应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2014, 51(1): 200–211. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2014.023

基于计算机视觉技术评价光照度对斜纹夜蛾幼虫体色的影响*

李瑾洁[1] 龚碧涯[1,2] 文意纯[1] 彭云鹏[1] 杨洪璋[1] 文礼章[1**]

（1. 植物病虫害生物学与防控湖南省重点实验室，湖南农业大学植物保护学院 长沙 410128；2. 湖南省园艺研究所 长沙 410125）

摘 要 **【目的】** 为揭示光照度对斜纹夜蛾 *Prodenia litura*（Fabricius）幼虫体色变化的影响，建立一套新的昆虫体色评价体系。**【方法】** 采用计算机视觉检测技术，将斜纹夜蛾幼虫的颜色数值化，评价了斜纹夜蛾幼虫体色随日龄的变化规律及光照度对斜纹夜蛾幼虫体色变化的影响。**【结果】** 随着日龄的增加，斜纹夜蛾幼虫的明度（*B*）和彩色指数（*CI*）逐渐减少，体色偏差系数（*BDV*）逐渐增加，色泽从开始的绿色占主导逐渐转变为红色占主导，不同日龄间主观色各颜色指标都差异显著（$P<0.01$）；在低光照度（0~1 000 lx）下，明度(*B*)和体色偏差系数（*BDV*）主要受光照影响，而彩色指数（*CI*）和归一化 RGB 值主要受发育日龄的影响，在高光照度下（1 000 lx 以上），所有颜色指标均受发育日龄影响较大，受光照处理相对较小，光照度对斜纹夜蛾幼虫体色影响的阈值为 1 000 lx，在阈值下，明度（*B*）、彩色指数（*CI*）及体色分化系数（*BDC*）都随光照度的增加显著增加，体色偏差系数（*BDV*）、RGB 色差则随光照度的增加而减少。**【结论】** 光照度主要影响斜纹夜蛾幼虫体色的明暗程度，对色彩程度影响不大，且光照度的影响阈值大约为 1 000 lx。

关键词 计算机视觉技术，斜纹夜蛾，体色，数值化，光照度

Influence of light intensity on the body colour of *Prodenia litura* (Fabricius) larvae based on computer visualization

LI Jin-Jie[1] GONG Bi-Ya[1,2] WEN Yi-Chun[1] PENG Yun-Peng[1]
YANG Hong-Zhang[1] WEN Li-Zhang[1**]

(1. Hunan Provincial Key Laboratory for Biology and Control of Plant Diseases and Insect Pests, College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Horticultural Institute, Changsha 410125, China)

Abstract **[Objectives]** To reveal the influence of illumination on the body colour of *Prodenia litura* (Fabricius) larvae, a new system of evaluating insect body colour was established. **[Method]** Based on computer vision detection technology, the change in body colour of *P. litura* larvae over successive days and the effect of illumination on the change in body colour were evaluated by assigning colours a numerical value. **[Results]** Brightness (*B*) and colour index (*CI*) decreased gradually of larvae over successive days, while the deviation coefficient (*BDV*) increased. The dominant colour, green, transformed gradually into red, all color parameters of subjective colour were significantly different among larvae of different ages ($P<0.01$). The brightness (*B*) and deviation coefficient (*BDV*) of body colour was influenced by light with low light intensity (0-1 000 lx), while colour index (*CI*) and normalized RGB value were influenced by age. At high light intensity(over 1 000 lx), all parameters of subjective colour were influenced by age more than light; the effect threshold of light intensity on body-colour was 1 000 lx, at this threshold, the brightness (*B*), colour index (*CI*) and differentiation coefficient of body colour increased with light intensity whereas the deviation coefficient (*BDV*) and delta-RGB (D) decreased. **[Conclusion]** Light intensity mainly affects the

* 资助项目：国家自然科学基金项目（C030402/31070387）

**通讯作者，E-mail: weninsect123@aliyun.com

收稿日期：2013-01-28，接受日期：2013-12-05

light and shade of body colour on *P. litura*larvae but had little effects on the degree of colour; the effect threshold of light intensity was 1 000 lx.

Key words　computer vision, *Prodenia litura* (Fabricius), body colour, numeralization, illuminace

昆虫的体色极为复杂，是形态学、生物学及生态学研究中广泛使用的一个重要特征，一直以来都是昆虫学家研究的热点，其研究是一个非常具有挑战性的问题（徐卫华，2011）。昆虫体色变化是指昆虫发育过程中表现出体色多型现象，受多种因素影响（程茂高等，2005），过去大多数学者对于昆虫体色的描述停留在定性分析的水平上，局限于红绿蓝之类的文字（陈永兵等，1999；刘绍友等，2000；曹成全等，2010），对于昆虫体色的规范评价则一直未有较大的进展。昆虫体色变化是一个连续渐变的过程（Tanaka, 2004），同一昆虫在相邻两个时间段的体色差别很小，不易区分，加上同一观察者不同时期或不同观察者彼此之间对颜色的认识或多或少存在差异，故常导致对于同一实际体色特征会有不同的描述结果（文礼章等，2012）。昆虫体色的变化形式主要表现为明暗程度和色泽，且变化的大小受昆虫种类和环境因子的类型影响（Eric *et al.*, 2000；熊延坤和张青文，2003；樊永胜和朱道弘，2009），定性分析是主观地将颜色分成若干间断类型，虽然也能揭示昆虫体色分化的规律，但对于明暗程度的连续变化却难以进行定量分析。

近年来，随着计算机的普及、数字逻辑器件及传感器的发展，人们越来越多地利用这些数码工具来进行视觉信息的获取与处理（杨宏伟和张云，2005）。计算机视觉技术是通过一个代替人眼的图像传感器获取物体的图像，将图像转换成数字图像，并使用计算机图像软件根据人的视觉判别准则去获取图像的视觉信息，达到定量分析图像的目的。本世纪以来基于生物特征的计算机视觉检测鉴别技术得到了广泛重视和空前发展，如广泛应用于农作物的病虫害识别与检测、农作物产品质量的监控、图像检索以及医学检测等（陶霖密和徐光祐，2001；Andrew *et al.*, 2004；赵红霞等，2004; 杨燕军和陈有亮，2004；黄萍等，2010; Matthew *et al.*, 2011）。但是，基于计量特征的计算机视觉技术却未曾发现有人应用到昆虫体色研究。本文针对昆虫体色变化的多样性，并以斜纹夜蛾 *Prodenia litura*（Fabricius）为例，选择数码相机作为获取其实物图像的工具，通过相关图像处理软件从电子图像中提取出可量化颜色数值，研究了光照度对斜纹夜蛾幼虫体色变化的影响规律，以此探索一种新的定量化评价昆虫体色的方法，为研究环境因子对昆虫体色变化影响提供了新的途径。

1　材料与方法

1.1　颜色定量的原理

颜色是一种复杂的光学现象，它并不是物质的固有特征，其产生是光源、物体和观察者共同作用的结果，三者间的任何变化都会导致颜色的差异，是一种受物理学、视觉生理学、心理学影响的综合量（刘浩学等，2005）。

颜色定量一般是通过数值来描述颜色的类型，通常通过数学模型来表示。目前，应用较广的主要是 RGB 颜色模型、CMYK 颜色模型、HSB/HSI 颜色模型、CIE-Lab 颜色模型等（李小梅等，2002）。RGB 颜色模型是一种加光体系，主要应用于计算机、扫描仪和数码相机等，RGB 分别代表红绿蓝，任何一种彩色均可以由这 3 种颜色混配而得，数值越大颜色越明亮；CMYK 颜色模型是减光体系，CMYK 即是代表青、洋红、黄、黑 4 种印刷专用的油墨颜色，该模式能有效避免打印时色彩的损失，适用于打印系统；而 Lab 颜色立方则是独立与设备之外的颜色系统，其中 L 表示亮度（Luminosity），a 表示从洋红色至绿色的范围，b 表示从黄色至蓝色的范围，Lab 中的数值描述为正常视力的人能够看到的所有颜色，而不是设备（如显示器、桌面打印机或数码相机）生成颜色所需的特定色料的数

量；HSB 和 HSI 颜色模型则都源自 RGB 颜色模型，并且是设备相关的色彩模型，H 为色相（Hue），指在 0 到 360°的标准色轮上，按位置度量不同颜色类型（红、橙、黄、绿等），S 为饱和度（Saturation），表示色相中灰色分量所占的比例，它使用从 0（灰色）至 100%（完全饱和）的百分比来度量， B 为明度(Brightness)，I 为强度(Intensity)，明度=0.3×R+0.59×G+0.11×B，强度=(R+G+B)/3，虽然两者都是反映色彩明亮程度的，但是明度反映了人眼对于红绿蓝的敏感程度不同，因此相对于强度 I 来说，使用明度 B 作为明亮程度信息更为准确，此外，由于 RGB 值的取值范围都为（0，255），所以明度和强度的取值范围也都为（0，255）（李小梅等，2002）。

所谓的颜色模型就是指某个三维颜色空间中的一个可见光子集，由 3 个颜色分向量决定（陶霖密和徐光祐，2001）。因此，任何一种颜色，不管采用何种颜色模型，都是需要至少 3 个分量才能描述出来。虽然颜色模型之间是可以相互转化的，但是由于其色域大小不一（何国兴，2004），不同模型在相互换算过程中会有色彩的丢失，为了减少这种丢失现象，本文直接选用数码相机所采用的 RGB 色彩模型及其相应的转化模型（HSB），通过计算机软件提取数字图像中 RGB（颜色部分）和明度值 B（黑化程度），并针对每一个指标进行运算，从而获得其他更多的数值规律。根据 RGB 值的大小可以粗略估计出颜色的范围。一般来说，数值最大的颜色对总的颜色有决定性作用，数值最小的颜色以及黑色对总的颜色影响不大；数值居中的颜色很关键，如果它的颜色数值接近最小的颜色数值时，总的颜色是原色，如果它更接近数值最大的颜色，则总的颜色是间色（即三原色当中的两个色以同等比例相加调和而形成的颜色）；当 RGB 3 个值都小于 50 时，则颜色表现为黑色（于福洋，2008）。

1.2 昆虫体色数值化的计算方法

1.2.1 定义 主观色（Subjective colour），即昆虫个体的全部可见外观的颜色的平均值，通过 Photoshop 可以直接获得照片上昆虫个体的颜色数值，由这些数值可以还原该昆虫的整体色泽。这些颜色数值包括明度、R、G 及 B 的平均值（$\bar{x}$）和标准差（s），其计算方法为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left[x_i - \bar{x}\right]^2} \tag{2}$$

其中，x_i 为第 i 个像素点的值，$i \in (1,\infty)$，n 为像素点总数，x 为明度、R、G 或 B 值，由此可以得到，明度、R、G、B 的平均值及其相应的 s 值。

平均值 $\bar{x}$ 测量的实际上为选取昆虫的整体外观指标，其不包括腹面无法看到的部分，其反映的是一个统计值，并不一定能代表某一个体色位的颜色。标准差 s 则反映了选取图像中所有像素点的值与平均值之间的偏离幅度，s 越大，各像素点间的颜色差异越大。

为了从明度信息中分离出颜色信息，将 RGB 值归一化处理，得到归一化 RGB 值（Normalized RGB value），定义为 $r\ g\ b$，其计算公式为：

$$r = \frac{R}{(R+G+B)}, g = \frac{G}{(R+G+B)}, b = \frac{B}{(R+G+B)} \tag{3}$$

通过对图像的 RGB 色彩空间进行归一化处理，在某些情况下是去除光照和阴影对颜色影响的一种简单而有效的方法（吴健新和李翠华，2004）。

1.2.2 定义 体色偏差系数（Deviation coefficient，*BDV*），选取明度作为统计指标，指某一单个昆虫图像各像素点明度指标的离散程度，消除了因平均值变化造成的影响。反映了体色的复杂程度，体色偏差系数越大，昆虫个体的颜色种类则越多，色泽越复杂，即昆虫个体不同位置的颜色差别越大。其计算公式如下：

$$BDV = \frac{s}{\bar{x}} \tag{4}$$

其中，s 为明度的标准差，$\bar{x}$ 为明度的平均值。

1.2.3 定义 总体平均颜色值（Ensemble mean

colour，*EMC*）、总体平均值的标准差（Standard deviation of ensemble mean colour，*ESD*），反映同一组样品中颜色的总体情况；体色分化系数（Differentiation coefficient，*BDC*），反映了抽样总体中不同昆虫之间体色的分化强度，在多组样品比较中，*BDC* 值越大，不同昆虫的体色类型越多。其计算公式如下：

$$BDC=\frac{ESD}{EMC}=\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left[w_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}w_i\right]^2}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}w_i} \quad (5)$$

其中，n 为昆虫个体总数，w_i 表示第 i 个昆虫个体的颜色。

1.2.4　定义　彩色指数(Colour index，*CI*)，指昆虫体色的色彩丰富程度，即去除亮度信息后昆虫的色彩程度，其值与亮值度、颜色类型无关。其计算公式为：

$$CI=\sqrt{\frac{1}{3}\left[(R-I)^2+(G-I)^2+(B-I)^2\right]} \quad (6)$$

其中 I 为强度，$CI\in(0,147.22)$。当 RGB 值都相等时，*CI* 为 0，昆虫体色为黑白像（即白灰黑 3 种情况），当 RGB 差值最大时，*CI* 为 147.22，*CI* 越大，昆虫体色越鲜艳。

RGB 色差（Delta-RGB，*D*）指两个样本间的颜色差别大小，其实质是将两个颜色值作为两个坐标点绘在三维色空间内，然后计算这两个点之间的距离，当然，这个距离还要考虑到人眼对于红绿蓝的敏感程度，因此，分别乘以系数{3，4，2}，其公式（杨振亚等，2009）为：

$$RGB\text{色差}=\sqrt{\left[3(R_1-R_2)^2+4(G_1-G_2)^2+2(B_1-B_2)^2\right]/9} \quad (7)$$

1.3　斜纹夜蛾幼虫体色数据的获取

1.3.1　拍照场所与方法　数码照相容易受拍摄光照的影响，因此，为保证每次拍照的光照条件相同，我们将拍照时间设置在晚上并采用固定的标准光源条件，或采用图 1 所示的暗室拍照。数码相机采用微距模式，光线选择 D65 标准光源，灯光照度度大约为 300 W 三基色灯泡，虫体的拍摄背景采用 18%的中性灰纸板，这是因为 18%灰板能基本反映出现实景物的平均亮度（中间亮度），18%灰板的曝光量基本吻合最佳曝光量，这已是摄影界达成的共识。当然，也可以选用白纸作为背景板，但这样会导致照片整体偏暗，需要另外设定相机的曝光补偿（将其提高 1/3 的曝光量），或通过打开 Photoshop“图像”菜单中“曝光度”的选项，选取图像中白纸部分作为参照，将白纸或 18%的中性灰纸的亮度 I 调至 210，这样就保证了每张照片拍摄时的光照水平一致，虫体的亮度水平也一致。将昆虫放在相机正下方，如图 1 所示的背景纸板上，相机设置如下：拍摄程序选择自动，微距模式，焦距约 20 cm，加权测光，白平衡自动，闪光灯关闭。

1.3.2　数据的获取　通过 Photoshop 打开电子照片，智能选取昆虫部分，由直方图的详细信息可以获得整个昆虫的明度、R、G、B 的平均值和标准差。当然，也可以通过 Instant colour picker 软件获取各体色位 3×3 像素的 RGB 颜色值，比较斜纹夜蛾幼虫不同体色位的颜色大小变化。

1.4　实验内容

1.4.1　斜纹夜蛾幼虫体色的变化规律　将 24 头刚孵化的斜纹夜蛾幼虫，用内层颜色相近大白菜叶在一次性塑料杯中单头饲养，光照条件一致（即自然光照），以室内条件为参考，实验时间为 7 月上旬（平均温度为 30℃）。从 4 龄开始拍照，采用了文礼章等（2012）提出的“以日龄作为观察时间间隔”，每日晚上对每一头幼虫正背面拍照，并记录照片编号，直至化蛹，其中 22 头成功化蛹。

1.4.2　斜纹夜蛾不同光照度下体色的变化规律　光照度表示物体表面积被照明的量，平时习惯将其称为光照强度，与发光强度和光源的距离有关，实际操作过程中不易准确控制。同一个光照条件下，放置在不同位置，其光照度也不一样，为了方便简单，本实验直接采用灯泡瓦数以及个数来控制光照强度，避免了采用纱网遮光（阎秀

峰等，2003）控制光照度导致的光线空间纹路，

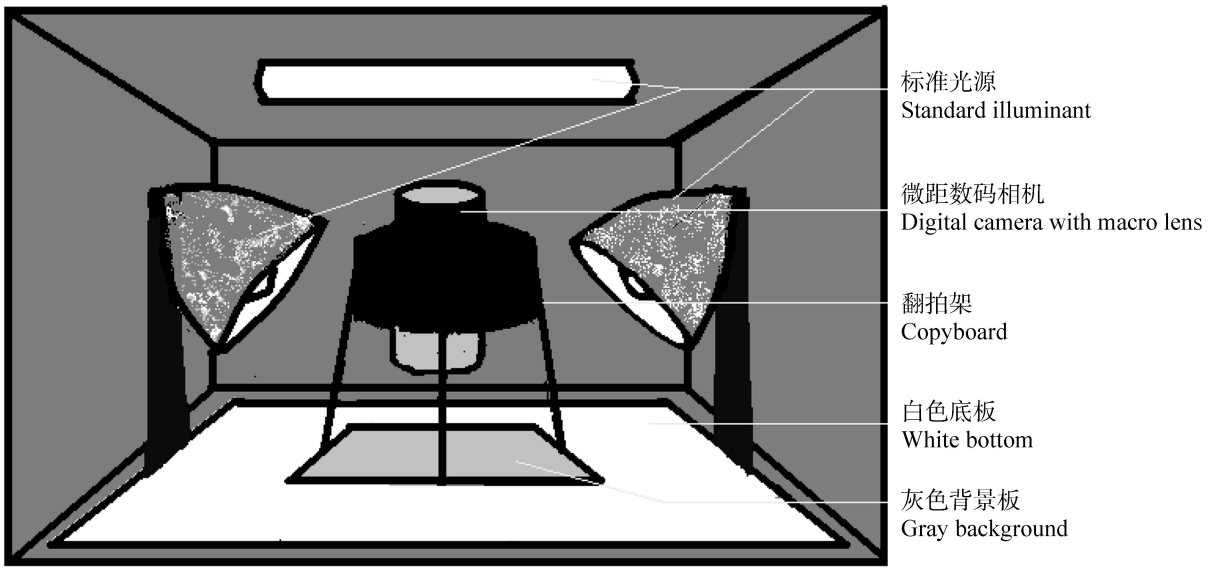

图 1　摄影暗房模拟图
Fig. 1　The simulated diagram of photography darkroom

然后再通过环境测量仪（DJL-18，浙江托普仪器有限公司产）准确测量其实际光照度。参照表 1，首先完成自然光照和全黑暗光照条件对斜纹夜蛾幼虫体色的影响，其他条件一致，实验时间为 7 月上旬（温度大约 25~35℃），单头饲养，每个处理 12 头初孵幼虫，分成 3 组；然后完成不同光照度梯度对斜纹夜蛾幼虫体色的影响，每个处理 24 头初孵幼虫，分成 3 组，饲养条件如下：温度 28℃，湿度 50%，食物选择内层颜色相近大白菜叶，单头饲养，从 4 龄开始，每日对每头幼虫正背面拍照，并记录照片编号，直至化蛹。

2　结果与分析

2.1　斜纹夜蛾幼虫体色变化的一般规律

斜纹夜蛾幼虫的体色是连续变化的，低龄阶段体色和食物颜色相似，喂食绿色食物能获得体色绿的虫体，高龄开始分化。由表 2 可知，斜纹夜蛾幼虫主观色的变化情况，明度值总体上随日龄的增加而减少，偏差系数则逐渐增加，即随着日龄的增加，幼虫体色逐渐变暗，色泽越复杂；*rgb* 值从开始的绿色占主导逐渐转变为红色占主导，而蓝成分（相对于红绿）一般较小，总体上显示昆虫的体色由浅绿逐渐变为土黄色和红褐色，研究所有样本没有发现蓝成分大于红或绿成分的现象，红成分和绿成分基本接近，根据 RGB 颜色数值规律，由 *b* 值远小于 *r* 值和 *g* 值，所以统计颜色为红和绿的间色，即橙色；彩色指数总体上是逐渐减小的，减少幅度较小；不同日龄间主观色各指标差异都显著（$P<0.01$）。

2.2　室内自然光照和全黑暗对斜纹夜蛾幼虫体色的影响

通过对各体色指标进行方差分析可以获得各指标在不同处理因素间的 *F* 检验值，由 *F* 检验值的大小可获得不同处理对各因素变异量的重要性。室内自然光照的光照度大概在 600~3 000 lx 之间，由表 3 可知，斜纹夜蛾幼虫在光照条件和发育日龄两因子下，红成分在光照处理下的 *F* 检验值差异不显著，即光照处理基本不影响红成分的变化，明度、彩色指数、体色偏差系数、绿成分、蓝成分的 *F* 检验值明显比日龄大，即光照对其影响明显大于日龄（特别是明度和彩

色指数），红成分的变化主要受日龄影响，与其　　发育情况相关。

表 1　不同光照条件控制方案设计表

Table 1　The method of different illumination conditions

实验编号 Experiment numbers	处理 Treatment	实测光照度（勒克斯） True illuminance (lx)	光：暗（h） Light：dark (h)	控制方法 Control method	光照来源 Source of light	所测有效昆虫个数 Effective number of insects
1	1	380-2 000	15：9	—	室内自然光照 Natural daylighting indoors	12
	2	0-10	0：24	—	遮光 Shading	12
2	1	492±55	14：10	9 W	单灯泡(功率 W)[1] Single bulb（power W）	24
	2	543±43	14：10	13 W	单灯泡(功率 W) Single bulb（power W）	24
	3	743±62	14：10	16 W	单灯泡(功率 W) Single bulb（power W）	24
	4	788±88	14：10	20 W	单灯泡(功率 W) Single bulb（power W）	24
	5	1 000±321	14：10	0×60	多灯泡（数量×功率 W）[2] Multiple bulb（number×W）	24
	6	1 826±124	14：10	2×60	多灯泡（数量×功率 W） Multiple bulb（number×W）	24
	7	1 826±124	14：10	4×60	多灯泡（数量×功率 W） Multiple bulb（number×W）	24
	8	2 622±297	14：10	6×60	多灯泡（数量×功率 W） Multiple bulb（number×W）	24

[1] 为铭扬照明牌的三基色电子节能灯，色调 RR；[2] 为人工气候箱所带的灯光系统，3 面有灯，每个灯泡瓦数为 60 W，色调 RR。

[1] it is the energy-save lamp with three primary colours by brand of Ming Yang, hue RR.　[2] it is the light system on Plant

Growth Chamber, that the light has 3 direction, that the wattage of every direction light is 60 W, hue RR.

表 2 斜纹夜蛾幼虫主观色的各指标与幼虫发育日龄的关系

Table 2 The relationship between the evaluation index of subjective colour and the age (day-old) of *Prodenia litura*larvae

幼虫日龄 [1] Larval age (day-old)	明度 Brightness	偏差系数 Deviation coefficient	归一化颜色值 Normalized colour value			彩色指数 Colour index
			r	*g*	*b*	
1	122.80±8.69a	0.13±0.03a	0.37±0.01	0.39±0.01	0.24±0.01	26.85±2.56a
2	131.59±11.29b	0.12±0.02a	0.38±0.00	0.40±0.00	0.22±0.01	33.58±3.28b
3	115.40±19.04c	0.21±0.04b	0.39±0.01	0.38±0.01	0.23±0.02	27.40±5.41cd
4	116.86±19.55c	0.21±0.04b	0.39±0.01	0.38±0.01	0.23±0.02	27.65±5.57cd
5	96.08±7.74cd	0.25±0.04b	0.40±0.02	0.39±0.02	0.21±0.03	28.26±6.75de
6	95.21±14.85cd	0.24±0.03b	0.41±0.01	0.39±0.01	0.20±0.02	28.94±7.35de
7	68.56±16.92e	0.31±0.07c	0.43±0.03	0.38±0.01	0.19±0.04	22.43±5.87ef
8	84.54±23.22d	0.27±0.06bc	0.38±0.02	0.36±0.01	0.26±0.03	16.02±7.08f
F 检验值 *F* value	17.11**	21.32**	8.17**	7.91**	5.09**	10.10**

[1] 表示日龄为 3 龄末开始算起；表中数据为平均值±标准差，不同字母表示同列数据差异显著；*F* 检验值表示不同日龄间对各体色指标的变异量大小；**$P \leq 0.01$。

[1] denotes the day-old of larval age counted the stadium at the end of 3rd larval; data in the table are mean ±SD, different column indicate significantly different; *F* value denotes the variation of each body-colour evaluation index on different developmental ages; ** $P \leq 0.01$.

表 3 斜纹夜蛾幼虫各体色指标在不同发育日龄、不同光照处理间的 *F* 检验值

Table 3 The *F* value of all body-colour evaluation index with *Prodenia litura*larvae in different developmental ages, different light treatment

体色指标 Body-colour index	*F* 检验值 [1] *F* value		
	日龄 Day-old	光照处理 Light treatment	日龄×光照处理 Day-old×light treatment
明度 Brightness	32.34**	50.85**	5.07**
彩色指数 Colour index	24.01**	76.25**	7.57**
偏差系数 Deviation coefficient	46.87**	67.89**	6.50**
r	9.34**	1.45	2.75*
g	11.37**	36.12**	1.48
b	7.07**	21.72**	2.90**

[1] 表示对不同体色指标进行方差分析后得到的检验值，** $P \leq 0.01$，* $P \leq 0.05$。

[1] denotes the value followed by analysis of variance with different body-colour index, ** $P \leq 0.01$，* $P \leq 0.05$.

2.3　不同光照度梯度对斜纹夜蛾幼虫体色的影响

通过对各体色指标进行方差分析可以获得各指标在不同光照度梯度和不同发育日龄间的 *F* 检验值，由表 4 可知，斜纹夜蛾幼虫的在光照梯度和发育日龄两因子下，低光照度和高光照度略有不同，在低光照度下，明度和体色偏差系数受光照影响较大，彩色指数及 *r*，*g*，*b* 值主要受发育日龄的影响，在高光照度下，所有颜色指标均受发育日龄影响较大，受光照处理相对较小。

2.4　各颜色指标与光照度的关系

总体平均颜色反映的是每个龄期的颜色情况，如果不考虑每日颜色变化，将单头虫体一生的颜色作为一个整体，可得到表 5 和图 2，从图 2 及表 5 中可以看出，明度、体色偏差系数、色彩指数、体色分化系数及 RGB 色差都呈现相似的变化，低强度光照（0~1 000 lx）下明度、色彩指数及体色分化系数随光照度的增加显著增加，当光照度达到 1 000 lx 以后，明度基本不变；

表 4　斜纹夜蛾幼虫各体色指标在不同发育日龄、不同光照梯度间的 *F* 检验值

Table 4　The *F* value of all body-colour evaluation index with *Prodenia litura* larvae in different developmental ages, different light gradients

体色指标 Body-colour index		*F* 检验值 [1] *F* value		
		日龄 Day-old	光照梯度 Light gradient	日龄×光照梯度 Day-old×light gradient
低光照度 Low illuminance[1]	明度 Brightness	9.08**	10.76**	6.58**
	彩色指数 Colour index	5.73**	1.52	11.50**
	偏差系数 Deviation coefficient	2.81**	25.16**	5.34**
	r	5.91**	1.17	2.88**
	g	4.84**	4.31**	1.73
	b	1.75	0.94	4.54**
高光照度 High illuminance[2]	明度 Brightness	125.41**	2.39*	2.67**
	彩色指数 Colour index	34.00**	0.13	2.76*
	偏差系数 Deviation coefficient	43.89**	3.15**	1.30
	r	35.20**	3.43**	2.06**
	g	5.02**	4.46**	4.47**
	b	36.34**	0.83	3.69**

[1] 表示对不同体色指标进行方差分析后得到的检验值，** $P \leq 0.01$，* $P \leq 0.05$；[1]低光照度的范围为 100~1 000 lx，即清晨、黄昏以及阴雨天；[2]高光照度的范围为 1 000 lx 以上，即太阳升起的时间段。

[1] denotes the value followed by analysis of variance with different body-colour index, ** $P \leq 0.01$，* $P \leq 0.05$; [1]denotes the range of low illuminance is 100-1 000 lx, that is early morning, dusk and rainy days; [2] denotes the range of high

illuminance is 1 000 lx, that the period of sun rose.

表 5 不同光照度下各颜色指标的总平均值

Table 5 The overall average of all colour index on different illuminance

光照度** Illuminance (lx)	整个发育历期的总平均值 The overall average of all developmental duration							
	明度 Brightness	偏差系数 Deviation coefficient	*r*	*g*	*b*	彩色指数 Colour index	分化系数 Differentiation coefficient	RGB 色差[1] Aberration of RGB
500.00	67.78	0.42	0.36	0.35	0.29	8.04	0.30	27.50
550.00	70.15	0.44	0.35	0.35	0.29	7.29	0.23	28.38
750.00	73.72	0.37	0.36	0.35	0.29	8.51	0.22	24.84
800.00	81.18	0.34	0.35	0.35	0.29	8.51	0.24	18.29
1 000.00	90.04	0.28	0.37	0.35	0.28	13.50	0.33	13.46
1 850.00	90.08	0.27	0.35	0.33	0.26	13.72	0.41	11.75
2 600.00	93.80	0.29	0.37	0.35	0.28	13.83	0.31	13.78
4 200.00	93.35	0.27	0.36	0.34	0.27	13.77	0.38	16.52

[1] 表示每个日龄相对于上一个日龄的变化量；**表示光照度为测量中心值，即测量范围内中心位置的值。

[1] denotes the variation of every day-old with respect to last; **denotes the illuminance is the value of measuring central.

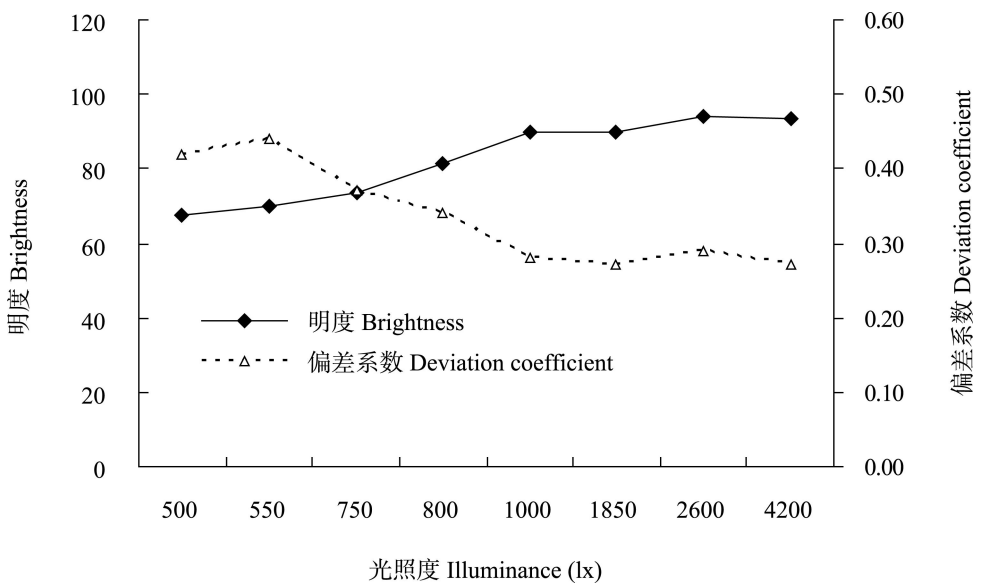

图 2 斜纹夜蛾幼虫的明度值、偏差系数与光照度的关系

Fig. 2　Relationship between the brightness, deviation coefficient of *Prodenia litura* larvae and illuminance

体色偏差系数、RGB 色差则正好相反，在低强度光照下，随光照度的增加而减少，在高光照度下，变化较小。*rgb* 的总平均值则基本无变化，三者之间存在很高的相关性，且遵循 $r+g\geq 2b$ 这一规律，结果表明斜纹夜蛾的幼虫体色变化在本实验研究的光照范围内跨度并不大，色彩的主要成分位于红绿之间，包括其间色（橙色），其余变化就在于明暗深浅了。

3　讨论

3.1　数值化研究昆虫体色的几个问题

采用数码相机探索昆虫体色问题是基于计算机视觉范畴，即不依赖于人眼对于颜色的判断。除了我们人类告诉计算机要如何去辨别颜色外，计算机本身对颜色一窍不通，RGB 颜色模型起源于模拟方式（连续量）而非数字化方式，它们实际上表示着色剂数量，其值取决于照明的光谱组成与强度（刘浩学等，2005），因此，在利用这种方式比较体色时，往往要考虑拍摄照片的质量，即拍摄照片时的环境。例如，比较一头昆虫在不同光照强度下拍出的照片，用人眼去比较发现极其相似，但是当我们用计算机视觉衡量时，发现差距还是较大的，这主要是因为人的眼睛带入了心理补偿量，校正了昆虫的色泽，即记忆色。因此，想要获取色彩较为准确的照片，在实验操作过程中，必须保证：①拍照环境的稳定性，即每张照片必须在同一拍照环境下和同一设备所获得。②标准光源，一般采用三基色荧光灯，色温 6 500 K。

RGB 颜色模型一共包括 256×256×256 种颜色（大约 1 680 万），事实上，以人对颜色的感知能力，人类能辨别的颜色类型大约为 6 000 多种，远小于 RGB 模拟出来的颜色（刑庆华，2005）。本实验中对颜色的数值化并不是为了还原颜色，而是为了去定量比较颜色，数值的大小在一定程度上有助于识别颜色，误差是不可避免的，只需要保证基本准确即可。实验所获得的颜色数据是一个统计量，并不能代表昆虫实际的颜色，事实上，昆虫体色每一个位置都有差异，统计的颜色值是包括了所有像素点的颜色值的平均值，是人眼看到的主观全部色彩和亮度感觉，虽然也可以根据其值找到对应的颜色，但不一定能找到虫体上与之完成对应的色泽，有些统计指标则是根据 RGB 值计算出来的，只是为了方便评价颜色类型，了解其变化规律。

3.2　几个颜色指标的探讨

体色偏差系数（*BDV*）是指昆虫表观体色明亮程度的分布，其实质是明度的标准差与平均值的比值，即变异系数。明度值作为体色偏差的评价指标，在一定程度上只能反映其明亮程度的变化，因为就算明度值相同，其颜色也不一定相同，真正决定颜色的还是 RGB 各分量，事实上，明度值是 RGB 值的一个综合量，与 RGB 值有很高的相关性，反映的是 RGB 各分量的均值；相对于单独用 RGB，使用明度值就能直接、客观地反映了昆虫的外观表型，而不需要用 3 个值分别去比较。

彩色指数是用来形容昆虫色彩程度的定量指标，RGB 色差是用于衡量两个颜色间的距离，这两者都是基于 RGB 色空间。其实，在 CIE-Lab 色空间中也有描述色彩丰富程度和色差的标准（彩度和 CIE 色差），事实上，采用 CIE-Lab 色空间作为评价指标比 RGB 色空间更为准确，因为 CIE-Lab 颜色模型是一个相对均匀的色空间，即相等的空间在视觉效果上是相对等差的；而 RGB 颜色模型是一个不均匀的色空间，在考虑不同颜色关系时，常会给人错误的印象。但是，在实际应用过程中，RGB 处理颜色相对简单，不需要经过复杂的转化，其实在转化过程中或多或少也有色彩的损失，因为 CIE-Lab 的色域比 RGB 大的多。如果在应用 RGB 计算时引入权重，就可以在一定程度减少了这种差异，且便于计算。

3.3 斜纹夜蛾幼虫的体色分化的动态及光照度变化对其影响

色彩源于各种各样的化合物，斜纹夜蛾幼虫的体色也不例外，其体色主要是由各种各样的色素构成的，斜纹夜蛾幼虫对体色的控制并不是随心所欲的，其变化离不开周围的环境，总的来说，斜纹夜蛾幼虫除了在环境中取食获得食物色素外，自身也能合成黑色素，黑色素的形成主要是由酪氨酸代谢产生的（Fuzeau, 1972），并不是所有的食物色素都可以被昆虫利用，不同昆虫对食物色素的利用也是不一样的，在本实验中，发现喂食人工饲料并不能获得类似人工饲料颜色的虫体，人工饲料做出来是黄色的，喂食得到的斜纹夜蛾幼虫却是乳白色的，但喂食甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner)和棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner)也得到了黄色的虫体。

Menzel 等（1973）研究发现昆虫体内的色素会随光照度的变化而变化，不同色素的变化情况不一样，随着光照度的增加，黑色色素的变化百分比略小于绿色色素。事实上，昆虫通过眼睛来感受环境的信号，会传递给虫体色素细胞，造成色素在这些色素细胞的存在情况，具体过程是怎样，至今还未有确切的解释。本实验中，随着光照度的增加，斜纹夜蛾幼虫的明度减小，但是，当光照度达到 1 000 lx 以后，斜纹夜蛾幼虫的明度基本不再变化，这可能是因为斜纹夜蛾幼虫的体壁结构引起的，昆虫的体壁一般分为表皮层和真皮层，表皮层一般是透明的，没有颜色的，但是，在蜕皮过程中，表皮的鞣化会发生醌骨化作用(由 Pryor（1940）在研究蜚蠊目（学名：Blattaria）卵壳鞘的鞣化过程中首次报告)，产生半透明的黑素化体壁，这一过程是可以叠加的、不可逆的（Richards *et al.* , 1967），这也是为什么体色会逐渐变暗的原因。斜纹夜蛾幼虫色彩则是由真皮层的色素变化引起的，这些色素以色素颗粒的形式存在真皮细胞中，本实验中光照度并不影响斜纹夜蛾幼虫的色泽，色泽的变化主要是由生长发育引起的，这是因为随着日龄的增加，表皮层的颜色掩盖了真皮层的颜色，这也是所谓的墨绿色和黑褐色。

斜纹夜蛾幼虫体色本身是复杂多变，在田间低龄幼虫的体色主要为绿色，高龄幼虫则变化较大，从土黄色到黑绿色都有（石宝才等，2009），这其实也是一个明度逐渐减小的过程，当明度达到 50 以下时，外观看上去是黑色的，而当明度达到 160 以上时，基本可以看做是白色（实际上是灰白色的），斜纹夜蛾幼虫真正的色彩范围其实并不大，并没有发现带蓝色的虫体，当然，这并不是说自然界没有蓝色的斜纹夜蛾幼虫，这只能说明在本实验条件下没有发现蓝色虫体。本实验通过多因素方差分析得到了日龄和光照处理对体色的重要性，得到了光照度对于斜纹夜蛾幼虫体色指标的影响主要为明暗程度，对色彩程度影响不大，且光照度的影响阈值大约为 1 000 lx。已有研究表明，光照度对昆虫体色是有影响的，赤蛱蝶 *Vanessa virginiensis* 养在光亮环境中，体色变淡，生活在黑暗环境中，体色较深（邓小华，2006），但是，最近关于光照度对昆虫体色的研究并不多，体色变深，这可能就是因为传统方法无法定量形容明暗程度，只能描述颜色类别。因此，本文通过引入新的颜色评价体系，为解决一些导致体色变化较小的环境因子研究提供了一个新的思路和方法。

参考文献 (References)

Andrew K, Bethany F, Sonia A, 2004. Quantifying monarch butterfly larval pigmentation using digital image analysis. *The Netherlands Entomological Society Entomologia Experimentalis et Applicata*, 113(2): 145–147.

Eric AH, Michael SB, 2000. A review of colour and pattern polymorphisms in anurans. *Biological Journal of the Linnean Society*, 70(4): 633–655.

Fuzeau B, 1972. Pigments and colour change. *Annual Review of Entomology*, 17(1): 403–424.

Matthew S, Murat O, Thomas C, 2011. A new method for quantifying colour of insects. *Florida Entomological Society*, 94(2): 201–207.

Menzel R, Knaut R, 1973. Pigment movement during light and chromatic adaptation in the retinula cells of *Formica polyctena*

(Hymenoptera, Formicidae). *Journal of Comparative Physiology*, 86(2): 125–138.

Pryor MGM, 1940. On the Hardening of the cuticle of insects. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 128(852): 393–407.

Richards, AG, 1967. Sclerotization and the localization of brown and black colours in insects. *Zoologische Jahrbuecher Abteilung fuer Anatomie und Ontogenie der Tiere*, 84: 25–62.

Tanaka S, 2004. Environmental control of body-colour polymorphism in the American grasshopper *Schistocerca american*. *Annals of the Entomological Society of America*, 97(2): 293–301.

Bruce FC 著, 2005. 色彩管理. 刘浩学, 梁炯, 武兵译. 北京: 电子工业出版社. 15–69.[Bruce FC, 2005. Color Management. Liu HX, Liang J, Wu BY. Beijing: *Electronics Industry Press*.]

曹成全, 张合伦, 陈海霖, 黄成军, 2010. 磁场对东亚飞蝗体色的影响. 昆虫知识, 47(2): 340–342. [Cao CQ, Zhang HL, Chen HL, Huang CJ, 2010. Influence of magnetic field on body colour of locusta migratoria manilensis. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(2): 340-342.]

陈永兵, 张纯胄, 胡丽秋, 1999. 温度与光照对甜菜夜蛾幼虫体色变化的影响. 温州农业科技, (4): 26–28.[Chen YB, Zhang CZ, Hu LQ, 1999. Influence of temperature and illumination to the change of the body color of *Prodenia litura* (Fabricius) larvae. *Wenzhou Agricultural science and technology.* (4): 26–28.]

程茂高, 乔卿梅, 原国辉, 2005. 昆虫体色分化研究进展. 昆虫知识, 42(5): 502–505. [Cheng MG, Qiao QM, Yuan GH, 2005. Progress of the research on body-color diversity in insects. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(5): 502-505.]

邓小华, 2006. 环境生态学. 北京: 中国农业出版社. 50–80. [Deng XH, 2006. Environmental Ecology. Beijing: China agriculture press. 50-80.]

黄萍, 钟铮, 吴玲玲, 刘卫华, 2010. 曲伏前列腺素滴眼液对虹膜颜色改变的影响. 眼科研究, 28(9): 869–872. [Huang P, Zhong Z, Wu LL, Liu WH, 2010. Study of iris color change after use of travoprost. *Chinese Ophthalmic Research*, 28(9): 869-872.]

何国兴, 2004. 颜色科学. 上海: 东华大学出版社. 65–171.[He GX, 2004. Color Science. Shanghai: *Donghua University Press*. 65-171.]

刘绍友, 仵均祥, 安英鸽, 李增义, 胡作栋, 胡美绒, 2000. 桃蚜体色生物型与寄主关系的研究. 西北农业大学学报, 28(3): 11 – 14.[Liu SY, Wu JX, An YG, Li ZY, Hu ZD, Hu MR,2000.Studies on the influence of host plant on stability of body-color biotypes of the green peach aphid, *Myzus persicae*. *The Journal of Kasetsart University* , 28(3): 11–14.]

李小梅, 马如, 陈立荣, 2002. 颜色技术原理. 北京: 化学工业出版社. 39–50.[Li XM, Ma R, Chen LR, 2002.The theory of color technology. Beijing: *Chemical Industry Press*.39-50.]

樊永胜, 朱道弘, 2009. 昆虫体色多型及其调控机理. 中南林业科技大学学报, 21(9): 84 – 88. [Fan YS, Zhu DH, 2009. Body-color polymorphism and regulatory mechanism of insects. *Journal of Central South Forestry University*, 21(9): 84-88.]

石宝才, 路虹, 宫亚军, 魏书军, 康总江, 2009. 斜纹夜蛾幼虫的识别与防治. 中国蔬菜, (19): 18–19.[Shi BC, Lu H, Gong YJ, Wei SJ, Kang ZJ,2009. Identification and prevention of *Prodenia litura*. *Chinese Vagetables*, (19): 18–19.]

陶霖密, 徐光祐, 2001. 机器视觉中的颜色问题及应用. 科学通报, 46(3): 178–190.[Tao LM, Xu GY, 2001. The color problem and application in machine vision. *Science Bulletin*, 46(3): 178–190.]

文礼章, 龚碧涯, 许浩, 杨中侠, 2012. 甘薯天蛾幼虫体色分化动态的数值化评价指标及其应用. 昆虫学报, 55(1): 101–115. [Wen LZ, Gong BY, Xu H, Yang ZX, 2012. Numerical evaluation indices for differentiation dynamics of body-color of larvae of Agrius convolvuli (Linnaeus) (Lepidoptera: Sphingidae) and its application. *Acta Entomologica Sinica*, 55(1): 101-115.]

吴健新, 李翠华, 2004. 视频序列中基于肤色的人脸实时检测. 厦门大学学报, 43(3): 321 – 325. [Wu JX, Li CH, 2004. Real-time face detection based on skin-color in video sequence. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 43(3): 321-325.]

刑庆华, 2005. 色彩. 南京: 东南大学出版社. 1–55.[Xin QH, 2005. Color. Nanjing: *Dongnan University Press*.1-55.]

熊延坤, 张青文, 2003. 影响大蜡螟幼虫体色的环境因素初探. 昆虫知识, 40(1): 52–54. [Xiong YK, Zhang QW, 2003. Effect of environmental conditions on the body color of galleria mellonella larvae. *Chinese Bulletin of Entomology*, 40(1): 52-54.]

徐卫华, 2011. 飞蝗型变分子机理研究前沿. 应用昆虫学报, 48(2): 227–230. [Xu WH, 2011. Advance on the molecular mechanism of phase transition in the migratory locust. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 227-230.]

杨宏伟, 张云, 2005. 计算机视觉技术在昆虫识别中的应用进展. 生物信息学, 3(3): 133 – 136. [Yang HW, Zhang Y, 2005. Application and prospect of computer vision technique in identifying insect. *China Journal of Bioinformatics*, 3(3): 133-136.]

杨燕军, 陈有亮, 2004. 颜色的仪器测定法及其在肉色测定中的应用. 肉类工业, 273(1): 43-45.[Yang YJ, Chen YL, 2004.

[Yang YJ, Chen YL, 2004. Determination of the color of the instrument and its application in the determination of color. *The meat industry*, 273(1): 43-45.]

杨振亚, 王勇, 杨振东, 王成道, 2009. 一种新的 RGB 色差度量公式, 计算机应用, 29(2): 465–467. [Yang ZY, Wang Y, Yang ZD, Wang CD, 2009. A new color difference formula in RGB color space. *Journal of Computer Applications*. 29(2): 465-467.]

于福洋, 张伟东, 刘佳, 2008. 色彩模式间颜色的数字化比较. 硅谷, 19(148): 15.[Yu FY, Zhang WD, Liu J,2008. Comparison between digital color in color model. *Silicon Valley*, 19(148): 15.]

阎秀峰, 王洋, 尚辛亥, 2003. 温室栽培光强和光质对高山红景天生物量和红景天甙含量的影响. 生态学报, 23(5): 841 – 849.[Yan XF, Wang Y, Shang XH, 2003. Effects of greenhouse light intensity and quality on biomass and salidroside in roots of *Rhodiola sachlinensis*. *Acta Ecological Sinica*, 23(5): 841–849.]

赵红霞, 周丰昆, 刘静波, 2004. 基于计算机视觉的肉色量化研究. 食品科学, 25(10): 95–100. [Zhao HX, Zhou FK, Liu JB, 2004. Study on the color quantification of pork with computer vision system. *Food Science*, 25(10): 95-100.]