

陕西靖边统万城建城时期地表物质成因与自然环境

黄小刚^{1,2}, 赵景波^{2,3}, 马延东², 岳大鹏², 罗小庆²

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041004; 2. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119;

3. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061)

摘要: 为查明距今约 1600 年的统万城建城时期的自然环境和该古城是否建在风沙沉积之上这一长期争议的问题, 对 6 个钻孔剖面样品进行粒度和 X-射线衍射等分析。结果表明: 城墙内外地表之下均为湖泊沉积, 沉积物特点与风沙沉积物显著不同, 主要表现为以下五个方面: (1) 沙层含有褐黄色针铁矿; (2) 有多个深灰色沉积层; (3) 沙层中粗砂含量显著大于风积沙层; (4) 沙层中粒度成分的分选性比风积沙层明显差; (5) 细粒斑点中 Fe_2O_3 与 Al_2O_3 含量比风沙沉积物高。本文获得的证据充分表明, 在统万城建城前后, 该区自然环境较好, 普遍分布的是由湖积物组成的高平地, 统万城建在湖积沙层之上。统万城建城时期基本没有发生沙漠化, 沙漠化发生在建城之后的一定时期。

关键词: 湖泊沉积; 粒度组成; 沙漠化; 自然环境; 统万城

关于统万城所在的毛乌素沙地的沙漠化, 过去进行了许多研究^[1-5], 取得了一些重要成果。现已认识到, 在距今约 60 万年前毛乌素地区就有局地沙漠化^[1,2], 晚更新世以来发生过多进^[5-7], 明代以来沙地向南移动幅度不大^[3]。关于人类历史时期毛乌素地区的沙漠化成因, 有的认为明代或明清时期是自然原因^[8-10], 有的认为不同历史阶段原因不同^[11,12], 有自然原因也有人为原因。关于统万城建城前后的自然环境和沙漠化问题, 过去也开展了一定的研究^[13-16]。过去有的研究者根据统万城城墙之下有细砂出现, 认为统万城建城时期已经存在沙漠化, 统万城建在风成沙之上^[13,14]。也有部分学者根据历史文献记载, 认为统万城建城时水草丰美, 自然环境较好, 沙漠化是后来发生的^[3,15-17]。为了查明统万城建城时期的地表沙层代表的自然环境和统万城是否建在风沙沉积之上这一长期争论的重要问题, 对统万城进行了考察, 并利用轻便人力钻进行打钻采样和实验分析。研究统万城建城时期的自然环境, 不仅对认识当时该城是否建在风沙沉积之上有重要意义, 而且对认识该区沙漠化发生时间和原因具有重要科学意义。

1 研究区概况与研究方法

统万城位于陕西省榆林市靖边县城北约 58 km 处的红墩界乡白城子村 (图 1a), 为东晋时南匈奴贵族赫连勃勃建立的大夏国都城遗址, 也是匈奴族在人类历史长河中留下的唯一都城遗址^[10]。统万城始建于公元 413 年, 竣工于公元 418 年, 由汉奢延城改建而成^[10],

收稿日期: 2019-04-11; 修订日期: 2019-09-02

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (11&ZD097); 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目 (KLACP1904)

作者简介: 黄小刚 (1978-), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事生态环境评价与治理研究。

E-mail: huangxg@sxnu.edu.cn

通讯作者: 赵景波 (1953-), 男, 山东滕州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事自然地理与第四纪研究。

E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

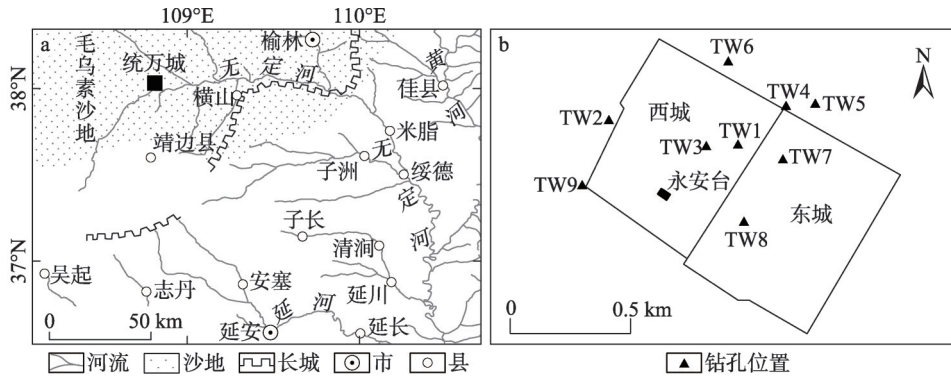


图1 统万城位置和采样钻孔分布

Fig. 1 Location of Tongwan city and distribution of sample bore holes

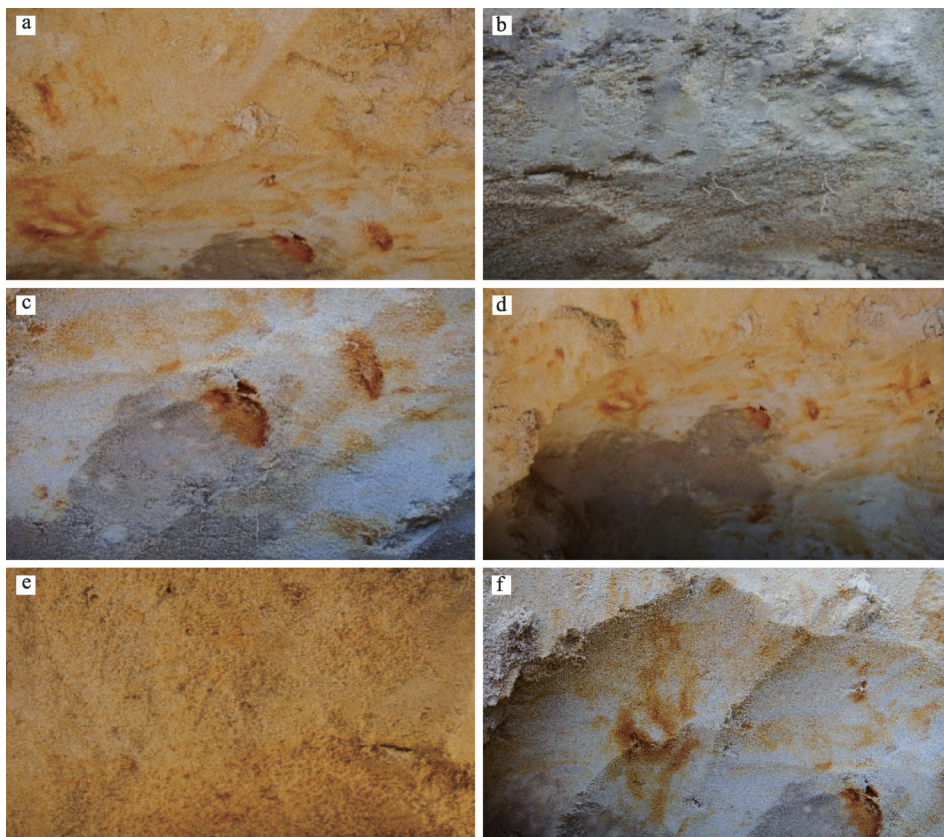
距今已有1600年历史。统万城所在的靖边县地处 $108^{\circ}17'15''\sim 109^{\circ}20'15''\text{E}$ 、 $36^{\circ}58'45''\sim 38^{\circ}03'15''\text{N}$ ，海拔在1123~1823 m之间。靖边县属半干旱大陆性季风气候，光照充足，温差大，气候干燥，雨热同季，四季分明。该区生态环境脆弱^[18]，易于发生沙漠化。年平均气温 7.8°C ， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的植物生长有效积温为 2800°C ，年平均无霜期为130天，年平均降水量 395.4 mm ^[19]，植被为灌丛草原。

研究方法包括野外考察与鉴别、打钻采样、粒度分析、X-射线衍射、统计分析。用轻便人力钻在统万城内外共打了9个1~2 m深度的钻孔(图1b)，每个钻孔剖面以10 cm间隔取样，共采集样品145个。钻孔1编号为TW1，经纬度为 $38^{\circ}00'06''\text{N}$ 、 $108^{\circ}51'06''\text{E}$ 。钻孔2编号为TW2，经纬度为 $38^{\circ}00'08''\text{N}$ 、 $108^{\circ}50'52''\text{E}$ 。钻孔3编号为TW3，经纬度为 $38^{\circ}00'06''\text{N}$ 、 $108^{\circ}51'00''\text{E}$ 。钻孔4编号为TW4，经纬度为 $38^{\circ}00'10''\text{N}$ 、 $108^{\circ}51'22''\text{E}$ 。钻孔5编号为TW5，经纬度为 $38^{\circ}00'10''\text{N}$ 、 $108^{\circ}51'28''\text{E}$ 。钻孔6编号为TW6，经纬度为 $38^{\circ}00'14''\text{N}$ 、 $108^{\circ}51'19''\text{E}$ 。钻孔7编号为TW7，经纬度为 $37^{\circ}59'57''\text{N}$ 、 $108^{\circ}51'20''\text{E}$ 。钻孔8编号为TW8，经纬度为 $37^{\circ}59'52''\text{N}$ 、 $108^{\circ}51'16''\text{E}$ 。钻孔9编号为TW9，经纬度为 $37^{\circ}59'54''\text{N}$ 、 $108^{\circ}50'48''\text{E}$ 。

2 结果分析

2.1 野外观察结果

钻孔剖面1 (TW1) 位于统万城西城偏东部，为褐黄色细沙层与灰黄色细沙层的互层，含褐黄色针铁矿斑点(图2a)，有个别中粗砂层，分选较好，揭露厚度2 m。钻孔剖面2 (TW2) 位于西城的西城墙中部外侧的墙基之下，上部为灰色中细砂层，夹有10 cm厚的灰绿色细砂层，下部为暗灰色中砂细砂层，揭露厚度1.5 m。钻孔剖面3 (TW3) 位于西城内中部的洼地，为暗灰色细砂层(图2b、图2c)，揭露厚度1.0 m。钻孔剖面4 (TW4) 位于西城的东北角墙基之下，为含褐黄色针铁矿斑点的细砂层(图2d)、灰黄色中粗砂层和灰褐色中细砂层，揭露厚度2 m。钻孔剖面5 (TW5) 位于西城的东北角东北约100 m的城墙之外，为含褐黄色斑点的灰黄色中细砂层、粉砂层，揭露厚度1 m。钻孔剖面6 (TW6) 位于西城的西北角—东北角的中间，城墙外200 m，为黄绿色细砂层、含有浅褐黄色斑点的灰黄色细砂层和灰黄色中砂层、粗砂层，揭露厚度2 m。钻孔剖面7 (TW7) 位于东城偏北部，北距城角约300 m，为含有褐黄色针铁矿斑点的灰黄



注: a. 钻孔1剖面中含褐黄色针铁矿斑点的砂层; b. 钻孔3剖面中的暗灰色砂层; c. 钻孔3剖面中含褐黄色针铁矿斑点的暗灰色砂层; d. 钻孔4剖面中的灰黄色砂层与灰色砂层; e. 钻孔7剖面中的含有均匀分散针铁矿的灰黄色砂层; f. 钻孔8剖面中含黄褐色针铁矿斑点的浅灰色砂层。

图2 统万城不同颜色的沙质沉积物

Fig. 2 Sandy deposit sediments with different colors in Tongwan city

色细砂层(图2e)和灰黄色、灰褐色细砂层, 揭露厚度2 m。钻孔剖面8(TW8)位于东城内偏西部, 距西城墙200 m, 为含有褐黄色针铁矿斑点的灰黄色、灰褐色细砂层(图2f), 揭露厚度2 m。钻孔剖面9(TW9)位于西城的西门瓮城内, 为含有褐黄色针铁矿斑点的灰黄色细砂层和灰黄色、灰褐色细砂层, 揭露厚度1 m。

根据野外调查, 在两个地点的地表见到了与风沙沉积特点不同的沙层。一处是在西城的西北角城墙下出露了含褐黄色针铁矿的褐黄色沙质堆积, 另一处是在西城北墙中部北侧可见灰绿色沙层。在西城的西北角—东北角的中间, 在城墙之北约200 m的平坦沙地表面, 可以见到具有龟裂纹的细沙层直接出露于地表, 之下为褐黄色以及深灰色沙层。在西城的西北角墙基之下, 直接看到含深褐黄色针铁矿薄膜的中粗沙层出露于城墙夯土层之下, 深褐黄色沙层与夯土层直接相连。深褐黄色中粗沙层层理很清楚, 与细沙层互层。虽然宏观观察是初步的, 但是宏观观察能够看到较大的范围, 可以避免片面性。由上可以确定, 统万城地表之下的沙层特点与风积沙层有明显不同。

2.2 粒度分析结果

除了对9个钻孔剖面进行了野外现场观察与沉积物成因识别之外, 选择了TW1、

TW3、TW4、TW6、TW7、TW8等6个钻孔剖面的样品进行粒度分析。本文根据常用的粒度划分标准,将0.005 mm、0.01 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.25 mm、0.5 mm、2 mm作为黏粒、细粉砂、粗粉砂、极细砂、细砂、中砂、粗砂的分界线。

2.2.1 颗粒级配

由6个钻孔剖面的粒度分析结果可知(表1),剖面中的粒度成分以粗砂、细砂和中砂为主,各剖面平均含量分别为34.3%、34.1%和19.3%,粗砂平均含量略多于细砂,细砂含量多于中砂,其他成分少。TW1剖面粒度最细,其次是TW7、TW3剖面粒度最粗。虽然TW1剖面以细砂为主,但是粗砂平均含量也有7.3%,最高含量为30.5%。TW7剖面也以细砂为主,但是粗砂平均含量为18.2%,最高达56.4%。TW3剖面粗砂平均含量为59.9%,最高达85.8%。

表1 统万城6个剖面粒度分析结果

Table 1 Content of grain size on 6 profiles in Tongwan city (%)

钻孔 编号	黏粒		细粉砂		粗粉砂		极细砂		细砂		中砂		粗砂	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
TW1	0~14.2	1.6	0~11.5	1.3	0~52.3	6.8	2.7~32.7	10.8	0~73.6	50.9	0~40.5	21.5	0~30.5	7.3
TW3	2.3~10.8	5.7	1.8~5.3	3.2	6.7~23.2	13.2	1~7.2	3.4	0~25.4	8.8	0~28.5	5.7	5.1~85.8	59.9
TW4	0~1.3	0.1	0~0.9	0.1	0~5.4	1.0	0~16.2	5.7	17.7~53.2	37.3	5.3~44.1	19.9	3.8~57.4	35.9
TW6	0~1.3	0.1	0~0.7	0.0	0~6.3	0.6	0.2~18.5	2.8	9.1~53.2	27.5	6.8~33.6	24.4	1.5~63.6	44.4
TW7	0~2.2	0.4	0~1.4	0.9	0~10.2	2.9	0.3~27.3	9.4	16.7~59.3	44.8	5.5~49.8	24.3	0~56.4	18.2
TW8	0~2.5	0.3	0~1.3	0.1	0~7.9	1.1	0~19.0	3.6	25.3~52.3	35.0	11.3~25.4	19.7	33.5~55.6	40.2

上述6个剖面的粒度成分与风沙沉积物差异显著(图3),风沙沉积层的粗砂含量很少。巴丹吉林沙漠中风成沙的细砂含量通常大于50%,中砂含量为约40%,粗砂在表层5 cm含量接近10%,5 cm之下的深厚沙层含量低于3%^[20]。腾格里沙漠的风成沙沉积中几乎不含粗砂^[21]。在毛乌素沙地南缘,现代沙丘沙中以细砂和中砂为主,粗砂仅为3.2%^[22]。

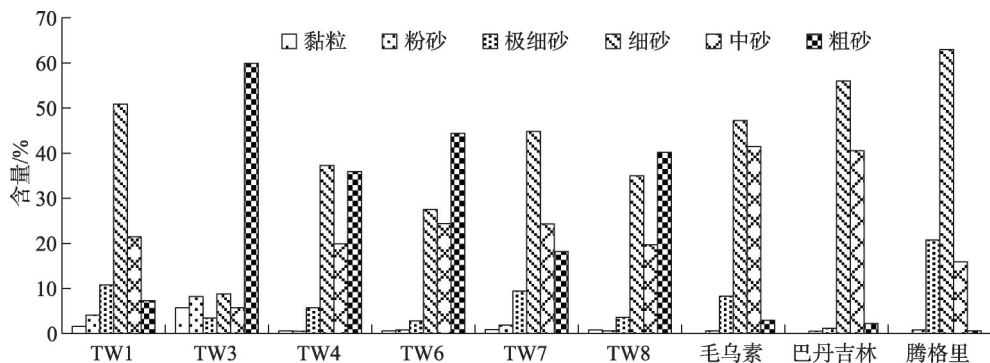


图3 统万城6个剖面与邻近沙漠粒度成分对比

Fig. 3 Comparison of grain composition between the 6 profiles in Tongwan city and its neighboring deserts

2.2.2 粒度频率分布和累积含量

剖面的粒度累积含量表示大于(或小于)任一选定粒径的颗粒在样品中的含量,用于定性分析样品的粒度特征。为了使粒度成分变化曲线更清晰,将6个剖面分成2组分别

制图(图4)。由TW4、TW6、TW7钻孔剖面沉积物粒度累积含量曲线可知(图4a), TW7孔剖面累积含量曲线位于最左侧, 表明曲线斜率大于其他2个剖面, 粒度组分偏细。而TW6孔剖面累积含量曲线位于最右侧, 表明其曲线斜率小于其他2个剖面, 粒度组分偏粗。TW4孔剖面累积含量曲线位于最中间, 粒度组分介于TW6和TW7之间。粒度频率曲线呈现突出的双峰特点(图4b)。由TW1、TW3、TW8剖面沉积物粒度累积含量曲线可知(图4c), 3个钻孔剖面沉积物的累积含量曲线存在明显差异, TW1孔剖面累积含量曲线位于最左侧, 表明曲线斜率大于其他2个剖面, 粒度组分偏细。而TW3孔剖面累积含量曲线位于最右侧, 表明其曲线斜率小于其他2个剖面, 粒度组分偏粗。TW8孔剖面粒度组分居中, 比TW1孔粗, 比TW3孔细。TW1、TW3、TW8剖面的频率分布曲线呈现不对称的双峰形(图4d)。

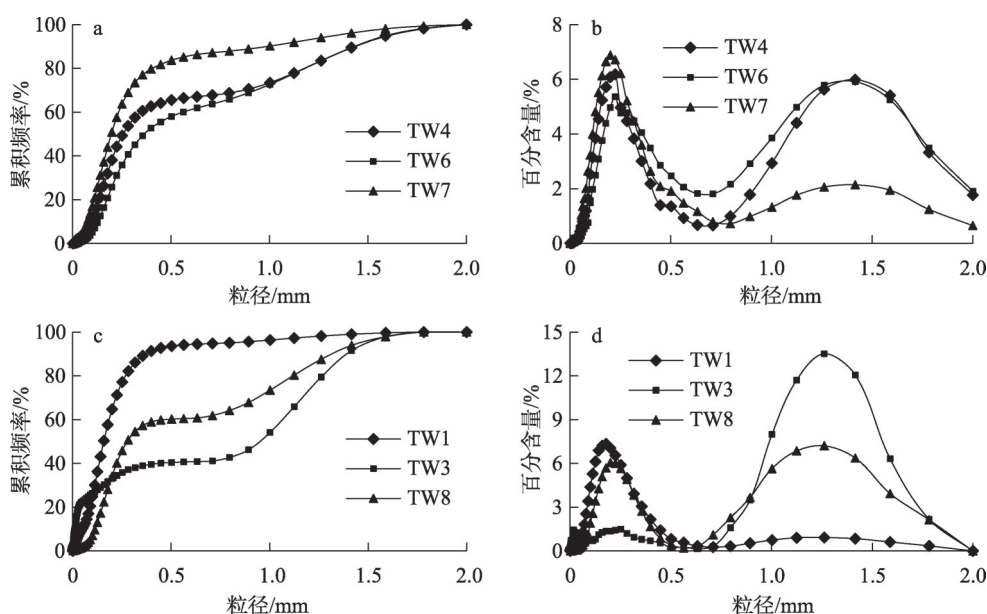


图4 统万城6个剖面沙地沉积物粒度累积含量

Fig. 4 Granularity content of deposit sediments accumulated on the 6 profiles in Tongwan city

由上述6个剖面的粒度曲线特别是粒度频率分布曲线可知, 6个剖面的粒度组成与风沙沉积明显不同, 风沙沉积以左侧峰代表的粒度成分占优势, 右侧峰代表的粒度不明显^[22,23], 表明这6个剖面中的沙层与风沙沙层差别较大。

2.2.3 粒度成分垂向变化

6个剖面粒度成分的垂向变化显示(图5), 粒度成分在垂向上变化非常明显, 每个剖面波动变化高达60%以上, 这是在风沙沉积中不存在的。湖泊搬运是水作为搬运介质的液态搬运, 由于水深变化和水动力变化, 易造成粒度成分在垂向分层上的大变化。风力搬运是气态介质的搬运, 比湖水搬运动力显著弱, 搬运的物质粒度成分特点是细小, 粒度组成差异较小。由此可见, 粒度组成的垂向变化证明这6个剖面的沙质沉积不是风沙沉积。

6个剖面中粒度成分波动变化大, 一是表明当时湖水动力变化大, 二是表明当时河流流量变化大。河流流量与湖水动力变化大决定了搬运的物质粗细变化大。河流流量变

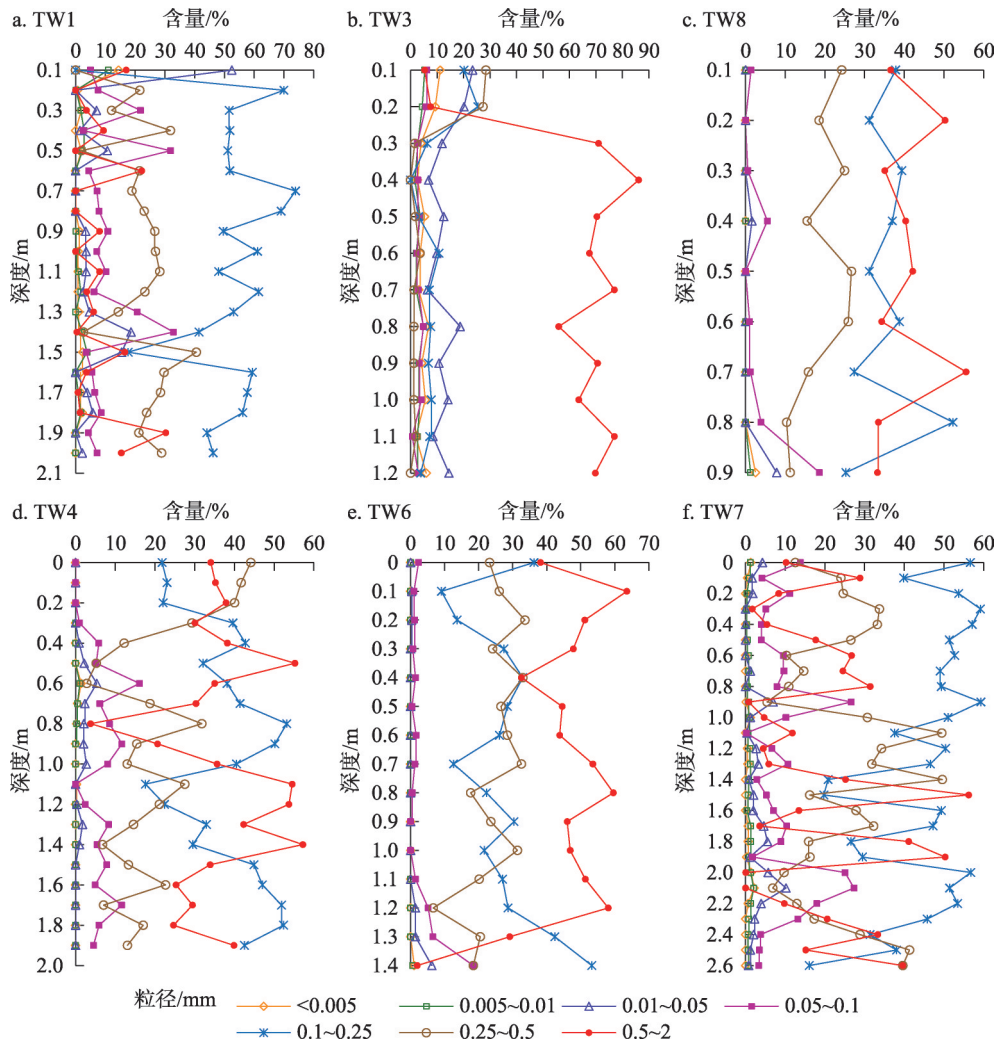


图5 统万城6个剖面粒度含量变化

Fig. 5 Granularity content on the 6 profiles in Tongwan city

化是降水量的变化引起的，反映了当时降水量变化大。虽然各剖面中不同粒度成分波动较大，但是并没有显示出明显的分层特点，这与所研究的剖面厚度较小有关。此外，在所研究的剖面中，大多数样品的总体含量差异较小，反映了搬运动力在主要时段是相近的。

2.3 沙层中的针铁矿分析

通过对含有深褐黄色斑点的沙层中6个样品的X-射线衍射分析可知，深褐黄色斑点样品中含有2%~4%的针铁矿（表2）。针铁矿是分布较广的一种水合铁氧化物，针铁矿化学组成为 $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ ^[24]。由于非结晶的针铁矿在水中以不可溶胶体形式存在，常与铁锰结

表2 统万城褐黄色沙层中的针铁矿含量

Table 2 Goethite content in the brownish-yellow sand layer in Tongwan city

(%)

样品号	TW1-1	TW1-2	TW3-1	TW3-2	TW4-1	TW7-1
含量	2	3	4	2	2	3

核相伴出现^[24,25], 所以它的形成需要饱和的水分条件。针铁矿对沉积物成因和沉积环境具有重要指示作用, 其代表的沙层成因类型和沉积环境将在后述讨论。

2.4 沙层沉积粉砂—黏土斑点化学成分

在统万城城墙之下的沙层中, 有时可见粉砂—黏土斑点。这些斑点对认识沙层成因有重要作用。由于这些粉砂—黏土斑点面积小、数量少, 达不到利用常规化学分析方法进行分析的要求, 因此我们在电镜下利用能谱仪对其进行了分析。结果显示(图6、表3), 粉砂—黏土斑点中 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量较风沙沉积显著高, 含量分别为12%~19%和10%~15%之间, 而风成沙中这两种成分含量分别小于4%和11%^[26]。风沙层沉积中 SiO_2 含量则多大于50%^[26], 而统万城粉砂—黏土斑点中 SiO_2 含量显著低。化学成分显示, 统万城城墙之下的沙质沉积与风沙沉积不同。

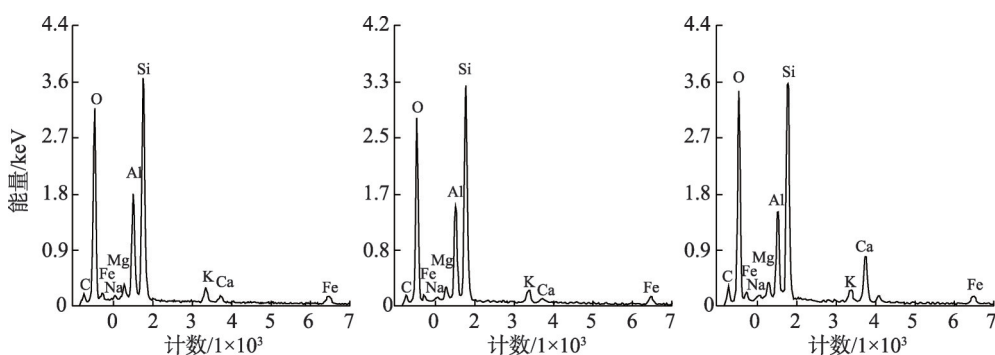


图6 褐黄色沙层中黏土斑点能谱曲线

Fig. 6 Energy spectrum analysis for clay spots in the brownish-yellow sand layer

表3 统万城褐黄色沙层中粉砂—黏土斑点化学成分

Table 3 Chemical components of the fine sand and clay spots in the brownish-yellow sand layer in Tongwan city (%)

样品号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	MgO	CO_2
TW1-a	37.14	14.89	18.64	0.96	1.71	0.58	2.12	23.65
TW1-b	39.15	14.95	16.13	0.78	1.74	0.63	2.38	23.85
TW3-a	30.40	10.70	14.74	6.23	1.37	0.72	2.55	33.14
TW4-a	38.37	13.94	17.85	0.83	1.62	0.64	2.32	24.59
TW4-b	29.28	10.37	12.85	6.28	1.28	0.78	2.22	36.78

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 研究剖面中的沙层颜色、粒度组成、粒度分选性、细粒斑点 Fe_2O_3 与 Al_2O_3 含量以及针铁矿存在都充分证明统万城及其附近地面之下的沙层是以粗砂为主的湖泊沉积, 与风沙沉积有非常大的不同。

(2) 统万城筑城时期该区普遍分布的是湖泊沙质沉积物组成的高原平地, 统万城建在湖泊成因的稳定沙质沉积层之上。

(3) 统万城筑城之前的湖泊发育时期, 该区自然环境比筑城时期更好, 当时降水量

多, 植被覆盖较好, 并有较大面积的湖泊发育。

(4) 研究剖面沙层中的粗砂含量、分选性、针铁矿含量、深灰色沉积层等显示, 沙层物质的搬运动力是水动力, 不是风动力, 当时水动力较强。

(5) 研究区湖积沙层的普遍存在指示, 统万城筑城时期的地表没有流沙, 没有发生沙漠化, 统万城及其附近的沙漠化是在筑城之后一定时期发生的。在统万城筑城时期, 降水更少的统万城西北地区发生一定沙漠化是完全可能的。

3.2 讨论

3.2.1 统万城沙层成因与搬运动力

很多研究表明, 风沙沉积以细砂为主, 其次为中砂, 粗砂含量非常少^[20,21]。风沙沉积分选非常好, 粒度成分均一, 层理差且各层间粒度差异很小。统万城地表之下的沙层粒度成分以粗砂为主, 比风沙沉积显著粗, 粗、中、细砂相混合, 分选性较差。粒度成分指示统万城地表之下的沙层与风沙沉积差异很大, 不是风沙沉积。虽然在个别情况下也可能出现粗砂为主的风沙沉积, 但是在统万城钻孔剖面沙层中, 可见清楚的层理构造, 有多层深灰色与褐黄色互层的沉积, 并含有针铁矿薄膜和斑点, 显示具有流水或水体沉积沙层的显著特征。深灰色沙层是在水体较深的条件下沉积的, 是湖泊沉积沙层的典型特征。含有针铁矿的褐黄色沙层常常是湖泊沉积的显著特征, 出露于地表具有龟裂纹特点的细砂层也是水体沉积的重要证据。沙层中粉砂—黏土斑点的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量较风沙沉积显著高, 表明沙层为湖泊沉积的可能性更大。根据这些特点, 可以确定统万城地面之下的沙层为湖泊沉积。

因为风动力比河流与湖泊动力弱, 这是决定风积沙层与河流沙层、湖泊沙层粒度成分差异的主要原因。研究剖面沙层粒度成分中的粗砂含量高指示当时搬运动力不是风动力, 而是水动力。湖泊物理沉积物一般是河流搬运带来的, 在进入湖泊之后粗颗粒在水动力较强的湖泊边缘沉积, 细颗粒在水动力弱的湖泊内部沉积^[27]。因此, 湖泊相粗颗粒代表水动力较强, 细颗粒代表水动力较弱。研究剖面中没有代表搬运动力很强的砾石成分, 代表搬运动力很弱的黏土与细粉砂含量很少, 这表明当时沉积物的搬运动力较强。

3.2.2 统万城沙层形成时的沉积环境

沙层的沉积特征能够指示沉积时的环境特点, 包括水深、氧化和还原条件^[27]。根据沙层沉积特点可知, 统万城沙层沉积过程中湖泊沉积环境发生过较大变化。

湖泊水一般主要来自大气降水。该区的湖泊为高原湖泊, 处在构造运动缓慢上升地区, 湖水来源更是依靠大气降水, 缺少来自侧向的水分补给。构造运动的上升会导致湖泊水体变浅, 沉积物粒度成分变粗。统万城湖泊形成的深灰色沙层沉积物代表湖泊水体深度较大, 降水量较多, 处于还原环境; 褐黄色沙层沉积时湖泊水体较浅, 降水量较少, 处于氧化环境。该区湖泊沉积的另一个特点是沉积物粒度成分较粗, 缺少代表湖泊中心部位的黏土类沉积, 表明当时该区处在湖泊的近边缘。然而值得注意的是, 在近湖泊的边缘也出现了水体较深的还原环境, 指示当时的湖泊面积较大, 水深也较大, 指示当时的自然环境较好。

该区湖泊消亡的时间值得查明, 这是需要研究另一科学问题。据调查, 在统万城内侧和西侧多处有湖泊沉积, 有的湖泊沉积表面仅有薄沙层覆盖^[23]。据湖泊沉积中螺壳 AMS¹⁴C 测定, 湖泊沉积年龄为 1760 ± 35 aBP^[23]。由此可以认为, 统万城地表之下的沙层

沉积时的湖泊消亡应该发生在距今1760年前后, 比统万城建城时间早160年左右。

3.2.3 统万城与毛乌素沙地沙漠化发生时代

统万城及其附近地面为广泛的湖泊沉积物, 说明当时该区地表无流沙, 无沙丘发育, 当时植被发育较好, 植被起到了较好的固沙作用。根据北魏地理学家郦道元的著作《水经注》中有关于奢延水一带存在赤沙阜、沙溪和沙陵的记述(水经注·河水三), 当时在统万城外围存在局部的沙漠化是可能的。因为毛乌素沙地年降水一般为400 mm左右^[19], 作为干旱地区降水量还是较多的, 在不受人为因素严重干扰的情况下, 该区草原植被茂盛。因此, 统万城建城时期该区自然环境整体较好, 草原植被茂盛是降水量较多决定的。但是该区西北部降水量减少, 自然环境较差。

现今的统万城城内和附近绝大部分地表为风沙覆盖, 这是在建城之后一定时期沙漠化的结果。根据湖泊沉积可以断定, 在距今约1600年前后的统万城建城时期, 统万城附近没有发生明显沙漠化。有研究认为, 在唐代公元593年, 统万城已出现沙漠化但不严重^[14], 在唐代晚期沙漠化已较严重。可以认为统万城的明显沙漠化出现在唐代, 之后的沙漠化总体在加强。统万城是在公元418年建成的, 到公元593年的时间为175年。因此, 可以认为统万城是在建城之后的175年后发生了轻度的沙漠化。在唐德宗贞元年间(公元785—805年)贾耽在其著作中就记载了毛乌素沙地的位置。在他所记“从边州入四夷七道”的“夏州塞外通大同云中道”沿线, 存在两片沙漠, 一片沙漠是位于黄河南侧的“库结沙”, 也就是库布齐沙漠北半部。另一片沙漠(应为沙地)位于夏州城西北方, 是一片尚未命名的沙漠, 这就是毛乌素沙地^[28]。这表明, 在唐代中后期的公元785—805年, 毛乌素沙地的西北部分已经存在。毛乌素西北部降水较东南部少, 所以西北部沙漠化发生时间较早。据艾冲研究^[28], 在公元822年, 统万城开始受到沙漠化的严重影响, 可以作为统万城严重沙漠化开始的年代。由此得出, 统万城明显的沙漠化发生在公元822年, 也就是建城之后404年才发生了严重的沙漠化。需要指出的是, 尽管在统万城建城时期当地没有发生沙漠化, 但是在统万城以西和以北的气候更为干旱的毛乌素沙地区, 当时甚至更早时段发生一定的沙漠化是完全可能的。

有的研究者根据统万城沙漠化发生在唐代, 认为毛乌素沙漠或沙地形成于唐代^[28]。如仅从有文字记载的人类历史时期考虑, 这一认识可能是对的。但是如要揭示毛乌素沙漠或沙地的形成历史, 就要研究更早时期特别是地质时期毛乌素沙地的沙漠化。根据我们在毛乌素沙地南缘横山县城附近发现的黄土剖面中夹有5层风沙层和前人在榆林地区发现的黄土剖面中有多层风成沙层发育可知, 毛乌素沙漠化至少距今50万年前就出现了^[1,29,30]。毛乌素沙地分别在距今3000年和4000年前后也发生了沙漠化^[7]。气候干旱是沙漠化的主要原因之一, 现代沙漠化就主要发生在干旱地区^[31,32]。唐代统万城和毛乌素沙地沙漠化仅是毛乌素沙地历史时期沙漠化的一个阶段, 不代表毛乌素沙地形成的长期演化历史过程。从黄土剖面中沙层分布范围可知, 当时的沙漠化的范围常常到达黄土高原北部边缘, 那时沙漠化的范围有时比现今范围还要广大。毛乌素沙地在距今1万年之间发生的多次沙漠化完全是自然环境变干变冷的结果, 表明1万年前该区曾多次处在极端干旱的荒漠气候条件下, 不像现今处在年降水量为400 mm的适于草原发育的自然条件下, 所以当时的沙地确实是沙漠。

关于统万城沙漠化发生原因, 公认的是3000年前或更早期发生的沙漠化是自然的气候变干造成的。对于统万城筑城之后发生的沙漠化原因还存在分歧, 有的认为明代或明

清时期的沙漠化是自然原因引起的^[8-10],有的认为不同历史阶段沙漠化原因不同^[11,12],有自然原因也有人为原因。本文作者根据该区的降水量分析认为,统万城筑城之后发生的严重沙漠化,是人为和自然因素共同作用的结果,人为因素的作用更大。

参考文献(References):

- [1] 董光荣,李保生,高尚玉,等.鄂尔多斯高原第四纪古风成沙的发现及其意义.科学通报,1983,28(16):998-1001. [DONG G R, LI B S, GAO S Y, et al. Significances of the Quaternary ancient eolian sands in the Ordos Plateau. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(16): 998-1001.]
- [2] SUN J M, DING Z L, LIU T S, et al. 580000-year environmental reconstruction from aeolian deposits at the Mu Us Desert margin, China. Quaternary Science Reviews, 1999, 18(12): 1351-1364.
- [3] 邓辉,舒时光,宋豫秦,等.明代以来毛乌素沙地流沙分布南界的变化.科学通报,2007,52(21):2556-2563. [DENG H, SHU S G, SONG Y Q, et al. The change of southern border of quicksand in Mu Us Desert since the time of Ming Dynasty. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(21): 2556-2563.]
- [4] DONG G R, GAO S Y, JIN J, et al. The formation, evolution and cause of the Mu Us Desert in China. Science in China: Series B, 1989, 32(7): 859-872.
- [5] ZHOU Y L, LU H Y, ZHANG J F, et al. Luminescence dating of sand-loess sequences and response of Mu Us and Otindag sand fields (North China) to climatic changes. Journal of Quaternary Science, 2009, 24(4): 336-344.
- [6] LU H Y, MIAO X D, ZHOU Y L, et al. Late Quaternary aeolian activity in the Mu Us and Otindag dune fields (North China) and lagged response to insolation forcing. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21): L21716.
- [7] LI B S, JIN H L, LYU H, Y, et al. Processes of the deposition and vicissitude of Mu Us Desert, China since 150 ka BP. Science in China: Series D, 1998, 41(3): 248-254.
- [8] HO P. The myth of desertification at China's northwestern frontier: The case of Ningxia, 1929-1958. Modern China, 2000, 26(3): 348-395.
- [9] 韩昭庆.明代毛乌素沙地变迁及其与周边地区垦殖的关系.中国社会科学,2003,(5):191-204. [HAN Z Q. The evolution of the Maowusu Desert and the reclamation in the adjacent areas in the Ming Dynasty. Social Sciences in China, 2003, (5): 191-204.]
- [10] 邓辉,夏正楷,王臻瑜.从统万城的兴废看人类活动对生态环境脆弱地区的影响.中国历史地理论丛,2001,16(2):104-113. [DENG H, XIA Z K, WANG B Y. Human activities' influence on the areas of weak ecological environment in terms of the rise and fall of Tongwan city. Collections of Essays on Chinese Historical Geography, 2001, 16(2): 104-113.]
- [11] 王乃昂,黄银洲,何彤慧,等.鄂尔多斯高原古城夯层沙的环境解释.地理学报,2006,61(9):937-945. [WANG N A, HUANG Y Z, HE T H, et al. The environmental significance of tamping sandy layer in ancient city ramparts on Erdos Plateau. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(9): 937-945.]
- [12] 黄银洲,王乃昂,何彤慧,等.毛乌素沙地历史沙漠化过程与人地关系.地理科学,2009,29(2):206-211. [HUANG Y Z, WANG N A, HE T H, et al. Process of historical desertification of Mu Us desert and relationship between nature and human beings. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(2): 206-211.]
- [13] 戴应新.统万城城址勘测记.考古,1981,(3):225-232. [DAI Y X. Survey on the site of Tongwan city. Archaeology, 1981, (3): 225-232.]
- [14] 王尚义,董靖保.统万城的兴废与毛乌素沙地之变迁.地理研究,2001,20(3):347-353. [WANG S Y, DONG J B. The rise and fall of Tongwan city with the environmental change of Mu Us Sandy Land. Geographical Research, 2001, 20(3): 347-353.]
- [15] 侯仁之.从红柳河上的古城废墟看毛乌素沙漠的变迁.文物,1973,(1):35-41. [HOU R Z. A research on the changes of the Maowusu Desert through the ruins of ancient towns in Hongliu River valley. Cultural Relics, 1973, (1): 35-41.]
- [16] 史念海.两千三百年来鄂尔多斯高原和河套平原农林牧地区的分布及其变迁.北京师范大学学报:社会科学版,1980,(6):1-14. [SHI N H. Distribution and changes of the farming, forestry and animal husbandry area in Ordos Plateau and Hetao Plain during the past 2300 years. Journal of Beijing Normal University: Social Sciences, 1980, (6): 1-14.]
- [17] 李恩菊,谢春林.统万城废弃的原因分析.中国沙漠,2010,30(5):1047-1052. [LI E J, XIE C L. Discuss on causes of

- abandonment of Tongwan city in south of Mu Us Sand Land. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(5): 1047-1052.]
- [18] 杨屹, 胡蝶. 生态脆弱区榆林三维生态足迹动态变化及其驱动因素. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1204-1217. [YANG Y, HU D. Dynamic changes and driving factors of three dimensional ecological footprint in Yulin. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1204-1217.]
- [19] 榆林市编纂委员会. 榆林市志. 西安: 三秦出版社, 1996: 85-116. [Yulin City Codification Committee. *Yulin City Annals*. Xi'an: Sanqin Press, 1996: 85-116.]
- [20] 赵景波, 张冲, 董治宝, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山粒度成分与沙山形成. *地质学报*, 2011, 85(8): 1389-1398. [ZHAO J B, ZHANG C, DONG Z B, et al. Particle size composition and formation of the mega-dune in the Badain Jaran Desert. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(8): 1389-1398.]
- [21] 哈斯, 王贵勇. 腾格里沙漠东南缘横向沙丘粒度变化及其与坡面形态的关系. *中国沙漠*, 1996, 16(2): 216-221. [HA S, WANG G Y. Grain-size variation on transverse dune in connection with slope morphology at southeastern fringe of Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 1996, 16(2): 216-221.]
- [22] 李智佩, 岳乐平, 薛祥煦, 等. 毛乌素沙地沉积物粒度特征与土地沙漠化. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(3): 578-586. [LI Z P, YUE L P, XUE X X, et al. Grain-size distribution characteristics of different geo-genetic type sediments and land desertification in Mo Us Desert. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(3): 578-586.]
- [23] 黄银洲, 王乃昂, 冯起, 等. 统万城筑城的环境背景: 河流、湖泊及沙漠化程度. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1233-1239. [HUANG Y Z, WANG N A, FENG Q, et al. Environmental background of building the Tongwancity: Rivers, lakes and desertification degree. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5): 1233-1239.]
- [24] 苏春田, 唐健生, 单海平, 等. 黎塘岩溶区土壤铁锰结核的地球化学特征研究. *中国岩溶*, 2008, 27(1): 43-49. [SU C T, TANG J S, SHAN H P, et al. Study on the geochemical properties of Fe-Mn nodule in Litang karst area. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(1): 43-49.]
- [25] ZHAO J B, MA Y D, LUI R, et al. Palaeoclimatic and hydrological environments inferred by moisture indexes from the S₁ palaeosol section in the Xi'an region, China. *Quaternary International*, 2018, 493: 127-136.
- [26] 钱亦兵, 吴兆宁, 石井武政, 等. 塔克拉玛干沙漠沙物质成分特征及其来源. *中国沙漠*, 1993, 13(4): 32-38. [QIAN Y B, WU Z N, ISHII T, et al. The constituent characteristics of sand materials and sand sources of the Taklamakan Desert. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(4): 32-38.]
- [27] 张宝政, 陈琦. *地质学原理*. 北京: 地质出版社, 1983: 156-159. [ZHANG B Z, CHEN Q. *Principles of Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 156-159.]
- [28] 艾冲. 论毛乌素沙漠形成与唐代六胡州土地利用的关系. *陕西师范大学学报: 哲学社会科学版*, 2004, 33(3): 99-105. [AI C. The relationship between the shaping of the Maowusu Desert and utility of land in the Six Barbarous States in the Tang Dynasty. *Journal of Shaanxi Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2004, 33(3): 99-105.]
- [29] 李保生, 董光荣, 高尚玉, 等. 陕西北部榆林第四纪地层剖面的粒度分析与讨论. *地理学报*, 1988, 43(2): 127-133. [LI B S, DONG G R, GAO S Y, et al. Analysis and discussion on the grain size of the Quaternary Strata profile in Yulin area of the Northern, Shaanxi. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43(2): 127-133.]
- [30] 孙继敏, 刘东生, 丁仲礼, 等. 五十万年来毛乌素沙漠的变迁. *第四纪研究*, 1996, 16(4): 359-367. [SUN J M, LIU D S, DING Z L, et al. The Mu Us Desert evolution in the last 0.5 Ma. *Quaternary Sciences*, 1996, 16(4): 359-367.]
- [31] 郭兵, 孔维华, 姜琳. 西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 412-424. [GUO B, KONG W H, JIANG L. Dynamic monitoring of ecological vulnerability in arid desert ecological region of Northwest China and the quantitative analysis of its driving forces. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 412-424.]
- [32] 李文龙, 石育中, 鲁大铭, 等. 北方农牧交错带干旱脆弱性时空格局演变. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1599-1612. [LI W L, SHI Y Z, LU D M, et al. The spatio-temporal evolution of drought vulnerability in the ecotone between agriculture and animal husbandry in the north of China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1599-1612.]

Causes of surface sediments and natural environment of Tongwan city in Jingbian county of Shaanxi province during its construction period

HUANG Xiao-gang^{1,2}, ZHAO Jing-bo^{2,3}, MA Yan-dong², YUE Da-peng², LUO Xiao-qing²

(1. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, Shanxi, China; 2. School of

Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3. Key Laboratory of Aerosol

Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to figure out the natural environment during the construction period (around 1600 years ago) of Tongwan city and a long-standing controversy of whether the city is built on sand deposits, research is done on six profiles of sample bore holes by grain size analysis, X-Ray diffraction, etc. This study indicates that lacustrine deposits are identified under the surface of ground both inside and outside of the city wall, and their features are totally different from wind deposit. The differences are shown as follows: (1) There is yellowish-brown goethite in targeted sand layers. (2) Several dark gray deposited layers are identified. (3) The content of coarse sand in the targeted sand layers is much higher than that in wind deposits. (4) The grain content showed a mixture of coarse and fine sand with a higher degree of separation. (5) The contents of Fe_2O_3 and Al_2O_3 in fine-sand spots in lacustrine deposits are higher than those in sand deposits. Supported by concrete evidences collected, it is shown that the natural environment of the city was good during the construction period. And the basic landscape is plateau generated owing to the accumulation of lacustrine deposits, on which the ancient city was built. Desertification did not occur during the construction period, but did during a period after its construction.

Keywords: lacustrine deposit; content of grain size; desertification; natural environment; Tongwan city