

对人眼色觉异常的定量测量研究^{1)*}

孙 沛 韩布新 孙秀如

曾晓栋

(中国科学院心理研究所, 北京, 100101)

(中国计量科学研究院, 北京, 100013)

贺极苍

(The Schepens Eye Research Institute, Harvard Medical School MA02114 USA)

摘 要 依据 Rayleigh 颜色匹配方法研制人眼颜色视觉定量测量实验装置, 并对 20 名色觉正常和 30 名色觉异常大学生的颜色视觉进行测量。结果表明, 色觉异常被试在 Rayleigh 匹配中点和匹配范围测量值上均与色觉正常被试存在明显的差异。

关键词 颜色视觉, Rayleigh 颜色匹配, 色觉异常。

分类号: B842.2

1 前 言

颜色视觉正常的人可以用三原色光(红、绿、蓝)混合匹配出可见光谱上的各种颜色, 因此可以称为三色觉者(trichromat)。有些人虽然用三原色能匹配出光谱的各种颜色, 但匹配结果与视觉正常的人不同, 他们对某些颜色的辨别力较差, 这种人称为异常三色觉者(anomalous trichromat)或色弱。如果异常三色觉者对红色的辨别力差, 就属于红色弱; 如果对绿色的辨别力差, 就属于绿色弱。

色觉异常的情况还包括有些人可以用两种原色匹配出各种光谱, 为局部色盲, 称为二色觉者(dichromat), 二色觉者包括红-绿色盲和蓝-黄色盲。红-绿色盲是最常见的色盲类型, 它又分为红色盲和绿色盲。色觉异常的极端情况为有些人用任何一种颜色, 通过改变这一颜色的明度, 就可以匹配出各种光谱色, 他们只有明度感觉而无颜色感觉, 称为单色觉者(monochromat)或全色盲^[1,2]。

正常的色觉对于某些工作来说是很重要的, 例如国防、交通、纺织、医疗等部门, 色觉异常者不适宜从事有关的工作, 因此在挑选上述人员时都应该进行色觉检查^[3]。目前对色觉异常的检查一般采用色盲检查图(假同色图), 色相子排列试验等色觉检查技术^[4]。

医学临床诊断和研究中有时必须对色觉异常进行定量测量, 这一测量可以通过色觉检查镜(anomaloscope)来完成。色觉镜的主要理论依据是 Rayleigh 颜色匹配原理, 即单色绿光(545nm)和单色红光(670nm)在一个圆形视场的一半形成混合光, 同时单色黄光

1) 本文初稿收到日期: 1999-02-12, 修改稿收到日期: 1999-03-20。

* 国家自然科学基金项目(69848003)。

(589nm) 投射到另一半视场中, 受检者通过调整混合光中红光和绿光的比例以及视场中黄光的亮度即可达到颜色的匹配^[5,6]。

Rayleigh 颜色匹配测量结果通常表示为混合光中红光所占的比例, 这一比例值通常称为 Rayleigh 匹配中点 (match midpoint), 即

$$I_{670}/(I_{670}+I_{545}) \quad (\text{公式 1})$$

其中 I_{670} 和 I_{545} 分别为颜色匹配时红光 (670nm) 和绿光 (545nm) 的入射光子量, 入射光子量为网膜照度与网膜面积的乘积。在 Rayleigh 颜色匹配测量中另外一个重要的测量值为 Rayleigh 匹配范围 (match range), 它是匹配最大值和最小值的差值^[7,8]。

研究表明, 色觉正常者的颜色视觉是由三种锥体细胞调节, 即对短波敏感的 S 锥体, 对中波敏感的 M 锥体和对长波敏感的 L 锥体。这三种锥体细胞分别含有可见光谱范围内具有不同最大波长吸收峰或敏感峰波长 (λ_{\max}) 的视觉色素, 三者的最大敏感峰波长分别位于 440nm, 530nm 和 560nm^[9]。对 Rayleigh 颜色匹配来讲, 由于它所采用的匹配光范围为中波到长波的光, 同时由于当波长大于 540nm 时, S 锥体对光刺激的反应基本上可以忽略, 因此可以认为 Rayleigh 匹配仅对 M 锥体和 L 锥体的功能进行诊断^[10]。

对色觉异常进行定量测量具有十分重要的意义, 它可以克服色盲检查图和色相子试验等检查技术主观性较大和缺乏定量描述的缺点, 还可以通过精细的测量及早发现人眼色觉功能的微小变化, 有利于对与色觉变化相关的某些后天眼部疾病进行早期诊断^[4]。本文报道我们依据 Rayleigh 颜色匹配原理研制的实验装置对色觉正常和异常被试进行颜色视觉测量的初步实验结果。

2 方 法

2.1 被试 中国农业大学学生 50 人, 年龄 18—22 岁。依据俞自萍色盲检查图 (第五版, 1997 年) 检查结果进行分类, 其中色觉正常者 20 人 (男 10 人, 女 10 人), 色觉异常者 30 人 (均为男性)。

2.2 仪器装置 色觉测量实验装置为红、绿、黄三条光路组成的光学系统, 在计算机的控制下进行 Rayleigh 颜色匹配的测量 (见图 1)。各光路中的光源 S1, S2, S3 均为发光二极管, 光源分别经置于其前端的透镜 L1, L2, L3 形成平行光, 平行光的光谱分布分别由放置于其前的干涉滤光片 F1, F2, F3 确定, 波长分别为: 红光为 670nm, 绿光为 545nm, 黄光为 589nm。红绿光分别经反射镜 M1, M2 混合, 与单色黄光一起被反射镜 M3 遮挡, 经光阑 A1 形成分半视场到达目镜 V1。目镜内视场为圆形, 位于观察者 2° 视野内, 红、绿混合光呈现于左半视场, 黄光

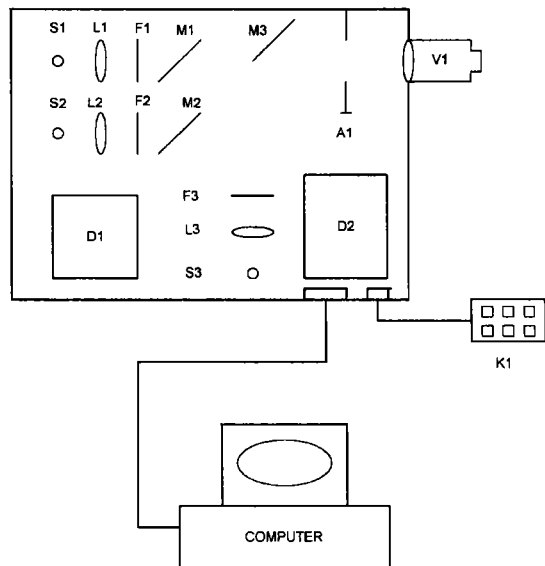


图1 实验装置及光路示意图

呈现于右半视场。各光源的光通量由计算机通过 D/A 转换器 D1, D2 调节, 计算机同时可以通过 D2 获取观察者在反应键盘 K1 上的反应。

2.3 定标 在 3 条光路中, 每个干涉滤光片的波长半宽度均为 8~12nm, 峰值透过率大于 50%。采用弱光光度计 (ST-900 型, 北京师范大学光电仪器厂) 对每条光路到达目镜的不同照度进行测量, 然后采用最小二乘法和差值算法建立与计算机控制下电路不同电压的对应关系, 最大误差 ± 0.05Td。

2.4 实验程序 在进行 Rayleigh 颜色匹配测量时, 红、绿混合光之和及单色黄光的颜色匹配光一般稳定在 1.8logTd (大约 63Td), Td 为网膜照度单位 (Troland)。混合光中红绿比例依据最小变化法选定, 其中一端从单色红光开始, 一端从单色绿光开始。

每次测验被试的任务是判断混合光与单色黄光相比是“较红”、“较绿”还是“一致”。被试通过与计算机相连的反应键盘作出相应的反应, 计算机将根据被试的反应设置下次混合光中红绿的比例, 比如被试的反应为“较红”, 则下次混合光中的红光将减少而绿光将增多。每次变化的差别为 0.2Td, 直到被试认为完全一致为止。如果被试认为右半视场单色黄光的亮度与左半视场混合光的不一致, 可以通过反应键盘上的“增亮”和“减暗”键进行调节。

每个被试共进行 4 次测验, 第一次的测验数据不进入分析。被试左眼和右眼分别进行测验。

3 结果与讨论

图 2 为 20 名色觉正常组被试和 30 名色觉异常组被试右眼 Rayleigh 匹配测量结果。

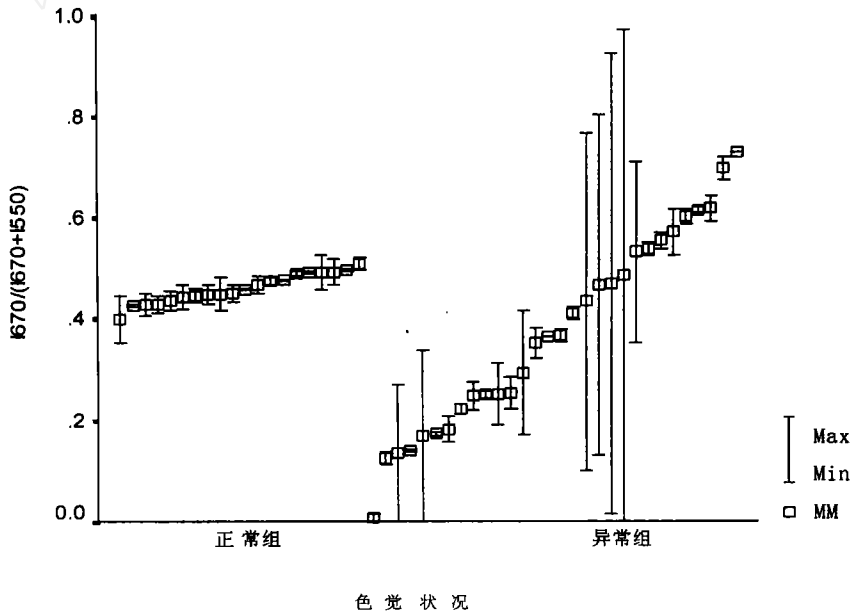


图2 20名正常和30名异常色觉被试右眼Rayleigh匹配测量结果

被试的测量结果依据匹配中点顺序排列,其中 MM 为匹配中点,Max 和 Min 分别为匹配范围的最大值和最小值。

20 名色觉正常者右眼匹配中点平均值为 0.461,左眼匹配中点平均值为 0.464;30 名色觉异常者右眼匹配中点平均值为 0.382,左眼匹配中点平均值为 0.396。对被试 Rayleigh 匹配中点测量结果进行单因素重复测量两因素混合设计的方差分析,结果表明被试内因素右眼和左眼差别不显著, $F(1, 48)=0.40, P>0.05$;被试间因素色觉正常与异常差别显著, $F(1, 48)=4.24, P<0.05$;两个因素之间的交互作用不显著, $F(1, 48)=0.18, P>0.05$ 。

20 名色觉正常者右眼匹配范围平均值为 0.032,左眼匹配范围平均值为 0.036;30 名色觉异常者右眼匹配范围平均值为 0.174,左眼匹配范围平均值为 0.210。对被试 Rayleigh 匹配范围测量结果也进行如上方差分析,结果表明被试内因素右眼和左眼差别不显著, $F(1, 48)=0.82, P>0.05$;被试间因素色觉正常与异常差别显著, $F(1, 48)=6.89, P<0.05$;两个因素之间的交互作用不显著, $F(1, 48)=0.56, P>0.05$ 。

以上方差分析的结果表明,色觉异常被试在 Rayleigh 匹配中点和范围均与色觉正常被试存在明显的差异。那么,导致这种差异的原因是什么呢?从图 2 中我们还注意到,30 名色觉异常被试的测量结果也存在明显的差异,这种差异的性质是什么呢?

从前言中我们可以知道,对正常三色觉者在中到长波光谱范围中的 Rayleigh 匹配测量是一个两变量系统,其中一个变量对应于红和绿单色光的混合比例,另一个变量对应于单色黄光的强度。

研究表明,正常三色觉者 L 和 M 锥体色素的敏感峰波长基本稳定在 543nm 和 566nm 左右,敏感峰波长的差别一般在 23nm。因此,正常三色觉者 L 和 M 锥体色素的激活数量基本相当并且变化非常小,其 Rayleigh 匹配测量特征为匹配中点在 0.5 左右并且个体匹配范围狭窄。本实验测量中,20 名色觉正常被试的右眼匹配中点平均值为 0.461,匹配范围平均值为 0.032;左眼匹配中点平均值为 0.464,匹配范围平均值为 0.036。

同正常三色觉者一样,异常三色觉者的 Rayleigh 匹配测量也是两变量系统。但异常三色觉者红或绿色素吸收谱沿波长轴发生了一定的偏移^[11]。研究表明,红色弱者 L 锥体色素的敏感峰波长向较短波长发生了位移;而绿色弱者 M 锥体色素的敏感峰波长向较长波长发生了位移^[12]。对红绿色弱者敏感峰波长的测量结果显示,其各自三个敏感峰波长分别为 440,543 和 553nm,440,560 和 566nm^[9]。

对于异常三色觉者,由于红色弱者 L 锥体和绿色弱者 M 锥体发生了敏感峰波长的相对位移,同时由于这种位移导致敏感峰波长差别减小(红色弱者平均在 10nm 左右,绿色弱者平均在 6nm 左右)^[6,9],因此在 Rayleigh 匹配测量中,观察者 L 和 M 锥体色素的相对激活数量将发生变化,同时他们敏感峰波长差别的减小将导致匹配范围变宽。

在 Rayleigh 匹配测量中,红绿色弱者还存在明显不同的子类型。依据其 L 和 M 锥体色素敏感峰波长差别的大小,主要可以分为一般 (simple) 和严重 (extreme) 两种子类型。他们的区分特征为一般类型者匹配范围狭窄(与正常者相似)而严重类型者匹配范围较宽^[13]。

本实验中,被试 21, 22, 23, 24, 30, 31, 38, 39, 41, 42, 44, 49, 50 右眼匹配中点平均值为 0.249,匹配范围平均值为 0.037;左眼匹配中点平均值为 0.249,匹配范围平均值为 0.036,符合一般绿色弱者的特征。被试 37, 40, 47 右眼匹配中点平均值为 0.200,匹配范围平均值

为 0.284; 左眼匹配中点平均值为 0.259, 匹配范围平均值为 0.269, 表现出严重绿色弱者的特征。

被试 25, 28, 32, 33, 43, 45, 48 右眼匹配中点平均值为 0.618, 匹配范围平均值为 0.040; 左眼匹配中点平均值为 0.607, 匹配范围平均值为 0.092, 表现出一般红色弱者的特征。被试 26, 35 右眼匹配中点平均值为 0.575, 匹配范围平均值为 0.187; 左眼匹配中点平均值为 0.525, 匹配范围平均值为 0.216, 表现出严重红色弱的特征。

由于二色觉者红绿色盲缺少 M 锥体或 L 锥体的功能, 并且如果 S 锥体的影响可以忽略不计, 那么对红绿色盲在中到长波范围内的 Rayleigh 颜色匹配测量便成为单变量系统。对于绿色盲来讲, 由于缺少 M 锥体, 光感受器的数量完全来自 L 锥体, 因此所有比率的红绿混合光都可以与相对强度的黄光匹配; 对于红色盲来讲, 由于缺少 L 锥体, 光感受器的数量完全来自 M 锥体, 因此所有比率的红绿混合光也都可以与相对强度的黄光匹配^[10]。从测量值的变化来看, 二色觉者的 Rayleigh 匹配中点可以出现在任意一点上, 统计上将表现为匹配中点是匹配范围的中值, 匹配范围为 0~1。此时, 基于如此宽泛匹配范围的匹配中点将不能反映锥体光谱敏感性的机理^[14], 不具有实际的生理意义, 但仍可以作为测量特征点。

对二色觉者红绿色盲的区分可以依据两方面的特征进行。第一, 绿色盲者在匹配红端和绿端混合光时所需单色黄光强度基本一致, 而红色盲者在匹配红端混合光时往往需要降低单色黄光的强度^[10]; 第二, 红绿色盲者在匹配测量过程中可能出现与红绿色弱者相类似的匹配点^[4, 15]。

被试 29, 34, 36, 46 右眼匹配中点平均值为 0.458, 匹配范围平均值为 0.754; 左眼匹配中点平均值为 0.433, 匹配范围平均值为 0.673。这四名被试在匹配红端和绿端混合光时所需单色黄光强度基本一致, 表现出绿色盲者的特征。被试 23 右眼匹配中点为 0.488, 匹配范围为 0.976; 左眼匹配中点平均值为 0.490, 匹配范围平均值为 0.980。这名被试在匹配红端混合光时相对于绿端混合光降低了单色黄光的强度, 表现出红色盲者的特征。

根据实验测量结果和上述分析, 我们将本实验中 30 名色觉异常者的色觉类型划分总

表1 30名色觉异常者的实验测量和色盲图检查结果及其分类

色觉类型	本实验测量分类结果			色盲图分类结果	
	人数	平均匹配中点	平均匹配范围	色觉类型	人数
一般绿色弱	13	0.249	0.037	极轻级	6
				轻级	3
				次重级	4
严重绿色弱	3	0.200	0.284	极轻级	1
				轻级	1
				次重级	1
一般红色弱	7	0.618	0.040	轻级	2
				次重级	5
严重红色弱	2	0.575	0.187	次重级	2
绿色盲	4	0.458	0.754	次重级	3
				重级	1
红色盲	1	0.488	0.976	次重级	1
合计	30				30

结为表 1。在表 1 中,我们同时列出了依据俞自萍色盲检查图检查结果对本实验中 30 名色觉异常者进行的分类结果,主要有四种,即极轻级、轻级、次重级和重级。

从表 1 中可以看到,本实验对 30 名色觉异常者色觉类型的划分与采用俞自萍色盲检查图进行的色觉分类符合程度比较好,但是也存在一定的差异。由于被试量的问题,我们未能对此问题做深入的分析,有待进一步实验研究。

整体上看,本实验测量中 20 名色觉正常被试和 30 名色觉异常被试的实验数据与前人研究结果基本一致^[6-10,12-14]。

总之, Rayleigh 匹配中点可以近似地反映观察者匹配时 L 和 M 锥体相对激活的数量,描述观察者的色匹配倾向,而 Rayleigh 匹配范围可以近似地反映观察者 L 和 M 锥体敏感峰波长的差别,描述观察者的色辨别能力。

4 小 结

本实验研究结果表明,色觉正常者与色觉异常者在 Rayleigh 颜色匹配测量中的匹配中点和范围均存在较大的差异,同时不同类型色觉异常者的匹配中点和范围也存在一定的差异,可根据这种差异对不同色觉类型进行分类。本实验研究结果还表明,我们依据 Rayleigh 颜色匹配原理研制的实验装置可以对人眼色觉异常进行定量测量,并进行色觉类型的分类。

参 考 文 献

- 1 荆其诚等. 色度学. 北京: 科学出版社, 1991, 56—60
- 2 束越新. 颜色光学基础理论. 山东: 山东科学技术出版社, 1981. 560—603
- 3 荆其诚等. 人类的视觉. 北京: 科学出版社, 1987. 45—64
- 4 吴景天. 色觉异常及其检查法. 实用眼科杂志, 1986, 4: (3)131—134
- 5 Wyszecki G, Stiles W S. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae, 2nd ed. John Wiley, New York, 1982
- 6 He J C, Shevell S K. Variation in color matching and discrimination among deuteranomalous trichromats: theoretical implications of small differences in photopigments. Vision Res, 1995, 35(18): 2579—2588
- 7 Swanson W H. Analysis of Rayleigh match data with psychometric functions. J Opt Soc Am, 1993, 10(8): 1807—1817
- 8 Jordan G, Mollon J D. Rayleigh matches and unique green. Vision Res, 1995, 35(5): 613—620
- 9 DeMarco P, et al. Full-spectrum cone sensitivity functions for X-chromosome-linked anomalous trichromats. J Opt Soc Am, 1992, 9: 1465—1476
- 10 Sanocki E. Serine / Alanine amino acid polymorphism of the L and M cone pigments: effects on Reyleigh matches among Deuteranopes, Protanopes and Color normal observers. Vision Res 33(15): 2139—2152 1993
- 11 Pinckers A J L G, Pokorny J, Smith V C, Verriest G. Classification of abnormal color vision. In: Pokorny J, et al. ed. Congenital and acquired color vision defects. Grune & Stratton, New York, 1979. 71—82
- 12 Sanocki E, Teller D Y, Deeb S S. Rayleigh match ranges of red / green color-deficient observers: psychophysical and molecular studies. Vision Res, 1997, 37 (14): 1897—907
- 13 Lutze M, et al. Genetic Studies of variation in Rayleigh and photometric matches in normal trichromats. Vision Res, 1990, 30(1): 149—162
- 14 Nagy A L, Purl K F. Color discrimination and neural coding in color deficient. Vision Res, 1987, 27 (3): 483—489

15 蔡惠文, 王恩普. Nagel 氏色觉检查镜的临床应用(附 60 例报告). 眼科新进展, 1991, 11: 27—28

QUANTITATIVE MEASUREMENT OF THE DEFICIENCY IN HUMAN COLOR VISION

Sun Pei Han Buxin Sun Xiuru

(Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101)

Zeng Xiaodong

(National Institute of Metrology Beijing, 100013)

He Jichang

(The Schepens Eye Research Institute, Harvard Medical School MA02114 USA)

Abstract

Human color vision can be measured quantitatively using the Rayleigh color match method. Here we reported the primary measure results of 20 normal and 30 abnormal color vision subjects by using this method. The results showed that there were significant differences between the normal and abnormal color vision subjects in both the Rayleigh match midpoint and match range measurements.

Key words color vision, Rayleigh color match, color vision deficiency.