Global Science Publishing

猪胆粉粉末颜色与胆红素含量相关性研究

何萌，陈玥，张洁，俄见卓玛，周蕊，廖予菲（通讯作者）
陕西国际商贸学院药学院，陕西咸阳
DOI:10.62836/medicine.v3i5.1520

摘要：目的：探讨猪胆粉粉末颜色色度值与胆红素含量的相关性，建立基于色度值的胆红素含量快速预测与判别方法。方法：收集30批市售猪胆粉，采用分光测色仪测定粉末CIE L*a*b*色度值；采用HPLC法（450nm）测定胆红素含量，HPLC-ELSD法测定猪去氧胆酸含量，烘干法测定水分；进行Pearson相关、线性回归与ROC判别分析。结果：30批样品胆红素含量为0.78～3.02mg·g^{-1}，b*值为10.78～40.27；b*值与胆红素含量呈极显著正相关（r=0.941，P<0.01），a*值与之呈正相关（r=0.789，P<0.01），L*值与之呈负相关（r=−0.788，P<0.01），而各色度值与猪去氧胆酸含量、水分均无显著相关（P>0.05）；单变量回归方程“胆红素=−0.0824+0.0780b*”（R2=0.886）可良好预测胆红素含量；以胆红素1.50mg·g^{-1}为界，b*值判别的ROC曲线下面积为0.971，阈值取21.7时灵敏度100%、特异度90.9%。结论：猪胆粉b*值可客观量化其黄色泽，与胆红素含量高度相关，可作为猪胆粉质量控制与入库验收的快速筛查指标。
关键词：猪胆粉；色度值；胆红素；猪去氧胆酸；相关性分析；快速评价

Study on the Correlation Between the Color of Pig Gall Powder and Bilirubin Content

Meng He, Yue Chen, Jie Zhang, Öjien Choema, Rui Zhou, Yufei Liao (Corresponding Author)
Shaanxi University of International Trade & Commerce, Xianyang, Shaanxi

Abstract: Objective: To investigate the correlation between the colorimetric values of porcine bile powder and its bilirubin content, and to establish a rapid prediction and discrimination method for bilirubin content based on these colorimetric values. Methods: Thirty batches of commercially available porcine bile powder were collected. The CIE L*a*b* colorimetric values of the powders were measured using a spectrophotometric colorimeter; bilirubin content was determined by HPLC (λ = 450 nm); the content of porcine deoxycholic acid was quantified by HPLC-ELSD; and moisture content was determined by drying. Statistical analyses included Pearson correlation analysis, linear regression analysis, and ROC discrimination analysis. Results: The bilirubin content of the 30 batches of samples ranged from 0.78 to 3.02 mg·g^{-1}, while the b* values ranged from 10.78 to 40.27. The b* value exhibited a highly significant positive correlation with bilirubin content (r = 0.941, P <0.01), the a* value showed a positive correlation (r = 0.789, P <0.01), whereas the L* value demonstrated a negative correlation (r = −0.788, P <0.01). No significant correlations were observed between any of the colorimetric values and either porcine deoxycholic acid content or moisture content (P> 0.05). The univariate regression equation “bilirubin = −0.0824 + 0.0780b*” (R^2 = 0.886) provided satisfactory predictive performance for bilirubin content. Using a cutoff value of 1.50 mg·g^{-1} for

*2024年陕西省大学生创新训练计划项目 基于“辨色论质”的猪胆粉质量控制研究 编号：S2024131230060。

bilirubin, the area under the ROC curve for discrimination based on the b* value was 0.971; when the threshold was set at 21.7, the sensitivity reached 100% and the specificity was 90.9%. Conclusion: The b* value of porcine bile powder objectively quantifies its yellow hue, exhibits a strong correlation with bilirubin content, and can serve as a rapid screening indicator for quality control and warehouse acceptance of porcine bile powder.

Keywords: pig bile powder; chromaticity value; bilirubin; pig deoxycholic acid; correlation analysis; rapid evaluation

1 引言

“辨色论质”是中药传统经验鉴别核心，药材色泽可反映内在品质，但传统判断主观性强、缺少量化标准。色度学利用分光测色仪获取CIE Lab色度参数，将颜色转化为客观数值，已有研究证明药材色度与有效成分含量存在关联，为性状数字化质控提供思路[1]。

猪胆粉由猪胆汁干燥制得，是人工牛黄、胆酸类制剂重要原料，主要含胆汁酸与胆红素。现行标准多以猪去氧胆酸为检测指标，依赖液相检测；胆红素是特征色素，决定样品黄橙色调，易受加工、贮藏条件影响，尚缺少快速筛查方法。行业常凭色泽深浅经验评判品质，该观点未得到量化证实，颜色指标也未纳入质量评价[2]。

本研究收集30批不同产地、不同干燥工艺的猪胆粉，测定色度值，同时采用HPLC、HPLC-ELSD分别测定胆红素、猪去氧胆酸含量，通过相关分析、回归建模及ROC判别，探究色度参数与内在成分的定量关联，为猪胆粉快速验收与质量控制提供客观依据[3]。

2 材料与方法

采用高效液相色谱仪、分光测色仪、电子天平等仪器；胆红素、猪去氧胆酸对照品购自中检院，甲醇、乙腈等为色谱纯或分析纯。30批猪胆粉样品取自多地，含冻干及烘干样品，鉴定合格，4℃避光保存。测定色度L*、a*、b*；HPLC-DAD测胆红素，HPLC-ELSD测猪去氧胆酸，烘干法测水分。方法学验证符合要求。运用SPSS 26.0、Python 3.13分析，采用Pearson、Spearman相关、多元线性回归及ROC判别分析，$P<0.05$为差异具有统计学意义[4]。

3 结果与分析

3.1 30批样品测定结果

30批猪胆粉的色度值及主要成分含量见**表1**、**图1**。胆红素含量为0.78～3.02mg·g^{-1}，均值1.90 mg·g^{-1}，批间差异近4倍；L*为48.0～88.0，a*为2.6～17.6，b*为10.8～40.3，变异系数分别为14.2%、42.9%与29.7%，批间颜色差异明显，为相关分析提供了足够的含量-颜色梯度；猪去氧胆酸含量为146～297mg·g^{-1}，均在常用标准限度之上；水分为3.2%～8.2%。4批冻干工艺样品（S1、S2、S5、S11）的胆红素含量均值为2.71 mg·g^{-1}，明显高于其余烘干样品的总体水平，提示冻干工艺有利于色素成分保留，与文献报道的冻干猪胆粉质量优势相符[5]。胆红素色谱峰分离良好，各批间峰面积差异明显（**图2**），与粉末外观的色差梯度相呼应。从分布看（**图1b**），L*主要集中于55～75，a*集中于5～13，b*集中于18～32，均近似单峰分布，未出现双峰混杂或极端离群，样本颜色状态连续可变，适合开展相关性分析[4]。

3.2 色度值与胆红素含量的相关性

Pearson相关分析结果见**表2**、**图3**。b*值与胆红素含量呈极显著正相关（$r=0.941$，$P<0.01$），散点近似直线，低、高含量端均无系统偏离；a*值与胆红素含量呈极显著正相关（$r=0.789$，$P<0.01$），但散点离散度较b*大；L*值与胆红素含量呈极显著负

表1. 30批猪胆粉色度值及主要成分测定结果

批号	L*	a*	b*	胆红素/(mg·g⁻¹)	猪去氧胆酸/(mg·g⁻¹)	水分/%
S1	51.3	17.6	37.9	3.02	254	6.5
S2	56.3	16.0	37.7	3.01	214	7.7
S3	48.0	17.5	40.3	2.91	166	6.0
S4	56.0	10.0	33.1	2.72	275	3.6
S5	51.5	10.4	35.5	2.70	273	8.2
S6	57.3	17.1	34.7	2.55	242	3.9
S7	62.4	10.9	29.8	2.46	210	5.9
S8	66.1	9.9	30.4	2.20	191	6.1
S9	61.0	11.3	23.8	2.17	246	7.8
S10	61.5	9.1	25.0	2.17	208	3.5
S11	55.5	12.3	25.2	2.12	207	3.2
S12	58.3	14.7	28.8	2.09	234	3.5
S13	66.9	13.0	26.7	2.08	225	5.8
S14	56.9	7.9	27.3	2.04	233	5.9
S15	65.1	12.4	23.2	1.93	181	6.7
S16	68.7	6.7	27.4	1.86	222	5.5
S17	59.8	7.4	27.1	1.83	213	7.5
S18	58.5	11.7	24.8	1.77	268	7.2
S19	73.0	3.5	24.3	1.53	272	7.7
S20	72.6	9.8	21.7	1.49	297	6.0
S21	88.0	6.6	19.8	1.44	181	6.8
S22	68.4	4.6	21.7	1.43	226	6.3
S23	67.5	9.1	16.3	1.40	232	4.7
S24	66.0	4.4	18.1	1.38	176	6.3
S25	71.2	10.4	20.4	1.38	146	4.9
S26	75.4	4.7	16.5	1.35	227	7.4
S27	65.3	9.9	26.4	1.30	282	6.2
S28	76.6	5.6	14.0	1.01	197	3.5
S29	65.4	2.6	13.1	0.84	165	3.2
S30	82.2	5.3	10.8	0.78	202	4.4

注：L*、a*、b*分别为明度、红绿色度与黄蓝色度值（D65光源、10°观察角，n=5）。

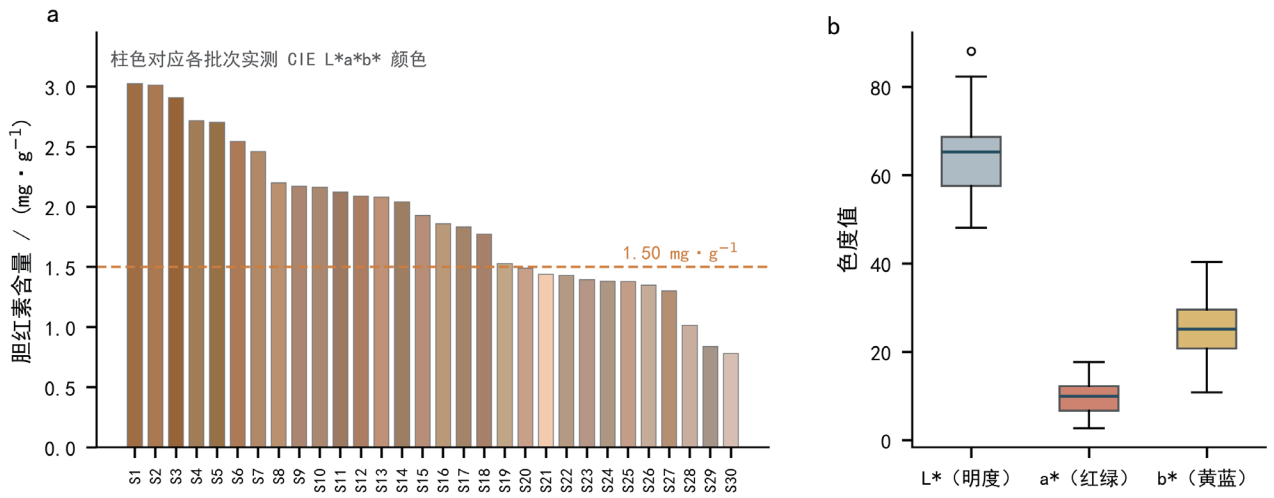


图1. 30批样品胆红素含量排序（a，柱色对应各批次实测颜色）及色度参数分布（b）

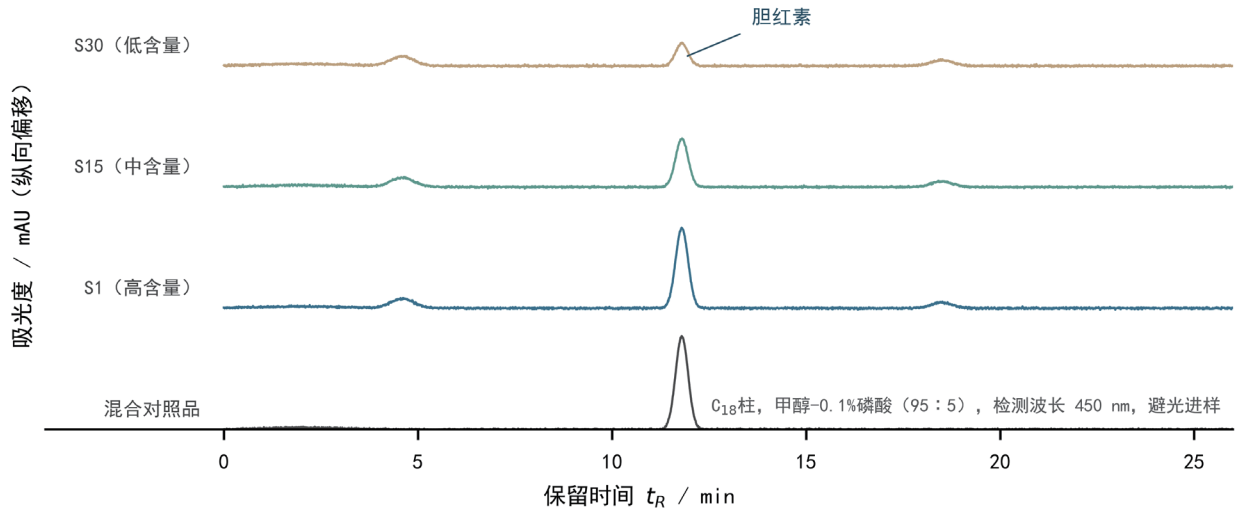


图2. 胆红素混合对照品及高、中、低含量样品的HPLC色谱图（450 nm）

相关（r=−0.788，P<0.01），即胆红素含量越高，粉末越黄且越暗、红色调越明显。Spearman秩相关复核结论与Pearson一致，结果稳健。三项参数中b*值的相关系数最大、散点带最窄，提示黄蓝色度是表征胆红素含量的最敏感颜色维度，与胆红素作为黄色色素直接决定粉末黄色深浅的化学属性相吻合。相关性强度呈现b*>a*≈L*的次序，亦符合三参数的物理意义：b*直接度量黄色深浅，对胆红素呈色的响应最直接；L*同时受粉末粒度、装样孔隙等物理因素干扰，a*可能受共存杂色成分影响，故相关性稍逊。

3.3 胆红素含量的预测模型

以L*、a*、b*为自变量建立多元线性回归模型：胆红素=0.654−0.008 1L*+0.021 6a*+0.061 2b*（R2=0.902，调整R2=0.891，F=80.0，P<0.01）。检验显示仅b*的偏回归作用有统计学意义（t=6.42，P<0.01），a*与L*均不显著（P>0.05），表明三者携带的颜色信息高度重叠，b*可单独承担预测功能。据此建立单变量预测方程：胆红素=−0.082 4+0.078 0b*（R2=0.886，RMSE=0.21 mg·g^{-1}），即b*每升高10个单位对应胆红素含量增加约0.78mg·g^{-1}。预测值与实测值均匀分布于1∶1线两侧，残差均在±0.40 mg·g^{-1}以内，未见端点偏倚（**图4a**），该精度可满足批量验收的快速筛查需要，超出筛查范围的样品再交由HPLC法定量确证。

3.4 基于b*值的判别分析

以胆红素含量1.50 mg·g^{-1}为界将样品分为高、低含量两组（19批与11批），绘制ROC曲线（**图4b**）。b*单参数判别的AUC为0.971，按约登指数确定的最佳阈值为21.7，此时灵敏度100%、特异度90.9%，30批中仅S27一批被误判（b*=26.4而胆红素1.30 mg·g^{-1}）；阳性预测值95.0%，阴性预测值100%，即b*值低于阈值时基本可排除高胆红素含量的可能。引入L*、a*建立三参数Logistic模型，AUC为0.976，较单参数仅提高0.005，收益有限，支持以b*单指标实施现场判别。实际应用中可将色谱定量集中于b*值偏低或临近阈值的批次。

3.5 色度值与猪去氧胆酸及水分的相关性

L*、a*、b*与猪去氧胆酸含量的相关系数分别为−0.208、0.126、0.271，与水分的相关系数分别为−0.023、0.004、0.242，均无统计学意义（P>0.05，**表2**），胆红素与猪去氧胆酸含量间亦无显著相关（r=0.206）。这符合二者的化学属性：胆红素为四吡咯色素成分，是粉末颜色的直接物质基础，而胆汁酸类为无色成分，其含量差异不以色泽形式呈现；水分在3%～8%范围内的波动尚不足以引起可

表2. 色度值与各指标含量的Pearson相关系数（n=30）

色度参数	胆红素/(mg·g⁻¹)	猪去氧胆酸/(mg·g⁻¹)	水分/%
L*	−0.788**	−0.208	−0.023
a*	0.789**	0.126	0.004
b*	0.941**	0.271	0.242

注：**P<0.01；无标记者P>0.05。

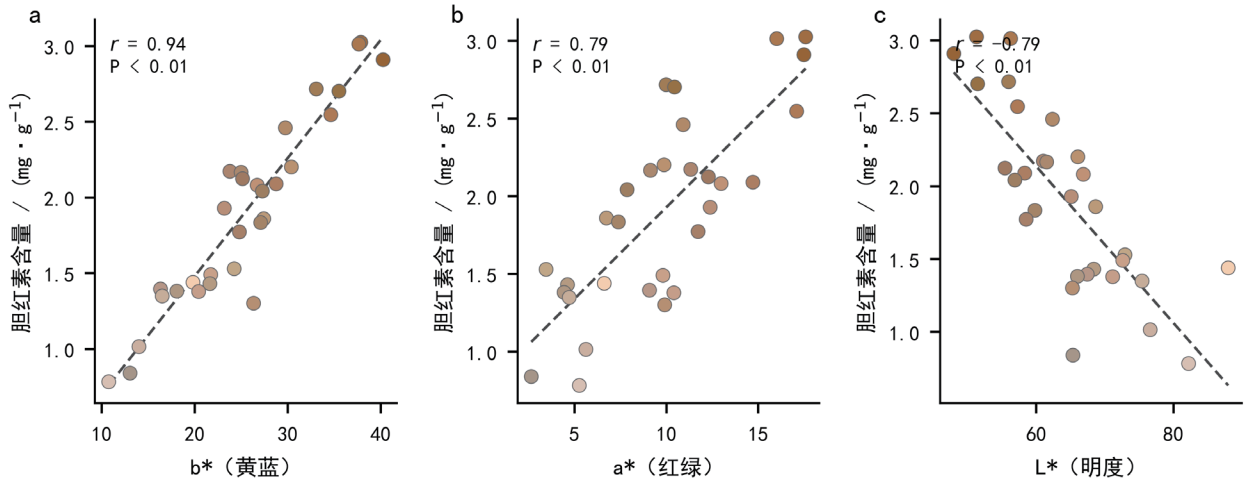


图3. 色度值b*（a）、a*（b）、L*（c）与胆红素含量的散点及回归线

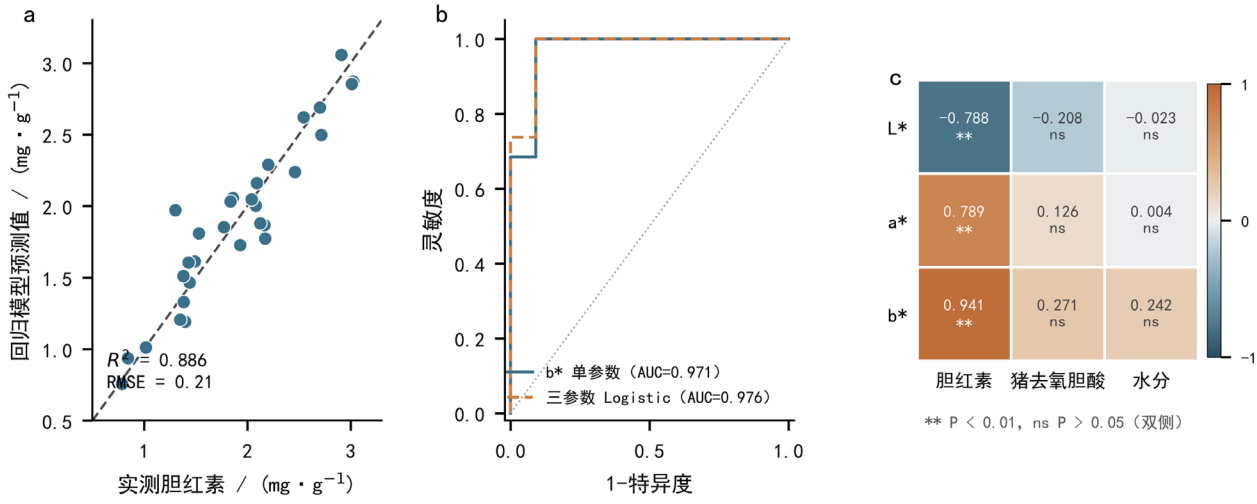


图4. 单变量回归模型的预测效果（a）、b*值与Logistic模型的ROC曲线（b）及色度值与各指标的相关系数热图（c）

检出的表观颜色变化。上述结果仅能用于色素环节的质量评价，不能据此外推效价成分含量。

4 讨论

本研究以30批市售猪胆粉验证“以黄为佳”的经验：黄蓝色度b*与胆红素含量高度正相关（r=0.941），在较宽含量区间线性稳定。胆红素的共轭结构使其含量升高时黄色加深、明度L*下降，偏回归分析表明仅b*即可作为简洁稳健的评价指标。色度参数与猪去氧胆酸无显著相关性，说明颜色不能替代胆汁酸的仪器检测，但b*可专一反映胆红素的异常，提示原料掺伪、高温加工或色素氧化等问题。该测色初筛操作简便快速，适合入库预检，可减少色谱检测量、降低检验成本，也可用于

贮藏期色素降解监测；相较于植物药材，猪胆粉颜色主要由胆红素主导，预测模型更简单可靠。本研究样本量有限，判别分界为经验值，模型稳定性有待扩大样本验证；湿度、粉末均匀度、装样方式会干扰色度结果，临近阈值样品仍需以HPLC作为最终判定标准。

5 结论

猪胆粉粉末颜色可由色差仪客观量化，黄蓝色度值b*与胆红素含量呈极显著正相关（r=0.941，P<0.01），预测方程“胆红素=−0.082 4+0.078 0b*”的R2达0.886；以b*≥21.7为阈值可快速识别胆红素含量不低于1.50 $mg·g^{-1}$的样品，灵敏度与特异度分别为100%和90.9%。色度值与猪去氧胆酸含量无显著相关，b*值可作为胆红素环节的快速筛查指标，与现行胆汁酸含量测定方法互为补充，为猪胆粉质量控制和入库验收提供外观数字化的辅助评价手段，亦可为含猪胆粉制剂的外观一致性控制提供参考。

参考文献

[1]李倩,艾青青,兰志琼,等.基于现代色度原理研究大黄蒽醌类成分含量与其颜色的相关性[J].中药材,2019,42(1):62-65.
[2]蒲昕颖,陈晓娇,徐雅静,等.基于“辨色论质”的红大戟色泽与蒽醌类成分的相关性研究[J].时珍国医国药,2023,34(9):2288-2290.
[3]李志万,马强,袁永生,等.HPLC-ELSD法对猪胆粉中猪去氧胆酸的含量测定研究[J].中国实验方剂学杂志,2005,11(5):14-16.
[4]唐元军,陈育琳,陈庆辉.HPLC-ELSD法同时测定猪胆粉中猪去氧胆酸和鹅去氧胆酸的含量[J].中药新药与临床药理,2010,21(6):651-653.
[5]王进吉,邹琼,张磊,等.冻干猪胆粉的HPLC指纹图谱和含量测定方法的研究[J].云南中医中药杂志,2022,43(4):64-69.

Copyright © 2026 by author(s) and Global Science Publishing Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access