

电子地图色域映射的 SOM 神经网络方法

吴明光, 郑培蓓, 崔丽丽

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏南京 210046)

摘 要: 颜色的设备相关性导致电子地图在跨媒介再现时容易出现色彩变形以及地理信息错误传输等问题. 本文分析了电子地图色域的特征, 提出了一种基于 SOM(Self-Organizing Maps)神经网络的色域映射方法. 针对神经网络方法没有顾及电子地图色域映射过程中的色彩空间权重以及神经网络中邻域函数的各向同性假设不适用于地图色域这两个问题, 提出了改进方法. 将本文方法与 ICC(International Color Consortium)感知再现、绝对色度再现色域映射方法进行了对比, 结果表明本文方法能够很好的保持地图整体色差, 能够提高电子地图颜色复制精度.

关键词: 电子地图; 色彩; 色域映射; 神经网络

中图分类号: J063 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)06-1108-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.011

Gamut Mapping of Electronic Map Based on SOM Neural Network

WU Ming-guang, ZHENG Pei-bei, CUI Li-li

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Device-dependency of color introduces such problems as color distortion and error geographic information transmission when electronic maps represent in multiple-medias. Based on the analysis of the characteristics of map gamut, a gamut mapping method based on SOM(Self-Organizing Maps) neural network is proposed. In this method, the weight factor of map color is considered and the neighborhood function, which is anisotropic in map color, is modified. The experiments indicate that our proposed method performs better than the ICC(International Color Consortium) perceptual intent and absolute colorimetric intent on keeping overall color difference. This method can also improve the reproduction accuracy of electronic map colors.

Key words: electronic map; color; gamut mapping; neural network

1 引言

色彩作为重要的地图视觉语言, 引起了国内外学者的广泛研究. 色彩已广泛应用于地形图^[1,2]及各类专题图^[3]. 传统的地图产品主要是纸质地图. 随着多媒体、网络等技术的出现, 产生了电子地图. 地图承载介质也开始由纸张发展为计算机屏幕、投影仪、手持阅读器等^[4]. 不同承载设备由于呈色机理、物理特性等不一致, 显色范围(色域)之间存在较大差异, 同类设备也会因为使用条件不同而导致色域不同^[5,6]. 色彩本身的设备相关性特点导致电子地图在跨承载介质与读图环境传输与再现时极易出现色彩丢失、色彩变异现象, 进而降低地图可用性与服务质量, 甚至传输错误的地理信息.

在电子地图色彩跨承载介质传输时, 地图色域与设备色域之间的映射是不可避免的. 地图色域与设备色域之间的映射结果直接决定地图色彩传输的质量. 色域映射方法大致可分为内容相关的算法与内容无关的算法.

内容无关色域映射方面, ICC(International Color Con-

sortium)针对设备到设备的色彩管理方法, 推荐了四种再现目的: 媒体相关色度再现(media relative colorimetric intent)、绝对色度再现(absolute colorimetric intent)、感知再现(perceptual intent)和饱和度再现(saturation intent). 媒体相关色度再现、绝对色度再现认为是色域裁剪算法, 感知再现、饱和度再现认为是色域压缩算法^[7]. 色域裁剪算法会导致地图色彩所蕴含的等级、顺序、空间分布等信息丢失; 色域压缩算法会导致地图整体色差变化较大. 内容无关色域映射方法还无法支持精确地图色彩传输.

内容相关色域映射方面, 王莹针对不同频率的色彩采用不同的色域映射算法^[8]. McCann 根据 Retinex 理论的原则, 提出了一种空间梯度保护算法^[9]. Bala 提出了一种空间明度保护的算法^[10]. 该类方法在图像复制领域能够取得比 ICC 通用色彩管理更好的色彩传输质量^[11~13]. 色调、明度和彩度三属性, 可用于表示属性上的定名、顺序、间隔、比例四种量表, 以及空间上的几何

形态、空间分布与拓扑关系,因此,地图色域受到制图对象的属性和空间特征的影响。几何形态、空间分布与拓扑关系本身无法直接通过频率、图像梯度、灰度级等指标来度量。定性与定量同时存在的属性特征描述,更增加了地图色域表达与特征提取的复杂度。因此,上述图像内容相关的色彩管理方法也无法支持地图色彩管理。

本文从地图色域特征分析出发,提出一种面向跨媒介传播的色域映射方法。

2 基于 SOM 神经网络的地图色域映射方法

地图色域与设备色域的差异是导致地图色彩传输时出现丢色、偏色的根本原因:与“连续”的设备色域相比,地图色域一般是“离散”的;与“无限”的设备色域相比,地图色域一般是“有限”的。本文将地图色域映射问题理解为一个目标色域范围约束下,离散色彩点的整体形变问题。将地图色域映射的约束条件归结为色彩的局部对比和整体色差。本文将整体色差、局部对比等约束条件转换为点云之间的拓扑关系,提出一种基于神经网络的地图色域映射方法。

2.1 SOM 神经网络与地图色域映射

SOM(Self-Organizing Maps)神经网络是芬兰学者 Kohonen 提出的一种自组织竞争人工神经网络^[14],在数据挖掘、模式识别、信号处理等领域均有着成功应用^[15]。SOM 神经网络由输入层和输出层(又称竞争层)组成。输入层与竞争层的神经元之间是全连接的。竞争层神经元可以按照一维或者二维网络形式排列成一个神经元矩阵。SOM 网络通过对输入样本的反复学习,捕捉各个输入样本中蕴含的模式特征,根据其特有的网络结构和学习规则,邻近的各个竞争层神经元彼此侧向交互作用,相互竞争,不断调整相关竞争层神经元与输入层神经元间的连接权值,在竞争层获得对输入样本的响应。

SOM 算法的工作过程是:

(1)任选一个训练样本,计算该训练样本与每个神经网络单元之间的距离。距离可以是欧式距离、曼哈顿距离等。将距离最小的神经网络单元作为获胜神经网络单元 x ,其序号为 $i(x)$ 。

(2)获胜神经网络元及其周围的神经网络元将向着训练样本的方向调整权重。其调整公式为:

$$w_j(n+1) = w_j(n) + \eta(n) h_{j,i(x)}(x(n)), j = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

式中 n 为迭代次数。 w_j 为第 j 个输出层神经网络单元权重。 η 为学习率。 h 为邻域函数。邻域函数可以为高斯函数、Cauchy 函数等。高斯邻域函数的计算公式为:

$$h_{j,i(x)} = \exp\left(-\frac{d_{j,i}^2}{2\sigma^2(n)}\right) \quad (2)$$

式中 σ 为邻域半径。 $d_{j,i}$ 为第 i, j 个神经网络单元之间的距离。

(3)再选取另一训练样本提供给网络输入层。选取获胜神经网络元并调整邻近神经网络元的权重。所有训练样本完成输入后结束一次迭代。达到迭代上限阈值后结束整个训练过程。最终,通过训练使得输出层中的获胜神经元 g 及其邻域内的权值向量逼近输入样本。

SOM 算法中,若神经网络元的个数小于输入样本的个数,即可实现对输入样本的聚类。若神经网络元的个数等于输入样本的个数,则可实现对输入样本的整体形变控制。对于地图色域映射问题来说:

(1)输入层与竞争层的神经元之间是全连通的。训练开始时,邻域范围也覆盖到整个神经网络空间。地图设色规则和用色习惯可能会导致地图点云中色点分布的不规律。借助神经网络单元的全连通性,不管是聚集还是随机分布的色点,都将影响到地图整体的色域映射结果。

(2)SOM 算法采用仅调整获胜神经元邻域内的神经元权值的学习训练方式,可以使特征相似的输入样本映射到竞争层的获胜神经元位置也是邻近的。这种性质称之为拓扑保持^[14]。该性质有利于色域映射过程对局部色调对比与整体色差的保持。

(3)样本训练、模式发现是非监督的。地图设色主要是通过色调、明度和彩度的综合用来表达不同制图对象的属性信息,按色彩有单变量、双变量和三变量的颜色之分,按变量性质有定性方案、二元方案、顺序方案、分支方案等,它们又可组成不同的色彩配置方案。非监督的样本训练和模式发现过程,无需预先定义色域映射意图,适用于不同设色方式的地图及多种方式混合的地图。

但是,SOM 神经网络方法应用于地图色域映射还需要解决两个问题:

(1)地图色彩点云的空间权重问题。地图色域不仅与地图设色方法有关,而且会受到制图对象的几何形态、空间分布的影响。地图色彩感受往往会受到面积大、长度长的制图对象的影响。色域映射过程中,在不可避免发生移位的情况下,空间权重大的色彩偏差应该小一点。SOM 神经网络方法可以定义训练样本各分量直接的权重,但还需要考虑色点的空间权重问题。

(2)邻域函数定量描述了获胜神经网络单元对邻近神经网络单元的影响。但是在制图对象定名、顺序、间隔、比例四种量表的表示方法中均可以用到色彩。其中,色调往往作为主变量来反映制图对象定性的差别(海-陆)或者量变过程中的突变(正-负增长)。但是,在 HSV 等色空间中,色调表现为角度而不是距离。邻域函

数仅考虑距离而不考虑方向,其作用是各向同性的.但是,设色方法决定了色点分布表现为各向异性.

本文利用 SOM 算法的非监督、拓扑保持等特性,提出一种基于 SOM 算法的地图色域映射方法,并针对上述两个问题给出改进方法.

2.2 基于 SOM 的色域映射方法

CIE $L^* a^* b^*$ 标准色空间是 CIE XYZ 标准色空间经过非线性变换而得到的、与设备无关的颜色空间.常用于设备色空间与设备色空间进行转换的中间色空间.其优点是当颜色的色差大于视觉的识别阈值而又小于孟塞尔系统中相邻两级的色差值时,能较好地反映物体色的心理感受效果. CIE $L^* a^* b^*$ 色空间中, L^* 表示明度值, a^* 表示红/绿, b^* 表示黄/蓝值. 如图 1 所示, CIE $L^* a^* b^*$ 也可以表示为 CIE $L^* C^* h^*$. L^* 表示明度值, C^* 表示彩度, h^* 表示色相角.

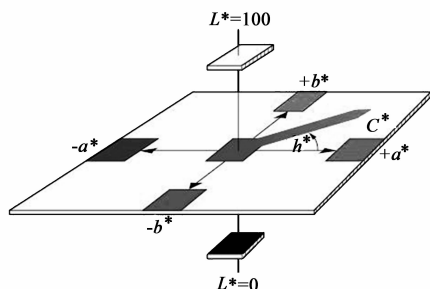


图1 CIE $L^* a^* b^*$ 与 CIE $L^* C^* h^*$ 的关系图

地图色域表现为离散、有限的点云,且各点具有不同的空间权重. 本文将地图色域描述为 CIE $L^* a^* b^*$ 色空间下,权重不同的色点集合.可表示为:

$$P = \{(W_1, C_1), (W_2, C_2), \dots, (W_n, C_n)\} \quad (3)$$

其中 W_i 为第 i 个点的空间权重. $C_i = [L_i, a_i, b_i]$, n 为色点的个数.

地图色点离散分布在地图制图设备的色域范围内.当制图设备和地图目标显示设备的色域不一致时,部分地图色点将超出目标设备色域(本文不讨论目标设备色域完全大于制图设备色域的情况). 本文提出一种基于 SOM 的地图色域映射方法-SMGM (SOM-based Map Gamut Mapping),其思路是:

(1) 获取目标设备色域范围,判断出超出目标色域的地图色点.对于出界的色点,按照色相角参数 θ ,将色空间划分为若干个扇区,每一个扇区选取一个离目标色域范围最远的色点.如图 2(a) 中的 C_p, C_q . 假设共有 m 个.采用传统色域压缩方法,获取其在目标色域范围内的最邻近点,如图 2(b) 中的 C'_p, C'_q .

(2) 选取 k ($k \leq n - m$) 个空间权重较大的色点与 m 个色域边界点一起作为色域映射过程中的控制点.利用 SOM 神经网络方法,将制图设备色域内的点云 P 作

为训练样本,将地图色彩点云训练为分布在目标色域范围内且保持了训练样本中色点之间局部和整体关系的一组新的点云数据.

(3) 将控制点的学习率设为 0. 即:该点在训练过程中可以影响到其它神经网络单元,但不会受到其它神经网络单元的影响.能够保证空间权重较大的色点映射前后没有色差.

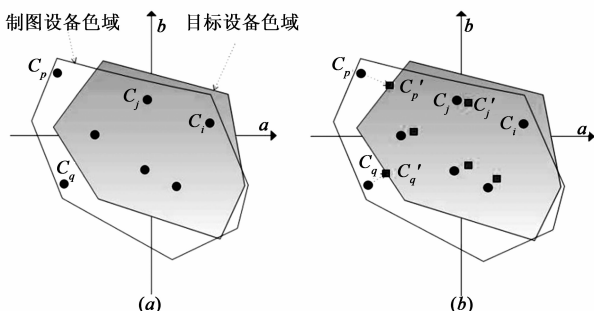


图2 基于SOM的色域映射方法

本文在 SOM 神经网络方法的邻域函数中加入各向异性的支持:邻域函数将色相角作为参数,色相角相近的色点之间作用大,色相角大于参数 ω 的色点不产生影响.修改后的邻域函数为:

$$h_{j,i(x)} = \exp\left(-\frac{d_{j,i}^2}{2\sigma^{2(n)}}\right) \exp\left(-\frac{a_{j,i}^2}{2\omega^{2(n)}}\right) \quad (4)$$

其中, ω 表示色相角的作用范围参数, $a_{i,j}$ 为第 i, j 个神经网络单元权重值对应应在 CIE $L^* a^* b^*$ 色空间中色相角.

完整的色域映射步骤是:

(1) 获取地图色彩点云集合 P . 其中包括色点的个数、每个色点的空间权重及 $L^* a^* b^*$ 值. 栅格地图,通过统计相同色点的频率作为其空间权重,矢量地图通过面积和长度计算来获取其空间权重.

(2) 采用分区最大边界描述方法 (Segment Maxima Gamut Boundary Descriptor, SMGBD)^[16] 来获取源设备色域边界. 采用前文所述方法,确定 m 个色域边界点和 k 个空间权重较大的色点. 此 $m + k$ 个色点作为神经网络单元的控制点.

(3) 定义 n 个三维神经网络元,代表 n 个地图色点个数. 将地图色域作为输入层. 设置参数:迭代总次数 $T = 1000$, 初始邻域半径 $\sigma(0) = v \times 5$, v 为恰可察觉色差 (just-noticeable color difference)^[12]. 邻域半径函数 $\sigma(t) = \sigma(0) \times 0.2^{(t/T)}$. 色相角范围 $\omega = \pi/3$. 初始学习率 $\eta(0) = 0.1$. SOM 神经网络初始化:将控制点的 $L^* a^* b^*$ 值作为 $m + k$ 个神经网络元的初始权重值. 剩下 $n - m - k$ 个神经网络元采用随机的方式赋初始权重值.

(4) 随机选取一个训练样本 $C_i = [L_i, a_i, b_i]$, 提供给 SOM 网络的输入层神经网络元. 寻找获胜神经网络

元:计算 C_i 与 W_j 之间的欧式距离 $d_{i,j} = \|c_i - w_j\|$. 从中选出距离最小的神经网络元作为获胜神经单位 x . 采用本文修正后的邻域函数,对获胜神经元邻域内所有神经网络元的权向按照式(1)进行调整.

(5)重复步骤(4),直到没有新的输入样本.训练迭代计数 $t = t + 1$,更新学习率函数以及邻域半径函数.重复步骤(2)~(5),当训练迭代计数达到预定的训练迭代总次数时,SOM 网络训练结束.SOM 网络的输出层即为地图色域映射结果.

3 实验验证

ColorBrewer 是由 Pennsylvania State University 开发的一个在线交互式地图配色工具^[17].它包括了若干预定义的地图设色方案和实例地图.ColorBrewer 已经成为 ArcGIS、QGIS、GeoTools 等平台的地图设色插件.其色谱也被 Matlab 采用,并应用于多个电子地图集的生产.本文采用 ColorBrewer 中的样图(图 3)进行色域映射对比试验.ColorBrewer 提供 sequential、diverging、qualitative 三种配色方式.其中 diverging 属于定量与定性用色的综合,可以认为是 sequential 与 qualitative 的综合.复杂度最高.另外,从数据分级处理方式来看,从地图心理实验的结论来看,数据组分为 5~9 级较合适.ColorBrewer 在 diverging 模式下支持的最大分级数为 11.本文为降低随机误差的影响,将色彩分为 11 来进行试验.ColorBrewer 中同时提供了样图 sRGB 色空间下的 RGB 与 $L^* a^* b^*$ 值.实验中,将制图设备色域定义为 sRGB 色空间.输出设备为:IBM ThinkPad T410s, Inter(R) core(TM) i5 CPU, 3GB 内存.实验中使用 X-Rite Eye-One 软硬件设备获取目标设备的 ICC Profile 文件.目标设备色域要小于 sRGB 色空间.地图色域完全在 sRGB 色空间范围内,但是,1、2、3、6、7、8 号颜色超出了设备色域.

在 ICC 定义的四种色域映射意图中,感知再现被认为能保持色彩之间的相对关系,绝对色度再现适合于颜色精确复制.因此,实验中选择这两种色域映射方法

与本文方法作为比较对象.SMGM 中,对于 6 个超出目标色域的地图色点,按照 3.2 部分描述的方法,选择 1、6 两个色点作为色域映射控制点,将感知再现方法所获取的色域映射值作为其初始权重,且其学习率为 0.选择 11、12 两个目标色域范围内的地图色域点作为控制点,其 $L^* a^* b^*$ 色彩值作为其初始权重值,且其学习率为 0.实验结果如表 1 所示,其中第 2、3 列是实验的原始数据,分别表示实验地图颜色在 sRGB 色空间下的 RGB 值与 $L^* a^* b^*$ 值.后面三列是以 $L^* a^* b^*$ 值来记录的三种方法色域映射结果.

表 1 三种色域映射方法实验结果对比

ID	RGB	$L^* a^* b^*$	感知再现	绝对色度再现	SMGM
1	158 1 66	34 58 11	39 46 15	39 46 8	39 46 15
2	213 62 79	50 60 27	52 58 24	51 57 19	51 59 27
3	244 109 67	63 51 49	65 53 46	63 49 41	64 51 48
4	253 174 97	78 24 51	78 23 46	78 22 40	78 24 49
5	254 224 139	90 3 45	90 3 45	90 0 32	90 3 45
6	255 255 191	99-7 31	96-4 25	97-7 12	96-4 25
7	230 245 152	94-15 43	95-14 42	93-16 28	93-14 42
8	171 221 164	84-25 23	84-23 23	83-27 8	84-25 23
9	102 194 165	72-34 6	74-36 8	72-36 8	73-34 6
10	50 136 189	53-13-36	53-12-42	54-12 50	53-13-36
11	94 79 162	38 23-44	38 23-44	38 21-57	38 23-44

由表 1 可知,不管是感知再现还是绝对色度再现,目标色域范围内的色点,映射均产生了偏移,导致地图整体色彩感受变化较大.SMGM 通过对控制点的学习率控制,能够保证目标色域范围内,空间权重较大的色点没有偏移,使得地图整体色彩感受的整体变化要小于感知再现和绝对色度再现.

样图中的设色方法采用颜色的变化来反映实验数据数量上的定量差距,色差代表了数据差.在色域映射过程中,色彩之间的距离关系应当得到保持.因此,进一步分析色域映前后对色点之间拓扑关系的保持情况.按照表 1 中罗列的 11 中颜色,采用 CIE1976 $L^* a^* b^*$ 色差公式计算前后两个颜色的色差(图 4).映射后的色差越接近原始色差,则该映射方法的色差保持效果好.感知再现方法采用的是色域压缩.由图 4 可知,感知再现方法的色差保持要比绝对色度再现方法要好.SMGM 借助于 SOM 神经网络拓扑保持的性质,在所有的 10 组色差中,第 1、4、7、9、10 组,SMGM 的色差最接近

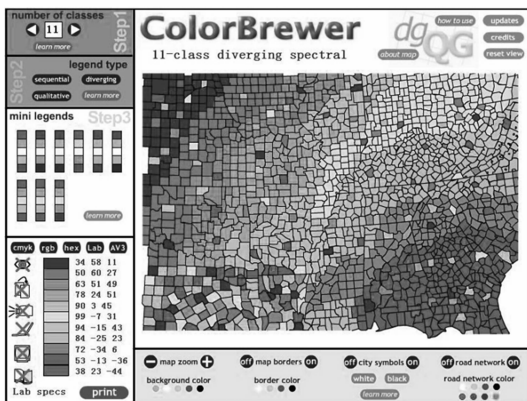


图 3 实验样图

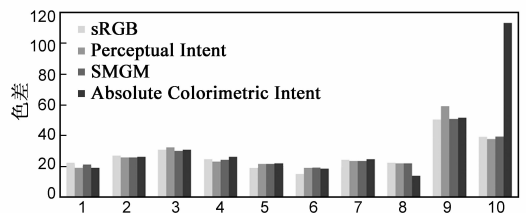


图 4 三种色域映射方法色差结果对比

原始色差. SMGM 方法在大多数情况下色彩的拓扑保持性质要优于色域压缩方法.

本文方法以地图色域为映射对象, 以目标色域作为色域边界, 以整体色彩感受、局部色差作为约束条件, 借助 SOM 神经网络全连通、非监督和拓扑保持等性质来进行求解. 从整体色彩感受和局部色彩的定量分析结果来看, 本文方法地图色域映射质量要优于 ICC 感知再现和绝对色度再现.

4 结论

随着电子地图、网络地图的广泛应用, 地图的承载介质呈现多元化的趋势, 地图在跨媒介再现过程中, 地图颜色传输精确性、可预见性问题均需要深入研究. 地图色彩设计本身有其规律性, 加之地图色彩所指代的地理对象出现分布和分异特征, 使得地图颜色不同于普通图像、图形、本文在分析地图色域特征的基础上, 将地图色彩高精度跨媒介再现问题转换为一个离散点云数据在边界约束下的整体形变问题. 引入 SOM 神经网络方法, 并针对 SOM 神经网络方法中没有考虑地图色点的空间权重, 以及邻域函数各向同性假设不适用与地图色彩等问题, 提出了改进方法. 实验表明, 该方法很好地保持了地图整体色差以及局部色彩对比.

参考文献

- [1] K J Patrick. Hillshading of terrain using layer tints with aspect-variant luminosity[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2004, 31(2): 67 – 77.
- [2] J Bernhard, H Lorenz. Swiss-style colour relief shading modulated by elevation and by exposure to illumination[J]. *The Cartographic Journal*, 2006, 43(3): 198 – 207.
- [3] K Melanie, H Lorenz. How to enhance cartographic visualisations of natural hazards assessment results[J]. *The Cartographic Journal*, 2011, 48(1): 60 – 71.
- [4] F David, A Gennady, A Natalia, et al. Representation and its relationship with cartographic visualization[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2001, 28(1): 13 – 28.
- [5] 罗雪梅, 曾平, 王莹, 王义峰. 基于色调恒常空间的色彩管理[J]. *电子学报*, 2010, 38(11): 2660 – 2668.
LUO Xue-mei, ZENG Ping, WANG Ying, WANG Yi-feng. Color management using a hue-constancy color space[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(11): 2660 – 2668. (in Chinese)
- [6] 卫保国, 沈兰荪, 蔡轶珩. 虚拟标准显色设备——跨网络色彩重现的新方案[J]. *电子学报*, 2003, 31(12): 1828 – 1831.
WEI Bao-guo, SHEN Lan-sun, CAI Yi-heng. Virtual standard color device: a new solution to cross-network color reproduction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 1828 – 1831. (in

Chinese)

- [7] G Phil, K Michael. *Color Management: Understanding and Using ICC Profiles*[M]. Wiltshire: John Wiley & Sons, 2010. 45 – 48.
- [8] 王莹, 曾平. 一种基于图像空间频率特征的色域匹配算法[J]. *计算机应用研究*, 2004, 21(10): 120 – 122.
Wang Ying, Zeng Ping. Agamut mapping method based on the spatial frequency of color image[J]. *Application Research of Computers*, 2004, 21(10): 120 – 122. (in Chinese)
- [9] H Y Jon. Recent advances in acquisition and reproduction of multispectral images [A]. 14th European Signal Processing Conference[C]. Florence, Italy: EURASIP, 2006. 1 – 5.
- [10] M Yuri, F Ken, Y Masahiro, et al. Color reproduction from low-SNR multispectral images using spatio-spectral Wiener estimation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4106 – 4120.
- [11] N Gianluca, P Paolo, S Raimondo. S-CMS: Towards the definition of a spectral color management system[J]. *Colore e Colorimetria: Contributi Multidisciplinari, Collana Quaderni di Ottica e Fotonica*, 2005, 19(13): 9 – 14.
- [12] R R Mitchell, D W Maxim. Spectral gamut and spectral gamut mapping[A]. *Spectral Imaging: Eighth International Symposium on Multispectral Color Science*[C]. San Jose, California, USA: SPIE, 2006. 60620K-1-11.
- [13] B A Cynthia. Evaluation of a model for predicting simultaneous contrast on color maps [J]. *The Professional Geographer*, 1997, 49(3): 280 – 294.
- [14] K Teuvo. Self-organized formation of topologically correct feature maps[J]. *Biological Cybernetics*, 1982, 43(1): 59 – 69.
- [15] Liu Yonggang, W H Robert. Patterns of ocean current variability on the west florida shelf using the self-organizing map [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(6): 6003 – 6007.
- [16] U Philipp, G R Rolf. Gamut boundary determination by sampling an inverse printer model[A]. NIP & Digital Fabrication Conference, 2002 International Conference on Digital Printing Technologies[C]. San Diego, California: Society for Imaging Science and Technology, 2002. 778 – 781.
- [17] H Mark, B A Cynthia. ColorBrewer. org: An online tool for selecting color schemes for maps[J]. *The Cartographic Journal*, 2003, 40(1): 27 – 37.

作者简介

吴明光 男, 1979年3月15日生于湖北武汉, 副教授, 主要研究方向为电子地图与地理信息系统.

E-mail: wmg@njnu.edu.cn

郑培蓓 女, 1988年1月17日生于安徽含山, 博士研究生, 主要研究方向为地理信息系统.

E-mail: zhengpeibei@163.com