

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.007

公路景观色彩对驾驶员脑电 δ 波成分的影响

王琳虹^{1,2}, 李世武¹, 高振海²

(1.吉林大学 交通学院, 长春 130025; 2.吉林大学 汽车工程学院, 长春 130025)

摘要: 为量化高速公路路侧景观色彩与驾驶员脑电 δ 波成分之间的关系,在吉珲高速公路进行道路试验,采集所需数据. 首先基于幂函数建立景观色彩值与脑电 δ 波成分的关系模型,然后考虑驾驶时间对驾驶员脑电 δ 波的累积影响,基于高斯函数建立驾驶时间与脑电 δ 波成分的关系模型. 最后采用联合建模的方式建立驾驶时间、景观色彩值对脑电 δ 波成分的影响关系模型. 模型分析结果表明:路侧景观色彩均值与驾驶员脑电 δ 波成分呈负相关,而 δ 波多在驾驶疲劳时出现,即景观色彩越鲜亮,越能有效避免驾驶疲劳的加剧;驾驶员脑电的 δ 波成分随着驾驶时间 t 呈现波动,但是整体仍处于上升趋势,即驾驶员为规避因疲劳导致的行车危险而强制自己处于警醒状态,其自身会存在疲劳与抗拒疲劳的博弈过程.

关键词: 交通运输安全工程;高速公路;景观色彩;驾驶时间; δ 波成分

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)09-0035-06

The impacts of roadside landscape color on the δ wave of driver's EEG signal

WANG Linhong^{1,2}, LI Shiwu¹, GAO Zhenhai²

(1.College of Transportation, Jilin University, Changchun 130025, China;

2.College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: To quantify the relationship between roadside landscape and δ wave of driver's EEG signal, real vehicle experiments were conducted in Jilin-Hunchun expressway to collect the required data. Firstly, the relationship model between landscape color and δ wave component of driver's EEG was developed based on power function. Then considering the cumulative impact of driving time duration on δ wave component, their relationship model was developed based on Gaussian function. Finally, relationship model among driving time duration, landscape color and δ wave was brought forward using joint modeling method. The analysis results of the model show that: the landscape color is negatively correlated with δ wave component, namely the brighter of the landscape color, the lower of driver's fatigue level. There is a fluctuating relationship between driving time and δ wave component of EEG signal and overall δ wave component would increase with the increase of driving time. Namely the driver will force him in alert state to avoid the driving risks caused by fatigue and there is a game between falling in fatigue and resisting fatigue. The study can provide theoretical foundation for the design of freeway landscape color by considering driving fatigue.

Keywords: traffic and transportation safety engineering; freeway; landscape color; driving time duration; δ wave component

高速公路景观对驾驶员的影响体现在两方面. 一方面是偶发性的影响,如道路上设置的非交通标志广告牌、强反射光、进出隧道时光强的突变等均易对驾驶员造成视觉干扰,分散其注意力,带来安全隐患. 另一方面是累积性的影响,如路侧景观的色彩、

连续性、植被造型及间距等通过长时间作用于驾驶员的生理、视觉,可能引起驾驶员注意力、反应速度等疲劳特性的变化,进而影响驾驶员的操纵能力. 无论是累积性还是偶发性的影响,最后均有可能诱发交通事故. 偶发性影响因素所导致的交通事故常常易被发现,能够引起管理者的关注,并进行控制或者预防. 而高速公路路侧景观通过长时间作用对驾驶疲劳所产生的累积性影响导致操纵能力下降却不易被发现,遭到管理者的忽视. 脑电常作为评价驾驶疲劳的主要生理指标,因此研究高速公路路侧景观对驾驶员脑电特征参数的影响规律具有重要的科

收稿日期: 2015-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(51308251);

中国博士后科学基金(2013M541306)

作者简介: 王琳虹(1984—),女,副教授,博士;

李世武(1971—),男,教授,博士生导师

通信作者: 李世武, lshiwu@163.com

学意义,可为考虑驾驶疲劳的高速公路景观的设计提供合理依据。

人体任何细微的动作及心理变化均可以在脑电中有所体现,利用脑电(electroencephalograph, EEG)监测驾驶员是相对客观、精确的方法之一。高速公路上路侧景观的色彩对驾驶员视觉及心理产生刺激,进而反映在脑电波中。人类脑电图中脑波频率一般在 1~30 Hz,根据频带不同可以将脑电波划分为 α 、 β 、 θ 、 δ 4 个节律, δ 波多在驾驶员疲劳时出现^[1-2]。因此,有学者选择能够表征疲劳程度的脑电 δ 波成分作为驾驶员脑电特征参数。本文通过研究路侧景观对驾驶员脑电 δ 波成分的影响,研究路侧景观对驾驶疲劳的影响。

当前高速公路景观色彩等景观自身特性对驾驶员的心电、脑电等生理指标的研究较少。李香红等对不同景观路段下心率、心率增长率变化规律,并对心率增长率与行驶时间、心率增长率与行驶速度进行相关性分析,结果表明不同景观路段导致驾驶员在相同实验条件下的生理指标存在差异^[3];朱翠翠通过行车试验,研究了道路圆曲线半径和坡度与脑电信号 β 波绝对功率值的相关性,结果表明驾驶员在从直线路段进入到圆曲线路段和上坡坡度时,驾驶员的 β 波绝对功率值与圆曲线半径呈负相关,与上坡坡度值呈正相关^[4];而国外没有相关文献对此进行报道。目前针对景观对驾驶员生理的影响也仅局限于定性分析景观植被间距、公路弯道半径对驾驶员生理特性的影响^[5-10],而没有从景观色彩等其自身特性角度出发进行研究。路侧景观只有在长时间尺度内才会对驾驶疲劳产生累积影响,在累积过程中无法忽略驾驶时间的作用。因此本文建立驾驶持续时间、景观的色彩均值共同影响下的脑电 δ 波成分预测模型,为后续研究考虑驾驶疲劳的高速公路景观设计提供依据。

1 实车道路实验与数据预处理

为研究高速公路路侧景观色彩与脑电 δ 波的关系,在吉珲高速公路进行实车道路试验,采集路侧景观图像及相关驾驶员脑电相关参数。

1.1 实验设计

为确保路侧景观色彩的多样性,本文在夏季与秋季分别在吉珲高速公路进行为期两天的实车道路实验,每天的试验时间为 6:00—18:00,路侧景观如图 1 所示。要求驾驶员状态良好,驾驶经验丰富,年龄范围为 35~45 岁。采用美国 Biopac 公司的 MP100 16 导生理记录仪对驾驶员的生理指标进行采集;利用数码相机采集高速公路路侧景观视频。实车道路

试验相关情况如图 2 所示。



(a) 夏季的路侧景观



(b) 夏季带有灰色边坡的景观



(c) 秋季的路侧景观

图 1 夏季与秋季的路侧景观

Fig.1 Typical roadside landscape colors in summer and fall

影响驾驶疲劳的 3 个主要因素包括:驾驶持续时间、公路景观及道路交通状态。由于吉珲高速公路上的交通量很小,驾驶员受高速公路上相邻车辆的影响较小,因此道路交通状态因素可以忽略不计。根据经验可知,在驾驶员行车过程中,短时(如几秒或者几分钟)的路侧景观变化难以对驾驶员的生理特性产生影响,但是随着驾驶时间的逐渐增加,路侧景观的单调性或者色彩突变将会对驾驶员产生作用,甚至造成驾驶员疲劳。因此本次实车道路试验时间较长,采集的景观视频及驾驶员脑电生理指标数据量较多。

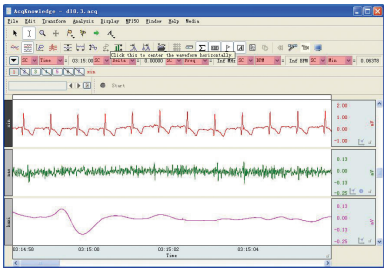
1.2 数据预处理

实验采集的景观视频速率 30 帧/s,而景观色彩对驾驶员的影响是长时间的累积作用,不会几秒之内便对驾驶员产生影响。因此选择 30 s 作为图像采集间隔,即每半分钟提取一副景观图像。基于 Biopac 的生理记录仪采集频率为 1 000 Hz,为了使得两组

数据——对应, 也选择每半分钟提取一组脑电指标.



(a) 实车实验装置



(b) 驾驶员生理指标变化曲线



(c) 相机摆放位置

图 2 实车道路试验相关情况

Fig.2 Vehicular experimental device

视频图像处理. 将采集的景观视频解压为图片序列并每半分钟提取一副图片. 基于图像分割中的纹理分析方法提取高速公路路侧景观, 并基于 K -均值聚类提取路侧景观主体色彩并计算景观色彩值^[11]. 用符号 c 表示景观的色彩值, c 的计算方法: $c = (65\ 536 \times B) + (256 \times G) + (R)$, R, G, B 为景观色彩中的红色、绿色、蓝色 3 个通道的色彩分量^[12].

生理数据处理. 人体任何细微的动作及心理变化均可以在脑电中有所体现, 利用脑电 (EEG) 监测驾驶员是相对客观、精确方法之一. 高速公路上路侧景观的色彩对驾驶员视觉及心理产生刺激, 进而反映在脑电波中. 人类脑电图中脑波频率一般在 1~30 Hz, 根据脑电中不同频带可将脑电波划分为 $\alpha, \beta, \theta, \delta$ 4 个节律. α 波的频率为 8~13 Hz, 通常驾驶员较放松时的脑电图以 α 波为主; β 波的频率为 14~30 Hz, 在驾驶员处于警醒状态时 β 波会大量出

现; θ 波的频率为 4~7 Hz, δ 波的频率为 1~4 Hz, 多在驾驶员疲劳时出现^[13-15].

由上可看出脑电 δ 波的成分能够不同程度表征驾驶员的疲劳程度. 而脑电 δ 波的功率谱密度积分成分与脑电总的功率谱密度积分之比 (以下均简称为脑电 δ 值) 可量化表达脑电 δ 波的成分. 因此选择脑电 δ 值表征驾驶员的生理特性. 因数据量较大, 选择 MATLAB 对脑电数据进行波形处理. 试验中采集的脑电信号均为时域信号, 为了获取脑电不同波形的功率谱密度, 需要利用傅里叶变换将脑电时域信号转换为频域信号. 然后根据脑电 δ 波节律及人脑电波形的频率范围不同 (δ 波的频率为 1~4 Hz, 人脑电波的频率为 1~30 Hz) 进行滤波. 最后对过滤后的波形进行功率谱密度分析, 进而利用微分的思想求得不同节律脑电波的功率谱密度积分.

2 模型建立

首先考虑驾驶时间、景观色彩对脑电 δ 值的影响建立模型; 然后研究高速公路路侧景观、驾驶时间对驾驶员脑电 δ 值的联合影响规律, 选择路侧景观的色彩值、驾驶时间作为自变量, 脑电 δ 值作为因变量建立三者之间的联合关系模型.

2.1 驾驶时间对脑电 δ 值的影响

景观色彩值与脑电 δ 值的数量级相差非常大, 导致建模中存在很多问题. 因此对数据进行归一化处理, 计算公式为

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}, \tag{1}$$

式中 x_i 为第 i 组样本变量值.

1) 数据分析. 为了建立驾驶时间对驾驶员脑电 δ 值的影响关系模型, 首先绘制二者之间的散点图, 如图 3 所示. 驾驶员脑电 δ 波多在疲劳的时候出现, 因此选择脑电 δ 波的功率谱密度积分成分占人脑总的功率谱密度积分之比 (定义为脑电 δ 值) 表征驾驶员的疲劳. δ 值越大, 代表驾驶员越疲劳.

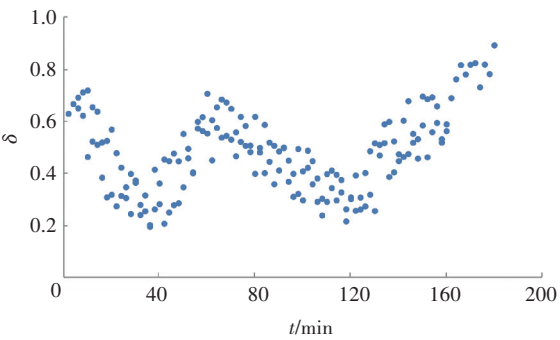


图 3 驾驶时间与驾驶员脑电 δ 值的散点图

Fig.3 Scatter diagram between driving time and δ of EEG

观察图 3 发现在驾驶过程的前 30 min, δ 值由 0.7 下降至 0.2. 原因在于实车道路试验通常在早晨 6:00 左右出发, 驾驶员在实验初期还处于轻微瞌睡状态, 之后随着逐渐进入驾驶状态, 精神变得警惕, δ 值逐渐下降. 而在 30 min 过后, 随着驾驶任务的加剧, 驾驶员越来越疲劳, δ 值逐渐变大. 在 60 min 之后, 由于疲劳易导致行车危险, 驾驶员的主观意识强迫自己要时刻处于警醒状态, 驾驶员自身会存在疲劳与抗拒疲劳的博弈过程. 因此驾驶员脑电的 δ 值会呈现波动, 但是整体仍处于上升趋势, 最后达到 0.8 左右, 说明此时驾驶员已经处于疲劳状态.

2) 模型建立及检验. 观察驾驶时间与脑电 δ 值的散点图, 发现二者的变化趋势符合三次高斯函数形式. 三次高斯函数的形式为

$$f(x) = a_1 e^{-\frac{(x-b_1)^2}{c_1^2}} + a_2 e^{-\frac{(x-b_2)^2}{c_2^2}} + a_3 e^{-\frac{(x-b_3)^2}{c_3^2}}, \quad (2)$$

式中 a_i, b_i, c_i 均为待拟合参数, $i = 1, 2, 3$.

因此尝试利用三次高斯函数对二者的关系式进行拟合, 拟合模型参数结果: $a_1 = 1.16, b_1 = 238, c_1 = 104.6; a_2 = 0.649, b_2 = 3.21, c_2 = 21.18; a_3 = 0.506, b_3 = 66.05, c_3 = 31.69$. 则驾驶时间 t 对脑电 δ 值的影响关系模型为

$$\delta = 1.16 e^{-\left(\frac{t-238}{104.6}\right)^2} + 0.649 e^{-\left(\frac{t-3.21}{21.18}\right)^2} + 0.506 e^{-\left(\frac{t-66.05}{31.69}\right)^2}. \quad (3)$$

拟合模型的判定系数 $R^2 = 0.737$, 表明自变量与因变量的相关性较大, 模型的回归效果较好. 拟合模型中自变量与因变量的关系曲线如图 4 所示.

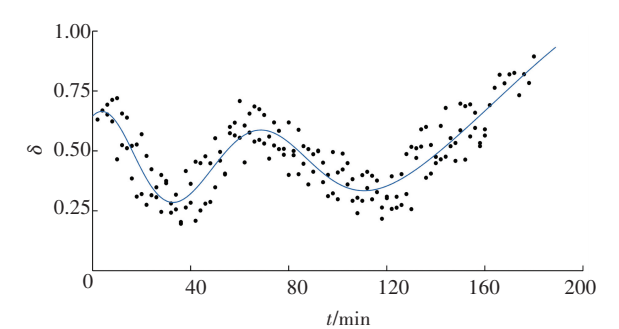


图 4 驾驶时间与脑电 δ 值影响关系拟合曲线

Fig.4 The fitting curve between driving time and δ of EEG

2.2 景观色彩对脑电 δ 值的影响

1) 数据分析. 为了建立景观色彩对脑电 δ 值的影响关系模型, 首先绘制二者之间的散点图, 如图 5 所示.

从图 5 可看出随着路侧景观色彩值的增加 (即颜色越加明亮、鲜艳), 驾驶员脑电 δ 值呈下降趋势, 根据前面的分析可知, 脑电 δ 值越小, 驾驶员越不疲劳, 即景观色彩的鲜亮程度与驾驶疲劳程度呈反比关系, 随着色彩值的增加驾驶疲劳等级逐渐减小; 即色彩明亮、鲜

艳的路侧景观具有缓解驾驶员疲劳的作用. 该结论也与实车道路试验过程中的情况相符.

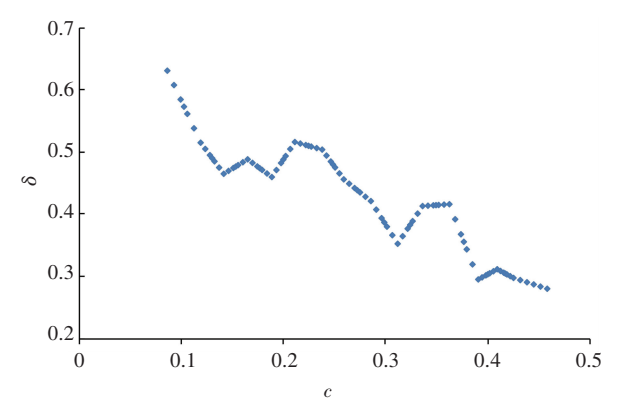


图 5 景观色彩值与驾驶员 δ 值的散点图

Fig.5 Scatter diagram between landscape color and δ of EEG

夏季的吉珲高速公路沿途多为绿色的植被, 色彩明亮, 则驾驶过程中驾驶员处于比较兴奋的状态, 而当经过长时间灰色的水泥边坡时, 驾驶员会感觉到景观过于单调, 提早进入疲劳状态. 深秋时节的吉珲高速公路绝大部分路段的植被或者庄家为暗黄色的, 因此驾驶员较早就进入疲劳状态, 当经过少部分的橙黄色树叶的植被时, 驾驶员比较兴奋. 散点图中间波动部分可能是受到外界突发的刺激而产生的, 比如超车、换道等.

2) 模型建立及检验. 观察景观色彩与脑电 δ 值的散点图, 发现二者关系可以采用幂函数进行表达, 即

$$f(x) = a \cdot x^b, \quad (4)$$

式中 a, b 均为待拟合参数.

采用散点图中的数据拟合景观色彩值 c 与脑电 δ 值的关系式, 拟合参数: $a = 0.253, b = -0.367$. 那么二者的关系模型为

$$\delta = 0.253 \cdot c^{-0.367}. \quad (5)$$

拟合模型的判定系数 $R^2 = 0.768$, 表明拟合效果较好. c 与脑电 δ 值的拟合曲线如图 6 所示.

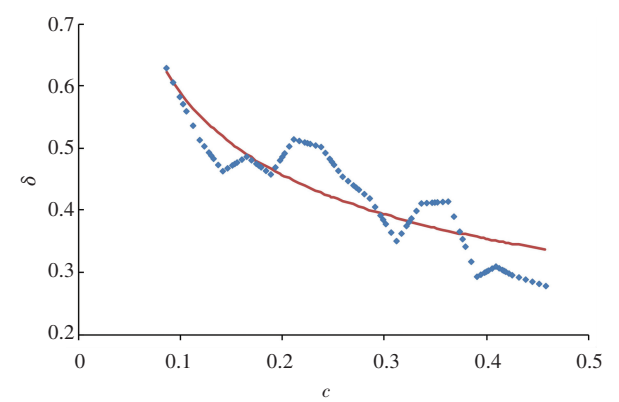


图 6 景观色彩值对驾驶员 δ 值的影响关系拟合曲线

Fig.6 The fitting curve between landscape color and δ of EEG

2.3 考虑驾驶时间的景观色彩对脑电 δ 值的影响关系建模

1) 基于迭代的模型融合. 在实际情况中, 驾驶时间与景观色彩共同作用于脑电 δ 值. 因此还需建立以驾驶时间、景观色彩为自变量, 驾驶员 δ 值为因变量的关系模型. 在 2.1 和 2.2 节已经分别建立了驾驶时间、景观色彩对 δ 值的影响关系模型, 在这两个模型中自变量与因变量呈现出非线性关系, 因此无法通过简单的线性叠加融合两个模型. 采用变量替换法将非线性问题线性化.

令 $x_1 = 1.16e^{-(\frac{t-238}{104.6})^2}$, $x_2 = 0.649e^{-(\frac{t-3.21}{21.18})^2}$, $x_3 = 0.506e^{-(\frac{t-66.05}{31.69})^2}$, $x_4 = 0.253c^{-0.3668}$, 则驾驶时间、景观色彩共同影响下的脑电 δ 值计算模型为

$$f(x) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5, \quad (6)$$

式中 β_i 为待拟合参数, $i = 1, 2, \dots, 5$.

计算出 $x_1, x_2, \dots, x_5$ 之后, 根据式(6) 结构进行多元非线性拟合, 得出拟合模型的参数为 $\beta_1 = 1.0$, $\beta_2 = 0.994$, $\beta_3 = 0.999$, $\beta_4 = 0.046$, $\beta_5 = -0.02$.

则最终的拟合模型为

$$f(x) = 1.0x_1 + 0.994x_2 + 0.999x_3 + 0.046x_4 - 0.02.$$

将拟合模型中的 $x_1, x_2, \dots, x_5$ 还原为 t, c , 得到景观色彩、驾驶时间与脑电 δ 值的关系模型为

$$\delta(t, c) = 1.163e^{-(\frac{t-238}{104.6})^2} + 0.645e^{-(\frac{t-3.21}{21.18})^2} + 0.505e^{-(\frac{t-66.05}{31.69})^2} + 0.012c^{-0.3668} - 0.02. \quad (7)$$

2) 模型验证. 为了评价模型拟合效果, 分别对模型拟合优度进行相关性检验和 F 检验. 能够检验通过, 方可应用拟合模型. 回归模型的相关性检验是对模型的精度进行验证, 并决定拟合模型是否可应用于研究中, 拟合模型的 $R^2 = 0.857$, 表明判定系数较大、模型的回归效果较好. F 检验通过利用变量 z 的总离差平方和中剩余平方和与回归平方和的比值, 检验回归模型整体的显著性. F 检验是为了判别拟合模型输出的脑电 δ 值与实际采集到的脑电 δ 值是否存在显著差异, 对两组数据进行 F 检验, 选择显著性水平 0.05, 4 自由度的拟合函数, 样本量为 168, 查表得 $F_{0.05}(4, \infty) = 2.37$. 而根据两组数据方差计算得到的 F 值为 114.33, 远大于 F 临界值, 拟合方程通过 F 检验. 综上, 可判断所建模型可有效地表达高速公路路侧景观色彩值、驾驶时间与脑电 δ 值的关系.

3 敏感性分析

3.1 敏感性分析方法选择

为了研究随着路侧景观色彩值 c , 驾驶时间 t 的

变化, 驾驶员脑电 δ 值变化的幅度, 对所建模型进行敏感性分析. 敏感性分析包括单因素敏感性分析和多因素敏感性分析. 单因素敏感性分析仅研究某一个参数变化对目标的影响; 而多因素敏感性分析需要考虑各种因素组合变动对目标的影响. 单因素与多因素敏感性分析的区别在于是否考虑各参数之间的相互作用^[16]. 因驾驶时间与景观色彩无相互作用, 因此选择单因素敏感性分析.

3.2 单因素敏感性分析

敏感度系数是在影响因素作用下目标值变化百分数与该影响因素变化百分数的比值. 敏感度系数高代表目标对影响因素的敏感程度高, 反之敏感程度低. 敏感度系数计算公式为

$$E = \Delta H / \Delta F.$$

式中: E 为敏感度系数; ΔF 为影响因素 F 的变化率; ΔH 为影响因素发生变化时目标的相应变化率.

$E > 0$ 表示目标与影响因素同方向变化, $E < 0$ 表示目标与影响因素朝相反方向变化. 在本节将驾驶员生理指标脑电 δ 值作为评价指标, 驾驶时间、景观色彩作为影响因素; 以拟合关系模型(7) 为基础, 研究在固定一个影响因素的情况下, 各个指标对另一个影响因素的敏感程度.

脑电 δ 值对景观色彩 c 、驾驶时间 t 的敏感系数如表 1、2 所示. 以一个场景为例测试了景观色彩值 c 、驾驶时间 t 以 10% 为步长, 上下变化 30% 情况下脑电 δ 值的变化率, 进而得到脑电 δ 值指标对影响因素的敏感系数 $E_c(\delta)$ 和 $E_t(\delta)$. 表 1 中随着驾驶时间 t 增幅的变化, 脑电 δ 值的增量幅度相对较大, 即脑电 δ 值对驾驶时间 t 的敏感程度较大, 表明脑电 δ 值可以有效表征驾驶员的疲劳. 通过表 2 可看出景观色彩值 c 与驾驶员脑电 δ 值呈负相关. δ 波多在驾驶员疲劳时出现, 随着 c 的增大, 景观色彩越加明亮, 脑电 δ 值逐渐下降, 驾驶员越不易产生疲劳. 且随着 c 的变化, 脑电 δ 值的增量幅度相对较小, 即脑电 δ 值对景观色彩值 c 的敏感程度相对较小.

表 1 驾驶员脑电 δ 值对驾驶时间的敏感性分析

Tab.1 The sensitive analysis of the δ of driver's EEG to driving time

$\Delta t / t$	$\Delta \delta / \delta$	$E_t(\delta)$
0.10	0.057 0	0.570 1
0.20	0.053 9	0.269 6
0.30	-0.002 7	0.001 9
-0.10	-0.109 1	1.091 1
-0.02	-0.248 3	1.241 3
-0.30	-0.383 4	1.278 1

表 2 驾驶员脑电 δ 值对景观色彩值的敏感性分析

Tab.2 The sensitive analysis of the δ of driver's EEG to landscape color

$\Delta c/c$	$\Delta \delta/\delta$	$E_c(\delta)$
0.10	-0.000 9	-0.009 2
0.20	-0.001 6	-0.008 2
0.30	-0.002 4	-0.007 9
-0.10	0.000 9	-0.009 2
-0.20	0.002 2	-0.011 0
-0.30	0.003 5	-0.011 6

对比驾驶员脑电 δ 值对景观色彩值、驾驶时间的敏感度系数绝对值,发现脑电 δ 值对驾驶时间 t 的敏感程度比对景观色彩值 c 的敏感程度要大,说明驾驶时间是影响驾驶疲劳的更重要因素。

4 结 论

1) 基于幂函数建立景观色彩值与脑电 δ 波成分的关系模型。然后考虑到驾驶时间对驾驶员脑电 δ 波的累积影响,基于高斯函数建立驾驶时间与脑电 δ 波成分的关系模型。最后采用联合建模的方式建立驾驶时间、景观色彩值对脑电 δ 波成分的影响关系模型。

2) 路侧景观色彩 c 与驾驶员脑电 δ 波成分呈负相关, δ 波多在驾驶疲劳时出现。因此随着色彩亮度的增加,脑电 δ 值逐渐下降,驾驶员越不易产生疲劳。

3) 驾驶员脑电的 δ 波成分随着驾驶时间呈现波动,但是整体仍处于上升趋势。原因是疲劳易导致行车危险,驾驶员的主观意识强迫自己要时刻处于警醒状态,驾驶员自身会存在疲劳与抗拒疲劳的博弈过程。

4) 敏感性分析结果表明驾驶时间、景观色彩对驾驶员脑电 δ 波成分存在不同程度的影响,其中前者的影响程度要高于后者的影响程度。后续将研究基于脑电信号的驾驶疲劳判别方法、高速公路路侧景观对驾驶疲劳的综合影响机理,为科学设计高速公路路侧景观提供参考。

参考文献

[1] 李影洁,邱意弘,朱贻盛.脑电信号分析方法及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
LI Yingjie, QIU Yihong, ZHU Yisheng. Analysis method for EEG signal and its application [M]. Beijing: Science Press, 2009.

[2] 王琳虹,李世武,高振海,等.基于粒子群优化与支持向量机的驾驶员疲劳等级判别[J].哈尔滨工业大学学报,2015,46(12): 102-107.
WANG Linhong, LI Shiwu, GAO Zhenhai, et al. A driver fatigue level recognition model based on particle swarm optimization and support vector machine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 46(12): 102-107.

[3] 李香红,朱守林,戚春华.基于不同公路景观环境的驾驶员生理反应实验研究[J].内蒙古农业大学学报,2010,31(4): 172-176.
LI Xianghong, ZHU Shoulin, QI Chunhua. Experiment research on

influence about the different road environment on drivers' physiology reaction [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2010, 31(4): 172-176.

[4] 朱翠翠.驾驶员脑电特性与山区双车道公路线形相关性研究[D].成都:西南交通大学,2013.
ZHU Cuicui. Correlation studies of driver EEG characteristics and two-lane highway line-type in mountainous area [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[5] 吴绍斌,高利,王刘安.基于脑电信号的驾驶疲劳检测研究[J].北京理工大学学报,2009(12): 1072-1075.
WU Shaobin, GAO Li, WANG Liuan. Detecting driving fatigue based on electroencephalogram [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(12): 1072-1075.

[6] 莫雄强.基于脑电的疲劳度检测方法研究[D].秦皇岛:燕山大学,2009.
MO Xiongqiang. Research of test method based on fatigue of EEG [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009.

[7] QU Xiaobo, YANG Ying, LIU Zhiyuan, et al. Potential crash risks of expressway on-ramps and off-ramps: a case study in Beijing, China[J]. Safety Science, 2014, 70: 58-62.

[8] QU Xiaobo, KUANG Y, OH E, et al. Safety evaluation for expressways: a comparative study for macroscopic and microscopic indicators[J]. Traffic Injury Prevention, 2014, 15(1): 89-93.

[9] 郑声涛.睡眠脑电的分析与应用研究[D].广州:广东工业大学,2014.
ZHENG Shengtao. The analysis and application research of sleep EEG[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.

[10] 马艳丽,裴玉龙.基于实验心理学的驾驶员驾驶特性及其综合评价[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(12): 2003-2006.
MA Yanli, PEI Yulong. Driving characteristics and its synthetic appraisal based on experimental psychology [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(12): 2003-2006.

[11] 李世武,王琳虹,杨志发,等.高速公路路侧景观提取及量化研究[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(4): 957-962.
LI Shiwu, WANG Linhong, YANG Zhifa, et al. Feature quantification method for freeway roadside landscape [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(4): 956-962.

[12] 何韵旺.色彩基础[M].北京:北京理工大学出版社,2009.
HE Yunwang. The color foundation [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2009.

[13] JAP B T, LAL S, FISCHER P, et al. Using EEG spectral components to assess algorithms for detecting fatigue [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 2352-2359.

[14] JAP B T, LAL S, FISCHER P. Comparing combinations of EEG activity in train drivers during monotonous driving [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38: 45-53.

[15] PARTIN D L, SULTAN M F, THRUSH C M, et al. Monitoring driver physiological parameters for improved safety [R]. Detroit: SAE, 2006.

[16] 秦伟,朱守林,戚春华.草原公路驾驶室噪声与驾驶员心率变异指标敏感性研究[J].内蒙古农业大学学报,2011,32(3): 246-249.
QIN Wei, ZHU Shoulin, QI Chunhua. The research about prairie road cab noise environment and sensitivity of driver heart rate variability [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2011, 32(3): 246-249.

(编辑 魏希柱)