

Centaurs 颜色及其与轨道参数的统计分析

李雪婧^{1,2†}

(1 中国科学院国家天文台 / 云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 为了探究太阳系小天体 Centaurs 色指数和轨道参数的统计特征及其物理学意义, 根据现今已知的 39 个 Centaurs 的色指数和轨道参数值, 利用统计学方法, 分析了 Centaurs 各色指数之间、色指数与轨道参数之间的统计特征. 结果显示 $B-V$ 与 $V-R$ 、 $V-R$ 与 $R-I$ 、 $B-V$ 与 $R-I$ 、 $B-R$ 与 $R-I$ 之间均呈现强相关性; Centaurs 表现出明显的红蓝双色性, 分界点在 $B-R=1.4$ 左右; Centaurs 各色指数值均呈现正态分布特征; 除 $B-V$ 与轨道倾角 i 、 $V-R$ 与轨道半长轴 a 存在弱关联性外, 其它 Centaurs 色指数与轨道参数之间均未表现出相关性.

关键词 小天体; Centaurs, 天体力学, 方法: 统计

中图分类号: P134; **文献标识码:** A

1 引言

Centaurs 是在木星轨道和海王星轨道之间绕太阳运动的太阳系小天体. 直到 1977 年, 2060 Chiron 的发现才使人们认识到它们是一类独特的群体^[1]. 在已发现的 Centaurs 小天体中观测到类似彗发活动的现象^[2], 反映了这类带冰的小天体上会更多地保留行星形成时期的信息. 目前普遍认为 Centaurs 可能由 KBOs (Kuiper Belt Objects) 经摄动后而来; Centaurs 经摄动影响后, 可能成为短周期彗星或小行星. 要确认这类问题的关键是认识这类小天体的物质组成及物理特性. 更进一步地, 这也将是我们认识理解太阳系形成以及行星形成和演化的重要线索.

多色测光提供了光谱的一阶近似, 因此对 Centaurs 进行多色测光可以反映出它们的表面物质组成. 目前对 Centaurs 多色测光的研究表明, 它们的表面颜色呈现出多样性, 颜色分布范围从蓝或蓝灰到非常红, 从而表明了其表面物质组成的多样性. 颜色的多样性也在某种程度上反映了表面物质形成的物理过程, 即反映原初物质组成的变化. 尽管对于这种颜色多样性的起源至今没有一个模型能够给予很好的解释, 然而一些动力学模型暗示了轨道特性与表面颜色之间存在某种关联性, 这种关联性可以为 Centaurs 的起源和演化理论提供重要的线索和依据.

2010-02-01 收到原稿, 2010-03-25 收到修改稿

† lxj29ster@gmail.com

在此之前,已经有学者对 Centaurs 颜色之间的关联性以及颜色与轨道参数的关联性进行过研究. Tegler 等^[3]对 22 个 Centaurs 样本的统计计算表明了 Centaurs 颜色的双色性,而且这种双色性并不是由于样本数目局限性导致的数据不全而呈现出间断. Bauer 等^[4]在对 24 个 Centaurs 样本的相关性研究中发现 $V-R$ 和 $R-I$ 与 a 存在很显著的相关性. Peixinho 等^[5]通过对 15 个 Centaurs 颜色之间关联性的研究,发现 $B-V$ 与 $V-R$ 、 $B-V$ 与 $R-I$ 有很显著的关联性,而没有找到 $V-R$ 与 $R-I$ 之间存在相关性的证据;他们认为如果这两者之间确实不存在相关性,则可能暗示着影响 Centaurs 颜色的各种因素在作用的过程中存在某种选择性.他们同时也考查了 Centaurs 颜色与其轨道参数之间的关联性问题,发现 $B-V$ 和 $B-R$ 与轨道离心率 e 之间存在相关性,而没有找到其它颜色与轨道参数之间关联性的证据. Doressoundiram 等^[6]也利用统计方法研究这些关联性,他们对 9 个 Centaurs 的研究发现 $B-V$ 与 e 存在较为显著的相关性,而 $B-R$ 与 e 之间的相关性要稍弱一些.

在本文中,我们将对更多样本数的 Centaurs 样本 (39 个) 进行颜色之间 ($B-V$ 、 $V-R$ 、 $R-I$ 、 $B-R$) 以及颜色与轨道参数 (a 、 e 、 i) 之间的相关性统计分析.这项工作不仅是对以往分析结果的求证,而且可以探究在更多样本数的情况下,相关性的显著程度是否发生改变,更重要的是,是否能够利用这些更多数目的 Centaurs 样本来发现新的相关性.

2 数据来源

我们按照行星数据系统^[7](Planet Data System) 中对小天体类别的划分来选取 Centaurs 样本.除了 7 个又被归属于彗星的 Centaurs 之外,其余 Centaurs 的轨道参数均来源于小行星中心¹(Minor Planet Center),而被归属为彗星的 Centaurs 的轨道参数来源于喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的小天体数据库²(JPL Small-Body Database Browser).

对于 Centaurs 色指数的信息,我们搜集了现在所有已知色指数的 Centaurs 数据.这些色指数数据来源于以往文献中列出的数据和网站上的在线数据.其中的一些 Centaurs 由于被多次观测而得到多组色指数的数据,从不同的观测设备所测量得到的结果来看,彼此间测得的数据是兼容的,因此我们选取来源于不同的观测设备的数据并不影响最终的结果.对于存在多组色指数测量值的 Centaurs,我们选择数据的原则是:选择误差最小的数据;如果前后测得的数据误差相同或相差不多,则选择最新数据. Centaurs 色指数的数据来源于以下出处: (1) Tegler 等^[3]; (2) “ESO Large Program on Centaurs and TNOs”^[5]; (3) “Meudon Multicolor Survey (2MS)”^[6]; (4) 在线数据库: MBOSS-Colors³(Minor Bodies in the Outer Solar System: Magnitudes and Colors); (5) Planetary Data System: TNO and Centaur Colors^[7].

我们通过误差的直方图考查所收集到的 Centaurs 各色指数的误差变化范围,得到

¹<http://www.cfa.harvard.edu/iau/lists/Centaurs.html>

²<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>

³<http://www.eso.org/~ohainaut/MBOSS/>

$B - V$ 、 $V - R$ 、 $R - I$ 以及 $B - R$ 的误差范围分别落在 $0.01 \sim 0.14$ 、 $0.01 \sim 0.1$ 、 $0.01 \sim 0.21$ 和 $0.01 \sim 0.16$ 这几个区间内. 这表明数据的误差均在可以接受的范围内, 因此我们认为数据的精度是较为可靠的 (见表 1).

表 1 Centaurs 数据样本
Table 1 Centaurs data sample

Object	$B - V$	$B - R$	$V - R$	$R - I$	H_R^*	$i(^{\circ})$	e	$a(\text{AU})$	Ref.		
2060 Chiron	1977 UB	0.68 ± 0.04	1.04 ± 0.04	0.36 ± 0.02	0.33 ± 0.03	6.11 ± 0.05	6.9	0.379	13.704	<i>b</i>	
5145 Pholus	1992 AD	1.30 ± 0.10	2.09 ± 0.10	0.79 ± 0.03	0.82 ± 0.05	7.17 ± 0.06	24.7	0.572	20.318	<i>b</i>	
7066 Nessus	1993 HA2	1.09 ± 0.04	1.87 ± 0.06	0.78 ± 0.05	0.69 ± 0.07	9.00 ± 0.07	15.6	0.518	24.643	<i>b</i>	
8405 Asbolus	1995 GO	0.74 ± 0.04	1.25 ± 0.06	0.51 ± 0.05	0.51 ± 0.04	9.04 ± 0.06	17.6	0.621	18.108	<i>b</i>	
10199 Chariklo	1997 CU26	0.80 ± 0.05	1.29 ± 0.05	0.49 ± 0.02	0.52 ± 0.01	6.58 ± 0.01	23.4	0.171	15.778	<i>b</i>	
10370 Hylonome	1995 DW2	0.77 ± 0.08	1.15 ± 0.10	0.38 ± 0.06	0.50 ± 0.19	9.30 ± 0.14	4.1	0.246	25.064	[6]& <i>b</i>	
	29981	1999 TD10	0.72 ± 0.02	1.23 ± 0.03	0.51 ± 0.02	0.46 ± 0.03	8.70 ± 0.04	6.0	0.875	98.152	[7]& <i>b</i>
31824 Elatus	1999 UG5	1.05 ± 0.02	1.69 ± 0.03	0.64 ± 0.02	0.63 ± 0.04	10.46 ± 0.12	5.2	0.384	11.763	[6]& <i>b</i>	
32532 Thereus	2001 PT13	0.71 ± 0.01	1.18 ± 0.01	0.47 ± 0.01	0.49 ± 0.04	9.37 ± 0.04	20.3	0.198	10.651	[3]& <i>b</i>	
	33128	1998 BU48	1.01 ± 0.04	1.65 ± 0.05	0.64 ± 0.03	0.64 ± 0.10	6.86 ± 0.14	14.3	0.384	33.158	[6]& <i>b</i>
42355 Typhon	2002 CR46	0.74 ± 0.02	1.26 ± 0.02	0.52 ± 0.01	0.48 ± 0.06	6.98 ± 0.05	2.4	0.534	37.612	[3]& <i>b</i>	
	44594	1999 OX3	1.11 ± 0.05	1.87 ± 0.09	0.76 ± 0.08	0.63 ± 0.07	6.85 ± 0.08	2.6	0.457	32.484	[6]& <i>b</i>
49036 Pelion	1998 QM107	0.75 ± 0.08	1.31 ± 0.12	0.56 ± 0.09	0.58 ± 0.21	10.19 ± 0.11	9.3	0.138	20.076	<i>b</i>	
52872 Okyrhoe	1998 SG35	0.74 ± 0.07	1.23 ± 0.09	0.49 ± 0.06	0.47 ± 0.07	10.73 ± 0.08	15.7	0.306	8.353	<i>b</i>	
52975 Cyllarus	1998 TF35	1.17 ± 0.05	1.88 ± 0.06	0.71 ± 0.04	0.67 ± 0.09	8.64 ± 0.10	12.6	0.380	26.178	[6]& <i>b</i>	
54598 Bienor	2000 QC243	0.67 ± 0.03	1.11 ± 0.04	0.44 ± 0.03	0.40 ± 0.08	7.72 ± 0.08	20.7	0.199	16.544	[6]& <i>b</i>	
55576 Amycus	2002 GB10	1.09 ± 0.05	1.77 ± 0.05	0.70 ± 0.03	0.76 ± 0.04	7.43 ± 0.03	13.3	0.393	25.064	[5]	
60558 Echeclus	2000 EC98	0.85 ± 0.08	1.32 ± 0.11	0.47 ± 0.08	0.49 ± 0.10	9.76 ± 0.08	4.3	0.458	10.751	<i>b</i>	
	63252	2001 BL41	0.70 ± 0.01	1.21 ± 0.03	0.51 ± 0.03	0.38 ± 0.16	11.28 ± 0.06	12.5	0.295	9.730	[3]& <i>b</i>
	73480	2002 PN34	0.76 ± 0.01	1.28 ± 0.02	0.52 ± 0.02	---	8.51 ± 0.03	16.6	0.573	31.254	[3]& <i>b</i>
83982 Crantor	2002 GO9	1.10 ± 0.02	1.86 ± 0.02	0.76 ± 0.01	0.71 ± 0.05	8.44 ± 0.03	12.8	0.277	19.459	[3]&[5]	
	87555	2000 QB243	0.77 ± 0.05	1.07 ± 0.10	0.38 ± 0.05	0.52 ± 0.08	8.16 ± 0.06	6.8	0.565	35.193	[5]&[7]
	88269	2001 KF77	1.08 ± 0.04	1.81 ± 0.04	0.73 ± 0.01	---	10.04 ± 0.02	4.4	0.241	26.053	[3]& <i>b</i>
	95626	2002 GZ32	0.61 ± 0.01	1.03 ± 0.04	0.42 ± 0.04	0.54 ± 0.07	6.60 ± 0.13	15.0	0.220	23.065	[3]& <i>b</i>
	119315	2001 SQ73	0.67 ± 0.02	1.13 ± 0.02	0.46 ± 0.01	---	8.89 ± 0.03	17.4	0.177	17.476	[3]& <i>b</i>
	120061	2003 CO1	0.74 ± 0.03	1.24 ± 0.04	0.49 ± 0.02	---	9.21 ± 0.04	19.7	0.474	20.765	[3]& <i>b</i>
	121725	1999 XX143	1.28 ± 0.11	1.86 ± 0.07	0.65 ± 0.07	1.12 ± 0.06	8.39 ± 0.04	6.8	0.465	17.916	[5]
		1994 TA	1.26 ± 0.14	1.93 ± 0.16	0.67 ± 0.08	0.74 ± 0.21	11.42 ± 0.13	5.4	0.303	16.759	<i>b</i>
		2000 FZ53	0.61 ± 0.03	1.17 ± 0.05	0.56 ± 0.04	0.24 ± 0.10	11.11 ± 0.14	34.9	0.478	23.757	[3]& <i>b</i>
C/NEAT	2001 M10	0.66 ± 0.10	1.17 ± 0.10	0.51 ± 0.03	0.51 ± 0.03	---	27.9	0.802	26.759	[7]	
	2001 XZ255	1.17 ± 0.02	1.91 ± 0.07	0.75 ± 0.07	---	10.80 ± 0.08	2.6	0.036	15.902	[3]& <i>b</i>	
	2002 CB249	---	---	0.63 ± 0.08	0.25 ± 0.08	10.16 ± 0.09	14.0	0.511	28.421	[5]	
	2002 DH5	0.66 ± 0.07	1.05 ± 0.08	0.47 ± 0.05	0.27 ± 0.08	9.76 ± 0.10	22.5	0.365	21.980	[5]	
P/LONEOS	2004 A1	---	---	0.32 ± 0.03	---	---	10.6	0.308	7.897	[7]	
166P/NEAT	2001 T4	0.87 ± 0.03	1.60 ± 0.04	0.73 ± 0.03	0.71 ± 0.03	---	15.4	0.382	13.838	[7]	
167P/CINEOS	2004 PY42	0.80 ± 0.03	1.29 ± 0.10	0.49 ± 0.10	0.42 ± 0.08	---	19.1	0.274	16.275	[7]	
29P/S-W	1927 V1	0.78 ± 0.03	1.28 ± 0.04	0.50 ± 0.03	0.52 ± 0.03	---	9.4	0.045	5.989	[7]	
39P/Oterma	1943 G1	0.74 ± 0.07	1.19 ± 0.09	0.45 ± 0.05	0.59 ± 0.10	---	1.9	0.246	7.251	[7]	
P/LINEAR	2000 B4	---	---	0.45 ± 0.03	0.45 ± 0.03	---	15.9	0.621	18.027	[7]	

* R 波段绝对星等

b: <http://www.eso.org/~ohainaut/MBOSS/>

3 数据分析

几乎所有的参数统计检验法都要求各组观测值的总体符合正态分布, 而基于现今我们对 Centaurs 这类群体的了解, 不允许我们对其数据分布情况作任何的假设. 因此我们将采用非参数统计检验方法对数据进行分析. 这一类检验方法的优点是不需要假定数据服从某一特定的概率分布, 所以这种方法对于服从任何一种概率分布的数据都是有效的.

而且当数据中预期含有异常值时, 非参数统计检验法更适用.

3.1 Centaurs 的色指数分析

3.1.1 Centaurs 色指数相关性分析

从图 1 可以看出 Centaurs 色指数之间具有较强的线性相关性, 为了进一步定量研究 Centaurs 色指数的相关性, 我们采用斯皮尔曼等级相关^[8] 检验方法, 对 Centaurs 色指数之间以及颜色与轨道参数之间的关联性进行分析. 这种检验方法不仅具有上述的优越性, 它在小样本数的情况下也能给出较为可信的结果. 数据之间的关联程度由斯皮尔曼等级相关系数及其显著水平 SL (Significance Level) 来衡量. 这里的显著水平 SL 是指假设两个样本之间不存在关联性 (H_0) 为假的概率. 由 SL 值来衡量两个样本之间关联性的程度, 我们参照 Efron 等^[9] 所规定的判断标准: $SL > 95\%$ — 较为坚实的可靠性证明 H_0 为假; $SL > 97.5\%$ — 坚实的可靠性证明 H_0 为假; $SL > 99\%$ — 非常坚实的可靠性证明 H_0 为假.

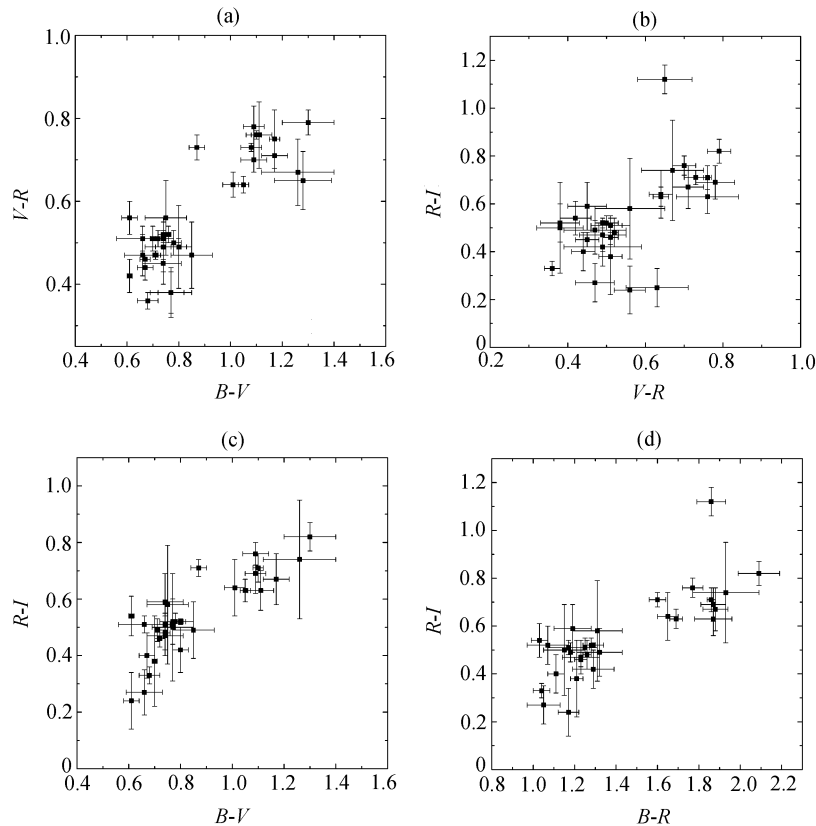


图 1 Centaurs 色指数之间的关系图. (a) $B-V$ 与 $V-R$ 的关系图, (b) $V-R$ 与 $R-I$ 的关系图, (c) $B-V$ 与 $R-I$ 的关系图, (d) $B-R$ 与 $R-I$ 的关系图

Fig. 1 Color-color diagrams of Centaurs. (a) $B-V$ vs. $V-R$, (b) $V-R$ vs. $R-I$, (c) $B-V$ vs. $R-I$, (d) $B-R$ vs. $R-I$

由于斯皮尔曼等级相关法没有将数据的误差考虑进去, 所以当出现数据误差大于某两个数据点之间的差值时, 数据误差对相关系数及其检验结果的影响就很重要了, 这有可能导致不准确的结果. 因此, 我们利用自举程序^[9](bootstrap)对每个数据点在其各自的误差范围内随机抽取 1 000 次, 组成 1 000 个样本, 对这些样本分别计算相关系数 ρ , 取平均值作为最终的结果.

我们从对 Centaurs 各色指数之间关联性的检验结果(表 2)发现, $B-V$ 与 $V-R$ (图 1(a))、 $V-R$ 与 $R-I$ (图 1(b))、 $B-V$ 与 $R-I$ (图 1(c))、 $B-R$ 与 $R-I$ (图 1(d))之间均存在很显著的相关性($\rho > 0.6$, $SL > 99.99\%$). 在这之前, Peixinho 等^[5]以及 Doressoundiram 等^[6]都发现了 $B-V$ 与 $V-R$ 、 $R-I$ 存在显著相关, 而没有找到 $V-R$ 与 $R-I$ 存在相关性的证据. Peixinho 等^[5]对于 $V-R$ 与 $R-I$ 之间没有显示出显著相关这一现象解释为不止一种作用因素导致 Centaurs 表面物质颜色的形成, 而这些影响 Centaurs 颜色的因素在作用的过程中存在某种选择性. Doressoundiram 等^[6]针对其采用容量很小的样本, 说明了他们的结果不是十分可靠的. 我们采用了更多的数据样本, 经统计检验发现 $V-R$ 与 $R-I$ 也存在显著的相关性, 并且我们增加了 $B-R$ 与 $R-I$ 的相关性检验, 发现它们之间也存在很显著的相关性. 从图 1 中也可以看出以上所述色指数之间存在较强的相关性, 但是相关关系略微存在差异, 这可能暗示着影响 Centaurs 颜色形成的主要因素不存在特殊的选择性, 而某些作用微弱的因素对于不同颜色的形成存在某种细小的差别.

表 2 对 Centaurs 色指数的斯皮尔曼等级相关检验

Table 2 Spearman rank correlation test for the color indexes of Centaurs

Variables	n	Without error bars		With error bars	
		ρ	$SL(\%)$	$\rho_{-\sigma}^{+\sigma}$	$SL(\%)$
$B-V$ vs. $V-R$	36	0.72	> 99.99	$0.71_{-0.04}^{+0.05}$	> 99.99
$V-R$ vs. $R-I$	33	0.63	> 99.99	$0.62_{-0.04}^{+0.03}$	> 99.99
$B-V$ vs. $R-I$	31	0.82	> 99.99	$0.77_{-0.05}^{+0.05}$	> 99.99
$B-R$ vs. $R-I$	31	0.76	> 99.99	$0.74_{-0.04}^{+0.05}$	> 99.99

注: n 表示能够进行计算的数据对的个数

3.1.2 Centaurs 的双色性

在此之前, 已经有人对 Centaurs 的双色性加以研究和证明. Boehnhardt 等^[10]和 Hainaut 等^[11]对 Centaurs 的双色性给出了定性的判断, Peixinho 等^[12]分析了当时所有已知 $B-V$ 和 $V-R$ 的 Centaurs, 断定这类天体在 SL 为 99.5% 的水平下是由两种不同 $B-R$ 颜色的群体组成的. Tegler 等^[3]在对 22 个 Centaurs 的色指数进行检验后发现, Centaurs 颜色的不连续性仅有不到 1/1000 的可能是由于样本不全导致的, 认为 Centaurs 呈现的双色性就是由于其来源于两种不同颜色的群体. Peixinho 等^[5]和 Doressoundiram 等^[6]采用新增的色指数数据, 通过 $B-V$ 与 $V-R$ 的色指数关系图, 进一步证实了双色性的存在.

我们用更多的数据样本进行了 Centaurs 双色性检验. 从图 1(a) 中 $B-V$ 与 $V-R$ 的关系图就可以比较清楚地看出位于图左下角的 Centaurs 呈现蓝色, 而位于图右上角的

Centaurs 呈现红色, 两者均有很强的聚集性, 且中间缺失在这两种颜色之间的过渡天体. 为了更直观地表示 Centaurs 样本色指数的分布情况, 我们对各个色指数的样本分别做出其相应的统计直方图 (图 2), 发现 Centaurs 样本中色指数 $B-R$ 和 $B-V$ 的分布在中间存在间断.

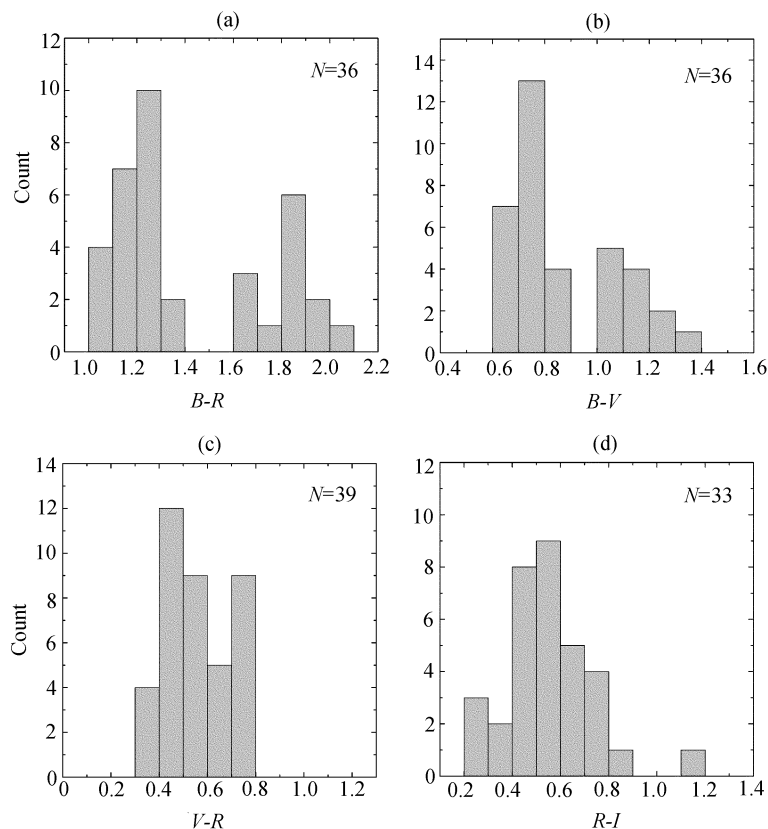


图 2 Centaurs 色指数的统计直方图

Fig. 2 Histograms of the color indexes of Centaurs

为了能够给出更加准确的判据, 我们采用 dip 检验^[13]对 Centaurs 的色指数进行分析. Dip 检验是一种检验数据样本是否来自同一个连续分布的样本总体的检验方法. 采用此检验方法可以判别各色指数的数据样本是否分别来自于其各自总体的一部分. 对各个色指数的 dip 检验结果如表 3. 对于 36 个 Centaurs 的 $B-R$ 计算得到的 dip 统计量为 0.081, 样本数据 $B-R$ 来源于同一样本总体的可能性小于 4%; 而对于 $B-V$ (36 个)、 $V-R$ (39 个) 以及 $R-I$ (33 个), 其各自分布来源于不同样本总体的可能性分别为 70%、54% 和 4%, 均不到 95% 的显著水平. 由此可以认为, Centaurs 样本数据 $B-R$ 不是来自同一颜色连续的样本总体 ($SL > 95\%$), Centaurs 呈现红、蓝双色并不是由于样本数据的缺失而导致的其中间出现间断; $R-I$ 分布的间断是由于我们样本数据的缺失导致的, 其样本数据来源于同一样本总体 ($SL > 95\%$); 对于 $B-V$, 其统计直方图中存在间断,

且分布来源于不同样本总体的 SL 为 70%, 需要采取进一步的验证; 而对于 $V - R$, 它的统计直方图不存在间断, 且分布较其它色指数集中, 其来源于不同样本总体的 SL 仅为 54%, 因此不容易确定 $V - R$ 是否来源于同一样本总体.

表 3 Centaurs 色指数的 dip 检验

Table 3 Dip test for the color indexes of Centaurs

Color index	Dip statistic	P
$B - R$	0.081	0.04
$B - V$	0.062	0.30
$V - R$	0.058	0.46
$R - I$	0.042	0.96

如果数据不是来源于同一连续分布的样本总体, 那么必然存在一个(或多个)临界值将属于不同分布的总体区别开来. 因此, 为了找到 $B - R$ 的临界值, 即 Centaurs 红、蓝双色的临界点, 我们利用 Wilcoxon 检验^[14] 寻找使红、蓝两色差异最显著的分界点. 我们仍然采用自举程序, 对每个数据点在其各自的误差范围内随机抽取 1 000 次, 组成 1 000 个新样本, 计算每个样本中使红、蓝两色差异最显著的分界点. 从图 3(a) 中可以看出使 $B - R$ 差异最显著的分界点 $(B - R)_{\text{cut}} = 1.4$ 出现的频次最多, 因此认为 $B - R$ 的分界点应为 1.4 左右.

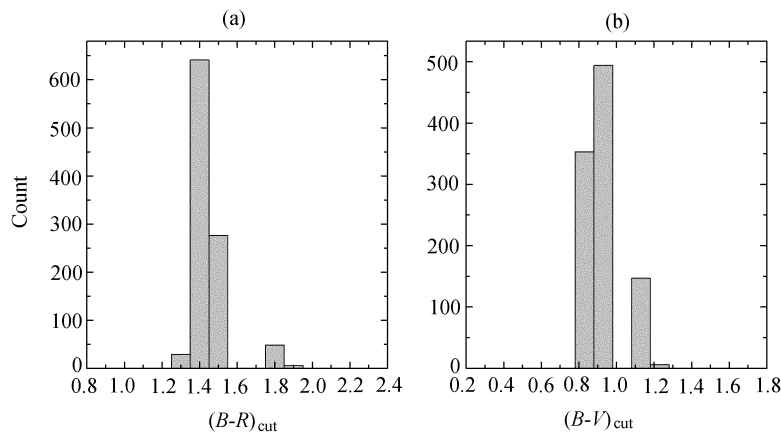


图 3 颜色差异分界点的概率密度分布直方图. $(B - R)_{\text{cut}}$ 、 $(B - V)_{\text{cut}}$ 分别为其各自颜色差异的分界点

Fig. 3 Histograms of the probability density distribution of the critical points for color differences.

$(B - R)_{\text{cut}}$ and $(B - V)_{\text{cut}}$ are the critical points for color differences, respectively

此外, 从图 2(b) 中可以看出 $B - V$ 中间也出现明显的间断且具有双峰, 虽然对其进行 dip 检验并不强烈支持其来自不同的两个样本总体, 但 $B - V$ 来自不同样本总体的概率仍有 70%, 为此我们也用上述处理 $B - R$ 的方法寻找 $B - V$ 的分界点. 从图 3(b) 可以看出 $B - V$ 差异最显著的分界点出现在 $(B - V)_{\text{cut}} = 0.9$ 处, 这与图 2(b) 的间断点基本一致, 因此认为若 $B - V$ 来自不同的样本总体, 则其分界点应在 0.9 左右.

3.1.3 色指数的分布检验

为了加深了解这一类天体的表面物质组成及形成机制,探究 Centaurs 颜色的分布规律不失为一种途径. Centaurs 群体呈现出双色性,这种颜色差异可能是由于 Centaurs 起源或是组成的差异引起的,也可能反映了空间天气的辐射和(或)彗发活动的水平不同. 如果对 Centaurs 群体各色指数的分布进行分析,结合其轨道空间分布情况,可以使得我们对 Centaurs 群体的起源环境、现今空间环境的辐射水平和对其表面组成物质的影响有所认知和了解.

为此,我们采用 K-S 检验^[15]对 Centaurs 色指数的分布进行分析. 由色指数的统计直方图(图 2)可以看出,目前观测到的 Centaurs 的 $B-R$ 、 $B-V$ 、 $V-R$ 及 $R-I$ 值均呈现出高斯分布特征. 因此我们采用 K-S 法来检验这些色指数是否符合高斯分布,即将 $B-R \geq 1.4$ 、 $B-R < 1.4$ 、 $B-V \geq 0.9$ 、 $B-V < 0.9$ 、 $V-R$ 及 $R-I$ 的值进行高斯分布检验. 由表 4 可以看出,对各色指数进行 K-S 检验所得的 P 值均大于 0.05. 一般来说, P 值大于 0.05, 即认为没有足够的理由拒绝 H_0 假设 (H_0 为色指数分布符合高斯分布); P 值大于 0.1, 即认为没有任何理由拒绝 H_0 假设. 因此,认为在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平下,上述色指数值均符合高斯分布. 高斯分布的均值 M_μ 决定分布的位置,即概率密度最大的值;标准偏差 σ 决定分布的“胖”“瘦”. 结合 M_μ 和 σ 可以大致给出 Centaurs 群体在颜色上的变化范围(在 $[M_\mu - 2\sigma, M_\mu + 2\sigma]$ 范围内的概率为 95.4%; 在 $[M_\mu - 3\sigma, M_\mu + 3\sigma]$ 范围内的概率为 99.7%). 因此 σ 的大小反映了 Centaurs 群体各色指数变化范围的大小. 色指数 $B-R \geq 1.4$ 的样本容量为 13, σ 为 0.13; 色指数 $B-R < 1.4$ 的样本容量为 23, σ 为 0.09. 这说明 Centaurs 群体中呈现蓝色的群体颜色分布较为集中,而呈现红色的群体颜色分布较为发散. 表面呈现蓝色的 Centaurs 可能是由于其表面由冰层覆盖或其上的彗发活动所致,而表面呈现红色的 Centaurs 可能由于其表面覆盖红色的有机物或是由辐射导致红化的结果^[11-12]. 蓝色群体的颜色分布集中可能是由于冰层覆盖物的差异较小或者彗发活动水平相当所致,而红色群体的颜色分布发散可能是其表面覆盖的有机物的组成、比例以及分布情况差异较大,或是反映了空间辐射水平由于空间位置的不同而有所差别.

表 4 Centaurs 色指数的 K-S 检验结果 ($\alpha = 0.05$)

Table 4 The results of K-S test for the color indexes of Centaurs ($\alpha = 0.05$)

Color index	N_C	K-S statistic	P	M_μ	σ
$B-R \geq 1.4$	13	0.21	0.58	1.83	0.13
$B-R < 1.4$	23	0.13	0.79	1.19	0.09
$B-V \geq 0.9$	12	0.22	0.56	1.14	0.09
$B-V < 0.9$	24	0.14	0.72	0.73	0.07
$V-R$	39	0.19	0.08	0.56	0.13
$R-I$	33	0.14	0.55	0.55	0.18

注: N_C 是符合第 1 列条件的色指数的个数

3.2 各色指数与轨道参数的关联性分析

为了探究 Centaurs 的颜色分布是否与其轨道参数有关联,我们仍然采用斯皮尔曼等

级相关来检验它们之间是否存在关联性. 具体地说, 分别检验色指数 $B-R$ 、 $B-V$ 、 $V-R$ 和 $R-I$ 与轨道倾角 i 、轨道离心率 e 和轨道半长轴 a 之间是否存在相关性. 为了确保结果的可靠性, 我们仍然采用不考虑误差和考虑误差两种方式进行检验分析. 由表 5 的结果看, 只发现 $B-V$ 与 i ($\rho = -0.37$, $SL = 97.25\%$)、 $V-R$ 与 a ($\rho = 0.30$, $SL = 93.74\%$) 存在弱相关性, 而对于其它色指数与轨道参数之间的关系, 未发现它们具有相关性.

表 5 对 Centaurs 色指数与轨道参数的斯皮尔曼等级相关检验

Table 5 Spearman rank correlation test for the color indexes vs. orbital parameters

Variables	N	Without error bars		With error bars	
		ρ	$SL(\%)$	$\rho_{-\sigma}^{+\sigma}$	$SL(\%)$
$B-R$ vs. i	36	-0.26	87.51	$-0.25_{-0.01}^{+0.02}$	84.07
$B-R$ vs. e	36	0.08	44.83	$0.10_{-0.01}^{+0.01}$	41.58
$B-R$ vs. a	36	0.05	24.67	$0.07_{-0.02}^{+0.01}$	31.15
$B-V$ vs. i	36	-0.37	97.25	$-0.36_{-0.02}^{+0.03}$	97.23
$B-V$ vs. e	36	0.07	19.55	$0.07_{-0.01}^{+0.01}$	19.82
$B-V$ vs. a	36	0.06	25.20	$0.07_{-0.01}^{+0.01}$	29.65
$V-R$ vs. i	39	-0.09	41.77	$-0.09_{-0.01}^{+0.01}$	40.39
$V-R$ vs. e	39	0.18	72.90	$0.15_{-0.01}^{+0.02}$	62.63
$V-R$ vs. a	39	0.30	93.74	$0.27_{-0.01}^{+0.02}$	90.00
$R-I$ vs. i	33	-0.22	79.16	$-0.22_{-0.01}^{+0.01}$	78.06
$R-I$ vs. e	33	0.002	0.70	$0.002_{-0.001}^{+0.001}$	0.75
$R-I$ vs. a	33	0.07	29.07	$0.07_{-0.01}^{+0.01}$	28.52

注: N 是进行相关检验的数据对的个数

从统计学上讲, 数据样本容量不大, 其可能存在的相关性并没有很好地体现出来. 从物理学角度看, 这类天体的运动状态、演化过程以及所处的空间环境等综合因素的影响可能导致对于某一因素的影响趋势不能很明显地体现出来. 存在弱相关性, 暗含着色指数与轨道参数之间可能存在某种关系. 从动力学角度考虑, 较大轨道倾角的 Centaurs 意味着可能发生更多的碰撞, 空间环境沿轨道变化比较大, 从而使得其表面物质再造, 更倾向于形成蓝色的 Centaurs; 而较小轨道倾角的 Centaurs 更倾向于保持其原始组成的红色. 同样, 轨道半长轴小的 Centaurs 更接近于太阳系内部, 碰撞较为频繁, 受空间环境影响较大, 偏向于呈现蓝色; 而轨道半长轴大的 Centaurs, 碰撞相对少, 离太阳相对远, 更易保持其原始的红色表面.

4 结论与讨论

本文根据目前已知色指数的 39 个 Centaurs 进行较为深入的统计分析, 得出如下结论:

(1) 通过对 Centaurs 各色指数之间的关联性检验, 发现 $B-V$ 与 $V-R$ ($\rho = 0.71_{-0.04}^{+0.05}$, $SL > 99.99\%$)、 $B-V$ 与 $R-I$ ($\rho = 0.77_{-0.05}^{+0.05}$, $SL > 99.99\%$) 之间均存在很显著的相关性. 这与 Peixinho 等^[5] 和 Doressoundiram 等^[6] 的结论是一致的. 此外, 我们还发现

$V-R$ 与 $R-I$ ($\rho = 0.62_{-0.04}^{+0.03}$, $SL > 99.99\%$)、 $B-R$ 与 $R-I$ ($\rho = 0.74_{-0.04}^{+0.05}$, $SL > 99.99\%$) 之间也存在强相关性.

(2) 通过对 Centaurs 色指数进行 dip 检验, 发现 Centaurs 具有红、蓝双色性; 利用 Wilcoxon 检验, 找到红、蓝双色 ($B-R$) 的分界点在 1.4 左右.

(3) 通过对 $B-R \geq 1.4$ 、 $B-R < 1.4$ 、 $B-V \geq 0.9$ 、 $B-V < 0.9$ 、 $V-R$ 及 $R-I$ 的值进行 K-S 检验, 发现它们均呈现高斯分布. 并且我们还发现色指数 $B-R \geq 1.4$ 的样本容量为 13, σ 为 0.13; 色指数 $B-R < 1.4$ 的样本容量为 23, σ 为 0.09. 这说明 Centaurs 群体中呈现蓝色的群体颜色分布较为集中, 而呈现红色的群体颜色分布较为发散. 蓝色群体的颜色分布集中可能是由于冰层覆盖物的差异较小或者彗发活动水平相当所致, 而红色群体的颜色分布发散可能是由于其表面覆盖的有机物的组成、比例以及分布情况差异较大, 或是反映了空间辐射水平由于空间位置的不同而有所差别.

(4) 通过对 Centaurs 色指数与轨道参数间的关联性分析, 只发现 $B-V$ 与 i ($\rho = -0.37$, $SL = 97.25\%$) 和 $V-R$ 与 a ($\rho = 0.30$, $SL = 93.74\%$) 存在弱关联性. 而对于其它色指数与轨道参数之间的关系, 未发现它们之间存在相关性.

尽管 Centaurs 轨道在 $10^6 \sim 10^7$ yr 的时间尺度内是不稳定的, 但如果测量短时期 (近期) 轨道参数与色指数的关系, 相对来说, 轨道是稳定的. 如果这项工作能够持续开展, 即实时更新色指数及轨道参数的数据, 不断扩大 Centaurs 样本数据, 利用更多更新的数据来重复进行上述统计性分析, 或许会在较长时间尺度内发现 Centaurs 表面物质形成与所处的空间环境之间的动力学作用.

致谢 感谢王晓彬老师的鼓励和支持; 感谢台湾中央大学叶永焯教授的热情帮助.

参 考 文 献

- [1] Kowal C T, Liller W, Marsden B G. Dynamics of the Solar System // Dordrecht D. Proceedings of the Symposium. Tokyo: Reidel Publishing Co., 1979: 245-250
- [2] Mazzotta Epifani E, Palumbo P, Capria M T, et al. A&A, 2006, 460: 935
- [3] Tegler S C, Romanishin W, Consolmagno G J. ApJ, 2003, 599: 49
- [4] Bauer J M, Meech K J, Fernández Y R, et al. Icar, 2003, 166: 195
- [5] Peixinho N, Boehnhardt H, Belskaya I, et al. Icar, 2004, 170: 153
- [6] Doressoundiram A, Peixinho N, Doucet C, et al. Icar, 2005, 174: 90
- [7] Neese C E. PDSS, 2009, TNO and Centaur Colors V6.0
- [8] Spearman C. Am. J. Psychol., 1904, 57: 72
- [9] Efron B, Tibshirani R J. An Introduction to the Bootstrap. London: Chapman and Hall, 1993: 53-63
- [10] Boehnhardt H, Tozzi G P, Birkle K, et al. A&A, 2001, 378: 653
- [11] Hainaut O R, Delsanti A C. A&A, 2002, 389: 641
- [12] Peixinho N, Doressoundiram A, Delsanti A, et al. A&A, 2003, 410: 29
- [13] Hartigan P M. JApS, 1985, 34: 320
- [14] Wilcoxon F. Biome, 1945, 1: 80
- [15] Gibbons J D, Chakraborti S. Non-parametric Statistical Inference. 4th edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2003: 645-649

The Statistical Analysis of Color-Color and Color-Orbital Parameter Relations of Centaurs

LI Xue-jing^{1,2}

(1 *National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT In order to research the statistical characters and physical significance of the color indexes and orbital parameters of Centaurs, we analyse the correlations of color-color and color-orbital parameter by using statistical methods according to the known color indexes of 39 Centaurs and their respective orbital parameters. We find that the correlations of $B - V$ vs. $V - R$, $V - R$ vs. $R - I$, $B - V$ vs. $R - I$ and $B - R$ vs. $R - I$ are all strong. Centaurs show distinct red-blue double colors. The cut-off point of $B - R$ is about 1.4. The distributions of the color indexes of Centaurs follow normal distribution. Further more, we find that the color distribution of blue Centaurs is more concentrated than that of red ones. The aggregation of the colors of blue Centaurs may be due to the small differences in ice mantles or cometary activities. While the dispersion of the colors of red Centaurs may result from the large differences in the composition, proportion and distribution of organic matters on their surfaces. For the correlations between colors and orbital parameters, we find weak correlations of $B - V$ vs. orbital inclination i and $V - R$ vs. orbital semi-major axis a . It may indicate that Centaurs with larger i or smaller a , which means more collisions and changes in environment, tend to form blue surfaces. In contrast, Centaurs with smaller i or larger a , which means less collisions and changes in environment, tend to keep their original red surfaces. There is no evidence for other correlations between colors and orbital parameters.

Key words asteroids: Centaurs, celestial mechanics, methods: statistical