

基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法

孙叶维¹, 孔玲君^{1,2}, 刘真¹

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了同时实现较高的光谱精度和色度精度, 提出一种基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法。 **方法** 利用Matlab软件自制由7986个色块组成的色靶, 将前5986个色块作为训练样本, 后2000个色块以及Munsell色卡作为测试样本。采集色靶的光谱数据后, 对高维光谱数据采用基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法进行降维, 并与主成分分析法、LabPQR非线性降维法、WSPCAplus非线性降维法、修改矩阵 R 降维法等方法的效果进行对比分析。 **结果** 实验结果表明, 提出的基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法重构得到的光谱数据具有较高的光谱精度, 同时在色度精度上也有了明显的提高, 且在观察视角变化的情况下仍具有稳定的色差精度。 **结论** 基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法能够在保证较好光谱精度的同时具有较高的色差精度, 且在不同视角下色差精度的稳定性较好, 适合多种颜色样本, 具有良好的实用性。

关键词: 光谱降维; 修改的LMS曲线; 加权残差补偿

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)09-0114-06

Residual Compensation of Weighted Spectral Dimension Reduction Method Based on Modified LMS

SUN Ye-wei¹, KONG Ling-jun^{1,2}, LIU Zhen¹

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: In order to achieve higher spectral accuracy and chromaticity accuracy, a residual compensation of weighted spectral dimension reduction method based on modified LMS was proposed in this paper. A homemade color test target composed of 7986 color patches was produced using Matlab. The first 5986 color patches were used as the training samples, while the other 2000 color patches and Munsell color swatches were used as the test samples. The spectral data of the training samples were measured and then the high dimensional spectral data's dimensionality was reduced by the residual compensation of weighted spectral dimension reduction method based on modified LMS, and the dimensionality reduction effect was compared with those of the principal component analysis, LabPQR nonlinear dimension reduction method, WSPCAplus nonlinear dimension reduction method and modified matrix R dimensionality reduction method. Experimental results showed that the reconstruction spectral data through the residual compensation of weighted spectral dimension reduction method based on Modified LMS had higher spectral accuracy and chromaticity accuracy, and it still had a stable color accuracy in the case of different observation view angles. In conclusion, this paper proposed a residual compensation of weighted spectral dimension reduction method based on modified LMS, the spectral data reduced by this method had a good spectral accuracy and chromaticity, as well as a good practicability.

KEY WORDS: spectral dimension reduction; modified LMS curve; weighted residual compensation

收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 上海理工大学科技发展项目

作者简介: 孙叶维(1992—), 女, 上海人, 上海理工大学研究生, 主攻图文信息处理与色彩再现。

通讯作者: 孔玲君(1972—), 女, 浙江人, 博士, 上海出版高等专科学校副教授, 主要研究方向为图文信息处理与色彩再现、数字印刷及质量评价等。

为了实现“同色同谱”的颜色再现控制,光谱复制成为了颜色科学研究的热点。要实现光谱颜色复制,首先要获得物体或场景的光谱数据。由于可见光谱的范围在380~780 nm之间,在按一定间隔(如10 nm)对光谱反射率进行采样时,得到光谱数据的维数一般都在31~40之间,这样高维数的图像在颜色复制再现时,计算复杂度高,运算时间长且占用存储空间大。对获得的多光谱数据进行降维是光谱颜色复制的关键技术之一。

目前最典型的多光谱降维方法有主成分分析法(PCA)^[1]、LabPQR非线性降维法^[2]和WSPCAplus非线性降维法^[3-4]等。但这些降维方法不能保证其重构得到的高维光谱数据具有高光谱精度和色差精度,因此,为了得到更好的降维效果,许多研究人员在这方面展开了更深入的研究,近几年来出现了多种新的光谱降维法。何颂华^[5-6]于2014年提出基于修改矩阵 $\mathbf{R}$ 的光谱降维法,将物体的光谱反射率分解成基本光谱与同色异谱两部分,然后分别对这两部分采用不同的线性降维法降维,以此提高色差精度。于海琦等人^[7]于2015年提出基于LMS加权的残差补偿光谱降维模型,将LMS锥响应光谱敏感曲线作为加权函数,对源光谱进行加权,然后对加权光谱采用PCA降维,同时对降维过程中产生的残差光谱部分也采用PCA进行降维,该方法获得了较好的光谱精度以及良好的色差精度。

这里基于文献[7]的方法,采用不同的转换矩阵将三刺激值转换到LMS视锥响应值,同时在计算LMS加权函数上添加了调整权值,使得降维后的光谱精度更具灵活性,且又进一步提高了色差精度。通过不同的测试样本发现,该方法具有一定的实用性,且在变换观察角度后仍有较高且稳定的色差精度。

1 原理与方法

设某一颜色的源光谱为 $\mathbf{R}$,维数为 N ,对其进行人眼视觉函数加权,得到加权光谱 $\mathbf{R}_w$,其表达式如下^[7]:

$$\mathbf{R}_w = \mathbf{w}\mathbf{R} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{w}$ 表示加权矩阵。 $\mathbf{w}$ 矩阵是LMS加权函数 $W(\lambda)$ 转换的对角矩阵。

这里选用的LMS加权函数在传统LMS加权函数^[7]上添加了调整权值,可以根据不同类型的光谱数据进行调整,其表达式如下:

$$W(\lambda) = \frac{[L(\lambda) + M(\lambda) + S(\lambda)] + 1}{\max[k(L(\lambda) + M(\lambda) + S(\lambda)) + 1]} \quad (2)$$

式中: $L(\lambda)$, $M(\lambda)$, $S(\lambda)$ 代表经过归一化的LMS视锥响应灵敏度曲线(经Vos和Walraven修正的), $\max$ 表示求归一化后的 $L(\lambda)$, $M(\lambda)$, $S(\lambda)$ 和的最大值, k 值为调整权值,一般在1~10。LMS视锥响应灵敏度曲线计算方式选用如下形式:

$$\begin{bmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(\lambda) \\ Y(\lambda) \\ Z(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$ 表示标准观察者三刺激值,变换矩阵是由传统的Von Kries变换矩阵变为布拉德福德变换矩阵(MBFD)。

对得到的加权光谱进行USV分解(奇异值分解),分解式如下:

$$\mathbf{R}_w = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为的特征向量, $\mathbf{U}=[U_1, U_2, U_3, \dots, U_n]$ 。取前 M 个值作为主成分 $\mathbf{U}_M$,则降维后的低维光谱表达式为^[7]:

$$\mathbf{G}_M = (\mathbf{U}_M^T, \mathbf{U}_M)^{-1} \mathbf{U}_M^T \mathbf{R}_w \quad (5)$$

计算得到重构加权光谱 $\hat{\mathbf{R}}_w$:

$$\hat{\mathbf{R}}_w = \mathbf{U}_M \cdot \mathbf{G}_M \quad (6)$$

计算得到重构光谱 $\hat{\mathbf{R}}_c$ 后,再获得残差光谱 $\mathbf{R}_{\text{lost}}$:

$$\hat{\mathbf{R}}_c = (\mathbf{w}^T \mathbf{w})^{-1} \mathbf{w}^T \cdot \hat{\mathbf{R}}_w \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{\text{lost}} = \mathbf{R} - \hat{\mathbf{R}}_c \quad (8)$$

为补偿残差光谱的误差,最后对残差光谱进行PCA降维,得到 $\mathbf{R}_{\text{lost}}$ 的最佳近似 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{lost}}$,用 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{lost}}$ 补偿式(7)的重构光谱 $\hat{\mathbf{R}}_c$,得到最终的重构光谱反射率,其表达式如下:

$$\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{R}}_c + \hat{\mathbf{R}}_{\text{lost}} \quad (9)$$

2 实验

首先采用Matlab软件自制色靶,色靶由RGBCMYK共7个通道组成,将7个通道分成6种组合,分别为BCK,CGK,GYK,MBK,RMK和YRK。在每种组合中,只有3个通道颜色的网点面积率取值为0~100,间隔为10,其余4个通道的颜色值全部为0。按照此规律,每种组合包含了1331套颜色值,一共得到7986套颜色值,对应着7986个颜色块。然后编写程

序,依据 7986 套颜色值制作色靶,以此作为实验对象。

输出设备选用 HP Design Z3200 多通道打印机,通过 EFI 软件对每个通道进行线性化后,打印自制的色靶,最终利用 Eyeone-io 测色仪器与 Measuretool 软件的点测功能,采集色靶的光谱数据,光谱反射率均在 400~700 nm 内,间隔 10 nm 采样,最终得到 31 维的高维光谱数据。

对采集到的高维光谱数据采用文中提出的基于 LMS 修改曲线的加权残差补偿光谱降维法进行降维。实验中,光源设定为 D50,采用制作色靶的前 5986 个色块作为光谱降维模型的训练样本,后 2000 个色块以及由 1269 个色块组成的 Munsell 色卡作为测试样本来验证算法的有效性。其中,前 5986 个色块的颜色组合包括 BCK,CGK,GYK,MBK 和 RMK,后 2000 个色块的颜色组合包括 RMK 和 YRK。

同时对相同的训练样本和测试样本,用 PCA, WSPCA, LabPQR 和修改矩阵 $\mathbf{R}$ 以及文献[7]提出的降维方法也进行了实验,并利用 CIE ΔE_{2000} 色差公式^[8]、均方根误差(RMSE)和适合度系数(GFC)这 3 个指标评价对不同降维方法的精度及其有效性作了对比分析。其中均方根误差和适合度系数的计算如下:

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{(\mathbf{R}-\hat{\mathbf{R}})^{\text{T}}(\mathbf{R}-\hat{\mathbf{R}})}{N-1}}$$

(10)

表 1 不同数量的主成分下重构后前 5986 个色块的光谱精度

Tab.1 The spectral accuracy of former 5986 color patches reconstructed by using different amounts of principle components

维 数	PCA		WSPCA		修改矩阵 $\mathbf{R}$		文献[7]方法		修改 LMS 加权	
	$\overline{E_R}$	$E_{R\max}$	$\overline{E_R}$	$E_{R\max}$	$\overline{E_R}$	$E_{R\max}$	$\overline{E_R}$	$E_{R\max}$	$\overline{E_R}$	$E_{R\max}$
4	0.0110	0.0775	0.0120	0.0855	0.0271	0.1450	0.0112	0.0784	0.0110	0.0792
5	0.0051	0.0440	0.0045	0.0445	0.0152	0.1075	0.0053	0.0446	0.0052	0.0440
6	0.0032	0.0378	0.0030	0.0289	0.0082	0.0557	0.0034	0.0393	0.0031	0.0387
7	0.0024	0.0217	0.0026	0.0242	0.0042	0.0259	0.0025	0.0230	0.0022	0.0224
8	0.0018	0.0144	0.0018	0.0145	0.0031	0.0257	0.0018	0.0144	0.0014	0.0144
9	0.0014	0.0136	0.0014	0.0135	0.0020	0.0177	0.0014	0.0135	0.0011	0.0135

在 0.003~0.01 左右,光谱精度较高。其中 PCA, WSPCA 以及文献[7]的方法得到的平均光谱精度比起 LabPQR 和修改矩阵 $\mathbf{R}$ 降维法得到的光谱精度要高些,均在 0.0014~0.012 之间。而文中的修改 LMS 加权残差补偿法得到的平均光谱精度在 0.0011~0.011 之间,其光谱精度更佳。

对测试样本,即后 2000 个色块和 Munsell 色卡降维后发现,2 种测试样本的降维效果基本一致,因此选择颜色包含较完整的 Munsell 色卡作为降维效果的分析对象。6 种光谱降维方法在不同数量的主成分下对 Munsell 色卡的重构光谱精度的评价结果见表 2 和表

$$\text{GFC}=\frac{\sum_{\lambda=400}^{700}\hat{\mathbf{R}}\cdot\mathbf{R}}{[\sum_{\lambda=400}^{700}\hat{\mathbf{R}}^2]^{1/2}[\sum_{\lambda=400}^{700}\mathbf{R}^2]^{1/2}}$$

(11)

式中: $\mathbf{R}$ 为源光谱数据, $\hat{\mathbf{R}}$ 为重构光谱数据。

3 结果与分析

3.1 实验结果对比

运用 PCA^[9-15], WSPCA^[9-12], LabPQR^[9-12] (只降到 6 维),修改矩阵 $\mathbf{R}$,文献[7]以及文中提出的基于 LMS 修改曲线的加权残差补偿法分别对训练样本(前 5986 个色块)以及测试样本(后 2000 个测试样本色块和 Munsell 色卡)进行光谱降维。其中 5 种光谱降维方法(PCA, WSPCA, 修改矩阵 $\mathbf{R}$ 、文献[7]以及文中提出的基于 LMS 修改曲线的加权残差补偿法)在不同数量的主成分下对训练样本,即前 5986 个色块的重构光谱精度的评价结果见表 1, $\overline{E_R}$ 为均方根误差的平均值, $E_{R\max}$ 为均方根误差的最大值。第 6 种 LabPQR 降维法得到的均方根误差的平均值为 0.0033,均方根误差的最大值为 0.0292。

由表 1 可知,6 种方法得到的平均光谱精度都控制

3,表 2 为均方根误差,表 3 为适合度系数,其中 $\overline{E_R}$ 为均方根误差的平均值, $E_{R\max}$ 为均方根误差的最大值, GFC_a 为适合度系数的平均值, GFC_s 为适合度系数的最大值。第 6 种 LabPQR 降维法得到的均方根误差的平均值为 0.0080,均方根误差的最大值为 0.0524,适合度系数的平均值为 0.9996,适合度系数的最大值为 0.9999。

由表 2 的数据发现,对于 Munsell 色卡来说,PCA, WSPCA, 文献[7]的方法以及文中的修改 LMS 加权残差补偿法得到的光谱精度较好,适合度系数也高,4 种方法均在 7 个主成分时平均光谱精度收敛于 0.005 左右。其中,PCA 和文中方法得到的光谱精度比其他 2

表2 不同数量的主成分下重构后Munsell色卡的光谱精度

Tab.2 The spectral accuracy of munsell color cards reconstructed by using different amounts of principle components

维 数	PCA		WSPCA		修改矩阵 $\mathbf{R}$		文献[7]方法		修改LMS加权	
	$\overline{E_R}$	E_{Rmax}	$\overline{E_R}$	E_{Rmax}	$\overline{E_R}$	E_{Rmax}	$\overline{E_R}$	E_{Rmax}	$\overline{E_R}$	E_{Rmax}
4	0.0137	0.0752	0.0159	0.0705	0.0363	0.1324	0.0226	0.0740	0.0156	0.0740
5	0.0101	0.0554	0.0107	0.0555	0.0167	0.0622	0.0103	0.0562	0.0102	0.0409
6	0.0083	0.0376	0.0082	0.0498	0.0094	0.0548	0.0082	0.0438	0.0082	0.0428
7	0.0057	0.0302	0.0059	0.0335	0.0072	0.0467	0.0059	0.0308	0.0057	0.0305
8	0.0044	0.0302	0.0046	0.0301	0.0053	0.0466	0.0054	0.0309	0.0045	0.0308
9	0.0033	0.0147	0.0034	0.0152	0.0042	0.0203	0.0043	0.0149	0.0033	0.0148

表3 不同数量的主成分下重构后Munsell色卡的适合度系数

Tab.3 The GFC of munsell color cards reconstructed by using different amounts of principle components

维 数	PCA		WSPCA		修改矩阵 $\mathbf{R}$		文献[7]方法		修改LMS加权	
	GFC _e	GFC _a	GFC _e	GFC _a	GFC _e	GFC _a	GFC _e	GFC _a	GFC _e	GFC _a
4	0.9986	0.9998	0.9981	0.9999	0.9898	0.9991	0.9983	0.9996	0.9984	0.9996
5	0.9992	0.9999	0.9991	0.9999	0.9979	0.9999	0.9991	0.9999	0.9992	0.9999
6	0.9995	0.9999	0.9995	1.0000	0.9994	0.9999	0.9994	0.9999	0.9995	0.9999
7	0.9998	1.0000	0.9998	1.0000	0.9996	1.0000	0.9998	1.0000	0.9998	1.0000
8	0.9999	1.0000	0.9998	1.0000	0.9998	1.0000	0.9999	1.0000	0.9999	1.0000
9	0.9999	1.0000	0.9999	1.0000	0.9999	1.0000	0.9999	1.0000	0.9999	1.0000

种方法重构后的平均光谱误差收敛更快,说明对于Munsell色卡样本,这2种方法能用较少的主成分重构得到较高的光谱精度。

为了解由6种降维结果重构得到的光谱与实际色度值之间的差异,给出了在不同数量的主成分下重构后Munsell色卡的色差,见表4,其中 ΔE_{00e} 为色差的平

均值, ΔE_{00a} 为色差的最大值,第6种LabPQR降维法得到的色差平均值为0.0026,色差最大值为0.0108。

由表4数据可知,由文献[7]方法和文中的修改LMS加权残差补偿法重构后的色块色差小于PCA和WSPCA重构得到的色块色差,LabPQR降维法和修改矩阵 $\mathbf{R}$ 得到的色差虽然小,但由表2可知,LabPQR降

表4 不同数量的主成分下重构后Munsell色卡的色差精度

Tab.4 The chromaticity accuracy of munsell color cards reconstructed by using different amounts of principle components

维 数	PCA		WSPCA		修改矩阵 $\mathbf{R}$		文献[7]方法		修改LMS加权	
	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}
4	1.2683	10.2475	0.7422	9.3489	0.0037	0.028	0.5455	7.3465	0.4868	7.5373
5	0.5271	2.9817	0.4967	8.4333	0.0036	0.034	0.4089	3.6570	0.3928	3.8727
6	0.4218	6.7910	0.4672	8.2973	0.0035	0.025	0.3059	5.2150	0.3010	5.2750
7	0.1660	2.4694	0.3093	6.4079	0.0026	0.022	0.1588	2.1232	0.1503	2.0208
8	0.1055	2.4484	0.1016	1.2793	0.0017	0.030	0.0536	0.6993	0.0511	0.6230
9	0.0787	0.9791	0.0898	1.5999	0.0010	0.021	0.0405	0.4236	0.0356	0.3989

维法和修改 $\mathbf{R}$ 矩阵重构色块得到的光谱精度低于文献[7]方法和文中方法重构色块得到的光谱精度。综合光谱精度和色差精度的结果,文献[7]方法和文中的LMS修改加权残差补偿法的降维效果较好。对比表2和表4最后2列数据发现,文献[7]方法重构得到的平

均色差在0.0405~0.5455之间,平均光谱误差在0.0043~0.0226之间,而采用文中方法重构得到的平均色差在0.0356~0.4868之间,平均光谱误差在0.0033~0.0156之间,这说明文中提出的基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法在保证光谱精度

和色差精度上的效果更佳。

角和10° 视角下重构得到的色差精度见表5,可知,在不同视角下,修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法得到的重构光谱具有较好的色差稳定性,即使观察视角发生改变,色差变化也不大,适用性好。

3.2 色差精度稳定性检验

后2000个测试样本色块和Munsell色卡在2° 视

表5 2° 视角和10° 视角下重构得到的色差精度

Tab.5 The chromaticity accuracy under the different observation view angle

维数	WSPCA				修改矩阵R			
	后2000色		后2000色		后2000色		后2000色	
	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}	ΔE_{00e}	ΔE_{00a}
4	0.7470	2.4913	0.7065	2.4463	0.4868	7.2172	0.5033	7.2399
5	0.6024	3.4689	0.5719	3.5278	0.3928	3.8727	0.3879	3.4056
6	0.2261	3.4079	0.2595	4.0339	0.3010	5.2750	0.3004	5.1001
7	0.0873	0.9183	0.0784	0.6920	0.1503	2.0208	0.1461	1.7035
8	0.0345	0.1757	0.0402	0.1770	0.0511	0.6230	0.0502	0.5291
9	0.0205	0.2383	0.0219	0.2507	0.0356	0.3989	0.0364	0.3925

4 结语

这里用7通道颜色模型自制色靶,将其中前5986个色块作为训练样本,后2000个色块和Munsell色卡作为测试样本。采用主成分分析法、LabPQR非线性降维法、WSPCAplus非线性降维法、修改矩阵R降维法、文献[7]方法以及基于LMS加权的残差补偿光谱降维法对高维光谱数据进行降维,并利用色差、均方根误差以及适合度系数对重建得到的光谱数据的光谱精度和色差精度进行检验。结果表明,采用文中提出的基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降维法重建得到的光谱数据能保证较高的光谱精度,同时也拥有较好的色差精度。

参考文献:

[1] 何颂华. 面向颜色复制的光谱降维模型研究[D]. 南京:南京林业大学,2013.

HE Song-hua. The Research of Spectral Dimension Reduction Models for Color Reproduction[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.

[2] DERHAK W M, ROSEN R M. Spectral Colorimetry Using LabPQR an Interim Connection Space[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2006, 50(1): 53—63.

[3] 王莹. 多光谱图像色彩再现关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.

WANG Ying. A Study of Key Techniques in Multispectral Image Color Reproduction[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[4] 王莹,王忠民,王义峰,等. 面向色彩再现的多光谱图像非

线性降维方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1172—1178.

WANG Ying, WANG Zhong-min, WANG Yi-feng, et al. Nonlinear Dimensionality Reduction of Multi-spectral[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1172—1178.

[5] 何颂华,刘真,陈桥. 基于矩阵R理论的光谱降维方法研究[J]. 光学学报, 2014(2): 1—8.

HE Song-hua, LIU Zhen, CHEN Qiao. Research of Spectral Dimension Reduction Method Based on Matrix R Theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014(2): 1—8.

[6] 何颂华. 同色异谱黑在光谱降维中的应用研究[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 99—104.

HE Song-hua. Spectral Dimension Reduction Method Based on Metameric Black[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 99—104.

[7] 于海琦,刘真,田全慧,等. 一种基于LMS加权的残差补偿光谱降维模型研究[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 98—101.

YU Hai-qi, LIU Zhen, TIAN Quan-hui, et al. Study on a LMS Weighted Residual Compensated Spectral Dimension Reduction Model[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 98—101.

[8] 戴哲敏,谢琬,李红勤,等. CIE2000色差公式在墙地砖表面色差测试中的鲁棒性研究[J]. 计量与测试技术, 2016, 33(7): 8—10.

DAI Zhe-min, XIE Hu, LI Hong-qin, et al. A Research on the Robust of CIE2000 Color Difference Formula in the Ceramic Tiles' Color Difference Detecting[J]. Metrology & Measurement Technique, 2016, 33(7): 8—10.

[9] 刘攀,刘真,吴光远,等. 面向颜色再现的光谱降维方法研究[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 119—122.

LIU Pan, LIU Zhen, WU Guang-yuan, et al. Spectral Dimension Reduction Methods for Color Reproduction[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 119—122.

- [10] 王文海. 多光谱颜色复制的关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
WANG Wen-hai. Research on Key Technologies of Multi-spectral Color Reproduction[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [11] 王红伟, 刘振. 多光谱颜色复制技术的应用与发展[J]. 印刷质量与标准化, 2014(9): 50—53.
WANG Hong-wei, LIU Zhen. Multi-spectral Color Replication Technology Application and Development[J]. Printing Quality & Standardization, 2014(9): 50—53.
- [12] 刘欣. 基于光谱的颜色复制技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
LIU Xin. Research on Spectral-based Color Reproduction Technology[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [13] 王一帆. 基于多光谱的色彩再现与印品检测的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014, 6.
WANG Yi-fan. Study of Color Reproduction and Presswork Detection Based on Multispectral[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [14] 王一帆, 唐正宁. 基于PCA和ICA的多光谱数据降维方法[J]. 光学技术, 2014, 40(2): 180—183.
WANG Yi-fan, TANG Zheng-ning. Dimensionality Reduction Method Based on Combination of PCA and ICA[J]. Optical Technique, 2014, 40(2): 180—183.
- [15] 王莹, 王忠民, 翟社平. 一种面向打印的低维光谱空间构造法[J]. 西安邮电大学学报, 2014, 19(6): 81—85.
WANG Ying, WANG Zhong-min, ZHAI She-ping. Construction of Low-Dimensional Spectral Space for Multi-ink Printing[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2014, 19(6): 81—85.

(上接第85页)

- Industry, 2014, 40(4): 118—124.
- [44] 张璟晶, 唐劲松, 王海波, 等. 溶菌酶、Nisin和壳聚糖复合保鲜剂对冰鲜银鲈保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(4): 323—326.
ZHANG Jing-jing, TANG Jin-song, WANG Hai-bo, et al. Lysozyme, Nisin, Chitosan Compound Preservatives for Ice Fresh Pomfret Preservation Effect Research[J]. Journal of Food Industry Science and Technology, 2014, 35(4): 323—326.
- [45] 蓝蔚青, 谢晶, 杨胜平, 等. Nisin生物保鲜剂对冷藏带鱼的保鲜效果研究[J]. 天然产物研究与开发, 2010, 22(4): 683—686.
LAN Wei-qing, Xie Jing, YANG Sheng-ping, et al. Effect of Preservation of Nisin Biological Fresh-keeping Agent for Frozen Hairtail Study[J]. Journal of Natural Products Research and Development, 2010, 22(4): 683—686.
- [46] BRILLET A, PILET M F, PREVOST H, et al. Biodiversity of *Listeria Monocytogenes* Sensitivity to Bacteriocin-producing *Carnobacterium* Strains and Application in Sterile Cold-smoked Salmon[J]. Journal of Applied Microbiology, 2004, 97(5): 1029—1037.
- [47] TAHIRI I, DESBIENS M, KHEADR E, et al. Comparison of Different Application Strategies of Divergicin M35 for Inactivation of *Listeria Monocytogenes* in Cold-smoked Wild Salmon[J]. Food Microbiology, 2009, 26(8): 783—793.
- [48] 杨世福. 生物保鲜剂在水产品保鲜中的应用[J]. 中国农业信息, 2014(7): 159.
YANG Shi-fu. Biological Fresh-keeping Agent in The Application of Aquatic[J]. Agricultural Information in China, 2014(7): 159.