

黄土高原地质、历史时期古植被研究状况

吕厚远^① 刘东生^① 郭正堂^{①②}

(^①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ^②中国科学院地球环境研究所, 西安 710015.

E-mail: houyuanlu@peoplemai.com.cn)

摘要 分析了目前对黄土高原古植被状况认识差异的可能因素, 对全新世不同地貌单元古植被记录做了初步分析, 认为黄土高原的古植被并没有严格按照植被地带性分布规律分布, 基岩山地、沟谷和塬面的植被类型有明显的差别, 全新世以来有厚层黄土分布的塬面上从来没有稳定的大面积的森林生长; 但在黄土高原南部沟谷和基岩山地全新世气候温暖期森林(疏林)可以得到较好的发育. 在黄土高原外围一些局地的植被群落, 更多的受到地形及地下水的控制.

关键词 黄土高原 古植被

黄土高原地质、历史时期原始天然植被状况是西北开发中争论较多的科学和实践问题, 这不仅是因为植被是黄土高原自然环境的重要组成部分, 更是因为这个问题直接关系到黄土高原植被和生态建设的方针和策略的选择.

目前对黄土高原原生植被的认识主要有 3 种观点: (1) 黄土高原在历史时期曾广泛发育森林和森林草原, 曾经有 53% 的面积被森林覆盖^[1~4], 目前没有森林生长是人类长期活动的结果. (2) 黄土高原的原始植被未超出草原的范围, 草原植被是黄土高原的顶级群落^[5~8]. (3) 黄土高原的植被不能简单地表述为森林和森林草原或草原, 而应区分不同地形部位和区域^[9]. 不同的学术观点对黄土高原植被建设持不同的见解. 对有关问题的深入研究不仅对于正确认识黄土高原自然环境历史的演变规律而且对黄土高原治理的决策有重要意义.

1 造成对黄土高原原始植被状况认识差异的主要原因

目前看来, 造成对原生植被状况认识差异的主要原因有以下 6 个方面:

(i) 历史文献和地质记录的差异. 历史文献多主张历史时期黄土高原有大面积的森林分布^[1~4], 这些证据表明黄土高原曾经生长过高大的乔木和森林植被. 来自黄土塬面地层记录的孢粉、植物硅酸体(植硅体)、有机质碳同位素以及古土壤等晚更新世以来的地质记录, 多表明塬面上从来没有过大面积稳定的森林分布^[5~13].

(ii) 沟谷和塬面的差异. 目前千沟万壑的黄土高原, 是在长达 240 多万年的第四纪期间逐步形成的,

中更新世以来至少可以划分出 5 次沟谷最发育的时期^[14], 史前的沟谷发育和人类活动没有关系. 来自沟谷和塬面不同的地质和历史记录可能反映了不同的植被演化特点.

(iii) 基岩山地和黄土塬的差异. 目前黄土高原的森林主要集中在延安一线以南的六盘山、小陇山、子午岭、黄龙山和吕梁山等山地. 所有这些大面积生长森林的山地, 都没有厚层的黄土沉积, 而是石质的基岩山地. 黄土塬区不存在大面积的自然森林, 例如白鹿塬、董志塬和洛川塬等. 来自基岩山地和黄土塬区不同地质和历史记录也可能反映了不同的植被特征.

(iv) 地带性(显域性)和局地性(隐域性)植被的差异. 绿洲以及在沙地梁滩相间区的草甸植被、沙生植被等隐域性植被, 在地质历史时期始终是存在的. 来自地质记录、考古学证据或历史文献所记载的古植被的资料, 需要准确判断地带性和局地性的植被特点. 如果用局部隐域性植被资料推断成地带性植被的特点可能会造成认识上的误差.

(v) 实际植被、潜在植被和原生植被的差异^[15]. 根据目前气候条件划分的潜在自然植被与实际植被分布有一定的差异, 在许多自然植被分布图上^[16~18], 黄土高原东南部的暖温带落叶阔叶林分布区, 实际上多为温带落叶林和灌丛、灌草丛以及农田分布区. 目前还缺少大规模人类活动以前气候温暖时期的原生植被分布资料, 由于气候变化和人类活动的影响, 原生植被和潜在植被、实际植被之间有一定的差异^[15,18], 气候温暖期的原生植被状况应该是目前生态恢复所能达到的最理想境界^[15].

(vi) 人工成林和自然森林演替之间的差异. 由

于目前在一些塬面上可以看到一些人工栽培的经济林,因而认为黄土高原地区只要没有人为的破坏,是完全可以生长森林的.实际上这些人工的树林多是一些单树种的纯林,不能自然下种,森林不能演替,缺少生物多样性,一次病虫害,就会遭到毁灭.人工林常常在生长 5~10 年后,由于土壤干层的出现,导致树林的退化和演替,几十年后或许还要再次造林,与自然生长的森林可演替性有很大的区别.深入研究不同地区的地带性优势种和伴生种以及植被演替的规律,可以为可持续发展的生态建设提供依据.

基于上面的认识,黄土高原植被系统具有明显地域分异,它的显著特征,一是植被类型表现形式的多样性,二是空间尺度上的多级性,三是时间尺度上的演替性.造成植被类型分异的最重要的原因之一是不同的区域、不同地貌的水热条件发生了变化.了解不同空间、时间尺度上的自然植被特点与水热条件的关系,分析不同气候、地形母质条件下实际植被、潜在植被和原生植被的差别,弄清黄土区不同地貌单元自然植被演化和人类活动的关系,是黄土高原生态环境建设最关键的科学和实践问题.对地质历史时期原生植被的研究已经有了许多可靠的方法^[19~27],黄土高原地区众多的地质记录^[28~42]和历史文献^[1~5,43],可以为我国初步认识黄土高原不同地貌单元的古植被特征提供重要的依据.

2 黄土高原不同地貌单元古植被研究的部分证据

2.1 古代文献中黄土高原的植被

部分学者通过对大量古代文献、古代遗存的考证,认为黄土高原曾经发育过广泛的森林和森林草原植被^[1~5,44],在全新世中期,关中、晋南和豫西北地区发育了北亚热带落叶与常绿阔叶混交林^[44].西周至春秋战国时期黄土高原的森林可以分布到河套地区^[1],森林面积达到 53%左右^[1~5,44].但如果从不同地貌单元对古代文献进行考证,可能会得出不同的看法.在中国古籍中,以《诗经》的史料真实性较高^[43].何炳棣^[43]通过对诗经中 305 篇诗中所涉及的黄土高原地区 151 种植物进行考证,按所描述的地形条件进行了详细的统计,原野上的林木不过占 9.5%,而且认为这个百分比还是比较夸张的.70%森林都生长在山上,不到 1/4 的林木生长在低平的湿地(表 1),认为黄土高原的森林主要生长在地,塬面上未曾生长过森

林^[43].

表 1 《诗经》中记录的黄土高原部分植物类型生长的地形条件^[43]

地形	木本植物(种数次数, %)		蒿(种数次数, %)	
原野	8	9.5	34	54.8
山地	57	67.9	20	32.3
沟谷湿地	19	22.6	8	12.9
人工种植	39			
不详	29		12	

2.2 不同地貌单元的全新世孢粉学证据

黄土塬区地层中孢粉含量较少,而且草本花粉含量常占绝对优势.一种观点认为,碱性的黄土环境不利于孢粉保存,孢粉分析结果很难全面反映植被情况,认为对于孢粉分析得出的黄土高原不存在森林的结论应持审慎的态度^[44].实际上许多木本花粉,如:带气囊的各种针叶类花粉,桦、胡桃和榆等常见的阔叶树花粉,其大小和外壁厚度远比禾本科等草本花粉要牢固,很难理解黄土环境选择性破坏了木本花粉,而且近年来一些基岩山地的黄土孢粉分析结果仍然可以获得大量的木本花粉.我们认为黄土高原的孢粉组合相对真实地反映了当时的古植被状况,是认识黄土高原不同地貌单元植被特点的最重要的依据.本文选择几个不同地貌单元(黄土塬区、沟谷、基岩山地、干旱区及黄土沙漠过渡带)全新世时期的孢粉记录,可以看出不同地貌、环境下的古植被的差异.

(i) 黄土塬区的孢粉记录:以渭南剖面孢粉记录为例.孙湘君等人^[7]发表了渭南剖面的孢粉记录,渭南剖面位于陕西省渭南阳县郭镇(34°24'N, 109°39'E),海拔 650 m.剖面由黄土和古土壤组成,全新世地层厚 1.43 m.孢粉组合表明:距今 11.8~3 ka 期间,蒿属花粉占主要优势,平均含量达到 45%,个别层位出现一定数量的乔木花粉(6%~25%),主要有松、云杉、铁杉、桦、榆、栎和胡桃,但除松外,其他木本花粉都是零星出现.出现大量的中华卷柏(最高达 15.5%)和里白属(4.5%)等孢子及一些单缝孢子和较多的环纹藻.研究表明整个全新世以草原为主要植被,短时间有阔叶树生长.根据该剖面近 100 ka 的花粉记录,认为黄土高原塬面上的草原植被是原生的,除某些相对短暂的水分适合乔木生长的时段外,未曾有过稳定的森林发育.

(ii) 黄土沟谷中的孢粉记录:以秦安大地湾孢

粉记录为例^[39]。剖面位于甘肃秦安县五营河(又名清水河)南岸,海拔 1000~1500 m,塬区地貌以梁、峁、沟为主,沟峁高差在 50~400 m 不等。研究剖面为沟底五营河切割出的天然剖面,厚 8.3 m,从底部 8.3~5.5 m 以厚层的河漫滩为主,5.5 m 以上逐渐有黑垆土和黄土沉积。¹⁴C 年龄表明为全新世沉积^[39]。

孢粉记录表明在 11~7 kaBP 左右,针叶树花粉含量达到 50%以上,花粉含量非常丰富,发育针叶林植被。全新世晚期出现了高含量的水生植物和阔叶树花粉,反映了局地的沟谷生景。

(iii) 基岩山地剖面的孢粉记录:以甘肃小陇山林区剖面为例。小陇山剖面位于天水党川乡(34°20'N, 106°08'E),孢粉结果来自 3 个土壤剖面,土壤剖面一般厚 1~2 m,土壤层下部的母质为残积坡积物,属于中泥盆纪灰绿色千枚状板岩、硅质千枚状板岩和黑云母石英片岩。

根据 3 个剖面的孢粉结果和 ¹⁴C 年代数据^[40],表明自全新世中期以来,古植被经历了 3 个演替阶段:距今 7.5~5 ka,为以栎类为主的落叶阔叶林,局部为针阔叶混交林,气候温暖湿润;距今 5~2.5 ka,以栎类为主的针阔叶混交林,气候温和略干;2.5 ka 至今,早期为栎林和针阔叶混交林,晚期是以栎林占优势的针阔叶混交林,与早期相比,气候转凉变干。整个中全新世以来,该区一直生长着茂盛的森林植被。

(vi) 干旱区湖泊沉积剖面孢粉记录:以岱海剖面孢粉记录为例。岱海位于内蒙古自治区乌兰察布盟凉城县境内,是一个规模不大的内陆微咸水湖。孢粉分析结果表明^[41],从 10.25~7.9 kaBP,在湖泊周围发育干旱草地和灌丛群落,7.9~4.45 kaBP,针叶林和桦木林发育,3.9 ka 以后森林植被消失,2.5 ka 来,岱海湖盆周围植被类型经历了典型草原、灌丛草原、森林草原、灌丛草原的演化过程。

(v) 沙漠/黄土过渡带古植被记录:以柳树湾剖面记录为例。柳树湾剖面(37°39'N, 108°37'E)位于陕西靖边城东 25 km,海拔 1400 m,由季节性水洼地或封闭的湖盆形成。剖面厚 13.8 m,为黑、灰色粉砂、淤泥和泥炭沉积。花粉分析结果和 ¹⁴C 年龄表明 1.3 kaBP 以来古植被始终为草原植被景观^[42]。

2.3 不同地区末次间冰期以来植硅体证据

吕厚远等人^[13]在对全国表土植硅体研究的基础上,选择黄土高原南部自东向西(渭南、宝鸡和兰州)3 个剖面末次冰期以来的地质记录进行植硅体研究,并利用和现在不同植被类型下现代土壤植硅体组合的关系,判別了高原塬区东、西部古植被的空间变化。

渭南剖面(34°24'N, 109°30'E)植硅体记录表明,130 ka 以来,该区大致经历了以下几次大的植被类型发展阶段:荒漠或草原化荒漠、落叶阔叶林和疏树草原、典型草原、疏树草原(短期落叶阔叶林)、典型草原、疏树草原和典型草原的多次交替及疏树草原(短期落叶阔叶林)。全新世植被类型被判別为草原、疏树草原,在气候最宜期可能有短期的落叶阔叶林生长。

宝鸡剖面(34°23'N, 107°16'E)落叶阔叶林生长的时间仅发育在 S₁ 的下部非常短暂的一段时期;宝鸡剖面 S₁ 地层沉积以来,在气候寒冷时期一直以典型草原或草甸草原植被类型为主,而渭南剖面在气候寒冷期,多次发育干草原和荒漠化草原植被类型,表现了宝鸡与渭南地区明显的区域性差异。宝鸡全新世植被类型判別为草原或疏树草原类型^[13]。

兰州剖面位于兰州九洲台,植硅体研究表明,50 ka 来,从来没有森林、森林草原生长,除了在 L₁ 黄土中部的弱发育古土壤层和全新世晚期发育了短暂的草原植被类型外,其他时期全部被判別为荒漠类^[13]。

2.4 土壤学证据

刘东生等人^[6]和郭正堂等人^[11]曾对黄土塬区的古土壤学进行过较详细的研究,提供了判別古植被及古生态环境的重要证据。

(i) 渭南全新世土壤^[6,11]。渭南剖面上部含大量碳屑和砖石块,受人类活动强烈扰动,下部保存一个单周期土壤的 Bt 和 Ck 层。土壤 pH 值在 7.4~8.3 之间变动,表明其碱性。吸附性复合体中交换阳离子以 Ca²⁺和 Mg²⁺为主,表明无明显的盐碱化现象。游离铁的含量在各层中都小于 2%,在 B 层或 Bt 层中,黏粒组分的 SiO₂/Al₂O₃ 比较下伏黄土层有所降低,表明土壤发育时存在较弱的富铁铝化过程。

对同一地区的西安全新世土壤的黏土矿物进行了分析,结果表明,黏土矿物都以 2:1 型矿物为主,

1) Xiao J L, Xu Q H, Naka Y, et al. Holocene vegetation history of the Lake Daihai region, Inner Mongolia, North-central China. Quaternary Science Reviews, 2003(待发表)

其中有伊利石、高岭石、蛭石、少量蒙脱石及混层矿物，而下伏黄土中蛭石含量较少，绿泥石含量增高。这种组合表明矿物的演化仍处于伊利石向膨胀型矿物转变的时期。

土壤微形态研究表明， S_0 下部的黏化层(B1t 和 B2t)未发现人为扰动的迹象，从关中地区的耕作史来看，黏化层应是全新世中期和早期的产物。该层具典型的虫孔微结构，虫孔占薄片面积的 12%~15%，是具有松软表层的草原土壤的典型特征。虫孔周围的基质被土壤生物强烈扰动，呈致密生物粪粒充填结构。这种结构是由土壤强烈的生物活动伴有暂时性的土体水饱和所形成，剖面中的铁锰斑点也说明土壤剖面确能达到暂时性的水饱和状态。但 Bt 层下 Ck 层的存在及铁锰斑点的低含量，说明土壤水饱和并不频繁，气候排水量接近于零。因此，土壤水分状况应为中国土壤系统分类中的半干润偏湿润的类型，但在美国土壤分类中仍应属于干的类型。土壤的细粒组分(30%)呈暗褐色，含较多的腐殖质，其中少量棕色铁质微粒，指示出土壤至少经历了微弱的棕化和红化过程。在这两层土壤中并未发现冻融作用的痕迹，尤其是细粒组分经历了一定的棕化和红化作用，说明土壤热量状况应为温性偏热。Bt 层中的空隙有 5% 的高腐殖质含量的暗褐色、半透明且具较高双折射的黏粒胶膜，它们常见于能产生较多富里酸植被下，即植被中可能有一些针叶树的成分。综合上述解释及土壤化学特征，我们认为，该区 S_0 是半湿润暖温带气候下以草甸草原植被为主的土壤。该土壤大致可定为美国诊断分类中的黏化干软土，联合国土壤分类中的淋溶湿草原土，法国土壤生态学分类的淋溶湿草原土，中国土壤系统分类中的黑垆土和淋溶热黑土的过渡类型。

(ii) 洛川全新世土壤^[6,11]。和渭南一样，洛川全新世土壤的上部也为人类活动所扰动，可能是人为堆积的结果。下部保存有一个完整的 AC-Ck 型发生层剖面，代表了人类活动前的自然土壤。该土壤的风化环境亦为微碱性，吸附复合体中以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主，对剖面中的黏土矿物曾有过深入的研究。土壤中黏土矿物组合与下伏黄土基本相同，有伊利石、高岭石、绿泥石和蛭石，而二者的主要差别是土壤中伊利石的结晶度较黄土中有所降低，表明黏土矿物主要为碎屑成因。

微形态研究揭示出，AC 层的上部全部脱钙，下

部仍含有 2%~3% 的碳酸盐。细粒组分富含有机质，呈褐黑色。各层都具有典型的海绵状微结构，反映了土壤中活跃的生物活动，是草原土壤的典型特征。该结构的完好保存，表明土壤剖面很少达到水饱和的状态，这与土体中无铁锰质斑点是一致的。这些特征结合剖面下部 Ck 层的存在，表明当时土壤水分状况为干的类型，剖面几乎无红化现象及较多的有机质积累，说明土壤具有温性温度状况。

该土壤大致可定为联合国土壤分类中的典型黑钙土，美国分类中的动物干扰干软土，法国分类中的草原黑钙土和中国系统土壤分类中的黑钙土，是半干旱的、有较大季节性反差的气候下形成的茂盛草原土壤。

3 研究黄土高原原生植被的一些思路

对原生植被以及与水热条件关系的研究，需要在历史的演变过程中寻找答案。除了通过对我国丰富的历史文献资料进行科学考证，获得最直接的古植物生长的证据外，近 20 年来，国际上先后发展了许多不同的利用地质记录判别古植被和估算古气候参数的技术和方法^[19~27]。在恢复古植被方面除了判别分析(discriminant analysis)等方法外^[19]，20 世纪 90 年代后随着全球古植被计划(Global Palaeo-Vegetation Project)的实施，逐渐发展了更加成熟的 Biomization 方法^[20]，极大地推动了全球古植被的研究。在定量估算古气候参数方面，不同的学者曾根据多元回归、相似类比、加权平均和响应面等不同的原理发展了一系列的技术及方法，在古气候、古环境参数定量研究方面获得了突破性的进展^[21~27]。所有这些方法的实现都是在掌握了大量现代表土孢粉等生物指标与现代表植环境关系的基础上完成的。

在我国黄土高原的古环境研究中，我国科学家发展了一系列适用于黄土地区科学研究的分析方法，积累了大量的资料，取得了一系列成果^[10~14,28~35]。在对现代孢粉、植硅体等研究基础上^[31,32,36]，对古植被、古气候的研究通过花粉^[7,30~34]、同位素^[10]和植硅体等^[13,36~38]相对直接的指标，取得了初步的成果。已有的工作为黄土高原的自然植被格局与生态建设的历史依据的研究提供了基础。

一般认为，距今 6 ka 以前的温暖期是最近似的原生植被发育时期^[15]。然而，目前有关黄土高原原生植被的研究资料多来自塬区地层剖面的分析结

果^[10~13];从研究方法上需要更多的现代环境指标的判别、多指标的相互验证以及定量(半定量)的古植被、古气候的分析. 现有的认识还无法客观地回答有关黄土高原植被争议的许多科学问题. 例如: (1) 距今 6 ka 以前的全新世温暖期, 基岩山地、黄土塬面、沟谷阶地原生植被特征、差异和分布规律; (2) 在中更新世以来气候更温暖的 S_1 , S_4 , 和 S_5 古土壤沉积时期, 黄土高原部分塬区是否可以生长森林? 如果生长森林需要多少自然降水维持? (3) 关中、晋西南河谷平原区; 晋西、渭北、陇东黄土高原沟壑区以及晋中、晋北、陕北、陇西黄土丘陵沟壑区, 在冰期、间冰期不同的植被类型(如森林、森林或疏林草原、草原、荒漠、沙漠)在空间上是如何分布的, 与目前实际植被分布的差异; (4) 植被随气候变化的演替过程及不同地区、不同地貌单元、不同植被类型的主要建群种类等都是目前急待探讨的科学问题.

在众多环境替代性指标中, 孢粉和植硅体是黄土地层中保存丰富的、也是最能直接反映植被特点的植物化石指标. 随着黄土孢粉分析方法的改进, 已经可以从黄土地层中提取出更丰富的孢粉种类. 植硅体分析已经在黄土高原的古植被和古环境研究中取得了初步的成果^[13,36], 特别是植硅体在分辨禾本科不同亚科方面具有孢粉分析目前难以达到的优势. 有机碳同位素分析在反映黄土高原 C_3 和 C_4 植被方面也取得了许多重要的进展. 土壤微形态研究是研究黄土高原古植被特点的最重要的手段之一. 来自分子化石的证据已经显示出在研究黄土高原古植被特点方面的潜力^[12], 不同指标的相互验证可以获得相对客观的古环境、古植被的认识.

4 小结

黄土高原的古植被状况并没有严格按照植被地带性分布规律分布, 沟谷和塬面的植被类型有明显的差别, 全新世以来有厚层黄土分布的塬面上从来没有稳定的大面积的森林生长, 即使在气候条件较好的关中盆地, 在全新世气候最适宜期也只有短暂的疏林生长, 黄土高原其他地区自然植被类型应该是草原. 但在沟谷中森林(疏林)可以得到较好的发育, 可是在地质时期沟谷植被的分布范围目前还没有很好的研究.

黄土高原的基岩山地与黄土塬的植被特点有很大的差别, 无论是地质记录还是目前的植被分布状

况都表明, 基岩山地是适合森林分布的区域, 而巨厚的黄土塬区由于其特有的岩土学特点, 既不同于我国东部的冲积平原也不同于有薄层土壤覆盖的基岩山地, 目前的气候状况以及全新世适宜期相对温暖湿润的气候条件都不足以支持在塬面上长期生长大面积的森林植被. 根据目前黄土高原的气候条件, 在强调全国性“还林”的同时, 应突出西北黄土高原塬区的“还草”问题. 从历史生态角度看, 天然绿化优于人工绿化, 单纯种草、种树不等于生态环境建设.

在黄土高原外围一些局地的植被群落, 由于更多的受到地形及地下水的控制, 无论是地质记录还是考古学证据, 要更多地考虑当时当地水文环境的变迁. 荒漠同样是西北干旱区生态环境的重要组成部分, 应当加强保护、恢复与重建荒漠生态系统, 是防治荒漠化的根本措施.

致谢 孔昭宸、沈才明、吴乃琴、秦小光等对本文提出的宝贵意见, 作者表示感谢. 本工作受国家自然科学基金(批准号: 40271117, 49894174)和中国工程院“西北水资源和生态环境建设”项目资助.

参 考 文 献

- 1 史念海. 河山集(二集). 北京: 三联书店, 1981. 1~143
- 2 史念海. 论历史时期我国植被的分布及其变迁. 中国历史地理论丛, 1991, 3: 43~73
- 3 朱志诚. 陕北黄土高原森林草原的范围. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983, 7(4): 122~131
- 4 朱志诚. 黄土高原森林草原的基本特征. 地理科学, 1994, 14(2): 52~155
- 5 周廷儒. 古地理学. 北京: 北京师范大学出版社, 1982. 342
- 6 刘东生, 郭正堂, 吴乃琴, 等. 史前黄土高原自然植被景观: 森林还是草原? 地球学报, 1994, (3-4): 226~273
- 7 孙湘君, 宋长青, 王奉瑜, 等. 黄土高原南缘最近 10 万年来的植被. 植物学报, 1996, 38(12): 982~988
- 8 王守春. 论古代黄土高原植被. 地理研究, 1990, (1): 72~79
- 9 张信宝, 安芷生. 黄土高原地区森林与黄土厚度的关系. 水土保持通报, 1994, 14(6): 194~197
- 10 林本海, 安芷生, 刘荣谟. 最近 60 万年中国黄土高原季风变迁的稳定同位素证据. 见: 刘东生. 黄土·第四纪地质·全球变化. 北京: 科学出版社, 1992. 55~60
- 11 郭正堂, 刘东生, 安芷生. 渭南黄土沉积中 15 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
- 12 谢树成, 王志远, 王红梅, 等. 末次间冰期以来黄土高原的草原植被景观: 来自分子化石的证据. 中国科学, D 辑, 2002, 32(1): 28~35
- 13 吕厚远, 刘东生, 吴乃琴, 等. 末次间冰期以来黄土高原南部植被演替的植物硅酸体记录. 第四纪研究, 1999, 4: 336~349

14 夏正楷. 黄土高原第四纪水土流失的地质记录和基本规律. 水土保持研究, 1999, 6(4): 49~53

15 张丕远, 任国玉, 孙惠南, 等. 西北地区开发的历史经验及环境承载力. 见: 王绍武, 董光荣, 主编. 中国西部环境演变评估. 第一卷 中国西部环境特征及其演变. 北京: 科学出版社, 2002. 217~242

16 侯庆春, 韩蕊莲. 黄土高原植被建设中的有关问题. 水土保持通报, 2000, 20(2): 53~56

17 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 1037

18 Hou X Y. Vegetation of China with reference to its geographical distribution. Annals of the Missouri Botanical Garden, 1983, 70(3): 509~549

19 Liu K B, Lam N S. Paleovegetational reconstruction based on modern and fossil pollen data: An application of discriminant analysis. Annals of the Association of American Geographers, 1985, 75: 115~130

20 Prentice I C, Guiot J, Huntley B, et al. Reconstructing biomes from palaeoecological data: A general method and its application to European pollen data at 0 and 6000 ka. Climate Dynamics, 1996, 12: 185~194

21 Imbrie J, Kipp N G. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: Application to a late Pleistocene Caribbean core. In: Turekian K K, ed. The Cenozoic Glacial Ages. Yele: Yale University Press, 1971. 71~181

22 Bartlein P J, Prentice I C, Webb T III. Climatic response surfaces from pollen data for some eastern North American taxa. Journal of Biogeography, 1986, 13: 35~57

23 Guiot J. Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1990, 80: 49~69

24 Overpeck J T, Webb T III, Prentice I C. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: Dissimilarity coecients and the method of modern analogs. Quaternary Research, 1985, 23: 87~108

25 ter Braak C J F. Canonical correspondance analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. Ecology, 1986, 76(5): 1167~1179

26 Hall I H, Smol A J. A weighted averaging regression and calibration model for inferring total phosphorus concentration from diatoms in British Columbia (Canada) lakes. Freshwater Biology, 1995, 27: 417~434

27 Fritz S C, Juggins S, Battarbee R W, et al. Reconstruction of past changes in salinity and climate using a diatom-based transfer function. Nature, 1991, 352: 706~708

28 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 1~481

29 An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on Loess Plateau of central China during the last 130000 years. Quaternary Research, 1991, 36: 29~36

30 宋长青, 王奉瑜, 孙湘君. 内蒙古大青山 DJ 钻孔全新世古植被变化指示. 植物学报, 1996, 38: 568~575

31 宋长青, 吕厚远, 孙湘君. 中国北方花粉-气候因子转换函数建立及应用. 科学通报, 1997, 42(24): 2182~2186

32 Yu G, Chen X, Ni J, et al. Palaeovegetation of China: A pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. Journal of Biogeography, 2000, 27: 635~664

33 陈承惠, 林绍孟. 西安一钻孔剖面第四纪孢粉组合与古气候初步分析. 见: 第三届全国第四纪学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1982. 139~141

34 孙建中, 柯曼红, 魏明健, 等. 黄土高原晚更新世的植被与气候环境. 地质力学学报, 1998, 4: 30~41

35 陈发虎, 李吉均, 张维信. 兰州黄土地层研究. 见: 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991. 120~130

36 吕厚远, 吴乃琴, 刘东生, 等. 最近 15 万年以来宝鸡黄土剖面植物硅酸体组合所反映的季节性气候变化. 中国科学, D 辑, 1996, 26(2): 131~137

37 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体研究及应用. 北京: 海洋出版社, 1993. 1~228

38 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义. 中国科学, B 辑, 1994, 24(12): 1290~1297

39 夏敦胜, 马玉贞, 陈发虎, 等. 秦安大地湾高分辨率全新世植被演变与气候变迁初步研究. 兰州大学学报, 1998, 34(1): 119~127

40 巨天珍, 陈学林. 甘肃小陇山林区全新世中期以来古植被演替的研究. 西北植物学报, 1998, 18(2): 292~299

41 乌云格日勒, 刘清泗. 岱海游乐场孔孢粉分析及其 2500 年来的古气候演化. 干旱区资源与环境, 1998, 12(3): 21~27

42 李小强, 周卫键, 安芷生, 等. 沙漠/黄土过渡带 13 kaBP 以来季风演化的古植被记录. 植物学报, 2000, 42(8): 868~872

43 何炳棣. 黄土与中国农业的起源. 香港: 香港中文大学出版社, 1969. 1~228

44 朱士光. 黄土高原地区环境变迁及其治理. 郑州: 黄河水利出版社, 1999. 1~312

(2002-08-12 收稿, 2002-11-03 收修改稿)