

第一章 绪论

据统计，黄土这一陆相碎屑沉积覆盖着约 10% 的陆地表面。而形成黄土的粉尘沉积则几乎遍布全球的每个角落，不论是在陆地还是海洋，是高山还是平原，乃至极地冰盖中，都有粉尘沉积存在。世界上的黄土主要分布在中国、中亚、中欧、乌克兰、阿根廷和北美的大平原地区^[1]，而中国和东亚则是世界上黄土最大厚度的所在地。黄土分布的广泛性以及黄土的结构特点决定了它不仅是记录着丰富古环境变迁信息的地质体，同时黄土还与人类的生存与发展密切相关。

第一节 世界黄土与第四纪研究

一、黄土的定义

中文“黄土”一词早在两千多年前就已出现在我国的文献中，它是中国人民对黄色松散堆积物的统称^[2]。英文黄土“Loess”一词源于德语“Loss”即松散之意，它最初被 K. Leonhard 用来描述沿莱茵河河谷分布的松散粉砂沉积。后来，莱伊尔将该术语广泛应用于具有类似特征沉积物的描述中。1845~1946 年莱伊尔在访问北美期间观察到，沿密西西比河河谷分布有与莱茵河河谷类似的黄土沉积。关于黄土的定义不同研究者有不同的看法。早期的研究者们将黄土描述为一种“均匀的、黄色的、钙质的粉砂”或“无层理、均质的、淡黄色钙质粉砂”。但后来的工作表明，黄土并非都是钙质的，它可以是粘土质的、沙质的，其颜色也不总是黄色的，而是变化无穷，从深灰、黄、棕、白到红色都有。德国人 F. V. 李希霍芬将中国的黄土与莱茵河的黄土进行对比后提出，黄土（Loess）是浅灰黄色、钙质的松散堆积物，疏松多孔，无层理，垂直解理发育，含有陆相软体动物化石且常呈陡壁状，并且它们都由风搬运堆积而成，不同于湖积的黄土状沉积物（Loess like deposits）^[3]。B. A. 奥勃鲁切夫曾对什么是黄土及如何鉴别黄土类沉积物等问题做过多方面的讨论，他认为以风力搬运堆积，并且未经过扰动的、无层理、黄色粉砂质的、富含碳酸盐并具有大空隙的土状沉积物称之为黄土，或所谓的原生黄土，而由其他动力形成的或由风成黄土再堆积形成的其他成因的黄色的、具有层理并常常含有砂或砾石夹层的粉砂堆积为次生黄土^[4]。Pecsi 则认为，黄土并不仅仅是由风携带并沉积的粉尘，粉尘只有在特定的地理区域中经历一定的时间历程才能转变为黄土，换言之，粉尘沉积后只有经历了一定生态条件下的成壤作用才能称形成黄土。并不是沉积在各种地理环境中的所有粉尘都能转变为黄土^[5]。据此，他定义典型黄土为：

(1) 均一、多孔、具轻微成壤作用的淡黄色沉积，主要由粗粉砂（10~50 μm ）组成，含量占 40%~70%，分选相对较好；

(2) 以石英颗粒占优势(40%~80% ,平均 60%~70%) ,并含有少量长石、方解石和白云石 ;

(3) 单一的黄土层无层理 ,但黄土序列中夹有古土壤或砂层 ;

(4) 粘土与砂的含量 5%~25% ,粘土矿物以伊利石、蒙托石为主 ,含少量高岭石、蛭石和绿泥石 ;

(5) 碳酸盐含量 1%~20% ,在老黄土中碳酸盐含量高 ;

(6) 黄土弱胶结或部分胶结 ,孔隙比 45%~55% 透水性良好 ;

(7) 在干旱条件下 ,即使很陡的黄土陡坎也是稳定的 ,但遇水易垮塌 ;

(8) 易为地表径流侵蚀 ,易于形成地下塌陷 ;

(9) 含有代表寒冷气候的动植物化石 ;

(10) 物质的积累主要是空气重复搬运与分选的结果 ,但也不排除其他过程将细颗粒物重新搬运直至它们为植被所截获。积累的粉尘在一定的地理环境下经适当的成土作用最终形成黄土。

与之相反 斯迈里^[6]等人则将黄土定义简化为“一种由风携带呈披覆状堆积的碎屑沉积 主要由直径 20~50 μm 的石英组成”。K. 派伊从全球观点出发 ,认为黄土已从厚度、粒度组成、颜色、矿物和地球化学等诸多方面展示出了自身的重要自然变异 ,故黄土可简述为陆相风成粉砂沉积 ,主要由石英、长石、云母、粘土矿物和碳酸盐按不同的比例混合而成。重矿物、植物化石、盐类 ,有时甚至火山灰也是重要的组成部分。未风化的黄土是均质的、无或略具层理、多空腔。干燥时 ,黄土可形成陡崖 ,湿润时由于剪切力的减小则易于塌陷^[7]。以刘东生为首的我国第四纪地质学家们通过对中国黄土的研究 ,并采纳了奥勃鲁切夫的学说要旨 ,认为“黄土是风力搬运堆积未经次生扰动的、无层理的黄色粉质、富含碳酸盐并具有大孔隙的土状沉积物 ,而其他成因的与黄土在某些方面具有类似特征的沉积称为次生黄土”^[8]。

二、黄土的物质来源

大量的研究业已证明 ,世界各地的风成黄土具有较好的结构均一性。黄土的物质组成中以粉砂级石英颗粒含量占优势 (含量一般 40%~80%) 并富含碳酸盐 (含量 1%~20%) 在表生环境中 ,石英是抗风化的稳定矿物 ,不易破碎。那么这些粉砂物质又是如何产生的呢 ? 为此 ,多年来关于构成黄土主体的物质—粉砂的成因一直存在着争论 ,总括起来 ,可将众多的粉砂形成机制假说概括为如下几类 :

1. 冰川研磨说

早在 1890 年 ,哈特凯斯特曾在他的文章中提及 ,组成黄土的粉尘有相当大一部分是由冰川研磨作用产生的 ,但冰川研磨机制的主要倡导者是 I. 斯迈里 (Smalley)。早期他和他的合作者声称 ,冰川研磨作用是惟一能产生大量石英粉砂的机制。他们的证据是 ,黄土沉积出现在第四纪 ,并和更新世大陆冰川作用有空间上的联系 ,即世界上大面积黄土堆积大多位于经历过更新世冰川作用区域的边缘^[9]。他将该类黄土定义为冰盖黄土或冰缘黄土 ,如北美、欧洲的大部分黄土都属此类。而前苏联学者奥勃鲁切夫则称这类成因的黄土

为“冷黄土”。冰川研磨说受到了后来一系列室内模拟实验结果的挑战。Haldorsen 进行了一系列干湿球研磨实验来模拟冰川的研磨作用，其结果表明，长石和云母被优先粉碎，而石英颗粒的大小几乎没有什么变化，即冰川磨蚀对石英颗粒影响很小^[10]。近年来，J. S. Wright 的室内模拟实验也证明，虽然研磨和颗粒沿劈理的劈裂作用也能产生细粒物质，但其量很小。在他的实验中，大多数过程(run)粉砂的产量不足 1% 仅一例达 9% 因此得出结论，对于黄土物质形成机制的解释应持慎重的态度，冰川作用过程对黄土形成的重要性在于冰对碎屑物的搬运和被动的携带，而不是产生大量粉尘物质^[11]。近年来，通过更广泛深入的研究工作，斯迈里也改变了他早期的看法，认为除冰川研磨作用外，还存在着其他黄土物质形成机制^[12]。

2. 风化学说

除上述黄土分布在空间上与冰川分布有一定的联系外，科学家们还发现，有一些重要的黄土分布区（如中亚、中国），黄土主要分布在沙漠的外围，即黄土的分布与这些地区的戈壁、沙漠有密切的联系。有人认为形成粉尘的机制源自沙漠区的风化作用，该类风化作用包括温差导致的物理风化、风的磨蚀作用、盐类结晶的劈裂作用和生物、化学风化作用^[13~15]，其中盐类对粉砂形成作用的贡献尤其令人注目。高迪与派伊等的实验表明，在模拟的热沙漠条件下，硫酸钠对沙丘石英砂的作用能产生中、粗粒级的粉砂。多次的毛管作用重复模拟实验也证明，所产生的碎屑中，粉砂占 25.3%~80% 平均为 47.97%。奥勃鲁切夫将分布在中亚及邻近地区沙漠边缘的黄土称作“暖黄土”而和冰川外围“冷黄土”形成鲜明对照。但 Smalley 和 Krinsley 于 1978 年提出异议^[16]，认为沙漠边缘黄土物质的形成机制源于高山风化环境，而非沙漠本身，沙漠在物源补给充足的条件下成为黄土物质由产出区运移至沉积区的中转站。这就是为什么不是所有世界大沙漠边缘都有黄土分布带的原因。亚洲各沙漠边缘黄土物质源于相邻高山区，高山区的寒冻风化作用是这些地区黄土物质形成的主要机制。该类黄土是典型的山地黄土，和奥勃鲁切夫的沙漠黄土相当^[17]。

除此之外，还有人倡导过黄土“就地风化”形成学说，认为只要有大量的微粒(0.001 mm 或 < 0.001 mm)存在，一定量的硅酸盐和相当多的碳酸盐，那么草原型干燥气候的风化作用结果就可以使沉积物具备“尘土”状的颗粒结构，也就是说，粉砂大小的颗粒可由粘粒经过风化作用而就地生成。

3. 构造说

Smalley 认为，粉砂是结晶岩风化、破碎能量释放过程的产物^[18]。大规模的能量转换导致了大量粉砂物质的产生和面积黄土形成，而第四纪以来主要的能量事件除冰川作用外，还有构造作用。特别是在高亚洲(High Asia)地区，二者都是导致黄土中的主要组成物质—粉砂形成的重要机制。该地区不仅是世界上的多山区，也是地球上构造活动最活跃地区。但由于气候干旱，第四纪冰川作用十分有限，区域中大面积黄土的分布应归因于构造剥蚀过程。K. Pye 也是构造说的支持者。他指出，是因为构造活动导致了地形抬升，并形成褶皱与断裂，一方面岩石因边界条件的改变而易于风化，另一方面高海拔造成

的极端气候条件又加剧了寒冻、盐类等风化作用。与此同时，高峻的地形和陡峭的地形坡度产生了巨大势能，使该地区下切速率大，坡面具不稳定性，故而为黄土的形成提供了丰富的碎屑物。Smalley 甚至认为，没有构造作用，就不可能形成“高亚洲”，也就不可能产生大面积分布于中亚和中国的黄土沉积。为和“冰缘黄土”、“漠缘黄土”术语保持一致，K. Pye 建议将 I. Smalley 所谓的“山地黄土”改为“山缘黄土”^[3]。

我国学者们经过多年的考察与研究，对中国黄土的形成持有不同的看法。中国历史上上千次粉尘事件分析证明，其尘土多源于黄土分布区西北和北部的沙漠、戈壁^[19~20]。在黄土分布区西北有 150 万 km² 的沙漠、戈壁，广泛发育中、新生代碎屑沉积，这些地区可为我国黄土高原的黄土堆积提供充足的物质来源（刘东生等，1985）^[2]。董光荣^[21~22] 等通过中国沙漠形成演化、发展历史研究，也为沙漠是黄土的物源提供了佐证，并提出了不同历史时期沙漠发展具不同模式的理论。白垩纪至第三纪晚期，在中国北方有红色沙漠带分布，它是副热带高压控制下干热气候的产物；而第四纪，上述地区沙漠演化为黄色，它们是青藏高原隆起、第四纪干冷气候变化的结果。在此模式下，第四纪以前，沙漠外缘不存在黄土而存在红土，而第四纪则黄土广泛分布。事实上，在黄土高原虽然未见老于 240 万年的黄土，但第四纪地层下，普遍发育一层红色地层，由发育程度很深的古土壤与薄层淡棕色土层构成，无层理，含结核，并含有三趾马化石。该套地层在西北内陆和青藏高原也有分布^[23~25]，Andersson(1923) 称之为“三趾马红土”杨仲键、德日进称之为“风成沉积”刘秀铭等^[26]对红土磁组构分析后提出，其母质成因类似于黄土；郑洪波等通过段家坡剖面的研究也提出，广泛分布于黄土高原的这套红粘土地层可能为风尘堆积^[27] 朱日祥等对红粘土磁学性质的研究证明，第三纪红粘土沉积与第四纪黄土—古土壤序列存在着风成相似性^[28]；山西省榆社县王宁剖面的地层，沉积、古生物和古地磁测试结果表明 R 红土的磁学性质与原生黄土系列相近，推测二者成因相似，即它是在较干燥的环境条件下由风力堆积又经过多次风化成壤作用而成^[29~32]。近年来对黄土高原红粘土的深入研究也从古地磁、粒度、沉积学和地球化学特征等方面为红粘土是风成沉积提供了新证据^[33~35]。很明显，越来越多的研究都得出了类似的结论，第三纪黄土高原及其相邻地区发育有风成红土。这与董光荣等关于第三纪存在红色沙漠的理论不谋而合。张小曳通过对“近源”中国沙漠和“远源”高空西风粉尘的元素示踪分析，提出亚洲主要的粉尘源地为中国西北、北部沙漠。冯兆东等则主张，中国北部的蒙古高原可能才是黄土高原粉尘的源地^[36~38]。

综上所述，虽然中国科学家对黄土（黄土高原）的物源区认识比较一致，然而对于粉尘到底如何产生尚存在争论。有一些人认为“中国西北沙漠、戈壁区属典型的大陆性气候，温度年较差、日较差大，物理风化强烈，大部分山坡和地面被物理风化形成的岩屑覆盖，物理风化形成的最细颗粒可达粉砂级，它们被搬运到盆地中堆积下来时，形成的各种沉积物中都含有大量粉砂级细粒物质。当盆地中的沉积被风蚀后，粉砂级以下颗粒可以被吹扬至空中形成粉尘，它们即黄土的原始物质^[39]。另外一种观点则认为，是寒冷风化和盐风化作用的结合于沙漠中产生了显著数量的粉砂^[7]。

三、黄土的形成条件

越来越多的研究结果表明，黄土并不是简单的大气粉尘堆积，黄土的形成受许多因素

的影响，“黄土化”作用类同于成壤作用，因此它跟土壤一样是气候、地形、生物、风化作用等诸多因素的函数。早在 1890 年，Hardcastle 就写道，黄土的形成需要：①物源；②搬运粉尘的风；③截取粉尘的植被；④足够长的堆积时间。K. Pye 认为，黄土的形成需要四个阶段：第一是粉尘颗粒的形成；第二是粉尘颗粒的搬运；第三是粉尘沉积；第四是粉尘沉积后的改造。这就意味着黄土的形成必须具备以下 4 个条件：物源、搬运动力、有利的堆积场所和适宜的成土环境。不同气候条件下、不同的下垫面上黄土形成所需要的条件也不一样。有人认为，如果粉尘降落在裸地或平坦地表面，它们可能会因再次悬浮而具有不稳定性，而如果粉尘降落在水体、湿地或植被覆盖的地面，粉尘就可能永久地被截留^[40~41]。而 Tsoar and Pye 则认为，对黄土形成起重要作用的是植被覆盖，不论在山区还是在平原都是如此，世界上有些沙漠边缘不存在连续的黄土带，一方面是因为缺少丰富的粉尘源，另一方面则是因为沙漠边缘不存在半干旱草原植被带。中国和中亚沙漠边缘之所以有连续厚层的黄土分布正是同时具备了上述两方面的条件。Goossens 等提出，地形是影响黄土形成的因素^[42]。为了证明地形的影响，Goossens 曾进行了室内模拟实验，其结果证明，在山区，粉尘受地形的影响，主要沉积在迎风坡。近年来，Pye 得出的结论是，广泛、深厚的黄土的累积需要如下条件：①千百万年长时期内，具有源源不断的粉尘粒子被从源区悬浮搬运；②适宜的粉尘截获物的存在，而这种截获物通常是较好的植被和有利的地形障碍。我国科学家经过多年研究提出，中国的黄土特别是黄土高原地区的黄土，正是具备了适宜的物源、动力和堆积场所 3 个条件下形成的。首先是中国西北地区广大的戈壁沙漠可为下风地区黄土的形成提供丰富的粉尘；其二，由于青藏高原的隆起使西风带在对流层分为两支，其北支使沙漠、戈壁上空具有自西北向东南流动的高空风，而冰期西伯利亚—蒙古高压的增强也为黄土物质的搬运提供了充足的动力条件，加之沙漠区为干旱区，植被稀少，风蚀作用强烈；第三，我国北方自白垩纪末至第三纪初，长期处于准平原化过程中，并形成广泛分布的夷平面与风化壳，黄土高原主体鄂尔多斯地台受新构造运动影响而抬升，原准平原分化为面积不等、形状不同的坡度平缓的正地形（形成梁、塬、卯黄土地貌），它们正是黄土堆积的理想场所。加之这些地区为半干旱区，地表为草原植被覆盖，径流作用较弱，有利于粉尘的长期停留和“黄土化”过程的进行，因而粉尘在长达 240 万年的时间内便逐渐堆积并最终形成了令世瞩目的黄土高原^[36]。

除上述物源、地形、植被和时间外，黄土化作用也是黄土形成的必要条件。当大气粉尘降落到干旱、半干旱地区的地表时，难免受到雨水、霜雪和生物活动等作用，同时这些作用是在弱碱性介质的氧化环境中进行的，其结果便是使粉尘堆积发生碳酸盐化。次生碳酸盐与粉尘中的粘粒结合构成许多微团聚体或微集合体。次生碳酸盐与粉尘颗粒之间产生的点、线和面连接，导致了黄土中孔隙的形成。同时次生碳酸盐与少量的铁、锰质氧化物一起包裹在粉尘颗粒表面，使之呈淡黄色。正是这种碳酸盐化作用使粉尘堆积变成了淡黄色、疏松多孔、质地均一并具粒状或斑状结构的黄土。

四、黄土与古气候记录

受区域自然条件的控制，世界不同区域，黄土形成时代、保存的信息所反映的古气候也不尽相同。

在世界黄土主要分布区之一欧洲，黄土的形成大约始于 2.0~1.7 Ma B. P. A. A. Velichk 认为，俄罗斯平原是欧洲黄土分布最为广泛的地区之一，其黄土—古土壤序列可大致与深海氧同位素记录对比，共有九层古土壤，其中第九层对应于氧同位素阶段 19~21(V28~239)^[43]。由于第四纪底界的划分差异，因此在过去 200 万年内，在俄罗斯平原至少有 11 层古土壤发育，甚至明显多于欧洲其他地区。A. A. Velichk 将古土壤形成期与间冰期、黄土形成期与冰期相对应。Fink 认为在奥地利和捷克，最近 170 万年至少存在 17 个黄土沉积期^[44]。中亚地区，黄土的厚度和古土壤层的发育都不亚于中国，形成时代为 2.0~2.5 Ma 至全新世^[45~46]，其分层也基本与中国黄土高原黄土—古土壤序列相同。所不同的是，虽然 Dodonov 和 A. A. Velich 等认为黄土形成于冰期，但前苏联有些科学家认为，黄土堆积期与间冰期对应，而古土壤的形成与冰期相对应^[47~49]。

在美洲，特别是美国，黄土也有广泛分布，但多为末次冰期黄土，最老的黄土为中更新世黄土，分布在大平原地区的 Loveland 黄土形成始于约 50 万年前，黄土剖面中含有多层富含碳酸盐的古土壤层。冯兆东等认为，大平原早期古土壤(Loveland)可能形成于干热的气候条件下，且对应于间冰期^[50~51]，而时代较晚的 Gilman Canyon 复合古土壤则形成于相对冷湿的条件下。由此可见，在北美，黄土—古土壤序列与古气候的关系不同于黄土高原。有人认为对于古土壤的形成，时间和湿度是主要的因素，而热量并不起决定性作用，因此古土壤并不都代表暖湿^[52]。

中国黄土与古气候的研究程度要较世界其他地区为高。关于第四纪古气候的研究最早源于对陆地上经典的冰碛研究和冰期的划分及湖相沉积的研究，深海沉积氧同位素和极地冰芯的研究使全球变化研究迈入了新的时代。随着测试手段的改善，古气候的时间分辨率已由原来的几十万年、万年变为近年来的千年、百年乃至几十年。海相沉积和冰芯以其较好的连续性和完整性受到越来越多的第四纪工作者的青睐。相比之下，陆相冰碛则具有明显的不足之处，而广泛分布的黄土则是可与海洋沉积媲美的陆相沉积。它不仅在连续性方面类似于深海沉积，还在分辨率方面优于海洋沉积。我国黄土不仅分布广泛，且有关黄土沉积与古气候的研究经几代人的努力已取得了丰硕的成果。在黄土高原，科学家们利用黄土—古土壤序列，重建了黄土高原 240 万年来古环境，特别是黄土中古气候信息的有效提取，古气候代用指标的建立，已使黄土记录能与深海沉积以及冰芯记录进行全球范围的比较。如宝鸡剖面高分辨率粒度分析结果证明，2.5 Ma 来，黄土粒度变化周期始终与地球轨道参数的变化周期相对应，即地轴、岁差、偏心率的天文周期变化通过黄土的粒度变化得以映射。进一步的研究又揭示，第四纪不同时段，气候变化的主导周期并不雷同，2.5~1.6 Ma 偏心率的 0.1 Ma 周期很明显，1.6~0.8 Ma 地轴倾斜度 41 000 a 周期最为明显；0.8 Ma 至现今，0.1 Ma, 19 000 a 周期都有反映，而 41 000 则不明显^[53~56]，从而使米兰科维奇天文驱动机制理论继在海洋沉积中找到了证据之后^[57~58]，又在陆相沉积中得以验证。而用粒度参数作为季风强度变化指标，建立起的 250 万年时间标尺也是目前世界上较长的时间标尺之一。近 20 年来，对于黄土古气候代用指标的研究可谓硕果累累。继 Heller 和刘东生首先研究了中国黄土磁化率的古气候含义之后^[59]，Kukla 和安芷生等对中国的典型黄土剖面做了深入的研究。研究表明，在黄土高原及边缘地区，黄土的磁化率低，而古土壤磁化率高^[60]。黄土磁化率可作为夏季风变化的代用

指标。而不同研究者对于黄土、古土壤磁化率的变化有不同的解释。

在过去全球变化研究中,将最近 15 万年列为重点研究时段,中国黄土—古土壤序列被列为重点中的重点研究对象之一^[72]。经过几年的努力,15 万年以来的古气候研究已取得重要进展。在年代学方面,近年来,国内外许多实验室都相继开展了对 15 万年以来中国黄土剖面的测年工作。刘嘉麒等^[73]对渭南剖面进行了系统的 ^{14}C 与 TL 测定,确定了马兰黄土和 S_1 的形成时代分别为 73 ka B. P. 和 134.5 ka B. P.。郭正堂等利用 ^{14}C 、TL 年龄为控制点并用 Kukla 的磁化率模型建立黄土高原 15 万年来的古气候变化时标^[74],在此基础上对复合风化指数曲线进行谱分析发现,15 万年来古气候变化具有较强的与岁差相对应的周期。聂众高等用 AMS ^{14}C 和 TL 测年相结合,对黄土剖面古气候记录与深海氧同位素记录的差异做出了合理的解释,指出其差异可能是地质界限的误差,进一步证实了中国黄土剖面与深海沉积和冰芯记录的可比性^[75]。

在古气候代用指标方面也取得了丰硕的研究成果。李吉均、安芷生、郭正堂、文启忠、沈承德等分别从磁化率、磁通量、粒度、古土壤、地球化学、 Be^{10} 、稳定同位素等不同方面对北塬、宝鸡、渭南等黄土剖面开展了深入细致的研究工作,所建立的古气候代用指标曲线都与深海氧同位素曲线的变化大致吻合^[76~89]。上述综合研究反映了 15 万年以来黄土高原区有多次万年级的的气候波动,其中也存在着若干次千年和百年级的波动。特别是过去认为仅发生在北欧和北大西洋区的 Younger Dryas 事件,在青藏高原和黄土高原的黄土记录中都有体现。郭正堂对洛川、宜川及渭南黄土剖面古风化强度的研究还揭示出,在 L_1 和 L_2 中记录有一系列干冷事件,前 6 个事件的时代与北大西洋的 Heinrich 事件大致相当^[74],从而也证明北大西洋气候事件在东亚季风区也留有明显印记。在古生物方面,孙湘君^[90]从黄土高原南缘 100 ka 来高分辨率花粉记录得出,近 100 ka 来黄土高原南缘塬面上始终以草原为主,除了暂短的阶段有过不稳定的森林植被外,没有典型的森林。林本海通过白鹿塬段家坡黄土剖面 220 块样品有机碳稳定同位素的分析证明,黄土高原至少过去 60 万年以来在塬面上都以草本植被占优势,未出现大片森林^[91]。吴乃琴等分析了洛川剖面 S_1 以上地层 118 块样品的蜗牛化石组合,划分出了 6 个蜗牛化石组合带,提出 110 ka 以来,洛川古气候长周期变化具有冷干、暖湿交替的总趋势,但在干冷时期,也会阶段性地出现短期的、季节性的湿润环境^[92]。吕厚远等在对现代土壤中植物硅酸体组合与气候参数回归分析的基础上,研究了宝鸡剖面植物硅酸体组合,初步探讨了该区约 150 ka 年来季节性气候变化,认为在黄土高原地区“轨道尺度”上的气候变化确实受全球冰量变化的控制^[93]。

关于末次间冰期气候的稳定与不稳定是目前第四纪研究中争论的焦点,以欧共体为首的欧洲派在对格陵兰 GRIP 孔的冰芯做了同位素、电导率和孢粉分析后得出结论,末次间冰期(即 5e 阶段)气候有强烈波动^[94~95]。北欧以年层为基础的冰川纹泥层中高分辨率孢粉记录和湖沼记录也显示 5e 期间气候是不稳定的^[96~97]。但以美国人为首的一派根据在距 GRIP 28 km 处 GISP2 冰芯记录研究结果,指出虽然末次冰期时 GISP2 冰芯记录的大幅度、快速气候变化与 GRIP 冰芯记录有很好的可比性,可是末次间冰期气候记录两孔存在较大差异,即末次间冰期气候的不稳定性有待商榷^[98~99]。该结论得到了来自北大西洋高分辨率深海钻孔样品同位素研究结果的支持^[100~101]。管东红等通过临夏北塬剖面

碳酸钙记录的研究证明,该区在 5e 阶段曾发生过 3 次显著的温暖期和两次明显严寒的大幅度气候波动,与格陵兰 GRIP 孔气候记录一致,即证明 MIS-5e 阶段气候不稳定性是存在的^[102]。方小敏等以末次间冰期土壤发生为例也证明,在末次间冰期(5e)最盛期无论冬季风还是夏季风均表现出千年尺度上的急剧波动,具体体现为该期间夏季风的 3 次突然爆发和 2 次明显的冬季风增强,分别对应于古土壤形成的三个温暖期和黄土形成的两个寒冷期与 GRIP 所揭示的气候模式相吻合,并试图证明在北半球气候变化具有突发性和不稳定性这一现象是普遍存在的^[103]。然而,陈发虎等对黄土高原西北边缘三个黄土剖面的研究,却未能提取到该区末次间冰期气候具不稳定性信息^[104]。因此,有关末次间冰期气候不稳定性之争不论是在中国,还是在国际上都将继续。

所幸的是世界上对于末次冰期气候不稳定性的认识比较一致。有关极地冰盖的研究表明,在末次间冰期冰盖迅速退缩之后,紧接着气候缓慢而均匀的变冷过程,在变冷过程中有若干次轻微的变暖,称为间冰段,而其余较寒冷的时期即为冰段。由于北美和西欧无论从冰盖的面积还是冰体的体积都是世界上最大的,因此过去通常把末次冰期称之为威斯康星-威克塞尔冰期。末次冰期又可分为 3 个亚期,即早、中、晚威斯康星-威克塞尔亚期。在早、中威斯康星-威克塞尔亚期之后,出现了冰盛期-晚威斯康星-威克塞尔亚期。到目前为止,对末次盛冰期及其以来的环境的了解程度高于早期和中期。近年来极地冰芯和深海沉积记录的研究已将末次冰期的研究推上了一个新台阶。如前所述,GRIP 和 GISP2 冰芯关于末次冰期的记录都揭示了该时段气候的高度不稳定性^[105~106]。在中国关于末次冰期以来古气候变化的研究也取得了许多成果,特别是近年来,黄土高原黄土和青藏高原冰芯、湖泊沉积等研究结果都揭示,极地和北大西洋地区末次冰期的气候不稳定性,在中国不同地区、不同类型的地质体中都有记录^[107~118]。然而,与世界各地区的研究类同,对于末次冰期各个亚期气候特点、区域差异及其发生机制的了解仍比较笼统,尤其是在黄土高原以外的地区。

第二节 新疆黄土与第四纪研究现状

新疆的地理位置决定了它的第四纪研究历史与现状的特殊性。对于新疆地区古代的自然和人文状况的记载远不及中原详尽。19 世纪后半期及 20 世纪前半期中外探险家对包括新疆在内的西北地区的考察有力地推动了该地区地理学的研究,也揭开了区域第四纪研究新的一页。

一、古气候研究

新疆地处内陆,幅员辽阔,第四纪以来环境变化与水热组合形式长期以来一直是国内第四纪工作者争论的焦点之一,特别是新疆干旱气候的成因和干旱气候始于何时至今尚无定论。美国学者亨丁顿对塔里木盆地进行考察后,提出废弃于荒漠中的古代遗址是由于历史上的气候变迁造成的,在中亚总的气候变化趋势中,存在着气候冷、凉湿与干热的周期波动。陈宗器则提出,“干旱区湖泊的变迁是受风力侵蚀和沉积两种作用支配的,史前湖泊的变化是气候变迁的产物,湖面最大时期与冰期相对应”,即冰期为冷湿。80 年

代以来，随着科技的进步，测试手段的更新，对新疆气候变化研究的深入也使各种争论更加激烈。关于第四纪环境变化中的水热组合形式主要有三种观点。

一种为“冷湿—暖干”组合。如李江风通过对古丝绸之路兴衰的研究证明，新冰期和小冰期恰好为古丝绸之路发达时期（汉代 2~3 ka B. P. 清代）而沙漠中人类居住地的存亡主要取决于水，故反推冷对应于湿，而暖对应于干^[119]。李吉均从湖泊变化和沉积模式入手，认为新疆地区晚更新世以来的环境变化服从西风带的一般规律，冰期与雨期同步，即冰川前进与气候冷湿、湖面上升的时期相当。冰期为冷湿期，间冰期为暖干期^[120]。韩淑媿对巴里坤湖湖相沉积的研究也证明冷与湿，暖与干是同期的^[121~122]。有关近代气候和湖泊变化的研究结果也在一定程度上支持冷湿—暖干说^[123~131]。

第二种观点为“暖湿—冷干”说。如文启忠等通过对新疆黄土的研究认为北疆晚更新世以来的气候波动与东部季风区类同，水热组合主要为冷与干、暖与湿相对应^[132]；耿宽宏等^[133~136]也从沙漠变化、沉积特征、气象记录等不同方面为上述论点提供了佐证。近年来北京地质所对巴里坤湖进行了更加深入的年代学和沉积学研究，得出了类似的结论^[137~138]。

第三种观点则为“冷干—暖干”说。董光荣等通过塔克拉玛干沙漠及其周边地区沙漠、黄土沉积的研究提出，在塔里木盆地第四纪以来，气候变化中水热的组合形式为“冷干与热干”^[139~148]。

有关新疆现代干旱气候的成因和变化趋势之争论由来已久。早在几十年前以 B. M. 西尼村为代表的一些学者就提出，包括新疆在内的亚洲中部地区历史时期有变干的趋势。平原风蚀作用加强、沙漠面积日益扩大、水量减少、湖泊缩小和变干、河道缩短和荒废、荒漠植被枯萎和死亡、人类和动物生存条件日益恶化、许多聚落城镇废弃在沙漠里、居民向山麓带迁移等都证明中亚的荒漠化在日益加深，究其原因乃中亚地处欧亚大陆腹地，周边山地的隆起特别是青藏高原的隆升导致气候干旱，并有日益变干之趋势。他还提出，塔里木盆地中部在第四纪时曾有一个巨大的淡水湖泊，直到第四纪晚期气候变干，湖泊才逐渐干涸消失，沙漠大规模发展。而 A. 彭克和 B. C. 贝尔格等另外一些学者则反对第四纪中亚变干这种说法。他们认为，中亚变干主要是新生代海退导致大陆性增强所致，干旱气候由来已久。根据有史以来的资料，世界上很多地区并未表现过重大的气候变化。3. M. 穆尔扎也夫等也曾提及，第四纪时期邻近新疆地区有两个多水期，即气候存在着干湿波动。H. T. 库兹涅佐夫认为，准噶尔盆地的湖泊 50 年代正处于多水期，这种多水期的周期变化正是气候周期变化的反映，而不是亚洲中部气候由湿润趋向干旱的标志，干旱是一个长期以来的过程。我国著名学者周廷儒也与贝尔格持相近的看法，认为新疆自上侏罗纪至老第三纪，气候在大部分地区是干旱的，第四纪以来气候也是一贯干旱，而反对日益变干之论点。虽然 20 世纪 80 年代以来，新疆第四纪古气候研究已取得了许多进展，如晚更新世晚期以来内陆西风型环境演变模式的确立、山地末次冰盛期以来冰川进退序列的建立、晚冰期气候突变事件的发现以及第四纪下限的确立等^[149~156]，但继早期西尼村与贝尔格关于干旱气候的成因之争，长期以来未能取得一致意见。大多数学者赞同西尼村的观点，并在其基础上有了很大发展，认为青藏高原及其周边山地的隆起，不仅增加了新疆内陆的封闭性，而且其本身的动力与热力作用对大气环流的影响以及高原四周产生的下沉气流

的作用是导致新疆干旱气候的主要原因，同时也是中国自然环境演化的根本因素，并且还在全球变化中起重要作用^[157~159]。另外一些学者则赞同贝尔格的观点，认为深居内陆，远离海洋，含较多水汽的暖湿海洋气候难以到达本区是气候干旱的主要原因，与青藏高原的隆起无关。我国西北地区乃至整个欧亚内陆腹地，现阶段干旱气候是深居内陆并受变性西风影响的结果^[160~161]。

对于新疆干旱气候的形成时代和发展趋势主要有以下几种看法。一种是末次冰期以来，气候有变干趋势，因而导致沙漠的发展和黄土的堆积，并以新疆黄土年代较新为佐证^[162~167]。最近关于黄土高原南北向断面的研究成果也提出了：从大约 3.0 Ma 年以来，中国北方的沙漠呈阶段性从西向东扩张，意味着晚第三纪以来西部干旱区干旱程度呈总体上加剧的趋势^[168]。另一种观点认为新疆气候自第三纪末至今持续干旱，第四纪冰期与间冰期的气候波动并未从根本上改变干旱之势^[139,145,169]。第三种观点认为，第四纪以来，新疆气候在全球变化的背景下存在着明显的干湿波动，具体表现为山地冰川的进退与平原地区湖面的消长^[120]。持第四种观点者提出，塔里木盆地虽然早在白垩纪晚期就已出现明显的干旱环境，但具有现代干旱特征的环境始于第三纪末，形成于第四纪初。盆地内部沙漠环境形成于中更新世或其晚期，沙漠在晚更新世晚期和全新世中晚期大规模向西、西南和东部地区发展^[170~171]。除此之外，还有人认为：我国西北干燥地带的演化，是受全新世以来气候变化过程与近代人类活动所引起的反照率、反馈机制的相互影响的结果^[172]。中国科学院组织的新疆综合考察成果中则提出：新疆历史时期的气候是从第四纪继承下来的，除有短期周期性的小变化外，并无特殊变干之迹象。新疆平原第四纪以来的气候是持续干旱的。

二、黄土研究

新疆第四纪问题突出，但资源也很丰富，既有冰碛、湖相沉积，也有广泛分布的黄土。然而对于新疆黄土的研究不论广度还是深度都不及黄土高原地区。早在 60 年代初周廷儒就对新疆的黄土作过调查，提出新疆黄土的形成和冰川物质的来源以及干草原的环境有关。在高山和亚高山带，降落的尘埃每被霜冻作用搅乱在土壤中；而在森林带，下降尘埃为降水冲刷到林下并与生物作用相结合，形成土壤，因此只有霜冻作用不甚显著、气候又较为干燥的低山草原环境最适合黄土的生成^[173]。除此之外，60 年代以前，B. A. 奥勃鲁切夫、王永焱、杨怀仁、刘东生等老一辈科学家就曾对新疆的黄土作过一些工作。70 年代末至今，新疆黄土的研究已取得了可喜的成果，不同作者从不同方面入手，对新疆黄土进行了形成时代、成因、分类和古气候记录等多方面的研究。就黄土的形成时代而言，从目前的研究成果来看，新疆黄土多为晚更新世以来形成的马兰黄土和全新世黄土，中更新世、早更新世黄土分布很有限。黄土的形成与冰期对应，而间冰期则形成古土壤。新疆黄土地层大体可与黄土高原进行对比^[177~190]。

多年来的研究业已证明，粉尘沉积的广泛性几乎是其他沉积难以相比的。因为粉尘沉积不仅在陆地上以黄土形式出现，而且在海洋沉积和极地冰芯中也都可寻到其踪迹。在中国，黄土除集中分布于黄土高原外，在青藏高原、新疆内陆盆地中也都有分布。作为陆相沉积中一种较佳的记录环境信息的载体，黄土与海洋沉积、冰芯记录一样，具有

连续性好、成因简单、分辨率高、记录完整等优点。因此是理想的用来作为第四纪环境演变研究对象的陆相地质体。以黄土粒度、磁化率、 CaCO_3 等为气候代用指标建立起的古气候变化序列,已得到世界第四纪同行们的认可,并被用来和海洋沉积、冰芯记录作详细对比。然而与青藏高原和黄土高原令人瞩目的研究进展相比,地处非季风区而却占有国土面积 1/6 的新疆内陆干旱区黄土与古气候的研究受多种因素的影响仍处于较低的层次上。虽然如前节所述,自本世纪初至今,通过科学工作者们的努力,新疆黄土及第四纪研究已取得了较为丰硕的成果,但由于新疆不仅地处边疆,而且地域辽阔,受人力、物力所限,各种研究的广度及深度都显不足。在黄土中古气候记录的提取方面除少量的古生物、矿物学、粒度分析和地球化学资料外,尚缺少系统的古气候代用指标方面的研究资料,特别是晚更新世以来黄土中高分辨率古气候记录的研究仍为空白。对于风成黄土沉积特征的研究,也仅仅停留在很低的水平上。关于黄土的成因至今还存在着争论。上述研究现状导致该区的研究很难与国际接轨,也使中国的黄土学说失却了完整性。事实上,新疆地处黄土、青藏高原之西北,主要受西风环流的控制,特别是北疆地区。如果黄土高原与高纬北大西洋地区末次冰期气候变化通过西风带与蒙古高压发生遥相关,那么,在新疆黄土中也必然留有北半球高纬地区气候变化的印记。不仅如此,新疆与中亚现代环境相近,两地古气候记录研究应可进行详尽的对比。不言而喻,新疆在过去全球变化研究中占有重要的地位。而另一方面,作为世界“第三极”的青藏高原的隆起对周边地区自然环境的影响长期以来也是国内外科学家研究之热点,地处青藏高原西北的新疆第四纪以来的环境变化深受青藏高原隆升的影响,该区第四纪环境变化的深入研究无疑将有助于对青藏高原隆升影响的更深入理解。

参考文献

- 1 Tsoar, H. and Pye, K. Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology*, 1987, 34:139~153.
- 2 刘东生等,黄土与环境.北京:科学出版社,1985.
- 3 Richthofen, F. V. On the mode of origin of the loess. *Geological Magazine*, 1882, 9(2): 293~305.
- 4 Obruchev, V. A. Loess types and their origin. *American Journal of Science*, 1945, 243:256~262.
- 5 Peccsi, M. Loess is not just accumulation of airborne dust. *Quaternary International*, 1990, 7/8:1~21.
- 6 Smalley, I. and Vita-Finzi, C. The formation of fine particles in sandy deserts and the nature of desert loess. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1968, 38:766~774.
- 7 Pye, K. The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14: 653~667.
- 8 刘东生等.中国的黄土堆积.北京:科学出版社,1965.
- 9 Smalley, I. The origin and distribution of the loess in the Danube basin and associated regions of east central Europe-a review. *Sedimentary Geology*, 1978, 21:1~26.
- 10 台益和等译 肯·派伊著.粉尘及粉尘沉积物.北京:海洋出版社,1987.
- 11 Janet, S. W. Glacial comminution of quartz sand grains and the production of loess silt; A simulation study. *Quaternary Science Review*, 1995,14: 669~680.
- 12 Smalley, I. Possible formation mechanisms for the modal coarse-silt quartz particles in loess deposits. *Quaternary International*, 1990, 7/8:23~27.
- 13 Whalley, W. B. *et al.* Origin of desert loess from some experimental observations. *Nature*, 1982, 300:433~435.

- 14 Goudie, A. S. *et al.* The formation of silt from quartz dune sand by salt processes in desert. *Journal of Arid Environment*, 1979, 2:105~112.
- 15 Pye, K. Formation of quartz silt during humid tropical weathering of dune sands. *Sedimentary Geology*, 1983, 34:267~282.
- 16 Smalley, I. and Krinslay, D. H. Loess deposits associated with deserts. *Catena*, 1978, 5:53~66.
- 17 Smalley, I. and Derbyshire, E. The definition of ice-sheet and mountain loess. *Area*, 1990, 22:300~301.
- 18 Smalley, I. The formation of silt-sized primary mineral particles for loess deposits. *Quaternary Science Review*, 1995, 14: 645~651.
- 19 张德二. 历史时期雨土现象剖析. *科学通报*, 1982, 27:294~297.
- 20 卢滨涛等. 中国黄土物质来源的初步探讨—石英、粉砂颗粒表面结构的电子显微镜研究. *地球化学*, 1976, (1): 47~53.
- 21 董光荣等. 中国风沙地貌特征与演化. 见:杨景春等主编. 中国风沙地貌特征与演化. 北京:海洋出版社,1993.
- 22 董光荣等. 中国沙漠形成演化与青藏高原隆起的关系. 见:中国青藏高原研究会论文集. 1995,13~29.
- 23 陈志明等. 中国地貌纲要. 北京:中国地图出版社,1993.
- 24 徐仁. 大陆漂移与喜马拉雅山上升的古植物学证据. 见:青藏高原隆起时代、幅度和形式问题. 北京:科学出版社,1981,8~18.
- 25 Liu, X. M. *et al.* The Chinese loess in Xifeng, I, the primary study on magnetostratigraphy of a loess profile in Xifeng area, Gansu Province. *Geophysical Journal*, 1988, 92:345~348.
- 26 郑洪波等. 段家坡黄土剖面磁学性质研究. 见:黄土、第四纪地质、全球变化(第三集). 北京:科学出版社,1992, 44~50.
- 27 朱日祥等. 红粘土的磁学性质. *第四纪研究*, 1996, (3):232~237.
- 28 曹家欣等. 晋东南“红土”的成因与时代. *北京大学学报(自然科学版)*, 1984, (5):88~96.
- 29 石宁等. 晋东南王宁 R 红土剖面的磁性研究及其形成时代与环境. *第四纪研究*, 1994, (2): 183~189.
- 30 罗运利. 离石丰义黄土剖面 2.56 Ma BP 前后地层岩性特征. 见:中国第四纪地质与环境. 北京:海洋出版社, 1997:92~98.
- 31 陈明扬等. 南极冰盖与中国的风尘堆积. *第四纪研究*, 1990, (3):261~271.
- 32 刘秀铭等. 中国黄土磁化率各向异性与成因及其对第四纪研究的意义. *中国科学(B)*, 1989, 19(4):441~448.
- 33 赵景波. 西安和山西保德第三纪晚期红土的研究. *沉积学报*, 1989, (7):113~120.
- 34 丁仲礼. 黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化问题. *第四纪研究*, 1997, (2):147~157.
- 35 孙东怀等. 中国黄土高原红粘土序列的磁性地层与古气候变化. *中国科学(D)*, 1997, 27(3):265~270.
- 36 张小曳等. 中国北部及西北部三次尘暴的研究—矿物气溶胶、微量元素源区特征及在大气搬运过程中的变化. *科学通报*, 1991, 36(19):1487~1490.
- 37 张小曳等. 中国内陆大气颗粒物的搬运沉积及所反映的气候变化. *中国科学(B)*, 1994, 24(11):1206~1215.
- 38 张小曳等. 亚洲粉尘的源区、传输与沉积. 见:中国第四纪地质与环境. 北京:海洋出版社,1997:207~214.
- 39 袁宝印等. 中国黄土地貌的形成机制与演化过程. 见:杨景春等主编. 中国地貌特征与演化. 北京:海洋出版社, 1995:132~148.
- 40 Cegla, J. Influence of capillary ground moisture on aeolian accumulation of loess. *Bull. Acad. Pol. Sci. Geog. Ser.*, 1969, 17:25~27
- 41 Foda, M. A. Dry fall of fine dust on sea. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88:6021~6026
- 42 Goossens, D. Scale model simulations of the deposition of loess in hilly terrain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13:533~544.
- 43 Velichko, A. A. Loess-paleosol formation on the Russian Plain. *Quaternary International*, 1990, 7/8:103~114.
- 44 Fink, I. *et al.* Pleistocene climate in central Europe; At least 17 interglacials after the Olduvai event. *Quaternary Research*, 1977, (7): 363~371.
- 45 Dodonov, A. E. and Baiguzina, L. L. Loess stratigraphy of Central Asia; Palaeoclimatic and palaeoenvironmental

- aspects, *Quaternary Science Review*, 1995,14:707~720.
- 46 Dodonov, A. E. Loess of Central Asia. *Geojournal*, 1991, 24:185~194.
- 47 Shackleton, N. J. *et al.* Accumulation rate of loess in Tadjikistan and China; Relationship with global ice volume cycle, *Quaternary Proceeding*, 1995, 4:1~6.
- 48 Pakhomov, M. M. New data on palaeogeography of loess-palaeosol series in Middle Asia. *Doklady Acad. Nauk SSSR*, 1983, 27:967~1072.
- 49 Deviatkin, E. V. *et al.* Lower Cenozoic of Mongolia; stratigraphy and paleogeography. Nauka, Moscow, 1989; 213.
- 50 Deviatkin, E. V. Meridional distribution of Pleistocene ecosystems in Asia; Basic problems, *Stratigraphy and Geological Correlation*, 1993,(1):439~444.
- 51 冯兆东等. 美国中西部第四纪冰川与黄土研究的进展和问题, *第四纪研究*, 1994, (4):362~367.
- 52 Feng Z. D. *et al.* Climatic singles from loess-soil sequences in the central Great Plains, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 110(2):345~358.
- 53 John, B. Comparison of soils in Northwest United States and west Europe with the interglacial record. *Quaternary Research*, 1985, 23:62~75.
- 54 丁仲礼等. 中国黄土研究进展(三) 时间标尺. *第四纪研究*, 1991,(4):336~348.
- 55 丁仲礼等. 第四纪时期东亚季风变化的动力机制. *第四纪研究*, 1995,(1):64~74.
- 56 丁仲礼等. 250 万年前后中国北方气候转型事件的初步确定. *科学通报*, 1990,35(1):1090~1092.
- 57 余志伟等. 250 万年以来地球轨道参数变化对黄土粒度变化的线性驱动. *第四纪研究*, 1992,(2):118~127.
- 58 Imbri, J. *et al.* The orbital theory of Pleistocene climate; Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger, A. *et al.* (eds.); *Milankovitch and Climate, Part I*. D. Reidel Publishing House, 1984:269~305.
- 59 Hays, D. J. *et al.* Variations in the earth's orbit; Pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194:1121~1132.
- 60 Heller, F. and Liu T. S. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geoph. J. R. Astr. Soc.*, 1984, 77:125~141.
- 61 安芷生等. 最近 13 万年来黄土高原季风变迁的磁化率证据. *科学通报*, 1991,35(7):529~532.
- 62 安芷生等. 洛川黄土地层学. *第四纪研究*, 1989,(2):155~168.
- 63 Kukla, G., Heller, F. *et al.* Pleistocene climatic in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 1988, 16: 811~814.
- 64 Maker, B. A. and Taylor, R. H. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature*, 1988,336: 368~370.
- 65 Maker, B. A. and Thompson, R. Mineral magnetic record of Chinese loess and paleosol. *Geology*, 1991, 19:3~6.
- 66 Maker, B. A. and Thompson, R. Paleoclimatic significance of the mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols. *Quaternary Res.*, 1992, 37:155~170.
- 67 刘秀铭. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义. *第四纪研究*, 1993,(3):281~287.
- 68 Liu X. M. *et al.* Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance. *Geophysical Journal International*, 1992, 108:301~308.
- 69 刘秀铭等. 中国黄土磁颗粒分析及其古气候意义. *中国科学*, 1991,(6):639~644.
- 70 韩家懋等. 马兰黄土与离石黄土的磁学性质. *第四纪研究*, 1994,(4):310~325.
- 71 沈承德等. 洛川黄土 $\mu\text{m-nm}$ 级物质粒度分布特征及 ^{10}Be 磁化率记录. 见: *中国第四纪地质与环境*. 北京, 海洋出版社 1997:158~168.
- 72 贾蓉芬等. 陕西段家坡黄土剖面中超磁细菌特征与环境意义. *中国科学(D)*, 1996,26(5):411~417.
- 73 刘嘉麒等. 渭南黄土剖面的年龄测定及十五万年来高分辨率时间序列的建立. *第四纪研究*, 1994,(3):193~202.
- 74 郭正堂等. 最后两个冰期黄土记录中的 Heinrich 型气候节拍. *第四纪研究*, 1996,(1):21~28.
- 75 聂众高等. 渭南剖面十五万年来的主要地层界限和气候事件. *第四纪研究*, 1996,(3):221~230.

- 76 李吉均等. 末次冰期旋—兰州黄土剖面与南极东方站冰岩芯的对比. 中国科学(B), 1990, (10): 1086~1094.
- 77 安芷生等. 最近 130ka 洛川黄土堆积序列与格陵兰冰芯记录. 科学通报, 1994, 39(24): 2254~2256.
- 78 An Z. S. *et al.* Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130000 years. *Quaternary Res.* 1991. 36: 29~36.
- 79 Porter, S. C. and An, Z. S. Correlation between climatic events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, 375: 305~308.
- 80 郭正堂等. 渭南黄土沉积中十五万年来的古土壤及其形成时的古环境. 第四纪研究, 1994, (3): 256~269.
- 81 郭正堂等. 全新世与上次间冰期气候差异的古土壤记录. 第四纪研究, 1993, (1): 41~53.
- 82 文启忠等. 黄土剖面中古气候变化的地球化学记录. 第四纪研究, 1995, (3): 223~231.
- 83 陈骏等. 最近的 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据. 科学通报, 1996, 41(21): 1963~1966.
- 84 刁桂仪 文启忠. 渭南黄土剖面碳酸盐和铁变化的古气候记录. 地球化学(增刊), 1995, 75~82.
- 85 沈承德等. 晚更新世黄土堆积物中的 ^{10}Be 记录. 第四纪研究, 1989, (2): 169~176.
- 86 沈承德等. ^{10}Be 磁化率模型及黄土中成壤磁性物质通量的估算. 第四纪研究, 1994, (1): 75~86.
- 87 韩家懋等. 黄土碳酸盐中古气候变化的同位素记录. 中国科学(D), 1996, 26(5): 399~404.
- 88 孙东怀等. 最近 150ka 黄土高原夏季风气候格局的演化. 中国科学(D), 1996, 26(5): 418~423.
- 89 孙东怀等. 末次间冰期黄土高原夏季风气候的初步研究. 科学通报, 1995, 40(10): 45~48.
- 90 孙湘君等. 黄土高原南缘十五万年以来的植被——陕西渭南黄土剖面的花粉记录. 科学通报, 1995, 40(13): 1122~1124.
- 91 林本海等. 最近 60 万年中国黄土高原季风变迁的稳定同位素证据. 见 黄土、第四纪地质、全球变化(第三集), 1991: 51~54.
- 92 吴乃琴等. 110 ka 来洛川黄土地层中蜗牛化石记录与环境因子分析. 中国科学, 1996, 26(5): 407~410.
- 93 吕远厚等. 150 ka 来宝鸡黄土植物硅酸体组合季节性气候变化. 中国科学, 1996, 26(2): 131~136.
- 94 Dansgaard W. *et al.* Evidence for general instability of past climate from a 250 ka ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218~220.
- 95 GRIP members. Climate instability during the last interglacial period in the GRIP ice core. *Nature*, 1993, 364: 203~207.
- 96 Michael H. F. *et al.* Eemian climate fluctuations observed in a European pollen record. *Nature*, 1994, 371: 779~783.
- 97 Nicolas, T. *et al.* Climate variations in Europe over the past 140 ka deduced from rock magnetism. *Nature*, 1994, 371: 503~506.
- 98 Taylor K. C. *et al.* Electrical conductivity measurements from the GRIP greenland ice cores. *Nature*, 1993, 366: 549~552.
- 99 Grootes P. M. *et al.* Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GISP Greenland ice cores. *Nature*, 1993, 366: 552~554.
- 100 Keigwin L. D. *et al.* The role of the deep ocean in North Atlantic climate change between 70 and 130 ka ago. *Nature*, 1994, 371: 323~325.
- 101 Memanus J. F. *et al.* High-resolution climate records from the North Atlantic during the last interglacial. *Nature*, 1994, 371: 326~329.
- 102 管东红等. 北塬剖面碳酸钙记录的末次间冰期气候不稳定性. 冰川冻土, 1996, 18(2): 119~124.
- 103 方小敏等. 亚洲季风演化的突发性与不稳定性——以末次间冰期土壤发生为例. 中国科学(D), 1996, 26(2): 154~160.
- 104 Chen, F. H. *et al.* East Asia monsoon variations during Oxygene Isotope Stage 5, evidence from the northwest margin of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Review*, 1999, 18: 1127~1135.
- 105 Dansgaard W. *et al.* Evidence for general instability of past climate from a 250 ka ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218~220.

- 106 Bond G. *et al.* Correlation between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 1993, 365:143~147.
- 107 安芷生, Porter S. C. 等. 最近 130ka 洛川黄土堆积系列与格陵兰冰芯记录. *科学通报*, 1993, 39(24):2254~2256.
- 108 丁仲礼等. 晚更新世季风—沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题. *中国科学(D)*, 1996, 26(5):386~391.
- 109 陈发虎等. 陇西黄土高原马兰黄土划分与末次冰期气候快速变化研究. *冰川冻土*, 1996, 18(2):111~118.
- 110 郭正堂等. 最后两个冰期黄土记录中的 Heinrich 型气候节拍. *第四纪研究*, 1996, (1):21~28.
- 111 Huayu L. *et al.* East winter monsoon oscillation and its correlation with the North Atlantic Heinrich events during the last glaciation. *Progress in Natural Science*, 1996, 6(6):711~717.
- 112 Chen, F. H. *et al.* High-resolution multi-proxy climate records from Chinese loess: evidence for rapid climatic changes over the last 75 kyr. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 1997, 130:325~335.
- 113 吴敬禄等. 青藏高原东部 RM 孔 140 ka 以来湖泊碳酸盐同位素记录的古气候特征. *中国科学(D)*, 1997, 27(3):155~164.
- 114 姚檀栋等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. *中国科学(D)*, 1997, 27(5):447~453.
- 115 Luejiang, W. and Tadamichi, O. Tele-connections between East Asia monsoon and the high-latitude climate: A comparison between the GISP2 ice core record and the high-resolution marine records from the Japan and the South China Seas. *The Quaternary Research*, 1998, 37(3):211~218.
- 116 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候突变—古里雅冰芯与 GRIP 冰芯对比研究. *中国科学(D)*, 1999, 29(2):175~184.
- 117 方晓敏等. 兰州约 60 ka 以来夏季风千年尺度不稳定性研究. *科学通报*, 1999, 44(4):436~439.
- 118 Fang, X. M. *et al.* Asian summer monsoon instability during the last 60000 years: magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the western Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 168:219~232.
- 119 李江风. 楼兰王国的消亡和丝路变迁与气候关系. 见:干旱区新疆第四纪研究论文集. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1985:81~94.
- 120 李吉均等. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式. *第四纪研究*, 1990, (4):197~204.
- 121 韩淑媿等. 新疆巴里坤湖 35000 年来古气候变化序列. 1990 *地理学报*, 45(3):350~361.
- 122 韩淑媿等. 晚更新世晚期北疆内陆型气候环境变迁. *地理研究*, 1993, 12(2):47~54.
- 123 秦伯强 施雅风. 全新世一万年来亚洲内陆湖泊的变化. 见:中国气候与海平面变化研究进展(一)施雅风等著. 海洋出版社, 1992:28~29.
- 124 秦伯强. 中亚近期气候变化的湖泊响应. *湖泊科学*, 1992, 5(2):118~127.
- 125 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部暖干化趋势与未来展望. *地理学报*, 1990, 45(1):1~14.
- 126 闫顺. 新疆第四纪孢粉组合特征及植被演替. *干旱区地理*, 1991, 14(2):1~9.
- 127 吴万里. 中国北方全新世古土壤记录与环境变化. *中国科学(D)*, 1996, 26(2):34~35.
- 128 潘安定. 新疆干旱区晚更新世以来的湿温对应关系的探讨. *干旱区地理*, 1993, 16(2):10~16.
- 129 潘安定. 北疆晚更新世以来植被与气候演化的初步研究. *干旱区地理*, 1993, 16(3):30~37.
- 130 关有志等. 塔克拉玛干沙漠北部全新世地层中的元素分布与古气候. *干旱区地理*, 1994, 17(3):19~26.
- 131 靳鹤龄等. 塔克拉玛干沙漠腹地晚冰期以来环境与古气候变化. *中国沙漠*, 1994, 14(3):31~37.
- 132 文启忠等. 北疆地区晚更新世以来的气候环境变迁. *科学通报*, 1988, 33(10):771~774.
- 133 耿宏宽. 中国沙区气候. 北京:科学出版社, 1986.
- 134 方修琦. 天山托木尔峰地区 7500 年来的气候变化. *干旱区地理*, 1989, 12(1):6~10.
- 135 黄春长. 我国西北高原盆地全新世沉积与环境变迁. *干旱区地理*, 1990, 13(2):1~8.
- 136 任美球. 塔克拉玛干地区干湿波动与全球湿度变化关系探讨. *中国沙漠*, 1994, 14(2):1~8.
- 137 袁宝印等. 新疆巴里坤湖十五万年来古水文演化序列. *第四纪研究*, 1998, (4):319~327.

- 138 顾兆炎等. 末次间冰期以来新疆巴里坤湖蒸发盐的沉积环境记录. 第四纪研究, 1998, (4), 328~334.
- 139 董光荣等. 晚更新世以来我国北方沙漠地区的气候变化. 第四纪研究, 1990, (3), 213~222.
- 140 董光荣等. 试论全球气候变化与沙漠化的关系. 第四纪研究, 1990, (1), 91~98.
- 141 董光荣等. 晚更新世初以来我国陆地生态系统的沙漠化过程及其成因. 见: 黄土、第四纪地质、全球变化, 第二集. 北京: 科学出版社, 1990, 91~101.
- 142 董光荣等. 中国沙漠形成演化的初步研究. 中国沙漠, 1991, 11(4), 23~32.
- 143 李保生等. 塔克拉玛干沙漠南缘沙山普鲁地层剖面的初步研究. 科学通报, 1988, 33(2), 140~143.
- 144 李保生等. 塔克拉玛干沙漠东部风沙地貌中的几个问题. 科学通报, 1990, 35(23), 1815~1818.
- 145 李保生等. 末次冰期以来塔里木盆地沙漠、黄土的沉积环境与演化. 中国科学(B), 1993, 23(6), 644~651.
- 146 李保生等. 塔克拉玛干沙漠及其以南风成相带划分和认识. 地质学报, 1995, 69(1), 78~87.
- 147 王树基等. 塔里木内陆盆地晚新生代干旱环境的形成与演变. 第四纪研究, 1990, (4), 372~380.
- 148 陈惠忠等. 塔里木盆地南缘阿羌剖面所反映的气候变化. 见: 塔干沙漠国际科学大会论文摘要汇编. 1993, 130~131.
- 149 钟巍等. 全新世新疆自然环境演变初论. 干旱区资源与环境, 1994, 8(4), 9~15.
- 150 韩淑媿等. 北疆巴里坤湖内陆型全新世气候特征. 中国科学(B), 1992, 22(11), 1021~1029.
- 151 韩淑媿等. 北疆巴里坤湖全新世环境变迁序列. 地质科学(增刊), 1992, 247~259.
- 152 姚檀栋等. 新疆冰芯中的小冰期气候记录. 中国科学(B), 1990, 20(11), 1196~1201.
- 153 姚檀栋等. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势. 中国科学(B), 1988, 18(6), 657~666.
- 154 陈吉阳. 天山乌鲁木齐河源全新世冰川变化的地衣年代学等若干问题之初步研究. 中国科学(B), 1988, 18(1), 95~104.
- 155 王宗太. 乌鲁木齐河大西沟小冰期气候环境及地表径流. 见: 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 57~66.
- 156 陈华慧等. 新疆天山地区早更新世沉积及其下限. 第四纪研究, 1993, (1), 38~46.
- 157 徐国昌等. 青藏高原对西北干旱气候形成的作用. 高原气象, 1983, 2(2), 9~15.
- 158 杨怀仁等. 第四纪中国自然环境变迁的原因机制. 第四纪研究, 1989, (2), 97~112.
- 159 钱永甫等. 行星大气中地形效应的数值研究. 北京: 科学出版社, 1988.
- 160 张林源等. 论我国西北干旱气候的成因. 干旱区地理, 1992, 15(2), 1~12.
- 161 翟章等. 中国干旱区的分布及其原因. 见: 中国干旱、半干旱地区气候、环境与区域开发学术讨论会论文集. 北京: 气象出版社, 1990.
- 162 王树基等. 天山南北麓新生代地理环境演变. 地理学报, 1987, 42(3), 211~220.
- 163 王树基. 准噶尔盆地晚新生代地理环境演变. 干旱区地理, 1997, 20(2), 9~16.
- 164 郑本兴. 中国西部末次冰期以来冰川、环境及其变化. 第四纪研究, 1990, (2), 101~110.
- 165 张兰生. 中国第四纪以来环境演变的主要特征. 北京师范大学学报(自然科学版), 1984, (4), 81~86.
- 166 张兰生. 我国西北和华北中更新世以来湿润状况的变化. 见: 气候学研究——“天、地、生”相互影响问题. 北京: 气象出版社, 1989, 98~103.
- 167 李栓科. 中昆仑山区封闭湖泊湖面波动及其气候意义. 湖泊科学, 1992, 4(1), 19~29.
- 168 丁仲札等. 过去 130ka 我国干旱区东西向环境大断面及古气候意义. 见: 中国第四纪地质与环境. 北京: 海洋出版社, 1997, 368~372.
- 169 阎顺等. 塔里木盆地晚新生代环境演变. 干旱区地理, 1990, 13(1), 1~9.
- 170 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠的形成时代及发展过程. 干旱区地理, 1994, 17(3), 1~9.
- 171 吴正. 塔克拉玛干沙漠成因的探讨. 地理学报, 1981, 36(3), 280~291.
- 172 杨怀仁主编. 第四纪地质. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- 173 周廷儒. 新疆第四纪陆相沉积的主要类型及其和地貌气候发展的关系. 地理学报, 1964, 29(2), 109~127.
- 174 A. 奥勃鲁切夫. 准噶尔盆地西北部的黄土. 见: 论黄土. 北京: 地质出版社, 1958, 133~138.
- 175 刘东生等. 中国第四纪沉积物区域分布特征的探讨. 见: 第四纪地质问题. 北京: 科学出版社, 1964.

- 176 王永焱. 北疆西部第四纪沉积. 中国第四纪研究, 1959, 2(2).
- 177 冯先岳等. 北疆黄土与黄土状岩石. 见: 新疆第四纪地质与冰川地质论文集. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1981, 67~80.
- 178 腾志宏. 新疆黄土的某些特征及其形成条件的初步认识. 西北大学学报, 1986, 16(1), 69~75.
- 179 张云林. 天山北麓的黄土. 新疆地质, 1981, (2): 21~39.
- 180 Zhang Hongyi *et al.* The paleosols in the loess of Xinjiang and their paleo-climatic significance. In: *Aspects of loess research*, edited by Liu Tungsheng. China Ocean Press, 1987, 52~58.
- 181 Wen Qizhong *et al.* Paleoclimatic records in the loess sections of North Xinjiang, China. In: *Aspects of loess research*, edited by Liu Tungsheng. China Ocean Press, 1987, 58~70.
- 182 高存海等. 试论昆仑山北坡黄土特征及其沉积环境. 干旱区地理, 1991, 14(3), 9~17.
- 183 高存海等. 中昆仑山北坡黄土特征及其环境. 地理研究, 1991, 10(4), 40~50.
- 184 高顺利. 天山北麓东段黄土状岩石的粒度、矿物特征及成因探讨. 新疆大学学报, 1985, (3), 115~123.
- 185 余淑华等. 新疆北部地区第四纪沉积地球化学特征. 地球化学, 1991, (1), 56~63.
- 186 余淑华等. 新疆地区黄土中的稀土元素地球化学特征. 干旱区地理, 1994, 17(2), 75~81.
- 187 赵秀峰等. 晚更新世以来昆仑山区黄土沉积及其气候记录. 冰川冻土, 1993, 15(1), 63~69.
- 188 赵兴有等. 晚更新世中期以来克里雅河流域黄土沉积特征与环境演化. 干旱区地理, 1995, 18(1), 51~59.
- 189 赵兴有等. 克里雅河流域黄土的矿物组合特征及环境意义. 干旱区地理, 1997, 20(3), 62~68.
- 190 唐肖宇等. 中昆仑山北坡黄土的矿物成分及微结构特征分析. 干旱区地理, 1991, 14(4), 23~30.