

日食所致“天再旦”现象再研究

王圣豪[†]

(北京师范大学历史学院 北京 100091)

摘要 古书《竹书纪年》记载周懿王元年“天再旦于郑”，这被现代学者认为可能是发生在日出之际的日食，夏商周断代工程选择前899年4月21日的日环食为天再旦的对应日食。更一般的分析发现只有食分在0.95以上的日食才能产生“天再旦”现象，对食甚时的太阳高度也有限制。在确定“郑”位于陕西凤翔县的前提下，前899年日食和断代工程实测的1997年日食的日光变化情况可以通过天文软件模拟，这确认了“天再旦”现象的普遍存在，从中也可得出“天再旦”现象发生时的具体过程并还原部分细节。

关键词 日食, 天体力学, 天文学史, 方法: 观测

中图分类号: P125; **文献标识码**: A

1 引言

成书于战国时期的古书《竹书纪年》当中记载周懿王元年出现了“天再旦于郑”的奇异天象，现代学者认为“天再旦”为“天亮了两次”之意，主张这是一次发生在日出之际的日全食。夏商周断代工程为验证“天再旦”现象，在1997年3月9日对发生在新疆北部的日全食进行了实地观测，证实了“天再旦”的可靠性，并最终选定前899年4月21日发生的日食为“天再旦”的对应，断代工程以此作为西周年表的重要支点，但由于种种条件限制，当时对“天再旦”现象的计算仍然有不少局限。进入21世纪后，随着电子计算机的大发展，出现了大量天文软件，故而我们可以通过天文软件便利地得到各种古天象信息，甚至能比较全面地复原古天象的各种参数，这为详细探究“天再旦”现象提供了极大便利。

2 过往有关“天再旦”的探索

战国时的古书《竹书纪年》当中记载了一次罕见天象“天再旦”：

“懿王元年天再旦(《开元占经》作启)于郑。”

《竹书纪年》原书已经遗失，但《开元占经》和《太平御览·天部》都转载了这一记载，其可靠性当无怀疑。这一天象长期不被人注意，古人也未将其同日食联系起来。近代以来疑古思潮兴起，西周共和(前841年)以前的历史广受怀疑，学者试图通过古天象记载确定共和之前的年表。这种情况下刘朝阳在1944年首次提出“天再旦”为“天亮了两次”之意^[1]，即一次发生在日出之际的日食。此后董作宾^[2]、方善柱^[3]、Pang等^[4]都从不同方面赞同这一观点，提出的“天再旦”发生年份则有前966、前925、前903、前899等多种观点。夏商周断代工程也把“天再旦”作为定年的突破口之一，并对1997

2023-07-06收到原稿, 2023-07-31收到修改稿

[†]2652834282@qq.com

年3月9日的日全食进行了详细观测,派人去全食带西端的阿勒泰(Altay)、富蕴(Fuyun)、哈巴河(Habahe)、塔城(Tacheng)等处进行观测. 观测的结果证实了“天再旦”现象的可靠性^{[5]70-73}. 断代工程在进一步分析后,选取前899年4月21日发生的日环食作为“天再旦”所对应的日食,据此确定周懿王元年为公元前899年,这一结论被写入《夏商周年表》当中^[6].

在这之后,“天再旦”仍然备受质疑,质疑者从环食不可能造成明显天光变暗^[7]、地球自转改正不支持日食发生在“郑”地^[8]等因素批评断代工程的研究结果. 更有人从古籍语义分析,指出“天再旦”跟日食完全无关^[9]. 在这种情况下,利用现代天文软件等更为有力的计算工具,对“天再旦”进行进一步的探讨仍然有其价值.

3 日出与日食带来的天光变化

“天再旦”日食说主张“天再旦”是发生在日出之际的大食分日食,认为日食会使得正在变亮的天空再度变暗,视觉上给人以“两次天亮”之感. 为此我们需要对日出与日食二者对天空亮度的影响分别进行具体讨论.

太阳光照到地球上需要穿过大气层,在这一过程中太阳光会被散射,这使得我们可以看到明亮的天空. 也是由于大气的散射作用,在太阳位置低于地平线后,太阳光仍会被高空大气散射,因而天空并不会马上黑掉,而会继续维持一定时间的明亮,即曙暮光. 一般规定太阳中心高度低于 -6° 为民用曙暮光(最亮的星可以看见,且户外尚不需要人工照明),太阳中心高度在 -6° 至 -12° 为航海曙暮光(在海上尚能看见海平线,同时大部分星星已经可见),太阳中心高度在 -12° 至 -18° 为天文曙暮光(最暗的天体也逐渐得见,曙暮光仅限于日出或日落方向地平线边缘).

曙暮光持续的时间会随着纬度有很大变化,在高纬度地区,夏季曙暮光(特指民用曙暮光,下同)持续时间可达90 min,而在赤道地区曙暮光持续时

间则会短至20 min. 在大约北纬 35° 的中原地区,曙暮光持续时间则在30 min左右.

日出对天空亮度的影响可以通过仪器实测得到,也可以通过理论模型计算得出. 目前影响最大的天空亮度模型是国际照明委员会(CIE)的标准天空模型,其共有15种天空类型.

CIE模型当中计算天空亮度的公式为^[10]:

$$L_s = \frac{[1 + c(e^{d\chi} + e^{\frac{\pi}{2}d}) + e \cos^2 \chi](1 + ae^{\frac{b}{\cos^2 Z}})}{[1 + c(e^{dZ_s} - e^{\frac{\pi}{2}d}) + e \cos^2 Z_s](1 + ae^b)} L_z, \quad (1)$$

这当中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 都是天空亮度参数,对于不同天空类型都可以查到, L_s 为计算点亮度, L_z 为天顶亮度, Z 为测点天顶角, Z_s 为太阳天顶角, χ 为计算点到太阳的角距离. 根据观测,白昼晴天天空亮度一般在 $0.5\sim 2.5 \text{ cd/m}^2$ 之间,在较为简化的情况下我们可以选取天顶亮度作为天空亮度的代表,天顶亮度的经验公式为^[11]:

$$L_z = \exp(a_0 + a_1\gamma_s^2 + a_2\gamma_s^2 + a_3\gamma_s^3 + a_4\gamma_s^4 + a_5\gamma_s^5), \quad (2)$$

这其中 γ_s 是太阳地平高度角,单位为度, L_z 的单位则为 cd/m^2 , $a_0\sim a_5$ 为系数,其取值根据晴空指数的不同也有不同,表1是上述系数的详细取值,其中的 K_v 代表晴空指数.

一般认为,当太阳地平高度达到 -20° 左右时,天就完全黑了. 根据实测,夜间天光亮度约为 0.1 cd/m^2 级别,据此只有第3组的数据相对最符合实情,因而我们选用第3组数据计算天空的变化情况. 日出时天空并不是均匀变亮的,在日出方向会最先变亮,更远地方仍较昏暗. 图1是天顶亮度随太阳高度角的变化曲线(左图)及太阳高度角 0° (视位置,即考虑折射后情形)时不同方位天空亮度沿方位角的分布曲线(右图),后者包括天顶角 30° 、 60° 和 90° (即地平线)3种情形,参数取CIE均匀天空($a = 0$ 、 $b = -1$ 、 $c = 2$ 、 $d = -1$ 、 $e = 0$).

表 1 天顶亮度公式当中的系数
Table 1 Coefficients in the formula of the zenith luminance

K_{ν}	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
0.1 ± 0.05	-0.61028	0.07637	-0.00230	4.1759×10^{-5}	3.5364×10^{-7}	9.9856×10^{-10}
0.2 ± 0.05	-0.74443	0.13868	-0.00622	1.6009×10^{-4}	2.0732×10^{-6}	1.0384×10^{-8}
0.3 ± 0.05	-0.80534	0.15724	-0.00748	2.0423×10^{-4}	2.7761×10^{-6}	1.4533×10^{-8}
0.4 ± 0.05	-0.70779	0.11398	-0.00327	4.4639×10^{-5}	-2.0180×10^{-7}	-2.325×10^{-10}
0.5 ± 0.05	-0.54822	0.07021	-0.00087	-8.785×10^{-6}	2.9294×10^{-7}	-1.5406×10^{-9}
0.6 ± 0.05	-0.51149	0.06782	-0.00243	7.2244×10^{-5}	-1.0678×10^{-6}	5.8770×10^{-9}
0.7 ± 0.05	-0.58312	0.09006	-0.00447	1.2809×10^{-4}	-1.7135×10^{-6}	8.6374×10^{-9}
0.8 ± 0.05	-0.60908	0.09863	-0.00523	1.5046×10^{-4}	1.9881×10^{-6}	9.6937×10^{-9}

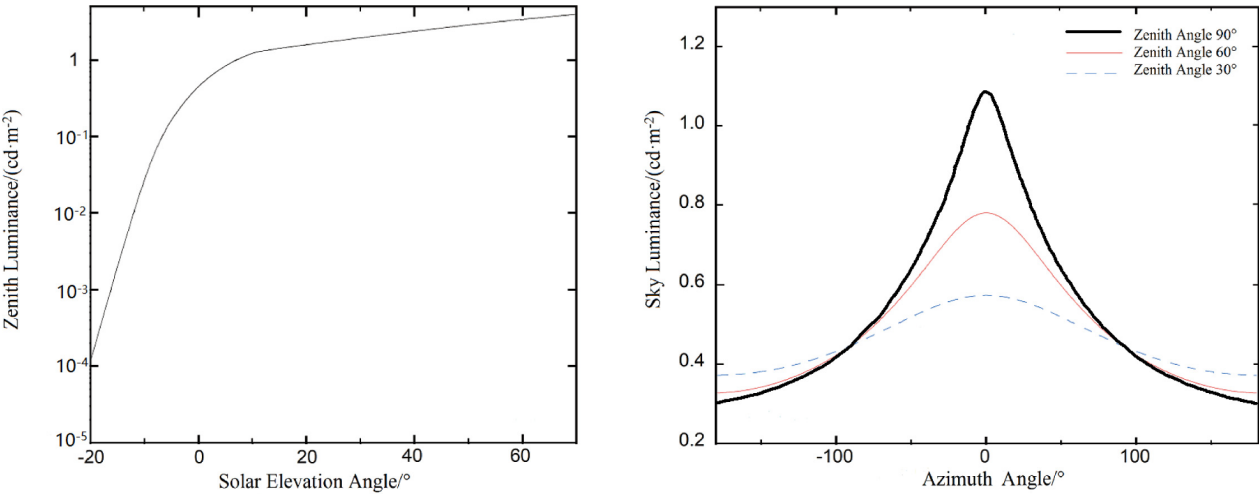


图 1 CIE均匀天空计算得出的天顶亮度随太阳高度角的变化情况(左图)与日出时天空亮度分布曲线(右图)

Fig. 1 The change of zenith luminance with solar elevation angle (left panel) and the curve of sky light at sunrise (right panel) by CIE well-distributed sky

图1虽然是过于理想化的模型的结果,但仍能看出一些定性的规律来,在太阳高度角大于10°时,天空亮度的增长就很慢了.在日出方向地平线附近,天空亮度明显亮于其他地方,而与日出方向相反的地方则较暗.随着天空升高,亮度差距也在变小,到天顶角30°时亮度变化已经不大了.

虽然天空亮度的经验公式当中并未出现和太阳光度有关的项,但天空发亮是太阳照射的直接结果.太阳本身的视星等是恒定的,但在日出前后或者云雾天气时,太阳光透过大气层会有更多的损

耗,导致可见星等低于实际星等,而天空也因此变得更加昏暗.图2是日出和日食时的太阳星等变化,从图2上可以看见,太阳透过大气层星等的变化情形,与天空亮度的变化规律有相似之处.考虑到具体的天空亮度受阴云、雾霭、沙尘等因素影响很大,我们在接下来以太阳视星等作为天空明亮程度的一个表征.

在日食发生时,由于日面被月面遮挡,到达地球的太阳光会减少,使得天空变得昏暗.但天空的昏暗程度并非随着食分线性增加.根据图2,当食分

在0.8以下时,太阳光度变化很有限,而后太阳光度随着食分增大迅速降低,当接近全食时更是会急剧降低.而天空明亮程度的变化也与太阳星等的变化一致,但日全食与真正的黑夜还是有明显差距的.

在不太昏暗的情况下,人眼感知的视亮度近似与光强的对数成正比,不过在比较昏暗的情形下这一规律并不适用,无月星空的亮度约为 0.00021 cd/m^2 ,而在有人工照明时这一亮度可以达到 0.1 d/m^2 ^[11],相差两个数量级以上,但观测者看来天空都是黑的,差距并不明显.刘次沅^{[5]47-51}在其论著中自行定义了一个“视亮度”概念以解决这一困惑.而我们通过天文软件Stellarium模拟,发现可以把亮星的可见与否作为人眼对天空亮暗感

知的定量判据.表2是北半球中纬度可见的0等以上主要亮星.

在特别理想的情况下,金星可以在没有日食的白昼被看见.当太阳星等下降到-25等以下(约相当于0.8食分)时,金星几乎总能被看见.木星可见要太阳星等降到-23.5左右(约相当于0.95食分),天狼星和水星则需要-22.5等(约相当于0.975食分),要想让土星、织女星、大角星、五车二这些一般的0等星可见,太阳星等需在-20以下,这时日食食分会在0.995以上,已经很接近全食了.我们把天空昏暗程度分为五等,见于表3,并以太阳星等下降到-22.5等(此时最亮的恒星天狼星可见)或更暗作为天空黑暗与否的分界.

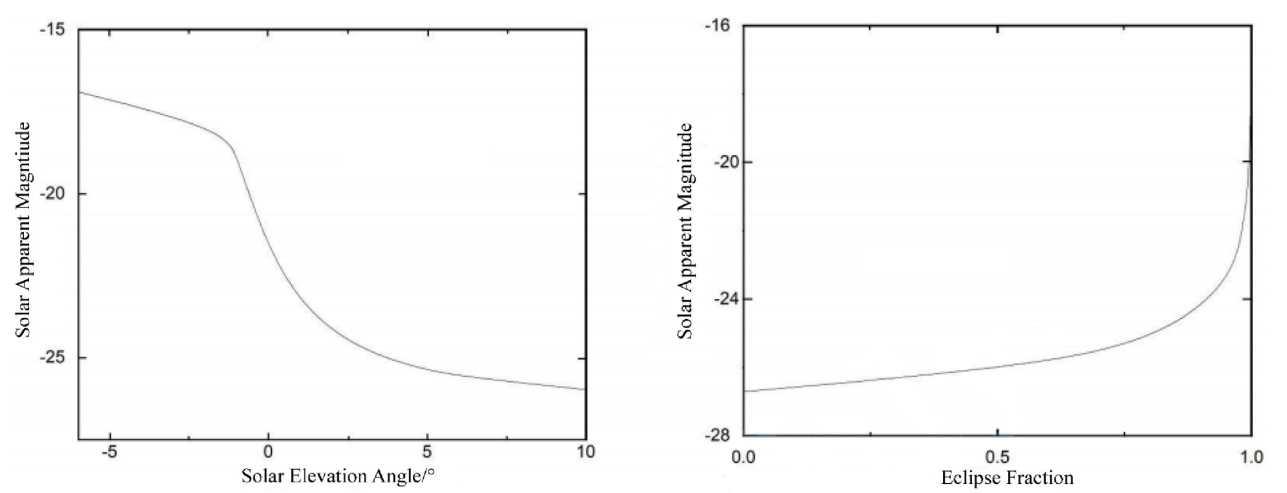


图 2 日出时太阳星等的变化(左图)与日食食分与太阳星等的关系(右图)

Fig. 2 The solar apparent magnitude change during sunrise (left panel), and the relation between eclipse fraction and solar apparent magnitude (right panel)

表 2 北半球中纬度可见的0等以上亮星
Table 2 Visible light stars with more than 0 magnitude in the northern middle latitude

Star Name	Magnitude	Star Name	Magnitude	Star Name	Magnitude
Venus	-2.98 ~ -4.92	Sirius	-1.46	Arcturus	-0.04
Jupiter	-1.66 ~ -2.94	Mercury	5.7 ~ -2.6	Vega	0.03
Mars	1.86 ~ -2.94	Saturn	1.0 ~ -0.2	Capella	0.08

表 3 根据亮星可见情形为天空昏暗分等
Table 3 The level of sky dimness by visible
bright stars

Sky Dimness Level	Visibility of Stars
Level 1	Venus is visible
Level 2	Jupiter is visible
Level 3	Sirius is visible.
Level 4	Vega is visible
Level 5	A total eclipse begins

依刘次沅^{[5]51}定义的“视亮度”, 0.95食分的日环食“视亮度”减弱天光的效果为日全食的40%, 这与我们的天空昏暗等级得出的结果是较为类似的. 事实上, 阴云、雾霭等因素对太阳或其他亮星的消光程度是差不多的, 无法改变太阳和其他星象视星等的差距. 在天气晴朗的理想情况下, 可认为日食时亮星是否可见, 只与太阳的食分以及太阳和亮星各自的地平高度角两个因素有关.

如果日食发生在日出之际, 那么实际见到的天光变化就是两者影响的叠加, 日食食分在0.95以下时, 太阳星等的下降少于3等, 可以认为无法发生“天再旦”现象, 食分若在0.8以下更是对太阳光度影响甚微. 而对于食分在0.95以上的情况, 则需要进行更为详尽的讨论.

首先, 我们需要把曙暮光持续时间和日食持续时间进行对比, 假如日食持续时间过长而曙暮光持续时间相对较短, 那么就可能只观测到天空持续昏暗, 直到日食逐渐结束而无法观测到“天再旦”. 事实上, 全食从食分0.8到食既用时大约在10–14 min, 而最大食分0.97的环食从食分0.8到环食始则大约要17 min. 而在北纬35°左右的中原地区, 曙暮光会持续30 min左右, 故对于发生在日出前后的日食, 出现先变亮再变暗的过程, 即“天再旦”, 是完全可能的.

其次, 日食发生时刻不能过早, 如果食甚出现在太阳地平高度低于 -3° (详见第5节)的时候, 最多只能起到推迟天空变亮的作用, 同样无法出现“天再旦”.

对于食分在0.98以上的情况, 太阳星等下降极为剧烈, 对食甚时太阳的地平高度要求也较为宽松.

在太阳地平高度为 6° 左右时(高大山脉的天际线完全可以达到此值), 大气消光作用已经可以使太阳星等下降1等以上, 叠加上日食, 星等下降可在5等以上, 足以产生明显的“天再旦”现象. 对于这样的全食或近全食, 可以认为食甚发生在太阳地平高度 -3° 到 6° 之间, 都有可能发生“天再旦”.

若食分在0.95到0.98之间, 对食甚发生时刻的要求将更为苛刻, 这种程度的日食自身对太阳亮度的影响有限, 需叠加上大气散射的损耗才能造成一定的昏暗天象. 当太阳地平高度为 2° 时, 大气消光作用可减少约2.6星等, 叠加上日食后的星等下降为5到6等, 勉强算是黑暗了. 对于这种大食分日食, 实现“天再旦”的太阳地平高度一般限制在 -1° 到 2° 左右, 具体能否实现还需要进一步详细分析.

由于潮汐原因, 地球自转会逐渐减速, 使得每一日时间变长, 在累计上千年后这一变化的效果会相当可观. 以西周时期而言, 在前900年左右地球自转变慢带来的影响可达6 h (22000 s)之多, 这会使日食带东西移动 90° , 看到日食的地点完全改变, 因而对于古天文计算必须加入地球自转改正. 对于“天再旦”这样的天象, 地球自转改正的影响更为显著.

古天文计算传统上将与距今年份的函数关系作为一个抛物线, 表现形式如下

$$\Delta T = \frac{1}{2}cT^2, \quad (3)$$

这其中 T 是自1800年起算的世纪数, 系数 c 单位为秒/世纪², 一般取 $c = 30$ 左右.

4 对1997年日食的检测

夏商周断代工程选取1997年3月9日的日全食验证“天再旦”现象的可信度, 该次日食的西端位于我国新疆北部同俄罗斯、哈萨克斯坦等国交界处, 断代工程在新疆多地组织了观测, 并在阿勒泰、哈巴河、富蕴、塔城等处观测到了不同程度的“天再旦”现象.

表4为这些城市在1997年日全食时的最大食分、食甚时刻及当地经纬度及日出时间(北京时间).

表 4 1997 年日全食在新疆的参数
Table 4 Parameters of the 1997 total solar eclipse in Xinjiang

City	Latitude and Longitude	Sunrise Time	Maximum Eclipse Magnitude	Mid-eclipse Time
Altay (阿勒泰)	88°8'E, 47°51'N	8:33	0.998	8:41
Habahe (哈巴河)	86°25'E, 48°4'N	8:40	0.999	8:41
Fuyun (富蕴)	89°32'E, 47°0'N	8:28	0.988	8:40
Tacheng (塔城)	83°0'E, 46°45'N	8:53	0.974	8:39

在这些实地观测当中, 塔城的观测结果最为知名, 虽然理论计算得出塔城的天光变化并不明显, 但由于彗星的失而复见, 在塔城所见的天空由亮转暗过程给了观测者极为深刻的印象, 成为证实“天再旦”描述的重要佐证. 文献[5]第63页这样描述塔城的“天再旦”现象:

天气特别晴(前几天下大雪, 后半夜天才晴), 彗星明亮, 8:00 东方微露白, 8:10 东方有云, 露红色, 渐向上染, 渐可辨人, 星渐隐, 8:20 彗星隐. 8:30 地平线下光线射出, 感到朝霞有些异样, 远没有那种应有的热情和炽亮. 8:35 明显感到天变暗了, 黎明朝霞竟转换成夕阳晚照一般, 太阳光芒在收敛, 亮橘色变为暗红色, 铁灰色, 天顶淡淡的红意在消退, 稍显白色的西边天区也暗了下来. 8:38 已隐没的

海尔-波普彗星突现于东北天际, 以匕首般的光刺挑破天穹, 经2分钟多. 8:45起, 天色云霞又渐渐由红转黄, 由暗变亮, 所有星星彻底隐没.

在阿勒泰和富蕴, 由于食分更大, 食甚时刻与日出时间更接近, 再加上东方向上有山, 太阳在升到地平线以上时仍被遮挡, 因而观测得到了更为显著的“天再旦”现象. 文献[5]第61–63页记载了观测者在阿勒泰和富蕴的观测记录.

下面我们使用天文软件Stellarium, 对这次日食的过程进行模拟, 并与亲历者描述相比对, 结果见表5. 在塔城, 模拟得出的“天再旦”现象极为微弱, 在8:30后的数分钟内天空亮度几乎无变化, 海尔-波普彗星在8:36至8:37时有微弱的变亮趋势, 与观测者所见情况大体一致.

表 5 Stellarium 模拟得出的1997 年日食天象
Table 5 The astronomical phenomena of the 1997 solar eclipse moderated by Stellarium

Time (Altay)	Astronomical Phenomenon	Time (Fuyun)	Astronomical Phenomenon	Time (Tacheng)	Astronomical Phenomenon
7:30	Nautical twilight began	8:00	Civil Twilight began	8:00	The sun's elevation angle was about -10°
8:30	The sky was a little light	8:40	Jupiter was dimly visible	8:10	The comet subsided
8:39	The sky turned very dark	8:50	The sun rose	8:30	Twilight was obvious
8:40	Polaris was dimly visible	8:55	The eclipse magnitude was about 0.75	8:35	The sky almost stopped to turn lighter
8:42	The sky turned a little lighter			8:36	The comet turned lighter weakly
8:47	The sky became much lighter			8:37	The comet stopped to turn lighter
				8:45	Stars disappeared

在富蕴和阿勒泰, 模拟结果和实测结果也较为接近, 两地的“天再旦”现象都相当明显. 塔城的食分略小, 且食甚发生时太阳远在地平线之下, 模拟结果表明该地天象处在“天再旦”发生的临界点, 可以作为“天再旦”能否发生的一个判据.

5 前899年日食的检验

能够用于推定年份的天象都是周期天象, 时隔一定时间会再度发生, 因而天象发生的周期就很重要了. 如果某一天象时隔10 yr左右就会重新发生一次, 那么对于推定历史年代几乎毫无价值. 如果某一天象需时隔 10^3 yr或更久才能重新发生一次, 又可能根本无法找到合适年份. 一般而言, 发生周期在60至300 yr左右的天象, 在推定年份时的价值较高, 因而我们需要检测“天再旦”现象大约时隔多长时间能发生一次.

我们先不讨论日食的进一步细节, 只讨论中心食(全食或环食)带西端位于中国境内的发生概率, 这可以作为一个粗略估计. 由于中国国土面积东西跨度很大, 大约每30 yr就有一次日食的中心食带西端位于中国境内, 但其中很多都在新疆、西藏、东北、华南等较偏远的地方, 在中原是无法见到“天再旦”的. 如果范围缩小到中原文明区, 那么平均200 yr左右才会发生一次, 对判断年代的意义就很大了.

表6列出从公元前2000年至公元2000年期间在中原文明区有可能观测到的“天再旦”. 从中我们可以看出, 可能造成“天再旦”的日食每200 yr左右才能发生一次, 在前899年的日食前后, 上一次可能的“天再旦”发生在前1093年, 下一次发生在前727年, 都远远超过了周懿王的可能在位时期, 这表明“天再旦”天象在确定年代上的价值还是比较大的.

当然, 与“天再旦”同样重要的是确定“郑”的地望. 从古籍记载来看, “郑”在西周中期是有相当影响的地名, 并被认为是与周王有密切关系. 今本《竹书纪年》有载: “穆王元年筑祗宫于西郑. 穆王以下都于西郑.” 一些西周中期的金文当中也有周王居于“郑”的记载, 如1976年出土的三年(犷兴)壶: “王在奠(郑), 飨醴, 呼虢叔召(犷兴).” 传统上, 西周

时的“郑”地被认为位于今陕西华县, 其依据是《史记·郑世家》索隐: “郑, 县名, 属京兆, 秦武公十一年‘初县杜, 郑’是也.” 根据《史记》记载, 郑是周宣王幼弟王子友(后称郑桓公)的封地, 郑国因此得名. 此外一些史料还将“郑”和“棫林”以及“拾”等地名联系在一起, 这些地名因此也被认为可能在今华县一带, 出处同见于《索隐》: “《世本》云: 桓公居棫林, 徙拾.”

表6 中原文明区可见之“天再旦”
Table 6 Visible “Double Dawns” in the central plains

Date of Solar Eclipse	Date of Solar Eclipse
BC1848-10-07	194-08-04
BC1299-04-04	368-04-04
BC1093-03-07	637-04-01
BC899-04-21	823-10-08
BC727-07-07	975-08-10
BC653-02-02	1303-06-15
BC615-06-29	1397-05-27
BC600-09-10	1731-12-29
BC546-10-13	1763-10-07
BC314-10-28	1824-06-27

从陈梦家起, “郑”的地望有了新的看法, 陈认为西周时的“郑”为奠井之意, 位于凤翔一带^[12], 此后唐兰^[13]、尹盛平^[14]、卢连成^[15]等人也认为“西郑”位于凤翔一带, 而杜勇则认为《左传》中记载的“棫林”位于陕西扶风一带而非凤翔^[16]. 此外亦有李学勤等仍坚持“郑”地当在华县的观点^[17], 刘次沅亦偏好这一论述^{[5]40-41}.

事实上, 西周中期时“郑”的所在地应当结合历史记载、出土金文和考古资料三者来综合判断. 庞小霞指出“郑”本为“奠”之意, 有可能不止一处^[18], 而西周中期的“郑”同郑桓公所封之“郑”也未必同为一地.

笔者认为, “棫林”与“拾”和“郑”的联系可谓孤证, 将其过度比附, 以至于联系到周懿王时期的“郑”是危险的. 相反, 金文和不多的史书记载都指

明“郑”是周王活动之地,凤翔至扶风一带有多处重要的西周遗址,出土过大量高等级遗物,而华县地区则并没有类似的高等级遗物被发现,故而“天再旦于郑”的“郑”当不大可能位于华县。

在诸多观点当中,尚志儒的观点尤其应当注意,他使用了较多的考古资料,认为凤翔的西劝读遗址很可能是穆王在“郑”所筑祗宫,这里有宫殿规模的巨型夯土、柱础等,应当存在西周时期的高等级建筑群落^[19]。

这还有金文当中的旁证,(广兴)组铭文当中当周王居于“郑”的时候多次与虢叔共事,虢叔之虢当为西虢,即今宝鸡,学界并无异议。可见“郑”地离虢地很近,在凤翔一带的可能性较大。本文结合考古发现,亦同意“郑”地处于今陕西凤翔西劝读遗址的观点。

在初步确定“郑”的地望为陕西凤翔西劝读遗址之后,我们便可以讨论这里的日出时间、日出方位、地形特征等因素,以判断前899年日食能否在郑地造就“天再旦”这一天文奇观。

我们假定的郑地,即西劝读遗址的经纬度为东经 $107^{\circ}31'42''$,北纬 $34^{\circ}31'6''$,在正北为 0° ,正东为 90° 的情况下,可得发生日食的4月21日,郑地太阳日出方位约为 $79^{\circ}25'$,太阳升至地平高度 5° 时的方位约为 $83^{\circ}15'$,都属于东偏北方向。

前899年郑地日出时间和曙暮光开始时间的变化情况也可从stellarium得到,4月21日的日出时间为5时32分(地方时)或6时23分(北京时间),曙暮光持续时间为26 min。

郑地位于岐山之下的黄土塬上,从西北经正北至东北方向皆是岐山,正东方向急剧下降,在东偏南方向又略有升高。这里的地形详细数据可通过地理信息系统(Geographic Information System, GIS)获取,并做出如图3所示的天际线。

日食发生当日的日出方位为东偏北方向,该方向天际线虽然已有所降低,仍在 4° 以上,可以想见日出后必然有很长一段时间无法看到太阳,一如富蕴、阿勒泰等地,若山顶有云,可能太阳地平达到 5° 左右时仍无法被看见。

前899年4月21日日食为一次日环食,最大食分为0.976,而凤翔可见食分约为0.962,对视星等的削

减仅为2.63等,接近“天再旦”的临界情形。

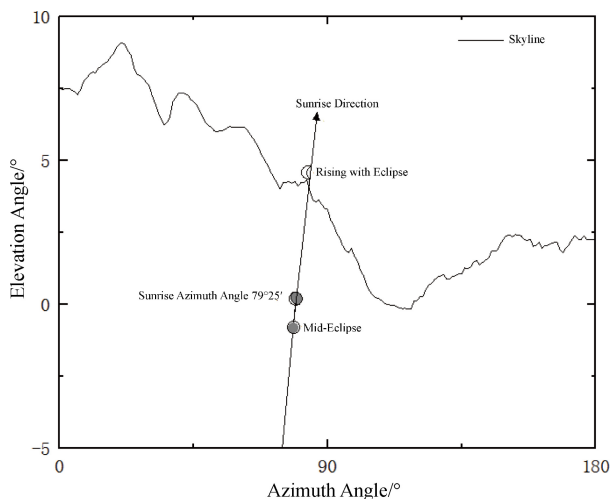


图3 郑地(陕西凤翔西劝读遗址)东方向的天际线,画有太阳带食而出过程

Fig. 3 The eastern skyline in “Zheng” (the west Quandu ruin in Shaanxi), on which the process of a sunrise with eclipse is depicted

这次日食持续时间约为2 h 10 min,从食分0.8左右到食甚,用时大约12 min。而曙暮光持续时间约为26 min,太阳从地平线上升到从山中出现约需24 min,都比大食分日食持续时间长。我们做出食甚发生在不同高度时,太阳视星等的变化曲线,如图4所示。

从图4可以看出,前899年日环食共有两次导致“天再旦”的机会,当食甚发生在太阳地平高度 -1° 左右时,会在日出前10 min左右有一次短暂的由亮转暗,而后太阳视星等陡然上升。这段时间正好是织女、大角等0等星逐渐消隐的时候,如果古人像1997年在塔城那样,发现某颗逐渐隐去的亮星重新被看见,对天色转暗的印象就会进一步加强,由于日出方向高山的阻挡,太阳乃至曙光都难以得见,古人无法将其和日食联系起来。在环食逐渐结束后,太阳星等会陡然上升,天空再度变亮,便给人以“天再旦”之感,当太阳地平高度达到 5° 以上时,食分已减少到0.5左右,日光已相当炽烈,不被时人注意为日食也是很可能的。

当食甚发生在太阳地平高度 2° 到 4° 时,也会发生一次由亮转暗,这时太阳仍处于天际线以下,最

亮的星如木星在此过程中有可能重新得见, 但绝对昏暗程度远不如前者. 据国家天文科学数据中心(National Astronomical Data Center, NADC)的日食软件计算, 该次日食的 $\Delta T = 22125$ s, 这时凤翔的食甚远在日出之前, 只能出现一定的天亮减缓, 而完全无法出现“天再旦”现象. 只有当 $\Delta T < 20500$ s时方能该次日食满足“天再旦”的基本条件.

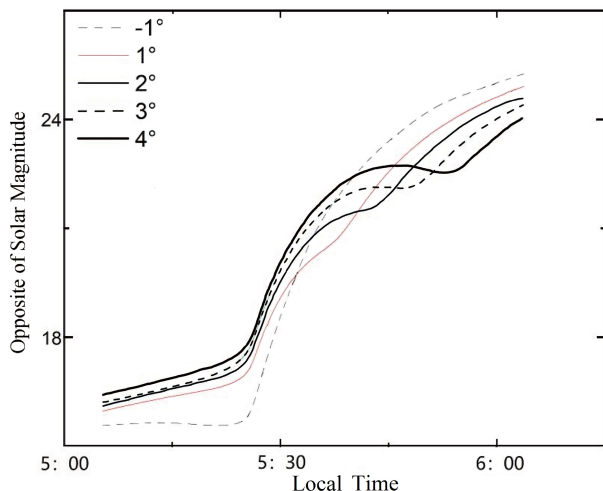


图4 在不同太阳高度角时发生食甚的太阳视星等变化趋势

Fig. 4 The change of solar apparent magnitude when the maximum phase happened with various zenith angle

当然, 根据已知的日食等天象, 地球自转改正的弥散程度是很大的, 如韩延本等人的研究就发现了这一点^[20]. 则前899年日食的实际明显小于NADC的理论值, 而只有20500 s左右, 也是不可能的, 图5为韩延本等^[20]得出的地球自转改正值, 格式据本刊规范有所调整.

另一方面, 在离西周不远的春秋有较多日食记录, 其中日全食可以大体推定地球自转改正, 最早的一次发生在前709年, NADC得出的 ΔT 为19434.76 s, 这时全食带经过洛阳. 这个数字尚小于20500 s, 故而还不会出现明显矛盾. 但如果郑地食甚发生在太阳地平高度 2° 到 4° 之间, 所需的 ΔT 将小于20000 s, 就有可能引发矛盾了.

总之, 在可以接受的范围内, 我们认为前899年4月21日日食对应着周懿王元年的“天再旦”异象,

而食甚时太阳地平高度约为 -1° .

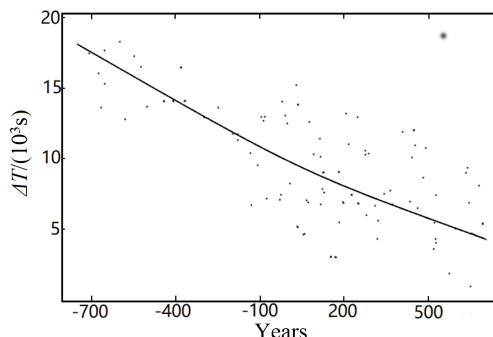


图5 根据中国古代日食得出的地球自转改正值^[20]

Fig. 5 The earth rotation correction derived by ancient Chinese documents on solar eclipses^[20]

由表6可见, 在前727年到前546年之间的不到200年间居然有连续5次日食有可能造成“天再旦”, 这一异象很可能给东周史官造成了很深刻印象, 而在《竹书纪年》成书之前不久的前314年也有一次发生在日出之际的大食分日食, 其中心食带西端位于山西南部一带, 正好是魏国的主要活动区域. 这也可能是《竹书纪年》作者特意提及“天再旦”的原因之一.

曾经有学者选定前925年3月9日和前871年10月6日两次日食作为“天再旦”的候选日食^{[5]70-73}, 我们对其也进行简要分析:

依NADC计算, 前925年日食的西端点位于帕米尔以西, 需对 ΔT 进行极大调整才能使这次日食的西端点进入陕西, 远超过可接受的范围.

前871年日食的西端点位于青海一带, ΔT 从NADC默认的21690.72 s调整到约24500 s时西端点可以来到郑地附近, 相当于(3)式中取 $c = 34$ 左右. 但这次日食也是日环食, 且其最大食分仅为0.957, 对“天再旦”现象的容错率更小, 且前871年距共和元年只有30年, 30年内经历分属四代的懿、孝、夷、厉(孝王为懿王叔父, 实际上有意义的只有三代)四王也有严重困难.

6 结论

“天再旦”即两次天亮完全可以用日出之际的日食来解释, 对于0.98食分以上的极大食分日食,

食甚时地平高度在 -3° 至 6° 都可以导致“天再旦”，断代工程对于0.95至0.98食分的日食，“天再旦”的发生条件要苛刻许多。而0.95食分以下完全无法出现“天再旦”。对1997年日食的模拟证实了当年实地观测的可靠性，其中塔城的数据可作为触发“天再旦”现象的下限，对前899年日食的模拟则发现其存在两次可能的“天再旦”时间，分别发生在太阳地平高度 -1° 和 2° – 4° 时，在考虑地球自转改正的限制后，前者比后者更有可能发生。虽然前899年日食作为周懿王元年“天再旦于郑”的候选日食，在地球自转改正、食分等方面仍不很理想，但在无其他更合理选择的情况下，它仍是目前已知的最优解。

致谢 感谢审稿人对本文提出的建议，感谢北京师范大学武家璧教授对本文的建议。感谢战略支援部队武旻同志提供西劝读遗址地理数据。

参 考 文 献

- [1] 刘朝阳. 中国文化研究汇刊, 1944, 2: 39
- [2] 董作宾. 西周年历谱. 台湾中央研究院历史语言研究所集刊, 1952
- [3] 方善柱. 武王克商之年研究//彭林. 西周年代学上的几个问题. 北京: 北京师范大学出版社, 1997: 554
- [4] Pang K D, Yau K, Chou H, et al. *Vistas in Astronomy*, 1988, 31: 833
- [5] 刘次沅. 从天再旦到武王伐纣. 北京: 世界图书出版公司, 2006
- [6] 夏商周断代工程专家组. 夏商周断代工程1996–2000年阶段成果报告. 北京: 世界图书出版公司, 2000: 24–25
- [7] Stephenson R F. *ApJ*, 1992, 33: 91
- [8] Keenan D J. *East Asian History*, 2002, 23: 61
- [9] 王学军. 自然辩证法研究, 2015, 6: 78
- [10] 吴玉香, 刘春燕, 文尚胜. 光学学报, 2014, 11: 1101004-1
- [11] 刘鸣, 马剑, 张宝刚. 照明工程学报, 2009, 20: 29
- [12] 陈梦家. 考古学报, 1956, 4: 85
- [13] 唐兰. 文物, 1976, 6: 39
- [14] 尹盛平. 试论文中的周//《考古与文物》编辑部. 考古与文物丛刊第三号. 西安: 考古与文物编辑部, 1983, 3: 33
- [15] 卢连成. 周都城郑考//《考古与文物》编辑部. 考古与文物丛刊第二号. 西安: 考古与文物编辑部, 1983, 2: 8
- [16] 杜勇, 王玉亮. 廊坊师范学院学报(社会科学版), 2017, 4: 75
- [17] 李学勤. 夏商周年代学札记. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1999: 40
- [18] 庞小霞. 考古与文物, 2014, 3: 66
- [19] 尚志儒. 郑棫林之故地及其源流探讨//四川大学历史系古文字研究室. 古文字研究第十三辑. 北京: 中华书局, 1986, 13: 438
- [20] 韩延本, 李致森, 林柏森, 等. 天体物理学报, 1984, 2: 107

Restudy of the “Double Dawn” Phenomenon Caused by Solar Eclipse

WANG Sheng-hao

(School of History, Beijing Normal University, Beijing 100091)

ABSTRACT According to an ancient document *Bamboo Annals*, the day dawned twice (“double dawn”) in Zheng (郑) during the first year of King Yi of Zhou (周懿王), and it has been regarded as a solar eclipse happening around sunrise by modern scholars. The annular eclipse on April 21th, 899BC is chosen as the candidate of “double dawn” eclipse by the Xia-Shang-Zhou Chronology Project. Besides, the more general researches confirm that only eclipses with magnitude more than 0.95 can cause the phenomenon “double dawn”, and the altitudes of sun during eclipse are constrained as well. After defining “Zheng” in Fengxiang county, Shaanxi, we use astronomical software to imitate the solar brightness change during the 899BC eclipse and the 1997 eclipse, which was observed by the Chronology project. As a result, we confirm that the “double dawn” is a general phenomenon, derive the specific process and some particulars of the “double dawn” eclipses.

Key words eclipse, celestial mechanics, history of astronomy, methods: observational