

毛纺织产品基准水足迹的核算与评价

严芳英¹, 陈必林², 王来力^{*2,3}, 柯莹⁴

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 浙江理工大学 服装学院, 浙江 杭州 310018; 3. 浙江理工大学 丝绸文化传承与产品设计数字化技术文化和旅游部重点实验室, 浙江 杭州 310018; 4. 江南大学 设计学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:毛纺织产品生产加工过程中的洗毛、染色、整理等工艺环节会消耗水资源并排放废水。基于 ISO 14046—2014 标准中水短缺足迹和水劣化足迹的核算方法,运用国家标准中毛纺织品生产的取水定额及废水污染物排放限额数据,对毛纺织产品的基准水足迹进行核算,评价毛纺织产品生产对水资源环境的影响。研究表明:粗梳毛织物(纱染)生产过程产生的基准水短缺足迹最大,约为 329.84 m³/t;染整工艺环节排放的可吸附有机卤素为引起水体富营养化的主要污染物,占总基准水体富营养化足迹的 58.25%;染色废水中的硫化物是引起水体酸化的主要污染物,毛纺织产品的基准水酸化足迹为 0.003 3 kg/t;总铬是水体生态毒性的特征污染物,毛纺织产品的基准水体生态毒性足迹为 6 kg/t。

关键词:毛纺织产品;水短缺足迹;水劣化足迹;核算;评价

中图分类号:TS 136 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2021)06-0484-06

Calculation and Assessment of Benchmark Water Footprint of Wool Textile Products

YAN Fangying¹, CHEN Bilin², WANG Laili^{*2,3}, KE Ying⁴

(1. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Fashion Design and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. Key Laboratory of Silk Culture Heritage and Products Design Digital Technology, Ministry of Culture and Tourism, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 4. School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In the process of the production of wool textile products, water resources are consumed and waste water is discharged in the processes of wool-scouring, dyeing, finishing and so on. Based on the calculating method of water shortage footprint and water degradation footprint in ISO 14046—2014, this paper used the water intake quota and pollutant discharge quota data of wool textile products' production in Chinese standards to calculate the benchmark water footprint of wool textile products. It evaluated the impact of wool textile products' production process on water resources and environment. The results show that the largest benchmark water shortage footprint is generated from the production process of woolen fabric (yarn dyeing), which is around 329.84 m³/t. AOX discharged from the dyeing-finishing process is the main pollutant causing water eutrophication, and it accounts for 58.25% of the total eutrophication footprint of benchmark water footprint. Sulfide discharged from dyeing-finishing process is the main pollutant causing water acidification. The acidification of benchmark water footprint is 0.003 3 kg/t. The total chromium is the characteristic pollutant of water ecotoxicity, and the exotoxicity footprint of benchmark water footprint is 6 kg/t.

Key words: wool textile products, water shortage footprint, water degradation footprint, calculation, evaluation

收稿日期:2021-02-29; 修订日期:2021-09-09。

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY20G030001)。

作者简介:严芳英(1998—),女,硕士研究生。

*通信作者:王来力(1985—),男,副教授,硕士生导师。主要研究方向为纺织服装产品可持续发展理论。

Email: wangll@zstu.edu.cn

毛纺织产品保暖性佳、吸湿性优良,是重要纺织及服用材料,深受消费者喜爱。原毛到毛织物制成品的生产加工过程中,洗毛、染色、后整理等工艺环节消耗水资源,并且排放高浓度的废水,对水资源环境造成影响。洗毛废水的主要成分是羊毛脂,具有较高的 COD(chemical oxygen demand, 化学需氧量)^[11];染整废水成分复杂,含有铬、砷等有毒重金属污染物^[2]。《毛纺织行业“十四五”发展指导意见(讨论稿)》^[3]指出,毛纺织行业要向低碳经济型、技术进步型、集约型增长的发展方式转变,实现“科技、绿色、时尚”的新发展目标。

评价毛纺织产品生产链段耗水、废水排放引发的水资源环境负荷对毛织物的绿色制造具有很好的指导意义。在毛纺织行业的羊绒领域,已发布了 T/CNTAC 29—2018《羊绒制品生产过程水足迹评价方法》^[4],对于在毛纺织行业推广水足迹核算与评价具有先行意义。“水足迹”的概念最早是 HOEKSTRA A Y 等^[5]提出的,它量化了已知人类生命活动在一定时间内对水资源环境负荷的影响。在纺织领域,CHAPAGAIN A K 等^[6]、CHICO D 等^[7]、王来力等^[8]对棉纺织品进行水足迹研究;何琬文等^[9]、许璐璐等^[10]、朱菊香等^[11-12]核算了丝绸、涤纶、黏胶等纺织产品的水足迹;孙丽蓉等^[13]核算了羊绒针织品的水足迹及不同加工过程的间接

水足迹;任洁等^[14]采用 8 家毛纺企业的实测数据,基于 ISO 14046—2014 标准^[15]对羊毛织物生产的 3 个工艺环节(前处理、染色、印花)进行水足迹的核算与评价。

当前的纺织产品水足迹研究多为单一或几个产品水足迹的核算与评价示范,仅能表征孤立样本的水足迹结果,不能充分反映产品类别的水足迹水平。鉴于此,文中以 ISO 14046—2014 标准中水足迹的核算方法为基础,运用国家标准^[16-19]中毛纺织产品生产的取水定额及废水污染物排放限额数据,核算毛纺织产品的基准水足迹,评价其生产过程对水资源环境的影响,为毛纺织产品的绿色生产和环境负荷评价提供参考。

1 基准水足迹的核算

1.1 核算边界

结合毛纺织产品生产工艺环节的特征和生产过程中水资源的使用及废水的排放,确定毛纺织产品水足迹核算的时间和空间边界,具体如图 1 所示。由图 1 可以看出,时间边界为原毛经过洗毛、碳化、染色和整理后生产出毛纺织产品的工艺过程;空间边界包括毛纺织产品生产加工时间边界内的水资源投入和废水及污染物的排放。

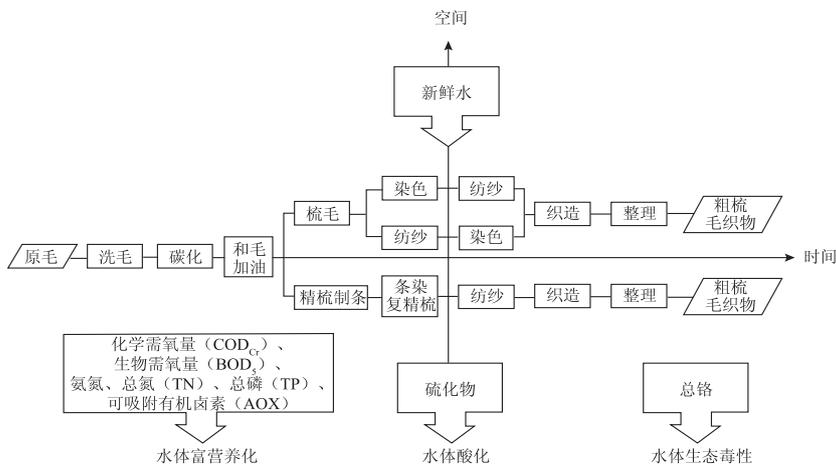


图 1 毛纺织产品基准水足迹核算边界

Fig. 1 Calculation boundary of wool textile products' benchmark water footprint

1.2 核算方法

毛纺织产品生产需要消耗大量的新鲜水,过程中会排放废水及水污染物,导致水资源短缺和水环境污染。

1.2.1 水短缺足迹 水短缺足迹是以相关地区的水压力指数和产品生产过程中所需的产品取水量为基准,衡量产品生产过程对水短缺影响的指标。水短缺足迹的核算方法为

$$F_{ws} = \sum_{i=1}^4 \frac{I_{wp,C}}{I_{wp,gl}} \cdot V_i \quad (1)$$

式中: F_{ws} 为水短缺足迹,即消耗的新鲜水体积(m^3); $I_{wp,C}$ 、 $I_{wp,gl}$ 分别表示中国平均水压力指数和全球平均水压力指数; V_i 表示产品生产过程的耗水量(m^3), i 为产品工艺环节,其中 1~4 分别代表洗毛、碳化、染色、整理环节。

1.2.2 水劣化足迹 水劣化足迹是衡量产品生产

过程中排入水体的各类污染物对水质劣化影响的指标。毛纺织产品生产过程产生的水劣化足迹可以分为3种,即水体富营养化足迹、水酸化足迹和水体生态毒性足迹。

水体富营养化足迹的核算方法为

$$F_{weu} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 C_{eu,i} \times Q_{eu,j} \quad (2)$$

式中: F_{weu} 表示水体富营养化足迹,即每吨废水中 PO_4^{3-} 的质量(kg); $C_{eu,i}$ 表示导致水体富营养化污染物*i*的特征因子,即污染物富营养化潜力系数(PO_4^{3-} 富营养化潜力系数为1); $Q_{eu,j}$ 表示工艺环节*j*排入水体富营养化污染物*i*的质量(kg),其中1,2分别代表洗毛、染整环节。

水酸化足迹的核算方法为

$$F_{waci,S} = C_{aci,S} \times Q_{aci,S} \quad (3)$$

式中: $F_{waci,S}$ 表示水酸化足迹,即每吨废水中污染物硫化物的质量(kg); $C_{aci,S}$ 表示导致水酸化污染物硫化物的特征因子,即污染物酸化潜力系数(SO_2 酸化潜力系数为1); $Q_{aci,S}$ 表示导致水酸化污染物硫化物排放的质量(kg)。

水体生态毒性足迹的核算方法为

$$F_{weco,Cr} = C_{eco,Cr} \times Q_{eco,Cr} \quad (4)$$

式中: $F_{weco,Cr}$ 表示水体生态毒性足迹,即每吨废水中污染物总铬的质量(kg); $C_{eco,Cr}$ 表示有毒污染物总铬的特征因子,即污染物水体生态毒性潜力系数(Cr 生态毒性潜力系数为1); $Q_{eco,Cr}$ 表示有毒污染物总铬的质量(kg)。

1.3 核算数据

GB/T 18916.14—2014《取水定额 第14部分:毛纺织产品》^[16]中,采用取水定额指标数据计算毛纺织产品生产过程引起的水短缺足迹,具体见表1。水压力指数(I_{wp})通过查询谷歌地图确定,查询得到中国平均水压力指数为0.266。水污染排放的标准采用GB 4287—2012《纺织染整工业水污染物排放标准》^[17]和GB 28937—2012《毛纺工业水污染物排放标准》^[18],其中总铬排放限额参照GB 8978—1996《污水综合排放标准》^[19],具体污染物排放限额见表2、表3。毛纺织产品生产过程中排放的相关水污染物特征因子取自参考文献[9]和[20],具体见表4。

表1 毛纺织产品的取水定额指标

Tab.1 Quota index of water intake for wool textile products

工艺环节	单位产品取水定额/(m ³ /t)		
	现有企业	新建和改扩建企业	先进企业
洗净毛(原毛—洗净毛)	22	18	14
碳化毛(洗净毛—碳化毛)	25	22	18
色毛条(白毛条—色毛条)	140	120	75
色毛及其他纤维(洗净毛—色毛)	120	100	60
色纱(白纱—色纱)	150	130	80
毛针织品(整理)	90	70	45
	单位产品取水定额/(m ³ /100 m)		
精梳毛织物(白毛条—精梳毛织物)	22	18	12
粗梳毛织物(洗净毛—粗梳毛织物)	24	22	14

注:精梳毛织物标准品单位质量为30 kg/100 m;粗梳毛织物标准品单位质量为60 kg/100 m。

表2 染整废水污染物排污限额

Tab.2 Pollution discharge quota of dyeing and finishing waste water

项目	污染物排放限值/(mg/L)			
	现有企业、新建和改扩建企业		特别地域范围	
	直接排放	间接排放	直接排放	间接排放
COD _{Cr}	80.0	200.0	60.0	80.0
BOD ₅	20.0	50.0	15.0	20.0
氨氮	10.0	20.0	8.0	10.0
TN	15.0	30.0	12.0	15.0
TP	0.5	1.5	0.5	0.5
AOX	12.0		8.0	
硫化物	0.5		0	
总铬			1.5	
	污染物排放限值/(m ³ /t)			
精梳毛织物基准排水量	500.0			
粗梳毛织物基准排水量	575.0			

注:毛织物标准品按布幅1500 cm、单位质量30 kg/100 m折算。

表3 毛纺工业废水污染物排放限额

Tab.3 Discharge quota of waste water pollutants in wool textile industry

项目	污染物排放限值/(mg/L)			
	现有企业、新建和改扩建企业		特别地域范围	
	直接排放	间接排放	直接排放	间接排放
COD _{Cr}	80.0	200.0	60.0	80.0
BOD ₅	20.0	50.0	15.0	20.0
氨氮	10.0	25.0	8.0	10.0
TN	20.0	40.0	15.0	20.0
TP	0.5	1.5	0.5	0.5
动植物油	10.0		3.0	
基准排水量	20.0		15.0	

表4 水劣化足迹污染物的特征因子

Tab.4 Characteristic factors of water degradation footprint pollutants

影响类型	污染物指标	特征因子
水体富营养化	COD _{Cr}	0.022
	BOD ₅	0.110
	氨氮	0.330
	TN	0.420
	TP	3.060
	AOX	5.700
水酸化	硫化物	0.003 3
水体生态毒性	总铬	1

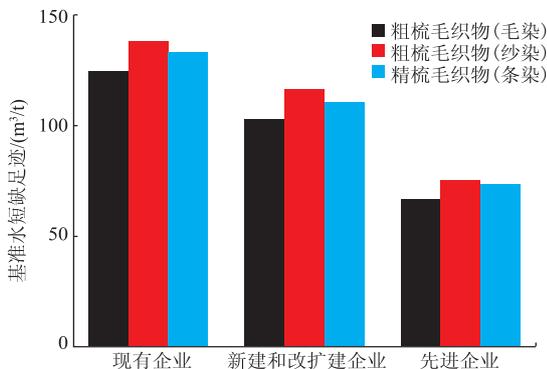


图2 不同企业3种类型毛纺织产品基准水短缺足迹
Fig.2 Benchmark water shortage footprints of three types of wool textile products in different enterprises

2 结果与分析

2.1 毛纺织产品基准水短缺足迹

由于毛纺织产品生产工艺以及染色工艺环节次序不同,将毛纺织产品分为粗梳毛织物(毛染:洗净毛—色毛)、粗梳毛织物(纱染:白纱—色纱)和精梳毛织物(条染:白毛条—色毛条)3种类型。根据式(1)核算毛纺织产品基准水短缺足迹,核算结果如图2所示。

毛纺织产品的基准水短缺足迹主要取决于染色工艺环节的单位取水量。由图2可以看出,3种类型毛纺织产品的基准水短缺足迹差异较小,由于粗梳毛织物在由洗净毛经染色变为色毛的过程中单位取水量最小,所以基准水短缺足迹从小到大排序为:粗梳毛织物(毛染) < 精梳毛织物(条染) < 粗梳毛织物(纱染)。不同类型的企业的取水定额指标不同,由图2可知,3类企业生产的毛纺织产品基准水短缺足迹限额排序为:先进企业 < 新建和改扩建企业 < 现有企业。先进企业的取水定额指标最为严苛,其生产的粗梳毛织物(毛染)基准水短缺足迹最小,为66.94 m³/t;现有企业生产的粗梳毛织物(纱染)基准水短缺足迹最大,为137.88 m³/t。

2.2 毛纺织产品基准水劣化足迹

毛纺织产品生产会引起水环境劣化,其主要工艺环节包括洗毛和染整,生产过程中排放的各种污染物会导致水体富营养化污染。不同类型企业生产毛纺织产品所排放的污染物限额不同,其基准水体富营养化足迹核算结果如图3所示。毛纺织产品洗毛和染整两个工艺环节的基准水体富营养化足迹核算结果如图4所示。

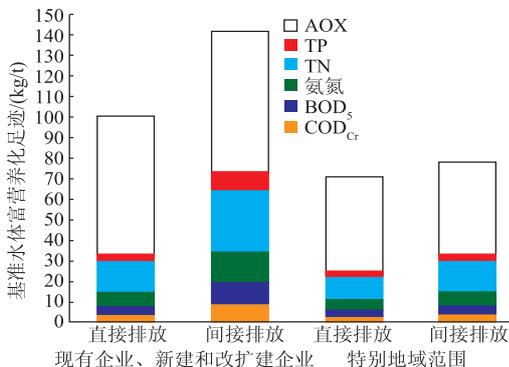


图3 不同类型企业毛纺织产品基准水体富营养化足迹
Fig.3 Benchmark water eutrophication footprints of different types of enterprises' wool textile products

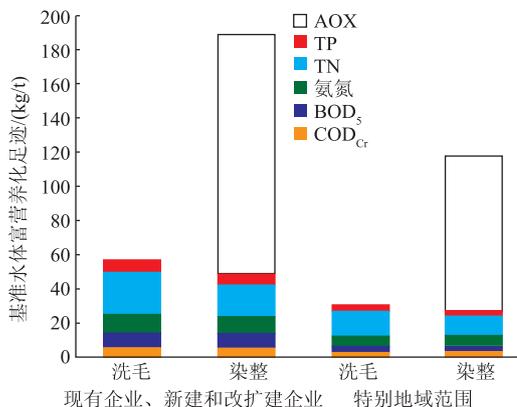


图4 毛纺织产品洗毛和染整工艺环节基准水体富营养化足迹

Fig. 4 Benchmark water eutrophication footprints of wool textile products in wool-scouring and dyeing-finishing process chain

由图3可知,现有企业、新建和改扩建企业间接排放污水导致的水体富营养化最严重,其基准水体富营养化足迹为141.63 kg/t。由图3和图4可知,AOX对水体富营养化的影响最大,其来源于染整工序,产生原因是羊毛表面有独特的鳞片结构,需要进行抗毡缩整理,其中由于氯化-聚合物抗毡缩整理价格低廉且效果显著,被广泛使用,但整理后的废水含有大量AOX^[21]。在现有企业、新建和改扩建企业中,AOX产生的基准水体富营养化足迹为136.8 kg/t,在染整环节中占比73.71%。在特别区域内,AOX产生的基准水体富营养化足迹为91.2 kg/t,在染整环节中占比76.98%。

硫化物作为水体酸化的特征污染物,主要来源于染整环节中添加的酸性染料或酸性含媒染料。现有企业、新建和改扩建企业生产的毛纺织产品基准水酸化足迹为0.0033 kg/t,而在特别地域范围内,硫化物受到严格管控,排放值为0。

在染整环节中,毛织物产品生产需使用大量含有重金属的染料和助剂,总铬作为染整环节排放的主要有毒重金属,是水体生态毒性的特征污染物^[12]。现有企业、新建和改扩建企业的毛纺织产品基准水体生态毒性与特别地域范围相同,为6 kg/t。

3 结语

1)毛纺织产品生产过程中,染整环节为主要耗水工艺环节,其中白纱经染色加工变为色纱的过程产生的基准水短缺足迹最大,3种企业生产粗梳毛织物(纱染)的基准水短缺足迹为329.84 m³/t。先进企业的取水定额指标最严格,其生产的粗梳毛织物(纱染)的基准水短缺足迹为75.81 m³/t。

2)洗毛和染整是引起水体富营养化污染的两个主要工艺环节,其中染整工艺环节排放的AOX为主要污染物,其在现有企业、新建和改扩建企业以及特别区域范围企业中产生的基准水体富营养化足迹总计为288 kg/t,占总体的58.25%。

3)染整环节排放硫化物,而硫化物是引起水体酸化的主要污染物,毛纺织产品的基准水酸化足迹为0.0033 kg/t;总铬是水体生态毒性的特征污染物,毛纺织产品的基准水体生态毒性足迹为6 kg/t。

参考文献:

- [1] 杨本晓,侯锋,戴建设.毛纺行业清洁生产审核实例[J].毛纺科技,2016,44(8):70-73.
YANG Benxiao, HOU Feng, DAI Jianshe. Practice of cleaner production audit in the wool textile industry[J]. Wool Textile Journal, 2016, 44(8): 70-73. (in Chinese)
- [2] 王萍.洗毛废水处理方法的研究进展[J].纺织学报,2001,22(1):59-61.
WANG Ping. Progress in the application of wool scouring effluent treatment processes[J]. Journal of Textile Research, 2001, 22(1): 59-61. (in Chinese)
- [3] 中国毛纺织行业协会.毛纺织行业“十四五”发展指导意见(讨论稿)[EB/OL].(2020-09-10)[2021-01-10].
http://www.cwta.org.cn/tzgg/202009/t20200916_4059466.html.
- [4] 内蒙古羊绒技术研究院有限公司,东华大学,内蒙古鄂尔多斯资源股份有限公司,等.羊绒制品生产过程水足迹评价方法:T/CNTAC 29—2018[S].北京:中国纺织工业联合会,2018.
- [5] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[C]//Value of water research report series No. 12. Delft: IHE, 2003: 13-23.
- [6] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [7] CHICO D, ALDAYA M M, GARRIDO A. A water footprint assessment of a pair of jeans: the influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 57(2): 238-248.
- [8] 王来力,丁雪梅,吴雄英.纺织产品的灰水碳足迹核算[J].印染,2013,39(9):41-43.
WANG Laili, DING Xuemei, WU Xiongying. Assessment of grey water footprint of textile products[J]. Dyeing and Finishing, 2013, 39(9): 41-43. (in Chinese)
- [9] 何琬文,李一,王晓蓬,等.丝绸产品基准水足迹核算与

- 评价[J]. 现代纺织技术,2018,26(2):41-45,65.
- HE Wanwen, LI Yi, WANG Xiaopeng, et al. Calculation and assessment of benchmark water footprint of silk products[J]. *Advanced Textile Technology*, 2018, 26(2): 41-45, 65. (in Chinese)
- [10] 许璐璐,吴雄英,陈丽竹,等. 分阶段链式灰水足迹核算及实例分析[J]. 印染,2015,41(16):38-41.
- XU Lulu, WU Xiongying, CHEN Lizhu, et al. Chain type assessment method of grey water footprint and case study [J]. *Dyeing and Finishing*, 2015, 41(16): 38-41. (in Chinese)
- [11] 朱菊香,李一,王来力. 基于水足迹的黏胶短纤维生产水环境负荷评价[J]. 现代纺织技术,2019,27(5):67-72.
- ZHU Juxiang, LI Yi, WANG Laili. Water environmental load assessment of viscose staple fiber based on water footprint[J]. *Advanced Textile Technology*, 2019, 27(5): 67-72. (in Chinese)
- [12] 朱菊香,何琬文,李一,等. 黏胶纤维生产基准水足迹核算与评价[J]. 上海纺织科技,2019,47(11):90-93.
- ZHU Juxiang, HE Wanwen, LI Yi, et al. Calculation and assessment of benchmark water footprint of viscose fiber [J]. *Shanghai Textile Science and Technology*, 2019, 47(11):90-93. (in Chinese)
- [13] 孙丽蓉,田君,丁雪梅,等. 羊绒针织品水足迹核算[J]. 毛纺科技,2018,46(9):5-7.
- SUN Lirong, TIAN Jun, DING Xuemei, et al. Calculation of product water footprint of cashmere knitting goods [J]. *Wool Textile Journal*, 2018, 46(9): 5-7. (in Chinese)
- [14] 任洁,丁雪梅,李方,等. 羊毛织物染整加工各工段水足迹核算[J]. 毛纺科技,2019,47(12):23-26.
- REN Jie, DING Xuemei, LI Fang, et al. Water footprint calculation in different sections of wool dyeing and finishing products [J]. *Wool Textile Journal*, 2019, 47(12):23-26. (in Chinese)
- [15] Environment management—water footprint—principle, requirements and guidelines; ISO 14046—2014 [S]. Geneva: ISO Copyright Office, 2014.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 取水定额 第14部分:毛纺织产品: GB/T 18916. 14—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [17] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 纺织染整工业水污染物排放标准: GB 4287—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [18] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 毛纺工业水污染物排放标准: GB 28937—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [19] 国家环境保护总局. 污水综合排放标准: GB 8978—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [20] HEIJUNGS R, GUINEE J B, HUPPES G, et al. Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds [M]. Leiden: CML, 1992.
- [21] 江魁,邵建中. 羊毛毛条的过硫酸氢钾-聚乙烯亚胺抗毡缩整理研究[J]. 染整技术,2019,41(2):33-38.
- JIANG Kui, SHAO Jianzhong. Anti-felting finishing study of potassium peroxymonosulfate-polyethyleneimine from wool tops [J]. *Textile Dyeing and Finishing Journal*, 2019, 41(2):33-38. (in Chinese) (责任编辑:沈天琦)