



从视觉到安全: 城市交通色彩安全性研究的趋势与挑战

胡林^{1,2}, 王志鹏¹, 黄晶^{3*}, 严睿哲¹, 巫宁⁴, 李娟娟⁵

- 长沙理工大学汽车与机械工程学院, 长沙 410114
- 长沙理工大学工程车辆轻量化与可靠性技术湖南省重点实验室, 长沙 410114
- 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082
- Ruhr-Universität Bochum, Nordrhein-Westfalen 44780, Germany
- 长沙理工大学设计与艺术学院, 长沙 410114

* E-mail: huangjing926@hnu.edu.cn

收稿日期: 2024-05-13; 接受日期: 2024-07-26; 网络版发表日期: 2024-11-21

国家杰出青年科学基金项目(批准号: 52325211)、国家自然科学基金项目(批准号: 52172399, 52175088, 52372348)、湖南省普通高等学校科技创新团队(新能源智能汽车技术)和湖南省研究生科研创新项目(编号: CX20230880)资助

摘要 随着人们对美学和安全意识的不断提升, 颜色在交通中的影响备受关注. 本文旨在回顾和总结交通色彩安全研究领域的研究进展, 并对未来的研究方向提出建议. 通过收集和分析相关文献资料, 本研究总结了196篇交通色彩安全相关文献资料. 在这些研究中发现了交通色彩安全领域的研究热点和趋势. 共现网络分析结果显示, 中国和美国是对交通色彩安全研究最多、合作最密切的国家, 多样化的合作形式可能会使得结果更具有普遍意义. 而感知和决策行为普遍受颜色影响, 研究者们对颜色的能见度和视觉显著性格外关注. 建模分析结果表明, 颜色在交通安全中的影响很大程度上受到研究方法和研究目标的限制. 采用问卷调查和真实实验的研究可能会倾向于得到颜色是有影响的结果, 而采用数据集分析和模拟实验研究则更倾向于得到颜色是没有影响的结果. 当研究目标为建筑环境和交通标志时, 颜色更可能产生显著影响, 而针对车辆颜色或辅助能见度设备的研究则可能影响不明显. 这项研究为进一步探讨交通色彩安全领域提供了理论支持和新思路, 对交通规划和设计具有重要意义.

关键词 交通色彩安全, 颜色安全, 计量学分析, 随机森林

1 引言

在城市交通系统的持续发展中, 交通色彩安全扮演着至关重要的角色. 随着城市人口的增长和交通流量的增加, 如何确保城市交通系统的安全性和可持

续性成为了当今城市规划和管理的重要挑战. 交通色彩安全作为提升交通系统可识别性^[1]、引导交通参与者行为^[2]、减少事故发生率的重要手段, 日益受到关注. 首先, 交通色彩安全直接影响着道路用户的感知和行为了^[3]. 通过合理选择和布置交通标志^[4,5]、信号灯以及

引用格式: 胡林, 王志鹏, 黄晶, 等. 从视觉到安全: 城市交通色彩安全性研究的趋势与挑战. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 33–50
Hu L, Wang Z P, Huang J, et al. From vision to safety: Trends and challenges in color safety research in urban transportation (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 33–50, doi: [10.1360/SST-2024-0119](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0119)

道路标线等元素的颜色^[6,7],可以有效提高驾驶员、骑手和行人对交通环境的认知和理解^[8],减少交通事故的发生。其次,城市交通安全的可持续发展需要在保证交通效率的同时,兼顾环境和社会的可持续性。在交通色彩安全方面,需要考虑不同用户群体的需求和特点^[9],结合城市规划和文化特色,设计出符合实际需要的交通色彩方案^[10],从而实现城市交通系统的可持续发展目标。

本文将聚焦于交通色彩安全在城市交通安全可持续性发展中的关键作用和挑战,探讨交通色彩设计的最新趋势、技术创新以及未来发展方向,旨在为城市交通规划和管理提供理论指导和实践经验,推动城市交通系统向着更安全、更可持续性的方向发展。

2 背景

迄今为止,颜色在道路交通环境中的应用已经非常广泛,而关于交通色彩安全的研究还在不断完善,本节通过对现有的研究进行回顾、归纳和总结,分别从道路交通强势、弱势参与方、道路交通标志及设施和建成环境四个方面分析了颜色在交通安全中的意义,并对其研究方法的演变历程展开讨论。

2.1 道路交通中的强势参与方

在整个交通参与过程中,强势参与方被定义为以汽车为代表的对其他参与者表现出相对强势的攻击性和威胁性的一方^[11]。关于颜色在汽车应用中的安全性研究主要集中在车身颜色和车灯颜色两个方面。

2.1.1 车身颜色

美国艾仕得涂料系统公司的一项关于2022年消费者汽车颜色偏好的调查揭示了消费者在购买车辆时会考虑将颜色纳入到考虑范围,甚至有的消费者在没有自己心仪的颜色时会考虑别的品牌或者花费额外的支付来定制(<https://www.27580.cn/news/92647.html>)。而这些看似平常的颜色偏好却潜在地影响了驾驶员的驾驶行为,偏好冷色车身的驾驶员往往比偏好暖色车身的驾驶员时间观念更强,更容易发生超速和闯红灯的行为^[12]。同时,车身颜色的能见度差异也使得车辆在碰撞风险上存在差异^[13]。警方的事故数据和医院的病例记录的分析结果表明,白色、黄色等浅色车身卷入碰

撞的风险比其他颜色更低^[14-16]。然而碰撞事故数据的记录总是有限的,只能通过其观察到一些表层的现象。因而,随之衍生出的实验研究作为更深层次的因素的补充被广泛开展起来,例如,各参与方在面对不同颜色车辆的反应、决策时间以及执行力等。特别地,例如红色等一些特殊颜色的车辆得到研究者关注^[17],各项指标似乎都指向了红色可以唤醒驾驶员的“攻击性”行为^[18],这在某种程度上支持了“红色效应”的假说^[19-21]。类似地,一些黑白条纹相间的车身在视觉上更易于融为周围环境,进而削弱了自身的可见性,间接增强了其他参与者的“攻击性”^[22]。

2.1.2 车灯颜色

心理学将颜色分为前进色(膨胀色)和后退色(收缩色),与前进色相比,当后退色车辆接近时,行人感受到的行驶速度更大、威胁性更高^[23]。针对这一问题,外部交互系统的应用旨在提醒行人注意驶近的车辆^[24],红色提示灯容易唤醒行人的规避行为^[25],而绿色和青色提示灯更像是在传达通行、安全的信号^[26],这似乎跟“绿色暗示可以通行、安全,而红色则表示禁止、等待和危险”的刻板印象关联起来。然而,在一些情况下,打破这些刻板印象可能对安全性起着正向作用,例如,在我们的认知当中,汽车的刹车灯和尾灯颜色都为红色,通过改变刹车灯的颜色(黄色),可以有效降低一些不利条件下的追尾碰撞^[27,28]。这是因为颜色的区分使得驾驶员更容易判断其他参与者的行驶状态,能够及时采取相应的应对措施,从而提高了行车安全。

2.2 道路交通中的弱势参与方

行人和两轮车骑行者一直以来都被认为是道路交通中的弱势参与方(Vulnerable road users, 简称VRU)^[29]。在交通事故发生时,他们往往面临比车内驾驶员和乘员更高的伤害风险^[30]。适当颜色的穿戴装备可以提高弱势参与方的视觉显著性,进而降低发生碰撞的风险。穿着鲜明颜色的服饰、佩戴明亮的头盔、穿戴辅助能见度设备等提高安全性的方式也正在逐渐被大众所接受。

2.2.1 服饰颜色

服饰作为日常生活中必备的一部分,其颜色在一定程度上会影响到个体的碰撞风险。穿着白色或亮色

的服装^[31], 能够更容易被其他参与方注意到^[32], 从而降低发生碰撞的可能^[33]. 而在夜间, 穿着黑色等深色服饰将会增加发生碰撞的概率^[34,35]. 因而, 道路上施工作业工程队、清洁人员、交警等大都采用了黄色、橙色和荧光色等醒目的服饰颜色来提高其他参与方对他们的注意^[36]. 除了这些普通的日常服饰之外, 由反光材料制成的一些特定服饰也在降低骑手碰撞伤害方面发挥着重要作用^[37]. 事实上, 无论是记录的事故数据^[38]还是设计的模拟实验^[39]都表明了着装明亮颜色的服饰可能与较低的碰撞风险有关.

2.2.2 头盔颜色

对于骑手而言, 除了着装明亮颜色的服饰之外, 选择合适颜色的头盔同样能够增强自身的视觉显著性. 早期Wells等人^[37]和Wali等人^[38]借助了人群病例对照研究, 测量了包括头盔、服饰以及摩托车的颜色与摩托车碰撞伤害之间的关联, 发现使用浅色头盔、服饰以及摩托车是简单而又有效降低伤害风险的举措^[36]. 在Shaheed等人^[39]的研究中通过模拟实验也证实了明亮的头盔对于提高骑手的视觉显著性有着重要作用, 恰当颜色的头盔和服饰以及大灯的使用对于骑手的安全性起着积极作用. 尽管头盔颜色带来的能见度作用是有限的, 但单从安全性方面来看, 它对骑手的保护作用依然是有效的.

2.2.3 辅助能见度设备

此外, LED主动光源和辅助能见度可穿戴设备等新技术的引入^[40], 为夜间或复杂交通条件下提高骑手能见度提供了创新途径. 能见度辅助设备的应用可以提高驾驶员对目标的检测能力^[41], 随着骑手身上能见度设备数量的增多, 受到重伤的几率也大大降低^[42]. 同时, 布置位置是影响能见度辅助设备作用的一个关键性因素^[43], 布置在臀部、膝盖和脚踝等下半身关节处最容易被检测到^[44], 这似乎与我们“布置在头部、肩部、手臂等上半身会更容易被检测到”的认知相矛盾, 而产生这种感知、认知差异性是因为我们上半身包含了许多重要的器官, 在面对危险时, 我们往往会下意识的偏向于保护上半身^[45]. 在夜间, 穿戴能见度辅助设备的骑手会增大车辆与之会车时的安全通过距离^[46]. 然而, 在注意力显著性较低的地区, 能见度辅助设备可能无法起到一个很好的效果^[47], 当然这也可能

归因于设备的使用率和骑手的依从性等^[48]. 关于能见度辅助装备的有效性存在一些争议, 对此骑手和驾驶员分别持有不同的态度^[49-51], 骑手认为这些辅助装备足以提供较高的能见度, 从而让驾驶员注意到自己, 而驾驶员则认为骑手高估了辅助装备的作用, 发生碰撞前他们并未注意到骑行者. 尽管现在提倡落实骑行者穿戴高能见度辅助装备, 但早期Hagel和Mulvaney等人^[52,53]的研究指出, 能见度辅助设备在弱势道路交通参与方中的使用率不高, 并且大多数人都认为这些设备的使用是可以提高安全性. 同样有趣的现象还发生在头盔和安全带的使用上, 人们都知道交通法规规定了骑手需要佩戴头盔、副驾驶及后排乘员也需系好安全带, 然而对于法规的依从性却并不总像预期一样, 只有在面临交通执法者和罚款时, 它们的使用率才有可能被提高.

2.3 交通标志及设施

道路交通标志和设施的颜色选择不仅是出于审美考虑, 更是为了在复杂的交通环境中有效传递信息^[54]. 首先, 颜色在不同天气和光线条件下的可见性至关重要. 在恶劣天气或夜间, 颜色的鲜明度和对比度对参与者的可见性起着重要作用^[55,56]. 这就要求交通标志的颜色设计能够在各种光线条件下清晰可辨, 以确保参与者能够准确理解交通标志所传达的信息^[57]. 其次, 颜色的连贯性和统一性对参与者形成习惯性反应也十分重要. 一致性的颜色编码有助于参与者形成直观、快速的反应模式, 提高其对交通标志信息的理解和记忆, 从而降低犯错的可能性. 另外, 颜色选择还应考虑到特定群体的视觉需求^[58], 在设计交通标志颜色时, 必须确保即使是存在色觉缺陷参与者也能够清晰地辨认和理解所传达的信息, 避免因颜色选择而导致的误解或混淆. 最后, 颜色的情感效应也可能影响参与者的态度和行为. 因此, 在考虑交通标志及设施颜色对交通参与者的影响时, 需综合考虑以上这些潜在因素.

2.3.1 交通指示标志颜色

与单调的指示标志相比, 彩色的交通标志在驾驶员屈服程度方面会表现出更好的效果^[59], 丰富的色彩元素增强了标志的显著性^[60], 适当的颜色搭配唤醒了参与者与之相关颜色语义概念^[61], 对外界信息做出行

为反应起到正向激励作用, 在提供关于速度行为的反馈时, 使用红、绿两种颜色能够更有效地引起参与者的对减速的注意, 并产生更显著的影响. 在维度上与2D相比, 将标志进行3D立体化更容易引起参与者的注意, 红色搭配黄色产生更大的视觉冲击, 刺激效果也更明显^[62,63].

2.3.2 路面颜色和地面标线(标志)颜色

在交通工程和人机应用设计中, 颜色作为一种传达信息的媒介发挥着自身独特的作用. 看似单调的路面也时刻暗藏着危险的契机, Liu等人^[64]发现驾驶员在面对路面坑洼修补前后形成的颜色差异时, 会产生较大心率波动, 引起情绪紧张, 影响行车安全. 在夜间, 荧光材质的路面可以改善驾驶员视觉舒适度, 从而增大安全行车距离^[65]. 类似地, 在路面划分不同颜色区域和标线也能产生同样的效果. 与线条的形状、厚度、大小等的设计相比, 颜色的影响往往更显著^[66], 在短时间内, 颜色可以产生强烈的视觉印象, 能够直观、迅速地传达出信息, 而设计则可能需要更多的认知过程才能被理解. 在复杂的交通中, 这种微环境的设计不仅增强了参与者对安全的感知, 还从主观上让身处于微环境中的交通参与者产生安全感^[67]. 与此同时, 适当的微环境设置, 可以有效降低参与者的违法行为、减少潜在的撞车事故^[68].

2.3.3 交通设施颜色

颜色对于交通安全性的影响在一些特殊的路况上也同样奏效. 高速公路作为世界各国路网中的重要组成部分, 其安全性方面也受到了很大的关注. 一些模拟实验通过记录分析驾驶员的主观行为表现, 包括速度变化、制动频率、制动时间等, 证实了高速圈定器颜色在激发驾驶员注意力方面的有效性^[69], 而黄色护栏和红色区域在高速公路上的应用也在一定程度上增强了驾驶员的驾驶性能^[70,71]. 眼动仪的数据表明, 颜色的差异带来的不仅仅是注意力的分散和信息的获取, 更多的是对驾驶员行为上的一种激励, 白色、黄色等被证实可以加快驾驶员采取行动^[72].

2.4 建成环境

2.4.1 建成环境中建筑物颜色

随着交通和城市规划政策的落实, 城市建筑物和

街道环境以及路边景观^[73,74]的颜色搭配的和谐程度受到了重视, 色彩明度的差异性直接影响到城市环境的和谐性^[75]. 和谐的建筑颜色搭配不仅可以增强人们自身的视觉舒适性^[76], 同时还能提升信息的可读性^[77], 这表明建筑色彩组合对个体的视觉感受发挥着重要的作用. 在一个城市中, 工业区、商业区、郊区和住宅区等地区的事风险存在显著的差异^[78,79]. 这差异不仅仅受到人口密度、车流量、交通设施等因素的影响, 同时也受到地区代表色的影响. 不同区域的代表色不仅仅是一种视觉元素, 更是对交通参与者主观感知的引导. 战术城市主义中提到: “对城市进行适当的色彩干预, 是一项推动城市交通安全可持续性发展的简单而又有效的措施”^[80].

早期的分心实验研究证明了建筑环境与驾驶员分心行为之间存在关联, 而通过对记录在内真实事故案例分析发现, 建筑环境与事故发生存在密切关系, 因此, 科学合理地对城市建筑环境设计可以最大限度地减少事故的发生^[81-83].

2.4.2 建成环境中照明光源颜色

随着交通设施的完善, 色彩所带来的感官影响不再局限于物质本身, 一些外部光源等照明设施的介入直接或间接影响了感官感受. 在能见度较低的极端情况下, 采用低色温(黄色)的路面照明似乎比高色温(白色)更为有效. 这是因为低色温的光源能够在恶劣的天气条件下提供更长的视距, 其对驾驶员的视觉适应性有积极影响. 此外, 一种具有适应性的自我调节系统也能够根据外界环境的变化, 智能地调整照明条件, 这种系统有助于改善交通参与者的能见度, 降低在恶劣天气下发生事故的风险^[84]. 路边商户LED广告牌的广泛使用, 一定程度上提高了夜间路面环境的能见度, 但会受到白场亮度的影响, 当白场亮度值较低时, 女性驾驶员对一些小目标的识别能力要强于男性^[85]. 同时, 夜间照明灯光的滥用会对参与者产生晕眩干扰, 通过平衡前景和背景的亮度条件, 可以降低照明产生的眩光干扰, 提高行人在夜间环境中的视觉注意力, 从而减少危险的发生^[86]. 而像隧道内部这样能见度较低的环境下, 光源色温对行车安全有着重要作用, 较高的色温对驾驶员的疲劳起抑制作用^[87]. Liang等人^[88]通过调节色温改善了驾驶员的视觉性能, 缩短了他们的反应时间. 在隧道能见度条件得到改善后, 隧

道内壁颜色成为了继照明条件之后影响驾驶员表现的又一因素^[89-91]。适当的内壁标记颜色搭配一定的时间频率会扭曲驾驶员对自身速度的感知,这不仅在一定程度上对驾驶员超速的行为进行了干预^[92],同时还有助于缓解驾驶员由于长时间的驾驶而产生的疲劳感^[93]。

2.5 研究方法的演变历程

研究者们就不同道路参与对象的颜色特征在交通安全方面产生的影响展开了一系列的研究与讨论,在这些研究中,多样化的研究方法不仅开辟了颜色在交通安全应用方面的新视角,同时也为深入理解颜色在交通安全方面的意义提供新理论。

早期的研究多是以医院记录的病例数据和警方记录的事故数据为基础开展样本数据分析,统计学方法在这个分析过程中得到了广泛的应用,随着机器学习等新的分析方法的出现进一步提高了模型的复杂程度,并拓宽了样本分析的维度和广度。同样在早期研究中应用比较广泛的还有走访调查、电话访问以及大规模在线调查的问卷调查形式,通过交叉验证和统计检验的方式为了解大众特征和需求提供了依据。而驾驶模拟器、眼动仪、脑电仪(EEG机)和心电仪(ECG机)等一些新型技术的投入使研究的形式与评价指标得到了丰富,同时在真实实验推进过程中,除了车辆本身输出的一些可以反映驾驶员特征的参数外,生理和心理信息的介入在一定程度上反映着驾驶员自身的动态特征,这使得对驾驶员行为和状态的研究变得更加全面和深入^[94]。此外,出于对安全性和可控性方面的考虑,一些危险冲突和复杂的场景则需要借助模拟试验的形式得以开发和验证。而现如今单一化的研究形式难以满足智能时代的需求,一些研究者已经试图结合多样化的研究方式来探寻颜色在智能交通安全体系中的新规律。

2.6 小结

上述内容对文献中的主题、观点、结论以及方法的系统性总结主要侧重于对文献内容的定性分析,这很大程度上依赖于研究者的主观判断和理解。因此,通过运用一些现代化工具对文献的数量特征进行定量分析可以帮助研究者从不同角度深入了解研究领域内的重要主题、趋势、热点和相关研究之间的关系。

3 数据和方法

3.1 数据源

为了保证研究数据的可靠性,Web of Science全球引文数据库被作为本研究数据主要来源。本研究优选了科学引文索引(SCI)和社会科学引文索引(SSCI)的核心集作为文献检索的引文数据库,这两者在涵盖学术领域的广度和深度上都具备优势。通过利用这两个引文数据库,我们能够获取到更全面和多样化的文献资源^[95],有助于深入挖掘研究领域的相关文献,并为研究提供更为全面和可靠的理论基础和背景支持^[96]。检索关键词设置为“交通色彩安全”(Traffic color safety)或“颜色效应”(Color effect)或“交通色彩心理学”(Traffic color psychology)或“交通色彩应用”(Traffic color application),检索词检索范围为全范围,包括标题、关键词、摘要和正文。同时,为了进一步精确文献检索目标,本研究限定了“工程”(Engineering)、“运输”(Transportation)和“心理学”(Psychology)作为研究领域。在完成相关文献检索工作后,对于一些不相关的文献进行了人工剔除,最终保留下196篇符合交通色彩安全这一主题的论文作为后续研究的数据基础。图1为2012年到2023年期间每年发文量和引文量的统计结果,由于2024年仅过了一个季度,发文量较少,因而在统计的过程中将其排除在外。从图1的结果中可以看出,年发文量虽然略有波动,但到2021年为止总体上还是呈现出上升趋势,而在之后的两年内出现了下降则可能是受到疫情的冲击,致使一些研究无法得以正常开展。

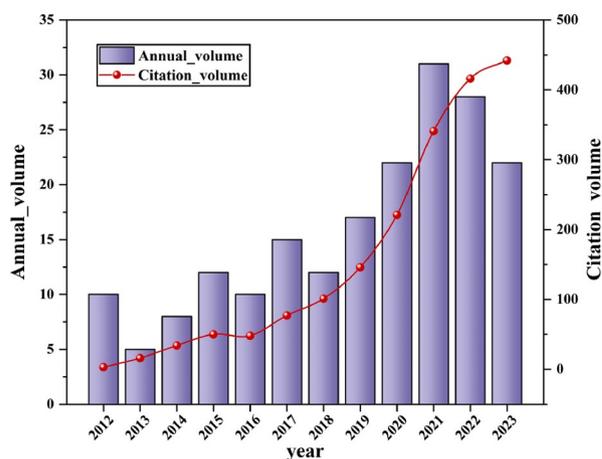


图1 (网络版彩图) 2012年到2023年文献统计结果
Figure 1 (Color online) Literature statistics from 2012 to 2023.

然而引文量的逐年增多表明交通色彩安全这一领域正在受到广大研究者的关注, 并且这一趋势将会在未来的几年内持续下去。

3.2 研究方法

本研究在前文建立好的文献数据库的基础上分别从可视化分析、文献样本化分析和讨论三个阶段来进一步揭示颜色在道路交通安全中的意义, 具体研究流程如图2所示。

在可视化分析阶段, 利用Scimago Graphica、VOSviewer和Pajek等计量分析软件生成知识图谱和关联网络对这些文献进行可视化, 进而清楚直观地认识到当下的研究重点和热点, 为未来的研究方向提供导向作用。而在样本分析阶段, 本研究将收集到的每一篇文章都视为样本, 并且它们的结果都是基于一定的实验研究和数据分析得到的, 因此, 这有足够的理由认为将它们作为样本来分析是合理的和可靠的。通过适当的处理将这些文献数据进行样本化, 分别对196个相关文献的研究内容、目标、方法、结果等进行提取、过滤、筛选、分类、编码。在对文献研究内容进行提取和分类的过程, 不可避免地存在一些文献的研究目标、研究方法的多样化, 为了能够更准确地传达出每份文献贡献者的意图, 本研究在处理过程中对这

些多样化的文献进行了拆分处理, 这使得原本的一份文献数据可能会变成两个甚至多个样本。最终获得了258例样本数据用于后续的建模分析。

4 共现网络可视化分析

4.1 地理网络共现分析

通过将包含196篇论文完整记录和引用文献的纯文本数据导入到VOSviewer软件中进行解析, 输入的文本数据被进一步转化为共现矩阵, 共现矩阵被识别后生成知识图谱网络, 随后将解析到的gml文件导入到Scimago Graphica软件中绘制地理共现网络。

地理共现分析结果如图3(a)所示, 这些研究主要来源于26个国家, 图中节点的大小表示了该国家的发文频次, 双方之间合作关系以线条的形式呈现, 而线条宽度则反映了合作关系密切程度。从图中可以看出, 中国和美国在交通色彩安全方面投入的研究最多, 同时在交通色彩安全研究领域扮演着重要角色。而韩国、澳大利亚、英国和意大利次之。从合作密度上来看, 中国的研究者在合作关系上跟美国的研究者最密切。在合作范围上, 美国合作国家明显多于中国, 相比单一国家之间的合作, 多个国家之间的多元化合作形式更有利于打破地域、数据、宗教信仰和风俗等局限

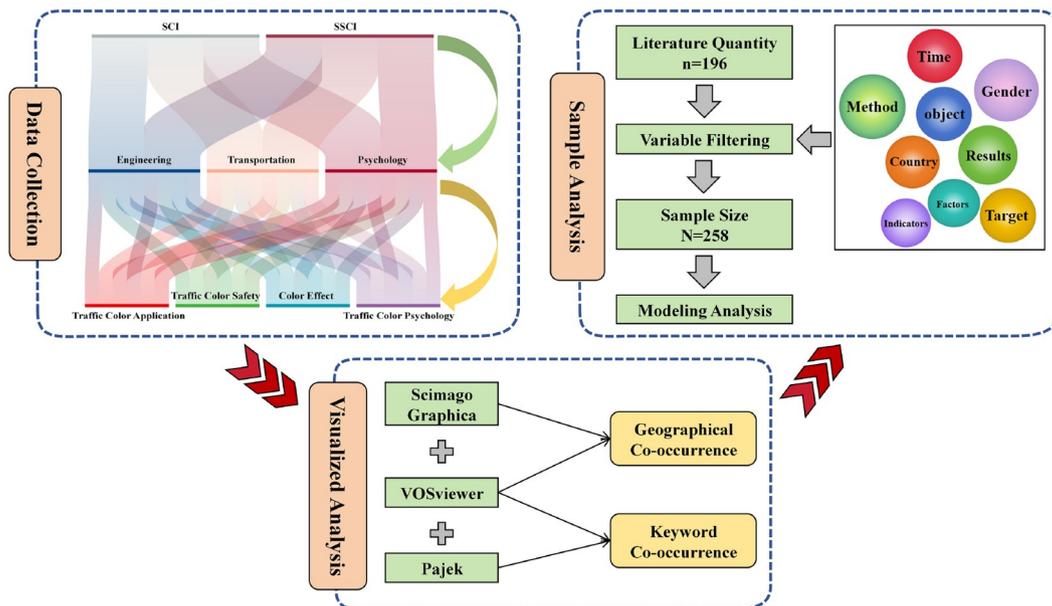


图2 (网络版彩图)研究流程示意图
Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the study process.

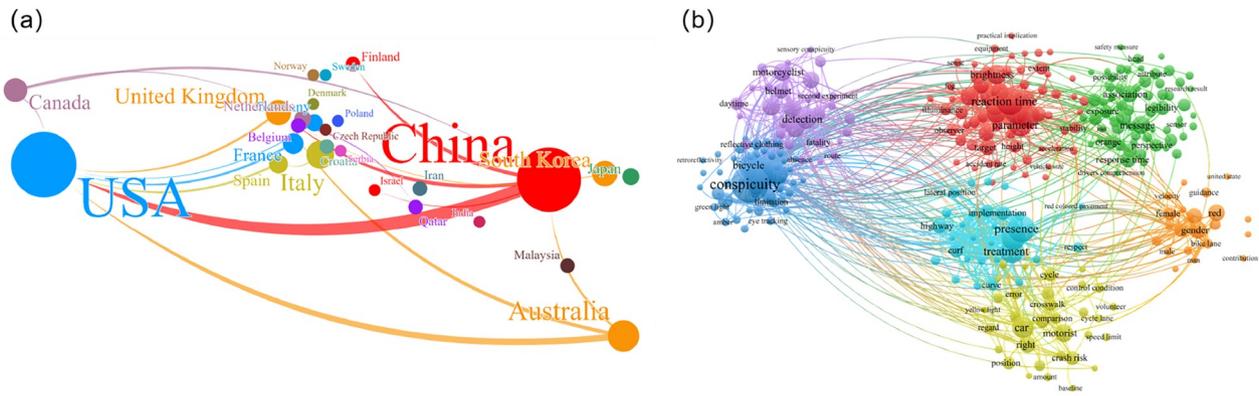


图3 (网络版彩图)共现网络. (a) 地理共现网络; (b) 关键词共现网络

Figure 3 (Color online) Co-occurrence networks. (a) Geographic co-occurrence networks; (b) keywords co-occurrence networks.

性, 例如, 在中国, 红色汽车被视为显眼与提高安全相关, 而在法国, 红色汽车可能会潜在地诱发驾驶员攻击性行为, 因为红色在当地被视为不好的代名词^[18]. 通过融合不同地域或国家的研究者在这一领域上的观点和见解, 吸纳不同地域或国家的研究成果, 可以使研究结果在形式上具有一定的灵活性和普遍适用性, 也更容易被大众所接受. 有趣的是, 从地域分布上来看, 涉猎相关研究的国家中欧洲国家居多, 这可能源于14到16世纪在欧洲全面爆发的文艺复兴运动, 在这场思想启蒙运动的影响下, 艺术和色彩在这些国家受到了更广泛的关注.

4.2 关键词网络共现分析

为了更好地呈现关键词共现网络图谱, 本文进一步将生成的关键词知识图谱通过Pajek进行节点分离并利用VOSviewer进行聚类分析, VOSviewer聚类技术获得的类别一致性在VanEck等人^[97]的研究中得到了证实, 聚类结果如图3(b)所示. 从图中可以看到这些文本数据根据出现频次以及引用的相关性被清晰地聚集成7个类别, 线条代表了两者之间存在共引关系. 聚类结果表明, 这些研究的焦点和热点集中在“能见度”和“视觉显著性”(Conspicuity)、“检测”(Detection)、“反应时间”(Reaction time/Response time)、“碰撞风险”(Crash risk)、“易读性”(Legibility)和“性别差异”(Gender)等. 而在这些焦点中, 研究者们很大程度上着眼于“视觉显著性”和“检测”, 这表明在面对颜色产生的能见度问题和检测行为上研究者们达成了共识. 这也间接揭示了视觉在交通参与过程中的重

要性.

共现网络结果表明, 交通安全色彩研究主要关注两个方面: 感知和决策. 在图3(b)中, 位于右边的几个聚类簇族的线条多由左边蓝色和紫色簇族引出, 这说明右边这些研究是基于这两个簇族的研究开展起来的, 尽管簇与簇之间存在差异, 但这些簇族的研究最终都反映在感知和决策这两个核心目标上来. 这表明在交通参与的整个过程中, 颜色在参与者的感知和决策中扮演着关键角色. 当参与者进行目标物的视觉搜索和识别时, 他们首先会注意到颜色, 然后逐渐关注更多细节. 在骑手方面, 诸如“视觉显著性”、“能见度”和“检测”等术语主要关注骑手在环境中的可见性, 这直接影响其他交通参与者对骑手的感知难易程度. 相反, 在驾驶员方面, 诸如“反应时间”、“信息识别”以及“性别差异”等术语更多关注驾驶员的认知加工和决策过程, 包括驾驶员对外部信息的接收、理解和处理速度. 尽管作用对象看似不同, 但这些因素都直接或间接影响驾驶员的感知和决策过程. 并且从图中不难发现, 以橙色为代表的“性别差异”术语在密度大小上要明显小于其他几个簇族, 在未来涉及颜色对交通安全影响的研究中, 考虑性别这一变量或将迎来热潮.

4.3 小结

共现网络分析从另一个角度层面将这些研究的地域分布、相互之间的合作情况以及研究者们关注的重点等以可视化网络的形式呈现出来. 一方面, 计量学分析验证了归纳总结的结论; 另一方面, 归纳总结补充了

计量学分析中难以捕捉到的内容和观点. 将二者结合起来可以更好地揭示研究领域的内在规律和发展趋势. 同时, 考虑到文献样本数量的限制和文献样本之间在颜色的选择上缺少交叉部分, 并且同一种颜色无论是对于不同研究目标还是不同的研究区域, 都表现一定的差异. 因此, 进一步的分析在结果上可能会缺乏一定的可信度, 这将需要研究者们在未来投入更多方面的研究来进一步揭示不同颜色在作用目标和区域差异上表现出的内在规律和发展趋势.

5 样本建模分析

在前文的论述中, 无论是归纳总结还是共现网络分析都只是从最直观的层面来反映一些表层现象. 而在回顾分析的过程中发现, 并非所有的研究者都认为颜色对交通安全存在影响, 为了解释这种研究结果上的差异, 本研究进一步地通过建模的方式深入分析背后的原因和机制, 为该领域提出新的知识和见解.

5.1 样本描述

由文献数据转化成的258例样本构成了建模分析的数据基础, 对于大多数研究性论文而言基本都包含了研究对象、研究内容、研究方法、研究结果以及评价指标等研究信息, 为了尽可能提取到这些文献数据的共有特征, 本研究在提取数据的过程中从这些研究信息中共同筛选了研究目标(Object)、研究对象(Participant)、条件或场景限制(Restrict)、研究方法(Method)、性别差异(Gender_Differences)、评价指标(Perception、Decision、Crash_Risk)和研究时间(Time) 9个可能影响交通色彩安全研究结果(Results)的变量. 由于不同的研究在颜色的选择、实验的过程和结果的表现形式上均存在差异, 为了便于建模分析, 这些样本的研究结果被按照颜色有无影响进行了表征, 即0=研究目标的颜色在交通安全中没有影响; 1=研究目标的颜色在交通安全中有影响, 例如, 路面标志颜色对交通安全是(否)有影响的, 详细内容见表1. 从统计的结果中可以看出, 研究结果为有影响的样本与结果为没有影响的样本在数量上存在不平衡. 尽管可能存在自然情况下的不平衡, 但是为了确保结果的准确性, 在进一步的分析过程中, 本研究还是将这个问题纳入到考虑的范畴.

表 1 变量分析与频数统计

Table 1 Analysis of variables and frequency statistics

变量	定义	占比/%
研究目标 (Object)	1=车灯颜色	7.36
	2=车身颜色	11.63
	3=辅助能见度设备	9.30
	4=建成环境颜色	11.63
	5=交通设施颜色	19.38
	6=路面标志颜色	20.93
	7=弱势群体穿戴颜色	16.67
研究对象 (Participant)	8=其他	3.10
	1=行人	15.12
	2=骑手	22.09
条件或场景限制 (Restrict)	3=驾驶员	62.79
	0=不适用	44.57
研究方法 (Method)	1=是	55.43
	1=问卷调查	12.40
	2=真实实验	13.95
	3=数据集分析	23.65
性别差异 (Gender_Differences)	4=模拟实验	50
	1=有	8.14
	2=无	27.91
评价指标1 (Perception)	3=不适用	63.95
	0=否	39.15
评价指标2 (Decision)	1=是	60.85
	0=否	55.81
评价指标3 (Crash_Risk)	1=是	44.19
	0=否	82.95
研究时间 (Time)	1=是	17.05
	1=白天	24.81
	2=晚上	16.66
	3=不适用	47.29
研究结果 (Results)	4=其他	11.24
	0=研究目标的颜色对交通安全没有影响	9.69
	1=研究目标的颜色对交通安全有影响	90.31

5.2 模型建立

随机森林(Random Forest)作为一种集成学习方法, 是由多棵决策树构建而成的. 它利用自助法重采样技术, 从原始训练样本集N中有放回地随机抽取k个样本

形成新的训练样本集合^[98]。接着, 利用这个自助样本集生成 k 个分类树, 这些分类树组成了随机森林。在对新数据进行分类时, 随机森林根据这 k 个分类树的投票结果进行分类决策。虽然随机森林本身并不直接解决样本不平衡问题, 但由于其集成学习的特性, 对少数类别的样本有一定的关注度, 有助于减轻样本不平衡问题对结果的影响^[99]。并且随机森林在数据拟合和模型泛化能力方面表现出良好的鲁棒性, 因此被选择为本研究进一步建模分析的方法, 其构建过程如图4所示。

5.2.1 数据集划分

在开始建立模型之前, 首先要将数据集划分为两个独立的部分: 训练集和测试集。本研究随机将80%的样本用于模型训练, 而20%的样本用于评估模型的性能和泛化能力。

5.2.2 选择特征指标

在划分好数据集后, 建立决策树过程中根节点的选择决定了决策树的分裂方式和结构, 不同的根节点选择会影响决策树的复杂度, 进而影响模型的拟合效果和泛化能力。在决策树的构建过程中, 节点的分裂依据是根据混乱程度的减少来选择最优的特征和分裂点, 而信息熵是一种度量混乱的方法之一。因此, 本研究通过信息熵确定最佳的特征来进行节点分裂。

设 t 是研究所选取的取值有限的离散变量, $p(i|t)$ 表示节点 t 为分类 i 的概率, 则信息熵的计算如公式(1)所示:

$$\text{Entropy}(t) = - \sum_{i=0}^{c-1} p(i|t) \log_2 p(i|t). \quad (1)$$

在求得变量的信息熵之后, 进一步地计算每个变量的信息增益结果可以帮助选择出权重最大的特征变量作为每棵决策树分裂的根节点。信息增益的计算如公式(2)所示:

$$\text{Gain}(D, a) = \text{Entropy}(D) - \sum_{i=1}^k \frac{|D_i|}{|D|} \text{Entropy}(D_i), \quad (2)$$

其中, D 为父节点, D_i 为子节点, 而 a 为 D 的特征变量选择, k 表示不同特征变量包含的类别数量。在公式中, 第一项表示了数据集 D 的混乱程度, 第二项表示的是使用特征变量划分后的数据集 D 的混乱程度, 二者之间的差值则表示通过特征变量 a 的划分使数据集 D 混乱程度的减少量, 即信息增益。

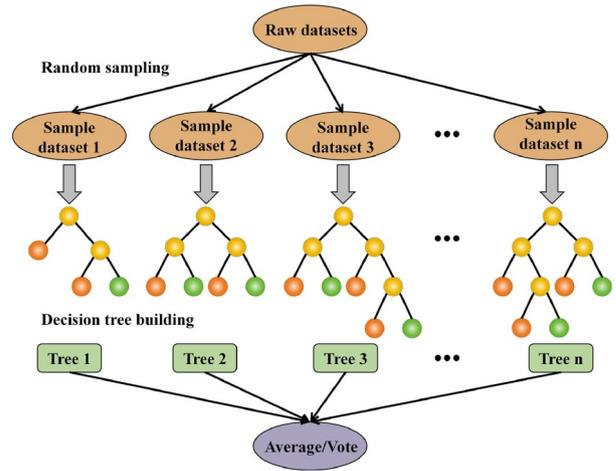


图4 (网络版彩图)随机森林模型建立

Figure 4 (Color online) Random forest modeling.

5.3 模型输出结果与分析

5.3.1 特征项分析

通过计算Object、Participant、Restrict、Method、Gender、Perception、Decision、Crash_Risk和Time这9个自变量特征项的信息熵和信息增益, 我们确定了随机森林模型中决策树分裂的根节点特征项, 从而完成了树模型的构建。图5中呈现了各自变量特征项的权重分布情况, 权重值越大表示对模型的贡献程度越大。从图中可以观察到, 特征项的权重占比从大到小依次是Method、Object、Time、Gender、Perception、Participant、Restrict、Crash_Risk和Decision。这些特征项中, 前五项占比高达73%, 剩下的四项分别占据了9.7%、7.6%、5.5%和4.2%。Method自然地成为每个决策树的根节点, 因为它在研究中占据最大的权重值。同时, 这也暗示着在研究交通色彩安全的影响时, 研究方法是导致研究结果多样性的最主要因素, 研究目的、时间因素、性别和研究对象也对结果产生重要影响, 而评价指标对结果的影响相对较小。

5.3.2 模型性能分析

通过选定9个特征参数作为自变量, 以及Results作为因变量, 并将80%的样本数据作为训练集, 利用信息熵增益的方式选择根节点来构建了100棵决策树, 完成了随机森林的建模过程。模型的输出结果如表2所示, 输出结果包含了模型各项参数设置和整体的评估效

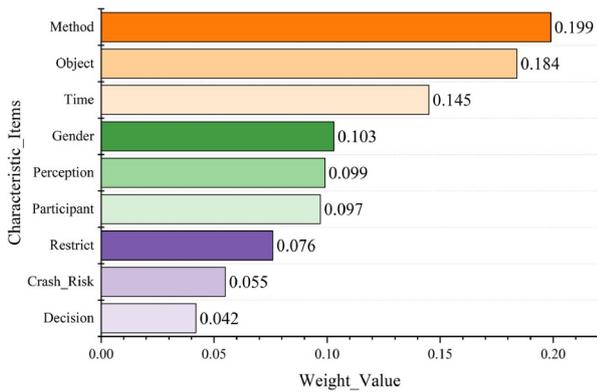


图 5 (网络版彩图)特征项权重值
Figure 5 (Color online) Feature term weight values.

果. 在参数设置中, 除训练集比例外其余各指标均为模型调整的参数值. 模型的评估结果显示, 准确率和召回率均为94.231%, 而综合得分f1-score为0.914, 模型效果较优.

5.3.3 模型可解释性分析

为了深入理解特征项对研究结果的影响, 本研究引入SHapley Additive exPlanations(SHAP)模型可解释器来量化每个重要特征对结果的影响程度. SHAP是一种模型事后解释方法, 其核心思想是通过计算特征对模型输出的边际贡献来解释预测结果, 并对“黑盒模型”提供全局和局部两个层面的解释.

特征变量的密度分布如图6所示, 纵坐标中每行代表了一个特征变量, 其排列顺序与特征权重大小相对应. 横坐标为SHAP值, 色带从低到高与标签值大小对应, 不同颜色代表了特征变量中的不同类别标签, 每个点都源自于一个样本. Gender、Perception、Participant、Restrict、Crash_Risk和Decision这些特征变量中所含的标签数均小于等于3, 在颜色上主要表现为红色、紫色和蓝色, 因此, 在图6的特征密度分布中可以相对直观地看出它们的标签分布情况和对结果的边际效应影响. 而Method、Object、Time标签数较多, 在颜色上不易区分每个标签的分布情况, 因此, 它们还需要进一步来分析. 从图6中可以看出, 在性别方面, 认为性别有影响的研究的边际效应值(蓝色)大多落在负轴上, 这表明它会对结果产生负向作用, 即倾向于得到颜色是没有影响的结果. 认为无性别差异的研究的边际效应值(紫色)则大多落在正轴上, 这表明它对结果会产

表 2 模型输出结果

Table 2 Model output results

名称	参数名	参数值
模型参数设置	训练集比例	0.8
	决策树数量	100
	节点分裂标准	Entropy
	节点分裂最小样本数	2
	叶节点最小样本数	5
	树的最大深度	5
	最大特征数目限制	Auto
	是否有放回采样	是
	是否进行袋外数据测试	是
模型评估效果	准确率	94.231%
	精确率(综合)	88.794%
	召回率(综合)	94.231%
	f1-score	0.914

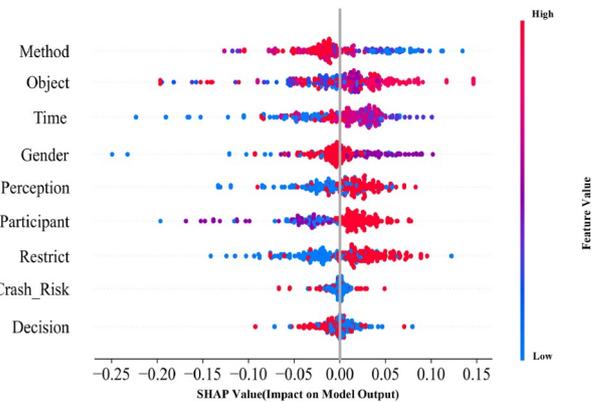


图 6 (网络版彩图)特征密度分布
Figure 6 (Color online) Distribution of feature density.

生正向作用, 即得到颜色是有影响结果. 而没有考虑性别因素的研究(红色)在正轴和负轴均有分布, 因此, 其对研究结果没有明显的影响. 在评价指标方面, 将感知作为研究的评价指标比没有考察感知的研究更容易得出颜色是有影响的结果, 而将碰撞风险和决策行为纳入到评价指标的研究对结果的影响没有差异. 在参与者层面, 关于行人和骑行者的研究更容易表现出没有影响, 而关于驾驶员的研究则促进了结果向有影响的方向发展. 在条件限制方面, 有场景、位置、能见度等其他因素限制的研究对结果有正向影响, 而没有其他因素限定的研究往往会得到无影响的结果.

除此之外, 像Method、Object、Time等多分类特征变量本研究进一步地以散点分布的形式来呈现它们对结果产生的边际效应, 如图7所示. 在图7中横坐标值对应每个标签, 而纵坐标值则表示每个标签对样本结果影响的边际效应. Method、Object、Time这三个特征项不仅对模型有着重要的影响, 很大程度上决定着研究的结果, 如图7所示, 在方法上, 采用问卷调查和真实实验方式的研究样本, 其边际效应值大多为正, 这

表明采用这两种研究方法更可能得到颜色是有影响的研究结果. 而标签为数据集分析和模拟实验样本表现出的负边际效应值则表明, 得到颜色是没有影响的结果可能会与这二者相关联. 造成两者之间的差异性可能归因于前者不可避免地介入了一定的主观因素, 而后者在很大程度上包含着相对的客观性. 从研究对象上来看, 目标为车灯、交通设施、弱势群体穿戴的研究似乎对结果没有显著的影响. 同时, 车辆本身和能

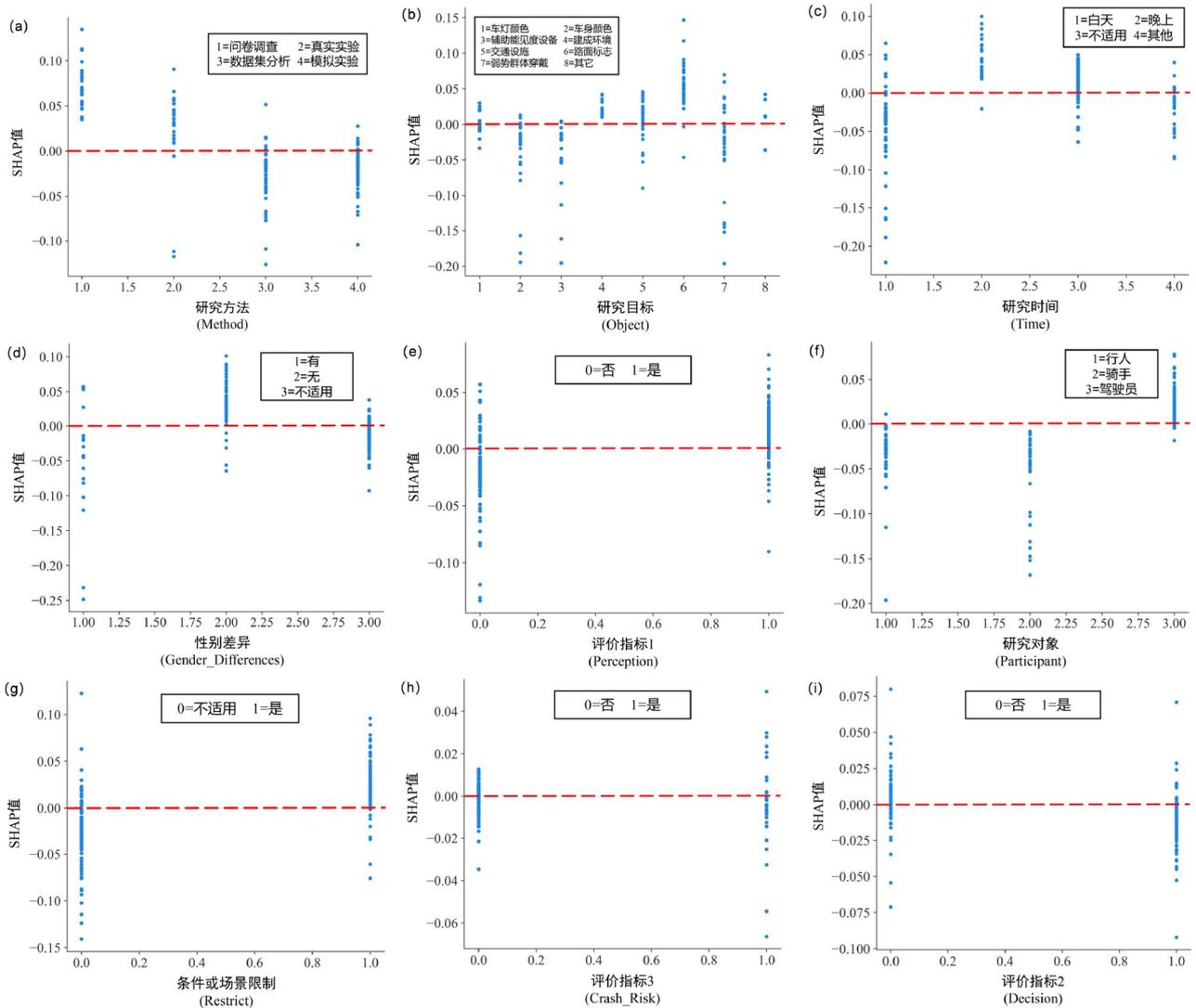


图7 (网络版彩图)特征散点分布. (a) 研究方法特征散点分布; (b) 研究目标特征散点分布; (c) 研究时间特征散点分布; (d) 性别特征散点分布; (e) 评价指标1特征散点分布; (f) 研究对象特征散点分布; (g) 局限性特征散点分布; (h) 评价指标3特征散点分布; (i) 评价指标2特征散点分布

Figure 7 (Color online) Scatter distribution of features. (a) Scatter distribution of research methodology characteristics; (b) scatter distribution of research objectives characteristics; (c) scatter distribution of research time characteristics; (d) scatter distribution of gender characteristics; (e) scatter distribution of evaluation indicator 1 characteristics; (f) scatter distribution of research object characteristics; (g) scatter distribution of limitations characteristics; (h) scatter distribution of evaluation indicator 3 characteristics; (i) scatter distribution of evaluation indicator 2 characteristics.

能见度辅助设备会对结果产生负边际效应, 而建成环境和交通标志则表现出正边际效应. 在时间上, 夜间而不是白天, 颜色在交通安全中的作用似乎更有效.

从特征变量权重分布来看, Method这一特征变量对研究结果的影响最为明显, 而由于在研究方法的选择上具有多样性, 其对研究结果的影响也产生了差异化的表现. 具体而言, 问卷调查大多是基于大规模的在线调查, 并且通常是匿名的形式, 这样一来便使得被调查对象更愿意去表达他们真实的想法, 进而提高了结果的真实性与可靠性; 同样地, 在真实实验中, 每位参与者都置身于真实的道路环境中, 会受到外界环境中诸多方面的影响, 这从最大程度反映了参与者真实的行为表现, 而真实环境也让参与者行为反应更具有真实性. 两者在参与者主观层面表现出的相似性可能使得他们对研究结果的影响呈现出一致性. 对于数据集分析, 建模分析的结果很大程度上依赖于所选择的变量以及建模方法, 即便在分析过程中考虑了足够多的变量, 仍然会存在一些未能考虑到的变量, 而这些变量是难以完全穷尽的. 就模拟实验而言, 一方面, 虚拟的环境搭建与真实情况之间的差异性无法被忽略, 另一方面, 模拟实验本身具有特点会使参与者潜意识里与真实环境下相比所产生的危险意识和警惕性有所降低, 进而对参与者的行为表现产生影响. 数据集分析和模拟试验的共性表现可能是二者对研究结果的影响趋于一致的一个原因.

6 结论和讨论

6.1 本研究的主要发现

从对背景归纳总结上来看, 关于交通色彩安全的研究主要分布在车辆颜色、车灯颜色、弱势参与方穿戴颜色、能见度辅助设备、交通设施、交通标志以及建筑和环境这几个方面. 然而, 因研究的内容、方式、目标、地域等存在差异, 这造成了研究结果上的不同, 即一些研究结果表明颜色是有影响的, 而另一些则证明是没有影响的.

进一步地共现网络可视化分析的结果表明, 中国和美国是交通色彩安全研究最多、合作最密切的两个国家, 多元化的合作形式可能会使得研究结果更具有普遍意义. 同时, 研究者们普遍认为颜色会影响到参与者的感知和决策. 颜色的能见度和视觉特性是影响

参与者的感知能力和决策行为的主要因素, 改善颜色能见度和视觉特性的过程是需要解决的突出问题之一. 此外, 在事故分析过程中, 将颜色纳入到考虑范畴将为事故致因分析和严重程度分析提供了新思路.

样本建模分析进一步阐释了Object、Participant、Restrict、Method、Gender、Perception、Decision、Crash_Risk和Time等因素是导致研究结果差异的主要原因. 这意味着通过对这些因素进行排列组合, 可能会产生更多不同的研究结果, 从而呈现出更广泛的数据趋势和洞察力. 特别地, Method和Object在很大程度上影响了研究的结果, 它们直接参与了研究的设计、数据采集、分析和解释过程, 从而对最终的研究结论的可信度和有效性产生深远影响. 选择适当的研究方法和恰当的研究对象是确保研究结果准确、可靠的关键因素. 因此, 研究者在设计和执行研究时应综合考虑这些因素, 并尽可能地控制它们, 以确保研究结果的可信度和泛化性.

6.2 本研究的创新之处

(1) 内容上在背景部分对交通色彩安全影响的研究进行了系统的归纳和总结, 为未来的学术研究和政策制定提供了参考依据.

(2) 方法上, 本研究在现有文献综述研究形式的基础上, 进一步地对文献数据建模, 综合分析了颜色在交通安全中的影响.

(3) 本研究将收集到的文献资料样本化, 通过变量提取和建模深入地分析了它们之间的内在关联, 并进一步进行了可视化分析, 这为以后的研究提供了新的研究角度和方法.

6.3 交通色彩安全的研究方向

本文围绕交通色彩安全领域的研究展开讨论, 通过对该领域的研究分析, 本研究确定几个具有潜力的未来研究方向.

6.3.1 多感官交互研究

现有关于交通色彩安全的研究主要局限于视觉层面, 尽管少部分研究考虑了颜色可能带来的心理效应, 但基本上仍以视觉为主要媒介. 然而, 未来开展关于颜色在视觉、听觉和触觉等其他感官信号之间的多感官交互研究将成为改善交通安全的重要举措. 一方面, 交

通色彩的制定与设计往往偏向于满足大多数人的需求, 而像视觉缺陷和色觉障碍等少数群体可能在识别这些信息上存在困难. 将表示不同信息的视觉信号与听觉信号相结合, 有望提高参与者的感知能力和道路安全性. 另一方面, 在能见度受限的环境中, 听觉信号要比视觉信号更为有效. 因此, 将每种颜色赋予特定的声音, 不仅在良好能见度条件下可以增强感知能力, 而且在能见度条件不佳的情况下, 听觉信息仍能独立发挥作用. 这种视听结合的方法将有助于提高参与者在各种交通环境中的安全感知能力.

6.3.2 文化和地区差异

在将颜色应用到交通环境中时, 深入研究不同文化和地区背景, 探究对交通色彩的理解和反应差异, 以及如何根据地区特性调整交通色彩设计也应是研究中值得关注的重点. 首先, 文化调研至关重要, 以了解当地居民对颜色的认知和偏好是进一步研究的基础. 其次, 受地理和气候条件影响, 一些颜色的应用需根据当地的交通文化和行为习惯调整设计, 以提高交通色彩的适用性和有效性. 通过综合考虑以上因素并进行相应调整, 交通色彩设计可以更好地适应不同文化和地区的特点, 发挥其在促进交通安全和效率方面的作用.

6.3.3 智能化交通系统的发展

随着大数据、智能汽车和车联网等新兴技术的不断

发展, 城市交通体系正逐渐朝着智能化方向迈进. 在这一进程中, 颜色作为机器识别的重要特征属性发挥着关键作用. 从交通信号灯到路标、行人指示等, 不同颜色代表着不同的意义, 这对于驾驶员和行人都至关重要. 同时, 颜色的差异也会影响机器的识别和检测能力, 智能汽车和其他交通设施需要准确地识别交通信号、标志以及其他车辆和行人的颜色特征, 以便进行正确的行为决策和路况分析. 因此, 在智慧交通体系中, 颜色的应用不仅是为了传递信息, 更是保障交通安全的重要因素之一.

然而全面无人驾驶目前尚未实现, 在这个过渡期间, 仍然需要人类驾驶员与智能系统共同操作车辆. 当涉及到人机共驾问题时, 颜色在二者之间的冲突性愈发凸显. 因此, 如何协调颜色对人和智能系统之间的影响, 应成为当前研究中面临的挑战.

6.4 结论

为了全面回顾和总结交通色彩安全研究领域的进展, 本研究首先选取了196篇相关文献, 并对其进行了综合梳理和总结. 利用计量学分析工具对这些文献资料进行了科学的共现网络可视化分析, 以揭示它们之间潜在的关联和趋势. 通过将文献资料处理成258例样本数据, 运用随机森林机器学习建模分析方法进行深入研究. 最终, 通过总结研究的主要发现和贡献, 提出了三个未来研究方向和启示, 为交通色彩安全领域的进一步发展提供了新的思路 and 方向.

参考文献

- 1 Chrysler S T, Carlson P J, Brimley B, et al. Effects of full matrix color changeable message signs on legibility and roadway hazard visibility. *Transp Res Record*, 2017, 2617: 9–18
- 2 Pankok Jr. C, Kaber D, Rasdorf W, et al. Effects of guide and logo signs on freeway driving behavior. *Transp Res Record*, 2015, 2518: 73–78
- 3 Law T H, Ghanbari M, Hamid H, et al. Role of sensory and cognitive conspicuity in the prevention of collisions between motorcycles and trucks at T-intersections. *Accident Anal Prevention*, 2016, 96: 64–70
- 4 Huang Y, Chen F, Song M, et al. Effect evaluation of traffic guidance in urban underground road diverging and merging areas: A simulator study. *Accident Anal Prevention*, 2023, 186: 107036
- 5 Huang J, Wang Z. The use of scientific programming method under visual communication design concept in urban landscape design. *Sci Program*, 2022, 2022: 8661969
- 6 Autelitano F, Giuliani F. Colored bicycle lanes and intersection treatments: International overview and best practices. *J Traffic Transp Eng*, 2021, 8: 399–420
- 7 Hunter W W, Harkey D L, Richard Stewart J, et al. Evaluation of blue bike-lane treatment in Portland, Oregon. *Transp Res Record*, 2000, 1705: 107–115

- 8 Lin N T, Hu L, Lin M, et al. Black spot identification and analysis of traffic accidents based on time series clustering (in Chinese). *J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci)*, 2023, 20: 45–54 [林南亭, 胡林, 林淼, 等. 基于时间序列聚类的交通事故黑点识别与分析. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20: 45–54]
- 9 Vich G, Marquet O, Miralles-Guasch C. Green streetscape and walking: Exploring active mobility patterns in dense and compact cities. *J Transp Health*, 2019, 12: 50–59
- 10 Safran J S, Beaton E B, Thompson R. Factors contributing to bus lane obstruction and usage in New York city: Does design matter? *Transp Res Record*, 2014, 2418: 58–65
- 11 Huang J, Peng Y, Hu L. A multilayer stacking method base on RFE-SHAP feature selection strategy for recognition of driver's mental load and emotional state. *Expert Syst Appl*, 2024, 238: 121729
- 12 Salter C A, Salter C D. Automobile color as a predictor of driving behavior. *Percept Mot Skills*, 1982, 55: 383–386
- 13 Newstead S, D'Elia A. Does vehicle colour influence crash risk? *Saf Sci*, 2010, 48: 1327–1338
- 14 Lardelli-Claret P, de Dios Luna-del-Castillo J, Jiménez-Moleón J J, et al. Does vehicle color influence the risk of being passively involved in a collision? *Epidemiology*, 2002, 13: 721–724
- 15 Ho T H, Chong J K, Xia X. Yellow taxis have fewer accidents than blue taxis because yellow is more visible than blue. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 3074–3078
- 16 Shin S Y, Lee S. Correlation between car accident and car color for intelligent service. *J Intell Inf Syst*, 2013, 19: 11–20
- 17 Díaz-Román A, Megías A, Díaz-Piedra C, et al. Seeing red on the road. *Perception*, 2015, 44: 87–92
- 18 Guéguen N, Jacob C, Lourel M, et al. When drivers see red: Car color frustrators and drivers' aggressiveness. *Aggressive Behav*, 2012, 38: 166–169
- 19 Wiedemann D, Burt D M, Hill R A, et al. Red clothing increases perceived dominance, aggression and anger. *Biol Lett*, 2015, 11: 20150166
- 20 Buechner V L, Maier M A. Not always a matter of context: Direct effects of red on arousal but context-dependent moderations on valence. *PeerJ*, 2016, 4: e2515
- 21 Greenlees I A, Eynon M, Thelwell R C. Color of soccer goalkeepers' uniforms influences the outcome of penalty kicks. *Percept Mot Skills*, 2013, 117: 1–10
- 22 Xie P, Li Q, Zhu T, et al. Simulation-based research on driver visibility of black-and-white striped vehicles. *J Adv Transp*, 2020, 2020: 1–11
- 23 Feldstein I T, Peli E. Pedestrians accept shorter distances to light vehicles than dark ones when crossing the street. *Perception*, 2020, 49: 558–566
- 24 Subramanian L D, O'Neal E E, Roman A, et al. How do pedestrians respond to adaptive headlamp systems in vehicles? A road-crossing study in an immersive virtual environment. *Accident Anal Prevention*, 2021, 160: 106298
- 25 Thorstenson C A. Functional equivalence of the color red and enacted avoidance behavior? *Soc Psychol*, 2015, 46: 306–311
- 26 Bazilinskyy P, Kooijman L, Dodou D, et al. How should external human-machine interfaces behave? Examining the effects of colour, position, message, activation distance, vehicle yielding, and visual distraction among 1434 participants. *Appl Ergonomics*, 2021, 95: 103450
- 27 Cameron D L. Color-specificity to enhance identification of rear lights. *Percept Mot Skills*, 1995, 80: 755–769
- 28 McIntyre S, Gugerty L, Duchowski A. Brake lamp detection in complex and dynamic environments: Recognizing limitations of visual attention and perception. *Accident Anal Prevention*, 2012, 45: 588–599
- 29 Wang F, Yin J, Hu L, et al. Should anthropometric differences between the commonly used pedestrian computational biomechanics models and Chinese population be taken into account when predicting pedestrian head kinematics and injury in vehicle collisions in China? *Accident Anal Prevention*, 2022, 173: 106718
- 30 Xue H T, Li H B, Zhao X Y, et al. A comparative study of rider dynamic response in vehicle-electric bicycle and vehicle-bicycle collisions (in Chinese). *Highw Auto Appl*, 2021, 6: 37–42 [薛海涛, 李海波, 赵小羽, 等. 汽车-电动自行车与汽车-自行车碰撞中骑车人动力学响应对比研究. *公路与汽运*, 2021, 6: 37–42]
- 31 Sayer J R, Buonarosa M L. The roles of garment design and scene complexity in the daytime conspicuity of high-visibility safety apparel. *J Saf Res*, 2008, 39: 281–286
- 32 Thornley S J, Woodward A, Langley J D, et al. Conspicuity and bicycle crashes: Preliminary findings of the Taupo bicycle study. *Inj Prev*, 2008, 14: 11–18
- 33 Wood J M, Tyrrell R A, Marszalek R, et al. Using reflective clothing to enhance the conspicuity of bicyclists at night. *Accident Anal Prevention*, 2012, 45: 726–730

- 34 Han L, Zhu C S, Chi R F, et al. Clothing color of vulnerable groups for intelligent vehicle testing (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2023, 36: 240–252 [韩玲, 朱长盛, 迟瑞丰, 等. 面向智能汽车测试的弱势群体服饰色彩研究. *中国公路学报*, 2023, 36: 240–252]
- 35 Hosseini S M, Najafi Moghaddam Gilani V, Mirbaha B, et al. Statistical analysis for study of the effect of dark clothing color of female pedestrians on the severity of accident using machine learning methods. *Math Probl Eng*, 2021, 2021: 1–21
- 36 Rogé J, Laurent S, Ndiaye D, et al. Does a yellow jacket enhance cyclists' sensory conspicuity for car drivers during daylight hours in an urban environment? *Saf Sci*, 2019, 119: 385–391
- 37 Wells S, Mullin B, Norton R, et al. Motorcycle rider conspicuity and crash related injury: Case-control study. *BMJ-Brit Med J*, 2004, 328: 857
- 38 Wali B, Khattak A J, Ahmad N. Examining correlations between motorcyclist's conspicuity, apparel related factors and injury severity score: Evidence from new motorcycle crash causation study. *Accident Anal Prevention*, 2019, 131: 45–62
- 39 Shaheed M S, Marshall D, Gkritza K. Factors affecting drivers' ability to detect motorcycles during daylight in a simulated environment. *Transp Res Record*, 2015, 2520: 143–150
- 40 Studzińska A, Frydrych I, Lęzak K. Transformable warning clothing for children with active light sources. *Autex Res J*, 2020, 22: 234–242
- 41 Kwan I, Mapstone J. Visibility aids for pedestrians and cyclists: A systematic review of randomised controlled trials. *Accident Anal Prevention*, 2004, 36: 305–312
- 42 Hagel B E, Romanow N T R, Morgunov N, et al. The relationship between visibility aid use and motor vehicle related injuries among bicyclists presenting to emergency departments. *Accident Anal Prevention*, 2014, 65: 85–96
- 43 Koo H S, Huang X. Visibility aid cycling clothing: Flashing light-emitting diode (FLED) configurations. *Int J Cloth Sci Tech*, 2015, 27: 460–471
- 44 Stapleton T, Koo H S. Bicyclist biomotion visibility aids: A 3D eye-tracking analysis. *Int J Cloth Sci Tech*, 2017, 29: 262–269
- 45 O'neill T W, Varlow J, Silman A J, et al. Age and sex influences on fall characteristics. *Ann Rheum Dis*, 1994, 53: 773
- 46 Black A A, Duff R, Hutchinson M, et al. Effects of night-time bicycling visibility aids on vehicle passing distance. *Accident Anal Prevention*, 2020, 144: 105636
- 47 Tin Tin S, Woodward A, Ameratunga S. The role of conspicuity in preventing bicycle crashes involving a motor vehicle. *Eur J Public Health*, 2015, 25: 517–522
- 48 Prati G. The effect of an italian nationwide mandatory visibility aids law for cyclists. *J Transp Health*, 2018, 9: 212–216
- 49 Lacherez P, Wood J M, Marszalek R P, et al. Visibility-related characteristics of crashes involving bicyclists and motor vehicles—Responses from an online questionnaire study. *Transp Res Part F-Traffic Psychol Behaviour*, 2013, 20: 52–58
- 50 Hu L, Li H, Yi P, et al. Investigation on AEB key parameters for improving car to two-wheeler collision safety using in-depth traffic accident data. *IEEE Trans Veh Technol*, 2022, 72: 113–124
- 51 Wood J M, Lacherez P F, Marszalek R P, et al. Drivers' and cyclists' experiences of sharing the road: Incidents, attitudes and perceptions of visibility. *Accident Anal Prevention*, 2009, 41: 772–776
- 52 Hagel B E, Lamy A, Rizkallah J W, et al. The prevalence and reliability of visibility aid and other risk factor data for uninjured cyclists and pedestrians in Edmonton, Alberta, Canada. *Accident Anal Prevention*, 2007, 39: 284–289
- 53 Mulvaney C A. Increasing child pedestrian and cyclist visibility: Cluster randomised controlled trial. *J Epidemiol Community Health*, 2006, 60: 311–315
- 54 Kandil F I, Olk B, Hilgetag C C. Female vs. male ampelmännchen-gender-specific reaction times to male and female traffic light figures. *Front Psychol*, 2017, 8: 690
- 55 Oh R S, Kim Y C, Bae Y H, et al. Evaluation of the maximum cognitive distance per emergency exit sign colour in a smoke-filled environment simulated using a translucent eye patch. *Fire Technol*, 2023, 59: 3445–3471
- 56 He Y, Li Y, Xing L, et al. Influence of text luminance, text colour and background luminance of variable-message signs on legibility in urban areas at night. *Lighting Res Tech*, 2021, 53: 263–279
- 57 Rodak A, Kruszewski M, Sztandera B. Does the driver understand the warning? Comprehension of the request to intervene. *Appl Sci*, 2022, 12: 9451
- 58 Atchison D A, Pedersen C A, Dain S J, et al. Traffic signal color recognition is a problem for both protan and deutan color-vision deficient. *Hum Factors*, 2003, 45: 495–503
- 59 Gehlert T, Schulze C, Schlag B. Evaluation of different types of dynamic speed display signs. *Transp Res Part F-Traffic Psychol Behaviour*, 2012, 15: 667–675

- 60 Ross V, Dehman A, Reinolsmann N, et al. The evaluation of decorated camera housings—A driving simulator study. [Accident Anal Prevention](#), 2023, 188: 107089
- 61 Lange F, Haiduk M, Boos M, et al. Road crossing behavior under traffic light conflict: Modulating effects of green light duration and signal congruency. [Accident Anal Prevention](#), 2016, 95: 292–298
- 62 Liang G, Qian G, Wang Y, et al. Design of a 3-dimensional visual illusion speed reduction marking scheme. [Int J Occupational Saf Ergonomics](#), 2017, 23: 92–104
- 63 Lai C C, You T Y. Graphic traffic signals—The color design of 3D crosswalks. [Transp Res Part F-Traffic Psychol Behaviour](#), 2023, 97: 291–300
- 64 Liu Q, Gao M, Zhang J, et al. Analysis on drivers' vision-psychology under the influence of color difference after pavement pothole repair. [Teh Vjesn](#), 2021, 28: 1894–1903
- 65 Wang W, Sha A, Falchetto A C, et al. Properties analysis of self-luminous cement-based materials with different colors and their visual comfort evaluation on pavement. [Sol Energy](#), 2022, 247: 214–227
- 66 Vera-Villarroel P, Contreras D, Lillo S, et al. Perception of safety and liking associated to the colour intervention of bike lanes: Contribution from the behavioural sciences to urban design and wellbeing. [Plos One](#), 2016, 11: e0160399
- 67 Rivera Olsson S, Elldér E. Are bicycle streets cyclist-friendly? Micro-environmental factors for improving perceived safety when cycling in mixed traffic. [Accident Anal Prevention](#), 2023, 184: 107007
- 68 Lusk A C, Willett W C, Morris V, et al. Bicycle facilities safest from crime and crashes: Perceptions of residents familiar with higher crime/lower income neighborhoods in Boston. [Int J Environ Res Public Health](#), 2019, 16: 484
- 69 Abou-Senna H, El-Agroudy M, Mouloua M, et al. Effect of changing a traffic control device color on driver behavior and perception across different age groups. [Transp Res Record](#), 2021, 2675: 228–240
- 70 Yang Y, Chen J, Easa S M, et al. Effectiveness of yellow color guardrail belt at freeway exits. [Accident Anal Prevention](#), 2020, 146: 105737
- 71 Ross V, Reinolsmann N, Dehman A, et al. Investigating the effect of marking and delineation treatments on driver behavior at highway exit gore areas. [Accident Anal Prevention](#), 2021, 161: 106362
- 72 Zhao E Z, Dong L L, Chen Y, et al. The impact of LED color rendering on the dark adaptation of human eyes at tunnel entrances. [Int J Environ Res Public Health](#), 2020, 17: 1566
- 73 Wang L, Bie Y, Li S. The impact of roadside landscape colors on driver's mean heart rate considering driving time. [Transp Res Part F-Traffic Psychol Behaviour](#), 2016, 42: 151–161
- 74 Li H, Zhang Y. Influence of landscape design on driving behavior based on slope illusion. [J Adv Transp](#), 2022, 2022: 1–7
- 75 Li K, Yang Y, Zheng Z. Research on color harmony of building façades. [Color Res Application](#), 2020, 45: 105–119
- 76 Wang Z, Sun H, Li J. Research on architectural color and visual comfort in historic landscape areas. [Buildings](#), 2023, 13: 1004
- 77 Won S, Lee Y J, Park Y K. The impact of signboard-building color combinations on color harmony and legibility. [Color Res Appl](#), 2020, 45: 527–541
- 78 Pulugurtha S S, Duddu V R, Kotagiri Y. Traffic analysis zone level crash estimation models based on land use characteristics. [Accident Anal Prevention](#), 2013, 50: 678–687
- 79 Tang X, Bi R, Wang Z. Spatial analysis of moving-vehicle crashes and fixed-object crashes based on multi-scale geographically weighted regression. [Accident Anal Prevention](#), 2023, 189: 107123
- 80 O'Connor Z. Tactical urbanism: Colour interventions with purpose. [Color Res Appl](#), 2021, 46: 516–523
- 81 AlKheder S. Studying the effect of built environment on traffic safety with random parameter and generalized ordered logit models. [Urban Clim](#), 2023, 47: 101388
- 82 Shin S, Choo S. Influence of built environment on micromobility–pedestrian accidents. [Sustainability](#), 2022, 15: 582
- 83 Lee S, Yoon J, Woo A. Does elderly safety matter? Associations between built environments and pedestrian crashes in Seoul, Korea. [Accident Anal Prevention](#), 2020, 144: 105621
- 84 Park W, Jin M, Kim Y, et al. Investigating the effect of road lighting color temperature on road visibility in night foggy conditions. [Appl Ergonomics](#), 2023, 106: 103899
- 85 He Y, Zhang X, Quan L, et al. Influence of coloured light projected from night-time excessive luminance outdoor LED display screens on vehicle driving safety along urban roads. [Building Environ](#), 2021, 188: 107448
- 86 Lee C C, Chen C H, Chien W C, et al. Improving pedestrians' navigation safety at night by enhancing legibility of foreground and background

- information on the display. *Int J Industrial Ergonomics*, 2023, 94: 103383
- 87 Li X, Ling J, Shen Y, et al. The impact of CCT on driving safety in the normal and accident situation: A VR-based experimental study. *Adv Eng Inf*, 2021, 50: 101379
- 88 Liang B, He S, Tähkämö L, et al. Lighting for road tunnels: The influence of CCT of light sources on reaction time. *Displays*, 2020, 61: 101931
- 89 He S, Liang B, Tähkämö L, et al. The influences of tunnel lighting environment on drivers' peripheral visual performance during transient adaptation. *Displays*, 2020, 64: 101964
- 90 Qin X, Zhang N, Zhang W, et al. How does tunnel interior color environment influence driving behavior? Quantitative analysis and assessment experiment. *Tunnelling Underground Space Tech*, 2020, 98: 103320
- 91 Zhao X, Liu Q, Li H, et al. Evaluation of the effect of decorated sidewall in tunnels based on driving behavior characteristics. *Tunnelling Underground Space Tech*, 2022, 127: 104591
- 92 Wan H, Du Z, Yan Q. The speed control effect of highway tunnel sidewall markings based on color and temporal frequency. *J Advcd Transp*, 2016, 50: 1352–1365
- 93 Zheng Z, Du Z, Yan Q, et al. The impact of rhythm-based visual reference system in long highway tunnels. *Saf Sci*, 2017, 95: 75–82
- 94 Lin H, Hai C, Jing H, et al. The challenges of driving mode switching in automated vehicles: A review. *IEEE Trans Veh Technol*, 2024, 73: 1777–1791
- 95 Wang W, Gan H, Wang X, et al. Initiatives and challenges in using gamification in transportation: A systematic mapping. *Eur Transp Res Rev*, 2022, 14: 41
- 96 Scarano A, Aria M, Mauriello F, et al. Systematic literature review of 10 years of cyclist safety research. *Accident Anal Prevention*, 2023, 184: 106996
- 97 van Eck N J, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 2010, 84: 523–538
- 98 Wei F, Xu P, Guo Y, et al. Exploring the injury severity of vulnerable road users to truck crashes by ensemble learning. *J Transp Saf Secur*, 2024, 16: 1–24
- 99 Wu D, Zhang Y, Xiang Q. Geographically weighted random forests for macro-level crash frequency prediction. *Accident Anal Prevention*, 2024, 194: 107370

From vision to safety: Trends and challenges in color safety research in urban transportation

HU Lin^{1,2}, WANG ZhiPeng¹, HUANG Jing³, YAN RuiZhe¹, WU Ning⁴ & LI JuanJuan⁵

¹ College of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

² Hunan Provincial Key Laboratory of Lightweight and Reliability Technology for Engineering Vehicles, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

³ College of Mechanical and Transportation Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

⁴ Ruhr-Universität Bochum, Nordrhein-Westfalen 44780, Germany

⁵ College of Design and Art, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

With the increasing awareness of aesthetics and safety, the influence of color in traffic has attracted considerable attention. This paper reviews and summarizes research on traffic color safety and proposes future research directions. By collecting and analyzing relevant literature, this paper summarizes 196 articles related to traffic color safety. In these studies, we identify the research hotspots and trends in the field of traffic color safety. The results of the cooccurrence network analysis show that China and the United States lead in traffic color safety research and cooperation. Their diverse forms of cooperation may make the results more general. As perception and decision-making behavior are generally influenced by color, researchers focus more attention on the visibility and visual salience of color. The results of the modeling analysis indicate that the influence of color on traffic safety is largely limited by the research methodology and research objectives. Studies using questionnaires and real experiments may tend to show that color is influential, whereas studies using data analysis and simulations may show that it is not. Color is more likely to have a significant effect when the studies target the built environment and traffic signs. By contrast, color may not have a significant effect when the studies target vehicle color or visibility aids. This study provides theoretical support and new ideas to further explore the field of traffic color safety, which is important for transportation planning and design.

traffic color safety, color safety, econometric analysis, random forest

doi: [10.1360/SST-2024-0119](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0119)