Hans Journal of Food and Nutrition Science 食品与营养科学, 2026, 15(6), 609-620
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjfns
https://doi.org/10.12677/hjfns.2026.156064

Hans汉斯

基于pH值响应的甲基红/溴百里酚蓝指示膜的研究

吴天祺[1]，田海蓉[1]，董晓光[1]，雷登文[2]，邢霁云[1]，杨裕春[1]，吴若侨[1]，张静茹[1]，孙东宇[1*]，杨　洋[1*]

[1]北京农业职业学院，食品与生物工程学院，北京
[2]广东省农业科学院，蚕业与农产品加工研究所，广东 广州

收稿日期：2026年8月25日；录用日期：2026年10月22日；发布日期：2026年11月2日

摘　要

为开发一种高效可视化食品新鲜度指示标签，本研究以羧甲基纤维素钠、海藻酸钠、卡拉胶为复合成膜基质，甘油为增塑剂，甲基红－溴百里酚蓝复配体系为显色指示剂，采用倾注流延法制备pH响应可视化指示膜，通过单因素试验系统探究了不同指示剂配比下可视化标签的pH响应特性、贮藏颜色稳定性、氨气敏感性，并进一步探究了添加量、多糖基质组成对指示膜机械性能及透光性能的调控规律。结果表明，0.3 mL添加量下甲基红与溴百里酚蓝按3:1复配时指示标签兼具储藏稳定性和碱性响应灵敏度。此外，甘油、卡拉胶与海藻酸钠可定向调控复合膜的力学强度与透光性能，本研究为生鲜食品智能可视化检测的开发提供了实验依据与技术参考。

关键词

pH响应指示膜，智能指示标签，新鲜度，复合膜

Research on Methyl Red/Bromothymol Blue Indicator Membrane Based on pH Response

Tianqi Wu[1], Hairong Tian[1], Xiaoguang Dong[1], Dengwen Lei[2], Jiyun Xing[1], Yuchun Yang[1], Ruoqiao Wu[1], Jingru Zhang[1], Dongyu Sun[1*], Yang Yang[1*]

[1]College of Food and Bioengineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing
[2]Sericultural & Argi-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou Guangdong

Received: August 25, 2026; accepted: October 22, 2026; published: November 2, 2026

*共同通讯作者。

文章引用: 吴天祺, 田海蓉, 董晓光, 雷登文, 邢霁云, 杨裕春, 吴若侨, 张静茹, 孙东宇, 杨洋. 基于 pH 值响应的甲基红/溴百里酚蓝指示膜的研究[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(6): 609-620. DOI: 10.12677/hjfns.2026.156064

Abstract

To develop an efficient and visual food freshness indicator label, Sodium carboxymethyl cellulose (CMC), Sodium alginate (SA) and Carrageenan (Car) were used as the composite membranes-forming matrix, Glycerol (Gly) as the plasticizer, and the Methyl red-Bromothymol blue compound system as the color indicator in this study. The pH response characteristics, storage color stability and ammonia sensitivity of the visual labels under different indicator ratios were systematically explored through single-factor experiments. Furthermore, the regulation laws of the addition amount and polysaccharide matrix composition on the mechanical properties and light transmission performance of the indicator film were investigated. The results showed that when Methyl red and Bromothymol blue are compounded at a ratio of 3:1 at an addition amount of 0.3 mL, the indicator label has both storage stability and alkaline response sensitivity. In addition, Gly, Car and SA can directionally regulate the mechanical strength and light transmission performance of the composite film. This study provides experimental basis and technical reference for the development of visual detection of fresh food.

Keywords

pH-Responsive Indicator Film, Intelligent Indicator Label, Freshness, Composite Membranes

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers 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

1. 引言

生鲜畜禽肉富含优质蛋白质、氨基酸与水分，是居民膳食中核心营养来源，造成肉品风味劣化、品质下降，存在食品安全隐患[1]。消费者长期依靠包装印刷保质期判断肉品新鲜程度，一旦冷链断链、贮藏温度波动，极易出现误判，既造成大量生鲜食材浪费，也给市场食品安全监管带来巨大压力，因此开发可直接贴合肉品包装、低成本可视化新鲜度指示材料具有重要现实意义与应用价值[2]。

pH 响应型指示膜能够随环境 pH 变化产生肉眼可识别色彩转变，无需精密检测设备即可直观反馈肉类腐败程度，近年来成为生鲜肉无损监测领域研究热点[3]。作为决定可视化膜灵敏度与识别区间的关键组分，指示剂的选择与基质配伍一直是研究核心。在色素选择上，郑辉等[4]利用花青素与姜黄素的协同变色效应制备智能标签，对猪肉新鲜度进行检测，能够有效反映其新鲜程度；罗远兰[5]等人利用姜黄素作为显色指示剂制备天然蚕丝纳米纤维膜，有效地应对果蔬和肉制品等新鲜度的检测；吴炫烨等[6]利用姜黄素的在不同 pH 值下的颜色变化复配海藻酸钠制备指示膜，有效的检测鱼肉新鲜度。

本研究以羧甲基纤维素钠、海藻酸钠、卡拉胶复合成膜体系，配合甘油为增塑剂，甲基红－溴百里酚蓝复配体系为 pH 显色指示剂制备可视化标签。通过单因素试验探究各组分添加量对可视化标签的影响，为肉制品的无损实时监测绿色可视化包装提供新材料与理论技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料与试剂

羧甲基纤维素纳、一水合柠檬酸、碳酸钠：国药集团化学试剂有限公司；海藻酸钠、甘油、甲基红：

上海麦克林生化科技股份有限公司；卡拉胶：北京酷来搏科技有限公司；溴百里酚蓝：天津市永大化学试剂有限公司。

2.2. 仪器与设备

DK-S26 电热恒温水浴锅：上海冉绘实业有限公司；CP214 电子天平：美国奥豪斯公司；雷磁 PHS-3E 型台式酸度计：上海仪电科学仪器股份有限公司；M650DS 紫外可见分光光度计：上海美普达仪器有限公司；HS20500D 台式超声波清洗机：天津市恒奥科技发展有限公司；CM-3700A 分光测色计：柯尼卡美能达(中国)投资有限公司；TMS-PRO 食品物性分析仪：美国 FTC 公司。

2.3. 实验方法

2.3.1. 可视化标签的制备

准确称量羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose, CMC)、甘油(Glycerol, GLY)、卡拉胶(Carrageenan, Car)、海藻酸钠(Sodium alginate, SA)若干，加入 50 mL pH4 缓冲溶液，60℃水浴恒温加热 230 min。配置 0.4%甲基红溶液与 1%溴百里酚蓝溶液，随后按 4:1、3:1、2:1、1:1 复配制成混合指示剂，分别取 0.1 mL、0.3 mL、0.5 mL 将其加入多糖溶液中，复热 10 min，500 w 超声处理 40 min 制的成膜液。采用倾注流延法，取 20 g 成膜液倾注在一次性培养皿中，置于 50℃烘箱干燥 14 h，得到可视化标签。

2.3.2. 混合指示剂 pH 响应

根据左海根[7]等人的研究稍作修改，在试管中分别加入 8 mL pH 值为 3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13 的缓冲溶液(pH 3~8 缓冲溶液通过一水合柠檬酸溶液和磷酸二氢钾配制，pH 9~11 缓冲溶液通过碳酸氢钠和氢氧化钠配置，pH 12~13 缓冲溶液通过甘氨酸和氢氧化钠配置)，再加入 95 微升混合指示剂，观察溶液颜色变化，同时采用紫外可见分光光度计测定吸光度，扫描范围为 300~800 nm。

2.3.3. 可视化标签的颜色稳定性

参考荣丽岩[8]等人的研究稍作修改，将可视化标签置于一次性培养皿中保存。分别将其放置 25℃、4℃、−18℃贮藏，贮藏时间与鲜肉保持一致，6 天后测量颜色变化。使用色差仪测定指示膜变色前后的 L、a、b 值，总色差(ΔE)计算如下所示：

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}$$

式中：L、a、b 为变色后可视化标签参数；L_0、a_0、b_0 为可视化标签的初始颜色参数。

2.3.4. 可视化标签的氨气敏感性

参考李雪[9]等人的研究加以修改，将可视化标签裁成 1.5 cm × 1 cm，固定在培养皿盖上，倒扣于装有 10 mL 0.2%氨水的一次性培养皿，使用色差仪测定指示膜变色后的 L、a、b 值，及标准白板的初始颜色参数。

2.3.5. 可视化标签单因素实验探究

称取羧甲基纤维素纳 1 g，卡拉胶 0.4 g，海藻酸钠 0.06 g，甘油 0.15 g，加入 50 ml pH 为 4 的缓冲溶液作为对照，记为 CK，随后将其置于 50℃的烘箱中干燥揭膜，保存备用。

(1) 甘油对可视化标签的影响

称取羧甲基纤维素纳 1 g，卡拉胶 0.4 g，海藻酸钠 0.06 g，加入 50 ml pH 为 4 的缓冲溶液，分别添加 0.1、0.2 g 甘油，分别记为 GLY-0.1、GLY-0.2，随后将其置于 50℃的烘箱中干燥揭膜，保存备用。

(2) 卡拉胶对可视化标签的影响

称取羧甲基纤维素纳 1 g，甘油 0.15 g，海藻酸钠 0.06 g，加入 50 ml pH 为 4 的缓冲溶液，分别添加 0.3、0.5 g 卡拉胶，分别记为 Car-0.3、Car-0.5，随后将其置于 50℃的烘箱中干燥揭膜，保存备用。

(3) 海藻酸钠对可视化标签的影响

称取羧甲基纤维素纳 1 g，甘油 0.15 g，卡拉胶 0.4 g，加入 50 ml pH 为 4 的缓冲溶液，分别添加 0.04、0.08 g 海藻酸钠，分别记为 SA-0.04、SA-0.08，随后将其置于 50℃的烘箱中干燥揭膜，保存备用。

1) 可视化标签的厚度

用千分尺分别在可视化标签上随机取 5 个点，精确到 0.001 mm，计算得出平均值为指示膜的厚度。

2) 可视化标签的机械性能的测定

参考王恩胜[10]的研究稍作修改，将样品裁剪为 45 mm × 10 mm 的矩形，设置拉伸长度为 15 mm，拉伸程序设置为 500 N，拉伸速度设置 20 mm/min，设置起始力 0.75 N。拉伸强度计算公式如下：

$$T = F/S$$

式中：T 为拉伸强度，MPa；F 为最大拉力，N；S 为膜的横切面面积，m^2。

断裂伸长率计算公式如下：

$$E = L_1/L_0 \times 100\%$$

式中：E 为断裂伸长率，%；L_0 为膜初始长度，mm；L_1 为膜拉伸断裂时位移，mm。

3) 可视化标签的透光性

参考 Hosseini S F [11]等人的研究并稍作修改，测定可视化标签对紫外光的阻隔性能，检测选定波长为 300、400、500、600、700、800 nm。裁剪尺寸为 45 mm × 10 mm 的薄膜试样，以空置样品池作为参比对照。每组测试重复测定三次，最终取三组光谱数据的平均值。

薄膜透明度通过下述公式计算：

$$\text{透明度(A/mm)} = \frac{\lg T}{x}$$

式中：A 为各波长下的吸光度；T 为各波长下透光率(%)；x 为薄膜厚度(mm)。

3. 数据结果与分析

3.1. 混合指示剂的 pH 响应性

由图 1 可知，不同比例混合指示剂在不同 pH 值缓冲溶液中会呈现不同的颜色，总体呈现出从红、橙、黄到蓝绿的变化。在低 pH 环境下，甲基红以更稳定的质子化形式存在，呈红色，与呈黄色的溴百里酚蓝混合后显示为红色或橙色。在 pH 值大于 7.6 时溴百里酚蓝呈现绿色，且随着 pH 升高，甲基红自身逐渐转变为黄色，这使得两种指示剂混合最终形成蓝绿色。此外，随着混合指示剂中甲基红含量的增加，整体颜色向绿色转变。

不同甲基红和溴百里酚蓝混合配比(1:1、2:1、3:1、4:1)的指示剂紫外可见吸收光谱如图 2 所示。当甲基红和溴百里酚蓝混合配比为 1:1，缓冲液的 pH 范围在 4 至 6 之间时，光谱曲线在 435 nm 附近呈现主要吸收峰，且随着 pH 值的升高，该吸收峰的吸光度逐渐上升，波长蓝移。此时溶液从红色逐渐变化为黄色，此变化主要取决于甲基红在 435 nm 处吸收峰强度的降低[10] [11]。当 pH 达到 8 时，光谱曲线呈现出了碱性特征峰，其最大吸收峰转移至约 616 nm 处，且随着 pH 的增加吸光度逐渐增大，最大紫外吸收波长稳定在 618 nm 处。这种在碱性条件下吸收峰大幅红移的现象，也与左海根[7]等人的研究相似。此外，碱性环境下吸收峰形无明显区别，且溶液颜色均呈现蓝绿色，说明过高的 pH 作用下指示剂颜色变化差异不大。

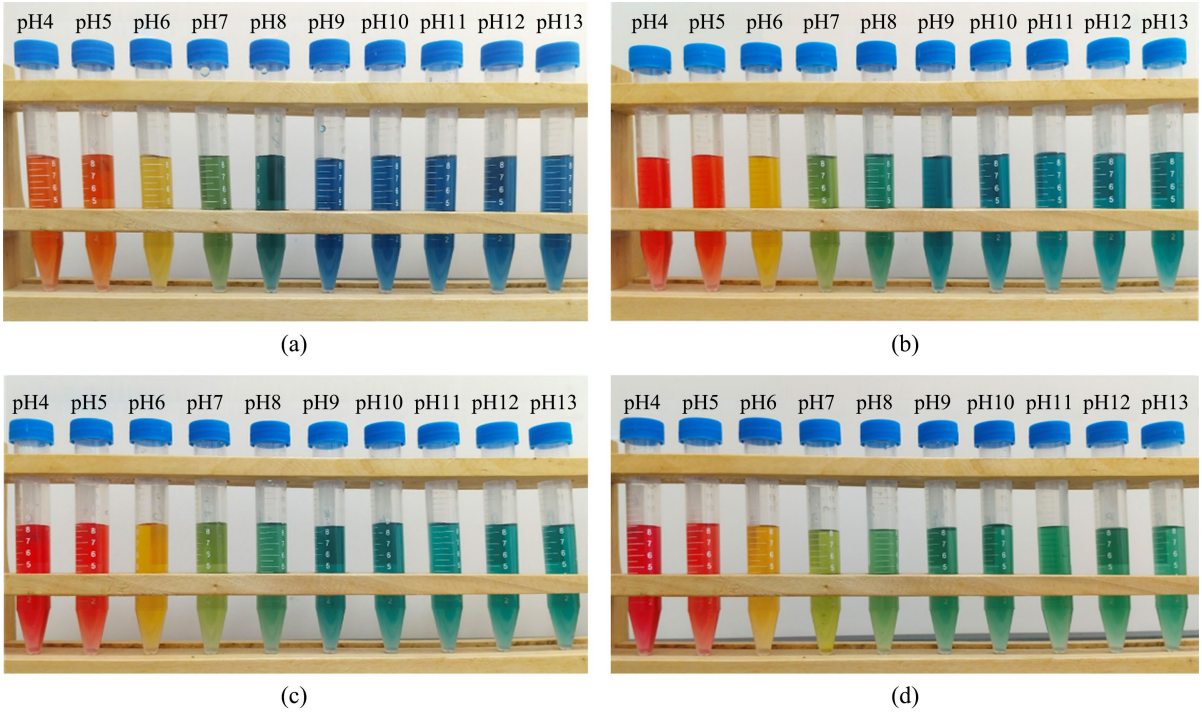


Figure 1. Color changes of mixed indicators in different proportions ((a) 1:1, (b) 2:1, (c) 3:1, (d) 4:1) in buffer solutions with different pH values
图 1. 不同比例混合指示剂((a) 1:1、(b) 2:1、(c) 3:1、(d) 4:1)在不同 pH 值缓冲溶液中颜色变化

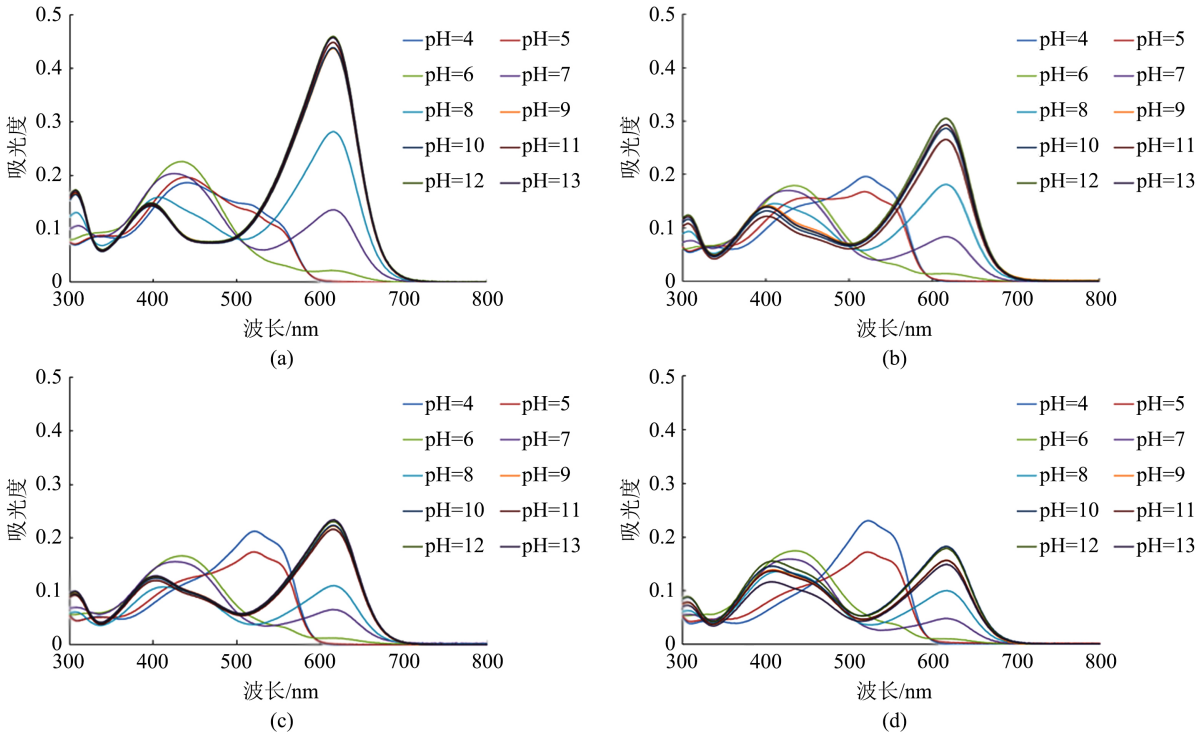


Figure 2. Ultraviolet-visible absorption spectra of mixed indicators in different proportions ((a) 1:1, (b) 2:1, (c) 3:1, (d) 4:1) in buffer solutions with different pH values
图 2. 不同比例混合指示剂((a) 1:1、(b) 2:1、(c) 3:1、(d) 4:1)在不同 pH 值缓冲溶液中的紫外可见吸收光谱

随着甲基红在混合指示剂中的比例递增，吸收光谱强度逐渐降低，其中 616 nm 波长处的碱性特征峰降低明显，吸光度值差异逐渐增大。值得注意的是，当 pH 小于 5 时，甲基红含量的增加使得的光谱曲线特征峰转移至 510~520 nm 处，且在甲基红和溴百里酚蓝的比例达到 4:1 时峰值达到最大。可以看出，甲基红浓度的增加可以促进指示剂响应灵敏度的提升，增加指示标签的颜色响应性。

3.2. 不同浓度指示剂对指示标签的颜色稳定性

0.1 mL 指示剂整体总色差水平最低，在 66.847 至 70.174 间波动。随着甲基红含量的增加，能明显看到亮度 *L* 先明显升高后降低，而 *a* 值始终大于 0，说明颜色主要呈现红色；黄蓝色度 *b* 由 0.425 降低至 0.365，黄色色调逐步减弱，并在 3:1 的比例下降低至−0.92，说明颜色从黄色转变为蓝色。由表 1 可以看出，不同环境储藏下指示标签的颜色会发生一定程度变化。在 26℃储存六天后，随着甲基红浓度的增加，指示标签的 *L* 值较同比例初始样品先增加后降低，说明过量的甲基红会导致亮度降低。常温储藏使得指示标签的 *a* 值略微降低，*b* 值向黄色偏移，总色差值逐渐增大。值得注意的是，在 0.1 mL 添加下，甲基红和溴百里酚蓝的比例达到 4:1 时总色差值 Δ*E* 大于 3，说明过高的甲基红添加不利于指示标签的颜色稳定性。其他浓度下，指示标签的颜色会发生轻微改变，但并不会引起视觉上的差异[12]。而冷藏冷冻对指示标签的影响变化不大，说明在低温下具备较好稳定性。

Table 1. The influence of adding different proportions of indicators under 0.1 mL on the color stability of visual labels
表 1. 0.1 mL 添加下不同比例指示剂对可视化标签颜色稳定性的影响

指示剂比例	储藏条件	*L* (亮度)	*a* (红绿色度)	*b* (黄蓝色度)	Δ*E*
0.1 mL/1:1	0 d	31.350 ± 0.099	2.750 ± 0.014	0.425 ± 0.035	67.753 ± 0.098
	26℃常温	31.225 ± 0.021	2.560 ± 0.001	0.535 ± 0.007	67.877 ± 0.021
	4℃冷藏	31.590 ± 0.028	3.290 ± 0.014	−0.345 ± 0.021	67.539 ± 0.028
	−20℃冷冻	30.845 ± 0.021	2.540 ± 0.001	0.470 ± 0.014	68.255 ± 0.021
0.1 mL/2:1	0 d	32.115 ± 0.29	2.345 ± 0.007	0.365 ± 0.007	66.972 ± 0.289
	26℃常温	32.325 ± 0.007	2.470 ± 0.001	0.885 ± 0.007	66.780 ± 0.007
	4℃冷藏	30.925 ± 0.007	2.200 ± 0.001	0.100 ± 0.001	68.158 ± 0.007
	−20℃冷冻	31.825 ± 0.049	2.580 ± 0.014	0.280 ± 0.014	67.275 ± 0.049
0.1 mL/3:1	0 d	31.710 ± 0.057	3.180 ± 0.014	−0.920 ± 0.001	67.411 ± 0.056
	26℃常温	31.475 ± 0.007	2.370 ± 0.001	0.185 ± 0.007	67.616 ± 0.007
	4℃冷藏	31.700 ± 0.014	3.170 ± 0.001	−0.280 ± 0.014	67.423 ± 0.014
	−20℃冷冻	31.230 ± 0.001	2.925 ± 0.007	−0.095 ± 0.007	67.882 ± 0.001
0.1 mL/4:1	0 d	28.930 ± 2.687	2.930 ± 0.269	−0.420 ± 0.255	70.174 ± 2.672
	26℃常温	32.245 ± 0.007	2.375 ± 0.007	0.255 ± 0.007	66.847 ± 0.007
	4℃冷藏	31.590 ± 0.028	3.290 ± 0.014	−0.345 ± 0.021	67.539 ± 0.028
	−20℃冷冻	30.325 ± 0.120	2.955 ± 0.007	−0.375 ± 0.007	68.786 ± 0.120

0.3 mL 的指示剂添加量相比较于 0.1 mL 而言，在相同的甲基红和溴百里酚蓝比例下总色差有明显的增加，但差异随着甲基红浓度的增加而逐渐减弱。可以看出，亮度值随着甲基红增加下明显降低，说明亮度降低，*b* 值降低，*a* 值增大，说明指示标签逐渐向红黄色偏移。由表 2 可知，0.3 mL 添加下所有样品在 26℃放置 6 天后，与同比例初始样品相比而言，*L* (亮度)值变化不大，*a* 值在低浓度下减低，但随后逐渐升高，*b* 值逐渐上升，说明其颜色整体向亮黄色偏移，这使得 Δ*E* 出现肉眼不可辨的下降趋势。4℃冷藏条件下，*L* (亮度)值较同比例初始样品也出现略微上升，而甲基红和溴百里酚蓝配比为 1:1 和 3:1 时，*a* 值出现轻微上升，颜色向红色轻微偏移，2:1 和 4:1 时 *a* 值则略微下降，向绿色偏移，Δ*E* 也出现轻微下降。冷冻储藏各个比例跟第一天值对比变化不大，说明在低温下可视化标签具备稳定性。

Table 2. The influence of adding different proportions of indicators under 0.3 mL on the color stability of visual labels
表 2. 0.3 mL 添加下不同比例指示剂对可视化标签颜色稳定性的影响

指示剂比例	储藏条件	*L* (亮度)	*a* (红绿色度)	*b* (黄蓝色度)	Δ*E*
0.3 mL/1:1	0 d	30.588 ± 0.239	4.102 ± 0.171	3.835 ± 0.288	68.717 ± 0.241
	26℃常温	31.175 ± 0.007	3.985 ± 0.007	4.290 ± 0.014	68.155 ± 0.006
	4℃冷藏	31.130 ± 0.001	4.260 ± 0.001	4.085 ± 0.007	68.203 ± 0.001
	−20℃冷冻	30.490 ± 0.382	4.185 ± 0.035	3.275 ± 0.035	68.788 ± 0.380
0.3 mL/2:1	0 d	30.127 ± 0.143	4.240 ± 0.103	2.035 ± 0.165	69.098 ± 0.142
	26℃常温	30.700 ± 0.014	4.270 ± 0.014	2.560 ± 0.001	68.549 ± 0.015
	4℃冷藏	30.850 ± 0.001	4.135 ± 0.007	1.985 ± 0.007	68.368 ± 0.001
	−20℃冷冻	30.010 ± 0.099	4.310 ± 0.014	2.060 ± 0.028	69.220 ± 0.097
0.3 mL/3:1	0 d	30.095 ± 0.265	4.230 ± 0.207	1.502 ± 0.060	69.112 ± 0.250
	26℃常温	30.940 ± 0.001	4.280 ± 0.001	1.865 ± 0.007	68.284 ± 0.001
	4℃冷藏	30.695 ± 0.007	4.320 ± 0.001	1.585 ± 0.007	68.522 ± 0.007
	−20℃冷冻	28.360 ± 0.014	3.765 ± 0.007	1.305 ± 0.007	70.811 ± 0.014
0.3 mL/4:1	0 d	30.175 ± 0.308	5.023 ± 0.328	1.727 ± 0.061	69.095 ± 0.331
	26℃常温	30.420 ± 0.014	5.190 ± 0.014	2.320 ± 0.001	68.884 ± 0.013
	4℃冷藏	30.375 ± 0.064	4.640 ± 0.001	1.780 ± 0.001	68.869 ± 0.063
	−20℃冷冻	29.520 ± 0.028	4.870 ± 0.057	1.485 ± 0.049	69.729 ± 0.023

当指示剂添加量增加至 0.5 mL 时，指示标签的显色特征及稳定性表现出与低添加量(0.1 mL、0.3 mL)不同的规律，整体在 68.044~70.131 间波动。随着甲基红浓度的增加，*L* 值总体呈现出略微下降趋势，说明亮度有所降低，但在 4:1 时略有上升，达到 29.97，总色差则变化不大。而 *b* 值随甲基红浓度的增加，下降较快，表明整体颜色的黄色度有所减弱。由表 3 可知，与同比例初始样品相比，在室温放置 6 天后，各个指示标签的亮度有明显的上升趋势，*a* 值和 *b* 值均呈现了先降低后增加的趋势，但过高的甲基红浓度则会导致红色度和黄色度降低。4℃条件下，较低的甲基红含量对 *L* 值影响较小。*a* 值和 *b* 值均有所下

降(红色、黄色减弱)，但变化幅度较小，而过高的浓度则会加剧亮度变化，色度变化较大，两者相互抵消，使得冷藏条件下指示标签整体颜色相对稳定。当温度达到−20℃时，各组分变化幅度极小，说明在冷冻情况下稳定性较好，总体稳定性较好。

Table 3. The influence of adding different proportions of indicators under 0.5 mL on the color stability of visual labels
表 3. 0.5 mL 添加下不同比例指示剂对可视化标签颜色稳定性的影响

指示剂比例	储藏条件	*L* (亮度)	*a* (红绿色度)	*b* (黄蓝色度)	Δ*E*
0.5 mL/1:1	0 d	30.490 ± 0.001	5.400 ± 0.001	6.320 ± 0.014	69.105 ± 0.001
	26℃常温	30.875 ± 0.757	5.300 ± 0.099	6.090 ± 0.057	68.946 ± 0.191
	4℃冷藏	30.600 ± 0.014	5.260 ± 0.014	6.000 ± 0.014	68.562 ± 0.193
	−20℃冷冻	30.990 ± 0.085	5.365 ± 0.007	6.475 ± 0.007	68.622 ± 0.042
0.5 mL/2:1	0 d	30.745 ± 0.163	3.670 ± 0.002	3.230 ± 0.057	68.500 ± 0.159
	26℃常温	31.175 ± 0.007	3.755 ± 0.007	3.585 ± 0.007	68.552 ± 0.342
	4℃冷藏	30.705 ± 0.021	3.510 ± 0.014	3.835 ± 0.007	70.086 ± 1.139
	−20℃冷冻	29.055 ± 0.064	3.080 ± 0.014	2.735 ± 0.007	70.131 ± 0.064
0.5 mL/3:1	0 d	29.925 ± 0.035	5.220 ± 0.012	3.835 ± 0.007	69.455 ± 0.036
	26℃常温	30.665 ± 0.007	4.760 ± 0.003	3.315 ± 0.007	69.196 ± 0.383
	4℃冷藏	30.160 ± 0.001	5.040 ± 0.001	3.635 ± 0.007	69.880 ± 0.589
	−20℃冷冻	29.405 ± 0.106	5.215 ± 0.007	3.525 ± 0.007	69.954 ± 0.105
0.5 mL/4:1	0 d	29.970 ± 0.014	3.875 ± 0.007	2.635 ± 0.007	69.256 ± 0.015
	26℃常温	31.080 ± 0.014	4.090 ± 0.001	3.215 ± 0.007	68.044 ± 0.104
	4℃冷藏	31.180 ± 0.001	3.930 ± 0.001	2.435 ± 0.021	69.577 ± 1.147
	−20℃冷冻	29.585 ± 0.064	3.785 ± 0.007	2.310 ± 0.001	69.621 ± 0.063

3.3. 指示剂对可视化标签的氨气敏感性的影响

由图 3 可知，随着标签与氨水接触时间的增加，不同甲基红和溴百里酚蓝配比和添加下的可视化标签的总色差值 Δ*E* 呈现出了持续上升的趋势，说明颜色均发生了变化，并在 360 min 时达到最大值。如图3(a)所示，当指示剂添加量为 0.1 mL 时，甲基红和溴百里酚蓝的配比为 1:1 和 3:1 具有更快的氨水响应性，在 90 min 时就能产生肉眼可见的变化(Δ*E* 大于 3)。而在 180 min 色差值增长较为迅速，这是由于此时指示膜呈现出了较大得黄色值。随着指示剂浓度的增加，指示标签对氨气的敏感性逐渐增强。0.3 mL 添加下的可视化标签总色差变化范围在 2 到 30 之间，最大可以达到 28.33，而 0.5 mL 添加下的可视化标签总色差变化范围在 1 到 9 之间，说明 0.3 mL 指示剂的添加可以使指示标签在氨水作用下产生更大的颜色变化。此外，在较高的指示剂添加量下，指示标签的颜色变化随着甲基红含量的升高逐渐增大，说明甲基红的引入可以加快颜色响应速度。可以看出，在 45 min 左右，0.3 mL 添加下的标签总色差值大于 3，即具有更快的颜色响应性。

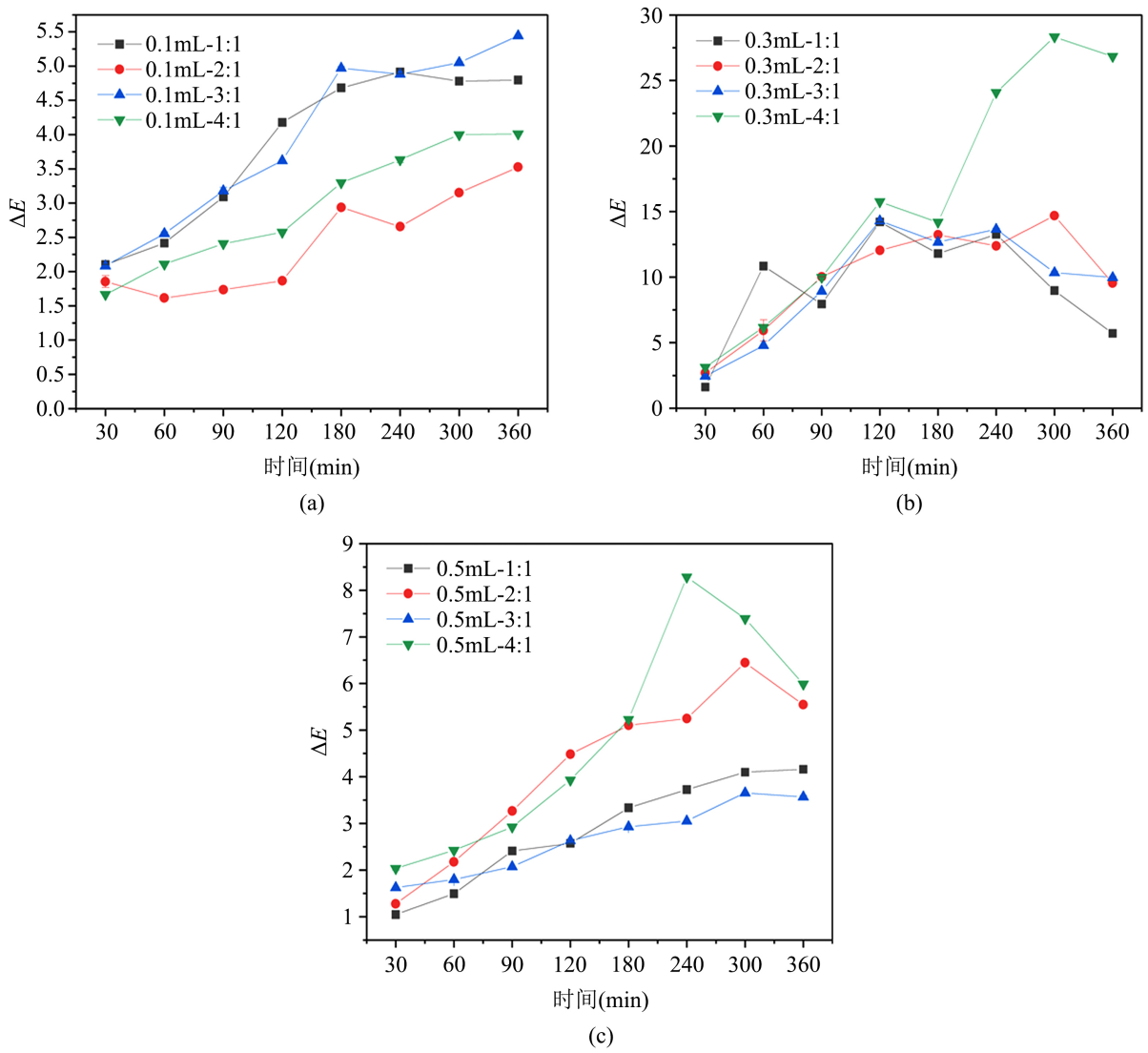


Figure 3. The influence of different proportions of indicator addition on the ammonia sensitivity of visual labels
图 3. 不同比例指示剂添加对可视化标签氨气敏感性的影响

3.4. 可视化标签的机械性能分析

拉伸强度和断裂伸长率可以有效衡量薄膜在外力作用下延展变形的能力，可以有效表征聚合物的强度，因此进一步探究不同成膜组分对膜性质的影响。由表 4 可知，可视化标签的拉伸强度都随着甘油的增加呈现出了先降低后升高的趋势，而在微添加下对断裂伸长率的影响较小。当甘油添加达到 0.15 时达到最低值，分别为 5.977 MPa 和 44.3%，这是由于甘油在成膜体系中形成了新的氢键，破坏了分子间原来的强相互作用力[13]。此外，较高甘油含量有利于提升聚合物之间的相容性，使得复合膜的柔韧性增加，并同时提升抗拉强度。而卡拉胶的添加使得复合膜的呈现出了拉伸强度先降低后增加，说明较高的卡拉胶含量有利于力学强度的提升，这可能是由于卡拉胶含有大量羟基，和羧甲基纤维素钠混合后产生了相互作用，从而获得更加致密的结构，并同时提升复合膜的柔韧性[14]。此外，复合膜的厚度随卡拉胶的浓度增大而降低。海藻酸钠添加量在 0.04 至 0.08 区间时，复合膜的拉伸强度和断裂伸长率均先降低后增加。海藻酸钠含有大量的羧基，卡拉胶含有大量的羟基，当按照一定的配比共混海藻酸钠与卡拉胶，两

者之间形成大量的氢键，使得海藻酸钠和卡拉胶分子间的间距逐渐减小，空间网络结构变得越来越紧密，使得复合膜的拉伸强度提升，然而海藻酸钠的加入使得断裂伸长率明显降低，说明过量的添加不利于保持复合膜的柔韧性。

Table 4. The influence of different polysaccharide additions on the mechanical properties of visual labels
表 4. 不同多糖添加对可视化标签力学性能的影响

添加量	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	厚度/mm
CK	5.977 ± 0.531	44.341 ± 3.379	0.121 ± 0.004
GLY-0.1	9.183 ± 0.361	65.569 ± 3.362	0.133 ± 0.011
GLY-0.2	6.526 ± 0.939	60.279 ± 0.377	0.120 ± 0.006
Car-0.3	6.18 ± 0.327	50.517 ± 1.652	0.142 ± 0.024
Car-0.5	7.2 ± 1.034	54.159 ± 0.98	0.121 ± 0.004
SA-0.04	6.853 ± 1.04	50.246 ± 24.755	0.130 ± 0.002
SA-0.08	7.721 ± 1.834	49.85 ± 12.574	0.127 ± 0.006

3.5. 透光性分析

Table 5. The influence of different polysaccharide additions on the light transmittance of visual labels
表 5. 不同多糖添加对可视化标签透光性的影响

样品	透光度					
	300	400	500	600	700	800
CK	4.499 ± 0.075	5.095 ± 0.113	4.336 ± 0.071	6.233 ± 0.048	6.601 ± 0.032	6.662 ± 0.032
GLY-0.1	3.729 ± 0.08	4.307 ± 0.037	4.284 ± 0.069	6.158 ± 0.048	6.522 ± 0.032	6.582 ± 0.032
GLY-0.2	4.641 ± 0.071	4.77 ± 0.077	6.857 ± 0.053	7.262 ± 0.035	7.329 ± 0.035	7.329 ± 0.035
Car-0.3	3.792 ± 0.001	4.263 ± 0.001	4.013 ± 0.065	5.769 ± 0.045	6.11 ± 0.031	6.166 ± 0.031
Car-0.5	4.726 ± 0.001	5.381 ± 0.001	4.739 ± 0.076	6.812 ± 0.053	7.214 ± 0.035	7.28 ± 0.0351
SA-0.04	4.88 ± 0.049	5.513 ± 0.038	4.41 ± 0.071	6.339 ± 0.049	6.713 ± 0.033	6.775 ± 0.033
SA-0.08	4.74 ± 0.078	5.343 ± 0.017	4.507 ± 0.072	6.479 ± 0.051	6.861 ± 0.033	6.924 ± 0.033

由表 5 可知，在波长 300~800 nm 范围内，各组可视化标签的透光度随入射波长增加整体呈先波动、后持续升高的变化规律，最大值可以在 800 nm 处获得。随甘油添加量提升，可视化标签的透光度在 400 nm 下呈先升高后降低的变化趋势。与空白对照组 CK 相比，低添加量(GLY-0.1)下薄膜全波段透光度均有所下降，透光性减弱；当添加量提升至 GLY-0.2 时，高波段(波长大于 400 nm)透光度显著高于空白组，透光性能明显提升。甘油作为多糖膜常用的多元醇增塑剂，可嵌入多糖分子链间隙，通过削弱分子间氢键作用改变膜基质的微观结构与结晶状态。低浓度的甘油易引发膜内局部相分离，增加光线在膜内的散射与折射损失，导致透光度下降；高浓度的甘油则可促进多糖分子链排布更均匀，减少膜内孔隙与界面

缺陷，进而提升薄膜透光性能。卡拉胶添加量对透光度的影响规律与甘油一致，低添加量(Car-0.3)下薄膜透光度低于对照组，随添加量升高至 0.5，透光度全面高于对照组，透光性随添加量增加呈现先减弱后增强的特征。而海藻酸钠添加量逐步提升，可视化标签在各个波长的透光度整体呈现出先降低后增加的趋势，在 0.08 的海藻酸钠添加量下透光性在 800 nm 处达到最大值 6.924。这可能是由于海藻酸钠与其他多糖的配比对复合膜透光性影响显著，其间通过分子间氢键作用形成连续互穿网络结构；当配比适宜时，膜基质致密性与均一性提升，可减少光线在相界面的反射与散射损失，最终表现为透光度升高[15]。

4. 结论

本研究通过延流法制备出基于甲基红/溴百里酚蓝的多糖基 pH 响应指示膜，验证了其功能特性与各项物理性能，证实该指示膜在 pH 3~13 范围内具备连续且辨识度高的颜色变化，能够对肉品腐败产生的碱性挥发物产生灵敏显色响应。研究明确了指示剂配比、添加量及成膜多糖组分对指示膜综合性能的作用机制，验证了低温环境对指示膜颜色稳定性的保障效果，同时指示膜对氨气具有良好的响应特性，优化得到的配方兼顾了显色响应性能。在基础物理性能方面，多糖含量的增加会降低膜的厚度，甘油与卡拉胶的添加量对复合膜的拉伸强度与透光性能均呈现先降低后升高的调控规律；海藻酸钠添加量提升可同步改善膜的拉伸强度与透光表现，但过量添加会削弱膜的柔韧性，各成膜组分可通过配比调整实现力学与光学性能的定向优化，为生鲜肉品新鲜度的快速无损检测提供新的实现路径。

基金项目

北京农业职业学院校级科研创新团队项目：特色食品关键技术集成及产品定向研发(项目编号：XY-TD-25-03)。

参考文献

[1] 贾惜文, 王浩, 曹传爱, 等. 颜色指示型智能包装监测生鲜肉新鲜度的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 318-324.

[2] 张晋豪, 王浩东, 邵良婷, 等. 生鲜肉新鲜度新型快速表征技术研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 210-217.

[3] 杨广瑞, 李鸿梅, 刘春雷. 用于冷鲜猪肉新鲜度多阶段实时指示水凝胶智能标签的制备研究[J/OL]. 吉林农业大学学报, 1-16. https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2026.0185, 2026-07-27.

[4] 郑辉, 蒋昊天, 王荔萱, 等. 花青素/姜黄素智能标签的制备及应用[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 17-21.

[5] 罗远兰, 李永良, 黄义, 等. 负载姜黄素的智能 pH 值指示膜的制备及性能研究[J]. 中国调味品, 2026, 51(5): 134-141+186.

[6] 吴炫烨, 王卉. 基于姜黄素的鱼肉新鲜度包装指示膜的研究[J]. 农产品加工, 2025(5): 21-24+30.

[7] 左海根, 谢蕾, 王思蓓, 等. pH 响应性水凝胶的制备及其对猪肉新鲜度的指示效果[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(21): 110-115.

[8] 荣丽岩, 蒋东华, 李丽, 等. 基于智能凝胶标签的鲜切网纹瓜新鲜度无损监测[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 239-246.

[9] 李雪, 丁志刚, 桑宏庆, 等. 藜麦淀粉/可得然胶/果胶/茜素复合膜的制备及其在牛肉新鲜度监测中的应用[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-14. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.046918, 2026-07-31.

[10] 王恩胜, 刘晓媛, 陈鑫沛, 等. 茶多酚/花青素/壳聚糖智能复合膜的制备及分析[J]. 食品科技, 2025, 50(2): 113-120.

[11] Hosseini, S.F., Rezaei, M., Zandi, M. and Ghavi, F.F. (2013) Preparation and Functional Properties of Fish Gelatin-Chitosan Blend Edible Films. *Food Chemistry*, **136**, 1490-1495. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.081

[12] Luchese, C.L., Sperotto, N., Spada, J.C. and Tessaro, I.C. (2017) Effect of Blueberry Agro-Industrial Waste Addition to Corn Starch-Based Films for the Production of a pH-Indicator Film. *International Journal of Biological Macromolecules*, **104**, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.149

[13] 江东阳, 李楠楠, 黄海源, 等. 淀粉/羧甲基纤维素/甘油可降解复合膜的制备及性能研究[J]. 林产化学与工业,

2024, 44(2): 94-102.

[14] 苟俏敏, 郭宗林, 董春娟, 等. 卡拉胶基复合花青素微胶囊指示膜的制备、表征及其对冷鲜牛肉新鲜度的监测[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 154-162.

[15] 卞紫秀, 董增, 张旭, 等. 海藻酸钠与卡拉胶复合膜的制备及性能[J]. 塑料工业, 2018, 46(9): 39-43.