

黑暗环境智能手机使用的视觉健康风险： 从眼表到眼底的潜在影响与机制探讨

全 雪, 许 燕*, 华思茵

重庆医科大学附属第二医院眼科, 重庆

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月5日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

随着智能手机的普及, 在黑暗环境中使用手机已成为普遍现象, 由此引发的视觉健康问题已成为公共卫生领域和眼科学界关注的焦点。目前研究多集中于长期暴露对眼表(如干眼、视疲劳)及黄斑区的影响, 而关于黑暗这一特殊视觉环境对眼底微血管结构, 特别是黄斑区血管密度(Vascular density, VD)及脉络膜结构: 包括脉络膜厚度(Choroidal thickness, CT)、脉络膜毛细血管密度(Choroidal capillary density CCD)及脉络膜血管指数(Choroidal vascular index, CVI)的短期影响, 尚缺乏系统性的研究。光学相干断层扫描血管成像(Optical coherence tomography angiography, OCTA)技术为无创、精准量化这些微观变化提供了可能。本综述旨在系统梳理黑暗环境下的视觉生理改变, 从机制上推演其对眼表(泪膜稳定性、主观视疲劳)及眼底(黄斑区血管密度、脉络膜厚度、脉络膜毛细血管密度及脉络膜血管指数)可能产生的短期影响。

关键词

智能手机, 黑暗环境, 光学相干断层扫描血管成像, 视疲劳, 黄斑区血管密度, 脉络膜结构

Visual Health Risks of Smartphone Use in Dark Environments: Potential Impacts and Mechanisms from Ocular Surface to Fundus

Xue Quan, Yan Xu*, Siyin Hua

Department of Ophthalmology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: November 11, 2025; accepted: December 5, 2025; published: December 11, 2025

*通讯作者。

Abstract

With the widespread use of smartphones, mobile phone usage in dark environments has become a common practice. The resulting visual health issues have drawn increasing attention in the field of public health and ophthalmology. Current research has largely focused on the long-term effects of such exposure on the ocular surface (such as dry eye and visual fatigue) and the macular region. However, there remains a lack of systematic investigation into the short-term effects of the specific visual environment of darkness on the microvascular structure of the fundus—particularly on vascular density (VD) in the macular region—as well as on choroidal structures, including choroidal thickness (CT), choroidal capillary density (CCD), and the choroidal vascular index (CVI). Optical coherence tomography angiography (OCTA) offers a non-invasive and precise method for quantifying these microstructural changes. This review aims to systematically outline the physiological visual changes that occur in dark environments and theoretically examine their potential short-term impacts on the ocular surface (such as tear film stability and subjective visual fatigue) and the fundus (including macular VD, CT, CCD, and CVI).

Keywords

Smartphone, Dark Environment, Optical Coherence Tomography Angiography, Visual Fatigue, Macular Vascular Density, Choroidal Structure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在数字时代，智能手机已成为人类感官的延伸。然而，随之而来的是一种逐渐普遍的行为模式——在夜间或黑暗环境中浏览手机。因此智能手机等电子设备在黑暗环境下的长时间使用对视觉系统的影响日益受到关注。尽管现有证据多集中于近视控制干预或特定眼病对脉络膜和血管密度的影响，但对于智能手机使用，特别是黑暗环境下的短期影响研究相对较少。一项研究探讨了虚拟现实头戴显示器(Virtual reality smartphone head mounted display, VR SHMD)对视觉参数的影响，发现在使用 2 小时后，脉络膜厚度并未出现显著变化，但参与者出现了明显的干眼和神经症状不适[1]。这提示电子屏幕使用可能首先影响眼表和主观感受，而对眼底结构的短期影响是目前被较少关注的研究领域。本综述旨在跨越从眼表到眼底的范畴，整合视觉生理学、生物力学及光生物学知识，构建一个理论框架，以探讨黑暗环境智能手机使用的潜在健康风险。

2. 黑暗环境下的视觉生理改变与核心应激源

黑暗环境并非视觉的“零负载”状态，而是引发了一系列独特的生理反应，构成了健康风险的基石。

2.1. 瞳孔与调节 - 集合系统的改变

在黑暗环境中，人眼睛的瞳孔会自然散大以增加入光量。而当注视明亮的手机屏幕时，瞳孔需要持续维持在一种相对收缩的紧张状态以应对强光，减少视网膜照度的增加[2][3]，这种与生理趋势相悖的调节需求，可能加重视觉系统的自主神经负荷。同时，人眼在近距离注视屏幕所伴随的调节(晶状体变凸)与

集合(双眼内转)需求，在瞳孔散大、景深变浅的情况下，其精确性和稳定性可能受到影响，从而加剧视疲劳，甚至可能导致头痛、视力模糊或聚焦困难等症状[4]。

2.2. 高对比度视觉负荷

视网膜是视觉系统的前哨，负责将光信号转换为神经信号。这一过程涉及多种细胞类型，包括光感受器细胞(视杆细胞和视锥细胞)、双极细胞、水平细胞、无长突细胞以及最终将信号传递给大脑的视网膜神经节细胞(Retinal ganglion cells, RGCs) [5]。视网膜电路通过复杂的处理，将光感受器接收到的像素化信息转化为RGCs的特征表征，这些特征包括亮度、对比度、运动和颜色等[5]。对比度，即亮度的差异，是视觉感知中的一个基本元素。视网膜神经元，特别是RGCs，对比度信号表现出高度的敏感性和适应性[6]。黑暗环境中的明亮屏幕创造了极高的局部对比度。这种极端的亮度差异会导致视网膜光感受器细胞和RGCs持续处于高负荷的响应状态，不仅是视觉信息处理的中枢负担加重，也可能通过尚未明确的机制，影响视网膜及脉络膜的血管自动调节功能。

2.3. 瞳目行为的抑制

瞬目，及眨眼，是维持眼表健康和泪膜稳定性的关键生理过程。正常的瞬目运动有助于将泪液均匀涂布于眼表，清洁眼球表面，并防止泪液过度蒸发。瞬目行为主要包括两个维度：瞬目频率(单位时间内的眨眼次数)和瞬目完整性(每次眨眼时眼睑是否完全闭合)。随着数字时代的到来，视频显示终端(Video display terminal, VDT)，如电脑、智能手机、电视等，已经成为人们工作、学习和娱乐不可或缺的工具。然而，长时间使用VDT与一系列视觉不适症状密切相关，统称为数字眼疲劳或视频终端综合征。其中，VDT使用对瞬目模式的改变被认为是导致或加剧干眼症及相关眼表疾病的核心机制之一。多项研究证实，专注于视频终端任务会显著降低使用者的瞬目频率和完整性[7]-[10]。在黑暗环境中，使用者可能更为沉浸，这种“凝视”效应会被进一步放大。不完整的瞬目无法形成均匀的泪膜，直接导致泪液过度蒸发，加重眼部不适[11]。

2.4. 屏幕光线的生物效应

随着发光二极管(light-emitting diode, LED)技术在室内照明和智能手机、电脑等电子设备的广泛应用，人类对人工光源，特别是富含短波长蓝光的光线暴露显著增加[12] [13]。蓝光因其波长短、能量高，能够穿透角膜和晶状体直达视网膜，引发了学术界对其潜在健康风险的广泛关注[14]。视网膜中的光感受器细胞和视网膜色素上皮细胞(Retinal pigment epithelial, RPE)对蓝光尤为敏感[15] [16]。多项研究指出，蓝光具有较高的光化学能量，能够增加细胞内活性氧(reactive oxygen species, ROS)的产生，通过诱导氧化应激对视网膜细胞造成损伤[17] [18]。虽然日常生活中屏幕蓝光的剂量远低于造成光化学损伤的阈值，但在瞳孔散大的暗环境下，进入眼内的光通量增加，其对视网膜色素上皮细胞和光感受器细胞的累积效应及其对昼夜节律的干扰，仍是不可忽视的潜在应激因素。

3. 对眼表的潜在影响：从泪膜到主观感受

基于上述机制，黑暗环境对眼表的影响是直接且可预测的。

3.1. 泪膜稳定性的破坏

机制：瞬目抑制→泪膜无法及时更新与铺展→泪液过度蒸发→泪膜稳定性下降。

观测指标：泪膜破裂时间(break-up time, BUT)是评估这一过程的金标准。我们可合理假设，与明亮环境相比，在黑暗环境中使用相同时长的手机，BUT的缩短将更为显著。

3.2. 主观视疲劳的加剧

机制：调节-集合负荷、高对比度眩光、以及干涩感等多重因素共同作用，引发中枢性疲劳。

观测指标：视觉模拟评分(Visual Analogue Scale, VAS)是量化主观不适感的有效工具。预期黑暗环境下的 VAS 评分将呈现更高水平的增长，且可能与使用时长呈正相关。

4. 对眼底的潜在影响：OCTA 下的微循环探索

眼底黄斑区是人眼视觉最敏锐的部位，其结构和血供的稳定对维持正常视功能至关重要。黄斑区的血管和脉络膜结构是当前眼科研究的热点，特别是在近视、年龄相关性黄斑变性(Age-related macular degeneration, AMD)等疾病的背景下。脉络膜结构和黄斑区血管密度(VD)是评估黄斑健康状况的两个关键生物学指标，通常使用光学相干断层扫描(Optical coherence tomography, OCT)和光学相干断层扫描血管成像(OCTA)技术进行无创测量[19] [20]。

4.1. 黄斑区血管密度(VD)的可能变化

黄斑区血管密度(VD)反映了视网膜毛细血管网络的灌注情况。现有研究认为，持续近距离用眼，会在短期内引起黄斑区视网膜及脉络膜血流密度的下降。一项 2024 年的研究发现，30 名大学生在持续近距离阅读纸质文本 1 h，会引起黄斑区浅层视网膜血流在短期内下降；持续近距离阅读电子文本 1 h，会引起黄斑区脉络膜血流短期内下降[21]。另一项于 2023 年的研究也得出相似的结论，该研究让 61 名近视青年近距离观看手机视频 1 h，并使用 OCTA 测量用眼前后的黄斑区浅层视网膜微循环指标。研究发现用眼后，包括血管长度密度(Vascular length density, VLD)和血管灌注密度(Vascular perfusion density, VPD)在内的多项指标均显著低于用眼前，其中中心区和内环区的 VLD 及 VPD 下降最为明显[22]。虽然这些研究证实了使用近距离用眼对黄斑区血管的短期负面影响，但它们均没有专门在黑暗环境中进行，也没有对不同使用时长进行分层比较。因此，当这一行为发生在黑暗环境下时是否会加剧这种血流下降效应，以及血流下降的程度是否与使用时长呈线性关系，目前尚无直接证据。我们推测，黑暗环境可能通过以下潜在机制，影响黄斑区血流甚至加剧血流下降效应：

1) 血管自主调节紊乱机制：视觉皮层和处理相关区域的高负荷工作，可能导致视网膜血管的自主调节功能紊乱：代谢需求增加可能引发代偿性血管扩张或血流增加；另外，应激也可能导致血管收缩。这种失衡的效应可能体现在 VD 的动态变化上。

2) 血管收缩机制：视觉负荷和潜在的光生物应激可能引发血管收缩因子(如内皮素-1)的释放，导致毛细血管发生功能性收缩甚至关闭，尤其是结构更为脆弱，自主调节功能有限的深部毛细血管丛(Deep capillary plexus, DCP)，从而表现为 DCP-VD 的显著降低。

4.2. 中心凹无血管区(Fovea Avascular Zone, FAZ)的稳定性

中心凹无血管区(FAZ)是位于黄斑中心凹、被视网膜毛细血管丛包围的无血管区域，其形态和大小是评估黄斑区微循环状态的重要指标[23] [24]。FAZ 的完整性对维持中心视力至关重要，而光学相干层析成像血管造影(OCTA)作为一种非侵入性成像技术，能够对 FAZ 的面积、周长、形态指数等参数进行精确量化，为临床研究提供有利数据。但是 FAZ 区域在成人中通常保持稳定。然而，在极端的血流动力学改变或微循环障碍下，其形态和面积也可能发生细微变化。一项 2023 年的研究让 61 名近视青年近距离观看手机视频 1 h，并用 OCTA 测量用眼前后的 FAZ 的面积(FAZ-A)和周长(FAZ-P)变化，结果显示在用眼后 FAZ 的周长和面积呈现变化趋势，但这种变化并未达到统计学显著性[22]。因此推测短期干预下 FAZ 变化可能不显著，但将其作为观测指标之一，可以排除早期微循环病变的极端情况，并为长期研究提供基

线数据。

4.3. 脉络膜厚度(CT)的争议与整合

脉络膜是位于视网膜和巩膜之间的富含血管的组织，对眼球的营养供应、温度调节和屈光状态维持至关重要[25] [26]。随着光学相干断层扫描(OCT)等影像技术的发展，对脉络膜厚度(CT)的无创、高分辨率测量成为了可能，使其逐渐成为眼科研究的热点[27]。脉络膜厚度不仅与年龄、屈光状态等生理因素相关，还可能受到多种病理和环境因素的影响。特别是在近视的研究中，脉络膜变薄被认为是近视发生和发展的重要特征[28]。但是目前关于智能手机使用对脉络膜厚度短期影响的研究结果存在分歧。部分研究未观察到显著影响，而另一些研究则提示了潜在的关联。例如一项 2021 年的研究纳入了 58 名健康志愿者，比较了使用虚拟现实智能手机头戴显示器(VR SHMD)或普通智能手机进行 2 小时游戏后的视觉参数变化，结果显示脉络膜厚度均未观察到有统计学意义的显著变化[1]。而另一项 2025 年的针对 119 名小学三年级学生的研究则得出了不同的结论，该研究发现，使用智能手机、平板电脑或手持游戏设备的时间与特定区域的脉络膜厚度存在显著的正相关关系。同时，该研究还发现使用电脑的时间与中心凹下方脉络膜厚度呈负相关，而阅读距离则与部分区域的脉络膜厚度呈正相关[29]。目前研究对此结论不一，这恰恰提示 CT 的变化可能是一个复杂的、受多种因素调节的动态过程。在黑暗环境中使用智能手机所引发的多重应激(如调节 - 集合负荷、高对比度及蓝光暴露)，可能通过影响脉络膜血管的舒缩状态，导致 CT 发生短期、可逆的改变。我们推测，在黑暗环境下使用手机的初期，为满足因高负荷视觉工作而增加的视网膜代谢需求，脉络膜血管可能发生代偿性扩张与充血，导致 CT 出现一过性增厚。然而，随着使用时间的延长，持续的视觉应激可能引发交感神经兴奋或血管收缩因子(如内皮素-1)释放，从而导致脉络膜血管收缩、血流减少，表现为 CT 从初始的增厚转为变薄，或直接呈现变薄趋势。这种先增后降或持续降低的动态模式，可能是视觉疲劳累积和微循环调节功能开始紊乱的早期信号。

4.4. 脉络膜毛细血管密度(CCD)的可能变化

脉络膜毛细血管(Choriocapillaris)是脉络膜最内层的毛细血管网络，负责为视网膜外层(包括光感受器细胞和视网膜色素上皮)提供氧分和营养。其密度的变化可直接反映脉络膜微循环的灌注状态[30] [31]。目前研究已关注到近距离用眼、光照环境等因素与脉络膜厚度及血流之间的关系。例如，有研究表明近距离用眼可导致成人脉络膜厚度减少和 CVI 下降[32]，而不同的光照条件(如窄带蓝光、红光)对脉络膜厚度有不同的影响[33]。而在黑暗环境中使用智能手机时，由于高对比度视觉负荷、瞳孔调节冲突及潜在的蓝光暴露，可能导致视网膜代谢需求与光生物应激增强，从而引起脉络膜毛细血管的短暂性收缩或血流再分布，进一步影响 CCD。我们推测，在黑暗环境下持续使用智能手机可能导致 CCD 短期内下降，尤其是在黄斑中心凹下区域，该区域对缺血和代谢变化最为敏感。未来研究可结合 OCTA 高分辨率模式，量化不同使用时长下 CCD 的动态变化，以揭示其与视觉疲劳和眼底健康之间的潜在联系。

4.5. 脉络膜血管指数(CVI)的动态响应

脉络膜血管指数(Choroidal Vascular Index, CVI)是反映脉络膜血管面积在总脉络膜面积中所占比例的指标，用于客观评估脉络膜的血管化程度[34] [35]。CVI 的变化可间接反映脉络膜的血流状态与血管调节能力。尽管目前没有直接研究使用智能手机，但有研究探讨了在暗适应(模拟黑暗环境)过程中脉络膜血管的变化。例如一项 2024 年的研究，纳入了 24 名健康受试者，通过口服 75 克葡萄糖诱导急性高血糖状态。结果显示，在暗适应过程中，急性高血糖组的脉络膜血管指数(CVI)较基线水平显著下降，而对照组未见此变化。这提示在特定的生理压力(如高血糖)下，黑暗环境会导致脉络膜血管性指标发生改变[36]。

这也表明，黑暗环境本身是影响脉络膜血管反应的重要条件，但其结果是在叠加了急性高血糖这一混杂因素下得出的，不能直接等同于健康个体在黑暗环境中使用手机的影响。但是我们推测，在黑暗环境下，由于视觉系统处于高度应激状态，交感神经兴奋性增强，可能引起脉络膜血管收缩，从而导致 CVI 降低。另一方面，若机体出现代偿性血管扩张以应对视网膜代谢需求的增加，则 CVI 可能暂时升高。因此，CVI 在短期内的变化趋势可能是双向且动态的，取决于使用时长、屏幕亮度、个体调节能力等多种因素。未来可通过分层分析(如不同时长、不同光照条件等)进一步明确其变化规律及临床意义。

5. 混杂因素与个体差异的考量

当然在解读黑暗环境用眼对视觉系统的影响时，也需系统考量以下混杂因素与个体差异：

- 1) 设备参数：屏幕型号、亮度设置、光谱成分(如蓝光比例)、是否开启“夜览模式”等均可调节光线生物效应。
- 2) 显示内容：文字阅读、视频浏览或游戏等不同任务对调节需求、认知负荷和瞬目模式的影响各异。
- 3) 个体生理差异：年龄(影响调节能力)、屈光状态(特别是近视程度与脉络膜基线厚度)、基线泪膜功能、虹膜色素深浅等。
- 4) 行为代偿：个体在不适时可能无意识地进行调节放松、增加瞬目或改变观看距离，这些行为代偿可能部分掩盖真实的生理应激反应。

6. 结论与展望

因此在黑暗环境中使用智能手机，构成了一个由瞳孔调节冲突、高对比度视觉负荷、瞬目行为抑制及屏幕蓝光暴露等多重应激源叠加的独特视觉场景。本综述通过机制推演与现有证据整合，系统阐述了该行为对视觉系统可能产生的从眼表到眼底的连锁影响，为开展干预性研究提供了理论框架。例如：可设计一项前瞻性、随机、对照的交叉研究：纳入 40 名 18~45 岁健康眼轴 < 26 mm 的成人，无干眼、青光眼、眼底病变、手术病史、糖尿病、自身免疫病，无激素或免疫抑制剂使用史，随机分入黑暗环境组 ($\leq 5 \text{ lux}$) 与正常光照对照组 ($500 \pm 50 \text{ lux}$)；干预措施：所有受试者在所属环境组内，以随机顺序完成 30 分钟、60 分钟、120 分钟的智能手机使用任务(屏幕亮度固定为 50%，关闭护眼模式及自动调节)，中间至少间隔 24 小时洗脱期；观测指标及时间点为干预前后使用 OCTA 测量黄斑区浅/深层血管密度(SVP-VD、DCP-VD)、FAZ 面积、脉络膜厚度(CT)、脉络膜毛细血管密度(CCD)与脉络膜血管指数(CVI)，次要指标包括泪膜破碎时间(BUT)及主观视疲劳评分(VAS)。从而探索并描绘出从眼表不适到眼底微循环改变的短期生理轨迹。这将不仅有助于将公众的普遍担忧转化为科学的理性认知，更能为制定针对性的视觉健康公共卫生策略、开发保护性干预措施以及指导个体养成健康用眼习惯，提供至关重要的理论依据与实践指导。

参考文献

- [1] Yoon, H.J., Moon, H.S., Sung, M.S., Park, S.W. and Heo, H. (2021) Effects of Prolonged Use of Virtual Reality Smartphone-Based Head-Mounted Display on Visual Parameters: A Randomised Controlled Trial. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 15382. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94680-w>
- [2] Douglas, R.H. (2018) The Pupillary Light Responses of Animals; a Review of Their Distribution, Dynamics, Mechanisms and Functions. *Progress in Retinal and Eye Research*, **66**, 17-48. <https://doi.org/10.1016/j.preteyes.2018.04.005>
- [3] McDougal, D.H. and Gamlin, P.D. (2015) Autonomic Control of the Eye. *Comprehensive Physiology*, **5**, 439-473. <https://doi.org/10.1002/j.2040-4603.2015.tb00603.x>
- [4] Chase, C., Tosha, C., Borsting, E. and Ridder, W.H. (2009) Visual Discomfort and Objective Measures of Static Accommodation. *Optometry and Vision Science*, **86**, 883-889. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3181ae1b7c>

- [5] Kerschensteiner, D. (2022) Feature Detection by Retinal Ganglion Cells. *Annual Review of Vision Science*, **8**, 135-169. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-100419-112009>
- [6] Dai, M. and Liang, P. (2020) Functional-Pathway-Dominant Contrast Adaptation and Sensitization in Mouse Retinal Ganglion Cells. *Cognitive Neurodynamics*, **14**, 757-767. <https://doi.org/10.1007/s11571-020-09636-z>
- [7] Chidi-Egboka, N.C., Jalbert, I., Chen, J., Briggs, N.E. and Golebiowski, B. (2023) Blink Rate Measured *in Situ* Decreases While Reading from Printed Text or Digital Devices, Regardless of Task Duration, Difficulty, or Viewing Distance. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **64**, Article 14. <https://doi.org/10.1167/iovs.64.2.14>
- [8] Page, C., Liu, C.C., Meltzer, J. and Ghosh Hajra, S. (2024) Blink-Related Oscillations Provide Naturalistic Assessments of Brain Function and Cognitive Workload within Complex Real-World Multitasking Environments. *Sensors*, **24**, Article 1082. <https://doi.org/10.3390/s24041082>
- [9] 中华医学会眼科学分会角膜病学组, 中国医师协会眼科医师分会角膜病学组. 中国干眼临床诊疗专家共识(2024年) [J]. 中华眼科杂志, 2024, 60(12): 968-976.
- [10] 亚洲干眼协会中国分会, 海峡两岸医药卫生交流协会眼科学专业委员会眼表与泪液病学组, 中国医师协会眼科医师分会眼表与干眼学组. 中国干眼专家共识: 生活方式相关性干眼(2022 年) [J]. 中华眼科杂志, 2022, 58(8): 573-583.
- [11] 吴小曼, 谌丹, 戚梦莹, 等. 不同剂量视频终端蓝光对眼表影响的量化研究[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2020, 22(6): 441-447.
- [12] de Gálvez, E.N., Aguilera, J., Solis, A., de Gálvez, M.V., de Andrés, J.R., Herrera-Ceballos, E., et al. (2022) The Potential Role of UV and Blue Light from the Sun, Artificial Lighting, and Electronic Devices in Melanogenesis and Oxidative Stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **228**, Article 112405. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112405>
- [13] Wong, N.A. and Bahmani, H. (2022) A Review of the Current State of Research on Artificial Blue Light Safety as It Applies to Digital Devices. *Heliyon*, **8**, e10282. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10282>
- [14] 王晓慧, 李志坚. 短波蓝光对眼部损伤的研究进展[J]. 医学综述, 2021, 27(1): 116-120.
- [15] Salceda, R. (2024) Light Pollution and Oxidative Stress: Effects on Retina and Human Health. *Antioxidants*, **13**, Article 362. <https://doi.org/10.3390/antiox13030362>
- [16] Chakravarthy, H., Georgiev, V., Wagen, C., Hosseini, A. and Matsubara, J. (2024) Blue Light-Induced Phototoxicity in Retinal Cells: Implications in Age-Related Macular Degeneration. *Frontiers in Aging Neuroscience*, **16**, Article ID: 1509434. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2024.1509434>
- [17] Fietz, A., Hurst, J. and Schnichels, S. (2022) Out of the Shadow: Blue Light Exposure Induces Apoptosis in Müller Cells. *International Journal of Molecular Sciences*, **23**, Article 14540. <https://doi.org/10.3390/ijms232314540>
- [18] 鞠雅晗, 汤志敏, 王宇瑶, 等. 不同波长的蓝光对人视网膜色素上皮细胞的影响[J]. 国际眼科杂志, 2020, 20(8): 1315-1319.
- [19] Wang, Y., Zhu, X., Xuan, Y., Wang, M., Zhou, X. and Qu, X. (2022) Short-Term Effects of Atropine 0.01% on the Structure and Vasculature of the Choroid and Retina in Myopic Chinese Children. *Ophthalmology and Therapy*, **11**, 833-856. <https://doi.org/10.1007/s40123-022-00476-0>
- [20] 郑淑月, 稲荔, 唐冲, 等. 高度近视人群的黄斑区视网膜血管密度及厚度分析[J]. 陆军军医大学学报, 2022, 44(10): 1067-1073.
- [21] 高丽煜, 任瑞, 王玉成, 等. 青年人近距离阅读纸质及电子文本对黄斑区微循环的短期影响[J]. 安徽医药, 2024, 28(1): 95-100+216.
- [22] 张汝婷, 滕月, 李君慧, 等. 近视患者近距离用眼后黄斑血流的变化[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2023, 44(4): 684-690.
- [23] 赵立宇, 杨芳, 吴昌凡, 张鹏飞, 姜茂华. 视网膜血管病中黄斑中心凹无血管区的研究进展[J]. 中华眼底病杂志, 2021, 37(2): 158-162.
- [24] 隋金沅, 李昊儒, 白洋, 等. 基于 OCTA 测量黄斑中心凹无血管区形态在眼部疾病中的应用研究进展[J]. 国际眼科杂志, 2024, 24(1): 48-52.
- [25] Yeung, S.C., You, Y., Howe, K.L. and Yan, P. (2020) Choroidal Thickness in Patients with Cardiovascular Disease: A Review. *Survey of Ophthalmology*, **65**, 473-486. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2019.12.007>
- [26] 国际近视研究院, 陈玳西, 杨金柳行, 等. 国际近视研究院关于动态脉络膜的报告[J]. 中华实验眼科杂志, 2024, 42(2): 172-184.
- [27] 段虹宇, 马佰凯, 杨婷婷, 等. 高度近视眼脉络膜形态学改变的研究进展[J]. 中华眼科杂志, 2021, 57(6): 459-464.

- [28] 向爱群, 曾芳, 钟兴武. 脉络膜在近视发展中的调控作用及其机制[J]. 眼科学报, 2024, 39(12): 657-665.
- [29] Hashimoto, A., Yotsukura, E., Ogawa, M., Mori, K., Hanyuda, A., Tsubota, K., et al. (2025) Thicker Peripapillary Choroid May Be Associated with Behavioral Factors in Tokyo's Children. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 17868. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02825-y>
- [30] Liu, X., Lin, Z., Wang, F., Peng, X., He, W., Chen, D., et al. (2021) Choroidal Thickness and Choriocapillaris Vascular Density in Myopic Anisometropia. *Eye and Vision*, **8**, Article No. 48. <https://doi.org/10.1186/s40662-021-00269-9>
- [31] 赵芹, 代艳. OCTA 观察早期 ARMD 患者黄斑区血流密度及形态结构的变化[J]. 国际眼科杂志, 2020, 20(12): 2170-2174.
- [32] Liu, M., Wang, Y., Li, H., Zhao, Y., Ma, M., Xu, S., et al. (2024) Differences in Choroidal Responses to Near Work between Myopic Children and Young Adults. *Eye and Vision*, **11**, Article No. 12. <https://doi.org/10.1186/s40662-024-00382-5>
- [33] Lou, L. and Ostrin, L.A. (2020) Effects of Narrowband Light on Choroidal Thickness and the Pupil. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **61**, Article 40. <https://doi.org/10.1167/iovs.61.10.40>
- [34] Xuan, M., Li, C., Kong, X., et al. (2024) Distribution and Determinants of Choroidal Vascularity Index in Healthy Eyes from Deep-Learning Choroidal Analysis: A Population-Based SS-OCT Study. *British Journal of Ophthalmology*, **108**, 546-551.
- [35] Borrelli, E., Gabela, M.C., Sacconi, R., Querques, L., Vella, G., Zuccaro, B., et al. (2021) Choroidal Luminal and Stromal Areas and Choriocapillaris Perfusion Are Characterised by a Non-Linear Quadratic Relation in Healthy Eyes. *British Journal of Ophthalmology*, **105**, 567-572. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2020-316479>
- [36] 于焕凯. 基于 SS-OCT 探究急性高糖对明暗适应过程中视网膜脉络膜血流及结构改变的影响[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州医科大学, 2022.