

陶寺观象台遗址的天文功能与年代

武家璧^①, 陈美东^②, 刘次沅^{③*}

① 东华大学人文学院, 上海 201620;

② 中国科学院自然科学史研究所, 北京 100010;

③ 中国科学院国家授时中心, 西安 710600

* 联系人, E-mail: liucy@ntsc.ac.cn

收稿日期: 2008-01-29; 接受日期: 2008-03-26

中国科学院知识创新工程重要交叉方向项目资助(编号: KACX2-SW-01)

摘要 山西襄汾陶寺遗址可能是夏初都城. 最近考古发现的大型半圆台夯土遗迹 II FJT1 具有明确的夯土中心观测点和夯土圆弧形墙上挖出的 12 道狭缝, 被认为是古人用来观测日出以确定季节的观象台. 对该遗址各特征点位置进行了精确的测量, 对其中 E2, E12 缝的中心线方位角和对应远山仰角测量数据进行了天文学分析. 结果显示, 现代夏至和冬至太阳升起时, 接近 E2, E12 缝, 但不能恰好进入. 由于黄赤交角的长期变化, 在考古学确定的年代(公元前 2100 年前后), 太阳升起一半时, 夏至太阳位于 E12 缝右部, 冬至太阳位于 E2 缝正中. 这令人信服地证明, II FJT1 是古代观象台的遗址.

关键词

天文考古学
天文年代学
陶寺文化
古代天文台
观象授时

1 陶寺观象台遗址的发现

山西省南部是中华民族最早的发祥地之一. 1950 年代襄汾县陶寺村附近发现的史前遗址是晋南 80 多处龙山文化(距今约 40~50 世纪)遗址中最著名的一处. 1978~1987 年, 陶寺遗址进行了大规模发掘. 发掘的 1300 余座墓葬及大量房屋遗址显示了当时的社会等级结构. 出土物包括大量石质、陶质和木制的生产、生活器具, 以及大型的石磬、鼓等祭祀器. C¹⁴ 检测证实, 陶寺文化分为早、中、晚三期, 存在于公元前 2500~1900 年之间. 近年来, 学术界倾向于将陶寺遗址与“尧都平阳”相联系.

自 1999 年以来, 中国社会科学院考古研究所、山西省考古研究所、临汾市文物局联合对陶寺遗址进行了新一轮发掘, 发现并确认了陶寺早期小城、中期大城、中期小城、祭祀区、仓储区、宫殿遗址等. 最令人兴奋的是, 一座大型半圆体夯土建筑 II FJT1 被发掘揭露. 结合考古学各方面信息, 该建筑建于陶寺中期(大约公元前 2100 年左右), 毁于陶寺晚期^[1].

中期大城大致呈圆角长方形, 东南-西北方向, 面积近 280 万平方米. 大城的东南部围出

一个长条形的小城, 属于祭祀区。II FJT1 位于小城中, 与大城(内道)南城墙 Q6 相接。这是一个夯土筑成的 3 层半圆形坛台。最上层台(第三层)的东部有一组排列成弧形的夯土墩。经探测, 这些夯土墩深达 2~3 m, 隔开土墩的略虚的夯土残深只有 4~17 cm(也就是在夯土圆弧墙上挖出一系列的残深为 4~17 cm 的狭缝)。II FJT1 半圆形坛背靠大城城墙, 面向东南方。目前揭露的夯土墩、墙的上端面大致在陶寺晚期(距今 40~39 个世纪)被削到同一平面, 位于现代地面下



图 1 陶寺 II FJT1 发掘现场及安放在 E5 上的观测铁架

约 1 m 深处。考古学家立刻意识到这些夯土墩可能是一组用于观测日出方位以定季节的建筑物的基础。为了证实这一猜测, 他们用了两年时间进行实际观测。首先, 根据夯土墩、墙的形状找到其圆心, 并保证从这一观测点, 视线可以穿过全部缝隙。这一点到 E1~E10 号缝隙(参见后文图 3)的内侧约 10 m。然后制作了一个高达 4 m 的铁架, 它的横截面形状和尺寸可以调整到与夯土墩的缝隙完全相符。这样, 站在中心观测点上就可以透过铁架形成的缝隙模拟古人的观测^[2,3]。图 1 是发掘现场和用于模拟观测的

铁架, 夯土墩的边界用白灰标出, 观测铁架安放在 E5 狭缝上。

初步观测证实, 在冬至日出时太阳接近但不能进入 E2 号缝; 而几分钟后太阳进入 E2 缝中时, 已经高出东边的山脉(参见后文图 5)。考虑到 40 个世纪前黄赤交角比现今约大半度, 初步计算的结果表明, 那时冬至日出时应该在 E2 缝中^[4]。夏至时的情况也与此相同: 初步计算得到 40 个世纪前日出时适合 E12 缝, 而现代的观测却不能适合。冬至和夏至的观测结果令人信服地证明了夯土墩是为观测四季日出而建造的, 其他各缝隙应是指示当时历法的一些特征点, 而 E1 缝则可能与观测月亮有关。在进行 2004 年 10 月中旬以前的实地模拟观测时, 陶寺文化中期的夯土观测点遗迹尚压在堆土台下(为便于模拟观测而暂留的)。此后的堆土台清理完毕发现, 原计算和摸索得到的理论模拟观测点的正下方竟然是一个核心直径 25 cm 的 4 层圆形夯土基础(见图 2), 其中心点与先前采用的模拟观测点只差 4 cm。这一发现更加证实了 II FJT1 的天文观测功能^[5]。进一步的发掘, 未能发现中心点西侧有观测日落的遗迹。



图 2 观测点圆形夯土基础解剖图

众多天文学史专家审读了发掘报告并对实地进行了踏勘, 一致认为该遗址与祭天和观测日出确定季节有关^[6]。

古代文献和遗物皆证实, 用日中影长来测定季节日期, 是中国古代一贯的传统, 这与世界其他文明的史实有明显的区别. 古代中国文献中, 极少有观测日出日落方位来定季节的线索, 也未发现过有关的遗迹, 刘次沅^[7]曾指出这一特殊性. 因此, II FJT1 的发现, 对于中国天文学史的研究具有特别重大的意义. 它所处的考古文化背景和初步天文分析的结果, 都指出它存在于 40 个世纪以前.

2 测量结果

北京洽恒科技有限公司通过 GPS 定位仪精密测量, 得到观测原点地理坐标为东经 $111^{\circ}29'54''.99635$, 北纬 $35^{\circ}52'55''.84645$, 海拔高度 572 m. 在原点的西北方向 200 m 处设置辅助点, 采用 GPS 定位并解算出两点联线的方位角, 以此作为测量方位的基线. 在观测原点上用钢尺和全站仪测出遗迹上各个特征点(夯土柱四角)的位置如表 1(参见图 3). 方位角单位为度; y 以正北为正, x 以正东为正, 单位为 m.

表 1 狭缝各特征点相对于原点的测量值

点名	方位角	y	x	点名	方位角	y	x
E1-1	131.25	-7.14	8.15	E7-3	94.08	-0.78	10.86
E1-2	132.45	-8.17	8.93	E7-4	92.85	-0.61	12.30
E1-3	129.57	-6.92	8.38	E8-1	89.62	0.07	10.84
E1-4	130.89	-7.95	9.18	E8-2	89.63	0.08	12.28
E2-1	125.66	-6.44	8.98	E8-3	88.60	0.26	10.74
E2-2	126.20	-7.26	9.92	E8-4	88.55	0.31	12.27
E2-3	124.27	-6.25	9.18	E9-1	82.76	1.34	10.54
E2-4	124.43	-6.97	10.17	E9-2	82.56	1.59	12.15
E3-1	119.21	-5.45	9.75	E9-3	82.05	1.46	10.45
E3-2	119.24	-6.10	10.91	E9-4	80.83	1.95	12.11
E3-3	118.46	-5.32	9.81	E10-1	75.30	2.78	10.58
E3-4	118.53	-5.95	10.95	E10-2	74.90	3.18	11.80
E4-1	112.96	-4.37	10.32	E10-3	74.29	2.98	10.59
E4-2	113.32	-4.94	11.45	E10-4	74.25	3.35	11.88
E4-3	112.03	-4.20	10.37	E11-1	67.22	4.53	10.78
E4-4	112.40	-4.76	11.55	E11-2	67.83	4.64	11.38
E5-1	106.45	-3.15	10.67	E11-3	64.68	5.97	12.61
E5-2	106.35	-3.49	11.91	E11-5	64.93	6.30	13.46
E5-3	105.65	-3.00	10.70	E11-4	64.70	6.71	14.20
E5-4	105.40	-3.29	11.94	E12-1	61.06	6.81	12.32
E6-1	101.44	-2.19	10.82	E12-5	61.40	7.15	13.12
E6-2	100.68	-2.28	12.07	E12-2	61.26	7.54	13.74
E6-3	100.59	-2.03	10.85	E12-3	59.22	7.23	12.13
E6-4	99.94	-2.12	12.10	E12-4	59.64	7.98	13.63
E7-1	94.95	-0.96	11.03	E13-1	55.73	8.07	11.84
E7-5	94.84	-0.98	11.61	E13-2	56.53	8.72	13.20
E7-2	95.28	-1.13	12.28				

这些特征点构成的 12 道观测缝如图 3, 狭缝编号 E1~E12. 图 3 的正上方为北, 纵横坐标单位 m, 左边纵坐标 0 即为发掘发现的观测原点. 图 3 标出了表 1 中各点并用适当的联线显示

夯土边界.

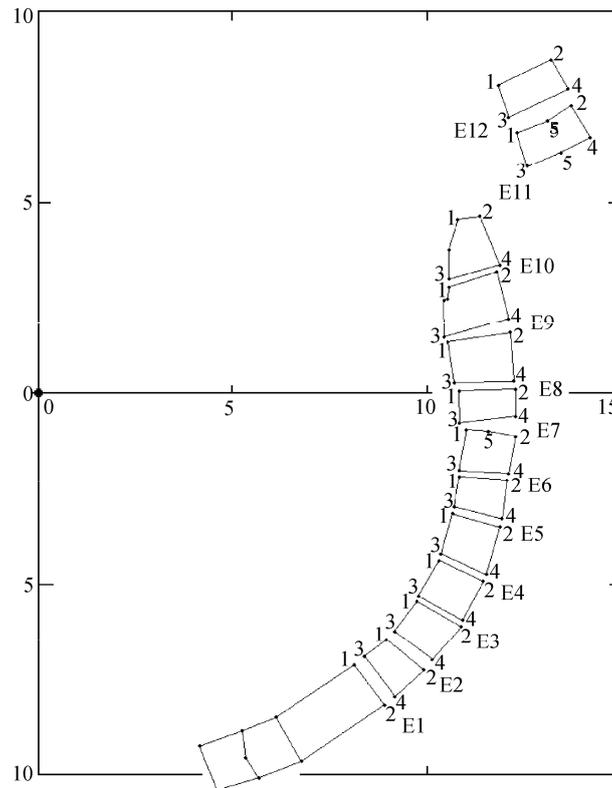


图3 观测原点和夯土遗迹的测量图

由表 1 可以解算出 12 个狭缝中心线的方位角和缝宽. 狭缝中心线的垂线与远山背景(约 10 km 外)交点的仰角另行测出. 表 2 给出这些数据(E5~E7 号缝仰角数据由北京洽恒科技有限公司测量, 其余仰角数据为冯九生用中国社会科学院考古研究所山西队日本产索佳牌全站仪测量). 表 1 中视宽(从原点看去的缝宽角度)、方位、仰角的单位为 $^{\circ}$; 缝宽和残深的单位为 cm.

表 2 12 个狭缝的测量数据

观测缝	缝宽/cm	残深/cm	方位/ $^{\circ}$	仰角/ $^{\circ}$	视宽/ $^{\circ}$
E1	30	6	131.068	5.559	0.36
E2	25	6	125.046	5.809	1.23
E3	20	4	118.872	5.538	0.68
E4	20	9	112.680	6.131	0.56
E5	20	10	106.000	7.203	0.70
E6	20	9	100.638	5.780	0.09
E7	内 20 外 50	16	94.464	4.266	0.76
E8	20	8	89.106	3.324	1.02
E9	内 15 外 40	8	82.304	2.261	0.53
E10	20	4	74.592	1.906	0.61

E11			66.080	1.125	2.29
E12	40	17	60.349	1.267	1.42

因为有的缝方向不太正, 所以视宽和缝宽并不成比例.

观测缝 E1~E10 是在一道深达 2~3 m 的夯土圆弧墙顶端挖出(墙厚 1.2~1.6 m), 目前残深 4~17 cm, 剖面呈 U 字到 V 字形. 这些缝多数呈长条形, 宽 20 cm; 有的稍宽(E1, E2, E3), 有的呈喇叭形(E7, E9, E10), 可能是后期破坏所致. E12 由两个较远的夯土墩形成, E11 的情形更为特殊, 这些可能与该建筑的祭祀功能有关. 可以假设, 古人以远山为标志物观测到冬至和夏至的日出点, 然后用吊垂线的方法将远山标志(或人为设置的远处标志)引到圆弧形墙基, 挖出狭缝作为进一步建造观测缝的标志. 进一步的建筑可能用石料或夯土, 应有 2~3 m 高, 以便观测者站在原点上借助狭缝观测日出, 现已无存.

3 利用 E2, E12 号缝的仰角、方位测量值求解年代

3.1 由纬度、仰角、方位求解赤纬的公式

由观测地的地理纬度、天体仰角-方位可以求解天体赤纬, 如图 4.

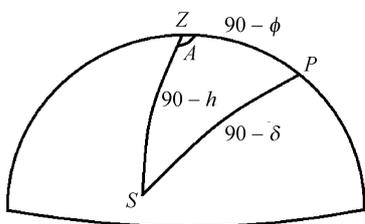


图 4 中 Z 为天顶, P 为北天极, S 为天体, A 为天体方位, h 为仰角, δ 为赤纬, ϕ 为观测地点的地理纬度.

对球面三角 PZS 应用边的余弦公式:

$$\begin{aligned} \cos(90 - \delta) &= \cos(90 - \phi) \cos(90 - h) \\ &\quad + \sin(90 - \phi) \sin(90 - h) \cos A, \quad (1) \\ \delta &= \arcsin(\sin \phi \sinh + \cos \phi \cosh \cos A), \end{aligned}$$

图 4 地理纬度、天体仰角、方位和天体赤纬的关系

将地理纬度、太阳的仰角和方位代入, 即可求得太阳的赤纬. 由于二至时太阳赤纬等于黄赤交角, 进而可以求出满足这一黄赤交角值的年代.

地球极移会影响观测地的纬度和章动等周期变化会影响两至时的太阳赤纬, 这些变化的幅度都不超过角秒量级, 不影响我们的讨论.

3.2 日出假设和计算过程

在一次日出的过程中, 太阳的方位不断变化. 采用太阳的不同部分作为日出的标志, 会得到大不相同的年代结果. 因此我们采用不同的假设进行试验.

冬至对应 E2, 缝中心线与远山交点仰角 5.809° , 方位 125.046° . 夏至对应 E12, 缝中心线与远山交点仰角 1.267° , 方位 60.349° . 这相当于采用日心作为日出的定义, 我们称为“日半出”. 太阳平均半径 16 角分(0.267°). 在仰角上加减太阳半径, 就得到分别相对于“日全出”和“日出”的情形. 考虑到肉眼见到日出时, 实际上太阳已经露出一部分, 因而增加“日既出”一项, 相当于太阳上边沿露出 2 角分, 这大约相当于陶寺地方冬夏至日出前后 12 s 太阳增加的高度.

计算的过程和结果见表 3. 表 3 中仰角和赤纬的单位为度, 大气折射单位为角分, 年代单位为 J2000 起算的世纪.

先由上述定义, 分别由“日半出”得到“日全出”、“日既出”、“日出”时的日心视仰角如表 3

中第一行. 减去大气折射改正得到日心真仰角(表 3 中未列).

表 3 由陶寺二至日出仰角、方位求解年代

对应狭缝 日出状态	E2 号缝(冬至)				E12 号缝(夏至)			
	日全出	日半出	日既出	日出	日全出	日半出	日既出	日出
日心仰角	6.076	5.809	5.575	5.542	1.534	1.267	1.033	1.000
折射改正	8.4	8.7	9.0	9.1	18.6	20.1	21.6	21.8
太阳赤纬	-23.712	-23.900	-24.064	-24.088	24.410	24.225	24.060	24.037
年代	-21.4	-37.7	-55.0	-58.1	无解	-85.0	-54.5	-51.8

3.3 近地面大气折射

近地面大气折射极为复杂, 它与气压、气温、光波波长有关, 而这些因素呈变化和均匀状态, 因此只能做粗略的改正. 经比较发现, 各种公式在 $1^\circ\sim 5^\circ$ 仰角尚能有 1 角分左右的符合. 我们采用美国天文年历说明书给出的近地公式^[8], 计算出(表 3 中第二行)大气折射改正:

$$R = (P/(T + 273))(0.1594 + 0.0196H + 0.00002H^2)/(1 + 0.505H + 0.0845H^2), \quad (2)$$

式中 H 为视仰角; P 为气压, 单位 mbar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$); T 为温度, 单位 $^\circ\text{C}$. 陶寺海拔高度 572 m(标准气压 945 mbar), 冬至日出时气温 -10°C , 夏至日出时气温 20°C .

将真仰角 h , 方位 A , 当地地理纬度 ϕ 代入(1)式, 即得到(表 3 中第三行)太阳赤纬 δ .

3.4 由黄赤交角求年代

通常采用的直到 T 三次项的黄赤交角 ε 表达式, 显然难以适用. 为适合远距历元的应用, Laskar 提出一个直到 10 次项的表达式^[9]:

$$\varepsilon = 23^\circ 26' 21.448'' - 4680.93U - 1.55U^2 + 1999.25U^3 - 51.38U^4 - 249.67U^5 - 39.05U^6 + 7.12U^7 + 27.87U^8 + 5.79U^9 + 2.45U^{10}, \quad (3)$$

其中 U 为 J2000 起算的时间, 单位万年 ($U < 1$).

夏至和冬至时太阳赤经分别为正负 ε . 按照(3)式可由 ε 求得 U , 并用 J2000 起算的世纪来表达, 就得到表 3 最后一行的相应年代.

3.5 结果

表 3 中看出, 不同的“日出假设”会得到大不相同的年代结果. 当我们“联立”夏至和冬至的条件, 就可以同时解出日出假设和年代.

从表 3 中结果来看, “日既出”冬至和夏至年代相互符合得最好, 其年代结果也差强人意, 是最可取的. 相对于结果相近的“日出”, “日既出”也更合乎情理(数学定义的“日出”, 实际上是看不到的). 因此我们可以得出结论, 与 E2 号缝(冬至)、E12 号缝(夏至)符合最好的年代, 在距今-55 世纪(即-3500 年)左右. 相应的观测, 是以日面上边沿露出 2 角分为准.

4 讨论

以上所述天文方法解算的陶寺天文遗址年代, 是基于以下假设: 现今遗存的夯土边界形成观测狭缝, 其中心线垂直向上延伸至与远山的交点, 即是当时观测冬至和夏至日出的标准. 也就是说, 古人要修筑 2~3 m 高的立柱, 以便在远山背景上呈现出现存夯土轮廓所显示的狭缝,

并保持其中心线的严格一致. 观测者的眼睛必须严格位于现存直径 25 cm 的夯土台中心的垂线上.

考古学研究和 C^{14} 测量估计该设施的建造和使用年代应在陶寺文化中期, 即距今 41 个世纪左右. 图 5 显示现在(2000 年)、当时(-2100 年)以及我们由天文计算得到年代(-3500 年)的天象, 即将现存夯土遗迹垂直向上延伸至远山背景, 在相应狭缝看到的冬至和夏至日出轨迹.

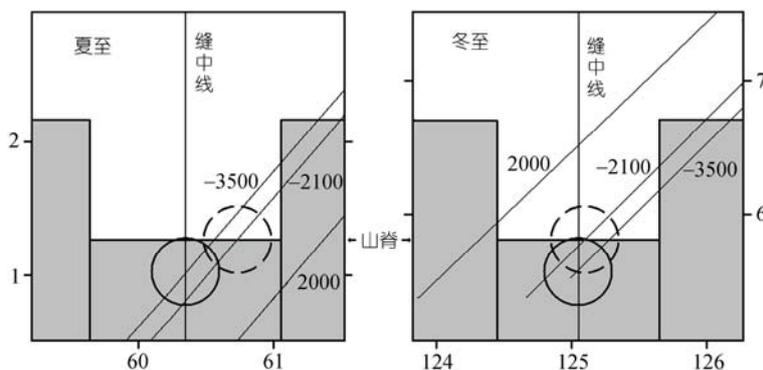


图 5 测量和计算得出的夏至、冬至日出日心运行轨迹

图 5 中给出根据测量和计算得出的夏至、冬至日出日心运行轨迹. 横坐标是方位, 纵坐标是仰角, 单位为 $^{\circ}$. 灰色部分表示形成观测缝的柱子和远山. 三条斜线分别给出 2000、-2100 和 -3500 历元的日出时日心轨迹. 圆圈表示日面大小.

图 5 显示, 对于现今历元, 夏至时太阳不能从 E2 缝中经过; 冬至太阳经过缝中线时已经明显高于山脊. 对于 -2100 历元(即考古学估计的年代), 冬至太阳露出一半时, 日心几乎恰好在狭缝中心线; 但对于夏至却有些偏差: 日出一半时日面已经到了狭缝的右部. 图 5 中虚线日面表现了这样的情景. 对于 -3500 历元, 不论冬至或夏至, 太阳都是刚刚露出一点点(2 角分)时, 日心正好经过缝中线.

图 5 中两个狭缝的宽度, 是按照测量值的比例画的. 因此, 由图 5 不难估算出狭缝各处(例如狭缝的两侧)所对应的天文年代. 以冬至缝为例, 若采用日心(日半出), 左侧大约对应 1300 历元, 右侧大约对应 -6500 历元.

由于黄赤交角的变化缓慢, 由日出方向确定年代, 误差是巨大的. 陶寺 IIFJT1 的中心观测点到各观测柱缝的距离约为 11 m(夏至 14 m). 1 cm 在 11 m 处的张角为 3.1 角分. 也就是说, 观测原点或狭缝中心线位置偏离 1 cm, 方位就误差 3.1 角分. 由(3)式可见, 黄赤交角每百年变化 47 角秒, 3.1 角分, 相当于 4 个世纪. 不论对于古人的测量, 还是今人根据现存遗迹对古人的恢复, 误差都远远大于这一数量. 因此天文方法得出的年代, 具有相当大的误差, 并不能对考古方面得到的年代(至少精确到一两百年)构成威胁: 试想观测者的眼睛向左边偏 5 cm(人的两眼距离即达 6~7 cm), 或观测狭缝在现今夯土边界右边 5 cm, 在 -2100 年时, 都可以看到日出一半时恰好位于 E12 缝的中心. 这样的误差, 相对于古代的观测水平和现存如此参差不齐的遗迹

轮廓来说, 都是不足为奇的。

如果当初的建造和观测都处于我们设想的理想状态, 完全可以想象, 陶寺文化中期(公元前 2100 年左右)的观测者就是以半日出为准, 冬至居中、夏至偏右来判断两至日的到来。

由天文方法对精确测量结果的分析, 可以得出以下结论:

陶寺夯土建筑 II FJT1 的 E2 缝、E12 缝, 在角分数量级上分别对应于冬至和夏至的日出方向, 而且在考古学所确定的年代(41 个世纪前), 其符合程度远比今天为好。这就强有力地证明, 陶寺 II FJT1 半圆台和狭缝, 是古人精心设计用来观测日出方向以确定季节, 即用于观象授时的目的, 是我国现存最早的观象台遗址。

应该指出, E2~E12 并未排列在同一个圆弧上(最北边两个夯土墩另成一体), 这的确令人费解。何弩^[2]认为 E11 形成“迎日门”, 是祭祀的需要。Pankenier¹⁾认为两部分不是同时修造的。E2~E12 之间形成 9 个狭缝, 显然是均分的结果。中间形成 10 个夯土墩, 将两至之间的时间分成 10 份, 也是一种合乎逻辑的想象, 尽管它不符合战国时期形成的 24 节气。至于是否形成长短不均的“二十月历”或二十个节气的“十月历”, 由于缺少证据, 目前还难以定论。

致谢 对陶寺考古队队长、中国社会科学院考古研究所何弩研究员提供的资料和帮助表示诚挚谢意; 同时非常感谢 Lehigh 大学 Pankenier 教授将文稿翻译成英文。

参考文献

- 1 中国社会科学院考古研究所, 山西省考古研究所, 临汾市文物局. 山西襄汾县陶寺城址祭祀区大型建筑基址 2003 年发掘简报. 考古, 2004, 7: 9—24
- 2 何弩. 陶寺中期小城内大型建筑 II FJT1 发掘心路历程杂谈. 古代文明研究通讯, 2004, 23: 47—58
- 3 中国社会科学院考古研究所山西队. 陶寺中期小城大型建筑 IIFJT1 实地模拟观测报告. 古代文明研究通讯, 2006, 29: 3—14
- 4 武家璧, 何弩. 陶寺大型建筑 II FJT1 的天文学年代初探. 中国社会科学院古代文明研究中心通讯, 2004, 8: 50—55
- 5 中国社会科学院考古研究所, 山西省考古研究所, 临汾市文物局. 2004~2005 年山西襄汾县陶寺遗址发掘新进展. 中国社会科学院古代文明研究中心通讯, 2005, 10: 58—64
- 6 江晓原, 陈晓中, 伊世同, 等. 山西襄汾陶寺城址天文观测遗迹功能讨论. 考古, 2006, 11: 81—94
- 7 刘次沅. 周初历法问题两议. 陕西天文台台刊, 2001, 2: 160—164
- 8 Seidelmann P K. Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. Mill Vally: University Science Books, 1992. 144
- 9 Laskar J. Secular terms of classical planetary theories using the results of general theory. Astron Astrophys, 1986, 157: 59—72

1) 私人通信