·临床报告·

发光二极管衍生的蓝光短时间暴露对眼表的影响

金海燕,李正日

引用:金海燕,李正日. 发光二极管衍生的蓝光短时间暴露对眼表的影响. 国际眼科杂志, 2026,26(12):2220-2223.

基金项目:吉林省自然科学基金项目(No.YDZJ202401111ZYTS)
作者单位:(133000)中国吉林省延吉市,延边大学附属医院干眼诊疗中心
作者简介:金海燕,硕士,主治医师,研究方向:眼表疾病。
通讯作者:李正日,博士,主任医师,研究方向:眼表疾病. ophlizhengri@163.com
收稿日期:2026-07-15 修回日期:2026-10-16

摘要

目的:研究发光二极管衍生的蓝光短时间暴露对人眼表的影响。

方法:本研究是一项前瞻性、非随机、比较性临床研究。收集 2026 年 2 月至 2026 年 5 月就诊于我院体检科的健康成年志愿者,完善眼表检查后参加了本研究。对照近距离暴露于发光二极管衍生的蓝光前后眼表疾病指数(OSDI)问卷评分、泪液分泌量、非接触式泪膜破裂时间(NIBUT)及角膜荧光素钠染色的变化。同时使用 ELISA 测量泪膜中的氧化应激标记物,包括泪膜中的己酰赖氨酸(HEL)及 4-羟基-2-壬醛(4-HNE)。所有测量均在基线状态,使用智能手机 1、4 h 后进行。

结果:本研究纳入健康成年志愿者 30 名,年龄 21-35 岁(因中青年群体是使用智能手机时长最长的人群),平均年龄 27.70±4.04 岁,男女比例 1∶1。参与者 4 h 时的 OSDI 问卷评分与基线和 1 h 时相比显著增加(均 $P<0.05$)。参与者 4 h 时的 NIBUT 与基线和 1 h 时相比显著降低(均 $P<0.05$)。参与者 4 h 时的 HEL 浓度与基线、1 h 时比较显著增加(均 $P<0.05$)。参与者不同时间的泪液分泌量、角膜荧光染色、4-HNE 均无差异(均 $P>0.05$)。

结论:尽量降低凝视时眨眼间隔时间延长导致泪液过度蒸发及近距离用眼调节集合负荷的情况下,使用智能手机近距离暴露于发光二极管衍生的蓝光不仅会加重主观眼部症状,使眼表的泪膜不稳定及泪液的氧化应激指数增高,最终可诱发眼表氧化应激升高,存在角膜氧化损伤、眼表炎症及干眼的潜在风险。

关键词:干眼;蓝光;发光二极管;眼表
DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.12.25

Effect of short-term exposure to light emitting diode-derived blue light on the ocular surface

Jin Haiyan, Li Zhengri

Foundation item: Jilin Provincial Natural Science Foundation Project (No.YDZJ202401111ZYTS)
Dry Eye Center, Affiliated Hospital of Yanbian University, Yanji 133000, Jilin Province, China

Correspondence to: Li Zhengri. Dry Eye Center, Affiliated Hospital of Yanbian University, Yanji 133000, Jilin Province, China. ophlizhengri@163.com
Received: 2026-07-15 Accepted: 2026-10-16

Abstract

• AIM: To investigate the effects of short-term exposure to light emitting diode (LED)-derived blue light on the human ocular surface.

• METHODS: This was a prospective, non-randomized, comparative clinical study. Healthy adult volunteers visiting the Physical Examination Department of our hospital between February 2026 and May 2026 were enrolled in this study after completing ocular surface examinations. Ocular surface disease index (OSDI), tear secretion volume, non-invasive keratograph break-up time (NIBUT), and corneal sodium fluorescein staining were measured before and after close-range exposure to LED-derived blue light. The tear film concentrations of oxidative stress markers, hexanoyl-lysine (HEL) and 4-hydroxy-2-nonenal (4-HNE), were quantified by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). All measurements were performed at baseline, and at 1 h and 4 h after blue light exposure via smartphone.

• RESULTS: Thirty healthy adult volunteers aged 21-35 y were enrolled (young and middle-aged people have the longest smartphone usage duration), with a mean age of 27.70±4.04 y and a male-to-female ratio of 1∶1.The OSDI scores at 4 h were significantly elevated compared with baseline and 1 h (all $P<0.05$). NIBUT at 4 h decreased significantly relative to baseline and 1 h (all $P<0.05$). HEL concentrations at 4 h were significantly higher than those at baseline and 1 h (all $P<0.05$). There were no significant differences in tear secretion volume, corneal fluorescein staining and 4-HNE levels across all time points (all $P>0.05$).

• CONCLUSION: While minimizing excessive tear evaporation caused by prolonged inter-blink intervals during gazing and the accommodative-convergence load associated with near work, close-range exposure to blue light emitted by LEDs from smartphones not only exacerbates subjective symptom but also destabilizes the tear film and elevates oxidative stress levels in tears. This may increase ocular surface oxidative stress, thereby contributing to potential risks of corneal oxidative damage, ocular surface inflammation, and dry eye.

• KEYWORDS: dry eye disease; blue light; light emitting diode; ocular surface

Citation: Jin HY, Li ZR. Effect of short-term exposure to light emitting diode-derived blue light on the ocular surface. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026,26(12):2220-2223.

0 引言

现代生活中,长时间使用电视、电脑、手机等电子设备,导致干眼患病逐年增高并年轻化[1]。干眼为多因素引起的慢性眼表疾病,是由泪液的质、量及动力学异常导致的泪膜不稳定或眼表微环境失衡,可伴有眼表炎性反应、组织损伤及神经异常,造成眼部多种不适症状和(或)视功能障碍。智能手机使用对眼表的多重负荷已被多项研究证实。包括凝视时随眨眼间隔时间延长导致泪液过度蒸发、调节疲劳、近距离负荷等。表明智能手机使用导致的眼表变化并非独立因素,而是协同作用,共同构成了视频终端相关性干眼的核心致病环节[2]。发光二极管(light emitting diode,LED)是一种能够将电能转化为光能并发出光的半导体器件。LED 的工作原理是利用电场激发半导体中的电子和空穴复合而产生光子,从而发出可见光或红外光。已被开发为替代传统光源的替代选择,并越来越多地用作各种电器的照明组件,例如电视、个人电脑和智能手机。从技术角度来看,使用 LED 作为照明源是高效的,因为与现有光源(例如白炽灯)相比,LED 具有很多优点,如低功耗、高效率、长寿命、小尺寸、快速响应、环保等。然而,众所周知,LED 会发出相当大量的蓝光[3]。最近,蓝光对视网膜的有害影响已得到广泛研究[4-6]。已知蓝光会通过过量的活性氧(ROS)产生导致感光细胞和视网膜色素上皮(RPE)细胞损伤。已有研究证明干眼小鼠模型和干眼患者的结膜上皮细胞氧化应激增加[7-8],过度暴露于蓝光导致眼表泪膜退化,炎症标志物水平升高和 ROS 产生[9]。也有研究证明,蓝光对人类角膜上皮细胞有不利影响[10-11]。然而,很少有研究调查蓝光对直接暴露在光线下的眼表的影响。因此本研究旨在探索,尽量降低凝视时眨眼间隔时间延长导致泪液过度蒸发及近距离用眼调节集合负荷的复合干预的情况下,发光二极管衍生的蓝光短时间暴露对人眼表的影响。

1 对象和方法

1.1 对象 本研究是一项前瞻性、非随机、比较性临床研究,旨在评估 LED 衍生的蓝光对主观症状以及泪膜和眼部变化的影响。收集 2026 年 2 月至 2026 年 5 月就诊于我院体检科的健康成年志愿者,完善眼表检查后参加了本研究。排除标准:眼部疾病、可能影响眼部状况的全身性疾病、使用隐形眼镜或眼部手术史。本研究遵循《赫尔辛基宣言》,已取得医学伦理委员会审查批准(批准号:延医伦理 20260276 号),所有参与者均自愿参加研究,并签署知情同意书。

1.2 方法 分别在基线(使用智能手机前)、使用智能手机近距离暴露于 LED 衍生的蓝光下 1、4 h 后进行测量。要求参与者在使用智能手机过程中眨眼率不低于 15 次/分,使用 BlinkAlarm App,前置摄像头实时检测眨眼频率,低于阈值时提醒。并执行“20-20-20”法则,这是眼科领域最经典的微休息方案。每近距离用眼 20 min,就抬头看 6 m(20 英尺)以外的物体,持续 20 s,全程有工作人员计时并提醒。尽量降低凝视时眨眼间隔时间延长导致泪液过度蒸发[12-13]及近距离用眼调节集合负荷的复合干预对试验结果的影响。参与者使用同品牌智能手机(屏幕类型 LTPO AMOLED、屏幕尺寸 6.2),光照强度固定为最大亮度的 80%。显示屏幕与参与者之间的距离及角度均保持恒定。所有参与者均被要求进行一项益智游戏。

1.2.1 调查方式 采用门诊调查问卷获取信息资料,把眼表疾病指数(ocular surface disease index,OSDI)问卷发放给参与者,让参与者在医护人员的指导下进行填写,问卷内容包括个人信息和病情资料、眼部刺激症状(3 题:如畏光、异物感、眼痛或酸胀)、视觉功能影响(6 题:如视物模糊、视力不佳,以及阅读、夜间驾驶、使用电脑、看电视等日常活动中的困难)、环境触发因素(3 题:如在大风、低湿度、空调环境中症状的加重情况)等。

1.2.2 特殊检查 医院检查项目一共有 4 项:(1)泪液分泌量检测:Schirmer Ⅰ试验是在无眼部表面麻醉情况下,测试的是主泪腺的分泌功能,观察时间为 5 min。(2)非接触式泪膜破裂时间(NIBUT)测定:运用 Keratograph 5M 眼表综合分析仪(oculus keratograph 4、tearscope plus)检查泪膜的稳定性。(3)角膜荧光素钠染色:观察角膜上皮或结膜上皮的染色情况[14]。使用荧光素钠眼科检测试纸染色,钴蓝滤光片下分区域观察角膜荧光素染色情况,并进行评分。采用三分法:将角膜分为上、中、下 3 个区域,根据每个区域角膜上皮荧光素染色情况进行评分,无染色为 0 分,染色点数 1-30 个为 1 分,染色点数>30 个且染色点未融合为 2 分,出现角膜片状染色融合、丝状物及溃疡等为 3 分;总分为 9 分。(4)测量泪液中氧化应激标记物的总蛋白水平:使用玻璃毛细管,从双眼下泪河处以非创伤性方式采集。操作中注意避免触及角膜及结膜表面。采集 30 μL 泪液样本,用磷酸盐缓冲液(PBS)稀释。采用竞争性 ELISA 试剂盒测定泪液样本中氧化标记物己酰赖氨酸(HEL)和 4-羟基-2-壬醛(4-HNE)浓度[15]。HEL 检测范围为 2-700 nmol/L。泪液样本经 α-糜蛋白酶于 37 ℃消化过夜后,取 50 μL 与等体积一抗溶液加入预包被板中,4-7 ℃孵育过夜;随后加入 HRP 标记二抗室温孵育 1 h,TMBZ 显色 15 min 后于 450 nm 读取吸光度。4-HNE检测按制造商说明书操作。样本吸光度与标准曲线对比计算 HEL 及 4-HNE 浓度。室温与湿度分别维持在 20-25 ℃和 30%-40%。

统计学分析:使用统计软件 SPSS27.0 对数据进行分析。计量资料表示为 $\bar{x}\pm s$,采用重复测量数据的方差分析,若有差异进行两两比较采用 LSD-t 检验。$P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 一般情况 本研究纳入健康成年志愿者 30 名,年龄 21-35 岁(因中青年群体是使用智能手机时长最长的人群),平均年龄 27.70±4.04 岁,男女比例 1:1。

2.2 OSDI 问卷评分结果 参与者不同时间的 OSDI 问卷评分比较,差异具有统计学意义($F=39.9579$,$P<0.01$)。参与者 1 h 时的 OSDI 问卷评分较基线增加,但差异无统计学意义($P=0.25$)。参与者 4 h 时的 OSDI 问卷评分与基线和 1 h 时相比,差异有统计学意义(均 $P<0.05$),见表 1。

2.3 泪液分泌量检测结果 参与者不同时间的 Schirmer Ⅰ试验测量的泪液分泌量比较,差异无统计学意义($F=0.6764$,$P=0.5124$)。参与者 1 h 时的泪液分泌量与基线比较差异无统计学意义($P=0.58$)。参与者 4 h 时的泪液分泌量与基线、1 h 时比较差异无统计学意义($P=0.25$、0.55),见表 1。

2.4 NIBUT 测定结果 参与者不同时间的 NIBUT 比较,差异具有统计学意义($F=10.0297$,$P<0.01$)。参与者 1 h 时的 NIBUT与基线比较差异无统计学意义($P=0.72$)。参

表 1　参与者在不同时间的临床指标结果　$\bar{x}\pm s$

时间	OSDI(分)	Schirmer Ⅰ试验(mm/5 min)	NIBUT(s)	荧光染色(分)
基线	16.16±9.36	13.69±1.72	11.57±2.43	0.80±0.79
1 h	19.37±6.78	13.41±1.57	11.30±3.17	0.47±0.81
4 h	39.01±13.45[a,c]	13.12±2.35	8.50±2.59[a,c]	0.77±0.96

注:[a]P<0.05 *vs* 基线;[c]P<0.05 *vs* 1 h。

与者 4 h 时的 NIBUT 与基线、1 h 时比较差异有统计学意义(均 P<0.05),见表 1。

2.5 角膜荧光素钠染色结果　参与者不同时间的角膜荧光素钠染色评分比较,差异无统计学意义(F=1.5175,P=0.2278)。参与者基线时的角膜荧光素钠染色评分与 1 h 比较差异无统计学意义(P=0.12)。参与者 4 h 时的角膜荧光素钠染色评分与基线、1 h 时比较差异无统计学意义(P=0.87、0.16),见表 1。

2.6 泪液中的氧化标记物含量测定结果　参与者不同时间的 HEL 比较,差异具有统计学意义(F=4.6214,P<0.05)。参与者暴露于发光二极管衍生的蓝光 1 h 后的 HEL 浓度与基线时比较差异无统计学意义(P=0.80);参与者 4 h 时的 HEL 浓度与基线、1 h 时比较差异有统计学意义(均 P<0.05)。参与者不同时间的 4-HNE 比较,差异无统计学意义(F=0.3085,P=0.7358)。参与者 1 h 时的 4-HNE浓度与基线比较差异无统计学意义(P=0.57),4 h 时的 4-HNE 浓度与基线、1 h 时比较差异无统计学意义(P=0.45、0.86),见表 2。

表 2　参与者在不同时间泪液中的氧化标记物含量测定结果　$\bar{x}\pm s$

时间	HEL(nmol/L)	4-HNE(μg/mL)
基线	267.03±25.77	10.05±2.54
1 h	268.46±26.30	9.74±2.16
4 h	283.04±10.33[a,c]	9.65±1.29

注:[a]P<0.05 *vs* 基线;[c]P<0.05 *vs* 1 h。

3 讨论

最近有很多研究报告了使用智能手机对眼部健康的各种不利影响。随着智能手机的使用越来越广泛,使用智能手机导致的眼部健康问题变得越来越严重。已有大量研究证实智能手机的使用对眼表的影响。智能手机对眼表的影响是多维度的,现有研究一致指向泪膜稳定性下降、眨眼动力学紊乱和主观症状加重这三条核心路径。然而,很少有研究调查蓝光对直接暴露在光线下的眼表的影响。因此本研究中尽量满足凝视时的眨眼次数和减轻近距离用眼调节集合负荷的情况下,主要观察 4 h 蓝光暴露对人眼表的影响。LED 屏幕在智能手机等小型便携式电子设备中非常有用且高效,但 LED 屏幕会发出大量蓝光。在可见光的光谱中,蓝光的能量很高并且接近于紫外光的色谱,因此过度暴露于蓝光对眼睛有潜在危害[16-17]。我们的前瞻性非随机对照临床研究比较了使用智能手机暴露于发光二极管衍生的蓝光对泪膜及眼表的影响。

为评估主观症状变化,我们分析了 OSDI 评分。研究结果显示,暴露于发光二极管衍生的蓝光后,反映干眼症状严重程度的 OSDI 评分在 4 h 后显著升高,且 NIBUT 下降。本研究证明,该症状的严重程度存在时间积累效应,随着发光二极管衍生的蓝光暴露时间的延长而显著加重。与基线组相比,4 h 后的疲劳感、灼热感及眼睛干涩感评分更高。在注视物体时,由于眨眼间隔延长导致泪液过度蒸发,被认为是导致视频显示终端相关性干眼的致病因素[12-13]。与阅读任务相关的高认知负荷(例如使用视频显示终端或阅读短信)导致自发性眨眼频率降低。此外,使用视频显示终端时,眨眼频率不完整且眼表暴露面积增加。智能手机的使用会导致多种有害因素,包括眨眼频率降低、频繁出现不完全闭眼以及眼表暴露时间增加,这些因素可能破坏眼表系统的精细稳态平衡,从而引发主观症状和泪膜不稳定。也说明蓝光暴露无法与使用智能手机的其他因素(如调节疲劳、认知负荷)完全区分。此外,角膜荧光素钠染色结果未见显著变化,可能是 4 h 蓝光暴露虽引起泪膜不稳定和氧化应激,但尚未达到导致角膜上皮可检测损伤的程度,提示泪膜功能变化早于形态学改变。

蓝光导致 ROS 产生过多并损害光感受器和 RPE 在之前的研究中已经得到证实,发现过度暴露于蓝光会降低细胞活力并增加角膜上皮细胞中 ROS 的产生[10]。也有研究证实,蓝光照射人角膜细胞时 IL-1β、IL-6 等促炎性细胞因子明显增加,在对各种病理刺激做出反应时分泌到眼表,会导致角膜上皮屏障功能丧失[11]。此外,蓝光引起的氧化损伤被证明通过有效的抗氧化提取物相关的自由基消除而减少,从而改善干眼小鼠模型中眼表的临床症状[18],并进一步证实了过度暴露于蓝光会增加氧化应激,增加角膜和泪液中的炎性因子的表达,降低细胞活力,并导致干眼。

在多种氧化应激标志物中,HEL 是一种很好的氧化修饰标志物,可作为脂质过氧化的早期标志物[19]。HEL 水平升高可能表明蓝光可诱导脂质过氧化,这是对 ROS 形成的次级反应。在这项研究中,我们的结果表明,与基线和 1 h 时相比,4 h 时泪液中的 HEL 浓度显著增加,可表明过度暴露于蓝光导致眼表氧化损伤、细胞凋亡和炎症。而 4-HNE 被认为是氧化应激晚期阶段观察到的细胞病理学效应的主要成因[15]。随着智能手机使用时间的延长和使用频率的增加,其他脂质过氧化标志物的水平也可能升高。然而,由于存在有害影响的可能性,延长实验时间存在风险。健康眼表中的多种抗氧化保护机制可减轻 ROS 造成的损伤。角膜因过度暴露于蓝光而产生的氧化损伤,可能与眼表炎症及由此引发的干眼存在关联[16]。

尽管本研究存在一定局限,包括纳入对象为智能手机使用时长最长的中青年群体(年龄 21-35 岁),无法覆盖中老年人群。使用智能手机近距离观看 4 h,本质上是蓝光暴露、近距离用眼、调节集合负荷、眨眼模式改变的复合干预,并非单纯的蓝光暴露。本研究中要求参与者在使用智能手机过程中眨眼率不低于 15 次/分,并执行“20-20-20”法则,尽量降低凝视时眨眼间隔时间延长导致泪液过度蒸发及近距离用眼调节集合负荷的复合干预对试验结果的影响,但无法完全消除。另外本研究中 4 h 蓝光暴露

会立刻破坏泪膜稳定性,可监测 OSDI 评分、NIBUT 及 HEL 等指标,但因参与者安全考虑无法长时间观察,泪液分泌量、角膜荧光染色、4-HNE 全程无统计学差异。最后未设置使用蓝光滤镜的对照组,蓝光是屏幕显色的核心,若真完全阻隔,屏幕会严重偏色,无法正常观看,反而有可能加重视疲劳。这些发现为后续研究指明了方向:未来可以在更严格的光学控制条件下进一步探索蓝光对眼表的影响。

综上所述,近距离暴露于蓝光下可加重主观眼部症状和视疲劳;其他影响包括泪膜稳定性受损和氧化损伤。在特定的工作环境下,人体可能会长时间暴露在高能蓝光照射下。提高蓝光对泪膜和眼表变化的认识,可能有助于了解眼部不适的原因,以及与过度使用智能手机相关的眼部问题的管理。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。
作者贡献声明:金海燕论文选题与修改,初稿撰写,文献检索,数据分析;李正日选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

[1] 孙莹莹, 彭健雄, 卢敏. 视频显示终端来源的蓝光对干眼影响的研究进展. 国际眼科杂志, 2025,25(2):255-258.
[2] Kamøy B, Magno M, Nøland ST, et al. Video display terminal use and dry eye: preventive measures and future perspectives. Acta Ophthalmol, 2022,100(7):723-739.
[3] Charoenpipatsin N, Yothachai P, Nuntawisuttiwong N, et al. Dosimetry assessment of potential hazard from visible light, especially blue light, emitted by screen of devices in daily use. Clin Cosmetic Invest Dermatol, 2025,18:169-176.
[4] Xia YT, Yang QJ, Zhang LY, et al. Blue light induced ferroptosis in retinal damage via iron overload-associated oxidative stress. J Environ Sci, 2025,155:221-234.
[5] Fan B, Zhang CX, Chi J, et al. The molecular mechanism of retina light injury focusing on damage from short wavelength light. Oxidative Med Cell Longev, 2022,2022:8482149.
[6] Chakravarthy H, Georgyev V, Wagen C, et al. Blue light-induced phototoxicity in retinal cells: implications in age-related macular degeneration. Front Aging Neurosci, 2024,16:1509434.
[7] Navel V, Sapin V, Henrioux F, et al. Oxidative and antioxidative stress markers in dry eye disease: a systematic review and meta-analysis. Acta Ophthalmol, 2022,100(1):45-57.
[8] Yang QJ, Li QY, Xia YT, et al. Blue LED light induces dry eye disease via NCOA4-mediated ferritinophagy and iron-overload. Ecotoxicol Environ Saf, 2026,316:120150.
[9] Bu JH, Liu YB, Zhang RR, et al. Potential new target for dry eye disease-oxidative stress. Antioxidants (Basel), 2024,13(4):422.
[10] Jin L, Yang QJ, Li JF, et al. The ROS/AKT/S6K axis induces corneal epithelial dysfunctions under LED blue light exposure. Ecotoxicol Environ Saf, 2024,287:117345.
[11] Ge JY, Yang QJ, Yu X, et al. Blue light induces corneal epithelial damage by activating the NLRP3 inflammasome pathway. Ecotoxicol Environ Saf, 2025,303:118921.
[12] Li W, Graham AD, Lin MC. A pilot study of the impact of repeated blink refrainment on ocular surface temperature and the interblink period. Optom Vis Sci, 2024,101(11):652-659.
[13] Maity M, Galor A, Basu S, et al. Tear film dynamics in visual display terminal users: a review of impact on goblet cells, lacrimal and meibomian gland function. Semin Ophthalmol, 2025,40(4):306-319.
[14] 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). 中华眼科杂志, 2024,60(12):968-976.
[15] Choi W, Lian C, Ying L, et al. Expression of lipid peroxidation markers in the tear film and ocular surface of patients with non-sjogren syndrome: potential biomarkers for dry eye disease. Curr Eye Res, 2016,41(9):1143-1149.
[16] Ouyang XL, Yang J, Hong ZX, et al. Mechanisms of blue light-induced eye hazard and protective measures: a review. Biomed Pharmacother, 2020,130:110577.
[17] Yeh WJ, Chien PT, Wen YT, et al. A comprehensive review of experimental models for investigating blue light-induced ocular damage: Insights into parameters, limitations, and new opportunities. Exp Eye Res, 2024,249:110142.
[18] Liu JT, Jiang EY, Kim H, et al. Beneficial effect of rebamipide eye drops on blue light-induced oxidative damage in the ocular surface. J Ocul Pharmacol Ther, 2025,41(6):314-321.
[19] Hu R, Shi J, Xie CM, et al. Dry eye disease: oxidative stress on ocular surface and cutting-edge antioxidants. Glob Chall, 2025,9(7):e00068.