

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230104

## 基于个体色度观察者的色适应生理优化模型

陈倩雯, 陈蕴智

(天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

**摘要:** 在传统色适应模型中引入个体色度观察者概念, 量化由个体视觉生理差异引起的特性化色适应变换结果。在传统色适应模型的框架基础上, 基于个体色度观察者模型获得表征个体视觉特性的视锥光谱响应函数, 代入模型运算中完成个体观察者的色度描述和色适应变换。从而实现量化不同年龄和视觉特性的个体观察者在不同视场下的对应色预测, 提出一种更精确且符合个体生理视觉特性的色适应模型优化算法。

**关键词:** 色适应; 色适应变换; 个体色度观察者; 视觉生理

中图分类号: TS801.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2023)06-0075-06

## Physiologically Optimized Chromatic Adaptation Transform Based on Individual Colorimetric Observer

CHEN Qianwen, CHEN Yunzhi

(College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology,  
Tianjin 300457, China)

**Abstract:** The concept of “individual colorimetric observer” is introduced to the traditional chromatic adaptation transform to quantify the chromatic adaptation results of individual observers with different visual characteristics. The individual visual characteristics was quantified by their cone spectra response function based on the individual colorimetric observer model, and will be used to complete the individual colorimetric description and transform based on the framework of traditional chromatic adaptation transform. Thus, the corresponding color prediction of individual observers with different ages and visual characteristics under different visual fields can be quantified, and a more accurate, personalized and physiologically optimized model of chromatic adaptation transform is proposed.

**Key words:** chromatic adaptation; chromatic adaptation transform; individual colorimetric observer; visual physiology

色度学是在 20 世纪围绕颜色所架构的科学系统, 其所需要解决的首要任务是颜色的准确度量。直至今使用最为广泛的色度系统仍是国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)的 CIE 1931 色度系统。CIE 1931 色度系统基于 CIE 1931 标准色度观察者构建, 所谓标准色度观察者, 即 CIE 官方推荐使用的表征观察者平均视觉特性的一组颜色匹配函数(color matching function, CMF)。如此就忽略了个体观察者之间的色觉差异<sup>[1-4]</sup>, 而将每个人所解读的不同版本的颜色世界, 简单统一为 CIE 所设定的假想“标准色度观察者”的颜色世界。

CIE 标准色度系统是一种简单、高效的解决方案, 提高了色度运算效率并简化了很多复杂的色度学问题。因此, CIE 1931 色度系统在色彩工业中得到广泛而迅速地推广和应用。色彩工业的高速发展, 对色精度有着越来越高的要求。例如国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)所推介的超高清电视频域标准(Bt.2020), 预期只能够通过诸如 LED(light emitting diode)、OLED(organic light emitting diode)、激光及量子技术等窄基原(narrow primary)的技术手段来实现<sup>[5]</sup>。Sarkar 等<sup>[6]</sup>发现对于这类窄基原广色域显示设备, 感红视锥(L-cone)的光

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-05-17

作者简介: 陈倩雯(1989—), 女, 江苏人, 博士研究生; 通信作者: 陈蕴智, 教授, yzchen@tust.edu.cn

谱吸收波峰有差异的个体会对显示器的颜色感知有歧义。Asano 等<sup>[7]</sup>对比 6 种不同基原(primary)的显示设备也发现其中窄基原的 IMAX 激光投影仪的观察者辨色差异最为显著。这表明伴随高精度广色域显示设备的研发,个体色度观察者之间的辨色差异必然会被激化,观察者同色异谱效应(observer metamerism, OM)将更为显著。

人眼视觉系统是一个动态调节机构,会对感知的亮度或颜色变化响应调节,以补偿这些变化。色适应(chromatic adaptation, CA)模拟适应场条件改变时,人眼通过调节视网膜上的 3 种视锥细胞(L/M/S-Cone)的响应灵敏度形成稳定的视觉和自动颜色平衡的现象。色适应可谓无处不在且无时不在,因为人类的生活场景都发生在一定的照明环境下,且真实的照明场景几乎时刻发生着变化。

色适应模型,又称色适应变换(chromatic adaptation transform, CAT),是在大量心理物理颜色视觉匹配实验的基础上所推导出的一系列数学模型,可用于模拟色适应变换过程中人眼自适应响应。既往关于 CAT 的研究主要集中于诸如对应色数据集(corresponding color dataset)的采集和测试<sup>[8-10]</sup>、视锥变换矩阵的推导和评价、完全色适应和不完全色适应、色适应度(D)等研究<sup>[11]</sup>。

色度描述是所有色度研究的起点,但现有的色适应模型仍基于传统的 CIE 色度系统搭建,默认使用 CIE 标准色度观察者进行色度描述和计算,忽略了实际个体色度观察者在生理上存在的色觉差异。此外,由于色适应涉及两个适应场之间的变换,相对于单一视场的简单视场更容易放大由个体差异所引起的对应色预测的色度结果偏差,因此相比于简单的单一视场,色适应中的个体差异更不应被忽视<sup>[12]</sup>。本研究将个体色度观察者模型和传统的色适应框架相结合,提出一种兼容个体色度观察者的色适应生理优化模型的运算方法。在具体的模型运算中使用个体色度观察者的视锥光谱响应函数在色适应中进行相关的色度描述和色度运算,旨在提供一种更准确量化个体色度观察者对应色预测结果的方法。

## 1 个体色度观察者模型

个体色度观察者模型<sup>[13-14]</sup>是基于 CIEPO06(CIE 2006 Physiological Observer)的拓展模型。

CIEPO06 由 CIE TC1-36 技术委员第一分部(Vision and Color, Division 1)发表于 2006 年<sup>[15]</sup>,主要

以 Stockman 等<sup>[16-19]</sup>的生理研究成果作为理论支撑,通过输入参数对观察者的晶状体和黄斑的光谱密度进行校正,从而可以输出视角范围在  $1^\circ \sim 10^\circ$  和观察者年龄范围在 20~80 岁观察者的平均颜色匹配函数。

个体色度观察者模型基于 CIEPO06 的基础算法进一步拓展了模型的输入参数,在 CIEPO06 二参模型的基础上又引入了 8 个个体色度观察者的生理参数,从而可以拟合出更加贴合个体色度观察者生理特征的视锥响应函数(*lms-CMF*),为

$$lms-CMF = (a, v, d_{lens}, d_{macula}, d_L, d_M, d_S, s_L, s_M, s_S) \quad (1)$$

式中: $a$  为观察者的年龄; $v$  为观察者的视角(度); $d_{lens}$  为与平均晶状体色素密度的相对偏差(%); $d_{macula}$  为与平均黄斑色素密度的相对偏差(%); $d_L$ 、 $d_M$ 、 $d_S$  为 LMS 视锥色素密度峰值分别对应与平均值的相对偏差(%); $s_L$ 、 $s_M$ 、 $s_S$  为 LMS 视锥的波峰偏移分别对应与平均值的相对偏差(nm)。其中 L、M、S 分别对应表示对长波、中波、短波光敏感的 3 类视锥细胞。

无论是颜色科学理论的进步,还是色度模型的革新,其底层都无法逃脱最基本的对色度的准确表征,这是一切色度计算的基础。把个体色度观察者的概念引入色适应模型,用贴合个体色度观察者自身的视锥响应函数 *lms-CMF* 取代 CIE 标准颜色匹配函数进行色适应模型中色度描述和颜色转换,将个体色度观察者模型与传统的色适应框架进行结合。

作为将个体色度观察者引入色适应模型的初步尝试,需要化繁从简,尽量减少不可控的变量因素,因此将色适应模型的框架限定在色适应变化的基础核心 von Kries 变换,且将色适应的范畴限定在简单适应场的完全色适应( $D = 1$ )。

## 2 个体色度观察者的颜色匹配函数和三刺激值的计算

### 2.1 个体色度观察者的颜色匹配函数

传统色适应模型在来源端适应场所输入的色度值是基于 CIE 标准色度系统的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三刺激值。其具体数值表征 CIE 标准观察者匹配目标参考色所产生颜色感觉的光能量所需要使用的三原色光的数量。将个体色度观察者的概念引入色适应模型,通过个体色度观察者模型根据预设参数输出,得到的是个体色度观察者视觉生理特性的视锥响应函数(*lms-*

CMF)。对函数进行归一化后, 所表征的含义是个体色度观察者的 L/M/S 这 3 种类型的视锥细胞在可见光谱波段的光谱响应灵敏度的分布, 是不能直接带入现有的色适应模型输入计算的。这就需要构建起个体色度观察者和标准色度观察者之间的对应关系, 从而进一步用个体色度观察者代替标准观察者匹配来

源端参考色。基于不同原色的色度系统可以建立一种线性转换关系, 如 CIE 1931 RGB 色度系统的基于颜色匹配实验的实验原色 RGB, 以及 CIE 1931 XYZ 色度系统为了避免产生负值所采用的假想原色 XYZ 与 LMS 视锥基原之间的线性变换如图 1 所示。

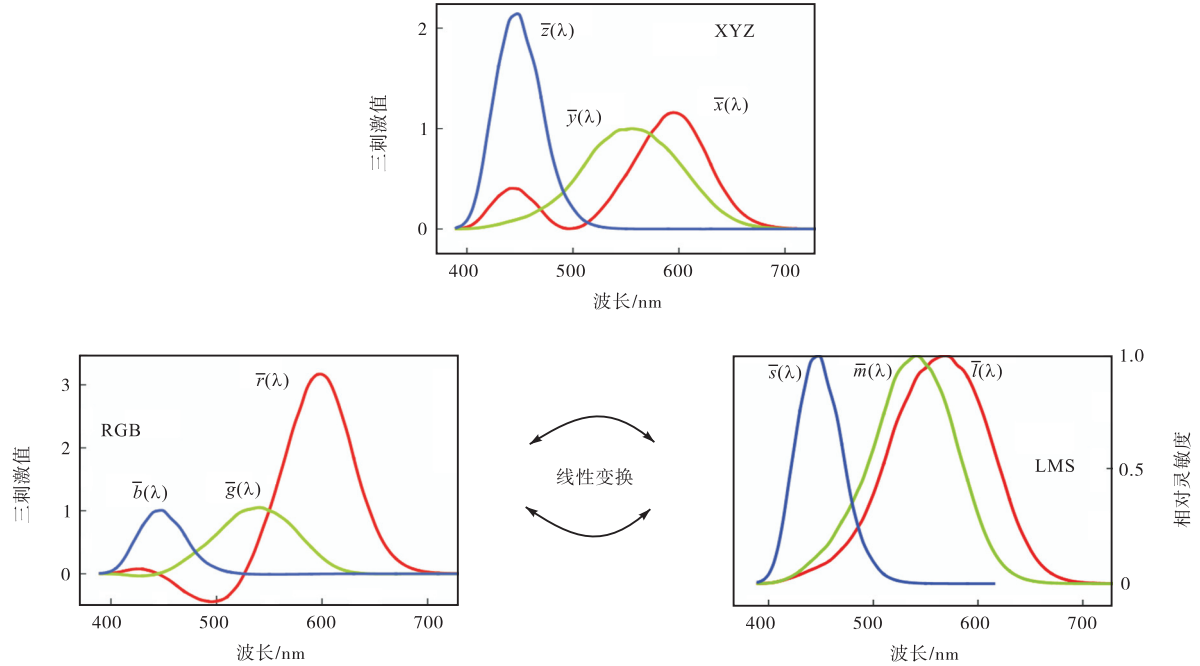


图 1 不同原色的函数之间的线性变换关系

Fig. 1 Linear transformation relationship between functions of different primary colors

个体色度观察者的视锥匹配函数与 CIE 标准颜色匹配函数之间的线性转换矩阵  $T$ , 为

$$\begin{bmatrix} x_{390} & y_{390} & z_{390} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{780} & y_{780} & z_{780} \end{bmatrix}_{\text{CIE}} = \begin{bmatrix} l_{390} & m_{390} & s_{390} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{780} & m_{780} & s_{780} \end{bmatrix}_{\text{indiv}} \cdot \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix}_{\text{transform}} \quad (2)$$

根据具体的视场 ( $f_s$ ) 大小, 选择 CIE 标准颜色匹配函数: 对于  $1^\circ \leq f_s \leq 4^\circ$  的小视角, 基于 CIE 1931 标准色度观察者进行线性变换; 对于  $f_s > 4^\circ$  的大视角基于 CIE 1964 标准色度观察者进行线性变换。

对等式进行变换, 可将变换矩阵  $T$  表示为

$$T = (\overline{lms}^T \cdot \overline{lms})^{-1} \overline{lms}^T \overline{xyz}_{\text{CIE}} \quad (3)$$

式中:  $\overline{lms}$  是个体色度观察者的视锥响应函数,  $\overline{xyz}_{\text{CIE}}$  是 CIE 标准色度观察者颜色匹配函数。个体

色度观察者的颜色匹配函数可以表示为

$$\overline{xyz}_{\text{indiv}} = \overline{lms} \cdot T \quad (4)$$

## 2.2 个体色度观察者三刺激值

当已知物体的光谱反射率函数, 并确定视场所在的光源, 基于观察者颜色匹配函数, 就可以计算出该物体色的三刺激值。对于个体色度观察者, 将 CIE 标准色度观察者的颜色匹配函数替换为  $\overline{xyz}_{\text{indiv}}$ , 可以计算得到个体色度观察者的三刺激值。对应色模型来源端待匹配参考色的个体色度观察者三刺激值, 可以用以下公式进行计算。

$$\begin{cases} X_{\text{indiv}} = k_1 \sum_{\lambda} S_{\lambda 1} R_{\lambda} \overline{x}_{\lambda \text{indiv}} \Delta \lambda \\ Y_{\text{indiv}} = k_1 \sum_{\lambda} S_{\lambda 1} R_{\lambda} \overline{y}_{\lambda \text{indiv}} \Delta \lambda \\ Z_{\text{indiv}} = k_1 \sum_{\lambda} S_{\lambda 1} R_{\lambda} \overline{z}_{\lambda \text{indiv}} \Delta \lambda \end{cases} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{100}{\sum_{\lambda} S_{\lambda 1} \overline{y}_{\lambda \text{indiv}} \Delta \lambda} \quad (6)$$

式中： $S_{\lambda 1}$ 为来源端视场中光源的相对光谱功率分布； $R_{\lambda}$ 为待匹配参考色表中各参考色的光谱反射率； $\overline{xyz}_{\lambda\text{-indiv}}$ 为个体色度观察者的颜色匹配函数； $k_1$ 为对Y通道进行归一化的归一化系数。

### 3 个体色度观察者的色适应计算

#### 3.1 个体色度观察者的视锥变换

依据色适应变换的模型框架，首先要将来源端视场条件下待匹配的个体色度观察者三刺激值利用视锥变换矩阵  $M$  转换到视锥响应空间(LMS-cone space)，求得视锥变换后的个体色度观察者来源端的视锥响应值  $RGB_{\text{indiv}1}$ 。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}1} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{indiv}1} \quad (7)$$

#### 3.2 个体色度观察者的白点适应

对于个体色度观察者，每个观察者在进行白点适应后，所得到的白点视锥响应值均不同。这是因为在计算个体色度观察者的白点视锥响应时，必须代入相应各个体色度观察者的视锥响应函数进行计算。

##### 3.2.1 计算个体色度观察者的白点三刺激值

首先基于个体色度观察者分别求出来源端视场和目标端视场的白点三刺激值。

来源端个体色度观察者的白点三刺激值为

$$\begin{cases} X_{\text{indiv-w}1} = k_1 \sum_{\lambda} S_{\lambda 1} \bar{x}_{\lambda\text{-indiv}} \Delta\lambda \\ Y_{\text{indiv-w}1} = k_1 \sum_{\lambda} S_{\lambda 1} \bar{y}_{\lambda\text{-indiv}} \Delta\lambda \\ Z_{\text{indiv-w}1} = k_1 \sum_{\lambda} S_{\lambda 1} \bar{z}_{\lambda\text{-indiv}} \Delta\lambda \end{cases} \quad (8)$$

目标端个体色度观察者的白点三刺激值为

$$\begin{cases} X_{\text{indiv-w}2} = k_2 \sum_{\lambda} S_{\lambda 2} \bar{x}_{\lambda\text{-indiv}} \Delta\lambda \\ Y_{\text{indiv-w}2} = k_2 \sum_{\lambda} S_{\lambda 2} \bar{y}_{\lambda\text{-indiv}} \Delta\lambda \\ Z_{\text{indiv-w}2} = k_2 \sum_{\lambda} S_{\lambda 2} \bar{z}_{\lambda\text{-indiv}} \Delta\lambda \end{cases} \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{100}{\sum_{\lambda} S_{\lambda 2} \bar{y}_{\lambda\text{-indiv}} \Delta\lambda} \quad (10)$$

式中： $S_{\lambda 2}$ 为目标端视场(target field)中光源的相对光谱功率分布； $k_2$ 为对目标端白场的Y值进行归一化的归一化系数。

##### 3.2.2 计算个体色度观察者的白点视锥响应

将计算得到的两组视场下的白点三刺激值，利用同样的视锥变换矩阵  $M$  分别变换到视锥相应空间，计算公式为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}1\text{-w}1} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{indiv}1\text{-w}1} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}1\text{-w}2} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{indiv}1\text{-w}2} \quad (12)$$

#### 3.3 个体色度观察者的对应色预测

来源端视场和目标端适应后的视锥响应为

$$\begin{bmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} 1/R_{\text{indiv-w}1} & 0 & 0 \\ 0 & 1/G_{\text{indiv-w}1} & 0 \\ 0 & 0 & 1/B_{\text{indiv-w}1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}1} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} 1/R_{\text{indiv-w}2} & 0 & 0 \\ 0 & 1/G_{\text{indiv-w}2} & 0 \\ 0 & 0 & 1/B_{\text{indiv-w}2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}2} \quad (14)$$

当适应场变换时，LMS 视锥细胞通过 3 个通道相互独立的增益调节要维持两个适应场下的色貌保持稳定，为

$$\begin{bmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{bmatrix}_2 \quad (15)$$

通过等式变换，就可以得到目标视场下的视锥响应  $RGB_{\text{indiv}2}$ ，为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}2} = \begin{bmatrix} \frac{R_{\text{indiv-w}2}}{R_{\text{indiv-w}1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{\text{indiv-w}2}}{G_{\text{indiv-w}1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{\text{indiv-w}2}}{B_{\text{indiv-w}1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}1} \quad (16)$$

视锥变换矩阵的逆矩阵通过逆运算就可以计算得到与来源端视场输入待匹配的个体色度观察者三刺激值互为目标端视场下互为目标色度的个体色度观察者三刺激值。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{indiv}2} = M^{-1} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{indiv}2} \quad (17)$$

## 4 结 论

本文突破了传统色适应模型使用标准色度观察者来平均量化个体观察者而忽略个体之间生理视觉差异的缺点,在个体色度观察者模型中引入个体色度观察者概念,在传统色适应模型的框架上,使用个体色度观察者实际的视锥光谱响应函数进行色适应中相关的色度描述和色度变换,从而可以得到贴合实际个体观察者生理视觉特性且更加准确的个体观察者色适应变换结果。

(1)理论层面:本文关于个体色度观察者色适应生理优化模型的研究是一次关于将颜色视觉的生理研究成果与色度模型进行结合的实践探讨。在本文研究的基础上,未来可以更加广泛地将视觉生理等交叉学科的理论研究成果与色度模型相结合,在深层次生理理论成果的支撑下,色度模型在精度优化方面才能有真正意义的提升空间。

(2)应用层面:可以从个性化、定制化的角度出发,为未来工业、医疗等领域提供高层次符合特定用户需求的人性化设计提供理论落脚点。例如在适老性研究中订制匹配老年人视觉特性的定制化产品,以及某些疾病发展与视觉生理变化相关联,可为特定医疗简单快捷且免除生理伤害的诊断方式提供切入点。

### 参考文献:

- [1] 陈倩雯. 基于观察者同色异谱的色适应变换研究[D]. 天津:天津科技大学,2021.
- [2] GUERRY E, CELINE C, BECHERAS E, et al. Influence of chromatic and lighting on the visual environment of the elderly: a critical literature review[J]. *Color research & application*, 2021, 46(1): 117–124.
- [3] LI J Y, HANSELEAR P, SMET K A G. Impact of color-matching primaries on observer matching: part I accuracy[J]. *The journal of the illuminating engineering society of north America*, 2022, 18(2): 104–126.
- [4] LI J Y, HANSELEAR P, SMET K A G. Impact of color matching primaries on observer matching: part II observer variability[J]. *The journal of the illuminating engineering society of north America*, 2022, 18(2): 127–144.
- [5] LONG D L, FAIRCHILD M D. Observer metamerism Models and multiprimary display systems[J]. *SMPTE Motion imaging journal*, 2016, 125(3): 18–29.
- [6] SARKAR A, BLONDE L, LE CALLET P, et al. Study of observer variability in modern display colorimetry: an analysis of CIE 2006 model[C]// *The 11th Congress of the International Colour Association*, Sydney, Australia: [s. n.], 2019.
- [7] ASANO Y, FAIRCHILD M D, BLONDÉ L, et al. Color matching experiment for highlighting interobserver variability[J]. *Color research & application*, 2016, 41(5): 530–539.
- [8] CAI S Y, SUN Y, SUN R X, et al. A method to prepare reference colors for chromatic adaptation experiments [J]. *Color research and application*, 2022, 47(4): 892–899.
- [9] CAI S Y, FAIRCHILD M D. Individual corresponding colors data and chromatic adaptation transforms[C]// *CIC 2016 24th Color and Imaging Conference*. San Diego: Society for Imaging Science & Technology, 2016: 248–253.
- [10] CAI S Y, CHEN Q W, WANG H F. A new method to evaluate a corresponding colors dataset based on its two derived transforms[J]. *Color research & application*, 2016, 42(2): 150–155.
- [11] LI Y Q, CHEN S, WEI M C, et al. Consideration of degree of chromatic adaptation for reproducing illuminated scenes[J]. *Color research & application*, 2022, 47(3): 605–614.
- [12] SMET K A G, WEBSTER M A, Whitehead L A. Color appearance model incorporating contrast adaptation: implications for individual differences in color vision[J]. *Color research & application*, 2021, 46(4): 759–773.
- [13] ASANO Y, FAIRCHILD M D, BLONDE L. Individual colorimetric observer model[J]. *PLOS ONE*, 2016, 11(2): e0145671.
- [14] ASANO Y, FAIRCHILD M D. Categorical observers for metamerism[J]. *Color research & application*, 2020, 45(4): 576–585.
- [15] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes [M]. Vienna: CIE, 2006.
- [16] STOCKMAN A, SHARPE L T, FACH C. The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cones derived from thresholds and color matches[J]. *Vision research*, 1999, 39(17): 2901–2927.
- [17] STOCLMAN A, SHARPE L T. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype[J]. *Vision research*, 2000, 40(13): 1711–1737.
- [18] STOCLMAN A. Cone fundamentals and CIE standards [J]. *Current opinion in behavioral sciences*, 2019, 30:

87-93.

- [19] STOCLMAN A. CIE Physiologically based color matching functions and chromaticity diagrams[J/OL].

Encyclopedia of color science and technology, 2015: 165-173. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8071-7\\_326](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8071-7_326).

责任编辑: 郎婧

(上接第19页)

11: 868-870.

- [19] 邢明威, 邓洪刚, 高美荣, 等. 不同产地卤虫幼体对凡纳滨对虾仔虾生长、肌肉组分和抗胁迫能力的影响[J]. 中国水产科学, 2022, 29(1): 70-78.

- [20] HAN X K, ZHENG Y Y, DAI C L, et al. Effect of polystyrene microplastics and temperature on growth, intestinal histology and immune responses of brine shrimp *Artemia franciscana*[J]. Journal of oceanology and limnology, 2021, 39(3): 979-988.

- [21] 刘晓翠, 邓洪刚, 于学权, 等. 不同产地卤虫幼体对云石斑鱼幼苗生长和抗胁迫能力的影响[J]. 天津科技大学学报, 2022, 37(2): 18-23.

- [22] QIN T, ZHAO X X, LUAN H, et al. Identification, expression pattern and functional characterization of As-MyD88 in bacteria challenge and during different developmental stages of *Anemia sinica*[J]. Developmental and comparative immunology, 2015, 50(1): 9-18.

- [23] DELORENZO M E, KEY P B, CHUNG K W, et al. Comparative toxicity of pyrethroid insecticides to two estuarine crustacean species, *Americamysis bahia* and *Palaemonetes pugio*[J]. Environmental toxicology, 2014, 29(10): 1099-1106.

- [24] ALISHAHI M, DEZFULY Z T. Comparative toxicities of five herbicides on nauplii of *Artemia franciscana* as an ecotoxicity bioindicator[J]. Iranian journal of fisheries sciences, 2019, 18(4): 716-726.

- [25] HALLIWELL B. Free radicals and antioxidants: updating a personal view[J]. Nutrition reviews, 2012, 70(5): 257-265.

- [26] VICIANO E, MONROIG O, BARATA C, et al. Antioxidant activity and lipid peroxidation in *Artemia nauplii* enriched with DHA-rich oil emulsion and the effect of adding an external antioxidant based on hydroxytyrosol[J]. Aquaculture research, 2017, 48(3): 1006-1019.

- [27] 邓钦有. 皱纹盘鲍稚鲍、幼鲍对海水酸化与溴氰菊酯复合暴露的响应[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.

- [28] ELIA A C, GIORDA F, PACINI N, et al. Subacute toxicity effects of deltamethrin on oxidative stress markers in rainbow trout[J]. Journal of aquatic animal health, 2017, 29(3): 165-172.

- [29] AL-NUMAIR K S, CHANDRAMOHAN G, VEERAMANI C, et al. Ameliorative effect of kaempferol, a flavonoid, on oxidative stress in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Redox report, 2015, 20(5): 198-209.

- [30] WANG M C, BOHMANN D, JASPER H. JNK signaling confers tolerance to oxidative stress and extends lifespan in *Drosophila*[J]. Developmental cell, 2003, 5(5): 811-816.

- [31] LI M, WU X Q, ZOU J X, et al. Dietary alpha-lipoic acid alleviates deltamethrin-induced immunosuppression and oxidative stress in northern snakehead (*Channa argus*) via Nrf2/NF-kappa B signaling pathway[J]. Fish & shellfish immunology, 2022, 127: 228-237.

- [32] ZHANG W W, FENG C, JIANG H. Novel target for treating Alzheimer's Diseases: crosstalk between the Nrf2 pathway and autophagy[J]. Ageing research review, 2021, 65: 453-456.

责任编辑: 郎婧