

不同眼病前额脑电响应的共性及视力的中介作用

胡皓月, 龚健杨*

安徽医科大学第一附属医院眼科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年4月18日; 发布日期: 2026年4月27日

摘要

目的: 探讨不同解剖部位眼病(屈光不正、晶状体浑浊、眼底疾病)状态下, 单通道前额事件相关电位(ERP)响应的共性与特异性, 验证前额脑电特征能否用于眼病的鉴别诊断, 并明确“视敏锐度”在视觉信息皮层重构中的中介调节作用。方法: 招募50例(71只患眼)确诊为单纯屈光不正、白内障及眼底疾病的受试者。在虚拟现实(VR)视觉刺激下同步采集单通道前额脑电, 提取P1、P2、P3、N1、N2特征成分。采用协方差分析(ANCOVA)排除年龄及基础视力混杂因素, 通过多元Logistic回归及判别分析评估疾病分类模型的准确率, 并利用Pearson/Spearman相关性分析评估ERP特征与Log MAR视力的关系。结果: 在排除年龄与视力协变量影响后, 三组间前额ERP各项特征成分的潜伏期、峰谷值及响应面积差异均无统计学意义($P > 0.05$)。基于前额ERP特征构建的多分类判别分析模型对三种眼病的分类准确率极低(仅13.33%~33.33%)。相反, ERP中N1潜伏期和N2响应面积与Log MAR视力呈显著正相关($P < 0.05$)。结论: 不同致病机制的眼病在向高级认知脑区传递信息时表现出高度的电生理共性。前额ERP对眼病类型缺乏鉴别特异性, 但对视觉功能损伤程度高度敏感。视敏锐度是驱动前额认知资源调用的核心中介变量, 本研究从神经电生理维度验证了视觉损害的“共同通路原则”, 为开发便携式客观视功能评估设备提供了循证基础。

关键词

事件相关电位(ERP), 视敏锐度, 前额叶皮层, 客观视功能评估, 共同通路原则

Commonality of Prefrontal EEG Responses in Different Eye Diseases and the Mediating Role of Visual Acuity

Haoyue Hu, Jianyang Gong*

Department of Ophthalmology, The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

*通讯作者。

文章引用: 胡皓月, 龚健杨. 不同眼病前额脑电响应的共性及视力的中介作用[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 4785-4796. DOI: 10.12677/acm.2026.1641751

Abstract

Purpose: The differential diagnosis of ocular diseases involving different anatomical sites remains a clinical challenge, especially when objective assessment of visual function is required. This study aimed to explore the commonalities and specificities of single-channel prefrontal Event-Related Potential (ERP) responses in patients with three distinct types of ocular diseases that affect different anatomical sites, namely refractive errors, lens opacities, and fundus diseases. Specifically, we sought to verify the potential value of prefrontal Electroencephalographic (EEG) features in the differential diagnosis of these ocular diseases and to clearly define the mediating and regulatory role of visual acuity in the cortical reconstruction of visual information, which could provide new insights into the neuroelectrophysiological mechanisms underlying visual impairment. **Methods:** A total of 50 subjects (71 affected eyes) who were clinically diagnosed with simple refractive errors, cataracts (as a representative of lens opacities), and fundus diseases were enrolled in this study. All subjects underwent a comprehensive ophthalmic examination to confirm the diagnosis and exclude other concurrent ocular or systemic diseases that might affect the results. During the experiment, single-channel prefrontal EEG signals were synchronously collected under standardized Virtual Reality (VR) visual stimulation, which was designed to ensure consistent and controllable visual input. The key characteristic components of ERP, including P1, P2, P3, N1, and N2, were extracted and analyzed. To eliminate the potential confounding effects of age and baseline visual acuity on ERP results, Analysis of Covariance (ANCOVA) was applied. Subsequently, multivariate Logistic regression and discriminant analysis were employed to evaluate the accuracy of the disease classification model constructed based on the extracted prefrontal ERP features. Additionally, Pearson correlation analysis (for normally distributed data) and Spearman correlation analysis (for non-normally distributed data) were used to explore the association between ERP features and Log MAR visual acuity, which is a standard indicator for evaluating visual function. **Results:** After adjusting for the covariates of age and visual acuity, statistical analysis showed that there were no significant differences in the latency, peak amplitude, and response area of each prefrontal ERP component (P1, P2, P3, N1, N2) among the three groups of patients with different ocular diseases (all $P > 0.05$). The multi-class discriminant model constructed based on the prefrontal ERP features exhibited an extremely low classification accuracy for the three types of ocular diseases, with the accuracy ranging only from 13.33% to 33.33%, indicating that prefrontal ERP features are not effective for differentiating these ocular disease types. In contrast, the results of correlation analysis revealed that N1 latency and N2 response area in ERP were significantly positively correlated with Log MAR visual acuity (all $P < 0.05$), suggesting that these ERP components are closely associated with the severity of visual function impairment. **Conclusion:** Ocular diseases with different pathogenic mechanisms, which affect different anatomical sites of the eye, exhibit high electrophysiological commonalities when transmitting visual information to high-order cognitive brain regions. Prefrontal ERP lacks specificity in differentiating the types of ocular diseases but is highly sensitive to the degree of visual function impairment, which means it can effectively reflect the severity of visual damage. Visual acuity serves as a core mediating variable that drives the allocation of prefrontal cognitive resources during visual information processing. From the neuroelectrophysiological perspective, this study verifies the “common pathway principle” of visual impairment, which holds that different types of visual damage may converge on a common neural pathway in the brain. Furthermore, these findings provide important evidence-based support for the development of portable, objective visual function assessment devices, which could be particularly useful in clinical settings where subjective visual assessment is not feasible. Visual stimulation, and characteristic components (P1, P2, P3, N1, N2) were extracted. Analysis of Covariance (ANCOVA) was used to exclude confounding factors of age and baseline visual acuity. Multivariate Logistic regression and discriminant analysis were employed to evaluate the accuracy of the disease classification model, and Pearson/Spearman correlation analysis was used to explore the association between ERP features and Log MAR visual acuity. **Results:** After adjusting for age and visual acuity covariates, there were no significant differences

in the latency, peak amplitude, and response area of each prefrontal ERP component among the three groups ($P > 0.05$). The multi-class discriminant model constructed based on prefrontal ERP features had an extremely low classification accuracy of only 13.33%~33.33% for the three types of ocular diseases. In contrast, N1 latency and N2 response area in ERP were significantly positively correlated with Log MAR visual acuity ($P < 0.05$). Conclusion: Ocular diseases with different pathogenic mechanisms exhibit high electrophysiological commonalities when transmitting information to high-order cognitive brain regions. Prefrontal ERP lacks specificity in differentiating ocular disease types but is highly sensitive to the degree of visual function impairment. Visual acuity is a core mediating variable driving the allocation of prefrontal cognitive resources. This study verifies the “common pathway principle” of visual impairment from the neuroelectrophysiological perspective and provides evidence-based support for the development of portable objective visual function assessment devices.

Keywords

Event-Related Potentials (ERPs), Visual Acuity, Prefrontal Cortex, Objective Visual Function Assessment, Common Pathway Principle

Copyright © 2026 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

人类大脑皮层对视觉信息的加工与整合是一个极其复杂的系统工程。在眼科临床实践中, 精准评估患者的视功能状态是疾病诊断、疗效监测及预后判断的基石。然而, 传统的视力表测试高度依赖受试者的主观反馈、认知理解能力及配合意愿。在面对婴幼儿、智力或认知功能障碍患者、失语症患者, 以及涉及法医学鉴定的伪盲(Malingering)人群时, 主观视力测试往往难以获得真实可靠的结果[1] [2]。因此, 探索不依赖语言反馈的客观视功能评估技术一直是现代神经眼科学与生物医学工程领域的重要前沿课题。

长久以来, 视觉诱发电位(Visual Evoked Potential, VEP)作为客观评价视路传导功能的“金标准”, 被广泛应用于临床[3]。然而, 传统 VEP 主要基于枕叶视皮层(O1, O2, Oz)的电生理信号提取。这种早期外源性神经电生理信号虽然对视网膜和视神经的传导速度敏感, 但面临诸多临床局限: 其一, 枕叶信号对眼球注视状态、瞳孔大小及屈光间质浑浊异常敏感, 极易产生假阳性或假阴性结果; 其二, 传统 VEP 设备的国际标准(ISCEV)要求多导联电极配置与严格的皮肤阻抗处理, 操作繁琐, 难以向便携式穿戴设备及居家监护场景转化[4] [5]。

近年来, 随着事件相关电位(Event-Related Potential, ERP)分析技术与脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)的飞速发展, 研究者的视野开始从“枕叶初级视觉皮层”向“前额叶高级认知皮层”转移。神经信息学机制表明, 当视觉输入质量下降(如由于未矫正的屈光不正导致视网膜成像模糊, 或白内障导致对比度降低)时, 抵达大脑的视觉信息比特率(Information Bit-rate)会显著降低, 神经信噪比随之下降[6]。为了在模糊的“高不确定性”输入中成功提取有效目标, 大脑必须启动“自上而下(Top-down)”的注意力调节机制。在这个过程中, 额叶-顶叶网络(Fronto-parietal network)作为注意力分配的中枢被高度激活, 以分配更多的工作记忆与心理资源去“弥补”视觉细节的缺失[7]。这种额外的“视觉努力(Visual Effort)”与“认知负荷(Cognitive Load)”, 能够在其诱发的 ERP 特征成分上留下深刻的生理印记[8]。前额叶诱发

的早期成分(如 P1、N1)主要反映了人脑对物理特征的早期感知;而晚期成分(如 P2、N2、P300)则被公认是内源性认知电位,深度卷入了刺激分类、执行控制以及工作记忆的更新[9]。当受试者面临低对比度或模糊的视觉任务时,不仅 P3 等晚期潜伏期会因处理时间延长而延迟, P2、N2 的响应面积与峰值也会因额叶资源的大量调动而发生特异性改变[10]。

梳理近五年的相关文献发现,尽管以 EEG/ERP 探讨视觉功能改变的研究日益增多,但绝大多数研究存在高度的“病种局限性”。例如, Zou 等人与 Li 等人深入研究了青少年近视患者在面部识别任务中的 ERP 早期成分及脑网络异常[11] [12];亦有学者针对单一青光眼或黄斑变性患者的皮层反应延迟进行了测定[13]。这类研究的核心逻辑是:将“特定眼病”视为独立的病理模型,试图寻找该疾病特异性的高级神经加工标志物。然而,这类“单线”范式遗漏了一个直击本质的科学问题:不同种类的眼科疾病,其原发病灶截然不同——屈光不正源于角膜曲率与眼轴错配(眼前节物理光学改变)、白内障源于晶状体蛋白变性(屈光介质浑浊)、视网膜病变源于感光细胞损害(眼底神经生物学改变)——但在神经信息流向高级认知脑区传递时,前额叶皮层真的能“辨别”这是哪里的损伤吗?

根据大脑层级信息处理理论,前额叶作为最高司令部,接收到的仅仅是经过背侧及腹侧视觉流层层预处理后的“抽象信号”[14]。本研究由此提出“视觉功能损害的共同通路原则(Common Pathway Principle)”这一核心假说:不论视觉剥夺的起因是屈光病理、晶状体病理还是眼底神经病理,其在前额脑电所诱发的神经响应图谱应表现出高度的“非特异性共性”。换言之,前额脑电不能作为区分眼科疾病的诊断工具;相反,前额叶的核心编码变量只有一个,即“视觉信息的最终劣化程度”。视敏度(Visual Acuity, VA)水平,而非眼部疾病类型,才是直接诱导和调节前额 ERP 时间分辨率与能量状态的核心中介变量(Mediating Role)。

鉴于上述理论空白与临床痛点,本研究突破了常规多通道全脑网络分析模式,前瞻性地采用可调节屈光度结合虚拟现实(VR)显示系统的新型复合视觉刺激范式,同步采集受试者最为简易便携的单通道前额(Fpz)脑电信号。本研究旨在通过多维度统计学建模,探讨不同眼病模型下前额脑电响应的共性与差异,论证视敏度的中介作用,以期为临床上开展基于便携式脑电设备的客观视功能评估提供坚实的神经电生理学证据。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料与受试者分组

本研究属于前瞻性临床观察性队列研究,患者招募工作于 2024 年 1 月至 2026 年 1 月在安徽医科大学第一附属医院眼科门诊及住院部开展。综合考量严格的纳排标准,最终确立有效样本量为 50 名临床受试者(总计获取有效患眼数据 71 只)。

根据受试者确诊的眼科疾病类型,将样本划分为三个独立的疾病模型组:

(1) 单纯屈光不正组(29 只眼):包括近视、远视及散光,屈光介质清澈,眼底检查无异常。

(2) 屈光介质浑浊/白内障组(23 只眼):经裂隙灯显微镜确诊为年龄相关性或并发性白内障,晶状体存在不同程度浑浊。

(3) 眼底器质性病变组(19 只眼):主要涵盖非增殖期或稳定期增殖性糖尿病性视网膜病变(DR)、视网膜脱离等明确影响黄斑区中央视力(不考虑周边视野的损伤)的疾病。

2.2. 纳入与排除标准

纳入标准:

经由专业眼科医师利用综合验光仪、裂隙灯及眼底 OCT (光学相干断层扫描)确诊为上述三类眼部疾

病之一。

以传统国际标准视力表及主观验光所得结果作为金标准, 设定合格样本的裸眼视敏度或最佳矫正视敏度(BCVA)界限严格控制在 0.1 至 1.0 之间, 以确保受试者具备基础的形觉感知能力以完成视觉诱发任务。

年龄处于 9 至 75 岁之间, 具有正常的言语交流及逻辑理解能力。

排除标准:

伴发明确的精神分裂症、重度抑郁症、阿尔茨海默病等严重心理或精神/神经系统疾病者, 以免因认知障碍干扰 ERP 的晚期成分;

患有斜视、重度弱视、眼球震颤或其他严重影响双眼视功能的复杂眼病者;

患眼同时存在两种或两种以上致盲性眼病(如白内障合并严重青光眼), 无法界定主要致病源者;

既往有颅脑外伤史或开颅手术史, 导致前额叶局部解剖结构破坏或脑电信号传导异常者。

2.3. 实验设备与视觉刺激范式

脑电监测依赖于联合广东工业大学研发且已申请专利[15]的软硬件一体化系统。核心硬件模块涵盖: 搭载 TGAM 芯片(Neurosky, 美国)的单通道干电极蓝牙脑波头带(配适蓝牙接收器)、作为视觉刺激源的 GOOVIS G2 型 VR 眼镜(GOOVIS 公司), 以及控制终端迷你电脑模块系统。在前期的预实验中, 初代仪器经历了漫长的研发与测试过程, 最终在多种图像、视频范式的反复测试下团队发现受试者的脑电波的变化大多发生在画面切换、反转、分辨率改变时发生, 因此最终的采集仪器版本使用的 VR 眼镜提供频率为 1 次/秒、总计 30 s 的复合视觉刺激范式(由 10 s 黑白界面交替、10 s 黑白棋盘反转及 10 s 棋盘格清晰度渐变三部分构成, 见图 1), 同时也起到了屏蔽环境散光的作用。软件采用更新后的模块系统, 如图 2 所示, 能同步体现受试者在 VR 眼镜视野中看到的画面, 有利于更好地实时监测实验进度并及时发现采集时可能出现的问题。

2.4. 数据采集与预处理提取流程

在静音暗室中进行测试。受试者被要求保持放松, 端坐于舒适座椅上, 尽可能减少吞咽、咬牙及频繁眨眼等肌肉活动。在受试眼注视 VR 范式刺激的同时, 同步记录单通道脑电数据。

采集完成后, 导入 MATLAB 平台并利用 EEGLAB 开源工具箱进行离线数据清洗与预处理。具体步骤如下:

1. 脑电信号采集

受试者取端坐位, 双手及前臂平放以保持姿势稳定, 避免头部及肢体活动。脑电采集前, 用生理盐水擦拭前额皮肤清除油脂, 清洁脑电采集头带的电极片与电极夹, 将电极片固定于前额中央, 参考电极

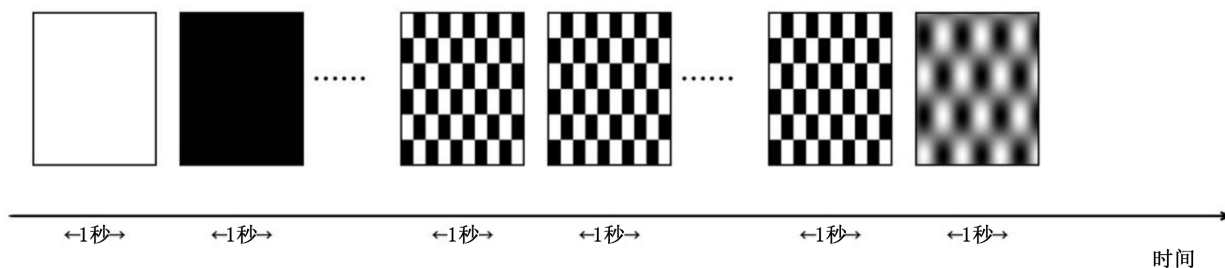


Figure 1. Compound visual stimulus paradigm

图 1. 复合视觉刺激范式



Figure 2. Prefrontal single-channel EEG acquisition device
图 2. 前额单通道脑电波采集仪器

夹置于右耳耳垂以降低信号传输阻抗。受试者裸眼佩戴 VR 眼镜, 依据主视觉验光结果调整屈光度, 眼镜完全隔绝外界光线, 确保视觉刺激单一来源。开启脑电头带蓝牙与采集模块应用界面, 确认设备连接正常后启动单眼采集: 以遮光布遮盖对侧眼, 嘱受试者专注注视 VR 眼镜内 30 s 视觉刺激视频, 点击“启动测试”自动采集脑电信号, 采集结束后通过“数据存储”功能将原始数据以.txt 格式保存并完成初步处理。单眼采集后休息 10~30 s, 换眼遮盖后重复上述流程完成对侧眼信号采集。

2. 数据预处理与 ERP 特征提取

原始脑电信号经专属软件系统进行去噪滤波、眼电伪影剔除、分段、基线校正及叠加平均预处理, 还原 ERP 波形。提取 N1、N2 (负向电位) 与 P1、P2、P3 (正向电位) 核心特征波, 量化分析关键指标: 峰值潜伏期(刺激触发至峰值的时间跨度, 图 3 中的 a 区域)、峰谷值(波峰与波谷的振幅落差, 图 3 中的 b 区域)及响应面积(特征波有效窗口内曲线下积分面积, 反映振幅动态维持水平, 图 3 中的 c 区域)。

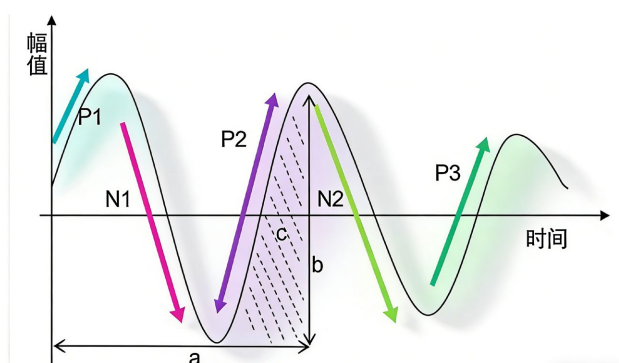


Figure 3. Schematic diagram of ERP characteristic components and eigenvalues
图 3. ERP 特征成分及特征值示意图

2.5. 统计学分析方法

使用 SPSS 25.0 统计软件进行统计学分析。对各组眼部基础疾病模型、各组视觉敏锐度的 ERP 特征波形 P1、P2、P3、N1、N2 的峰值潜伏期、峰谷值、响应面积进行方差分析, 分析各组内各波形特征成分的特征值是否存在差异; 利用 Spearman 分析各特征值与视敏锐度(矫正)的相关性; 利用 Pearson 分析各疾病组中特征值与 LogMAR 视敏锐度之间是否存在线性相关性。当 $P < 0.05$ 时, 差异被认为具有统计

学意义。

3. 结果

3.1. 基础资料与视力情况的组间比较

本研究最终纳入统计分析的有效数据涵盖 71 只患眼, 其中单纯屈光不正组 29 只, 屈光介质浑浊/白内障组 23 只, 眼底疾病组 19 只。

在受试者的一般特征方面, 各组性别比例差异无统计学意义($P > 0.05$)。由于白内障及糖尿病视网膜病变多发于中老年人群, 而单纯屈光不正多见于中青年, 各组年龄分布存在符合临床规律的客观差异(见表 1)。然而, 作为影响视觉功能的核心指标, 三组受试者在最佳矫正视敏度(转换为 LogMAR 视力)上的基础分布差异并无统计学意义。经统计学 Levene 检验分析证实, 三组受试者视力水平的方差齐性良好($F = 2.102, P = 0.130, F = 2.102, P = 0.130$), 满足后续进行统计学建模与比较的前提条件(见表 2)。

Table 1. Basic information of different disease model groups

表 1. 不同疾病模型分组基本信息

分组(N)	性别(男, %)	平均年龄(岁)
单纯屈光不正组(29)	16 (55.17)	38.72 ± 19.18
屈光介质浑浊(白内障)组(23)	11 (47.83)	65.78 ± 8.90
眼底疾病组(19)	9 (47.37)	44.79 ± 21.87
P	0.822	0.000**

*: 三组数据相比, P 值小于 0.05, 差异具有统计学意义。

Table 2. Analysis of variance of visual acuity in different disease model groups

表 2. 不同疾病模型分组视敏度方差分析

	方差齐分析结果(Levene 检验法)				
	组别(标准差)			F	P
	1.0 (n = 29)	2.0 (n = 23)	3.0 (n = 19)		
矫正视力	0.32	0.35	0.33	2.102	0.130

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

3.2. 排除混杂因素后的眼病特异性差异分析

针对“不同疾病模型是否产生不同脑电响应”这一核心疑问, 本研究采用了严谨的统计学排除法。如果直接采用单因素方差分析(ANOVA), 年龄和视力的不平衡极易造成“伪相关”的误差。因此, 本研究采用协方差分析(ANCOVA), 将“年龄”与“LogMAR 视力”作为协变量固定。

表 3 中统计结果清晰地表明: 在剔除了年龄与视力差异带来的混杂效应后, 单一由“眼病类型(致病的解剖部位)”引起的前额 ERP 特征差异极小。具体而言, 无论是早期的视觉物理属性感知成分(P1、N1), 还是晚期的注意分配与工作记忆成分(P2、P3、N2), 其潜伏期、峰谷幅值以及响应面积, 在三组眼病之间的差异均无任何统计学意义(所有特征的协方差主效应 P 值均 > 0.05)。

这一结果初步证实: 无论视觉剥夺的根源是眼前节折射异常、晶状体浑浊还是眼底神经受损, 前额叶皮层并未表现出任何的特异性, 其诱发响应表现出高度的一致性。

Table 3. Schematic diagram of ERP characteristic components and eigenvalues**表 3.** 不同病种分组特征值协方差分析

ERP 特征成分	差异源	平方和	df	均方	F	P
潜伏期						
P1	病种分类	1033.642	2	516.821	0.071	0.932
P2	病种分类	4287.987	2	2143.994	0.088	0.916
P3	病种分类	22459.97	2	11229.985	0.417	0.661
N1	病种分类	23,608.039	2	11804.02	0.931	0.399
N2	病种分类	2861.277	2	1430.639	0.059	0.943
峰谷值						
P1	病种分类	0.817	2	0.408	1.04	0.359
P2	病种分类	0.044	2	0.022	0.024	0.976
P3	病种分类	1.216	2	0.608	1.07	0.349
N1	病种分类	0.741	2	0.37	1.043	0.358
N2	病种分类	0.939	2	0.469	0.438	0.647
响应面积						
P1	病种分类	138.513	2	69.257	0.474	0.624
P2	病种分类	356.512	2	178.256	0.594	0.555
P3	病种分类	170.286	2	85.143	0.411	0.665
N1	病种分类	23.792	2	11.896	0.099	0.906
N2	病种分类	1040.017	2	520.008	1.023	0.365

P 值小于 0.05, 差异具有统计学意义。

3.3. 前额 ERP 特征值与视敏锐度的量化相关性

既然眼病类型不决定脑电差异, 那么是什么驱动了 ERP 信号的变化? 本研究将所有受试者作为一个整体队列, 考察 ERP 特征与临床视力参数的相关性。结果发现: N1、N2 的潜伏期和响应面积与 Log MAR 视敏锐度(矫正)之间存在线性相关性($P < 0.05$), 见表 4。

Table 4. Correlation analysis of eigenvalues for each group of VA**表 4.** 视敏锐度分组特征值相关性分析

ERP 特征值	Pearson 相关		Spearman 相关	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值
period_P1	-0.139	0.247	-0.156	0.195
period_P2	-0.204	0.087	-0.249	0.036
period_P3	-0.112	0.351	-0.06	0.617
period_N1	-0.241	0.043	-0.257	0.030
period_N2	-0.072	0.552	-0.023	0.851

续表

area_P1	-0.131	0.275	-0.049	0.686
area_P2	-0.05	0.678	0.022	0.854
area_P3	0.035	0.773	-0.137	0.254
area_N1	-0.117	0.331	-0.069	0.567
area_N2	0.039	0.037	0.268	0.024
ppvalue_P1	-0.126	0.294	-0.108	0.371
ppvalue_P2	0.032	0.789	0.141	0.241
ppvalue_P3	0.146	0.223	0.055	0.650
ppvalue_N1	-0.015	0.904	0.129	0.283
ppvalue_N2	-0.047	0.697	0.017	0.886

3.4. 疾病判别建模“失效”的反向验证

为进一步从人工智能算法分类的维度验证单通道前额脑电的非特异性, 本研究基于提取到的全套 ERP 特征数据(涵盖 P1 至 N2 的所有时间/空间/能量参数), 尝试构建一个多分类的 Fisher 判别分析模型及多元 Logistic 回归模型, 试图让模型去“猜出”受试者患有哪种眼病。

测试集数据的交叉验证结果表明, 该疾病分类模型的预测准确率呈现灾难性的低下: 针对单纯屈光不正、白内障及眼底疾病的分类准确率仅在 13.33%至 33.33%的极低区间波动。由于随机盲猜的概率约为 33.3%, 该模型的准确率基本等同于随机事件, 见表 5。

从判别函数散点分布图(图 4)来看, 三组眼病的数据点在二维坐标系中呈现极度离散、互相包裹交叉的状态, 不存在任何可被线性或非线性边界有效分割的聚类中心。客观数据再次证实: 基于该范式下的额部脑电信号绝对缺乏疾病鉴别特异性, 无法有效鉴别不同种类的眼病。

Table 5. Multinomial logistic regression analysis

表 5. 多项 Logistic 回归分析

ERP 特征成分		P1	P2	P3	N1	N2
准确率	潜伏期	20.00%	13.33%	20.00%	20.00%	20.00%
准确率	峰谷值	6.67%	13.33%	33.33%	6.67%	20.00%
准确率	响应面积	13.33%	13.33%	20.00%	13.33%	20.00%

4. 讨论

视觉不仅仅是视网膜对光量子的被动接收, 更是大脑皮层对海量信息主动解码、推演与重构的过程。在本项研究中, 我们并没有沿用传统视觉电生理寻找“疾病特异性波形”的老路, 而是通过一种极简的单通道前额脑电体系, 深入揭示了人类大脑应对不同视觉损伤时的深层共性。

4.1. 前额 ERP 响应特征与认知负荷理论的印证

本研究最核心的阳性发现之一, 是额叶 ERP 部分特征(如 N1、N2)与视敏锐度之间存在的稳健线性相关。在正常状态下, 清晰的视网膜图像具有极高的信噪比, 视觉流经过枕叶到颞/顶叶的传递是高效且

第一验证函数得分和第二验证函数得分散点图

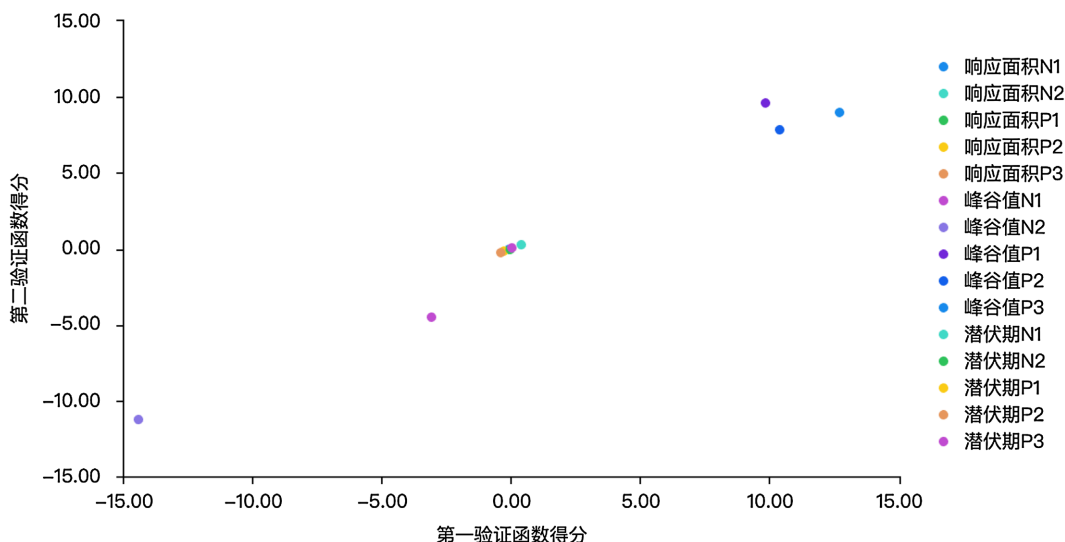


Figure 4. Discriminant analysis function scores of EEG models in each disease group
 图 4. 各疾病组脑电模型判别分析函数得分

低耗能的[16]。然而,当受试者处于屈光不正或白内障、视网膜疾病导致的视觉剥夺状态时,输入信号变为高度残缺的“模糊图谱”。

根据 Makeig 等学者提出的脑电动力学挖掘理论,为了在一片模糊中提取有用的形状特征以应对实验范式,大脑的“执行控制中心”——前额叶皮层(Prefrontal Cortex, PFC)被迫超负荷运转[17]。它必须动用更多的注意力资源(表现为 P2 振幅增加)、启动更强烈的冲突监控与刺激分类机制(表现为 N2 响应面积的扩张),以补偿初级视皮层传来的劣质信号[18]。这种现象在神经病学中被称为“认知代偿(Cognitive Compensation)”。本研究中,Log MAR 视力值越差的受试者,其前额 ERP 绝对响应面积显著增加,完美地印证了这一代偿机制。这就意味着,单通道前额脑电不是在单纯地测算视路这个“电缆”的导电速度,而是在宏观层面量化大脑为了“看清”这一行为到底付出了多少“算力”。

4.2. 诊断模型的“失效”与共同通路原则的确立

本研究的一个亮点在于充分利用了一个统计学上的“负面结果”。在构建判别分析模型时,利用多维 ERP 特征进行三种眼病的分类,其测试准确率仅为 13.33%至 33.33%。在机器学习的视角中,这是一个彻底失败的分类器;但在认知神经科学的宏观框架下,这一“失效”却具有极其重大的理论启示价值。

它反证了本文提出的“视觉损害共同通路原则”。无论前路的角膜曲率如何改变、中路的晶状体如何浑浊,亦或是底部的视网膜细胞凋亡,当这些异常导致的劣质视觉电信号跨越外侧膝状体、经过视放射抵达高级认知皮层时,原发解剖病灶的“物理标签”已被彻底清洗剥离。前额叶皮层无法、也无需去区分视力下降的原因是白内障还是糖尿病视网膜病变,它所面对和处理的仅仅是一个抽象变量——“视觉信息的最终剥夺程度”[19]。

因此,协方差分析中眼病类型主效应的不显著,以及判别模型的极低准确率,两相印证,从神经电生理层面确认了视力水平(而非致病机制)才是驱动和塑造额叶脑电图谱的真正中介因素。

4.3. 与传统 VEP 的互补印证与临床转化前景

本研究的结果与既往以枕叶 VEP(包括模式 VEP 和扫频 VEP)客观评估视力的文献既有重叠之处,更

具突破性互补。以往大量研究证实, VEP 的空间频率极限或 P100 波幅与行为学视力存在对应关系[20]。但正如前文所述, 枕叶 VEP 极易受视网膜病变本身的局部遮挡而出现电位漂移, 导致评估偏差。

本研究所采用的“单通道电极”前额测量方案, 其最大的临床优势在于: “去专业化、去繁琐化”。临床应用不再需要刮剔患者后脑勺的头发涂抹导电膏, 不需要复杂的 64 通道脑电帽穿戴。只需将便携模块贴敷于前额, 结合内置在 VR 设备中的视力算法, 即可形成一套自动闭环的脑机接口(BCI)客观视功能评价系统[21]。

尤其针对法医学伤残鉴定中的伪盲检测(排除主观故意装瞎), 或非言语期婴幼儿、智力发育迟缓儿童的视力筛查, 这套基于共同通路原则的前额评估系统由于不依赖病种背景, 表现出极强的“广谱适应性”。

4.4. 局限性与未来展望

必须指出, 本研究的设计仍存在一定局限性。首先, 我们采用的是相对简单的视觉识别任务范式, 这有利于控制变量, 但在更为复杂或高生态效度的自然场景下, 额叶 ERP 的调节方式是否依然遵循“共同通路原则”尚需验证。其次, 为追求临床便携化而放弃了多通道脑电数据, 导致我们无法进行精准的源定位(Source Localization)及脑网络拓扑学分析。同时, 范式的设计仅限于黑白画面的切换、反转及分辨率的改变, 未将对比敏感度、色觉等更多可以反映视功能的指标纳入考量与设计, 这可能会造成实验结果的误差。

未来研究可考虑两条路径并行推进: 在基础科学层面, 结合多通道高密度 EEG 及功能性核磁共振(fMRI), 探索枕叶-顶叶-前额叶通路的层级交互机制, 寻找不同眼病可能残存的极微弱空间频率特异性; 在工程应用层面, 以本研究确立的核心特征(P2/N2 响应面积与 Log MAR 的相关模型)为内核, 引入深度学习与长短期记忆网络(LSTM), 在保证单通道极简架构的前提下, 进一步提升绝对视力预测值的精确度。

5. 结论

基于虚拟现实范式与单通道前额脑电采集系统, 本研究针对不同眼部解剖部位病变模型下的 ERP 特征进行了系统分析。研究证实: 不同致病机制眼病所诱发的前额 ERP 响应表现出高度的神经认知共性。前额脑电对眼部器质性病变类型缺乏鉴别特异性, 其特征值组合无法作为分类诊断工具; 然而, 其对综合视觉功能改变高度敏感。

这一发现从电生理维度首次验证了视觉损害的“共同通路原则”。视敏锐度而非原发眼病类型, 在眼部解剖物理损伤与大脑前额皮层认知响应之间起到了决定性的中介与主导作用。本研究不仅深化了对皮层视觉剥夺代偿机制的理解, 更为下一步开发广谱、低成本、无需主观反馈的便携式脑机视力评估设备奠定了坚实的医学循证理论基础。

声明

本研究获得安徽医科大学伦理委员会批准(审批号: PJ2024-03-86), 患者均签署知情同意书。

致谢

广东工业大学以韩一石教授为首的计算机专业科研团队。

参考文献

- [1] Marmor, M.F., Fulton, A.B., Holder, G.E., et al. (2015) ISCEV Standard for Full-Field Clinical Electroretinography (2015 Update). *Documenta Ophthalmologica*, **130**, 1-12.

- [2] 葛坚, 王宁利. 眼科学[M]. 第3版. 北京: 人民卫生出版社, 2015: 85-92.
- [3] Odom, J.V., Bach, M., Brigell, M., Holder, G.E., McCulloch, D.L., Mizota, A., *et al.* (2016) ISCEV Standard for Clinical Visual Evoked Potentials: (2016 Update). *Documenta Ophthalmologica*, **133**, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10633-016-9553-y>
- [4] 赵堪兴, 杨培增. 临床眼科电生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 120-135.
- [5] Bourne, R.R.A., Flaxman, S.R., Braithwaite, T., Cicinelli, M.V., Das, A., Jonas, J.B., *et al.* (2017) Magnitude, Temporal Trends, and Projections of the Global Prevalence of Blindness and Distance and near Vision Impairment: A Systematic Review and Meta-Analysis. *The Lancet Global Health*, **5**, e888-e897. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(17\)30293-0](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(17)30293-0)
- [6] Polat, U., Schor, C., Tong, J., Zomet, A., Lev, M., Yehezkel, O., *et al.* (2012) Training the Brain to Overcome the Effect of Aging on the Human Eye. *Scientific Reports*, **2**, Article No. 278. <https://doi.org/10.1038/srep00278>
- [7] Felleman, D.J. and Van Essen, D.C. (1991) Distributed Hierarchical Processing in the Primate Cerebral Cortex. *Cerebral Cortex*, **1**, 1-47. <https://doi.org/10.1093/cercor/1.1.1>
- [8] Makeig, S., Debener, S., Onton, J. and Delorme, A. (2004) Mining Event-Related Brain Dynamics. *Trends in Cognitive Sciences*, **8**, 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.03.008>
- [9] Woodman, G.F. (2010) A Brief Introduction to the Use of Event-Related Potentials in Studies of Perception and Attention. *Attention, Perception, & Psychophysics*, **72**, 2031-2046. <https://doi.org/10.3758/bf03196680>
- [10] Polich, J. (2007) Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, **118**, 2128-2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- [11] Zou, X., Li, S., Wang, Y., *et al.* (2023) Abnormal Visual Evoked Potentials and Brain Functional Connectivity in Adolescents with Myopia. *Brain Sciences*, **13**, Article 586.
- [12] Li, S., Chen, Z., Zhang, L., *et al.* (2024) Face Processing Deficits in High Myopia Revealed by N170 and Neural Oscillations. *Vision*, **8**, Article 31.
- [13] Creel, D.J. (2015) Visually Evoked Potentials. <https://webvision.med.utah.edu/book/part-xi-electrophysiology/visually-evoked-potentials/>
- [14] Goodale, M.A. and Milner, A.D. (1992) Separate Visual Pathways for Perception and Action. *Trends in Neurosciences*, **15**, 20-25. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)
- [15] 任宏怡, 龚健杨, 马庆凯, 等. 一种基于脑电信号的可穿戴视敏锐度检测装置[P]. 中国专利, CN115886720A. 2023.
- [16] Hamilton, R., Lochhead, A., Oulton, C.A., *et al.* (2021) VEP Estimation of Visual Acuity: A Systematic Review. *Documenta Ophthalmologica*, **142**, 25-36.
- [17] Blankertz, B., Tangermann, M., Vidaurre, C., Fazli, S., Sannelli, C., Haufe, S., *et al.* (2010) The Berlin Brain-Computer Interface: Non-Medical Uses of BCI Technology. *Frontiers in Neuroscience*, **4**, Article 198. <https://doi.org/10.3389/fnins.2010.00198>
- [18] Yan, W., Xu, G., Xie, J., Li, M. and Dan, Z. (2018) Four Novel Motion Paradigms Based on Steady-State Motion Visual Evoked Potential. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **65**, 1696-1704. <https://doi.org/10.1109/tbme.2017.2762690>
- [19] Xu, H., Hsu, S., Nakanishi, M., Lin, Y., Jung, T. and Cauwenberghs, G. (2023) Stimulus Design for Visual Evoked Potential Based Brain-Computer Interfaces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **31**, 2545-2551. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2023.3280081>
- [20] 徐光华, 郑小伟, 田沛源, 等. 视觉诱发电位视力客观检查技术的研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(3): 1-10.
- [21] 谭嘉宁, 罗方亮, 张馨元, 刘技辉. 视觉刺激事件相关电位及其研究进展[J]. 中国法医学杂志, 2017, 32(1): 44-47.