

# 镜质体反射率抑制的多元影响因素及相关校正方法综述

王仕东, 郑静文\*

长江大学资源与环境学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年2月25日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年7月7日

## 摘要

镜质体反射率(Ro)是沉积有机质热成熟度评价中应用最广泛的指标之一, 在油气勘探中具有重要意义。然而, 近年来“镜质体反射率抑制”现象引起了广泛关注, 即测得的Ro值显著低于其他成熟度参数所指示的水平, 从而造成成熟度判断偏差, 进而影响烃源岩评价的准确性。本文系统梳理了镜质体反射率抑制的研究进展, 从有机质类型、镜质组组成、沉积环境、成岩演化过程及实验技术等方面, 分析了其主要影响因素。同时, 总结了常见的校正方法, 包括镜质体显微组构分析、拉曼光谱、热解参数对比及多指标联合校正等。研究表明, 反射率抑制是一种多因素耦合的复杂现象, 准确识别与合理修正需结合具体地质背景与综合技术手段。本文对镜质体反射率抑制的机理与校正路径进行了深入探讨, 为非常规油气系统中热演化程度的准确判定提供理论支撑。

## 关键词

镜质体反射率, 抑制效应, 有机质成熟度, 影响因素, 校正方法

# A Review of the Multiple Influencing Factors of Vitrinite Reflectance Suppression and the Related Correction Methods

Shidong Wang, Jingwen Zheng\*

School of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan Hubei

Received: Feb. 25<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 12<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 7<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 王仕东, 郑静文. 镜质体反射率抑制的多元影响因素及相关校正方法综述[J]. 矿山工程, 2025, 13(4): 637-644. DOI: 10.12677/me.2025.134071

## Abstract

Vitrinite reflectance (Ro) is a widely applied thermal maturity indicator in sedimentary organic matter studies, serving as a key parameter in hydrocarbon exploration. However, in recent years, the phenomenon of “vitrinite reflectance suppression” has attracted widespread attention. The measured Ro values are significantly lower than the levels indicated by other maturity parameters, which leads to deviations in maturity assessment and consequently affects the accuracy of source rock evaluation. This paper systematically reviews current research on the causes of Ro suppression, focusing on the effects of organic matter type, maceral composition, sedimentary setting, diagenetic processes, and laboratory procedures. Furthermore, it discusses correction methods such as textural analysis of vitrinite, Raman spectroscopy, comparative pyrolysis techniques, and integrated multi-parameter methods. The findings suggest that suppression is controlled by multiple interrelated geological and experimental factors, and accurate identification and rational correction require the integration of specific geological background and comprehensive technical means. This paper delves into the mechanism of vitrinite reflectance suppression and the pathways for its correction, providing a theoretical underpinning for the accurate determination of thermal maturity in unconventional oil and gas systems.

## Keywords

Vitrinite Reflectance, Suppression Effect, Organic Matter Maturity, Influencing Factors, Correction Methods

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 研究背景

镜质体反射率(Vitrinite Reflectance, Ro)的概念最早由德国学者(Hoffmann 和 Jenkner 1932)提出,是衡量沉积有机质热演化程度最常用、最成熟的指标之一,广泛应用于油气地质勘探、煤岩学和有机地球化学等领域。在油气资源评价中,Ro 值不仅是划分生烃阶段(未成熟-成熟-过成熟)的基础参数,也是建立热演化史、重建埋藏史和开展油气系统分析的重要依据。

然而,随着非常规油气勘探工作的深入,尤其是在富有机质页岩与高演化程度沉积岩系中,Ro 值偏低甚至明显失真的现象日益普遍,这种现象被称为镜质体反射率抑制(Ro Suppression)。镜质体反射率抑制现象早在 20 世纪 80 年代便引起了国外学者的关注。Price 和 Barker (1985)最早在北美泥岩地层中发现镜质体反射率明显低于预期的现象,提出“Ro 抑制”这一概念,并指出其可能与有机质类型和矿物组成有关。随后,Rimmer (1994)、Lewan (1998)等学者进一步探讨了富氢的 II 型或混合型干酪根在热演化早期形成较多胶质与沥青组分,这些低反射性组分包覆镜质体颗粒,导致 Ro 测值被低估。

21 世纪以来,镜质体反射率(Ro)抑制现象在多个非常规油气盆地中屡有报道,已成为影响有机质成熟度判定精度的关键因素之一。国内研究者围绕 Ro 抑制的成因及其校正方法开展了系统性探讨,主要聚焦于沉积环境、有机质类型、烃源岩质量及热演化过程等方面的影响。研究指出,强还原环境[1]-[4]、高藻类有机质输入(如 Toolebuc 页岩)及富氢显微组分的广泛分布[5]是导致 Ro 值偏低的主要原因。其中,I 型和 II 型干酪根因氢指数(HI)较高,Ro 抑制效应更为显著,典型如渤海湾盆地东营凹陷。

针对上述问题, 国内逐步建立了一系列  $R_o$  校正技术路径。包括荧光光谱类方法(如 FMM 法、反射率-荧光交会法)在高成熟阶段烃源岩识别中的应用[6]-[9]; 化学抽提法通过去除富氢可溶组分提升  $R_o$  测值的代表性; 以及氢指数- $R_o$  图版法与多参数校正模型在兼顾成本与效率方面的综合优势。这些方法为提升  $R_o$  测值的准确性提供了多技术支持。在国际上,  $R_o$  抑制问题同样引发广泛关注。Hackley 与 Cardott (2016)综合总结了其显微特征与判别标准, 强调需结合热解参数、有机质显微组分组成及多种热演化指标进行联合分析。实证研究表明, 该现象常发育于有机质丰度高、胶质成分丰富且黏土矿物含量较高的地层中, 且包裹体效应及镜质体边界模糊等显微特征常与之相关。近年来, 国外学者逐步引入拉曼光谱、红外光谱及固体核磁共振等高分辨率技术手段, 尝试从分子结构层面刻画镜质体的微观演化特征, 为抑制现象的识别与校正开辟了新路径。相关研究成果广泛见于 Barnett、Marcellus 等北美页岩, 以及四川、鄂尔多斯、塔里木等国内主要盆地。

综上所述, 镜质体反射率抑制现象显著制约了有机质成熟度的精确判定, 进而影响油气资源潜力的科学评价与部署策略的合理制定。未来亟需从热演化机理、显微组分演变与多技术集成应用等方面进一步深化研究, 以提升非常规油气评价工作的准确性与可靠性。

## 1.2. 研究目的及意义

镜质体反射率作为评价有机质热演化程度的经典指标, 广泛应用于常规及非常规油气资源勘探。然而, 在实际测量与应用过程中, 镜质体反射率经常出现偏低的异常现象, 即“反射率抑制”, 严重影响热演化程度的准确判断, 进而影响烃源岩评价及油气资源潜力的分析。本研究旨在通过文献调研和对比分析, 系统梳理镜质体反射率抑制现象的研究进展, 全面总结其可能的影响因素, 包括有机质类型、沉积环境、显微结构、成岩作用及实验测定条件等。通过本综述, 旨在为相关研究提供系统的理论参考与研究框架, 推动镜质体反射率抑制机制及校正方法的深入研究, 为提高有机质热演化评价的准确性和可靠性奠定基础。

## 2. 影响镜质体反射率的因素分析

镜质体反射率作为表征有机质热演化程度的重要参数, 其测定结果常常受到多种因素的共同影响。特别是在非常规油气地层中, 镜质体反射率偏低或失真的现象日益普遍。通过文献归纳与研究对比, 镜质体反射率的主要影响因素可归纳为有机质类型与显微组分、沉积环境作用、有机质丰度与成熟度水平、测定方法与样品处理与镜质体识别等多个方面。

### 2.1. 有机质类型与显微组分

不同类型的干酪根及其衍生物在热演化过程中表现出不同的演化路径和显微结构。尤其是富氢的 II 型、I 型干酪根在成熟早期易生成胶质、沥青质等低反射性组分, 这些组分包覆或充填于镜质体周围, 易造成光学反射率的低估[10]-[12]。镜质体与壳质体、惰质组等显微组分共存时, 由于各组分反射性差异大, 容易干扰  $R_o$  的识别与测量, 导致偏低或不稳定的测值[13]-[20]。例如, 做重要的富氢镜质体识别在激发光下发弱荧光, 紫外光下呈暗褐色荧光, 蓝光激发下呈褐-深黄褐色, 一般含量较少, 常常存在于湖相泥岩和海陆过渡相源岩中。富氢镜质体的反射率通常显著低于共生的正常镜质体, 其主要原因在于富氢组分对光的反射能力较弱。在低煤化作用阶段, 此类镜质体常伴有较弱的棕褐色荧光, 具备一定的可识别性。因此, 在解释反射率数据时, 应结合有机显微组分特征, 避免因组分混杂而误判热演化程度。

### 2.2. 沉积环境与成岩作用

沉积环境对镜质体反射率有着重要的抑制作用。厌氧还原的沉积环境会产生异常富氢的镜质组, 导

致反射率的抑制镜质体反射率不仅反映热演化程度, 还受控于沉积环境与成岩过程等多种外部因素。不同的沉积—成岩条件将直接影响有机质类型、保存状态及其光学表现, 进而造成  $R_o$  值的偏移或抑制。还原性强的沉积环境有利于富氢型干酪根的富集, 如湖相深水还原环境中, 常伴随生成大量胶质、沥青质等低反射性组分, 易导致镜质体反射率出现抑制现象[21][22]。氧化性较强的环境则更倾向于形成结构相对稳定、芳香性高、反射率正常或偏高的镜质体颗粒因此, 沉积环境是决定镜质体反射率表现差异的基础性因素之一。镜质体与干酪根/沥青质的再结合过程也可能引起  $R_o$  值的“再平衡”效应, 使实际成熟度被低估[23][24]。因此, 在分析  $R_o$  时应结合沉积—成岩环境, 避免单纯从热演化角度判断成熟度水平。

### 2.3. 测定方法与样品处理

镜质体反射率测定的准确性在很大程度上依赖于显微镜观察条件、抛光质量、样品制片工艺、反射率标定方法等技术细节。例如样品中若存在大量荧光有机质, 可能干扰反射测量; 而样品抛光不均匀或镜质体粒径过小也会影响  $R_o$  的代表性。此外, 测量人员的主观判断在镜质体粒子的选取与判别中亦可能带来误差。

### 2.4. 主观因素的影响

镜质体反射率的测定结果在一定程度上受到人为因素的影响, 主要表现在镜质组识别的主观判断以及测试条件控制的差异。测试过程中的环境参数(如温度、湿度)、仪器性能(如光源稳定性、校准情况)、辅助材料(如浸油种类、标准样片精度)以及光片制备质量等, 均可能对测值产生干扰。其中, 测试温湿度对镜质体的光学响应具有一定影响。研究表明, 温度波动可能引起镜质体界面光程变化, 从而导致反射率偏离实际值, 当前经验证将测试温度控制在约  $26^{\circ}\text{C}$  是为较为理想的状态。另外, 浸油折射率影响光的入射与反射特性, 不同浸油可能产生轻微系统误差。标准样的标定精度与光片抛光质量(如划痕、气泡等缺陷)直接决定测量结果可靠性, 未达标样品会导致  $R_o$  值异常偏移。

因此, 在进行镜质体反射率测试时, 需严格按照标准规范进行操作, 确保测试环境与流程具备良好的可控性和稳定性, 从而提升结果的科学性与可靠性。

## 3. 镜质体反射率抑制的校正方法

### 3.1. 化学组成法的特点

镜质组化学组成法通过分析镜质体中碳、氢、氧等元素含量, 识别其反射率受抑制的成因, 从而实现热成熟度的校正。研究表明, 氢富或氧富的共生组分(如壳质体、腐泥组分)易与镜质体共存, 影响  $R_o$  测值的准确性。该方法常采用元素分析(EA)、X 射线光电子能谱(XPS)及红外光谱(FTIR)等技术, 结合显微组分分析, 评估镜质体的真实化学结构和演化特征。相较于传统方法, 该法具有物质基础明确、可揭示抑制机制等优势, 同时也可与显微法与模拟法提供重要参数支持。但其应用受限于实验条件且需要专业的设备和技术人员, 样品前处理复杂, 分析成本较高, 导致结果的准确性和可靠性存在一定的风险。此外, 镜质组化学组成法只能提供镜质体反射率受抑制的定性分析, 难以给出具体的校正值。

### 3.2. 显微组分定量法

显微组分定量法是一种基于有机显微组分识别与定量分析的镜质体反射率校正方法。该方法通过显微镜下对有机质中各类显微组分(如镜质体、壳质体、腐泥组分、沥青质等)进行识别与计数, 结合其光学性质和热演化行为, 对镜质体反射率异常偏低的原因进行判别, 并据此剔除干扰组分或通过加权平均法修正  $R_o$  值。其核心思想在于恢复镜质体反映母质热演化程度的真实指标, 排除由非镜质体组分干扰引起

的抑制效应。该方法的优点在于理论基础清晰, 能够直观识别反射率抑制机制, 适用于组分复杂的页岩和煤系烃源岩; 但其不足在于操作过程繁琐、主观性较强, 对显微观察经验要求较高, 且在镜质体热演化程度较高、结构受破坏时应用受限。代表性研究包括 Taylor 等人(1998)提出的有机组分分类与镜质体识别方法, 以及 Hackley 和 Cardott (2016)在页岩体系中对抑制效应的系统分析。

### 3.3. 热演化模拟法

热演化模拟法是基于地层热史与有机质演化模型, 重建样品所处的热演化过程, 并据此推算出理论镜质体反射率( $R_o$ )值, 与实测值进行比对, 从而识别并校正镜质体反射率的抑制程度。该方法通常依托生烃模拟软件[25]。热演化模拟法的优点在于具有良好的物理基础和可重复性, 能够实现  $R_o$  的动态重建, 尤其在缺乏高质量显微观测数据或样品保存条件差的区域表现出较强适用性; 同时, 该方法也可联合多种成熟度指标[26]进行综合约束, 提升校正结果的可靠性。其局限性主要包括: 模型构建对基础地质参数依赖性强, 模拟结果受输入数据质量影响显著; 且对于早期演化阶段或构造复杂区, 模拟的不确定性较大。此外, 模拟结果为“理论  $R_o$ ”, 需结合实测数据进行合理解读与修正。

### 3.4. 多方法结合的优势

多种方法联合用于镜质体反射率抑制的校正具有明显优势。一方面, 不同方法在机理和适用性上各有侧重, 联合应用可实现信息互补, 提高校正结果的准确性与可靠性。例如, 镜质组化学组成法可揭示反射率受抑制的原因, 而多显微组分荧光变化法(FAMM)可通过荧光响应判断成熟度, 两者结合有助于全面评估镜质体的热演化特征。另一方面, 联合校正方法具有更强的适应性, 可根据不同地质背景与有机质类型灵活调整技术路线, 克服单一方法适用范围受限的问题。同时, 通过先快后精的策略, 将快速筛查方法与高精度分析手段结合, 有助于提高整体校正效率并降低成本。因此, 多方法协同校正是提高镜质体反射率判释准确性的重要手段, 已在有机质成熟度评价和油气资源研究中展现出广泛应用前景。所以综合来看, 各类校正方法在适用条件、精度控制和数据要求方面各具优势。那么在实际应用中, 建议根据研究区特点选择合适方法见表 1。

**Table 1.** Recommendations for selecting vitrinite reflectance correction methods under different conditions  
**表 1.** 不同情形下镜质体反射率校正方法选择建议

应用场景	推荐方法	说明
样品中有丰富共生组分(壳质体、腐泥组)	显微组分定量法 + 化学组 成法	可直观识别干扰组分, 同时分析其对 $R_o$ 的抑制影响
镜质体结构保存较差/显微观察困难	热演化模拟法	利用热史数据重建 $R_o$ , 减少对显微数据的依赖
样品热演化阶段跨度大	多方法联合	综合不同方法补偿各自局限, 提高判释准确性
实验条件受限缺乏高端设备	显微组分定量法	技术门槛较低, 依靠常规显微镜和经验判断即可
需要快速筛查大批量样品	显微法初选 + 模拟法精修	先利用显微法识别异常样品, 再用模拟法校正典型样本
研究目标为反射率抑制机制解析	化学组成法 + 显微组 分法	结合物质组成与显微特征分析抑制成因

总之, 多种方法结合校正镜质体反射率抑制是一种有效的方法, 可以提高校正结果的准确性、可靠性和效率, 为油气勘探等领域提供更准确的有机质成熟度评估。

## 4. 案例分析

### 案例一：鄂尔多斯盆地伊陕斜坡长 7 段页岩样品

鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中部长 7 段页岩为一套典型的陆相—湖相过渡沉积，镜质体含量较高，但同时共存大量腐泥组分与壳质体，显微组分类型复杂[27]。实测镜质体反射率(Ro)整体偏低，最低值仅为 0.53%，明显低于热演化历史所预测的成熟度水平，表明存在显著的反射率抑制效应。

为识别并校正该现象，首先应用显微组分定量法对镜质体及共生有机质类型进行识别与统计，剔除干扰组分后，通过加权平均法将 Ro 修正至 0.71%。随后，借助 X 射线光电子能谱(XPS)与傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析镜质体化学组成[28]，结果表明样品中富氢、富氧组分含量较高，是导致 Ro 偏低的重要因素[29]。在此基础上，采用 PetroMod 热演化模拟软件构建区域热史模型[30]，得到理论 Ro 为 0.75%，与修正后的测值高度吻合，验证了校正结果的合理性。最终，将修正后的 Ro 与 T\_max 和 PI 等其他成熟度指标进行比对，表现出良好一致性，进一步印证了多方法联合校正在该区镜质体反射率抑制识别与校正中的有效性与适用性。

### 案例二：四川盆地中部泥页岩镜质体反射率抑制识别与校正

四川盆地中部陆相泥页岩具有热演化程度高、有机质类型多样、保存条件复杂等特点[31]。镜质体常与不规则变形的沥青质或变质组分共存，反射率判释难度大。实测镜质体 Ro 值约为 0.46%，远低于区域热史预测的成熟度，表明其存在显著的反射率抑制现象。在样品显微组分不清、化学测试受限的情况下，优先采用热演化模拟法进行校正。基于钻井测温数据、地层沉积速率与区域构造背景参数，构建热演化模型，BasinMod 模拟 Ro 结果为 0.82%。为进一步验证模拟精度，辅以多显微组分荧光变化法(FAMM)对镜质体的成熟度进行分析[32]-[35]，发现多数镜质体呈弱荧光反应，与模拟 Ro 相吻合。结合 Tmax (441 °C) 和 PI (0.19) 等成熟度指标，最终将 Ro 修正至 0.80%，与模拟值保持一致。该案例表明，在镜质体结构模糊、显微组分识别受限的区域，热演化模拟法结合荧光响应分析可有效识别反射率抑制程度，提升成熟度判释的科学性和可信度，为高成熟区或构造复杂区的 Ro 校正提供了实践依据。

总结两个案例结果，以下是针对两个案例的对比表格(表 2)，以“研究区特征”“抑制表现”“所用方法”“校正过程”“最终效果”等维度进行对比展示，呈现出多方法校正不同地质背景下的适用性与优势以供后续研究参考。

**Table 2.** Comparative case studies of vitrinite reflectance suppression correction in different regions

**表 2.** 不同地区镜质体反射率抑制校正案例对比

对比项目	案例一	案例二
地质背景	陆相 - 湖相过渡带页岩，显微组分复杂	高演化陆相泥页岩，镜质体变形严重
反射率表现	Ro 最低 0.53%，显著低于热史推算值	Ro 约 0.46%，与区域成熟度不符
抑制原因分析	富氢、富氧组分(腐泥组分、壳质体)共存	镜质体变形 + 沥青质共生，显微难识别
校正方法	显微组分定量法 + 化学组成分析 + 热演化模拟	热演化模拟法 + 荧光变化法(FAMM)
校正后 Ro 结果	修正为 0.71%~0.75%，与 Tmax、PI 一致	修正为 0.80%，与模拟值及其他指标匹配
方法优势	多方法互补、识别精度高	适用于显微不清样品，依赖模拟 + 荧光校核

## 5. 结论与展望

镜质体反射率评估是受地质背景复杂性及有机质组分多样性的影响，其反射率常出现不同程度的抑

制现象, 进而干扰成熟度的准确判定。本文围绕镜质体反射率抑制的成因及主流校正路径展开综述, 重点分析了镜质组化学组合法、显微组分定量法、热演化模拟法以及多技术融合策略的原理、优势与适用条件。研究表明, 不同方法在技术侧重点、适用样品类型及校正精度方面各具特点, 科学选用或有机整合多种方法, 是提高镜质体反射率校正准确性的有效途径。

在校正方法方面, 继续探索创新的校正策略是未来研究的重点。基于综合数据分析的校正方法, 可以进一步扩大数据源的范围, 整合更多的地质参数和有机质成熟度指标。提高校正的准确性和可靠性。

总之, 未来的研究应致力于更深入地理解镜质体反射率抑制的机制, 开发更准确、高效的校正方法, 为油气勘探等领域提供更可靠的技术支持。通过多学科的交叉合作和技术创新, 推动镜质体反射率研究不断向前发展。

## 参考文献

- [1] 《地质科技情报》编辑部. 镜质组反射率抑制及校正研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2): 69-74.
- [2] 马安来, 张大江, 李贤庆, 等. 镜质组反射率抑制及校正研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2): 69-74.
- [3] 姚多喜. 镜质组反射率的抑制作用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, 18(4): 369-372.
- [4] 李贤庆, 钟宁宁, 马安来, 等. 镜质组反射率  $R_o$  抑制及其校正研究[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(4): 35-38.
- [5] 张磊, 等. 煤岩显微组分测定方法的研究现状及几点建议[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(3): 45-50.
- [6] 王运所, 等. 用热模拟图版校正法计算高成熟烃源岩油气资源量[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 189-195.
- [7] 孟江辉, 吕沛熙, 吴伟, 等. 基于笔石表皮体反射率和拉曼光谱评价海相页岩热成熟度的方法——以川南下古生界五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1515-1528.
- [8] 曹长群, 尚庆华, 方一亭. 探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用[J]. 古生物学报, 2000, 39(1): 151-156.
- [9] 汪啸风, Andreas Hoffknecht, 萧建新, 等. 笔石、几丁虫和虫牙反射率在热成熟度上的应用[J]. 地质学报, 1992, 66(3): 269-279.
- [10] Zhang, H., Zhao, W., Wang, H., Guo, H. and Peng, P. (2024) Study on the Suppression of Vitrinite Reflectance: A Thermal Simulation Experiment. *ACS Omega*, **9**, 41389-41395. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04220>
- [11] Lewan, M.D. (2023) Comment: Suppression of Vitrinite Reflectance by Bitumen Generated from Liptinite during Hydrous Pyrolysis of Artificial Source Rock by Peters *et al.* (2018). *Organic Geochemistry*, **181**, Article 104628. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2023.104628>
- [12] Sanders, M.M., Jubb, A.M., Hackley, P.C., *et al.* (2022) Molecular Mechanisms of Solid Bitumen and Vitrinite Reflectance Suppression Explored Using Hydrous Pyrolysis of Artificial Source Rock. *Organic Geochemistry*, **165**, Article 104371.
- [13] 孔伟思, 方石, 袁魏, 等. 镜质体反射率的研究现状[J]. 当代化工, 2015, 44(5): 1020-1028.
- [14] 王晔, 邱楠生, 马中良, 等. 固体沥青反射率与镜质体反射率的等效关系评价[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 563-575.
- [15] 仰云峰. 川东南志留系龙马溪组页岩沥青反射率和笔石反射率的应用[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 466-472.
- [16] 唐颖, 李乐忠, 苏展, 等. 页岩镜质体反射率抑制及其校正——以澳大利亚 Galilee 盆地 Toolebuc 页岩为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016, 31(1): 17-22+36.
- [17] 韩旭. 镜质组反射率异常的影响因素及其校正研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- [18] 姚多喜, 支霞臣. 镜质组反射率抑制作用演化热动力学模式分析[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2002, 21(3): 183-185.
- [19] 朱抱荃. 异常低的镜质体反射率(抑制作用)——生油岩研究的一个重要问题[J]. 石油勘探与开发, 1987(2): 40-45+33.
- [20] 刘越. 内蒙古锡林郭勒地区上古生界极低级变质矿物及镜质体反射率研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [21] 李志明, 秦建中, 徐旭辉, 等. 镜质体反射率抑制与烃源岩质量关系——以渤海湾盆地东营凹陷烃源岩为例[J].

- 石油实验地质, 2008, 30(3): 276-280.
- [22] 胡安文, 李慧勇, 江涛, 等. 超压和富氢背景下镜质组反射率计算模型——以渤海湾盆地渤中西次凹东三段烃源岩为例[J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 106-111+119.
- [23] 赵师庆, 王飞宇. 镜质组反射率的抑制效应及富氢镜质体的形成模式[J]. 淮南矿业学院学报, 1990, 10(3): 1-11.
- [24] 郭黔杰. 组分富氢性对反射率特征的影响及意义[J]. 地球科学进展, 1993, 8(3): 49-52.
- [25] Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A., *et al.* (1998) *Organic Petrology: A New Handbook Incorporating Some Revised Parts of Stach's Textbook of Coal Petrology*. Gebrüder Borntraeger.
- [26] Peters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M. (2005) *The Biomarker Guide: Volume 2, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History*. 2nd Edition, Cambridge University Press.
- [27] Stach, E., Mackowsky, M.T., Teichmüller, M., *et al.* (1982) *Stach's Textbook of Coal Petrology*. Gebrüder Borntraeger.
- [28] Tissot, B.P. and Welte, D.H. (1984) *Petroleum Formation and Occurrence*. 2nd Edition, Springer-Verlag.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>
- [29] Hower, J.C., Berti, D., Hochella, M.F. and Mardon, S.M. (2018) Rare Earth Minerals in a "No Tonstein" Section of the Dean (Fire Clay) Coal, Knox County, Kentucky. *International Journal of Coal Geology*, **193**, 73-86.  
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.05.001>
- [30] Hantschel, T. and Kauerauf, A.I. (2009) *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*. Springer.
- [31] Carr, A.D. (2000) Suppression and Retardation of Vitrinite Reflectance in the Jurassic Coals of the Yorkshire Basin. *Marine and Petroleum Geology*, **17**, 239-259.
- [32] Wilkins, R.W.T., Buckingham, C.P., Sherwood, N., *et al.* (1998) The Current Status of the FAMM (Fluorescence Alteration of Multiple Macerals) Technique for Determining Thermal Maturity in Sedimentary Organic Matter. *Organic Geochemistry*, **28**, 805-822.
- [33] 汪啸风, Andreas Hoffknecht, 萧建新, 等. 笔石、几丁虫和虫牙反射率在热成熟度上的应用[J]. 地质学报, 1992(3): 269-279+297-298.
- [34] Faiz, M., Sherwood, N. and Wilkins, R.W.T. (2021) Elemental Composition of Dispersed Vitrinite in Marine Jurassic Source Rocks of the Vulcan Sub-Basin, Australia: Implications for Vitrinite Reflectance Suppression. *Marine and Petroleum Geology*, **133**, Article 105278. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105278>
- [35] Peters, K.E., Hackley, P.C., Thomas, J.J., *et al.* () Suppression of Vitrinite Reflectance by Bitumen Generated from Liptinite during Hydrous Pyrolysis of Artificial Source Rock. *Organic Geochemistry*, **125**, 220-228.  
<https://doi.org/10.1016/J.ORGGEOCHEM.2018.09.010>