

高脂饮食对豚鼠屈光发育及眼部生物学特征的影响

张孝然 陈亚敏 张宁 栾子辰 郝瑞

天津医科大学眼科临床学院 天津市眼科医院 天津市眼科研究所 天津市眼科学与视觉科学重点实验室 南开大学附属天津市眼科医院, 天津 300020

通信作者: 郝瑞, Email: haorui0311@126.com

【摘要】 目的 探讨高脂饮食对豚鼠屈光发育及眼部生物学特征的影响。方法 选取 16 只 3 周龄 SPF 级健康雄性三色豚鼠, 采用随机数字表法分为正常对照组和高脂饮食组, 每组 8 只, 其中正常对照组饲喂 4 周标准饲料(供能占比: 脂肪 9.1%, 碳水化合物 65.2%, 蛋白质 25.7%), 高脂饮食组饲喂 4 周高脂饲料(供能占比: 脂肪 45.0%, 碳水化合物 35.0%, 蛋白质 20.0%)。饮食干预前及干预后第 4 周, 采用全自动生化分析仪检测各豚鼠甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)、高密度脂蛋白、低密度脂蛋白(LDL)水平; 采用动物体重仪测量豚鼠体重。饮食干预前及干预后第 2、4 周, 采用小动物红外自动验光仪测量各豚鼠屈光度; 采用眼科超声测量仪测量眼轴长度; 采用角膜曲率计测量角膜曲率半径; 采用全眼光学相干断层扫描仪测量视网膜厚度(RT)、脉络膜厚度(ChT)、脉络膜血流量(ChBP)。比较 2 个组干预前后不同时间点各参数差异、屈光度和眼轴长度变化量并分析各参数相关性。结果 2 个组干预前和干预后 4 周, TC、TG、LDL 总体比较差异均有统计学意义($TC: F_{\text{组别}} = 8.21, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 36.10, P < 0.001$ 。 $TG: F_{\text{组别}} = 6.60, P < 0.05; F_{\text{时间}} = 11.71, P < 0.01$ 。 $LDL: F_{\text{组别}} = 5.73, P < 0.05; F_{\text{时间}} = 20.85, P < 0.001$), 其中干预后 4 周, 高脂饮食组 TC、TG 和 LDL 均高于正常对照组, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。2 个组干预前、干预后 2 和 4 周屈光度总体比较差异均有统计学意义($F_{\text{组别}} = 24.97, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 96.77, P < 0.001$), 其中干预后 2 和 4 周, 高脂饮食组屈光度均低于正常对照组, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。正常对照组干预后 2 和 4 周屈光度变化量分别为 (-0.77 ± 0.28) 和 (-1.15 ± 0.19) D, 高脂饮食组分别为 (-2.26 ± 0.35) 和 (-2.16 ± 0.21) D, 2 个组屈光度变化量总体比较差异有统计学意义($F_{\text{组别}} = 22.32, P < 0.001$), 其中干预后 2 和 4 周高脂饮食组屈光度变化量均明显大于正常对照组, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。2 个组干预前后眼轴长度总体比较差异有统计学意义($F_{\text{组别}} = 15.04, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 361.40, P < 0.001$), 其中干预后 4 周, 高脂饮食组眼轴长度明显大于正常对照组, 差异有统计学意义($P < 0.001$)。2 个组 RT、ChT 和 ChBP 总体比较差异均有统计学意义($F_{\text{组别}} = 30.63, 17.40, 85.21$, 均 $P < 0.001$), 其中干预后 2 周, 高脂饮食组 RT 和 ChBP 均低于正常对照组, 干预后 4 周, 高脂饮食组 RT、ChT 和 ChBP 均低于正常对照组, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。相关性分析显示, 屈光度与眼轴长度呈明显负相关($r = -0.84, P < 0.001$); ChT 与 ChBP 和 ChBP、RT、ChT 与屈光度均呈正相关($r = 0.42, 0.56, 0.44, 0.37$, 均 $P < 0.01$)。结论 高脂饮食会导致豚鼠近视易感性的增加, 并伴随眼轴增长、RT、ChT 和 ChBP 显著降低。

【关键词】 高脂饮食; 豚鼠; 近视; 屈光发育; 光学相干断层扫描成像

基金项目: 南开大学视光科学研究院开放基金 (NKSGY202309); 天津市卫生健康科技项目高层次人才专项 (TJWJ2025RC015); 天津市医学重点建设学科建设项目 (TJYXZDXK-3-004A-3)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20250901-00283

Effect of high-fat diet on refractive development and ocular biological characteristics in guinea pigs

Zhang Xiaoran, Chen Yamin, Zhang Ning, Luan Zichen, Hao Rui

Clinical College of Ophthalmology, Tianjin Medical University, Tianjin Eye Hospital, Tianjin Eye Institute, Tianjin Key Lab of Ophthalmology and Vision Science, Affiliated Tianjin Eye Hospital, Nankai University, Tianjin 300020, China

Corresponding author: Hao Rui, Email: haorui0311@126.com

【Abstract】 Objective To investigate the effect of a high-fat diet on refractive development and ocular biological characteristics in guinea pigs. **Methods** Sixteen 3-week-old SPF healthy male tricolor guinea pigs were selected and randomly assigned to a normal control group and a high-fat diet group using a random number table, with

8 animals in each group. The control group was fed a standard diet for 4 weeks (energy composition: fat 9.1%, carbohydrates 65.2%, protein 25.7%), whereas the high-fat diet group was fed a high-fat diet for 4 weeks (energy composition: fat 45.0%, carbohydrates 35.0%, protein 20.0%). Serum levels of total cholesterol (TC), triglycerides (TG), high-density lipoprotein, and low-density lipoprotein (LDL) were measured using an automated biochemical analyzer before dietary intervention and at week 4 after the intervention. The weight of guinea pigs were measured using an animal weight meter. Before the intervention and at weeks 2 and 4 after the intervention, refractive error was measured using a small-animal infrared automated refractometer; axial length was measured using an ophthalmic ultrasound biometer; the corneal curvature radius (CCR) was measured using a keratometer; retinal thickness (RT), choroidal thickness (ChT), and choroidal blood perfusion (ChBP) were measured using full-eye optical coherence tomography. The differences in parameters and changes in refraction and axial length between the two groups at different time points before and after intervention were compared, and the correlation of each parameter was analyzed. All animal experiments were conducted in accordance with the guidelines of the Tianjin Medical Experimental Animal Protection Center. The experimental protocol was approved by the Animal Ethics Committee of Tianjin Eye Hospital (No. YSY-DWLL-2022249).

Results There were significant overall differences in TC, TG, and LDL between the two groups before and 4 weeks after intervention (TC: $F_{\text{group}} = 8.21$, $P < 0.001$; $F_{\text{time}} = 36.10$, $P < 0.001$. TG: $F_{\text{group}} = 6.60$, $P < 0.05$; $F_{\text{time}} = 11.71$, $P < 0.01$. LDL: $F_{\text{group}} = 5.73$, $P < 0.05$; $F_{\text{time}} = 20.85$, $P < 0.001$). Four weeks after intervention, TC, TG and LDL were higher in the high-fat diet group than in the normal control group, with statistical significance (all $P < 0.01$). There were statistically significant overall differences in refractive power between the two groups before intervention, 2 and 4 weeks after intervention ($F_{\text{group}} = 24.97$, $P < 0.001$; $F_{\text{time}} = 96.77$, $P < 0.001$). At 2 and 4 weeks after intervention, the refractive power was lower in the high-fat diet group than in the normal control group (both $P < 0.01$). The refractive changes at 2 and 4 weeks after intervention were respectively (-0.77 ± 0.28) and (-1.15 ± 0.19) D in the normal control group and were (-2.26 ± 0.35) and (-2.16 ± 0.21) D in the high-fat diet group, respectively, with statistically significant overall difference ($F_{\text{group}} = 22.32$, $P < 0.001$). The refractive power changes in the high-fat diet group were significantly greater than those in the normal control group at 2 and 4 weeks after intervention (both $P < 0.01$). There were statistically significant differences in axial length between the two groups before and after intervention ($F_{\text{group}} = 15.04$, $P < 0.001$; $F_{\text{time}} = 361.40$, $P < 0.001$). Four weeks after intervention, the axial length were greater in the high-fat diet group than in the normal control group ($P < 0.001$). There were statistically significant overall differences in RT, ChT, and ChBP between the two groups ($F_{\text{group}} = 30.63$, 17.40 , 85.21 ; all $P < 0.001$). Two weeks after the intervention, RT and ChBP in the high-fat diet group were lower than those in the normal control group (both $P < 0.01$). Four weeks after the intervention, RT, ChT, and ChBP in the high-fat diet group were lower than those in the normal control group (all $P < 0.01$). Correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between refraction and axial length ($r = -0.84$, $P < 0.001$). ChT were positively correlated with ChBP and ChBP, RT, and ChT were positively correlated with refraction ($r = 0.42$, 0.56 , 0.44 , 0.37 ; all $P < 0.01$).

Conclusions A high-fat diet increases myopia susceptibility in guinea pigs and is accompanied by axial elongation and significant reductions in RT, ChT, and ChBP.

[Key words] Diet, high-fat; Guinea pigs; Myopia; Refractive development; Optical coherence tomography

Fund program: Open Fund Project of the Institute of Optometry Science, Nankai University (NKSGY202309); Tianjin Health Research Project for High-level Talents (TJWJ2025RC015); Key Construction Discipline Project of Tianjin Medical Science (TJYXZDXK-3-004A-3)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20250901-00283

近年来,近视已成为全球范围内重要的公共卫生问题。据预测,至 2050 年全球近视患者人数将达 50 亿^[1]。东亚地区青少年近视患病率超过 80%,其中约 20%为高度近视^[2]。高度近视不仅明显损害患者视觉质量,还会显著增加黄斑变性、青光眼及视网膜脱离等致盲性眼病的发生风险^[3]。因此,阐明近视的发病机制并探索有效的防控策略已成为亟需解决的科学问题。近视的发生与遗传及环境因素密切相关,其中户

外活动减少和近距离用眼过度是公认的主要危险因素^[4]。近年来,饮食结构对屈光发育的潜在作用也逐渐受到关注。流行病学证据表明,持续不健康的生活方式会增加青少年超重/肥胖与近视共患病的发生风险^[5],这提示高脂饮食可能通过调控代谢途径影响儿童屈光发育。

高脂饮食是代谢紊乱的重要诱因,长期摄入可导致胰岛素抵抗、糖尿病等疾病^[6],并对眼部产生不利

影响,如泪液分泌减少、视网膜变薄及功能减退^[7-8]。此外,高脂饮食可激活巨噬细胞、小胶质细胞,增加炎症因子表达,促进视网膜和脉络膜新生血管形成,加重炎症性眼病^[9]。然而,目前关于高脂饮食对屈光发育影响的系统研究仍十分有限。豚鼠在脂质代谢及血脂变化方面与人类相似,适合用于研究高脂饮食与近视的关系^[10]。本研究通过建立高脂饮食豚鼠模型,旨在探讨高脂饮食对屈光系统发育的影响,为揭示饮食与近视发生机制的关联提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验动物 取 3 周龄 SPF 级健康雄性三色豚鼠 16 只(购自天津市武清区科达养殖中心),体重 155~175 g。实验开始前,所有豚鼠均接受眼部检查,排除患有白内障、结膜炎、自发性近视及其他屈光不正的个体。实验在自然日光条件下进行,光照周期为 12 h 光照/12 h 黑暗,环境条件受控,光照强度设定为 200 lx,室温维持在 25 ℃,自由饮水。所有动物实验均遵循天津市医学实验动物保护中心的指导原则,实验方案经天津市眼科医院动物伦理委员会批准(批文号:YSY-DWLL-2022249)。

1.1.2 主要试剂及仪器 高脂饲料由江苏协同医药生物工程有限公司配制,在标准饲料基础上添加猪油、蔗糖及酪蛋白,能量构成比例为:脂肪供能占 45.0%,碳水化合物占 35.0%,蛋白质占 20.0%。标准饲料的能量构成比例为:脂肪占 9.1%,碳水化合物占 65.2%,蛋白质占 25.7%。5%水合氯醛(天津易生源基因科技有限公司);1%复方托吡卡胺滴眼液(日本参天制药株式会社);0.5%盐酸丙美卡因滴眼液(美国爱尔康眼科产品有限公司);加替沙星滴眼液(天津中国大冢制药有限公司)。毛细管玻璃管(南通医太实验耗材有限公司);EP 管(南通苏品实验器材有限公司);离心机(5430R,德国 Eppendorf 公司);全自动生化分析仪(BS-360E,深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司);动物体重仪(河南恒奥生物科技有限公司);小动物红外自动验光仪(德国 STRIA 公司);眼科超声测量仪(MD-1000A/P,天津迈达医学科技有限公司);角膜曲率计(YZ38,苏州六六医疗器械有限公司);全眼光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)仪[VG200,视微影像(河南)科技有限公司]。

1.2 方法

1.2.1 实验分组与高脂模型建立 采用随机数字表法将豚鼠分为正常对照组和高脂饮食组,每组 8 只。

正常对照组豚鼠全程自由摄取标准饲料。高脂饮食组第 1 周进行逐步过渡喂养,第 1、3、5、7 天高脂饲料占日粮比例为 10%、30%、60%、100%,随后 3 周自由摄取高脂饲料。

1.2.2 眼部血液样本采集及血清离心处理 饮食干预前及干预后第 4 周,采集豚鼠眼部血液样本。采样前动物禁食 12 h,所有操作均在同一时间段内进行,以尽量减少昼夜节律对数据的影响。采用 5%水合氯醛腹腔注射诱导麻醉,使用内径 0.9~1.1 mm 的毛细管在右眼外眦处经眼眶静脉丛穿刺采血,EP 管采集 0.5 ml 血液。穿刺部位使用酒精棉片轻轻擦拭进行消毒,并点用加替沙星滴眼液预防感染。采集的血液样本置于 4 ℃ 保存过夜,离心半径 10 cm、12 000 r/min,4 ℃ 下离心 15 min,分离血清,冻存于 -80 ℃ 备用。

1.2.3 血脂水平和体重检测 饮食干预前及干预后第 4 周,按照标准化操作规程,采用全自动生化分析仪测定血脂水平,检测项目包括总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、高密度脂蛋白(high-density lipoprotein, HDL)及低密度脂蛋白(low-density lipoprotein, LDL)。饮食干预前及干预后第 4 周同一时间点使用动物体重仪测量豚鼠体重。

1.2.4 屈光度及眼球生物学参数测量 干预前及干预后第 2、4 周进行屈光度及眼球生物学参数测量。(1)屈光度 采用 1%复方托吡卡胺滴眼液扩瞳后 15 min,使用小动物红外自动验光仪测量豚鼠屈光度,配套软件自动计算垂直子午线方向屈光度,每次测量 10 个读数并取连续 3 次测量结果的平均值;计算干预后 2 和 4 周屈光度变化量,干预后 2 周屈光度变化量=干预后 2 周屈光度-基线屈光度,干预后 4 周屈光度变化量=干预后 4 周屈光度-干预后 2 周屈光度。(2)眼轴长度 采用眼科超声测量仪中的 A 型探头测量豚鼠眼轴长度。测量前,向豚鼠结膜囊内滴入 0.5%盐酸丙美卡因滴眼液进行眼表麻醉,测量时探头垂直置于角膜中央表面,仪器自动读取眼轴长度,每眼连续测量 3 次,取平均值;计算干预后 2 和 4 周眼轴长度变化量。(3)角膜曲率半径 采用角膜曲率计测量角膜曲率半径。为适应豚鼠角膜较陡的特点,在角膜曲率计前端加装+8.0 D 屈光度镜片以保证测量准确性,每眼测量 3 次,取平均值后乘 0.451,获得最终角膜曲率半径。

1.2.5 视网膜厚度、脉络膜厚度及血流量测量 干预前及干预后第 2、4 周,采用全眼 OCT 仪测量视网膜厚度(retinal thickness, RT)、脉络膜厚度(choroidal

thickness, ChT) 和脉络膜血流量 (choroidal blood perfusion, ChBP)。豚鼠右眼扩瞳后,以视盘为中心,采用 OCT 横截面扫描模式,在配套软件中根据解剖学边界勾画脉络膜区域后导出图片,视网膜定义为内界膜至视网膜色素上皮层内表面,脉络膜定义为视网膜色素上皮层外表面至巩膜内表面。使用 ImageJ 软件,以视盘为中心,分别绘制半径为 1 000、1 500 及 2 000 μm 的同心圆作为定位参考。RT 和 ChT 沿同心圆与各边界相交的切线测量,测量左右两侧 6 个结果取平均值。通过像素分析评估 ChBP;视盘居中,扫描视野范围为 6 mm \times 6 mm,纵向覆盖下、上象限区域,根据上述脉络膜定义标准勾画 ChBP 红色信号点,采用 ImageJ 软件统计该区域内运动阳性像素总数(图 1)。

1.3 统计学方法

采用 GraphPad Prism 9 软件进行统计分析和作图。计量资料经 Shapiro-Wilk 检验证实呈正态分布,以 $\bar{x}\pm s$ 表示,方差齐性检验证实方差齐,2 个组不同时间点各指标总体比较采用重复测量两因素方差分析,两两比较采用 Bonferroni 校正检验。各参数的相关性采用 Pearson 相关分析进行评估。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义, Bonferroni 校正检验的检验水准为 0.05/比较次数。

2 结果

2.1 2 个组干预前后豚鼠血脂水平和体重比较

2 个组干预前和干预后 4 周,TC、TG、LDL 总体比较差异均有统计学意义(TC: $F_{\text{组别}} = 8.21, P<0.001$; $F_{\text{时间}} = 36.10, P<0.001$ 。TG: $F_{\text{组别}} = 6.60, P<0.05$; $F_{\text{时间}} = 11.71, P<0.01$ 。LDL: $F_{\text{组别}} = 5.73, P<0.05$; $F_{\text{时间}} = 20.85, P<0.001$),其中干预后 4 周,高脂饮食组 TC、TG 和 LDL 均高于正常对照组,差异均有统计学意义(均 $P<0.01$)。2 个组干预前后 HDL 总体比较差异均无统计学意义($F_{\text{组别}} = 0.52, P>0.05$; $F_{\text{时间}} = 1.83, P>0.05$)。2 个组体重比较差异无统计学意义,干预前后体重比较差异有统计学意义($F_{\text{组别}} = 5.28, P>0.05$; $F_{\text{时间}} = 44.33, P<0.001$) (表 1)。

2.2 2 个组干预前后豚鼠屈光度、眼轴长度和角膜曲率半径及其变化量比较

2 个组干预前、干预后 2 和 4 周屈光度、眼轴长度总体比较差异均有统计学意义(屈光度: $F_{\text{组别}} = 24.97, P<0.001$; $F_{\text{时间}} = 96.77, P<0.001$ 。眼轴长度: $F_{\text{组别}} = 15.04, P<0.001$; $F_{\text{时间}} = 361.40, P<0.001$),其中干预后 2 和 4 周,高脂饮食组屈光度均低于正常对照组;干

干预后 4 周,高脂饮食组眼轴长度明显高于正常对照组,差异均有统计学意义(均 $P<0.01$)。2 个组角膜曲率半径总体比较差异无统计学意义,干预前后角膜曲率半径总体比较差异有统计学意义($F_{\text{组别}} = 0.43, P>0.05$; $F_{\text{时间}} = 32.29, P<0.001$) (表 2)。

正常对照组干预后 2 和 4 周屈光度变化量分别为 (-0.77 ± 0.28) 和 (-1.15 ± 0.19) D,高脂饮食组分别为 (-2.26 ± 0.35) 和 (-2.16 ± 0.21) D,2 个组屈光度变化量总体比较差异有统计学意义($F_{\text{组别}} = 22.32, P<0.001$),其中干预后 2 和 4 周高脂饮食组屈光度变化量均明显大于正常对照组,差异均有统计学意义(均 $P<0.001$);干预后 2 和 4 周屈光度变化量总体比较差异无统计学意义($F_{\text{时间}} = 0.29, P>0.05$)。正常对照组干预后 2 和 4 周眼轴长度变化量分别为 (0.19 ± 0.02) 和 (0.24 ± 0.02) mm,高脂饮食组分别为 (0.16 ± 0.02) 和 (0.35 ± 0.02) mm,2 个组眼轴长度变化量总体比较差异无统计学意义,干预后 2 和 4 周眼轴长度变化量总体比较差异有统计学意义($F_{\text{组别}} = 3.38, P>0.05$; $F_{\text{时间}} = 36.98, P<0.001$) (图 2)。

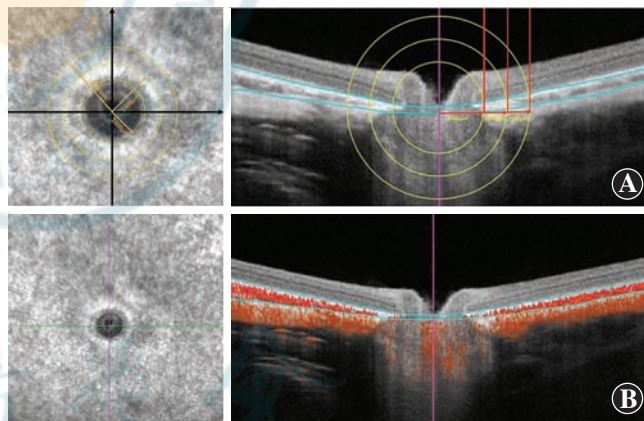


图 1 豚鼠眼部 OCT 扫描及分析图像 A:豚鼠眼底 OCT 扫描 脉络膜为视网膜色素上皮层外表面(上方蓝线)至巩膜内表面(下方蓝线),视网膜为内界膜至视网膜色素上皮层内表面(上方蓝线);分别以 1 000、1 500 和 2 000 μm 为半径作切线,切线与脉络膜蓝线相交处即为脉络膜厚度测量点 B:豚鼠眼底 OCTA 扫描 红色像素点代表血流 OCT:光学相干断层扫描;OCTA:光学相干断层扫描血流成像

Figure 1 OCT scanning and analysis of guinea pig eyes A: OCT scan images of guinea pig fundus The choroid was delineated from the outer surface of the retinal pigment epithelium layer (upper blue line) to the inner surface of the sclera (lower blue line), while the retina was defined from the inner limiting membrane to the inner surface of the retinal pigment epithelium layer (upper blue line). Tangential lines were drawn at radii of 1 000, 1 500, and 2 000 μm , and the intersections with the choroidal boundary (blue line) were defined as measurement points for choroidal thickness B: OCTA scan images of guinea pig fundus Red pixels indicated blood flow OCT: optical coherence tomography; OCTA: optical coherence tomography angiography

表 1 2 个组干预前后不同时间点豚鼠血脂水平和体重比较($\bar{x}\pm s$)

Table 1 Comparison of blood lipid level and body weight between two groups before and 4 weeks after the intervention ($\bar{x}\pm s$)

组别	样本量	TC (mmol/L)		TG (mmol/L)		HDL (mmol/L)	
		干预前	干预后 4 周	干预前	干预后 4 周	干预前	干预后 4 周
正常对照组	8	0.93±0.10	1.21±0.18	0.61±0.09	0.61±0.03	0.22±0.03	0.20±0.02
高脂饮食组	8	0.73±0.07	2.29±0.22 ^a	0.53±0.04	1.19±0.17 ^a	0.18±0.03	0.30±0.06

组别	样本量	LDL (mmol/L)		体重 (g)	
		干预前	干预后 4 周	干预前	干预后 4 周
正常对照组	8	0.31±0.07	0.50±0.04	167.23±6.48	288.22±18.74
高脂饮食组	8	0.23±0.05	1.18±0.23 ^a	174.21±8.65	336.78±17.88

注: TC: $F_{\text{组别}}=8.21, P<0.001; F_{\text{时间}}=36.10, P<0.001; F_{\text{交互作用}}=17.58, P<0.01$. TG: $F_{\text{组别}}=6.60, P<0.05; F_{\text{时间}}=11.71, P<0.01; F_{\text{交互作用}}=11.53, P<0.01$. HDL: $F_{\text{组别}}=0.52, P>0.05; F_{\text{时间}}=1.83, P>0.05; F_{\text{交互作用}}=3.57, P>0.05$. LDL: $F_{\text{组别}}=5.73, P<0.05; F_{\text{时间}}=20.85, P<0.001; F_{\text{交互作用}}=9.21, P<0.01$. 体重: $F_{\text{组别}}=5.28, P>0.05; F_{\text{时间}}=44.33, P<0.001; F_{\text{交互作用}}=0.93, P>0.05$. 与正常对照组比较, ^a $P<0.01$ (重复测量两因素方差分析, Bonferroni 校正检验) TC: 总胆固醇; TG: 甘油三酯; HDL: 高密度脂蛋白; LDL: 低密度脂蛋白
 Note: TC: $F_{\text{group}}=8.21, P<0.001; F_{\text{time}}=36.10, P<0.001; F_{\text{interaction}}=17.58, P<0.01$. TG: $F_{\text{group}}=6.60, P<0.05; F_{\text{time}}=11.71, P<0.01; F_{\text{interaction}}=11.53, P<0.01$. HDL: $F_{\text{group}}=0.52, P>0.05; F_{\text{time}}=1.83, P>0.05; F_{\text{interaction}}=3.57, P>0.05$. LDL: $F_{\text{group}}=5.73, P<0.05; F_{\text{time}}=20.85, P<0.001; F_{\text{interaction}}=9.21, P<0.01$. Weight: $F_{\text{group}}=5.28, P>0.05; F_{\text{time}}=44.33, P<0.001; F_{\text{interaction}}=0.93, P>0.05$. Compared with the normal control group, ^a $P<0.01$ (Repeated measures two-way ANOVA, Bonferroni correction test) TC: total cholesterol; TG: triglyceride; HDL: high-density lipoprotein; LDL: low-density lipoprotein

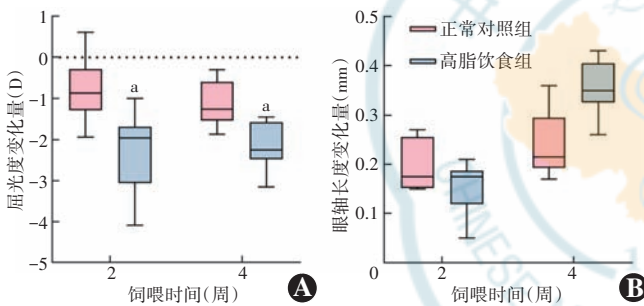


图 2 2 个组干预后 2 和 4 周屈光度、眼轴长度变化量比较 (重复测量两因素方差分析, Bonferroni 校正检验; $n=8$) A: 屈光度变化量 $F_{\text{组别}}=22.32, P<0.001; F_{\text{时间}}=0.29, P>0.05; F_{\text{交互作用}}=1.10, P>0.05$. 与正常对照组比较, ^a $P<0.01$ B: 眼轴长度变化量 $F_{\text{组别}}=3.38, P>0.05; F_{\text{时间}}=36.98, P<0.001; F_{\text{交互作用}}=16.28, P<0.001$
Figure 2 Comparison of changes in refraction and axial length between two groups after 2 and 4 weeks of intervention (Repeated measures two-way ANOVA, Bonferroni correction test; $n=8$) A: Changes in refraction $F_{\text{group}}=22.32, P<0.001; F_{\text{time}}=0.29, P>0.05; F_{\text{interaction}}=1.10, P>0.05$. Compared with the normal control group, ^a $P<0.01$ B: Changes in axial length $F_{\text{group}}=3.38, P>0.05; F_{\text{time}}=36.98, P<0.001; F_{\text{interaction}}=16.28, P<0.001$

2.3 2 个组干预前后豚鼠 RT、ChT 和 ChBP 比较

2 个组 RT、ChT 和 ChBP 总体比较差异均有统计学意义 ($F_{\text{组别}}=30.63, 17.40, 85.21$, 均 $P<0.001$), 其中干预后 2 周, 高脂饮食组 RT 和 ChBP 均低于正常对照组, 干预后 4 周, 高脂饮食组 RT、ChT 和 ChBP 均低于正常对照组, 差异均有统计学意义 (均 $P<0.01$)。干预前后不同时间点 RT 和 ChT 总体比较差异均有统计学意义 ($F_{\text{时间}}=7.68, 14.26$, 均 $P<0.01$), ChBP 总体比较差异无统计学意义 ($F_{\text{时间}}=0.86, P>0.05$) (图 3、4, 表 2)。

2.4 眼部各参数相关性分析

相关性分析显示, 屈光度与眼轴长度呈明显负相关 ($r=-0.84, P<0.001$); ChT 与 ChBP 和 ChBP、RT、ChT 与屈光度均呈正相关 ($r=0.42, 0.56, 0.44, 0.37$, 均 $P<0.01$) (图 5)。

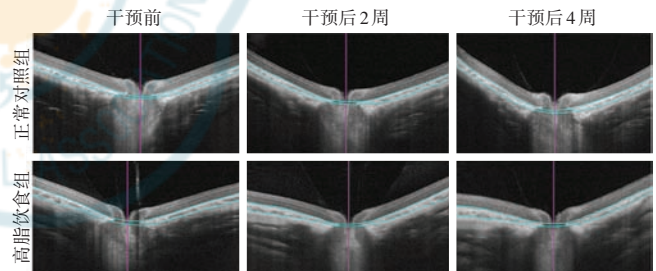


图 3 正常对照组和高脂饮食组饮食干预前后 OCT 扫描图像 干预后 4 周高脂饮食组 RT 和 ChT 均低于正常对照组 OCT: 光学相干断层扫描; RT: 视网膜厚度; ChT: 脉络膜厚度
Figure 3 OCT images of normal control group and high-fat diet group before and at weeks 2 and 4 after dietary intervention The RT and ChT at week 4 after dietary intervention were lower in the high-fat diet group than those in the normal control group OCT: optical coherence tomography; RT: retinal thickness; ChT: choroidal thickness

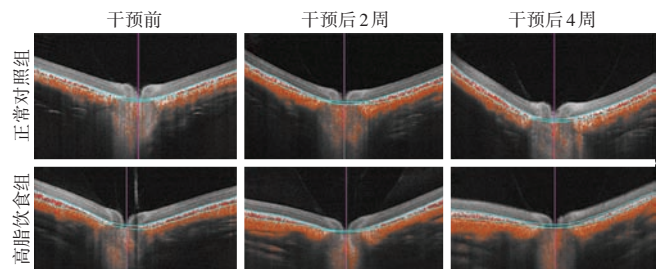


图 4 正常对照组和高脂饮食组饮食干预前后 OCTA 扫描图像 高脂饮食组干预后各时间点 ChBP 均低于正常对照组 OCTA: 光学相干断层扫描血流成像; ChBP: 脉络膜血流量
Figure 4 OCTA images of normal control group and high-fat diet group before and at weeks 2 and 4 after dietary intervention The ChBP at different time points after intervention were lower in the high-fat group than that in the normal group OCTA: optical coherence tomography angiography; ChBP: choroidal blood perfusion

表 2 2 个组干预前后不同时间点眼部生物学参数比较 ($\bar{x}\pm s$)

Table 2 Comparison of biological parameters between two groups before and at weeks 2 and 4 after the intervention ($\bar{x}\pm s$)

组别	样本量	屈光度 (D)			眼轴长度 (mm)			角膜曲率半径 (mm)		
		干预前	干预后 2 周	干预后 4 周	干预前	干预后 2 周	干预后 4 周	干预前	干预后 2 周	干预后 4 周
正常对照组	8	3.91±0.20	3.15±0.19	2.00±0.23	7.48±0.02	7.68±0.03	7.92±0.02	3.47±0.03	3.54±0.03	3.70±0.049
高脂饮食组	8	4.31±0.21	2.06±0.31 ^a	-0.10±0.21 ^a	7.53±0.02	7.68±0.02	8.04±0.03 ^a	3.42±0.03	3.56±0.02	3.68±0.028

组别	样本量	RT (μm)			ChT (μm)			ChBP (px)		
		干预前	干预后 2 周	干预后 4 周	干预前	干预后 2 周	干预后 4 周	干预前	干预后 2 周	干预后 4 周
正常对照组	8	131.13±1.29	129.13±1.39	130.50±1.39	59.63±0.63	58.25±0.86	58.63±1.03	5 131.88±156.60	6 039.75±143.23	6 042.75±217.87
高脂饮食组	8	129.38±0.84	122.75±1.64 ^a	120.88±1.16 ^a	60.12±0.69	55.75±1.29	49.63±1.61 ^a	5 175.75±144.61	4 221.75±194.19 ^a	3 845.00±184.43 ^a

注:屈光度: $F_{\text{组别}} = 24.97, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 96.77, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 15.19, P < 0.001$ 。眼轴长度: $F_{\text{组别}} = 15.04, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 361.40, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 5.36, P < 0.01$ 。角膜曲率半径: $F_{\text{组别}} = 0.43, P > 0.05; F_{\text{时间}} = 32.29, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 0.68, P > 0.05$ 。RT: $F_{\text{组别}} = 30.63, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 7.68, P < 0.01; F_{\text{交互作用}} = 4.57, P < 0.05$ 。ChT: $F_{\text{组别}} = 17.40, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 14.26, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 10.17, P < 0.001$ 。ChBP: $F_{\text{组别}} = 85.21, P < 0.001; F_{\text{时间}} = 0.86, P > 0.05; F_{\text{交互作用}} = 23.32, P < 0.001$ 。与正常对照组比较, ^a $P < 0.01$ (重复测量两因素方差分析, Bonferroni 校正检验) RT: 视网膜厚度; ChT: 脉络膜厚度; ChBP: 脉络膜血流量

Note: Diopter: $F_{\text{group}} = 24.97, P < 0.001; F_{\text{time}} = 96.77, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 15.19, P < 0.001$. Axial length: $F_{\text{group}} = 15.04, P < 0.001; F_{\text{time}} = 361.40, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 5.36, P < 0.01$. Corneal curvature radius: $F_{\text{group}} = 0.43, P > 0.05; F_{\text{time}} = 32.29, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 0.68, P > 0.05$. RT: $F_{\text{group}} = 30.63, P < 0.001; F_{\text{time}} = 7.68, P < 0.01; F_{\text{interaction}} = 4.57, P < 0.05$. ChT: $F_{\text{group}} = 17.40, P < 0.001; F_{\text{time}} = 14.26, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 10.17, P < 0.001$. ChBP: $F_{\text{group}} = 85.21, P < 0.001; F_{\text{time}} = 0.86, P > 0.05; F_{\text{interaction}} = 23.32, P < 0.001$. Compared with the normal control group, ^a $P < 0.01$ (Repeated measures two-way ANOVA, Bonferroni correction test) RT: retinal thickness; ChT: choroidal thickness; ChBP: choroidal blood perfusion

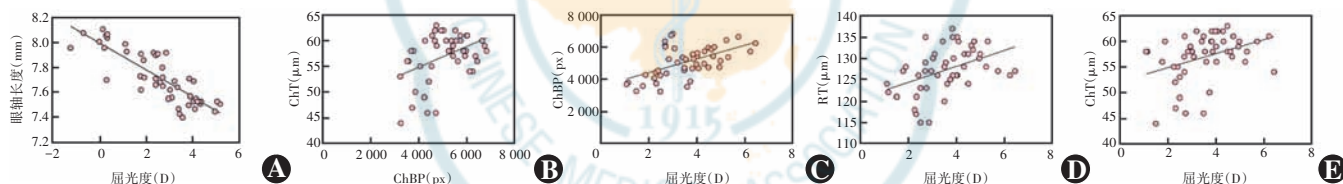


图 5 眼部各参数相关性分析 (Pearson 相关分析, $n = 16$) A: 屈光度与眼轴长度 $r = -0.84, P < 0.001$ B: ChBP 与 ChT $r = 0.42, P < 0.01$ C: 屈光度与 ChBP $r = 0.56, P < 0.01$ D: 屈光度与 RT $r = 0.44, P < 0.01$ E: 屈光度与 ChT $r = 0.37, P < 0.01$ ChT: 脉络膜厚度; ChBP: 脉络膜血流量; RT: 视网膜厚度

Figure 5 Correlation analysis of various parameters in the eyes (Pearson correlation analysis, $n = 16$) A: Correlation between refraction and axial length $r = -0.84, P < 0.001$ B: Correlation between ChBP and ChT $r = 0.42, P < 0.01$ C: Correlation between refraction and ChBP $r = 0.56, P < 0.01$ D: Correlation between refraction and RT $r = 0.44, P < 0.01$ E: Correlation between refraction and ChT $r = 0.37, P < 0.01$ ChT: choroidal thickness; ChBP: choroidal blood perfusion; RT: retinal thickness

3 讨论

本研究系统评估了高脂饮食对豚鼠屈光发育及眼部结构的影响,结果显示,高脂饮食不仅显著导致了眼轴延长和近视易感性的增加,还使得 RT 及 ChT 变薄,并伴随 ChBP 的下降。这些发现提示,代谢异常可能通过多重途径影响屈光发育过程。

本研究发现,饲喂 4 周高脂饲料的豚鼠 TC、TG 和 LDL 明显升高,与以往小鼠和大鼠高脂模型中的报道一致,表明高脂饮食可有效诱导全身性脂质代谢紊乱,提示模型构建成功^[11-12]。HDL 在本研究中并未出现显著差异,但已有研究在不同动物中观察到 HDL 的变化具有不一致性,有研究显示高脂饮食导致 HDL 水平下降,从而削弱其抗氧化、抗炎和保护血管内皮的作

用^[13];也有研究发现高脂饮食导致大鼠血清 HDL 水平升高,可能与不同物种、饲料组成以及干预时长有关^[14]。总体而言,这些研究结果与临床试验及动物实验中高脂饮食引起代谢综合征的发现相一致^[15]。值得注意的是,尽管高脂饮食组体重在 4 周时略高于正常对照组,但差异无统计学意义,提示在早期阶段体重增加可能尚未充分反映代谢异常,而血脂变化更为敏感。因此,本研究结果表明,短期高脂饮食可显著扰乱豚鼠的血脂稳态,其对机体代谢平衡的负面影响可能早于体重变化的出现。

本研究结果表明,高脂饮食可增加豚鼠近视的易感性,引起眼轴增长,进一步拓展了饮食结构与屈光发育之间的关联。流行病学证据表明,肥胖和代谢综合征患者的近视风险更高^[16-17],提示代谢异常可能是近

视的危险因素之一。除高脂饮食外,已有研究显示,营养因素亦可能影响近视进展。例如,临床试验发现,补充藏红花素的儿童近视进展减缓^[18];动物与临床研究均表明, ω -3 多不饱和脂肪酸可减缓实验性近视并改善 ChBP^[19];叶黄素则通过抗氧化和抗炎作用保护视网膜并可能延缓近视发展^[20]。相反,高糖饮食可能通过促进巩膜糖酵解和乳酸生成,加速近视发生^[21]。综合来看,饮食因素不仅影响全身代谢状态,还可能通过调节局部血流和组织代谢参与屈光发育过程。

已有研究表明,高脂饮食可通过诱导系统性及局部炎症反应介导代谢异常和眼部结构改变。例如,高脂摄入可激活核因子 κ B、肿瘤坏死因子 α 、白细胞介素 6 等炎症相关因子^[22-23],这些炎症因子可促进巩膜胶原降解、细胞外基质重塑,导致眼轴延长和近视漂移^[24]。此外,炎症因子还会诱导氧化应激反应,从而损伤脉络膜血管内皮,影响局部血流调节^[25]。未来研究可结合转录组学或代谢组学技术,深入揭示高脂饮食诱导炎症与近视形成之间的分子通路,并探索关键通路的干预靶点。

此外,本研究发现,高脂饮食可导致豚鼠 RT 和 ChT 变薄,同时伴随 ChBP 减少,并且屈光度与上述指标均呈正相关,这提示高脂饮食可能通过影响眼部结构和血流灌注而增加近视的发生风险。已有研究表明,RT 和 ChT 的变化是近视进展的重要结构学特征,尤其是 ChT 变薄,与 ChBP 不足及眼轴延长密切相关^[26]。本研究中观察到的 ChBP 减少,可能导致局部营养和氧供不足,进而导致巩膜缺氧和重塑,进一步推动屈光度向近视方向发展^[27-28]。值得注意的是,屈光度与 RT、ChT 及 ChBP 均呈正相关,进一步支持了“血流-结构-屈光”相互联系的假说。

本研究存在一定局限性,首先本研究仅选用雄性三色豚鼠进行实验,未考虑性别差异可能带来的影响。已有研究显示,性激素水平可调节脂质代谢、血流灌注及视网膜神经功能^[29-31],因此未来研究应纳入雌性动物,探讨性别因素在高脂饮食相关近视易感性中的作用。其次,近视的发生和发展通常受到多种环境因素的共同影响。已有研究表明,增加户外活动时间能有效降低儿童和青少年近视的发生率和进展速度^[32],而且户外光照强度越高,保护作用越强^[33]。长时间近距离用眼(如阅读、电子设备使用)与近视发生和进展密切相关,其风险随用眼时间增加而上升^[34]。本研究仅探讨了高脂饮食单一因素的作用,未能评估其与其他环境因素的交互效应。未来应设计多因素干预实验,探讨高脂饮食是否与光照不足或过度近距离用眼存在

协同或拮抗关系,以更全面地揭示环境与代谢因素在近视发生中的复杂交互机制。

综上,本研究结果显示高脂饮食能够显著增加豚鼠的近视易感性,并伴随 RT、ChT 变薄及 ChBP 减少。未来需进一步通过分子和功能学实验,阐明代谢异常在其中的作用机制。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献说明 张孝然:参与选题、研究设计、收集数据、资料分析、论文撰写及修改;陈亚敏、张宁、栾子辰:参与数据收集;郝瑞:参与选题、研究设计、论文修改及定稿

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] Liang J, Pu Y, Chen J, et al. Global prevalence, trend and projection of myopia in children and adolescents from 1990 to 2050: a comprehensive systematic review and meta-analysis [J]. *Br J Ophthalmol*, 2025, 109(3): 362-371. DOI: 10.1136/bjo-2024-325427.
- [3] 焦永红, 卢海, 麻婧, 等. 重视儿童早发性高度近视致盲性并发的管理[J]. *中华眼科杂志*, 2025, 61(1): 7-11. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20241005-00432.
- [4] Jiao YH, Lu H, Ma J, et al. Paying attention to the management of blinding complications caused by early-onset high myopia in children [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2025, 61(1): 7-11. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20241005-00432.
- [5] 霍环环, 李素云, 仇婷婷, 等. 近距离工作、视屏时间及户外活动时间与儿童近视的关联分析[J]. *中华实验眼科杂志*, 2025, 43(6): 548-555. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20241115-00314.
- [6] Huo HH, Li SY, Qiu TT, et al. Association between near work, screen time, outdoor time and myopia in children [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2025, 43(6): 548-555. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20241115-00314.
- [7] 储莉婷, 张风云, 齐文娟, 等. 青少年健康生活方式与超重/肥胖及近视共患关联的队列研究[J]. *中华流行病学杂志*, 2025, 46(6): 1023-1029. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20241028-00667.
- [8] Chu LT, Zhang FY, Qi WJ, et al. A cohort study on the association of healthy lifestyle with co-morbidity of overweight/obesity and myopia in adolescents [J]. *Chin J Epidemiol*, 2025, 46(6): 1023-1029. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20241028-00667.
- [9] Sandu O, Song K, Cai W, et al. Insulin resistance and type 2 diabetes in high-fat-fed mice are linked to high glycotxin intake [J]. *Diabetes*, 2005, 54(8): 2314-2319. DOI: 10.2337/diabetes.54.8.2314.
- [10] Wu Y, Wu J, Bu J, et al. High-fat diet induces dry eye-like ocular surface damages in murine [J]. *Ocul Surf*, 2020, 18(2): 267-276. DOI: 10.1016/j.jtos.2020.02.009.
- [11] Cao X, Guo Y, Wang Y, et al. Effects of high-fat diet and Apoe deficiency on retinal structure and function in mice [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 18601. DOI: 10.1038/s41598-020-75576-7.
- [12] Clarkson-Townsend DA, Douglass AJ, Singh A, et al. Impacts of high fat diet on ocular outcomes in rodent models of visual disease [J]. *Exp Eye Res*, 2021, 204: 108440. DOI: 10.1016/j.exer.2021.108440.
- [13] Fernandez ML. Guinea pigs as models for cholesterol and lipoprotein metabolism [J]. *J Nutr*, 2001, 131(1): 10-20. DOI: 10.1093/jn/131.1.10.
- [14] Liang H, Jiang F, Cheng R, et al. A high-fat diet and high-fat and

- high-cholesterol diet may affect glucose and lipid metabolism differentially through gut microbiota in mice [J]. *Exp Anim*, 2021, 70(1): 73-83. DOI: 10.1538/expanim.20-0094.
- [12] Wang L, Xu F, Zhang XJ, et al. Effect of high-fat diet on cholesterol metabolism in rats and its association with Na^+/K^+ -ATPase/Src/pERK signaling pathway [J]. *J Huazhong Univ Sci Technolog Med Sci*, 2015, 35(4): 490-494. DOI: 10.1007/s11596-015-1458-6.
- [13] Stadler JT, Marsche G. Obesity-related changes in high-density lipoprotein metabolism and function [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(23): 8985. DOI: 10.3390/ijms21238985.
- [14] Shinohata R, Shibakura M, Arai Y, et al. A high-fat/high-cholesterol diet, but not high-cholesterol alone, increases free cholesterol and apoE-rich HDL serum levels in rats and upregulates hepatic ABCA1 expression [J]. *Biochimie*, 2022, 197: 49-58. DOI: 10.1016/j.biochi.2022.01.011.
- [15] 张蕴南, 相萍萍, 刘超. 限食通过调控表观遗传修饰改善代谢综合征的研究进展 [J]. *国际内分泌代谢杂志*, 2022, 42(5): 364-368. DOI: 10.3760/cma.j.cn121383-20210622-06055.
- Zhang YN, Xiang PP, Liu C. Dietary restriction reversing metabolic syndrome by regulating epigenetic modifications [J]. *Int J Endocrinol Metabol*, 2022, 42(5): 364-368. DOI: 10.3760/cma.j.cn121383-20210622-06055.
- [16] Zheng T, Fu W, Jiang S, et al. Inverse L-shaped association between body mass index and myopia in Chinese schoolchildren: a pilot study [J]. *J Multidiscip Healthc*, 2024, 17: 1839-1846. DOI: 10.2147/JMDH.S458978.
- [17] Bai WY, Zhang HW, Ye XF, et al. Association between body mass index and myopia: results from NHANES and mendelian randomization [J]. *Ophthalmic Epidemiol*, 2025: 1-10. DOI: 10.1080/09286586.2025.2483684.
- [18] Mori K, Torii H, Fujimoto S, et al. The effect of dietary supplementation of crocetin for myopia control in children: a randomized clinical trial [J]. *J Clin Med*, 2019, 8(8): 1179. DOI: 10.3390/jcm8081179.
- [19] Zhang XJ, Zhang Y, Zhang YJ, et al. Dietary omega-3 polyunsaturated fatty acids as a protective factor of myopia: the Hong Kong Children Eye Study [J]. *Br J Ophthalmol*, 2025, 110(1): 101-106. DOI: 10.1136/bjo-2024-326872.
- [20] Li LH, Lee JC, Leung HH, et al. Lutein supplementation for eye diseases [J]. *Nutrients*, 2020, 12(6): 1721. DOI: 10.3390/nu12061721.
- [21] Lin X, Lei Y, Pan M, et al. Augmentation of scleral glycolysis promotes myopia through histone lactylation [J]. *Cell Metab*, 2024, 36(3): 511-525. DOI: 10.1016/j.cmet.2023.12.023.
- [22] Cortez M, Carmo LS, Rogero MM, et al. A high-fat diet increases IL-1, IL-6, and TNF- α production by increasing NF- κ B and attenuating PPAR- γ expression in bone marrow mesenchymal stem cells [J]. *Inflammation*, 2013, 36(2): 379-386. DOI: 10.1007/s10753-012-9557-z.
- [23] Jia R, Cao LP, Du JL, et al. Effects of high-fat diet on antioxidative status, apoptosis and inflammation in liver of tilapia (*Oreochromis niloticus*) via Nrf2, TLRs and JNK pathways [J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2020, 104: 391-401. DOI: 10.1016/j.fsi.2020.06.025.
- [24] 郝壮, 周健. 炎症在高度近视发病中的作用研究进展 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2025, 43(2): 174-180. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20231017-00135.
- Hao Z, Zhou J. Role of inflammation in the development of high myopia: current research insights [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2025, 43(2): 174-180. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20231017-00135.
- [25] Liu Y, Wang L, Xu Y, et al. The influence of the choroid on the onset and development of myopia: from perspectives of choroidal thickness and blood flow [J]. *Acta Ophthalmol*, 2021, 99(7): 730-738. DOI: 10.1111/aos.14773.
- [26] 苗森, 汪军, 孟忻, 等. 高度近视眼脉络膜厚度与年龄及眼轴长度相关性研究 [J]. *中国实用眼科杂志*, 2017, 35(3): 277-280. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2017.03.012.
- Miao S, Wang J, Meng X, et al. The choroidal thickness in highly myopic eyes and its relationship with the age and the axial length of the eyes [J]. *Chin J Pract Ophthalmol*, 2017, 35(3): 277-280. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2017.03.012.
- [27] Liang R, Yang R, Ai B, et al. Structural changes in the retina and choroid in patients with different degrees of myopia [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 31033. DOI: 10.1038/s41598-024-82142-y.
- [28] Wu H, Chen W, Zhao F, et al. Scleral hypoxia is a target for myopia control [J/OL]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2018, 115(30): E7091-E7100 [2025-08-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29987045/>. DOI: 10.1073/pnas.1721443115.
- [29] 原梦, 冯焯. 雌激素与雄激素对代谢功能障碍相关脂肪性肝病的作用及机制研究进展 [J]. *中华糖尿病杂志*, 2025, 17(12): 1671-1675. DOI: 10.3760/cma.j.cn115791-20250610-00273.
- [30] Nuzzi R, Caselgrandi P. Sex hormones and their effects on ocular disorders and pathophysiology: current aspects and our experience [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(6): 3269. DOI: 10.3390/ijms23063269.
- [31] Valero-Ochando J, Cantó A, López-Pedrajas R, et al. Role of gonadal steroid hormones in the eye: therapeutic implications [J]. *Biomolecules*, 2024, 14(10): 1262. DOI: 10.3390/biom14101262.
- [32] 高雨婷, 刘贺婷. 户外活动在近视防控中的作用 [J]. *国际眼科纵览*, 2022, 46(6): 554-559. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-5803.2022.06.014.
- Gao YT, Liu HT. The role of outdoor activities in myopia prevention and control [J]. *Int Rev Ophthalmol*, 2022, 46(6): 554-559. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-5803.2022.06.014.
- [33] Wen L, Cao Y, Cheng Q, et al. Objectively measured near work, outdoor exposure and myopia in children [J]. *Br J Ophthalmol*, 2020, 104(11): 1542-1547. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2019-315258.
- [34] Yam JC, Zhang XJ, Zaabaar E, et al. Interventions to reduce incidence and progression of myopia in children and adults [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2025, 109: 101410. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2025.101410.

(收稿日期:2025-09-01 修回日期:2026-03-09)

(本文编辑:施晓萌 骆世平)

读者·作者·编者

本刊对稿件的学术要求

文稿须有较高的学术价值,具有创新性、科学性、导向性和实用性。文稿要求资料翔实、实事求是、立论新颖、方法学正确、论据充分、图表恰当、结果客观、结论可靠、论述严谨、符合逻辑、层次清晰、数据准确、语句通顺。

(本刊编辑部)