



辽河平原东部黑土剖面孢粉组合及其时代和古气候意义

高 远,周业泽,秦 天,侯红星,裴 阳,寇福建,闫 波

中国地质调查局 廊坊自然资源综合调查中心,河北 廊坊 065000

摘 要: 对辽河平原东部黑土剖面 PM25 中 0~1 m 开展孢粉分析,根据孢粉百分含量变化将化石自下而上划分为两个孢粉组合,其中 PM25-1 孢粉组合以 *Spiraea-Artemisia-Sanguisorba-Rosa-Echinata* Asteraceae 为主,气候由冷干向暖湿转变;PM25-2 孢粉组合以 *Pinus-Cyperaceae-Chenopodium* 为主,指示了气候由暖湿向冷干转变。结合 ^{14}C 测年数据,辽河平原东部黑土主要形成于 1.355 ka 以来的中世纪暖期。

关键词: 辽河平原;黑土;孢粉;古气候;全新世

SPOROPOLLEN ASSEMBLAGE OF BLACK SOIL SECTION IN EASTERN LIAOHE PLAIN: Age and Paleoclimatic Implication

GAO Yuan, ZHOU Ye-ze, QIN Tian, HOU Hong-xing, PEI Yang, KOU Fu-jian, YAN Bo

Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract: By analysis of sporopollen in 0–1 m black soil profile PM25 in eastern Liaohe Plain, the fossils are divided into two sporopollen assemblages from bottom to top according to the sporopollen content change. The PM25-1 sporopollen assemblage is mainly *Spiraea-Artemisia-Sanguisorba-Rosa-Echinata* Asteraceae, with the climate changing from cold-dry to warm-wet; while the PM25-2 sporopollen assemblage is dominated by *Pinus-Cyperaceae-Chenopodium*, indicating the transition of climate from warm-wet to cold-dry. Combined with the ^{14}C dating data, it is concluded that the black soil in eastern Liaohe Plain was mainly formed in Medieval Warm Period since 1335 a B.P.

Key words: Liaohe Plain; black soil; sporopollen; paleoclimate; Holocene

0 引言

在晚全新世范围内, ^{14}C 测年的误差可能不会超过 100 a^[1], AMS 加速器 ^{14}C 测年在晚第四纪年代学研究中更是占据着核心地位^[2]。程鹏等通过对黄土-古土壤剖面中木质的 ^{14}C 测年,为国内黄土的古环境恢复提供依据^[3]。沈承德等通过 ^{14}C 测年得出鼎湖山亚热带

森林赤红壤属全新世的产物,为红土的成土时间提供了有效的证据^[4]。李汉鼎等认为只有将富里酸分离出去后, ^{14}C 年龄才最接近真实年龄,为 ^{14}C 样品的前处理提出了要求^[5]。 ^{14}C 测年技术的发展为第四纪年代学提供了有效的支撑。

孢粉由于生产量高、保存范围广、表面结构易于识

收稿日期:2023-04-20;修回日期:2023-07-12。编辑:黄欣。

基金项目:中国地质调查局项目“辽河平原梨树地区黑土地表基岩层调查”(DD20211590)。

作者简介:高远(1995—),男,工程师,主要从事区域地质调查和地表基岩层调查,通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号,E-mail//864636696@qq.com

通信作者:秦天(1989—),男,工程师,主要从事地表基岩层调查和自然资源监测研究,通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号,E-mail//tianqinhj@163.com

别,常作为恢复古环境的重要手段^[6]。例如:赵辰辰等通过孢粉恢复了中国在 2.5 Ma 以来的古气候与古植被^[7];孙湘君等通过对深海孢粉的研究,初步恢复了我国南海及东海的古气候和古环境^[8];杨再宝等通过孢粉恢复了珠江口 8 ka 古气候^[9];宋运红通过对海伦黑土区的孢粉研究,发现中全新世是黑土形成的鼎盛时期^[10]。前人在时间尺度上对 2 ka 以来的孢粉研究相对较少。

黑土具有土质疏松、结构良好、腐殖质层深厚等特点^[11],是宝贵的土地资源,也是大自然赋予的得天独厚的宝藏^[12],但近年来黑土退化问题愈发严重,引起社会各界广泛关注^[11-12]。自然黑土区是环境演化和气候变化的重要地质记录^[10],前人对黑土区的研究多集中于地表地球化学与生态环境响应^[13-15],¹⁴C 测年技术也多用于黄土及其他古土壤^[4,16],对黑土演化与古气候研究甚少。本次研究通过对辽河平原黑土剖面进行详细描述与样品采集、分析和鉴定,结合 AMS ¹⁴C 测年数据,对辽河平原东部 1.84 ka 以来的古气候进行恢复,探讨黑土的形成时代,为黑土资源的保护与利用提供科学依据。

1 研究区概况及样品采集

黑土剖面 PM25 位于吉林省四平市梨树县境内(图 1)。梨树县位于辽河平原东部,地势东南高、西北低,东部为以长白山余脉大黑山为骨架的低山丘陵,中部为波状平原,东北部和西北部为东辽河冲积平原。

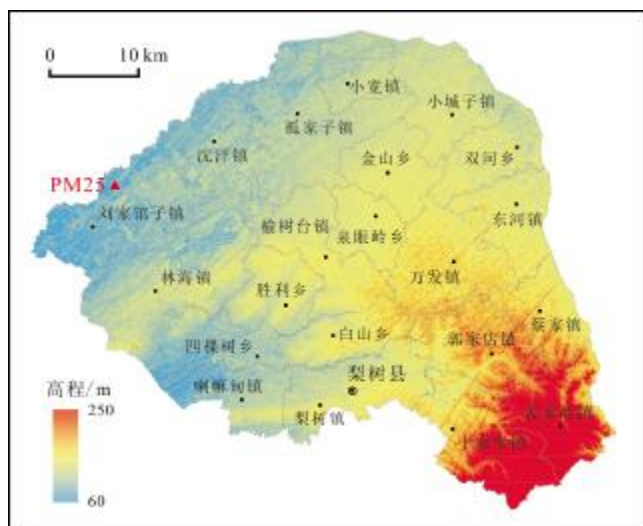


图 1 梨树地区自然黑土剖面 PM25 位置图

Fig. 1 Location map of natural black soil profile PM25 in Lishu area

通过对比近 40 年遥感影像,选择未改变土壤环境的自然剖面,通过与第四纪地质图对比,选取黑土区自然剖面 PM25。剖面描述如下:

0~0.22 m,浅灰色粉砂质壤土,团粒结构,含大量植物根系,土质紧实,略湿;

0.22~0.80 m,黑棕色壤土,团粒结构,很少量植物根系,少量锈斑,局部夹少量粉砂,潮湿;

0.80~0.90 m,棕色壤质砂土,砂状结构,含少量锈斑,潮湿;

0.90~1.50 m,棕黄色黏质壤土,块状结构,大量锈斑和锰结核,土质略紧实,略湿。

取样方法:为防止上层土壤的混入,自下而上采集 ¹⁴C 样品 6 件、孢粉样品 10 件、氧化物样品 10 件,样品深度均在 0~1.00 m 范围内。孢粉样品由吉林大学古生物学与地层学研究中心孢粉实验室采用常规孢粉分析法鉴定,¹⁴C 测年样品由厦门贝克新碳进出口有限公司通过加速质谱仪(AMS)完成。

2 测试结果

样品采集于 PM25 剖面 0~1 m 处,共采集 10 件孢粉样品,每个样品统计孢粉总数在 91~235 粒之间,共鉴定孢粉总数 1 466 粒,包括 42 属(科)(图 2)。根据主要孢子花粉浓度聚类分析结果及孢粉含量变化规律,并结合 AMS ¹⁴C 测年数据(表 1),将剖面 PM25 自下而上划分为 2 个孢粉组合带及 4 个孢粉亚带(图 3)。

I 带: *Spiraea-Artemisia-Sanguisorba-Rosa-Echinata* Asteraceae 组合

该带包括 6 个样品,样品深度 40~100 cm,孢粉总浓度很小,孢粉贫乏,指示植被覆盖度很低。组合以灌木及陆生草本植物花粉(含量在 79.12%~95.68%之间)为主,蕨类植物孢子(0.92%~12.96%)、针叶植物花粉(0.72%~7.69%)、落叶阔叶植物花粉(0~3.30%)均较少。根据孢粉含量变化划分出 2 个亚带, I-a 亚带(70~100 cm)以蒿属为主,绣线菊属含量平稳,毛茛科短暂出现且含量逐渐降低,针叶植物花粉、水生植物花粉和蕨类孢子少量出现。 I-b(40~70 cm)亚带仍以蒿属为主,但含量明显下降,绣线菊属和地榆属含量明显升高,针叶植物花粉、水生植物花粉和蕨类孢子少量出现。

II 带: *Pinus-Cyperaceae-Chenopodium* 组合

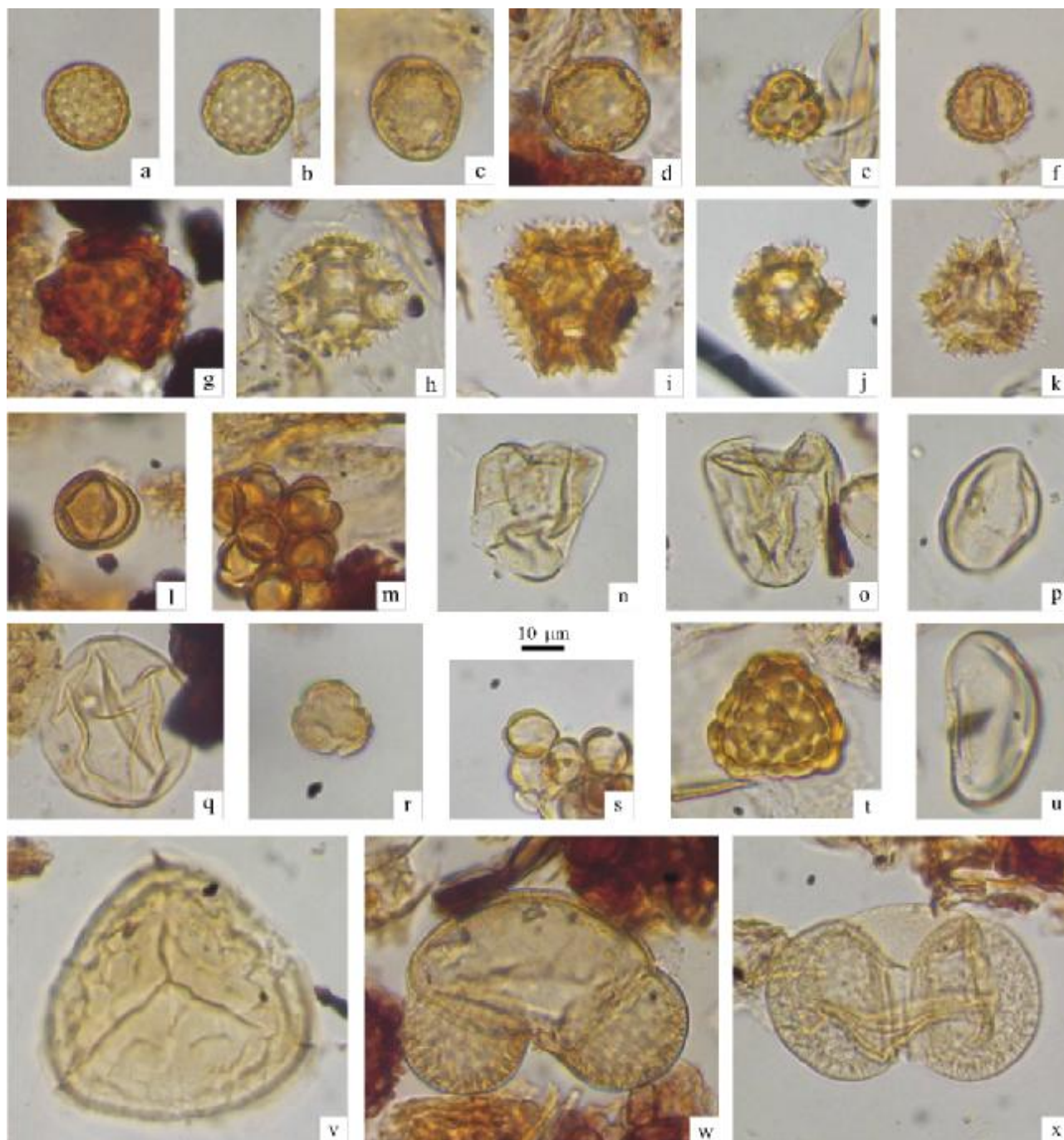


图 2 梨树地区黑土剖面 PM25 部分孢粉化石图版

Fig. 2 Plates of sporopollen fossils from black soil profile PM25 in Lishu area

a-b—藜属(*Chenopodium*); c-d—石竹科(*Caryophyllaceae*); e-g—具刺类菊科(*Echinata Asteraceae*); h-k—网胞状类菊科(*Lophata Asteraceae*); l-m—蒿属(*Artemisia*); n-o—莎草科(*Cyperaceae*); p—禾本科(*Poaceae*); q—栽培禾本科(*Planted Poaceae*); r—毛茛科(*Ranunculaceae*); s—绣线菊属(*Spiraea*); t—中华卷柏(*Sellaginella sinensis*); u—水龙骨科(*Polypodiaceae*); v—钱苔属(*Riccia*); w-x—松属(*Pinus*)

该带包括 4 个样品,样品深度 0~40 cm,孢粉浓度波动较大,最大值出现在本带,指示植被覆盖度有时较大.以针叶植物花粉(含量在 15.56%~70.21%之间)为主,其次灌木及陆生草本植物花粉(含量在 26.81%~

81.78%之间)较多,蕨类植物孢子、落叶阔叶植物花粉、水生草本植物花粉少量出现.根据孢粉含量变化划分出 2 个亚带,II-a 亚带(20~40 cm)与 I-b 亚带相比,莎草科急剧增加,松属含量增多,蒿属及绣线菊

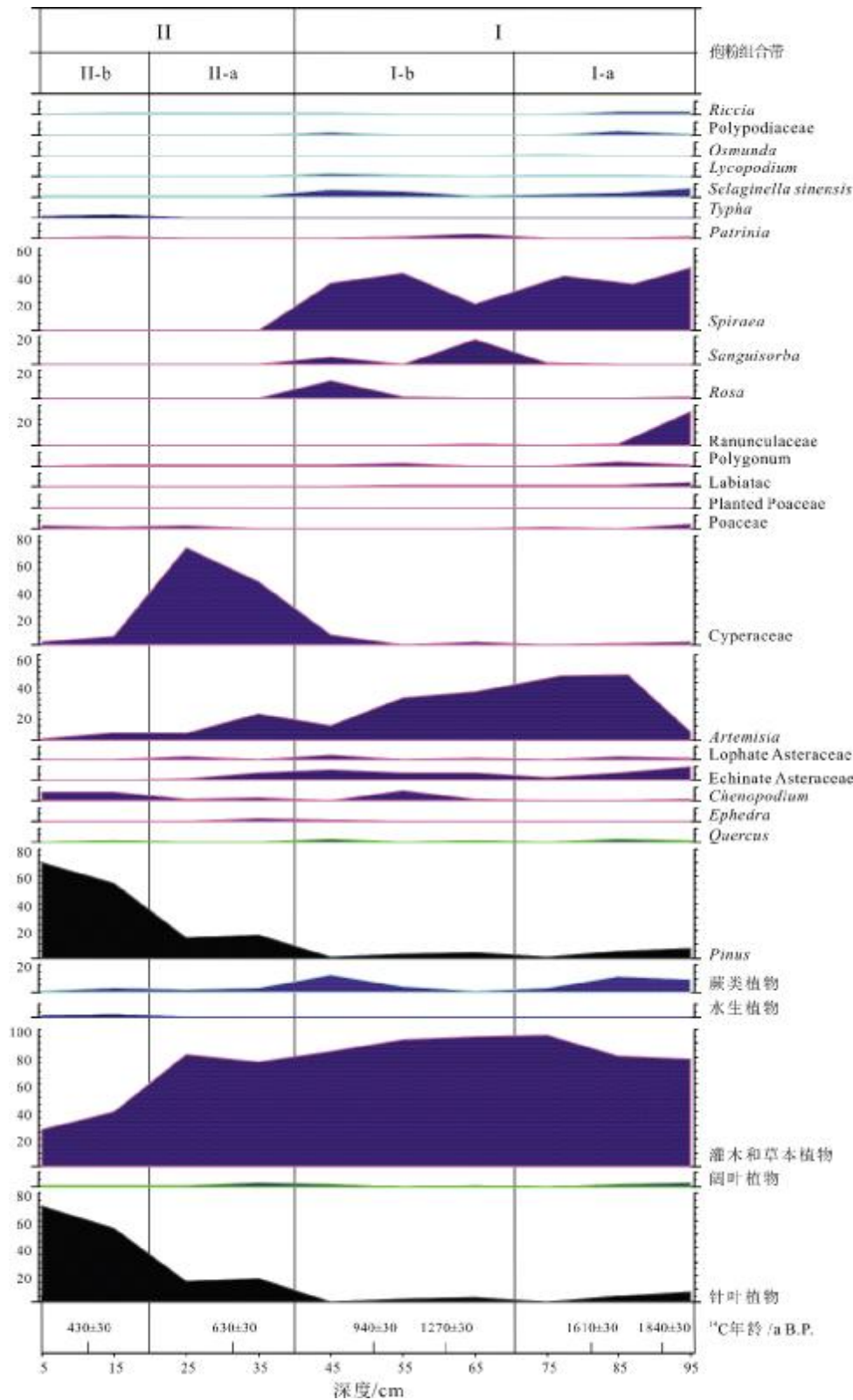


图 3 梨树地区自然黑土剖面 PM25 孢粉含量图

Fig. 3 Sporopollen contents of natural black soil profile PM25 in Lishu area

属含量明显下降,蔷薇属逐渐消失,水生植物和蕨类孢子略有出现. II-b 亚带(0~20 cm)松属花粉含量快速

升高,藜属含量略有增加,莎草科含量急剧下降,蕨类植物孢子、落叶阔叶植物花粉、水生草本植物花粉少量

表 1 梨树县黑土剖面 PM25 ¹⁴C 测年结果

Table 1 ¹⁴C dating results of black soil profile PM25 in Lishu area

原始编号	采样深度/cm	Δ ¹⁴ C/‰	常规放射性年龄/a	树轮校正后年龄/cal. a B.P.	
				1σ (68.2%)	2σ (95.4%)
CPM25-1	10~20	-60.23±3.54	430±30	68.2% 514~477	91.4% 527~450 4% 350~334
CPM25-3	30~40	-83.34±3.45	630±30	39.0% 596~558 29.2% 650~626	95.4% 658~552
CPM25-5	50~60	-118.04±3.32	940±30	32.3% 837~794 24.2% 875~842 8.7% 910~898 3% 886~882	95.4% 922~778
CPM25-6	60~70	-153.54±3.19	1270±30	60.5% 1270~1204 7.7% 1192~1182	83.7% 1287~1175 11.2% 1164~1122 0.4% 1088~1084
CPM25-8	80~90	-188.62±3.06	1610±30	31.4% 1454~1416 18.4% 1495~1472 18.3% 1532~1510	95.4% 1537~1408
CPM25-10	90~100	-211.52±2.97	1840±30	43.1% 1750~1708 20.3% 1792~1760 4.8% 1818~1810	91.6% 1826~1700 3.8% 1656~1640

出现.

3 讨论

3.1 ¹⁴C 年龄特征

¹⁴C 测年技术目前已成为晚更新世以来年代构建最可靠和最精确的技术手段^[12]. 通过对自然黑土剖面 PM25 进行有机碳 ¹⁴C 测年(表 1),获得最新年龄为 430±30 a,最老年龄为 1 840±30 a,可以初步认为辽河平原东部梨树地区黑土的形成时间为全新世,为探究黑土的形成时间及速率提供了年代学依据.

对于 Δ¹⁴C<0 的土壤层位,有机质较为稳定,与外界几乎没有物质的交换,这些层位的有机质可用于黑土年龄的测定^[6]. 对剖面 PM25 常规放射性 ¹⁴C 年龄及样品深度进行线性拟合,其线性方程为: $H=0.0539T-2.00$ ($R^2=0.97396$), H 为样品深度, T 为常规放射性 ¹⁴C 年龄, R^2 为相关系数,方程斜率为剖面 PM25 黑土成土速率(图 4). 各层位年龄与样品深度呈线型递减关系,说明剖面 PM25 黑土为连续发育,不存在间断. 孢粉组合带相关年龄均通过上述线性方程深度与年龄对应关系获得.

3.2 孢粉反映的古植被古气候演化

孢粉组合序列能在一定程度上反映植被变化情

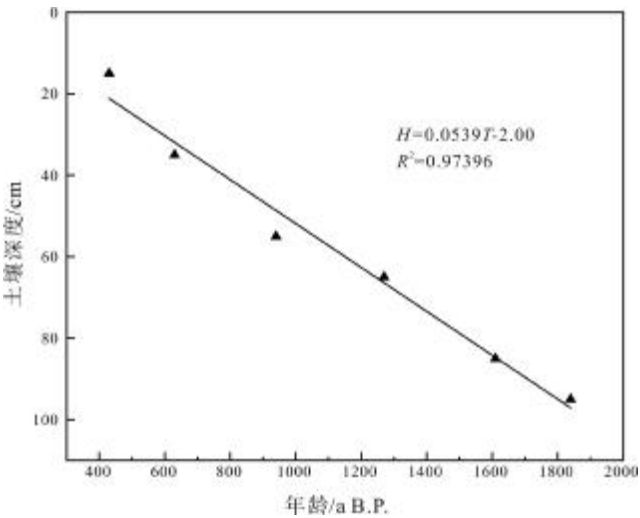


图 4 梨树地区黑土剖面深度-年龄关系图

Fig. 4 Depth vs. age diagram of black soil profile in Lishu area

况,是恢复古植被面貌的有效手段,与冰芯记录一样能间接反映古气候特征^[17]. 高瑞琪等参照孢粉母体植物生态资料对孢粉植物的生态环境进行了系统性的研究,参照其研究成果^[18],将黑土剖面 PM25 孢粉划分为针叶林、阔叶林、灌木和草本植物、蕨类植物、水生草本植物 5 个大类(图 2).

I 带(100~40 cm, 1 892~779 a)以灌木和草本

植物花粉为主,平均含量达 87.86%;蕨类孢子平均含量为 7.30%;针叶植物花粉平均含量为 3.50%;落叶阔叶植物平均含量 1.34%。该孢粉带特征,喜冷干蒿属为主的草本植物和喜湿绣线菊属为主的灌木林占优势,偶见少量松属的针叶林及中生环境的具刺状菊科,推测此时植被类型为疏林-草原植被。I-a 亚带(100~70 cm, 1 892~1 335 a)以喜冷干的蒿属为主,喜湿绣线菊属含量平稳,毛茛科短暂出现,气候寒冷,沉积环境中生偏干。I-b 亚带(70~40 cm, 1 335~779 a)以喜冷干的蒿属为主,但含量略有下降,喜湿的绣线菊属和地榆属升高,气温较 I-a 亚带升高,气候向暖湿转变。在科尔沁左翼后旗发现古土壤,其测年结果为 $1\,200 \pm 80$ a 和 $1\,256 \pm 100$ a,也证实了气候向暖湿转变^[19]。由本次孢粉分析结果可见,PM25 黑土剖面 I 带反映了由冷干向暖湿的气候转变(图 5)。

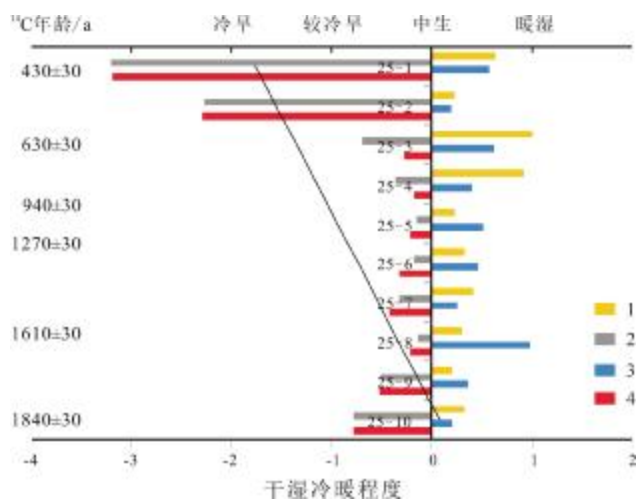


图 5 孢粉反映的古气候演化图

Fig. 5 Paleoclimate evolution revealed by sporopollen

1—暖(warm); 2—冷(cold); 3—湿(wet); 4—干(dry)

II 带(40~0 cm, 779~37 a)灌木和草本植物花粉占优,平均含量达 56.28%;针叶植物花粉次之,平均含量为 39.50%;蕨类孢子平均含量为 2.17%;落叶阔叶植物花粉平均含量为 1.39%,偶见少量水生植物花粉。II-a 亚带(40~20 cm, 779~408 a)与 I-b 相比,该亚带典型特征为以喜湿莎草科为主的草本植物花粉占绝对优势,冷干型松属含量略有增加,喜湿绣线菊属含量减少,蒿属含量急剧减少,可见少量冷干型藜属及超旱生麻黄属花粉,蔷薇属突然消失,推测当时植被为以莎草科及蒿属为主的草原植被,发育少量以松属为主的

针叶林,局部分布沼泽,气候继续向暖湿转变。II-b 亚带(20~0 cm, 408~37 a)冷干型松属花粉含量快速升高,藜属含量略有增加,莎草科含量急剧下降,水生草本植物香蒲属花粉少量出现。淡水静水藻类环纹藻出现较多,双星藻少量出现。推测当时植被为以针叶松属为主的松树林,林下发育藜属等草本植物,水生草本植物零星分布,气候向冷干转变。由本次孢粉分析结果可见 II 带反映了由暖湿向冷干的气候转变(图 5)。

3.3 元素地球化学指示的古气候变化

沉积物中元素的迁移与富集,是对不同沉积环境响应的表现^[20]。在温暖湿润环境下,Al₂O₃ 易于富集;Fe₂O₃ 在地层中含量越高,风化过程中氧化作用越强;CaO 和 MgO 的溶解与迁移,在半干旱-半湿润条件下进行;Na₂O 与 K₂O 化学性质活跃,冷干条件下易于保存^[21-22]。氧化物之间的比值可以用来表征化学风化强度^[23],通过硅铝比值 SiO₂/Al₂O₃、硅铝铁系数 SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃)、Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)、残积系数 (Al₂O₃+Fe₂O₃)/(CaO+Na₂O+MgO)这 4 种系数来表征梨树地区黑土沉积时的化学风化强度(表 2,为表述方便,下文分别用 S/A、S/R、A/NK 来代表前 3 种系数)^[24]。

通过对 PM25 剖面中 10 个氧化物样品测试分析,发现 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 在 0.25 m 处含量达到最大值(图 6),分别是 15.50%和 6.36%,而 Na₂O 与 K₂O 含量偏低,此时气候温暖湿润。II-b 亚带中 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量低于 II-a 亚带,且 II-b 亚带中 Na₂O 与 K₂O 含量明显高于 II-a 亚带,表明 II-b 亚带气候较 II-a 亚带冷干。I-a 亚带中 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 含量较 I-b 带和 II-a 带均低,指示 I-a 亚带气候冷干,I-b 和 II-a 亚带气候温暖。I-a 亚带中 Na₂O 和 K₂O 含量较 I-b 和 II-a 亚带均高,也证实了 I-a 亚带气候冷干。氧化物分析结果与孢粉组合所指示的古气候具有高度一致性。

硅铝比值(S/A)、硅铝铁系数(S/R)越小,风化强度越强^[20]。A/NK 主要反应碱金属的淋溶程度,值越大,风化强度越大^[24]。残积系数反映 Mg、Ca、Na 元素溶解与迁移和 Al、Fe 元素的富集^[25-26]。测试结果表明,I-a 亚带中 S/A、S/R 明显高于 I-b 和 II-a 亚带(图 5),在 II-a 亚带有小幅度的波动,至 II-b 亚带后有明显的上升趋势。A/NK 和残积系数的变化趋势与 S/A、S/R 相反,反映了风化强度“较弱—较强—较弱”的变化趋势。这与孢粉组合所揭示的气候变化相吻合。

表 2 PM25 样品氧化物含量及相关系数

Table 2 Oxide contents and correlation coefficients of samples from profile PM25

样品编号	深度/cm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	S/A	S/R	A/NK	残积系数
PM25-1	5	62.20	13.00	1.12	4.13	2.52	1.17	1.37	4.78	3.63	3.34	4.68
PM25-2	15	62.40	13.20	1.11	4.09	2.45	1.16	1.37	4.73	3.61	3.46	4.75
PM25-3	25	57.90	15.50	1.54	6.36	2.42	1.50	1.00	3.74	2.65	4.53	5.41
PM25-4	35	61.10	13.50	1.68	4.73	2.38	1.23	1.22	4.53	3.35	3.75	4.41
PM25-5	45	62.00	12.80	1.50	4.76	2.26	1.18	1.35	4.84	3.53	3.55	4.36
PM25-6	55	62.60	13.30	1.69	4.60	2.28	1.25	1.35	4.71	3.50	3.66	4.17
PM25-7	65	61.10	13.30	1.50	4.87	2.27	1.26	1.28	4.59	3.36	3.75	4.50
PM25-8	75	62.40	13.60	1.32	4.75	2.34	1.28	1.29	4.59	3.40	3.75	4.72
PM25-9	85	65.20	11.80	1.22	2.97	2.40	1.03	1.36	5.53	4.41	3.14	4.09
PM25-10	95	66.30	11.20	1.16	2.64	2.43	0.89	1.43	5.92	4.79	2.90	3.98

含量单位: %.

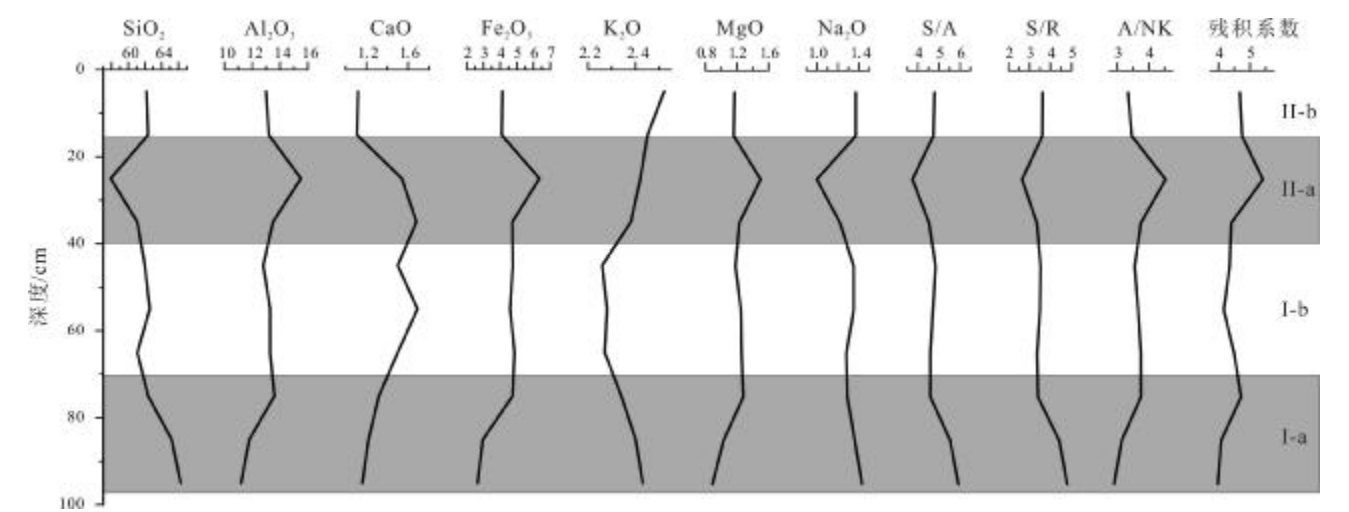


图 6 PM25 黑土剖面氧化物及相关系数变化折线图

Fig. 6 Line chart showing the oxide contents and correlation coefficient change of black soil profile PM25

3.4 梨树局部地区黑土的形成发育过程

辽河平原属于继承性第四纪沉积盆地, 由于其特殊的地理环境及地质特征形成了特定的黑土类型, 新构造运动是控制黑土区自然环境演变的主要动力, 直接影响着辽河平原地形起伏和地貌特征^[27]. 上新世末期辽河平原局部下沉, 中更新世辽东、辽西上升运动^[28], 进入全新世两侧山体开始缓慢抬升, 为后期黄土状细粒沉积物的堆积提供了地貌条件^[29]. 早全新世(11~7.5 ka)东北平原气候冷干^[10], 虽然研究区沙地存在收缩现象^[30], 但气温较低, 不利于黑土发育. 中全新

世及晚全新世早期(7.5~2.5 ka)是冰后期气候最温暖的时期^[10], 尤其 5.3~3.5 ka 梨树地区北部沙地收缩, 黑土形成^[31], 气候温暖湿润, 植被茂盛. 晚全新世(2.5 ka 以来), 抬升作用加强, 古辽东湾海平面下降^[29], 北部沙地多为固定沙地、半固定沙地以及流动沙地和半流动沙地, 沙地间的凹处多存在湖泊或沼泽. 2.2~1.4 ka 气候冷干, 沙地活化^[31], 不适宜黑土层发育. 通过此次对梨树地区黑土剖面 ¹⁴C 年龄及孢粉组合特征分析, 梨树地区黑土主要形成于 1.335 ka 以来中世纪暖期(MWP), 气候温暖湿润. 刘祥等对该期次黑土 ¹⁴C

测年结果为 $1.256 \text{ ka}^{[31]}$, 与调查结果一致。

4 结论

1) 通过辽河平原东部 PM25 黑土剖面孢粉分析, 自下而上识别出 *Spiraea-Artemisia-Sanguisorba-Rosa-Echinata Asteraceae* 和 *Pinus-Cyperaceae-Chenopodium* 两个孢粉组合。

2) ^{14}C 测年数据表明, 辽河平原东部梨树地区黑土主要形成于 1 335 a 以来的中世纪暖期(MWP)。

3) 综合 ^{14}C 测年数据及孢粉分析表明, I 带(1 840~798 a)整体反映了气候由冷干向暖湿转变, 植被为疏林草原景观。II 带(798~430 a)气候由暖湿向冷干转变, 植被为以松属为主的针叶林。

致谢: 本文涉及的所有孢粉样品由吉林大学古生物学与地层学研究中心张淑芹研究员分析鉴定, AMS ^{14}C 测年由厦门贝克新碳实验室测定, 孢粉分析受到宋运红博士的指导, 特此感谢。

参考文献(References):

- [1] 陈铁梅. ^{14}C 测年与示踪用于研究四万年来的全球变化[J]. 第四纪研究, 1990, 2: 181-187.
Chen T M. Radiocarbon and Global Change[J]. Quaternary Sciences, 1990(2): 181-187.
- [2] 陈铁梅, 李坤, 郭之虞, 等. 加速器质谱计在地球科学中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(1): 103-114.
Chen T M, Li K, Guo Z Y, et al. Application of accelerator mass spectrometry to earth science[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1989, 9(1): 103-114.
- [3] 程鹏, 周卫健, 余华贵, 等. 黄土-古土壤序列 ^{14}C 年代学研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 85-89.
Cheng P, Zhou W J, Yu H G, et al. Advances in radiocarbon dating researches in the loess-paleosol sequences [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(2): 85-89.
- [4] 沈承德, 易惟熙, 孙彦敏, 等. 鼎湖山森林土壤 ^{14}C 表观年龄及 $\delta^{13}\text{C}$ 分布特征[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 335-344.
Shen C D, Yi W X, Sun Y M, et al. ^{14}C apparent ages and $\delta^{13}\text{C}$ distribution of forest soils in Dinghushan natural reserve[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 335-344.
- [5] 李汉鼎, 冷雪天, 白艳, 等. 泥炭样品 ^{14}C 年龄可靠性初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1992, 12(2): 89-97.
Li H D, Leng X T, Bai Y, et al. A preliminary study on reliability of ^{14}C ages of peat samples[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1992, 12(2): 89-97.
- [6] 边叶萍, 翁成郁. 孢粉稳定碳同位素研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(3): 141-148.
Bian Y P, Weng C Y. An overview of carbon stable isotope analysis of pollen [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(3): 141-148.
- [7] 赵辰辰, 王永波, 胥勤勉. 2.5 Ma 以来中国陆地孢粉记录反映的古气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(4): 175-191.
Zhao C C, Wang Y B, Xu Q M. Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: Evidence from fossil pollen records[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(4): 175-191.
- [8] 孙湘君, 罗运利, 陈怀成. 中国第四纪深海孢粉研究进展[J]. 科学通报, 2003, 48(15): 1613-1621.
Sun X J, Luo Y L, Chen H C. Deep-sea pollen research in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(20): 2155-2164.
- [9] 杨再宝, 李铁刚, 南青云. 8000 a BP 以来珠江口西南部孢粉组合特征及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(4): 33-40.
Yang Z B, Li T G, Nan Q Y. Features of the sporopollen assemblages at southwestern Pearl River estuary over the past 8000 years and its paleoclimate implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(4): 33-40.
- [10] 宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 等. 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[J]. 地质通报, 2022, 41(9): 1528-1538.
Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. Palynological assemblages of typical black soil profile in the eastern Songliao Plain and their age and paleoclimatic [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(9): 1528-1538.
- [11] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 66-70.
Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 66-70.
- [12] 张新荣, 焦洁钰. 黑土形成与演化研究现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 553-568.
Zhang X R, Jiao J Y. Formation and evolution of black soil [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 553-568.
- [13] 陆继龙, 周永昶, 周云轩. 吉林省黑土某些微量元素环境地球化学特征[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 365-368.
Lu J L, Zhou Y C, Zhou Y X. Environmental geochemical characteristics of some microelements in the black soil of Jilin Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(5): 365-368.
- [14] 于磊, 张柏, 宋开山. 基于 GIS 的黑土区环境地球化学质量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 23-26.
Yu L, Zhang B, Song K S. The geochemical environment quality evaluation on the black soil region based on GIS[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(2): 23-26.
- [15] 陆继龙, 周云轩, 周永昶, 等. 黑土农业区常量和微量元素环境地

- 球化学特征[J]. 农业环境与发展, 2002, 19(1): 27-29.
- Lu J L, Zhou Y X, Zhou Y C, et al. Environmental geochemical characteristics of major and trace elements in black soil agricultural areas[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2002, 19(1): 27-29.
- [16] 余华贵, 祝一志, 程鹏, 等. 热解法用于礼村黄土-古土壤地层¹⁴C测年[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 73-78.
- Yu H G, Zhu Y Z, Cheng P, et al. Pyrolysis-combustion method used to do ¹⁴C dating of Holocene loess sequence at Licun profile[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(1): 73-78.
- [17] 罗丽萍, 朱利东, 向芳, 等. 成都平原 4000 a BP 以来的孢粉记录与环境变化[J]. 古生物学报, 2008, 47(2): 195-202.
- Luo L P, Zhu L D, Xiang F, et al. Spore-pollen assemblage and environmental changes of the Chengdu Plain during the late Holocene [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2008, 47(2): 195-202.
- [18] 高瑞祺, 赵传本, 乔秀云, 等. 松辽盆地白垩纪石油地层孢粉学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 20-100.
- Gao R Q, Zhao C B, Qiao X Y, et al. Cretaceous oil strata palynology from Songliao Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 20-100.
- [19] 裴善文, 李取盛, 夏玉梅, 等. 东北西部沙地古土壤与全新世环境[M]//施雅风. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992: 153-160.
- Qiu S W, Li Q S, Xia Y M, et al. Paleosol and Holocene environment of sandy land in western Northeast China[M]//Shi Y F. The climates and environments of Holocene Megathermal in China. Beijing: China Ocean Press, 1992: 153-160.
- [20] 高远, 秦天, 李瑞红, 等. 松辽盆地梨树断陷嫩江组孢粉记录及古气候特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1391-1402.
- Gao Y, Qin T, Li R H, et al. Palynological records and paleoclimatic characteristics of Nenjiang Formation in Lishu fault depression, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1391-1402.
- [21] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 75-82.
- Li X S, Yang D Y, Lu H Y. Oxide-geochemistry features and paleoclimatic record of the aeolian-dust depositional sequence in southern Anhui[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(4): 75-82.
- [22] 张玉芬, 李长安, 熊德强, 等. “巫山黄土”氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 352-360.
- Zhang Y F, Li C A, Xiong D Q, et al. Oxide geochemical characteristics and paleoclimate records of “Wushan loess”[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 352-360.
- [23] 冯志刚, 王世杰, 刘秀明, 等. 微地域搬运——碳酸盐岩红色风化壳形成过程的一种方式[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 127-138.
- Feng Z G, Wang S J, Liu X M, et al. Micro-area transportation of residues: A style of forming the red weathering crusts of carbonate rocks[J]. Acta Geological Sinica, 2007, 81(1): 127-138.
- [24] 马晓晨, 王家生, 陈黎, 等. 华北房山景儿峪组顶部古风化壳常量元素地球化学特征及其古气候意义[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 3853-3872.
- Ma X C, Wang J S, Chen C, et al. Major element compositions and paleoclimatic implications of paleo-regolith on top Jingeryu Formation in Fangshan, North China[J]. Earth Science, 2018, 43(11): 3853-3872.
- [25] 郭媛媛, 莫多闻, 毛龙江, 等. 澧阳平原岩板珩剖面地球化学特征与风化强度研究[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 335-341.
- Guo Y Y, Mo D W, Mao L J, et al. Geochemical characteristics and weathering intensity of the Yanbandang profile in Liyang Plain, the middle reach of the Changjiang River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(3): 335-341.
- [26] 徐树建, 倪志超, 丁新潮. 山东平阴黄土剖面常量元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(2): 353-359.
- Xu S J, Ni Z C, Ding X C. Geochemical characteristics of major elements of the Pingyin loess in Shandong Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(2): 353-359.
- [27] 刘凯, 宋运红, 杨凤超, 等. 松嫩平原北部全新世黑土剖面孢粉组合及其对环境演化的制约[J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2121-2131.
- Liu K, Song Y H, Yang F C, et al. Palynological assemblages of Holocene typical black soil profile from northern Songnen Plain and its restricts to environmental evolution [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(12): 2121-2131.
- [28] 孔维翰. 下辽河平原第四纪微体古生物和气候[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2014.
- Kong W H. Quaternary's micropalaeontology and climate of the Lower-Liaohai Plain[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2014.
- [29] 王强, 刘立军, 王卫东, 等. 环渤海地区及华北平原第四纪古环境变迁机制[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 129-138.
- Wang Q, Liu L J, Wang W D, et al. The mechanism of quaternary palaeoenvironmental change in circum-Bohai-sea region and North China plain [J]. Geological Survey and Research, 2004, 27(3): 129-138.
- [30] 冯丽杰, 郭伟静, 陈树良, 等. 松辽盆地南缘第四纪环境特征——以四平-双辽地区为例[J]. 地质与资源, 2007, 16(2): 81-85.
- Feng L J, Guo W J, Chen S L, et al. Quaternary environment characteristics in the southern margin of Song-Liao Basin: A case study of Siping-Shuangliao area [J]. Geology and Resources, 2007, 16(2): 81-85.
- [31] 刘祥, 侯兰英, 张志. 西辽河平原土地沙漠化地质环境演变研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2001, 22(3): 100-104.
- Liu X, Hou L Y, Zhang Z. Study on desertizational geological environment evolution in plain of Xi Liao River [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2001, 22(3): 100-104.