

双 Rayleigh 颜色匹配与色觉检测*

文军庆 韩布新 孙秀如[†] 孙沛 刘玉华 李东辉

(中国科学院心理研究所心理健康重点实验室, 北京 100101) (协和医院眼科, 北京 100730)

摘要 介绍了 Nagel 色觉检查镜等基于经典 Rayleigh 匹配原理的色觉仪在颜色视觉领域的应用, 经典 Rayleigh 匹配的几种改进的方法, 特别是近年来新产生的双 Rayleigh 颜色匹配色觉检测方法及其原理。最后介绍了国内学者基于双 Rayleigh 匹配原理研究开发的一种新型色觉检测仪——全自动双 Rayleigh 匹配型色觉检测仪, 并分析了其应用前景。

关键词 色觉异常, 经典 Rayleigh 匹配, 双 Rayleigh 匹配。

分类号 B842

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, 又称三色觉者。人一出生就有颜色视觉异常, 其类型和轻重程度终生不变者, 为先天性色觉异常。它是 X 染色体伴性遗传, 通常男多于女; 主要有异常三色性色觉(包括红色弱、绿色弱和青黄色弱) 二色性色觉(包括红色盲、绿色盲与青黄色盲) 和一色性色觉(即全色盲, 包括杆体一色视与锥体一色视) 三种。因视觉器官疾病继发的白内障、青光眼、视神经病变等, 缺陷程度与原发病病情的变化相平行行为后天色觉缺陷。这类患者除色觉障碍外, 还伴有视力障碍及视野中心暗点, 其色觉异常也常是暂时性的。一旦疾病痊愈, 视力恢复, 则色觉障碍也随之消失^[1]。

正常和异常颜色视觉有显著个体差异^[2-4]。变异的原因可能有:(1) 眼睛介质透过率和/或锥体色素光密度不同,(2) 视觉色素敏感峰波长(λ_{max})不同^[3]。分子遗传学研究表明, 从混合基因表达得到的人工色素细胞存在敏感峰波长分离^[5]。这一结果为解释颜色匹配测量中存在的个体差异提供了新思路。

为了测量敏感峰波长的微小差异, 需要精细定量测量人眼颜色视觉的方法和仪器。传统的色觉测量方法如色盲图(Stkling 假同色图、Ishihara 色盲检查表和俞自萍色盲检查图)、色子排列(Farnsworth 的 FM-100 或 D-15 色调排列法) 携带方便, 易于操作, 因而普遍使用于对精度要求不高的大规模定性体检中, 但不适用于对精度要求较高的视觉研究及临床应用。

在目前常用的定量色觉检测方法中, 色觉镜检查较为准确。其原理是通过受检者对特定颜色的匹配来判断其色觉状况。Nagel 色觉异常检查镜分 I、II 两型。I 型对红、绿色盲和红、绿色弱敏感, 对红绿色弱也很有效。II 型的不同之处是使用了很亮的短波光光源, 此时 3 种色觉异常的视敏感度曲线的分布不同, 因此更容易区分色觉异常的类型。其他还有如 Moreland 色觉镜、Besancon 色觉镜、Neitz 色觉镜和 Pickford-Nicolson 色觉镜等。与假同色图和色子排列法相比, 色觉镜既能区分正常和异常色觉, 又能精确判断异常的类型与程度^[1]。

2 Rayleigh 匹配

2.1 经典 Rayleigh 匹配原理

色觉镜大多根据经典 Rayleigh 匹配(Rayleigh Match) 原理制成。1881 年, Rayleigh 爵士提出了将中波

收稿日期: 2003-04-05

* 国家自然科学基金项目(60047005) 资助

通讯作者: 韩布新, 电话: 010-64855830 email: hanbx@psych.ac.cn

绿光 (550nm) 和长波红光 (670nm) 在一个半圆形视场混合, 同时单色黄光 (589nm) 投射到另一半视场中。通过调整混合光中红绿光比例以及黄光的亮度即可达到两侧颜色的匹配^[2-4]。经典瑞利匹配的测量结果通常用混合光中红光所占的比例表示, 又称为 Rayleigh 匹配中点 (match midpoint), 表示为 $I_{670}/(I_{670}+I_{550})$ 或 $R/(R+G)$ 。其中 I_{670} 和 I_{550} 分别表示匹配时的红光 (670nm) 和绿光 (550nm) 的入射光量。入射光量为网膜照度与网膜面积的乘积。在瑞利匹配中, 另外一个重要测量值为匹配范围 (match range), 即匹配最大值和最小值的差。根据瑞利匹配中点和匹配范围的数值, 便可确定受测者的色觉异常类型, 并给出量化值^[2,4]。这种对色觉异常类型和程度以及正常色觉个体差异的定量表述, 在人类学、遗传学等基础理论研究、临床诊断以及与色觉相关的职业 (如驾驶) 选择都具有十分重要的意义。

正常颜色视觉由对短波敏感的 S 锥体、对中波敏感的 M 锥体和对长波敏感的 L 锥体调节。这三种锥体细胞所含的视色素在可见光谱范围内最大敏感峰波长 (max) 不同, 分别为 440nm, 530nm 和 560nm^[3]。由于 Rayleigh 匹配的匹配光范围为中到长波的光, 同时当波长大于 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 匹配仅诊断 M 锥体和 L 锥体的功能^[3], 如图 1 所示。

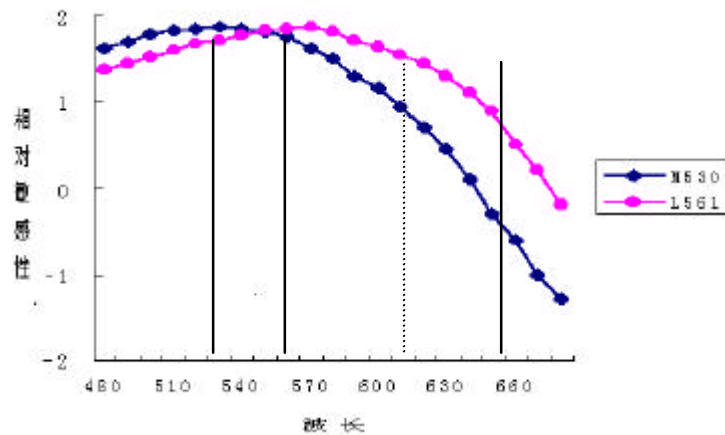


图 1 人眼 M 和 L 锥体沿波长变化的相对敏感性

注: 其中 M 锥体色素的敏感峰波长为 530nm, L 锥体色素的敏感峰波长为 560nm。双 Rayleigh 匹配测量使用的波长 620nm 光用虚线表示。

因此, 测量正常三色觉者在中到长波光谱范围中的 Rayleigh 匹配是两变量系统。其中一个变量对应红和绿单色光的混合比例, 另一个变量对应单色黄光强度。用公式表示为:

$$I_{589} T_{589} [1 - e^{-de(589)}]_M = I_{670} T_{670} [1 - e^{-de(670)}]_M + I_{550} T_{550} [1 - e^{-de(550)}]_M \quad (1a)$$

$$I_{589} T_{589} [1 - e^{-de(589)}]_L = I_{670} T_{670} [1 - e^{-de(670)}]_L + I_{550} T_{550} [1 - e^{-de(550)}]_L \quad (1b)$$

其中 I 为入射光量, T 为透射率, () 为吸光系数, d 为光密度。

将公式 (1a) 和 (1b) 代入 Rayleigh 匹配值 $I_{670}/(I_{670} + I_{550})$, 即 $(I_{670}/I_{550})/((I_{670}/I_{550}) + 1)$ 中的 (I_{670}/I_{550}) , 可得:

$$\frac{I_{670}}{I_{550}} = \frac{T_{550} [1 - e^{-de(550)}]_M [1 - e^{-de(589)}]_L - [1 - e^{-de(550)}]_L [1 - e^{-de(589)}]_M}{T_{670} [1 - e^{-de(670)}]_L [1 - e^{-de(589)}]_M - [1 - e^{-de(670)}]_M [1 - e^{-de(589)}]_L} \quad (2)$$

公式 (2) 表明 Rayleigh 匹配值依赖于前感受器透过率 T_{550} 和 T_{670} 、光密度 d 以及色素光谱性质 ()。经典 Rayleigh 匹配由于同时依赖于上述三种因素, 因此它很难给出颜色视觉中的个体差异的来源。

经典瑞利匹配的优点为: (1) 测量光波长位于晶体和黄斑影响较小的波谱范围内; (2) 在此波长上的

短波敏感锥体激活很少,故三色觉者可只调用二个成分(550nm 和 670nm)而匹配^[2]; (3) 无经验观察者可快速完成匹配故可施测于大量人群。因此,基于瑞利匹配的色觉镜在科研和应用领域得到了广泛应用。其也有不足:受感光细胞前光吸收和光密度正常变动影响,基于经典瑞利匹配的色觉检测仪器不能准确测量引起色觉差异的 L 锥体 $\max(\text{视色素敏感峰波长}) \pm 5\text{nm}$ 的微小差异^[6]。

2.2 几种改进型 Rayleigh 匹配方法

为了满足实际研究的需要并弥补经典 Rayleigh 匹配方法的不足,人们又提出了几种改进型的 Rayleigh 匹配方法。如:大视野 Rayleigh 匹配 (large-field Rayleigh Match)、漂白 Rayleigh 匹配 (the Rayleigh Match with bleaching)、扩展 Rayleigh 匹配 (the extended Rayleigh Match) 和双 Rayleigh 匹配 (dual Rayleigh Match) 方法。大视野 Rayleigh 匹配方法被用于研究正常个体颜色视觉的多型现象^[7]和红绿色觉异常者的 Rayleigh 匹配范围。经典 Rayleigh 匹配 (2° 视场、低照度) 被改为大视场 (10° 视场)、高照度和环形刺激野。大视野方法与经典 Rayleigh 匹配方法相比压缩了匹配范围,提高了 Rayleigh 匹配的测量精度^[6]。颜色视觉的个体差异除主要受锥体视色素 \max 的影响外,同时还受波长选择性吸收 (wavelength-selective absorption)、黄斑色素、视色素光密度及杆体和短波锥体的影响^[8]。大视野方法虽然压缩了匹配范围,但因锥体细胞主要分布在中央凹 2° 范围内^[2],故又引入了杆体和短波锥体的影响 (Rayleigh 匹配主要是针对长波锥体 L 和中波锥体 M); 另外它不能很好地将锥体视色素 \max 的个体变异和波长选择性吸收以及视色素光密度区分开来。

双 Rayleigh 匹配方法被用于研究颜色匹配中的个体差异^[2]和个体 L 视色素蛋白中 180 号位置氨基酸多型现象的关系^[9]。通过使用漂白 Rayleigh 匹配和扩展 Rayleigh 匹配控制视色素光密度等个体差异对被试颜色匹配个体差异的影响^[4],再结合双 Rayleigh 匹配方法进一步证实了锥体视色素 \max 与这种个体差异相关。经典 Rayleigh 匹配在低照度 (大约 60td) 下进行,而漂白 Rayleigh 匹配使用强照度 (>1000td)。这种方法对视色素光密度的变化很敏感,而对晶体透射率和 \max 的变化不敏感,因而可以用来研究不同光密度对个体颜色匹配的影响。扩展 Rayleigh 匹配将 670nm 与 550nm 的混合光依次与介于 550nm 与 670nm 之间的光相匹配。这种方法不受晶体透射率影响,同时也与 \max 变异无关,但对光密度相当敏感。一般红绿色弱者用漂白 Rayleigh 匹配、扩展 Rayleigh 匹配和双 Rayleigh 匹配三种配色方法的结果有较大差别。若双 Rayleigh 匹配结果差别很大,而漂白 Rayleigh 匹配差别却很小,就说明差别是由于 \max 的不同引起的; 若双 Rayleigh 匹配结果差别很大,而扩展 Rayleigh 匹配接近一致,则差别原因也是由于 \max 的不同引起的,反之这种差异则与光密度有关^[4]。虽然漂白 Rayleigh 匹配和扩展 Rayleigh 匹配可以将观察者的可能光密度限制在一定范围内,但二者仍不能将 \max 的个体变异与感光色素光密度的个体差异区分开来。

3 双 Rayleigh 匹配原理与应用

3.1 双 Rayleigh 匹配原理

双重 Rayleigh 匹配通过比较两次独立的 Rayleigh 配色结果克服经典 Rayleigh 匹配的不足。第一次通过调整中波绿光 (550nm) 和长波红光 (670nm) 的混合比例以及视场中单色黄光 (589nm) 的亮度达到颜色匹配。第二次将经典 Rayleigh 匹配中的红光 (670nm) 用另一红光 (620nm) 代替,然后再与中波绿光 (550nm) 混合,调整二者比例并与黄光匹配^[2]。双重 Rayleigh 匹配的测量结果为两次匹配之比,表示为:

$$K = \frac{I_{670} / I_{550^*}}{I_{620} / I_{550}} = \frac{T_{670} [1 - e^{-de(670)}]_L [1 - e^{-de(589)}]_M - [1 - e^{-de(670)}]_M [1 - e^{-de(589)}]_L}{T_{620} [1 - e^{-de(620)}]_L [1 - e^{-de(589)}]_M - [1 - e^{-de(620)}]_M [1 - e^{-de(589)}]_L} \quad (3)$$

其中, I_{550^*} 中的 * 表示采用 620nm 红光时 I_{550} 的新水平,而不是用 670nm 时所测定的值。公式 (3) 表明, K 值依赖于 620nm 或更长波长的感受器前透射率,当波长大于 620nm 时过滤最小。同时, K 值还不受 M 和 L 锥体色素在 550nm 性质的影响。从图 1 可以看到,由于 M 和 L 锥体在 550nm 附近相互交叉并且差

别微小，如果敏感峰波长发生微小位移，它们将几乎不能做出任何反应。而双 Rayleigh 匹配则避开了这一不敏感区域，因此很小的波峰变化将引起较大的 K 值变化^[2]。

K 值可将 L 锥体 $\lambda_{max} \pm 5nm$ 的位移同其他可能原因区分开来，因为 K 值变化是光密度和感受器前光谱吸收（受人眼介质透射率影响）变化最坏情况下的 2 倍^[2]。分别用经典 Rayleigh 匹配和双 Rayleigh 匹配测量 17 位 18—39 岁的男性色觉正常者，发现在经典 Rayleigh 匹配中全部被试的测量值范围约为 0.43~0.6。各被试间差别明显但原因不明，高光密度可以将匹配值移到约 0.44，低光密度则可移到 0.62，因此经典 Rayleigh 匹配测量值只能用光密度变动来解释。双 Rayleigh 匹配中，某些被试的测量值差别大于光密度或感受器前光谱吸收变动的范围值，故表明个体间确实存在着 L 锥体细胞的 λ_{max} 变异，并且这种变异可以定量描述为 3-5nm 的差别^[2]。在一项研究颜色匹配中的个体差异和个体 L 视色素蛋白中 180 号位置氨基酸多型现象关系中，比较 14 名色觉正常的高加索男性被试的经典 Rayleigh 匹配和双 Rayleigh 匹配结果。双 Rayleigh 匹配在辨别被试是携带丝氨酸还是丙氨酸方面比经典 Rayleigh 匹配更精确、更清楚。虽然大样本的经典 Rayleigh 匹配在评估携带丝氨酸或丙氨酸被试的人口分布中 useful，但经典 Rayleigh 匹配测量受感受器前光谱选择性过滤及光密度正常变动等多重因素的影响，不能将引起视色素 λ_{max} 位移的丝氨酸和丙氨酸分离开来。因此经典 Rayleigh 匹配在判断一个特定被试 L 视色素蛋白中 180 号位置上到底是含有丝氨酸还是丙氨酸时并不理想^[9]。双 Rayleigh 匹配的比率对 L 色素的 λ_{max} 的微小差异比对透射率和光密度的差异更敏感^[2]，双匹配比率放大了 L 色素的 λ_{max} 的微小差异，可以将 L 锥体感光色素的 λ_{max} 变化从别的经典 Rayleigh 匹配不能区分的因素中区分开来，因此在评估基因多型现象方面很有用^[9]。

理论计算和实验结果均表明，双重 Rayleigh 匹配扩大了 L 锥体 λ_{max} 效应并且相对控制了光密度和感受器前光谱选择性过滤的影响，将 λ_{max} 位移的影响从感光细胞前吸收与感光细胞光学密度变化中区分出来，因此它比经典 Rayleigh 匹配对锥体 λ_{max} 的微小变化更敏感^[2,9]。基于以上原理并结合实际要求，我们研制出国内第一台全自动双匹配色觉检测仪。

3.2 全自动双 Rayleigh 匹配型色觉检测仪

全自动双匹配色觉检测仪是根据双 Rayleigh 颜色匹配原理设计的一种定量测定人眼色觉状况的仪器。两次独立的 Rayleigh 颜色匹配测量过程由与仪器相连的计算机控制。仪器主要包括光路部分、电路部分和计算机控制部分。其光路示意图见图 2。

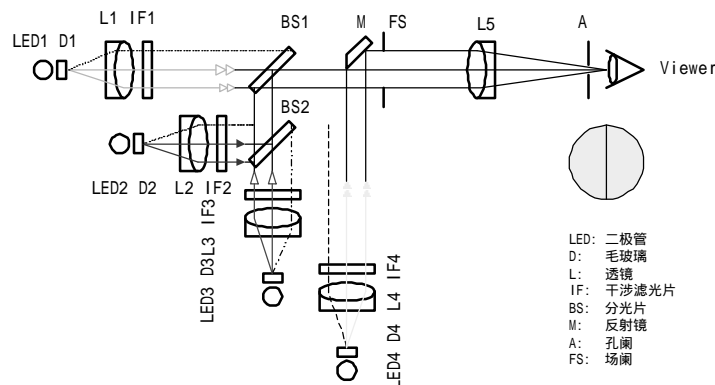


图 2 双 Rayleigh 匹配四光路光学系统示意图

仪器测量参数为：Rayleigh 匹配测量值正常者应分布在 0.45~0.5 之间，红色觉异常者分布在 0.55~1.0 之间，绿色觉异常者分布在 0.0~0.4 之间。双重 Rayleigh 匹配 K 值正常者应分布在 1.2~1.5 之间，红色觉异常者分布在 2.5~3.3 之间，绿色觉异常者分布在 1.8~2.2 之间。仪器已获国家实用新型专利（专利批准号：

ZL982074298)。

在仪器研制过程中,研制组使用该实验装置对人眼颜色视觉异常^[10]和人眼色觉老化特性^[11]做了定量测量,并调查了北京、广东、内蒙等地 6 所中学的 2700 名初中学生。根据 Rayleigh 匹配检查结果,共有 55 名绿色色觉异常者(占 2.03%)、16 名红色色觉异常者(占 0.6%)、色盲患者 34 人(占 1.27%);总的色觉异常比例为 3.9%,比色盲检查图检出率(1.9%)高。双 Rayleigh 匹配检查结果表明正常色觉人群有明显的个体差异,可以区分为两个亚群。以上实验和调查结果都表明仪器具有良好的性能,符合设计要求。

临床研究观察了 20 例(40 只眼)眼底病患者,使用色觉检查图、色觉检测仪两种方法进行色觉检查,同时使用眼底血管荧光造影技术判断眼底病变情况,然后将三种检查结果进行对照。选 2 例情况列于表 1。

表 1 二例临床病例情况

病例	色觉检查结果				荧光造影诊断结论
	色盲图		色觉仪		
	右	左	右	左	
郑 XX(女, 66 岁)	通过	通过	轻度绿色异常(0.38)	重度绿色异常(0.30-0.70)	双眼糖尿病视网膜病变
迟 XX(男, 48 岁)	通过	通过	轻度绿色异常(0.36, 1.65)	轻度红色异常(0.61, 2.28)	右眼黄斑微血管瘤样改变, 左眼小玻璃疣, 除外 RPE 脱离

病例一: 郑 XX, 女, 门诊为糖尿病患者, 色盲图检查两眼均通过, 色觉检测仪检查结果表明两眼均存在不同程度的绿色异常, 荧光造影的结果显示糖尿病导致眼底病变。

病例二: 迟 XX, 男, 门诊为左眼中心性浆液性视网膜炎, 色盲图检查两眼均通过, 但色觉仪检查结果表明, 右眼轻度绿色异常, 左眼轻度红色异常, 荧光造影的结果显示右眼黄斑微血管瘤样改变, 左眼小玻璃疣, 除外视网膜色素细胞脱离(表 1 中 0.38、0.61 等为 Rayleigh 匹配中点值; 1.65、2.28 等为双 Rayleigh 匹配 K 值)。

40 只眼中有 37% 色盲图检查通过而色觉仪检查发现异常, 并且色觉仪检查结果与眼底荧光造影诊断同步。本仪器能诊断出临床上眼底病变引发的颜色视觉改变, 检测敏感性明显高于色盲图, 并与临床初诊、眼底荧光造影诊断基本相符; 能进行定量测量, 对眼底病尤其是黄斑病变的早期诊断具有重要临床价值; 由于分级精确, 对疾病的预后具有指导作用。

双 Rayleigh 匹配型色觉检测仪的优势表现在: (1) 与假同色图、色子排列等传统检测方法只能定性相比, 能对受测者的颜色视觉状况进行定量排序, 并定性鉴定色觉是正常还是异常, 同时定量区分正常的两个亚型和异常的红、绿色弱或色盲; (2) 仪器对眼底病变引发的色觉改变敏感性明显高于色盲检查图, 仪器能很好反映出临床上眼底病变所引发的颜色视觉的改变; (3) 仪器由计算机控制, 测量精确, 操作简单, 使用安全、快捷, 检测结果易确认, 色觉状况分类清晰, 因此适合不同检测环境要求。

4 结语

颜色视觉是前感受器、视网膜、视神经以及大脑视觉皮层重要的心理和生理分析指标, 而它的变化是人眼黄斑和视神经病变最敏感的早期指标^[12]。对颜色视觉的精细测量有助于对临床眼科疾病的早期诊断和预后评估^[13]。颜色视觉是眼科术后恢复程度的一个重要指标^[14], 先进的测量方法和技术对评估治疗效果有重要作用。

正常和异常色觉者皆有基因数量差异或杂交基因存在, 同时颜色视觉明显的个体差异可能是不同基因型的表型^[15]。基础理论研究、临床诊断以及从事与色觉相关的社会活动都迫切需要对个体颜色视觉状况和程度进行准确测量^[1]。人眼色觉存在老化现象^[11,16], 而通常的定性检测无法鉴别出色觉老化过程的细微变

化。不同人类种群色觉异常状况存在明显差异^[8]，现有的人眼颜色视觉检查手段，如色盲图、色子排列仅能定性而不能定量，更不能精细地划分色觉类型。双 Rayleigh 匹配方法及全自动双匹配色觉检测仪基本满足了这个需求。

参考文献

- [1] 池海宏,孙秀如,许宗惠.先天性色觉异常的特性及检查方法.心理科学,1997,20:239~242
- [2] He J, Shevell S K. Individual differences in cone photopigments of normal trichromats measured by Dual-Rayleigh-Type color matches. *Vision Research*, 1994, 34: 367~376
- [3] He J C, Shevell S K. Variation in color matching and discrimination among deuteranomalous trichromats: theoretical implications of small differences in photopigments. *Vision Research*, 1995, 35(18): 2579~2588
- [4] Shevell S K, He J. The visual photopigments of simple deuteranomalous trichromats inferred from color matching. *Vision Research*, 1997, 37(9): 1115~1127
- [5] Merbs S L, Nathans J. Absorption spectra of the hybrid pigments responsible for anomalous color vision. *Science*, 1992, 258: 464~466
- [6] Sanocki E, Teller D Y, Deeb S S. Rayleigh Match Ranges of Red/Green Color Deficient Observers: Psychophysical and Molecular Studies. *Vision Research*, 1997, 37(14): 1897~1907
- [7] Neitz J, Jacobs G H. Polymorphism in normal human color vision and its mechanism. *Vision Research*, 1990, 30: 621~636
- [8] Jordan G, Mollon J D. Rayleigh Matches and Unique Green. *Vision Research*, 1995, 35(5): 613~620
- [9] Sanocki E, Shevell S K, Winderickx J. Serine/Alanine Amino Acid Polymorphism of the L-Cone Photopigment Assessed by Dual Rayleigh-Type Color Matches. *Vision Research*, 1994, 34(3): 377~382
- [10] 孙沛,韩布新,孙秀如等.对人眼颜色觉异常的定量测量.心理学报,1999,31(4): 390~396
- [11] 孙沛,孙秀如.采用 Rayleigh 颜色匹配对人眼色觉老化特性的测量.心理科学,2001,24 (6): 730~731
- [12] Smith V C, Pokorny J, Diddie K R. Color matching and the Stiles-Crawford effect in observers with early age-related macular changes. *Journal of the Optical Society of America*, 1988, 5(12): 2113~2121
- [13] 刘芳. Panel D-15 和俞自萍色盲检查图对晶体摘除术前、后的色觉检查.中国实用眼科杂志,1997,15(7): 400~402
- [14] 梁平,梁慷,孙红.后房型人工晶体植入术后的色觉改变.中国实用眼科杂志,1997,15(7): 399~400
- [15] Nathans J. The evolution and physiology of human color vision: Insights from molecular genetic studies of visual pigments. *Neuron*, 1999, 24: 299~312
- [16] Swanson W H, Fish G E. Age-related changes in the color-match-area effect. *Vision Research*, 1996, 36(14): 2079~2085

The Dual-Rayleigh Match And The Measurement Of Color Vision

Wen Junqing, Han Buxin, Sun Xiuru, Sun Pei

(Key Lab of Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101)

Liu Yuhua, Li Donghui

(Department of Ophthalmology, Peking Union Medical College Hospital, Beijing 100730)

Abstract: Anomaloscopes were widely used in the color vision field recently, most of them are based on the classical Rayleigh Match theory. The mechanism and the clinical application of the classical Rayleigh Match and the improved Rayleigh Match were introduced first in this paper. Based on this, then, the dual-Rayleigh Match theory and a new instrument for measuring color vision were introduced in detail, including several investigated datum collected with this instrument.

Key words: abnormal color vision, classical Rayleigh Match, dual-Rayleigh Match.