

doi:10.19677/j.issn.1004-7964.2022.05.002

# 生命周期评价法评估皮革复鞣剂染整过程的环境影响

刘冠彤<sup>1</sup>, 余跃<sup>1,2\*</sup>, 曾运航<sup>1,2</sup>, 周渝翔<sup>1</sup>, 王亚楠<sup>1,2</sup>, 石碧<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学制革清洁技术国家工程实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学皮革化学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:**采用生命周期评价法对芳香族合成鞣剂 BTL、三聚氰胺树脂鞣剂 DD42、丙烯酸树脂鞣剂 LP 和荆树皮栲胶 SUN 的染整过程进行了环境影响评价。结果表明,复鞣剂和复鞣操作是制革染整过程环境影响的重要贡献者,且这四种复鞣剂染整过程的环境影响总体呈现 BTL>DD42>LP>SUN。用 SUN 进行染整时非生物资源消耗、初级能源消耗和气候变暖潜力相较于 LP 染整过程分别减少了 61%、39%和 46%,相较于 BTL 染整过程分别减少了 73%、55%和 59%。这是因为 SUN 的生产过程仅涉及少量的矿产和石化资源消耗及温室气体排放。由于 BTL 和 DD42 是用甲醛作为原料合成得到的,因此用这两种复鞣剂进行染整加工对生态质量和人体健康的影响明显高于使用 LP 和 SUN 的染整过程。综上所述,采用无甲醛的生物基材料——栲胶进行复鞣是更绿色的皮革染整工艺体系。

**关键词:**皮革;复鞣剂;染整过程;生命周期评价;环境影响

中图分类号: TS 543 文献标志码:A

## Assessing the Environmental Impact of the Post-tanning Process of Leather Retanning Agents by Life Cycle Assessment

LIU Guantong<sup>1</sup>, YU Yue<sup>1,2\*</sup>, ZENG Yunhang<sup>1,2</sup>, ZHOU Yuxiang<sup>1</sup>, WANG Yanan<sup>1,2</sup>, SHI Bi<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Clean Technology of Leather Manufacture, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Key Laboratory of Leather Chemistry and Engineering (Sichuan University), Ministry of Education, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Life cycle assessment was applied to evaluate the environmental impact of the post-tanning process of four retanning agents including aromatic syntan BTL, melamine resin DD42, acrylic resin LP and mimosa extract SUN. Results indicate that the retanning agent and the corresponding retanning operation are the important contributors to the environmental impact of post-tanning process, and the environmental impact sequence of the four tested retanning agents is BTL>DD42>LP>SUN. The abiotic depletion potential, primary energy demand, and climate warming potential of the SUN post-tanning process were reduced by 61%, 39%, and 46%, respectively, compared with that of LP post-tanning process, and were decreased by 73%, 55%, and 59%, respectively, compared with that of BTL post-tanning process. This is because only a few mineral and petrochemical resources were consumed and a little greenhouse gas was discharged in the SUN production process. Compared with the LP and SUN post-tanning processes, BTL and DD42 post-tanning processes exhibited remarkably higher environmental impact on the ecological quality and human health, because formaldehyde was used in the production processes of both BTL and DD42. Thus, formaldehyde-free biomass-based materials, i.e. vegetable extracts, are green retanning agents for leather post-tanning systems.

**Key words:** leather; retanning agent; post-tanning process; life cycle assessment; environmental impact

收稿日期:2022-04-11

基金项目:四川省天府万人计划,四川大学专职博士后研发基金项目(2021SCU12094)

第一作者简介:刘冠彤(2001-),女,在读本科生,E-mail: 2674650539@qq.com。

\* 通信联系人:余跃(1991-),男,助理研究员,主要从事皮革生物基材料的开发及应用研究,E-mail: yuyue@scu.edu.cn。

## 引言

复鞣是皮革加工过程中必不可少的关键工序,被誉为制革过程的“点金术”。这是因为复鞣不仅可以增强主鞣效果,而且还能增加得革率,减少部位差,赋予成革丰满性、耐磨性和成型性等性能<sup>[1-2]</sup>。目前,商品复鞣剂主要包括芳香族合成鞣剂、氨基树脂鞣剂、丙烯酸类树脂鞣剂和植物鞣剂等<sup>[3]</sup>。其中,芳香族合成鞣剂和氨基树脂鞣剂因其具有良好的补充鞣制和填充增厚效果而被广泛用于皮革复鞣<sup>[2,4]</sup>。然而,这两种复鞣剂由于在生产过程中普遍使用甲醛作为基础合成原料<sup>[5-6]</sup>,使所得皮革不可避免地存在甲醛释放问题<sup>[7-8]</sup>。丙烯酸树脂鞣剂的选择填充作用可赋予成革优良的丰满性和较高的得革率,且其生产过程不涉及甲醛的使用,故在制革工业中广受欢迎<sup>[9]</sup>。植物鞣剂复鞣皮革具有饱满、坚挺、成型性好的特点,且来源于纯天然的植物原料,被视为一种绿色复鞣剂<sup>[10]</sup>。

随着人们环保意识的增强,皮革复鞣剂的选择除了关注本身的功能效果外,还非常关注材料对环境的影响,尤其关注复鞣剂中的甲醛释放量<sup>[7-8]</sup>。然而,环境影响评估涉及化学品输入和废物输出对气候变化、资源消耗、生态质量和人体健康等多种影响<sup>[11]</sup>。显然,现有侧重于甲醛释放量这单一指标的评价方法具有一定的片面性,难以为绿色低碳复鞣剂的合理设计及选择提供全面指导。

生命周期评价法(LCA)是一种用于全面评估和量化与目标产品、活动或加工过程相关的环境因素和潜在影响的方法<sup>[12]</sup>。作为一种重要的环境决策工具,LCA已被广泛应用于能源<sup>[13]</sup>、食品<sup>[14]</sup>、建筑<sup>[15]</sup>和化工<sup>[16]</sup>等领域的环境影响评价。在制革领域,LCA正越来越多地被用于整个皮革加工过程<sup>[17-18]</sup>、某个阶段(如鞣制工段和染整工段)<sup>[19-21]</sup>、某项操作(如脱毛和脱灰操作)<sup>[22-23]</sup>、甚至是某种皮革化学品(如鞣剂、加脂剂、表面活性剂和纳米羟基磷灰石)<sup>[20-21,24-25]</sup>的环境影响评价。然而,现有研究尚未系统比较不同类型复鞣剂染整过程的环境影响。

本研究采用LCA对制革常用的四种复鞣剂的染整过程,包括芳香族合成鞣剂、氨基树脂鞣剂、丙烯酸树脂鞣剂和荆树皮栲胶的染整过程,进行了较为全面的环境影响评价,以期获得复鞣剂对染整过程环境性能的影响规律,进而提出选用复鞣剂和设

计染整工艺的相关建议,为皮革绿色制造提供基础数据支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 主要材料与试剂

削匀蓝湿革(1.2 mm),山东森鹿皮业有限公司;芳香族合成鞣剂 BTL、丙烯酸树脂鞣剂 LP,工业级,四川德赛尔化工实业有限公司;三聚氰胺树脂鞣剂 DD42,工业级,四川达威科技股份有限公司;荆树皮栲胶 SUN,工业级,巴西 Seta 公司;其他染整工艺中所用化工材料均为工业级。

### 1.2 主要仪器与设备

GSD 型热泵循环不锈钢控温比色实验转鼓(400 mm × 200 mm),无锡新达轻工机械有限公司;Vario TOC 型总有机碳分析仪,德国 Elementar 公司;DR6000 型紫外-可见光分光光度计,美国 HACH 公司;Optima 8000 型电感耦合等离子体发射光谱仪,美国 Perkin Elmer 公司;eFootprint 产品碳足迹及生命周期评价与管理系统,成都亿科环境科技有限公司。

### 1.3 目标与范围定义

本研究的目的是对制革常用复鞣剂的染整过程进行环境影响评价,功能单位为加工 1 kg 蓝湿革。皮革的生产过程(图 1)主要包括原料皮的获取、准备工段、鞣制工段、染整工段和表面涂饰等过程<sup>[26]</sup>。由于不同复鞣剂应用过程的输入和输出差异主要集中在染整工段,因此本研究的系统边界从蓝湿革开始,经漂洗、中和、复鞣、加脂,到坯革为止,不包括原料皮的获取、准备工段、鞣制工段以及表面涂饰过程,遵循“摇篮到大门”的方法模型(图 1)<sup>[20-21]</sup>。

### 1.4 生命周期清单分析

沿蓝湿革背脊线的对称部位取 4 块重量为 1 kg 的蓝湿革,然后以蓝湿革重量作为用料基准,按照

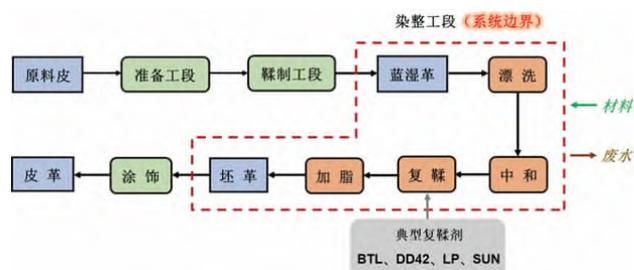


图 1 染整过程的系统边界图

Fig. 1 System boundary for post-tanning process

表 1 工艺分别采用 LP、BTL、DD42 和 SUN 对蓝湿革进行复鞣。期间,记录染整过程漂洗、中和、复鞣和加脂操作中皮化材料的输入量和废水的输出量,同时取各项操作的废水进行总有机碳(TOC)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、总氮(TN)和 Cr(III)含量分析。其中,TOC 和 TN 采用总有机碳分析仪(含氮检测元件)进行测试,COD<sub>Cr</sub>采用紫外-可见分光光度计进行测试,Cr(III)采用电感耦合等离子体发射光谱仪进行测试。另外,按照表 1 的染整工艺材料配方配制复鞣剂和加脂剂原液,用总有机碳分析仪测试原液的 TOC,再根据式(1)计算染整材料的吸收率<sup>[27-28]</sup>。

$$A = \frac{TOC_1 + TOC_2 - TOC_3 - TOC_4}{TOC_1 + TOC_2} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $A$ 表示染整材料的吸收率(%), $TOC_1$ 表示复鞣剂原液的 TOC 质量浓度(mg/L), $TOC_2$ 表示加脂剂原液的 TOC 质量浓度(mg/L), $TOC_3$ 表示复鞣剂废液的 TOC 质量浓度(mg/L), $TOC_4$ 表示加脂剂废液的 TOC 质量浓度(mg/L)。

#### 1.4.1 输入分析

由于不同复鞣剂染整过程的能耗完全一致。因此,本研究仅考察皮化材料的输入对环境的影响。如图 2 所示,加工 1 kg 蓝湿革涉及的皮化材料包括:水、甲酸、脱脂剂、甲酸钠、小苏打、复鞣剂(BTL、DD42、LP 或 SUN)、染料和加脂剂。其中,复鞣剂的输入量高达 150 g,反映了其在复鞣过程中的重要地位。

#### 1.4.2 输出分析

BTL、DD42、LP 和 SUN 染整过程的输出参数(包括废水量、TOC、COD、TN 和 Cr(III))分别如图 2

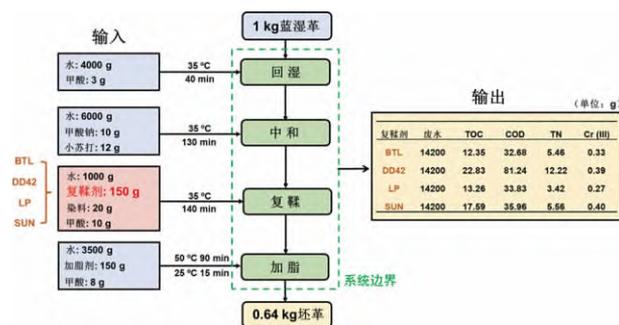


图 2 染整过程输入、输出清单

Fig. 2 Input and output inventories for post-tanning process

输出部分所示。由 TOC、COD 和 TN 结果可知,不同复鞣剂染整废水的有机污染负荷总体呈现 DD42 > SUN > LP > BTL。这是因为,DD42 与铬鞣革的结合能力弱(主要依靠磺酸基和铬形成离子键),而 SUN 的水溶性差(多以胶体形式存在)<sup>[29]</sup>,使得这两种复鞣剂难以与铬鞣革形成稳定的化学结合,在复鞣和加脂的水相操作中不可避免地被排入水中,最终导致染整材料的吸收率分别为 72.4%和 73.6%;LP 和 BTL 水溶性好,且可以分别通过羧基和酚羟基与铬形成稳定的配位键<sup>[29]</sup>,使得染整材料的吸收率分别为 81.3%和 82.5%。由 Cr(III)结果可知,不同复鞣剂染整废水中的 Cr(III)含量较为接近(0.27~0.40 g/kg 蓝湿革),且主要来源于蓝湿革中游离和结合不牢的 Cr(III)释放<sup>[30]</sup>。综上,仅从废水污染负荷的单一角度而言,与铬鞣革结合能力更强的 LP 和 BTL 相较于 DD42 和 SUN 更为清洁环保。然而,针对本文的研究目标,尚需结合材料的输入和污染物的输出全方位探讨典型复鞣剂的染整过程对环境的影响。

#### 1.5 生命周期影响评估

本研究依据 ISO 标准<sup>[31-32]</sup>,采用 eFootprint 在线系统对典型复鞣剂染整过程的环境影响进行评价,影响类别包括气候变暖(GWP)、非生物资源消耗(ADP)、初级能源消耗(PED)、水资源消耗(WU)、富营养化(EP)、生态毒性(ET)、人体毒性-非致癌(HTNC)和人体毒性-致癌(HTC)。其中,

表 1 染整工艺  
Tab. 1 Post-tanning process

操作	材料	温度/°C	用量/%	时间/min	备注	
漂洗	水	35	400	40	废液	
	甲酸		0.3			
	脱脂剂		0.5			
中和	水	35	200	30	废液	
	甲酸钠		0.6 × 2			15 × 2 + 60
	小苏打		15 × 2			
复鞣	水	35	400	10	废液, 纳入中和废液	
	水		100			
	BTL/DD42/ LP/SUN		15			60
	染料		2			
加脂	甲酸	50	0.5 × 2	10 × 2 + 30	废液	
	水		150			
	加脂剂		15			
	甲酸		0.4 × 2			15 × 2
	水		200			

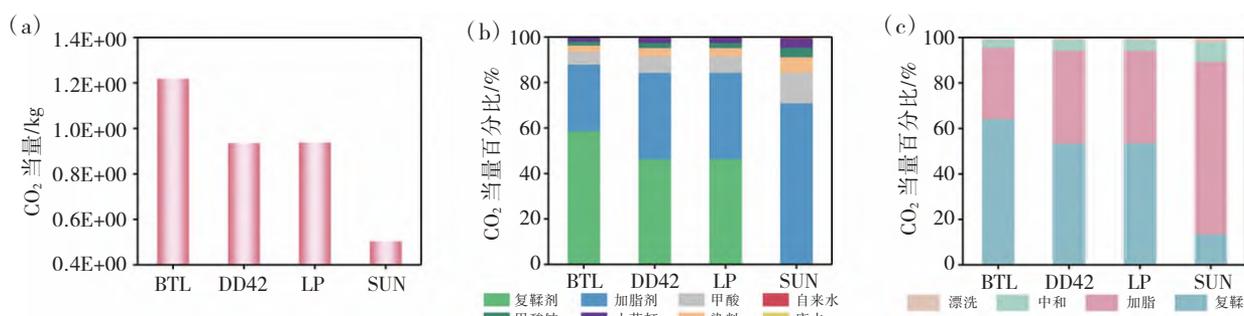


图 3 不同复鞣剂对温室气体排放的影响

(a)GWP 的特征值;(b)皮化材料和(c)各项操作对 GWP 的贡献

Fig. 3 Effect of retanning agents on greenhouse gas emissions

(a) Characteristic values of GWP; Contributions of leather chemicals (b) and various operations (c) to GWP

GWP 反映温室气体排放, PED、ADP 和 WU 反映资源消耗, EP 和 ET 反映生态质量, HTNC 和 HTC 反映人体健康<sup>[20-21]</sup>。这些环境影响类别特征值的计算原理为:生命周期清单物质在每个生命周期阶段的输入和输出变量乘以相应的系数,然后再进行加和。某个生命周期阶段的 GWP 可按式(2)计算:

$$GWP_i = \sum_j E_{ij} \times CF_j \quad (2)$$

其中,  $GWP_i$  为第  $i$  个生命周期阶段的 GWP,  $E_{ij}$  为第  $j$  个清单物质(如影响 GWP 的  $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $N_2O$  等物质)在第  $i$  个生命周期阶段的输入和输出变量,  $CF_j$  是第  $j$  个清单物质的系数(如 GWP 中  $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$  的特征因子分别为 1、25、310)<sup>[21]</sup>。

本研究涉及的输入和输出变量如图 2 所示,清单物质的系数(即特征因子)来自特征化模型(如 CML2002、Swiss Ecoscarcity 和 IPCC2013 等)<sup>[21]</sup>。水、小苏打、BTL、LP 和染料背景数据来源于 CLCD-China-ECER 0.8 数据库,甲酸、甲酸钠和加脂剂的背景数据来源于 Ecoinvent 3.1 数据库,DD42 的背景数据来源于 Ecoinvent-Public 2.2, SUN 的背景数据来源于 ELCD 3.0 数据库。由于 eFootprint 系统内置的数据库中缺少部分材料的上游数据信息,因此选取结构或功能相似的材料进行替代。根据 Cut-off 规则<sup>[33]</sup>, 总共忽略的物料重量不应超过 5%。由于本研究中脱脂剂的用量为 0.5%(表 1), 因此忽略了其上游生产数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 温室气体排放分析

随着人们对全球气候变暖问题的日益关注,碳排放已成为环境影响评价的关键指标。因此,本节首先对不同复鞣剂染整过程的 GWP 情况进行分析,结果如图 3 所示。由图 3(a)可知,加工 1 kg 蓝湿革,不同复鞣剂染整过程的 GWP 呈现 BTL(1.2 kg  $CO_2$  当量) > DD42 (0.9 kg  $CO_2$  当量)  $\approx$  LP (0.9 kg  $CO_2$  当量) > SUN (0.5 kg  $CO_2$  当量)。BTL、DD42 和 LP 染整过程对 GWP 的影响较高,这是因为这三种复鞣剂的生产过程均会产生大量的温室气体(如  $CO_2$  和  $CH_4$  等,图 4a-c)<sup>[34-36]</sup>,使得复鞣剂对 GWP 的

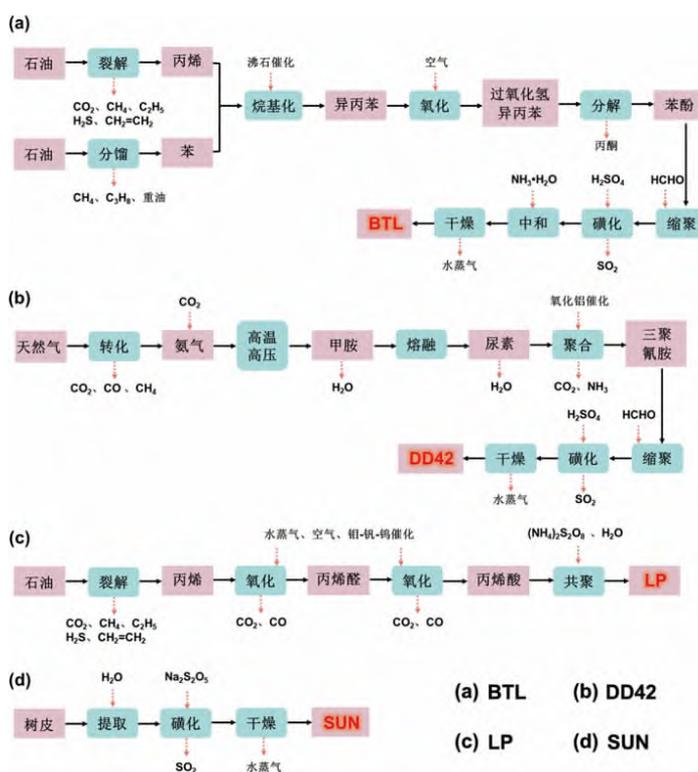


图 4 不同复鞣剂的生产流程<sup>[34-37]</sup>

Fig. 4 Production flows of different retanning agents<sup>[34-37]</sup>

贡献最大(46%~59%,图 3b),且复鞣操作对 GWP 的贡献高达 53%以上(图 3c)。SUN 染整过程对 GWP 的影响最低是因为该复鞣剂的生产过程几乎不涉及温室气体排放(图 4d)<sup>[37]</sup>,所以复鞣剂对 GWP 的贡献低至 0.2%(图 3b),相应的复鞣操作对 GWP 的贡献不足 14%(图 3c)。SUN 染整过程的 GWP 相较于 DD42 和 LP 染整过程减少了 46%,相较于 BTL 染整过程甚至减少了 59%,说明 SUN 染整过程的碳排放更低,更符合制革绿色低碳发展的需求。

## 2.2 资源消耗分析

不同复鞣剂染整过程的资源消耗情况,包括 ADP、PED 和 WU,如图 5 所示。BTL 染整过程对 ADP(图 5a)和 PED(图 5b)的影响最高,这主要是因为 BTL 是一种石化基复鞣剂,其生产过程使用了沸石(硅铝酸盐矿石)作为催化剂且需要采用大量的石油化学品(丙烯和苯)作为基础合成原料(图 4a)<sup>[34]</sup>,

故复鞣剂(图 5d、5e)和相应的复鞣操作(图 5g、5h)对 ADP 和 PED 的贡献最高,均超过 59%。DD42 和 LP 染整过程对 ADP 和 PED 的影响同样较高,这是因为 DD42 和 LP 也是石化基复鞣剂,它们的生产过程消耗了金属催化剂(钼-钒-钨和氧化铝)和石油化学品(丙烯和氨气)(图 4b、c)<sup>[35-36]</sup>。SUN 染整过程对 ADP 和 PED 的影响最低,这是因为 SUN 是一种生物基复鞣剂,其生产过程几乎不涉及矿产资源和石化资源的消耗(图 4d)<sup>[37]</sup>,所以复鞣剂和复鞣操作对 ADP 和 PED 的贡献最低,均低于 30%。相较于 LP 染整过程,SUN 染整过程的 ADP 和 PED 分别减少了 61%和 39%。相较于 BTL 染整过程,SUN 染整过程的 ADP 和 PED 甚至分别减少了 73%和 55%。四种复鞣剂染整过程的 WU 较为接近(图 5c),这是因为染整加工 1 kg 蓝湿革需要消耗 14.5 kg 工业用水(表 1),对 WU 的贡献达到 87%以上,而复鞣剂对

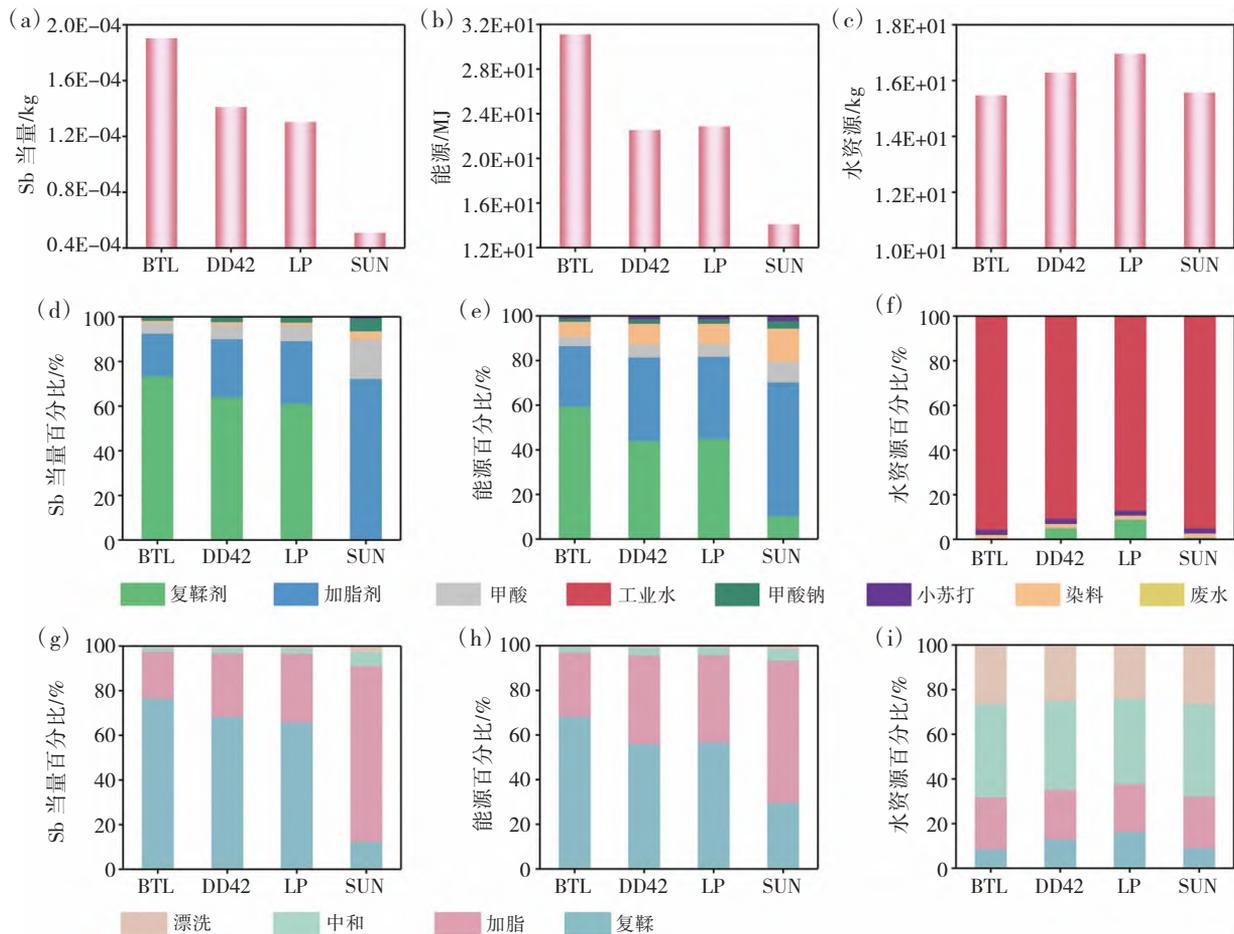


图 5 不同复鞣剂对资源消耗的影响

(a-c) ADP、PED 和 WU 的特征值; (d-f) 皮革材料和 (g-i) 各项操作对 ADP、PED 和 WU 的贡献

Fig. 5 Effect of retanning agents on resource consumption

(a-c) Characteristic values of ADP, PED, and WU; Contributions of leather chemicals (d-f) and various operations (g-i) to ADP, PED, and WU

WU 的贡献不足 9%(图 5f),影响较小。综上所述,这四种复鞣剂染整过程的资源消耗呈现 BTL > DD42 ≈ LP > SUN。由此可见,生物基复鞣剂比石化基复鞣剂更利于皮革工业的绿色发展。

### 2.3 生态质量分析

通过 EP 和 ET 指标分析了不同复鞣剂染整过程对生态质量的影响,结果如图 6 所示。DD42 染整过程对 EP 的影响最高(图 6a),这是由于 DD42 染整废水的有机污染负荷最高(图 2),染整废水对 EP 的贡献高达 69%(图 6c)。BTL 染整过程对 EP 的影响也较高,这是因为 BTL 在生产过程中消耗了大量可导致富营养化的氨水(图 4a)<sup>[38]</sup>,复鞣剂对 EP 的贡献达到 17%。SUN 和 LP 染整过程对 EP 的影响较低,前者是因为 SUN 的生产过程不涉及含氮有机物的使用(图 4d),后者是因为 LP 染整废水的有机污染负荷最低(图 2)。需要注意的是,复鞣和加脂操作对 EP 的贡献高达 91%以上(图 6e),这是因为大量复鞣剂和加脂剂未被皮革吸收,说明提高复鞣剂和加脂剂的吸收率是降低染整过程 EP 的关键。

就 ET 而言,BTL 和 DD42 染整过程对 ET 的影响较高(图 6b),这是因为 BTL 和 DD42 的生产过程使用了甲醛作为基础合成原料(图 4a、4b),而甲醛是一种典型的有毒有害水污染物<sup>[39]</sup>,复鞣剂(图 6d)

和复鞣操作(图 6f)对 ET 的贡献高达 55%以上。LP 染整过程因使用不含甲醛的 LP 而表现出较低的 ET 影响。SUN 染整过程对 ET 的影响最低,这主要得益于 SUN 是一种天然低毒复鞣剂,对 ET 的贡献几乎为零(图 6d),不会危害生命有机体。综合而言,四种复鞣剂染整过程对生态质量的影响呈现 BTL > DD42 > LP > SUN。这说明天然低毒生物基复鞣剂的使用可以减少皮革加工对生态系统的影响。

### 2.4 人体健康分析

随着生活水平的不断提高,人们对身体健康有了更为迫切的追求。本研究采用 HTNC 和 HTC 指标分析了不同复鞣剂染整过程对人体健康的影响,结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,四种复鞣剂染整过程的 HTNC 呈现 BTL > DD42 > LP > SUN。该规律与复鞣剂(图 7c)和复鞣操作(图 7e)的贡献规律一致,也与这些复鞣剂的甲醛含量正相关,这主要是因为甲醛可引起人体多个器官(如皮肤、眼睛和上呼吸道黏膜)和多项系统(如呼吸系统和生殖系统)的损伤<sup>[40-41]</sup>。DD42 和 BTL 染整过程对 HTC 的影响较高,这是因为这两种复鞣剂在生产过程中使用了具有致癌作用的甲醛<sup>[42-43]</sup>。DD42 染整过程的 HTC 是 BTL 染整过程的 3 倍,这是因为生产 DD42 时三聚氰胺与甲醛的物质的量比通常为 1 : 3,而生产

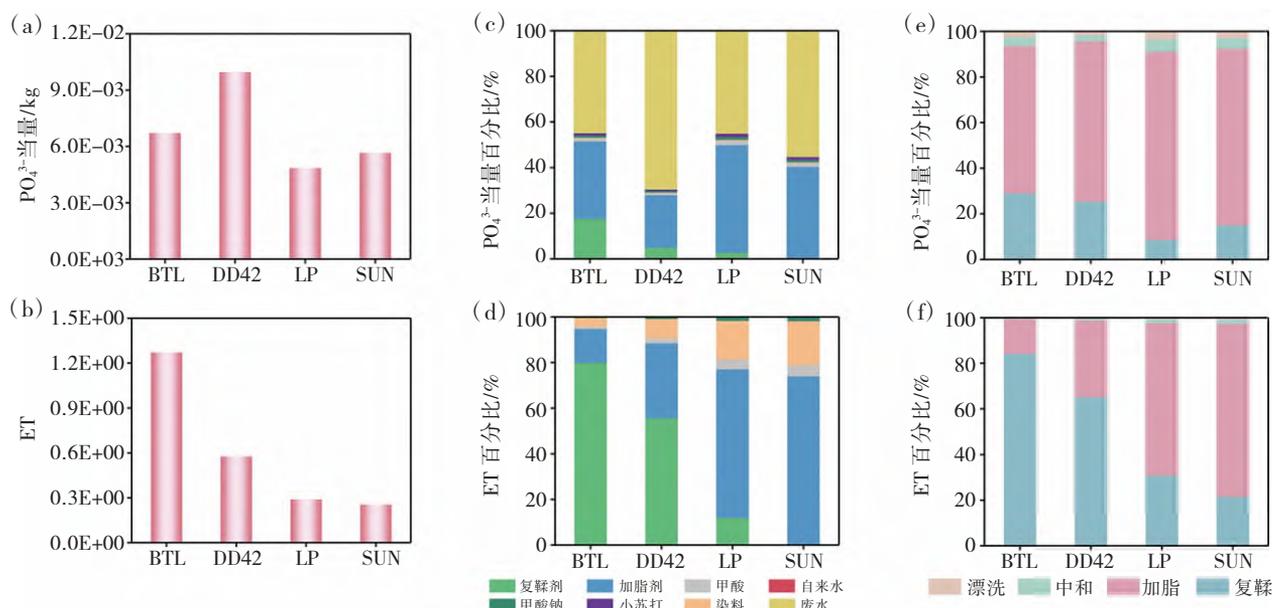


图 6 不同复鞣剂对生态质量的影响

(a, b) EP 和 ET 的特征值;(c, d)皮化材料和(e, f)各项操作对 EP 和 ET 的贡献

Fig. 6 Effect of retanning agents on ecosystem quality

(a, b) Characteristic values of EP and ET; Contributions of leather chemicals (c, d) and various operations (e, f) to EP and ET

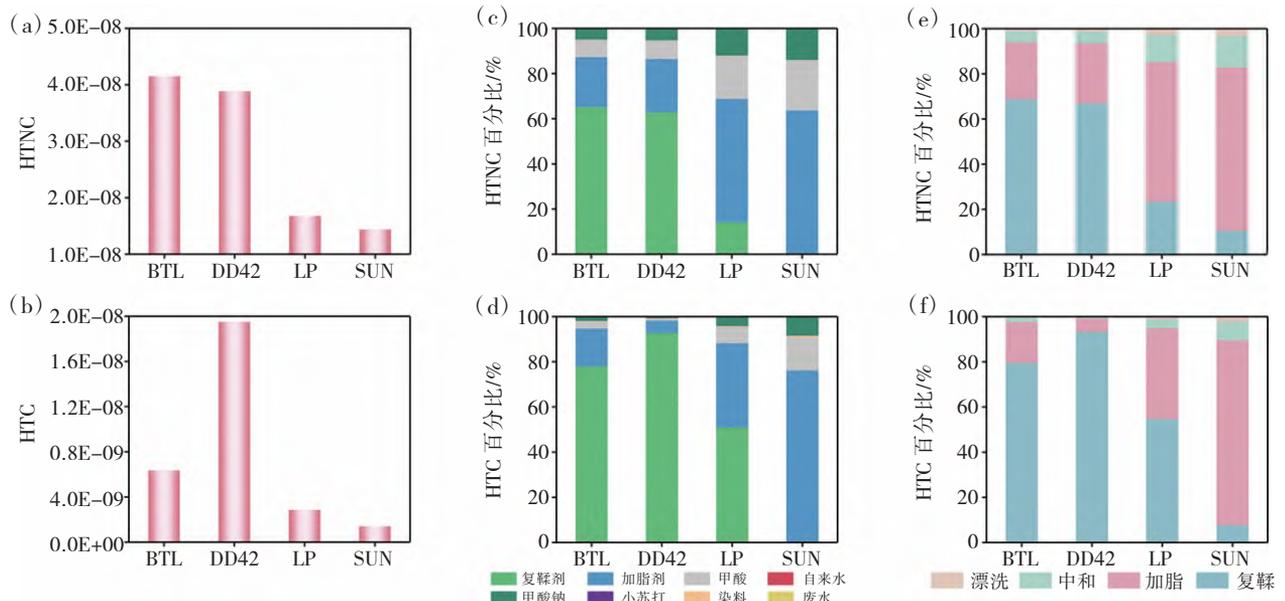


图 7 不同复鞣剂对人体健康的影响

(a, b) HTNC 和 HTC 的特征值; (c, d) 皮化材料和 (e, f) 各项操作对 HTNC 和 HTC 的贡献

Fig. 7 Effect of retanning agents on human health

(a, b) Characteristic values of HTNC and HTC; Contributions of leather chemicals (c, d) and various operations (e, f) to HTNC and HTC

BTL 时苯酚与甲醛的物质的量比通常为 1 : 1<sup>[29]</sup>。LP 和 SUN 染整过程因不涉及含甲醛复鞣剂的使用而表现出较低的 HTC 影响。总体而言,四种复鞣剂染整过程对人体健康的影响呈现 BTL>DD42>LP>SUN。由此可见,无甲醛的复鞣剂,尤其是无甲醛的生物基复鞣剂,对人体健康更为友好。

### 3 结论

与仅从甲醛释放角度评价环境影响的方法相比,LCA 能对皮革复鞣剂染整过程涉及的温室气体排放、资源消耗、生态质量和人类健康等多种环境影响指标进行全面评价。复鞣剂及其相应的复鞣操作是染整过程大多数环境影响类别的重要贡献者,因此应重视复鞣剂和染整工艺的生态设计。各种复鞣剂的染整过程的环境友好性呈现:栲胶类>丙烯酸树脂类>三聚氰胺树脂类>芳香族合成鞣剂类。由此可见,选择无甲醛且天然低毒的生物物质,如栲胶等作为原料,开发功能和环境效益俱佳的复鞣剂,有助于推动制革绿色低碳技术的发展。

#### 参考文献:

- [1] 郝东艳,王学川,朱兴,等.两性聚合物在皮革中的应用研究进展[J].皮革科学与工程,2020,30(5):33-39.
- [2] Sun Q Y,Zeng Y H,Wang Y N,et al.A deeper exploration of

the relation between sulfonation degree and retanning performance of aromatic syntans [J].Journal of Leather Science and Engineering,2021,3:1.

- [3] Song Y,Wang Y N,Zeng Y H,et al.Quantitative determinations of isoelectric point of retanned leather and distribution of retanning agent [J].Journal of the American Leather Chemists Association,2018,113(7):232-238.
- [4] Zhou J B,Li P L,Zhou J F,et al.Preparation of formaldehyde-free melamine resin using furfural as condensation agent and its retanning performances investigation[J].Journal of the American Leather Chemists Association,2018,113:198-206.
- [5] 陈银杰,张文华,黄嘉卉,等.芳香族鞣剂 SCP 的合成及其鞣性研究[J].皮革科学与工程,2014,24(4):5-10.
- [6] Agust í M,Sara C,Rosa M,et al.Dyestuffs and formaldehyde content in split leather treated with formaldehyde resins[J].Dyes and Pigments,2018,158:50-59.
- [7] 韩凯翔,游川锐,单志华.无甲醛双氰胺及三聚氰胺树脂功能表征[J].皮革科学与工程,2020,30(2):12-15.
- [8] Ashraf M N,Khan S M,Munir S.Synthesis of formaldehyde free amino resin to produce green eco-labelled leather with improved retanning properties [J].Journal of the American Leather Chemists Association,2020,115(4):132-139.
- [9] Song Y,Zeng Y H,Xiao K L,et al.Effect of molecular weight of acrylic resin retanning agent on properties of leather[J].Journal of the American Leather Chemists Association,2017,112:128-134.
- [10] 王全杰,任方萍,高龙,等.新型植物皮革鞣剂的研究进

- 展[J].皮革科学与工程,2011,21(4):38-40.
- [11] 梁龙,杭胜,彭澎,等.“五结合”生态温室生命周期评价及比较分析[J].中国农业资源与区划,2019,40(5):1-8.
- [12] Chowdhury Z U M,Ahmed T,Antunes A P M,et al.Environmental life cycle assessment of leather processing industry:A case study of bangladesh [J].Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists,2018,102(1):18-26.
- [13] Ali P,Hossein A,Sattar S.Embodied energy and CO<sub>2</sub> emissions of life cycle assessment (LCA)in the traditional and contemporary Iranian construction systems [J].Journal of Building Engineering,2021,39:102310.
- [14] Vidergar P,Perc M,Lukman R K.A survey of the life cycle assessment of food supply chains [J].Journal of Cleaner Production,2021,286:125506.
- [15] Llatas C,Bizcocho N,Soust-Verdaguer B,et al.An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings[J].Waste Management,2021,126:608-622.
- [16] Daniela R G,Jose L,Ofelia Q F.Sustainability assessment for the chemical industry:Onwards to integrated system analysis [J].Journal of Cleaner Production,2021,278:123966.
- [17] Navarro D,Wu J H,Wei L,et al.Life cycle assessment and leather production [J].Journal of Leather Science and Engineering,2020,2:26.
- [18] 袁琳琳,姚庆达,但年华,等.铅-铝-钛鞣黄牛革全生命周期评价[J].中国皮革,2022,51(1):7-13.
- [19] 徐晓颖,石佳博,王坤余.基于LCA法对比传统铬鞣工艺和改性戊二醛鞣工艺[J].皮革科学与工程,2015,25(1):5-12.
- [20] Yu Y,Lin Y R,Zeng Y H,et al.Life cycle assessment for chrome tanning,chrome-free metal tanning,and metal-free tanning systems[J].ACS Sustainable Chemistry&Engineering,2021,9(19):6720-6731.
- [21] Yu Y,Sun Q Y,Zeng Y H,et al.Diagnosing the environmental impacts of typical fatliquors in leather manufacture from life cycle assessment perspective [J].Journal of Leather Science and Engineering,2022,4:6.
- [22] Catalan E,Komilis D,Sanchez A.A life cycle assessment on the dehairing of rawhides:chemical treatment versus enzymatic recovery through solid state fermentation [J].Journal of Industrial Ecology,2019,23(2):361-373.
- [23] Lei C,Lin Y R,Zeng Y H,et al.A cleaner delimiting technology with glycine for ammonia-nitrogen reduction in leather manufacture[J].Journal of Cleaner Production,2020,245:118900.
- [24] Rosa R,Pini M,Neri P,et al.Environmental sustainability assessment of a new degreasing formulation for the tanning cycle within leather manufacturing [J].Green Chemistry,2017,19(19):4571-4582.
- [25] Ingrao C,Vesce E,Evola R S,et al.Chemistry behind leather: Life cycle assessment of nano-hydroxyapatite preparation on the lab-scale for freproofng applications[J].Journal of Cleaner Production,2021,279:123837.
- [26] Covington A D,Wise W R.Current trends in leather science [J].Journal of Leather Science and Engineering,2020,2:28.
- [27] Yu Y,Wang H,Wang Y N,et al.Construction of a chrome-free tanning system based on highly-oxidized starch-zirconium complexes[J].Journal of the American Leather Chemists Association,2022,117(3):87-95.
- [28] 胡玥,王嘉莹,余跃,等.不同鞣制方法对皮革轻飘感的影响[J].皮革科学与工程,2022,32(1):15-20.
- [29] 周华龙,何有节.皮革化工材料学[M].北京:科学出版社,2010,7:21-22,63-73.
- [30] Yu Y,Zeng Y H,Wang Y N,et al.Inverse chrome tanning technology:A practical approach to minimizing Cr(III)discharge[J].Journal of the American Leather Chemists Association,2020,115(5):176-183.
- [31] ISO 14040.Environmental management-life cycle assessment-principles and framework.Geneva,Switzerland,2006.
- [32] ISO 14044.Environmental management-life cycle assessment-requirements and regulations.Geneva,Switzerland,2006.
- [33] 袁琳琳,姚庆达,但年华,等.铬鞣黄牛革全生命周期评价[J].皮革科学与工程,2021,31(4):11-16.
- [34] 崔小明.苯酚生产技术及国内外市场分析[J].上海化工,2015,40(6):33-38.
- [35] 王斐.简述三聚氰胺的生产工艺及高压尿素法尾气处理[J].四川化工,2020,23(3):7-8.
- [36] 张志鑫,王业红,张超锋,等.丙烯酸催化合成新进展[J].化工进展,2021,40(4):2016-2033.
- [37] 杭锡勤.巴西黑荆树皮栲胶生产 [J].生物质化学工程,1985,8:28-29.
- [38] 王健.煤气化工艺中高氨氮废水的处理方法[J].化工管理,2018,(33):185.
- [39] 韩姝伊,魏凯,陈春山,等.四种常用消毒剂对细鳞鲑幼鱼的急性毒性[J].水产学杂志,2018,31(6):7-11.
- [40] 余跃,韩君懋,王亚楠,等.基于铝-铅络合物的兔皮无甲醛鞣制技术[J].中国皮革,2021,50(2):7-13.
- [41] 陈颖,盛志豪,陈秋冲,等.醒脑再造胶囊对甲醛致小鼠呼吸系统损害的影响[J].徐州医学院学报,2020,40(1):30-32.
- [42] Sonal K,Neelam B,Anita L,et al.BTEX and formaldehyde levels at a suburban site of Agra:Temporal variation,ozone formation potential and health risk assessment [J].Urban Climate,2021,40:100997.
- [43] Shao W C,Wu H Y,Angus S,et al.Chitosan-dosed adsorptive filter media for removal of formaldehyde from indoor air-performance and cancer risk assessment [J].Chemical Physics Letters,2021,779:138836.