

大同盆地全新世以来孢粉特征和环境演变

范淑贤¹⁾ 刘海坤¹⁾ 周建柱²⁾ 童国榜¹⁾ 毕志伟¹⁾

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;

2) 河北省国土资源厅矿产资源储量评审中心, 河北石家庄 050031

摘要 通过对大同盆地东水头剖面孢粉植物群分析研究, 揭示了全新世气候环境的演变特征。结果表明: 全新世以来草本植物始终占据优势地位, 落叶阔叶植物和针叶植物虽然有时在木本植物中出现高峰, 但仍然未形成稳定的森林景观。该区植被类型是以疏林草原和草原植被为主, 气候温暖偏干。全新世大暖期在 8.5~4 kaB. P. 间, 气候不稳定, 气候波动明显, 与黄土高原地区具有良好的可比性。

关键词 大同盆地, 全新世, 孢粉, 植物群

Spore and Pollen Characteristics and Environment Evolution in Datong Basin Since Holocene

FAN Shuxian¹⁾ LIU Haikun¹⁾ ZHOU Jianzhu²⁾ TONG Guobang¹⁾ BI Zhiwei¹⁾

1) Institute of Hydrogeology and Environment Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061;

2) Centre of Mineral Reserves Examination and appraisal, Hebei Bureau of Land and Resources, Shijiazhuang, Hebei 050031

Abstract Based on a study of the spore-pollen flora from the Dongshuitou section of Datong basin, the authors revealed evolutionary characteristics of the climatic environment in Holocene. The results indicate that the herb has been dominant all the time since Holocene. Although the deciduous and broad-leaf plants and the coniferous plants sometimes possessed important positions in the woody plants, they have not yet formed the stable forest landscape. The vegetation types in the study area are dominated by veld and grassland plants, suggesting a warm and dry climate. The megathermal period of the Holocene lasted from 8.5 kaB. P. to 4 kaB. P. when the climate was unstable, which has good comparability with that of the Loess Plateau.

Key word Datong basin, Holocene, spore and pollen, plant community

大同盆地位于黄土高原的东北部(山西省雁北地区),呈北东—南西向展布。该盆地属构造差异性升降运动而形成的晚新生代断陷盆地。盆地东部分布 20 余个孤立的火山堆,构成我国著名的第四纪火山群之一(大同火山群)(图 1)。自上世纪 50 年代以来,一些学者曾对该火山群形成的地质、年代及火山岩特征进行较多研究(曹家欣,1959;李虎候等,1984;陈文寄等,1992;秦大军等,1994;李树德等,1995;张世民等,1997;刘海坤等,2006),并取得了许多有价值的科研成果。然而,对该区域全新世以来古气候环境研究较少。为此,作者选择东水头

剖面作为研究对象,旨在揭示全新世以来孢粉植物群的历史及古气候、古环境演化规律,为恢复大同盆地全新世以来古气候古环境及全球变化对比提供孢粉学依据。

1 自然环境

研究区属温带半干旱季风区,四季分明,春冬寒冷干燥,秋夏温暖多雨,年均温度 6.6℃,年均降水量 400 mm 左右,年蒸发量 1152 mm,干燥度 2.2。本区在植被区划中处于温带半湿润落叶阔叶—草甸亚高山地带(中国植被编辑委员会,1983),代表性

本文由国家自然科学基金项目“黄土高原东北部中更新世以来气候变化与全球变化对比”(编号:49171064)资助。

责任编辑:刘志强;收稿日期:2007-09-07;改回日期:2007-11-10。

第一作者简介:范淑贤,女,1957年生,副研究员,主要从事第四纪孢粉、环境地质研究;E-mail: Fshuxian@yahoo.com.cn。

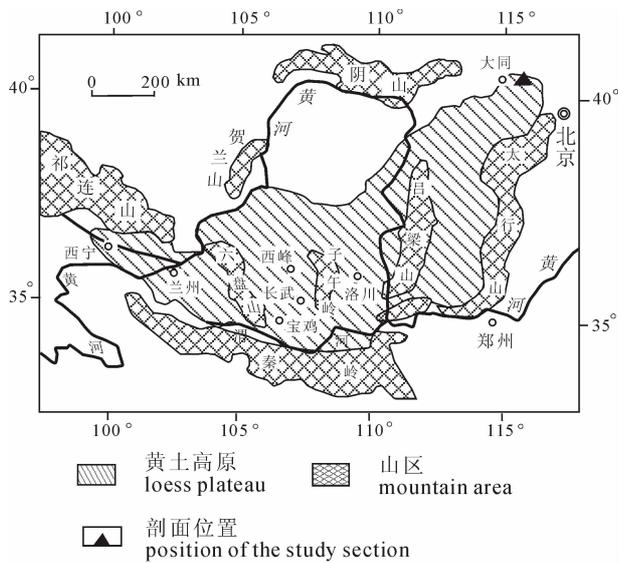


图1 大同盆地火山群区域地质与剖面位置示意图

Fig 1 The volcanic group regional geological sketch map and position of study section in Datong basin

群种有长芒草(*Stipa bungeana*)、蒿(*Artemisia*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)等,由于人类长期的农业开垦活动及地表侵蚀,原始植被荡然无存。栽培植物遍布全区,主要有小麦、玉米、谷子、土豆、甜菜及各种豆类,路边及田间的防护林及果木树种有杨(*Populus*)、柳(*Salix*)、榆(*Ulmus*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、枣(*Ziziphus*)、苹果(*Malus*)等。

2 地层剖面与时代

研究剖面位于大同盆地东部阳高县东水头村水眼沟上游沟头处。剖面总厚6 m,其岩性特征由上而下为:

全新统(Q₄)

0—0.2 m 灰黑色亚砂土,为近代耕作土(人工扰动层);

0.2—1.9 m 为灰黑色亚粘、亚砂土,具壤化(黑垆土)。

中下部钙质略富集,偶见白色钙质小斑点;

1.9—2.8 m 为浅褐灰色含粘土粉砂,夹薄层粘土条带。

底部含土黄色粘土质粉砂小碎块;

2.8—3.5 m 为深灰色砂砾与含粘土砂、粉砂互层。砂砾成分以玄武岩、片麻岩为主,呈棱角、次棱角状;砂土中具水平层理;

3.5—4.1 m 为土褐色少含粘土粉砂,偶夹小碟状砂砾透镜体;

4.1—4.3 m 为灰褐色含砂粘土,见炭屑;

4.3—5.5 m 为黑色少含粘土粉砂,具壤化(黑垆土)。

下部钙质渐富集;

5.5—6.0 m 为灰褐色粘土质粉砂,夹薄层粘土条带,显水平层理;

为了确定地层的沉积年代,在该地层剖面采集了3个¹⁴C测年样品。深0.6 m处年龄为(4114 ± 110) aB. P.,深1.8 m处年龄为(6619 ± 95) aB. P.,5.35 m处年龄为(10167 ± 81) aB. P. (¹⁴C测年是由中国地质科学院水文地质环境地质研究所同位素实验室完成)。利用三点的测年数据,结合地层的岩性、岩相特征,采用内差、外推计算方法,估算该剖面地层约形成于全新世早—中期的11~3 kaB. P.左右。

3 孢粉组合特征

在东水头剖面共采集58块孢粉样品,采样距为10 cm左右。每块样品取样100 g,外加石松孢子,对样品采用盐酸去除钙质和氢氧化钠去除腐殖质,再用碘重液分离。最后在生物显微镜下鉴定和统计。共鉴定7908粒,平均每个样品统计至172粒。根据孢粉科属类型及百分含量和浓度在剖面上的变化,可划分为5个孢粉组合带(图2)。

孢粉带 I:剖面深度6.0~5.6 m,年代为11.0~10.4 kaB. P.;总孢粉浓度在本剖面中最高,平均浓度为172.3粒/g,变化幅度不大;草本花粉含量占优势,以蒿属为主,最高占79.3% (86.4粒/cm³),其次是藜科(Chenopodiaceae)为27.0%~5.3% (9.6~21.8粒/g)、菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)、毛茛科(Ranunculaceae)、豆科(Leguminosae)、麻黄属(*Ephedra*)、唇形科(Labiatae)等;木本花粉占23.7%~3.3% (41~3.6粒/g),以松(*Pinus*)为主,占18.3% (31粒/g),椴属、栎属零星分布,表明了末次冰期结束以后植被仍以松和蒿为主,形成草原的环境,气候冷干。

孢粉带 II:剖面深度5.6~4.5 m,年代为10.4~9.0 kaB. P.;孢粉总浓度为121.3~183.6粒/g,花粉的科属类型较多,植被的覆盖率高。草本花粉含量占绝对优势,一般为78.4%~90.5% (104.2~150粒/g),草本花粉中的蒿和藜占草本花粉80%以上,还有少量的禾本科、菊科、毛茛科、唐松草属(*Thalictrum*)、豆科、十字花科(Cruciferae)等;木本花粉中落叶阔叶明显增加,特别是栎属(*Quercus*)和椴属(*Tilia*)增加最显著,松属、榆属、桦属、桤木属(*Alnus*)等连续出。说明这段时期栎、椴、桦、榆增加较快,且蒿和藜比较平稳,反映了当时气候条件和植被状况有所改善,由于气温升温较快,造成气候湿

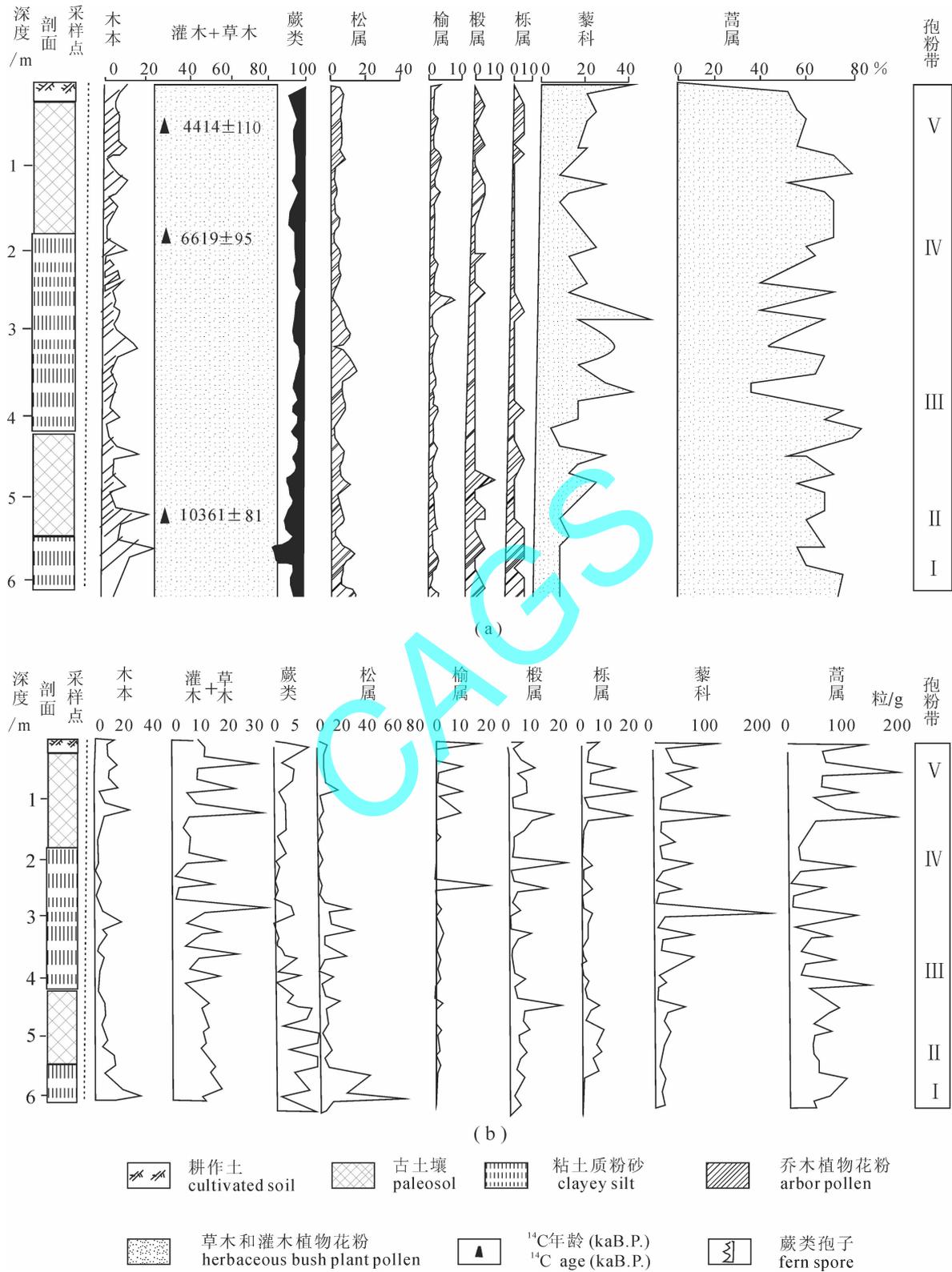


图2 大同盆地东水头剖面孢粉百分数(a)及孢粉浓度(b)图

Fig. 2 Spore-pollen percentage (a) and concentration diagram (b) of Dongshuitou section in Datong Basin

度并不大。因而形成以稀疏落叶阔叶乔木与草原伴生的植被。

孢粉带Ⅲ:剖面深度 4.5~3.0 m,年代为 9.0~7.4 kaB. P.;孢粉平均浓度在本剖面中最低,但变化范围大,平均浓度为 57.1 粒/g,从孢粉的百分比来看,草本植物花粉仍占绝对优势,含量占 98.9%~90.1% (101.7~38.5 粒/g),仍以蒿属为主,含量占 89%~65% (86.3~19.8 粒/g) 其次是藜科、禾本科、毛茛科、菊科、唐松草属、豆科、十字花科等;木本喜凉松有所增加,以松属为主,椴属、栎属、桦属、榆属、臭春属 (*Ailanthus*) 等少量分布;在这一阶段草本中的蒿和藜相互消长,反映了当时气候十分不稳定,该区经历一次由冷干到强干的发展过程,植被为草原。

孢粉带Ⅳ:剖面深度 3.0~0.8 m,年代为 7.4~4.1 kaB. P.;总孢粉浓度变化较大,一般浓度为 118.8~15 粒/g,草本植物花粉仍占绝对优势,其含量占 95.8%~88.5% (1103~15 粒/g),草本蒿属占绝对优势,其含量占 77.6%~66.2% (46.4~35.5 粒/g),还有少量的藜科、禾本科、菊科、毛茛科、唐松草属等,木本花粉数量有所增加,占 8.2%~1.7% (5.5~1.1 粒/g),花粉有椴属、栎属、松属、桦属、胡桃属、柳属等。该时期喜暖的落叶阔叶树种增多,耐干蒿属减少,形成了以落叶阔叶树和蒿为主的植被为疏林草原。气候温暖湿润。

孢粉带Ⅴ:剖面深度 0.8~0.2 m,年代为 4.1 kaB. P. 至 3.0 kaB. P. 左右;花粉类型明显增多,植被比较丰富。总孢粉浓度再次上升为 124.7~102.9 粒/g。草本仍以蒿属和藜科占绝对优势,最高占 62% (71 粒/g) 和 26.1% (32.7 粒/g),藜科增加,蒿属有所下降;还有少量禾本科、毛茛科、菊科、唐松草属、豆科、茜草科 (*Rubiaceae*)、十字花科、唇形科、葎草属 (*Humulus*) 等,水生湿生草本有莎草属 (*Cyperus*);乔木花粉以椴属、松属为主,占 5.7% (4.3 粒/g) 和 4.2% (4.9 粒/g),其次是栎属和榆属等;植被是以松、藜增加明显,说明气候在逐渐变凉。

4 结果与分析

综上所述,东水头剖面 5 个孢粉带揭示了大同盆地约 6 m 厚的沉积物中记录古植被古气候及古环境变化有以下特点:

(1) 在对 58 块样品的孢粉观察、鉴定和统计过程中发现每块样品的孢粉(浓度)含量都很低,植物

科属类型单调。落叶阔叶乔木树种的花粉含量高于针叶树种花粉的含量。草本植物花粉科属类型较多,稳定分布且占绝对优势,特别是蒿和藜在整个剖面占有相当的比例。水生湿生草本很少见,仅在 0.8~1.6 m 间见到几粒,蕨类植物科属类型单一且含量低。

根据孢粉百分比和浓度图谱的变化特点,剖面自下而上共分 5 个孢粉带。其中孢粉带Ⅰ和Ⅱ为早全新世,孢粉带Ⅲ和Ⅳ、Ⅴ为中全新世。与其相对应古环境变化规律是:全新世早期 11.0~10.4 kaB. P. 间,孢粉科属单调,主要是以松和蒿为主,显示本区出现一个明显的降温的过程,从其年龄和气候环境分析,这与较为公认的界于 11.0~10.0 kaB. P. 之间新仙女木事件(YD)(刘嘉麒等,2001)相当,它代表了晚冰期进入全新世过度的急剧升温过程中一次快速变冷事件。10.4~9.0 kaB. P. 间,气候具有波动上升的特点,孢粉浓度有所减少,但波动频繁。乔木中椴、栎、榆等落叶阔叶成分逐渐升高,针叶树的百分含量减小,说明温度在逐渐增加,这一特点与贵州荔波董歌洞石笋记录表明 11.3~9.0 kaB. P. (覃嘉铭等,2004)、云南洱海湖泊沉积岩芯多环境指标分析得出的云南洱海地区 10.329~8.399 kaB. P. (沈吉等,2004)、神农架大九湖日历效正年代 9.218~7.530 kaB. P. (朱诚等,2006)可对比,说明这一时期,气候由冷到暖的突变以后,全新世初期的缓慢升温过程,这种波动升温的过程具有普遍性。9.0~7.4 kaB. P. 期间,孢粉浓度在整个剖面最小,气候以干为主,植被以蒿、藜为主,针叶松有所增加,早期孢粉以草本蒿为主,气候冷干,中部以藜为主,反映了气候逐渐由冷干向强干的方向发展。7.4~4.114 kaB. P. 间,孢粉浓度有所增加,但数量变化大,木本植物、中早生草本有较大增加,水生草本和蕨类孢子在本阶段亦出现。植被以落叶阔叶树种和蒿为主,气候温暖湿润,且波动频繁,代表了全新世的气候最佳期。4.0~3.0 kaB. P. 左右,植被单一,以耐旱的蒿、藜、麻黄等占据绝对优势,气候开始向干方向转化,接近于现代。

(2) 东水头剖面孢粉所记录了该区早、中全新世(11.0~3.0 kaB. P.)时期冷暖波动频繁的气候规律,根据孢粉组成的数量消长表现得非常频繁,说明全新世气候极不稳定。本区存在着两次相对较温暖湿润和 3 次较冷干气候变化过程。其时间分别为 10.0~9.0 kaB. P.、7.4~4.0 kaB. P. 左右反映的气

候相对温暖湿润,而时间约为 11.0 ~ 10.0 kaB. P., 9.0 ~ 7.4 kaB. P. 及 4.0 ~ 3.0 kaB. P. 左右气候冷干。这种变化过程与西北内陆干旱区黄土高原西部区临夏塬堡黄土剖面(陈一萌等,2004)相接近。全新世高温期 7.4 ~ 4.1 kaB. P. 间气候表现更不稳定,具有百年尺度的快速降温变干的过程,乔木花粉迅速显著减少,耐干旱的草本特别繁盛,且波动强烈。这种降温过程与黄土高原周边地区山地暗针叶林向平原扩展,冷杉、云杉林再次繁盛记录相对比。与黄土高原岐山全新世冷干也颇相近(陈云,1999),反映了黄土高原全新世的高温期气候变化的区域性特征。

综观东水头剖面孢粉组合变化可以得出,剖面从下到上均以疏林草原和草原为主,草本植物始终占据组合的优势地位,表明该区疏林草原和草原植被持续繁盛。落叶阔叶植物和针叶植物虽然有时在木本植物中出现高峰,但仍然未形成稳定的森林景观。喜干的植物花粉在剖面上下均出现较高含量,在组合中占有突出的地位,说明该区气候总体上处于干旱—半干旱状态。根据喜温湿的落叶阔叶植物和其他乔木植物、湿生水生植物及蕨类植物在剖面上的变化特征,可以进一步认为,该剖面下部在相对干旱的背景下显示出一定温暖潮湿气候环境。剖面中部在 9.0 ~ 7.4 kaB. P. 则为干旱稳定发展期,成为全剖面干旱程度最强,温度较低的时期,而剖面上部又表现出温度和湿度略有升高的趋势,顶部显现出变干燥的趋势。总之,大同盆地全新世孢粉植被特征反映出以干为主气候演化特点。

5 结论

经对大同盆地东水头剖面全新世早、中期孢粉植物群的演化规律的研究,参考地层岩性、测年资料,我们将该剖面的孢粉分析结果划分了 5 个孢粉带。孢粉带反映该剖面古植被由草原—针阔叶疏林草原—干草原—针阔叶疏林草原—草原,相对应气候环境由冷干—温暖偏干—强干—温暖潮湿—温凉偏干演化规律。其演化规律可与区域地质环境对比。该剖面孢粉植物群反映的古植被古气候环境演化规律,在我国黄土高原北部地区具有一定的代表性。

参考文献

曹家欣. 1959. 大同盆地东部的新构造运动与火山活动. 中国第四纪研究, 2(2): 60 ~ 68.

- 陈文奇, 李大明, 戴潼漠, 等. 1992. 大同第四纪玄武岩的 K-Ar 年龄和过剩氩. 见: 刘若新主编. 中国新生代火山岩的年龄和地球化学. 北京: 地震出版社, 81 ~ 92.
- 陈一萌, 陈发虎, 陈兴盛, 等. 2004. 中国干旱、半干旱区末次冰期以来气候变化规律. 干旱区地理, 27(2): 161 ~ 165.
- 陈云, 李铮华, 赵景波, 等. 1999. 全新世高温期气候不稳定性记录. 海洋地质与第四纪, 19(3): 97 ~ 103.
- 李虎侯, 孙建中. 1984. 用热释光年龄研究大同火山活动的时代. 中国科学(B辑), 14(7): 637 ~ 644.
- 李树德, 徐海鹏. 1995. 山西省大同火山群碎屑沉积特征. 沉积学报, 13(增刊): 151 ~ 155.
- 刘海坤, 张玉方, 范淑贤, 等. 2006. 黄土高原东北部古土壤微结构特征及其古气候意义. 地球学报, 27(增刊): 318 ~ 321.
- 刘嘉麒, 倪云燕, 储国强. 2001. 第四纪的主要气候事件. 第四纪研究, 3(21): 239 ~ 247.
- 秦大军, 邓晋福, 莫宣学, 林培英. 1994. 大同火山群新生代火山岩成因相平衡实验约束. 岩石矿物学杂志, 13(1): 1 ~ 9.
- 沈吉, 杨丽原, 羊向东, 等. 2004. 全新世以来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录. 中国科学(D辑), 34(2): 130 ~ 138.
- 覃嘉铭, 袁道先, 程海, 等. 2004. 新仙女木及全新世早、中期气候突变事件: 贵州茂兰石笋氧同位素记录. 中国科学(D辑), 34(1): 69 ~ 74.
- 张世民, 窦素芹, 杨景春. 1997. 大同盆地第四纪火山群的活动特点. 见: 地壳构造与地壳应力研究(10). 北京: 地震出版社, 103 ~ 111.
- 中国植被编辑委员会. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社, 917 ~ 955.
- 朱诚, 马春梅, 张文卿, 等. 2006. 神农架大九湖 15.753 kaB. P. 以来的孢粉记录和环境演变. 第四纪研究, 26(5): 815 ~ 826.

References

- Cao Jiixin. 1959. Neotectonic movements and volcanic activity in the southeast of the Datong Basin. Quaternaria Sinica, 2(2): 60 ~ 68 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yimeng, Chen Fahu, Chen Xingsheng, et al. 2004. Laws of Climate change in arid and semiarid zones of China since Last Glacial period. Arid land geography, 27(2): 161 ~ 165 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yun, Li Zhenghua, Zhao Jingbo, Zhang Junpai, Jia Yankun. 1999. Climatic instability record of megathermal period in Holocene. Marine Geology & Quaternary Geology, 19(3): 97 ~ 103 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wenji, Li Daming, Dai Tongmo, et al. 1992. The K-Ar age and excess Ar of Quaternary basalt in Datong. In LIU Ruo-xin (ed). The Age and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rock in China. Beijing: Seismological Press, 81 ~ 92 (in Chinese).
- Editing Board of China Vegetation. 1980. China Vegetation. Beijing: Science Press, 917 ~ 955 (in Chinese).
- Liu Haikun, Zhang Yufang, Fan Shuxian, et al. 2006. Study on relation between microstructure of paleoclimate changes in northeast of the lo-

- ess plateau. *Geoscientica Sinica*, 27 (Sup): 318 ~ 321 (in Chinese with English abstract).
- Li Huhou, Sun Jianzhong. 1984. Studies Dating volcanic activity with the thermoluminescent age the time. *Science in China (Ser. B)*, 14 (7): 637 ~ 644 (in Chinese with English abstract).
- Li Shude, Xu Haipeng. 1995. Deposition Charactics of Volcanic Debris of Datong Volcano Group in the Easten Part of China. *Sedimentological Sinica*, 13 (Supp.): 151 ~ 155 (in Chinese with English abstract).
- Qin Dajun, Deng Jingu, Mo Xuanxue Lin Peiyang. 1994. Constraints of Phase Equilibrium Experiments on the Origin of Cenozoic Volcanic Rocks in the Datong Vocanic Cluster. *Petrologica et Minerralogica*, 13(1): 1 ~ 9 (in Chinese with English abstract).
- Shu Cheng, Ma Chunmei, Zhang Wenqing, et al. 2006. Pollen record from dajiuhu basin of Shennongjia and environmental Changes Since 15.753 kaB. P. *Quaternary sciences*, 26 (5): 815 ~ 826 (in Chinese with English abstract).
- Shen Ji, Yang Liyuan, Yang Xiangdong, et al. 2004. Lake sediment record of climate changes and human activity in Er hai Valley of Yunnan province since the Holocene. *Science in China (Ser. D)*, 34 (2): 130 ~ 138 (in Chinese with English abstract).
- Tan Jiaming, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. 2004. The climate sudden change event-Younger dryas in early-middle Holocene: stalagmite oxygen isotope record of Mao lan in Guizhou prov. *Science in China (Ser. D)*, 34 (1): 69 ~ 74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shimin, Dou Suqin, Yang Jingchun. 1997. Characteristics of the Datong Quaternary volcano group. In: *Crustal Structures and Crustal Stress* (10). Beijing: Seismological Press, 103 ~ 111 (in Chinese).

俄罗斯全俄地质研究所所长奥雷格·彼得洛夫教授 荣获 2007 年度中国政府“友谊奖”

经国家“友谊奖”评审委员会评审决定,由我院推荐、国土资源部申报的俄罗斯全俄地质研究所所长奥雷格·彼得洛夫(Oleg Petrov)教授荣获 2007 年度中国政府“友谊奖”。这是由我院推荐的第八位获此殊荣的外国专家。

奥雷格·彼得洛夫教授现任俄罗斯全俄地质研究所所长,兼任世界地质图委员会北欧亚分会副主席和俄罗斯联邦自然资源部总编辑委员会主席。因其卓越的学术成就曾获得俄罗斯联邦荣誉地质学家的称号。

自 2001 年 7 月我院与全俄地质研究所签署“中俄合作编制 1:250 万亚洲中部及邻区地质图系合作协议书”以来,彼得洛夫所长在项目实施的五年中起了关键作用,为该项目的顺利实施和加强中俄科技合作与友谊做出了突出贡献。

该项目的顺利实施还为解决两国长期悬而未决的重大基础地质问题——“全球中元古代地质年代的底界究竟以 18 亿年为准(以中国为代表)还是以 16 亿年为准(以俄罗斯为代表)”。在实地考察和共同研究的基础上,各国的项目成员一致认为:两国的中—新元古界地层层序可以对比,中方将中元古界

底界年代确定为 18 亿年的依据是充分的。这为国际地层委员会前寒武纪分会今后做出将中元古界底界的年龄由 16 亿年修改为 18 亿年的决定,奠定了良好基础。而彼得洛夫所长为使这项对比工作取得圆满的结果,起了极为重要的保障作用,而且也反映出他尊重科学,实事求是的科学家的职业品质和宽阔的胸怀。

以彼得洛夫所长为首的俄方科学家与中方科学家之间,不仅在工作中合作融洽、配合默契,同时个人之间也都建立了相互信任和深厚的友情。尤其是通过彼得洛夫所长良好的“桥梁”作用,使中俄合作已经远远超出了编图项目本身。更为重要的是,中俄哈蒙韩五国建立了良好有效的合作机制。为项目第二阶段工作的开展打下了坚实的基础。

彼得洛夫教授是近年来中俄地学合作的杰出组织者和参与者。在他的不懈努力和推动下,目前,中俄地学合作的局面正在全面展开,并取得崭新的世界性成果。中俄地学合作的意义在于从科学上开启了两国新世纪资源环境全面合作的大门。彼得洛夫教授正是手持钥匙的守门人之一。