

# 考虑环境色彩协调的隧道墙式洞门色彩设计方法

叶 飞<sup>1</sup>, 刘 佳<sup>1,2</sup>, 温小宝<sup>1</sup>, 张兴冰<sup>1,3</sup>, 朱文豪<sup>1</sup>, 杨 永<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 河北交通职业技术学院 路桥工程系, 河北 石家庄 050035; 3. 四川成乐高速公路有限责任公司, 四川 成都, 610041)

**摘要:** 为了提升隧道洞门与自然环境的协调统一, 应用色彩学理论和图像处理技术, 对我国公路隧道墙式洞门色彩与洞口环境色彩之间的协调性问题开展研究。通过调查问卷和引入色相协调理论, 构建了隧道洞门色彩协调性设计准则, 即色相符合谐波协调类型、饱和度和明度均为弱对比类型; 基于该准则提出了隧道墙式洞门色彩量化设计方法: 利用聚类分析对隧道洞口环境图像进行色彩提取并转化为 HSV(色相、饱和度、明度)色彩空间, 分析色相谐波类型, 计算饱和度和明度, 进而确定洞门色彩三属性的取值范围。应用基于色相协调理论的洞门色彩设计方法对既有隧道进行案例分析, 其协调性评价结果与主观问卷结果一致, 验证了该方法的可行性与有效性, 同时为新建隧道洞门设计提供科学依据。

**关键词:** 隧道洞门; 色彩设计; 协调理论; 环境; 图像处理

**中图分类号:** U453.1

**文献标志码:** A

## Color Design Method for Tunnel Wall Portal Considering Environmental Color Coordination

YE Fei<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1,2</sup>, WEN Xiaobao<sup>1</sup>, ZHANG Xingbing<sup>1,3</sup>, ZHU Wenhao<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Department of Bridge Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050035, China; 3. Sichuan Chengle Expressway Co., Ltd., Chengdu, 610041, China)

**Abstract:** In order to improve the coordination and unification between the tunnel portal and the natural environment, the color theory and image processing technology are applied to study the color coordination of highway tunnel wall portal with the environment in China. In this paper, by conducting a survey questionnaire and introducing the hue coordination theory, the design criteria for the color coordination of tunnel portals are constructed,

that is, the hue conforms to the harmonic coordination type, and the saturation and lightness are both weak contrast types. Based on this criteria, a quantitative design method for tunnel wall portal color is proposed. The cluster analysis is used to extract the color attributes of the tunnel entrance environment image and convert them into the HSV (hue, saturation, value) color space. The hue harmonic type is analyzed, the saturation and lightness are calculated, and the value range of the three attributes of the portal color is determined. A case study of an existing tunnel is conducted using the color design method, and the coordination evaluation results are consistent with the subjective questionnaire results, which verifies the feasibility and effectiveness of the method and provides a scientific basis for the design of new tunnel portals.

**Key words:** tunnel portal; color design; coordination theory; environment; image processing

近些年,我国公路隧道洞门装饰成为工程建设中的关键环节,一方面可以通过景观装饰美化隧道洞口环境,增添地域文化特色、增进与自然生态环境的协调统一,另一方面能够改善隧道洞口视觉环境,提升隧道行车安全与舒适性,这两者休戚相关、相互辉映<sup>[1]</sup>。洞门色彩是司乘人员最易感知的装饰元素,适宜的色彩装饰不仅发挥洞口视线诱导功能,还能够弱化端面墙壁,提升与周围环境的融合度<sup>[2]</sup>。

隧道洞门色彩的选取涉及到色彩学相关理论。Munsell最早提出了色彩三要素:色相、明度和色度,建立了Munsell色彩体系,正式奠定了现代色彩学基础,对色彩的描述与研究更加方便和准确,以此推动了多色彩的协调性探究<sup>[3]</sup>;Moon和Spencer<sup>[4]</sup>寻求色彩协调

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(52078046)

第一作者: 叶飞(1977—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为隧道及地下工程。

E-mail: xianyefei@126.com

通信作者: 张兴冰(1997—),男,硕士,主要研究方向为数字化隧道景观及地下工程。

E-mail: xingbing20@gmail.com



论文  
拓展  
介绍

的定量表达,根据相应色彩组合的诱发情绪来评价色彩协调程度;Munsell<sup>[5]</sup>与Ostwald<sup>[6]</sup>都认为色彩在色彩空间中具有特定关系,例如色调与饱和度不变,仅有明度指标变化时,色彩依旧保持协调;Munsell<sup>[7]</sup>以色彩面积为主要因素,考虑具有相同符号的等距色度标度与等反射率明度,将色彩协调理论建立在明度、色度与色相等外观属性基础之上;Itten<sup>[8]</sup>强调色调(色相),通过色轮型式定义了色彩协调的概念,将互补色称为双色协调,三色协调在色轮上表现为等边三角形,四色协调表现为正方形,六色协调为六边形;Matsuda<sup>[9]</sup>经过长达9年调研与分析,通过色轮型式建立了i、V、L、I、T、Y、X和灰度图N型,共8种色彩协调类型,在传统的图像领域和新兴的虚拟现实技术(VR)领域得到广泛应用。

色彩从来不是孤立存在的,更多是借助其他媒介展现在人们眼前,这就是色彩的应用领域,或称其为应用色彩学。谷晓旭等<sup>[10]</sup>在分析公路建筑环境的基础上,提出公路建筑色彩设计的原则,并结合边坡、隧道、中央分隔带等典型建筑的环境差异性特点,构建公路建筑色彩协调性设计方法,对提升行车安全、丰富路域景观具有重要意义;沈晓倩<sup>[11]</sup>针对桥梁色彩与周围环境不协调的问题,总结了桥梁色彩设计要点,确定控制色源与被控制色源,将桥梁色彩设计分为搭建环境模拟系统和推荐色彩方案及系统模拟,为桥梁色彩方案设计提供参考。隧道洞口环境色彩对司乘人员的视觉审美、感知可行性、满意度和愉悦感有重要影响,叶飞<sup>[12-13]</sup>利用眼动指标分析了洞门颜色对隧道洞口驾驶环境的影响,并基于动静结合的视觉特性,建立了隧道洞口设计综合评价体系;Duan<sup>[14]</sup>利用生理仪研究了不同行车速度下,洞门色彩与驾驶人心率之间的相互关系;另有不少学者研究了洞口绿化在隧道洞口减光、降低照明能耗、缓解驾驶人紧张情绪等方面发挥的重要功能<sup>[15-16]</sup>。

综合我国公路隧道景观发展需求,以及隧道洞口景观在洞门色彩设计方面的研究尚且存在不足,既有、新建隧道洞门色彩选取具有随意性。鉴于此,本文引入色彩协调性理论,使用图像处理技术,提出一种考虑自然环境色彩影响的隧道墙式洞门色彩设计方法,并将其应用于隧道洞门色彩设计与评价中,以期推动隧道洞门与周围环境的协调统一<sup>[17]</sup>。

## 1 洞门色彩应用情况

根据气候区划,对我国647座隧道洞门色彩和洞口环境的应用情况进行统计。国家《建筑气候区划标准》将全国划分为严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、

温和地区和夏热冬暖地区五大分区<sup>[18]</sup>,考虑到季节变化、地表植被形态特征等因素,将上述五大分区进行整合并命名为:四季分明环境、春秋两季分明环境和全年常绿环境三大分区。依据HSV色彩三属性(色相、饱和度、明度),对三大分区环境下洞门色彩与洞口环境色彩进行色差分析<sup>[19]</sup>,如表1所示。

表1 三大分区环境下色差统计结果

Tab. 1 Statistic of color difference in three major partition environments

		%		
类型		四季分明	春秋两季分明	全年常绿
色相差	邻近色	33	28	19
	同类色	26	21	10
	对比色	16	12	22
	差色	10	9	16
	类似色	9	19	16
	中差色	6	11	16
	互补色	0	0	1
饱和度差	弱对比	90	83	71
	中对比	9	16	25
	强对比	1	1	4
明度差	弱对比	76	76	91
	中对比	24	23	8
	强对比	0	1	1

由统计结果得出:四季分明和春秋两季分明环境下,隧道洞门色彩与洞口环境色彩之间的色相差以邻近色和同类色为主,较少使用差色、中差色且不使用互补色,对于全年常绿环境下色相差类型不具备显著差异,对比色类型占比略多,且存在互补色类型;不同分区环境下的饱和度差具有相同的分布规律,均以弱对比为主,其次为中对比,强对比最低,随着地区环境色彩变化剧烈程度的减弱,弱对比类型逐渐降低,中、强对比类型逐渐升高;三大分区环境下的明度差均以弱对比为主,中对比其次,强对比最低,与饱和度差的分布规律相一致。

综合不同分区环境下色相差、饱和度差与明度差的分布规律可知:隧道洞门设计时均选择了弱对比的饱和度和明度,然而色相的选择仍然存在较多差异。

## 2 洞门色彩协调性调研与分析

为了探究既有洞门色彩设计的协调性,本节选取了10组隧道洞门案例进行主观问卷。

### 2.1 问卷设计

问卷分为两部分,第一部分为基本信息调研,包括性别、年龄、驾龄以及对隧道洞门色彩的关注程度等;第二部分为洞门色彩协调性调研,被调研者在每组案

例中选出协调性最优的选项。10组案例来源于黄土高原地区、华南地区、秦岭地区、地表植被不太发育地区以及典型民族地区(藏族聚居区)。每组案例中的图片

在选取时遵循隧道洞口环境(色彩)类似、洞门结构形式相近、洞门色彩存在差异的原则,如图1所示。

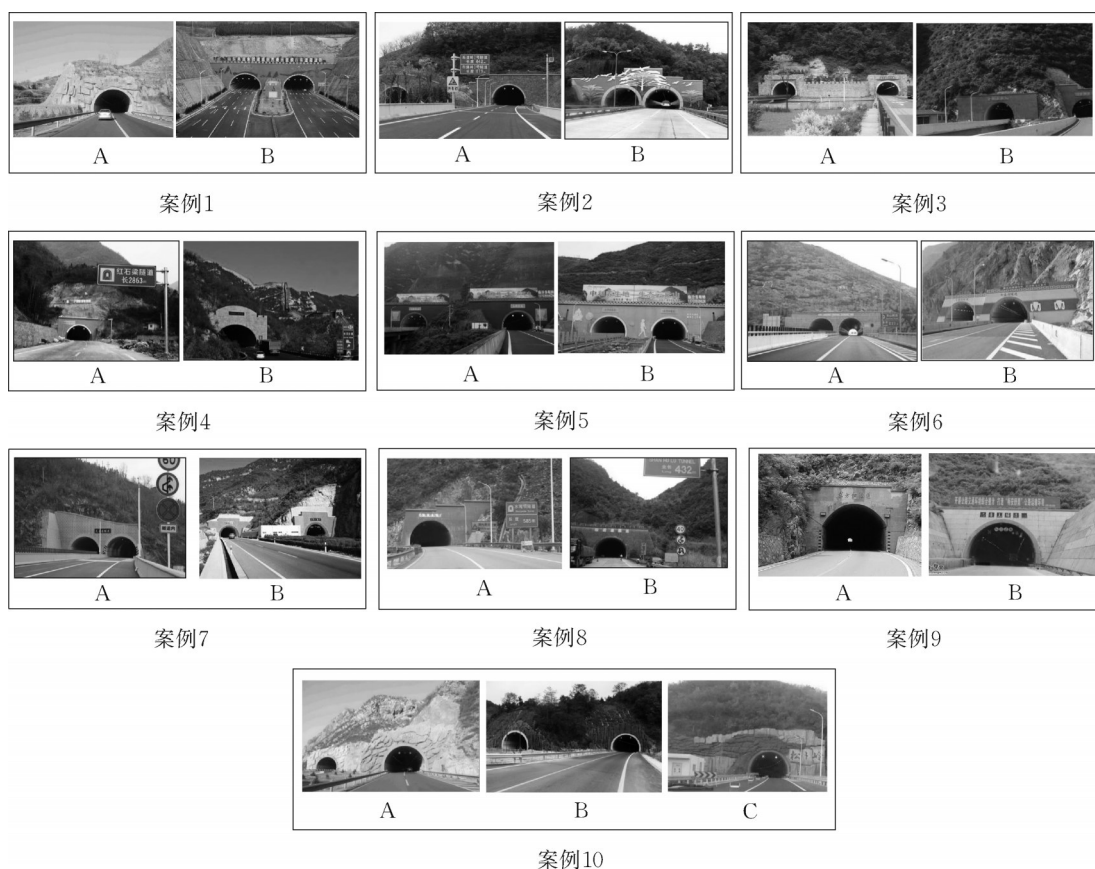


图1 洞门案例

Fig. 1 Portal cases of tunnel

## 2.2 结果统计

### (1) 基本信息

调研结果共回收64份问卷,性别:男性43人,女性21人,男女比接近2:1,接近交通部21年公布的驾驶人性别比;年龄:18~25、26~35、36~50岁的人数分别占37.5%、43.8%、18.8%;驾龄:0~4、4~10、10年以上的人数分别占40%、37.5%、22.5%。被调研者中有62.5%会关注洞门色彩,认为适宜的洞门色彩会改善驾驶体验感。

### (2) 洞门色彩协调性

10组案例的问卷调研结果如图2所示,除案例9外,其余9组案例中有60%以上的被调研者选择了同一个选项,说明大众对于洞门色彩协调性的看法具有明显趋同性。另外,既有隧道存在洞门色彩与周围环境色彩协调性不足的情况,如案例1中的B隧道,案例4中的A隧道,案例10中的B隧道,被调研者对以上隧道洞门色彩协调性的评价结果均低于20%。

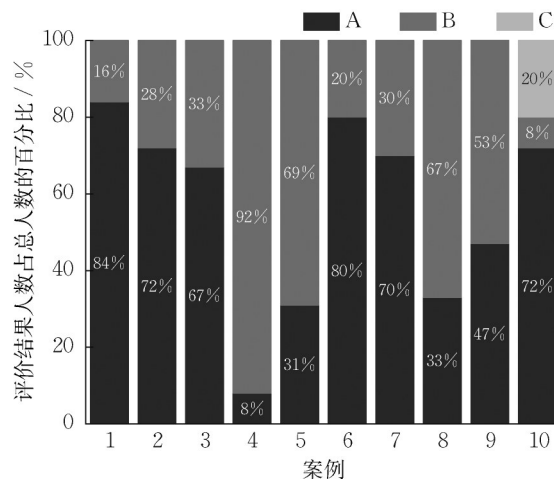


图2 色彩协调性统计

Fig. 2 Statistics of color coordination

为了进一步量化分析洞门色彩的协调性,对案例统计结果中大众审美趋同性较高的9个洞门案例(1-A、2-A、3-A、4-B、5-B、6-A、7-A、8-B、10-A)进行色差分析,



如图3所示。由结果得知:色相差中以邻近色占比最高,其次是同类色与对比色,类似色和中差色占比最低;饱和度差和明度差均为中、弱对比度,其中弱对比饱和度占88.9%,弱对比明度占66.7%。

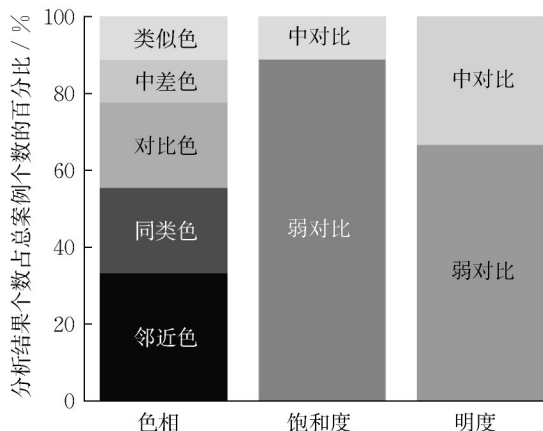


图3 色差分析

Fig. 3 Analysis of color difference

### 3 洞门色彩设计方法

根据洞门色彩协调性调研结果,符合色彩协调性设计的案例中,饱和度和明度呈现出统一的规律,均以弱对比度为主,然而色相却没有明确的取值范围。因此,本文借鉴色彩学中的谐波协调理论,出色相选取准则,并据此总结出一种洞门色彩的设计方法。

#### 3.1 谐波协调理论

Matsuda<sup>[9]</sup>20世纪末在HSV色彩空间的色相通道上提出8种谐波协调类型(图4),Daniel等将其成功应用于图像美化处理领域<sup>[20]</sup>。受此启发,本文将其引入用于隧道墙式洞门色彩色相选取标准中。由于Matsuda的第八种类型为灰度图,本文不考虑该种类型,剩下7种类型,分别为:i型、V型、L型、I型、T型、Y型和X型。

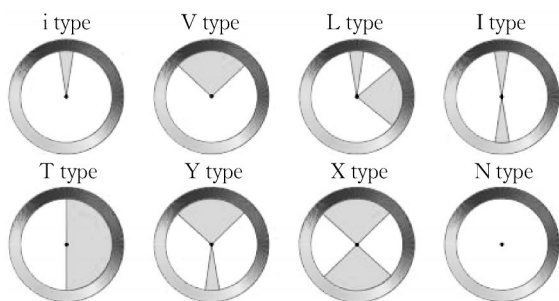


图4 8种色相谐波协调类型

Fig. 4 Eight types of hue harmonic coordination

#### (1) 理论介绍

以i型为例,其在色轮上的分布是一个较小的扇

形阴影区,如果一幅图像的色相分布全部位于阴影区内,那么就认为该图像满足谐波协调理论,即符合色彩协调性,其协调类型为i型。i型的阴影区圆心角为 $18^\circ$ ,其含义为色相分布区域可以是 $[0, 18^\circ]$ ,也可以是 $[90^\circ, 108^\circ]$ ,只要其色相分布的极差不大于 $18^\circ$ 即可,其他协调类型同理。

为了定量描述每种协调类型的分布特点,将每种类型阴影区的分布范围(对应的圆心角)用矩形宽度来表示,当有两个阴影区时,分别用“第一个矩形宽度”、“第二个矩形宽度”来区分,“距离”表示两个矩形区域左侧边界的间距,单位均为度( $^\circ$ ),见表2。

表2 7种谐波协调类型的分布特征

Tab. 2 Characteristic of seven harmonic coordination types

类型	第一个矩形宽度	第二个矩形宽度	距离
i型	$18^\circ$		
V型	$93.6^\circ$		
T型	$180^\circ$		
I型	$18^\circ$	$18^\circ$	$180^\circ$
L型	$18^\circ$	$79.2^\circ$	$59.4^\circ$
X型	$93.6^\circ$	$93.6^\circ$	$180^\circ$
Y型	$93.6^\circ$	$18^\circ$	$217.8^\circ$

#### (2) 实现过程

当输入一张图像后,判断其属于哪种谐波协调类型的实现过程为:获取图像色彩RGB(红、绿、蓝)值、RGB值转化为HSV值、计算HSV直方图、计算直方图距离和判断谐波协调类型。RGB色彩空间的三个分量表示为: $I_r$ 、 $I_g$ 和 $I_b$ ,其中, $I_r$ 为红色分量, $I_g$ 为绿色分量, $I_b$ 为蓝色分量;HSV色彩空间的三个分量表示为: $I_h$ 、 $I_s$ 和 $I_v$ ,其中, $I_h$ 为色相, $I_s$ 为饱和度, $I_v$ 为明度,具体实现流程如下:

①输入图像并获取其 $I_r$ 、 $I_g$ 和 $I_b$ 值;

②图像RGB值与HSV值的色彩空间转换;

③计算 $I_h$ 的直方图,其横坐标为色相的取值范围( $[0, 360^\circ]$ ),纵坐标为每个角度(色彩)的像素点数量;

④计算 $I_h$ 直方图上每一个角度与7种色彩协调类型上每个角度的距离。将距离最小的色相协调类型定义为最优的谐波协调类型,即:

$$\text{type}_{\text{opt}} \in \{\text{Type i, Type V, Type T, Type L, Type X, Type Y}\}$$

在最优的谐波协调类型下,最小距离的位置被视为最优角度(最优方案)。

⑤根据最优方案生成RGB图像,即为色彩协调特征图(色轮分布图)。进而完成图像的色相分布规律与最接近(匹配)的谐波协调类型判断。

### 3.2 设计方法

在进行隧道墙式洞门色彩设计时,洞门与洞口环境需要满足的色彩协调性准则为:色相符合谐波协调

类型、饱和度为弱对比、明度为弱对比。利用图像处理技术,得出墙式洞门配色流程,如图5所示。

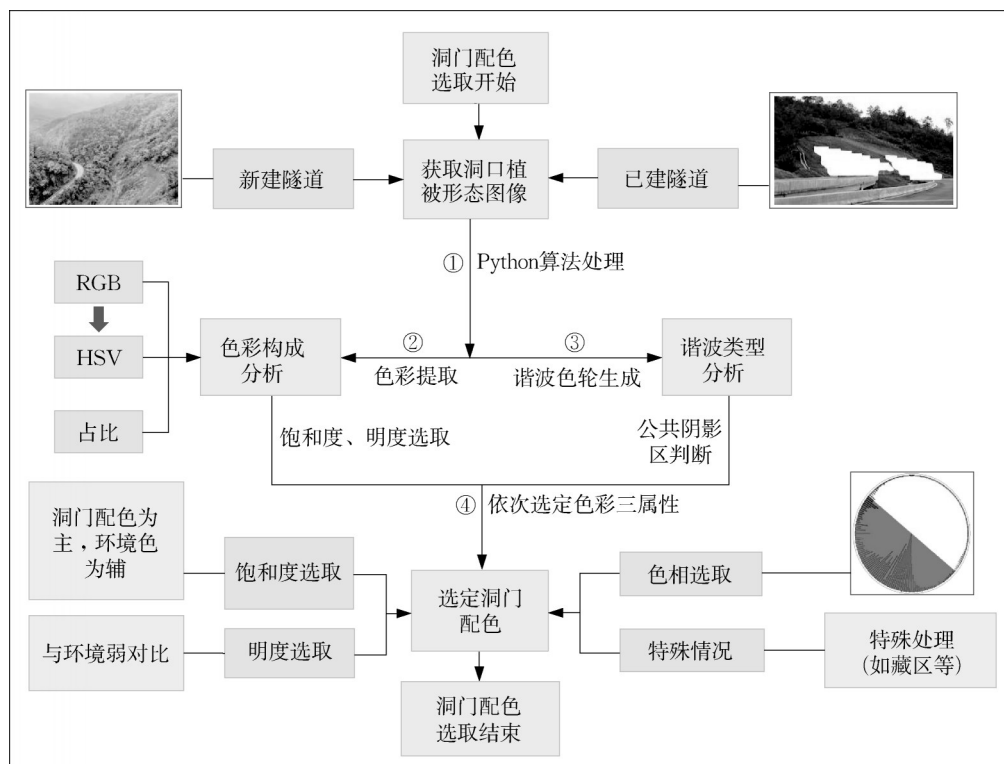


图5 墙式洞门色彩选取流程

Fig. 5 Selection of the color of wall portal

①获取隧道洞口环境图像。当针对已建项目进行隧道洞门重新装饰时,需要利用PS等图像编辑软件,将已有洞门色彩从图像之中剥离,仅保留洞口周围植被部分,以免受到既有洞门色彩的影响;

②色彩构成分析。基于聚类分析的图像色彩提取算法将隧道洞口图像信息进行提取,完成色彩空间的转换;

③谐波类型分析。将所用的图像导入至谐波协调分析程序中,从而判断图像的色轮分布及最接近的谐波协调类型;

④选定洞门色彩。

i 色相 当希望获得与周围环境更强的协调感时,应尽量选择阴影区内靠近色相直方图分布集中的区域;若希望获得一定的对比性,以提升洞门的醒目程度,则选择阴影区内远离色相直方图分布集中的区域,如阴影区边界位置;

ii 饱和度 应尽量做到周围环境为辅助色,洞门色彩为主色,以增强洞门的醒目性与主导性,但由于饱和度与明度的非独立性,因此二者的选择可综合考虑;

iii 明度 应尽量做到与环境明度范围相一致,或者

偏差不宜太大。同时明度与饱和度的选择进行综合考虑;

iv 在选定洞门色彩时,可提供多组方案,然后综合地域文化、风土人情以及大众意愿确定最优方案。

## 4 案例分析

为了进一步说明设计方法的可行性与有效性,以第2节主观问卷案例3-B作为已建项目进行洞门色彩设计和评价,并将评价结果与主观问卷结果进行对比。

### 4.1 色彩协调性设计

按照3.2节中提出的墙式洞门色彩设计方法,对已建隧道洞门色彩进行协调性设计:

①获取隧道洞口环境图像

案例3-B作为已建隧道,利用PS技术将原隧道洞门色彩剔除,如图6所示。

②色彩构成分析

利用聚类分析的图像处理算法,对图6b进行主要色块提取和色彩空间转换,得表3,其中, $j$ 为主要色彩类型, $p$ 为比例, $I_{hj}$ 、 $I_{sj}$ 、 $I_{vj}$ 分别为第 $j$ 种色彩的色相、饱和度和明度。

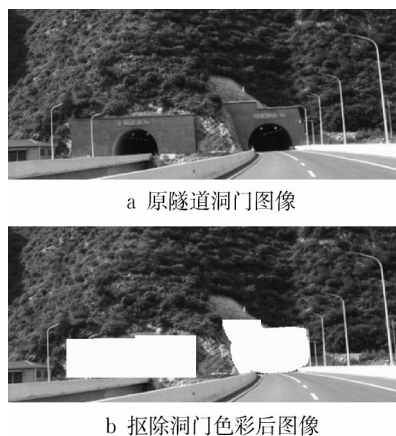


图6 隧道洞口环境图像获取过程

Fig. 6 Acquisition of ring surrounding image of tunnel entrance

表3 主要色彩信息

Tab. 3 Information of Main color

色彩 <i>j</i>	$p_j/\%$	$I_{ij}/(^{\circ})$	$I_{sj}$	$I_{vj}$
	25.5	98	0.184	0.141
	21.8	78	0.157	0.224
	18.3	71	0.153	0.188
	12.6	151	0.055	0.596
	12.5	170	0	0
	7.3	68	0.047	0.412
	2.0	149	0.055	0.929

## ③谐波类型分析

通过对图像的色轮分析,判断其谐波协调类型为“T”型,如图7所示。

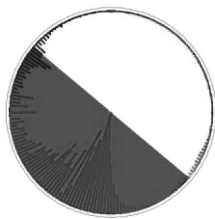


图7 案例3-B隧道洞口环境色彩谐波协调类型

Fig. 7 Harmonic coordination type of entrance environment in case 3-B

## ④选定洞门色彩

依据3.2节中的色相值选取方法,将图7所示阴影区域作为洞门色彩色相选取范围。利用式(1)分别计算洞口环境色彩的加权饱和度 $\bar{I}_s$ 与加权明度 $\bar{I}_v$ :

$$\begin{aligned}\bar{I}_s &= \sum_{j=1} p_j \cdot I_{sj} \approx 0.121 \\ \bar{I}_v &= \sum_{j=1} p_j \cdot I_{vj} \approx 0.243\end{aligned}\quad (1)$$

根据3.2节的色彩协调性准则,饱和度和明度均为弱对比类型,由公式(2)计算出洞门色彩的饱和度 $I_{sm}$ 与明度 $I_{vm}$ 取值范围,得:饱和度取值为 $[0, 0.454]$ 、明度取值为 $[0, 0.576]$ 。

$$\begin{aligned}0 &\leq |I_{sm} - \bar{I}_s| \leq 0.3333, \text{ 且 } I_{sm} \in [0, 1] \\ 0 &\leq |I_{vm} - \bar{I}_v| \leq 0.3333, \text{ 且 } I_{vm} \in [0, 1]\end{aligned}\quad (2)$$

## 4.2 协调性评价

结合4.1节给出的洞门色彩取值范围,对原隧道洞门色彩设计进行评价。

## (1)色相评价

对原隧道洞门图像(图6a)进行谐波协调处理,得到其色轮分布及所属谐波类型(图8),结合4.1节得出的洞门色彩色相选取范围,原隧道洞门色彩位于阴影区域之外,据此推断原隧道洞门色彩和洞口环境色彩在色相上不符合谐波协调类型。

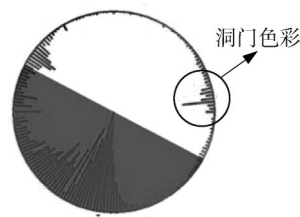


图8 案例3-B隧道洞门色彩协调性评价

Fig. 8 Portal color coordination assessment in case 3-B

## (2)饱和度及明度评价

对原隧道洞门图像(图6a)进行色彩提取,得到其饱和度和明度,分别为0.090和0.412,依据式(2)计算结果,原隧道洞门色彩的饱和度和明度均在取值范围之内,符合弱对比类型。

综合色相、饱和度、明度的评价结果,得出原隧道洞门色彩设计不满足色彩协调性,这与主观问卷中的调研结果相一致,进一步验证了此设计方法的有效性。

## 5 结语

针对公路隧道墙式洞门色彩协调性问题开展研究,统计了我国隧道墙式洞门色彩应用情况以及大众对于隧道洞门色彩审美的趋向性,提出一种满足色彩协调性的隧道洞门设计方法,具体结论如下:



(1)考虑季节变化和地表植被特征的三大分区环境下,我国既有隧道洞门色彩与洞口环境色彩之间的饱和度差与明度差以弱对比为主,色相差类型在四季分明环境和春秋两季分明环境中,以邻近色和同类色为主,全年常绿环境下的色相差类型不具有显著差异。大众对于洞门色彩协调性的认知具有趋同性,符合大众协调性认知的隧道洞门色彩具有相同规律:饱和度和明度均为中、弱对比,色相中邻近色占比最高;(2)引用色彩协调理论,同时借鉴设计学中饱和度与明度计算方法,构建了隧道墙式洞门色彩设计准则:色相符合谐波协调类型、饱和度为弱对比、明度为弱对比;(3)基于洞门色彩设计准则,应用图像处理技术提出了一种墙式洞门色彩设计方法:获取隧道洞口环境图像、提取图像色彩信息、判断谐波类型、确定洞门色彩三属性取值范围。最后以既有隧道洞门为例,对其进行色彩协调性设计与评价,进一步验证了设计方法的可行性和有效性。

#### 作者贡献声明:

叶飞:提出研究主题与论文思路。

刘佳:论文构思及撰写。

温小宝:提出论文框架与论文修改。

张兴冰:图像信息处理,指导论文修改。

朱文豪:调研结果统计与分析。

杨永:论文构思与修订。

#### 参考文献:

- [1] YE F, HE C, WANG S M, *et al.* Landscape design of mountain highway tunnel portals in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 29: 52.
- [2] 刘佳,何乔,苏恩杰,等.公路隧道洞口景观构景元素分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(4): 485.  
LIU Jia, HE Qiao, SU Enjie, *et al.* Landscape elements analysis of highway tunnel entrance [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, 51(4): 485.
- [3] KUEHNI R G. The early development of the Munsell system[J]. *Color Research & Application*, 2002, 27(1): 20.
- [4] MOON P, SPENCER D E. Area in color harmony[J]. *JOSA*, 1944, 34(2): 93.
- [5] CLELAND T M, MUNSELL A H. A grammar of color: Arrangements of strathmore papers in a variety of printed color combinations according to the Munsell color system [M]. West Springfield, United States: Strathmore Paper Company, 1921.
- [6] OSTWALD W. Color science [M]. [S.l.]: Windsor Newton, 1932.
- [7] MUNSELL A H. A Grammar of Colour [M]. New York: Van Nostra Reinhold Co., 1969.
- [8] ITTEN J. The elements of color [M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1970.
- [9] MATSUDA Y. Color design [J]. *Asakura Shoten*, 1995, 2(4): 10.
- [10] 谷晓旭,李祝龙,卫巍,等.公路建筑环境色彩和谐构建研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(3): 157.  
GU Xiaoxu, LI Zhulong, WEI Wei, *et al.* Research in construction of harmonious color in highway architecture [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2010, 8(3): 157.
- [11] 沈晓倩.跨江桥梁色彩方案推荐系统的研究与应用[D].武汉:华中科技大学, 2021.  
SHEN Xiaoqing. Research and application of color scheme recommendation system for river-crossing bridge [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [12] 叶飞,李文辉,韩鑫,等.基于动静结合的公路隧道洞口设计综合评价体系研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 32(7): 1.  
YE Fei, LI Wenhui, HAN Xin, *et al.* Comprehension evaluation system for a highway tunnel portal design based on the combination of dynamic and statics [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 32(7): 1.
- [13] 叶飞,应凯臣,苏恩杰,等.基于眼动指标的公路隧道洞口景观设计舒适性及安全性评价[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(2): 218.  
YE Fei, YING Kaicheng, SU Enjie, *et al.* Comfort and safety evaluation of tunnel portal landscape design based on eye movement index [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(2): 218.
- [14] DUAN Y, WEI Y, SHANG T, *et al.* Analysis of the color on the tunnel portal based on the drivers' heart rate [C]// *Materials Science and Engineering*. [S.l.]: IOP Publishing, 2019, 688(4): 044016-044022.
- [15] 肖代全,申振武,徐学才.高速公路隧道口绿化对驾驶员心理的影响[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(6): 101.  
XIAO Daiquan, SHEN Zhengwu, XU Xuecai. Impact of virescence at expressway tunnel portal on driver's psychology [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(6): 101.
- [16] GARCIA-TRENAS T, LÓPEZ J C, PEA-GARCÍA A. Proposal to forest alpine tunnels surroundings to enhance energy savings from the lighting installations. towards a standard procedure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78(8): 1.
- [17] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道设计细则:JTG/T D70—2010[S].北京:人民交通出版社, 2010.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for design of highway tunnel: JTG/T D70—2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [18] 中华人民共和国建设部.建筑气候区划标准:GB 50178—1993 [S].北京:中国计划出版社, 1994.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard of climatic regionalization for architecture: GB 50178—1993 [S]. Beijing: Plan Publishing House of China, 1994.
- [19] LI K R, ZHENG Z Q, WANG P H, *et al.* Research on the colour preference and harmony of the two-colour combination buildings [J]. *Color Research & Application*, 2022, 47(4): 980.
- [20] COHEN-OR D, SORKINE O, GAL R, *et al.* Color harmonization [J]. *ACM Transaction on Graphic*, 2006, 25(3): 624.