

温度 - 时间 - 煤变质程度的定量计算

张学梅¹, 李 东¹, 马青华¹, 郝静远^{1,2}

¹西安思源学院能源及化工大数据应用教学研究中心, 陕西 西安

²西安交通大学化工学院, 陕西 西安

Email: 476333285@qq.com

收稿日期: 2021年6月9日; 录用日期: 2021年7月9日; 发布日期: 2021年7月16日

摘 要

吴冲龙的煤变质热动力学方程是一个包含煤层绝对年龄、变质温度和镜质体反射率的数学方程。如果确定煤层绝对年龄和其镜质体反射率, 能够计算其理论最低变质温度; 如果确定煤层绝对年龄和变质温度, 能够计算其理论最大镜质体反射率。定义时温比值来比较延长或提高温度对提高煤变质程度的影响以及温度影响显著性。结果表明: 在同一个成煤期内, 随着镜质体反射率的增加, 温度影响显著性下降; 在相同的镜质体反射率, 随着成煤期的年龄, 温度影响显著性也下降。在白垩纪高煤级煤III的 $R_0 = 6.1\%$ 时, 普通数学方法计算出增加 1°C 温度的影响相当于延长五百九十万年时间的的影响。而高等数学方法计算结果是增加 1°C 温度的影响相当于延长三百六十七万年时间的的影响。

关键词

煤变质, 热动力学, 最低变质温度, 最大镜质体反射率, 时温比

Quantitative Calculation of Temperature-Time-Coal Metamorphism

Xuemei Zhang¹, Dong Li¹, Qinghua Ma¹, Jingyuan Hao^{1,2}

¹Energy & Chemical Engineering Research Center, Xian Siyuan University, Xi'an Shaanxi

²School of Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

Email: 476333285@qq.com

Received: Jun. 9th, 2021; accepted: Jul. 9th, 2021; published: Jul. 16th, 2021

Abstract

Wu Chonglong's thermal dynamics equation of coal metamorphism is a mathematical equation containing the absolute age of coal seams, the temperature of coal metamorphism, and the vitri-

nite reflectance. If the absolute age of the coal seam and its vitrinite reflectance are determined, the minimum theoretic metamorphism temperature can be calculated. If the absolute age and metamorphism temperature of the coal seam are determined, the maximum theoretic vitrinite reflectance can be calculated. The time-to-temperature ratio has been defined to compare the effect of prolonged time or increased temperature on increasing the degree of coal metamorphism and the significance of temperature effect. The results show that in the same coal-forming period, with the increase of the vitrinite reflectance, the temperature influence decreased significantly, and in the same vitrinite reflectance, with the younger coal-forming period, the temperature influence significance decreased. At the time of the Cretaceous High Coal Grade III $R_0 = 6.1\%$, the general mathematical method calculated that the effect of increasing the temperature by 1°C was equivalent to the effect of an extension of 5.9 million years. The result of the higher mathematical method is that the effect of increasing the temperature by 1°C is equivalent to the effect of extending the period of 3.67 million years.

Keywords

Coal Metamorphism, Thermodynamics, Minimum Metamorphism Temperature, Maximum Vitrinite Reflectance, Time-to-Temperature Ratio

Copyright © 2021 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

泥炭经过褐煤、亚烟煤、烟煤到无烟煤的发展，称为“煤化作用”。因为煤化作用实质上是煤的物理化学结构在温度、压力及时间等因素的作用下发生变化而导致煤的物理化学性质变化，所以也称为煤变质。概括性地说，煤化作用的进行程度主要受控于二个外在影响因素(温度和时间)，而这两个因素对煤化作用的影响和控制是综合性的。煤化程度(煤变质程度)是用镜质体反射率来表示的。众所周知定性与定量是有区别的，定性是用文字语言进行相关描述，而定量却是用数学语言进行描述。如吴冲龙和杨起根根据地热学与化学动力学的一般原理，参照 Bostick 曲线和我国中、新生界实测数据，采用双重回归的方法来建立温度 - 时间 - 反射率的三变量经验公式[1] [2] [3] [4] [5]就是定量煤变质热动力学。而“温度对煤化作用有十分强烈的影响”，“在达到一定地温要求后，有效受热时间决定煤化作用的程度”和“低温长时或短时高温都可以达到相同的变质程度”等就是比较常见定性分析煤变质热力学的文字描述。到目前为止，鲜见用吴冲龙温度 - 时间 - 反射率的热动力学方程来验证煤变质热力学的定性分析。为此，本文就想尝试回答以下三个问题：1) 对已知煤层绝对年龄并测得其镜质体反射率的煤，能否计算其最低变质温度？2) 对已知煤层绝对年龄和变质温度的煤，能否计算其镜质体反射率，即最大变质极限？3) 能否定量说明提高温度或延长时间这两个因素中的哪一个因素对提高煤变质程度的影响大？

2. 基本方程与数据

2.1. 吴冲龙温度 - 时间 - 反射率的热动力学方程

吴冲龙[1]在 1997 年提出以温度为因变量，时间和反射率为自变量的公式是：

$$\ln(T - 273) = \frac{646.32}{\ln t + 111.85} - \frac{0.492t^{0.093}}{R_0} \quad (1)$$

式中： t ：作者先用“岩层绝对年龄”后用“有效受热时间”两种说法，百万年； R_0 ：镜质体反射率，%， T ：古地温，K。岩层绝对年龄是由地质年代所确定，镜质体反射率是按国家标准所测定[6]，这两者是不会引起任何争议的数据。而古地温测定方法就有包体测温[7][8]、镜煤反射率测温[9][10]、镜煤顺磁共振测温[11]和牙形石色变分析地温梯度[12]等。不同古地温测定方法有其各自的前提条件、精确度和结果范围。因为深成变质煤的演化程度总是与一定的构造沉降、地热作用以及有效受热时间的配置相对应，所以有效受热(变质)时间也是根据煤层反射率等值线和构造沉降现存褶皱形态所确定。但是无论如何，有效受热(变质)时间是小于等于岩层绝对年龄。有效受热(变质)时间和古地温是两个有争议的数据。

以反射率为因变量，时间和温度为自变量的公式是：

$$R_0 = \frac{0.492t^{0.093}}{\frac{64632}{\ln t + 111.85} - \ln(T - 273)} \quad (2)$$

2.2. 成煤期

有不少关于中国有多少成煤期的研究报告。选择三个均能产生从低阶煤(长焰煤)到高阶煤(无烟煤)地质时期是：

古生代石炭纪晚期至二叠纪早期：距今约 3.20 亿年~2.78 亿年。时间跨度为四千二百万年，简称石炭纪。石炭纪是最早的煤炭资源形成期，我国的石炭纪煤基本上分布在黄河流域，煤种范围从长焰煤到无烟煤。

中生代侏罗纪早中期：距今约 2.05 亿年~1.59 亿年。时间跨度为四千六百万年，简称侏罗纪。侏罗纪煤主要集中在内蒙古，陕西，甘肃，宁夏四省区交界地带和新疆北部，煤种范围从褐煤、长焰煤到无烟煤。

中生代白垩纪早期：距今约 1.42 亿年~0.99 亿年。时间跨度为四千三百万年，简称白垩纪。白垩纪煤分布于内蒙古东部和东北三省。东北三省的白垩纪煤种范围从长焰煤到无烟煤。

2.3. 镜质体反射率

长焰煤的镜质体反射率 $R_0 \geq 0.50\%$ 。其它烟煤煤种(气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫煤、弱粘煤、和不粘煤)的镜质体反射率可以参考李文华“烟煤镜质组平均最大反射率与煤种之间的关系”一文[13]。而根据镜质体反射率进行 11 级的煤化程度分级(低煤级煤、7 级的中煤级煤和 3 级的高煤级煤)可以参照中国煤炭行业标准[14]。

3. 煤变质热动力学定量分析

3.1. 最低温度和最大镜质体反射率

选择距今约 3.20 亿年~2.78 亿年的石炭纪、距今约 2.05 亿年~1.59 亿年的侏罗纪和距今约 1.42 亿年~0.99 亿年的白垩纪作为煤变质定量分析讨论的三个成煤期。虽然这三个成煤期的岩层绝对年龄首尾相差二亿二千万年，但是有二个特别显著的共同点。首先，这三个成煤期都能够生成从长焰煤到无烟煤的煤种范围，即有相同的变质跨度。其次，这三个成煤期的时间跨度也基本相等，即从四千二百万年到四千六百万年。现根据相同的变质跨度和时间跨度特点，设计用于表现温度 - 镜质体反射率(时间)的二维图。将长焰煤到无烟煤的镜质体反射率定在 0.52%到 2.83%之间。将选择好的长焰煤到无烟煤的镜质体反射率分为 42 个等份以求得镜质体反射率的增量，即 $(2.83\% - 0.52\%) / 42 = 0.055\%$ 。0.055%为镜质体反射率的增量。将每个成煤期的最近年代定为起始时间，与镜质体反射率增量相对应的时间增量为二百万年。如

石炭纪的起始镜质体反射率为 $R_0 = 0.52\%$ ，石炭纪的起始时间为 2.78 亿年， $t = 278$ 。用方程(1)计算石炭纪的起始温度为 49.4°C 。石炭纪的第二点条件 $R_0 = 0.52 + 0.055 = 0.575\%$ ， $t = 278 + 1 = 279$ ，用方程(1)计算石炭纪的第二点温度为 57.6°C 。以此类推……三个成煤期就形成三条温度 - 镜质体反射率(时间)曲线，如图 1。石炭纪是最下方的线。侏罗纪是中间的线。白垩纪是最上方的线。图 1 的纵轴表示温度。横轴是反射率，同时也表示时间。

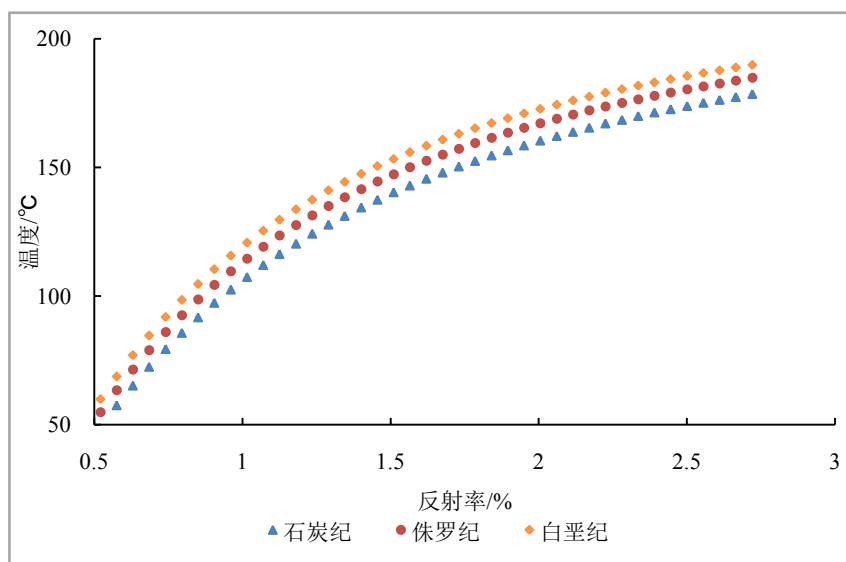


Figure 1. Temperature vitrinite reflectance (time) diagram of Carboniferous, Jurassic and Cretaceous

图 1. 石炭、侏罗、白垩纪的温度 - 镜质体反射率(时间)图

在图 1 选定的镜质体反射率做一条垂直线往上升，可以先后交到石炭、侏罗和白垩纪的曲线。那么各自交点所对应的温度则是：已知煤层绝对年龄并测得其镜质体反射率的煤，计算其最低变质温度。表 1 列出在石炭、侏罗、和白垩纪的岩层绝对年龄时，要达到六个镜质体反射率所需的最低温度。因为“岩层绝对年龄”是大于“有效受热时间”，并且岩层绝对年龄是无争议的值，所以对应岩层绝对年龄要达到特定的变质程度所需的温度就是最低温度。

Table 1. The minimum temperature required to reach different vitrinite reflectance at different rock absolute ages

表 1. 在不同岩层绝对年龄要达到不同的镜质体反射率所需的最低温度

反射率 /%	石炭纪		侏罗纪		白垩纪	
	年龄/百万年	最低温度/°C	年龄/百万年	最低温度/°C	年龄/百万年	最低温度/°C
0.52	280	49.4	161	54.9	101	60
0.96	288	102.6	169	109.7	109	115.8
1.4	296	134.4	177	141.6	117	147.6
1.84	304	154.7	185	161.6	125	167.2
2.28	312	168.6	193	175.2	133	180.5
2.72	320	178.6	201	184.9	141	189.8

在图 1 选定的温度做一条水平线往右延伸，可以先后交到白垩、侏罗、和石炭纪的曲线。那么各自

交点所对应的镜质体反射率则是：已知煤层绝对年龄和变质温度的煤，计算其最大变质极限，即镜质体反射率最大可能值。表 2 列出在不同岩层绝对年龄和温度时煤的最大镜质体反射率。

Table 2. Maximum vitrinite reflectance of coal at different absolute ages and temperatures of strata
表 2. 不同岩层绝对年龄和温度时煤的最大镜质体反射率

温度/°C	石炭纪		侏罗纪		白垩纪	
	年龄/百万年	反射率/%	年龄/百万年	反射率/%	年龄/百万年	反射率/%
50	290	0.525	170	0.491	110	0.466
50	310	0.529	190	0.498	130	0.476
75	290	0.705	170	0.657	110	0.62
75	310	0.711	190	0.667	130	0.634
100	290	0.932	170	0.863	110	0.81
100	310	0.941	190	0.877	130	0.83
125	290	1.242	170	1.139	110	1.062
125	310	1.255	190	1.16	130	1.091
150	290	1.704	170	1.543	110	1.424
150	310	1.726	190	1.575	130	1.469
175	290	2.489	170	2.203	110	2.001
175	310	2.528	190	2.259	130	2.076
200	290	4.14	170	3.502	110	3.083
200	310	4.232	190	3.623	130	3.235

如果选定了岩层绝对年龄和温度，但实测的镜质体反射率大于由方程(2)的计算值，则唯一的可能是温度定低了。而当实测的镜质体反射率小于由方程(2)的计算值，则温度定低了或有效受热时间短于岩层绝对年龄这两种可能都有。

3.2. 温度与时间对变质程度的影响比较

从一般概念上讲，可以定性地说：提高受热温度对提高煤变质程度的影响大于延长有效受热时间对提高煤变质程度的影响[15] [16]。但从来没有定量的数值对这两者影响的大小进行比较。对于这个问题可以用普通数学或高等数学两种方法来解决。

3.2.1. 普通数学方法

对于比较提高受热温度或延长有效受热时间对影响煤变质程度的大小可以理解成为：在 t_1 、 T_1 和 R_{01} 的时间、温度和镜质体反射率为起点，

如果维持原时间 t_1 不变，计算出提高镜质体反射率至 R_{02} 需要增加多少温度？这是一个已知时间 t_1 和镜质体反射率， R_{02} ，%，可以直接用方程(1)求 T_2 。

如果维持原温度 T_1 不变，计算出提高镜质体反射率至 R_{02} 需要延长多少时间？这是一个已知镜质体反射率， R_{02} ，%，和温度 T_1 ，只能采用迭代法求 t_2 。

定义一个“煤变质时间温度比 t/T ”，简称时温比。时温比的量纲是百万年/°C，时温比的物理意义表示每增加 1°C 变质温度相当于延长多少百万年变质时间。时温比也可以理解为每增加 1 个单位变质温度相当于延长几个单位变质时间，或变质温度的贡献与延长时间的贡献之比。时温比可以按下列方程计算：

$$\frac{t}{T} = \frac{t_2 - t_1}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

根据研究发现在不同成煤期和不同煤级时，要增加相同的镜质体反射率所需的时温比是不同的。按上述的普通数学方法计算三个成煤期内，低煤级煤、7 级的中煤级煤和 2 级的高煤级煤等 10 级煤化程度增加镜质体反射率 0.05%时需要增加多少温度或需要延长多少时间。

Table 3. Temperature and time of 0.05% increase in vitrinite reflectance of Carboniferous, Jurassic and Cretaceous coals
表 3. 石炭纪、侏罗纪和白垩纪各煤级镜质体反射率增加 0.05%时的温度时间

煤级	时间	石炭纪			侏罗纪			白垩纪		
		标准	升温	延时	标准	升温	延时	标准	升温	延时
低煤级煤	R_0	0.395	0.445	0.445	0.395	0.445	0.445	0.395	0.445	0.445
	T	302.47	310.4	302.47	306.31	314.7	306.31	309.6	318.6	309.6
	t	298	298	836.2	179	179	495.2	118	118	326.5
中煤级煤 I	R_0	0.572	0.622	0.622	0.572	0.622	0.622	0.572	0.622	0.622
	T	329.67	336.7	329.67	335.11	342.5	335.11	339.7	347.3	339.7
	t	298	298	582.5	179	179	346.5	119	119	228.2
中煤级煤 II	R_0	0.77	0.82	0.82	0.77	0.82	0.82	0.77	0.82	0.82
	T	355.52	361.2	355.52	361.87	367.7	361.87	367.17	373.1	367.17
	t	298	298	472.5	179	179	281.6	119	119	186
中煤级煤 III	R_0	1.04	1.09	1.09	1.04	1.09	1.09	1.04	1.09	1.09
	T	382.38	386.5	382.38	389.27	393.4	389.27	394.98	399.2	394.98
	t	298	298	406.2	179	179	242.4	119	119	160.2
中煤级煤 IV	R_0	1.34	1.39	1.39	1.34	1.39	1.39	1.34	1.39	1.39
	T	403.94	406.9	403.94	411.04	414	411.04	416.89	419.9	416.89
	t	298	298	370.5	179	179	221.5	119	119	146.3
中煤级煤 V	R_0	1.6	1.65	1.65	1.6	1.65	1.65	1.6	1.65	1.65
	T	417.9	420.2	417.9	425.05	427.4	425.05	430.92	433.2	430.92
	t	298	298	352.5	179	179	210.8	119	119	139.8
中煤级煤 VI	R_0	1.8	1.85	1.85	1.8	1.85	1.85	1.8	1.85	1.85
	T	426.56	428.5	426.56	433.7	435.6	433.7	439.56	441.5	439.56
	t	298	298	343.5	179	179	205.3	119	119	135.6
中煤级煤 VII	R_0	2.186	2.236	2.236	2.186	2.236	2.236	2.186	2.236	2.236
	T	439.68	441.1	439.68	446.77	448.2	446.77	452.58	454	452.58
	t	298	298	330.9	179	179	198.1	119	119	131.4
高煤级煤 I	R_0	3.214	3.264	3.264	3.214	3.264	3.264	3.214	3.264	3.264
	T	461.36	462.1	461.36	468.26	469	468.26	473.92	474.7	473.92
	t	298	298	315.4	179	179	189	119	119	125.5
高煤级煤 II	R_0	4.952	5.002	5.002	4.952	5.002	5.002	4.952	5.002	5.002
	T	479.36	479.7	479.36	486.02	486.4	486.02	491.48	491.8	491.48
	t	298	298	306.4	179	179	183.8	119	119	122

将表 3 的 t/T 分别计算出来后, 取自然对数 $\ln(t/T)$ 为纵坐标, 镜质体反射率为横坐标作图。对三个成煤期的数据进行方程拟合, 得图 2 和相应拟合方程。

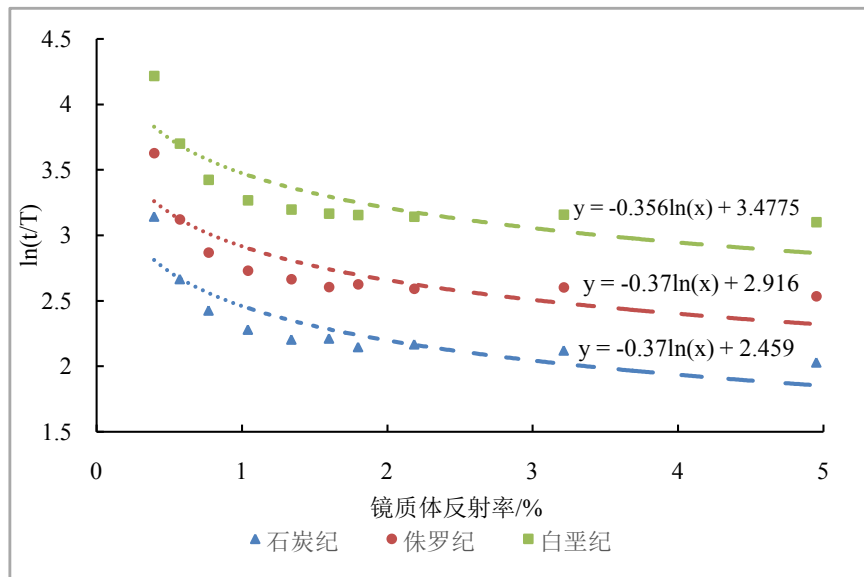


Figure 2. Relationship between vitrinite reflectance and time temperature ratio calculated by ordinary mathematical method in three coal forming periods

图 2. 三个成煤期, 用普通数学方法计算的镜质体反射率与时温比关系

镜质体反射率与时间温度比的关系可以看出三点:

1) 在任何情况下(不同成煤期, 不同镜质体反射率), 增加 1°C 温度的影响大于延长 1 百万年时间的的影响, 即时温比 $t/T > 1$ 。即使当白垩纪高煤级煤 III 的 $R_0 = 6.1\%$ 时, 时温比是最小时仍然有 $t/T = 5.90$, 即增加 1°C 温度的影响相当于延长五百九十万年时间的的影响。如果将不同成煤期、不同煤级的时温比进行比较就可以显示温度影响显著性。

2) 在同一个成煤期内, 随着镜质体反射率的增加, 温度影响显著性下降。

3) 在相同的镜质体反射率, 随着成煤期的年青, 温度影响显著性也下降。

3.2.2. 高等数学方法

方程(2)表示镜质体反射率 R_0 是二元(温度 T 和时间 t)函数。高等数学方法不能按普通数学的思路求温度与时间对变质程度的影响。

方程(2)求全微分:

$$dR_0 = \left(\frac{\partial R_0}{\partial t}\right)_T dt + \left(\frac{\partial R_0}{\partial T}\right)_t dT \quad (4)$$

方程(4)等号的右侧有两项。第一项是在温度 T 不变前提下时间的偏导数乘以时间变量, 表示时间对变质程度变化的贡献; 第二项是在时间 t 不变前提下的温度偏导数乘以温度变量, 表示温度对变质程度变化的贡献。

其中温度 T 不变, 对时间 t 求偏导:

$$\left(\frac{\partial R_0}{\partial t}\right)_T = \frac{993717}{A} - \frac{11439}{B} \quad (5)$$

$$A = \frac{993717}{3125t^{0.907} (\ln t + 111.85)^2 \left[\ln(T - 273) - \frac{16158}{25 \ln t + 2796.25} \right]^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{11439}{250000t^{0.907} \left[\ln(T - 273) - \frac{16158}{25 \ln t + 111.85} \right]} \quad (7)$$

其中时间 t 不变，对温度 T 求偏导

$$\left(\frac{\partial R_0}{\partial T} \right)_t = \frac{C}{D} \quad (8)$$

式中，

$$C = 123t^{0.093} \quad (9)$$

$$D = 250(T - 273) \left[\ln(T - 273) - \frac{16158}{25 \ln t + 2796.25} \right]^2 \quad (10)$$

在这种情况下，时温比就是变质温度的贡献与延长时间的贡献之比。

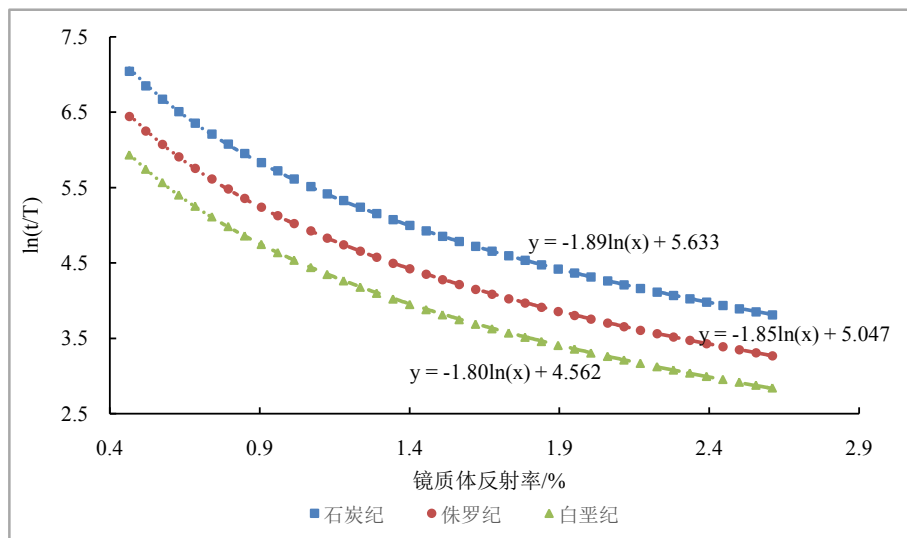


Figure 3. Relationship between vitrinite reflectance and time temperature ratio calculated by advanced mathematics method in three coal forming periods

图 3. 三个成煤期，用高等数学方法计算的镜质体反射率与时温比关系

比较图 2 与图 3 的拟合方程后可以看出：虽然所用数学方法不同，但因为拟合方程相类似，仍然可以得到相同的三个趋势结论：

- 1) 在不同成煤期或不同镜质体反射率，时温比 $t/T > 1$ ，增加 1°C 温度的影响大于延长 1 百万年时间的的影响；
- 2) 在同一个成煤期内，随着镜质体反射率的增加，温度影响显著性下降；
- 3) 在相同的镜质体反射率，随着成煤期的年青，温度影响显著性也下降。

但是，用高等数学计算的结果不同于用普通数学计算的结果。如同样白垩纪高煤级煤 III 的 $R_0 = 6.1\%$ 时，时温比是最小时仍然有 $t/T = 3.67$ ，即增加 1°C 温度的影响相当于延长三百六十七万年时间的的影响。

3.2.3. 高等数学方法的验证

现以图 1 中侏罗纪成煤期为例说明如何验证用高等数学方法计算镜质体反射率的变化值。方程(4)表示时间和温度对镜质体反射率变化的贡献。从已知的起始温度、变质时间和镜质体反射率开始, 逐次加上由方程(4)计算的增加值作为“计算值”, 而图 1 中的侏罗纪反射率作为“理论值”。这些数据可以做时间 - 温度 - 镜质体反射率三维立体图, 如图 4 所示。从计算值与理论值的误差来看, 最大误差为 1.58%。

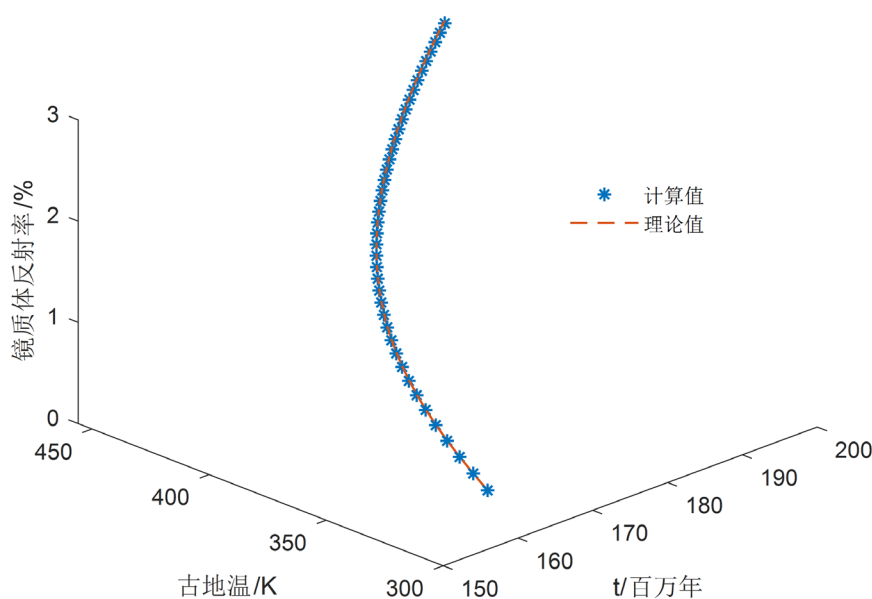


Figure 4. Comparison of calculated and theoretical values
图 4. 计算值与理论值的比较

4. 结论

1) 定性分析与定量分析应该是统一的, 相互补充的; 定性分析是定量分析的基本前提, 没有定性的定量是一种盲目的、毫无价值的定量; 定量分析使之定性更加科学、准确, 它可以促使定性分析得出广泛而深入的结论。定量分析则必须建立在定性预测基础上, 二者相辅相成, 定性是定量的依据, 定量是定性的具体化, 二者结合起来灵活运用才能取得最佳效果。

2) 用吴冲龙温度 - 时间 - 反射率的热动力学方程根据已知煤层绝对年龄和其镜质体反射率, 能够计算其最低变质温度; 也可以根据已知煤层绝对年龄和变质温度, 能够计算其最大镜质体反射率, 即最大变质极限。

3) 可以用普通数学和高等数学两种方法计算提高温度对提高煤变质程度的影响大于延长时间对提高煤变质程度的影响。定义增加 1℃ 温度的影响相当于延长几百万年时间的影响为时温比。在不同成煤期和不同煤级时, 要增加相同的镜质体反射率所需的时温比是不同的。在同一个成煤期内, 随着镜质体反射率的增加, 温度影响显著性下降; 在相同的镜质体反射率, 随着成煤期的年青, 温度影响显著性也下降。

基金项目

陕西省教育厅 2020 年度一般专项科学研究计划(20JK0858)。

参考文献

- [1] 吴冲龙, 杨起, 刘刚, 等. 煤变质作用热动力学分析的原理与方法[J]. 煤炭学报, 1997, 22(3): 225-229.
- [2] 杨起, 吴冲龙, 汤达祯, 等. 中国煤变质作用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1996, 21(3): 311-319.
- [3] 杨起. 中国煤变质研究[J]. 地球科学, 1989, 14(4): 341-345.
- [4] 杨起. 中国煤的叠加变质作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(Z1): 1-8.
- [5] 曹代勇, 李小明, 邓觉梅. 煤化作用与构造-热事件的耦合效应研究——盆地动力学过程的地质记录[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 52-60.
- [6] 肖文钊, 张秀仪, 叶道敏. GB/T 6948-2008 煤的镜质体反射率显微镜测定方法[S]. 西安: 煤炭科学研究总院西安研究院, 2008.
- [7] Hood, A., Gutjahr, C.C.M. and Heacock, R.H. (1975) Organic Metamorphism and the Generation of Petroleum. *AAPG Bulletin*, **59**, 986-996. <https://doi.org/10.1306/83D91F06-16C7-11D7-8645000102C1865D>
- [8] Bostick, N.H., Cashman, S.M., McCulloh, T.H., *et al.* (1979) Gradients of Vitrinite Reflectance and Present Temperature in the Los Angeles and Ventura Basins, California. In: Oltz, D.F., Ed., *Low Temperature Metamorphism of Kerogen and Clay Minerals* (pp. 65-96). Pacific Section, SEPM (Society for Sedimentary Geology), Los Angeles.
- [9] 谭勇杰. 煤变质古地温恢复方法探讨[J]. 煤田地质与勘探, 1989(2): 30-36.
- [10] 黄克兴, 谭勇杰. 四川南桐煤田煤变质的古地温场研究[J]. 煤炭学报, 1990, 15(4): 54-62.
- [11] Pusey, W.C. (1973) How to Evaluate Potential Gas and Oil Source Rocks. *World Oil*, **176**, 71-75.
- [12] Epstein, A.G., Epstein, J.B. and Harris, J.D. (1977) Conodont Color Alteration—An Index to Organic Metamorphism. In: *Geological Survey Professional Paper 995* (pp. 1-27). United States Government Printing Office, Washington. <https://doi.org/10.3133/pp995>
- [13] 李文华, 白向飞, 杨金和, 等. 烟煤镜质组平均最大反射率与煤种之间的关系[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 342-345.
- [14] 肖文钊, 张秀仪, 李小彦. MT/T 1158-2011 镜质体反射率的煤化程度分级[S]. 西安: 煤炭科学研究总院西安研究院, 2011.
- [15] 胡忠亚. 浅析温度、时间和压力对煤化作用的影响[J]. 硅谷, 2010(8): 4.
- [16] 张双全. 煤化学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015.