专题评述

中国黄土的地质环境

刘东生　安芷生　文启忠　卢演俦
韩家懋　王俊达　刁桂仪
（中国科学院贵阳地球化学研究所）

中华人民共和国成立以来，特别是无产阶级文化大革命以来，广泛地开展了黄土和黄土地质环境的研究．这里主要介绍黄土的分布和地层，黄土与其他第四纪沉积物的关系，以及黄土的物质成分和结构的研究成果．从黄土沉积时期地质环境的特点和黄土成因等说明中国第四纪时期有干湿气候的交替变换和多次的气候波动．这些研究成果对于利用与改造黄土和黄土的地质环境有着实际的意义．

一、黄土的分布

黄土在中国北方，分布于昆仑山、秦岭、泰山、鲁山山地一线（约北纬34—35°）以北的干旱和半干旱地带．在平面分布上自北而南，戈壁、沙漠、黄土呈带状排列[1]．

黄土在黄河中游地区分布最为广泛，构成了切割程度不一的黄土高原．黄土高原地区黄土覆盖了约276,000平方公里，占黄河中游总面积的40％以上[2]，成为黄河中游自然景观的主体．

黄土高原常见的地貌形态有三种：塬、梁、峁．塬是平坦的高地，梁是长脊，峁是圆丘．黄土高原北部以梁峁地形为主，至南部梁峁地形逐渐减少，广阔的黄土塬地形增多．黄土高原黄土的厚度一般为80—120米，测得最大厚度为175米．

二、黄土的地层和第四纪气候的变化

黄土地层自上而下划分为晚更新世马兰黄土、中更新世离石黄土上部和下部、早更新世午城黄土．其间被三个剥蚀面隔开．

古生物化石的研究　中国黄土中哺乳动物化石是比较丰富的，各不同时期黄土中动物的成份都自成为一个有特征的干旱草原性的动物群[3]，含有鼢鼠类、马类、驼鸟等有代表性的黄土区生物．各不同时期黄土中孢粉含量不多，草本花粉占优势，其中代表干燥性气候的蒿属（*Artemisia*）、藜科（Chenopodiaceae）、禾本科（Gramineae）等花粉居多，反映了黄土堆积时期干草原植被的特征．

此外，在陕西省蓝田县陈家窝村附近中更新世离石黄土中曾发现蓝田猿人（*Sinanthropus Lantianensis*）化石[4]．

古地磁的研究*　曾对陕西洛川黄土剖面进行古地磁研究．该剖面黄土共厚134米，可与午城剖面对比（图1）．

* 李华梅同志参加了该项工作．

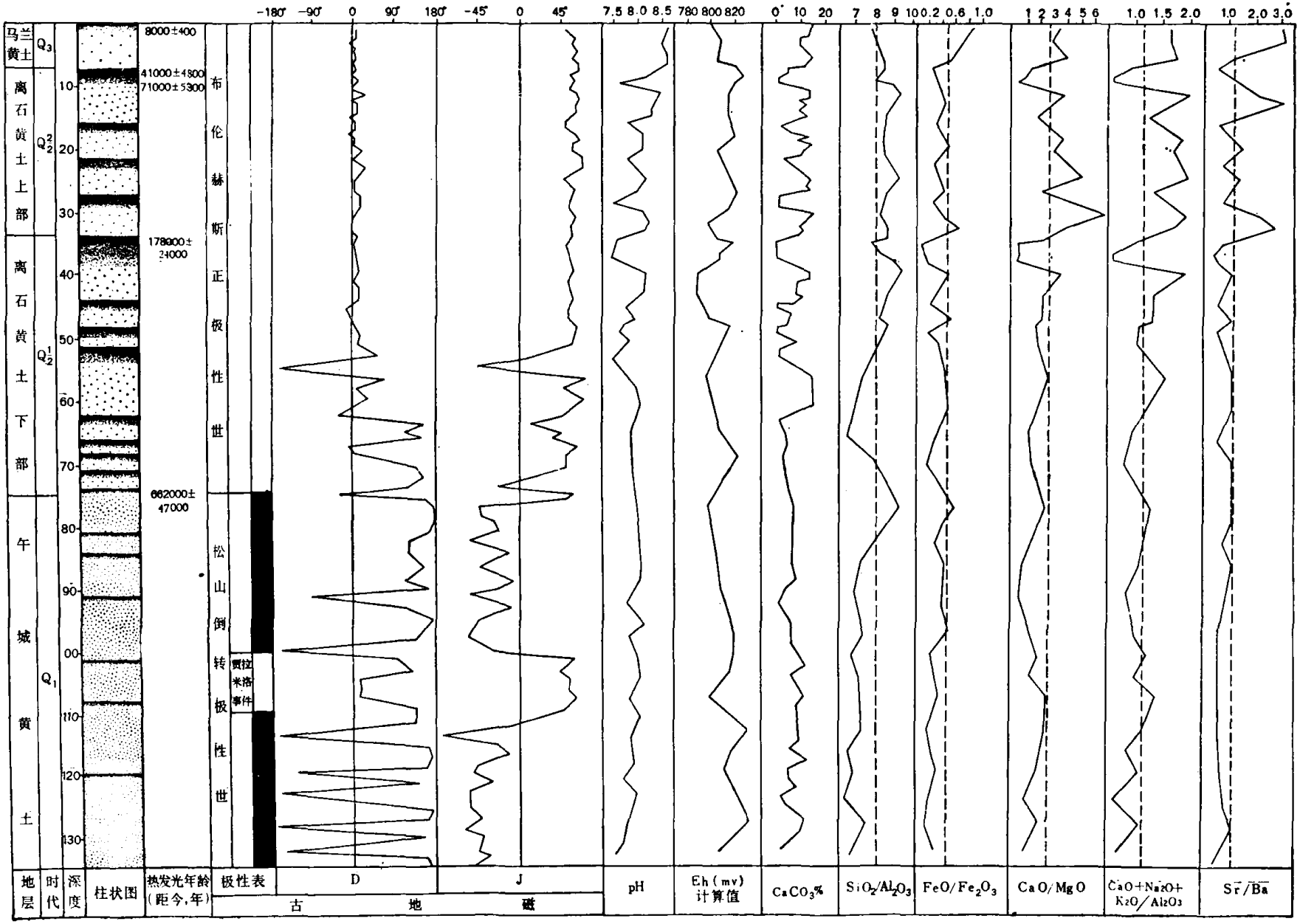


图 1　陕西省洛川黄土地层、年代和地球化学特征综合柱状图

马兰黄土和离石黄土样品的剩余磁化强度矢量的正磁倾角和较小的偏角表明，马兰黄土和离石黄土所反映的正极性时期可与 A. 考克斯[5] 地磁极性时期表中的布伦赫斯正极性世对比. 离石黄土中个别样品的反磁化性质仅仅记录了布伦赫斯世中短暂的倒转事件. 午城黄土中多数样品的剩余磁化强度矢量的负磁倾角和较大的磁偏角，表明午城黄土是在松山倒转极性世沉积的. 这样，洛川黄土剖面中离石黄土的底部(自上而下 75 米处)暂视为布伦赫斯世与松山世的界限 (0.69 百万年) 在该剖面上的反映.

位于 100—110 米的午城黄土样品的正磁化性质，反映出松山世中最晚出现的贾拉米洛正极性事件 (0.89—0.95 百万年). 在其下部直到剖面底部 134 米处的午城黄土样品皆为反磁化性质，可以认为午城黄土是从松山世的中晚期开始沉积的.

有的研究者将奥地利和捷克斯洛伐克黄土中反映了八个冰川旋迴的黄土划入布伦赫斯世[6]，那末它们可与中国的马兰黄土和离石黄土对比. 中国黄土的厚度大于奥地利和捷克斯洛伐克黄土的厚度，不但记录了贾拉米洛事件，而且在贾拉米洛事件前已沉积了至少 20 余米反磁化的黄土. 中国黄土开始发育是在松山世中晚期，较奥地利和捷克斯洛伐克开始发育为早.

热发光研究* 黄土中石英粉砂具有相似的天然热发光性质，在 100—250℃ (通常峰温在 175℃ 左右) 区间均出现显著的中温发光峰，约从 350℃ 起发光量又有所增加 (图 2). 175℃左右的中温发光峰峰值与加热温度 400℃范围内的热发光总量(辉光曲线下面积的积分

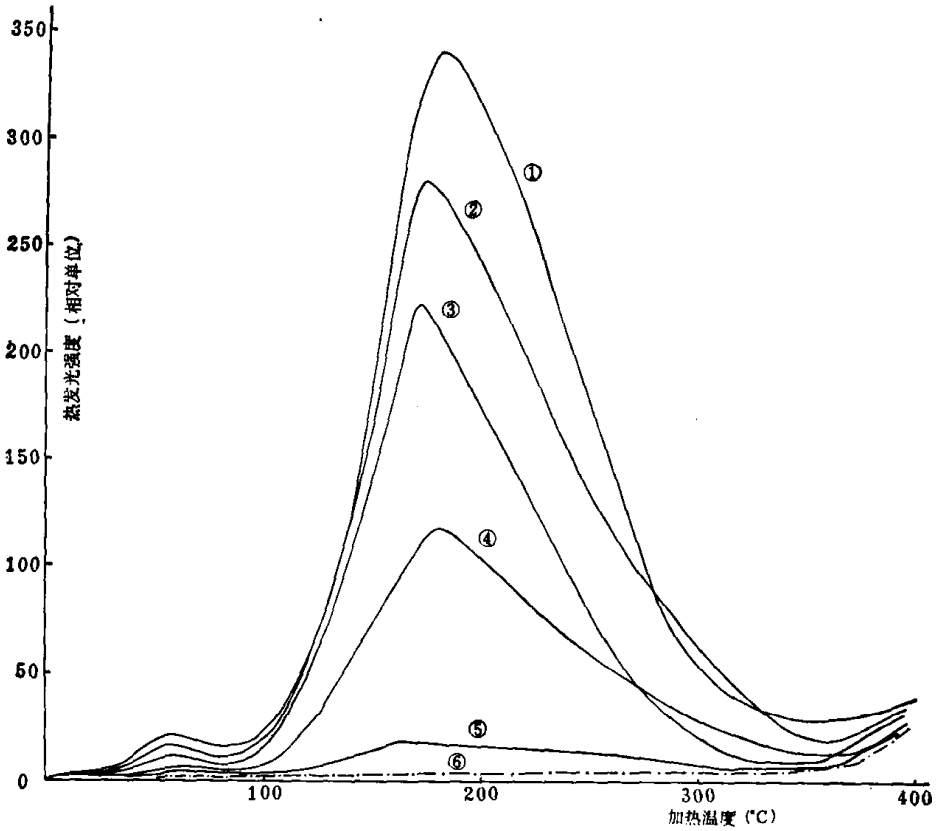
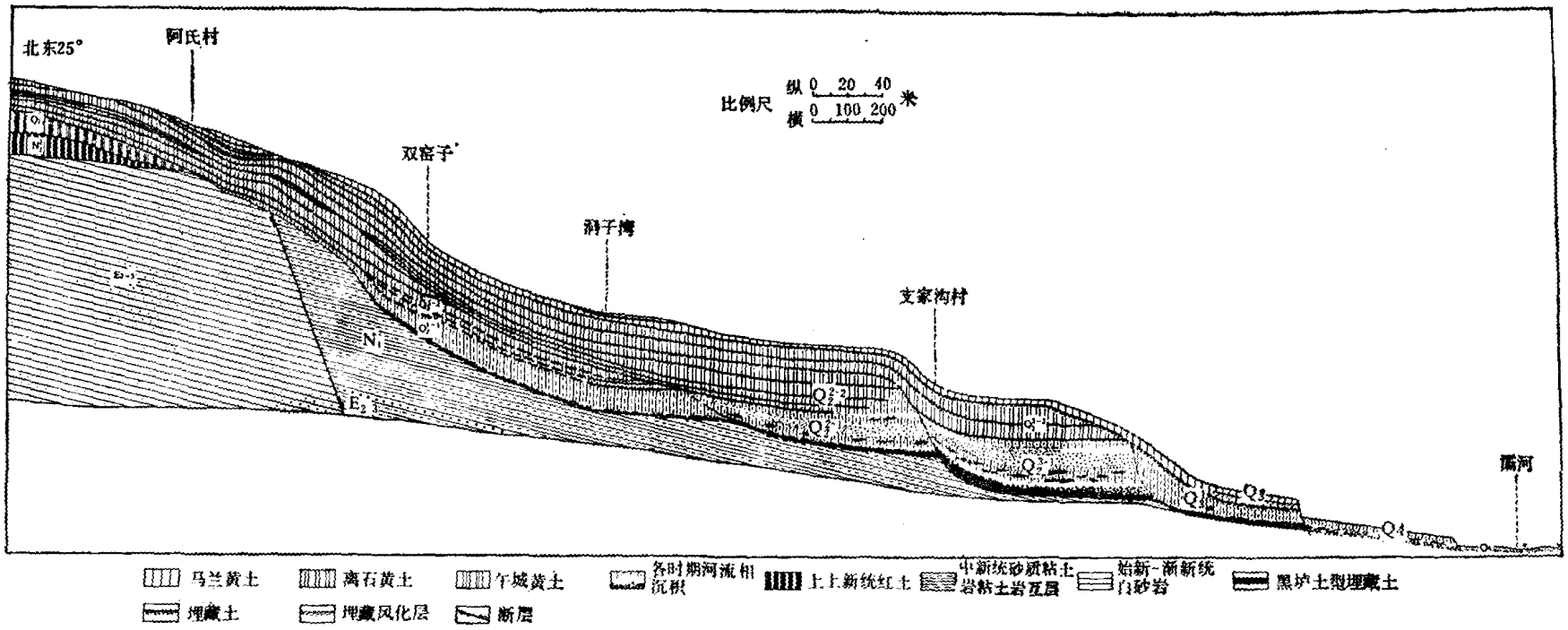


图 2 不同时期的黄土和现代风砂中粉砂石英的天然热发光曲线

① 午城黄土 (Q_1) 74L-005; ② 离石黄土下部 (Q_2^1) 74L-057;
③ 离石黄土上部 (Q_2^2) 74L-080; ④ 第 I 古土壤 74L-85;
⑤ 马兰黄土 (Q_3) 顶部 74L-101; ⑥ 阿拉善沙漠现代风砂 72-115.

* 该项研究是与中国科学院地质研究所共同进行的.



Q_4 河流相沉积——河漫滩及第一阶地　Q_3^3 马兰黄土　Q_3 河流相沉积——第二阶地　Q_2^{3-2} 离石黄土顶部　Q_2^{3-1} 河流相沉积——第三阶地
Q_2^2 离石黄土上部　Q_2^{2-1} 河流相沉积——第四阶地　Q_2^{1-2} 离石黄土下部　Q_2^{1-1} 河流相沉积——第五阶地　Q_1 午城黄土　N_2^3 上上新统
N_1 中新统　Pg_{2-3} 始新-渐新统　＊ 第二阶地由孝义村投影于此

图 3　陕西蓝田支家沟第四纪地层剖面图

值)有线性正相关关系. 在黄土剖面中自上而下,中温发光峰峰值递增,在马兰、离石黄土中尤为明显. 阿拉善沙漠中现代风砂的石英粉砂的天然热发光性质与黄土中石英粉砂的相类似,但不显中温发光峰,400℃ 范围内热发光总量甚小,比马兰黄土顶部的还低一个数量级,与黄土中石英粉砂被迅速加热至 400℃ 冷却后重测的"本底"热发光总量相当. 由此可推测,粉砂石英颗粒在参与黄土堆积之前,曾暴露于地表,受阳光沐浴,淋洗掉先前积累的辐射能量,参与黄土堆积后受到黄土中放射性物质(如 U、Th、K^{40})蜕变所产生的放射性辐射,重新积累辐射能量,并且主要以中温发光峰表现出来. 黄土中粉砂石英的中温发光峰可用来测定地层年龄.

沿用测定古陶瓷年龄的热发光方法[7],对陕西洛川黄土剖面中若干黄土和古土壤层的样品作了年龄测定,初步结果如下: 马兰黄土顶部距今 8000±400 年;自上而下第 I 层古土壤上部距今 41000±4800 年;第 I 层古土壤之下的黄土距今 71000±5300 年;第 V 层古土壤顶部距今 178000±24000 年; 午城黄土顶部距今 662000±47000 年(图 1).

黄土与河湖相沉积物的关系　　黄土高原的河谷地区以及黄土高原和凹陷平原的过渡区中,河湖相沉积物也相当发育. 不同时期黄土与不同时期河湖相沉积物有着上下迭置的关系. 例如,甘肃庆阳西峰镇剖面中,马兰黄土直接超覆于沙拉乌苏河湖相沉积物之上,后者含有丰富的晚更新世哺乳动物化石.

陕西蓝田支家沟剖面[8]是一个很好的例子(图 3). 其地层结构是以随阶地时代愈新而地层的迭覆数愈少为其特征的. 每一阶地中黄土迭置于河湖相沉积物之上,并在这一剖面上可以看出更新世以来代表不同气候条件的河湖相沉积物和黄土的多次更迭出现.

黄土中大量啮齿类化石的发现,反映了干冷的干草原环境; 而在河湖相沉积物中,如泥河湾、丁村、陕县、沙拉乌苏等地层中有大量喜湿热的动物出现,如象、犀牛、河狸等,反映了较湿热的森林-草原环境. 因此,黄土和河湖相沉积物及与之相应的剥蚀面在地层剖面上多次出现,说明中国第四纪时期至少有四次较大的干、湿气候交替的变换. 黄土中埋藏土壤和埋藏风化层,代表了当时气候的变暖,它们的多次出现则反映了气候的多次波动. 据此,可以将中国北方第四纪地层作一划分(图 4).

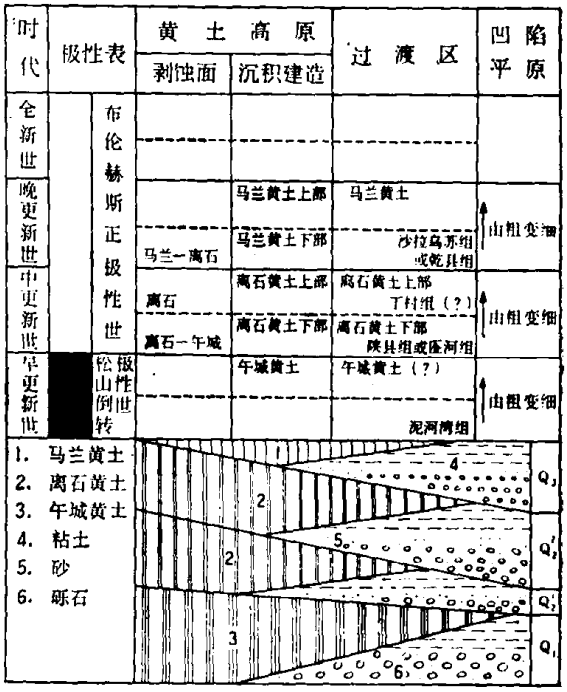


图 4　中国北方第四纪地层

总之,中国黄土是由更新世早期到更新世晚期被三个剥蚀面所隔开、迭覆四次的黄土沉积所组成. 中国黄土分布广泛,厚度大,地层全,从早于 100 万年的松山世中晚期至布伦赫斯世都有它的沉积. 这样较完整的黄土系列,是除深海沉积物之外具有特点的更新世地质环境变化的良好记录.

三、黄土的物质成分和结构

中国的黄土,无论时代新老,或分布地区的不同,其物质成分和结构大体相似,但有着一些规律性的变化.

粒度组成和矿物成分　中国黄土基本上是由 250 μ 以下的颗粒所组成. 黄土的基本物质是由粉砂粒级(5—50 μ)的石英、长石和方解石颗粒所组成. 黄土中发现大约 60 多种矿物. 重矿物含量变化于 4—7%, 多集中于 10—100 μ 的粒级中. 黄土中粘粒(< 2 μ)部分的矿物主要是伊利石和绿泥石,还有少量的石英、长石和方解石,未见有显著量的蒙脱石.

中国黄土中含约 40—50% 的粉砂粒级的石英颗粒. 曾用透射电子显微镜作过石英颗粒形态的研究[9]. 以后,用扫描电子显微镜观察了粒径约 20—50 μ 的石英颗粒的形态、表面结构和表面附着物.

石英颗粒大多数为次棱角状和棱角状, 边缘不规则, 有的有显著的贝壳状断口 (照片 1—3). 并发现有半滚圆状的石英颗粒, 它类似于阿拉善沙漠中现代风砂的石英颗粒形态 (照片 4). 石英颗粒表面发育清晰的裂纹,且分布不规则. 颗粒表面见有贝壳状破裂结构,常见层状-阶梯结构,以及溶蚀结构和氧化硅沉淀 (照片 5). 氧化硅沉淀常分布在颗粒表面的凹坑、裂纹中, 甚至形成表面薄膜, 有的形成许多小突起. 镜下见到不少石英颗粒表面平滑, 或较大的石英颗粒上附着有小的颗粒 (照片 6).

中国黄土中含约 30—40% 的粉砂粒级的长石颗粒. 多被磨圆或半磨圆, 通常表面新鲜, 风化微弱, 应视为是与石英颗粒同时堆积的.

中国黄土富含碳酸盐, 在黄土中常以颗粒状和其它形式出现. 黄土中颗粒状碳酸盐一般为方解石, 含量达 0.5—2.5% (按薄片面积计), 粒径为 20—60 μ, 均匀分布在黄土中, 具有良好的滚圆度. 它们也是与石英、长石同时堆积的原生方解石.

有的研究者[10]根据黄土中石英颗粒的大小、形态和表面结构,认为冰川研磨产生大量的黄土物质, 沙漠作用只能产生少量的黄土物质. 根据对中国黄土中石英颗粒形态和表面结构的观察, 坚硬的石英颗粒是由于机械破碎产生的. 不能排斥冰川营力引起机械破碎产生石英颗粒的说法,也不能排斥其它物理作用产生粉砂粒级的石英颗粒的说法.

中国北方自北而南戈壁、沙漠、黄土三者呈带状排列,马兰黄土也有着水平分带性变化(见后). 黄土的矿物组成与沙漠砂基本一致. 黄土中有着性质不相协调的原生的石英、长石、方解石的紧密共生. 这些都表明, 黄土高原以北的阿拉善及其西北的戈壁沙漠地区是中国黄土物质来源的重要补给区.

化学成分　黄土的主要化学成分为 SiO_2、Al_2O_3 和 CaO, 含量达 70% 以上, 其次为 Fe_2O_3、MgO、K_2O、Na_2O 和 FeO. 黄土中的微量元素为 Ti、Mn、Sr、Ba、Zr、V、Cr、Pb、Zn、Ni 等,其次为 Co、Cu、Ga、Be 等.

黄土的化学成分虽基本近似, 但在区域分布上, SiO_2 的含量自黄土高原北部至南部由多到少,倍半氧化物(R_2O_3)的含量则南部较北部为高. 不同时期黄土的化学成分也有某些差异, 以洛川黄土剖面为例加以说明(图 1). pH 值、$CaCO_3$ 的含量、$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ 值、$\frac{CaO + K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$ 值、$\frac{CaO}{MgO}$ 和 $\frac{Sr}{Ba}$ 值等自剖面的下部至上部逐渐增大,反映了黄土堆积时的气候状况自更新世初以来,有愈加干燥的趋势. 同时,上述数值各自从小于平均值到大于平均值的界限与午城黄土和离石黄土的地层界限吻合.

埋藏土壤中有粘土化现象, SiO_2 和 R_2O_3 含量较黄土显著增高; 而 pH、$\frac{CaO + K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$ 值和 $\frac{FeO}{Fe_2O_3}$ 值偏低, $CaCO_3$ 含量甚微, 表明埋藏土壤形成时期气候较为湿热.

黄土中 $CaCo_3$ 含量约为 10—16%，pH 值为 7.75—8.60，Eh 的相对值比标准的 $\frac{Fe^{3+}}{Fe^{2+}}$ 的氧化电位要高，有机质含量较低，$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ 值为 6.48—9.65，$\frac{CaO+K_2O+Na_2O}{Al_2O_3}$ 值为 1.0—1.73，这些说明黄土是在弱碱性介质条件，氧化环境干燥地区堆积的.

黄土的结构　　黄土的微结构形态以马兰黄土为例，可分为下列三类[11]：(1) 接触式胶结，碎屑颗粒彼此接触，多为棱角状，粒间空隙较大，胶结物呈薄膜状；(2) 接触-基底式胶结，



1．马兰黄土中石英颗粒 150×



2．离石黄土中石英颗粒 500×



3．午城黄土中石英颗粒 150×



4．阿拉善沙漠中现代风砂的石英颗粒 150×



5．离石黄土中石英颗粒 1000×



6．马兰黄土中石英颗粒 1000×

照片 1—6　粉砂石英颗粒形态及表面结构照片（扫描电子显微镜观察）

颗粒多为半棱角状，粒间孔隙率较小，粘粒含量增加，胶结物呈镶嵌状；(3) 基底式胶结，碎屑颗粒彼此不相接触，多为滚圆或次棱角状，粒间孔隙率最小，粘粒含量增至 20% 以上，胶结物加厚明显地将颗粒隔开，颗粒似座落在胶结物之中.

黄土的区域性变化　　黄土高原的现代自然环境自西北而东南有显著的变化. 区内降水量多在 500 毫米以下，年蒸发量多在 1000 毫米以上，以干燥、半干燥性气候为主. 降水量从该区西北部的小于 300 毫米到东南部可增至 550 毫米以上，土壤从西北部的草原土壤过渡到东南部的森林土壤，由西北而东南可划分为荒漠草原、干草原和森林草原三个植被区.

黄土高原现代地质环境不但反映了现代自然环境的特点，而且是更新世以来黄土地质环境发展的延续. 马兰黄土物质成份和结构区域变化的规律就是一个很好的说明. 马兰黄土的厚度自黄土高原的西北向东南递减. 马兰黄土的粒度自西北向东南逐渐变细. 根据细砂和粘粒含量可以分为砂黄土、黄土、粘黄土三个带[12]. 各带间并无明显的界限，而是逐渐过渡的. 马兰黄土在水平方向的变化表明了形成黄土的碎屑颗粒受风力搬运的分选性，即距补给区越近则颗粒越粗，比重较大的矿物较多等. 更重要的是，西北部砂黄土的较高的不稳定矿物含量，较高的 SiO_2 含量和接触式胶结的微结构类型，都标志着搬运来的碎屑颗粒仅受了微弱的生物化学风化和成土改造作用，较多地保留了堆积初期的原始面貌. 而东南部的马兰黄土碎屑颗粒粒径较小，滚圆度增大，粘粒增多；稳定矿物含量显著增高，原生方解石数量减少；Al_2O_3 含量增高；一些孔隙被粘粒或其它胶体物质充填呈现出基底式胶结类型，与堆积初期的原始面貌有很大的不同，已转化为粘黄土. 说明粘黄土是黄土碎屑颗粒堆积后受到较强烈的生物化学风化和较强烈的成土改造作用所致.

因此，砂黄土和粘黄土物理化学性质的差异所反映的成土改造作用的强烈不同，表明马兰黄土堆积时期，黄土高原西北部较干旱，东南部较湿润、植被较发育的自然环境，这与现代自然景观有着某种相似性.

黄土的成因和沉积环境　　黄土物质成分和结构的研究表明，中国黄土的基本物质是由石英、长石和碳酸盐构成. 黄土物质补给区和堆积区都是处在干燥和较干燥气候下的氧化环境中. 同时，古生物化石也标志着黄土堆积区的干草原生态环境.

阿拉善、鄂尔多斯及其西北地区的沙漠戈壁应是中国黄土物质来源的重要地区. 中国西北部冰川地区也应视为黄土物质来源的地区之一.

黄土高原的黄土，特别是我们称为原生黄土的那一部分，其物质是由风力搬运的. 有利的证据是：(1) 黄土与沙漠、戈壁成带状排列；(2) 其产状与基岩地形无关；(3) 结构和成分的某种一致性；(4) 由西北向东南结构逐渐变细和厚度逐渐变薄；(5) 多次埋藏土壤层的重迭.

被风力搬运的碎屑颗粒物质从堆积初期到发育成黄土的过程中，在当时当地古气候条件的控制下，经受了不同程度的风化成土作用，自黄土高原西北向东南有逐渐增强的趋势. 这也反映了在总的比较干燥的背景下，西北部较干燥、东南部较湿润的气候状况，与现代自然环境有着它的一致性.

四、黄土的利用与改造

我国劳动人民有着利用与改造黄土，用以发展生产和保护环境的丰富经验. 例如，早就利用黄土及黄土中的埋藏土壤，钙质结核制作各种建筑材料. 利用黄土的吸附性能改良水质. 在埋藏土壤之下修建窑洞，以利用埋藏土壤底部坚硬的钙质结核层作窑洞的顶板. 黄土具有

柱状节理发育、常呈直立陡壁等特性，已被广泛用于修筑梯田等农田基本建设．黄土高原梁峁区人民根据黄土地形破碎，坡度大，土质疏松，暴雨多，水土容易流失的特点，在黄土沟谷中打坝淤地．不仅利于控制下游泥砂含量，而且利用自然力量使许多冲沟变成良田[13]．

利用和改造黄土与黄土的地质环境特征有着密切的关系．例如，在黄土地区进行水利、道路、厂房等工程建筑中所遇到的各种工程地质问题，都与黄土的地貌、地层结构、物质成分以及它们反映出来的各种黄土的基本性质有关．黄土高原的马兰黄土一般有较强烈的湿陷性，而离石黄土下部和午城黄土基本没有湿陷性，具有较高的抗压抗剪强度，离石黄土上部则介于两者之间．这是由于自午城黄土至马兰黄土所受的风化成岩作用强度逐渐变弱所致．黄土高原西北部一些低阶地上发育的次生黄土有明显的层次，颗粒较粗，分选较差，粘粒往往聚合成丸粒状，呈不等粒基底式胶隧结，具水平孔隙，易溶盐含量较高等．因而它们一般比高阶地上的原生黄土有较强烈的湿陷性．在其上面修筑建筑物时，要采取较多的工程措施．此外，陇东、陕、晋和豫西等地区离石黄土上部埋藏土壤发育，两层埋藏土壤之间的黄土层较厚，并常被切割出露，处于地下水位之上，成为修建隧道、涵洞、窑洞等工程的有利场所．

黄土地区地下水的开发利用与黄土地层有关．黄土高原沟谷中发育的河湖相地层往往是良好的含水层．在陇东、陕北黄土塬区黄土中一些钙质结核层常常构成含水层[14]．陕北黄土塬区离石黄土下部有两层厚度较大、粉砂含量较高的黄土层，一般含有可利用的地下水．

黄土高原的地质环境特点决定了它是一个较强烈侵蚀的不平衡地区．但是，黄土高原地区仍是中国农业的重要发源地，这与几千年来中国劳动人民利用与改造黄土、改造黄土自然环境的辛勤劳动是分不开的．在中国共产党和毛主席的领导下，广大人民群众响应“**农业学大寨**”的伟大号召，进行了群众性的水土保持工作．如大修蓄水保墒的水平梯田，打坝淤地，移山填沟造平原，兴修大小水库和植树造林等，使较强烈的自然侵蚀过程和水土的流失得到了一定程度的控制，黄土高原的泥沙流失量也有所减少，农村的自然环境得到保护和改善，生产有了很大的发展．

人民群众在毛主席革命路线指引下的生产活动，不但大大地发展了生产，改造了原有的黄土地质环境，甚至改变了现代地质作用的强度和方向．例如山西省昔阳县大寨大队，原来这里是群众称之为“七沟八梁一面坡”的侵蚀地形，大寨群众利用当地黄土、埋藏土壤、第三纪红土大修水平梯田，并将坡、梁、沟大都建成了保水、保土、保肥的大寨田，治理了冲沟．近年来还将黄土山丘削平，填入冲沟，改变了地形形态，造出多块“人造小平原”，并使地面坡度降低，地表迳流量减少，坡面侵蚀作用转变为“小平原”上的堆积作用，水土获得了保持．同时采用客土改土、人工调剂土质、“三深”耕作、多施有机肥等措施，使造田母质马兰黄土在较短的时间内变成水、肥、气、热和土壤微生物活动都有利于作物生长的大寨田[15]．大寨田土壤与其母质相比，有机质、速效氮、磷、钾含量较高，粘粒及胶体物质增加，而硅质、碳酸盐类成分减少．同时，将马兰黄土的粉砂状结构改造成具有良好的团粒和孔隙发育的大寨田土壤结构，粮食产量由过去亩产 100 多斤增加到现在亩产 1000 斤以上，粮食总产量大幅度增长．

上述都充分说明，人民群众的生产活动是改善黄土自然环境的极积的决定性因素．生产活动所引起的黄土地质环境的变化是地质工作者应予研究的问题．随着社会主义工农业的发展，黄土高原的自然面貌正在发生新的变化，这为中国地质工作者研究黄土和黄土地质环境开辟了更广阔的前景．

[下转 26 页]