

150 ka 来宝鸡黄土植物硅酸体组合季节性气候变化*

吕厚远 吴乃琴 刘东生 韩家懋 秦小光

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

孙湘君

王永吉

(中国科学院植物研究所, 北京 100093)

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

摘要 利用现代表层土壤中植物硅酸体组合与气候参数的回归关系, 研究了宝鸡黄土剖面约 150 ka 以来植被类型的演替及 1 月份、7 月份、年均降水和温度的变化, 探讨了季风气候在不同时期对该区影响强度的差别。

关键词 黄土 植物硅酸体 古季风

黄土高原古环境演化直接受冬、夏季风盛衰控制的观点已被越来越多的地质记录所印证^[1-3], 同时就其演化机制的动力因子和动力过程也提出了诸如“全球冰量驱动”、“青藏高原隆起”、“太阳辐射变化”、“双中心驱动”等假说^[2]。随着研究的深入, 我们更加关心黄土沉积中地质记录可以在多大空间、时间尺度(精度)上显示古季风的演化历史。本文在对我国 153 个表层土壤样品植物硅酸体组合进行系统定量研究的基础上, 选取陕西宝鸡黄土剖面 L2 顶部以上的地层, 做植物硅酸体分析, 对该区约 150 ka 以来季节性气候变化做初步探讨。

1 方法与材料

利用现代表层土壤(沉积物)中的生物组合与相对应的气候参数之间的相关关系, 定量估算化石组合中所蕴涵的古气候参数的方法, 已广泛应用在海陆相沉积物的许多生物门类中^[4]。然而, 由于不同的生物门类都有其特殊性, 人们也就更加警觉古气候转换方法中的假设、缺陷及可能的解决途径。作者对古气候转换中常用的物种最适度方法、Imbrie 和 Kipp 的转换函数方法^[5]、反应面方法^[6]以及 Webb 和 Bryson 的转换函数方法^[7], 分别进行了演算, 最后以 Imbrie 和 Kipp 方法为基础, 建立了比较适合植物硅酸体研究的转换函数。

上述方法都要有大量表层样品的支持, Imbrie 和 Kipp 利用了大西洋等海区 61 个表层样品^[5], Webb 和 Bryson 利用了美国中西部北区的 73 个表土样品^[7], 1993 年 Webb^[8]则增加到 851 个表层样品。在我国要采到各种环境下大量合格的土壤样品并不容易, 关键要求表土样品与现代气候条件相平衡。本文所采集的 153 个表层土壤样品的分布可参考吕厚远等图 1^[9]。

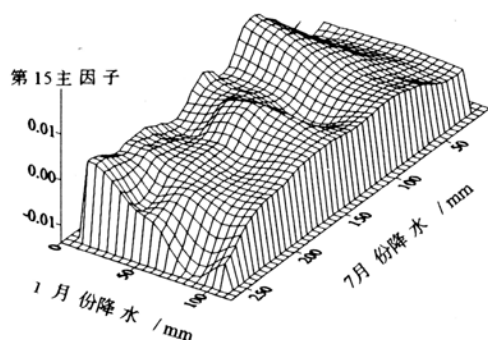


图 1 第 15 主因子与 1 月份、7 月份降水的对应关系

本文现代气候参数采用国家气象局 (1995) 全国各地 0.4 ka 每年、每月的降水、温度软件资料。前人对宝鸡黄土地层已作过许多工作^[1], 本文选择陕西宝鸡市陵辉村黄土剖面 L2 顶部以上的地层, 每 20cm 取样, 共采取 59 个样品, 实验室分析采用吴乃琴等的方法^[12]。

2 植物硅酸体分类与鉴定

通过对我国 200 多种现代植物的分析, 曾采用多级分类的方法^[10], 把植物硅酸体分为 120 余类, 然而, 目前国际上利用植物硅酸体进行地质学研究, 多采用简单的分类方案 (一般分为 10 多类)^[13], 在本文的研究中, 我们把植物硅酸体分为 25 类。主要有: (1) 蕨类植物类型; (2) 裸子植物类型; (3) 阔叶植物类型。以上 3 类采用近藤 (1978, 1981) 分类^[10]; (4) 亚铃型, 对应于 Twiss 的 Panicoid Class^[14] 和 Kondo 的 Panicoid Class^[13], 主要产于黍亚科; (5) 竹节型 (长鞍型), 对应于 Kondo 的 Bambusoid Class, 只产于竹亚科; (6) 短鞍型, 对应于 Twiss 的 Chloridoid Class 和 Kondo 的 Chloridoid Class, 主要产于画眉草亚科; (7) 多齿型, 对应于王永吉等^[10] III D2-3; (8) 弱齿型, 对应于王永吉等 III D4-6; (9) 齿型, 对应于王永吉等 III D。以上 3 类对应于 Twiss 的 Festucoid Class, 近藤 (1990) 的 Festucoid Class 类型 1 和 Kondo 的 Festucoid Class, 只产于早熟禾亚科; (10) 帽型, 对应于近藤 (1990) Festucoid Class 类型 2 只见于早熟禾亚科; (11) 有突起扇型, 对应于王永吉等 III H1, 只产于竹亚科; (12) 芦苇扇型, 对应于王永吉等 III H2-1a1, 只见于芦苇; (13) 无突起扇型; (14) 扇型。以上 2 类属于 Kondo Pan-Shape Class, 分别对应于王永吉等 III H2 和 III H, 产于温暖类型的禾本科植物; (15) 方型; (16) 长方型, 属于 Kondo 的 Pan-Shape Class, 分别对应于王永吉等 III I 和 III J, 在温暖环境生长的禾本科植物中产量较多; (17) 板状棒型; (18) 刺 (突) 状棒型; (19) 平滑棒型; (20) 棒型。以上 4 类属于 Twiss 的 Elongate Class, 分别对应于近藤 (1990) Elongate Class 中的相应小类, 王永吉等的 III K1, III K2-3 及 6, III K4-5 和 III K, 在寒冷的早熟禾亚科中最为丰富; (21) 长尖型; (22) 短尖型; (23) 尖型, 属于 Kondo Point-Shape Class, 分别对应于王永吉等 III LI~II I, III L II 2~III 和 III L, 主要产于在北方生长的禾本科植物表皮细胞中; (24) 团块型; (25) 条纹型, 对应于吴乃琴等中的团块型和条纹型, 王永吉等图版 10: 9 以及图版 17: 12。在干旱的藜科植物中产量丰富, 在我国西北干旱地区的表层土壤中大量出现。

目前, 植物硅酸体研究在综合恢复森林植物群落方面相对孢粉分析还有很大的差距。然而, 在研究以草本植物为主的植物群落方面具有孢粉分析无法相比的优势^[10]。在干草原中, 禾本科植物生产量占全部植物生产量的 60%~90%^[11], 植物硅酸体具有对禾本科植物区分到亚科、族、属甚至种的能力, 并且, 草本植物多数是一年生或季节性生长的植物, 在草原地区草地群落的演替一般只需要 0.1 ka 或更多一些时间^[11], 对气候变化比较敏感。

本文现代气候参数采用国家气象局

3 植物硅酸体转换函数的建立

3.1 对应分析

以 25 个植物硅酸体类型的百分含量作变量对 153 个表层样品做对应分析, 得特征值 λ 、特征向量 U 矩阵, Q -型因子载荷矩阵.

3.2 选取主因子

对应分析结果, 前 10 个主因子占总方差贡献的 90.1%, 前 20 个主因子占方差总贡献的 100%. 以往的方法, 只选取几个方差最大的主因子. 到底有没有环境意义, 没人深究. 事实上, 采用方差最大, 在数学上只是选取主因子的方法之一, 方差越小, 总体熵越小, 主因子的环境意义越具体^[15]. 以第 15 个主因子为例, 其方差只占总方差贡献的 0.8%, 但与 1 月份降水仍呈现出明显的负相关(图 1). 方差大的主因子反映了植物硅酸体组合变化的总体趋势, 方差小的主因子提取极端或局部环境信息. 因此, 我们采用全部 20 个主因子参与气候参数的逐步回归.

3.3 逐步回归

从回归方程中剔除次要的主因子? 采用不同的 $F1$ 和 $F2$ 值(选入和剔除因子的 F 检验临界值), 每增加 0.1 的步长, 从 0.1 到 7 进行 70 次计算, 选取回归离差最小、复相关系数最大的回归方程, 作为最终的转换函数. 分别如下:

$$Y_{[1\text{月降水}]} = 11.2 + 254.9X_1 + 94.1X_2 - 47.6X_3 + 47.5X_5 + 190.6X_6 + 135X_9 - 61.3X_{10} + 92X_{11} + 62.9X_{12} - 115.6X_{15} + 120.8X_{17} + 178.1X_{18} + 315.9X_{20},$$

$$Y_{[7\text{月降水}]} = 113.3 + 1023.1X_1 - 69.2X_2 + 313.8X_3 + 409.4X_5 - 194.4X_7 + 292.6X_8 + 629.3X_9 - 430.5X_{10} + 996.9X_{11} + 479.7X_{12} + 528.5X_{14} + 1061.2X_{15} + 859X_{16} + 357.7X_{17} + 1565.5X_{18} + 669.4X_{19},$$

$$Y_{[年降水]} = 588.6 + 7397.4X_1 + 1164X_2 + 1970.2X_5 + 2038.4X_6 - 636.2X_8 + 4767.5X_9 - 2054.1X_{10} + 5523.1X_{11} + 2070X_{13} + 2090X_{17} + 5873.8X_{18} + 4688.8X_{19} + 4857.3X_{20}$$

$$Y_{[1\text{月温度}]} = -3.5 + 113.9X_1 + 58.1X_2 - 35.3X_3 - 18.6X_4 + 11.4X_5 + 49.8X_6 - 29.7X_7 + 64.2X_9 - 58.7X_{10} + 27.9X_{11} + 33X_{13} - 91.5X_{15} + 79.7X_{17} + 66.3X_{18},$$

$$Y_{[7\text{月温度}]} = 24 + 31.4X_1 + 13.2X_2 - 7X_3 + 6.9X_6 - 29.5X_7 + 15.6X_9 + 17.6X_{11} + 45.5X_{13} + 19X_{14} - 35.7X_{15} + 24.7X_{17} + 58X_{18} - 35.8X_{19},$$

$$Y_{[年温度]} = 11 + 69.2X_1 + 39.9X_2 - 26.1X_3 - 7.4X_4 + 33.8X_6 - 32.7X_7 + 38.3X_9 - 42X_{10} + 22.6X_{11} + 36.2X_{13} - 79.2X_{15} + 51.4X_{17} + 58.2X_{18}.$$

$X_i (i=1, \dots, 20)$: 主因子.

3.4 地层样品植物硅酸体组合的准因子及古气候参数计算

利用表层样品的列向量之和 $R_i (i=1, \dots, p, p: \text{变量数})$, 变量总和 T , 求地层样品的协方差矩阵 $B=Z'Z$, 和 $Z' = \sum_{i=1}^p (X_{ij} - R_i \cdot X_{.j}/T) / \sqrt{R_i \cdot X_{.j}}$ (X_{ij} : 地层样品数据). 利用表层样品

的特征向量矩阵 U 求地层样品的单位向量矩阵: $V=Z'U$. 利用表层样品的特征值矩阵 λ 求地层样品的准因子: $G=V\sqrt{\lambda}$. 检验地层样品准因子计算正确与否, 可用任意几个表层样品数据假设为地层样品进行准因子计算, 其结果应与原来的计算结果完全一致. 用地层样品的准因子分别代入上述 6 个回归方程, 计算 1 月、7 月、年均降水量和温度参数.

3.5 地层样品古气候误差范围计算

采用 Sally Howe(转引文献[16])的方法,计算了与 95% 置信区间相对应的约 150 ka 以来 1 月、7 月、年均降水量与温度的误差范围。例如:所得年均降水量最大误差范围为 6 ± 101 mm, 最小误差范围为 ± 34 mm, 1 月份温度的最大误差范围为 $\pm 2.2^\circ\text{C}$, 最小误差范围为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

4 150 ka 来宝鸡黄土剖面植物硅酸体组合特征及古气候变化

图 2 为宝鸡黄土剖面 13 种主要的植物硅酸体变化图式。图 3 为通过转换函数计算的约 150 ka 来 1 月、7 月、年均降水量和温度的变化曲线和经过 F 检验的 95% 的置信区间。

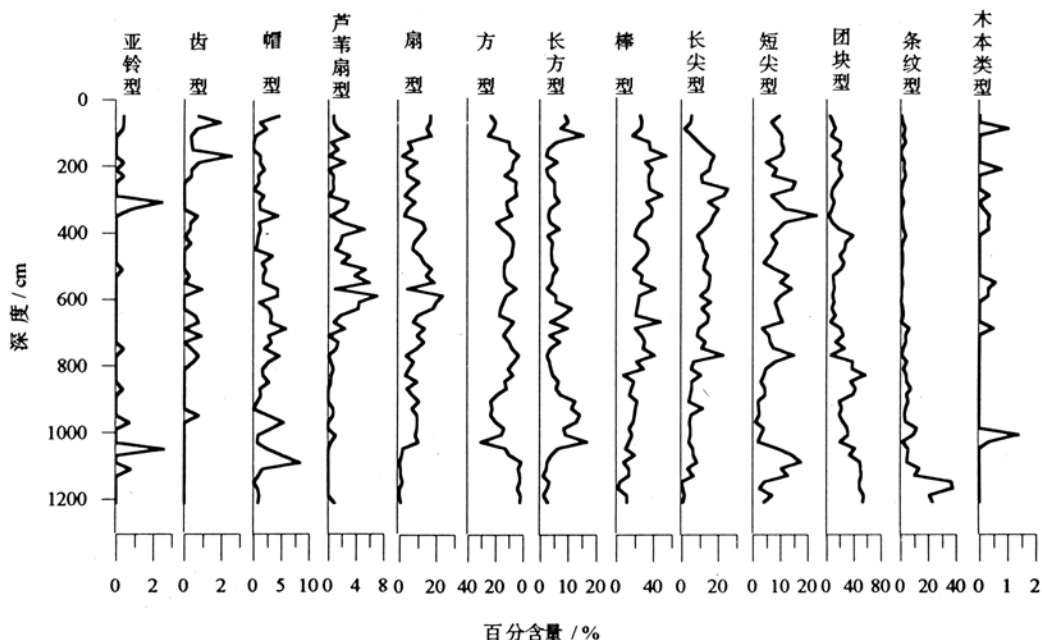


图 2 宝鸡黄土剖面 13 种主要的植物硅酸体变化图式

(1) 在 L2 顶部,植物硅酸体组合以在我国西北干旱区占优势的团块型、条纹型为主,帽型、短尖型大量出现。方型、亚铃型含量近于零。年均温度在 7°C 左右,年均降水量不到 200 mm, 1 月温度在 -10°C 以下,植被属于微冷极干的草原化荒漠类型(草地分类依据文献[11, 17],下同),是典型的大陆性气候,当时夏季风可能没有任何影响。

(2) 进入 S1 阶段,植物硅酸体组合以反映温暖、湿润的方型、长方型、亚铃型为主,扇型含量增加,短尖型、团块型、条纹型含量减少,有少量木本硅酸体。发现竹子硅酸体^[18],年均温度在 $14 \sim 17^\circ\text{C}$,年均降水量在 $800 \sim 1100$ mm, 1 月温度在 $3 \sim 5^\circ\text{C}$,单从草地类型分析,属于温暖湿润的暖温带-亚热带草丛类,这类草地伴有阳性乔木和灌木生长。目前我国温暖带季风影响区,6~9 月份降水量一般占全年降水量的 50%~60% 左右,从 S1 阶段 7 月份降水量(150 mm 左右)占全年降水量的比例并不大分析,当时夏季风 1 年之中可能会在此地持续较长时间。从图 3 可以看出,在 S1 阶段有两次明显的气候变冷期,生态及水热条件相对恶化。

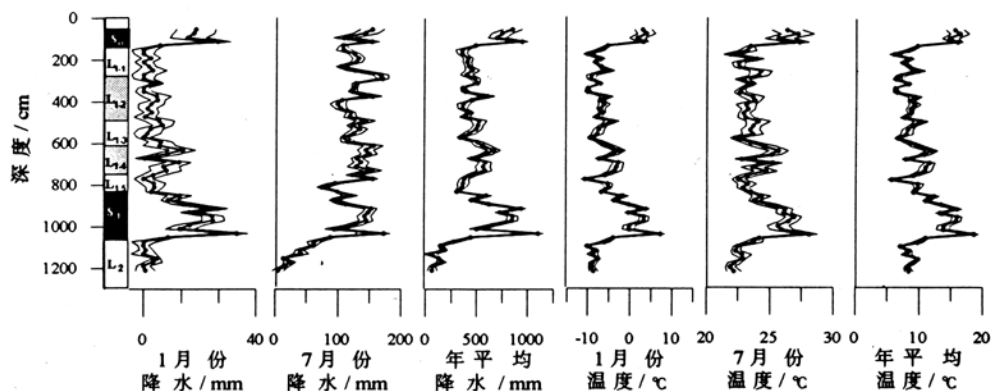


图3 宝鸡黄土剖面约 150 ka 来 1 月、7 月、年均降水量和温度的变化曲线
粗线为回归估算值, 两侧细线是 95% 的置信区间

(3) 在 L1-5 阶段, 反映温暖的植物硅酸体类型含量减少, 寒冷、干旱类的齿型、棒型、长尖型、短尖型、团块型含量增加。年均温在 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$ 左右, 降水量在 400 mm 左右; 1 月份温度在 $-7 \sim -10^{\circ}\text{C}$, 降水量近于零; 7 月份温度在 22°C 左右, 降水量在 80 mm 左右。草地类型属于微温微干的干草原类, 春季酷旱, 仅 7 月份降水量就占全年降水量的 1/4 左右, 说明夏季风 1 年之中在此地的持续时间并不长, 可能接近当时夏季风所能影响的北界。

(4) L1-4 ~ L1-2 阶段, 团块型明显减少, 扇型含量增加, 温暖和寒冷的类型多次交互消长, 但变化幅度不大, 总的趋势是温湿型逐渐减少, 干冷型逐渐增加, 芦苇扇型在中期达到最高值。年均温度从 $11 \sim 12^{\circ}\text{C}$ 逐渐降到 $8 \sim 9^{\circ}\text{C}$, 在 L1-3 阶段最低降到 7°C 左右, 年降水量从 600 mm 逐渐降到 400 mm 左右; 7 月份降水量多次起伏变化, 但并没有逐渐减小的趋势, 这种随着年降水量的减少 7 月份降水量总的趋势并不减少的现象, 只能说明夏季风在此维持的时间越来越短, 从 7 月份降水量多次起伏变化表明, 在这个时期夏季风时强时弱。植被类型以微温、微润、微干的典型草原、干旱草原交替演变为主。在 L1-3 阶段, 水热条件相对差一些。

(5) L1-1 阶段, 植被类型与气候条件和 L1-5 阶段相似。

(6) S0 阶段, 顶部近 50 cm 没有采样, 下部方型、长方型、扇型明显增多, 长尖型、团块型减少, 棒型减少不明显, 齿型、帽型、亚铃型都有一定的含量, 年均温在 $14 \sim 16^{\circ}\text{C}$ 左右, 年降水量 700 ~ 800 mm 左右。现在宝鸡市年均温 13°C , 年降水量 710 mm。故比现在相对温暖湿润。

5 问题讨论与结论

(1) 宝鸡黄土剖面约 150 ka 以来的气候变化趋势与深海氧同位素变化比较(图 4), 可以看出, 在黄土高原地区“轨道尺度”上的气候变化确实受到全球冰量变化的控制。

(2) 在 L2 顶部沉积阶段, 没有夏季风的影响, 是典型的内陆气候环境, 完全不同于 S1 以来的气候特点, 在 S1 阶段的 3 次气候温暖期, 夏季风影响最为显著, L1-5 和 L1-1 阶段仍有夏季风的影响, 是处于夏季风影响最弱的时期, 可能接近夏季风影响的北界, 在 L1-4 ~ L1-2 阶段夏季风时强时弱, 总的趋势是一年之中夏季风维持的时间越来越短。

(3) 根据方差越小总体熵越小的推论, 验证了方差小的主因子对个别气候参数仍有相关

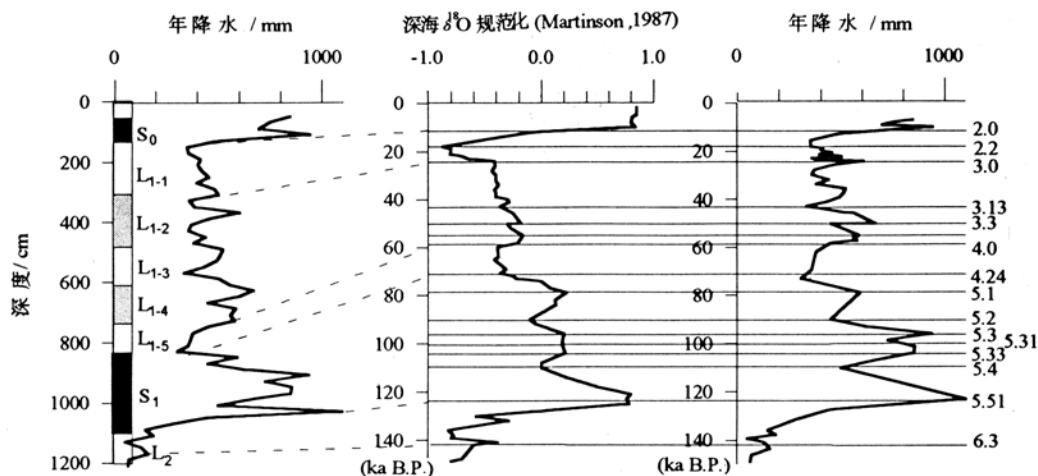


图 4 宝鸡黄土剖面约 150 ka 以来的气候变化与深海氧同位素变化的对比

性,进而利用全部主因子参与逐步回归,是本文建立转换函数的一个重要特点.

参 考 文 献

- 1 安芷生,吴锡浩,汪品先等.末次间冰期以来中国古季风气候与环境变迁.见刘东生主编.黄土·第四纪·地质全球变化.北京:科学出版社,1992. 14~30
- 2 丁仲礼,余志伟.第四纪时期东亚季风变化的动力机制.第四纪研究,1995, (1): 63~74
- 3 郭正堂,刘东生,安芷生.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
- 4 魏国彦.利用微体古生物推算古温度的新发展.海洋地质与第四纪地质,1993, 13(2): 12
- 5 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. New Haven: Yale University Press, 1971. 71~181
- 6 Bartlein P J, Prentice I, Webb III T. Climatic response surfaces from pollen data for some Eastern North American Tax. Journal of Biogeography, 1986, 13: 35~57
- 7 Webb III T, Bryson R A. Late and postglacial climate change in the Northern Midwest, USA: quantitative estimates derived from fossil pollen spectra by multivariate statistic analysis. Quat Res, 1972, (2): 70~115
- 8 Webb III T, Patrick J B, Sandy P H *et al.* Vagitation, lake levels, and climate in Eastern North America for the past 18 000 Years. In: Wright H E eds. Global climates since the last glacial maximum. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1993. 415~467
- 9 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): 1 290~1 297
- 10 王永吉,吕厚远.植物硅酸体研究及应用.北京:海洋出版社, 1993
- 11 北京农业大学主编.草地学.北京:农业出版社, 1982. 137
- 12 吴乃琴,吕厚远,孙湘君等.植物硅酸体-气候因子转换函数及其在渭南晚冰期以来古环境研究中的应用.第四纪研究, 1994, (3): 270~279
- 13 Kondo R, Child C, Atkinson I. Opal phytoliths of New Zealand: Manaaki Whenua Press, 1994
- 14 Twiss P C, Suess E, Smith R M. Division S-5 — soilgenesis, morphology, and classification (morphological classification of grasses phytoliths). Soil Sci Amer Proc, 1969, 33: 109~115
- 15 边肇祺.模式识别.北京:清华大学出版社, 1988. 208~209
- 16 王开发,徐 馨.第四纪孢粉学.贵阳:贵州人民出版社, 1988. 81~92
- 17 甘肃农业大学主编.草原调查与规划.北京:农业出版社, 1985
- 18 吕厚远,吴乃琴,聂高众.关中盆地黄土地层中竹子植物硅酸体化石的发现及意义.科学通报, 1994, 39(24): 2 254~2 259