

交河故城保护加固技术研究

Research on Consolidation Techniques for
Conserving the Ancient City of Jiaohe

李最雄 王旭东 孙满利 编著



科学出版社

www.sciencep.com

交河故城保护加固 技术研究

李最雄 王旭东 孙满利 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍了交河故城的保存现状及布局、建造工艺及技法特点；研究了交河故城的地质环境、风场、温度、降雨等环境特征和遗址土的工程特性；分析了遗址的主要病害及其成因；总结了PS加固土遗址的室内和现场研究成果；研究了土遗址锚固灌浆技术，重点是以楠竹加筋复合锚杆对危土体进行锚固技术，同时，对灌浆效果进行了现场检测；归纳了加固遗址本体和崖体的主要工程措施及技术方法；介绍了部分典型遗址本体和崖体加固工程实例。

本书适合大专院校文物保护专业的学生和研究生参考使用，对有关文物保护科技工作者及广大文物爱好者也有一定的阅读、参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

交河故城保护加固技术研究 / 李最雄, 王旭东, 孙满利编著. —北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-022612-9

I. 交… II. ①李…②王…③孙… III. 交河城-古城遗址(考古)-加固-研究 IV. K878. 04 TU746. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 113482 号

责任编辑: 宋小军

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 娄 婕

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年8月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2008年8月第一次印刷 印张: 27 1/2 插页: 15

印数: 1—1 600 字数: 624 000

定价: 150. 00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

“十一五国家科技支撑计划大遗址保护关键技术研究
与开发——土遗址保护关键技术研究” 课题资助出版
课题编号：2006BAK30B02

序 一

我国是世界上文明起源最早的国家之一，在古丝绸之路、黄河流域和长江流域遗存下大量具有很高历史、科学和艺术价值的土遗址。如长江流域的河姆渡遗址、中原地区的大河村遗址，蜿蜒北部和西北苍茫戈壁上的长城、烽燧，新疆的交河、高昌故城，楼兰、尼雅遗址。可谓上下万年，纵横万里，遍布中华。

由于我国西北地区气候干旱、少雨，土遗址才能幸存下来。但是，千百年来，在戈壁荒野中年复一年强劲风沙的风蚀和集中式强降雨的雨蚀破坏下，这些幸存下的土遗址也处于濒危之中，现正以惊人的速度毁坏成一堆堆沙土，消失在我国西北苍茫的戈壁荒野中。另外随着“西部大开发”战略的实施，大规模的基本建设全面铺开，大量的土遗址被发掘出土，面临急剧干裂和风化破坏的威胁。因此，这些新出土的土遗址及遗存在地面上历经千百年沧桑的土遗址都亟待加固保护。

土遗址的保护是一个世界性难题，虽然我国对土遗址保护工作开展较晚，但是，我国文物保护工作者经过十多年的艰苦努力，在土遗址保护中已经取得了长足的进步。

1983年，李最雄等尝试用PS渗透的方法加固了甘肃秦安大地湾新石器时代的居住遗址，取得了明显的防风化效果。1990年，在美国新墨西哥州召开的第六届土遗址保护国际学术研讨会上，发表了“用高模数硅酸钾加固中国新石器时代土遗址的研究”的论文，引起国际土遗址保护界的关注。

1992年，李最雄、王旭东等人承担了国家文物局的“古代土建筑遗址的加固研究”科研项目，他们在室内研究的基础上，先后在甘肃安西县的汉代破城子古城遗址、吐鲁番交河故城、西安半坡遗址、秦俑坑遗址、三门峡虢国墓地车马坑进行了大量的现场试验。通过上述大量室内研究和现场试验，得出了PS加固土遗址的合适的模数、浓度及一些工艺方法。1999年，“古代土建筑遗址的加固研究”项目获国家文物局（部级）科技进步二等

奖。后来，又采用多学科的测试手段——X 射线衍射分析、扫描电镜分析、透射电镜分析、电子能谱方法、孔隙率和比表面分析以及差热分析等，对 PS 材料本身及 PS 与黏土矿物的作用机理做了进一步研究。1998 ~ 2002 年应用 PS 材料对甘肃敦煌玉门关、河仓城和宁夏西夏王陵三号陵墓、交河故城瞭望台等土遗址进行了抢险保护加固，取得了明显的加固保护效果。

近几年，李最雄、王旭东及孙满利等人，结合新疆吐鲁番交河故城加固保护工程，对交河故城的主要病害及其成因做了进一步研究，又经过大量室内实验和 PS 渗透防风蚀和雨蚀加固、楠竹加筋复合锚杆对危土体锚固及裂隙灌浆的现场试验，归纳了加固遗址的主要工程措施及技术方法，使工程量大、地质病害复杂和加固技术难度极大的交河故城抢险加固工程顺利开展，并已获得明显的保护效果。

《交河故城保护加固技术研究》一书是李最雄研究员等在土遗址保护研究方面近 20 年来所取得成果的汇集，代表了近年关于土遗址保护研究的最新进展。

《交河故城保护加固技术研究》一书的出版，将为土遗址保护加固提供科学依据和技术支持，也将提高土遗址保护的技术水平，促进我国的土遗址保护工作向新的高度发展。

中国工程院院士

王思敬

2008 年 7 月 18 日

序 二

中国是四大文明古国之一，因此有不少具有重大历史价值的古建筑及古文化遗址需要我们保护，需要我们好好珍惜；当中有些已被联合国正式列为人类文化遗产。

回顾人类的历史进程，地球上的许多古文明，都留下了一些古建筑和文化遗址，像古埃及的金字塔和神庙，古希腊及罗马的神殿和竞技场，印加和美雅的祭坛，乃至中古意大利及波希米亚的天主教堂，这些遗址都比较好保存，皆因它们主要是由石建筑组成的。

我们中国的古建筑，有一大部分是由木建筑及土建筑组成的。该建筑较易受到祝融的光顾；中国历史上许多有名的木建筑，就是毁于战火中。土建筑则易受到风雨的侵蚀和破坏。例如新疆吐鲁番的交河故城；它是中国西北丝绸之路上最主要的土建筑遗址，也是世界上规模最大、历史最悠久、保存最完好的城址。可是，经过千百年来的风吹雨打，这个重要的遗址正处于濒危之中。可幸过去十多年来，敦煌研究院李最雄研究员、王旭东研究员、西北大学孙满利副教授及一批文物保护工作者花了巨大的心力，经过大量的实验研究和现场测试，研发出了一些原创性的土遗址加固材料和保护方法，包括注浆防裂，以及对危土体采用木锚杆、竹锚杆及楠竹加筋复合锚杆锚固，以防坍塌等加固工艺。毫无疑问，交河故城保护工程是目前我国土遗址保护工程中工作量最大，也是技术难度最大的保护工程。敦煌研究院同仁结合科研与实践，取得了很大的成功，取得了良好的保护效果。

该书以交河故城保护加固工程为典型实例，介绍了敦煌研究院过去十多年来在这方面的科研工作与实践成果，充分反映了中国科研工作者在保护古代土建筑方面进行的不懈努力和因此取得的重大突破。我为敦煌研究院同仁所取得的成果而感到自豪，更相信这些成果会受到国际岩土工程界及文物保护界同行的赞赏和引用。

中国工程院院士
香港大学副校长

李焯芬

2008年5月6日

目 录

序一	王思敬 (i)
序二	李焯芬 (iii)
第一章 概况	(1)
一、交河故城的地理位置	(1)
二、交河故城的历史沿革	(2)
三、交河故城的价值评估	(4)
(一) 交河故城的历史价值	(4)
(二) 交河故城的艺术价值	(7)
(三) 交河故城的科学价值	(9)
四、前人对交河故城的研究	(10)
第二章 交河故城的建筑形制	(13)
一、现状及布局	(13)
二、建造工艺及技法	(15)
(一) 建造工艺	(15)
(二) 建造技术	(18)
第三章 交河故城的环境	(21)
一、地质环境	(21)
(一) 地形地貌	(21)
(二) 地层与岩性	(22)
(三) 水文与水文地质条件	(24)
(四) 地质构造	(28)
(五) 地震	(29)
二、风场特征	(32)
三、温度特征	(32)
四、降雨特征	(33)
第四章 交河故城的工程特性	(35)
一、交河故城遗址土的化学组成和矿物成分	(35)
(一) 样品采集	(35)
(二) 遗址土的矿物特征	(36)

(三) 遗址土的化学成分	(37)
二、遗址土的物理特性	(42)
三、遗址土的力学特性	(45)
四、遗址土的崩解特性	(45)
(一) 一般崩解特性	(45)
(二) 遗址土的崩解速度与取样位置关系	(49)
五、交河故城遗址土的波速特征	(50)
(一) 声波测试	(50)
(二) 面波测试	(52)
第五章 交河故城土遗址的主要病害及成因机理	(57)
一、病害类型及分类原则	(57)
二、文物本体的病害	(59)
(一) 病害类型	(59)
(二) 大佛寺的病害	(64)
(三) 东北佛寺的病害	(100)
(四) 塔林的病害	(113)
(五) 官署西洞口窑洞病害分布	(118)
(六) 瞭望台的病害	(118)
三、交河故城土遗址载体(台地崖体)的地质病害	(120)
(一) 工程地质分区	(120)
(二) 稳定性评价	(128)
(三) 崖体的主要病害分析	(146)
四、病害形成的机理	(151)
(一) 文物本体病害形成的机理	(151)
(二) 崖体崩塌形成的机理	(153)
第六章 PS 加固土遗址的室内研究	(154)
一、PS 加固土样的基本特性实验	(154)
(一) 土样的工程特性	(154)
(二) 试样的制备及 PS 加固	(155)
(三) 结果及讨论	(158)
二、PS 加固土样的室内耦合实验	(164)
(一) 室内实验方案	(165)
(二) 实验结果及分析	(168)
三、不同含水率土遗址的 PS 渗透加固实验	(172)

(一) 试样制备·····	(173)
(二) PS 渗透加固实验·····	(174)
四、裂隙灌浆材料的室内实验·····	(178)
(一) PS-(C+F) 浆液·····	(178)
(二) PS-C 浆液·····	(186)
五、环境因素对 PS 加固土遗址效果的影响·····	(193)
(一) 试样制备·····	(193)
(二) 环境因素对 PS 加固效果影响实验·····	(194)
(三) 结论·····	(203)
第七章 PS 加固土遗址的现场试验·····	(205)
一、遗址土体表面 PS 渗透加固·····	(205)
(一) 遗址土体表面 PS 喷洒渗透试验·····	(205)
(二) PS 表面滴渗试验·····	(217)
(三) 做旧试验·····	(219)
(四) 风蚀、雨蚀现场模拟试验·····	(220)
二、遗址危土体锚固试验·····	(236)
(一) 薄壁钢管锚杆·····	(236)
(二) 木质锚杆·····	(239)
(三) 楠竹锚杆·····	(242)
(四) 大体量土体加固锚杆筛选试验·····	(245)
(五) 楠竹加筋复合锚杆·····	(248)
(六) 楠竹加筋复合锚杆加固交河故城崖体效果检测·····	(251)
三、遗址土体裂隙灌浆试验·····	(256)
(一) 灌浆工艺·····	(256)
(二) 裂隙灌浆加固效果·····	(257)
(三) 小结·····	(269)
第八章 土遗址本体保护加固·····	(270)
一、交河故城本体加固技术·····	(270)
(一) 土坯砌补·····	(270)
(二) 锚固·····	(274)
(三) 裂隙灌浆·····	(276)
(四) 表面防风化渗透加固·····	(281)
(五) 钢梁吊顶加固·····	(287)
(六) 特殊区域保护加固工艺·····	(291)

二、交河故城本体保护加固案例	(300)
(一) 大佛寺保护加固	(300)
(二) 东北佛寺保护加固	(304)
(三) 官署西洞口保护加固	(309)
三、裂隙加固效果试验对比	(313)
第九章 交河故城崖体保护加固技术	(315)
一、交河故城崖体加固施工工序	(315)
二、交河故城崖体加固的主要工程措施	(315)
(一) 变形监测系统建立与运行	(315)
(二) 脚手架搭设	(324)
(三) 临时支护	(327)
(四) 楠竹加筋复合锚杆锚固	(330)
(五) 钢筋(木)短锚杆锚固	(337)
(六) 裂隙注浆	(339)
(七) 土坯砌补	(349)
(八) 表面防风化加固	(352)
(九) 交河故城崖体加固的特殊工程措施	(352)
三、交河故城崖体加固工程实例	(358)
(一) 崖体 57 区加固工程实例	(358)
(二) 崖体 51 区加固工程实例	(371)
(三) 崖体 41 区加固工程实例	(382)
(四) 崖体 36 区加固工程实例	(405)
参考文献	(417)
后记	(420)

Research on Consolidation Techniques for Conserving the Ancient City of Jiaohe

Contents

Preface I	Wang Sijing (i)
Preface II	Li Zhuofen (iii)
Chapter One Generalization of Jiaohe Ancient City	(1)
1. Geographical Position	(1)
2. History	(2)
3. Assessment of Significance	(4)
3.1 Historical Value	(4)
3.2 Artistic Value	(7)
3.3 Scientific Value	(9)
4. Previous Studies	(10)
Chapter Two Architectural figuration and Techniques	(13)
1. Status and Layout	(13)
2. Construction Process and Techniques	(15)
2.1 Construction Process	(15)
2.2 Construction Techniques	(18)
Chapter Three Environment	(21)
1. Geologic Environment	(21)
1.1 Topography	(21)
1.2 Stratum and Lithology	(22)
1.3 Hydrology and hydrogeology Conditions	(24)
1.4 Geologic Structure	(28)
1.5 Earthquake	(29)
2. Wind Features	(32)
3. Temperate Features	(32)
4. Rainfall Features	(33)
Chapter Four Engineering Characteristics the Soil in Jiaohe Ancient City	(35)
1. Chemical Composition and Minerals	(35)
1.1 Sample Collection	(35)

1.2	Minerals	(36)
1.3	Chemical Composition	(37)
2.	Physical Characteristics	(42)
3.	Mechanics Properties	(45)
4.	Disintegration properties	(45)
4.1	General characteristics of disintegration	(45)
4.2	The Relationship between Disintegration Rate and Location	(49)
5.	Wave Speed Properties	(50)
5.1	Sonic Wave Test	(50)
5.2	Surface Wave Test	(52)
Chapter Five Main Deteriorations and Their Mechanism of Jiaohe Ancient City Earth-		
en Site		(57)
1.	Types and Classification of Deterioration	(57)
2.	Deteriorations to Architectures on the Site	(59)
2.1	Deterioration Types	(59)
2.2	Deteriorations in Big Buddha Temple	(64)
2.3	Deteriorations in Northeast Buddha Temple	(100)
2.4	Deteriorations in Pagoda Forest	(113)
2.5	Distribution of Issues of the West Gate of Government Office	(118)
2.6	Deteriorations in Observation Tower	(118)
3.	Geological Issues of Cliff of Jiaohe	(120)
3.1	Engineering Geological Zoning	(120)
3.2	Stability Evaluation	(128)
3.3	Analysis on Primary Deteriorations to the Cliff	(146)
4.	Mechanism of Deterioration	(151)
4.1	Deterioration Mechanism of the Site	(151)
4.2	Deterioration Mechanism of Collapse of Cliff	(153)
Chapter Six Laboratory Study of ps Consolidation for Earthen Site		(154)
1.	Basic Properties Test of PS Consolidating Clay Sample	(154)
1.1	Engineering Characteristic of Soil	(154)
1.2	Sample Preparation and its Consolidation by PS	(155)
1.3	Results and Discussion	(158)
2.	Laboratory Coupling Test of PS Consolidating Clay Sample	(164)
2.1	Experiment Plan in Laboratory	(165)
2.2	Results of Test and Discussion	(168)
3.	Penetrated Consolidation experiment on soil with Different Water Content by PS	(172)
3.1	Sample Preparation	(173)

3.2 Penetrated Consolidation Experiment by PS	(174)
4. Laboratory Test of Materials for Grouting	(178)
4.1 PS-(C + F) Grouts	(178)
4.2 PS-C Grouts	(186)
5. The Influence of Environmental Factors	(193)
5.1 Sample Preparation	(193)
5.2 Test	(194)
5.3 Discussion	(203)
Chapter Seven In-situ Test of PS Consolidation for Earthen Site	(205)
1. PS Infiltration on the Surface of Earthen Site	(205)
1.1 Spraying Infiltration to Earthen Site Surface by PS	(205)
1.2 Surface Infiltration by Tricking PS	(217)
1.3 Restore the original look	(219)
1.4 In-sita Simulation Test of Rain Erosion and wind Erosioh	(220)
2. Anchoring Test	(236)
2.1 Bolt of Thin-wall Steel Tube	(236)
2.2 Wooden Bolt	(239)
2.3 Bamboo Bolt	(242)
2.4 Selection Test of Anchoring for the Large-scale Soil Body	(245)
2.5 The Compound Bolt with Bamboo and Steel	(248)
2.6 Effect Evaluation of the Compound Bolt	(251)
3. In-situ Test of Grouting to cranny of Earthen Site	(256)
3.1 Grouting Techniques	(256)
3.2 Effect Evaluation	(257)
3.3 Discussion	(269)
Chapter Eight Conservation and Consolidation of Earthen Architectures	(270)
1. Consolidating Techniques	(270)
1.1 Retaining and Protection with Adobe	(270)
1.2 Anchoring	(274)
1.3 Cranny Grouting	(276)
1.4 Penetration for Surface Weather-resistant	(281)
1.5 Conservation of Ceiling of Cave	(287)
1.6 The Consolidation Technique for Special Areas	(291)
2. The Case Study	(300)
2.1 The Big Buddha Consolidation	(300)
2.2 Northeast Buddha Temple Consolidation	(304)
2.3 The West Gate of Governor Office	(309)
3. Cranny Grouting Evaluation	(313)

Chapter Nine Reinforcement Techniques of the Cliff	(315)
1. Reinforcement Process	(315)
2. Main Engineering Measures	(315)
2.1 Deformation Monitoring	(315)
2.2 Scaffolding	(324)
2.3 Temporary Retaining and Protection	(327)
2.4 Anchor by Compound Bolt with Bamboo and Steel	(330)
2.5 Anchor by Short Steel Rods (wood) Bolt	(337)
2.6 Cranny Grouting	(339)
2.7 Retaining and Protection with Adobe	(349)
2.8 Surface Weather-resistant Consolidation	(352)
2.9 Special Engineering Measures	(352)
3. Project Cases	(358)
3.1 Zone 57	(358)
3.2 Zone 51	(371)
3.3 Zone 41	(382)
3.4 Zone 36	(405)
References	(417)
Postscript	(420)

第一章 概况

一、交河故城的地理位置

吐鲁番市位于新疆维吾尔自治区东部，地处吐鲁番盆地中间，东邻鄯善县，西接托克逊县，南抵库鲁克山，北至天山分水岭，与乌鲁木齐、奇台、吉木萨尔等市县毗连。吐鲁番位于东经 $88^{\circ}51'' \sim 89^{\circ}54''$ ，北纬 $40^{\circ}21'' \sim 43^{\circ}35''$ ，南北长 262 km，东西狭窄，最宽处约 100 km，略呈南北向长条状，总面积为 15738.3 km²。吐鲁番市距乌鲁木齐市的公路里程为 182 km，直线距离为 155 km，212 国道、陇海铁路穿境而过。交河故城和吐鲁番市有县级公路相通，交通十分便利（图 1-1），可以北通乌鲁木齐，西达库尔勒、喀什，东到甘肃敦煌。

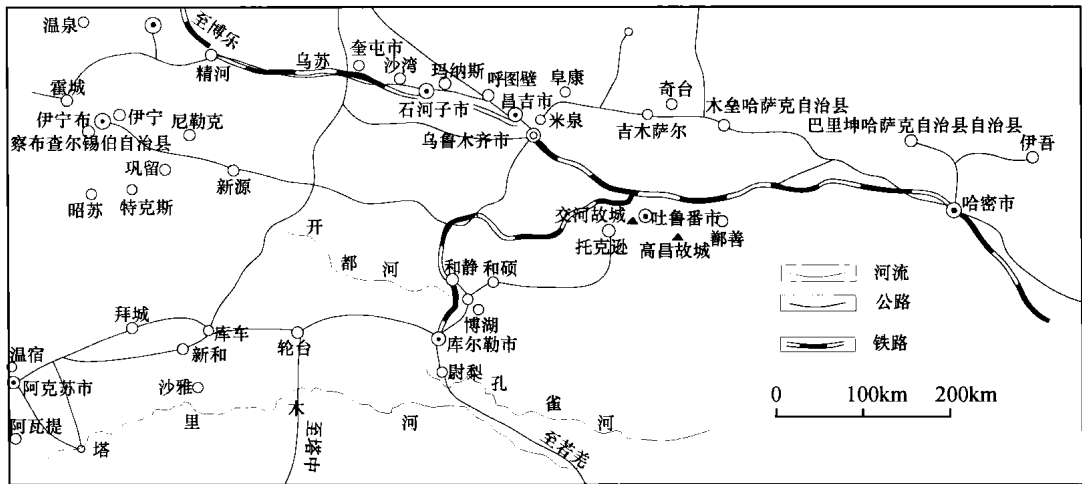


图 1-1 吐鲁番市交通位置图

交河故城遗址是国务院 1961 年公布的第一批全国重点文物保护单位，位于新疆维吾尔自治区吐鲁番市西 10 km 的雅尔乃孜沟村（图 1-2）。交河故城地处吐鲁番盆地西部，自古以来就是连接内地与西域的门户，也是沟通塔里木、准噶尔两大盆地的通道，故城坐落在高达 30 m 的台地上，台地正当火焰山与盐山交接处，控扼着两山之间的天然豁口。交河故城东、南面为吐鲁番盆地的腹地，北自大河沿镇，沿河越天山经唐代“他地道”通北庭城（今吉木萨尔县城北护堡子，唐北庭都护府城遗址），西偏北沿盐山北麓，溯白杨河（唐代“白水涧道”）通唐代轮台城（今乌鲁木齐市南郊乌拉泊古

城)。穿过盐山豁口,西南通唐代天山县(今托克逊县城附近),进而经唐代银山道,翻过库鲁克塔格山脉可进入塔里木盆地,或经托克逊西侧的阿拉沟向西通伊犁河谷,地理位置非常重要。

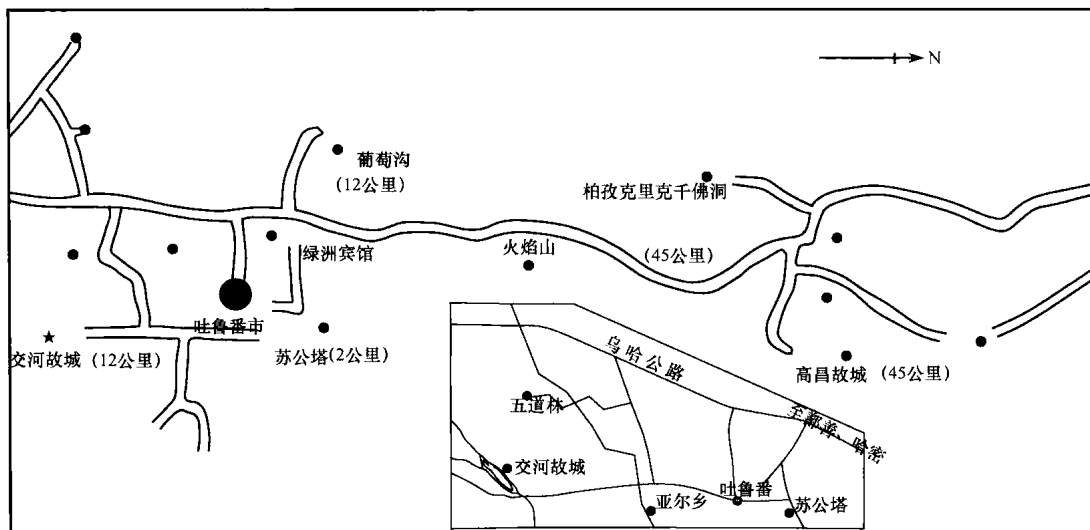


图 1-2 交河故城地理位置图

二、交河故城的历史沿革

1995 年新疆考古所在交河故城沟西台地发现旧石器时代晚期的文化遗存,采集到大批打制石器,经专家鉴定距今 2~1.5 万年,表明在远古时期交河故城所在地就有古人类活动、居住;从 20 世纪初在交河故城台地及附近陆续发现的与辽东、蒙古草原和北疆草原出土的细石器遗存属同一文化传统的新石器文化遗存,表明了人类在距今 1 万年前在此活动的事实,也表明在那个时期它已经与外界发生广泛的文化交流;近年来,在交河台地出土了距今 4000~3000 年的形制和风格受中原彩陶文化影响较大的彩陶文化遗存。这些考古发现表明了交河一直是先民们的理想栖息地,交河台地及其附近正好毗邻艾丁湖,古代艾丁湖的湖面远比现在大,在全新世早中期艾丁湖面积可达 251 km²,北端直达火焰山山脚,附近山上林茂草密,动植物丰富,山下流水潺潺,非常适合狩猎和居住。因此,古代先民普遍选择了此类靠山有水的地形,考古资料表明,目前吐鲁番盆地发现的细石器时代遗址共 9 处,都选择自然条件优越,傍近地表水的火焰山山前地带。

早在战国时期,即公元前 5 世纪,姑师民族已经在交河建立了功能比较齐全的东天山地区最具影响力的城邦国,姑师人先臣服于月氏人,后臣服于匈奴人。直到公元前 138 年,张骞出使西域,才使姑师民族始见于史载。从公元前 121 年汉武帝遣大将霍去病率军