

北宋崇宁恒星观测新探

杨伯顺 褚龙飞✉

(中国科学技术大学 科技史与科技考古系,合肥 230026)

摘要 对于北宋崇宁时期的恒星观测问题,以前学界了解甚少。本文通过分析一批新的古代恒星数据,发现崇宁年间其实进行过一次与皇祐时期规模相似的大型恒星观测活动。在剔除这批数据中人为构造的成分之后,计算其观测精度与年代,发现崇宁恒星数据的观测精度明显优于皇祐星表,是目前所见北宋恒星观测的最高水平。本文认为北宋时期是天文观测发展史上的关键节点,这一时期的天文观测者重视浑仪细节,追求观测数据精密性,展现了与汉唐时期天文学不同的特质。崇宁观测是这一全新趋势的最终成就。

关键词 崇宁;恒星观测;星表;浑仪

中图分类号 N092

文献标识码 A

文章编号 1000-0224(2024)02-0171-18

中国古代有着2000余年以浑仪观星的历史,北宋是其中尤其重要的发展阶段。在此期间,中国古代恒星观测进入了兴盛阶段。北宋官方至少进行了7次恒星观测活动,其中有4次的观测数据留存至今。这些数据包括景祐、皇祐所测周天星官坐标,以及元丰、崇宁时期测量的二十八宿距度。前人已根据以上4次所测二十八宿距度数据,对该时期内恒星观测的进步进行了探究,并认为在这4种北宋恒星数据中,崇宁所测数据的精度达到了最高水平。^[1-2]事实上,作为北宋最后一次恒星观测,崇宁恒星数据应该代表了整个宋朝的最高成就,并很可能是元代郭守敬之前的最高水准。南宋偏安一隅,所铸浑仪形制较小,且未曾进行过大规模的恒星观测,难有超越北宋之可能。([2],246页)

但可惜的是,相比于景祐、皇祐时期,崇宁观测留下的资料极少,学界此前所见仅有《宋史·律历志》中“纪元历”部分保留的二十八宿距度。一方面,崇宁时期是否对其他恒星也进行过测量,尚属未知;另一方面,仅凭这些数据并不足以全面了解崇宁时期的观测水平。故前人只能以《皇祐星表》作为研究北宋恒星观测水平的最佳文献。([3],98、168页)

笔者最近有幸发现了一部分崇宁时期流传下来的恒星观测数据。这批数据并不完

收稿日期:2021-10-19;修回日期:2023-11-29。

作者简介:杨伯顺,1996年生,山东菏泽人,博士后,研究方向为古代天文学史;褚龙飞,1987年生,山西榆次人,副教授,研究方向为古代天文学史,Email:chulf@ustc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年项目“唐宋时期恒星观测实践过程的重构研究”(项目编号:12103051);国家社会科学重大项目“中日韩古天文图整理与研究”(项目编号:16ZDA143)。

整,但仍然能够证明崇宁年间进行了规模不亚于皇祐时期的恒星观测,而且其反映出的观测水平更是在皇祐时期之上,可以说是北宋恒星观测最佳水平的真正代表。不仅如此,通过对崇宁时期观测精度提升原因的进一步考察,本文也揭示了北宋时期天文观测趋向精密化的重要转向。这些成果将对重新考察宋元时期天文学快速进步的原因以及思考宋元之间天文学发展连续性的问题提供帮助。本文将对这批资料的可靠性、精度、观测年代以及背后反映的仪器变革等问题进行探讨,以待方家指教。

1 新发现的崇宁恒星观测资料

崇宁观测是北宋恒星观测史的一个缺环。长期以来,虽然学界普遍认同崇宁二十八宿距度取得了北宋最高观测精度,却因材料限制而不能确定该时期是否对其他恒星进行过观测。由于数据样本有限,研究者无法将其与皇祐、景祐等大型测量活动进行对比研究,因此很难对其历史地位给出恰当的评价。

南宋天官邹淮在《星象考》中曾记载周天星官数据中“皇祐所测与崇宁所测,(有)^①其间有分秒不同者,并从崇宁为准云”。^[4]邹淮在编撰占书时要记录恒星的观测数据,他明确提到有皇祐、崇宁两种可参考的数据。由此看来,崇宁期间应该至少测量过一些内外星官的数据。皇祐、崇宁两次观测数据在南宋依然受到天官重视,而邹氏“并从崇宁为准”,则二者之中崇宁数据更有权威性。因此,崇宁时期的恒星观测在宋代的重要性是显而易见的。但崇宁时期的测量规模有多大?测量精度如何?使用了什么仪器?这些问题的答案依旧空白。幸运的是,崇宁时期所测恒星资料并没有完全湮灭在历史中,有一部分还保留在明初钦天监编纂的大型占书《大统通占》之中,它们正是崇宁时期进行过二十八宿距度之外的恒星观测的直接证据。

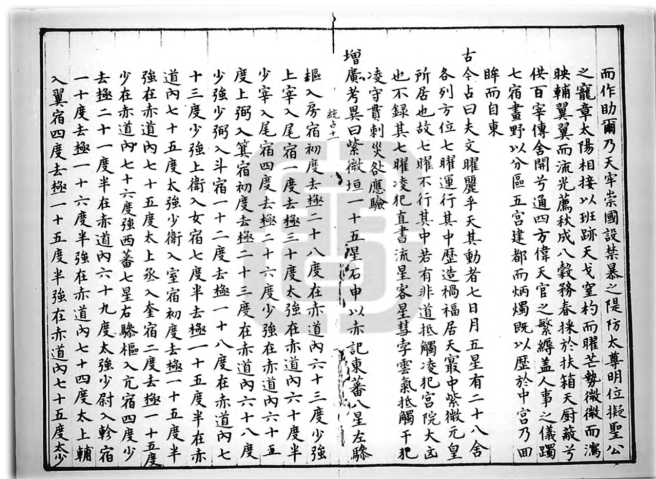


图1 《大统通占》中引用的《增广考异》恒星数据

① 此处疑为衍文。

《大统通占》成于明初,内容丰富,引用了许多前代文献中记录的恒星数据。与崇宁观测有关的数据,便来自于其引用的《增广考异》一书(图 1)。这本书久已散佚,但通过搜索各家书目文献与占书内容,可以发现其全名很可能为《增广天文考异》。上文提到的南宋天官邹淮,曾“汇集历代灾祥之占”而成《天文考异》一书。二者书名相关,又兼有崇宁数据^①,故《增广(天文)考异》可能由《天文考异》增补而成。

首先,《增广考异》中的数值采取了“少”、“半”、“太”等格式,与现存的崇宁宿度形式相同,说明这批数据是元之前所测^②。此外,《大统通占》中所转载九宿距度(表 1)与史籍记载的崇宁宿度也完全一致。除距度之外,这九宿去极度亦存,为以往学界未见的内容;通过简单计算可知,其年代指向、精度水平与崇宁距度非常契合。藪内清、薄树人、潘鼎等学者根据崇宁二十八宿距度,计算出观测误差为 0.15°或 0.156°。([1];[2],246 页)而笔者根据《增广考异》所载九宿距星去极度数据,计算出其相对于崇宁五年(1106)真实恒星位置的平均误差为 0.14°(8.2′),二者年代与精度水平相仿。综上,这份材料与崇宁时期的观测有密切联系。

表 1 《大统通占》所转载九宿崇宁距度与去极度

宿名	亢	氐	井	鬼	柳	星	张	翼	轸
距度	9 少	16	33 少	2 半	13 太	6 太	17 少	18 太	17
去极度	97 少	103 少	68 半强	70 半强	83	96 半	102 少	105 少	104 少

除了上述九宿本身的数据之外,《大统通占》中还按照三垣二十八宿体系的顺序,依次引用了隶属于紫微垣以及这九宿的星官数据。之所以只有一垣九宿,是因为《大统通占》现仅存 16 卷,恒星部分本身便不完整。不过,现存的《大统通占》在这一垣九宿下现存星官条目中皆引《增广考异》恒星数据,几乎无一例外。可见全本《大统通占》中这些恒星数据应当涉及全天星官。结合上述邹淮之言,可以推测崇宁时期应该也像景祐、皇祐时一样,对每一座星官都进行了一些测量。虽然现存数据并非原测全貌,但依然为重新评价崇宁观测的历史地位、弥补宋元恒星观测史的断裂提供了珍贵的史料,具备极高的历史价值。

2 崇宁恒星数据分析与计算

《增广考异》恒星数据包括紫微垣、亢氐井鬼柳星张翼轸等九宿及内外星官 76 座共计 306 条。这些恒星数据同时具备去极度与赤道内外度,可互相参校,以便修正数据传抄之误。^③值得注意的是,《增广考异》给出了绝大部分星官的全部成员星坐标,而崇宁之前

① 邹淮在编纂《星象考》时,拥有完整的崇宁恒星数据。据四库馆臣推测,《星象考》恰有可能源自《天文考异》。^[4]

② 元代之后皆使用百分位来表示。

③ 例如,天棓南星“入箕宿二度,去极四十三度,在赤道内四十七度半强”,去极 43 度与赤道内 47 度半强相加为 90 度半强,与四分之一个周天(九十一度少强)相比少 0.75 度;两个数据中,显然是去极度漏抄“太”字致误更为可能,故去极度应为四十三度太。若不易判断二者中的错误数据,则需要参考实际坐标进行校对;如去极度更接近实际坐标,则调整赤道内外度,反之则调整去极度。笔者一共对 18 颗恒星数据进行了类似修正。

的星表(如《景祐星表》、《皇祐星表》等)在大多数星官中仅给出距星或少数亮星的坐标;因此《增广考异》提供的恒星坐标数量远远超出了传统星表的范围。

但本文认为,崇宁时期实际观测的星可能并未超出传统范畴。与传统观测星相比,《增广考异》所载的其他恒星数据可证认性很差。在全部 306 个数据中,仅有 204 个周围 2° 范围内存在可证认的恒星。在这 204 条数据中,一些记载值虽然周围 2° 内有星可证,却过于暗淡,对应关系并不明确。大多数情况下,只有传统距星的记载值能明确对应某颗恒星。如图 2^① 两星官的距星梗河大星、亢池北星分别与 HIP 72105、HIP 70027 有着较好的对应关系;而两座星官的非距星则只能根据相对位置勉强证认。图 3 与图 4 中的传统星与非传统星也有着相似的差异。因此,这些非距星的记载值不似实测所得。另外 102 个记载值则在 2° 范围内找不到对应恒星。

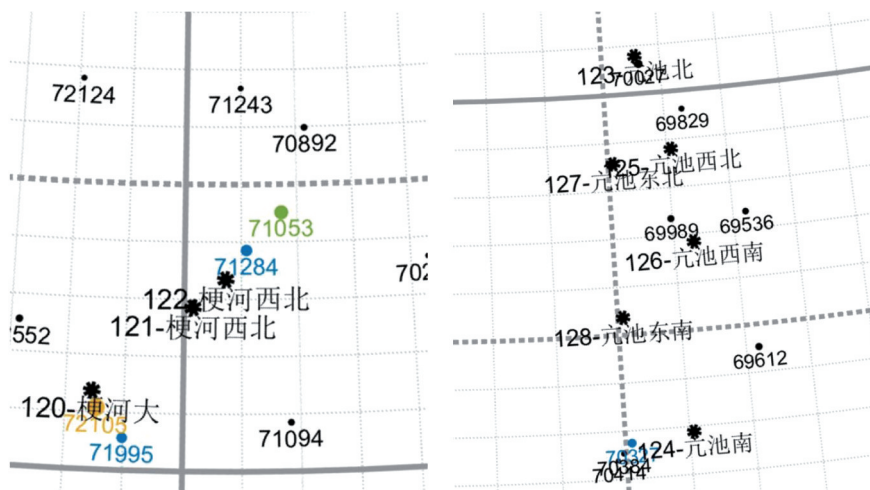


图 2 据《增广考异》恒星数据绘制出的梗河与亢池

虽然大部分记载值无法证认或证认关系比较差,但记载值所勾勒出的形状与星图上的传统星官形象却十分接近,如“骑官”(图 3)、“器府”、“天庙”等星官,说明这些数据可能是根据某份星图构造所得。轩辕星官的错误构型巧妙地验证了这个推测(图 4)。轩辕星官 17 星在天空中比较明显,但记载值勾勒出的位置(粗线)与天空中的实际位置(细线)相比存在很大的差异:天空中的轩辕南四星到轩辕南五星的连线向上折,而记载值中二者连线向下折,导致记载值从轩辕南五星到轩辕尾各星都与天空中真正的轩辕星官(细线)存在较大偏离。这些偏离的记载值周围并无可证认亮星,基本可以排除认星错误的可能。无独有偶,苏州石刻天文图中出现了与这些记载值相同的偏差。这说明,当时流传的一些星图版本中便存在着错误的轩辕星官,上述记载值偏差应该源于以这种错误星图为蓝本的构造。综合判断,这些非传统观测范围的记载值数据应是根据某份星图构造所得。

因此,本文将《增广考异》中与《皇祐星表》重叠的 92 颗“传统星”(大多为星官距星)

① 图中圆点代表依据现代依巴谷星表数据计算的 1106 年星空背景,坐标网格一格为 1° ;其中*为星官各记载值的位置。其他图同。

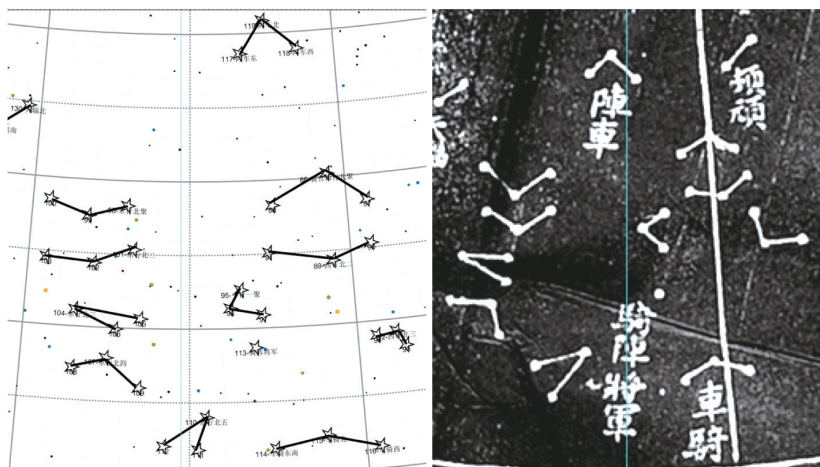


图3 据《增广考异》数据绘制的骑官与苏州图之骑官

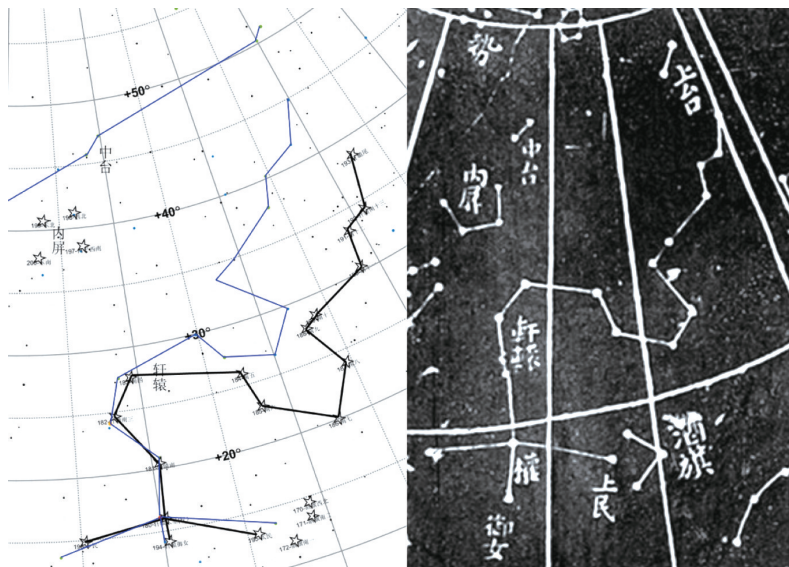


图4 据《增广考异》数据绘制的轩辕与苏州图之轩辕

单独整理为表2进行计算。由表2可知,大多数星的赤纬误差在 0.25° 之内,甚至不少在 0.1° 以下,如阴德 0.01° ,天玑 0.02° ,它们在《皇祐星表》中则分别为 0.24° 与 0.53° 。由此看来,这些恒星数据不大可能是基于其他星表数据构造得到。另外,笔者整理了赤纬随机误差^①分布图列于图5左侧,图中传统星随机误差正负两侧分布均匀,与真实观测中的随机情况相符。图5右侧非传统星的赤纬随机误差分布则相当不均匀^②,与真实观测的结果区别明显。因此,表2传统星数据基本可以确定是真实观测的结果。另外,虽然不能排除有少数非传统星也是实测,但这应当不会对计算结果产生太大影响。

① 赤纬随机误差是由赤纬误差去掉系统偏差之后得到的。

② 由于篇幅限制,不再列出非传统星的数据。

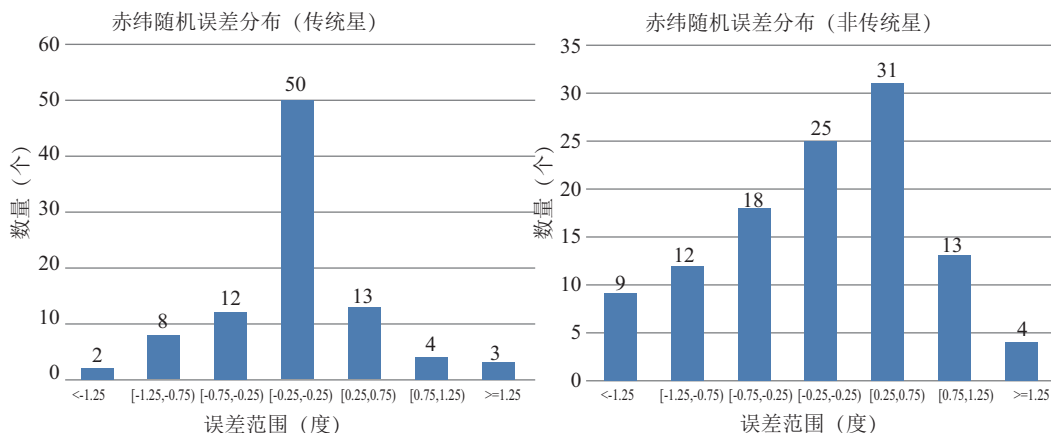


图5 传统星与非传统星赤纬随机误差分布

利用傅里叶分析可以直观地展示一组古代恒星数据的年代与系统偏差。若表2数据实际观测年代为 T_r ,在该年代前后设置多个时间间隔固定的假设观测年代 T_s^i ,然后以现代星表为基础、利用岁差公式推求出表2证认星在各个年代的恒星赤纬 D_s^i ,再将 D_s^i 与古代记载值 D_r 比较,得到差值 $\delta_i = D_s^i - D_r$ 。在随机观测误差分布均匀的情况下,此差值可以变换为以下形式: $\delta_i = C + n(T_s^i - T_r)\cos\alpha$ 。其中 C 为常数项,代表赤纬观测值的系统偏差,该偏差与观测仪器的北极照准误差有关;一次余弦项 $A_i = n(T_s^i - T_r)\cos\alpha$ 表示赤纬观测的年代系统误差,其中 $n = 0.5567^\circ/\text{百年}$,是与岁差相关的常数项, α 为恒星赤经。当余弦项系数 $n(T_s^i - T_r)$ 为0时,有 $T_s^i = T_r$,即假设年代为实际观测年代。本文设置了崇宁观测前后共90年间(1060—1150)以10年为间隔的10个年代,并计算各年代的常数项、余弦项系数及误差标准差。如图6所示,假设年代为1100与1110的两条曲线最接近水平,代表观测年代便在二者之间。由表3可知,各假设年代求得的观测年代皆为1106年。图7显示,当假设年代设为1106年时,余弦项系数为零,拟合曲线完全水平,证明这批数据应为崇宁年间所测。分析结果还显示,这批崇宁观测值的系统偏差约为 0.088° ($5.3'$),随机误差为 0.372° ($23.3'$)。

为了更好地比较崇宁与皇祐观测的精度水平,笔者特意挑选了皇祐星表中与表2共有且证认结果一致的83颗星进行对比。结果显示,皇祐观测的赤经误差为 $53.9'$,赤纬随机误差为 $30.3'$,系统偏差为 $17.9'$;而崇宁观测的赤经误差为 $42.4'$,赤纬随机误差为 $23.6'$,系统偏差为 $2.7'$ 。故崇宁的北极校准较皇祐有了很大提升,但赤经、赤纬观测精度皆仅为皇祐的1.3倍左右,进步幅度似乎并不显著。但是应当指出,上述数据不能代表《皇祐星表》与完整《崇宁星表》的误差比。上述83颗星中,北极附近的星占比超过1/3,而在完整的北宋星表中,北极附近的星仅占1/10左右。在观测实践中,北极附近的星多数较暗,不易观测,误差也较寻常星大。去掉北极周围 30° 之内的星后,崇宁星表的赤经、赤纬观测精度分别为皇祐的1.64和1.74倍。故崇宁恒星观测的真实精度应为皇祐的1.7倍左右。

表 2 崇宁恒星观测数据及其证认结果^①

编号	星名	星官	入宿度 (古度)	去极度 (古度)	赤道内外度 (古度)	换算赤经 (°)	折合赤纬 (°)	证认结果	星等	赤经误差(°) (1106年)	赤纬误差(°) (1106年)
NO. 1	紫微垣	左骖枢	房 0	28	63.33	226.46	62.42	HIP 75458	3.46	0.01	-0.18
		上宰	尾 1	30.83	60.50	239.11	59.63	HIP 78527	4.12	-2.69	1.46
		少宰	尾 4	26.33	65.00	242.06	64.07	HIP 80331	2.87	1.19	-0.43
		上弼	箕 0	23	68.33	257.16	67.35	HIP 83895	3.14	-0.33	-0.51
		少弼	斗 12	18	73.33	279.25	72.28	HIP 89908	4.20	-1.05	-1.53
		上卫	女 7.5	15.5	75.83	307.09	74.74	HIP 99255	4.37	0.48	0.09
		少卫	室 0	15.58	75.75	335.12	74.66	HIP 111056	5.49	-0.60	-0.39
		上丞	奎 2	15.25	76.08	2.19	74.99	HIP 6522	6.16	2.76	-1.12
		右骖枢	亢 4.25	21.5	69.83	205.66	68.83	HIP 68756	3.65	-0.55	-0.06
		少尉	轸 10	16.58	74.75	182.46	73.68	HIP 61281	3.84	-4.66	1.08
		上辅	翼 4	15.58	75.75	158.07	74.66	HIP 56211	3.92	-0.48	-0.51
		少辅	柳 4	16.5	74.83	121.43	73.75	HIP 46977	4.69	-0.21	-0.57
		上卫	参 9	18.25	73.08	80.51	72.03	HIP 33827	5.85	-1.01	-1.01
		少卫	昂 9.25	18.58	72.75	52.33	71.70	HIP 24254	5.40	-0.36	0.13
		少丞	胃 0	20	71.33	28.08	70.30	HIP 14862	4.86	-1.10	0.15
NO. 2	北极	天枢		1.58	89.75		88.46				
NO. 3	勾陈星	大星	壁 5.75	5.75	85.58	357.59	84.35	HIP 11767	2.11	0.71	0.04

① 本文按照前文所述原则修正了一些错误的去极度和赤道内外度记载值,并将记载值放在正确数值后的括号中。原文中恒星级数中的“强”、“弱”可能只是表示“多一点”、“少一点”,但我们为了便于处理,将其统一化为十二分之一进行计算。在表中,有 9 颗星不可证认,其中北极仅有去极度,内阶东中星、天理东南星方位错误,天厨大星、外厨西大星入宿度错误,太乙、器府存在数据构造,势星东北星、土司空南星周围无可证亮星。这些星官在皇祐星表中也大多不可证认。

续表2

编号	星名	星官	入宿度 (古度)	去极度 (古度)	赤道内外度 (古度)	换算赤经 (°)	折合赤纬 (°)	证认结果	星等	赤经误差(°) (1106年)	赤纬误差(°) (1106年)
NO. 4	五帝座	中大星	室 6	12.58	78.75	341.04	77.62	HIP 112519	4.92	-0.65	0.80
NO. 5	天柱	东南星	危 0	13.58	77.75	319.89	76.63	HIP 102599	5.53	-1.63	0.36
NO. 6	六甲	南一星	奎 4.25	15.33	76.00	4.41	74.91	HIP 5626	5.61	-1.73	-0.13
NO. 7	御女	西南星	牛 1	13.58	77.75	293.55	76.63	HIP 90647	5.81	-6.33	-0.17
NO. 8	女史	女史	斗 3.25	17.83	73.50	270.62	72.44	HIP 86614	4.67	-0.91	-0.02
NO. 9	柱史	柱史	斗 13.5	16.83	74.50	280.73	73.43	HIP 89937	3.67	-1.30	-1.25
NO. 10	尚书	北二星	尾 11.75	20	71.33	249.70	70.30	HIP 80650	4.95	-1.65	0.37
NO. 11	大理	东星	心 2.25	24.75	66.58	234.17	65.62	HIP 77277	5.22	-0.54	-0.16
NO. 12	阴德	东星	房 0.75	19.5	71.83	227.20	70.80	HIP 74605	5.27	-0.35	0.01
NO. 13	天床	西南星	氏 2.5	22.58	68.75	213.04	67.76	HIP 70952	6.20	-0.52	-0.50
NO. 14	华盖	中星	奎 13	26.33	65.00	13.03	64.07	HIP 9009	4.95	0.42	-0.02
NO. 15	杠	南一星	娄 11	14.33	77.00	27.41	75.89	HIP 14417	5.58	-4.88	-0.60
NO. 16	北斗	天板	张 12.5	23.83	67.50	149.45	66.53	HIP 54061	1.95	1.32	-0.14
		天璇	张 13.75	29.33	62.00	150.68	61.11	HIP 53910	2.35	0.30	-0.11
		天机	翼 12.5	31.83	59.50	166.45	58.64	HIP 58001	2.43	-0.44	-0.02
		天权	翼 17.75	28	63.33	171.62	62.42	HIP 59774	3.34	0.49	-0.42
		天衡	轸 10.75	29.58	61.75	183.20	60.86	HIP 62956	1.75	0.04	0.02
		开阳	角 2.5	30.5	60.83	192.14	59.96	HIP 65378	2.25	-0.43	-0.25
		瑶光	角 8.75	36.75	54.58	198.30	53.80	HIP 67301	1.80	-0.41	0.12
		辅星	角 2.75	30.58	60.75	192.38	59.88	HIP 65477	4.05	-0.30	-0.12
NO. 17	传舍	西四星	胃 5	28.5	62.83	33.01	61.93	HIP 15520	4.70	-1.06	-0.03

续表2

编号	星名	星官	入宿度 (古度)	去极度 (古度)	赤道内外度 (古度)	换算赤经 (°)	折合赤纬 (°)	认证结果	星等	赤经误差(°) (1106年)	赤纬误差(°) (1106年)
NO. 18	八谷		毕 3	33. 83	57. 50(57)	57. 25	56. 67	HIP 23522	4. 18	-0. 53	1. 77
NO. 19	内阶	东中星	参 8	20. 58	70. 75	79. 53	69. 73				
NO. 20	文昌	西星	柳 3. 25	34. 75	56. 58	120. 69	55. 77	HIP 44901	4. 54	-0. 03	-1. 02
NO. 21	三师	西北星	张 0. 5	21	70. 33	137. 62	69. 32	HIP 50933	4. 93	0. 39	0. 43
NO. 22	天牢	西北星	张 4. 25	30	61. 33	141. 32	60. 45	HIP 51814	5. 24	1. 98	0. 98
NO. 23	势星	东北星	翼 2. 5	30. 5(30. 75)	60. 83	156. 59	59. 96				
NO. 24	玄戈		亢 4. 5	40. 33	51. 00	205. 90	50. 27	HIP 69732	4. 21	-0. 41	0. 10
NO. 25	天理		翼 9	27. 75(88. 75)	63. 58	163. 00	62. 67				
NO. 26	相		轸 2	33. 75	57. 58	174. 57	56. 75	HIP 60485	4. 92	0. 05	-0. 22
NO. 27	太阳守		翼 11	38	53. 33	164. 97	52. 56	HIP 57399	3. 86	-0. 85	0. 11
NO. 28	内厨	西星	轸 10. 25	18. 83	72. 50	182. 70	71. 46	HIP 62423	5. 55	-0. 64	0. 27
NO. 29	天厨	大星	斗 20	21. 33	70	287. 13	68. 99				
NO. 30	天乙		亢 0	20. 5	70. 83	201. 47	69. 81	HIP 67627	4. 62	-0. 15	-0. 56
NO. 31	太乙		角 12	20. 58	70. 75	201. 50	69. 73				
NO. 32	天枪	东北星	亢 7. 5	34	57. 33	208. 86	56. 51	HIP 70497	4. 15	-0. 24	-0. 36
NO. 33	天棓	南星	箕 2	43. 75(43)	47. 58	259. 13	46. 90	HIP 86414	3. 75	-0. 51	-0. 17
NO. 34	三公	东星	角 5. 25	36. 58	54. 75	194. 85	53. 96	HIP 66234	4. 72	-0. 60	-0. 25
NO. 35	亢宿	南二星距	亢 0	97. 25	-5. 92	201. 47	-5. 83	HIP 69427	4. 33	0	-0. 05
NO. 36	大角		亢 2. 5	66. 75	24. 58	203. 93	24. 23	HIP 69673	0. 11	-0. 20	-0. 19
NO. 37	折威	西三星	角 11	103	-11. 67	200. 52	-11. 50	HIP 69269	5. 02	0. 21	-0. 35
NO. 38	阳门	西星	亢 1. 5	115. 25(125. 25)	-23. 92	202. 94	-23. 58	HIP 70306	4. 94	0. 29	0. 18
NO. 39	氏宿	西南星距	氏 0	103. 25	-11. 92	210. 57	-11. 75	HIP 72622	2. 79	0. 01	-0. 28

续表2

编号	星名	星官	入宿度 (古度)	去极度 (古度)	赤道内外度 (古度)	换算赤经 (°)	折合赤纬 (°)	证认结果	星等	赤经误差(°) (1106年)	赤纬误差(°) (1106年)
N0.40	天乳		氐15.5	91.75	-0.42	225.85	-0.41	HIP 77516	3.54	0.03	0.08
N0.41	招摇		亢3	51	40.33	204.42	39.75	HIP 69879	4.97	0.56	0.08
N0.42	帝席	东星	氐2	68.25	23.08	212.54	22.75	HIP 72659	4.68	0.02	0.30
N0.43	骑官	西行北星	氐0	121.5	-30.17	210.57	-29.74	HIP 73049	5.34	0.06	-0.16
N0.44	骑阵将军		氐2.5	133.25	-41.92	213.04	-41.32	HIP 74117	4.00	-0.26	-0.14
N0.45	车骑	东南星	氐2	140.25	-48.92	212.54	-48.22	HIP 74395	3.57	0.26	-0.08
N0.46	阵车	东星	氐2.75	113	-21.67	213.28	-21.36	HIP 73714	3.31	-0.04	-0.08
N0.47	轸河	大星	氐1	59.5	31.83	211.56	31.37	HIP 72105	2.52	-0.08	-0.30
N0.48	亢池	北星	亢3	70.25	21.08	204.42	20.78	HIP 70027	5.01	-0.05	-0.16
N0.49	天辐	南星	氐10.92	118.5	-27.17	221.34	-26.78	HIP 76600	3.60	-0.06	0.34
N0.50	井宿	西扇一星距	井0	68.58	22.75	82.23	22.42	HIP 30343	2.91	0	0.03
N0.51	鬼宿	西南星距	鬼0	70.58	20.75	114.99	20.45	HIP 41822	5.45	0	0.25
		中星积尸气	鬼1.5	68.75	23.58	116.46	23.24	M44		0.65	-0.94
N0.52	耀星	西北星	井29.75	61	30.33	111.56	29.89	HIP 40843	5.23	-0.34	-0.24
N0.53	天狗	西南星	井22.5	104.25	-12.92	104.41	-12.73	HIP 36773	4.94	-1.22	-0.23
N0.54	外厨	西大星	柳0	92.75	-1.42	117.48	-1.40				
N0.55	天记		柳3.75	102	-10.67	121.18	-10.52	HIP 43067	4.47	-0.15	-0.08
N0.56	天社	西南星	井13.25	135	-43.67	95.29	-43.04	HIP 31685	3.14	-2.67	0.37
N0.57	柳宿	西头三星	柳0	83	8.33	117.48	8.21	HIP 42313	4.15	0	0.24
N0.58	酒旗	西北星	星0	76.58	14.75	130.88	14.54	HIP 46771	5.14	-0.09	0.42
N0.59	星宿	中大星	星0	96.5	-5.17	130.88	-5.10	HIP 46390	2.14	0	0.03

续表2

编号	星名	星官	入宿度 (古度)	去极度 (古度)	赤道内外度 (古度)	换算赤经 (°)	折合赤纬 (°)	证认结果	星等	赤经误差(°) (1106 年)	赤纬误差(°) (1106 年)
NO. 60	轩辕	大星	张 2.58	75.08	16.25	139.67	16.02	HIP 49669	1.32	0.37	0.08
		御女	张 2.58	77	14.33	139.67	14.12	HIP 49637	4.51	0.31	0.01
		左角太民	星 3.5	77.92	13.42	134.33	13.23	HIP 47508	3.63	-1.11	0.44
		右角少民	张 7.75	76.25	15.08	144.77	14.87	HIP 51624	3.80	1.54	-1.16
NO. 61	内平	西南星	张 6	52.25	39.08	143.04	38.52	HIP 51056	4.79	0.22	-0.41
NO. 62	天相	北星	星 6.25	95.5	-4.17	137.04	-4.11	HIP 48437	5.09	0	-0.03
NO. 63	天璽	西南大星	柳 12	137.25	-45.92	129.31	-45.26	HIP 44511	3.92	-0.94	1.51
NO. 64	张宿	西二星	张 0	102.25	-10.92	137.13	-10.76	HIP 48356	4.27	0	-0.13
NO. 65	天庙	西北星	柳 13.25	113.75	-22.42	130.54	-22.10	HIP 45902	4.80	-0.02	-0.32
NO. 66	太尊	太尊	张 17	41.25	50.08	153.88	49.36	HIP 54539	3.16	0.38	-0.16
NO. 67	翼宿	中西二星	翼 0	105.25	-13.92	154.13	-13.72	HIP 53740	4.25	0	0.05
NO. 68	东瓠	西南星	张 7.75	128.5	-37.17	144.77	-36.64	HIP 50191	3.87	-0.32	-1.23
NO. 69	轸宿	西北星	轸 0	104.25	-12.92	172.60	-12.73	HIP 59803	2.55	0.01	0.16
NO. 70	左辖		轸 4	102.75	-11.42	176.54	-11.26	HIP 61174	4.39	0.11	0.04
NO. 71	右辖		翼 17	110.5	-19.17	170.88	-18.89	HIP 59199	4.10	-0.10	-0.86
NO. 72	长沙		轸 1.5	109.25	-17.92	174.08	-17.66	HIP 60189	5.17	-0.32	0.43
NO. 73	青丘	东星	轸 5	125	-33.67	177.53	-33.19	HIP 61789	4.60	0.75	-1.83
NO. 74	车门	西北星	翼 13.75	113.25	-21.92	167.68	-21.60	HIP 58082	5.43	-0.18	0.81
NO. 75	器府	西北星	翼 8.5	137	-45.67	162.50	-45.01				
NO. 76	土司空	南一星	翼 15	122.75	-31.42	168.91	-30.97				

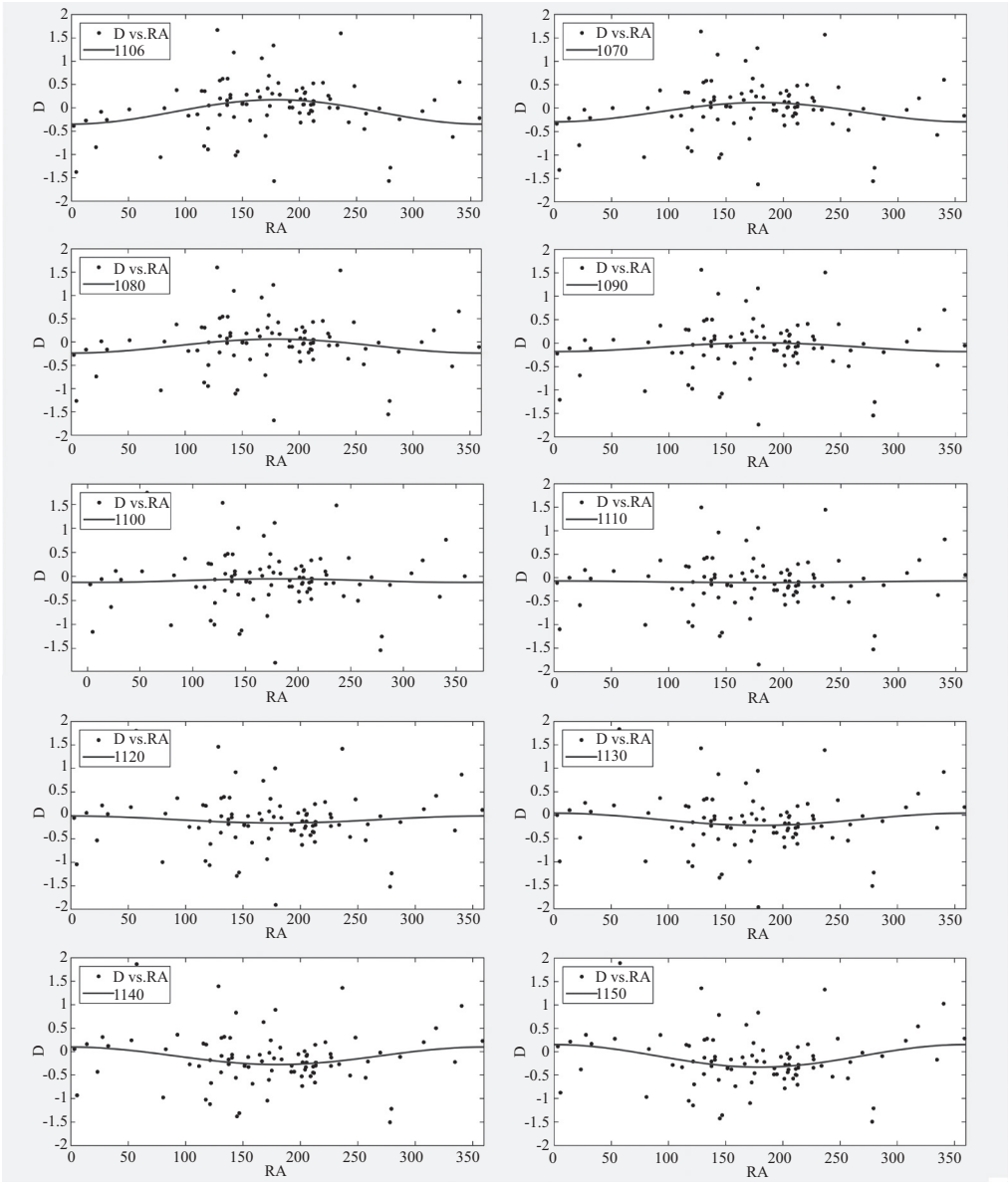


图 6 1060—1150 年的赤纬误差傅里叶拟合曲线

表 3 崇宁恒星纬度误差分析结果(1060—1150)

假设年代 T_s	常数项 $c(^{\circ})$	余弦项系数 $n(T_s^i - T_r)(^{\circ})$	指向年代 T_r	误差标准差($^{\circ}$)
1060	-0.0871	-0.2612	1106.9193	0.5988
1070	-0.0870	-0.2615	1116.9732	0.5904
1080	-0.0876	-0.1495	1106.8547	0.5839
1090	-0.0877	-0.0936	1106.8080	0.5795

续表3

假设年代 T_s	常数项 $c(^{\circ})$	余弦项系数 $n(T_s - T_r)(^{\circ})$	指向年代 T_r	误差标准差($^{\circ}$)
1100	-0.0879	-0.0376	1106.7595	0.5771
1110	-0.0879	0.0184	1106.7038	0.5768
1120	-0.0880	0.0744	1106.6427	0.5786
1130	-0.0879	0.1304	1106.5763	0.5825
1140	-0.0879	0.1865	1106.4990	0.5883
1150	-0.0877	0.2426	1106.4218	0.5961

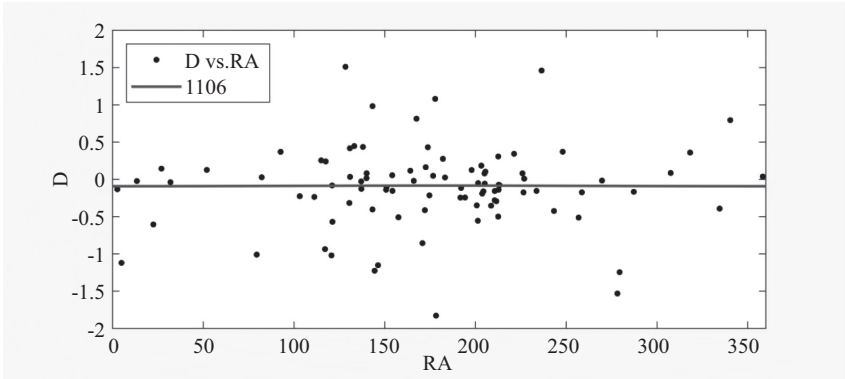


图 7 1106 年的赤纬误差傅里叶拟合曲线

3 北宋恒星观测的精密化

崇宁恒星观测能够在皇祐观测的基础上更进一步,离不开北宋官方在观测实践与仪器铸造上的持续探索。以往对于中国古代恒星观测发展的总体印象是渐进式、逐步发展的。但细心考察可知,从汉至唐,恒星观测精度总体并无明显进展,在千余年中始终停滞于同一水平;与之相对,北宋时期的恒星观测则呈现出一种快速发展的状态,在一个世纪内接连取得突破。崇宁观测在这一系列观测活动中时间最晚,精度最高,代表这一特殊时期天文观测发展的最终成就,具有重要的历史意义。

前人在研究星表的过程中对其观测精度最为关注,但本文并不打算停留在这一层面,而是想探究其背后的进步原因。相比汉唐时期,北宋天文学家则更多体现了对精细化观测的追求,这是中古之后天文学走向成熟化、精密化的关键因素。这种新的诉求多数时候是通过观测仪器的细节体现出来的。古代恒星观测所使用的主要观测仪器是浑仪。在北宋沈括《浑仪议》及苏颂《进仪象状》中,可以看到北宋天文学家对于浑仪细节如何影响观测精度已经有了非常精深的讨论,这样细致的讨论在此前文献中尚未发现。

从汉至唐,浑仪结构经历了从简单到复杂的发展,李淳风的三重浑仪及一行的黄道游仪代表了成熟的浑仪结构,除了最基本的赤道之外,还有着黄道、白道等代表日月五星运行轨道的规环。北宋浑仪大体承袭唐代,并未增添新的规环,甚至有所简化。^[5]不过,我国古代天文观测主要为赤道体系,其精度与黄、白道的增设无关,而是体现在北极校准度、规环偏心率、窥管结构、刻度均匀及粗细程度等方面^[6]。

唐代前期,以张衡《浑天仪注》为代表的经典浑天说处于统治地位,而浑仪则是这种宇宙论的器物代表。尽管李淳风、一行等人通过测量发现地中(阳城)、长安的北极高度与经典浑天说的“北极出地三十六度”并不吻合,但依旧以 36 度为标准北极高度来铸造浑仪。长安的北极高度约为 34.8 度,所以仅这一项便为其观测数据带来了 1.2 度的系统误差^①。北宋浑仪则展示了一系列新的北极高度数据,这些数据为实测所得。沈括在《浑仪议》中重测极星去北极度数,其实也很好地展示了北宋天文学家如何定位北极:“使人目切南枢望之,星正循北极枢里周,常见不隐,天体方正。”^②当极星恰好循浑仪枢轴内壁运动时,浑仪极轴便与天轴恰好对应。宋都汴梁北极出地约为 35.29 古度,至道浑仪首次突破了传统学说,采用了 35 度的北极高度,大大降级了系统误差;而皇祐、元祐浑仪更进一步,不再满足于整数数据,而分别采用 35 度少强($35\frac{4}{12}$ 度)与 35 度少弱($35\frac{2}{12}$ 度)这样的精细分数。这种不断调整的过程也反映了北宋观测者并未遵循一个固定的值,而是在观测过程中不断调试以接近最真实的北极高度。正是在这种实践中,崇宁观测的系统偏差降低到了不足 0.1°,达到了空前的精度。

规环偏心率、刻度均匀程度并无直接史料记载,它们与金属环铸造工艺及度量水平有关;若规环偏心率过大或者刻度不均匀,即便观测过程再细致也不可能取得精确的结果。据一行所述,当时灵台所用斛兰浑仪便存在“度刻不均”的问题。由于去极度是以浑仪南极为起点进行度量,期间每一个刻度的误差都会累积到后面的读数上,因而所带来的误差可能会较大,那些较大的误差可能是这些因素带来的。石氏星表中随机误差超过 2° 的数据占据 14.1%,景祐星表占据 7.3%,而皇祐、崇宁观测则分别降至 0%。([8], 96、183-211 页)这体现出北宋尤其是皇祐之后的浑仪铸造水平已经相当成熟,圈环趋于正圆,刻度近于均匀。

窥管结构也是影响观测精度的重要因素之一,沈括对此有着清晰的认识。古人使用窥管定位天体时,其视线可能相对于窥管中轴线有一定的偏角。宋代之前的浑仪窥管口径皆为“一度半”,沈括指出,“若人目迫下端之东以窥上端之西,则差几三度”。他对窥管进行了改造,使下端口径仅三分,上端为一度半,这样视野中两端便会大小相等,使“人目不摇,所察自正”。([7], 958 页)沈括所举是极端的情况,一般情况下观测者会将观测目标置于窥管上端视野中央,而人眼在窥管下端的游离所造成的随机误差约在 $\pm 0.75^\circ$ 之内。皇祐浑仪降低了窥管孔径相对于长度的比例,使随机误差降低到 0.6° 以内,故皇祐

① 一行所测二十八宿去极度相对于开元十二年(724)理论值的误差为 1.04 度,与此接近。

② 中华书局点校本原文作“……星正循北极,枢里周常见不隐……”([7], 958-959 页),不可解。此据上下文意重新断句。

观测的随机误差的 1° 溢出率仅有 9.1%,甚至低于崇宁观测(12%)。([8],96 页) 这些改变说明宋人对于人眼游离误差已经有了深入的理解。可惜的是,元祐时期苏颂等人铸造浑仪时可能出于从古心理或其他原因,并未继承以上两种改进,而是使用了旧的窥管比例。据下文可知,崇宁观测所用即为元祐浑仪,故其在 1° 以上的随机误差比例相对于皇祐反而更多(表 4)。

在浑仪铸造日渐成熟的情况下,系统误差及大于 1° 的随机误差逐渐消减。但要继续提高观测精度,还需要提高其“分辨率”,即读取更小数量级的坐标。汉代石氏星表已经存在这种倾向,许多坐标读数精确到“少”、“半”、“太”等,但由于汉代浑仪铸造水平尚不成熟,误差较大,读数的精细化并不能凸显其意义。唐代一行及北宋景祐进行的恒星观测,多数仅精确到 1 整度,仅有少数读取到半度;皇祐、元丰时期读取至半度成为常规情况,甚至有个别数据精确到四分之一度。而崇宁观测则进一步提高了读数精度,姚舜辅等对此进行解释:“诸历赤道宿次,就立全度,颇失真数。今依宋朝浑仪校测距度,分定太、半、少,用为常数,校之天道,最为密近。”([7],1857 页)

理想情况下,最小刻度或者读数决定了随机误差的理想误差范围。当排除其他误差时,随机误差应小于坐标数据最小数量级的一半。在实际观测中,由于瞄准有误或者仪器刻度不均等问题,实际产生的随机误差要超出理想范围。但这种细化读数对精度提升依旧起到了一定的作用。表 4 中列出了各星表在不同误差范围内的随机误差绝对值比例。可见,由于景祐星表最小读数为 1 度,0—0.5 度为其理想误差范围,因此该范围内的数据量要远超 0.5—1 度内的误差;但 0—0.25 度与 0.25—0.5 度范围内随机误差所占比例则相差不大。在皇祐星表所使用的最小读数(0.5 度)之内,0—0.25 度属于理想误差范围,与同等长度(0.25—0.5 度)的误差范围相比,聚集在这个范围的数值最多,这体现了最小读数(或刻度)的约束作用;而皇祐随机误差落在 0—0.125 度之间与 0.125—0.25 度之间的比例分别为 21%与 17%,相差不大,这证明皇祐恒星观测使用的浑仪并未将 1 度进行四分。而崇宁数据使用了四分细化读数(0.25 度),0—0.125 度属于其理想误差范围,所以与同等长度(0.125—0.25 度)的误差范围相比,被约束在这个范围的数值占比最多(31%)。因此,在北宋时期浑仪铸造工艺成熟的背景下,读数的精细化有效地提升了观测精度。

表 4 北宋前各星表随机误差绝对值分布

石氏 (N=85)			景祐 (N=178)		
误差范围(度)		数量(比例)	误差范围(度)		数量(比例)
[0,0. 125)	[0,0. 0625)	8(9%)	[0,0. 5)	[0. 125,0. 25)	41(24%)
	[0. 0625,0. 125)	5(6%)			
[0. 125,0. 25)		10(12%)		[0. 25,0. 5)	37(21%)
[0. 25,0. 5)		20(24%)			
[0. 5,1]		20(24%)	[0. 5,1]		48(27%)
>1		22(26%)	>1		50(28%)
皇祐 (N=339)			崇宁 (N=92)		

续表4

误差范围(度)		数量(比例)	误差范围(度)		数量(比例)
[0,0.25)	[0,0.125)	72(21%)	[0,0.125)	[0,0.0625)	13(14%)
				[0.0625,0.125)	16(17%)
	[0.125,0.25)	57(17%)	[0.125,0.25)		21(23%)
[0.25,0.5)		102(30%)	[0.25,0.5)		20(22%)
[0.5,1]		77(23%)	[0.5,1]		11(12%)
>1		31(9%)	>1		11(12%)

那么,这些分数是否是估读得到的呢?沈括曾提到,宋代浑仪上一般施银丁或者齿,是因为“夜候天晦,不可目察,则以手切之也”([7],960页)。这也可以解释为何此前一行、景祐、皇祐观测数据仅读取至半度,这样的数据并不需要灯火辅助即可估出。不过,崇宁观测值有相当多的去极度与赤道内外度数据不仅读取至“少”、“半”、“太”,还有“强”、“弱”这样的估读表示,如“上宰去极三十度太强”(30.75度+)。无论如何,这样的表述方式不太可能是整度下的估读,更像是基于四分细化刻度进行的估读。因此,可以合理推测崇宁观测读取数据的方式相对前人已有改变:他们不仅使用灯火照明辅助读取,且浑仪规环上还可能将1度分为了四个细化刻度。南宋乾道四年(1166),太史局使用高宗前期制造的小浑仪测验,得到“土星在赤道虚宿六度弱”、“太阴北去角宿距星二十一度少弱”、“土星在赤道虚宿六度半弱”等结果。([7],1924-1926页)这架小浑仪度距更为狭窄,若无细化刻度,仅就整度来估读,不可能做出这样细微的估读。唯一合理的解释便是其上标有四分细化刻度,这种细化刻度显然应该继承自北宋。

崇宁时期的最新浑仪是苏颂等人铸造的元祐浑仪。《新仪象法要》中记载了元祐浑仪的结构及其部分观测数据,其中也有着四分刻度存在的痕迹。卷中“四时昏旦中星图”中除了给出《礼记·月令》、唐及元丰所测中星度之外,还在最后添加了小注,小注内容为日躔位置,应为苏颂以新仪所测。这些数据以四分刻度估读的形式给出,如春分晓时“日在奎一度少弱”,秋分昏时“日在轸五度半弱”。^[9]结合崇宁数据形式,可以推测元祐浑仪之上可能已经具备了四分刻度^①,崇宁观测所用应为此浑仪。细化刻度的使用是浑仪发展史上的一个细小却重要的创新,崇宁星表揭示了北宋时期便可能已经存在四分的细化刻度。不可否认的是,刻度或读数的细化,是12世纪天文观测精密化思潮下的一个重要转向,对恒星观测精度的提升产生了深远的影响。

4 结 语

在我国历史上,北宋是铸造浑仪数量最多和恒星观测最为密集的时期之一,而且在这一时期所进行的大量观测实践及积累的新仪器技术,又为后世郭守敬在恒星观测和仪器

① 日躔数据一般无法直接测量,但是元祐浑仪属于水运仪象台的一部分,其窥管可以与太阳同步运转。即便该组数据是以传统方式借助金星等天体间接测量,若无细化刻度也无法得到如此小的数据量级。

铸造上取得更大的突破奠定了基础。尽管目前学界已认识到北宋恒星观测的最高成就应存在于崇宁时期,但由于该时期留下的恒星观测资料过少,学界只能依据二十八宿距度对其略作考究。而笔者近来发现明抄本《大统通占》中存有许多崇宁时期的相关观测资料,在对其中人为构造的部分进行剔除之后,提取出崇宁时期实测的恒星观测数据。基于这份全新的材料,本文对崇宁恒星观测的精度进行了重新计算,发现其相对于皇祐星表有了显著提高。

北宋是中国恒星观测史上的关键节点。这一时期的天文学家格外关注“细节”对于天文仪器及观测精度的影响,进行了大量的观测实践、对误差也有了实在、深入的分析,并对观测仪器有了相应的改进措施。对仪器及观测精细化的追求是 11 世纪天文学相对于中古时期的明显不同之处,为下一个时代中国天文学巅峰时期的到来奠定了基础。对精度的追求在元代得到了更进一步的发展,郭守敬认为“昔人以管窥天,宿度余分约为太半少,未得其的”,“乃用二线推测,于余分纤微皆有可考”^[10]。郭守敬将一度进一步划分成了十格,使恒星坐标的精确性在理论上达到了 0.05 度;又辅以二线定位,大体消除了人眼游离误差。正因如此,在创造历法的过程中,郭守敬等人测量的七曜行度数据就具有了相对于前代更小、更精确的数量级,这也是《授时历》能取得如此高成就的重要原因之一。对更细化的刻度、更准确的天空坐标的追求,无疑是促成宋元之际中国天文学得到快速进步的重要原因。

致 谢 本文曾在“第十届青年科技史学术研讨会”上报告,并得到王广超教授的有益指点。两位匿名审稿专家及邹大海研究员惠赐了宝贵的修改意见。苏州碑刻博物馆为本文提供了天文图高清图片,“国家资助博士后研究人员计划(GZC20232547)”为本文第一作者提供了支持,谨致谢忱!

参 考 文 献

- [1] 薄树人. 中国古代的恒星观测[J]. 科技史集刊, 1960(3): 35-52.
- [2] 潘鼐. 中国恒星观测史[M]. 上海: 学林出版社, 2009: 246.
- [3] 吴守贤, 全和钧. 中国古代天体测量学及天文仪器[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- [4] 邹淮. 星象考[M]//四库全书存目丛书: 第 55 册. 济南: 齐鲁书社, 1995: 21.
- [5] 潘鼐. 彩图本中国古天文仪器史[M]. 太原: 山西教育出版社. 2005: 5-10.
- [6] 郭盛炽. 中国古代星表数据的误差[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1997: 235-240.
- [7] 脱脱, 等. 宋史[M]. 北京: 中华书局. 1977.
- [8] 杨伯顺. 中国传统恒星观测精度及星官演变研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2023.
- [9] 苏颂. 新仪象法要[M]. 刘蕾, 整理. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2020: 136-143.
- [10] 宋濂. 元史[M]. 北京: 中华书局. 1976: 990.

New Research on Star Observations in the Chongning Period of the Northern Song Dynasty

YANG Boshun, CHU Longfei

*(Dept. of the History of Science and Scientific Archaeology, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China)*

Abstract The academic community had little understanding of stellar observation issues during the Chongning (崇宁) period of the Northern Song Dynasty. By studying a new batch of ancient star data, this article finds that a large-scale star observation activity similar to that of the Huangyou (皇祐) period was actually carried out during the Chongning period. After eliminating the made-up components in this batch of data, and calculating its observation accuracy and age, the authors found that the observation accuracy of Chongning star data is significantly better than the Huangyou star catalog, making it the highest level of Northern Song star observations yet seen. This article believes that the Northern Song Dynasty was a key moment in the history of the development of astronomical observation. Astronomical observers in this period paid attention to the details of the armillary sphere and pursued precision of observation data, showing different characteristics from astronomy in the Han and Tang Dynasties. The Chongning observations were the ultimate achievement of this new trend.

Keywords Chongning (崇宁) Period; star observations; star catalogue; celestial armillary sphere