

DOI:10.11918/202510092

# 多源沥青基因特征及其性能构效机制分析

杨正源<sup>1</sup>, 纪伦<sup>1</sup>, 刘济玮<sup>1</sup>, 朱箫迪<sup>2</sup>, 顾洪江<sup>3</sup>, 谭忆秋<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 辽宁交投监理咨询有限责任公司, 沈阳 110166;  
3. 辽宁步云交通新材料科技有限公司, 辽宁 盘锦 124099)

**摘要:** 为揭示多源基质沥青自身“基因”特征与其性能之间的内在构效关系, 选取10种不同油源的常用基质沥青, 通过对基质沥青的宏观性能(三大指标等)、化学组分(饱和分、芳香分、胶质、沥青质含量)及元素组成进行系统分析, 结合组成成分试验与相关性分析, 揭示了胶质-沥青质比  $I_{R/A}$  与135℃旋转黏度极强相关, 而胶质  $R$ /芳香分  $A$  只与老化后软化点存在强负相关关系等等。进一步结合凝胶渗透色谱测试结果, 发现分子量分布特征与四组分间协同作用显著影响沥青流变行为, 其中重均分子量与老化后延度存在强的负相关性。分布宽度指数与针入度指数  $PI$ 、老化后软化点、标准黏度和135℃旋转黏度存在强或极强的正负相关性。这表明分子量分布越宽, 沥青的温度敏感性和黏度越高, 而延展性降低。通过回归分析进一步验证了四组分、分子量参数对宏观性能的影响, 并得出了这些“基因”特征与沥青性能之间的构效模型, 通过“基因”特征指标预测相应的性能指标。研究结果为将来实现沥青材料的精准设计与性能预判提供了理论依据。

**关键词:** 基质沥青; “基因”特征; 相关性分析; 构效关系; 性能预测

**中图分类号:** U415 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)12-0325-12

## Analysis of genetic characteristics and structure-performance mechanisms in multi-source asphalt

YANG Zhengyuan<sup>1</sup>, JI Lun<sup>1</sup>, LIU Jiwei<sup>1</sup>, ZHU Xiaodi<sup>2</sup>, GU Hongjiang<sup>3</sup>, TAN Yiqiu<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;  
2. Liaoning Transportation Investment Supervision and Consulting Co., Ltd., Shenyang 110166, China;  
3. Liaoning Buyun Transportation New Materials Technology Co., Ltd., Panjin 124099, Liaoning, China)

**Abstract:** To reveal the intrinsic structure-property relationships between the inherent "genetic" characteristics of multi-source base asphalt and its performance, this study selected ten commonly used base asphalts from different crude oil sources. Through systematic characterization of the macroscopic properties (such as the three major indicators), chemical composition (saturates, aromatics, resins, and asphaltene content), and elemental composition of the base asphalts, combined with compositional analysis and correlation analysis, it was revealed that the resin-to-asphaltene ratio ( $I_{R/A}$ ) exhibits a very strong correlation with the rotational viscosity at 135℃, while the resin-to-aromatics ratio ( $I_{R/A}$ ) only shows a strong negative correlation with the softening point after aging. Furthermore, combined with gel permeation chromatography test results, it was found that the synergistic effect between molecular weight distribution characteristics and the four fractions significantly influences the rheological behavior of asphalt. Among these, the weight-average molecular weight demonstrates a strong negative correlation with ductility after aging. The polydispersity index exhibits strong or very strong positive or negative correlations with the penetration index ( $PI$ ), softening point after aging, standard viscosity, and rotational viscosity at 135℃. This indicates that a broader molecular weight distribution leads to higher temperature susceptibility and viscosity of asphalt, while reducing its ductility. Through partial least squares regression analysis, the influence of the four fractions and molecular weight parameters on macroscopic properties was further validated, and structure-property equations between these "genetic" characteristics and asphalt performance were established. To some extent, the constructed structure-property relationship model allows for the prediction of corresponding performance indicators based on genetic characteristic parameters. This study provides a theoretical foundation for the precise design and performance prediction of asphalt materials in the future.

**Keywords:** matrix asphalt; "genetic" characteristics; correlation analysis; structure-activity relationship; performance prediction

收稿日期: 2025-10-28; 录用日期: 2025-11-24; 网络首发日期: 2025-11-28

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251128.1410.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52508493); 黑龙江省自然科学基金研究团队项目(TD2022E001); 国家重点研发计划(2024YFB2605300)

作者简介: 杨正源(2003—), 男, 硕士研究生; 纪伦(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 谭忆秋, tanyiqiu@hit.edu.cn; 纪伦, jilun@hit.edu.cn

沥青作为道路工程中不可或缺的胶结材料,其性能直接决定了沥青路面的服役行为与使用寿命,如抗车辙能力、低温抗裂性及耐久性等。在全球道路基础设施迈向绿色与可持续发展的大背景下,新材料与新技术的应用,如温拌沥青以降低碳排放<sup>[1]</sup>、高比例再生沥青路面(RAP)技术<sup>[2]</sup>以实现固废资源化利用以及各类生物基与复合改性沥青的开发<sup>[3-4]</sup>,已成为行业研究热点。然而,沥青是一种化学成分极为复杂的石油衍生物,其性能深受原油来源、炼制工艺等“基因”特征的深刻影响。不同油源的基质沥青,以及经不同工艺改性的沥青,其路用性能表现出的显著差异,归根结底源于其内在化学组成与分子结构的根本不同<sup>[5]</sup>。

长期以来,工程实践与科研中主要依赖针入度、软化点、延度等宏观指标对沥青进行评价与选择。这些指标虽能直观反映沥青的某些性能,但属于“黑箱”或“灰箱”式的经验性评价,难以揭示性能差异的内在本质与演化规律。值得注意的是,随着材料检测技术的进步,研究者们已认识到必须深入到材料的化学组分(如四组分:饱和分、芳香分、胶质、沥青质)、元素组成、分子量分布及微观界面行为等层面,才能从根本上理解并预测其宏观行为<sup>[6-7]</sup>。例如,分子动力学模拟被用于揭示沥青质的缔合规律<sup>[8]</sup>及水对沥青-集料界面的破坏机理<sup>[9]</sup>,而流变学测试与多尺度预测模型(如 Buttlar 模型用于胶浆性能预测)则成为连接微观结构与宏观性能的有力工具<sup>[10]</sup>。

现有研究在沥青化学组成与宏观性能关联方面取得进展,但仍存在明显不足:1)研究对象系统性不足,多局限于单一油源或少数改性沥青,缺乏对不

同“基因”背景基质沥青的系统比对,难以提炼普适性构效规律;2)多因素协同机制不清,关键组分比例与分子量分布等参数如何协同调控流变、老化及耐久性尚缺乏统一结论<sup>[11]</sup>;3)模型预测能力有限,人工智能等先进数据驱动方法在基质沥青“基因”-性能关系研究中的应用尚不充分,机理模型与预测精度均有待提升<sup>[12-13]</sup>。

为此,本研究选取 10 种不同油源基质沥青,系统表征其宏观性能、化学组分及分子量分布,结合相关性分析与回归方法<sup>[14]</sup>,旨在:1)辨析关键组分比例(如 R/A)对高温黏度、温度敏感性及老化性能的影响;2)阐明分子量分布与四组分的协同作用对流变行为与耐久性的调控机制;3)建立“基因”特征与宏观性能的定量构效方程,为性能预测提供模型工具。

本研究深化了对沥青材料“基因”-性能内在联系的理解,为沥青材料的精准设计、性能预测及新材料研发提供了理论依据与方法支持,对推动道路工程材料发展与应用具有重要意义。

## 1 基质沥青特性分析

针对北方地区 10 种常用的不同产地、不同品质的基质沥青,试验分析基质沥青的四组分、红外光谱、元素组成、族组成结构含量、分子量及分子量分布等微观组成参数构建特性数据体系,进行基质沥青的老化前后 25 °C 针入度、软化点、5 °C 延度以及标准黏度、60 °C 动力黏度和 135 °C 旋转黏度试验等性能指标进行测定。

### 1.1 多源基质沥青宏观性能

本文收集北方地区常见的 10 种不同产地或生产批次的 90 号基质沥青进行性能测试,其性能见表 1。

表 1 10 种多源基质沥青宏观性能

Tab. 1 Macroscopic properties of 10 multi-source base asphalts

基质沥青 种类	软化点/ °C	5 °C 延度/ mm	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	针入度 指数 PI	老化后软 化点/°C	老化后延 度/mm	老化后 25 °C 针入 度/(0.1 mm)	标准黏度/ (pa·s)	60 °C 动力 黏度/(pa·s)	135 °C 旋转 黏度/(pa·s)
JB	44.9	192.7	87.2	-1.43	48.9	21.7	68.6	144.4	155.6	0.42
QP	53.4	162.8	80.6	-0.47	50.5	104.7	58.4	74.4	158.4	0.44
BL	49.3	128.1	88.6	-0.63	50.7	67.0	72.4	403.1	142.9	0.41
LH-A	44.3	115.6	86.7	-1.57	47.4	65.1	65.6	280.0	130.72	0.26
LH-B	43.6	116.1	86.4	-1.35	48.1	63.9	65.3	264.8	116.16	0.22
XH-A	46.3	91.3	77.3	-1.34	50.5	39.3	56.0	254.5	173.92	0.34
XH-B	44.5	132.7	97.9	-1.97	50.6	7.8	64.1	234.7	164.50	0.32
JY	50.5	205.5	78.2	-0.35	52.1	162.6	59.1	589.5	298.0	0.54
PJ	45.3	110.6	73.2	-1.45	49.0	58.2	61.9	239.3	155.25	0.31
ZH	43.2	77.7	93.4	-1.21	50.2	5.6	67.2	243.1	134.5	0.37

由表 1 可知, LH-A 与 LH-B 基质沥青虽然批次不同, 但各项宏观指标相似, 而 XH-A 与 XH-B 基质沥青宏观指标差异较大。同时所研究的 10 种基质沥青老化前后 5℃ 延度、标准黏度和 60℃ 动力黏度差异显著。

## 1.2 多源基质沥青红外光谱分析

本研究采用美国 NicolettiS10 型号傅里叶红外光谱仪 (FTIR) 对 10 种基质沥青进行特征基团表征, 重点获取不同沥青的极性官能团丰度信息。红外光谱分析技术因其能够高效、精准地表征沥青胶结料中官能团及化学键的特征信息<sup>[15]</sup>, 是沥青化学组成与结构解析的重要手段。本研究对 10 种基质沥青样品进行系统表征, 重点考察其极性官能团的分布特征。

如图 1 所示, 所有沥青样品的红外光谱在 2 000 ~ 4 000  $\text{cm}^{-1}$  之间均呈现 3 个特征吸收峰: 2 956  $\text{cm}^{-1}$  (甲基不对称伸缩振动)、2 924  $\text{cm}^{-1}$  (亚甲基不对称伸缩振动) 和 2 849  $\text{cm}^{-1}$  (亚甲基对称伸缩振动)。已有研究表明, 这些饱和 C—H 键的振动强度在不同沥青材料中差异不显著。因此, 本研究重点分析 1 800  $\text{cm}^{-1}$  以下波数区域的光谱特征。

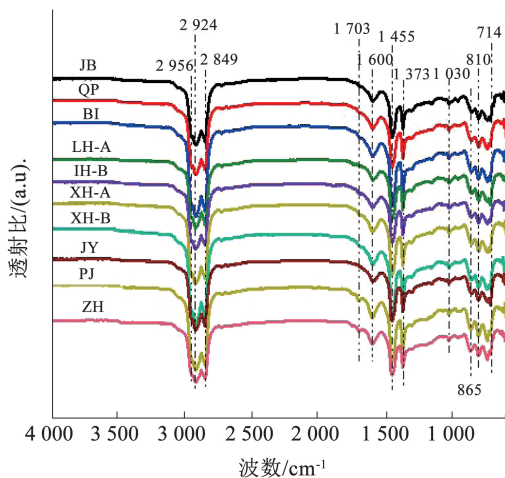


图 1 不同基质沥青样品原始的傅里叶红外光谱

Fig. 1 Raw FTIR spectra of different base asphalt samples

在指纹区 (1 800 ~ 650  $\text{cm}^{-1}$ ) 的光谱解析中, 观察到以下特征振动模式: 1 600  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于芳香环骨架振动 (C=C 共轭双键), 810  $\text{cm}^{-1}$  处的峰对应芳环 C—H 面外弯曲振动 (对二取代模式)。1 455  $\text{cm}^{-1}$  和 1 373  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰分别源于亚甲基和甲基的弯曲振动, 反映了直链或支链烷烃结构的存在。此外, 1 703  $\text{cm}^{-1}$  处的弱吸收峰可指认为羧基 (-COOH) 的 C=O 伸缩振动, 而 1 030  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰则归因于亚砜基 (S=O) 的伸缩振动。值得注意的是, 尽管样品来源各异, 但其红外光谱的

峰位高度一致, 仅在吸收强度上存在差异, 这表明不同沥青样品具有相似的官能团组成, 但各官能团的相对含量存在区别。

基于 Lambert-Beer 定律, 官能团含量与其特征峰吸收强度呈正相关关系。为消除测试条件波动和基团耦合效应的影响, 本研究采用峰面积积分法进行半定量分析。光谱解析结果显示, 所有样品均未检测到显著的羰基 (C=O) 和羟基 (-OH) 特征信号, 仅观察到亚砜基 (S=O) 吸收峰, 这与基质沥青未经历明显老化的特性相符。因此, 本研究选用亚砜基指数 (SI) 作为评价沥青极性官能团丰度的指标。选取指纹区 (1 400 ~ 650  $\text{cm}^{-1}$ ) 全波段峰面积作为基准进行归一化处理, 具体计算公式为

$$SI = A_{1\,032} / A_{1\,400-650} \quad (1)$$

其中:  $A_{1\,032}$  表示 1 030  $\text{cm}^{-1}$  处亚砜基的特征峰面积,  $A_{1\,400-650}$  表示 1 400 ~ 650  $\text{cm}^{-1}$  内所有吸收峰的累积面积。

通过计算得到的亚砜基指数 (SI) 分布, 如图 2 所示。数据分析表明, 不同基质沥青的极性官能团丰度存在一定差异, 但这种差异与油源相关性不明显。具体而言, LH-A 沥青样品表现出最低的 SI 值, 而 QP 和 XH-B 样品的 SI 值最为显著。这一结果为进一步研究沥青材料的构效关系提供了重要的化学组成依据。

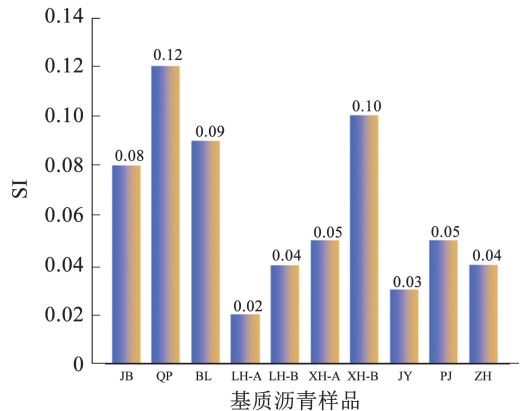


图 2 不同基质沥青亚砜基官能指数

Fig. 2 Sulfoxide functional group indices of different base asphalt samples

## 1.3 多源基质沥青四组分分析

沥青是一种复杂的有机化合物, 本文采用山东淄博山分仪器有限公司生产的 SF-2020 棒状制备色谱仪分析基质沥青四组分<sup>[16]</sup>。其试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 10 种基质沥青中, 沥青质质量分数  $A_t$  在 6% ~ 14% 之间, 胶质质量分数  $R$  在 18% ~ 30% 之间, 芳香分质量分数  $A$  在 37% ~ 52% 之间, 饱和分质量分数  $S$  在 15% ~ 30% 之间, 其中, JY 基

质沥青的沥青质含量最高;LH 基质沥青沥青质含量最低,但饱和分含量最高;QP 基质沥青芳香分含量最高;JB、BL、LH 以及 PJ 基质沥青胶质含量较高且差异不大。LH 不同批次基质沥青四组分相似,而 XH 不同基质沥青四组分差异较大。分离出的基质沥青四组分溶液如图 4 所示。

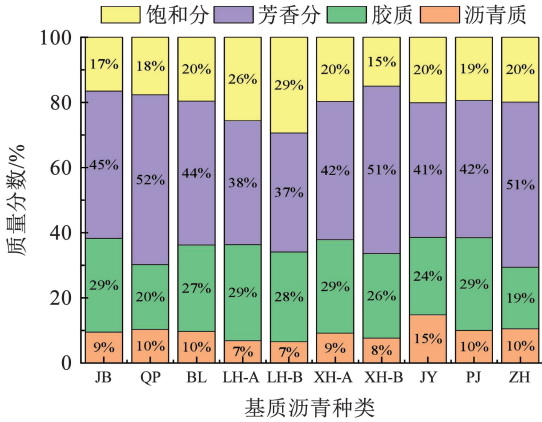


图 3 10 种基质沥青四组分质量分数对比

Fig. 3 Comparison of mass fractions of four components in 10 base asphalts

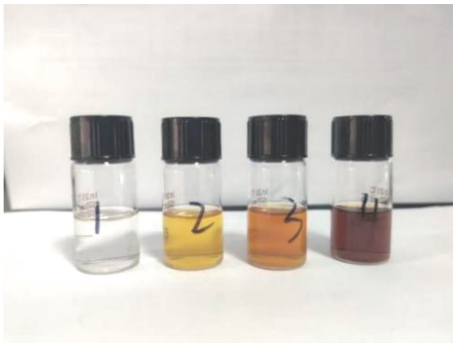


图 4 沥青四组分溶液 (LH-A 基质沥青)

Fig. 4 Four-component solution of asphalt (LH-A base asphalt)

为了更好地描述基质沥青组分差异,提出以下指标更好地描述不同基质沥青组分差异。

胶质-沥青质比  $I_{R/A}$ :

$$I_{R/A} = \frac{R}{At} \quad (2)$$

表 3 10 种基质沥青元素质量分数

Tab. 3 Elemental mass Fractions of 10 base asphalts

基质沥青	$W_C/\%$	$W_H/\%$	$W_S/\%$	$W_N/\%$	$W_O/\%$	$N_H/N_C$	$(N_N + N_O + N_S)/N_C$
JB	84.38	10.33	4.11	0.66	0.61	1.469	0.030 4
QP	83.57	10.16	5.06	0.36	0.32	1.458	0.029 3
BL	83.48	10.30	4.20	0.65	0.68	1.480	0.031 7
LH-A	87.08	10.70	0.41	0.71	0.48	1.474	0.012 9
LH-B	87.16	10.77	0.35	0.73	0.75	1.483	0.015 1
XH-A	83.87	10.26	4.29	0.63	0.42	1.468	0.029 4
XH-B	84.21	10.31	4.36	0.60	0.40	1.469	0.029 1
JY	84.01	10.30	4.78	0.48	0.46	1.471	0.030 3
PJ	84.40	10.37	3.93	0.67	0.38	1.474	0.027 6
ZH	83.34	10.18	4.77	0.42	0.45	1.465	0.029 8

注:由于氢碳比与杂原子比较小,小数点分别保留 3 位和 4 位。

芳香分-饱和分比  $I_{A/S}$ :

$$I_{A/S} = \frac{A}{S} \quad (3)$$

溶胶指数  $I_C$ :

$$I_C = \frac{R + A}{S + At} \quad (4)$$

组分平衡指数 CBI:

$$CBI = \frac{R + 0.5 \cdot A}{0.5 \cdot S + At} \quad (5)$$

其中:  $At$  为沥青质质量分数,  $R$  为胶质质量分数,  $S$  为饱和分质量分数,  $A$  为芳香分质量分数。

计算得出各基质沥青的组分指标如表 2 所示。

表 2 10 种基质沥青的各项组分指标

Tab. 2 Compositional indicators of 10 base asphalts

基质沥青	胶质-沥青质比 $I_{R/A}$	芳香分-饱和分比 $I_{A/S}$	溶胶指数 $I_C$	组分平衡指数 CBI
JB	3.04	2.73	2.84	2.89
QP	1.92	2.96	2.57	2.40
BL	2.75	2.25	2.42	2.50
LH-A	4.30	1.49	2.08	2.47
LH-B	4.23	1.25	1.79	2.16
XH-A	3.12	2.15	2.46	2.62
XH-B	3.40	3.42	3.41	3.41
JY	1.61	2.06	1.87	1.79
PJ	2.87	2.17	2.41	2.52
ZH	1.81	2.56	2.30	2.17

### 1.4 多源基质沥青元素分析

基质沥青的元素组成,主要指碳(C)、氢(H)、氮(N)、硫(S)、氧(O),这些元素通过影响沥青的化学结构、极性、分子间作用力以及反应活性,进而决定了沥青的性能。

本研究采用德国 Elementar Unicube 元素分析仪对基质沥青进行元素分析<sup>[17]</sup>。该仪器可将样品通过高温燃烧的方式,转化成对应元素的氧化物,再吸附-解吸柱实现高效分离,便于对氧化物进行定量分析。试验结果见表 3。

可知,对于测试的沥青,碳质量分数一般在 82% ~ 88% 之间,氢质量分数一般在 10% ~ 11% 之间,硫质量分数一般在 0.3% ~ 5% 之间,氮质量分数一般在 0.36% ~ 0.74% 之间,氧元素质量分数一般在 0.32% ~ 0.75% 之间。碳氢元素质量分数占基质沥青中 94% 以上的比例。

用氢原子数目与碳原子数目的比值( $N_H/N_C$ )来表示沥青的极性,这是由于较高的氢原子与碳原子的比值表明饱和分和链烷烃含量相对较高,分子结构相对简单、极性较弱。该种基质沥青可能低温性能较好,但高温性能可能不足,因为过高的饱和分可能起稀释剂作用。

而活性硫(如硫醇、硫化物、多硫化物)是影响沥青 SBS 改性的最重要元素之一<sup>[18]</sup>。非活性硫(如噻吩类)通常不参与反应,影响较小。氮氧元素多存在于胶质和沥青质的杂环中(如吡咯、羧基、羰基),显著增强分子极性,同时作为氧化催化位点,加速沥青老化。用杂原子与碳原子之比即 $[(N_N + N_O + N_S)/N_C]$ 代表杂原子占据碳原子的含量比例,杂原子相对含量越多的沥青,会形成更多极性官能团。

由图 5 可知,基质沥青氢碳比数值在 1.459 ~ 1.483 之间,说明基质沥青的氢原子与碳原子之比总体在 1.47 倍左右,其极差为 0.024,变异系数在 1.6%,说明不同基质沥青的氢碳比差异较小。

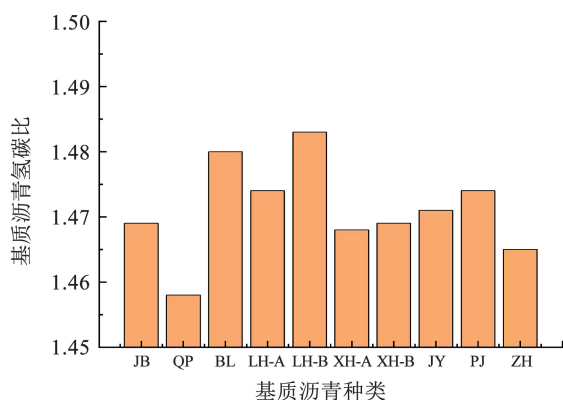


图 5 基质沥青碳氢比

Fig. 5 C/H ratio of base asphalt

由图 6 可知,基质沥青杂原子与碳原子之比数值在 0.012 9 ~ 0.031 7 之间,其极差为 0.026 6,变异系数在 70.6%,这是由于不同基质沥青硫含量有较大差异,说明基质沥青杂原子与碳原子之比差异较大。其中 LH 基质沥青杂原子与碳原子之比远小于其他基质沥青。

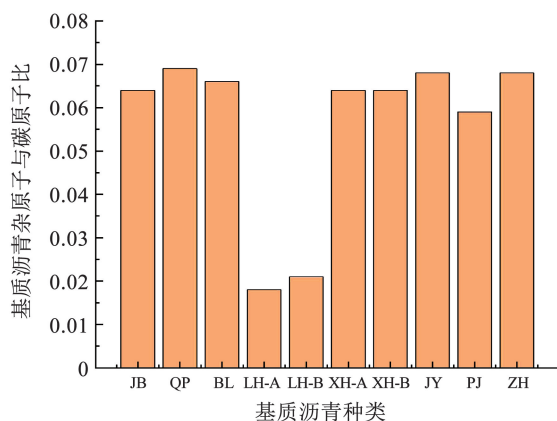


图 6 基质沥青杂原子与碳原子之比

Fig. 6 Heteroatom-to-carbon ratio of base asphalt

### 1.5 多源基质沥青凝胶色谱分析

本研究采用安捷伦 PL-GPC50 凝胶渗透色谱系统对沥青样本的分子量分布情况进行表征。仪器启用 PL-RI 示差折光检测器进行分子量测定。实验以四氢呋喃(THF)为流动相,采用 1.0 mL/min 流速,配合微量双柱塞泵实现高精度溶剂输送。在 GPC 分析中,常用的分子量统计值有峰值分子量  $M_p$ 、数均分子量  $M_n$ 、重均分子量  $M_w$ 、Z 均分子量  $M_z$ 、粘均分子量  $M_v$  以及多分散系数 PDI。其中,峰值分子量  $M_p$  定义为分子量分布曲线最高峰对应的分子量;数均分子量  $M_n$  为以数目为加权进行统计的分子量数据;重均分子量  $M_w$  为以质量为加权进行统计的分子量数据;Z 均分子量  $M_z$  是基于分子重量(质量)加权的统计平均分子量,对体系中高分子量组分的变化最为敏感;重均分子量  $M_w$  与数均分子量  $M_n$  之比被称为分布宽度指数 PDI。除读图识别的  $M_p$  之外,其他指标的计算:

$$M_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i} = \frac{\sum w_i}{\sum \frac{w_i}{M_i}} \quad (6)$$

$$M_w = \frac{\sum w_i M_i}{\sum w_i} = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i} \quad (7)$$

$$M_z = \frac{\sum n_i M_i^3}{\sum n_i M_i^2} \quad (8)$$

$$M_v = \left( \frac{\sum n_i M_i^{\alpha+1}}{\sum n_i M_i} \right)^{1/\alpha} \quad (9)$$

$$M_v = \left( \frac{\sum n_i M_i^{\alpha+1}}{\sum n_i M_i} \right)^{1/\alpha} \quad (10)$$

$$PDI = \frac{M_w}{M_n} \quad (11)$$

其中: $n_i$ 为分子量为  $M_i$  的分子数量; $w_i$ 为分子量为  $M_i$  的分子总质量( $w_i = n_i M_i$ ); $\alpha$ 为 Mark-Houwink 方程指数,线性分子  $\alpha \approx 0.7$ ,支化分子  $\alpha < 0.5$ 。

$M_z$ 与 $M_w$ 相似侧重表征聚合物的“重量”,一般是通过测定链长得到的,不常用于表征聚合物; $Z$ 均分子量 $M_z$ 对大分子量组分较敏感,权重偏向高分子量尾端。粘均分子量 $M_v$ 通过特性黏度( $[\eta]$ )关联分子量,反映分子链在溶液中的流体力学体积;分布宽度指数 PDI 是用于衡量聚合物分子量分布的广

度,PDI( $PDI = M_w/M_n$ )多分散性指数越大,分子量分布越广。一般高聚物的分布宽度指数为 2.0 左右,而连锁聚合产物分布宽度指数则处于 1.5~2.0 之间,沥青的 PDI 均处于连锁聚合反应产物相应区间。基于对前述 GPC 曲线的分析,可以得出不同样本的分子量统计值,计算结果汇总于表 4。

表 4 沥青分子量以及分布

Tab. 4 Molecular weight and distribution of asphalts

基质沥青	峰顶分子量 $M_p$ / ( $g \cdot mol^{-1}$ )	数均分子量 $M_n$ / ( $g \cdot mol^{-1}$ )	重均分子量 $M_w$ / ( $g \cdot mol^{-1}$ )	粘均分子量 $M_v$ / ( $g \cdot mol^{-1}$ )	Z 均分子量 $M_z$ / ( $g \cdot mol^{-1}$ )	分布宽度指数 PDI
JB	1 941	1 136	2 248	3 570	3 813	1.979
QP	1 929	1 154	2 243	3 525	3 758	1.944
BL	2 286	1 171	2 373	3 758	4 004	2.026
LH-A	1 426	921	1 757	2 735	4 224	1.908
LH-B	1 408	915	1 595	2 300	2 419	1.743
XH-A	1 892	1 096	2 169	3 374	3 590	1.979
XH-B	2 560	1 280	2 442	3 650	3 859	1.908
JY	1 417	657	1 459	2 446	2 612	2.221
PJ	1 390	953	1 736	2 598	2 749	1.822
ZH	1 509	1 133	2 185	3 473	3 702	1.923

对于沥青微观组成结构分析来说,更侧重于原油分子量分布的“数量”,而重均分子量和 Z 均分子量则更侧重于表示分子量分布的“重量”,因此对于沥青分子量及分子量分布应选取“数均分子量  $M_n$  和分布宽度指数 PDI”两项指标。根据这两项指标的数据绘制沥青分子量及分子量分布指标,如图 7 所示,由图 7 可知,不同沥青的分子量存在一定差异,虽然 LH 沥青不同批次的数均分子量相近,但其分子量分布仍有较大差异。同时 JY 沥青,数均分子量最小,但分布宽度指数 PDI 最大。

观地反映出沥青碳氢与杂原子含量的多少。可以发现原油的碳数分布集中在(C66~C90)之间,一般来说平均分子式直接包含了元素含量和分子量的组成结构信息,本文计算平均分子式是为了更直观地展现不同基质沥青的碳氢与杂原子相对含量。

表 5 基质沥青平均分子式

Tab. 5 Average molecular formula of base asphalt

基质沥青	平均分子式
JB	$C_{79.9}H_{117.3}S_{1.46}N_{0.54}O_{0.43}$
QP	$C_{80.4}H_{117.2}S_{1.82}N_{0.30}O_{0.23}$
BL	$C_{81.5}H_{120.6}S_{1.54}N_{0.54}O_{0.50}$
LH-A	$C_{66.8}H_{98.5}S_{0.12}N_{0.47}O_{0.28}$
LH-B	$C_{66.5}H_{98.5}S_{0.10}N_{0.48}O_{0.43}$
XH-A	$C_{76.6}H_{112.4}S_{1.47}N_{0.49}O_{0.29}$
XH-B	$C_{89.8}H_{132.0}S_{1.74}N_{0.55}O_{0.32}$
JY	$C_{46.0}H_{67.7}S_{0.98}N_{0.23}O_{0.19}$
PJ	$C_{67.0}H_{98.8}S_{1.17}N_{0.46}O_{0.23}$
ZH	$C_{78.7}H_{115.3}S_{1.69}N_{0.34}O_{0.32}$

注:碳原子 C 与氢原子 H 数量较多,分子式保留到小数点后一位;硫 S 氮 N 氧 O 原子数量较少保留小数点后两位。

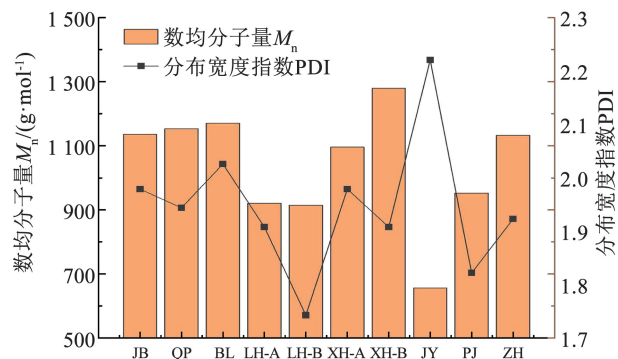


图 7 沥青分子量及分子量分布指标

Fig. 7 Molecular weight and molecular weight distribution indicators of asphalt

利用沥青凝胶色谱测得数据平均分子量  $M_n$  和元素组成这个各元素相对含量数据可推算出沥青的平均分子式,结果如表 5 所示。通过分子式能够直

分子量分布曲线是反映各分子量组成在沥青中所占比重大小。PDI 一般认为衡量高分子材料分子量分布的指标,而差异分布曲线是将该指标具象化作图,更清晰地对比二者分子分布情况,如图 8 所示。

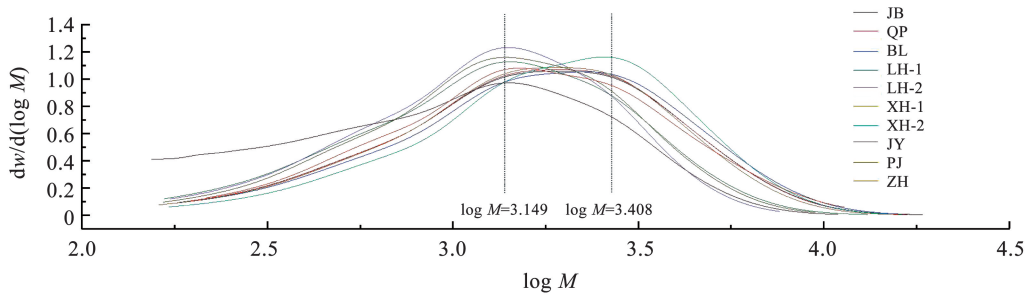


图 8 基质沥青差异分布曲线

Fig. 8 Differential distribution curves of base asphalts

由图 8 沥青差异分布曲线可知, 沥青的分子量的分布呈正态分布, 且沥青的峰值比较集中, 沥青的峰值对应的分子量参数  $\log M = 3.149 \sim 3.408$ , 说明沥青材料中具有更多的大分子; 沥青的分布宽度指数 PDI 较小, 说明沥青材料中分子间聚合较为密集, 因此沥青材料具有大分子且较为密集的特征。

## 2 基于相关性的沥青“基因”特征研究

### 2.1 相关性分析方法

在数据相关性分析中, 相关系数是量化两个变量间关联强度与方向的核心指标。不同类型的相关系数适用于不同数据场景(如连续数据、分类数据、排序数据), 但判定逻辑均围绕“系数取值范围”“方向”“强度”3 个维度展开。Pearson(皮尔逊)相关系数:  $r > 0$  正相关, 即一个变量增大时, 另一个变量大概率随之增大;  $r < 0$  负相关, 即一个变量增大时, 另

一个变量大概率随之减小;  $r = 0$  无线性相关, 即两个变量间不存在线性关联。

Pearson 系数绝对值大小对应“线性关联强度”, 行业通用分级标准见表 6。

表 6 线性关联强度分级标准

Tab. 6 Classification criteria for linear correlation strength

CORREL 结果( $r$ )	相关性	相关性强度
$0.8 < r \leq 1$	正相关	极强相关
$0.5 < r \leq 0.8$	正相关	强相关

注: 负值时为负相关。

### 2.2 三大指标特征与其他指标的相关性分析

将上述基质沥青, 及其老化实验数据进行相关性分析。若本文取  $|r| \geq 0.6$  为强相关,  $|r| \geq 0.8$  为极强相关作为判定标准。以部分结果为例, 分析相关性如表 7 所示。

表 7 基质沥青及老化性能的相关性

Tab. 7 Correlation between base asphalt and aging performance

相关参数	5 °C 延度	25 °C 针入度	针入度指数 PI	老化后软化点	老化后延度	老化后 25 °C 针入度	标准黏度	60 °C 动力黏度	135 °C 旋转黏度
软化点	0.54	-0.41	0.85	1.00	0.60	0.74	0.16	0.50	0.72
5 °C 延度	1.00	-0.16	0.45	0.31	0.58	-0.07	0.23	0.63	0.69
25 °C 针入度		1.00	-0.40	-0.06	-0.58	0.63	-0.13	-0.38	-0.20
针入度指数 PI			1.00	0.57	0.78	-0.16	0.40	0.51	0.75
老化后软化点				1.00	0.35	-0.32	0.44	0.71	0.79
老化后延度					1.00	-0.40	0.56	0.68	0.53
老化后 25 °C 入度						1.00	0.03	-0.48	-0.16
标准黏度							1.00	0.67	0.37
60 °C 动力黏度								1.00	0.75

可见, 三大指标间不存在显著的线性相关性。软化点与针入度指数间存在极强相关性, 与老化后软化点、延度和 135 °C 旋转黏度强相关。5 °C 延度与 60 °C 动力黏度、135 °C 旋转黏度强相关。25 °C 针入度与老化后 25 °C 入度强相关。针入度指数与老化后延度、135 °C 旋转黏度强相关。老化后软化点

与 60 °C 动力黏度、135 °C 旋转黏度强相关。老化后延度与 60 °C 动力黏度强相关。标准黏度与 60 °C 动力黏度强相关。

### 2.3 基质沥青组分特征与其他指标的相关性分析

将组分与基质沥青, 及其老化的实验数据进行相关性分析, 经分析可知, 亚砷基官能指数与性能没

有明显的相关性。沥青质与软化点、针入度指数、老化后软化点、60 °C 动力黏度、135 °C 旋转黏度强相关。而胶质、饱和分与老化后软化点具有强的负相关关系。饱和分与 135 °C 旋转黏度具有强的负相关关系。而采用沥青质  $A_t$ /饱和分  $S$  指标,放大了这一关系,表现出极强的相关性。

沥青质  $A_t$ /芳香分  $A$  与针入度指数、老化后延度、标准黏度、135 °C 旋转黏度之间存在强相关,与 60 °C 动力黏度极强相关。胶质  $R$ /芳香分  $A$  只与老化后软化点存在强负相关关系。

胶质/沥青质比  $I_{R/A}$  与针入度指数、老化后软化点强相关;与 135 °C 旋转黏度极强相关。

芳香分-饱和分比  $I_{A/S}$ ,为“软质”成分间比例,其与其他性能没有明显的相关性。溶胶指数亦然。组分平衡指数 CBI 与针入度指数 PI、老化后延度存在强的负相关关系。

## 2.4 基质沥青元素特征与其他指标的相关性分析

将元素与基质沥青和老化后的实验数据进行相关性分析,结果如表 8 所示。

表 8 沥青元素特征与基质沥青性能的相关性

Tab. 8 Correlation between elemental characteristics of asphalt and performance of base asphalt

相关参数	软化点	5 °C 延度	25 °C 针入度	针入度指数 PI	老化后软化点	老化后延度	老化后 25 °C 针入度	标准黏度	60 °C 动力黏度	135 °C 旋转黏度
$W_C$	-0.46	-0.12	0.04	-0.40	-0.80	0.03	0.12	-0.02	-0.35	-0.71
$W_H$	-0.48	-0.14	0.05	-0.38	-0.77	0.04	0.22	0.10	-0.35	-0.71
$W_S$	0.49	0.25	-0.09	0.39	0.82	0.03	-0.23	0.01	0.46	0.76
$W_N$	-0.57	-0.20	0	-0.57	-0.65	-0.28	0.35	0.07	-0.37	-0.65
$W_O$	-0.29	0.05	0.27	0	-0.33	-0.07	0.67	0.23	-0.30	-0.24
$N_H/N_C$	-0.37	-0.15	0.04	-0.16	-0.39	0.04	0.48	0.46	-0.20	-0.46
$(N_N + N_O + N_S)/N_C$	0.43	0.26	-0.05	0.36	0.80	-0.03	-0.08	0.06	0.42	0.74

可见,  $W_C$ 、 $W_H$ 、 $W_S$ 、 $W_N$  以及  $(N_N + N_O + N_S)/N_C$  与老化后软化点、135 °C 旋转黏度均表现出强或极强的正负相关性。 $W_O$  与老化后 25 °C 针入度表现出强相关性。

$W_C$ 、 $W_H$  与  $W_S$  以及沥青质  $A_t$ 、芳香分  $A$ 、饱和分  $S$  存在强或极强的正负相关性(表 9)。 $W_N$  与沥青质  $A_t$ 、胶质  $R$ 、芳香分  $A$  存在强或极强的正负相关性。 $N_H/N_C$  与饱和分  $S$  存在强的相关性。 $(N_N + N_O + N_S)/N_C$  与沥青质  $A_t$ 、饱和分  $S$  存在强的负相关性。

## 2.5 基质沥青分子量特征与其他指标的相关性分析

将分子量特征与基质沥青和老化后实验数据进行相关性分析,结果如表 10 所示。

表 9 沥青元素特征与基质沥青组分的相关性

Tab. 9 Correlation between elemental characteristics of asphalt and components of base asphalt

相关参数	亚砷基官能指数	沥青质 $A_t$	胶质 $R$	芳香分 $A$	饱和分 $S$
$W_C$	-0.51	-0.71	0.53	-0.65	0.83
$W_H$	-0.52	-0.70	0.59	-0.72	0.86
$W_S$	0.52	0.76	-0.55	0.64	-0.90
$W_N$	-0.32	-0.66	0.95	-0.61	0.49
$W_O$	-0.17	-0.35	0.37	-0.48	0.54
$N_H/N_C$	-0.41	-0.41	0.59	-0.71	0.62
$(N_N + N_O + N_S)/N_C$	0.53	0.71	-0.41	0.57	-0.88

表 10 沥青分子量特征与基质沥青性能的相关性

Tab. 10 Correlation between molecular weight characteristics of asphalt and performance of base asphalt

相关参数	软化点	5 °C 延度	25 °C 针入度	针入度指数 PI	老化后软化点	老化后延度	老化后 25 °C 针入度	标准黏度	60 °C 动力黏度	135 °C 旋转黏度
峰顶分子量	0.19	0.11	0.51	-0.14	0.37	-0.36	0.21	-0.21	-0.10	0.15
数均分子量	-0.11	-0.31	0.56	-0.35	0.03	-0.74	0.30	-0.65	-0.57	-0.16
重均分子量	0.06	-0.15	0.53	-0.17	0.24	-0.61	0.28	-0.49	-0.36	0.10
粘均分子量	0.16	-0.05	0.48	-0.03	0.34	-0.51	0.28	-0.40	-0.24	0.27
Z 均分子量	0.01	-0.14	0.50	-0.19	-0.07	-0.44	0.34	-0.36	-0.36	0.01
分布宽度指数 PDI	0.58	0.59	-0.15	0.62	0.74	0.54	-0.16	0.63	0.83	0.88

数均分子量与老化后延度、标准黏度存在强的正负相关性。重均分子量与老化后延度存在强的负相关性。分布宽度指数与针入度指数 PI、老化后软化点、标准黏度和 135℃ 旋转黏度存在强或极强的正负相关性, 沥青分子量特征与基质沥青组分的相关性如表 11 所示。

表 11 沥青分子量特征与基质沥青组分的相关性

Tab. 11 Correlation between molecular weight characteristics of asphalt and components of base asphalt

相关参数	亚砷基官能指数	沥青质 $A_t$	胶质 $R$	芳香分 $A$	饱和分 $S$
峰顶分子量	0.80	-0.15	0.05	0.61	-0.59
数均分子量	0.73	-0.33	0.00	0.82	-0.42
重均分子量	0.76	-0.12	-0.09	0.82	-0.58
粘均分子量	0.73	0.04	-0.18	0.81	-0.64
Z 均分子量	0.39	-0.24	0.05	0.53	-0.31
分布宽度指数 PDI	0.00	0.77	-0.36	-0.05	-0.52

峰顶分子量、数均分子量、重均分子量以及粘均分子量与亚砷基官能指数、芳香分  $A$ 、芳香分-饱和分比  $I_{A/S}$ 、溶胶指数  $I_C$ 、组分平衡指数 CBI, 存在强或极强的正相关性。粘均分子量与饱和分  $S$  存在强的负相关性。分布宽度指数 PDI 与沥青质  $A_t$  存在强的正相关性。

## 2.6 基质沥青“基因”特征指标

由上述分析可见, 限于本文的研究样品数量相对较少, 因此在具备潜在“基因”特征的指标中, 根据与其他指标存在  $|r| \geq 0.6$  为强相关性的指标作为“基因”特征指标。具体的可以认为, 软化点、5℃ 延度、25℃ 针入度, 以及针入度指数具备“基因”特征; 沥青质、胶质、饱和分、沥青质  $A_t$ /饱和分  $S$ , 以及沥青质  $A_t$ /芳香分  $A$ 、胶质  $R$ /芳香分、胶质-沥青质比  $I_{R/A}$  和组分平衡指数 CBI 具备“基因”特征。元素特性中,  $W_C$ 、 $W_H$ 、 $W_S$ 、 $W_N$  以及  $W_O$ 、 $(N_N + N_O + N_S)/N_C$  均具备“基因”特征, 这也符合材料学一般常识。沥青分子量特征中, 数均分子量、重均分子量和分布宽度指数可作为“基因”特征指标。

## 3 “基因”特征与沥青性能的构效关系分析

在试验研究和工程应用中, 本文希望通过简单性能指标(如三大指标: 针入度、软化点和延度), 以及常规组成(如四组分)来判定沥青的性能。下面我们结合相关性的分析, 就存在显著相关性的指标进行分析, 并建立构效关系<sup>[19]</sup>。

### 3.1 基于基质沥青三大指标推测其他指标

根据上文 2.2 的分析, 结合相关性显著性水平, 以及基质沥青及老化性能的相关性分析, 可通过测试基质沥青的软化点分析获得针入度指数 PI、老化后软化点、老化后延度和 135℃ 旋转黏度; 可根据 5℃ 延度推测分析 60℃ 动力黏度; 根据 25℃ 针入度可分析获得老化后 25℃ 入度; 而通过 60℃ 动力黏度可分析获得标准黏度。

$T_{R\&B}$  表示软化点,  $D$  表示延度,  $P$  表示针入度, TFOT 代表薄膜烘箱试验(thin-film oven test),  $C$  代表标准黏度(conditioned viscosity),  $\eta_{60}$  表示 60℃ 动力黏度,  $\eta_{135}$  表示 135℃ 旋转黏度(rotational viscosity at 135℃)。软化点-针入度指数 PI 关系如图 9 所示。

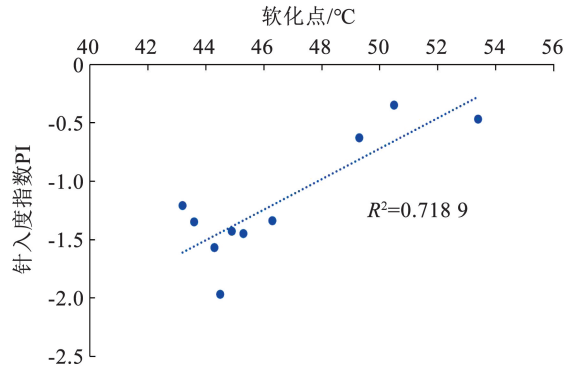


图 9 软化点-针入度指数 PI 关系

Fig. 9 Softening point-penetration index (PI) relationship

其关系公式如下:

$$PI = 0.1307T_{R\&B} - 7.2588 \quad (12)$$

针入度指数 PI 与老化后延度分析如图 10 所示。

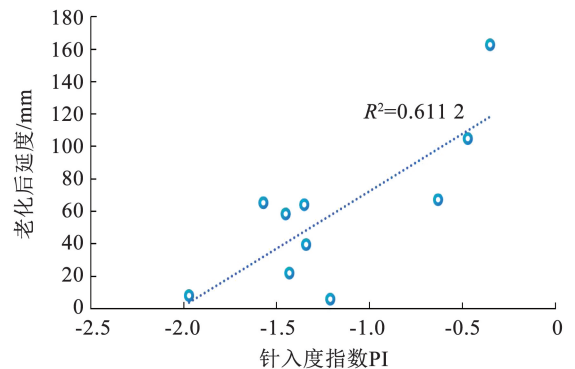


图 10 针入度指数 PI 与老化后延度分析

Fig. 10 Analysis of penetration index (PI) and ductility after aging

### 3.2 基于基质沥青组分推测其他指标

沥青质  $A_t$  与 135℃ 旋转黏度相关性达到 0.90, 二者关系分析如图 11 所示。

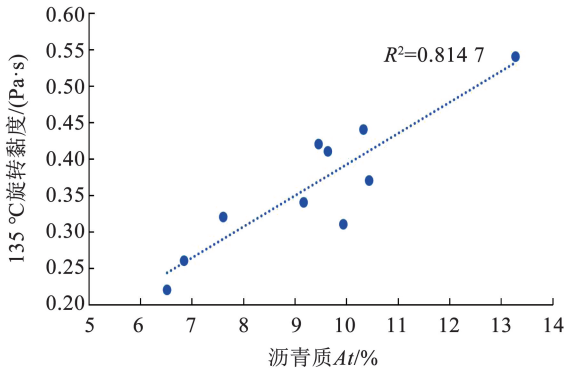


图 11 沥青质  $At$  与  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  旋转黏度关系分析

Fig. 11 Analysis of relationship between asphaltene ( $At$ ) and rotational viscosity at  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$

其关系公式为

$$\eta_{135} = 0.0427At + 0.0349 \quad (13)$$

沥青质  $At$ /芳香分  $A$  与  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  动力黏度的相关性达到  $0.87$ , 二者关系分析如图 12 所示。

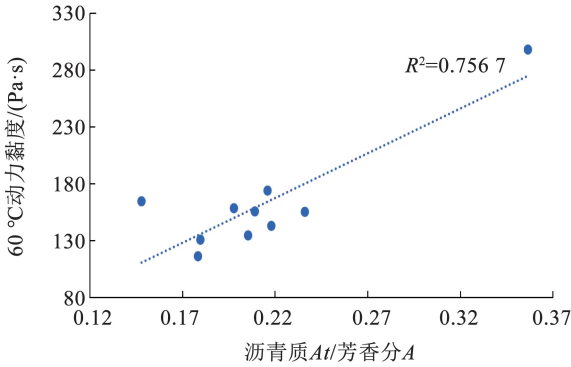


图 12 沥青质  $At$ /芳香分  $A$  与  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  动力黏度关系分析

Fig. 12 Analysis of the relationship between asphaltene-to-aromatics ratio ( $At/A$ ) and dynamic viscosity at  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

其关系公式为

$$\eta_{60} = 787.23 \frac{At}{A} - 5.9033 \quad (14)$$

沥青质  $At$ /饱和分  $S$  与老化后软化点相关系数为  $0.81$ , 与  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  旋转黏度相关性达到  $0.92$ , 可见采用该指标分析  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  旋转黏度较采用沥青质  $At$  更优, 具体分析略。图 13 为沥青质  $At$ /饱和分  $S$  与老化后软化点关系。

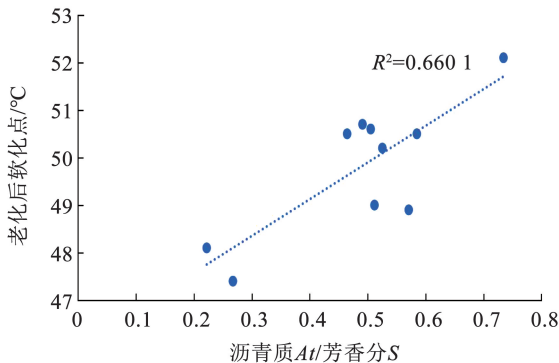


图 13 沥青质  $At$ /饱和分  $S$  与老化后软化点关系

Fig. 13 Relationship between asphaltene-to-saturates ratio ( $At/S$ ) and softening point after aging

### 3.3 基于基质沥青元素特征推测其他指标

$W_S$  与老化后软化点相关性达到  $0.82$ , 其二者关系如图 14 所示。 $W_N$  与胶质  $R$  相关性显著达到  $0.95$ , 其二者关系如图 15 所示。

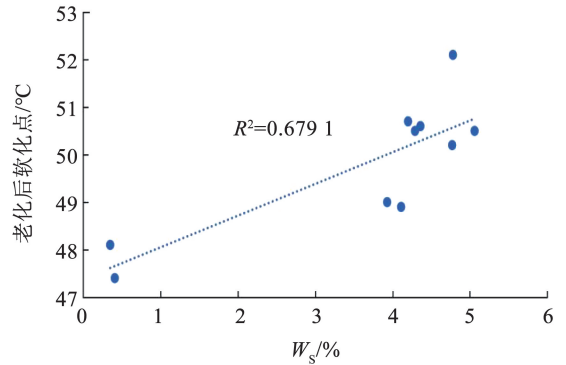


图 14  $W_S$  与老化后软化点相关性

Fig. 14 Correlation between  $W_S$  and softening point after aging

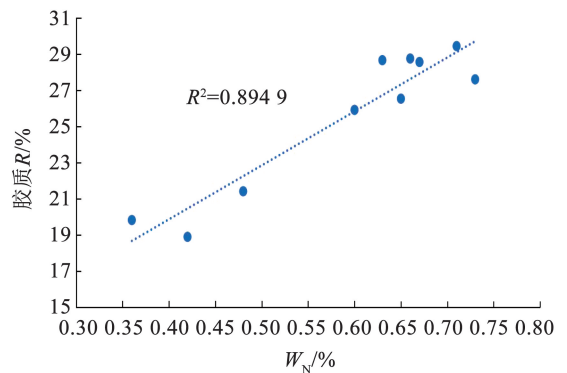


图 15  $W_N$  与胶质  $R$  关系分析

Fig. 15 Analysis of the relationship between  $W_N$  and resin content ( $R$ )

其关系公式为

$$R = 19.835W_N + 7.9146 \quad (15)$$

$W_S$  与饱和分  $S$  存在极强的负相关性, 相关系数达到  $0.95$ , 关系如图 16 所示。

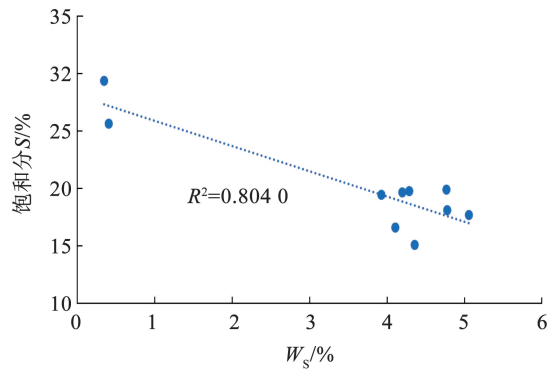


图 16  $W_S$  与饱和分  $S$  关系分析

Fig. 16 Analysis of the relationship between  $W_S$  and saturates content ( $S$ )

其关系公式如下:

$$S = -2.1967W_s + 28.063 \quad (16)$$

### 3.4 基于基质沥青分子量特征分析其他指标

分布宽度指数 PDI 与 60 °C 动力黏度、135 °C 旋转黏度存在极强的正相关性,分别达到 0.83 和 0.88,可据此推测二者指标。其关系如图 17、18 所示。

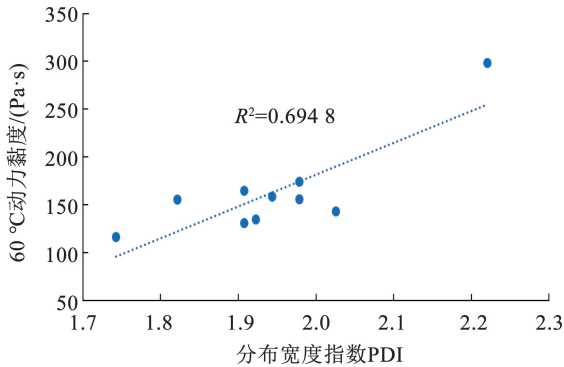


图 17 分布宽度指数 PDI 与 60 °C 动力黏度二者关系

Fig. 17 Relationship between polydispersity index (PDI) and dynamic viscosity at 60 °C

其公式关系为

$$\eta_{60} = 332.42PDI - 483.67 \quad (17)$$

图 18 为分布宽度指数 PDI-135 °C 旋转黏度关系分析图。

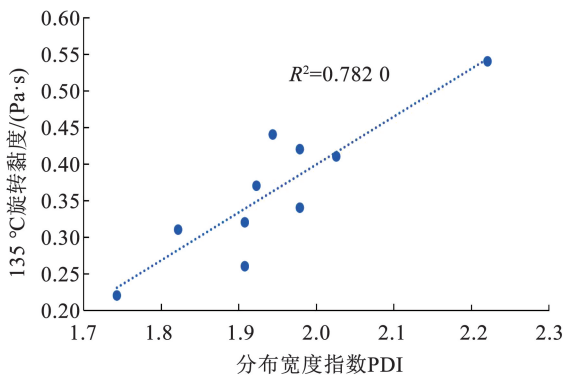


图 18 分布宽度指数 PDI-135 °C 旋转黏度二者关系

Fig. 18 Relationship between polydispersity index (PDI) and rotational viscosity at 135 °C

其关系公式为

$$\eta_{135} = 0.6546PDI - 0.9103 \quad (18)$$

可见,从上面的分析可知,“基因”特征指标与性能或相关指标间的线性关系显著,多数指标间回归系数大于 0.75,一定程度上,可基于构建的构效关系模型,通过“基因”特征指标预测相应的性能等指标。

## 4 结论

1) 关键化学组分比例是调控沥青性能的核心因素。胶质/沥青质比 ( $I_{RA}$ ) 与 135 °C 旋转黏度显著相关,控制高温流变行为;胶质/芳香分比 ( $I_{RA}$ ) 与老化后软化点呈负相关,影响抗老化性能。

2) 分子量分布特征决定沥青性能演变。重均分子量与老化后延度负相关,分子量分布宽度指数与温度敏感性、黏度指标显著相关,分布越宽则温度敏感性越高、延展性越差。

3) 多基因参数协同作用显著,通过构建定量构效关系方程,实现了基于化学与分子特征的关键路用性能有效预测。

4) 建立了从“基因”视角预测沥青性能的方法体系,为材料快速分类、精准筛选和性能定制提供了理论基础和实践路径。

## 参考文献

- [1] 董文豪. 温拌改性沥青性能及碳排放评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2021  
DONG Wenhao. Study on performance and carbon emission evaluation of warm mix modified asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2021.001190
- [2] 冯德成, 易军艳, 曹继伟, 等. 沥青路面固废资源化利用[J]. 中国公路, 2023(22): 68  
FENG Decheng, YI Junyan, CAO Jiwei, et al. Resource utilization of solid waste in asphalt pavement[J]. China Highway, 2023(22): 68. DOI:10.13468/j.cnki.chw.2023.22.028
- [3] HUANG Gang, YANG Tianhong, HE Zhaoyi, et al. Polyurethane as a modifier for road asphalt: a literature review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129058. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129058
- [4] ITOUA I P, SUN D. Evaluation of waste toner asphalt containing crude palm oil from Congo: rheological properties, compatibility, self-healing and aging characteristic [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03082. DOI: 10.1016/J.CSCM.2024.E03082
- [5] 谭忆秋, 李冠男, 单丽岩, 等. 沥青微观结构组成研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 1  
TAN Yiqiu, LI Guannan, SHAN Liyan, et al. Research progress of bitumen microstructures and components[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 1. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.06.001
- [6] 刘志扬, 董泽蛟, 周涛, 等. 基于材料信息学的沥青混合料性能提升综述及展望[J]. 中国公路学报, 2024, 37(4): 98  
LIU Zhiyang, DONG Zejiao, ZHOU Tao, et al. Review and prospects of performance enhancement of asphalt mixtures based on material informatics[J]. China Highway Journal, 2024, 37(4):

98. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.04.009
- [7] WEI Hui, BAI Xianping, QIAN Guoping, et al. Aging mechanism and properties of SBS modified bitumen under complex environmental conditions[J]. *Materials*, 12(7): 1189. <https://doi.org/10.3390/ma12071189>
- [8] 汪海年, 丁鹤洋, 冯珀楠, 等. 沥青混合料分子模拟技术综述[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(2): 1  
WANG Hainian, DING Heyang, FENG Ponan, et al. Advances on molecular simulation technique in asphalt mixture[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(2): 1. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.02.001
- [9] 马晓燕. 沥青-填料交互作用效应与沥青胶浆性能预估研究[D]. 西安: 长安大学, 2019  
MA Xiaoyan. Study on asphalt-filler interaction effect and performance prediction of asphalt mastic[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2019.000028
- [10] 朱洪洲, 谭祺琦, 杨孝思, 等. 纤维改性沥青混合料性能的研究现状与展望[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(7): 2573  
ZHU Hongzhou, TAN Qiqi, YANG Xiaosi, et al. Research status and prospect of fiber modified asphalt mixture performance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(7): 2573
- [11] KARKI B, PROVA S, ISIED M, et al. Neural network approach for fatigue crack prediction in asphalt pavements using falling weight deflectometer data[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(7): 3799. DOI:10.3390/APP15073799
- [12] 刘廷国. 常温拌和式半柔性路面材料及设备关键技术研究报告[R]. 新乡: 河南省高远公路养护技术有限公司, 2018  
LIU Tingguo. Research on key technologies of normal temperature mixing semi-flexible pavement materials and equipment[R]. Xinxiang: Henan Province Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co., Ltd., 2018
- [13] ZHANG Yuting, YI Meihui, MEI Wenyong, et al. A multi-objective ensemble learning framework for designing low-carbon ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Applied Soft Computing*, 2025, 169: 112644. DOI:10.1016/J.ASOC.2024.112644
- [14] LEMBKE S, PARKER K, NARMOUR E, et al. Acoustical correlates of perceptual blend in timbre dyads and triads[J]. *Musicae Scientiae*, 2019, 23(2): 250. DOI: 10.1177/1029864917731806
- [15] 纪伦, 邬金麒, 李红专, 等. 矿粉微观特征及其与沥青胶浆流变性能的灰度分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(11): 1  
JI Lun, WU Jinqi, LI Hongzhan, et al. Gray scale analysis of microscopic characteristics of mineral powder and rheological properties of asphalt mortar[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(11): 1
- [16] 张卫国, 贾珊, 魏永锋. 沥青四组分构成与疲劳特性的相关性研究[J]. *中国建材科技*, 2024, 33(1): 49  
ZHANG Weiguo, JIA Shan, WEI Yongfeng. Correlation between asphalt four-component composition and fatigue characteristics[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2024, 33(1): 49
- [17] 胡娟. 元素分析仪测定煤中碳氢含量的研究[J]. *价值工程*, 2025, 44(26): 12  
HU Juan. Determination of carbon and hydrogen content in coal using elemental analyzer[J]. *Value Engineering*, 2025, 44(26): 12
- [18] 周纯秀, 王璐, 张中丽, 等. 超硬质沥青改性结合料流变性能分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(9): 144  
ZHOU Chunxiu, WANG Lu, ZHANG Zhongli, et al. Rheological properties analysis of ultra-hard asphalt modified binder[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(9): 144
- [19] 郝晟, 纪伦, 邬金麒, 等. 基于筛余特征参数的沥青混合料路用性能预测方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(11): 7  
HAO Sheng, JI Lun, WU Jinqi, et al. Prediction method for pavement performance of asphalt mixture based on sieve residue characteristic parameters[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(11): 7