但水解则因水温不同而有很大差别。这就是说，温度是水解的主要影响因子。据此，我们可以把土壤发育中的过程区分为两大类型：其一为地球化学风化作用。其风化的结果是矿物结构和组成的完全解体，各组成从原来矿物晶格或组合中释放出来。这种风化作用发生于热带气候下，代表热带土壤风化的特征。其二为生物化学风化作用。它的特点是风化作用进行缓和，往往是不彻底和不完全的，是渐进的，其风化产物中多保留着原生矿物结构（晶格构造），可看作风化过程的中间产物，多为不溶性残留物。这种风化代表着温带气候下的风化特征。

由此可见，从原生矿物转变为次生矿物的粘粒，其强度及形成的粘粒量均随环境条件不同而有差异。若此种转变过程较弱，变化不多，则其粘粒的形成可称为是母质遗传的；反之，若转变强烈而与原来矿物有显著差别者，则可分别称之为降解作用（degradation）及加积作用（aggradation），它的产物可以称之为新生的。

一、土壤发育中的地球化学风化作用

地球化学风化的显著特征是原生矿物的完全水解和次生粘粒矿物的新生（neogenesis）。这种风化过程可以说是热带土壤发育过程所专有。Pedro（1964）和Robert（1970）曾分别在实验室条件下演示了这种过程。它发生于中性及微碱性条件下及排水良好的环境中（即有流水循环的），但不存在有机酸的阴离子。在这样的模拟实验条件下，原生矿物可完全破坏，其重要组成尤其是 SiO_2 及 Al_2O_3 被释放。这对于层状硅酸盐矿物（云母类）及网状硅酸盐矿

物都一样，其命运或结局是它的组成被完全破坏。这种完全的水解作用不但使盐基离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等被排除或淋失，且使硅酸遭到淋溶而迁出风化体。盐基和硅酸这两部分组成在风化中属于活动成分。而铁、铝则否，它们属于惰性成分，只有微弱的活动性，因而在风化体内就地积聚起来，表现为风化体的富铁、铝化。Pedro发现，原生矿物中的100%的铁和70%的铝被保留在风化残积体中。

然而这种风化作用处于半封闭的排水不良的条件下，被风化释出的硅酸淋失减慢时，就可发生硅酸和铝氧化物的重新组合成为新生粘粒。

粘粒的新生作用是怎样进行的呢？正如Tardy指出，在此过程中，铝由四配位变为六配位，它并不长期存在于溶液中，而是通过复合离子阶段很快地老化，转变为不溶性无定形氧化铝（据Schwertmann, 1969）。Trichet在研究火山玻璃体风化的实验中，曾观察到新生的叶绿石环绕于球状凝胶颗粒的周围，即首先是氧化铝凝胶形成铝八面体的中心，而后是硅氧排列成边界四面体层。

粘粒的形成不论就其类型还是数量来说，都因下列两个因素的差别而不同。即：（1）天然的土壤排水条件。排水状况决定风化释出的组成被移走的速率，从而控制着风化速率及保留于风化液或残体的成分。（2）各种成分在其环境中的不同溶解度，它在很大程度上决定于pH。

Acquaye和Tinsley (1965)曾提到：当pH升高时，如铝在pH 5左右的溶解度将出现锐降，从而出现了淀积的 Al_2O_3 吸收 SiO_2 ；但在这种稳定的酸性或强酸性反应下，其盐基及硅酸均遭强烈淋失而排至深层或土体之外，因而只能形成硅酸不足的低硅性粘粒（高岭石型）。反之，降水较少或排水较差（如半闭流区）及母质富含碱土金属元素者，则被 Al_2O_3 胶体吸收的 SiO_2 较为丰富，可形成2：1型的蒙脱石类粘粒。由此可见，在热带气候下，其土壤中出现三种占优势的粘粒是：三水铝石、高岭石、蒙脱石。它们顺次地反映了含硅量的递增，而其降水量则由湿润向干旱，其排水则由通畅向闭流方向演变。总之，热带土壤粘粒类型是同它的气候及地形（排水条件）等条件相一致的。

二、土壤发育中的生物化学风化作用

在温带气候下，风化机制中的水解作用比热带气候下缓和得多。其风化产物中的中间产物占有很大比例（Souchier, 1971）。其产生的粘粒大部来自叶腊石类矿物的转化。影响这种水解或转化的主要因子是介质的pH及有机阴离子。新生的粘粒在温带气候下仅占极次要的地位。在热带则不然，某些相当稳固的抗水解的2：1型矿物，也可通过缓慢的脱硅作用而形成1：1型的高岭石类，乃至铁、铝氧化物粘粒。

在温带气候下，土体内的活动性有机阴离子的种类和数量控制着水解方式及其进程的快慢。在这个过程中，一部分Al可被溶解，而自土壤排水中淋失，因而其富铝化过程得不到发展。这是温带和热带风化作用的重要区别。

据Robert (1970, 1979)及Razzagha-Karimi (1974), Pedro (1976)等人的研究，温带的生物化学风化的水解方式有以下几种：

（一）中性水解作用 风化液中存在较丰富的盐溶液，它是在非酸性而富含盐基的环境下发生的，它比较少见，仅见于黄土及石灰岩风化体等母质之上，其中， Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 参与水解中的交换作用；它只能使矿物晶层间的 K^+ 受到缓和的及很不完全的脱钾作用；八面体层上

的 Fe^{2+} 也只有部分被氧化而脱离，层片状晶架只是极有限地退化和解体。这样缓和的粘粒形成过程好象是粘粒来自母质的继承作用，甚至可以看作云母矿物的晶层受到简单的碎裂作用而形成的。

(二) 酸性水解作用 这是表土层存在着丰富的腐熟的酸性腐殖质 (mul) 的酸性棕壤中常见的风化方式。在这些酸性的活动的腐殖质以及由残落物 (A_0 层) 产生的有机物的影响下，可提供柠檬酸、草酸、多元酚等组成的阴离子，使一部分惰性矿质成分如铁、铝等活动而分散 (胶散) 于水。这就是说，在这些有机物影响下，云母类型的原生矿物会被彻底地移走其层间 K^+ ，并使其晶层结构张开，从而由云母变为伊利，再演化而为蛭石；同时，四配位的铝也会逐渐从四面体层移走，并随其他风化产物自排水损失。但也有某些铝离子留存于晶层之间，构成岛状复合 Al^{3+} —— $\text{Al}(\text{OH})_n$ ，这就形成了铝的六配位，产生为铝蛭石 (据Villers和Jackson, 1967)。

(三) 通过加积作用形成铝绿泥石 长石等矿物在生物化学风化中所释出的铝，在闭流及半闭流的排水不良条件下，不能被淋洗移走，于是，矿物的起始水解作用就被加积作用 (agradation) 取代，形成岛状复合 Al^{3+} ，进而相互联结而造成相串接的三水铝石晶层。此种加积产生的粘粒属于2:1:1型绿泥石构造。这种富铝的绿泥石是次生的，它不同于原生的富镁的绿泥石。原生绿泥石系富镁而呈微酸性的始成土中存在的粘粒矿物。

(四) 络合风化作用 络合风化 (complexolysis) 不属于水解作用。它不仅有 H^+ 作用，而且能形成活动性的络合物，使一些原生矿物及粘粒产生特殊的活性，即以其络合功能提取矿物片状晶架上的铁、铝原子，使之活化迁移，造成晶架的破坏。在本书第三章、第四章中反复论述了灰壤化中的络合机制，可供参考。

据Robert (1970), Razzaghe-Karimi (1974), 和Boyle (1974) 等人的实验研究，这些有机络合阴离子能强烈作用于云母类粘粒，它们不仅提取了粘粒晶架中的间层铝及四配位铝，还提取八面体层的铝，从而导致其晶体的彻底崩溃。在 $\text{pH}3$ 下，这些有机络合阴离子可导致黑云母及伊利石的完全破坏 (Robert和Vicente, 1977)。

粘粒矿物对络合作用的抗性是：高岭石 > 伊利石和蛭石 > 蒙脱石，这说明热带、亚热带湿热环境下发展的高岭化土壤的发育多半属于老成土性质。

在络合作用下，云母型矿物的退化或降解的顺序大约是：

黑云母 → 伊利石 → 蛭石 → 蒙脱石。

└──────────┘ → 硅、铝络合物及其可溶性物 (可从风化液中流失)。

第四节 土壤发育中粘粒的形成和它的新生作用

一、地球化学风化中的粘粒新生作用

综合第三节第一段所述，地球化学风化的结果，可简列为图1-1。

在表解风化产物中，带电荷的胶体对土壤类型及其特征具有重要影响，这些胶体包括下列三类：

1. 土壤中的胶体氧化铝 $[\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{OH}]^{+-}$ ，可形成以下矿物：

(1) 无定形 $\text{Al}(\text{OH})_3$ ，即 $1/2 (\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O})$ ；其表面活性大，吸附性强。

(2) 结晶形三水铝石及拜耳石 $1/2 (Al_2O_3 \cdot 3H_2O)$ 。

(3) 结晶形氧化氢氧化铝：勃姆铝矿及硬铝石 $(AlOOH \text{ 或 } 1/2 Al_2O_3 \cdot H_2O)$ 。

(4) 结晶氧化铝：刚玉 (Al_2O_3) 。

2. 胶体氧化铁 $[Fe, O, OH]^{+-}$ ，可形成以下矿物：

(1) 无定形 $Fe(OH)_3$ ，表面活性强。

(2) 微晶形氢氧化铁。

(3) 结晶形氧化氢氧化铁：针铁矿及纤铁矿 $(FeOOH)$ 。

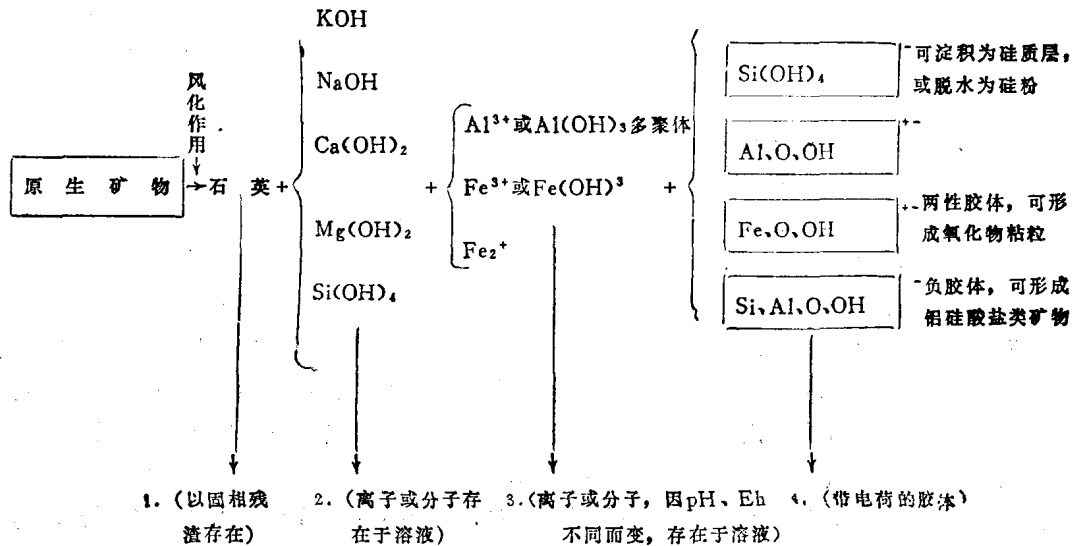


图1-1 各种原生矿物在地球化学风化中的产物

(4) 结晶形氧化铁：赤铁矿，磁赤铁矿 (Fe_2O_3) ，磁铁矿 $(FeO \cdot Fe_2O_3)$ 。

3. 铝硅酸盐类胶体：带负电荷，它可以演化为一类粘粒矿物。其构造特征已在第二节内说明。这些粘粒矿物可看作是在新生作用下形成的。即原生矿物被彻底风化而解体，然后在原来的造岩矿物的晶体附近，或迁移到别的土层之后，经过组成的重新搭配，合成为粘粒矿物。它们的构造系列，主要同云母具有亲缘性，因为它们都具有相似的层状晶架。这一类土壤粘粒矿物常见者有：

(1) 伊利石。云母层间钾离子被水解而释去，代之以氢离子，而成为伊利石（亦称为水化云母）。

(2) 蛭石。云母层间的钾离子被镁取代，因镁离子之水化较强，故使晶层膨胀而成为蛭石。

(3) 蒙脱石。八面体层上的铝被镁取代，从而增加了负电荷而提高CEC，而且晶层间极易膨胀。

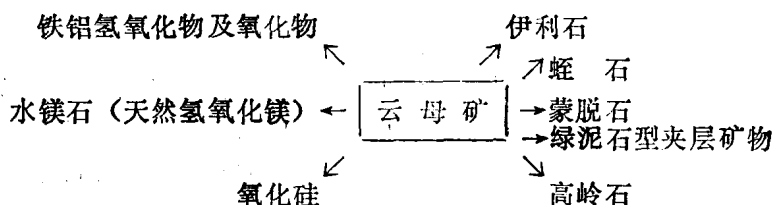
(4) 绿泥石。云母层间的K被带正电荷的镁、铝八面体层取代，从而大大地降低其CEC，形成八面体夹层矿物，失去其膨胀性能。

(5) 高岭石。当叶腊石被极度蚀变时，它的每两个硅四面体层之一即被剥离，因而铝八面体层原有的 O^{2-} 平面被转变为 OH^- 平面（即为水的偶极离子）。此剥蚀的残留矿物，就是高岭石。

高岭石及叶腊石若经过加热以驱除其 OH^- ，则高岭石分子之硅铝率 $Sa = 2.0$ ；叶腊石为 4.0。

与高岭石有密切联系的粘粒矿物还有蛇纹石和埃洛石等。蛇纹石的八面体孔穴中的 Mg^{2+} 及 Fe^{2+} 超过 Al^{3+} 。埃洛石是在两个高岭石层间插入一个水分子平面，这样的层片可以卷曲为亚微观圆筒状，可在电镜下看到。

下图表达了土壤中常见粘粒由以云母为中心的风化作为起点的转化过程（即由母质遗传而形成的）。



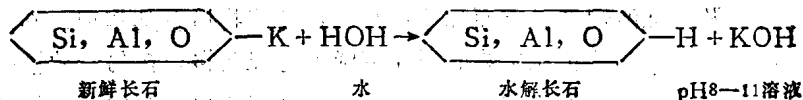
以上所述粘粒之形成均属于矿物蚀变转化或遗传型。

土壤粘粒若以正长石的风化为中心，则其矿物晶体的基本构造及组成均经过完全改造，而后重新组合为粘粒矿物。这一过程称之为粘粒矿物的新生 (neogenesis)。

总之，土壤粘粒的新生，必须经过起始的水解作用以及后继的溶蚀作用相连贯，而后在一定的环境条件下新生成不同类型的粘粒矿物。

矿物的机械捣碎作用，如磨蚀、压挤、胀缩等，决不能产生具有胀缩性、韧性及表面化学活性很显著的粘粒。但机械破碎为矿物的水解及溶蚀提供了有利条件，可以加速其进行。因此粘粒的产生，决不可以理解为原生矿物的简单的捣碎作用。

所谓矿物的起始的水解，可以新鲜的长石矿物为例，而以下式表述之：



风化产物中的OH若迅速被雨水淋走，则上述水解作用可加快进行，否则，水解停滞不前。可见，天然降水量及土壤排水条件对于起始水解（以及后续的溶蚀作用）有着极大关系。

以上表述适用除石英矿物外的各种原生矿物的水解的说明。这实质上是土体或岩体中进行的阳离子交换作用。在这个过程中，千万不可忽视数量极大的来自生物生命作用的碳酸的作用。碳酸虽是一种弱酸，但在土壤发育的物质转化及迁移中起着十分重要的作用。在某些特定条件下，则硫酸、磷酸、硝酸等强酸以及粘粒酸则可起着重要的水解作用，因为它们都提供 H^+ 。

风化作用中的溶蚀 (dissolution) 可作如下理解：例如，新鲜长石通过水解而获得 H^+ 时，此 H^+ 扩散到矿物晶层内，使晶层面上的 O^{2-} 转变为 OH^- ，使矿物出现了局部的不稳定，最终使硅八面体或铝四面体发生了分离，拆散其晶层面。这样就如前面表解所示，在风化液中出现了以下物质：

①溶解性或分散性的硅酸 (H_4SiO_4)。

②在风化液中的铝在铝八面体周围同水分子或 OH^- 及 O^- 离子呈六配位基。这样铝原子即以下列分子或离子形态出现于风化液中：即 $Al(OH)_3$ 分子及 $Al(OH)_4^-$ ， $Al(OH)_2^+$ ， $Al(OH)^{2+}$ ， Al^{3+} 。这些形态的产生决定于风化液的pH。同时因其浓度低，故可用浓度积方程来探讨。

顺便提一下，“粘粒矿物”（clay minerals）这个名词是土壤学中惯用的术语。它是指 $<2\mu\text{m}$ 的土粒。既包括硅酸盐粘粒，又包括氧化物粘粒（即铁、铝氧化物）。但在矿物学中却常用“粘土矿物”这个术语，它是专指铝硅酸盐类粘土的。故这两个术语实际上是有些区别的，在表达这些问题时，在用词上应注意两者的差别。

二、温带生物化学风化下粘粒的形成

在温带气候下，粘粒的新生作用是进行得极缓慢的。这不仅是因为它的水解作用及凝胶的缩聚而晶化作用在温带气候下进行得较慢，而且因为在这种成土条件下，土壤表层的酸性腐殖质（包括mull，moder及litter等）提供了有机络合阴离子，从土壤中携走了可供粘粒合成的成分（包括盐基及铝、铁等）。所以在温带土壤中，粘粒的新生作用始终受到阻滞，而难于进展。

温带土壤中长期保存着无定形及微晶形游离氧化物的原因，也是因为森林植被提供了有机阴离子，它与铁、铝离子形成不溶性而可以被胶散（peptization）的混合凝胶及有机-无机复合体之故。这些物质不易被晶化而保持在凝胶态。

总之，在温带只是在微酸性、缺乏有机质和排水通畅而易使风化产物移走的土壤中，可在其一定的土层内，造成粘粒的新生，而使之居于重要的地位，甚至超过粘粒继承性的形成过程。

三、环境因素对风化作用的影响

降水及温度两者是影响矿物风化的主要因素。而土壤所处的现场条件（site），如地形、母质、植被状况等，对风化具有非常显著的影响。温带气候下的生物化学风化作用，因受丰富的活性有机化合物及其强酸性的影响而加速进行。但这些物质及其作用，却阻滞着粘粒的新生，甚至还会使以前就存在的粘粒矿物的退化或降解过程变慢。在另一种情况下，高含量的钙、镁碱土金属离子及强烈的生物活动也可使温带土壤的风化进程变慢。但同时对于富硅粘粒的形成及其维护则产生有利的影响。

综上所述，所谓生物气候控制的风化类型，可以划分为三大带，其相应的成土过程可以概括为三大过程：（1）灰壤化（冷温带）；（2）棕壤化及硅铁铝化（温带湿润区）；（3）富铁铝化（热带雨林）。各气候带的风化类型可用下表进行概括。

表1-2 各气候带的风化类型

气候带	土壤	风化方式	粘粒形成及转化方式	粘粒的新生
寒带	灰壤	络合作用	退化及溶蚀	无
温带	灰化土(含mor)	络合作用	退化及溶蚀	无
	棕壤(含mull)	酸性水解	转化蚀变及逐渐退化	弱，高龄化
亚热带	硅铁铝土	中性水解	继承性，缓和转化	中，蒙脱石化
干旱带	热带富铁土 (排水条件佳)	完全水解 (中性)	继承性，缓和转化	强，高龄化
	变性土(排水条件差)	完全水解(中性)	继承性，缓和转化	强蒙脱石化
湿热赤道气候	铁铝土	完全水解(中性)	无继承性，无转化	强高龄化及三水铝石化