中侏罗世泥炭地净初级生产力及控制因素 ——以准噶尔盆地南缘煤田为例

李雅楠¹, 邵龙义^{1*}, 闫志明¹, 侯海海¹, 唐跃², David J. LARGE³

1. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100000;

3. Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK

* 通讯作者, E-mail: ShaoL@cumt.edu.cn

收稿日期: 2017-11-22; 收修改稿日期: 2018-04-08; 接受日期: 2018-07-23; 网络版发表日期: 2018-09-13

国家自然科学基金项目(批准号: 41572090)和中国地质调查局项目(编号: DD20160204-YQ17W01)资助

摘要 侏罗纪是地质历史发展过程中的重要时期, 中国北方及中亚地区在中侏罗统发现了多个大型煤田. 泥炭地作为碳储存的重要场所, 所形成的煤层保留了丰富的古气候和古环境信息. 米兰科维奇轨道参数旋回作为重要的时间尺度度量“工具”, 被广泛地用于“深时”研究, 近年来该“工具”也被用来度量泥炭地发育的时限并对前第四纪泥炭地净初级生产力进行分析. 针对准噶尔盆地南缘中侏罗世厚煤层, 利用自然伽马、密度和电阻率测井曲线进行频谱分析, 获得其米兰科维奇周期参数(偏心率123ka、斜率37.1ka、岁差21.7ka), 并进一步计算43号和3号煤层的沉积时限分别为876~970和322~357ka. 考虑煤化作用过程中的碳损失, 获得43号和3号煤层的泥炭地碳聚集速率分别为58.6~64.9和60.3~66.8 g C m⁻² a⁻¹, 净初级生产力分别为251.8~279.1和259.1~287.1 g C m⁻² a⁻¹. 研究区中侏罗世的净初级生产力高于前人所获得的全新世、晚二叠世同一纬度带的净初级生产力, 与早白垩世同一纬度带的净初级生产力相近. 其主控因素为二氧化碳、氧气含量和温度, 过低的二氧化碳或过高的氧气含量均导致泥炭地净初级生产力的下降. 中侏罗世的二氧化碳含量高于冰室期二叠纪、全新世, 与温室期白垩纪相近, 该结果与Berner的全球二氧化碳曲线一致. 因此, 由测井信号提取出来的米兰科维奇轨道参数可用于计算不同地质历史时期的泥炭地净初级生产力, 从而实现“深时”古气候的分析.

关键词 泥炭地, 中侏罗世, 米兰科维奇, 净初级生产力, 中纬度地区, 古气候

1 引言

侏罗纪(距今约2.013~1.45亿年)(Cohen等, 2013)是地质历史发展过程中非常重要的时期. 自三叠纪末期

联合古大陆出现分裂迹象, 侏罗纪联合古大陆的分裂继续增强, 特提斯洋盆进一步扩张, 环太平洋带出现强烈构造-岩浆活动. 经过侏罗纪的构造演化和板块漂移, 形成了当今地球大陆板块格架的雏形(王思恩,

中文引用格式: 李雅楠, 邵龙义, 闫志明, 侯海海, 唐跃, Large D J. 2018. 中侏罗世泥炭地净初级生产力及控制因素——以准噶尔盆地南缘煤田为例. 中国科学: 地球科学, 48: 1324–1334, doi: [10.1360/N072017-00407](https://doi.org/10.1360/N072017-00407)

英文引用格式: Li Y N, Shao L Y, Yan Z M, Hou H H, Tang Y, Large D J. 2018. Net primary productivity and its control of the Middle Jurassic peatlands: An example from the southern Junggar coalfield. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9263-4>

1985). 侏罗纪大多数时期为温暖、潮湿气候, 物种由经历三叠纪-侏罗纪大灭绝后(张筱青等, 2016)的各种动植物非常稀少发展到竞相发育繁盛的状况, 陆生的裸子植物在侏罗纪发展到极盛期, 恐龙成为陆地庞大的优势物种, 翼龙类和鸟类出现, 哺乳动物开始发展(Hallam, 1975). 侏罗纪时期是重要的成煤期之一, 中国北方及中亚地区在侏罗系发现了多个大型煤田, 储量丰富, 常含有厚煤层或巨厚煤层. 在中国华北和西北地区, 著名煤田有淮南、神府、大同等煤田(韩德馨和杨起, 1980). 煤既是能源燃料, 又是研究古气候的优良介质. 通过准噶尔盆地南缘中侏罗世的厚煤层来研究泥炭地净初级生产力及控制因素, 对侏罗纪的古气候恢复具有非常重要的意义.

泥炭地生态系统自泥盆纪晚期以来在全球碳循环中扮演重要角色(Greb等, 2006), 其碳聚集特征能够记载气候和环境的变化. 煤作为泥炭地的产物和重要的沉积载体, 储存了大量的气候和环境信息, 通过研究煤中碳聚集速率, 进而分析泥炭地碳聚集速率和净初级生产力, 可以间接地恢复这些重要信息. 但是, 研究煤中碳聚集速率, 需要准确地确定煤层沉积时限. 虽然古生物化石定年、古地磁测年、地球物理测年、放射性同位素定年技术应用广泛, 但测试结果存在较大误差范围(郭桂红和韩锋, 2007; 杨江海和殷鸿福, 2014), 对煤层等需要高精度定年的沉积物实用性较差. 而米兰科维奇周期信号完整地记录在厚煤层中, 利用它的时间度量特性可以计算出煤层的沉积时限(Large等, 2003, 2004).

20世纪40年代, 前南斯拉夫气候学家米兰科维奇提出了地球轨道参数与气候变化关系的天文旋回理论(Berger等, 1989). 米兰科维奇旋回具有全球效应, 已被多位学者应用于沉积物的旋回性研究(Schwarzacher, 1993; 程日辉等, 2008; 赵宗举等, 2010; 吴怀春等, 2011). Large等(2003)发现新近纪煤层存在米兰科维奇旋回信息, 并以该旋回信息作为度量时间的工具, 计算出煤层的沉积时限, 进而对泥炭地生态系统进行研究, 计算出前第四纪泥炭地的生产力水平. 邵龙义等(2011)、闫志明等(2016)分别对中国西南地区晚二叠世和二叠盆地吉尔嘎郎图凹陷早白垩世厚煤层的测井曲线进行频谱分析, 获得米兰科维奇旋回参数, 以此为“度量”工具, 计算出其所代表的泥炭地的碳聚集速率和净初级生产力, 并综合分析影响因素. 从以上研

究可以看出, 米兰科维奇旋回理论是“度量”泥炭地沉积时限的有效方法, 并已应用于多个时代泥炭地碳聚集速率和净初级生产力的研究. 本文以准噶尔盆地南缘中侏罗世厚煤层为例, 以米兰科维奇旋回参数为时间尺度, 对中侏罗世泥炭地的碳聚集速率、净初级生产力进行计算, 并将结果与全新世、早白垩世、晚二叠世同一纬度带的泥炭地净初级生产力对比, 并分析其控制因素. 该研究对中侏罗世的碳循环规律和古气候分析具有一定的指导意义.

2 地质背景

研究区构造上位于准噶尔盆地南部的山前褶皱冲断带, 是准噶尔盆地与北天山造山带的接合部位, 南邻博格达山与依连哈比尕山、北与盆地腹部的昌吉凹陷相邻(董臣强等, 2007). 准噶尔盆地受到多期次周缘造山带的逆冲推覆作用, 其发育过程与一般意义的前陆盆地有一定差异(王宗秀等, 2008; 赵淑娟等, 2014; 杨庚等, 2016). 特别是新生代的喜马拉雅运动, 造成山前强烈褶皱并发育多条大型逆冲断裂. 盆地南缘的断裂大体与天山和博格达山平行, 走向NWW或EW (图1a).

准噶尔盆地南缘主要发育上古生界、中生界及新生界地层, 其中中侏罗世早期阿林阶、巴柔阶(174.1~168.3Ma)对应于西北地区的西山窑组, 中侏罗世晚期巴通阶、卡洛夫阶(168.3~163.5Ma)对应于西北地区的头屯河组(王泽九等, 2014). 西山窑组是区内主要含煤地层, 厚度为731~903m, 该时期沉降中心在玛纳斯-昌吉一带(姜科庆等, 2010). 西山窑组为一套以灰白色砾岩和砂岩、灰色、灰黑色泥岩和煤为主的陆源碎屑沉积, 发育的古地理单元主要有辫状河、辫状河三角洲和滨浅湖(图1b). 西山窑组自下而上分为下段、中段和上段(Li等, 2018), 煤层主要发育于西山窑组下段, 煤层厚度在6.6~48.6m之间, 平均厚度为24.9m; 西山窑组中段煤层不太发育, 厚度在0~27.4m; 西山窑组上段煤层基本不发育, 厚度一般在0~8m(图2). 区内化石种类丰富, 可见大量的动、植物化石和孢粉化石. 植物化石常见的是锥叶蕨属、枝脉蕨属和苏铁类化石Cycadales, 多以高大乔木为主, 说明成煤植物多以木本植物为主(王正华等, 2006). 分析认为中侏罗世西山窑组时期为潮湿、温暖的气候环境.

图1 准噶尔盆地南缘地质简图
(a) 研究区位置图; (b) 研究区中侏罗世早期古地理简图

3 数据来源

3.1 沉积地层剖面选择

研究米兰科维奇旋回的沉积地层应具备以下特点: 沉积地层有一定厚度, 以确保沉积时限包括多个米兰科维奇旋回的最长周期; 沉积地层垂向上连续性好, 以保证米兰科维奇旋回的连续性; 地层沉积受轨道气候驱使影响明显, 最好有直观的旋回性(Boulila等, 2010)。

本次研究选择准噶尔盆地南缘两个钻孔的中侏罗世早期西山窑组的厚煤层作为研究对象, 便于分析对比。6-1钻孔剖面的43号煤层具有连续性好、厚度大的特点, 其深度为484.8~520.7m, 视厚度为35.9m, 底板为粉砂岩, 顶板为细砂岩(图3a)。43号煤层煤岩类型为半暗型, 镜质组含量为34.7%, 惰质组含量为46.3%, 壳质组含量为0.4%, 矿物含量为18.6%, 该煤层形成于三角洲朵叶废弃后形成的泥炭地。zk404钻孔剖面3号煤层也具有连续性好、厚度较大的特点, 其深度为862.7~875.9m, 视厚度为13.2m, 底板为炭质泥岩, 顶

板为泥岩(图3b)。3号煤层煤岩类型为半亮型, 镜质组含量为62%, 惰质组含量为35.1%, 壳质组含量为0.9%, 矿物含量为2%, 该煤层也形成于三角洲朵叶废弃后形成的泥炭地。

3.2 煤层灰分测井响应特征

煤层灰分主要受地表水搬运的陆源碎屑物供给的影响, 从43号和3号煤层的中低灰分特点分析认为(表1), 其形成环境为受地表水与雨水给养的中位泥炭地(Moore, 1987; Diessel, 1992)。稳定的构造背景下, 气候条件影响泥炭地的水文条件, 年平均气温的下降使研究区内地表径流和降雨强度增强, 水流携带的矿物质进入泥炭地, 造成煤中矿物质含量增加(Large等, 2009)。同时, 煤层中灰分记录了大气中的灰尘沉积(Large和Marshall, 2015; Marshall等, 2016)。因而煤层中灰分变化可以间接地反映成煤泥炭地发育时期的天文周期旋回。

测井曲线具有分辨率高、数据连续、准确的特点, 沉积物的结构、成分等周期性变化都能连续地记

图 2 准噶尔盆地南缘中侏罗世沉积相柱状图

录在测井曲线中,是高频旋回研究的重要信息(李凤杰等, 2003)。自然伽马测井通过探测井壁的微量放射性元素铀、钍及成岩主体放射性物质钾的放射强度变化来实现(赵军龙, 2012),其中钾多以同位素(^{40}K)的形式普遍存在于云母和伊利石黏土中,因此自然伽马测井可以测定沉积岩中黏土和云母物质的含量(余继峰和李增学, 2003)。纯煤层自然伽马为极低值,但当煤中含

有泥岩和炭质泥岩夹层时自然伽马值变大(Dobrin和Savit, 1988; Diessel, 1992)。密度测井通过探测人工放射源照射井壁、经围岩吸收后反射的能量来完成(赵军龙, 2012)。在含煤岩系中,煤的密度比其他岩石低,其密度测井响应也比其他岩石低。但随着煤中泥质含量的增加,其密度测井响应逐渐增大(Dobrin和Savit, 1988; Diessel, 1992)。电阻率测井是探测钻孔的围岩电阻率,其测井响应与围岩的水含量和岩性密切相关。纯煤层的电阻率一般较高,如果煤中含有黏土会使电阻率测井响应降低,这是因为黏土含有结合水使得电阻率降低(王锦祥, 2006)。

因此,自然伽马、密度和电阻率的测井响应,能够反映煤层中灰分含量的变化,表现为煤层中灰分含量越高,自然伽马越高、密度越大、电阻率越低。

4 频谱分析

4.1 处理方法

首先从6-1钻孔43号煤层和zk404钻孔3号煤层的自然伽马、密度和电阻率测井曲线,分别获得359和132个数据,数据间距为0.1m。对每条测井曲线的数据分布特征进行分析,如果数据中存在不对称分布,则对数据进行 $\text{Log}_{10}X$ 转换,从而增加小数据的权重,改善数据的分布特征。

其次利用SSA-MTM工具箱中的奇异谱方法(SSA)、多窗谱方法(MTM)及最大熵谱方法(MEM),对测井曲线进行频谱分析。SSA分析是一种研究周期振荡行为的分析方法,通过分解序列中的时间主分量,提取具有显著振荡行为的信号分量。MTM分析可以较好地平衡谱分辨率与方差,适用于短序列、高噪声背景下准周期信号的诊断分析。MEM分析是一种将自相关函数外推的方法,在分析过程中,不受传统谱中数据加窗的影响(Ghil等, 2002)。

针对43号煤层和3号煤层得到的6组测井数据分别使用SSA方法识别并去除数据中的低频分量,同时对有意义的频率进行非线性重构;然后对去除了低频分量或者原本未包含低频分量的数据进行MTM分析;辨识涵盖在米兰科维奇频率范围内的频率,并选择置信水平 $\geq 99\%$ 的MTM频谱峰值,与运用MEM方法计算的频谱峰值进行对比分析;最后选择两种分析得到的相同频率为有效的显著频率,即每米中周期数(邵龙义

图3 准噶尔盆地南缘中侏罗世含煤岩系岩性特征及煤层测井曲线
(a) 6-1钻孔43号煤层; (b) zk404钻孔3号煤层

表1 准噶尔盆地南缘中侏罗世早期西山窑组43号和3号煤层主要煤质指标^{a)}

煤层号	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	$S_{t,d}$ (%)	C_{daf} (%)	$ARD(g\ cm^{-3})$
43号煤层	2.03	14.26	33.86	0.55	82.68	1.27
3号煤层	2.14	11.61	36.72	0.20	81.82	1.34

a) M_{ad} 为空气干燥基水分含量; A_d 为干燥基灰分含量; V_{daf} 为干燥无灰基挥发分含量; $S_{t,d}$ 为干燥基全硫含量; C_{daf} 为干燥无灰基碳含量; ARD 为视密度

等, 2011; 闫志明等, 2016).

4.2 分析结果

对6-1钻孔中35.9m厚煤层和zk404钻孔中13.2m厚煤层的测井曲线进行频谱分析, 选择置信水平 $\geq 99\%$ 的MTM频谱峰值, 与运用MEM方法计算的频谱峰值进行对比分析, 选择相同频率为有效的显著频率(图4和5). 通过整理2个煤层测井曲线的频谱分析结果, 可以得到3组频率值, 分别位于低频、中频和高频范围内, 依次为0.10~0.30、0.51~0.91、0.99~1.20 m^{-1} , 各个频率的平均值分别为0.2、0.7、1.1 m^{-1} , 周期长度分别为5、1.4、0.9m, 其比例为5.6:1.6:1, 与中侏罗世(约170Ma)的米兰科维奇周期(偏心率123ka: 斜率37.1ka: 岁差21.7ka=5.6:1.7:1)(Berger等, 1992)相近, 因此认为测井曲线所反映的煤层灰分变化受控于米兰科维奇旋

回周期的驱动.

5 中侏罗世泥炭地净初级生产力

5.1 计算模型

泥炭地净初级生产力(NPP)计算流程(图6)如下: 利用煤层测井曲线进行频谱分析得到的频率值, 计算出的周期长度与煤层的偏心率、斜率及岁差周期时间分别作比, 得到煤层的沉积速率; 再利用煤层的沉积厚度与沉积速率(V)作比, 得出煤层的沉积时限. 泥炭地中聚集的碳的总量等于煤层中保存的碳和泥炭转化为煤的过程中损失的碳的总和, 与泥炭压缩等因素无关(Clymo等, 1998). 利用煤层中的碳含量(C_{daf})、视密度(ARD)和煤层的沉积速率(V)得出煤中碳聚集速率(V_c)的计算模型(1). 成煤过程中损失的碳含量, 可以利用

图 4 准噶尔盆地南缘43号煤层频谱分析结果

图 5 准噶尔盆地南缘3号煤层频谱分析结果

Large和Marshall(2015)中不同碳含量(C_{daf})和视密度(ARD)求出对应的碳损(C_{loss}),从而得出泥炭地碳聚集速率(V_p)的计算模型(2). 根据不同纬度带的泥炭地碳聚集速率(V_p)与净初级生产力(NPP)的相关性(Diessel等, 2000; Large, 2007)(图7), 得到不同纬度带中 V_p 与 NPP 的比值关系(N), 从而形成泥炭地净初级生产力(NPP)的计算模型(3).

5.2 中侏罗世泥炭地净初级生产力计算

将根据频谱分析得到的周期长度5、1.4、0.9m和对应的旋回周期123、37.1、21.7ka应用于煤层中, 计算出煤层每千年沉积的厚度为0.037~0.041m. 将43号和3号煤层的沉积厚度35.9和13.2m分别与煤层的沉积速率0.037~0.041m ka^{-1} 作比, 分别得到两个煤层的沉

图6 泥炭地净初级生产力计算流程图

图7 全新世泥炭地净初级生产力和碳聚集速率与纬度的关系图

据Large(2007)修改。(a) 全新世泥炭地净初级生产力与纬度的关系(Beerling和Woodward, 2001); (b) 全新世泥炭地碳聚集速率与纬度的关系(Diessel等, 2000)。阴影部分表示中侏罗世准噶尔盆地所处的古纬度范围

积时限。43号厚煤层的沉积时限为876~970ka, 3号厚煤层的沉积时限为322~357ka。由于西山窑组的沉积时限为174.1~168.3Ma, 跨度为5.8Ma(王泽九等, 2014), 远

大于43号和3号厚煤层的沉积时限, 因此认为计算所得的煤层沉积时限结果是合适的, 也进一步证明43号和3号厚煤层中的米兰科维奇旋回周期的合理性。

43号煤层的碳含量为82.68%, 平均视密度为1.27 g cm⁻³, 根据模型(1)计算煤中碳聚集速率为38.9~43.1 g C m⁻² a⁻¹。3号煤层的碳含量为81.82%, 平均视密度为1.34 g cm⁻³, 根据模型(1)计算煤中碳聚集速率为40.6~44.9 g C m⁻² a⁻¹。

泥炭在成煤过程中, 经历泥炭化作用和煤化作用, 以释放CH₄和CO₂的形式损失了大量的碳、氢、氧等元素, 因此煤层中现存的碳含量比原始泥炭地堆积的碳要少。煤化程度越高, 成煤过程中损失的碳就越多。Large和Marshall(2015)根据煤级和碳聚集速率, 预测不同纬度地区1万年间的泥炭地沉积厚度, 其中考虑了对应于不同碳含量及密度的碳损(C_{loss})计算。43号煤层现存碳含量为82.68%, 平均视密度为1.27 g cm⁻³, 对应于泥炭的煤化过程中大约有33.68%的碳损(Large和Marshall, 2015)。已知43号煤层的碳聚集速率为38.9~43.1 g C m⁻² a⁻¹, 综合泥炭地中碳的损失, 根据模型(2)计算出43号煤层泥炭地的碳聚集速率为58.6~64.9 g C m⁻² a⁻¹。3号煤层现存碳含量为81.82%, 平均视密度为1.34 g cm⁻³, 对应于泥炭的煤化过程中大约有

32.67%的碳损(Large和Marshall, 2015). 3号煤层的碳聚集速率为 $40.6\sim 44.9\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 根据模型(2)可计算出3号煤层泥炭地碳聚集速率为 $60.3\sim 66.8\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$.

Large(2007)在对比全新世全球不同纬度地区的泥炭地碳聚集速率和净初级生产力中发现, 两者之间具有明显的正相关性(图7). 准噶尔盆地在中侏罗世位于 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 的中纬度地区(李永安等, 1999), 从图7可以看出, 全新世古纬度在 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 地区的泥炭地碳聚集速率范围为 $23.1\sim 64.6\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 均值约为 $43.8\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ (Diessel等, 2000); 泥炭地净初级生产力范围为 $155.0\sim 223.4\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 均值约为 $189.2\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 泥炭地净初级生产力与碳聚集速率的比值 N 为4.3. 将此比值 N 应用到已求得43号和3号的泥炭地碳聚集速率上, 即 $58.6\sim 64.9$ 和 $60.3\sim 66.8\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$. 根据计算模型(3)可以分别求得43号煤层的泥炭地净初级生产力为 $251.8\sim 279.1\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 3号煤层的泥炭地净初级生产力为 $259.1\sim 287.1\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$.

6 中侏罗世泥炭地净初级生产力控制因素讨论

中侏罗世中纬度地区泥炭地的净初级生产力普遍高于全新世中纬度地区的泥炭地净初级生产力. 以下分析认为中侏罗世泥炭地净初级生产力的控制因素不是水文条件和古火灾事件, 而是由二氧化碳、氧气含量和温度等多种因素组成.

中侏罗世陆生裸子植物占主导地位, 新生代开始被子植物开始繁盛起来. 被子植物相对裸子植物对自然环境具有更强的适应能力, 但在中侏罗世准噶尔盆地南缘气候温暖潮湿, 成煤植物较为稳定, 因此植物群类型的变化对泥炭地净初级生产力的影响较小. 另外, 准噶尔盆地南缘中侏罗世泥炭地发育于废弃的河流及三角洲平原, 对于受地下水和雨水同时补给的中位泥炭地来说, 水分和养分供应相对充足, 而全新世中纬度地区多为水源供应充足的低位泥炭沼泽, 其水文条件优于中侏罗世泥炭地, 而中侏罗世泥炭地净初级生产力普遍高于全新世, 因此水文条件不是提高中侏罗世泥炭地净初级生产力的主要因素.

Page等(2002)在研究赤道附近的印度尼西亚泥炭地时发现了野火事件, 并计算了泥炭燃烧时向大气中释放的碳含量. 准噶尔盆地南缘中侏罗世煤中惰质组

含量较高, 通常含量大于30%, 且丝质体镜下形态呈星状, 认为是受到古火灾事件的影响. 而古火灾事件的发生需要可燃物、氧气和点火源, 燃烧实验表明大气中氧气含量在15~35%时, 可以支持燃烧的发生(Scott和Glasspool, 2006). 中侏罗世大气中的氧气含量的模拟值为14.6%(Berner, 2009), 接近煤层自燃时的氧气含量. 火灾事件导致除正常煤化过程中碳的损失外, 泥炭燃烧过程中碳向大气中转移, 最终保留下的碳含量比实际值偏小, 反而降低了泥炭地的净初级生产力, 不能成为中侏罗世泥炭地净初级生产力比全新世高的原因. 因此古火灾事件对研究区泥炭地净初级生产力影响较小.

在特定的纬度和充足的水分供给条件下, 影响泥炭地净初级生产力的主要因素是大气中的二氧化碳、氧气的含量(Beerling和Woodward, 2001)和温度. 植物光合作用固定的碳来自于大气中的二氧化碳, 植物呼吸作用需要的氧来源于大气中的氧气, 而温度影响植物的光合作用和呼吸作用过程中酶的活性(余峥等, 2006). 中侏罗世大气中氧气含量的模拟值为14.6%(Berner, 2009), 二氧化碳模拟值为0.102%(Berner, 2006), 全新世大气中氧气和二氧化碳含量分别为21%(Berner, 2009)和0.03%(Berner, 2006)(图8a). 相比来说, 中侏罗世相对于全新世氧气含量降低了6.4%, 二氧化碳含量是全新世二氧化碳含量的4倍. 中侏罗世较高的二氧化碳含量起到一定的肥化作用, 使中侏罗世的泥炭地净初级生产力较全新世有所增加. Beerling和Woodward(2001)在不考虑气候和二氧化碳含量的前提下, 对氧气含量和净初级生产力进行数值模拟, 得出氧气含量增加11%时, 陆相生物圈净初级生产力降低了10%. 因此, 全新世的氧气含量抑制了净初级生产力的增加. 同时全新世处于第四纪冰期, 总体上温度接近于现今水平, 相比来说现代气候处于地质历史过程中较冷的时期. 而侏罗纪处于石炭纪-二叠纪和第四纪冰期之间的过渡期, 以热带和亚热带气候为主, 平均温度高于全新世. 因此中侏罗世相对较高的温度更适于植物的生长, 从而导致泥炭地的净初级生产力进一步增加.

闫志明等(2016)研究早白垩世中纬度地区的厚煤层时, 计算出泥炭地净初级生产力为 $231\sim 256\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 与研究区的净初级生产力结果相近(图8b). 早白垩世大气中二氧化碳含量平均为0.12%(Berner, 2006), 是现今大气中二氧化碳含量的4倍. 早白垩世处

图8 不同地质时期大气中CO₂和O₂含量与泥炭地净初级生产力变化图

(a) 大气中CO₂和O₂含量数据来自Berner(2006, 2009); (b) 中纬度地区泥炭地净初级生产力数据来自晚二叠世(邵龙义等, 2011)、中侏罗世(本文; Wang等, 2018)、早白垩世(闫志明等, 2016)、全新世(Large, 2007)

于石炭纪-二叠纪冰期和第四纪冰期之间的温室期(胡修棉, 2004), 因此也产生了较高的净初级生产力。但由于早白垩世氧气含量(21%)大于中侏罗世大气中的氧气含量(14.6%)(图8a), 导致早白垩世净初级生产力较中侏罗世同一纬度带略有降低。邵龙义等(2011)在研究晚二叠世赤道附近的厚煤层时, 计算出碳聚集速率为 $54.3\sim77.0\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 根据Large和Marshall(2015)建立的纬度变化与碳聚集速率的关系方程, 预测晚二叠世中纬度地区($40^{\circ}\sim45^{\circ}\text{N}$)的碳聚集速率为 $15.5\sim44.8\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。同时中纬度地区泥炭地净初级生产力是碳聚集速率4.3倍, 计算出晚二叠世中纬度地区净初级生产力为 $66.5\sim192.7\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。晚二叠世处于冰期末期, 大气中二氧化碳含量为0.1%(Berner, 2006), 氧气含量为35%(Berner, 2009)(图8a), 较高的氧气含量和较低的温度会削弱植物的肥化作用, 导致晚二叠世中纬度地区净初级生产力较中侏罗世低(图8b)。

因此, 中侏罗世泥炭地净初级生产力主要受二氧

化碳、氧气含量和温度控制, 过低的二氧化碳或过高的氧气含量均会导致泥炭地净初级生产力的下降。通过计算不同地质时期同一纬度带的泥炭地生产力, 可以实现对古气候的分析。

7 结论

(1) 对准噶尔盆地南缘中侏罗世厚煤层的自然伽马、密度和电阻率测井曲线进行频谱分析, 获得米兰科维奇周期参数分别为偏心率123ka、斜率37.1ka、岁差21.7ka, 43号和3号煤层的沉积时限分别为876~970和322~357ka。

(2) 准噶尔盆地南缘中侏罗世43号煤层的泥炭地碳聚集速率为 $58.6\sim64.9\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 净初级生产力为 $251.8\sim279.1\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$; 3号煤层的泥炭地碳聚集速率为 $60.3\sim66.8\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 净初级生产力为 $259.1\sim287.1\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。中侏罗世泥炭地净初级生产力高于全新世、晚二叠世同一纬度带的净初级生产力, 与早白垩世同一纬度带的净初级生产力相近。

(3) 中侏罗世泥炭地净初级生产力主要受二氧化碳、氧气含量和温度控制, 当二氧化碳含量过低或氧气含量过高时会导致泥炭地净初级生产力的下降。中侏罗世的二氧化碳含量高于冰室期二叠纪、全新世, 与温室期白垩纪相近, 该结果与Berner的全球二氧化碳曲线一致。通过计算不同地质时期同一纬度带的泥炭地净初级生产力, 可以实现对古气候的分析。

参考文献

- 程日辉, 王国栋, 王璞珺. 2008. 松辽盆地白垩系泉三段-嫩二段沉积旋回与米兰科维奇周期. 地质学报, 82: 55-64
- 董臣强, 孙自明, 洪太元. 2007. 准噶尔盆地南缘前陆褶皱冲断带构造滑脱层厘定. 石油实验地质, 29: 138-142
- 郭桂红, 韩锋. 2007. 地质定年方法综述与地球物理定年. 地球物理学进展, 22: 87-94
- 韩德馨, 杨起. 1980. 中国煤田地质学(下册). 北京: 煤炭工业出版社. 415
- 胡修棉. 2004. 白垩纪“温室”气候与海洋. 中国地质, 31: 442-448
- 姜科庆, 田继军, 汪立今, 彭雪峰, 王威. 2010. 准噶尔盆地南缘西山窑组沉积特征及聚煤规律分析. 现代地质, 24: 1204-1212
- 李凤杰, 王多云, 郑希民, 刘自亮, 王峰, 王志坤, 李树同. 2003. 测井曲线频谱分析在含煤地层沉积旋回研究中的应用. 煤田地质与勘探, 31: 14-18

- 李永安, 孙东江, 郑洁. 1999. 新疆及周边古地磁研究与构造演化. *新疆地质*, 17: 193–235
- 邵龙义, 汪浩, Large D J. 2011. 中国西南地区晚二叠世泥炭地净初级生产力及其控制因素. *古地学报*, 13: 473–480
- 王锦祥. 2006. 现代煤田地质勘探、煤矿矿井物探及测井新技术新方法实用手册. 北京: 煤炭工业出版社. 1417
- 王思恩. 1985. 中国的侏罗系. 北京: 地质出版社. 332
- 王正华, 叶兰, 韦波. 2006. 淮南煤田西山窑组主要煤层成煤原始物质堆积方式. *新疆地质*, 24: 157–160
- 王泽九, 黄枝高, 姚建新, 马秀兰. 2014. 中国地层表及说明书的特点与主要进展. *地球学报*, 35: 271–276
- 王宗秀, 李涛, 张进, 柳永清, 马宗晋. 2008. 博格达山链新生代抬升过程及意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38: 312–325
- 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 方念乔, 杨天水, 李海燕. 2011. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望. *地球科学——中国地质大学学报*, 36: 409–428
- 闫志明, 邵龙义, 王帅, Large D J, 汪浩, 孙钦平. 2016. 早白垩世泥炭地净初级生产力及其控制因素——来自二连盆地吉尔嘎郎图凹陷6号煤的证据. *沉积学报*, 34: 1068–1076
- 杨庚, 赵孟军, 陈竹新, 王晓波. 2016. 准噶尔南缘逆冲带多个逆冲断层同期活动的几何学证据. *地质学报*, 90: 639–652
- 杨江海, 殷鸿福. 2014. 高精度锆石 U-Pb 年代学 10 年发展: 浅谈中国科学家的机遇和挑战. *地学前缘*, 21: 93–101
- 余继峰, 李增学. 2003. 测井数据小波变换及其地质意义. *中国矿业大学学报*, 32: 336–339
- 余峥, 胡庭兴, 王开运, 张远彬. 2006. 植物光合作用对大气 CO₂ 和温度升高的响应及其适应机制的研究进展. *四川林业科技*, 27: 30–35
- 张筱青, 张国权, 席书娜, 李丽琴, 邓春涛, 王岩, 周宁, 王永栋, 宋宜. 2016. 三叠系-侏罗系界线古火灾事件研究: 方法、进展及展望. *古生物学报*, 55: 331–345
- 赵军龙. 2012. 测井资料处理与解释. 北京: 石油工业出版社. 209
- 赵淑娟, 李三忠, 刘鑫, 楼达, 索艳慧, 戴黎明, 孙文军, 李涛, 王学斌, 杨朝. 2014. 准噶尔盆地东缘构造: 阿尔泰与北天山造山带交接转换的陆内过程. *中国科学: 地球科学*, 44: 2130–2141
- 赵宗举, 陈轩, 潘懋, 吴兴宁, 郑兴平, 潘文庆. 2010. 塔里木盆地塔中-巴楚地区上奥陶统良里塔格组米兰科维奇旋回性沉积记录研究. *地质学报*, 84: 518–536
- Beerling D J, Woodward F I. 2001. *Vegetation and the Terrestrial Carbon Cycle: Modeling the First 400 Million Years*. Cambridge: Cambridge University Press. 405
- Berger A, Loutre M F, Dehant V. 1989. Pre-Quaternary Milankovitch frequencies. *Nature*, 342: 133–133
- Berger A, Loutre M F, Laskar J. 1992. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies. *Science*, 255: 560–566
- Berner R A. 2006. Geocarbsulf: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochim Cosmochim Acta*, 70: 5653–5664
- Berner R A. 2009. Phanerozoic atmospheric oxygen: New results using the Geocarbsulf model. *Am J Sci*, 309: 603–606
- Boulila S, Galbrun B, Hinnov L A, Collin P Y, Ogg J G, Fortwengler D, Marchand D. 2010. Milankovitch and sub-Milankovitch forcing of the Oxfordian (Late Jurassic) Terres Noires Formation (SE France) and global implications. *Basin Res*, 22: 717–732
- Clymo R S, Turunen J, Tolonen K. 1998. Carbon accumulation in peatland. *Oikos*, 81: 368–388
- Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, Fan J X. 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36: 199–204
- Diessel C F K. 1992. *Coal-bearing Depositional System*. New York: Springer-Verlag. 721
- Diessel C, Boyd R, Wadsworth J, Leckie D, Chalmers G. 2000. On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, Western Canada, and their sequence-stratigraphic significance. *Int J Coal Geol*, 43: 143–186
- Dobrin M B, Savit C H. 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting*. 4th ed. New York: McGraw-Hill. 867
- Ghil M, Allen M R, Dettinger M D, Ide K, Kondrashov D, Mann M E, Robertson A W, Saunders A, Tian Y, Varadi F, Yiou P. 2002. Advanced spectral methods for climatic time series. *Rev Geophys*, 40: 1–41
- Greb S F, DiMichele W A, Gastaldo R A. 2006. Evolution and importance of wetlands in earth history. In: Greb S F, DiMichele W A, eds. *Wetlands Through Time*. *Geol Soc Am Spec Pap*, 399: 1–40
- Hallam A. 1975. *Jurassic Environments*. Cambridge: Cambridge University Press. 269
- Large D J. 2007. A 1.16 Ma record of carbon accumulation in western European peatland during the Oligocene from the Ballymoney lignite, Northern Ireland. *J Geol Soc*, 164: 1233–1240
- Large D J, Jones T F, Somerfield C, Gorringer M C, Spiro B, Macquaker J H S, Atkin B P. 2003. High-resolution terrestrial record of orbital climate forcing in coal. *Geology*, 31: 303–306
- Large D J, Jones T F, Briggs J, Macquaker J H S, Spiro B F. 2004. Orbital tuning and correlation of 1.7 m.y. of continuous carbon storage in an early Miocene peatland. *Geology*, 32: 873–876
- Large D J, Spiro B, Ferrat M, Shopland M, Kylander M, Gallagher K, Li X, Shen C, Possnert G, Zhang G, Darling W G, Weiss D. 2009. The influence of climate, hydrology and permafrost on Holocene peat accumulation at 3500m on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quatern Sci Rev*, 28: 3303–3314
- Large D J, Marshall C. 2015. Use of carbon accumulation rates to

- estimate the duration of coal seams and the influence of atmospheric dust deposition on coal composition. [Geol Soc London Spec Publ](#), 404: 303–315
- Li Y, Shao L, Hou H, Tang Y, Yuan Y, Zhang J, Shang X, Lu J. 2018. Sequence stratigraphy, palaeogeography, and coal accumulation of the fluvio-lacustrine Middle Jurassic Xishanyao Formation in central segment of southern Junggar Basin, NW China. [Int J Coal Geol](#), 192: 14–38
- Marshall C, Large D J, Heavens N G. 2016. Coal-derived rates of atmospheric dust deposition during the Permian. [Gondwana Res](#), 31: 20–29
- Moore P D. 1987. Ecological and hydrological aspects of peat formation. [Geol Soc London Spec Publ](#), 32: 7–15
- Page S E, Siegert F, Rieley J O, Boehm H D V, Jaya A, Limin S. 2002. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. [Nature](#), 420: 61–65
- Schwarzacher W. 1993. Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory. Amsterdam: Elsevier. 225
- Scott A C, Glasspool I J. 2006. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 103: 10861–10865
- Wang D, Yan Z, Liu H, Lv D, Hou Y. 2018. The net primary productivity of Mid-Jurassic peatland and its control factors: Evidenced by the Ordos Basin. [Int J Min Sci Tech](#), 28: 177–185

(责任编辑: 秦勇)