

doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2018.11.01

View this article at: <http://dx.doi.org/10.3978/j.issn.1000-4432.2018.11.01>

阿托品对单色光中豚鼠屈光发育的干预作用

钱一峰, 肖艳辉, 陈志刚, 陆培荣

(苏州大学附属第一医院眼科, 江苏 苏州 215006)

[摘要] 目的: 研究阿托品作用下豚鼠眼在不同单色光中的屈光发育情况。方法: 24只2周龄3色种豚鼠被随机分成3组, 分别在蓝光(430 nm)、绿光(530 nm)和白光(色温5000k)中饲养。3组豚鼠的双眼从实验开始点1%阿托品滴眼液, 1次/d, 持续6周。实验前后测量豚鼠屈光度和眼球生物参数。结果: 实验开始时3组各测量结果差异均无统计学意义。实验起始时各组平均屈光度约为4.3 D。实验结束时白光组平均屈光度约为4.84D, 绿光组约为3.47D, 蓝光组约为6.19 D, 3组间屈光度差异显著, 且3组前后屈光度变化量比较差异显著。各组玻璃体腔长度在实验开始约为3.3 mm, 实验结束时白光组约为3.25 mm, 绿光组约为3.39 mm, 蓝光组约为3.17 mm。此时白光组与绿光组玻璃体腔长度相比差异显著, 绿光组与蓝光组相比差异显著, 而白光组与蓝光组相比差异无统计学意义。实验结束时3组角膜曲率半径、前房深度和晶状体厚度无统计学差异。结论: 阿托品通过干预豚鼠玻璃体腔长度的变化而影响单色光对屈光发育的作用, 但单色光引起的屈光变化方向不受影响。

[关键词] 正视化; 屈光不正; 调节反应; 阿托品; 单色光; 豚鼠

Intervention effect of atropine on refractive development of guinea pigs in different monochromatic lights

QIAN Yifeng, XIAO Yanhui, CHEN Zhigang, LU Peirong

(Department of Ophthalmology, First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou Jiangsu 215006, China)

Abstract **Objective:** To investigate the effect of atropine on ocular refractive development of guinea pigs in different monochromatic lights. **Methods:** Twenty-four guinea pigs aged 2 weeks were randomly divided into three groups, which were raised in blue light (BL, 430 nm), green light (GL, 530 nm) and white light (WL, color temperature 5000k), respectively. The two eyes of the guinea pigs in the three groups were treated with 1% atropine eye drops once a day for 6 weeks from the beginning of the experiment. The refraction and ocular biological parameters of the guinea pigs were measured before and after the experiment. **Results:** At the beginning of the experiment,

收稿日期 (Date of reception): 2018-10-11

通信作者 (Corresponding author): 陆培荣, Email: lupeirong@suda.edu.cn

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (81400429); 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20140290); 江苏省“科教强卫”青年医学人才项目 (QNRC2016717)。This work was supported by the National Natural Science Foundation (81400429), the Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (BK20140290), the Jiangsu Provincial Medical Youth Talent Project (QNRC2016717), China.

there was no significant difference in every measurement among the three groups. The average refraction of each group was about 4.3 D at the beginning. At the end of the experiment, the average refraction was approximately 4.84 D in the WL, 3.47 D in the GL, and 6.19 D in the BL. The differences in refraction of the three groups were significant, and the refractive changes of the three groups before and after the experiment were significant. The length of vitreous chamber in each group was approximately 3.3 mm at the beginning, but it was approximately 3.25 mm in the WL, 3.39 mm in the GL and 3.17 mm in the BL at the end of the experiment. At this time, there was significant vitreous difference between the WL and the GL, and between the GL and the BL, but there was no significant difference between the WL and the BL in vitreous length. After the experiment, there was no significant difference in the radius of corneal curvature, depth of anterior chamber and lens thickness among the three groups. **Conclusion:** The effect of monochromatic light on refractive development is affected by atropine through intervening the vitreous length in guinea pigs, but the direction of refractive change induced by monochromatic light is not influenced.

Keywords emmetropization; refractive error; accommodation response; atropine; monochromatic light; guinea pig

眼球在生长过程中发生调控性生长使物像焦点落在视网膜上, 这一过程称为眼球的正视化。这里所说的调控通常指视觉对眼球生长的调控, 而受到调控的是眼轴长度, 主要是通过影响玻璃体腔长度和脉络膜厚度达到。在实验研究中, 所使用的视觉刺激包括形觉剥夺(遮盖)^[1-10]、光学离焦(透镜)^[11-19]和单色刺激(单色光)^[20-27]等。例如, 给小鸡附加负透镜后其眼球能产生与透镜度数相当的近视^[13]。在这个过程中, 小鸡眼球发生玻璃体腔的延长和脉络膜变薄以抵消负透镜造成的光学焦点向后移动, 不但眼球生长的方向与焦点移动方向一致, 而且眼球生长的变化量与焦点移动距离相当。在单色光刺激实验中, 无论是焦点向晶状体移动的430 nm单色光, 还是焦点向脉络膜移动的530 nm单色光, 豚鼠眼球都能够跟随单色光焦点变化方向进行生长, 这与透镜诱导的情况相同^[28]。豚鼠眼球这种单色光刺激产生的方向性生长不但在长期刺激下会产生, 而且短期刺激也能够迅速发生^[29-30]。然而豚鼠眼球的生长导致的屈光度变化要高于单色光造成的焦点变化, 达到了数倍于色像差的结果^[28]。这与鱼和鸡的实验研究情况不符, 因为后两者的实验均显示单色光中的屈光补偿量与单色光间的色像差相一致^[20-27,31]。

对于正视眼来说, 中波长的光能最佳的聚焦在视网膜上, 而其他波长的光会发生一定的离焦。有研究指出, 由于同一屈光介质中短波长光的焦点变化较其他波长长, 正视眼中短波长光离焦量最大, 其焦点最靠近晶状体^[27,32]。因此, 通

常眼球聚焦状态下短波长敏感视锥细胞接受短波长光刺激时候短波长光处于近视离焦状态, 而长波长敏感视锥细胞的情况与其相反^[25,33]。在单色光中由于单一类型的视锥细胞受刺激, 此时的视觉机制可能发生变化, 包括调节反应^[34]。单独刺激人短波长敏感视锥细胞时受试眼会发生过度调节的现象, 其原因可能是为了达到短波长敏感视锥细胞感光时倾向于近视离焦, 从而产生过度调节^[33,35]。而长波长光中的情况可能相反, 出现调节不足。因此, 前面提到的单色光中豚鼠过度屈光补偿可能与此时的调节异常有关。即豚鼠在短波长单色光中发生过度调节, 在中波长或长波长单色光中发生调节不足。基于这样的假设, 我们将饲养于不同单色光中的豚鼠进行调节麻痹处理, 观察此时豚鼠眼球的屈光发育情况, 以检验在调节系统受到影响的情况下豚鼠眼能否对单色光刺激产生预测性的生长, 以及还能不能产生早期研究所发现的过度屈光补偿现象。

1 材料与方法

1.1 实验动物和实验设计

24只2周龄三色种豚鼠, 体重90~110 g, 屈光介质透明, 被随机分成3组: 蓝光组、绿光组和白光组。3组分别在不同光照中连续饲养6周。实验过程中按实验动物使用的3R原则给予人道关怀。3组豚鼠的双眼从实验开始点1%阿托品滴眼液, 1次/d。实验前和实验结束时测量所有豚鼠双眼屈

光度、角膜曲率半径和眼轴参数。

1.2 饲养条件和光照设置

豚鼠饲养于暗室, 室内环境温度维持在22~26 °C, 相对湿度55%~65%。专门制作3个木箱用于饲养豚鼠, 木箱四周内壁涂装白色反光涂料, 并开有小窗利于通风。木箱之间用遮光布完全隔开避免光线相互干扰。木箱内壁四周、上方及下方均安置二极管灯管, 每面安装约4~6支。木箱内居中放置豚鼠饲养笼, 尺寸为80 cm×50 cm×40 cm, 网眼大小为1.5 cm×5.0 cm。根据动物分组使用3种不同的二极管灯管: 蓝光组($\lambda_{\max}=430$ nm, 半波宽20 nm), 绿光组($\lambda_{\max}=530$ nm, 半波宽30 nm), 白光组(色温5 000 K)。根据豚鼠视锥细胞光谱敏感曲线, 本研究中蓝光对应豚鼠S视锥细胞光谱吸收峰值, 对M视锥细胞没有刺激作用, 绿光组对应豚鼠M视锥细胞光谱吸收峰值, 对S视锥细胞没有刺激作用^[36]。白光具有覆盖上述两种单色光LED光谱范围的宽光谱且没有偏向。每组灯管光照强度由单独的调压器(德力西TDGZ-50调压器, 调压范围0~250 V)调节, 并用ILT1700科研用辐射仪进行现场检测。已有研究显示豚鼠眼对等亮度和等光子数照明产生相近的屈光发育变化^[28], 本研究选择将各组光照强度设置为光子数一致, 为 3×10^{-4} $\mu\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。测量点与笼内豚鼠眼球处于同一水平面。各组光照时间相同, 由电子定时器统一控制, 光照周期12/12 h(光照时间8 a.m.~8 p.m.)。具体饲养和照明设置参考了已有研究方法^[28,30]。

1.3 眼球光学和生物学参数测量

眼球光学和生物学测量采用单盲法, 由两位研究者完成。由于豚鼠性情温顺且配合检查, 故无需进行全身麻醉。验光过程在暗室中进行, 验光前豚鼠双眼均使用1%阿托品滴眼液(复旦大学附属耳鼻喉科医院)点眼, 3次/d, 持续3 d, 第4天验光。参考文献[37], 屈光度使用带状光检影获得, 以水平和垂直屈光度的平均值记录, 准确度为0.25 D。豚鼠角膜曲率半径由角膜曲率计(OM-4, 日本Topcon公司)前加+8 D镜片检查获得。记录数据为水平和垂直子午线读数的平均值。具体测量方法可见于之前文献中的详细描述^[37-38]。A超(11 MHz; Optikon Hiscan A/B)测量在

上述测量完成后进行, 测量前使用表麻剂0.4%盐酸奥布卡因(日本Santen公司)进行眼球表面麻醉。A超测量参数包括眼轴、前节长度(角膜厚度+前房深度)、晶体厚度和玻璃体腔长度。测量中设置超声波在介质中的传播速度为1 540 m/s(前节和玻璃体腔)和1 645 m/s(晶状体)^[9,37]。测量中各界面回波清晰才可判断为有效测量, 且测量10次取平均值作为最终结果。

1.4 统计学处理

采用STATA 15.0软件进行数据分析。各组豚鼠只取右眼参数。组间参数比较采用方差分析, 两两比较采用Bonferroni法。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 眼球屈光度的变化

实验开始时3组平均屈光度大约为4.3 D ($P=0.9752$, 表1), 但实验结束时3组屈光度差异显著($P < 0.0001$, 表2)。6周时, 白光组平均屈光度约为4.84 D, 绿光组平均屈光度约为3.47 D, 蓝光组平均屈光度约为6.19 D, 各组两两比较差异均有统计学意义($P < 0.05$, 表2)。实验结束时与实验开始时相比, 白光组屈光度增加约0.56 D, 绿光组减少约0.78 D, 蓝光组增加约1.88 D, 3组屈光度变化量比较差异显著($P < 0.0001$, 表3), 各组两两比较差异均有统计学意义($P < 0.05$, 表3)。

2.2 角膜曲率半径、前房深度和晶状体厚度的变化

各组角膜曲率半径实验开始时约3.4 mm ($P=0.8820$, 表1), 实验结束时约3.7 mm ($P=0.3930$, 表2), 实验前后变化量约为0.3 mm ($P=0.8952$, 表3)。各组前房深度实验开始时约1.3 mm ($P=0.5763$, 表1), 实验结束时约1.4 mm ($P=0.0931$, 表2), 实验前后变化量约为0.1 mm ($P=0.2258$, 表3)。各组晶状体厚度实验开始时约3.2 mm ($P=0.9855$, 表1)增加到实验结束时约3.5 mm ($P=0.1663$, 表2), 实验前后变化量约为0.3 mm ($P=0.3623$, 表3)。虽然这些眼球生物学参数在实验前后发生变化, 但无论在实验开始时还是结束时各组间差异无统计学意义(均 $P > 0.05$)。

表1 实验开始时3组右眼的参数

Table 1 Measurement of parameters in the right eyes of guinea pigs among the three groups at the beginning of the experiment

组别	屈光度/D	角膜曲率半径/mm	眼轴长度/mm	前节长度/mm	晶状体厚度/mm	玻璃体腔长度/mm
白光组	4.28 ± 0.78	3.45 ± 0.10	7.83 ± 0.17	1.31 ± 0.04	3.18 ± 0.12	3.33 ± 0.19
绿光组	4.25 ± 0.35	3.45 ± 0.14	7.83 ± 0.18	1.33 ± 0.04	3.19 ± 0.08	3.32 ± 0.15
蓝光组	4.31 ± 0.44	3.42 ± 0.13	7.84 ± 0.21	1.33 ± 0.04	3.18 ± 0.06	3.33 ± 0.21
P	0.9752	0.8820	0.9956	0.5763	0.9855	0.9792

表2 实验结束时3组右眼的参数

Table 2 Measurement of parameters in the right eyes of guinea pigs among the three groups at the end of the experiment

组别	屈光度/D	角膜曲率半径/mm	眼轴长度/mm	前节长度/mm	晶状体厚度/mm	玻璃体腔长度/mm
白光组	4.84 ± 0.64	3.77 ± 0.12	8.15 ± 0.09	1.42 ± 0.03	3.48 ± 0.10	3.25 ± 0.05
绿光组	3.47 ± 0.63*	3.76 ± 0.05	8.35 ± 0.08*	1.42 ± 0.02	3.54 ± 0.05	3.39 ± 0.11*
蓝光组	6.19 ± 0.56** [#]	3.71 ± 0.08	8.03 ± 0.08** [#]	1.40 ± 0.02	3.47 ± 0.08	3.17 ± 0.04** [#]
P	<0.0001	0.3930	<0.0001	0.0931	0.1663	<0.0001

与白光组相比, * $P<0.05$; 与绿光组相比, [#] $P<0.05$ 。

Compared with the white light group, * $P<0.05$; compared with the green light group, [#] $P<0.05$.

表3 实验结束时3组右眼参数变化量

Table 3 Parameter variation in the right eyes of guinea pigs among the three groups after the experiment

组别	屈光度/D	角膜曲率半径/mm	眼轴长度/mm	前节长度/mm	晶状体厚度/mm	玻璃体腔长度/mm
白光组	0.56 ± 1.16	0.32 ± 0.10	0.32 ± 0.16	0.11 ± 0.06	0.30 ± 0.11	-0.08 ± 0.18
绿光组	-0.78 ± 0.66*	0.31 ± 0.16	0.52 ± 0.21	0.09 ± 0.05	0.35 ± 0.07	0.08 ± 0.21
蓝光组	1.88 ± 0.69** [#]	0.29 ± 0.17	0.19 ± 0.21 [#]	0.07 ± 0.04	0.29 ± 0.10	-0.16 ± 0.24
P	<0.0001	0.8952	0.0108	0.2258	0.3623	0.0590

与白光组相比, * $P<0.05$; 与绿光组相比, [#] $P<0.05$ 。

Compared with the white light group, * $P<0.05$; compared with the green light group, [#] $P<0.05$.

2.3 眼轴和玻璃体腔长度的变化

各组眼轴长度在实验开始时均约为7.8 mm($P=0.9956$, 表1)。实验结束时3组间眼轴长度比较差异有统计学意义($P<0.0001$, 表2), 其中白光组平均约为8.15 mm, 绿光组平均约为8.35 mm, 蓝光组平均约为8.03 mm。各组间两两比较均有统计学意义($P<0.05$, 表2)。实验过程中白光组眼轴增长约0.32 mm, 绿光组增长约0.52 mm, 蓝光组增长约0.19 mm。3组眼轴变化量比较显著差异有统计学意义($P=0.0108$, 表3), 其中绿光组与蓝光组两两比较差异显著($P=0.009$, 表3), 而其余两两比较差异无统计学意义。

各组玻璃体腔长度在实验开始时测量值相近, 约为3.3 mm($P=0.9792$, 表1)。实验结束时白光组约为3.25 mm, 绿光组约为3.39 mm, 蓝光组约为3.17 mm, 3组间差异有统计学意义($P<0.0001$, 表2)。此时白光组与绿光组玻璃体腔长度相比差异有统计学意义($P=0.003$, 表2), 绿光组与蓝光组相比显著差异有统计学意义($P<0.001$, 表2), 而白光组与蓝光组相比差异无统计学意义($P=0.127$, 表2)。实验过程中白光组玻璃体腔长度变化为(-0.08±0.18) mm, 绿光组为(0.08±0.21) mm, 蓝光组为(-0.16±0.24) mm, 3组间玻璃体腔长度变化差异无统计学意义($P=0.0590$, 表3)。

3 讨论

各组实验开始时屈光度相近, 当实验结束时发生不同变化。绿光组屈光度减少, 同时伴有显著的眼轴和玻璃体腔长度的延长。蓝光组屈光度增加, 同时伴有显著的玻璃体腔长度缩短。白光组虽然出现前房深度和晶状体厚度增加导致眼轴延长, 但由于玻璃体腔长度略有缩短而使得屈光度有少量增加。整个实验中各组角膜曲率半径、前房深度和晶状体厚度均有增加, 但各个时点水平及变化量比较差异无统计学意义, 说明实验因素对这些参数无影响。

本研究中白光组未出现预测的正视化过程, 反而出现玻璃体腔缩短向远视漂移的情况, 不排除其由实验测量误差、样本量限制、观察时间不足等可能原因引起。另外, 可能原因还包括阿托品对视觉反馈机制的影响以及对正视化效应器如巩膜、脉络膜等塑形变化的影响。

对比已有文献[28-30]报道, 本研究两种单色光中豚鼠眼虽然受到阿托品的作用, 但还能够如前期研究提示的单色像差变化方向进行屈光发育。点阿托品后, 豚鼠眼球的视觉生理受到一定影响, 但单色光诱导信号的方向识别未受到影响, 与预测方向一致。即在短波长单色光中豚鼠眼玻璃体腔延长受到限制, 屈光度向远视发展; 在中波长单色光中豚鼠眼玻璃体腔延长受到促进, 屈光度向近视方向发展^[28]。

本研究绿光组和蓝光组于实验结束时的屈光度差值约为2.7 D, 其仍大于这两种波长单色光间约1.5 D的纵向色像差^[28]。参考已有单纯单色光作用研究^[28], 6周时这两种波长光照后豚鼠眼屈光度差值约为3.8 D, 与本研究6周时结果不同。显然, 在本研究结束时单色光导致的屈光度变化受到一定因素的影响而低于预计度数。再看玻璃体腔长度的差异, 已有研究^[28]报道两组6周时差值约为0.29 mm, 而本研究约为0.22 mm。两项研究中玻璃体腔长度的差异与屈光度差异在数值比例上是一致的。同时也说明单色光等研究因素是通过影响玻璃体腔长度导致屈光度的变化的, 这与正视化及屈光发育理论是一致的。与之前研究^[28]相比, 本研究不同为实验眼加滴阿托品溶液, 单色光光照相同, 但实验结果在数值上产生差别。因此产生差别的原因主要在加滴的阿托品溶液上。阿托品产生作用的机制值得讨论和研究。

本研究中, 绿光组与白光组相比6周时屈光度差值约为1.37 D, 玻璃体腔长度差值约为0.14 mm; 蓝光组与白光组相比6周时屈光度差值约为1.35 D, 玻璃体腔长度差值约为0.08 mm。前述研究中^[28], 绿光组与白光组相比6周时屈光度差值约为1.25 D, 玻璃体腔长度差值约为0.11 mm; 蓝光组与白光组相比6周时屈光度差值约为2.50 D, 玻璃体腔长度差值约为0.18 mm。由此可见, 本研究中阿托品对蓝光组的影响大于对绿光组的影响, 其原因及机制值得讨论。

上述讨论已经明确阿托品对单色光诱导豚鼠屈光发育过程会产生影响, 主要表现为影响玻璃体腔长度, 从而导致屈光度变化幅度减少, 但方向不受影响。同时, 阿托品对中波长光的作用影响不大, 但对短波长光的作用影响较大。结合阿托品对调节麻痹的作用可以推测: 中波长光对豚鼠眼的调节影响不大; 豚鼠在短波长光中很可能发生调节过强。这与之前研究^[33,35]提示的受试眼在短波长光中出现调节过强是一致的。豚鼠在短波长光中调节系统反应灵敏, 虽然发生高于平常水平的过度调节, 但因此可能具有较好视力, 同时能较好的调节眼球的生长进行屈光补偿, 结果导致屈光度变化量较大。鉴于豚鼠视网膜上广泛分布的高密度短波长敏感视锥细胞, 这一推测具有较高的可能性^[36,39]。

至本研究结束, 两种单色光间产生的豚鼠屈光度差异仍要大于两种波长间纵向色像差的数值, 一方面可能豚鼠眼受单色光刺激后产生多重作用, 虽然阿托品限制调节系统的影响, 但仍有其他作用未受影响导致过度屈光补偿。另一方面, 阿托品对调节系统的抑制作用可能还不够完全, 虽然有一定程度的减少, 但还是产生了高于纵向色像差的屈光补偿。有关这一推测还需进一步研究证实。

参考文献

1. Wiesel TN, Raviola E. Myopia and eye enlargement after neonatal lid fusion in monkeys[J]. *Nature*, 1977, 266(5597): 66-68.
2. Smith EL 3rd, Harwerth RS, Crawford ML, et al. Observations on the effects of form deprivation on the refractive status of the monkey [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1987, 28(8): 1236-1245.
3. Wallman J, Adams JJ. Developmental aspects of experimental myopia

- in chicks: susceptibility, recovery and relation to emmetropization[J]. *Vision Res*, 1987, 27(7): 1139-1163.
4. McBrien NA, Norton TT. The development of experimental myopia and ocular component dimensions in monocularly lid-sutured tree shrews (*Tupaia belangeri*)[J]. *Vision Res*, 1992, 32(5): 843-852.
 5. Troilo D, Judge SJ. Ocular development and visual deprivation myopia in the common marmoset (*Callithrix jacchus*)[J]. *Vision Res*, 1993, 33(10): 1311-1324.
 6. Siegwart JT Jr, Norton TT. The susceptible period for deprivation-induced myopia in tree shrew[J]. *Vision Res*, 1998, 38(22): 3505-3515.
 7. Smith EL 3rd, Bradley DV, Fernandes A, et al. Form deprivation myopia in adolescent monkeys [J]. *Optom Vis Sci*, 1999, 76(6): 428-432.
 8. Smith EL 3rd, Hung LF. Form-deprivation myopia in monkeys is a graded phenomenon[J]. *Vision Res*, 2000, 40(4): 371-381.
 9. Howlett MH, McFadden SA. Form-deprivation myopia in the guinea pig (*Cavia porcellus*)[J]. *Vision Res*, 2006, 46(1/2): 267-283.
 10. Zhou X, Lu F, Xie R, et al. Recovery from axial myopia induced by a monocularly deprived facemask in adolescent (7-week-old) guinea pigs [J]. *Vision Res*, 2007, 47(8): 1103-1111.
 11. Smith EL 3rd, Hung LF, Harwerth RS. Effects of optically induced blur on the refractive status of young monkeys[J]. *Vision Res*, 1994, 34(3): 293-301.
 12. Hung LF, Crawford ML, Smith EL. Spectacle lenses alter eye growth and the refractive status of young monkeys[J]. *Nat Med*, 1995, 1(8): 761-765.
 13. Wildsoet C, Wallman J. Choroidal and scleral mechanisms of compensation for spectacle lenses in chicks [J]. *Vision Res*, 1995, 35(9): 1175-1194.
 14. Graham B, Judge SJ. The effects of spectacle wear in infancy on eye growth and refractive error in the marmoset (*Callithrix jacchus*)[J]. *Vision Res*, 1999, 39(2): 189-206.
 15. Shaikh AW, Siegwart JT Jr, Norton TT. Effect of interrupted lens wear on compensation for a minus lens in tree shrews[J]. *Optom Vis Sci*, 1999, 76(5): 308-315.
 16. Smith EL 3rd, Hung LF. The role of optical defocus in regulating refractive development in infant monkeys [J]. *Vision Res*, 1999, 39(8): 1415-1435.
 17. McFadden SA, Howlett MH, Mertz JR. Retinoic acid signals the direction of ocular elongation in the guinea pig eye [J]. *Vision Res*, 2004, 44(7): 643-653.
 18. Howlett MH, McFadden SA. Spectacle lens compensation in the pigmented guinea pig[J]. *Vision Res*, 2009, 49(2): 219-227.
 19. Lu F, Zhou X, Jiang L, et al. Axial myopia induced by hyperopic defocus in guinea pigs: A detailed assessment on susceptibility and recovery[J]. *Exp Eye Res*, 2009, 89(1): 101-108.
 20. Schaeffel F, Howland HC. Properties of the feedback loops controlling eye growth and refractive state in the chicken[J]. *Vision Res*, 1991, 31(4): 717-734.
 21. Rohrer B, Schaeffel F, Zrenner E. Longitudinal chromatic aberration and emmetropization: results from the chicken eye[J]. *J Physiol*, 1992, 449(1): 363-376.
 22. Wildsoet CF, Howland HC, Falconer S, et al. Chromatic aberration and accommodation: their role in emmetropization in the chick[J]. *Vision Res*, 1993, 33(12): 1593-1603.
 23. Kröger RH, Fernald RD. Regulation of eye growth in the African cichlid fish *Haplochromis burtoni*[J]. *Vision Res*, 1994, 34(14): 1807-1814.
 24. Kröger RH, Wagner HJ. The eye of the blue acara (*Aequidens pulcher*, Cichlidae) grows to compensate for defocus due to chromatic aberration[J]. *J Comp Physiol A*, 1996, 179(6): 837-842.
 25. Seidemann A, Schaeffel F. Effects of longitudinal chromatic aberration on accommodation and emmetropization[J]. *Vision Res*, 2002, 42(21): 2409-2417.
 26. Rucker FJ, Wallman J. Cone signals for spectacle-lens compensation: differential responses to short and long wavelengths[J]. *Vision Res*, 2008, 48(19): 1980-1991.
 27. Rucker FJ, Wallman J. Chick eyes compensate for chromatic simulations of hyperopic and myopic defocus: evidence that the eye uses longitudinal chromatic aberration to guide eye-growth[J]. *Vision Res*, 2009, 49(14): 1775-1783.
 28. Liu R, Qian YF, He JC, et al. Effects of different monochromatic lights on refractive development and eye growth in guinea pigs[J]. *Exp Eye Res*, 2011, 92(6): 447-453.
 29. Qian YF, Dai JH, Liu R, et al. Effects of the chromatic defocus caused by interchange of two monochromatic lights on refraction and ocular dimension in Guinea pigs [J]. *PLoS One*, 2013, 8(5): e63229.
 30. Qian YF, Liu R, Dai JH, et al. Transfer from blue light or green light to white light partially reverses changes in ocular refraction and anatomy of developing guinea pigs[J]. *J Vis*, 2013, 13(11): 16.
 31. Rucker FJ, Kruger PB. Cone contributions to signals for accommodation and the relationship to refractive error[J]. *Vision Res*, 2006, 46(19): 3079-3089.
 32. Kruger PB, Rucker FJ, Hu C, et al. Accommodation with and without short-wavelength-sensitive cones and chromatic aberration[J]. *Vision Res*, 2005, 45(10): 1265-1274.
 33. Rucker FJ, Kruger PB. Isolated short-wavelength sensitive cones can mediate a reflex accommodation response[J]. *Vision Res*, 2001, 41(7): 911-922.

34. Flitcroft DI. A neural and computational model for the chromatic control of accommodation[J]. *Vis Neurosci*, 1990, 5(6): 547-555.
35. Rucker FJ, Kruger PB. The role of short-wavelength sensitive cones and chromatic aberration in the response to stationary and step accommodation stimuli [J]. *Vision Res*, 2004, 44(2): 197-208.
36. Jacobs GH, Deegan JF 2nd. Spectral sensitivity, photopigments, and color vision in the guinea pig (*Cavia porcellus*)[J]. *Behav Neurosci*, 1994, 108(5): 993-1004.
37. Zhou X, Qu J, Xie R, et al. Normal development of refractive state and ocular dimensions in guinea pigs[J]. *Vision Res*, 2006, 46(18): 2815-2823.
38. Norton TT, McBrien NA. Normal development of refractive state and ocular component dimensions in the tree shrew (*Tupaia belangeri*)[J]. *Vision Res*, 1992, 32(5): 833-842.
39. Parry JW, Bowmaker JK. Visual pigment coexpression in Guinea pig cones: a microspectrophotometric study[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2002, 43(5): 1662-1665.

本文引用：钱一峰, 肖艳辉, 陈志刚, 陆培荣. 阿托品对单色光中豚鼠屈光发育的干预作用[J]. 眼科学报, 2018, 33(4): 260-266. doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2018.11.01

Cite this article as: QIAN Yifeng, XIAO Yanhui, CHEN Zhigang, LU Peirong. Intervention effect of atropine on refractive development of guinea pigs in different monochromatic lights[J]. *Yan Ke Xue Bao*, 2018, 33(4): 260-266. doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2018.11.01