

doi: 10.12097/gbc.2023.08.039

松嫩平原齐齐哈尔地区拜泉县地表基质特征及其古环境恢复

邵兴坤, 侯红星*, 任柄璋, 时凌峰, 詹泽东, 西广越, 李俊华, 曹龙宇, 高远
SHAO Xingkun, HOU Hongxing*, REN Bingzhang, SHI Lingfeng, ZHAN Zedong, XI Guangyue,
LI Junhua, CAO Longyu, GAO Yuan

中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000
Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Langfang 065000, Hebei, China

摘要: 地表基质是自然资源管理的全新概念, 是支撑孕育各类自然资源的基础物质。加强地表基质沉积环境分析和古环境恢复对研究其形成机制具有重要意义。通过对松嫩平原拜泉地区 50 m 以浅地表基质沉积特征和沉积环境剖析, 并结合全芯粘土矿物、碳酸盐、磁化率、碳元素数据分析, 认为研究区垂向上分布了 16 层土质基质, 由深至浅呈现湖相沉积→陆域风成相→草甸相过渡沉积演化特点, 深层湖相沉积具有滨湖相沉积、堤岸相沉积、滨湖相多旋回沉积特点; 其中深层滨湖相和堤岸相沉积物形成于寒冷极干燥环境, 中深层湖相沉积物形成于温暖湿润环境, 浅表层草甸相和风成相沉积物形成于较干冷环境。综合前人资料和¹⁴C、光释光、ESR 测年结果, 将研究区沉积演化阶段划分为早更新世晚期—中更新世早期干冷沉积阶段、中更新世中晚期温暖的湖相沉积阶段、晚更新世—早全新世风成黄土沉积阶段、中晚全新世以来黑土沉积阶段。

关键词: 松嫩平原; 地表基质; 拜泉地区; 沉积环境; 古环境恢复

中图分类号: P622^{+.1}; P96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)09-1498-17

Shao X K, Hou H X, Ren B Z, Shi L F, Zhan Z D, Xi G Y, Li J H, Cao L Y, Gao Y. Sedimentary characteristics analysis and paleoenvironmental restoration of the ground substrate in Baiquan County, Qiqihar area, Songnen Plain. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1498–1514

Abstract: Ground substrate is a new concept in natural resource management, which is the fundamental material supporting the breeding of various natural resources. Strengthening the analysis of ground substrate sedimentary environment and the restoration of paleoenvironment is of great significance for studying its formation mechanism. This article analyzes the sedimentary characteristics and the sedimentary environment of a 50 m shallow ground substrate, based on the data of full core clay minerals, carbonates, magnetic susceptibility, and carbon elements. The research results indicate that there are 16 layers of soil substrate vertically distributed in the study area, exhibiting a transitional sedimentary evolution from deep to shallow, characterized by lacustrine sedimentation → continental eolian facies → meadow facies. The deep lakeside facies and embankment sediments are formed in cold and extremely dry environments, the middle deep lake sediments are formed in warm and humid environments, and the shallow surface meadow and aeolian sediments are formed in relatively dry and cold environments. Based on previous data and ¹⁴C, photoluminescence and ESR dating results, the sedimentary evolution stage of the study area is divided into the late Early Pleistocene to early Middle Pleistocene dry cold sedimentary stage, the warm lacustrine sedimentary stage in the middle and late Middle Pleistocene, the Late Pleistocene to Early Holocene eolian loess sedimentary stage and the black soil sedimentary stage in the Middle and Late Holocene.

Key words: Songnen Plain; ground substrate; Baiquan area; sedimentary environment; paleoenvironmental restoration

收稿日期: 2023-08-27; 修订日期: 2023-12-10

资助项目: 中国地质调查局项目《松嫩平原齐齐哈尔地区黑土地表基质调查》(编号: DD20220855)

作者简介: 邵兴坤(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地表基质调查和区域地质矿产调查。E-mail: 740703590@qq.com

* 通信作者: 侯红星(1975-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事区域地质矿产调查和自然资源调查。E-mail: wjhjhx@163.com

2020 年 1 月, 自然资源部发布的《自然资源调查监测体系构建总体方案》首次提出了“地表基质”的概念, 指出地表基质是地球表层孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质(自然资源部, 2020a)。2020 年 12 月, 自然资源部发布了《地表基质分类方案(试行)》, 指出地表基质是指当前出露于地球陆域地表浅部或水域水体底部, 主要由天然物质经自然作用形成, 正在或可以孕育和支撑森林、草原、水等各类自然资源的基础物质(自然资源部, 2020b)。2022 年 5 月, 自然资源部下发了《黑土地地表基质调查总体方案》, 对东北黑土地地表基质专项调查工作目标、调查内容、技术路线和成果表达进行了规定(自然资源部, 2022)。相关专家从地表基质时空-物质-属性结构模型、地表基质分类、地表基质调查目标任务、内容、技术方法、地表基质支撑服务黑土地资源适宜性评价、地表基质调查服务自然资源管理、不同地理背景区地表基质调查填图实践等方面进行了探索(葛良胜等, 2020; 郝爱兵等, 2020; 殷志强等, 2020, 2023; 侯红星等, 2021a, b, 2022; 陈龙等, 2022; 贾磊等, 2022; 陈彭等, 2023; 李响等, 2023)。

地表基质是地球关键带地表以下的物质和功能载体, 底界就是基岩与上覆物质交界面, 是表生地质作用(风化、剥蚀、搬运、沉积)所能达到的下限深度。陈龙等(2022)认为, 地表基质调查深度为非饱和的包气带 30 m。从支撑服务地表覆盖层的角度, 侯红星等(2024)认为植物根系所能达到的下限深度是地表基质研究的重点, 且植物根系所能够达到的最深区域通常不超过 50 m, 其包含地球表层系统中的生物圈、大气圈、土壤圈、水圈和岩石圈近地表的部分, 是维系上覆地表覆盖层自然生态系统正常运转的关键层位。本文选取 50 m 深度范围开展相关研究工作。

地表基质是一定时间范围内在特定地理环境背景下基础物质产生、发育、迁移和转化的产物, 地理环境和地表基质具有耦合互馈关系, 研究地表基质形成机制必须加强其古地理环境的恢复工作。笔者在齐齐哈尔市拜泉县兴华乡高海峰村部署汽车钻 BQZK05, 开展 50 m 以浅地表基质演化规律研究, 通过研究沉积相分布特征、粘土矿物、碳酸盐、磁化率等相关物化参数, 对地表基质形成古环境进行反演, 利用 ^{14}C 、光释光、电子自旋等测年数据对地表基质形成时代进行确定, 探讨区内地表基质的演化过程,

以期对反演松嫩平原西北部地区环境演化及其地表基质的调查研究工作有所帮助。

1 研究区概况

研究区位于松嫩裂谷拗陷盆地(I-4-1)腹地(付俊彧等, 2018), 第四系发育, 东南部剥蚀区出露少量嫩江组(K_2n)泥岩; 上荒山组(Qp^2s)冲积湖地层覆盖全区, 主要为青灰色、灰黑色亚粘土, 局部夹亚砂土和砂砾石透镜体; 哈尔滨组(Qp^3h)不连续分布于上荒山组之上, 为黄色、灰黄色黄土状亚粘土, 在北部河流阶地区有出露; 研究区西南部冲—湖积低平原低洼处小面积分布冲—湖积(Qh^d)黑灰色、褐黄色亚粘土、亚砂土、细粉砂等, 可见淤泥质亚粘土; 全新统冲积物(Qh^al)呈带状分布于河流的河床及河漫滩, 岩性为黄色砂、含砾砂、砂砾石层, 局部夹褐灰、灰黑色亚粘土(图 1)。

研究区为小兴安岭向松嫩平原过渡区域, 地形地貌为漫坡漫岗冲积洪积高平原, 地面高程 200~300 m, 相对高度 50~100 m。坡地坡度多为 3°~5°, 5°~8°的约占 30%, 坡面长度一般为 300~500 m, 少数可达 800~1500 m。研究区为典型的黑土区, 土壤类型为黑土, 黑土厚度在 80 cm 左右, 部分地区厚度超过 170 cm。地表基质垂向组合构型主要为壤土/泥岩、粗砂/粗砾、淤泥/砂砾、壤土/砂土、壤土/粘土/粗砾、壤土/砂砾、淤泥(图 1)。土地利用类型以旱地为主, 面积约占 75%, 主要分布在冲积—洪积波状高平原壤土/粘土/砂砾区; 其次为林地、草地和水田, 水田呈带状分布于冲积—洪积阶地和河床河漫滩壤土/砂砾区, 草地主要分布于西南角冲积—湖积低平原壤土/砂砾区, 林地呈碎片状广泛分布于冲积—洪积波状高平原壤土/粘土/砂砾区和壤土/泥岩区。

2 分析测试方法

本次在 BQZK05 汽车钻土芯采集分析测试样品, 用以探讨地表基质演化与古环境的相互关系, 相关技术要求如下。

钻孔基本情况: BQZK05 位于拜泉县兴华乡高海峰村西南 210 m 处, 坐标为东经 125°58'34"、北纬 47°42'22", 孔口高程 301.35 m, 终孔深度 50 m, 岩心长度 50 m, 岩心采取率 100 %。古环境分析样品为全孔等间距采样, 粘土矿物样品 50 件, 采样精度为 1 件/m; 碳酸盐样品 250 件, 采样精度为 5 件/m; 磁化

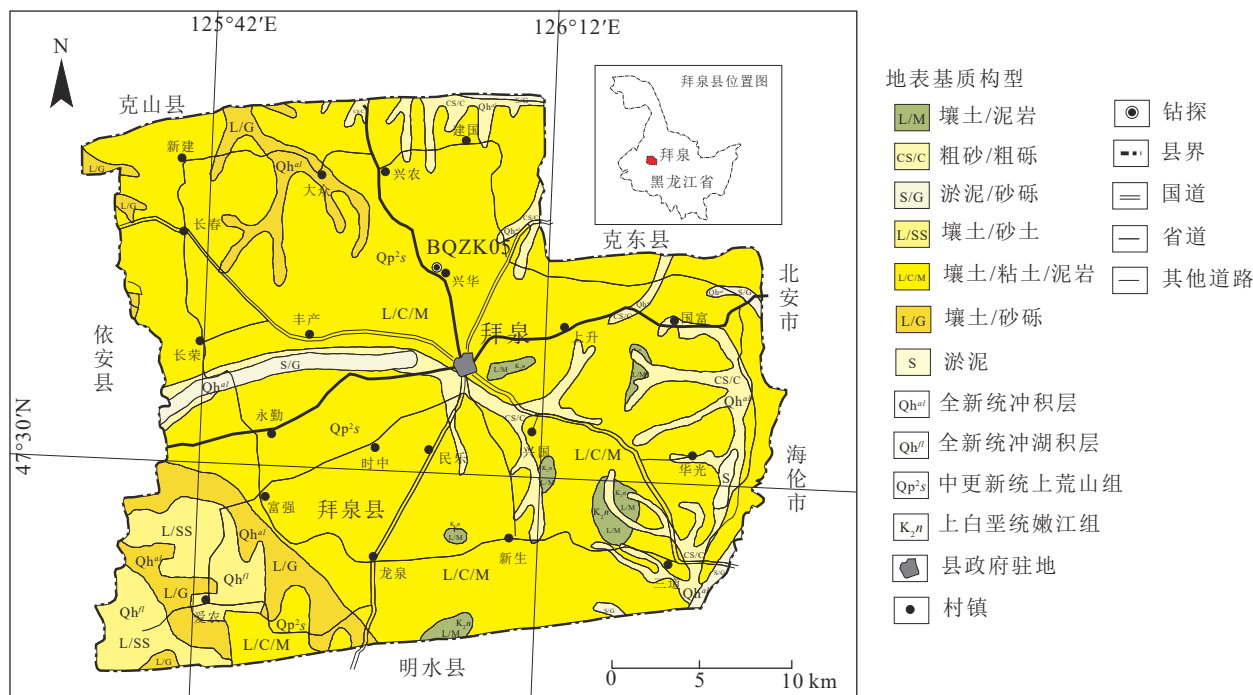


图1 拜泉县地表基质垂向构型及 BQZK05 位置图

Fig. 1 Vertical configuration of ground substrate and BQZK05 drilling location map in Baiquan county

率样品 250 件, 采样精度为 5 件/m; 有机碳样品 96 件, 采样精度为 2 件/m; 全碳样品 96 件, 采样精度为 2 件/m。测年样品按照不同地表基质类型采样, ^{14}C 样品采集于表层黑色粘质壤土, 样品数量为 3 件, 采样深度分别为 0.2 m、0.4 m 和 0.6 m; 光释光样品采集于浅层(暗)黄色壤质粘土, 样品数量为 2 件, 采样深度分别为 1.4 m 和 3.6 m; 电子自旋样品采集于深层青灰色粘土, 样品数量为 6 件, 采样深度分别为 23.7 m、28.3 m、36.47 m、38.72 m、43.15 m 和 46.4 m。

粘土矿物分析测试工作由北京北达智汇微构分析测试中心有限公司完成。仪器型号为 X 射线衍射仪(D8 Advance), 检测依据为《沉积岩中粘土矿物和常见非粘土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2018), 所用试剂和标物为乙二醇、氨水、冰醋酸、双氧水。测试条件: 温度 22℃, 相对湿度 30%, X 射线为 $\text{CuK}\alpha$, 管电压 40 kV, 管电流 40 mA, 单色器 Ni 滤片, 扫描方式 $\theta/2\theta$ 扫描, 步进扫描步宽 $0.02^\circ(2\theta)$, 停留时间 0.3 s。

磁化率测试在吉林大学地球探测科学与技术学院古地磁实验室完成。工作程序为土质样品干燥及粉碎、土质样品筛选(筛选土样的分样筛为 10 目)及装盒、磁化率测定。土壤样品的磁化率测定使用捷

克生产的 SM-30 磁化率仪, 仪器技术参数: 灵敏度 10^{-7} SI, 测量范围 $0.001\sim1000\times10^{-3}$ SI, 测量时间基本模式 5 s, 数字显示 4 数位 LCD, 内存容量 250 个测量数据, 控制按键 3 个按键。首先在空气中标定, 然后在装有土样的圆柱形样品盒顶底表面测定 2 次磁化率, 最后在空气中校准, 并显示经过校准后的 2 次磁化率读数的平均值。参考中国地质调查局地质技术标准《岩矿石物性调查技术规程》(DD2006—03), 质检率为 10.2%, 磁化率测定检查工作以重复测定方法进行。磁化率测定的平均相对误差为 0.22%。

碳酸盐测试在吉林大学油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合工程实验室完成。实验设备包括 METTLER TOLEDO AL204 电子天平, 透水坩埚, 滴定管, 高精度 pH 试纸, 101A—2E 电热鼓风干燥箱。本次碳酸盐分析实验方法采用中和滴定法, 使用滴定管(25 mL), 依据森林土壤碳酸钙的测定(LY/T1250—1999)方法测定。

有机碳测试在吉林大学油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合工程实验室完成, 实验仪器: METTLER TOLEDO AL204 电子天平, METTLER TOLEDO XP6 电子天平, 透水坩埚, 滴定管, 高精度 pH 试纸, 电热鼓风干燥箱 101A—2E, 英国 Elementar 生产的 vario PYRO cube 元素分析仪—ISOprime

100 型稳定同位素质谱联用系统,小锡纸杯。

电子自旋共振测试在中国原子能科学研究院核技术综合研究所计量测试中心完成。仪器型号为德国布鲁克公司 EMX BRUKER X—Band ESR 信号测量谱仪。低温测量参数测量功率 0.2 mW,微波频率 9.46 GHz,中心/磁场 3396 G,扫场宽度 350 G,调制幅度 1.00 G,转换时间 40.96 ms,时间常数 40.96 ms。常温测量参数:测量功率 2.0 mW 和 0.2 mW,微波频率 9.8 GHz,中心磁场 3520 G,扫场宽度 50 G,调制幅度 1.00 G,转换时间 5.12 ms,时间常数 40.96 ms。根据样品 ESR 信号测量结果计算等效剂量。

样品 U、Th、K 元素含量分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。仪器型号为 NexION300D 等离子体质谱仪(U、Th)和 Z—2000 石墨炉原子吸收分析仪(K)。根据样品的 U、Th、K 含量和宇宙射线、含水量等,计算样品剂量率。

3 地表基质沉积相垂向特征

汽车钻 BQZK05 土芯整体表现为由上至下为黑色壤土+黄色粘土+青色粘土多层垂向结构。综合 BQZK05 汽车钻资料区内沉积相分布特点,表层为草甸相黑色壤土,黑色壤土下部母质为陆域风成相黄色粘土,深部物质为低能滨(浅)湖相沉积物(图 2)。

(1)草甸相

0~1 m 黑色粘质壤土,团粒结构,紧实,湿润,含锰结核,少量孔隙,含少量植物根系,富含有机质。在 1.50 m 处含粘土质透镜体,透镜体呈块状,紧实,湿润,含黄粘土结核,结核粒径 5 cm。

(2)陆域风成相

1~3.15 m 黄色壤质粘土,团粒结构,块状构造,紧实,湿润,含少量孔隙,含少量植物根系,偶见少量锰结核,含少量黑色有机质。

3.15~5 m 暗黄色壤质粘土,团粒结构,紧实,略为湿润,中量孔隙,含锰结核和钙质结核,含少量石英、燧石碎屑,含少量黑色有机质。

(3)滨湖亚相

5~5.90 m 暗绿色粘土,棱块状结构,紧实,略湿润,少量孔隙,含锰结核。

5.90~7.10 m 绿灰色粘土,棱块状结构,紧实,湿润,中量孔隙,含铁锈斑纹,含少量有机质和炭质结核。

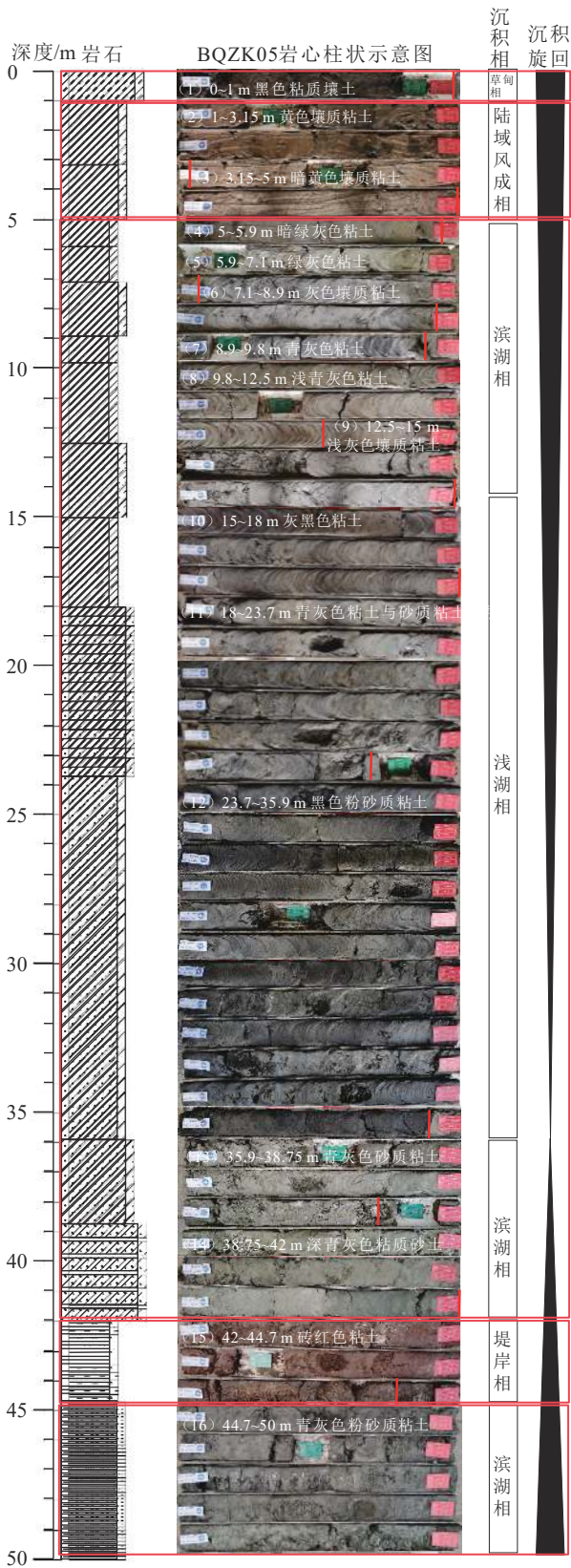


图 2 BQZK05 岩性沉积相图

Fig. 2 Lithological sedimentary facies diagram of BQZK05 soil core

7.10~8.90 m 灰色壤质粘土,团块状结构,紧实,略为湿润,中量孔隙,含少量有机质,含锰结核,含胶膜。

8.90~9.80 m 青灰色粘土,棱块状结构,紧实,略湿润,少量孔隙,含极少量铁锈斑纹,含有机质斑纹碎块。

9.80~12.50 m 浅青灰色粘土,团块状结构,紧实,略湿润,中量孔隙,含极少量铁锈斑纹,含黑色碳质斑纹。

12.50~15 m 浅灰色壤质粘土,块状结构,少量团粒结构,紧实,略湿润,中量孔隙,含胶膜,含锰结核。

(4)浅湖亚相

15~18 m 灰黑色粘土,棱块状结构,紧实,略湿润,中量孔隙,见少量不规则粉砂质条带,含铁锈斑。

18~23.70 m 青灰色粘土与砂质粘土互层,棱块状结构,砂屑结构,紧实,略湿润,少量孔隙,含铁锈斑纹。

23.70~35.90 m 黑色粉砂质粘土,砂屑结构,紧实,略湿润,少量孔隙,富含有机质。

(5)滨湖亚相

35.90~38.75 m 青灰色砂质粘土,砂屑结构,紧实

度为松,湿度为干,中量孔隙,含岩石碎(泥)块。

38.75~42 m 深青灰色粘质砂土,砂屑结构,紧实度为松,湿度为干,中量孔隙。

(6)堤岸亚相

42~44.70 m 砖红色粘土,块状结构,非常紧实,湿度等级为干,少量孔隙,含泥岩碎块。

(7)滨湖亚相

44.70~50 m 青灰色粉砂质粘土,砂屑结构,非常紧实,湿度等级为干,少量孔隙,富含有机质。

4 地表基质垂向物理化学指标特征及其环境意义

4.1 粘土矿物特征及其环境意义

粘土矿物形成和转化的影响因素较多,其中气候因素起主要作用,不同气候条件下所形成的粘土矿物截然不同。干冷气候易形成伊利石(It),温暖湿润气候易形成蒙脱石(S),干湿交替环境下易形成伊蒙混层粘土(I/S),湿热气候易形成高岭石(Kao)([胡彬等, 2019](#); [吴劲宣等, 2022](#))。

根据图 3 和表 1 数据,浅表层草甸相黑色粘质壤土和陆域风成相(暗)黄色壤质粘土中粘土矿物以伊蒙混层粘土(I/S)为主,含量为 92%~94%,伊蒙混层比为 50%~60%,根据伊蒙混层比可以测算出伊蒙

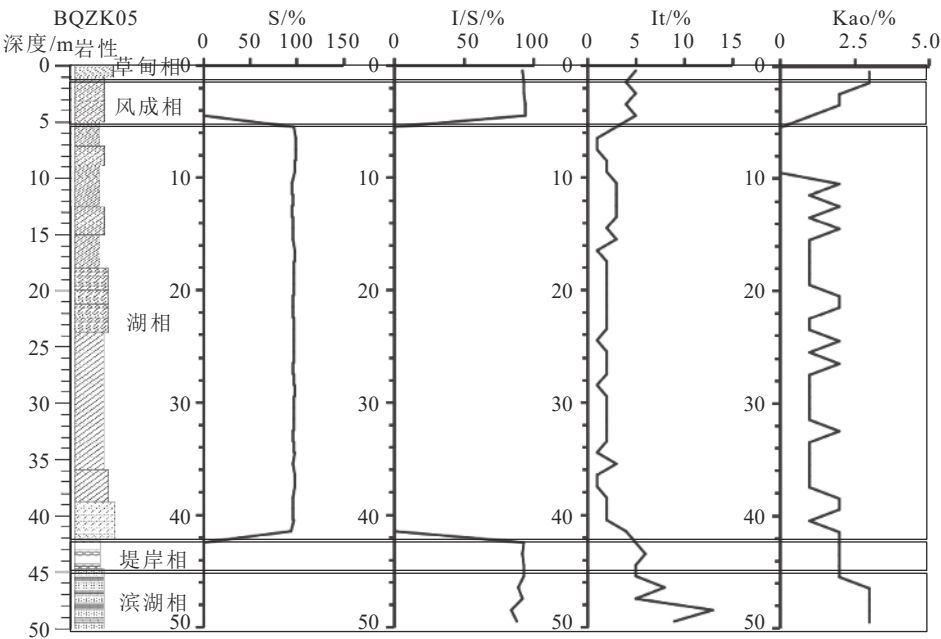


图 3 BQZK05 粘土矿物含量对比图

Fig. 3 Comparison chart of clay mineral content of BQZK05 soil core
S—蒙脱石; I/S—伊蒙混层粘土; It—伊利石; Kao—高岭石

表 1 BQZK05 粘土矿物分析测试结果

Table 1 Analysis and testing results of clay minerals in BQZK05 soil core

样品名称	粘土矿物相对含量/%				混层比/%			采样深度 /m	沉积相	样品名称	粘土矿物相对含量/%				混层比/%			采样深度 /m	沉积相
	S	I/S	It	Kao	I/S	It	S				S	I/S	It	Kao	I/S	It	S		
BQZK05—N1	—	92	5	3	55	90	2	0.5	黑色粘质壤土, 草甸相	BQZK05—N26	97	—	2	1	—	—	—	25.5	黑色粉砂质粘土, 浅湖相
BQZK05—N2	—	93	4	3	55	91	2	1.5	(暗)黄色壤质粘土, 风成相; 呈现出干湿交替的沉积环境	BQZK05—N27	96	—	2	2	—	—	—	26.5	
BQZK05—N3	—	93	5	2	50	91	2	2.5		BQZK05—N28	97	—	2	1	—	—	—	27.5	
BQZK05—N4	—	94	4	2	55	92	2	3.5		BQZK05—N29	98	—	1	1	—	—	—	28.5	
BQZK05—N5	—	94	5	1	60	92	2	4.5		BQZK05—N30	97	—	2	1	—	—	—	29.5	
BQZK05—N6	97	—	3	—	—	—	—	5.5	暗绿色粘土, 滨湖相	BQZK05—N31	97	—	2	1	—	—	—	30.5	
BQZK05—N7	99	—	1	—	—	—	—	6.5		BQZK05—N32	97	—	2	1	—	—	—	31.5	
BQZK05—N8	99	—	1	—	—	—	—	7.5	绿灰色粘土, 滨湖相	BQZK05—N33	96	—	2	2	—	—	—	32.5	
BQZK05—N9	98	—	2	—	—	—	—	8.5	灰色壤质粘土, 滨湖相	BQZK05—N34	97	—	2	1	—	—	—	33.5	
BQZK05—N10	98	—	2	—	—	—	—	9.5	青灰色粘土, 滨湖相	BQZK05—N35	98	—	1	1	—	—	—	34.5	
BQZK05—N11	95	—	3	2	—	—	—	10.5	浅青灰色粘土, 滨湖相	BQZK05—N36	96	—	3	1	—	—	—	35.5	
BQZK05—N12	96	—	3	1	—	—	—	11.5		BQZK05—N37	98	—	1	1	—	—	—	36.5	
BQZK05—N13	95	—	3	2	—	—	—	12.5		BQZK05—N38	98	—	1	1	—	—	—	37.5	
BQZK05—N14	96	—	3	1	—	—	—	13.5		BQZK05—N39	96	—	2	2	—	—	—	38.5	
BQZK05—N15	96	—	2	2	—	—	—	14.5		BQZK05—N40	96	—	2	2	—	—	—	39.5	
BQZK05—N16	96	—	3	1	—	—	—	15.5	灰黑色粘土, 浅湖相	BQZK05—N41	97	—	2	1	—	—	—	40.5	
BQZK05—N17	98	—	1	1	—	—	—	16.5		BQZK05—N42	94	—	4	2	—	—	—	41.5	
BQZK05—N18	97	—	2	1	—	—	—	17.5	青灰色粘土与砂质粘土互层, 浅湖相	BQZK05—N43	—	93	5	2	65	92	1	42.5	
BQZK05—N19	97	—	2	1	—	—	—	18.5		BQZK05—N44	—	92	6	2	65	91	1	43.5	
BQZK05—N20	97	—	2	1	—	—	—	19.5		BQZK05—N45	—	93	5	2	65	92	1	44.5	
BQZK05—N21	96	—	2	2	—	—	—	20.5		BQZK05—N46	—	93	5	2	65	92	1	45.5	
BQZK05—N22	96	—	2	2	—	—	—	21.5		BQZK05—N47	—	89	8	3	65	88	1	46.5	
BQZK05—N23	97	—	2	1	—	—	—	22.5	黑色粉砂质粘土, 浅湖相	BQZK05—N48	—	92	5	3	65	91	1	47.5	
BQZK05—N24	97	—	2	1	—	—	—	23.5		BQZK05—N49	—	84	13	3	55	82	2	48.5	
BQZK05—N25	97	—	1	2	—	—	—	24.5		BQZK05—N50	—	88	9	3	50	86	2	49.5	

注: S—蒙脱石; It—伊利石; I/S—伊蒙混层; Kao—高岭石

混层粘土矿物中伊利石和蒙脱石的单矿物成分(表 1),伊利石(含伊蒙混层矿物伊利石)含量 95%~97%,蒙脱石(含伊蒙混层矿物蒙脱石)含量 2%,高岭石含量 1%~3%,粘土矿物成分代表了干燥寒冷的气候条件。中深层湖相(深)青灰色(粉)砂质粘土中粘土矿物以蒙脱石为主,含量为 94%~99%,伊利石含量为 1%~3%,粘土矿物成分代表了温暖湿润的气候条件。深层堤岸相砖红色粘土和滨湖相青灰色粉砂质粘土中粘土矿物以伊蒙混层粘土为主,含量为 84%~93%,伊蒙混层比 50%~65%,伊利石(含伊蒙混层矿物伊利石)含量 95%~97%,蒙脱石(含伊蒙混层矿物蒙脱石)含量 1%~2%,高岭石含量 2%~3%,粘土矿物成分代表了干燥寒冷的气候条件。

本文计算了蒙脱石+伊蒙混层含量与伊利石+绿泥石含量比值($(S+I/S)/(It+C)$),比值高代表沉积环境相对湿润,比值低代表沉积环境相对干旱(任增莹等, 2016; Fang et al. 2019; 吴劲宣等, 2022)。表 2 数据显示, 44.7~50 m 滨湖相沉积物质($(S+I/S)/(It+C)$)值为 8.12, 42~44.7 m 堤岸相沉积物质($(S+I/S)/(It+C)$)值为 16.78, 5~42 m 湖相沉积物质($(S+I/S)/(It+C)$)值为 55.36, 1~5 m 风成相沉积物、0~1 m 草甸相沉积物($(S+I/S)/(It+C)$)值为 22.48, 数值变化反映了研究区干旱→湿润→干旱的气候变化趋势。

4.2 碳酸盐、磁化率特征及其环境意义

气候是控制碳酸盐(碳酸钙+碳酸镁)沉积的一个重要因素,碳酸盐在湿热的气候条件下容易溶解流失,在干冷的气候条件下不易溶解,有利于堆积。碳酸盐含量高指示气候干冷,碳酸盐含量低指示气候湿热(席建建, 2018)。表 3、图 4 显示,浅表层草甸相黑色粘质壤土和风成相(暗)黄色壤质粘土中碳酸盐含量为 0.072%~0.095%,平均值 0.081%;中深层湖相(深)青灰色(粉)砂质粘土中碳酸盐含量 0.002%~0.131%,平均值 0.052%;深层堤岸相砖红色

粘土和滨湖相青灰色粉砂质粘土中碳酸盐含量 0.048%~0.266%,平均值 0.106%。整体浅表层草甸相黑色粘质壤土、风成相(暗)黄色壤质粘土、深层堤岸相砖红色粘土和滨湖相青灰色粉砂质粘土中碳酸盐矿物含量高,代表了干冷的气候环境;中深层湖相(深)青灰色(粉)砂质粘土中碳酸盐含量较低,代表了暖湿气候环境。

湖泊中一般强磁性矿物的来源主要有 2 种:

①碎屑成因,由冬季风或者西风环流从干旱区搬运随粉尘入湖形成或者流域周围由河流或近岸湖水侵蚀搬运而来;②自生成还原条件下有机质和 S 元素供应充足,可形成强磁性铁的硫化物,如胶黄铁矿(詹涛等, 2023)。磁化率较高的 0~4.2 m 陆域草甸相黑色粘质壤土和陆域风成相黄色壤质粘土。42~45 m 氧化环境堤岸相砖红色粘土,且区内磁化率数据与 S 元素数据没有相关性,所以可以判断区内磁性矿物来源于外部物质的带入。5~42 m 和 42~50 m 处为稳定的湖相沉积,构成了正旋回韵律,此段磁化率较低且稳定,可能与古大湖稳定深水沉积环境有关。

4.3 C 元素特征及其环境意义

土壤 C 含量对气候温度具有指示意义,对气候变暖具有互馈作用。

表层(0~1 m)草甸相黑色壤质粘土有机碳和全碳含量较高,表明夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥的季风气候条件下的碳储过程(表 4; 图 5)。

1~5 m 处陆域风成相黄色壤质粘土有机碳和全碳含量较低,代表干冷的气候条件。

湖相沉积物中黑色粘土越发育,有机碳和全碳含量增高,代表了水体越深。35.9~5 m 湖相沉积物有机碳和全碳含量由高逐渐降低,代表了由深水沉积环境向浅水沉积环境转化的过程,其中 23.7~35.9 m 处有机碳和全碳含量达到了峰值,代表

表 2 BQZK05 粘土矿物 ($(S+I/S)/(It+C)$) 值

Table 2 Clay mineral ($(S+I/S)/(It+C)$) value of BQZK05 soil core

深度范围/m	沉积相	$(S+I/S)/(It+C)$ 平均值	土质类型
0~1	草甸相	22.48	黑色壤土
1~5	风成相		黄色壤质粘土
5~42	湖相	55.36	青灰色砂质粘土
42~44.7	堤岸相	16.78	红色粘土
44.7~50	滨湖相	8.12	青灰色粉砂质粘土

表 3 BQZK05 碳酸盐和磁化率分析测试结果

Table 3 Analysis and test results of carbonate and magnetic susceptibility of BQZK05 soil core

序号	样品野外编号	取样深度/m	碳酸盐含量/%	容积磁化率/ 10 ⁻³ SI	序号	样品野外编号	取样 深度/m	碳酸盐含量/%	容积磁化率/ 10 ⁻³ SI
1	BQZK05—T1	0	0.08187	0.0187	120	BQZK05—T127	25.2	0.05718	0.0189
2	BQZK05—T2	0.2	0.09452	0.0242	121	BQZK05—T129	25.6	0.04858	0.0113
3	BQZK05—T3	0.4	0.08037	0.021	122	BQZK05—T130	25.8	0.0474	0.0121
4	BQZK05—T4	0.6	0.07445	0.0154	123	BQZK05—T131	26	0.03968	0.0156
5	BQZK05—T5	0.8	0.07248	0.0187	124	BQZK05—T132	26.2	0.06624	0.0265
6	BQZK05—T6	1	0.06753	0.0267	125	BQZK05—T133	26.4	0.07414	0.0136
7	BQZK05—T7	1.2	0.07092	0.0265	126	BQZK05—T134	26.6	0.04965	0.0117
8	BQZK05—T8	1.4	0.06307	0.0278	127	BQZK05—T135	26.8	0.09577	0.0118
9	BQZK05—T9	1.6	0.07214	0.0171	128	BQZK05—T136	27	0.04623	0.0162
10	BQZK05—T10	1.8	0.0715	0.026	129	BQZK05—T137	27.2	0.04147	0.0119
11	BQZK05—T11	2	0.08178	0.0258	130	BQZK05—T138	27.4	0.04868	0.0134
12	BQZK05—T12	2.2	0.0742	0.0312	131	BQZK05—T139	27.6	0.08306	0.0147
13	BQZK05—T13	2.4	0.07223	0.0385	132	BQZK05—T141	28	0.04974	0.0138
14	BQZK05—T15	2.8	0.08766	0.0335	133	BQZK05—T142	28.2	0.04841	0.0183
15	BQZK05—T16	3	0.07613	0.0221	134	BQZK05—T143	28.4	0.04953	0.0133
16	BQZK05—T17	3.2	0.07624	0.0324	135	BQZK05—T144	28.6	0.0495	0.0213
17	BQZK05—T18	3.4	0.06809	0.0251	136	BQZK05—T145	28.8	0.03628	0.0151
18	BQZK05—T19	3.6	0.04993	0.0253	137	BQZK05—T146	29	0.0318	0.0144
19	BQZK05—T20	3.8	0.0615	0.0288	138	BQZK05—T147	29.2	0.04972	0.013
20	BQZK05—T21	4	0.06532	0.0198	139	BQZK05—T148	29.4	0.07752	0.0144
21	BQZK05—T22	4.2	0.05669	0.0215	140	BQZK05—T149	29.6	0.07143	0.0336
22	BQZK05—T23	4.4	0.06446	0.0218	141	BQZK05—T150	29.8	0.05256	0.0094
23	BQZK05—T24	4.6	0.06623	0.0179	142	BQZK05—T151	30	0.03769	0.0159
24	BQZK05—T25	4.8	0.05216	0.0193	143	BQZK05—T152	30.2	0.03401	0.0159
25	BQZK05—T26	5	0.06994	0.0196	144	BQZK05—T153	30.4	0.03096	0.0154
26	BQZK05—T27	5.2	0.08359	0.0157	145	BQZK05—T154	30.6	0.03802	0.0105
27	BQZK05—T28	5.4	0.08037	0.013	146	BQZK05—T155	30.8	0.03846	0.0153
28	BQZK05—T29	5.6	0.08308	0.0123	147	BQZK05—T156	31	0.04695	0.0198
29	BQZK05—T30	5.8	0.07121	0.011	148	BQZK05—T157	31.2	0.03949	0.0133
30	BQZK05—T31	6	0.08116	0.0079	149	BQZK05—T158	31.4	0.03893	0.024
31	BQZK05—T32	6.2	0.08696	0.0047	150	BQZK05—T159	31.6	0.05506	0.0135
32	BQZK05—T33	6.4	0.10246	0.0092	151	BQZK05—T160	31.8	0.03627	0.0142
33	BQZK05—T34	6.6	0.10174	0.0104	152	BQZK05—T161	32	0.05932	0.0171
34	BQZK05—T35	6.8	0.1125	0.0097	153	BQZK05—T162	32.2	0.03907	0.0208
35	BQZK05—T36	7	0.12154	0.0132	154	BQZK05—T163	32.4	0.04404	0.0169
36	BQZK05—T37	7.2	0.0765	0.0145	155	BQZK05—T164	32.6	0.05348	0.014
37	BQZK05—T38	7.4	0.07269	0.0163	156	BQZK05—T165	32.8	0.05706	0.0073
38	BQZK05—T39	7.6	0.0763	0.0123	157	BQZK05—T166	33	0.04802	0.0187
39	BQZK05—T40	7.8	0.06793	0.0153	158	BQZK05—T167	33.2	0.04162	0.0143
40	BQZK05—T42	8.2	0.04926	0.0149	159	BQZK05—T168	33.4	0.09873	0.0205

续表 3-1

序号	样品野外编号	取样深度/m	碳酸盐含量/%	容积磁化率/ 10 ⁻³ SI	序号	样品野外编号	取样 深度/m	碳酸盐含量/%	容积磁化率/ 10 ⁻³ SI
41	BQZK05—T43	8.4	0.05867	0.016	160	BQZK05—T169	33.6	0.04872	0.013
42	BQZK05—T44	8.6	0.05875	0.0146	161	BQZK05—T170	33.8	0.0423	0.0109
43	BQZK05—T45	8.8	0.04094	0.0132	162	BQZK05—T171	34	0.04282	0.0101
44	BQZK05—T46	9	0.05074	0.0163	163	BQZK05—T172	34.2	0.05058	0.0146
45	BQZK05—T47	9.2	0.06483	0.0082	164	BQZK05—T173	34.4	0.03251	0.0174
46	BQZK05—T48	9.4	0.06191	0.0099	165	BQZK05—T174	34.6	0.05292	0.0116
47	BQZK05—T49	9.6	0.03686	0.0138	166	BQZK05—T175	34.8	0.07484	0.0113
48	BQZK05—T53	10.4	0.05287	0.0145	167	BQZK05—T176	35	0.05563	0.0108
49	BQZK05—T54	10.6	0.05241	0.016	168	BQZK05—T177	35.2	0.03746	0.0134
50	BQZK05—T55	10.8	0.05353	0.0139	169	BQZK05—T178	35.4	0.06499	0.0157
51	BQZK05—T56	11	0.03067	0.0167	170	BQZK05—T179	35.6	0.05974	0.0158
52	BQZK05—T57	11.2	0.03187	0.0138	171	BQZK05—T180	35.8	0.04731	0.0121
53	BQZK05—T58	11.4	0.04093	0.0139	172	BQZK05—T181	36	0.0497	0.0204
54	BQZK05—T59	11.6	0.05034	0.0128	173	BQZK05—T182	36.2	0.06745	0.0141
55	BQZK05—T60	11.8	0.04718	0.014	174	BQZK05—T183	36.4	0.0022	0.022
56	BQZK05—T61	12	0.03255	0.0156	175	BQZK05—T184	36.6	0.07237	0.0189
57	BQZK05—T62	12.2	0.04645	0.0138	176	BQZK05—T185	36.8	0.08179	0.0187
58	BQZK05—T63	12.4	0.03239	0.0063	177	BQZK05—T187	37.2	0.08495	0.0171
59	BQZK05—T64	12.6	0.04691	0.0153	178	BQZK05—T188	37.4	0.04532	0.0176
60	BQZK05—T65	12.8	0.05046	0.0142	179	BQZK05—T189	37.6	0.04167	0.0191
61	BQZK05—T66	13	0.03747	0.0156	180	BQZK05—T190	37.8	0.04172	0.0132
62	BQZK05—T67	13.2	0.03747	0.0154	181	BQZK05—T191	38	0.04143	0.0148
63	BQZK05—T68	13.4	0.0486	0.0165	182	BQZK05—T192	38.2	0.07402	0.0133
64	BQZK05—T69	13.6	0.05192	0.0119	183	BQZK05—T193	38.4	0.13072	0.0112
65	BQZK05—T70	13.8	0.03571	0.0165	184	BQZK05—T194	38.6	0.04932	0.0083
66	BQZK05—T71	14	0.04609	0.0134	185	BQZK05—T195	38.8	0.04161	0.0116
67	BQZK05—T72	14.2	0.04325	0.014	186	BQZK05—T196	39	0.03458	0.0207
68	BQZK05—T73	14.4	0.03928	0.0134	187	BQZK05—T197	39.2	0.04069	0.0077
69	BQZK05—T74	14.6	0.04318	0.0148	188	BQZK05—T198	39.4	0.06651	0.0063
70	BQZK05—T76	15	0.03728	0.0158	189	BQZK05—T199	39.6	0.0362	0.0122
71	BQZK05—T77	15.2	0.02712	0.0122	190	BQZK05—T200	39.8	0.03146	0.0123
72	BQZK05—T78	15.4	0.01563	0.0145	191	BQZK05—T201	40	0.03679	0.0139
73	BQZK05—T79	15.6	0.01494	0.0168	192	BQZK05—T202	40.2	0.03789	0.0114
74	BQZK05—T80	15.8	0.03748	0.0159	193	BQZK05—T203	40.4	0.03663	0.0168
75	BQZK05—T81	16	0.04136	0.0124	194	BQZK05—T204	40.6	0.03444	0.0185
76	BQZK05—T82	16.2	0.03769	0.0126	195	BQZK05—T205	40.8	0.03037	0.0155
77	BQZK05—T83	16.4	0.06501	0.0165	196	BQZK05—T206	41	0.03008	0.0176
78	BQZK05—T84	16.6	0.04946	0.0118	197	BQZK05—T207	41.2	0.02439	0.0135
79	BQZK05—T85	16.8	0.03919	0.0172	198	BQZK05—T208	41.4	0.02825	0.0348
80	BQZK05—T86	17	0.0468	0.0142	199	BQZK05—T209	41.6	0.04408	0.0183
81	BQZK05—T87	17.2	0.05327	0.012	200	BQZK05—T210	41.8	0.04371	0.0185

续表 3-2

序号	样品野外编号	取样深度/m	碳酸盐含量/%	容积磁化率/ 10 ⁻³ SI	序号	样品野外编号	取样 深度/m	碳酸盐含量/%	容积磁化率/ 10 ⁻³ SI
82	BQZK05—T88	17.4	0.03888	0.0122	201	BQZK05—T213	42.4	0.12473	0.0224
83	BQZK05—T89	17.6	0.04577	0.0131	202	BQZK05—T214	42.6	0.18772	0.0293
84	BQZK05—T90	17.8	0.05091	0.0196	203	BQZK05—T216	43	0.06943	0.0867
85	BQZK05—T91	18	0.05431	0.0152	204	BQZK05—T217	43.2	0.06006	0.0358
86	BQZK05—T92	18.2	0.02718	0.0149	205	BQZK05—T218	43.4	0.04901	0.0404
87	BQZK05—T93	18.4	0.04529	0.0197	206	BQZK05—T219	43.6	0.04772	0.0431
88	BQZK05—T94	18.6	0.02358	0.0104	207	BQZK05—T220	43.8	0.0698	0.0468
89	BQZK05—T95	18.8	0.03307	0.0122	208	BQZK05—T221	44	0.07933	0.0358
90	BQZK05—T96	19	0.02473	0.0122	209	BQZK05—T222	44.2	0.06452	0.043
91	BQZK05—T97	19.2	0.03255	0.0071	210	BQZK05—T223	44.4	0.07757	0.0419
92	BQZK05—T98	19.4	0.03242	0.0129	211	BQZK05—T224	44.6	0.0824	0.034
93	BQZK05—T99	19.6	0.04491	0.013	212	BQZK05—T225	44.8	0.10504	0.0347
94	BQZK05—T100	19.8	0.04137	0.0132	213	BQZK05—T226	45	0.08475	0.0247
95	BQZK05—T101	20	0.03135	0.0139	214	BQZK05—T227	45.2	0.09417	0.026
96	BQZK05—T102	20.2	0.03442	0.0164	215	BQZK05—T228	45.4	0.0996	0.0255
97	BQZK05—T103	20.4	0.04975	0.0194	216	BQZK05—T229	45.6	0.07424	0.0258
98	BQZK05—T104	20.6	0.03728	0.0168	217	BQZK05—T230	45.8	0.09405	0.0211
99	BQZK05—T105	20.8	0.05229	0.0137	218	BQZK05—T231	46	0.08936	0.0145
100	BQZK05—T106	21	0.05825	0.0165	219	BQZK05—T232	46.2	0.0861	0.0201
101	BQZK05—T107	21.2	0.06061	0.0117	220	BQZK05—T233	46.4	0.07394	0.0138
102	BQZK05—T108	21.4	0.0646	0.0149	221	BQZK05—T234	46.6	0.08508	0.0138
103	BQZK05—T109	21.6	0.05405	0.0136	222	BQZK05—T235	46.8	0.08133	0.016
104	BQZK05—T110	21.8	0.06544	0.0137	223	BQZK05—T236	47	0.07195	0.014
105	BQZK05—T111	22	0.0668	0.0182	224	BQZK05—T237	47.2	0.07466	0.0107
106	BQZK05—T112	22.2	0.05949	0.0169	225	BQZK05—T238	47.4	0.08267	0.015
107	BQZK05—T113	22.4	0.05098	0.0189	226	BQZK05—T239	47.6	0.08179	0.0149
108	BQZK05—T114	22.6	0.05765	0.0155	227	BQZK05—T240	47.8	0.08994	0.0105
109	BQZK05—T115	22.8	0.05417	0.0236	228	BQZK05—T241	48	0.08806	0.0135
110	BQZK05—T116	23	0.0487	0.0231	229	BQZK05—T242	48.2	0.10138	0.0099
111	BQZK05—T117	23.2	0.04359	0.0128	230	BQZK05—T243	48.4	0.26506	0.0133
112	BQZK05—T118	23.4	0.0497	0.0148	231	BQZK05—T244	48.6	0.155	0.0112
113	BQZK05—T119	23.6	0.039	0.0152	232	BQZK05—T245	48.8	0.17682	0.0152
114	BQZK05—T120	23.8	0.05505	0.0545	233	BQZK05—T246	49	0.17081	0.0098
115	BQZK05—T121	24	0.05352	0.0099	234	BQZK05—T247	49.2	0.1916	0.0092
116	BQZK05—T122	24.2	0.05181	0.0325	235	BQZK05—T248	49.4	0.26623	0.0088
117	BQZK05—T124	24.6	0.03804	0.0143	236	BQZK05—T249	49.6	0.09292	0.0139
118	BQZK05—T125	24.8	0.05217	0.0134	237	BQZK05—T250	49.8	0.11584	0.0123
119	BQZK05—T126	25	0.04342	0.0164					

了湖泊水体处于最深沉积状态。

35.9~50 m 处滨湖相青灰色砂质粘土和堤岸相砖红色粘土全碳数量继续升高, 有机碳数量变低。

有机碳数量降低的原因可能与湖水水位下降有关; 全碳数量升高主要由无机碳含量升高造成, 原因在粘土中可见一定数量的钙质泥岩碎(块)屑。此处为

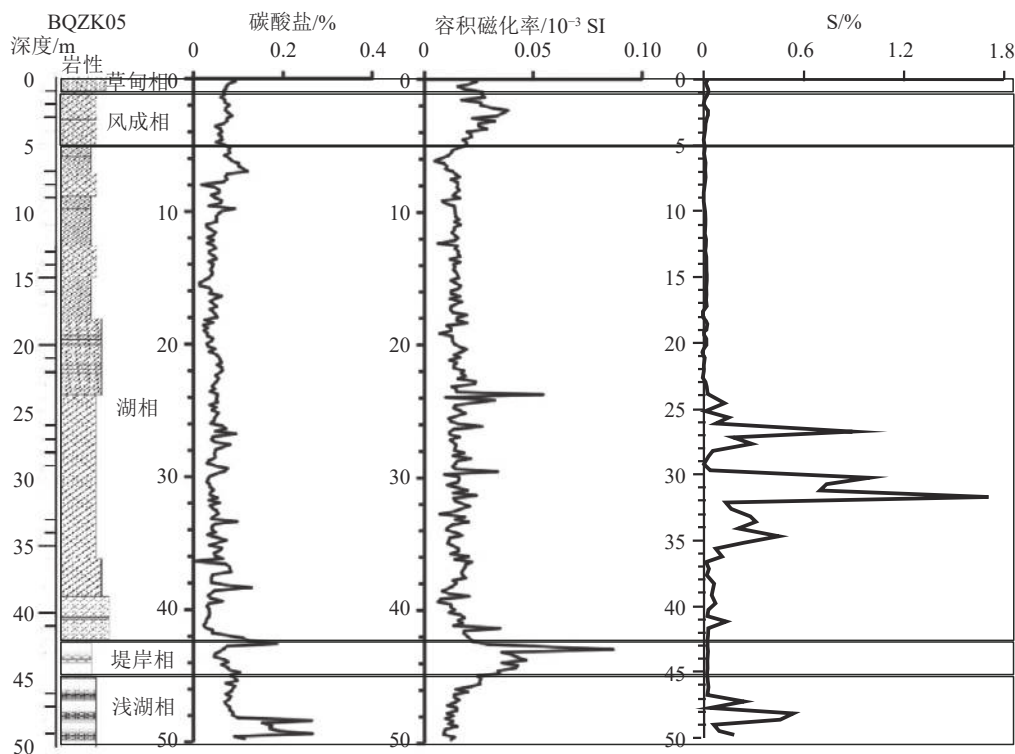


图4 BQZK05 碳酸盐和磁化率含量对比图

Fig. 4 Comparison chart of carbonate and magnetic susceptibility content of BQZK05 soil core

东侧海伦隆起向西侧依安凹陷过渡区域, 东侧海伦地区的钙质泥岩在表层地质作用下发生风化、剥蚀作用, 向西侧乌裕尔凹陷区发生搬运作用, 在搬运过程中沿途发生不同程度的钙质泥岩沉积, 此时沉积环境为风化堤岸环境。

5 地表基质形成演化过程

不同沉积成因的地表基质类型形成于不同的沉积环境, 其形成是一个历史过程, 具有阶段性特点, 代表了不同的沉积环境和古气候特征。通过阅读前人资料(夏玉梅等, 1987; 赵福岳, 2010; 赵超等, 2016; 宋运红等, 2022; 赵倩等, 2022)和本次地表基质汽车钻垂向调查(沉积相、粘土矿物、碳酸盐、磁化率、C 元素、 ^{14}C 、光释光、ESR), 对工作区 50 m 以浅地表基质形成时的沉积环境和古气候进行了探讨, 并反演其形成演化过程。

5.1 早更新世晚期—中更新世早期地质环境: 气候干冷

夏玉梅(1987)根据孢粉研究认为, 松嫩平原在上新世晚期—更新世早期, 因受来自北部冷气团的侵袭, 气候明显变冷变干, 喜温湿的乔木和灌木逐渐

向南部迁移或消亡。赵福岳(2010)认为, 此时大、小兴安岭及东部长白山等山地广泛发育冰川堆积、冰川侵蚀和冰水堆积作用形成的冰水湖泊。

本次在 46.40 m 青灰色粉砂质粘土层中采集了电子自旋(ESR)样品, 根据样品 ESR 信号测量结果计算等效剂量, 计量曲线拟合程度好(图 6), 且 ESR 测量信号较好, 年龄结果误差小于 20%, 测年结果较好。测年结果为 1172 ± 159 ka(表 5), 时代为早更新世晚期, 粘土矿物、碳酸盐、磁化率、C 元素分析结果指示此时气候干冷, 为大姑亚冰期(1050~1200 ka)产物。

5.2 中更新世中—晚期地质环境: 松辽古大湖极盛时期

中更新世中—晚期松辽平原处于整体稳定断陷接受沉积的古大湖环境(赵福岳, 2010), 本次在 43.15 m 砖红色粘土层采集电子自旋(ESR)样品, 测年结果为 727 ± 101 ka, 沉积相和粘土矿物结果显示为干旱氧化环境, 为大姑—庐山间冰期(1200~200 ka)风化的产物。在 38.72 m(青灰色砂质粘土)、36.47 m(青灰色砂质粘土)、28.3 m(黑色粉砂质粘土)、23.7 m(青灰色粘土)湖相沉积物采集电子自旋

表 4 BQZK05 有机碳和全碳分析测试结果

Table 4 Organic carbon and total carbon analysis test results of BQZK05 soil core

样品编号	采样深度/m	TC/%	Corg/%	样品编号	采样深度/m	TC/%	Corg/%
BQZK05—H1—1	0.25	1.39	1.26	BQZK05—H12-4	25.75	0.66	0.64
BQZK05—H1—2	0.75	1.82	1.68	BQZK05—H12—5	26.25	0.58	0.57
BQZK05—H2—1	1.25	0.54	0.54	BQZK05—H12—6	26.75	1.2	1.03
BQZK05—H2—2	1.75	0.48	0.47	BQZK05—H12—7	27.25	0.74	0.72
BQZK05—H2—3	2.25	0.34	0.33	BQZK05—H12—8	27.75	0.29	0.27
BQZK05—H2—4	2.825	0.31	0.31	BQZK05—H12—9	28.25	0.33	0.28
BQZK05—H3—1	3.425	0.4	0.39	BQZK05—H12—10	28.75	0.3	0.3
BQZK05—H3—2	3.95	0.32	0.31	BQZK05—H12—11	29.25	0.26	0.25
BQZK05—H3—3	4.6	0.34	0.33	BQZK05—H12—12	29.75	0.31	0.3
BQZK05—H4—1	5.25	0.21	0.21	BQZK05—H12—13	30.25	0.81	0.75
BQZK05—H4—2	5.7	0.12	0.098	BQZK05—H12—14	30.75	0.83	0.76
BQZK05—H5—1	6.25	0.075	0.059	BQZK05—H12—15	31.25	0.41	0.4
BQZK05—H5—2	6.85	0.088	0.072	BQZK05—H12—16	31.75	1.98	1.76
BQZK05—H6—1	7.4	0.26	0.25	BQZK05—H12—17	32.25	0.89	0.74
BQZK05—H6—2	8	0.2	0.2	BQZK05—H12—18	32.75	0.58	0.57
BQZK05—H6—3	8.6	0.12	0.11	BQZK05—H12—19	33.25	0.77	0.67
BQZK05—H7—1	9.35	0.17	0.16	BQZK05—H12—20	33.75	0.86	0.77
BQZK05—H8—1	10.07	0.11	0.096	BQZK05—H12—21	34.25	0.63	0.62
BQZK05—H8—2	10.61	0.094	0.082	BQZK05—H12—22	34.75	0.73	0.68
BQZK05—H8—3	11.15	0.1	0.09	BQZK05—H12—23	35.25	0.63	0.61
BQZK05—H8—4	11.69	0.11	0.097	BQZK05—H12—24	35.7	0.66	0.65
BQZK05—H8—5	12.23	0.13	0.11	BQZK05—H13—1	36.2	0.19	0.15
BQZK05—H9—1	12.715	0.15	0.13	BQZK05—H13—2	36.75	0.13	0.1
BQZK05—H9—2	13.145	0.18	0.17	BQZK05—H13—3	37.25	0.15	0.1
BQZK05—H9—3	13.575	0.19	0.18	BQZK05—H13—4	37.75	0.13	0.09
BQZK05—H9—4	14.005	0.21	0.19	BQZK05—H13—5	38.375	1.19	0.098
BQZK05—H9—5	14.435	0.22	0.21	BQZK05—H14—1	39.125	0.17	0.075
BQZK05—H9—6	14.825	0.26	0.25	BQZK05—H14—2	39.75	0.15	0.077
BQZK05—H10—1	15.29	0.22	0.21	BQZK05—H14—3	40.25	0.061	0.057
BQZK05—H10—2	15.82	0.25	0.23	BQZK05—H14—4	40.75	0.091	0.078
BQZK05—H10—3	16.3	0.16	0.15	BQZK05—H14—5	41.25	0.099	0.078
BQZK05—H10—4	16.78	0.18	0.17	BQZK05—H14—6	41.75	0.056	0.05
BQZK05—H10—5	17.26	0.16	0.14	BQZK05—H15—1	42.25	1.1	0.097
BQZK05—H10—6	17.75	0.16	0.16	BQZK05—H15—2	42.75	2.08	0.078
BQZK05—H11—1	18.25	0.15	0.15	BQZK05—H15—3	43.25	0.4	0.12
BQZK05—H11—2	18.75	0.17	0.17	BQZK05—H15—4	43.75	0.35	0.14
BQZK05—H11—3	19.25	0.19	0.18	BQZK05—H15—5	44.35	0.38	0.11
BQZK05—H11—4	19.75	0.16	0.16	BQZK05—H16—1	45.1	0.43	0.14
BQZK05—H11—5	20.25	0.21	0.2	BQZK05—H16—2	45.75	0.52	0.13
BQZK05—H11—6	20.75	0.19	0.18	BQZK05—H16—3	46.25	0.58	0.18
BQZK05—H11—7	21.25	0.19	0.18	BQZK05—H16—4	46.75	0.68	0.18
BQZK05—H11—8	21.75	0.24	0.22	BQZK05—H16—5	47.25	0.83	0.27
BQZK05—H11—9	22.25	0.24	0.23	BQZK05—H16—6	47.75	0.67	0.2
BQZK05—H11—10	22.75	0.26	0.25	BQZK05—H16—7	48.25	2.32	0.36
BQZK05—H11—11	23.35	0.26	0.25	BQZK05—H16—8	48.75	2.06	0.4
BQZK05—H12—1	24.1	0.33	0.32	BQZK05—H16—9	49.15	1.53	0.087
BQZK05—H12—2	24.75	0.41	0.41	BQZK05—H16—10	49.45	1.39	0.094
BQZK05—H12—3	25.25	0.26	0.25	BQZK05—H16—11	49.8	2.29	0.11

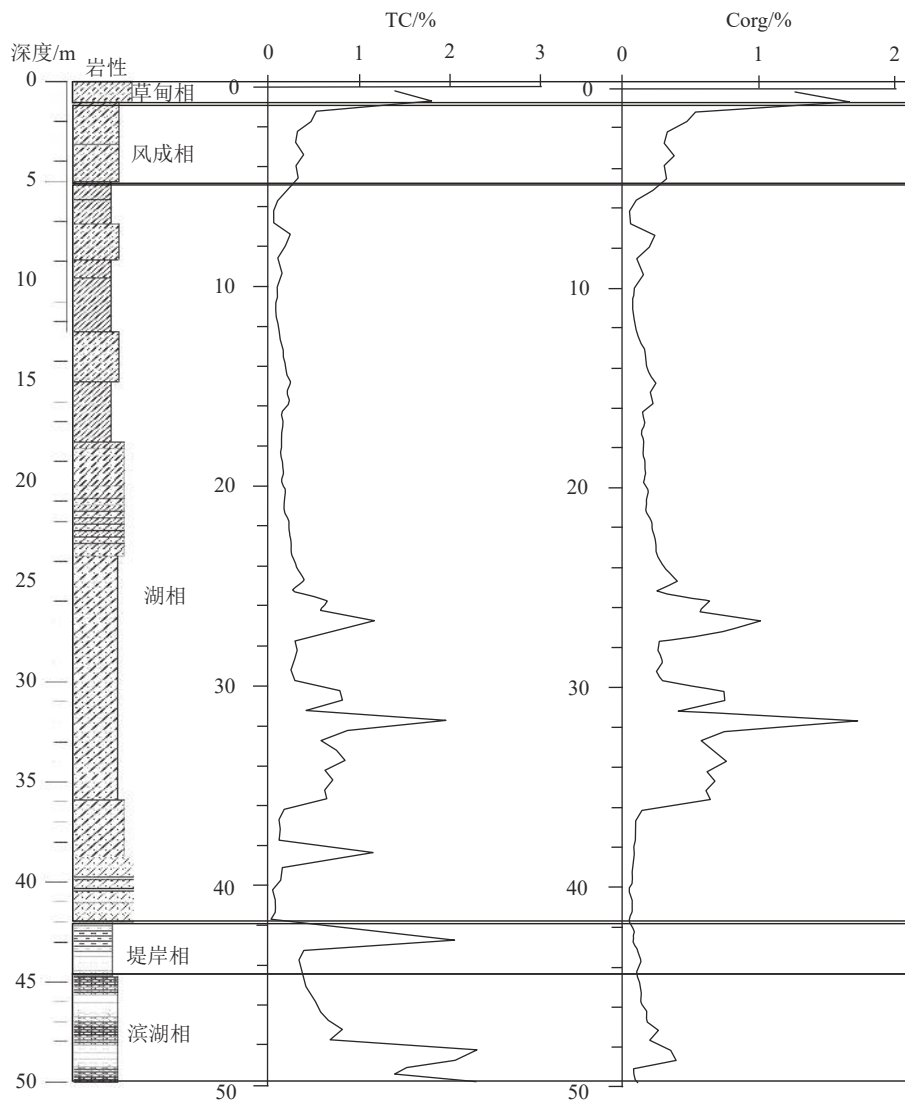


图5 BQZK05 全碳(TC)和有机碳(Corg)含量对比图

Fig. 5 Comparison of total carbon (TC) and organic carbon (Corg) content of BQZK05 soil core

(ESR)样品,测年结果为 727 ± 101 ka、 705 ± 89 ka、 653 ± 104 ka、 498 ± 68 ka、 343 ± 44 ka,时代为中更新世中晚期(表5)。本次沉积相、碳酸盐、磁化率、粘土矿物和碳元素分析结果显示,此时间段为温暖湿润的湖相沉积环境,进一步说明松辽古大湖已经扩展到研究区,接受沉积的古大湖环境。

5.3 晚更新世—早全新世地质环境: 风成黄土

晚更新世中—晚期研究区地壳运动总体仍以差异升降为主作用特征,早更新世沉积的亚粘土、亚砂土堆积物外露水面(赵福岳, 2010),湖相沉积环境转化为风化剥蚀环境。夏玉梅(1987)研究发现,晚更新世松嫩平原本地植物主要为松、云杉、桦,草本植物主要为蒿和藜,蕨类植物中出现一定数量耐寒冷

的阴地蕨,代表大陆性干冷气候。赵超(2016)认为,早全新世东北地区尤其是北部地区气候较冷凉,属于寒温带的气候环境。赵倩等(2022)根据哈尔滨荒山剖面哈尔滨组黄土(Qp^3h)研究结果认为,受控于两极冰盖扩张,全球冰量增加,气温降低,冬季风加强,亚洲内陆干旱化,此时松嫩平原处于亚洲干旱—半干旱带最东端。

根据本次光释光测年结果(表6),风成黄土的年龄为 71.4 ± 3.8 ka,该时期属于大理亚冰期(10~110 ka),此时气候普遍寒冷干燥,并且在中国北方地区分布大面积风成黄土堆积。根据本次 1~3.15 m 处黄色壤质粘土和 3.15~5 m 处暗黄色壤质粘土矿物、碳酸盐、C 元素值,此时气候干冷,湖泊萎缩,在风力作

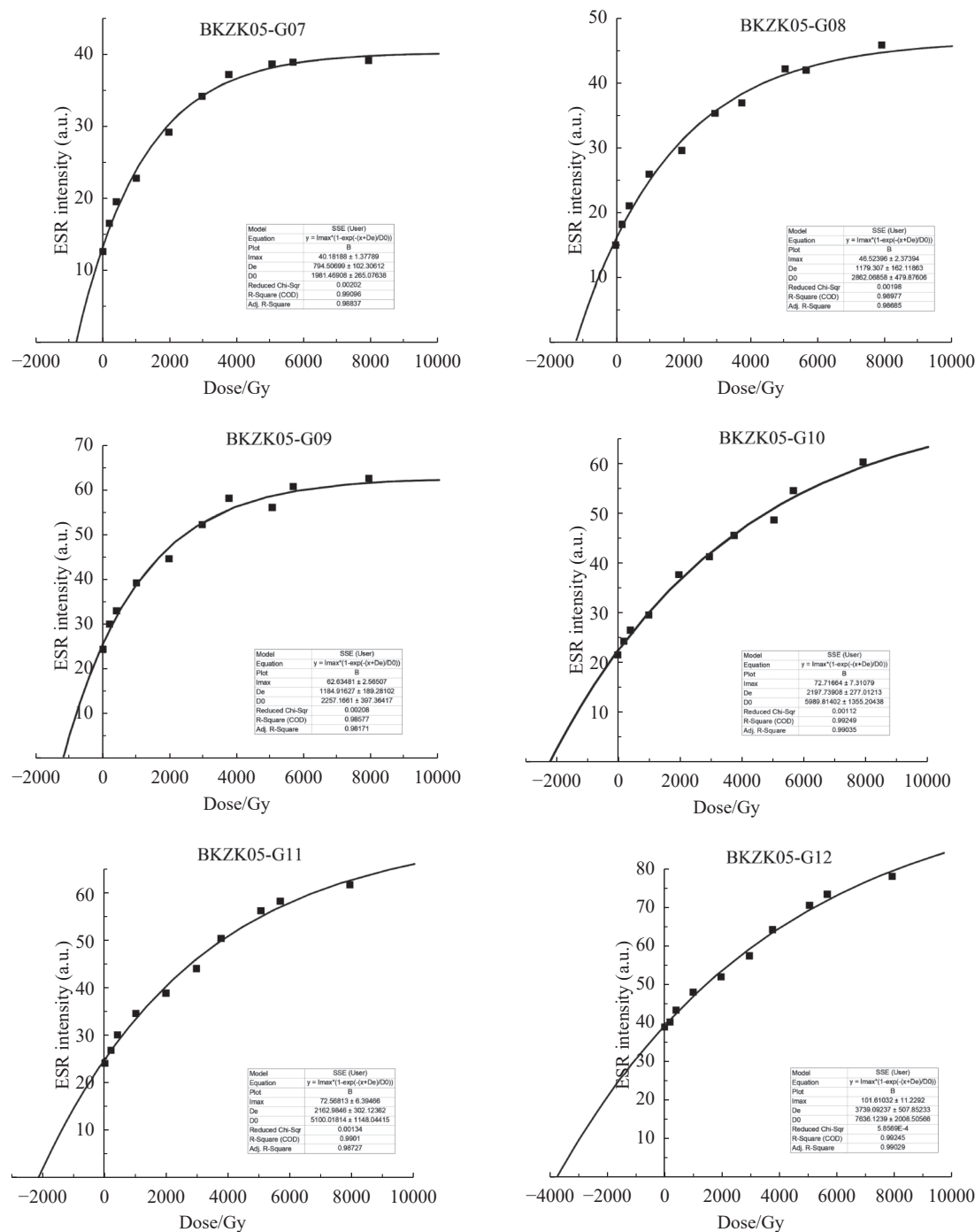


图 6 BQZK05 ESR 剂量响应曲线

Fig. 6 BQZK05 ESR dose response curves

ESR intensity—电子自旋信号强度; Dose—辐射剂量

用下, 外来风积物共同组成风积黄土和风积砂堆积, 形成的黄土为后期形成的黑土的成土母质。

5.4 中晚全新世 1 万年以来: 黑土形成

本次在表层草甸相黑色壤土采集¹⁴C 测年样品, 测年结果为 5665±30 a BP、940±20 a BP 和 3190±30

a BP(表 7)。该时期为冰后期, 气候开始转为夏季湿热、冬季干冷的温带季风气候。宋运红等(2022)通过海伦地区(拜泉县东部邻县)典型黑土孢粉组合研究及测年, 认为松嫩平原黑土主要形成于中全新世 7400 a BP 以来的大暖期, 为温暖半湿润的气候环境,

表 5 BQZK05 ESR 分析测试结果

Table 5 ESR analysis test results of BQZK05 soil core

野外编号	样品物质	深度/m	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	含水量/%	等效剂量/Gy	剂量率/(Gy·ka ⁻¹)	年龄/Ka
BQZK05—G07	粘土	23.7	2.24±0.09	13.1±0.26	1.40±0.06	16±5	795±102	2.32±0.12	343±44
BQZK05—G08	粉砂质粘土	28.30	2.09±0.08	14.2±0.28	1.29±0.05	13±5	1179±162	2.37±0.12	498±68
BQZK05—G09	砂质粘土	36.47	1.31±0.05	16.1±0.32	0.79±0.03	17±5	1185±189	1.81±0.09	653±104
BQZK05—G10	砂质粘土	38.72	1.97±0.08	17.6±0.35	1.88±0.08	11±5	2198±277	3.12±0.16	705±89
BQZK05—G11	粘土	43.15	1.50±0.06	16.4±0.33	2.28±0.09	18±5	2163±302	2.98±0.15	727±101
BQZK05—G12	粉砂质泥岩	46.4	1.99±0.08	15.4±0.31	2.34±0.09	15±5	3739±508	3.19±0.16	1172±159

注: 样品符合 ESR 测年要求, 测量信号较好, 年龄结果误差小于 20%

表 6 BQZK05 光释光测年结果

Table 6 Photoluminescence dating results of BQZK05 soil core

野外编号	深度/m	测试矿物(Q/KF)	粒径	含水量/%	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	环境剂量率/(Gy·ka ⁻¹)	等效剂量/Gy	年龄/ka
BQZK05—G02	1.4	KF	63-90	25	2.7±0.1	13.1±0.5	2.1±0.1	3.9±0.2	279.1±6.4	71.4±3.8
BQZK05—G03	3.6	KF	63-90	27	2.6±0.1	13.6±0.5	2.1±0.1	3.8±0.2	837±35	220±14

表 7 BQZK05 加速器质谱 (AMS) ¹⁴C 年龄测试结果

Table 7 Accelerator mass spectrometry (AMS) ¹⁴C age test results for BQZK05 soil core

样品原编号	采样深度/m	样品	¹⁴ C 年龄/a BP	距离2023年/a
BQZK05—C14—1	0.20	黑色粘质壤土	5665±30	5738±30
BQZK05—C14—2	0.40	黑色粘质壤土	940±20	1013±20
BQZK05—C14—3	0.60	黑色粘质壤土	3190±30	3263±30

注: 所用¹⁴C半衰期为5568年, ¹⁴C年龄BP为距1950年的年代

植被为以草本灌木为主的草原植被。此时草甸植物迅速繁盛起来, 大量植物残体形成有机质。由于冬季严寒, 微生物对有机质分解停止, 夏季多雨, 加之季节性冻土的阻隔, 使土壤水分充足, 好气性微生物活动也受到限制。因此每年只有 15% 的腐殖质被分解掉。大量有机质被保留在土壤中, 形成黑土层。

6 结 论

(1) 将地表基质垂向划分为 16 层、5 个沉积相、3 个沉积亚相。分别为草甸相(0~1 m), 黑色粘质壤土; 陆域风成相(1~5 m)黄色、暗黄色壤质粘土; 湖相(5~50 m)青灰色粘土类, 滨湖亚相(5~15 m)青灰色粘土、浅湖亚相(15~35.9 m)(灰)黑色(粉砂质)粘土、滨湖亚相(35.9~42 m)青灰色砂质粘土、堤岸亚相(42~44.7 m)砖红色粘土和滨湖亚相(44.7~50 m)青灰色粉砂质粘土。

(2) 梳理了粘土矿物、碳酸盐、磁化率、C 元素垂向分布特征, 在此基础上进行了沉积环境分析。显示表层草甸相和风成相沉积物质形成于较干冷的环境, 中深层湖相沉积物质形成于温暖湿润的沉积环境, 深层堤岸相和滨湖相沉积物质形成于寒冷极干燥环境。

(3) 综合前人资料和此次研究结果划分了 4 个气候环境演化阶段: 早更新世晚期—中更新世早期干冷环境阶段、中更新世中晚期温暖的湖相沉积环境阶段、晚更新世—早全新世风成黄土形成阶段、中晚全新世以来黑土形成阶段。

References

Chen L, Sun Y G, Shang X Y, et al. 2022. Geological survey method for the ground substrate survey of natural resource: Taking Zhangbei demonstration zone as an example[J]. Henan Science and Technology, 41(21): 99-102(in Chinese with English abstract).

- Chen P, Hou H X, Ma J C, et al. 2023. Investigation and research idea on black soil surface matrix in low mountain and hilly regions: A case study of Zhalantun area[J]. *Natural Resource Economics of China*, 81(9): 81–89(in Chinese with English abstract).
- Fang X M, Galy A, Yang Y B, et al. 2019. Paleogene global cooling—induced temperature feedback on chemical weathering, as recorded in the northern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 47(10): 992–996.
- Fu J Y, Li Y C, Zhao C J, et al. 2018. Geotechnical map of Northeast China (1 : 1.5 million scale)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ge L S, Yang G C. 2020. New field of Natural resources survey and monitoring: Ground substrate survey[J]. *Natural Resource Economics of China*, 33(9): 4–11,67(in Chinese with English abstract).
- Hao A B, Yin Z Q, Peng L, et al. 2020. A discussion of the classification of natural resources based on the combination of academic—legal principles and management[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 47(6): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Hou H X, Lu M, Qin T, et al. 2024. Methodology for surface matrix investigation[M]. Beijing: China University of Geosciences Press: 6. (in Chinese).
- Hou H X, Ge L S, Sun X, et al. 2022. A study on the application of ground substrate in the survey and evaluation of China's black soil resources: Based on ground substrate survey in Baoqing, Heilongjiang Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 37(9): 2264–2276(in Chinese with English abstract).
- Hou H X, Zhang S J, Lu M, et al. 2021. Technology and method of the ground substrate layer survey of natural resources: Taking Baoding area as an example[J]. *Northwestern Geology*, 54(3): 277–288(in Chinese with English abstract).
- Hou H X, Ge L S, Sun X, et al. 2021. Discussion on the content and elements attribute index system of surface matrix survey[J]. *Natural Science*, 9(4): 433–442(in Chinese with English abstract).
- Hu B, Zhang C X, Wu H B, et al. 2019. Clay mineralogy of an Eocene fluvial-lacustrine sequence in Xining Basin, Northwest China, and its paleoclimatic implications[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 49(3): 569–583(in Chinese with English abstract).
- Jia L, Liu H, Ouyang Y, et al. 2022. Division scheme of surface substrate mapping units of mountainous-hilly area in South China based on geological formations research: Example from Xinhui-Taishan area in Pearl River Delta[J]. *Northwestern Geology*, 55(4): 140–157(in Chinese with English abstract).
- Li X, Zhou X H, Xiang Z Q, et al. 2023. Simply discussion on the work of ground substrate survey: taking Hainan Island as an example[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(1): 68–75(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources. 2020a. General scheme for construction of natural resources survey and monitoring system[Z](in Chinese).
- Ministry of Natural Resources. 2020b. Classification Scheme for Surface Matrix (Trial)[Z](in Chinese).
- Ministry of Natural Resources. 2020. Overall plan for investigation of black soil surface matrix [Z](in Chinese).
- Ren Z Y, Wu P, Cao X X. 2016. Clay minerals and their palaeoclimatic indicators in the Mawo karst basin in Weining, Guizhou[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36(1): 70–76(in Chinese with English abstract).
- Song Y H, Liu K, Dai H M. et al. 2022. Palynological assemblages of typical black soil profile in the eastern Songliao Plain and their age and its implication for paleoclimatic[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(9): 165–177 (in Chinese with English abstract).
- Wu J X, Xia G Q, Chen Y, et al. 2022. Characteristics of clay mineralogy and its paleoclimatic significance across the Oligocene–Miocene transition in Lunpola Basin, Central Tibet[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(5): 1265–1279(in Chinese with English abstract).
- Xi J J, Fu C F, Meng Y Y, et al. 2018. Carbonate content of Jianzha Basin in Northeastern margin of the tibetan plateau and paleoclimatic significance[J]. *Quaternary Sciences*, 38(1): 107–117(in Chinese with English abstract).
- Xia Y M, Wang P F. 1987. The paleobotany and paleoclimate in the Songnen Plain: A study on the Late Tertiary–Pleistocene spore pollen assemblages[J]. *Acta Geographica Sinica*, 42(2): 165–177(in Chinese).
- Yin Z Q, Chen Z R, Li X, et al. 2023. Connotation, layering, mapping and supporting objectives of the integrated survey of ground substrates[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 50(1): 144–151(in Chinese with English abstract).
- Yin Z Q, Qin X G, Zhang S J, et al. 2020. Preliminary study on classification and investigation of surface substrate[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 11(6): 8–14(in Chinese with English abstract).
- Zhan T, Yang Y, Zeng F M, et al. 2023. Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the Dumeng borehole sequence from Northeast China Plain and implications for sedimentary evolution of the Songnen paleo-lake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(2): 673–684(in Chinese with English abstract).
- Zhao C, Li X Q, Zhou X Y, et al. 2016. Holocene vegetation succession and responses to climate change in the northern sector of Northeast China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 46(6): 870–880(in Chinese with English abstract).
- Zhao F Y. 2010. A Study of the regularity of Quaternary geological history evolution in Songliao plain based on geological remote sensing survey[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 86: 152–158(in Chinese with English abstract).
- Zhao Q, Xie Y Y, Hao D M, et al. 2022. Climatic aridification in Songnen Plain since the Middle Pleistocene from Harbin Loess records[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(6): 1702–1717(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈龙, 孙勇刚, 尚晓雨, 等. 2022. 坝上地区自然资源地表基质调查地质测量方法探讨——以张北示范区为例[J]. *河南科技*, 41(21): 99–102.

- 陈彭, 侯红星, 马骏驰, 等. 2023. 低山丘陵区黑土地地表基质调查研究思路——以扎兰屯地区为例[J]. 中国国土资源经济, 81(9): 81–89.
- 付俊彧, 李英才, 赵春荆, 等. 2018. 东北地区大地构造相图(1:150万)说明书[M]. 北京: 地质出版社.
- 葛良胜, 杨贵才. 2020. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基质调查[J]. 中国国土资源经济, 33(9): 4–11, 67.
- 郝爱兵, 殷志强, 彭令, 等. 2020. 学理与法理和管理相结合的自然资源分类学[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 1–7.
- 侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 2022. 地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨——基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J]. 自然资源学报, 37(9): 2264–2276.
- 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 2021a. 自然资源地表基基层调查技术方法新经验: 以保定地区地表基基层调查为例[J]. 西北地质, 54(3): 277–288.
- 侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 2021b. 地表基质调查内容及要素—属性指标体系探讨[J]. 自然科学, 9(4): 433–442.
- 侯红星, 鲁敏, 秦天, 等. 2024. 地表基质调查工作方法[M]. 北京: 中国地质大学出版社: 6.
- 胡彬, 张春霞, 吴海斌, 等. 2019. 西宁盆地始新世河湖相沉积序列粘土矿物组合特征及其古环境意义[J]. 中国科学(地球科学), 49(3): 569–583.
- 贾磊, 刘洪, 欧阳渊, 等. 2022. 基于地质建造的南方山地丘陵区地表基质填图单元划分方案——以珠三角新会—台山地区为例[J]. 西北地质, 55(4): 140–157.
- 李响, 周效华, 相振群, 等. 2023. 地表基质调查的工作思路刍议: 以海南岛为例[J]. 地质通报, 42(1): 68–75.
- 任增莹, 吴攀, 曹星星. 2016. 贵州威宁麻窝山岩溶盆地沉积物中粘土矿物特征及其古气候指示意义[J]. 沉积与特提斯地质, 36(1): 70–76.
- 宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 等. 2022. 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, 41(9): 165–177.
- 吴劲宣, 夏国清, 陈云, 等. 2022. 西藏伦坡拉盆地渐新世—中新世之交粘土矿物特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 40(5): 1265–1279.
- 席建建, 符超峰, 孟媛媛, 等. 2018. 青藏高原东北缘尖扎盆地碳酸盐含量及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 38(1): 107–117.
- 夏玉梅, 汪佩芳. 1987. 松嫩平原晚第三纪—更新世孢粉组合及古植被与古气候的研究[J]. 地理学报, 42(2): 165–177.
- 殷志强, 陈自然, 李霞, 等. 2023. 地表基质综合调查: 内涵、分层、填图与支撑目标[J]. 水文地质工程地质, 50(1): 144–151.
- 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 2020. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 11(6): 8–14.
- 詹涛, 杨业, 曾方明, 等. 2023. 东北平原杜蒙钻孔的磁性地层学和磁化率对松嫩古湖演化的指示[J]. 地球物理学报, 66(2): 673–684.
- 赵超, 李小强, 周新郢, 等. 2016. 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, 46(6): 870–880.
- 赵福岳. 2010. 松辽平原的第四纪地质历史演化规律研究[J]. 国土资源遥感, 86: 152–158.
- 赵倩, 谢远云, 郝冬梅, 等. 2022. 松嫩平原中更新世以来气候干旱化——来自哈尔滨黄土记录[J]. 沉积学报, 40(6): 1702–1717.
- 自然资源部. 2020a. 自然资源调查监测体系构建总体方案[Z].
- 自然资源部. 2020b. 地表基质分类方案(试行)[Z].
- 自然资源部. 2022. 黑土地地表基质调查总体方案[Z].