

“天再旦”研究^{*}

刘次沅

(中国科学院陕西天文台, 中国科学院国家天文观测中心, 临潼 710600)

李建科

(ANU Astrophysical Theory Centre, Department of Mathematics, Australian National University, ACT0200 Australia)

周晓陆

(西北大学文博学院, 西安 710069)

摘要 讨论了“天再旦”现象的天文条件及其在地面上可见地域的分布特征, 说明了用天文方法计算古代天象的精度和存在的问题. 在此基础上全面搜索计算公元前 1 000 至前 840 年的日食及其造成的“天再旦”现象, 证实公元前 899 年 4 月 21 日日食是“懿王元年天再旦于郑”记录极其合理的解释.

关键词 天文学史 年代学 日食

中国古代文献《竹书纪年》中记载的“懿王元年天再旦于郑”^[1], 被认为是当时在郑地发生的一次日出时日全食. 它所造成天亮后转黑并再次天亮的现象使古人产生“天再旦”的感觉. 由于西周懿王在中国最早的确切纪年“共和元年(841BC)”之前四代, “天再旦”记录的研究有可能导致我国年代学研究的重大进展. 自刘朝阳^[2]提出“日食说”后, 不少学者对此作了研究, 得到的结果却不相同^[3]. Pang^[4]的研究似乎是最令人信服的. 公元前 899 年 4 月 21 日日食带的西端点位于今陕西华县(郑的可能地点), 这是“天再旦”记录的唯一对应. Stephenson^[5]则对“天再旦”记录的日食说持反对意见.

实际上我们需要从理论和实践上对清晨日食的天光变化作全面深入的研究. 对于不同食分, 不同的食甚时太阳亮度, 不同天气状况, 天光的变化过程如何? 人眼的感受如何? 怎样用数学方法来表述?

我们通过对实际天亮过程的测量, 得到了正常晴天日出时, 天光随太阳地平高度变化的表达式(以及天气状况对它的影响), 这样, 对于任何地点和日期, 就可以计算得到日出时天光随时间的变化过程. 把它与日食引起的天光变化相叠加, 并用视亮度表达, 就可以用理论方法来表达“天再旦”的过程^[6]. 由于“天再旦”最关键的特征是在天光上升过程中的短暂下降, 因而我们定义在 10 min 内的视亮度下降量为天再旦的强度. 这样, 就可以计算出任一地点天光变化过程和“天再旦”强度.

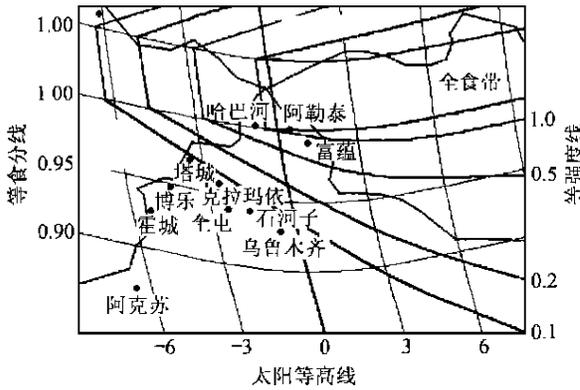


图 1 1997 年 3 月 9 日新疆日食形势

为了验证我们的理论,并确定人眼感知这一现象的临界值,利用 1997 年 3 月 9 日日食的机会,在其全食带西端点附近区域,即新疆北部,布网组织了一次群众性的日食天光观测.我们共收到 60 余人从 18 个不同地点寄来的 36 份报告,完全证实了理论计算的结果.同时显示,当强度大于 0.1 时,“天再旦”现象明显可见,大于 0.5 时,强烈可见(参见文献 [6] 及观测报告^[1]).

与此类似,美国加州南部的观察者也记载过 1992 年 1 月 4 日日环食带食而落所造成的“天再昏”现象^[7].

成的“天再昏”现象^[7].

1 “天再旦”等强度线及其形态

由参考文献 [6] 的分析得知,某地点的“天再旦”强度由当地日食最大食分、食甚时太阳地平高度以及天气状况决定.该文图 3 给出晴天条件下“天再旦”强度随食分和太阳高度的变化曲线(阴天会导致强度减弱).计算出各点的强度后,就可以在地图上画出“天再旦”的等强度线.图 1 给出 1997 年 3 月 9 日日食的“天再旦”等强度线(强度 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 四条).图中同时给出该次日食的等食分线和食甚时太阳等高线.图中标出的城市是我们的观测网点,它基本上覆盖了“天再旦”强度的各种情形.

前面的讨论基于“天再旦”现象的一个特征,即天光视亮度的下降量.这一特征导致等强度线向右逐渐散开(见图 1),不难想象它将覆盖很大的区域.然而“天再旦”现象的另一特征是,它必须与“旦”有关,即它必须是在天光明显上升期间.由参考文献 [6] 图 1 及 (3), (4) 式可见,当太阳升到 5° 以上,天光视亮度增强势头减缓,10° 以上,视亮度基本上不再继续加强.从日出到 10° 这一过程在中低纬度地区通常需要 1 h 左右.

换句话说,在整个白天,天光本身平稳少变,较小的日食都会使天光有短时的下降,但这已与“天再旦”无关.考虑到“旦”的特征,可以对等强度线作进一步限制.

我们限制“天再旦”现象必须在太阳地平高度 10° 以下,同时在 5° 与 10° 之间作一个线性衰减.在对文献 [6] 图 3 作了这样的改正后得到图 2. 图中纵坐标为某地点的最大食分,横坐标为当地食甚时的太阳地平高度,由此可以得到当地的“天再旦”强度,进而在地图上画出“天再旦”等强度线.经过这样修正的“天再旦”等强度线在日食带西端形成一个近似于菱形的区域.

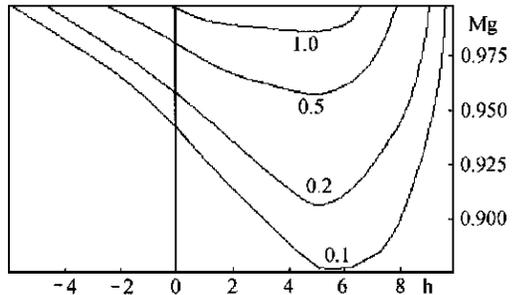


图 2 “天再旦”强度与食分和太阳高度的关系

1) 刘次沅,周晓陆. 1997 年 3 月 9 日日食新疆北部天光观测报告,北京天文台主编: 1997 年日食论文集

地面上的日食图形态是千变万化的,但它的端点部分形态基本上有两个特征:宽度和方向.宽度基本上是由食分和地理纬度决定的.因此对于我们所讨论的纬度 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 地区,可以根据食分大致给出“天再旦”等强度线的基本形状,如图 3.

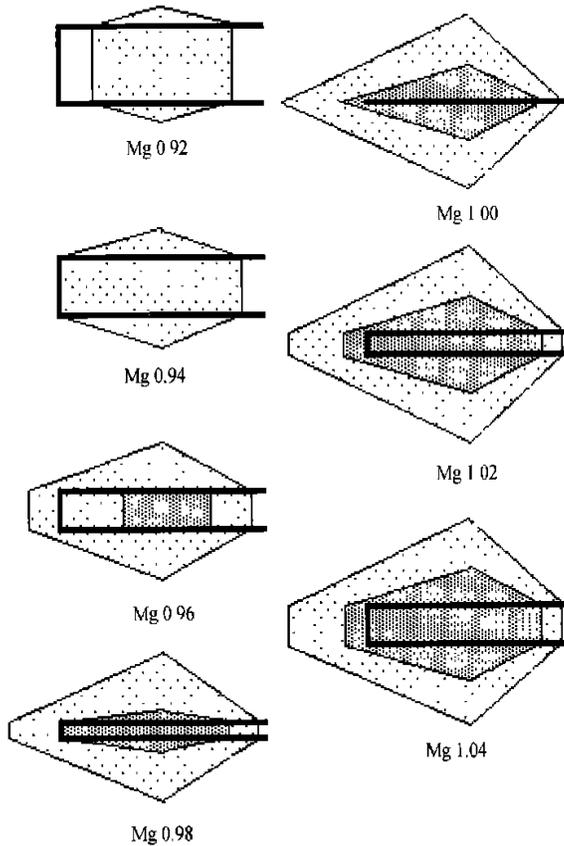


图 3

图中横坐标为地理经度方向,纵坐标为纬度方向.分别给出从 0.92 到 1.04,不同食分日食的情形.粗实线为中心食带,左端(封口)为食甚时日出,右端(不封口)为食甚时太阳地平高度 10° .发生“天再旦”的地区在中心食带的西端周围.浅色区强度大于 0.1,深色区强度大于 0.5.由图 3 可见,所有日食(包括食分最小的环食)都可以造成“天再旦”现象,其强度随着食分增大;“天再旦”最强的地区在日出以后.

2 日食计算的误差范围

日食计算是天文现象中最繁琐的计算之一.由于现代观测和理论的日臻精密和完善,日食发生的时刻和全食地点都可以计算得相当精确.计算机技术的发展,也使得计算过程简便易行.但是计算方法是建立于几百年以来的精密观测的基础之上,把它推广到几千年以前,显然会产生很大的误差.尽管现代日月位置的计算公式参考了古代观测记录,但由于古代记录的精确度和可信度都有限,远不能令人满意.实际上天文学家更希望找到尽可能多,尽可能精

确的古代天象记录来改进计算方法。

输入日月历表的自变量是时间。而人类历来用以量度时间的基准——地球自转(日)却是不均匀的。现代精密观测证实,地球自转速度具有周年性、半年性周期变化,几十年尺度的不均匀变化以及由于潮汐摩擦造成的能量耗损和其他尚不很清楚的原因造成的地球越转越慢的长期变化。地球自转所指示的时间(世界时)和理想均匀的时间(历书时)之差 ΔT 主要是地球自转长期变化累积造成的。由现今上溯到西周懿王时期, ΔT 约有 6 h 之多,造成计算的日食带在地球表面向西平移达经度 90° !这是因为计算天体位置时,代入公式的是理想而均匀的时间,而古人观测所依据的却是地球自转所指示的时间,所得到的结果显然不符。

远期日食计算误差主要来源于月亮平黄经潮汐加速项和地球自转长期变化量 ΔT 的不确定性。地球自转长期变化这一概念直到本世纪中期才明确建立起来。此前已经相当成功的天文计算,只是将古代观测和现代计算的不符当做原因不明的经验改正,加入日月历表,以求得大致相符。这就是为什么上个世纪末 Oppolzer 忽略如此大数量的地球自转长期变化而计算的古代日月食典^[8],如今看来仍旧大致正确的原因。这样“张冠李戴”的计算方法,至今仍在某些方面有效地应用着^[9]。

月亮平黄经潮汐加速项(n ,单位:角秒/世纪²)和地球自转长期变化(c ,单位:时秒/世纪²)都是时间的平方项,而且在月亮位置计算中起的作用相当类似,因而由古代观测只能求得它们的一个线性组合,很难将它们分离。 c 与 ΔT 之间有 $\Delta T = cT^2$ 。这里 T 为从AD1800起算的世纪数。

在天文界长期使用的基于 Brown 理论的“改良月历”(ILE)中,采用 $n = -22.44$ 。在此基础上再采用适当的 c 值,便可以计算较远期的月亮位置。近年来,月亮平黄经长期项在实测和理论上都有了很大发展,因此 n 可以脱离古代观测而用现代精密观测直接测定。据20年来由人卫潮汐摄动、激光测月、数值潮汐模型、月掩星、水星凌日等方法得到的结果, n 值在-25到-27之间。美国宇航局长期精密历表 DE102 采用 $n = -26.2^{[10]}$,而古代天象记录研究者一般采用 $n = -26.0^{[11]}$ 。为了便于比较,我们采用后者。

地球自转长期变化远较月亮平黄经长期项复杂,它不能用现代观测和理论来确定,唯一的办法是利用实时的古代天象记录。近年来的研究证明,长期项本身也是变化的,也就是说,上述 ΔT 与 c 之间的关系式只是一个近似的,平均的概念。例如由平均历元 390BC 的巴比伦月食记录得到 $c = 32.5^{[12]}$,而平均历元 948AD 的阿拉伯资料得到 $c = 25.0^{[13]}$ 。最新的,综合性的研究由 Stephenson 和 Morrison^[11]作出。由 BC700 年以后(没有更早的可靠资料)的各种观测结果得到平均值 $c = 31$ 。由资料的弥散度来看(原文图 2-5), c 取 28~34 之间都是可能的。 c 值的这一不确定性,使得在 BC900 年左右时,计算的日食带在地图上东西向有 18° 的不确定性。

3 “天再旦”日食的计算结果

前文已经说明,“天再旦”现象发生在日食带的西端点附近。现在我们采用 $n = -26$, $c = 28$,将 BC1100 年至 BC840 年之间的日食全部算出,并将日食带西端点位于中国附近的情形画在图 4。图中画出每次日食带西端 10° 范围及“天再旦”等强度线。图中用不同深浅的阴影给出“天再旦”的强度: $I > 0.1$; $I > 0.2$; $I > 0.5$; $I > 1.0$ 。每次日食的日期,类型,食分也注在图中(日期采用儒略历)。图中还用黑点标出了凤翔(左)、西安(中)、华县(右)三个地点。史学界

目前对“郑”的确切地点尚无定论，主要有华县、凤翔两说^[3]。

由于地球自转长期变化的不确定性，日食带在地图上向东可以有 18° 的平移(相当于 $c=34$)。在此区间内的任何一组解，都是与当今对于地球自转的已知结果不矛盾的。由图中可见，只有 BC899.4.21(取 $c=28\sim30$)和 BC871.10.6(取 $c=32\sim34$)两次日食符合“天再旦”的天文条件。就天文条件而言，前者较强，后者较弱。就历史条件而言，后者似无可能。由此可见 BC899.4.21 日食完美地解释了“懿王元年天再旦于郑”的记载，而且是它唯一的选择。

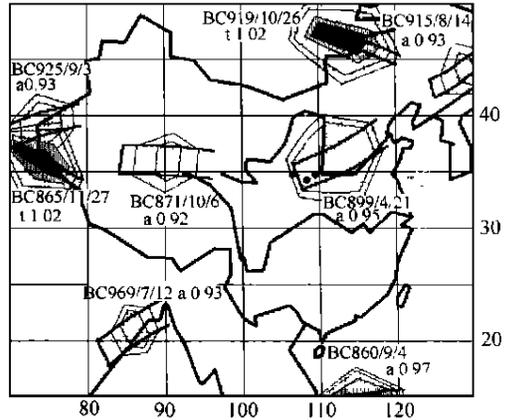


图 4 BC1000 ~ BC840 可见的“天再旦”现象

以图中情况而言($c=28$)，凤翔(“天再旦”光变强度为 0.10)的感觉相当于参考文献[6]中图 4C2，即 1997.3.9 日食塔城的感觉(强度为 0.09)；华县(强度为 0.24)相当于图 4B2 与 4C2 之间，比塔城的感觉强。陕西关中地区的其他地点，情况相当于这两者之间。现在仅就图 1 中情形($c=28$)，将 BC899 日食凤翔、华县(以今县城为准)见食情况列表如下：

表 1 BC 899 年 4 月 21 日日食凤翔、华县见食情况

儒略历日期 BC899.4.21 格里历日期 BC899.4.13 儒略日 1393174
 常数采用： $n=-26$ $c=28$ $\Delta T=340$ min
 以下两地的最大食分 0.953，经历时间 2 min 57 s

地点及经纬度	凤翔(107.4/34.5)				华县(109.7/34.5)			
	时刻	高度	方向	食分	时刻	高度	方向	食分
初亏	5:23	-12.4	东偏北 19	0.00	5:22	-10.9	东偏北 18	0.000
华县日出					6:12	-0.8	东偏北 11	0.831
食甚	6:21	-0.9	东偏北 11	0.952	6:20	0.9	东偏北 9	0.953
凤翔日出	6:21	-0.8	东偏北 11	0.946				
太阳高度 5° 时	6:50	5.0	东偏北 7	0.518	6:40	5.0	东偏北 7	0.662
食分 0.1 时	7:17	10.7	东偏北 3	0.100	7:17	12.6	东偏北 1	0.100
复圆	7:24	12.1	东偏北 2	0.000	7:24	14.0	正东	0.000
“天再旦”光变强度	0.10				0.24			

表中高度、方向的单位为度，时间为北京时间(求当地时间的方法：凤翔减 50 min，华县减 41 min)。改变 c 的取值，见食情况会改变(c 值减小，两地“天再旦”强度增大，反之减小)。考虑到地平线大气折射和日面半径，天文上通常取日心高度 -0.8° 为日出。这是“理想”地平线，具体情况要由当地地形确定。

至此，我们可以对前人的不同意见和结果作一个简单的讨论。

Stephenson^[3] 不同意“天再旦”记录的日食说和 Pang^[4] 的结果。其主要理由是：(1) BC 899

年的日食是环食, 虽然食分与全食相差无几, 但光线变化的感觉绝然不同; (2) Pang 采用地球自转参数 $c=29.5$ 计算得到结论, 而正确的数值是 $c=43.3$, 算得的郑地食甚在日出前一个多小时, 天空亮度的变化不可能发现. 事实上我们在文献[6]和本文已经从理论和实践上证实了, 即使是 0.92 的食分, 也可以看到“天再旦”现象. 同时前文也提及, Stephenson¹⁾ 本人也在以后的工作中得到 c 在 31 左右.

半个世纪以来, 学者们对“天再旦”日食提出了至少 6 个不同的结果. 除 BC899 外, 还有刘朝阳的 BC926、BC903^[2], 董作宾的 BC966^[1], 葛真的 BC925^[14], 张培瑜的 BC919^[15]. 以下分别列出这 5 次日食的情况(日期为儒略历). 考虑到地球自转参数(c)的不确定性, 日食状况的描述给出一定范围:

BC903.7.3, 日全食. 西安食甚在 9:30~11:10, 食分 0.7~0.6. 全食带西端在阿位伯海, 图 4 不可见. BC919.10.26, 日全食. 西安食甚在 6:20~7:20, 食分 0.5~0.6. 全食带西端在蒙古到我国东北, 图 4 可见. BC925.9.3, 日环食. 西安食甚在 7:50~9:20(当天日出在 6:15), 食分 0.75~0.8. 环食带西端在新疆南部, 图 4 可见. BC926.3.21, 日环食. 西安食甚在 13:40~15:20, 食分 0.8~0.95. 环食带西端在非洲东部, 图 4 不可见. BC966.5.12, 日全食. 中国不可见. 全食带西端在太平洋中.

由此可见, 这 5 次日食都不能满足“天再旦”的要求. BC926 的一次, 周都西安附近有可能看到食分很大的日食, 但时间已至下午, 不能称为再旦了.

4 “天再旦”记录再分析

前文已经证明, 在 BC 899 年 4 月 21 日日出时, 周都附近的确发生一次引起清晨天色明显变暗的日食, 而且这样的现象在懿王元年的可能期间仅此一次. 下面我们进一步讨论它与“天再旦”记录的关系.

中国历代有史官观察并记录天象的传统. 商代甲骨卜辞证实, 这一传统, 当时已经形成. 商代卜辞中已经确认了日月食记录. 综合各方面的情况来看, 在周初时, 王者身边有史官(巫卜)随侍, 注意观察天象与气象, 进行卜祭与记载. 自然, 他们对日月食、风云之类的现象是熟悉的(当时还不能预报日月食). 就天色突然变暗这一现象而言, 食分很大的日食、沙尘暴、很浓厚的乌云、遮天蔽日的蝗虫等现象都可能引起. 对于一个专事观察天象的史官, 甚至对于普通的人, 这些现象都是不难识别的. 记作“天再旦”, 自然有他的困惑. 因而, 阴云掩盖或山岭遮蔽的日食, 是“天再旦”最合理的解释. 这一点, 我们在阿勒泰所进行的实地观察作出最好的说明, 对于一个注意观察天空而又未得到日食预报的人, 这一现象的确是震撼人心的²⁾.

关于“郑”的具体地点, 尚无一致结论. 与之相关的地名, 有南郑、西郑、大郑宫、域林、拾等; 可能的地点有今凤翔和今华县之说, 总之不出西周京畿之地^[3]. 由图 4 可见, 从天文计算角度来看, 整个关中盆地都是可能的(当然, 华县的可能性略大一点). 据计算(见表 1), 当天日出方位为东偏北 11° , 当太阳地平高度达到 $10^\circ \sim 12^\circ$ 时, 食分已经降到 0.1, 肉眼难以发现. 阴天, 天边的雾气, 山岭的遮蔽都可以造成“天再旦”的现象而不被看出日食. 据关中地方当今气

1) 董作宾. 西周历谱. 史语所集刊, 23 本下册, 1952

2) 见 1242 页脚注

候而言,天空基本晴朗而天边云雾很重的情况是常见的.古人在记载天象时常常记“入浊”就是这种情况.今凤翔县北部是高度在 1 000~1 700 m 的山区,而华县南部是高达 2 500 m 的秦岭主脉,山岭遮蔽的情况可能存在.但由于“郑”的位置不定,无法具体讨论其周围的地平线状况.

“天再旦”的记录,历史上仅此一例.它发生在西周早期,有其历史背景.当史官能够熟练地掌握“朔”并能初步计算日食后,他就容易想到在朔日发生的天亮了又黑的现象是由日食引起的,而不至于记作“天再旦”.汉代以后屡有“带食而出”记载,而“天再旦”不再出现,其原因正在于此.从历史上看,西周早期正处于这种已经开始严密注意天象,却又不能掌握日食规律的时期.

历代天象记录,极少有言及观测地点的.因为这些记录来自史官.而史官随侍王侧,其地点在京城则不言而喻.据今本《竹书纪年》记载,穆王以下居大郑宫.因为当时天子不在京城,所以史官在记下天象以后,特别注明地点“郑”,这也给我们确信该条记录以更强的信心.

由以上分析,我们可以断定,“天再旦”的记录是 BC 899 年 4 月 21 日懿王的史官在随王居住郑地时,早晨例行观察天象(尤其是东边日出方向)时发现的.当时“天再旦”现象不是很强烈,普通人即使发现,也不会引起太大的震动.但是对于每天专职观察日出的史官,我们由理论和实践证明的这样明显的异象,就足以引起惊恐,继而报告天子,载诸史册了.

当然,“天再旦”的记录毕竟过于简单,由此出发所作的推论有其薄弱性,仍需要其他方面的证实.这也是许多古代史学问题的共同特点.例如从金文月相干支来定历日,首先必须假定当时的纪日干支系统与后世(例如春秋以后)是连续的.而这一基本假定至今尚未有独立的证实.

参 考 文 献

- 1 方诗铭,王修龄.古本竹书纪年辑证.上海:上海古籍出版社,1981
- 2 刘朝阳.殷末周初日月食初考.中国文化汇刊,1944 4(2): 85~119
- 3 刘次沅,周晓陆.“懿王元年天再旦于郑”考证.自然科学史研究,1999,18(1): 48~54
- 4 Pang K D, Yan K K, Chou H H, et al. Computer analysis of some ancient Chinese sunrise eclipse records to determine the earth's rotation rate. *Vistas in Astronomy*, 1988, 31: 833~847
- 5 Stephenson F R. A re-investigation of the double dawn event recorded in the bamboo annals. *Q J R astro Soc*, 1992, 33: 91~98
- 6 刘次沅,周晓陆.带食而出的天光变化.天文学报,1998 39(3): 278~286
- 7 Levy D H. Star trail. *Sky & Telescope*, 1992, 83: 695~696
- 8 Oppolzer T R. Canon of eclipses. Viena 1887. Dover Publications Inc. 1962
- 9 渡边敏夫.中国日本朝鲜日食月食宝典.东京:雄山阁,1979
- 10 Newhall X X, Standish E M, Williams J G. DE102; a numerically integrated ephemeris of the moon and planets spanning forty-four centuries. *Astro Astrophys*, 1983 125: 150~167
- 11 Stephenson F R, Morrison L V. Long-term fluctuations in the earth's rotation; 700BC to AD1990. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1995, 351: 165~202
- 12 Stephenson F R, Morrison L V. Long-term changes in the rotation of the earth; 700BC to AD1980. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1984, 313: 47~70
- 13 Stephenson F R, Said S S. Non-tidal changes in the earth's rate of rotation as deduced from medieval eclipse observations. *Astro Astrophys*, 1989, 215: 181~189
- 14 葛真.用日食月相来研究西周的年代学.贵州工学院学报,1980, 2: 81~98
- 15 张培瑜.西周天象和年代问题.南京大学学报(自然科学版),1982, 2a: 371~380