维普资讯 http://www.cqvip.com

含煤岩系沉积学和层序地层学研究现状和展望*

邵龙义　窦建伟　张鹏飞
（中国矿业大学北京研究生部　100083）

摘要　在对含煤岩系沉积学研究历史进行回顾的基础上，论述了含煤岩系层序地层学方法以及海平面变化与聚煤作用的关系。注重强调分布广泛的厚煤层实际上是在基准面或海平面抬升过程中堆积的，煤层底面代表海泛面，以煤层之下的古土壤（根土岩）或沉积间断面为代表的暴露事件则把其下的进积期沉积和其上的海侵期沉积分隔开来。

关键词　层序地层学　煤系　海平面　现状　远景
中国图书资料分类法分类号　P512.3
作者简介　邵龙义　男　33岁　副教授　博士　沉积学和层序地层学

1　引言

近年来，层序地层学作为一种新的盆地分析方法，受到广大地质学家尤其是油气地质学家的重视。有关高分辨层序地层学技术的研究如雨后春笋般地涌现出来，层序地层学已从原来的地震地层学的概念发展到如今的比地震地层分辨率更高的以研究第4和第5级准层序为主的"高分辨率层序地层学研究方法"，尤其是露头规模的高分辨率层序地层学的研究已经成功地用于地下相及矿产资源的预测，并且极大地改进了人们对岩相几何形态及储层分布格架的认识[1]。总之，层序地层学已经发展成油气勘探及科学研究的一种强大的、具预测功能的相分析手段[2]。这些新的沉积学研究方法已渗透到含煤岩系研究中，并促使含煤岩系沉积学迅速向前发展[3]。在国内，虽然聚煤作用与海水进退的关系早就为人们所注意（韩德馨和杨起等，1980），但含煤岩系层序地层学研究也只是最近几年才得以全面展开（李思田等，1992，1993；邵龙义和张鹏飞等，1993；陈世悦和刘焕杰等，1995；李增学等，1996）。

* 国家自然科学基金和国家教委留学回国人员基金资助项目

RELATIONSHIP BETWEEN MATERIAL COMPONENT OF DEVONIAN COAL AND ECOLOGICAL PROPERTY OF EARLY TERRESTRIAL PLANT IN DAMAIDI, SICHUAN

Wang Yanbin　Han Dexin　(Beijing Graduate School of China University of Mining and Technology)

Abstract　There are several lenticular coal seams occurred in Middle Devonian around Damaidi, in which the content of cutinite is >75% in general, the type, content and texture of cutinite in different coal-rich points are different, and the obvious differentiation phenomena are presented, reflecting the adaptability of early terrestrial plant to the environment and its ecological property. That is the result of comprehensive actions of the factors such as coal-accumulating environment, plant type and ecology and so on. Starting from the coal petrology, palaeobotany and sedimentary environment analysis, in this paper the genetic telations among them and the ecological property of early vascular plant reflected from them are expounded.

Keywords　coal; maceral; composition; plant ecology; Devonian

维普资讯 http://www.cqvip.com

2　含煤岩系沉积学的研究历史回顾

从含煤岩系沉积学的研究历史可以看出，煤系沉积学的发展经历了"旋回层阶段"和"三角洲迁移模式阶段"[4]。本世纪初，当 Udden(1912)明确提出海侵—海退旋回是造成北美上石炭统含煤岩系中岩性单元规律性重复现象的原因之后，立刻引起地质学家对含煤岩系旋回性沉积的广泛兴趣。Weller(1930)、Wanless 和 Weller(1932)及 Wanless 和 Shepard(1936)进一步强调这些旋回性的广泛的横向连续性及其在地层对比上的实用价值，正式提出"旋回层"(cyclothem)一词，并将其归因于地壳运动引起的海侵—海退或轨道控制的冰控全球海平面变化，从此便拉开了含煤岩系研究史上的"旋回层时代"的序幕。尽管后来曾有许多学者发现含煤岩系旋回层中的沉积单元构成与 Weller、Wanless 当初的"理想旋回层"之间有许多差异，并发现这些差异主要是构造背景及沉积环境的区域性差异造成，但 Weller(1930)的旋回层概念在几十年时间内一直强烈地影响着含煤岩系沉积学的研究。直到60～70年代，当 Fisk(1960)及其学生把现代密西西比河三角洲研究成果用于阿巴拉契亚地区的宾夕法尼亚纪含煤地层研究后，人们才认识到河道决口分流河道摆动、砂坝的迁移以及其它一些幕式或周期性作用等自旋回现象(Ferm，1974，1979；Home 等，1978)，从此便开始了"三角洲迁移模式"阶段的历史，并同时开始了旋回层的自旋回与他旋回机制的争论。到目前为止已提出了多种成煤模式。争论虽然存在，但无论是旋回层理论还是后来的沉积模式理论都为煤系沉积学的发展起了巨大的推动作用。

近年来，Vail 等(1977)，Van Wagoner 等(1988)，Posamentier 等(1988)，以及 Van Wagoner 等[5]提出层序地层学的概念体系，将旋回层的全球性特征与自旋回区域性变异灵活性很好地结合起来，建立起地层划分对比的新方法，从而也为含煤岩系自旋回机制与他旋回机制之间的争论增添了新的内容。在层序地层学思想影响下，越来越多的煤田地质学家注意到类似于河道决口、三角洲迁移等自旋回机制只能解释那些与 Weller(1930)理想旋回层不一致的局部变化，即一些分布局限的沉积特征，而不能解释那些大量存在的在整个盆地范围甚至全球性分布的沉积特征或旋回层的成因，后者显然只能用盆地动力机制或其它一些异旋回机制来解释。层序地层学与旋回地层学相结合，所建立的层序地层格架、旋回序列及其所反映的海平面变化规律等，可为含煤岩系年代地层、旋回性及盆地演化等提供可靠依据，进而也可推动聚煤作用理论的发展。因此也可以说，层序地层学的出现将开辟含煤岩系研究的新篇章。

3　含煤岩系层序地层学研究方法

3.1　高频含煤层序特征

层序地层学(Seguence Stratigraphy)主要是研究以侵蚀面、无沉积面或与其相应的整合面为界的，成因上有关的地层之间的相互关系，它是研究可在全球范围内确定年代地层格架的方法的学科。层序地层学中的4个基本控制因素是全球海平面变化、盆地沉降、沉积物供给以及气候变化等(Vail 等，1977，1987)。其中，盆地沉降可以提供沉积物可容空间，盆地沉降作用与全球海平面变化相结合则会导致相对海平面变化，相对海平面变化直接控制可容空间的变化，后者又进一步控制了沉积层序的形成。

Mitchum[6]在 Vail 等(1977)、Van Wagoner 等(1988)及 Posamentier 等(1988)等人工作的基础上，进一步总结出高频旋回层序的层序地层特征。在高频层序中，准层序大致相当于 Miall[7]的第4级和第5级旋回，分别称为第4级准层序和第5级准层序或称高频层序[6]。这些准层序以一定方式叠加而构成准层序组，准层序组中准层序的叠置型式则决定了体系域类型。由准层序组构成的体系域的边界基本与第3级旋回层序(复合层序)中的拐点一致。海陆交互相含煤岩系多属于高频层序。含煤岩系中向上变浅的第4级和第5级含煤旋回即相当于第4级准层序和第5级准层序。在含煤岩系层序地层分析中，首先根据详细的相分析确定出向上变浅的准层序特征，然后根据准层序的叠置型式来确定体系域的类型及所反映的三级海平面变化规律。在实际工作中，可通过横向追溯代表水体最浅或最深相的分布范围，或代表最浅或最深相在剖面上的发育程度，来确定体系域类型及海平面变化规律。代表水体最浅的相如古土壤，代表水体最深的相如滨外暗色泥岩、潮下石灰岩或直接为煤层。因此，古土壤层、暗色泥岩层、石

维普资讯 http://www.cqvip.com

灰岩层及煤层等分布范围及发育程度是分析层序地层特征的最基本依据。

3.2 层序地层格架与厚煤体分布的关系

低位体系域聚煤作用发生于陆棚边缘三角洲中和深切谷充填中。因为陆棚边缘三角洲和陆棚内水体能量较高和沉积环境的不稳定性，所以形成泥炭的条件并不理想，尽管有时在供沉积物越过的谷地可形成局部分布的煤层。泥炭聚集作用很可能是在低位体系域晚期阶段发生的，因为这时高地与谷地之间的地形差异开始被高地剥蚀和谷地河道加积共同作用而减低。相当常见的情况是在低位体系域末期形成不规则和不连续的煤层，这种煤层常位于随后海侵体系域中形成的厚得多并广泛分布的煤层及煤层之间沉积物之下。

虽然 Van Wagoner 等[5]认为低位体系域是主要成煤场所，但 Diessel[8]等大多数地质学家则强调海侵和高位体系域有利于形成厚煤层。据 Ryer (1984)，美国犹他州晚白垩世煤系中最厚和分布最广的煤层出现在3级旋回(层序)的海侵和海退最大点处的第4级旋回(准层序)的厚的叠加部位，这说明在犹他州，有一部分具经济价值的煤层发现于海侵体系域和早期高位体系域之间的最大海泛面附近，而另一些有经济价值的煤层出现于类型Ⅰ层序底部陆棚边缘体系域中。如果其它条件都满足，那么海侵体系域和高位体系域内部缺乏有经济价值的煤层，原因就可能是犹他州白垩纪滨线移动太快而不能发生和维持泥炭聚集作用，仅仅在海侵和海退转折点处，滨线移动速度才减慢到足以形成厚煤层。

4 海平面变化与聚煤作用的关系

大面积稳定分布的厚煤层作为含煤岩系中的一个等时面已经受到大多数煤田地质工作者的肯定[8]。进行含煤岩系层序地层分析时，对煤层在层序中的位置以及含煤岩系中层序界面性质的认识是十分关键的。过去多数人曾经把煤层放在含煤旋回层或准层序的顶部作为海水变浅后的产物，但是近来的一系列研究[8]表明，有相当一部分煤层可能形成于海平面抬升过程中，即海侵过程成煤。大面积分布的可采煤层及其上覆海相层或含动物化石层常构成典型的海陆过渡相含煤岩系旋回层，它们一般是异旋回因素控制的结果。这些异旋回机制包括气候变化、沉积物供给的变化、与岩石圈载荷变化有关的沉积速率的变化以及相对海平面的变化。盆地范围分布的含煤旋回层很可能与受全球海平面波动控制的基准面变化有关。据 Mc Cabe(1984)研究，泥炭聚集速率比大多数正常的基底沉降速率都要快，尤其对高位沼泽更是这样，泥炭沼泽只有当沉降作用变得异常快的时候或者潜水面由于某种特殊原因而突然上升的时候才会沉没，煤层与下伏沉积物之间在时间上有一个明显的沉积间断。Ramsbottom(1979)曾用全球海平面波动模式解释英国南威尔士煤田含煤岩系沉积作用，他认为潜水面的上升(由海平面上升引起)阻碍了沼泽排水而有效地防止有机质的氧化，从而又促进厚泥炭层的堆积。Hartley(1993)认为盆地范围的基准面变化受全球海平面变化的驱动，并且控制着那些盆地范围分布的煤层及含煤旋回层的形成，甚至主张以往曾被认为对含煤岩系沉积起主要作用的含煤盆地三角洲朵叶的进积和迁移作用也可能是受基准面变化的控制。Diessel[8]曾提出的海侵煤的一些表现特征，例如在煤层剖面中，镜质体反射率、结构镜质体含量、煤中硫的同位素比值及 TPI 指数等指标向上减少；结构镜质体的荧光强度、镜质体含量、黄铁矿及硫含量、煤中的碎屑显微组分(如反映异地和微异地搬运的碎屑惰性体和碎屑镜质体)、挥发分产率以及 H/C 原子比等指标向上增加。煤层顶板为深覆水海相或潮相细粒沉积(如泥岩、页岩、碳酸盐岩等)而非陆相冲积物等也是最直观的海侵成煤的标志。根据这种分析，大面积分布的以海相石灰岩或含化石泥岩为顶板的含煤旋回层序中的煤层多是在海侵过程中形成的。我们在广西晚二叠世海相碳酸盐岩煤系中已经发现一些煤层的底板直接为沉积间断面(邵龙义等，1992)或与沉积间断有关的古土壤层(黄乃和等，1994)，这更说明其上覆盖的煤层应是在随后的海侵及海平面抬升过程中沉积的。

目前，国外许多地质学家都已认识到大多数大面积分布的厚煤层常常出现在最大海侵点处或其附近(如 Ryer，1984；Tadros and Hamilton，1991；Aitken and Flint[9])。从层序地层学的观点来看，考虑到煤层堆积速率极快(4～100 a 堆积1 mm，McCabe，1984)，所以厚煤层的堆积需要有持续存在的可容空间以容纳快速堆积的煤层(泥炭)，适合成煤

维普资讯 http://www.cqvip.com

的最大可容空间的持续保持需要有潜水面和基准面的不断抬升，这种基准面的抬升又离不开海平面的抬升，因此发育较好的煤层一般都形成于最大海泛期。Hamilton 等及 Aitken 还提出与基准面变化有关的大面积分布的厚煤层底面可作为层序地层的一种边界，即海泛面（Marine flooding surface）。但 Aitken 和 Flint（1995）在解释美国 Kentucky 东部宾夕法尼亚纪 Breathitt 群的层序地层特征时，认为曾被 Ferm（1976）和 Horne（1978）解释为三角洲模式形成的大面积分布（数百 km^2）的厚煤层，实际上是潜水面上升以及伴随碎屑沉积物供给因基准面上升而中止时期的沉积，并认为在靠陆地方向的一些大面积（数十 km^2）分布的厚煤层（厚度大于2 m）代表与 Van Wagoner（1988）所称最大海泛面相当的最大海泛带（Maximum flooding zone）的层序地层位置（图1）。Heckel[10]的研究也表明，阿巴拉契亚地区宾夕法尼亚纪分布广泛的厚煤层形成于海水达到高位期间，这些厚煤层代表与西部远处（如 Illinois 和 Kansas 地区）高水位期海相单元等时的滨岸低地沉积。

综上所述，煤层的堆积保存需要有一定的可容空间作保证，同时成煤沼泽的发育又要求没有陆源

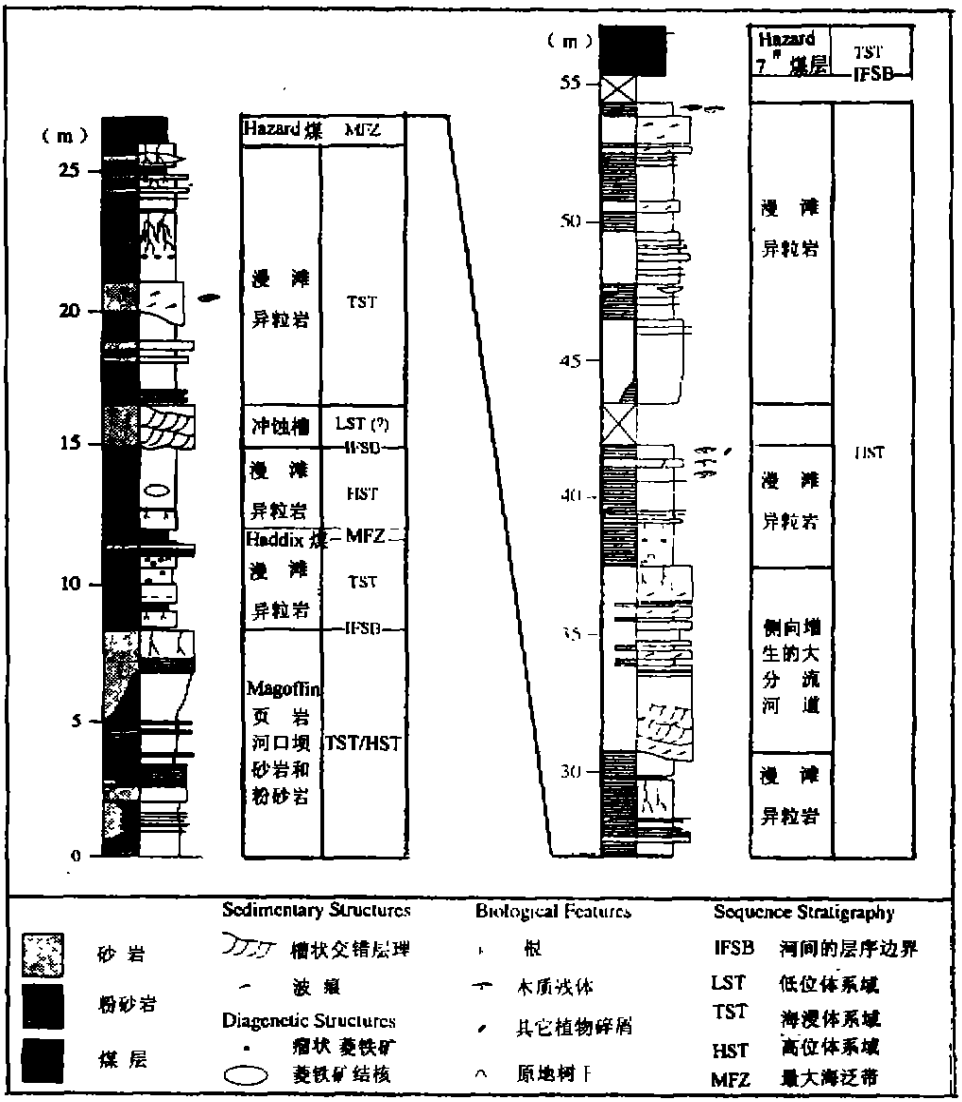


图1　美国肯塔基州东部宾夕法尼亚纪中 Breathitt 群的露头剖面层序地层学解释（据 Aitken 和 Flint，1995）

注：其中厚度较大的一些煤层被解释为最大海泛面（最高的可容空间）的上倾方向的对等物。

维普资讯 http://www.cqvip.com

碎屑沉积物的干扰。可容空间赖于潜水面或基准面的不断抬升，在滨海平原背景下的陆相和海陆过渡相成煤环境中，潜水面的抬升则与相对海平面上升密切相关。因此煤层实际上是在海平面上升过程中堆积的。在准层序划分时，煤层不是向上变浅的最终产物，最终产物应是煤层底板的根土岩或古土壤层。相反，煤层则是在基底暴露之后重新淹没过程中形成的，因此煤层应是海泛期形成的沉积。煤层底面代表海泛面，煤层应作为准层序的底部单元。以煤层之下的古土壤（根土岩）或沉积间断面为代表的暴露事件则把其下的进积期沉积和其上的海侵期沉积分隔开来。

一般来说，对滨海平原过渡相靠陆一侧的含煤岩系如阿巴拉契亚的上石炭统煤系以及我国云南东部的晚二叠世煤系，其中分布广泛的厚煤层可能是在最大海泛期沉积的；但是靠海一侧，即真正的海陆交替沉积序列中，一些大面积分布且较厚的煤层可以是最大海泛面沉积，也可以是一般的海泛面沉积，这时煤层常与其上覆盖的海相石灰岩及含动物化石泥岩层一起构成海泛带或最大海泛带沉积。如果仅仅考虑第4级准层序，那么其中的煤层可作为海侵期沉积看待，其上的海相石灰岩及含动物化石泥岩层则代表4级旋回中最大海泛期的沉积。稳定克拉通盆地的海陆交互相含煤岩系一般会发育成高频层序，其中的4级准层序可按一定型式叠置成准层序组，这些准层序组的叠置型式决定了低位、海侵及高位体系域的沉积构成，并组成更高一级即3级旋回层序。在3级旋回层序中，我们建议把煤层和其上覆的海相层看作一个统一的海洋淹没带沉积，其底面则作为海泛面，然后可根据这些海泛带的横向延伸范围及纵向发育程度来判断准层序组的叠置型式及体系域类型。这种情况在我国贵州西部的晚二叠世煤系和华北晚石炭世灰岩和碎屑岩交替的含煤岩系中比较典型。

5 展望

自从 Wilgus 等人[11]的著作发表至今，层序地层学理论已经得到迅速发展，尤其是对浅海陆棚体系的沉积序列已经有比较成熟的研究方法和实例。相比之下，深海浊积体系、陆相冲积体系、风成体系及构造活动盆地（如前陆盆地和拉伸盆地）等沉积序列的层序地层学研究则较为欠缺。对含煤岩系层序地层学方法和理论的研究仍有待继续深入，对层序地层学在陆相冲积体系中的应用目前争论较大，如有人认为河流加积和海岸上超发生于海平面下降阶段（Posamentier 和 Vail，1988），而 Shanley 和 McCabe[12]则认为发生于相对海平面变化曲线的上升一支。因为现在普遍认识到煤层及古土壤可用来指示层序界面，所以对含有煤层及古土壤的河流层序的认识将会进一步加深陆相层序地层学的研究，将来含煤岩系层序地层学的研究将会集中对煤层本身所包含的海平面或湖平面（如果是纯陆相）变化信息的研究。国际上将会对不同构造背景下的含煤盆地尤其是前陆盆地的层序地层特征作进一步深入研究，国内则会对内陆山间盆地和稳定克拉通盆地的陆相和海陆过渡相含煤岩系层序地层特征有进一步认识。

本文工作得到任德贻教授、田宝霖教授及毛鹤龄高级工程师的支持和帮助，在此深表感谢。

参考文献

1 Howell J A，Aitken J F eds. High Resolution Sequence Stratigraphy：Innovations and Applications. Geological Society，London，Special Publication 1996；(104)：371

2 Hesselbo S P，Parkinson D N eds. Sequence Stratigrapyh in British Geology. Geological Society，London，Special Publication，1996；(103)：277

3 Gibling M R，Bird D G. Late Carboniferous cyclothems and alluvial paleovalleys in Sydney basin，Nova Scotia. Geological Society of America Bulletin，；(1994)；(106)：105～117

4 Rahmani R A，Flores R M 等著，李濂清，李思田等译. 煤和含煤地层沉积学. 北京：地质出版社，1984

5 Van Wagoner J C，Mitchum R M *et al*. Siliciclastic sequence stratigraphy in well olgs，cores，and outcrops：concepts for high-resolution correlation of time and facies，AAPG，Methods in Exploration Series，1990；(7)

6 Mitchum R M，Van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns：sequence stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. Sedimntary Geology，1991；70：131～160

7 Miall A D. Stratigraphic sequences and their chronostratigraphic correlation. Journal of Sedimentary Petrology，1991；61：497～505

8 Diessel C F K. Coal-bearing depositional systems-coal facies and depositional environments. Springer-verlag，1992

维普资讯 http://www.cqvip.com

9 Aitken J F, Flint S S. High-frequency sequences and the nature of incised-valley fills in fluvial systems of the Breathitt Group (Pennsylvanian), Appalachian Forland Basin, eastern Kentucky. In: Dalrymple R W, Boyd R, Zaitlin B A eds. Incised Valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences. SEPM Special Publication, 1994; (51): 353～368

10 Heckel P H. Glacial-eustatic base-level —climatic model for late Middle to Late Pennsylvanian coal-bed fromation in the Appalachian basin. Journal of Sedimentary Research, 1995; B65 (3): 348～356

11 Wilgus C K 等著，徐怀大等译. 层序地层学原理. 北京：石油工业出版社，1993；526

12 Shanley K W, McCabe P J. Alluvial architecture in a sequence sratigraphic framework—a case history from the Upper Cretaceous of southern Utah, U. S. A. In: Flint S S, Bryant I D eds. The geological modelling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 1993; (15): 21～56

（收稿日期　1997—02—17）

THE STATUS AND PROSPECT OF SEDIMENTOLOGY AND SEQUENCE STRATIGRAPHY RESEARCH ON THE COAL-BEARING STRATA

Shao Longyi　Dou Jianwei　Zhang Pengfei

(Beijing Graduate School, China University of Mining and Technology)

Abstract　Based on the review of the sedimentology research history of coal-bearing strata, both the sequence stratigraphy method of coal-bearing strata and the relationship between sealevel change and coal accumulation are expounded. It is emphasized that the thick, extensively distributed coal seams were actually formed in the process of base level or sea level rise. The bottom of coal seam is a marine flooding surface. The paleosols (rooting clays) underneath the coal seams or the discontinuous surface represent the exposure events which discriminate between the underlying prograding sediments and the overlying transgressive ones.

Keywords　sequence stratigraphy; coal-bearing strata; sea level; status; perspectives

（上接第12页）

A FRACTAL MODEL FOR THE ESTIMATION OF ROCK FRACTURE SURFACE ROUGHNESS

Xu Zhibin　Xie Heping　Wang Jiyao

(Department of Mineral Resources & Engineering Science, College of Mineral Resource & Environment Science, CUMT)

Abstract　A simpler fractal model to estimate the joint roughness coefficient (*JRC*) is suggested. It can be applied to simulate rock discontinuity profiles. The rougher the surface, the greater the fractal dimension (*D*). An empirical equation between *JRC* and *D* was established. Using this equation, the *JRC* values of 6 joint profiles were estimated and they were very close to the typical *JRC* values.

Keywords　rock; fault planes; roughness; fractal; fracral dimension