

# 不同颜色光对正视眼与近视眼调节反应和调节微波动影响的比较

张黎悦 郭东煜 谢忱 杨倩婕 孙远 童剑萍 沈晔

浙江大学医学院附属第一医院眼科, 杭州 310003

通信作者: 沈晔, Email: idrshen@zju.edu.cn

**【摘要】 目的** 比较视觉显示终端上不同色光产生冲突的刺激对近视眼和正视眼调节反应及调节微波动的影响,探讨色光、调节与近视发生和发展之间可能的关系。**方法** 采用非随机对照研究设计,纳入 2020 年 1—5 月于浙江大学医学院附属第一医院就诊的 22~30 岁受试者 41 人 41 眼,其中近视组 22 人 22 眼,正视组 19 人 19 眼,受试者色觉正常且无眼部器质性疾病。干预措施为不同色光屏幕,共有 7 种色光类型,分别是 3 种单色光(红、绿、蓝)、3 种双色光(红+绿、红+蓝、绿+蓝)和 1 种混合光(白色:红+绿+蓝)。受试者持续注视 33 cm 处可视性视频终端上的黑色 E 视标 20 s 以上,随机变换屏幕背景颜色,用 Grand Seiko WAM-5500 开放视野自动验光仪每 0.2 s 自动检测 1 次,记录受试者调节反应,调节微波动以调节反应的标准差计算,比较各组受试眼不同色光条件下调节反应值和调节微波动。**结果** 近视组与正视组调节反应值总体比较差异无统计学意义( $F_{\text{分组}} = 2.626, P = 0.113$ ),不同色光条件下调节反应值总体比较差异有统计学意义( $F_{\text{色光}} = 39.070, P < 0.01$ )。各种色光对近视组和正视组的影响趋势相似,均为红光单色光调节反应值最大,其次为含红光的混合光,而蓝光单色光最小,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。正视组红、绿、蓝、红+蓝、红+绿、蓝+绿和白色光条件下调节微波动值分别为(0.142±0.033)、(0.128±0.038)、(0.131±0.043)、(0.139±0.039)、(0.127±0.034)、(0.131±0.043)和(0.139±0.042)D,近视组分别为(0.178±0.043)、(0.164±0.043)、(0.159±0.039)、(0.174±0.042)、(0.166±0.036)、(0.159±0.031)和(0.174±0.035)D,总体比较差异均有统计学意义( $F_{\text{分组}} = 12.146, P < 0.01; F_{\text{色光}} = 2.782, P < 0.05$ ),其中每种色光下近视组调节微波动值均高于正视组,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ );近视组红光调节微波动最大,显著大于蓝光,蓝绿混合光最小,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ );双色光的调节微波动与组成该光的 2 种单色光的调节微波动比较差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),混合光(白光)与组成该光的 3 种单色光的调节微波动差异亦无统计学意义( $P > 0.05$ );正视组不同色光条件下调节微波动差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。**结论** 近视者调节微波动比正视者大;包含长波长色光的刺激引起的调节微波动更大,但混合色光提供冲突的调节刺激并不会显著增加调节微波动。

**【关键词】** 近视; 正视; 眼调节; 色光; 调节反应; 调节微波动

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(8220040041); 国家卫生健康委员会(原国家卫生和计划生育委员会)科研基金项目(2018273457); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA16040200)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20200916-00646

## Comparison of the effects of different chromatic lights on accommodative response and microfluctuation in myopes and emmetropes

Zhang Liyue, Guo Dongyu, Xie Chen, Yang Qianjie, Sun Yuan, Tong Jianping, Shen Ye

Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310003, China

Corresponding author: Shen Ye, Email: idrshen@zju.edu.cn

**【Abstract】 Objective** To explore the effects of conflicting stimuli generated by different chromatic lights on visual display terminal (VDT) on accommodative response and microfluctuation of myopes and emmetropes, and to investigate the possible relationship between chromatic light, accommodation and the development and progression of myopia. **Methods** A non-randomized controlled trial was conducted. Forty-one subjects aged 22 to 30 years old were enrolled, including 19 emmetropes in emmetropic group and 22 myopes in myopic group. The subjects had the normal color vision and no ocular organic diseases. The interventions were screens of different colors. There were 7 chromatic light conditions, including 3 monochromatic lights (red, green, blue), 3 bichromatic lights (red+green, red+blue, green+blue) and 1 polychromatic light (white = red+green+blue). Subjects were asked to look at a black E

target on a VDT at a distance of 33 cm for more than 20 seconds. The background color of the VDT was changed randomly in the 7 chromatic light conditions. The accommodative responses were recorded with the Grand Seiko WAM-5500 automatic infrared refractor every 0.2 seconds and the accommodative microfluctuation was calculated as the standard deviation of the accommodative response. Accommodative response and accommodative microfluctuation under different chromatic light conditions were compared. This study adhered to the Declaration of Helsinki. The study protocol was approved by the Ethics Committee of the First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine (No. 2019-1564). Written informed consent was obtained from each subject. **Results** No statistically significant difference was found in the accommodative response between the two groups ( $F_{\text{group}} = 2.626, P = 0.113$ ). There was a statistically significant difference under different chromatic light conditions between the two groups ( $F_{\text{light}} = 39.070, P < 0.01$ ). There were similar trends in the effects of various color lights in both groups, with the largest accommodative response under monochromatic red light, followed by the bichromatic light containing red light, and then the smallest accommodative response under monochromatic blue light, and the differences were statistically significant (all at  $P < 0.05$ ). The accommodative microfluctuations under red, green, blue, red+blue, red+green, blue+green and white light conditions were ( $0.142 \pm 0.033$ ), ( $0.128 \pm 0.038$ ), ( $0.131 \pm 0.043$ ), ( $0.139 \pm 0.039$ ), ( $0.127 \pm 0.034$ ), ( $0.131 \pm 0.043$ ) and ( $0.139 \pm 0.042$ ) D in emmetropic group, and ( $0.178 \pm 0.043$ ), ( $0.164 \pm 0.043$ ), ( $0.159 \pm 0.039$ ), ( $0.174 \pm 0.042$ ), ( $0.166 \pm 0.036$ ), ( $0.159 \pm 0.031$ ) and ( $0.174 \pm 0.035$ ) D in myopic group, respectively, showing statistically significant differences between them ( $F_{\text{group}} = 12.146, P < 0.01$ ;  $F_{\text{light}} = 2.782, P < 0.05$ ). The accommodative microfluctuations under the 7 light conditions were higher in myopic group than in emmetropic group, and the differences were statistically significant (all at  $P < 0.05$ ). In myopes, the accommodative microfluctuation was the largest under red light, which was significantly larger than that under blue light, and was the smallest under blue + green light (all at  $P < 0.05$ ). There was no significant difference in the accommodative microfluctuation between bichromatic light and its two monochromatic lights, or between the polychromatic light (white light) and its three monochromatic lights (all at  $P > 0.05$ ). There was no significant effect of various chromatic lights on the accommodative microfluctuation in emmetropic group (all at  $P > 0.05$ ). **Conclusions** The accommodative microfluctuation is greater in myopes than in emmetropes. The stimuli produced by long-wavelength light cause larger accommodative microfluctuation, while conflicting stimuli generated by different chromatic lights do not increase accommodative microfluctuation.

**[Key words]** Myopia; Emmetropia; Accommodation, ocular; Chromatic light; Accommodative response; Accommodative microfluctuation

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (8220040041); Science Foundation of National Health and Family Planning Commission (2018273457); The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA16040200)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20200916-00646

近年来,近视已成为全球性的健康和社会问题。据预测,2050 年全世界近视患者将高达总人口的 49.8%<sup>[1]</sup>。有研究发现,中国 18 岁的在校青少年近视患病率约为 80%<sup>[2]</sup>。因此,探索近视的发病机制是大家关注的热点。研究表明,近视可能是基因与环境共同作用的结果,环境光的光谱与近视的发展有关<sup>[3-5]</sup>。光进入人眼,存在纵向色像差,即长波长的光通过相同的眼内屈光系统其焦点落在短波长光的后面。研究发现由于纵向色像差,488~700 nm 波长光的调节反应值有 1.00 D 的差异<sup>[6]</sup>。人们日常使用的视觉显示终端(visual display terminal, VDT),大部分屏幕由三原色光点(红、绿、蓝)组成,人眼看到的白色是 3 种可视光的叠加,青色、黄色和紫色是基本色组合的双色光。多色显示器上提供的是需要不同调节反应相互冲突的刺激,而非单一的调节刺激。这种冲突的刺激可能导致

每次新的注视,调节会在不同的焦点间波动。当注视着一个静止的目标时,眼的调节并不是绝对稳定而是在上下约 0.5 D 的范围内波动,人们将这种微小的震荡命名为调节微波动<sup>[7]</sup>。部分研究发现,近视人群的调节微波动显著大于正视人群,调节微波动可能与近视的发生和发展有关<sup>[8-9]</sup>。我们推测,当人注视显示器上混合光时,调节会在不同焦点之间震荡而影响调节反应和调节微波动。虽然 VDT 上不同文本-背景颜色组合对调节反应和调节微波动无显著性影响<sup>[10-11]</sup>,但混色光对不同屈光状态人群的调节反应和调节微波动是否存在影响,及其对近视发生和发展的可能影响机制并不清楚。本研究拟探讨色光对正视、近视者调节反应和调节微波动的影响以及色光、调节与近视发生和发展之间可能的关系,以期对近视的防控提供更多依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

采用非随机对照研究设计方法,纳入 2020 年 1—5 月于浙江大学医学院附属第一医院就诊的 22~30 岁受试者 41 人 41 眼,均取右眼纳入研究。所有受试者的色觉和调节幅度均正常、柱镜度 $<0.75$  D、双眼屈光参差 $<1.0$  D,最佳矫正视力 $>1.0$ ,且无眼部器质性疾病。将受试者分为近视组 22 人和正视组 19 人。其中近视组男女各 11 人,平均年龄 $(25.55\pm 1.57)$  岁,双眼等效球镜度为 $-1.00\sim -6.00$  D,右眼平均等效球镜度为 $(-4.13\pm 1.12)$  D;正视组男 8 人,女 11 人,平均年龄 $(25.89\pm 1.15)$  岁,双眼等效球镜度为 $-0.50\sim +0.50$  D,右眼平均等效球镜度为 $(-0.11\pm 0.43)$  D。2 个组年龄和性别构成比比较,差异均无统计学意义( $t=-0.803$ ,  $P=0.427$ ;  $\chi^2=0.256$ ,  $P=0.613$ )。本研究遵循《赫尔辛基宣言》,研究方案经浙江大学医学院附属第一医院伦理委员会审核批准(批文号:2019 科研快审第 1564 号),所有受试者均自愿参加本试验并签署知情同意书。

### 1.2 方法

**1.2.1 试验室环境及设备** 本试验在暗室中进行,除视标屏幕之外无其他光源。采用 WAM-5500 开放视野自动验光仪(日本 Grand Seiko 株式会社)高速模式连续检测受试者右眼的调节反应,仪器精度为 $0.01$  D,检测频率为 $5$  Hz,仪器可自动去除瞬目数据。

**1.2.2 视标设计** 在 12.3 英寸计算机(美国微软公司 Surface Pro 7 系列)屏幕中间显示 1 个黑色的 Snellen E 视标,视角为 $1.59'$ 。计算机屏幕放置在距离角膜 $33$  cm 处。屏幕背景有 7 种不同色光类型,控制屏幕亮度,平均亮度为 $12.46$  lx,分别是 3 种单色光,即红色(RGB 为 $255,0,0$ ,主波波长为 $611$  nm)、绿色(RGB 为 $0,255,0$ ,主波波长为 $547$  nm)和蓝色(RGB 为 $0,0,255$ ,主波波长为 $463$  nm);3 种双色组合光,即红色+绿色(RGB 为 $255,255,0$ )、红色+蓝色(RGB 为 $255,0,255$ )和绿色+蓝色(RGB 为 $0,255,255$ );以及 1 种混合光(白光),即红色+蓝色+绿色(RGB 为 $255,255,255$ ) (图 1)。采用 OHSP-350C 光谱彩色照度计(杭州虹谱光色科技有限公司)检测视标波长及亮度。

**1.2.3 一般眼科检查、屈光状态及色觉检查** 采用裂隙灯显微镜(BM900 型,瑞士 Haag-Streit 公司)及检眼镜(YZ11D 型,苏州六六视觉科技股份有限公司)对受试者进行常规眼前后节检查以排除眼部器

质性疾病。采用《俞自萍色盲检查图》(第 6 版)检查受试者色觉,排除色觉异常者。采用电脑验光和主觉验光结合检查屈光度,最终以主觉验光为准。采用 RK-F2 全自动验光角膜曲率仪(日本 Canon 公司)验光后,按照最正之最佳视力原则由同一位医师采用 RT-600 综合验光仪(日本 Nidek 公司)进行小瞳孔下主觉验光。

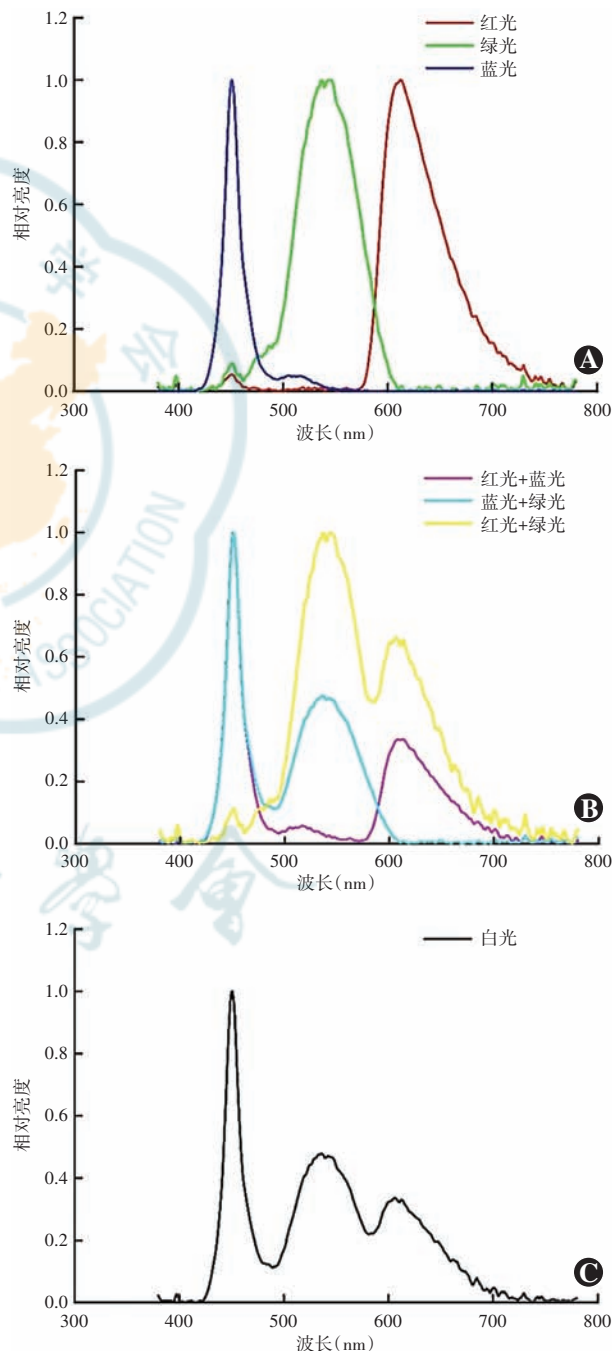


图 1 7 种色光光谱图 A:3 种单色光 B:3 种双色组合光 C:1 种混合光

Figure 1 Spectrum of seven chromatic lights A: Three monochromatic lights B: Three bichromatic lights C: One polychromatic light

**1.2.4 调节反应及调节微波动测量** 近视组受试者均在试验前 30 min 戴上软性角膜接触镜矫正视力, 保证矫正视力 > 1.0 (戴镜矫正度数经过顶点换算, 顶点距离取 12 mm)。受试者进入暗室后适应 5 min, 下颌固定在下颌托架上, 保持受试者右眼视轴、验光仪光轴、视标在同一水平线上。遮盖受试者左眼, 嘱受试者用右眼注视 E 视标, 始终保持视标清晰。随机变换 7 种屏幕背景颜色 (视标设置详见 1.2.2), 每种颜色屏幕持续注视 20 s 以上, 每次注视后休息 2 min 以上。采用 WAM-5500 开放视野自动验光仪的高速模式 (5 Hz), 每 0.2 s 自动检测 1 次受试者动态调节反应值 (为实时屈光度数的绝对值)。删除因瞬目导致的异常数据, 以连续测量 20 s 内 100 次实时调节反应值的平均值计算为该色光条件下的调节反应值, 以 100 次实时调节反应值的标准差计算调节微波动大小<sup>[10]</sup>。

**1.3 统计学方法**

采用 SPSS 20.0 统计学软件进行统计分析。计量资料的数据经 Kolmogorov-Smirnov 检验证实符合正态分布, 以  $\bar{x} \pm s$  表示, 经 Levene 检验证实方差齐, 当数据不满足球形检验时采用 Greenhouse-Geisser 法校正。各组受试眼不同色光条件下调节反应值和调节微波动的差异比较采用重复测量两因素方差分析, 两两比较采用 LSD-*t* 检验。P < 0.05 为差异有统计学意义。

**2 结果**

**2.1 各组受试眼不同色光条件下调节反应值比较**

近视组与正视组调节反应值总体比较差异无统计学意义 ( $F_{\text{分组}} = 2.626, P = 0.113$ ), 不同色光条件下调节反应值总体比较差异有统计学意义 ( $F_{\text{色光}} = 39.070, P < 0.01$ )。各种色光对近视组和正视组的影响趋势相似, 均为红光单色光调节反应值最大, 其次为含红光的混合光, 而蓝光单色光最小, 差异均有统计学意义 (均  $P < 0.05$ ) (表 1)。

**2.2 各组受试眼不同色光条件下调节微波动值比较**

各组受试眼不同色光条件下调节微波动总体比较差异均有统计学意义 ( $F_{\text{分组}} = 12.146, P < 0.01$ ;  $F_{\text{色光}} = 2.782, P < 0.05$ ), 其中每种色光下近视组调节微波动值均大于正视组, 差异均有统计学意义 (均  $P < 0.05$ ); 近视组红光调节微波动最大, 显著大于蓝光, 蓝绿混合光最小, 差异均有统计学意义 (均  $P < 0.05$ ); 双色光的调节微波动与组成该光的 2 种单色光的调节微波动差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ ), 混合光 (白光) 与组成该光的 3 种单色光的调节微波动比较差异亦无统计学意义 ( $P > 0.05$ ); 正视组不同色光条件下调节微波动比较差异均无统计学意义 (均  $P > 0.05$ ) (表 2)。

表 1 各组不同色光条件下调节反应值比较 ( $\bar{x} \pm s, D$ )

Table 1 Comparison of accommodative response values under different color light conditions between two groups ( $\bar{x} \pm s, D$ )

组别	眼数	不同色光条件下调节反应值						
		红	绿	蓝	红+蓝	红+绿	蓝+绿	白
正视组	19	2.389±0.204	2.140±0.207 <sup>a</sup>	1.915±0.298 <sup>ab</sup>	2.275±0.254 <sup>abc</sup>	2.198±0.211 <sup>ac</sup>	2.058±0.262 <sup>acde</sup>	2.208±0.242 <sup>acdf</sup>
近视组	22	2.532±0.348	2.304±0.294 <sup>a</sup>	2.048±0.415 <sup>ab</sup>	2.370±0.318 <sup>ac</sup>	2.310±0.267 <sup>ac</sup>	2.208±0.274 <sup>abcde</sup>	2.291±0.277 <sup>acdf</sup>

注:  $F_{\text{分组}} = 2.626, P = 0.113; F_{\text{色光}} = 39.070, P < 0.01; F_{\text{交互作用}} = 0.389, P = 0.835$ 。与组内红光比较, <sup>a</sup> $P < 0.05$ ; 与绿光比较, <sup>b</sup> $P < 0.05$ ; 与蓝光比较, <sup>c</sup> $P < 0.05$ ; 与红光+蓝光比较, <sup>d</sup> $P < 0.05$ ; 与红光+绿光比较, <sup>e</sup> $P < 0.05$ ; 与蓝光+绿光比较, <sup>f</sup> $P < 0.05$  (重复测量两因素方差分析, LSD-*t* 检验)

Note:  $F_{\text{group}} = 2.626, P = 0.113; F_{\text{light}} = 39.070, P < 0.01; F_{\text{interaction}} = 0.389, P = 0.835$ . Compared with red light within the same group, <sup>a</sup> $P < 0.05$ ; compared with green light, <sup>b</sup> $P < 0.05$ ; compared with blue light, <sup>c</sup> $P < 0.05$ ; compared with red+blue light, <sup>d</sup> $P < 0.05$ ; compared with red+green light, <sup>e</sup> $P < 0.05$ ; compared with blue+green light, <sup>f</sup> $P < 0.05$  (Two-way repeated measures ANOVA, LSD-*t* test)

表 2 各组不同色光条件下调节微波动值比较 ( $\bar{x} \pm s, D$ )

Table 2 Comparison of accommodative microfluctuation values under different color light conditions between two groups ( $\bar{x} \pm s, D$ )

组别	眼数	不同色光条件下调节微波动值						
		红	绿	蓝	红+蓝	红+绿	蓝+绿	白
正视组	19	0.142±0.033	0.128±0.038	0.131±0.043	0.139±0.039	0.127±0.034	0.131±0.043	0.139±0.042
近视组	22	0.178±0.043 <sup>a</sup>	0.164±0.043 <sup>a</sup>	0.159±0.039 <sup>ab</sup>	0.174±0.042 <sup>a</sup>	0.166±0.036 <sup>a</sup>	0.159±0.031 <sup>abc</sup>	0.174±0.035 <sup>ad</sup>

注:  $F_{\text{分组}} = 12.146, P < 0.01; F_{\text{色光}} = 2.782, P < 0.05; F_{\text{交互作用}} = 0.303, P = 0.935$ 。与正视组比较, <sup>a</sup> $P < 0.05$ ; 与组内红光比较, <sup>b</sup> $P < 0.05$ ; 与红光+蓝光比较, <sup>c</sup> $P < 0.05$ ; 与蓝光+绿光比较, <sup>d</sup> $P < 0.05$  (重复测量两因素方差分析, LSD-*t* 检验)

Note:  $F_{\text{group}} = 12.146, P < 0.01; F_{\text{light}} = 2.782, P < 0.05; F_{\text{interaction}} = 0.303, P = 0.935$ . Compared with respective emmetropic group, <sup>a</sup> $P < 0.05$ ; compared with red light within the same group, <sup>b</sup> $P < 0.05$ ; compared with red+blue light, <sup>c</sup> $P < 0.05$ ; compared with blue+green light, <sup>d</sup> $P < 0.05$  (Two-way repeated measures ANOVA, LSD-*t* test)

### 3 讨论

本研究发现光谱对人眼调节反应有显著影响。波长越长的光能引起更大的调节反应,而双色组合光的调节反应位于组合成该光的 2 种光的调节反应之间,混合光(白光)的调节反应位于红色、蓝色光之间。单色光、双色光、混合光的调节反应符合纵向色像差的分布<sup>[6]</sup>,即长波长光折射率小,经眼屈光介质成像于视网膜之后,比短波长光需要更大的调节反应。Kröger 等<sup>[12]</sup>研究发现,选择性地消除长波长光成分能显著减少人眼约 0.5 D 的调节刺激,认为无论是在蓝光下还是从优先反射短波长光的纸张上阅读,都可能减少近视的发展。人眼对纵向色像差的反应可能在近视的发生和发展机制中起到一定作用<sup>[13-14]</sup>。一些动物实验发现,红光可促进豚鼠和鸡等眼轴增长及近视发生,蓝光对近视的发生有抑制作用<sup>[5]</sup>。但也有一些研究发现,红光能防止恒河猴和树鼩近视,蓝光促进近视<sup>[15-16]</sup>。这些相互矛盾的研究结果,可能是因为实验光光照的强度、时间、节律、实验动物年龄、物种和视锥细胞色素吸收曲线等不同导致的,因此,纵向色相差对近视的作用仍有待深入研究<sup>[15,17]</sup>。

本研究发现,受试者对不同波长光的调节反应符合纵向色像差的规律,但近视者与正视者的调节反应值在各种色光下比较差异无统计学意义,与 Day 等<sup>[8]</sup>和 Langaas 等<sup>[18]</sup>的研究一致;而也有研究者发现在混合光下近视者调节反应显著小于正视者<sup>[19]</sup>。研究发现的近视与正视人群调节反应矛盾的矛盾结果可能与纳入人群的近视程度有关,进展性近视人群调节反应显著小于正视人群,而稳定性近视人群则与正视人群无差异<sup>[20]</sup>。本研究中受试人群均为稳定性近视的成年人,这可能是导致其与正视人群调节反应无显著性差异的原因。

本研究也发现近视人群的调节微波动大于正视人群,这与一些研究结果相似<sup>[9,19,21]</sup>,但也有研究发现不同屈光状态间的调节微波动差异无统计学意义<sup>[22]</sup>。Langaas 等<sup>[9]</sup>研究发现,调节微波动对近视的发展有预测作用,可能是近视发生和发展的危险因素,其所引起的视网膜离焦是造成近视的潜在原因<sup>[9]</sup>。近视患者有更大的焦深和较浅的对比度梯度,增大的焦深增加了模糊检测阈值,使其对视网膜模糊的敏感性降低,需要更大的调节微波动才能引起足够的调节反应<sup>[8,23-24]</sup>。视网膜离焦可以通过时间累积,最终导致眼轴拉长<sup>[25]</sup>。

本研究还发现,色光对人眼调节微波动的影响较小,仅在近视组中发现红光干预下的人眼调节微波动

高于蓝光和蓝绿混合光。人可以通过感知视网膜图像光谱波段的对比度,通过纵向色像差,为调节提供方向性的信号,以获得视网膜最清晰的聚焦<sup>[26]</sup>。在视网膜上,红光焦点落在蓝光之后,且需要更多的调节反应。VDT 上不同颜色组合产生的相互冲突刺激,尤其是当 2 种颜色充分饱和且其波长的纵向色像差大于眼的焦点深度时,可能会对视网膜产生混乱冲突的方向性信号,导致调节不能准确聚焦,破坏了调节的神经控制,可能会增加调节微波动<sup>[10-11]</sup>。但本研究发现,VDT 上单色光与由其组成的双色光和混合光的调节微波动比较差异无统计学意义。Atchison 等<sup>[11]</sup>研究发现,在 VDT 上与宽带的黑底白字相比,多色组合的目标不会显著增加调节微波动。Jiménez 等<sup>[10]</sup>研究人面对不同颜色字体-背景组合电子屏幕时的调节微波动,也发现不同颜色组合、不同极性对调节微波动均无显著性影响。综合说明调节可能并非单一由视网膜感受的光谱波段决定,而是存在其他影响因素,如主观对颜色的偏好<sup>[27]</sup>。虽然混合光的微波动并未显著大于单色光,但本研究发现单色光里,红光条件下的调节微波动显著大于蓝光,这可能与波长不同导致的调节反应大小不同有关。Day 等<sup>[8]</sup>和 Harb 等<sup>[28]</sup>均发现调节反应值越大,调节微波动越大。本研究中红色光条件下调节反应值显著大于蓝色光,因此光对人眼调节微波动的影响可能是由光导致的不同调节反应值引起的。动物实验中发现,红光促进近视,蓝光抑制近视,其机制尚未阐明<sup>[5]</sup>。本研究发现,包含长波长色光的调节微波动更大,而更大的调节微波动被认为与近视的发生和发展有关。动物实验中红光能促进近视可能是由于红光导致更大的调节微波动。色光对近视发生和发展的影响有待进一步研究。同时,本研究结果显示光谱波长对近视组的调节微波动有显著影响,而对正视组无明显影响。Rucker 等<sup>[26]</sup>发现,近视人群比正视人群本身对颜色对比度更加敏感。在一项涉及 16 539 名中国学生的研究中发现,红/绿色盲的学生眼轴更短,近视程度更低,色觉缺陷可能会影响近视的发生和发展<sup>[29]</sup>。近视人群本身比正视人群对颜色更敏感可能导致光谱对近视人群的微波动影响更大,从而影响近视的发生和发展。本研究对象仅涉及稳定性近视的成年人,而未包括儿童及色盲者,不同人群对色光的调节反应和调节微波动值得进一步研究;同时,本研究仅探讨了 33 cm 距离色光的影响,不同距离下的影响也有待进一步探讨。

综上,本研究发现近视者调节微波动比正视者大,调节微波动可能与近视发生和发展间有一定关联;包

含长波长色光的刺激引起的调节微波动更大,但混合色光提供冲突的调节刺激并不会显著增加调节微波动,色光对近视的影响有待进一步研究。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

**作者贡献声明** 张黎悦: 酝酿和设计试验、实施研究、采集数据、分析/解释数据、文章撰写; 郭东煜: 酝酿和设计试验、实施研究、采集数据、分析/解释数据; 谢忱: 酝酿和设计试验、实施研究、采集/分析数据; 杨倩婕: 实施研究、采集数据; 孙远: 采集数据、文章审阅; 童剑萍: 文章审阅及修改; 沈晔: 酝酿和设计试验、分析数据、文章审阅和修改

## 参考文献

- [1] Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050 [J]. *Ophthalmology*, 2016, 123(5): 1036-1042. DOI: 10.1016/j.ophtha.2016.01.006.
- [2] Jonas JB, Xu L, Wei WB, et al. Myopia in China: a population-based cross-sectional, histological, and experimental study [J/OL]. *The Lancet*, 2016, 388(S1): S20 [2022-06-08]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014067361631947X>. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31947-X.
- [3] Dolgin E. The myopia boom [J]. *Nature*, 2015, 519(7543): 276-278. DOI: 10.1038/519276a.
- [4] Morgan IG, French AN, Ashby RS, et al. The epidemics of myopia: aetiology and prevention [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2018, 62: 134-149. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.09.004.
- [5] Zhang P, Zhu H. Light signaling and myopia development: a review [J]. *Ophthalmol Ther*, 2022, 11(3): 939-957. DOI: 10.1007/s40123-022-00490-2.
- [6] Vinas M, Dorronsoro C, Cortes D, et al. Longitudinal chromatic aberration of the human eye in the visible and near infrared from wavefront sensing, double-pass and psychophysics [J]. *Biomed Opt Express*, 2015, 6(3): 948-962. DOI: 10.1364/BOE.6.000948.
- [7] Charman WN, Heron G. Microfluctuations in accommodation: an update on their characteristics and possible role [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2015, 35(5): 476-499. DOI: 10.1111/opo.12234.
- [8] Day M, Gray LS, Seidel D, et al. The relationship between object spatial profile and accommodation microfluctuations in emmetropes and myopes [J/OL]. *J Vis*, 2009, 9(10): 5. 1-13 [2022-06-08]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19810786/>. DOI: 10.1167/9.10.5.
- [9] Langaas T, Riddell PM. Accommodative instability: relationship to progression of early onset myopia [J]. *Clin Exp Optom*, 2012, 95(2): 153-159. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2011.00699.x.
- [10] Jiménez R, Redondo B, Molina R, et al. Short-term effects of text-background color combinations on the dynamics of the accommodative response [J]. *Vision Res*, 2020, 166: 33-42. DOI: 10.1016/j.visres.2019.11.006.
- [11] Atchison DA, Strang NC, Stark LR. Dynamic accommodation responses to stationary colored targets [J]. *Optom Vis Sci*, 2004, 81(9): 699-711. DOI: 10.1097/O1.opx.0000144749.73094.f.
- [12] Kröger RH, Binder S. Use of paper selectively absorbing long wavelengths to reduce the impact of educational near work on human refractive development [J]. *Br J Ophthalmol*, 2000, 84(8): 890-893. DOI: 10.1136/hjo.84.8.890.
- [13] Rucker FJ, Wallman J. Chicks use changes in luminance and chromatic contrast as indicators of the sign of defocus [J/OL]. *J Vis*, 2012, 12(6): 23 [2022-06-01]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22715194/>. DOI: 10.1167/12.6.23.
- [14] Del Águila-Carrasco AJ, Kruger PB, Lara F, et al. Aberrations and accommodation [J]. *Clin Exp Optom*, 2020, 103(1): 95-103. DOI: 10.1111/cxo.12938.
- [15] Gawne TJ, Ward AH, Norton TT. Long-wavelength (red) light produces hyperopia in juvenile and adolescent tree shrews [J]. *Vision Res*, 2017, 140: 55-65. DOI: 10.1016/j.visres.2017.07.011.
- [16] Hung LF, Arumugam B, She Z, et al. Narrow-band, long-wavelength lighting promotes hyperopia and retards vision-induced myopia in infant rhesus monkeys [J]. *Exp Eye Res*, 2018, 176: 147-160. DOI: 10.1016/j.exer.2018.07.004.
- [17] Smith EL 3rd, Hung LF, Arumugam B, et al. Effects of long-wavelength lighting on refractive development in infant rhesus monkeys [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 56(11): 6490-6500. DOI: 10.1167/iov.15-17025.
- [18] Langaas T, Riddell PM, Svarverud E, et al. Variability of the accommodation response in early onset myopia [J]. *Optom Vis Sci*, 2008, 85(1): 37-48. DOI: 10.1097/OPX.0b013e31815ed6e9.
- [19] 乐融融, 郑志利, 宋佳丽, 等. 青少年正视眼与近视眼调节微波动的差异及其与波前像差的关系 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2015, 33(8): 745-750. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.08.016.
- [20] Le RR, Zheng ZL, Song JL, et al. Association analysis of accommodative microfluctuations and wavefront aberration in emmetropia and myopia in teenagers [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2015, 33(8): 745-750. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.08.016.
- [21] Abbott ML, Schmid KL, Strang NC. Differences in the accommodation stimulus response curves of adult myopes and emmetropes [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 1998, 18(1): 13-20.
- [22] 刁凯, 徐菁菁, 郑志利, 等. 正视和近视学龄儿童调节微波动的对比研究 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2013, 31(6): 555-558. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2013.06.008.
- [23] Diao K, Xu JJ, Zheng ZL, et al. A comparative study on accommodative microfluctuation between emmetropic and myopic school-aged children [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2013, 31(6): 555-558. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2013.06.008.
- [24] Xu J, Lu X, Zheng Z, et al. The effects of spatial frequency on the accommodative responses of myopic and emmetropic Chinese children [J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2019, 8(3): 65 [2022-06-08]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6602141/>. DOI: 10.1167/tvst.8.3.65.
- [25] Day M, Seidel D, Gray LS, et al. The effect of modulating ocular depth of focus upon accommodation microfluctuations in myopic and emmetropic subjects [J]. *Vision Res*, 2009, 49(2): 211-218. DOI: 10.1016/j.visres.2008.10.010.
- [26] Day M, Strang NC, Seidel D, et al. Refractive group differences in accommodation microfluctuations with changing accommodation stimulus [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2006, 26(1): 88-96. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2005.00347.x.
- [27] Wallman J, Winawer J. Homeostasis of eye growth and the question of myopia [J]. *Neuron*, 2004, 43(4): 447-468. DOI: 10.1016/j.neuron.2004.08.008.
- [28] Rucker FJ, Kruger PB. Cone contributions to signals for accommodation and the relationship to refractive error [J]. *Vision Res*, 2006, 46(19): 3079-3089. DOI: 10.1016/j.visres.2006.04.009.
- [29] Drew SA, Borsting E, Stark LR, et al. Chromatic aberration, accommodation, and color preference in asthenopia [J/OL]. *Optom Vis Sci*, 2012, 89(7): E1059-E1067 [2022-06-08]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22733104/>. DOI: 10.1097/OPX.0b013e31825da2f7.
- [30] Harb E, Thorn F, Troilo D. Characteristics of accommodative behavior during sustained reading in emmetropes and myopes [J]. *Vision Res*, 2006, 46(16): 2581-2592. DOI: 10.1016/j.visres.2006.02.006.
- [31] Qian YS, Chu RY, He JC, et al. Incidence of myopia in high school students with and without red-green color vision deficiency [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2009, 50(4): 1598-1605. DOI: 10.1167/iov.07-1362.

(收稿日期: 2022-08-10 修回日期: 2023-02-25)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)

