

文章编号: 1008-9357(2025)05-0447-10

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20250310001

基于稳定同位素技术的混纺纱线染色行为

沈焰枝¹, 蔡严飞¹, 邓永龙¹, 薛梅², 王颖¹, 周惠敏¹

(1. 新疆大学新疆智能与绿色纺织重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆东纯兴纺织有限公司, 新疆 图木舒克 843900)

摘要: 为揭示混纺纱线中多组分纤维的染色行为差异, 采用稳定同位素技术结合常规表征方法, 系统探究黏胶纤维(viscose)及黏胶/涤纶(viscose/polyester)混纺(黏胶纤维与涤纶纤维的质量比 70/30)纱线在活性染料活性红(X-3B)体系中的染色机制。结果表明: 随着染料用量的增加, 黏胶/涤纶混纺纱线中的氢稳定同位素值(δD)出现贫化现象, 而纯黏胶纱线则表现为小幅度富集, 表明两种纤维在染色过程中的染色行为存在显著差异。氧稳定同位素值($\delta^{18}O$)的变化幅度为 1‰, 活性染料对氧同位素有一定影响, 但与染料用量无关。温度对染色效果影响较大, 随着温度升高, $\delta^{18}O$ 值回升, 染料更多停留在纤维表面, 减少了深度结合, 低温有利于氢键的稳定, 增强了染料的吸附能力。深度结合减少导致 δD 出现贫化趋势(从 -60.4‰ 下降至 -63.9‰)。碱浓度的增加使 δD 表现出贫化趋势, 氢键的结合能力增强, 染料与纤维的结合更加紧密, $\delta^{18}O$ 的变化则较为复杂, 受到多种因素的影响, 从而无明显规律。在所有染色过程中, 由于碳作为纤维基本骨架, 碳稳定同位素值($\delta^{13}C$)几乎不受影响。活性染料在染色过程中显著改变了纤维的氢和氧稳定同位素比例, 且受染料用量、温度和碱浓度的共同调控。

关键词: 稳定同位素; 混纺纱线; 活性染料; 染色均匀性; 黏胶纤维

中图分类号: TS193.1

文献标志码: A

Dyeing Behavior of Blended Yarns Based on Stable Isotope Technology

SHEN Yanzhi¹, CAI Yanfei¹, DENG Yonglong¹, XUE Mei², WANG Ying¹, ZHOU Huimin¹

(1. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent and Green Textile, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Xinjiang Dongchunxing Textile Limited Company, Tumxuk 843900, Xinjiang, China)

Abstract: To reveal the differences in dyeing behavior of multi-component fibers in blended yarns, the dyeing mechanism of viscose fiber and viscose/polyester blended yarn (70/30, a mass ratio of viscose fiber to polyester fiber) in the reactive dye X-3B system was systematically investigated, using stable isotope technology combined with conventional characterization methods. Results showed that as the dye concentration increased, the δD (hydrogen stable isotope value) in the viscose/polyester blended yarn exhibited a depletion phenomenon, while pure viscose fiber showed a slight enrichment, indicating significant differences in the dyeing behavior of the two fibers during the dyeing process. The variation range of $\delta^{18}O$ (oxygen stable isotope value) was 1‰, indicating that reactive dyes have a certain impact on oxygen isotopes,

收稿日期: 2025-03-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2023 A02001-2); 国家自然科学基金青年基金(22305206)

作者简介: 沈焰枝(2000—), 女, 安徽安庆人, 硕士, 主要研究方向为功能纺织材料。E-mail: yanzhi1213@outlook.com

通信联系人: 周惠敏, E-mail: xjzhouhuimin@126.com

引用格式: 沈焰枝, 蔡严飞, 邓永龙, 薛梅, 王颖, 周惠敏. 基于稳定同位素技术的混纺纱线染色行为 [J]. 功能高分子学报, 2025, 38(5): 447-456.

Citation: SHEN Yanzhi, CAI Yanfei, DENG Yonglong, XUE Mei, WANG Ying, ZHOU Huimin. Dyeing Behavior of Blended Yarns Based on Stable Isotope Technology [J]. Journal of Functional Polymers, 2025, 38(5): 447-456.

independent of dye concentration. Temperature had a significant impact on the dyeing effect. As the temperature increased, $\delta^{18}\text{O}$ rebounded, and more dye remained on the fiber surface, reducing deep binding. Low temperatures favored the stability of hydrogen bonds, enhancing the dye's adsorption capacity, while high temperatures increased fiber swelling, causing more dye to remain on the fiber surface and reducing deep binding, leading to a depletion trend in δD (decreasing from -60.4% to -63.9%). Increasing the alkali concentration led to a depletion trend in δD , enhanced the binding ability of hydrogen bonds, and tightened the bond between dye and fiber, while the change in $\delta^{18}\text{O}$ was more complex, influenced by various factors, and showed no obvious pattern. In all dyeing processes, $\delta^{13}\text{C}$ (carbon stable isotope value) was hardly affected because carbon acts as the basic skeleton of the fiber. Therefore, reactive dyes significantly altered the hydrogen and oxygen stable isotope ratios of the fiber during the dyeing process, and were jointly regulated by dye concentration, temperature, and alkali concentration.

Key words: stable isotope; blended yarn; reactive dye; dyeing uniformity; viscose

随着纺织工业持续发展,集合了不同纤维优良性能的混纺纱线在现代纺织领域应用更加广泛^[1]。然而,现有研究中对混纺纱线染色行为的理解仍存在明显的不足之处:一方面,大多数研究主要集中于单一纤维材料的染料吸附和扩散行为,对混纺纱线中不同组分纤维的协同作用及其对染色均匀性的影响缺乏深入分析^[2];另一方面,传统的染色研究手段多以宏观表征为主,难以精确区分不同组分对染料的选择性吸附和扩散行为^[3]。此外,在实际应用中,由于混纺纱线中纤维材料的物理化学特性差异显著,染色过程中容易出现色深不均^[4]、色牢度降低^[5]及纱线表面毛羽化^[6]等问题,这些技术瓶颈阻碍了混纺纱线染色工艺的进一步优化。

在当代科学研究的多元领域中,稳定同位素技术展现出了独特且关键的作用。它凭借高精度、高灵敏度的特性,已广泛渗透至生物学、食品科学、水文地质学以及纺织学等诸多学科,为各领域的深入探究提供了有力支撑。在生物学方面,刘静轩等^[7]通过碳稳定同位素比值分析,构建了植物源示踪技术体系,成功鉴别出土麻织物的植物来源,为亚欧大陆早期纺织文明传播路径研究提供了分子考古学依据;在食品科学领域,Zhang等^[8]探究了籼稻和粳稻生长过程中叶片稳定同位素值的动态变化,以及糙米和精米从茎到叶、从叶到米的稳定同位素值变化情况,为提高水稻来源真实性提供信息;在水文地质学范畴,Odobel等^[9]首次运用稳定同位素示踪剂,从微生物细胞生长和活动监测等方面证实了海洋环境中聚羟基丁酸酯(PHB)的生物降解过程,通过不同时间点的DNA稳定同位素探测(DNA-SIP)实验,鉴定出关键的PHB降解菌属。

相较于传统的宏观表征方法,稳定同位素技术在解析纤维与染料微观相互作用方面展现出了独特优势^[10,11]。传统方法虽然可以提供整体染色结果,但通常无法精确揭示不同纤维成分对染料的选择性吸附、扩散及结合行为,且对纤维间协同效应的分析存在明显的局限性^[12-14]。稳定同位素技术通过标记不同纤维的同位素标签,能够精确定量分析染料在各组分纤维中的吸附与扩散过程,从微观层面深入揭示混纺纱线染色行为的细节,克服传统技术的不足^[15-21]。

本文通过稳定同位素技术结合常规表征方法,系统分析了黏胶纤维及黏胶/涤纶混纺纱线在活性染料活性红(X-3B)体系中的染色行为。通过调节染料用量、染色温度和碱质量浓度等工艺参数,揭示了不同纤维组分的染料吸附与扩散规律。通过分析纤维组分的协同效应及其对染色深度(评价指标色深值(K/S))、色牢度(评价指标上染率(E))和物理性能的影响,首次将稳定同位素技术应用于混纺纱线的染色研究,突破了传统技术在区分不同纤维组分染色行为方面的局限性。通过揭示多组分纤维材料的微观染色机制,为高性能混纺纱线的染色工艺开发和绿色纺织工业的可持续发展提供理论技术参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

无水硫酸钠: $w=99.7\%$,天津市致远化学试剂有限公司;无水碳酸钠(Na_2CO_3): $w=99.5\%$,阿拉丁生化科技股份有限公司;无水乙醇: $w=99.7\%$,天津市汇杭化工科技有限公司;活性红(X-3B):江苏臻庆染料厂;喷气涡流纺(MVS)黏胶(40S)纱线、MVS黏胶/涤纶(40S)混纺纱线(黏胶纤维与涤纶纤维的质量比为70/30):新疆东纯兴纺织有限公司。

1.2 混纺纱线染色处理

固定染液与纺织品的质量比为 1/20, 当染液达到目标温度后加入被染纱线, 完全浸染 10 min 后加入 Na_2SO_4 ($\rho(\text{Na}_2\text{SO}_4)=100 \text{ g/L}$), 再隔 30 min 加入 Na_2CO_3 , 过 50 min 上染时间后即可水洗除去部分浮色。皂洗过程中 1 g 织物中加入 30 mL 皂洗液, 皂洗液的质量浓度为 2 g/L, 75 °C 条件下皂洗 10 min 去除大部分表面浮色, 水洗后烘干。

本实验采用单因素分析法探究活性红 X-3B 染料用量(染料质量与干的织物质量之比为 0.5%~3%)、染色温度(25~80 °C)及 Na_2CO_3 质量浓度(10~30 g/L)对纯黏胶纱与黏胶/涤纶混纺纱染色性能的影响。

1.3 测试与表征

1.3.1 上染率 采用双光束紫外可见分光光度计(屹谱仪器制造(上海)有限公司 U-T9 型)测量染色前染液的吸光度(A_0)与染色后残液在最大吸收波长处的吸光度(A_1), 参照 GB/T23976.1—2009^[22], 依据式(1)计算棉纤维上染率。

$$E = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 色深值 在 D65 光源下, 采用分光测色仪(HunterLab 公司 UltraScan PRO 型)进行测试, 观察角度为 10°, 孔径为 10 mm。采用折叠样品的方法来增加其厚度, 随机选取 10 个不同的位置, 避免发生透显现象, 并求其平均值。棉纤维染色皂洗后的 K/S 值由库贝卡-芒克(Kubelka-Munk)方程(式(2))计算:

$$K/S = \frac{1 - R^2}{2R} \quad (2)$$

其中: K 和 S 分别是纤维的吸收和散射系数, R 是纤维在最大波长处的反射系数。

1.3.3 毛羽指数 采用纱线毛羽测试仪(陕西长岭纺织机电科技有限公司 YG172 A 型)对染色前后试样进行毛羽指数测试, 设置片段长度为 10 m、试验次数为 5 次、测试速率为 30 m/min、预加张力为 0.5 cN/tex (1 cN/tex=10 N·m/g)。

1.3.4 纱线条干均匀度 使用条干均匀度测试分析仪(陕西长岭纺织机电科技有限公司 CT200 型)测试纱线的粗细均匀性, 设定测试速率 400 m/min、时间 1 min, 记录变异系数(CV, %)、不匀率(U , %), 以及纱线直径比平均值小 30%、40%、50% 的细节(Thin spots(-30%)、Thin spots(-40%)、Thin spots(-50%)), 纱线直径比平均值大 35%、50%、70% 的粗节(Thick spots(+35%)、Thick spots(+50%)、Thick spots(+70%))。

1.3.5 纱线拉伸性能 使用电子式万能试验机(上海企想检测仪器有限公司 QX-W050 型), 依据 GB/T 3916—2013 测定单根纱线断裂性能^[23]。设置夹持距离 500 mm、拉伸速率 500 mm/min、预加张力 0.5 cN/tex、重复拉伸 20 次, 所有试样在经标准温度(20 °C)和湿度(65%)环境下调湿 24 h 后, 在标准大气压下完成测试。

1.3.6 稳定同位素 待测样品于 45 °C 干燥 48 h 至恒重, 粉碎过 80 目(178 μm)筛后备用。取约 5 mg 样品封装于锡杯中, 通过稳定同位素质谱仪(德国 Elementa 公司 Isoprime PreciSION 型)测定样品中 C 和 N 元素的稳定同位素值。样品经 1 150 °C 氧化炉和 850 °C 还原炉完全燃烧为 CO_2 、 N_2 , 氦气流量 230 mL/min, 质谱载气流量 100 mL/min。取约 1 mg 样品封装于银杯中, 利用高温(1 400 °C)热解生成 H_2 和 CO , 经色谱分离后由高分辨质谱分析碳稳定同位素值($\delta^{13}\text{C}$)、氢稳定同位素值(δD)和氧稳定同位素值($\delta^{18}\text{O}$)。氦气流量 200 mL/min, 质谱载气流量 110 mL/min, 测试 3 次取平均值。稳定同位素值(δ)的计算公式为:

$$\delta = \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \quad (3)$$

其中: R_{sample} 和 R_{standard} 分别表示样品和标准物质中重同位素与轻同位素的丰度比。在分析过程中, 每 10 个样品中插入 1 个实验室标准样品进行标定, 仪器的长期标准偏差如下: $\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 为 0.3‰, $\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 为 0.2‰, $\delta\text{D}/^1\text{H}$ 为 1‰。

2 结果与讨论

2.1 染色温度对纯黏胶纱线稳定同位素特征值的影响

固定染料用量($m(\text{Dye})/m(\text{Yarn})$)为 0.5%、 $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 为 20 g/L, 温度对纯黏胶纱线的影响如图 1 所示, 相应的条干均匀度测试结果如表 1 所示。

随着温度升高,上染率先下降后小幅回升,室温时达到最大值(图1(a))。这是由于活性红 X-3B 为单偶氮类活性染料(二氯三嗪型),反应性强,染色过程为放热反应。低温下,染料分子更容易与纤维羟基形成稳定的共价键;80 °C 时,部分染料分子因热运动增强导致上染率略微增加,但仍低于室温值。这可能是因为高温下染料部分分解或水解,有效吸附量减少,相关研究^[24]表明,温度每升高 10 °C,二氯三嗪型染料水解速率增加约 3 倍,在高温下更易水解,因此需在较低温度(如 30~40 °C)下染色,这与本文结果一致。随温度升高, K/S 值呈非单调响应,60 °C 时最高,80 °C 时最低(图1(b)),表明适度升温可提高染料吸附饱和度,但由于 X 型活性染料不稳定,染料易水解,高温导致染料分解,染色深度降低。毛羽指数在 50 °C 时最低,可能是低温增强纤维结合力,减少短毛羽(毛羽长度小于 1 mm)的外露;但高温时因纤维过度溶胀导致毛羽指数回升(图1(c))。室温下纱线应力峰值最高(55 MPa),升高温度后应力及伸长率降低(图1(d)),这是由于高温削弱了纤维间的氢键网络,而低温染色则避免了对纱线力学性能的损伤,从而起到了保护作用。表 1 条干均匀度测试显示,25、40 °C 及 60 °C 处理组的 CV 和细节数显著改善,表明适宜温度可优化纱线均匀性,但高温因纤维损伤会导致 CV 值上升。

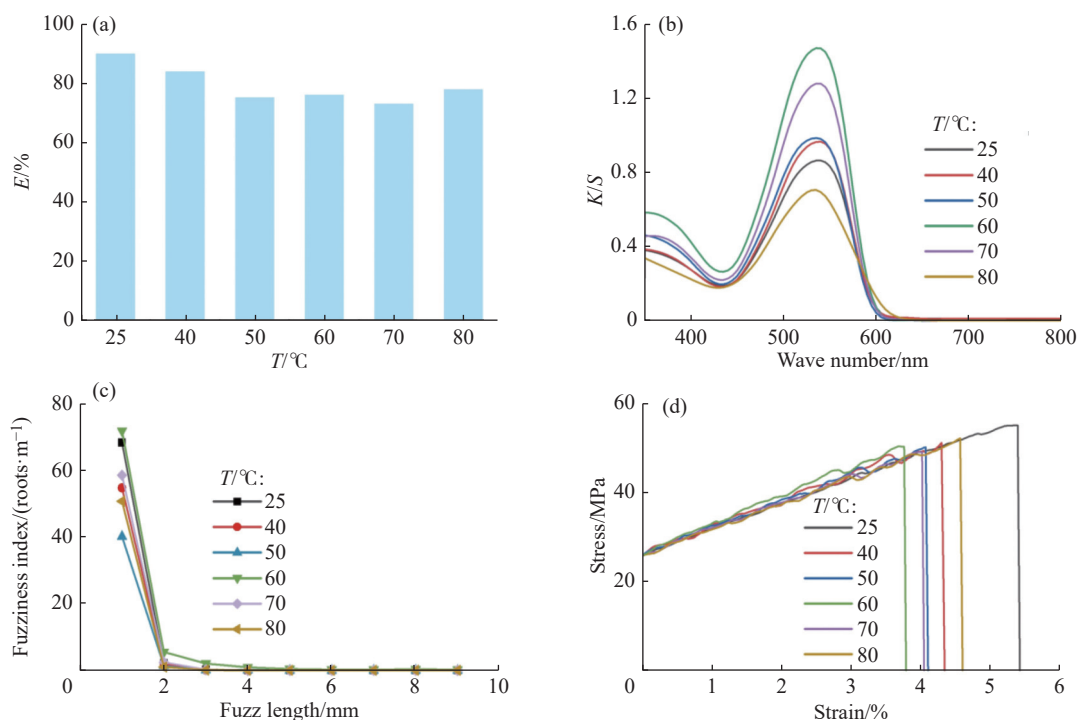


图 1 温度对黏胶纱线的影响

Fig. 1 Effect of temperatures on viscose yarn

表 1 不同上染温度下条干均匀度测试结果

Table 1 Yarn evenness testing results at different dyeing temperatures

$T/^\circ\text{C}$	CV/%	$U/\%$	Thin spots(-30%)	Thin spots(-40%)	Thin spots(-50%)	Thick spots(+35%)	Thick spots(+50%)	Thick spots(+70%)
25	12.50	9.85	0	0	0	2	1	1
40	12.19	9.62	7	1	0	0	0	0
50	15.25	12.08	11	4	0	2	0	0
60	11.44	9.55	1	0	0	0	0	0
70	15.03	12.29	3	1	0	1	0	0
80	15.02	11.30	0	0	0	3	1	0

不同温度对黏胶纤维中稳定同位素比值的影响如图 2 所示。同上,在染色温度上升的过程中, $\delta^{13}\text{C}$ 的变化较为微小,几乎不受染色的影响,但 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化更加明显。特别是 25 °C 时, $\delta^{18}\text{O}$ 值较低,表明染料分

子在这一温度下能够深入纤维内部, 与纤维的亲水性部分形成更强的结合。随着温度进一步升高, $\delta^{18}\text{O}$ 值回升, 这与染料分子更多停留在纤维表面而非深入扩散相一致。此现象表明, 高温可能导致纤维溶胀, 从而减少染料与纤维之间的深度结合, 增加表面吸附的比例。高温条件下, δD 的变化反映了纤维和染料之间的结合机制从氢键结合转向更弱的表面吸附, 这解释了 δD 值在温度升高时的整体贫化趋势(从 -60.4% 下降至 -63.9%)。低温有利于氢键的稳定, 增强了纤维对染料的吸附能力, 而高温则通过增加纤维溶胀和染料分子的热运动, 使得染料的吸附效应减弱, 导致 δD 的变化。

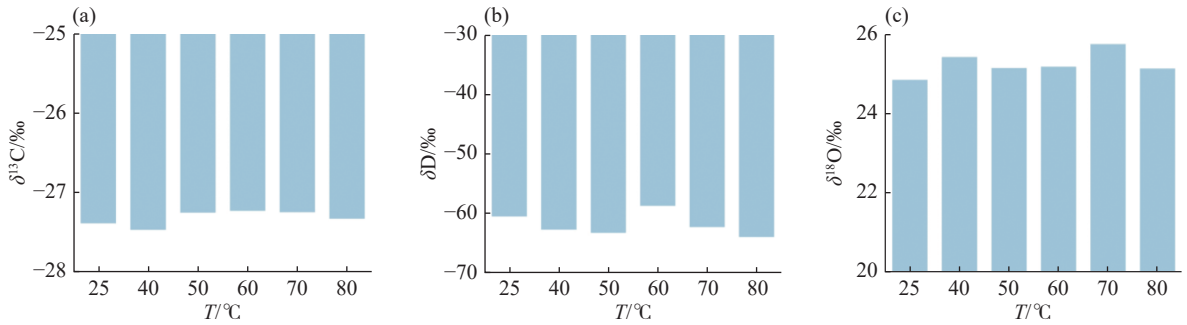


图2 不同上染温度下, 黏胶纱线中的轻稳定同位素比值
Fig. 2 Light stable isotope ratios in viscose yarn at different dyeing temperatures

2.2 染色碱浓度对纯黏胶纱线稳定同位素特征值的影响

固定染料用量为 0.5%, 染色温度为 60 °C, $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 对纯黏胶纱线的影响如图 3 所示, 相应的条干均匀度测试结果如表 2 所示。 $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 对纱线染色性能及物理性能呈现多维度调控作用。随 $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 增加, 上染率呈先小降后升趋势, 10 g/L 时为最大值, 可能因低碱条件更利于活性染料与纤维羟基的键合(图 3(a)); K/S 值则在 20 g/L 时最高, 表明适度增加碱浓度可提升染料吸附饱和度从而提升染色后纱线色深(图 3(b))。毛羽指数随 $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 升高呈增大趋势, 且从 20 g/L 到 25 g/L 时变化幅度最大, 归因于高碱环境加剧黏胶纤

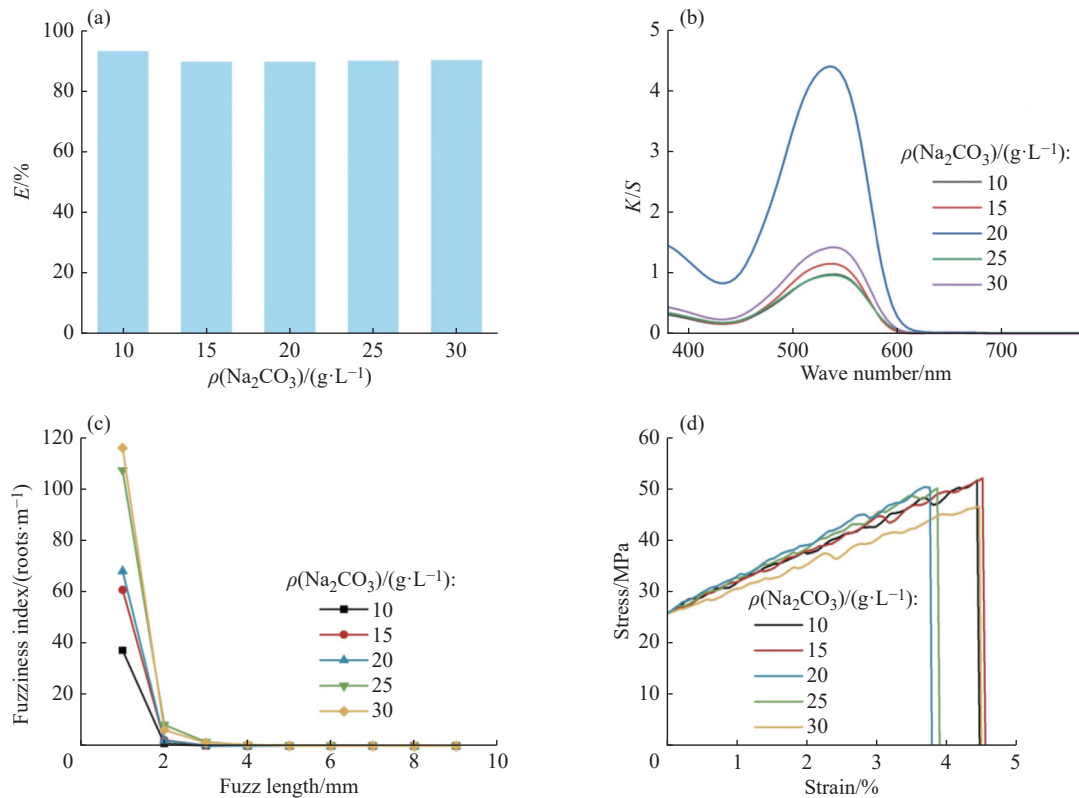


图3 碱质量浓度对黏胶纱线的影响

Fig. 3 Effect of alkali mass concentrations on viscose yarn

维溶胀损伤,导致短毛羽外露(图3(c))。应力-应变曲线(图3(d))与表2中纱线条干不匀率均表明,10~30 g/L的碱浓度对黏胶纱线影响较小,变化程度不明显。

表2 不同碱质量浓度下条干均匀度测试结果

Table 2 Yarn evenness testing results with different alkali mass concentrations

$\rho(\text{Na}_2\text{SO}_4)/$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	CV/%	U/%	Thin spots(-30%)	Thin spots(-40%)	Thin spots(-50%)	Thick spots(+35%)	Thick spots(+50%)	Thick spots(+70%)
10	12.35	9.17	1	0	0	1	0	0
15	13.52	9.75	0	0	0	2	0	0
20	12.50	9.85	0	0	0	2	1	1
25	13.93	11.34	1	0	0	0	0	0
30	13.29	10.45	1	0	0	0	0	0

在不同碱浓度条件下, $\delta^{13}\text{C}$ 、 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化趋势如图4所示。当 $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 从10 g/L升高至30 g/L时, $\delta^{13}\text{C}$ 变化仅为0.02%,与前述规律一致。随着 $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 的升高, δD 整体表现出贫化的趋势,氢键的结合能力增强,染料与纤维的结合变得更加紧密,导致氢稳定同位素的分馏效应增强。氧元素的相对分子质量相对较大,氧元素的稳定同位素值变化不如氢元素明显。在碱处理过程中,除了发生氢键的断裂,还有氢键的形成及盐式键的形成与断裂,这个过程对于氧的重、轻同位素的选择反应比较复杂,因此 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化没有明显的规律。

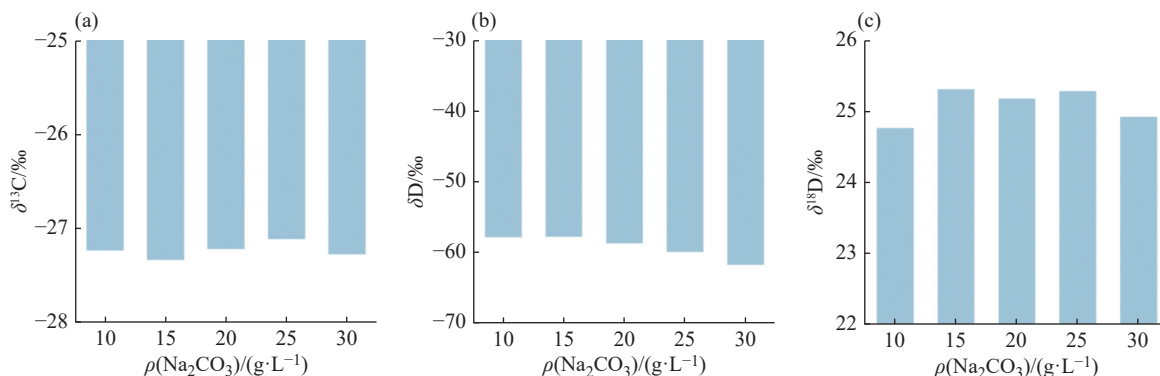


图4 不同碱浓度上染黏胶纱线中的轻稳定同位素比值

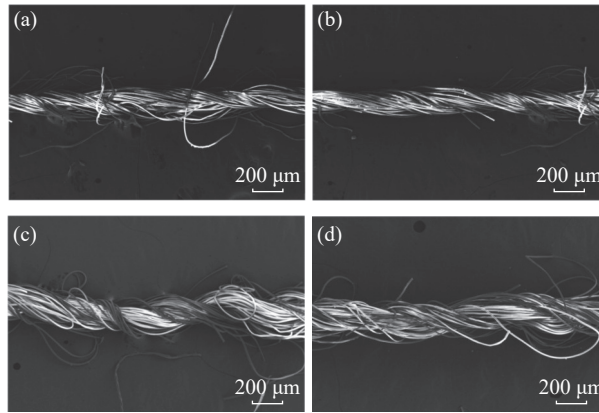
Fig. 4 Light stable isotope ratios in viscose yarn at different alkali concentrations

2.3 染料用量对纯黏胶及黏胶/涤纶混纺纱线稳定同位素特征值的影响

纱线样品的SEM图如图5所示,未染色纯黏胶纱线的纤维间抱合较为紧密,单根纤维分散较少;而经活性染料染色后,纤维表面膨胀明显,纱线结构松弛,单根纤维分散度增加。这是因为活性染料与纤维羟基形成共价键,同时染色过程通常在水溶液中进行,黏胶纤维吸收水分子导致显著膨胀^[25]。未染色黏胶/涤纶混纺纱中涤纶纤维凭借其高强度和刚性,与黏胶纤维紧密抱合,形成紧密的整体结构。涤纶的低亲水性和高机械强度使其在混纺纱中起到骨架作用,限制黏胶纤维的移动。混纺纱染色后结构显著松散,出现毛羽。这是因为活性染料主要与黏胶组分反应,导致黏胶纤维膨胀,而涤纶纤维因低染料亲和力不发生类似变化。这种差异性膨胀造成纱线内部应力,黏胶纤维的膨胀最终导致双股结构松散化,纤维外露形成毛羽,而涤纶纤维变化较小。

固定 $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 为20 g/L,染色温度为60℃,染料用量对纱线性能的影响如图6所示。随着染料用量的增加,黏胶及黏胶/涤纶混纺纱线的上染率均呈现整体降低趋势(图6(a)),当染料用量为0.5%时,纤维对染料分子的吸附达到饱和,进一步增加染料用量反而导致染色率下降。纯黏胶纱线的上染率显著高于混纺体系,这是由于黏胶纤维的强亲水性及丰富羟基可与活性染料形成共价键。随染料用量增加,纯黏胶与黏胶/涤纶混纺纱线的K/S值(538 nm处)显著提升(图6(b)),说明提高染料用量使纯黏胶及混纺纱线的上染颜色均逐

渐加深, 而纯黏胶组在相同染料用量下的 K/S 值均大于黏胶/涤纶混纺组的相应值, 进一步印证染料对亲水纤维的选择性。染色后纱线毛羽在低染料用量(1%)时均较小(图 6(c, d)), 混纺纱线毛羽指数较高, 可能与涤纶纤维的刚性特征及其在染色过程中与黏胶的异质性膨胀有关, 刚性纤维难以通过染色完全贴合, 而双组分非协同变形加剧了表面纤维端外露。



(a) Un-dyed pure viscose; (b) Un-dyed viscose/polyester blend; (c) Dyed pure viscose; (d) Dyed viscose/polyester blend

图 5 纱线的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of yarns

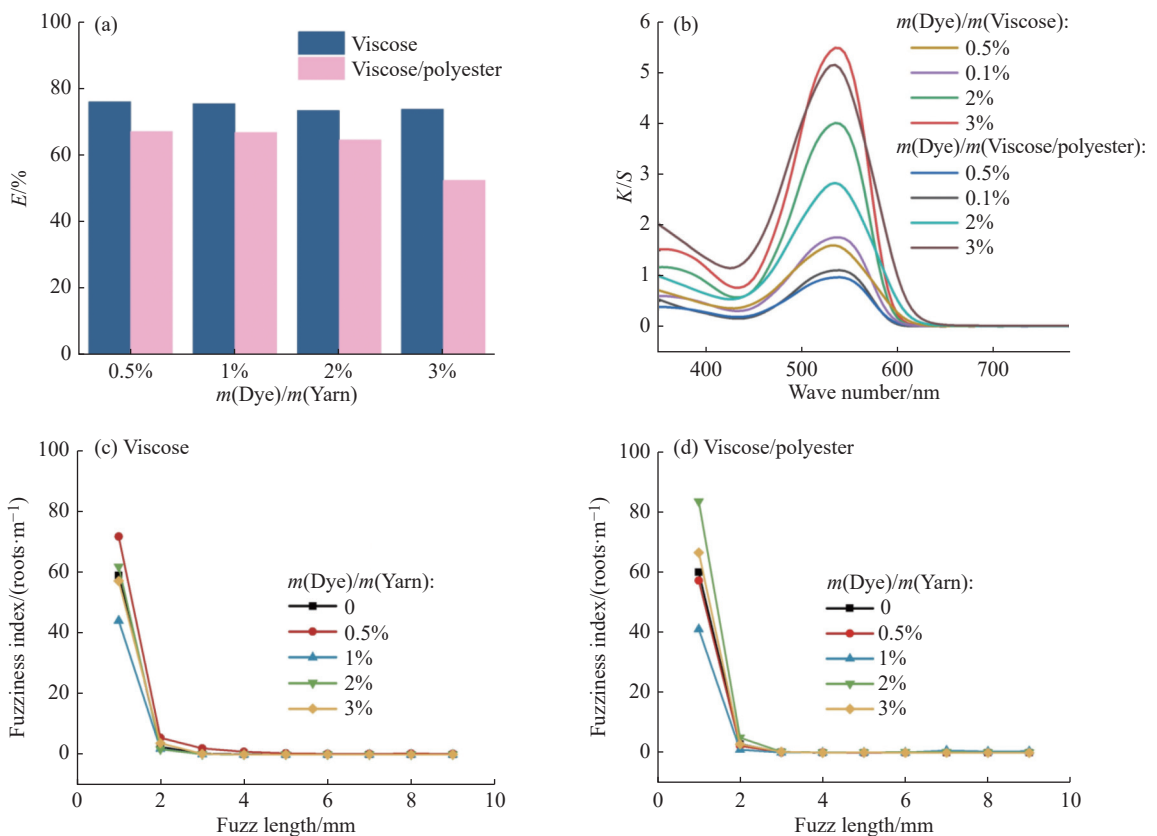


图 6 染料用量对纱线性能的影响

Fig. 6 Effect of dye amounts on yarn properties

条干均匀度测试结果如表 3 所示, 染色处理对纱线条干均匀度影响较小, 纯黏胶纱线和黏胶/涤纶混纺纱线的 CV 在染色前后波动范围分别为 11.44%~14.39% 和 10.05%~12.87%, 未表现出明显规律性变化。然而, 当染料用量为 0.5% 时, 两类纱线的 CV 及细节均显著下降, 表明低染料用量(0.5%~1%)染色可通过增强纤维间结合力改善表面结构。高染料用量(1%~3%)处理组毛羽指数无明显变化, 进一步说明染料对条干均匀度的优化存在染料用量阈值效应。

表 3 不同染料用量下条干均匀度测试结果

Table 3 Testing results of yarn evenness with different dye amounts

Yarn	$m(\text{Dye})/m(\text{Yarn})$	CV/%	U/%	Thin spots (-30%)	Thin spots (-40%)	Thin spots (-50%)	Thick spots (+35%)	Thick spots (+50%)	Thick spots (+70%)
Viscose	0	13.55	10.53	6	1	0	0	0	0
	0.5%	11.44	9.55	1	0	0	0	0	0
	1%	14.39	10.47	10	4	0	1	0	0
	2%	13.92	11.09	5	0	0	1	0	0
	3%	13.41	10.41	6	1	1	0	0	0
Viscose/polyester	0	12.22	8.48	3	2	0	0	0	0
	0.5%	10.05	6.92	0	0	0	0	0	0
	1%	12.87	9.89	3	0	0	0	0	0
	2%	12.28	10.06	0	0	0	0	0	0
	3%	12.74	10.06	1	0	0	0	0	0

不同染料用量下, 纱线的应力-应变曲线如图 7 所示, 染料用量对纱线拉伸性能的影响因纤维组分差异显著。纯黏胶纱线断裂伸长率较低, 应力峰值随染料用量增加先升后降。相比之下, 黏胶/涤纶混纺纱线因涤纶纤维的高抗拉强度及弹性模量, 断裂伸长率和应力峰值均呈现出比较好的效果, 且应力随染料用量降幅较小。综合来看, 黏胶/涤纶混纺纱线在染色后的力学性能提升主要归因于涤纶纤维的稳定性和增强效应。涤纶纤维未受反应性染料影响, 保持高强度和模量, 通过负载分担和结构支持, 减轻了染色对纱线性能的损害^[26]。这一差异表明, 涤纶组分可有效缓冲染色对纱线力学性能的损伤, 混纺体系在维持高伸长率的同时降低了性能损失。

不同染料用量下, 黏胶及黏胶/涤纶混纺纱线中的轻稳定同位素比值如图 8 所示。尽管碳作为基本骨架变化幅度较小, 但通过对 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的观察可以看出, 染料用量的增加依然对不同纤维的同位素比值产生了显著影响。具体而言, 混纺纱线 δD 随着染料用量增大而出现贫化, δD 从 -70.6% 下降到 -82.5% , 其主要原因

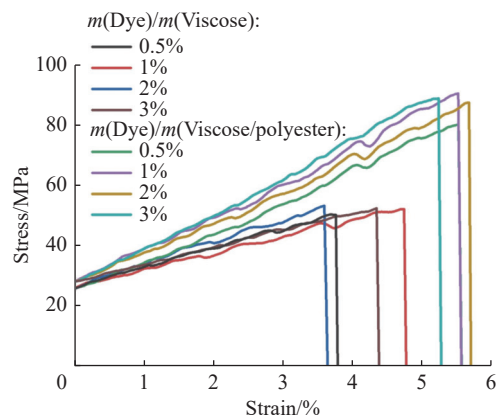


图 7 不同染料用量下, 纱线的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of yarn with different dye amounts

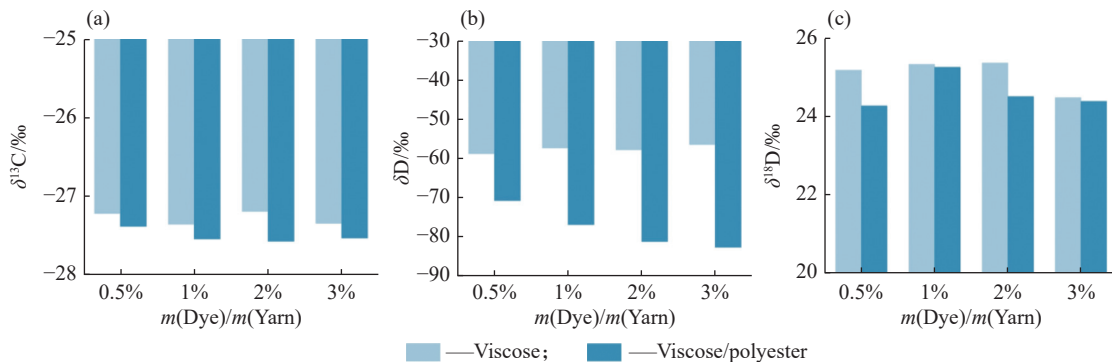


图 8 不同染料用量下黏胶及黏胶/涤纶混纺纱线中的轻稳定同位素比值

Fig. 8 Light stable isotope ratios of viscose and viscose/polyester blended yarns dyed with different dye amounts

在于染色过程中涤纶纤维与染液的水分交换和偶氮染料基团的化学反应,尤其在高温和长时间染色条件下,氢稳定同位素发生分馏和重新分布。纯黏胶纤维 δD 随着染料用量增大而呈现小程度富集, δD 变化幅度为 2.3‰,这说明黏胶纤维的染色行为与涤纶纤维不同,纤维的化学性质和亲水性在染色过程中对水分和染料的吸附以及氢稳定同位素的分布起到了决定性作用。2组纱线中 $\delta^{18}O$ 的变化幅度最大为 1‰,这表明活性染料染色过程中对氧同位素的影响是一定的,与所用的染料用量并无明显关系。

3 结 论

(1)在 25 °C 时,染色后的纯黏胶纱线 $\delta^{18}O$ 值较低,随着温度升高, $\delta^{18}O$ 值回升,染料更多停留在纤维表面,减少了深度结合。高温下, δD 表现出贫化趋势(从 -60.4‰ 下降至 -63.9‰),反映了纤维和染料之间的结合机制由氢键转向更弱的表面吸附,低温有助于氢键稳定,增强活性染料的吸附。

(2)随着碱的质量浓度从 10 g/L 升高至 30 g/L,染色后的纯黏胶纱线 δD 整体表现出贫化趋势,表明氢键的结合能力增强,染料与纤维的结合更加紧密,从而增强了氢稳定同位素的分馏效应。相比之下, $\delta^{18}O$ 的变化较为复杂,未呈现明显规律,主要受氢键的断裂、盐式键的形成及断裂等多个因素的影响,导致氧同位素的变化较为波动。

(3)在染色用量变化过程中,由于碳作为纤维基本骨架 $\delta^{13}C$ 几乎不受影响,黏胶/涤纶混纺纱线中的 δD 随着染料用量增大而出现贫化,而纯黏胶纤维则出现小幅度富集。

参考文献:

- [1] LIU Z, HUANG S, JIN W, MU Y. A novel method based on near-infrared imaging spectroscopy and graph-learning to evaluate the dyeing uniformity of polyester yarn [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 131: 107912.
- [2] WAGHMARE N, NAYAR A, TANDYEKKAL S, JUIKAR V. Influence of dye pickup on different functionalized regenerated cellulosic fibres [J]. *Cellulose*, 2023, 30(8): 5391-5406.
- [3] TANG L Y, TIAN X, HUA T. Enhancement of colour effects of dyed-yarn mixed fabrics using cramming motion and finer polyester yarns [J]. *Polymers*, 2018, 10(7): 783-804.
- [4] LI Y, ZHAI S, DONG W, YAO C, FAN Z, JIN K, ZHAO H, WANG M, CAI Z. Preparation of cationic viscose and its salt-free dyeing using reactive dye [J]. *Coloration Technology*, 2022, 138(4): 378-387.
- [5] TOKI G F I, MUNTASIN M, ROY S K, MIA R, AHMED T, ALAVE R K K, GHOSH S, ALMARHOON Z M, HOSSAIN M K. Eco-friendly sustainable dyeing of lycra viscose fabric with allium sativum using natural and metal mordants [J]. *Fibers and Polymers*, 2024, 25(10): 3887-3900.
- [6] ZACHLEDER V, VITOVA M, HLAVOVA M, MOUDRIKOVA S, MOJZES P, HEUMANN H, BECHER J R, BISOVA K. Stable isotope compounds-production, detection, and application [J]. *Biotechnol Adv*, 2018, 36(3): 784-797.
- [7] 刘静轩, 杨海亮, 贾丽玲, 郑海玲, 周旸, 娜仁高娃. 新疆尉犁营盘墓地出土魏晋时期云纹麻靴的麻织物特征 [J]. *文物鉴定与鉴赏*, 2025(4): 120-124.
LIU J X, YANG H L, JIA L L, ZHENG H L, ZHOU Y, NAREN G W. Characteristics of hemp fabrics in cloud-patterned hemp boots unearthed from the Weijin period at the Yingpan cemetery in Yili, Xinjiang [J]. *Cultural Relics Identification and Appreciation*, 2025(4): 120-124.
- [8] ZHANG M, LI C, LIU Y, ZHANG Y, NIE J, SHAO S, MEI H, ROGERS K M, ZHANG W, YUAN Y. Effects of water isotope composition on stable isotope distribution and fractionation of rice and plant tissues [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(16): 8955-8962.
- [9] ODOBEL C, JACQUIN J, SAINT-PICQ C, HINGANT M, LEMECHKO P, THOMAS T, EYHERAGUIBEL B, CÉBRON A, TERHALLE A, BARBE V, BRUZAUD S, GHIGLIONE J F. Unveiling marine plastic degraders through DNA-stable isotope probing [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 490: 137729.
- [10] DAÉID N N, MEIER-AUGENSTEIN W, KEMP H F. Investigating the provenance of un-dyed spun cotton fibre using multi-isotope profiles and chemometric analysis [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2011, 25(13): 1812-1816.
- [11] MEIER-AUGENSTEIN W, KEMP H F, SCHENK E R, ALMIRALL J R. Discrimination of unprocessed cotton on the basis of geographic origin using multi-element stable isotope signatures [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2014, 28(5): 545-552.

- [12] 刘勇. 苏木染丝织品的老化脱色对其结构性能及同位素的影响 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
LIU Y. Effects of aging and decolorization of Sappanwood-dyed silk fabrics on their structural properties and isotopes [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023.
- [13] 杨丹, 翁云, 贾丽玲, 周旻, 彭志勤. 清洗对明代传世丝绸结构及稳定同位素的影响 [J]. 现代纺织技术, 2024, 32(11): 62-71.
YANG D, WENG Y, JIA L L, ZHOU Y, PENG Z Q. Effect of washing on the structure and stable isotopes of Ming Dynasty heirloom silk fabrics [J]. *Modern Textile Technology*, 2024, 32(11): 62-71.
- [14] SZPAK P, VALENZUELA D. Camelid husbandry in the atacama desert? A stable isotope study of camelid bone collagen and textiles from the Lluta and Camarones Valleys, northern Chile [J]. *PLoS One*, 2020, 15(3): e0228332.
- [15] VON HOLSTEIN I C C, WALTON R P, CRAIG O E, PENKMAN K E H, NEWTON J, COLLINS M J. Provenancing archaeological woolltextiles from medieval northern europe by light stable isotope analysis ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^2\text{H}$) [J]. *PLoS One*, 2016, 11(10): e0162330.
- [16] MARTENS T, CAMERON J, STUART-WILLIAMS H, KURPIEL R, MYERS S. Novel approaches to material use and reuse in Victorian-Era Melbourne, Australia; New insights from stable light isotope analysis and scanning electron microscopy of fiber artifacts [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2024, 60: 104864.
- [17] 邵孟茹, 贾丽玲, 黎浩, 洪天畅, 朱恒杏, 潘家荣. 染色及老化因素对丝织物 C、N 稳定同位素比值的影响 [J]. *核农学报*, 2023, 37(10): 1987-1993.
SHAO M R, JIA L L, LI H, HONG T C, ZHU H X, PAN J R. Effect of dyeing and aging factors on the C and N stable isotope ratios of silk fabrics [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(10): 1987-1993.
- [18] PEI L, LUO Y, SALEEM M A, WANG J. Sustainable pilot scale reactive dyeing based on silicone oil for improving dye fixation and reducing discharges [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123831.
- [19] SNYDER K A, ROBINSON S A, SCHMIDT S, HULTINE K R. Stable isotope approaches and opportunities for improving plant conservation [J]. *Conservation Physiology*, 2022, 10(1): coac056.
- [20] PEI L, NIU W, WANG Y, LIU X, ZHANG S, XU J, WANG J. Synergetic construction of super-color and low-hydrolysis of reactive dyeing for cotton fiber via a linear silicone medium dyeing system [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, 43: e01288.
- [21] QUAN W, WANG J, HUANG J, ZHANG D. Structure characterization and dye adsorption properties of modified fiber from wheat bran [J]. *Molecules*, 2024, 29(11): 2581.
- [22] 全国染料标准化技术委员会 (SAC/TC 134). 染料 上染速率曲线的测定 上色率测定法: GB/T 23976.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
National Standardization Technical Committee for Dyes (SAC/TC 134). Determination of Dyeing Rate Curve, Dyeing Rate Measurement Method: GB/T 23976.1—2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
- [23] 全国纺织品标准化技术委员会基础标准分技术委员会 (SAC/TC 209/SC 1). 纺织品 卷装纱 单根纱线断裂强力和断裂伸长率的测定 (CRE 法): GB/T 3916—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
National Standardization Technical Committee for Textiles Basic Standards (SAC/TC 209/SC 1). Textiles-Spool Yarn-Determination of Single Yarn Breaking Strength and Elongation at Break (CRE Method): GB/T 3916—2013[S]. Beijing: China Standards Press, 2013.
- [24] SIDDIQUA U H, ALI S, IQBAL M, HUSSAIN T. Relationship between structure and dyeing properties of reactive dyes for cotton dyeing [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 241: 839-844.
- [25] KLANČNIK M. The influence of temperature on the kinetics of concurrent hydrolysis and methanolysis reactions of a monochlorotriazine reactive dye [J]. *Dyes and Pigments*, 2000, 46(1): 9-15.
- [26] LEWIS D M, BROADBENT P J, CARR C M, HE W D. Investigation into the reaction of reactive dyes with carboxylate salts and the application of carboxylate-modified reactive dyes to cotton [J]. *Coloration Technology*, 2022, 138(1): 58-70.

(责任编辑: 王吉晶)