

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.003

松嫩平原东部典型黑土剖面孢粉组合、时代及其对古气候的指示

宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 许江, 张哲寰, 梁帅

SONG Yunhong, LIU Kai, DAI Huimin, XU Jiang, ZHANG Zhehuan, LIANG Shuai

中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China

摘要:自然黑土区是环境演化和气候变化的重要地质记录。研究黑土区形成的时代及古气候环境演变,清楚黑土的形成机制,对黑土资源的可持续利用、保护东北大粮仓具有重要的意义。在松嫩平原东部海伦地区典型黑土剖面中采集15件孢粉样品进行孢粉学研究,并对相同层位土壤样品中总有机碳进行了AMS¹⁴C测年。系统的分析、鉴定和研究表明,典型黑土剖面自下而上可划分为2个孢粉组合,下部孢粉组合以Echinata Asteraceae-Artemisia-Boraginaceae-Pinus为代表,上部孢粉组合以Pinus-Amaranthaceae-Artemisia为代表。通过AMS¹⁴C测年认为,松嫩平原东部海伦地区典型黑土为中全新世及晚全新世早期的产物。综合元素地球化学、古植物、孢粉分析表明,松嫩平原东部典型黑土主要形成于中全新世7400 a B.P.以来的大暖期,形成于松嫩平原温暖半湿润的气候环境,植被为以草本灌木为主的草原植被。

关键词:松嫩平原东部;典型黑土;孢粉组合;古气候;全新世;地质调查工程

中图分类号:Q913.84;P642.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)09-1528-11

Song Y H, Liu K, Dai H M, Xu J, Zhang Z H, Liang S. Palynological assemblages of typical black soil profile in the eastern Songliao Plain and their age and its implication for paleoclimatic. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9): 1528-1538

Abstract: Natural black soil area is an important geological record of environmental evolution and climate change. Studying the formation of the black soil area and the evolution of the paleoclimatic environment, and knowing how the black soil came from, is of great significance for the sustainable use of black soil resources and protecting the large granary in the Northeast. Fifteen sporopollen samples were collected from a typical black soil profile in the Helen area of the eastern Songnen Plain for pollen research, and total organic carbon in soil samples from the same stratum was AMS¹⁴C dated. 2 sporo-pollen assemblages which represented by Echinata Asteraceae-Artemisia-Boraginaceae-Pinus of lower part and Pinus-Amaranthaceae-Artemisia of upper part were identified from the typical black soil profile after systematical analysis, identification and research. AMS¹⁴C dating indicates that the typical black soil in the Helen area of the eastern Songnen Plain is a product of the Middle Holocene and the early Late Holocene. Comprehensive element geochemistry, paleontology, and spore pollen analysis indicate that the typical black soil was mainly formed during the warm period since 7400 a B.P. in the Holocene. Which Formed in the warm and semi-humid climate of the Songnen Plain, the vegetation is mainly grassland vegetation with herbaceous shrubs.

Key words: the eastern Songliao Plain; typical black soil; palynological assemblage; paleoclimate; Holocene; geological survey engineering

一直以来,土壤学家通过研究黄土-古土壤沉积中的土壤碳同位素年龄及组成反映古气候及古

环境的变化^[1-4],但是对于黑土的研究很少。黑土地是大自然给予人类的得天独厚的宝藏,是农业生

收稿日期:2020-04-13;修订日期:2020-08-05

资助项目:中国地质调查局项目《松辽平原黑土地生态地质调查》(编号:DD20221779)、《兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查》(编号:DD20190520)

作者简介:宋运红(1983-),女,硕士,高级工程师,从事土地质量地球化学调查及研究工作。E-mail:yunhong408@163.com

产的基础,也是中国粮食安全的保障^[5]。作为陆地生态系统的 2 个限制因素之一,土壤在生态系统的调节中也起着重要作用^[6]。

自然黑土区是环境演化和气候变化的重要地质记录。选取自然黑土土壤剖面,可以减少人为因素干扰,获得土壤剖面元素分布的自然规律,恢复黑土区自然环境演变的基本轮廓。地质学家对黑土质量已经做了很多研究^[7-11],但对黑土的形成和演化问题研究较少^[12]，“黑土是怎么来的,又是怎么没的”这一问题还不清楚,因此研究黑土退化,首先要清楚黑土的形成过程。孢粉学研究已应用于很多领域,其中一个极重要的领域就是推测古气候环境^[13-14]。研究区位于松嫩平原东部海伦地区典型黑土,在 ArcGIS 软件平台支持下,进行不同时期(1970 年、1995 年、2010 年 3 期 1:10 万比例尺)土地利用数据信息叠加,对比、研究典型黑土区 40 a 间土地利用未发生改变的地区(本次主要研究林地和耕地),在此基础上对比第四纪地质图,消除不同成土母质引起的土壤元素分布规律的改变,在此基础上布设了本次研究的 2 条典型黑土剖面。本次对典型黑土剖面进行了详细描述、系统采样和室内处理、分析和鉴定,并结合有机碳 AMS¹⁴C 测年及其他资料,完成对 2 个典型黑土剖面孢粉组合的划分与对比,讨论黑土形成的年代及古气候环境。利用地质、元素地球化学、同位素地球化学、孢粉组合分析的方法,探讨东北松嫩平原典型黑土形成的地质时期及古气候环境,为黑土资源的可持续利用、保护

及修复提供科学依据。

1 样品采集和分析

典型黑土剖面位于松嫩平原东部,小兴安岭西麓,海伦市中部地区,行政区域为绥化市,全区多分布丘陵及平原,区内地势总体呈东北高西南低的特征,东北部一般海拔为 350~450 m,最高处海拔 490 m。区内属大陆性气候区,冬季干寒漫长,夏季湿热短暂。年平均气温 1.2℃,年降水量约 550 mm,降水大部分集中在 7—8 月,11 月至翌年 4 月为冻结期。

在每个典型黑土剖面采样点处严格按照采样要求进行样品采集,同时用 GPS 记录取样点经纬度,详细描述采样周围的环境,拍摄相关照片。样品采集严格按照要求,离开公路 200~300 m 距离,在同一采样层位多点采样,组合成一个样品。其中¹⁴C 同位素和孢粉样品采自相同的采样层位,具体采样位置(图 1)及描述如下。

以松辽平原东部海伦地区白春村和新立村 2 个典型黑土土壤剖面为研究对象,两剖面最近 40 a 土地利用类型均为林地(本次作为自然黑土研究),土壤类型为典型黑土。白春村土壤剖面地貌类型为岗地,坡度小于 3°,树种黑林一号,植被主要有冰草、星星草、清蒿、水蒿、酸模,覆盖度 50%,枯枝败叶层地表连续覆盖,层厚 0.5 cm。新立村土壤剖面地貌类型为岗地上部,坡度小于 6°,树种为黑林一号,有明显可分的土壤剖面层次。剖面详细情况见表 1 和表 2。

表 1 白春村典型黑土土壤剖面描述

Table 1 Description of typical black soil profile in Baichun Village

距表层深度/cm	发生层	详细描述
0~30	A 层	润,黑色,中壤,有团粒结构,较松,多根孔,含大量草根和木本根系
30~80	AB 层	润,黑色,中壤,有团粒结构,较紧实,较多木本根系
80~150	B1 层	润,黑色-棕黄色,重壤,有小团块结构,紧实,少量木本根系
150~200	B2 层	潮,棕黄色,重壤,块状,结实,偶见木本根系

表 2 新立村典型黑土土壤剖面描述

Table 2 Description of typical black soil profile in Xinghai Village

距表层深度/cm	发生层	详细描述
0~20	AP 层	润,黑色,中壤,有团粒结构,较松,多根孔,含大量草根和木本根系
20~40	A 层	润,棕黑色,中壤,有团粒结构,含大量木本根系
40~70	B1 层	润,棕黑色,中-重壤,有团粒结构,较紧实,含较多木本根系
70~120	B2 层	润,棕黄色,重壤,有小团块结构,紧实,少量木本根系
120~180	B3 层	潮,棕黄色,重壤,块状,结实,偶见木本根系

白春村 PM1908 黑土土壤剖面深 200 cm,新立村 PM1910 黑土剖面深 180 cm,均为人工挖掘,为防止上层碳的混入,取样原则为自下而上依次取样,取样间隔 10 cm,每个样品约取 200 g,其中一部分用作¹⁴C 测年,一部分用作孢粉分析。15 件孢粉和 16 件¹⁴C 同位素样品分别采自 PM1908 剖面 0~80 cm 和 PM1910 剖面 0~70 cm 土壤层。孢粉样品由吉林大学古生物学与地层学研究中心孢

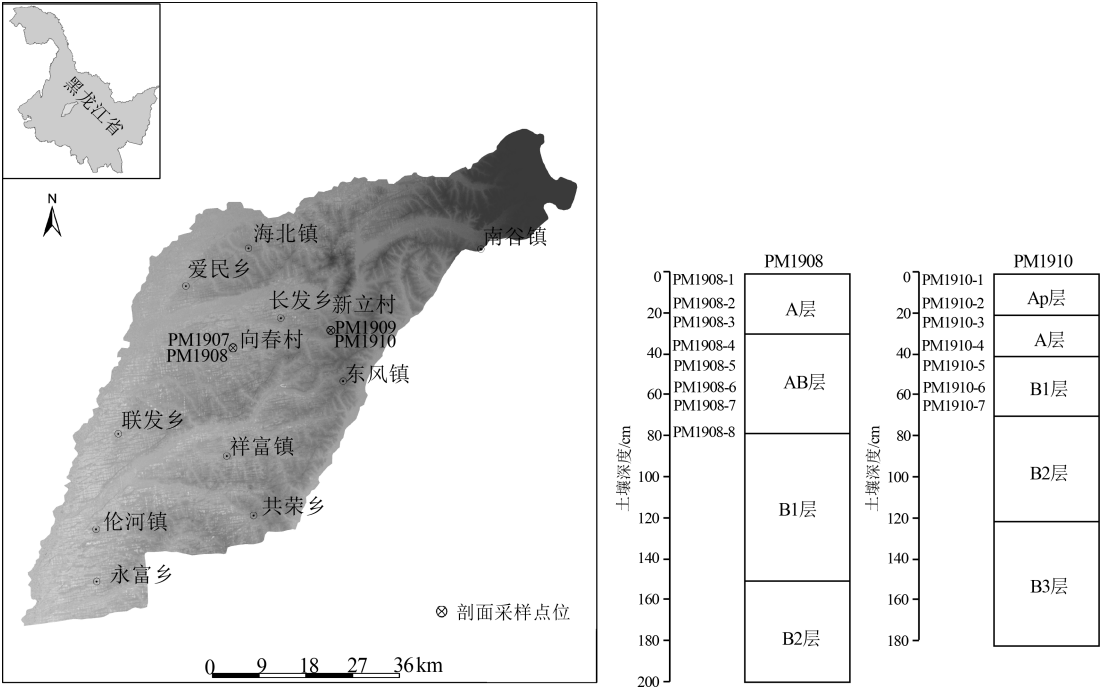


图 1 海伦地区典型黑土剖面采样位置图

Fig. 1 The sampling position of typical black soil profile in Hailun area

粉实验室采用常规孢粉分析法分析,化石由张淑芹研究员鉴定。¹⁴C 土壤样品测年介质为黑土中的总有机碳,样品制备及样品测试过程均在青岛海洋科学与技术国家实验室完成。

2 结果分析

2.1 ¹⁴C 测年

本次共得到 16 个典型黑土的 AMS¹⁴C 年龄数据。表 3 给出海伦市白春村 PM1908 和新立村

PM1910 黑土剖面的¹⁴C 表观年龄。

2.2 孢粉组合划分及其特征

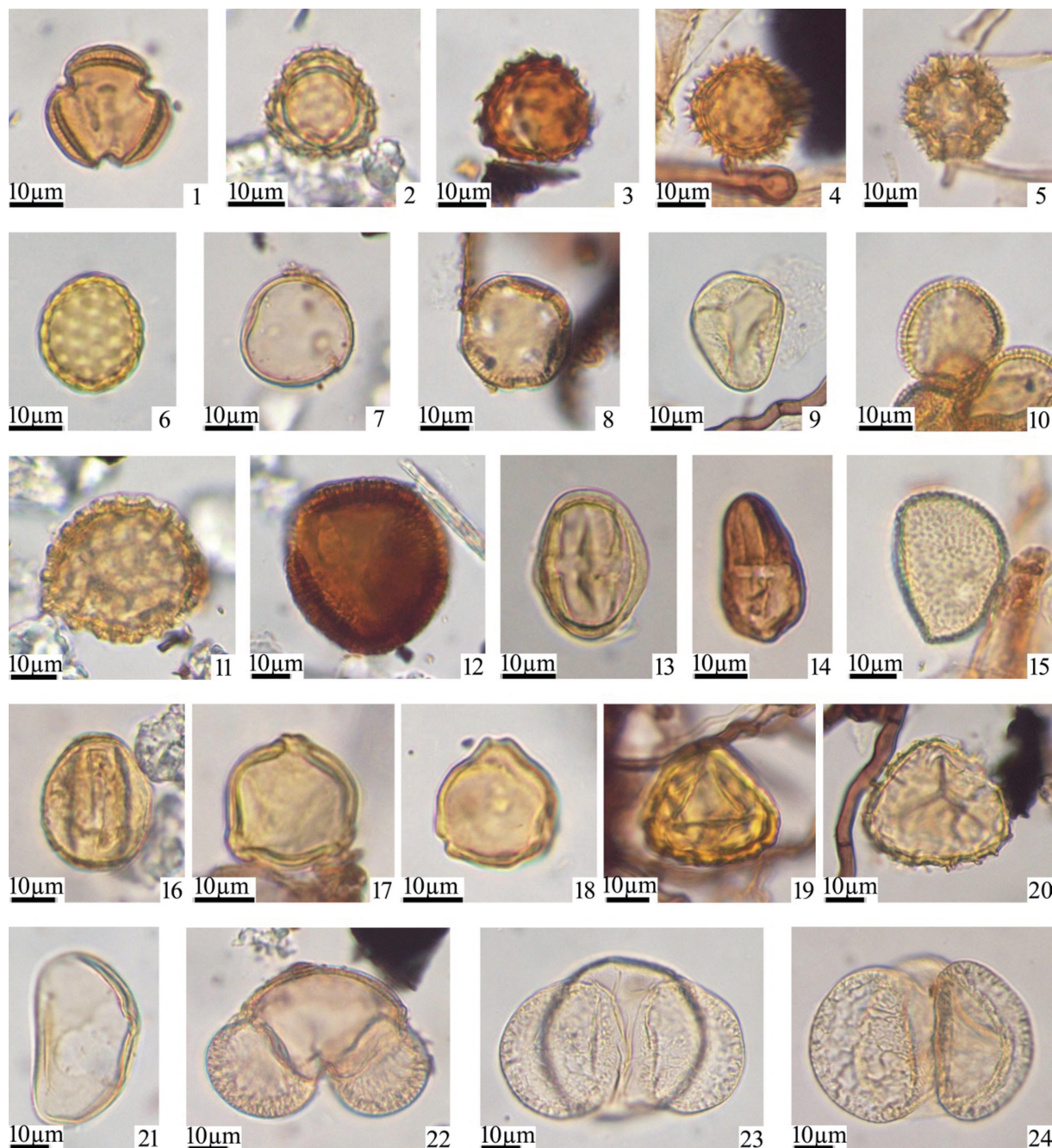
孢粉样品分别采自 PM1908 剖面 0~80 cm 和 PM1910 剖面 0~70 cm 土壤层,共采集了 15 件孢粉样品,鉴定出孢粉 1570 例,包括 33 科植物(图版 I、图版 II)。根据剖面不同层位出现的孢粉类型及百分比含量的变化,结合本次获得的¹⁴C 年龄,分别将 2 条剖面自下而上划分为 2 个孢粉组合带。其中剖面 PM1908 孢粉组合带的特征(图 2)描述如下。

表 3 PM1908 和 PM1910 典型黑土剖面有机碳、Δ¹⁴C 及¹⁴C 表观年龄结果

Table 3 Apparent age of organic carbon,Δ¹⁴C and ¹⁴C in typical black soil profile of PM1908 and PM1910

样品编号	深度/cm	C/%	Δ ¹⁴ C/‰	N/%	¹⁴ C 年龄 /(a B.P.)	σ- ¹⁴ C 年龄 /a	样品编号	深度/cm	C/%	Δ ¹⁴ C/‰	N/%	¹⁴ C 年龄 /(a B.P.)	σ- ¹⁴ C 年龄 /a
PM1908-1	0~10	2.44	-39.6	0.18	260	20	PM1910-1	0~10	1.89	-127.3	0.15	1025	25
PM1908-2	10~20	1.28	-173.7	0.10	1465	25	PM1910-2	10~20	1.79	-130.6	0.15	1055	25
PM1908-3	20~30	1.09	-250.0	0.10	2245	40	PM1910-3	20~30	1.70	-123.4	0.14	990	20
PM1908-4	30~40	0.95	-365.9	0.08	3595	35	PM1910-4	30~40	1.22	-342.4	0.10	3300	30
PM1908-5-2	40~50	0.87	-449.3	0.07	4725	25	PM1910-5	40~50	1.05	-445.1	0.08	4665	35
PM1908-6	50~60	0.84	-518.9	0.07	5810	40	PM1910-6	50~60	0.89	-530.9	0.07	6015	40
PM1908-7	60~70	0.88	-535.0	0.07	6085	35	PM1910-7	60~70	0.68	-605.5	0.06	7400	70
PM1908-8-1	70~80	0.57	-597.0	0.06	7230	60	PM1910-8-1	70~80	0.53	-626.8	0.05	7850	50

图版 I Plate I

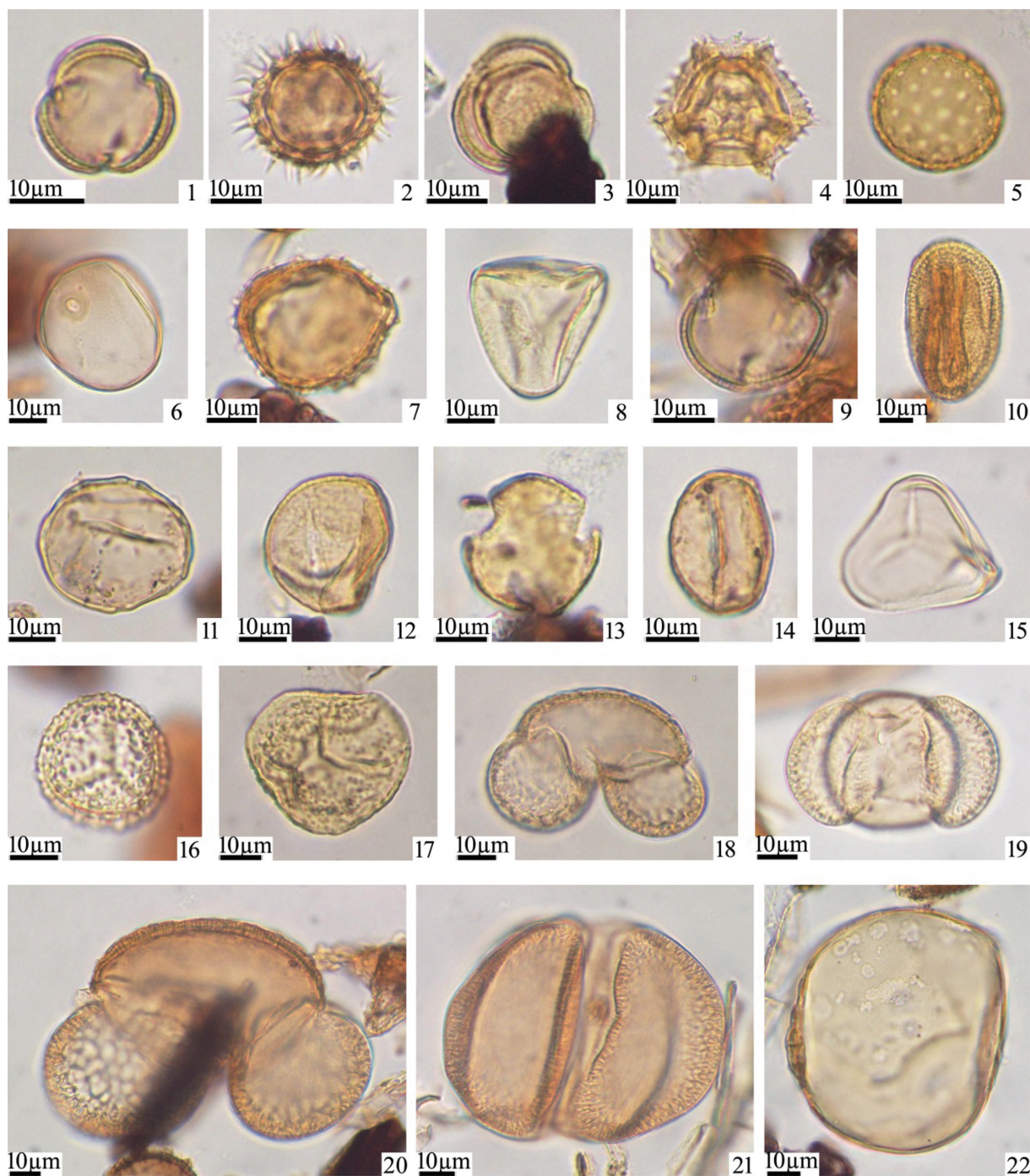


1. 蒿属 (*Artemisia*); 2~4. 具刺类菊科 (Echinate Asteraceae); 5. 网胞状类菊科 (Lophate Asteraceae); 6. 苋科 (Amaranthaceae); 7. 禾本科 (Poaceae); 8. 石竹科 (Caryophyllaceae); 9. 莎草科 (Cyperaceae); 10. 十字花科 (Cruciferae); 11. 蓼属 (*Polygonum*); 12. 牻牛儿苗科 (Geraniaceae); 13. 地榆属 (*Sanguisorba*); 14. 豆科 (Leguminosae); 15. 香蒲属 (*Typha*); 16. 栎属 (*Quercus*); 17. 桦木属 (*Betula*); 18. 榛属 (*Corylus*); 19. 中华卷柏 (*Selaginella sinensis*); 20. 石松属 (*Lycopodium*); 21. 水龙骨科 (Polypodiaceae); 22~24. 松属 (*Pinus*)

(1) BPM1908-1 带 (20~80 cm, $2245 \pm 40 \sim 7230 \pm 60$ a B. P.): 以 Echinate Asteraceae - *Artemisia* - Boraginaceae - *Pinus* 为主的孢粉组合, 包含 20~80 cm 的 6 个样品。对比 ^{14}C 分析结果可知, 其时代为中全新世 (8200~4200 a B. P.) 及晚全新世 (4200 a B. P.)

以来) 早期。以灌木及陆生草本植物花粉 (61.0% ~ 82.89%) 为主, 其次为针叶植物花粉 (1.32% ~ 26.23%), 蕨类植物孢子 (4.92% ~ 19.48%) 较多, 落叶阔叶植物花粉 (0 ~ 12.0%)、水生草本植物花粉 (0 ~ 2.08%) 少量出现。该孢粉带中生 (介于湿生和

图版 II Plate II



1. 蒿属 (*Artemisia*); 2. 具刺类菊科 (Echinata Asteraceae); 3. 苍耳属 (*Xanthium*); 4. 网胞状类菊科 (Lophate Asteraceae); 5. 苋科 (Amaranthaceae); 6. 禾本科 (Poaceae); 7. 败酱属 (*Patrinia*); 8. 莎草科 (Cyperaceae); 9. 毛茛科 (Ranunculaceae); 10. 蓼属 (*Polygonum*); 11. 胡桃属 (*Juglans*); 12. 水青冈属 (*Fagus*); 13~14. 栎属 (*Quercus*); 15. 铁线蕨属 (*Adiantum*); 16. 紫萁属 (*Osmunda*); 17. 膜蕨属 (*Hymenophyllum*); 18~19. 松属 (*Pinus*); 20. 冷杉属 (*Abies*); 21. 云杉属 (*Picea*); 22. 玉蜀黍属 (*Zea*)

旱生之间)植物具刺类菊科、旱生植物蒿属花粉较多,水生植物香蒲属少量出现。

(2) BPM1908-2 带(0~20 cm, $260 \pm 20 \sim 1465 \pm 25$ a BP); 以 *Pinus*-*Amaranthaceae*-*Artemisia* 为主的

孢粉组合,该带包含 10~20 cm 的 2 个样品。对比 ^{14}C 分析结果可知,其时代为晚全新世(4200 a B.P. 以来)。以针叶植物花粉(41.49%~55.80%)和灌木及陆生草本植物花粉(40.22%~54.26%)为主,水生

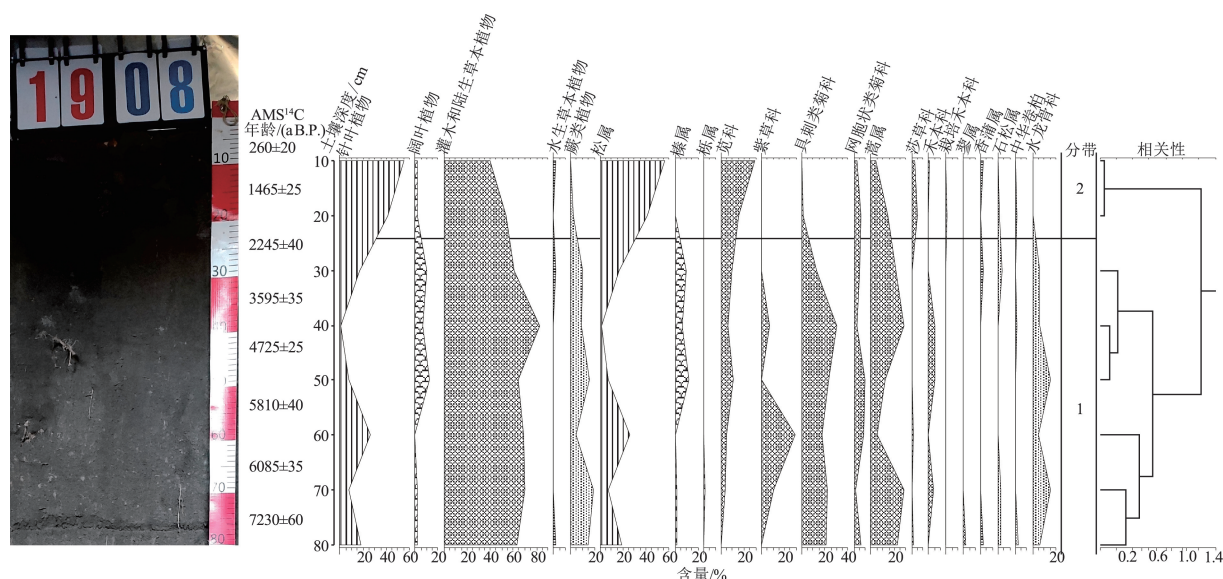


图 2 海伦地区典型黑土剖面 PM1908 孢粉百分含量

Fig. 2 Pollen percentage diagram of Hailun black soil profile PM1908

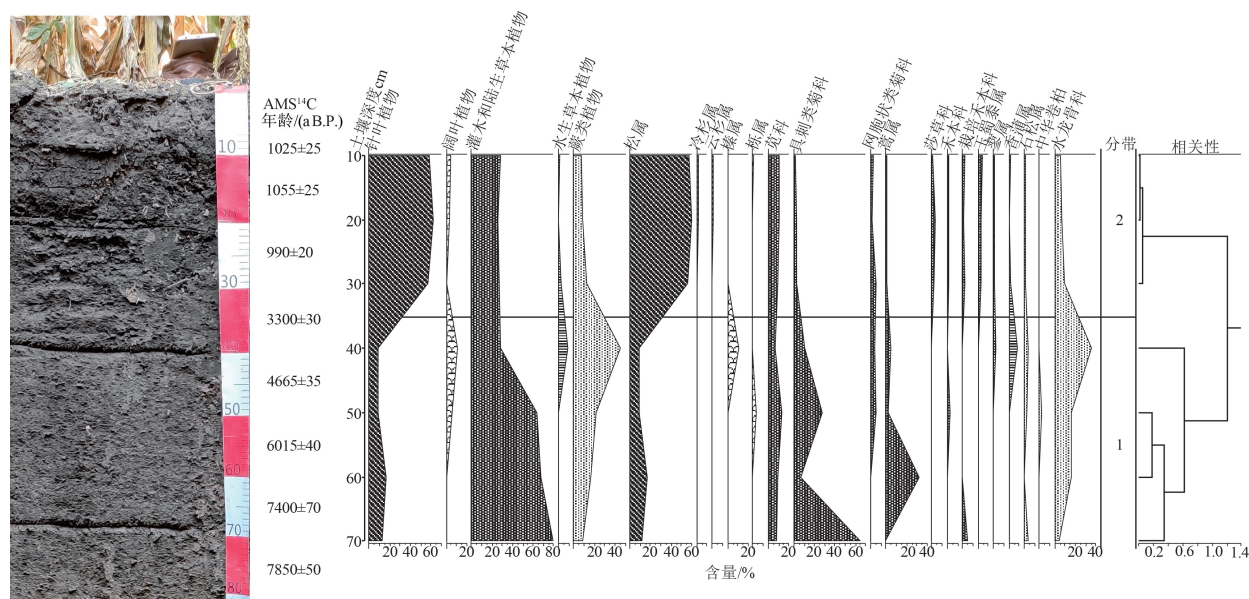


图 3 海伦地区典型黑土剖面 PM1910 孢粉百分含量

Fig. 3 Pollen percentage diagram of Hailun black soil profile PM1910

草本植物花粉 (0~2.17%)、落叶阔叶植物花粉 (1.45%~2.13%)、蕨类植物孢子 (0.36%~2.13%) 少量出现。该孢粉带针叶植物松属花粉含量很高, 陆生草本植物苋科、旱生植物蒿属花粉较多, 水生植物香蒲属少量出现。

剖面 PM1910 孢粉组合带的特征(图 3)描述如下。

(1) BPM1910~1 带 (30~70 cm, 3300±30~7400±

70 a B.P.): 以 *Echinata Asteraceae*—*Polypodiaceae*—*Artemisia*—*Pinus* 为主的孢粉组合, 该带包含 30~70 cm 的 4 个样品。对比 ^{14}C 分析结果可知, 其时代为中全新世 (8200~4200 a B.P.) 及晚全新世 (4200 a B.P. 以来) 早期。以灌木及陆生草本植物花粉 (27.66%~80.0%) 为主, 蕨类植物孢子 (8.0%~44.68%) 较多, 针叶植物花粉 (8.51%~16.13%)、落

阔叶植物花粉(0~10.64%)、水生草本植物花粉(0~8.51%)较少。该孢粉带中生(介于湿生和旱生之间)植物具刺类菊科花粉最多,蕨类植物水龙骨科孢子较多,旱生植物蒿属花粉和针叶植物松属花粉有一定含量,水生植物香蒲属少量出现。

(2)BPM19010-2带(0~30 cm, $1025 \pm 25 \sim 990 \pm 20$ a B.P.):以 *Pinus*-*Amaranthaceae*-*Polypodiaceae* 为主的孢粉组合,该带包含 10~30 cm 的 3 个样品。对比 ^{14}C 分析结果可知,其时代为晚全新世(4200 a B.P.以来)。以针叶植物花粉(56.97%~63.0%)为主,其次灌木及陆生草本植物花粉(25.50%~27.50%)较多,蕨类植物孢子(7.50%~12.73%)、落叶阔叶植物花粉(0.61%~4.58%)、水生草本植物花粉(0~2.42%)少量出现。该孢粉带针叶植物松属花粉最多,其次陆生草本植物苋科、蕨类水龙骨科孢子较多,水生植物香蒲属少量出现。

3 讨论

3.1 典型黑土时代确定及 ^{14}C 年龄分布特征

放射性同位素 ^{14}C 定年目前已成为晚更新世以来最精准的定年技术^[15]。通过对东北典型黑土土壤有机碳 ^{14}C 年龄测定,可以初步确定黑土发育的年龄,探索黑土的形成过程,为从根本上修复黑土地提供理论依据。本次对典型黑土剖面有机碳 AMS ^{14}C 定年结果见表 3。白春村 PM1908 典型黑土剖面最新年龄为 260 ± 20 a B.P.,最老年龄为 7230 ± 60 a B.P.;而新立村 PM1910 黑土剖面测得的年龄范围为 $990 \pm 20 \sim 7850 \pm 50$ a B.P.,对照 2018 年的最新国际地质年代表,初步认为松辽平原东部海伦地区典型黑土为全新世的产物。

白春村和新立村 2 个黑土剖面各层的有机碳 ^{14}C 表观年龄与土壤深度图(图 4)表明,各层位年龄值与土壤深度呈线性递减,说明 2 个黑土剖面的土壤是连续发育的,没有间断。 $\Delta^{14}\text{C} < 0$ 的黑土土壤,有机质较稳定,与外界几乎没有物质交换,这些层位的有机质可用于黑土年龄的测定^[2]。2 个黑土剖面 $\Delta^{14}\text{C}$ 值随黑土剖面深度的增加而递减^[16]。从图 4 可以看出,总体上 2 个剖面形成时代一致,尤其是 40cm 以下的土壤层位。但白春村黑土剖面表层最新年龄为 260 ± 20 a B.P.,而新立村黑土剖面 0~10 cm 的年龄为 1025 ± 25 a B.P.(20~30 cm 为 990 ± 20 a B.P.),根据实际采样的位置及地质地貌条件,初

步推测新立村剖面 PM1910 位于坡地上(实际采样的坡度较白春村大),表层黑土土壤受地表自然剥蚀及耕作层深翻扰动作用较明显。

本次对土壤深度和年龄之间的研究,经过线性拟合,白春村剖面的方程为: $D = 0.009 T + 6.047$ ($R^2 = 0.988$);新立村黑土剖面的方程为: $D = 0.008 T + 11.57$ ($R^2 = 0.945$)。D 为黑土剖面深度, T 为 AMS ^{14}C 表观年龄, R^2 为相关系数,方程中斜率即为该黑土剖面土壤的成壤速率(cm/a B.P.)。比较 2 个剖面的成壤速率可以发现,2 个剖面无较大差异(图 4)。基于经典的道库恰耶夫学说^[17],土壤是母质、气候、生态群落、地形和时间五大自然因素综合作用的产物,2 个黑土剖面处于同一地区,有相同的气候带、母质、生态群落等,与实际相符。

3.2 孢粉反映的古植被古气候演化

高瑞琪等^[18]参照现生植物生态环境特征,对地质时期孢粉母体植物的生态环境进行了系统研究。参照其研究成果,笔者对海伦地区 2 条剖面全部孢子和花粉按照属级单位,将母体植物生态归纳如下,植被类型划为针叶林、阔叶林(落叶)、灌木和陆生草本、蕨类等大类;干湿度分为旱生、中生、湿生、水生等类型。

BPM1908-1 带(20~80 cm)母体植物属于灌木及陆生草本类,孢粉平均占 68.22%,针叶树的孢粉类型平均占 13.18%,蕨类孢子平均占 12.37%,落叶阔叶类孢粉平均占 8.44%,水生草本类孢粉平均占 0.68%。该孢粉带的典型特征是以冷干型蒿属为主的草原植被孢粉和中生型(介于湿生和旱生之间)草灌植物具刺类菊科占优势,少量乔木孢粉以冷干型的松属为主,另见少量温湿型的落叶榛属、栎属等暖温带的乔木。通过以上各类植被的孢粉含量分析可知,该带草本植物花粉占优势,推测当时的植被类型以蒿属、菊科灌丛为主,发育少量松属、落叶榛属为主的针阔叶混交林,为疏林-草原植被。本次孢粉分析结果显示,此时($2245 \pm 40 \sim 7230 \pm 60$ a B.P.)的气候较温暖,沉积环境为中生偏干,其中,20~50 cm, $2245 \pm 40 \sim 4725 \pm 25$ a B.P.这个阶段植被仍为草原植被,较远处分布有落叶阔叶榛属植物,且数量有所上升,表明气候有持续变暖的趋势(图 5)。

BPM1908-2 带(0~20 cm)母体植物属于针叶树的孢粉类型平均占 48.65%,灌木及陆生草本类孢

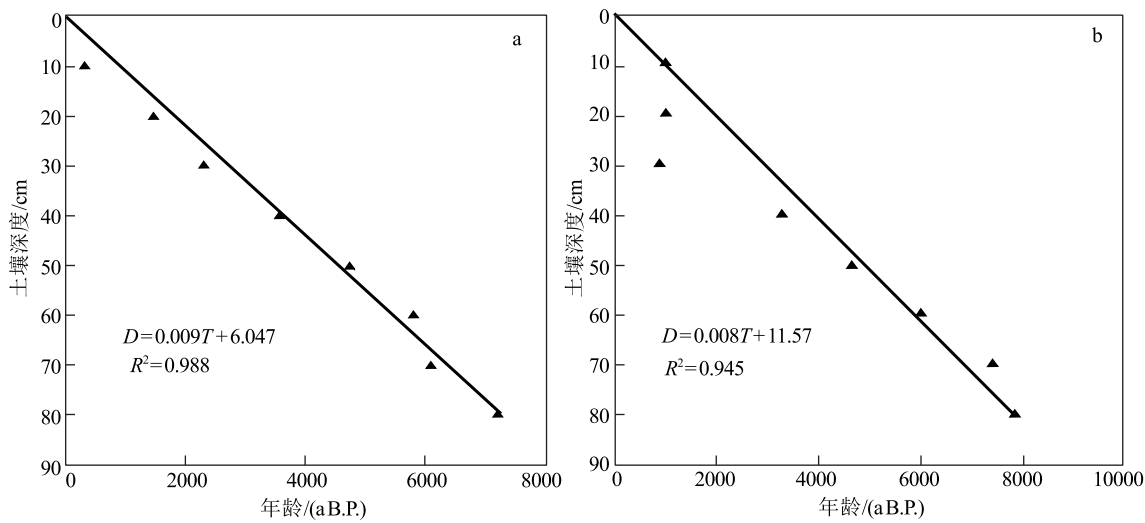


图 4 海伦地区黑土剖面深度-年龄关系

Fig. 4 Relationship between depth and age of Hailun black soil profile
a—白春村黑土剖面; b—新立村黑土剖面

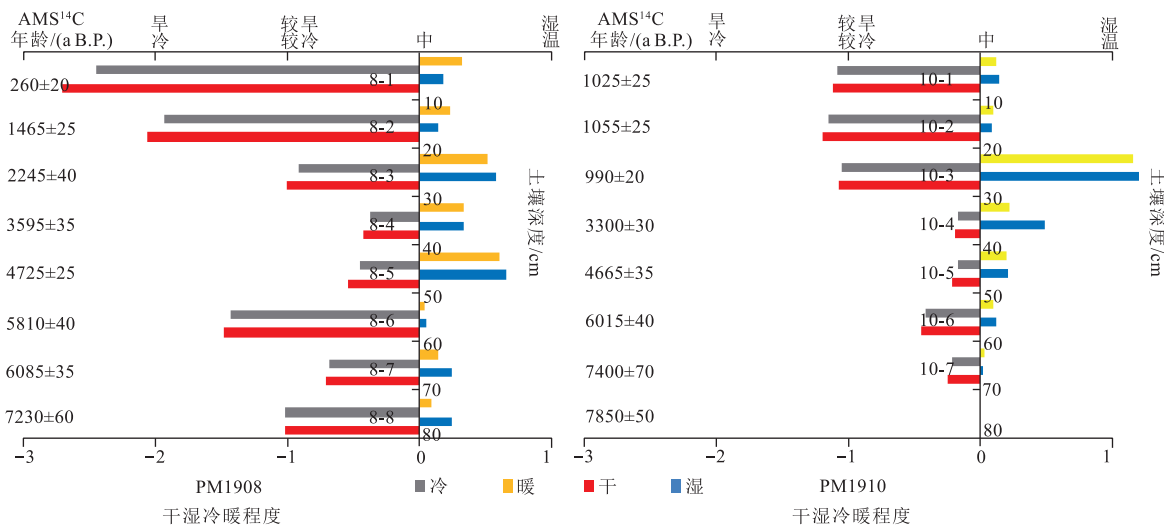


图 5 孢粉反映的古气候演化图(8-1~8-8 和 10-1~10-7 为样品号)
Fig. 5 Palaeoclimate evolution map reflected by palynology

粉平均占 47.24%, 落叶阔叶类孢粉平均占 1.79%, 蕨类孢子平均占 1.25%。可见该孢粉带针叶乔木花粉明显增高, 该带典型特征以冷干型松属为主, 暖干型的苋科为主的草原植被孢粉占优势, 可见到少量温湿型的落叶桦木属、榛属、栎属、鹅耳枥属等暖温带的阔叶乔木。通过以上各类植被的孢粉含量可知, 该带木本植物花粉占优势, 推测当时的植被类型是以针叶松属为主的松树林, 林下发育苋科、蒿属、菊科灌丛, 只零星分布阔叶树, 反映了此时温

凉偏干的气候。综合孢粉分析结果认为, 此时(260±20~1465±25 a.B.P.)的气候环境为温凉偏干。白春村剖面 PM1908 分析表明, 典型黑土土壤从中全新世 7230±60~260±20 a.B.P.经历了冷干—暖湿—冷干的气候环境演变特征。BPM1910-1 带(30~70 cm)母体植物灌木及陆生草本类孢粉平均占 59.76%, 针叶树的孢粉类型平均占 8.68%, 蕨类孢子平均占 22.65%。可见该孢粉带的典型特征以中生型(介于湿生和旱生之间)草

灌植物具刺类菊科占优势外,水龙骨科蕨类植物较多,另见以冷干型蒿属为主的草原植被孢粉。通过以上各类植被的孢粉含量可知,该带草本植物花粉占优势,推测当时的植被类型以菊科、蒿属灌丛为主。本次孢粉分析结果显示,此时(3300±30~7400±70 a B.P.)的气候较温暖,沉积环境为中生偏干,其中,30~50 cm,3300±30~4665±35 a B.P.这个阶段植被仍为草原灌丛,较远处分布有落叶阔叶榛属、栎属、胡桃属植物,且数量有所上升,表明气候有持续变暖的趋势。这与 BPM1908-1 带(20~50 cm, 2245±40~4725±25 a B.P.)对应(图 5)。

BPM1910-2 带(0~30 cm)母体植物属于针叶树的孢粉类型,平均占 59.57%,灌木及陆生草本类孢粉平均占 26.76%,蕨类孢子平均占 9.58%,落叶阔叶类孢粉平均占 2.73%。可见该孢粉带针叶乔木花粉明显增高,该带典型特征以冷干型松属为主,少量出现冷杉、云杉属花粉,多见暖干型的苋科为主的草原植被孢粉。通过以上各类植被的孢粉含量可知,该带木本植物花粉占优势,推测当时的植被类型为以针叶松属为主的松树林,林下发育苋科、菊科灌丛,反映了此时温凉偏干的气候。综合孢粉分析结果认为,此时(1025±25~990±20 a B.P.)的气候环境为温凉偏干。

新立村剖面 PM1910 分析表明,典型黑土土壤从全新世 7400±70~990±20 a B.P.经历了冷干—暖湿—冷干的气候环境特征,这与剖面 PM1908 相似。

3.3 古气候的元素地球化学指示

湖泊沉积物中的 Sr、Sr/Cu、FeO/MnO、Al₂O₃/MgO、Mg/Ca 等元素及比值对判别古气候及环境有较好的指示作用^[13,19],这些元素含量的变化记录了气候环境的演化信息。本次对 2 条黑土剖面土壤 20 件样品进行了主量、微量元素分析,其分析结果见表 4。

由表 4 可见,BPM1908-1 带中 Sr 含量与 BPM1908-2 带相差较明显,1 带 Sr 含量(176~177 mg/kg)较 2 带(184~187 mg/kg)低,指示 1 带较潮湿、2 带较干旱的气候;Sr/Cu 值为 6.38~8.62,均大于 5,指示气候总体较干旱^[20]。1 带中 FeO/MnO 值较 2 带高,显示 1 带较 2 带温暖湿润。BPM1910-1 带中 Sr 含量 175~180 mg/kg,明显低于 BPM1910-2 带(191~193 mg/kg),Sr/Cu 值为 7.41~8.91,均大于 5,1 带中 FeO/MnO 值(23.97~30.95)较 2 带

(19.11~20.05)高,均显示 BPM1910-1 带较 2 带温暖湿润,总体较干旱。这些元素地球化学指标的结果均与孢粉指示的结果一致。

4 黑土区自然环境演变

前人对晚更新世早期(140 000~70 000 a)的研究认为,此时松辽平原东部波状高平原由亚粘土和亚砂土组成。前人根据亚粘土分布的空间位置、岩相结构特点和沉积过程中粘土颗粒呈均匀悬浮搬运形式^[21],认为该套亚粘土的成因为冲湖积,由其形成的平原称为冲湖积平原(波状高平原),是区内黑土形成的重要母质条件。进入晚更新世以后,松辽平原地貌环境发生了深刻的变化。晚更新世中期发生强烈地壳运动,松辽平原东部高平原开始抬升,晚更新世早期形成的冲湖积粘土堆积物质露出水面,二级湖成阶地形成,为区内黑土形成提供了有利的地貌条件。

前人对全新世的气候研究较多^[19,22~24],全新世气候及其变化是对当今人类生存环境影响最大和最直接的因素之一,是区内黑土形成与退化最发育的时期。前人将全新世气候环境又分为早期升温变暖、中期温暖湿润、晚期降温变凉 3 个阶段^[25]。

根据前人的研究成果^[25],早全新世(1.1~7500 a B.P.),东北地区尤其是北部地区气候仍较冷凉,属于寒温带的气候环境,特别是 8700~8900 a B.P.的强低温事件,加上晚更新世遗留下来连续多年冻土的分布,此时的气候环境并不适宜黑土层的沉积,所以此时松辽平原未形成黑土。

中全新世及晚全新世早期(7500~2500 a B.P.),是冰后期气候最温暖的时期。该时期亦称为大暖期^[26],虽有气候波动,但松嫩平原始终处于温带半湿润区,年均气温约比现今高 1~2℃,根据前人研究,季节性冻土全部融化时间为 60~150 d。此时,草原化草甸植被植物迅速繁茂起来,大量植物残体在地上和地下形成有机质。由于冬季严寒,留在土壤中的有机质微生物活动停止,夏季多雨土壤过湿,加上季节冻层阻隔使土壤水分更充足,好气微生物活动受限,一般每年只有 15% 的腐殖质被分解矿化,年复一年的暖—寒气候周期变化,使土壤中大量有机质被保留,并迅速沉积,在第四纪前中全新世含土质堆积物顶层形成了黑土层。本次在海伦

表 4 白春村典型黑土土壤剖面 PM1908 和 PM1910 元素分析结果

Table 4 Major and trace elements contents of typical black soil PM1908 and PM1910 profile in Baichun Village

样号	深度/cm	主量元素含量/%					微量元素含量/ 10^{-6}		Sr/Cu	Mg/Ca	Al ₂ O ₃ /MgO	FeO/MnO
		FeO	MnO	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Sr	Cu				
PM1908-1	0-10	2.01	0.105	1.20	1.35	14.02	187	21.7	8.62	0.75	11.64	19.16
PM1908-2	10-20	2.24	0.094	1.34	1.37	14.41	184	23.1	7.99	0.82	10.72	23.87
PM1908-3	20-40	2.27	0.089	1.37	1.27	14.63	176	23.8	7.38	0.91	10.69	25.58
PM1908-4	40-60	2.31	0.082	1.44	1.22	14.57	177	21.7	8.16	0.99	10.13	28.22
PM1908-5	60-80	2.32	0.075	1.48	1.21	14.82	177	23.0	7.69	1.03	10.03	31.04
PM1908-6	80-100	2.38	0.074	1.53	1.25	14.92	180	24.7	7.30	1.03	9.72	32.31
PM1908-7	100-120	2.45	0.094	1.58	1.30	15.05	189	26.4	7.15	1.02	9.52	25.96
PM1908-8	120-140	2.33	0.098	1.43	1.24	15.07	175	27.5	6.38	0.97	10.53	23.81
PM1908-9	140-160	2.31	0.118	1.43	1.29	14.82	184	26.4	6.98	0.93	10.38	19.67
PM1908-10	160-180	2.23	0.094	1.37	1.27	14.59	182	27.5	6.63	0.91	10.63	23.63
PM1910-1	0-10	2.09	0.109	1.24	1.47	13.67	193	21.7	8.91	0.71	11.03	19.11
PM1910-2	10-20	2.18	0.109	1.28	1.37	13.81	191	22.2	8.62	0.78	10.81	20.05
PM1910-3	20-40	2.12	0.089	1.26	1.21	14.18	175	22.0	7.95	0.87	11.25	23.97
PM1910-4	40-60	2.30	0.074	1.40	1.18	14.61	179	21.8	8.20	1.00	10.41	30.95
PM1910-5	60-80	2.36	0.082	1.45	1.18	14.91	180	24.3	7.41	1.03	10.28	28.88
PM1910-6	80-100	2.41	0.093	1.49	1.20	14.99	181	25.1	7.23	1.04	10.09	26.04
PM1910-7	100-120	2.37	0.100	1.48	1.22	14.84	186	24.9	7.46	1.02	10.00	23.67
PM1910-8	120-140	2.39	0.126	1.45	1.24	14.67	189	26.0	7.25	0.98	10.10	18.98
PM1910-9	140-160	2.42	0.106	1.43	1.20	14.94	179	25.9	6.91	1.01	10.42	22.82
PM1910-10	160-180	2.40	0.107	1.40	1.17	15.07	174	25.5	6.82	1.01	10.77	22.53

地区剖面采集的孢粉样品分析结果表明,植物组合以蒿属、菊科灌丛为主,发育少量松属、落叶榛属为主的针阔叶混交林,为疏林-草原植被,反映当时的古气候温暖湿润。尤其 4665~2245 a B.P.期间地表植被主体仍为草原植被,较远处分布有落叶阔叶榛属植物,且数量有所上升,木本植物和草本植物的比值开始增大,蕨类孢子和水生植物香蒲属花粉的比例增加,均表明此时气候有持续变暖的趋势(图 5),这是区内黑土形成的鼎盛时期。中全新世及晚全新世早期的气候环境适宜黑土层的沉积,是区内黑土形成时期,这与前人的研究结论一致。

晚全新世(2500 a B.P.以后),受区内地壳总体抬升作用和湖泊水源补给不足,以及气候等因素影响,松嫩、东西辽河湖泊退缩、干涸,直至消亡,但在齐齐哈尔—大安一带和长岭弧形断隆岩片之间的洼地仍然残留现代地湖泊^[25]。嫩江水系由原来的过湖河演变为下切河,与松花江水系完全贯通,经

三江平原汇入黑龙江。辽河水系急剧下切,形成深切河谷。沿河道形成晚全新世冲积成因的淤泥、砂土地层^[27-29]。广布于黑土的高平原区遭受水蚀侵蚀和人为作用影响,黑土发生面积性减少和质量下降。本次在海伦地区剖面采集的孢粉样品分析结果表明,此时松较之前增加明显,植物组合以针叶裸子植物松为主,草本灌木以蒿属为主,表明此时气候变干旱凉爽,风沙吹扬,松辽平原进入人类活动与自然环境并存的生态环境退化阶段。

5 结 论

(1)综合 2 条土壤剖面分析结果可知,松嫩平原东部海伦地区典型黑土剖面孢粉化石自下而上可划分为 2 个孢粉组合,下部孢粉组合以 Echinatae Asteraceae-Artemisia-Boraginaceae-Pinus 为代表,上部孢粉组合以 Pinus-Amaranthaceae-Artemisia 为代表。

(2)结合 AMS¹⁴C 测年,认为松嫩平原东部海

伦地区典型黑土为全新世的产物。

(3)元素地球化学、古植物、孢粉分析表明,松嫩平原东部典型黑土主要形成于中全新世 7400 a B.P.以来的大暖期,气候温暖半湿润,植被以草本灌木为主。

(4)松嫩平原东部海伦地区 4665~2245 a B.P.时段气候有持续变暖的趋势,这是区内黑土形成的鼎盛时期。

致谢:感谢吉林大学古生物学与地层学研究中心孢粉实验室张淑芹研究员在孢粉鉴定过程中给予的帮助,感谢青岛海洋科学与技术国家实验室在¹⁴C测年过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 沈承德,刘东生,彭少麟,等.鼎湖山自然保护区森林土壤¹⁴C测定及¹⁴C示踪初步研究[J].科学通报,1998,43(16): 1775-1780.
- [2] 邢长平,沈承德,孙彦敏,等.鼎湖山亚热带森林土壤有机质¹⁴C年龄初步研究[J].地球化学,1998,27(5): 493-499.
- [3] 宁有丰,刘卫国,安芷生.甘肃西峰黄土-古土壤剖面的碳酸盐与有机碳的碳同位素差值($\Delta\delta^{13}\text{C}$)的变化及其古环境意义[J].科学通报,2006,51(15): 1828-1832.
- [4] 沈承德,易惟熙,孙彦敏,等.鼎湖山森林土壤¹⁴C表观年龄及 $\delta^{13}\text{C}$ 分布特征[J].第四纪研究,2000,20(4): 335-344.
- [5] Powelson D S, Gregory P J, Whalley W R, et al. Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services [J]. Food Policy, 2011, 36: S72-S87.
- [6] Jiang Y F, Guo X, Sun K, et al. Spatial variability of farmland soil C/N ratio of Jiangxi Province [J]. Environ. Sci., 2017, 38: 3840-3850.
- [7] 史文娇,汪景宽,魏丹,等.黑龙江省南部黑土区微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例[J].土壤学报,2009,46(2): 342-347.
- [8] 贾树海,张佳楠,张玉玲,等.东北黑土区旱田改稻田后土壤有机碳、全氮的变化特征[J].中国农业科学,2017,50(7): 1252-1262.
- [9] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7): 1032-1041.
- [10] Song Y H, Dai H M, Yang F C, et al. A Preliminary Study on Soil Degradation and Nutrient Imbalance of Typical Black Soil in Northeast China [C] // Proceedings of The 6th Academic Conference of Geology Resource Management and Sustainable Development,

2018, 12: 328-335.

- [11] Song Y H, Dai H M, Yang F C, et al. Temporal and Spatial Change of Soil Organic Matter and pH in Cultivated Land of the Songliao Plain in Northeast China during the Past 35 Years [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(supp.1): 142-143.
- [12] 崔明,张旭东,蔡强国,等.东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J].地理研究,2008,27(3): 527-535.
- [13] 孙立新,张云,张天福,等.鄂尔多斯北部侏罗纪延安组、直罗组孢粉化石及其古气候意义[J].地学前缘,2017,24(1): 32-51.
- [14] 郑月娟,张健,张海华,等.大兴安岭中段晚二叠世林西组介形虫化石及环境意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(6): 1776-1786.
- [15] 陈铁梅.¹⁴C测年与用于研究四万年来的全球变化[J].第四纪研究,1990,(2): 181-186.
- [16] 宋运红,刘凯,戴慧敏,等.东北松辽平原典型黑土-古土壤剖面AMS¹⁴C年龄首次报道[J].中国地质,2019,46(6): 1926-1927.
- [17] 杨胜天.道库恰耶夫与土壤地理学的研究方法[J].贵州师范大学学报(自然科学版),1992,1: 18-20.
- [18] 高瑞琪,赵传本,乔秀云,等.松辽盆地白垩纪石油地层孢粉学[J].北京:地质出版社,1999: 20-100.
- [19] 崔巧玉,赵艳.大兴安岭阿尔山天池湖泊沉积物记录的全新世气候突变[J].第四纪研究,2019,39(6): 1346-1356.
- [20] Lermann A. Lakes: chemistry, geology, physics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978: 79-83.
- [21] 初本君,高振操,等.黑龙江省第四纪地质与环境[M].北京:海洋出版社,1989.
- [22] 唐克丽,贺秀斌.黄土高原全新世黄土-古土壤演变及气候演变的再研讨[J].第四纪研究,2004,24(2): 129-140.
- [23] 张玉兰,杨永兴.中全新世以来黑龙江同江地区的孢粉组合与植被、气候演化[J].地理科学,2002,22(4): 426-429.
- [24] 王秀玲,介冬梅,李瑛.下辽河平原全新世孢粉组合与古气候演化研究[J].河南科学,2010,28(7): 794-798.
- [25] 赵超,李小强,周新郢,等.北大兴安岭地区全新世植被演替及气候响应[J].中国科学:地球科学,2016,46(6): 870-880.
- [26] 裘善文,孙广友,夏玉梅,等.中国东北平原第四纪自然环境形成与演化[M].哈尔滨:哈尔滨地图出版社,1990: 60-67.
- [27] 赵福岳.松辽平原第四纪地质历史演化规律研究[J].国土资源遥感,2010,(86)增刊: 152-158.
- [28] 宋运红,张哲寰,杨凤超,等.黑龙江海伦地区垦殖前后典型黑土剖面主要养分元素垂直分布特征[J].地质与资源,2020,26(6): 543-549.
- [29] 韩晓萌,戴慧敏,梁帅,等.黑龙江省拜泉地区典型黑土剖面元素地球化学特征及其环境指示意义[J].地质与资源,2020,29(6): 556-563.