

文章编号: 1003-1421(2026)09-0159-10

引用格式: 赵永强, 董婧轲, 张驰. 基于多变量控制图的跨境生鲜农产品运输交付链质量监控研究[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(9): 159-168.

ZHAO Yongqiang, DONG Jingke, ZHANG Chi. Quality Monitoring of Transport and Delivery Chain for Cross-Border Fresh Agricultural Products Based on Multivariate Control Chart[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(9): 159-168.

基于多变量控制图的跨境生鲜农产品运输 交付链质量监控研究

赵永强, 董婧轲, 张 驰

(西安邮电大学 现代邮政学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 研究针对跨境生鲜农产品运输交付链的质量监控问题, 提出基于可变抽样时间和可变样本容量的VSSI T^2 控制图方法, 以提高监控效率并降低产品损耗和运输交付链成本。首先, 引入VSSI T^2 控制图方案, 构建了包含关税成本、生鲜损耗成本等关键跨境特征参数的经济性统计性模型; 其次, 通过遗传算法和粒子群算法优化控制图参数, 以最小化预期利润损失为目标, 求解模型的最优解; 最后, 以中欧班列长沙至汉堡的茶叶铁路运输交付链为例, 验证提出模型的有效性并对比研究了VSSI T^2 控制图与传统的可变样本容量VSS T^2 和可变抽样时间VSI T^2 控制图的性能。结果表明, VSSI T^2 控制图在成本控制和异常检测方面的表现优于传统的可变样本容量VSS T^2 和可变抽样时间VSI T^2 控制图, 且对参数波动具有较强的鲁棒性, 为跨境生鲜农产品运输交付链的质量监控提供了科学的决策支持。

关键词: 跨境生鲜农产品; 运输交付链; 多变量控制图; 经济性统计性设计

中图分类号: U297.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250528001

Quality Monitoring of Transport and Delivery Chain for Cross-Border Fresh Agricultural Products Based on Multivariate Control Chart

ZHAO Yongqiang, DONG Jingke, ZHANG Chi

(School of Modern Post, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: For the quality monitoring of the transport and delivery chain for cross-border fresh agricultural products, this study proposed an approach based on a VSSI T^2 control chart incorporating variable sampling intervals (VSI) and variable sample sizes (VSS). The aim is to improve monitoring efficiency while reducing product loss and the cost of the transport and delivery chain. Specifically, the VSSI T^2 control chart is introduced to construct an economic-statistical model that incorporates key cross-border characteristic parameters such as tariff cost and product loss cost. Then, the control chart parameters are optimized using a genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO), and the optimal solution to the model is obtained by minimizing the expected profit loss. Furthermore, the effectiveness of the proposed model is verified through a case study of the China Railway Express transport and delivery chain for tea from Changsha to Hamburg. The

收稿日期: 2025-05-28

通信作者: 董婧轲(2001—), 女, 河南新乡人, 西安邮电大学现代邮政学院硕士研究生。

基金项目: 国家社会科学基金后期资助项目(24FGLB020)

performance of the VSSI T^2 control chart is compared with that of the conventional VSS T^2 and VSI T^2 control charts. The results show that the VSSI T^2 control chart outperforms its conventional counterparts in cost control and anomaly detection and exhibits strong robustness against parameter fluctuations. The proposed scheme provides scientific decision support for the quality control of the transport and delivery chain for cross-border fresh agricultural products.

Keywords: Cross-Border Fresh Agricultural Product; Transport and Delivery Chain; Multivariate Control Chart; Economic-Statistical Design

0 引言

根据农业农村部发布的数据, 2000—2024年, 中国农产品进口额呈现稳定增长的趋势^[1], 反映出市场对生鲜农产品的高需求。在跨境生鲜农产品的运输过程中常常面临着温控问题、供应链中的延误以及跨境政策与关税差异带来的不确定性等众多挑战。特别是易腐的农产品, 其对运输时效高度敏感, 长距离跨境铁路运输的时间损耗会显著提升综合流通成本^[2], 且任何细微的运输质量问题都可能导致其品质下降, 甚至丧失市场价值。如何有效控制生鲜农产品运输过程中的质量, 确保能够以最佳状态将其送达目的地, 成为全球供应链中的一个重要课题。

质量控制作为供应链管理中的关键环节, 相关研究已取得一定的进展。Wisner等^[3]、陆芬等^[4]、汪峻萍等^[5]、魏娜^[6]与马帅^[7]围绕普通供应链质量控制开展研究, 分别从供应链采购管理、协调契约、渠道权利结构、果蔬电商供应链建模、航空制造全生命周期风险管控展开分析, 证明契约机制、渠道主导关系、全流程风险管控能够有效提升供应链质量水平, 为本研究搭建跨境生鲜运输交付链质量监控整体框架提供理论思路与管控逻辑参考。

针对跨境生鲜农产品的质量问题的, Widodo等^[8]研究发现, 仓储和跨境运输环节的损耗率普遍高达20%~60%。Ahumada等^[9]的随机规划模型、Donis-Gonzalez等^[10]的生鲜农产品实时监测方案、霍红等^[11]的生鲜农产品博弈质量管理模型, 分别为本研究刻画运输不确定性、采用动态监控思路、构建成本优化模型提供理论参考; 许秀红^[12]对进口生鲜市场的分析, 印证跨境生鲜质量管控的行业价值。但现有研究缺少融合动态多变量控制图、兼顾跨境特有成本的监控方案, 为本研究引入可变样本量与抽样间隔的 T^2 控制图(VSSI T^2 控制图)优化交付链质量管控留下研究空间。

控制图是一种重要的统计过程控制工具, 通过持续监测关键变量并实时识别异常波动来保障供应链与交付链的稳定性。然而, 传统的质量控制方法因单一和静态的特性, 已难以适应现代生产和供应链管理的复杂需求。因此, 学者开始关注多变量控制图等先进技术, 以应对动态变化的市场需求。交付链是供应链中最终产品生产完成到产品最终交付给客户的关键部分^[13]。运输交付链则侧重于产品跨供应链环节的高效流转。跨境生鲜农产品运输交付链对时效、精准度要求严苛, 研究其运作、预判潜在异常, 对降低流通损耗、保障食品安全、增强国际市场竞争力具有重要意义。近年来, 众多学者围绕控制图在供应链交付环节的应用展开研究, Dumicic^[14]建立了变量控制图来监控供应链中的交货时间。为了增加效益, 降低成本, Duncan^[15]提出了控制图经济设计模型(ED)。然而, 该模型的目标函数较为复杂, 且优化参数求解难度大, 限制了其在实际生产中的应用^[16]。Montgomery^[17]基于Duncan的模型, 提出了一个用于 $\bar{X}$ 控制图最佳经济设计的计算机程序。此后, 以平均损失最小或收益最大为目标的控制图Lorenzen-Vance经济模型、Costa质量成本模型、Calabrese成本模型等相继被提出^[18-20]。控制图设计中若仅关注统计性, 理论上异常检测高效, 实际却易导致成本过高或资源浪费; 若仅关注经济性, 成本虽显著降低, 但会削弱质量控制的统计性能, 导致检测延迟或误报率过高。基于此, Saniga^[21]提出了经济性统计性设计的概念。

基于文献分析发现, 现有研究虽然在运输交付链质量控制方面取得了一定进展, 但对跨境运输的研究仍较为有限, 对跨境生鲜农产品运输交付链的系统性研究也较少, 缺乏有效的优化策略和监控体系。控制图由针对单一变量发展到多变量, 由静态发展到动态, 但对动态控制图与多变量控制图相结合的研究却很少。在该背景下, 研究提出基于可变

抽样时间(VSI)及可变样本容量(VSS)的多变量 VSSI T^2 控制图监控方法, 采用 Costa 质量成本模型, 并构建经济性统计性模型, 以最小预期利润损失为目标, 结合马尔可夫链方法计算性能指标, 采用遗传算法和粒子群算法优化参数, 以提升监控体系的适应性和经济性。该研究不仅可以为跨境供应链中的质量控制提供新思路, 也为生鲜农产品相关领域提供了实用方法。

1 基于 VSSI T^2 控制图的跨境生鲜农产品运输交付链质量监控

1.1 VSSI T^2 控制图方案

1.1.1 模型假设及描述

VSS T^2 控制图: 使用 2 个样本量 n_1 和 n_2 ($n_1 < n_2$)。图表被分为松弛区、收紧区和动作区, 图表上当前样本点的位置决定了下一个样本的大小。在进行抽样时, 样本容量在 n_1 和 n_2 中进行更换。当采样点 T_i^2 统计量落在松弛区时, 采样点 T_i^2 离控制限 k 较远, 则样本容量为较小的 n_1 。而当采样点 T_i^2 统计量落在收紧区时, 采样点 T_i^2 离控制限 k 较近, 则样本容量为较大的 n_2 。

VSI T^2 控制图: 采样间隔 h 在 2 个值 h_1, h_2 之间改变。若采样点 T_i^2 统计量落在收紧区域内, T_i^2 统计量距离控制限 k 较远, 将在较短的时间间隔 h_2 后绘制下一个样本。若采样点 T_i^2 统计量进入松弛状态, T_i^2 统计量接近控制限 k , 下一个样本将在较长时间间隔 h_1 后绘制。

VSSI T^2 控制图是对传统 T^2 控制图的改进, 它融合了可变样本容量 VSS 和可变抽样时间 VSI 方案, 能够根据前一个样本点的位置动态来管控、调整样本容量和抽样间隔^[22], 降低监控成本的同时提高异常检测的效率和准确性。

具体为将 (n_1, h_1) 设置成较小的样本量和较长的抽样时间一对, (n_2, h_2) 为较大的样本量和较短抽样时间一对, n_0 和 h_0 分别是控制图中的固定样本容量与固定抽样间隔, 作为基准, n_1 更小、 n_2 更大, h_1 更长、 h_2 更短, 得到 $n_1 < n_0 < n_2$ 和 $h_2 < h_0 < h_1$ 。在 (n_1, h_1) 和 (n_2, h_2) 对之间的切换取决于控制图上的先前样本点。首先将控制图分为 3 个区域, 即收紧区域 $(\omega, k]$, 松弛区域 $[0, \omega)$, 动作区域 $[k, \infty]$ 。如

果采样点 T_i^2 统计量(如 T_5^2)的值落在动作区域, 则报警表示进程均值移位的信号, 停止交付进程, 查找异常。其中 k 是控制限, ω 称为预警限, 且 $0 \leq \omega < k$ 。前一个样本点在图表上的位置决定了当前样本的大小和抽样时间。如果先前的采样点 T_{i-1}^2 统计量落在收紧区域, 则当前的采样点 T_i^2 应使用 (n_2, h_2) 。如果先前的采样点 T_{i-1}^2 统计量落在松弛区域, 则当前的采样点 T_i^2 应使用 (n_1, h_1) 。下面的函数展示了 VSSI T^2 控制方案的开关原理。

$$(n(i), h(i)) = \begin{cases} (n_2, h_2) & \omega < T_{i-1}^2 \leq k \\ (n_1, h_1) & 0 \leq T_{i-1}^2 \leq \omega \end{cases} \quad (1)$$

在跨境生鲜农产品的运输过程中, 温控问题、供应链中的延误以及由于跨境政策与关税差异带来的不确定性等因素都可能对生鲜农产品的品质和运输交付链的稳定性产生影响。因此, 结合跨境生鲜农产品运输交付链的特点以及上述影响因素, 对 VSSI T^2 控制图方案的相关参数及定义进行合理假设, 以构建出能够有效监控跨境生鲜农产品运输交付链质量的模型。VSSI T^2 控制图方案的参数及定义如表 1 所示。

1.1.2 转移概率矩阵

整个周期的每个采样时间根据过程的状态(控制或失控)和 T_i^2 (松弛区、收紧区或动作区)的位置, 达到 5 种暂态中的一种。

状态 1: $0 \leq T^2 < \omega$, 过程受控, T_i^2 处于松弛区, 下一个抽样大小和 시간은 (n_1, h_1) 。

状态 2: $\omega \leq T^2 < k$, 过程受控, T_i^2 处于收紧区, 下一个抽样大小和 시간은 (n_2, h_2) 。

状态 3: $T^2 \geq k$, 过程受控, T_i^2 处于动作区, 下一个抽样大小和 시간은 (n_2, h_2) 。

状态 4: $0 \leq T^2 \leq \omega$, 过程失控, T_i^2 处于松弛区, 下一个抽样大小和 시간은 (n_1, h_1) 。

状态 5: $\omega \leq T^2 \leq k$, 过程失控, T_i^2 处于收紧区, 下一个抽样大小和 시간은 (n_2, h_2) 。

当 T_i^2 在某个采样时间进入动作区且过程状态失控时, 将触发真报警, 系统进入吸收状态 6。

在 Duncan^[15]提出的控制图模型中, 不同的时间段允许存在不同的可分配原因。由于本研究对象为跨境生鲜农产品运输交付链, 故进行以下假设。

(1) 假设交付时间向量 μ_0 和协方差矩阵 Σ 已

表1 VSSI T²控制图方案的参数及定义Tab.1 Parameters of VSSI T² control chart and their definitions

参数	定义
C_0	受控状态下跨境生鲜农产品运输交付链日利润, 元/箱天
C_1	失控状态下跨境生鲜农产品运输交付链日利润, 元/箱天
a_1	跨境生鲜农产品运输交付链抽样成本, 元/次抽样
a_2	跨境生鲜农产品运输交付链评估误报警成本, 元/次误报警
a_3	跨境生鲜农产品运输交付链异常寻找及修复成本, 元/次故障修复
a_4	跨境生鲜农产品关税成本, 元/箱
a_5	生鲜农产品日均损耗成本, 元/箱天
λ	发生异常的概率
T_1	寻找单位误报警的时间, d/次
T_2	出现异常后识别并且修复为正常的时间, d/次
d	偏移量, 即量化跨境生鲜农产品运输链中时间等多维度质量特性的联合偏移程度
p_6	跨境路线数, 条(正整数)
n_1	较小的样本量, 箱/次抽样
n_2	较大的样本量, 箱/次抽样
h_1	较长的抽样间隔时间, d
h_2	较短的抽样间隔时间, d
$E(T)_{\text{VSSI}}$	VSSI T ² 控制图周期时间, d
$E(C)_{\text{VSSI}}$	VSSI T ² 控制图交付周期的期望利润, d/箱
$E(A)_{\text{VSSI}}$	VSSI T ² 控制图每日预期利润损失, 元/箱天
$AATS_{\text{VSSI}}$	VSSI T ² 控制图调整的平均报警时间, d
ANF_{VSSI}	VSSI T ² 控制图误报警的平均次数, 次/周期
ATC_{VSSI}	VSSI T ² 控制图平均周期时间, d
ANI_{VSSI}	VSSI T ² 控制图周期内被检验和取样的预期数量, 箱/周期

注: 本研究中单位“箱”均表示40 ft标准集装箱。

知, 有 p 个交付路线特征的联合概率分布为多元正态分布, 可以转换为服从 F 分布的 T^2 统计量。若运输交付过程出现异常, 均值发生偏移, T^2 服从非中心参数为 η 的非中心卡方分布。

(2) 过程的控制状态为 $\mu = \mu_0$, 一个异常原因会使得约定的交付时间均值从 $\mu = \mu_0$ 到 $\mu = \mu_1$ 之间发生均值变化, 可以得到马氏距离, 马氏距离的大小直接影响控制图对过程异常的敏感度。

(3) 研究中不考虑“偏移过程”影响过程失控的发生异常原因。因此, 假设协方差矩阵在时间上保持不变。

VSSI T²控制图的马尔科夫链转移概率矩阵 P 如下所述。

$$P_{\text{VSSI}} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ 0 & 0 & 0 & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 为转移概率; i 为先前状态; j 为当前状态。

$$p_{11} = Pr(0 \leq T^2 < \omega) \times e^{-\lambda h_1} = F(\omega, p, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_1} \quad (3)$$

$$p_{12} = Pr(\omega \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_1} = [F(k, p, \eta = 0) - F(\omega, p, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (4)$$

$$p_{13} = Pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_1} = [1 - F(k, p, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_1} \quad (5)$$

$$p_{14} = Pr(0 \leq T^2 < \omega) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = F(\omega, p, \eta = n_1 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (6)$$

$$p_{15} = Pr(\omega \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [F(k, p, \eta = n_1 d^2) - F(\omega, p, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (7)$$

$$p_{16} = Pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_1}) = [1 - F(k, p, \eta = n_1 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_1}) \quad (8)$$

$$p_{21} = p_{31} = Pr(0 \leq T^2 < \omega) \times e^{-\lambda h_2} = F(\omega, p, \eta = 0) \times e^{-\lambda h_2} \quad (9)$$

$$p_{22} = p_{32} = Pr(\omega \leq T^2 < k) \times e^{-\lambda h_2} = [F(k, p, \eta = 0) - F(\omega, p, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (10)$$

$$p_{23} = p_{33} = Pr(T^2 \geq k) \times e^{-\lambda h_2} = [1 - F(k, p, \eta = 0)] \times e^{-\lambda h_2} \quad (11)$$

$$p_{24} = p_{34} = Pr(0 \leq T^2 < \omega) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = F(\omega, p, \eta = n_2 d^2) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (12)$$

$$p_{25} = p_{35} = Pr(\omega \leq T^2 < k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [F(k, p, \eta = n_2 d^2) - F(\omega, p, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (13)$$

$$p_{26} = p_{36} = Pr(T^2 \geq k) \times (1 - e^{-\lambda h_2}) = [1 - F(k, p, \eta = n_2 d^2)] \times (1 - e^{-\lambda h_2}) \quad (14)$$

$$p_{44} = Pr(0 < T^2 < \omega) = F(\omega, p, \eta = n_1 d^2) \quad (15)$$

$$p_{45} = Pr(\omega \leq T^2 < k) = F(k, p, \eta = n_1 d^2) - F(\omega, p, \eta = n_1 d^2) \quad (16)$$

$$p_{46} = Pr(T^2 \geq k) = 1 - F(k, p, \eta = n_1 d^2) \quad (17)$$

$$p_{54} = Pr(0 < T^2 < \omega) = F(\omega, p, \eta = n_2 d^2) \quad (18)$$

$$p_{55} = Pr(\omega \leq T^2 < k) = F(k, p, \eta = n_2 d^2) - F(\omega, p, \eta = n_2 d^2) \quad (19)$$

$$p_{56} = Pr(T^2 \geq k) = 1 - F(k, p, \eta = n_2 d^2) \quad (20)$$

式中: P_r 为概率运算符号, 用来计算 T^2 落在5种暂态上的概率; $F(x, p, \eta)$ 为非中心卡方分布的累积概率分布函数; p 为自由度, 即需要监控的质量特征的个数; $\eta = n_i d^2$ 为非中心参数, d 是偏移量, 表达式为

$$d = (\mu_1 - \mu_0)' \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_0) \quad (21)$$

每种状态达到吸收状态所需的预期试验次数可以由 $b'(I - Q)^{-1}$ 得到, 矩阵 Q_{VSSI} 是由矩阵 P_{VSSI} 删

除吸收状态对应元素后得到的5阶矩阵, I_{VSSI} 为5阶的单位矩阵。因此, 平均样本数与相应采样间隔的乘积决定周期 ATC_{VSSI} , 表达式为

$$ATC_{VSSI} = b'_{VSSI} (I_{VSSI} - Q_{VSSI})^{-1} h'_{VSSI} \quad (22)$$

式中: h'_{VSSI} 为下一次采样所用的5个暂态对应的采样间隔向量; b'_{VSSI} 为初始概率向量。为了对启动过程中出现的问题提供额外的保护, 令 $h'_{VSSI} = (h_1, h_2, h_3, h_4)$, $b'_{VSSI} = (0, 1, 0, 0, 0)$ 。

1.2 跨境生鲜农产品运输交付链经济性统计性模型构建

1.2.1 跨境生鲜农产品运输交付链周期

Duncan^[15]将质量控制周期分为受控时间、失控时间、寻找误报警时间, 以及识别和修复可分配原因时间4个阶段。本研究基于以上4个阶段, 针对海关检查、运输时间变化、天气等不确定因素对跨境生鲜农产品运输交付链的影响, 将其质量控制周期分为以下4个阶段。

(1) 跨境生鲜农产品运输交付链的受控期。跨境运输交付链处于受控状态时, 生鲜农产品的品质稳定, 运输过程正常。此模型假设为马尔科夫模型, 所以分布函数是服从指数分布, 则运输交付链的受控时间是 $\frac{1}{\lambda}$ 。

(2) 失控时间。失控时期指的是在异常发生后到失控信号被触发的时间, 此时, 跨境生鲜农产品运输交付链出现异常情况, 导致生鲜农产品的品质受到影响。这是由 $AATS_{VSSI}$ (调整的平均报警时间) 给出的。因为指数函数的无记忆性, 所以在研究假设发生异常概率按照参数为 λ 的指数分布发生, ATC_{VSSI} 是从运输交付过程开始直到失控状态下控制图报警的平均时间, 可得出

$$AATS_{VSSI} = ATC_{VSSI} - \frac{1}{\lambda} \quad (23)$$

(3) 误报警搜索期。令 T_1 为寻找单位误报警的时间, ANF 为误报警的平均次数。根据马尔可夫链的初等性质, 可以得到

$$ANF_{VSSI} = b'_{VSSI} (I_{VSSI} - Q_{VSSI})^{-1} f'_{VSSI} \quad (24)$$

式中: $f'_{VSSI} = (0, 0, 1, 0, 0)$ 为误报警向量, 由于误报警引起的预期搜索周期长度可以用 $T_1 ANF_{VSSI}$ 表示。

(4) 异常识别和修复可分配原因的预期时间。用 T_2 表示运输交付过程出现异常后识别并且修复为

正常的时间, 周期时间用 $E(T)_{VSSI}$ 表示

$$E(T)_{VSSI} = \frac{1}{\lambda_{VSSI}} + AATS_{VSSI} + T_1 ANF_{VSSI} + T_2 = \quad (25)$$

$$ATC_{VSSI} + T_1 ANF_{VSSI} + T_2$$

1.2.2 跨境生鲜农产品运输交付链利润

跨境生鲜农产品运输交付链的利润可分为以下7个主要部分。

(1) 受控过程中的利润为 $\frac{C_0}{\lambda}$ 。

(2) 失控过程中的利润为 $C_1 AATS_{VSSI}$ 。

(3) 抽样检验成本。用 ANI_{VSSI} 表示在交付周期内被检验和取样的预期数量

$$ANI_{VSSI} = b'_{VSSI} (I_{VSSI} - Q_{VSSI})^{-1} n'_{VSSI} \quad (26)$$

式中: $n'_{VSSI} = (n_1, n_2, n_2, n_1, n_2)$ 为抽样个数向量。每个周期的抽样成本为 $a_1 ANI_{VSSI}$ 。

(4) 误报警成本为 $a_2 ANF_{VSSI}$ 。

(5) 异常及修复成本为 a_3 。

(6) 关税成本。跨境线路有 p_6 条, 则关税成本为 $a_4 p_6$ 。

(7) 跨境生鲜农产品每日损耗为 $a_5 E(T)_{VSSI}$ 。

结合上述公式, 每个周期的期望利润 $E(C)_{VSSI}$ 是:

$$E(C)_{VSSI} = \frac{C_0}{\lambda} + C_1 (ATC_{VSSI} - \frac{1}{\lambda}) - a_1 ANI_{VSSI} - a_2 ANF_{VSSI} - a_3 - a_4 p_6 - a_5 E(T)_{VSSI} \quad (27)$$

$E(A)_{VSSI}$ 是周期内单位时间质量损失, 所以跨境生鲜农产品运输交付链每日预期利润损失为

$$E(A)_{VSSI} = C_0 - \frac{E(C)}{E(T)} \quad (28)$$

2 案例分析

2.1 案例描述

中欧班列由中国国家铁路集团有限公司组织运营, 按照固定车次、线路、班期运行。德国汉堡作为中欧班列的重要停靠城市, 具备完善的公路、铁路网络和强大的货运、配送能力。目前, 包括成都、重庆、西安、郑州、乌鲁木齐在内的多条中欧班列线路均能直达汉堡。长沙出口货物可经由上述5个城市中转输往德国汉堡。茶叶属于高附加值生鲜类农产品, 近年来通过中欧班列频繁出口^[23], 对跨境冷链运输时效、温湿度稳定性要求严苛; 依托中欧班列出口规模逐年攀升, 长途跨境运输易出现品质损耗、交付质量偏移等问题, 兼具典型冷链生鲜

与跨境贸易双重特征。同时茶叶关税、运输损耗、品质监测成本清晰可量化，便于代入VSSI T²多变量控制图模型测算利润与质量损失，故选取中欧班列长沙至汉堡的茶叶运输交付链作为研究案例，探讨跨境生鲜农产品运输过程中的质量控制与成本优化。

研究以40 ft标准集装箱为分析单位，并选择5个中欧班列铁路中转站(成都A₁，重庆A₂，西安A₃，郑州A₄，乌鲁木齐A₅)经阿拉山口口岸出口的铁路运输路线。具体而言，产品从原产地长沙(O点)分别通过5条线路(OA₁，OA₂，OA₃，OA₄，OA₅)运送至对应的中转站(A_i)。作为供应链的关键节点，中转站(A_i)承担产品集散与转运功能，确保跨境运输的顺畅衔接。随后，产品由中转站运输至阿拉山口口岸(B点)，并进一步转运至最终目的地汉堡(D点)，中欧班列长沙至汉堡的运输交付链如图1所示。

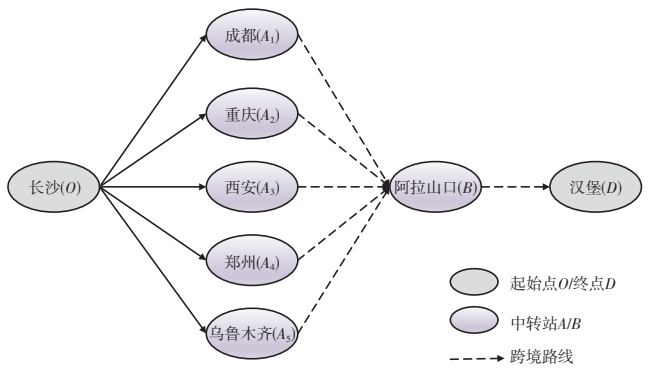


图1 中欧班列长沙至汉堡的运输交付链

Fig.1 Transport and delivery chain from Changsha to Hamburg of China Railway Express

通过查阅95036网可得长沙至中欧班列铁路中转站铁路运输距离如表2所示，中欧班列铁路中转站至阿拉山口铁路运输距离如表3所示，阿拉山口至汉堡铁路运输距离如表4所示。

以成都中铁铁路快运网站^[24]关于列车21 h (0.875 0 d)的运输时效为基准，根据表2中的运输距

表2 长沙至中欧班列铁路中转站铁路运输距离 km
Tab.2 Transport distances from Changsha to transfer stations of China Railway Express

起始地	到达地	距离
长沙	成都	1 092
长沙	重庆	817
长沙	西安	894
长沙	郑州	1 405
长沙	乌鲁木齐	3 973

表3 中欧班列铁路中转站至阿拉山口铁路运输距离 km
Tab.3 Transport distances from transfer stations of China Railway Express to Alashankou

起始地	到达地	距离
成都	阿拉山口	3 400
重庆	阿拉山口	3 705
西安	阿拉山口	3 565
郑州	阿拉山口	3 043
乌鲁木齐	阿拉山口	477

表4 阿拉山口至汉堡铁路运输距离 km
Tab.4 Railway transport distance from Alashankou to Hamburg

起始地	到达地	距离
阿拉山口	汉堡	7 108

离信息，计算出长沙至其余4个中转站的运输时效，国内运输时效表如表5所示。

表5 国内运输时效表 d
Tab.5 Domestic transit timetable

起始地	到达地	运输天数
长沙	成都	0.875 0
长沙	重庆	0.654 6
长沙	西安	0.716 3
长沙	郑州	1.125 8
长沙	乌鲁木齐	3.183 5

通过查阅95036网可得到中欧班列铁路中转站到汉堡运输时效，国外运输时效表如表6所示。

表6 国外运输时效表 d
Tab.6 International transit timetable

起始地	到达地	出境岸口	运输天数
成都	汉堡	阿拉山口	14
重庆	汉堡	阿拉山口	12
西安	汉堡	阿拉山口	16
郑州	汉堡	阿拉山口	16
乌鲁木齐	汉堡	阿拉山口	10

首先计算单条路线上的运输成本。通过图1可知，长沙与汉堡间共有5条(即P=5)铁路运输线路。此外，在国内段，40 ft集装箱铁路运输的基价1为610元/箱，基价2为2.7元/箱公里^[25]，则集装箱货物每箱运价=基价1+基价2×运价公里；在国外段，欧盟国家集装箱铁路运输单位里程基价3为6.240元/箱公里。每日平均单条铁路运输路线的成本计算式为

$$\left[\text{国内段运输距离} \times (\text{基价1} + \text{基价2} \times \text{运价公里}) + \text{国外段运输距离} \times \text{基价3} \right] / \text{运输时效/运输路线数} \quad (29)$$

利用表2、表3、表4所示的铁路运输距离和货物每箱运价及运输时效可得每日平均单条运输路线的成本为3 941.170 8元。

接着计算单条路线上的每一天的受控利润 C_0 。据统计中欧班列上每成交800 t茶叶可获得的销售额为760万元^[26]，则通过对销售额和每日单条运输路线成本作差，可得货物每日受控利润 C_0 为13 017元/箱(40 ft标准集装箱可装货物约26.6 t)。

最后对于失控状态下每日利润 C_1 ，查阅相关资料可知其约为50元^[27]。根据茶叶从价关税税率15%^[28]，可得茶叶的关税成本 a_4 为509元/箱。此外，对于难以得到的数据如抽样成本 a_1 、评估误报警的成本 a_2 、寻找及修复运输交付过程的成本 a_3 ，以及每日生鲜损耗成本 a_5 ，参考Faraz等^[13]所采用关于运输交付链的参数假设来设定其余参数，即 $C_0 = 13\,017$ ， $C_1 = 50$ ， $\lambda = 0.03$ ， $T_1 = 0.5$ ， $T_2 = 1$ ， $a_1 = 50$ ， $a_2 = 200$ ， $a_3 = 800$ ， $a_4 = 509$ ， $a_5 = 20$ ， $p = 5$ ， $p_6 = 5$ 。

2.2 算法选择与参数设置

多变量控制图的经济性统计性模型涉及多个变量和约束条件，变量之间存在复杂的非线性关系，难以用传统的解析方法求解，遗传算法和粒子群算法作为启发式优化算法，能够有效处理这种复杂性。因此，研究选择使用遗传算法和粒子群算法来求解VSSI T²控制图生鲜农产品运输交付链经济性统计性模型。设置遗传算法的种群规模为100，迭代次数为200，交叉率设定为0.05，变异率为0.9。较大的种群规模有助于提供更多的遗传多样性，从而增加找到全局最优解的概率。较高的迭代次数为算法提供了更多的机会来探索解空间，进一步提高了找到最优解的可能性。交叉率设为0.05，以保持当前优良个体的特性，避免算法过度搜索无关的解空间，从而提升效率。为了保证算法的一致性，粒子群算法的种群规模也设为100，迭代次数为200， ω 为0.7， c_1 和 c_2 均为2。

2.3 VSSI T²控制图生鲜农产品运输交付链经济性统计性模型求解

考虑到长沙—汉堡跨境运输交付链的远程性和各种潜在风险，本研究假设每次抽样都会监控到跨境运输交付链。为了确保每条路线都有被选取的可能性，将抽样容量定为 $n_1 = 1$ ， $n_2 = 5$ ，将抽样时间

定为 $h_1 = 1$ ， $h_2 = 0.5$ ，跨境运输路线总数 $p_6 = 5$ ，预警限 ω 的取值约束条件为 $0 \leq \omega < k$ 。

利用遗传算法和粒子群算法对模型进行求解，遗传算法求解结果如表7所示，粒子群算法求解结果如表8所示。

表7 遗传算法求解结果

Tab.7 Results of GA

d	遗传算法		
	k	ω	$E(A)_{\text{VSSI}}$
0.5	52.916 2	47.364 1	551.659 0
1	59.624 1	51.882 4	551.660 2
1.5	61.552 4	57.335 5	551.660 2
2	67.874 8	58.862 0	551.660 2
3	72.165 1	62.241 8	551.660 2

表8 粒子群算法求解结果

Tab.8 Results of PSO

d	粒子群算法		
	k	ω	$E(A)_{\text{VSSI}}$
0.5	33.112 2	32.496 4	555.268 7
1	31.953 0	30.953 0	554.889 4
1.5	31.027 8	30.027 8	554.469 8
2	30.021 2	29.021 2	553.965 2
3	29.092 8	28.092 8	553.075 4

使用VSS T²控制图监控跨境生鲜农产品运输交付链的经济性，当偏移量 $d = 1.5$ 时，遗传算法得到的跨境生鲜农产品运输交付链每日预期利润损失 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 为551.660 2，低于粒子群算法的554.469 8。这表明在VSSI T²模型下，遗传算法的经济性表现更优秀。但是遗传算法下随着偏移量 d 的增大， $E(A)_{\text{VSSI}}$ 却并未变化。在VSSI T²控制图模型下，遗传算法难以优化 d ，这是因为GA依赖变异和交叉，而VSSI T²控制图的动态调整机制(同时调整抽样间隔 h 和样本容量 n)使 d 对 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的影响被削弱，导致遗传算法在进化过程中可能不会调整 d ，最终使得 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 维持不变。相比之下，粒子群优化由于采用连续调整方式，每次都会调整 d ，即使影响较小，仍然能优化 d 并影响 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 。

2.4 敏感性分析

(1) 偏移量 d 的大小估计容易出现误差，且从前文研究可知，遗传算法对 d 的变化表现出较低的敏感性。因此，采用粒子群优化算法来分析 d 的微小变化对经济性最优情况下其采样策略及统计性的影响， d 的敏感性分析如表9所示。

表9 d 的敏感性分析
Tab.9 Sensitivity analysis of d

d	VSSI T ² 控制图		
	$E(A)_{\text{VSSI}}$	AATS	ANF
1.3	554.641 1	1.544 5	0.170 5
1.4	554.557 3	1.446 8	0.165 4
1.5	554.469 8	1.351 2	0.148 2
1.6	554.378 8	1.105 5	0.127 1
1.7	554.282 8	0.995 3	0.100 8

由表9可知随着偏移量 d 的增大，每日预期利润损失 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 从554.641 1降至554.282 8，调整的平均报警时间AATS从1.545 5降至0.995 3，误报警次数ANF从0.170 5降至0.100 8。表明VSSI T²模型对显著质量偏差的快速检测能力，从而缩短失控状态的持续时间，降低经济损失。

(2) 分析偏移量 $d = 1.5$ 时，跨境生鲜农产品运输交付链受控状态下的日利润 C_0 以及失控状态下的日利润 C_1 的微小变化对最优经济性及其相应统计性的影响，从而提升模型的实用性， C_0 的敏感性分析如表10所示， C_1 的敏感性分析如表11所示。

表10 C_0 的敏感性分析
Tab.10 Sensitivity analysis of C_0

C_0		$E(A)_{\text{VSSI}}$	
值	变化率/%	值	变化率/%
11 715.30	-10	517.071 2	-6.744 9
12 366.15	-5	535.510 2	-3.419 4
12 626.49	-3	543.096 5	-2.051 2
12 886.83	-1	550.677 9	-0.683 8
13 017.00	0	554.469 8	0
13 147.17	+1	558.261 7	+0.683 9
13 407.51	+3	563.743 1	+1.672 5
13 667.85	+5	573.429 4	+3.419 4
14 318.70	+10	590.163 1	+6.437 3

表11 C_1 的敏感性分析
Tab.11 Sensitivity analysis of C_1

C_1		$E(A)_{\text{VSSI}}$	
值	变化率/%	值	变化率/%
45	-10	572.337 7	+3.222 5
47.5	-5	566.431 9	+2.157 4
48.5	-3	563.351 4	+1.601 8
49.5	-1	559.123 3	+0.839 3
50	0	554.469 8	0
50.5	+1	551.517 3	-0.532 5
51.5	+3	545.876 9	-1.549 8
52.5	+5	540.216 3	-2.570 7
55.0	+10	536.345 7	-3.268 7

通过对比不同参数 C_0 ， C_1 对 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的影响，可以发现以下关键结论。

(1) 参数马氏距离的敏感性。 C_0 与 C_1 对 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的影响显著低于参数本身的波动幅度。当 C_0 的变化率为+10%时， $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的变化率为+6.437 3%； C_1 的变化率为+10%时， $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的变化率仅为-3.268 7%。 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的变化率表明模型对参数估计误差具有较强的鲁棒性，尤其对 C_1 的敏感性更低。

(2) 参数影响的差异性。当 C_1 减少10%时， $E(A)_{\text{VSSI}}$ 增加了3.222 5%， C_0 同等幅度变化下 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 减少了6.744 9%， C_0 对 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的波动影响较 C_1 更大。当 C_1 增加10%时， $E(A)_{\text{VSSI}}$ 减少了3.268 7%， C_0 同等幅度变化下 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 增加了6.437 3%， C_0 对 $E(A)_{\text{VSSI}}$ 的波动影响较 C_1 更大。这一结果验证了在跨境运输交付链动态环境中，不同的参数对模型的影响具有差异性。

(3) 经济性模型的适用性。上述研究表明，在实际应用中参数的估计可能存在误差，但模型通过降低对 C_0 和 C_1 的敏感度，能够有效缓解不确定性对经济性优化的负面影响。模型的低敏感性为跨境生鲜农产品运输交付链的长期监控提供了可靠工具。

2.5 性能对比

可变样本容量VSS T²控制图：为了确保可对比性，将抽样时间定为 $h = 0.5$ ，样本容量定为 $n_1=1$ ， $n_2=5$ 。

可变抽样时间VSI T²控制图：将样本容量定为 $n = 5$ ，确保每条运输链都可以被监控，抽样时间则定为 $h_1 = 1$ ， $h_2 = 0.5$ 。

为了验证哪种控制图模型更适合跨境运输交付链。研究对比了VSS T²控制图、VSI T²控制图以及VSSI T²控制图在 $d = 1.5$ 时遗传算法的经济性和统计性，控制图性能比对如表12所示。

表12 控制图性能比对
Tab.12 Comparison of control chart performance

d	VSS T ² 控制图	VSI T ² 控制图	VSSI T ² 控制图
1.5	$E(A)$	604.835 1	769.027 4
	AATS	2.561 0	1.441 6
	ANF	0.122 3	0.167 1

从每日预期利润损失 $E(A)$ 来看，VSSI T²为554.469 8，相较于VSS T²的604.835 1降低了8.327 1%，较VSI T²的769.027 4降低了27.899 9%，

表明VSSI T²模型在成本控制方面表现最优,经济性最好。在调整的平均报警时间AATS方面,VSSI T²的最短,表明VSSI T²的统计性最好,在保持较低成本的同时能够快速检测到异常情况。在误报警次数ANF方面,VSSI T²最低,表明VSSI T²控制图在控制误报警次数方面表现最好。综合来看,VSSI T²控制图在成本控制和异常检测方面综合性能最优,经济性统计性最好。对于跨境生鲜农产品运输交付链,建议优先采用VSSI T²控制图,以实现成本、时效性和异常检测的最优平衡。

3 结论

研究基于可变样本容量和抽样时间的VSSI T²控制图下跨境生鲜农产品运输交付链过程中的利润,建立了以最小/最大样本数量、最长/最短抽样时间和控制限为参数组合的质量损失函数,并采用遗传算法与粒子群算法对模型进行参数优化,得出以下主要结论。

(1) VSSI T²控制图的综合性能最优。在3种控制图方案中,VSSI T²控制图通过动态调整样本容量和抽样间隔,实现了成本控制与质量监控的最佳平衡。案例分析表明,当偏移量 $d = 1.5$ 时,VSSI T²模型的每日预期利润损失 $E(A)$ 显著低于VSS T²和VSI T²,同时其调整的平均报警时间AATS与误报警次数ANF均表现更优,验证了其在跨境生鲜农产品运输交付链中的高效性与适用性。

(2) 多变量控制图的经济性统计性优化效果显著。通过引入动态抽样策略,模型能够快速响应运输延误、温控失效等异常情况。当偏移量 d 从0.5增至3时,VSS T²模型的 $E(A)$ 降低了153.900 7,表明大偏移场景下的检测效率显著提升,有效降低了失控状态的经济损失。VSSI T²模型调整的平均报警时间AATS最短、误报警次数ANF最少,统计性优化效果最优。

(3) 模型对参数波动具有鲁棒性。敏感性分析表明,受控与失控状态的利润参数 C_0 和 C_1 波动 $\pm 10\%$ 时,每日预期利润损失 $E(A)$ 的变化率均较低,说明模型对实际场景中的参数波动具有较强的适应性。

本研究对跨境生鲜农产品运输交付链的监控优化方面进行了分析探讨,但仍存在局限性:①中欧

班列长沙至汉堡的茶叶运输交付链的研究样本并不足以代表所有的跨境生鲜农产品运输特征,未来可考虑扩大样本范围,以增强研究结果的普遍性和适用性。②伴随着供应链的智慧化发展,未来可向动态化、智能化、可持续化方向演进,结合新兴技术与管理理论,构建更具韧性与社会责任的供应链管理体系。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村重要经济指标[EB/OL]. (2025-02-13)[2025-02-13]. <http://zdsccx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/index.jsp>.
- [2] 冯芬玲, 刘 洋. 考虑货物时间价值的中欧班列差异化补贴经济性分析[J]. 铁路运输与经济, 2022, 44(6): 1-7.
FENG Fenling, LIU Yang. Economic Analysis of Differentiated Subsidy for China-Europe Railway Express Considering Freight Time Value[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(6): 1-7.
- [3] WISNER J D, TAN K C. Supply Chain Management and Its Impact on Purchasing[J]. Journal of Supply Chain Management, 2000, 36(3): 33-42.
- [4] 陆 芬, 吴小畅, 徐烨昕. 生鲜电子商务供应链质量控制与保鲜努力决策研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(6): 752-757, 765.
LU Fen, WU Xiaochang, XU Yexin. Quality Control and Preservation Effort Decision of Fresh Product E-Commerce Supply Chains[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2023, 37(6): 752-757, 765.
- [5] 汪峻萍, 吴思卓. 捆绑销售供应链定价和质量控制策略研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(1): 126-131, 144.
WANG Junping, WU Sizhuo. Research on Pricing and Quality Control Policies in a Bundling Supply Chain[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2024, 47(1): 126-131, 144.
- [6] 魏 娜. 基于质量控制的果蔬农产品电商服务供应链协同管理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [7] 马 帅. 航空制造供应链中的质量管理策略[J]. 物流技术, 2023, 42(4): 132-135.
MA Shuai. Quality Management Strategy of Aviation Manufacturing Supply Chain[J]. Logistics Technology, 2023, 42(4): 132-135.

- [8] WIDODO K H, NAGASAWA H, MORIZAWA K, et al. A Periodical Flowering-Harvesting Model for Delivering Agricultural Fresh Products[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 170(1): 24-43.
- [9] AHUMADA O, RENE VILLALOBOS J, NICHOLAS MASON A. Tactical Planning of the Production and Distribution of Fresh Agricultural Products under Uncertainty[J]. Agricultural Systems, 2012, 112: 17-26.
- [10] DONIS-GONZÁLEZ I R, GUYER D E, PEASE A, et al. Internal Characterisation of Fresh Agricultural Products Using Traditional and Ultrafast Electron Beam X-Ray Computed Tomography Imaging[J]. Biosystems Engineering, 2014, 117: 104-113.
- [11] 霍红, 白艺彩. 基于互联网环境的生鲜农产品质量安全控制研究[J]. 工业工程, 2020, 23(6): 52-59.
HUO Hong, BAI Yicai. A Research on Quality and Safety Control of Fresh Agricultural Products under Internet Environment[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(6): 52-59.
- [12] 许秀红. 我国生鲜农产品进口贸易: 特征、影响因素及前景[J]. 对外经贸实务, 2018, 36(9): 48-51.
- [13] FARAZ A, HEUCHENNE C, SANIGA E, et al. Monitoring Delivery Chains Using Multivariate Control Charts[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 228(1): 282-289.
- [14] DUMICIC K, ZMUK B. Monitoring Delivery Time with Control Charts[M]. Vienna: DAAAM International Vienna, 2011.
- [15] DUNCAN A J. The Economic Design of X-bar Charts Used to Maintain Current Control of a Process[J]. Journal of the American Statistical Association, 1956, 51(274): 228-242.
- [16] GIRSHICK M A, RUBIN H. A Bayes Approach to a Quality Control Model[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1952, 23(1): 114-125.
- [17] MONTGOMERY D C. Economic Design of an $\bar{X}$ Control Chart[J]. Journal of Quality Technology, 1982, 14(1): 40-43.
- [18] LORENZEN T J, VANCE L C. The Economic Design of Control Charts: A Unified Approach[J]. Technometrics, 1986, 28(1): 3-10.
- [19] COSTA A F B. $\bar{X}$ Charts with Variable Sample Size[J]. Journal of Quality Technology, 1994, 26(3): 155-163.
- [20] CALABRESE J M. Bayesian Process Control for Attributes[J]. Management Science, 1995, 41(4): 637-645.
- [21] SANIGA E M. Economic Statistical Control $\bar{X}$ Chart Designs with an Application to $\bar{X}$ and R Charts [J]. Technometrics, 1989, 31(3): 313.
- [22] 夏春辉. 基于 PEST 的铁路冷链物流环境分析与发展对策[J]. 铁路物流, 2025, 43(9): 26-32.
XIA Chunhui. PEST-Based Environmental Analysis and Development Strategies for Railway Cold Chain Logistics[J]. Railway Logistics, 2025, 43(9): 26-32.
- [23] 湖南省人民政府. 班列规模连续 6 年稳居全国第一方阵 长沙成为中欧班列集结中心[EB/OL]. (2025-02-09)[2025-03-18]. https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/zwdt/202502/t20250209_33583400.html.
- [24] 成都中铁铁路快运. 运输时时刻刻表[EB/OL]. (2023-09-19)[2025-03-18]. <http://www.cdztkyw.com/intro/16.html>.
- [25] 国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于调整铁路货物运价有关问题的通知[EB/OL]. (2014-01-30)[2025-03-18]. <https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/upload/images/202210/202210151550283.pdf>.
- [26] 安徽省人民政府. 中欧班列安徽首列“茶叶专列”顺利发运[EB/OL]. (2021-09-09)[2025-03-18]. <https://www.ah.gov.cn/zwyw/iryw/554038391.html>.
- [27] 雪球. 由中国发往欧洲的中欧班列集装箱在俄罗斯滞留数月后, 被俄方原路退回中国[EB/OL]. (2025-03-09)[2025-03-18]. <https://xueqiu.com/1785441490/326556076>.
- [28] 搜狐网. 德国进口调味茶清关手续简述[EB/OL]. (2019-02-14)[2025-03-18]. https://www.sohu.com/a/294746485_196883.

(责任编辑 汪沁莹)