www.
geojournals.cn/georev

约代尔旋回形成机制之我见

——以华北克拉通晚古生代煤系沉积为例

石彦强

北京大地高科地质勘查有限公司,北京, 100040

内容提要:“约代尔”旋回是由石灰岩、煤层和陆源碎屑岩组成的,以煤层顶板与海相灰岩直接沉积接触为特征的旋回。就此旋回,以往研究给出了截然不同的多种成因认识。为了探寻旋回的真正形成机制,将地史聚煤期沉积特征与现代植被、泥炭沼泽、碳酸盐岩沉积规律相对比分析,认为地史聚煤期植物异常繁盛,占据了盆地演化阶段的主导地位。在先遣植被的禁锢下,盆地输入陆源碎屑极其贫乏,形成动态泥炭沼泽;泥炭沼泽覆水后,很浅的水体也非常清澈,水生生物与已沉积有机质共同作用,以及随后的成岩胶结促进了石灰岩的形成。煤层顶部至石灰岩下部代表的是无碎屑输入的滨海,水深逐渐增加的沉积序列,石灰岩与下伏煤层为连续沉积。约代尔旋回是先遣植被限制了陆源碎屑输入,导致海水清澈的、正常的海进海退沉积。石灰岩和煤层虽然厚度不是很大,但横向连续性相当好,向陆源方向煤层增厚、石灰岩变薄,向海方向煤层变薄、石灰岩增厚,约代尔旋回向陆可以形成厚煤层。约代尔旋回真相的揭示,为沉积古地理和层序地层研究,以及为准确的区域对比、探索聚煤规律奠定了坚实的基础。

关键词:约代尔旋回;先遣植被;动态泥炭沼泽;陆源碎屑;动态聚煤模式;碳酸盐岩沉积;华北克拉通

“约代尔”旋回(Yoredale cycle)是指由石灰岩、陆源碎屑岩和煤层组成的,以煤层顶板与海相灰岩直接沉积接触(俗称石灰岩压煤)为特征的旋回沉积。该旋回最早由 Wilson(1975)在英国彭奈恩山脉的约代尔—温斯利代尔地区研究石炭纪韦宪期地层时命名(汪寿松等, 1989;曾勇,1994)。其实 Udden 1912 年就在北美伊利诺斯煤田石炭纪煤系中揭示了这样的旋回,并指出其结构为“根土岩⟶煤⟶石灰岩或海相页岩⟶粉砂岩、砂岩⟶根土岩”的重复层序(Rahmaai,1988);以后在北美内陆宾夕法尼亚、印第安纳和中国华北克拉通晚古生代等含煤地层中均发现同样的旋回。

这样的旋回成因历来得到高度关注,众说纷纭。其中研究较详细的代表性观点有:Moore(1959)的稳定陆架附近三角洲侧向迁移(转引自汪寿松等,1989);何起祥等(1991)的受限陆表海峡口启闭引起的突发漫式海侵;张鹏飞等(2001)的渐进型海侵;李增学等(2005)的快速海侵;邵龙义等(2008)海相层滞后时段聚煤;李晓静等(2019)非对称性成因。以上都从旋回结构层面分析了其成因,为了揭示该旋回形成的本质,有必要对约代尔旋回的沉积机制进行深入的分析。

1 约代尔旋回的沉积特征分析

约代尔旋回常见于陆表海聚煤盆地,但是在内陆煤盆地也有相似的沉积特征。

1.1 陆表海聚煤盆地

——以华北克拉通聚煤盆地为例

在华北克拉通晚古生代陆表海聚煤盆地中,约代尔旋回广泛发育。特别是太原组,基本为该旋回的多个叠合,旋回从北向南逐步增多。据陈晋镳等(1997),由盆地北边内蒙古准格尔—山西大同—北京西山一带为 1 个旋回,到太原西山为 3~4 个旋回,晋城附近 8~10 个旋回,向南到苏北徐州一带石灰岩最多可达 18 层之多。

每个旋回由根土岩、煤层、石灰岩或泥质灰岩,向上过渡为灰黑色钙质泥岩、泥岩或粉砂质泥岩沉积,再向上为深灰色粉砂岩、浅灰—灰白色中细粒砂岩等。有时某一岩性可能缺失,但煤层及其上覆石灰岩的结构是稳定的,煤层与顶板石灰岩之间有时会夹薄层黑色泥岩以示过渡。

1.1.1 煤层底板

煤层底板多见根土岩,其下为一套水深向上变浅的碎屑粒序层系。平面上,由北向南层系厚度逐

收稿日期:2020-12-01;改回日期:2021-08-05;网络首发:2021-08-20;责任编辑:赵雪、章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.08.013
作者简介: 石彦强, 男,1966 年生, 高级工程师,主要从事煤炭地质勘查与研究; Email:shxshyq@126.com。

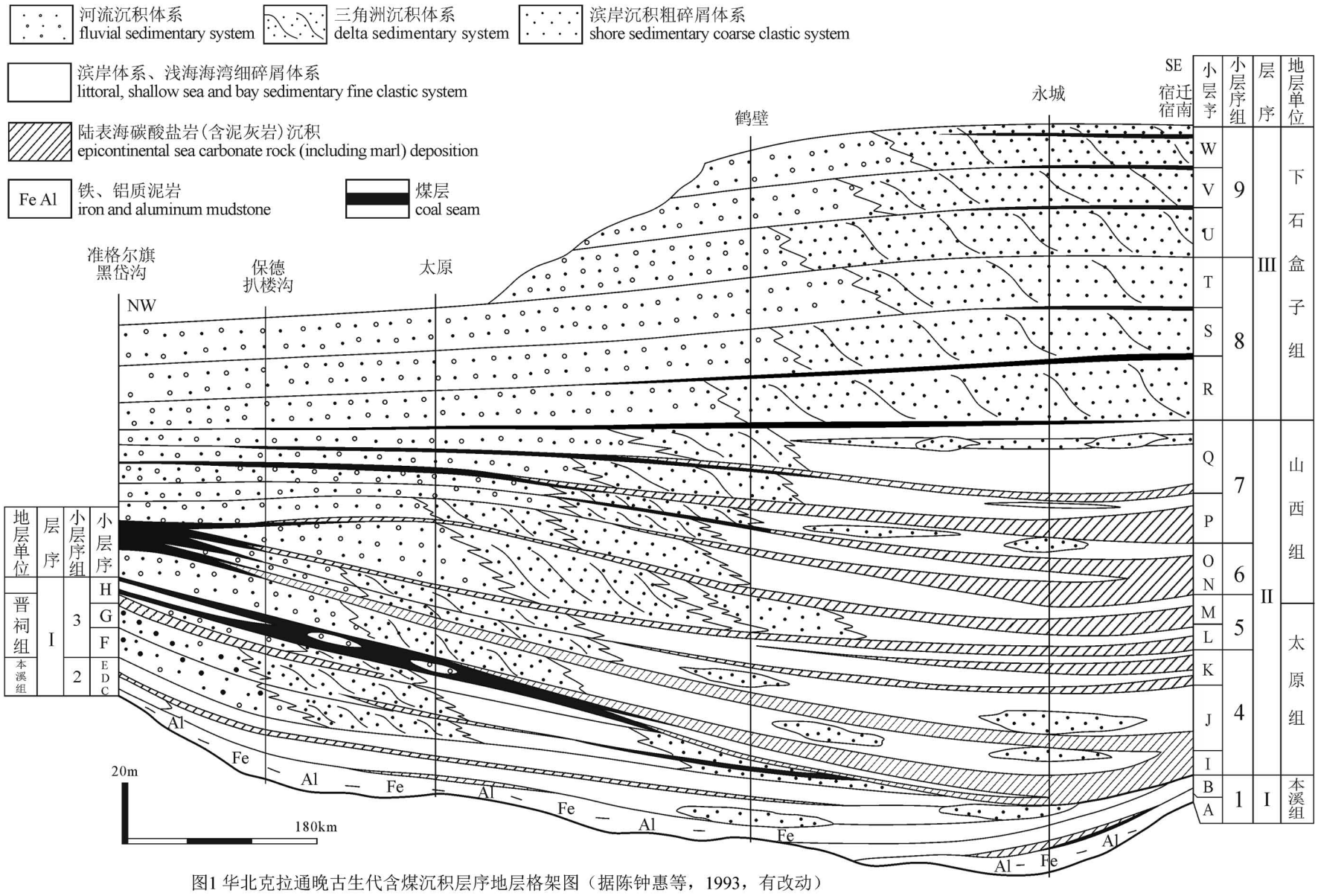


图1 华北克拉通晚古生代含煤沉积层序地层格架图（据陈钟惠等，1993，有改动）

Fig. 1 Sequence stratigraphic framework of Late Paleozoic coal bearing sediments in North China Craton (revised from Chen Zhonghui et al., 1993#)

渐变薄，砂岩层位逐渐提高、厚度变薄、粒度变细、成熟度变好。沉积环境由河流冲积平原——上三角洲平原——下三角洲平原——三角洲前缘——潮坪潟湖发展，煤层形成于三角洲平原—废弃三角洲前缘—废弃潟湖潮坪—废弃碳酸盐岩台地之上（图 1）。根土岩往往代表的是无沉积间断。

1.1.2　煤层

约代尔旋回中煤层层位区域稳定，但煤层结构复杂，为条带状、线理状结构，局部见透镜状；煤层厚度变化较大，分岔、变薄、尖灭现象明显，总体依照南海北陆呈北厚南薄的趋势。

煤中煤岩组份以镜质组为主，惰质组贫乏；煤的灰分较低、硫分较高，其中主要为黄铁矿硫，一般为高硫煤。

煤层与上覆石灰岩之间不存在暴露标志、为连续性沉积。张鹏飞等（2001）研究发现煤层形成时明显受到海水的影响，煤层上覆石灰岩形成中亦有淡水参与，说明煤层及其顶板灰岩是连续的渐进型海侵；据程保洲（1992），太原西山斜道沟太原组 7 号煤层厚 1.60 m，异常大于区域厚度，煤中局部夹大量钙质煤核，顶部由水平纹理的煤，过渡为煤与生物粉屑薄互层的韵律纹层，向上炭质含量减少，逐渐过渡为较纯的顶板 L4 石灰岩，说明该处在海侵淹没泥炭沼泽过程中遭受了大潮汐的改造，沿岸植物碎屑和泥炭形成泥炭坪（图 2）（程保洲，1992）；偶然性风暴潮可以将泥炭和植物残骸搬运到潮下以及更远的地方（胡益成等，1999）；石灰岩与下伏煤层直接接触（图 3），局部见风暴潮形成的冲刷面，如山

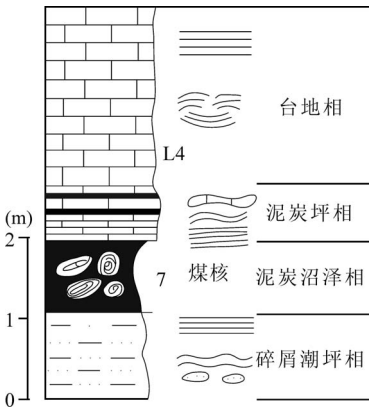


图 2 太原西山斜道沟约代尔旋回剖面（据程保洲，1992）

Fig. 2 The Yoredale cycle profile in the slope gully of Xishan, Taiyuan (from Cheng Baozhou, 1992#)

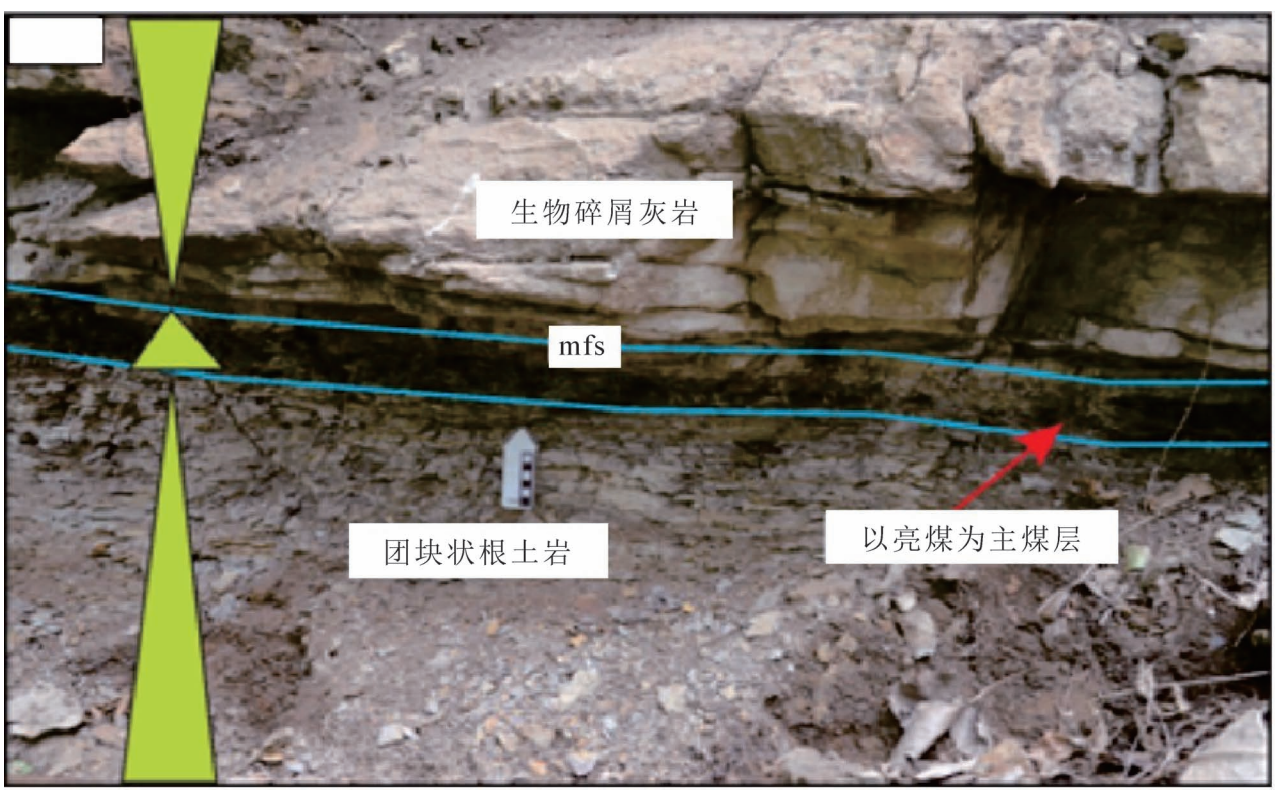


图 3 山东淄博煤田露头的约代尔旋回（引自吕大炜等，2015）

Fig. 3 Yoredale cycle of outcrop in Zibo coalfield, Shandong (from Lü Dawei et al., 2015&)

东、山西某些煤田煤层海蚀成的“蛤蟆顶”(杨起等,1979)。

1.1.3 煤层顶板石灰岩

煤层顶板石灰岩厚度则是由北向南增加。据陈晋镳等(1997),石灰岩由数十厘米到 3~5 m 者居多,少数灰岩厚度可达 10 m 以上,个别复合层达 30 m。灰岩中普遍富含生物化石及其碎屑,主要有蜓类、腕足类、珊瑚、瓣鳃类、海百合、牙形刺等,这些窄盐性的海洋生物的大量发育标明古海水为正常盐度。据陈钟惠等(1993),动物化石及其碎屑含量 15%~40%,最高可达 92%,以破碎型、中等破碎至较完整型为主,常密集成堆或定向排列。自北而南,生物碎屑总体含量增加,各门类也增多,但广盐性的介形虫和双壳类含量变化不大。基质主要为泥晶方解石(灰泥),含量 40%~90%,结晶细小,扫描电镜下可见磨蚀痕迹。灰岩中陆源碎屑以黏土和粉砂级为主,局部地区见有细砂颗粒。陆源碎屑含量在北部有明显向南减少的趋势,在南部则变化不大。更主要的是石灰岩中普遍含炭质。一些灰岩层的顶、底部有较多细小的黄铁矿化植物根化石,炭质和黏土矿物含量也增加,这说明沉积环境是逐渐变化的;灰岩下部、上部主要为双粒度双模式型微相,而中部主要是双粒度单模式—双粒度双模式过渡型,反映了较浅弱动荡水——>相对低能较深水——>较浅弱动荡水的旋回性沉积;从粗枝藻科的伞藻类多出现在灰岩的中、上部,推测灰岩沉积时期水深应大于 3~5 m 而小于 12~15 m;古盐度为 7‰~37.65‰,古水温 16.9~23.2 ℃。

1.2 内陆含煤盆地的相似沉积

在我国的一些内陆含煤盆地中也曾发现这样的旋回层序。据李增学等(2005),云南小龙潭新近纪褐煤盆地,含煤岩系明显三分,即:下段以坡积洪积相砂砾岩充填为主;中段为湖沼相沉积,范围逐步扩大,盆地连成一体,并演变为泥炭沼泽,形成巨厚煤层,煤体呈透镜状,以盆地中部最厚,约 220 m,向周边变薄尖灭;上段以湖泊相泥灰岩为主,含淡水动物化石,盆地沉积范围最大。由此说明约代尔旋回不仅局限于陆表海聚煤盆地。

1.3 根据沉积特征对约代尔旋回成因的思考

在约代尔旋回中,煤层底板为一套水深变浅的沉积序列,而顶板直接覆盖石灰岩。一般认为,煤层是接近水面附近的泥炭沼泽演化的,石灰岩大多认为是较深水沉积,煤层与其顶板石灰岩之间似乎缺少了水体逐渐加深的半个旋回。如果仅从岩性结构的表象解释为快速海侵,由此得出海水快进慢退的抽风式旋回运动,这样的推论违背了自然旋回规律,是难以自洽的;把多层叠合的约代尔旋回全部解释为峡口启闭突发式海侵更说不过去;三角洲周期性迁移也只能是局部充填而已。

那么,在渐进型海侵过程中,煤层与石灰岩之间为什么没有水深增加的碎屑沉积序列呢?或者说碎屑沉积为什么没有如约而至?何来如此回天之力?

有时候现象与本质往往相去甚远,需要深度挖掘,像扒洋葱一样,层层扒下去,去伪存真、抓住事物的本质,才能得到正确的认识——这就是聚煤时期,植被、泥炭沼泽对陆源碎屑的限制作用。

2 约代尔旋回的主控因素——动态聚煤模式

2.1 现代植物对环境的作用

现在是打开过去的最好钥匙。海岸红树林破坏导致海水清澈度下降珊瑚礁白化;人类早期的焚林而猎和后来的焚林而田、过度砍伐、过度放牧,对环境和气候造成严重的破坏,而近年来退耕还林和植树造林、治沙工程使黄河水逐渐变清、中西部气候好转,均凸显植物对环境的作用。

(1)植物可以适应环境:植物不仅在环境适宜的条件下,得以快速生长;而且据袁明等(2014),植物受体类激酶在植物生长发育和防御反应中起着非常重要的作用,使植物能够克服环境胁迫,在不利的条件下也能适应性生长。

(2)植被能够保持水土:植被树冠、枯枝落叶层与根共同作用,大大减弱了地表冲刷。主要是植物根系对基底碎屑的控制,据朱菁等(2017)研究,植物根系分泌的大量多糖类物质和高分子粘胶物质具有强大粘结作用,与大量的发达的根系束缚和包裹增强土体抗冲性能;红树林发达的根系、茂密的丛冠等对海浪具有压服作用,缓解了海水对岸堤的冲蚀(江锐捷等,2020);植被和密集的网状根系阻滞了河流对岸坡的冲蚀能力,降低了河道决口、侧向迁移的几率。

(3)植被涵养水源:植被保持水土的同时也截留大气降水、延缓地表径流,增加吸收和下渗,储蓄水分;植物形成的植被、泥炭沼泽具有很强的持水能力,达到 300%~400%,从而调节河流流量、减缓汛期洪峰、提高地下水位;泥炭沼泽深部泥炭化作用形成大量胶质体和沉淀析出的黏土夹层,及其底板土壤沉淀层,均可视为很好的隔水层,阻止了沼泽水的

下渗，减缓了其横向流速，使沼泽水体能长期保持较高的水位（石彦强等，2009）。

（4）植被调节气候：据曾红玲等（2010）研究认为，植被通过改变地表特征参数，从而改变地表能量通量的收支，进而会对气候和大气环流产生影响。而且，这种影响不只是局限在陆地表面及近地对流层，还可以向上延伸到对流层的中高层。植被的存在增强了三圈环流，从而使现有的气候和植被分布更加稳定。

2.2　地史聚煤期的植物

地质历史时期的晚石炭世—二叠纪、侏罗纪、晚白垩世—新近纪等聚煤期，分别是孢子植物、裸子植物、被子植物等演化更替后大爆发的鼎盛阶段。那时的植物体型高大且生长旺盛，又尚未遭受天敌、病害等阻碍，堪比现代物种入侵，本能激发、迅猛繁衍、疯狂蔓延。这样的生态发展，无论从固碳量还是从植物的丰度、高度，或者从形成的煤层厚度和范围广度推论，都是远高于现在的、超乎想象的演化。

2.3　动态聚煤模式

十几年前笔者为了探寻可采煤层的成因，根据煤层发育规模、顶底板环境变化和地质历史时期植物繁盛和扩展变化，推导出了聚煤时期，植被和泥炭沼泽在沉积过程中的主导作用，提出了动态聚煤模式（石彦强等，2009）。

动态聚煤模式表现在：成煤期植物和泥炭沼泽，已经从脆弱的遭受河流、海浪、潮汐等碎屑流体的限制、冲刷、改造的被动阶段，转向主动限制河流的侧蚀、迁移、汇聚，制压海浪潮流的发展高度；是由个体孳生发展为群体效应的过程；是脆弱的现代植物生态演化为强劲的、自我滋育的控盆植被体系的转化发展过程；是聚煤期质的飞跃。

此时的植被大大消减了河流的携带能量，压服海浪、潮汐的冲刷。植被限制了基底碎屑活动，调节了环境水文，进一步发育改善了区域气候，植物与环境持续互动并协同演化，致使植被横向连片、纵向扩展到水域和陆源。至此，由植物形成的植被、泥炭沼泽，已经占据了盆地演化阶段的主导地位，植被将盆地和陆源碎屑牢牢禁锢在原地，促使地表水细流化、缓流化、低能化、清澈化，潜移默化、润物无声，滋育宏大的植被、泥炭沼泽长期稳定发育。如毛节华等（1999）华北克拉通晚古生代的 B、D 煤组煤层几乎遍布超过 1500000 km^2 的聚煤盆地，反映了当时植被泥炭沼泽的发展规模。

3　约代尔旋回形成过程分析

3.1　海退后期

海退后期，在植被和泥炭沼泽作用下，海岸输入碎屑贫乏。海浪和潮流充分改造有限的海岸碎屑，形成平坦广阔的海滩湖泽。随着海退，植被、泥炭沼泽迅速占据废弃的基底环境，由三角洲平原向三角洲前缘、前三角洲潟湖海湾推进，进一步占据废弃的碳酸盐台地之上发育，形成辽阔的跨基底环境发育的动态泥炭沼泽。

3.2　海进过程

3.2.1　先遣植被的控制作用

下一次海侵，水体淹没泥炭沼泽，在平坦清澈的滨岸带生长着稠密的海草等水生植物、漂浮着大量植物残骸，更加之海岸附近类似于红树林植被的网状结构，压服海浪和潮流，保护才形成的泥炭层不被冲蚀，同时海水顶托沼泽淡水向上滋育泥炭沼泽垂向发育。

同样泥炭表层稠密的植被丛冠阻滞了海水推进的速度，上升的海水阻滞并反推沼泽淡水向上扩展。随着海侵水位上升，基底碎屑活动势能减小，而向陆推进的先遣植被，进一步禁锢基底碎屑，影响区域水文和气候，可扩展到物源区。使动态泥炭沼泽占据了河流冲积平原、间湖以至冲积扇前缘的广大区域发展。

沼泽河流和潮汐海流携带的植物残骸、泥炭碎屑，与偶然性风暴潮灾变事件冲蚀、撕裂的滨海植被及泥炭层，甚至尚未固结好的石灰岩硬底，运移到盆地更远的地方，分选性沉降沉积。其中黏土等碎屑物质因比重较大，先沉积下来形成夹矸；泥炭和植物残骸比重较小，会在海面上漂浮一段时间，等植物残骸组织空隙充分饱水，海水澄清才会慢速下沉累积，形成异地煤，部分沉积于泥炭沼泽附近形成微异地煤。

3.2.2　煤层顶板石灰岩的形成机制

地史上，大部分碳酸盐岩是由分泌碳酸盐的生物形成的，其中不少是光合作用的副产品（颜佳新等，2019），显生宙以来更是如此。动态泥炭沼泽覆水后，因为先遣植被限制了陆源碎屑输入，使很浅的水体也非常清澈。在清澈的海水中生长着水生植物、水生动物、微生物，与已沉积有机质共同作用，以及随后的成岩胶结促进了石灰岩的形成（图 4）。其中：



图 4 植被保护下的现代浅海碳酸盐岩沉积示意图

Fig. 4 sedimentary map of modern shallow sea carbonate under vegetation protection

照片来源/Photo from: 佚名/Anon

(http://m.thepaper.cn/rss_newsDetail_7549845? from=sina)

3.2.2.1 沉积有机质

泥炭沼泽覆水后,海岸附近受海浪和潮流搅浑,海水被泥炭腐殖酸酸化,钙化作用下降,不利于石灰岩形成。正如邵龙义等(2008):"很多学者研究发现,全新世冰期后海平面上升到佛罗里达陆棚上之后,碳酸盐并没有马上沉积下来,而是在数千年之后才沉积下来,在这数千年甚至更长的滞后时段中,红树林泥炭则大量发育形成了红树林泥炭层,最终的层序是沉积间断面—红树林泥炭层—海相碳酸盐岩沉积"。

而在较深的海水中,据 Erik Fligel(埃里克·弗吕格尔,2010),有机质在碳酸盐的形成过程中起重要作用。有机质微生物腐烂的氨化作用引起水体 pH 值升高,利于钙质晶体的沉淀;有机质还导致文石沉淀,一些特定有机质诱发方解石结晶。

3.2.2.2 水生植物

当最早的绿色植物于 3.5 Ga 前出现时,地壳才有碳酸盐岩沉淀(张昀,1998)。

海草可在水深 2~15 m 范围内大量繁殖,对海水盐度的适应范围很宽。如现代海草席可分布于潮间到浅潮下带的较宽范围(埃里克·弗吕格尔,2010)。根植在淹没泥炭层上的水生植物营养丰富、生长茂盛,形成致密的海底草席,不仅降低水流速度,消耗广海传来的波能,并捕获经过的悬浮颗粒,而且吸收海水中的 CO_2,促使碳酸盐沉淀,同时呼出氧气,有利于海洋生物快速大量繁殖;植物根系细胞内钙化作用和根系周围细胞钙化作用也形成根生钙质壳(埃里克·弗吕格尔,2010)。

3.2.2.3 水生动物

海草叶片有利于底栖生物的附着和生长。如藻类、有孔虫、苔藓虫、海绵、珊瑚、双壳类、腹足类和龙介虫等,这些附着生物不仅构成了各种生物包壳,还能产生大量的松散碳酸盐沉积物,如在地中海地区中—新生代碳酸盐岩。其中细菌、藻类、小型有孔虫、苔藓虫和刺毛海绵是石炭纪二叠纪结壳生物群的重要组成部分。

海洋生物不仅形成生物礁和微生物岩,而且同样形成大量泥晶碳酸盐,如骨屑颗粒解体和泥晶化,在热带浅水地区常常出现白色碳酸盐悬浮物—"海雪",是浅水细粒碳酸盐的主要来源;附着生物的分解是佛罗里达海湾灰泥的主要来源(颜佳新等,2019;埃里克·弗吕格尔,2010)。

虽然未固结的、松散的碳酸盐沉积物仍然可以受到水动力搬运与扩散的影响,但生物骨架构造和生物包粘、捕获、障积作用,包括有机质早期成岩胶结,均可以抵抗波浪和海流的改造,其堆积范围可以直达海岸附近。其中①潮下台地或近海浅滩,生活在植物叶片上的有孔虫、珊珊状藻、双壳类和腹足类等,构成海浪蛤草席,相应的沉积物是分选差的生屑泥粒灰岩。②潮间坪被大叶藻属海草形成的草席覆盖,它们在潮间带下部往往形成比较稀疏的群落,而

在潮间带上部形成稠密的海草席。沉积物是分选很差的、含内栖软体类骨屑砂和陆源碎屑混合物。③潮间带顶部的红树林带与潮坪向陆方向相连，形成典型的纹层状灰泥岩、假角砾岩和“根土岩”。如现代美国南佛罗里达的灰泥海岸，被认为与古代泥晶丘相似（埃里克·弗吕格尔，2010）。

3.2.2.4　微生物

海洋细菌的生命过程和细菌分解有机质都能导致碳酸钙的沉淀，其中“灰泥丘”就是微生物的强烈作用形成的。微生物捕获（黏结）沉积颗粒、有机组织的生物矿化作用，以及之上的表层沉淀作用形成碳酸盐岩沉积；强烈光合作用，加上高密度的生物类群，可以引发碳酸盐泥以白垩的形式沉淀下来，稳固于海底蓝细菌席中；蓝细菌和藻类的光合作用驱动微生物席发育，在微生物席中抓获并形成细粒碳酸盐（贡云云，2017）。微生物席是能够适应各种环境条件的活生生的沉积物表面，是地球生态系统的最古老的生物成因沉积构造，在广阔的非海洋环境和海洋环境都有出现；在漫长的时空条件下，微生物席具有惊人的持续性（埃里克·弗吕格尔，2010；梅冥相，2014）。

大多异养细菌都可以引发碳酸钙沉淀。原核蓝细菌在适宜的微生物席，形成固体泥晶钙管，从欠饱和水中摄取光合重碳酸盐导致在微生物席中发生泥晶沉淀作用（埃里克·弗吕格尔，2010）。

3.2.2.5　早期成岩作用

碳酸盐早期成岩作用优先发育于潮坪灰岩中。明显的标志包括：①重力（微钟乳石）胶结物，例如，在潮间带鸟眼孔隙中的滴水石胶结物；②潮上带海滩岩颗粒间的新月形胶结物；③淡水渗流豆粒；④形成于潮间带和潮上带表面的方解石或文石质泉华包壳；⑤在受冲浪影响的底质上的不规则碳酸盐结壳，常与豆粒相伴生（埃里克·弗吕格尔，2010）。

大多数浅海相碳酸盐岩通过溶解和沉淀来实现其石化过程；海水潜流成岩作用发生在浅海或深海的海底或海底之下以及潮坪和海滩环境（埃里克·弗吕格尔，2010）。

综合以上分析，海水碳酸盐在被淹没的泥炭层表面能快速沉积形成钙质“硬底”，进一步发育形成横向稳定的石灰岩顶板，保护下覆泥炭层免受后来海水及突变事件的长期侵蚀。

由此推断，先遣植被限制了陆源碎屑发育，煤层顶部至石灰岩下部代表的是，无碎屑输入时，水深逐渐增加的沉积序列。在大多数石灰岩垂向上能发现海水由浅——>深——>浅，水动力由动荡——>相对低能——>弱动荡水的旋回性特征；局部可能因分析鉴定手段，或灰岩较薄、偶然性风暴潮搅混等原因，抹去了垂向变化，从而误导了许多研究者。

3.3　海退过程

海进后期，物源区边坡及碎屑遭受先遣植被禁锢，累积了高耸的势能；海退后，基底和陆源碎屑活动势能愈加增大，在大地震、大暴雨和物源区构造活动加剧等突发事件作用下，陆源碎屑重新活跃，冲破植被限制，碎屑像脱缰的野马可以运移到盆地更远的地方，而上游暴露严重，可能遭受剥蚀。

3.4　约代尔旋回沉积规律的发现

约代尔旋回是在先遣植被保护下的，以动态泥炭沼泽占主导地位的正常的海水进退旋回沉积，形成根土岩——>煤层——>石灰岩/海相泥岩——>向上变浅的碎屑岩——>根土岩的沉积旋回。因此，约代尔旋回煤中硫分普遍较高，向陆源方向煤层增厚、石灰岩变薄直至尖灭；向海方向煤层变薄直至尖灭、石灰岩增厚（图 5），甚至其间碎屑沉积物也尖灭，致使上下旋回石灰岩合并（陈晋镳等，1997）（图 1）；而在约代尔旋回向陆可以形成厚煤层（陈钟惠等，1993；程保洲，1992）。

石灰岩和煤层在此消彼长的基础上，又存在互利互惠的共生关系。即：石灰岩和煤层虽然厚度都不是很大，但石灰岩压煤层的结构组合的横向稳定性非常好，可以连续追踪几百到上千千米（陈钟惠等，1993；程保洲，1992），连续性相当好（图 1）。

4　问题讨论

（1）旋回界面位置的确定，历来是各家争论的焦点；层序地层倡导以不整合面分界。根据约代尔旋回的成因，煤层与根土岩之间常常是一个无沉积间断面，建议把旋回/小层序界面放在根土岩顶部比较合适。

（2）地层数字定年，天文旋回导致的气候变化与海洋、湖泊沉积韵律和生物更替关系的研究越来越得到学界重视。约代尔旋回真相的揭示，为精准的与天文旋回比对，探索深层的旋回控制因素，准确标定地层年代奠定了良好的基础。

（3）许多“硅质碎屑—碳酸盐岩混合沉积”地层（徐伟等，2019），大多被解释为风暴潮等动力将陆源碎屑异地搬运到碳酸盐台地的结果；如果用约代尔旋回沉积机理分析可能会更加合理。由此推测许多碳酸盐岩和碎屑岩交替混合沉积，向陆源追索有

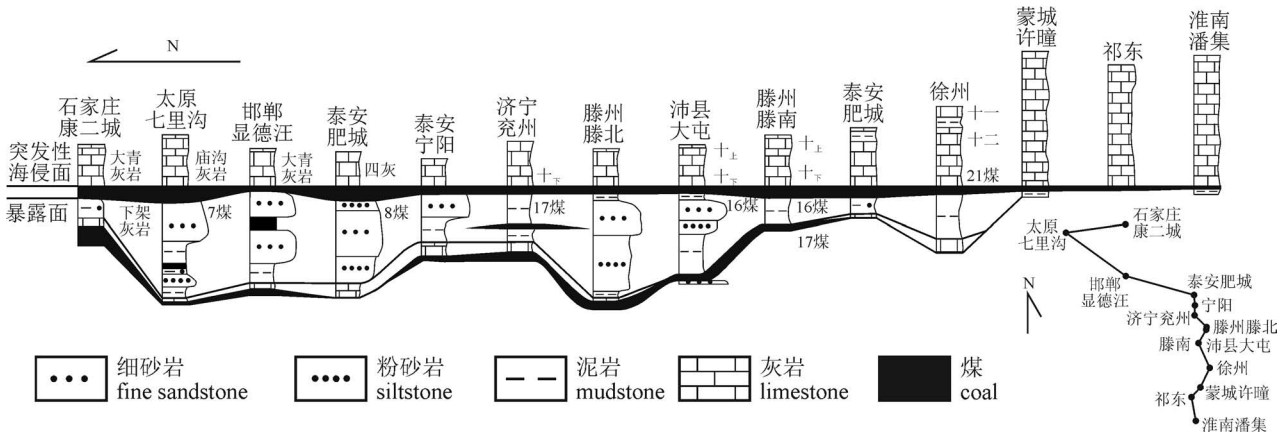


图 5 华北克拉通约代尔旋回南北向变化规律(引自吕大炜等,2015)

Fig. 5 Variation regularity of the Yoredale cycle in North China Craton (from Lü Dawei etal., 2015&)

可能找到典型的约代尔旋回和煤层,这有待进一步研究证实。

5 认识和结论

(1)地史聚煤期是植物大爆发的鼎盛时期,植物限制了基底碎屑活动,并与环境协同演化,致使植被横向连片、纵向扩展到陆源和水域,植物占据了盆地演化阶段的主导地位。在先遣植被的禁锢下,地表水细流化、缓流化、清澈化,导致海岸输入碎屑极其贫乏,形成平坦广阔的海滩湖泽,随着海水进退发育动态泥炭沼泽。

(2)在先遣植被保护下,动态泥炭沼泽覆水清澈,水生生物与沉积有机质、成岩胶结共同作用促进了石灰岩的形成。

(3)成煤植物限制了陆源碎屑发育,煤层与上覆石灰岩代表了无碎屑供给的、正常的海进过程沉积。约代尔旋回代表的是先遣植被限制了陆源碎屑后的正常的海水进退沉积。

(4)约代尔旋回形成机制的研究,揭示了旋回结构的变化规律和煤中高硫的真正原因,为向陆方向寻找厚煤层提供了理论依据;为沉积古地理和层序地层分析,以及为准确的区域对比、探索聚煤规律奠定了坚实的基础。

致谢:毛小平教授和章雨旭研究员审阅了文稿,提出了许多宝贵的修改意见,陈浩高级工程师重新转绘和修改了图件,孙乔琪工程师进行了英文翻译和修改,在此一并致以衷心的感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "**&**" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "**#**" is in Chinese without English abstract)

埃里克·弗吕格尔. 2016. 碳酸盐岩微相分析、解释及应用(第二版). 马永生,刘波,郭荣涛,等. 译. 北京:地质出版社:1~832.

陈晋镳,武铁山,张鹏远,游文澄,等. 1997. 华北区区域地层. 武汉:中国地质大学出版社:1~199.

陈钟惠,武法东,张守良,张年茂,马晋贤,葛立刚,等. 1993. 华北晚古生代含煤岩系的沉积环境和聚煤规律. 武汉:中国地质大学出版社:1~153.

程保洲. 1992. 山西晚古生代沉积环境与聚煤规律. 太原: 山西科学技术出版社:1~253.

贡云云. 2017. 蓝细菌钙化作用. 地质科技情报,36(2):112~118.

何起祥,业冶铮,张明书,李浩. 1991. 受限陆表海的海侵模式. 沉积学报,9(1):1~9.

胡益成,廖玉枝. 1999. 华北盆地南部早二叠世早期聚煤作用的成因机制. 地学前缘,6(S1):111~115.

江锐捷,程鹏,高建华,王爱军. 2020. 红树林对潮流底边界层动力过程的影响. 海洋地质前沿,36(4):37~44.

李晓静,刘莹,王东东,刘海燕,刘福胜. 2019. 能源岩系沉积序列中旋回类型及其非对称性成因. 中国煤炭地质,31(10):1~7.

李增学,魏久传,刘莹编. 2005. 煤地质学. 北京:地质出版社:1~254.

吕大炜,李增学,王东东,刘海燕,贾强,王平丽,于得明,吴晓燕. 2015. 华北晚古生代陆表海盆地海侵事件微观沉积特征及成煤探讨. 沉积学报,33(4):633~640.

毛节华,许惠龙. 1999. 中国煤炭资源预测与评价. 北京:科学出版社:1~465.

梅冥相. 2014. 微生物席的特征和属性:微生物席沉积学的理论基础. 古地理学报,16(3):285~304.

邵龙义,鲁静,汪浩,张鹏飞,韩德馨. 2008. 近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展. 古地理学报, 10(6):561~570.

石彦强,邢立杰. 2009. 动态聚煤模式——兼论成煤植物在聚煤环境中的主导作用. 中国煤炭地质,21(S1):6~8,39.

汪寿松,陈昌明,陈志明,黄家宽,柯保嘉,陈安宁. 1989. 我国华北地区晚古生代"约代尔"旋回沉积的发现及其意义. 科学通报,(15):1165~1167.

徐伟,杜晓峰,黄晓波,宋章强,李正宇. 2019. 混合沉积研究进展与关键问题. 沉积学报,37(2):225~238.

颜佳新,孟琦,王夏,刘志臣,黄恒,陈发垚,郭全鼎. 2019. 碳酸盐工厂

与浅水碳酸盐岩台地:研究进展与展望. 古地理学报,21(2):232~253.

杨起,韩德馨. 1979. 中国煤田地质学(上册). 北京:煤炭工业出版社:1~261.

佚名. 珠峰:你一生的故事(有数_澎湃新闻)[OL]. [2021-08-05] http://m. thepaper. cn/rss_newsDetail_7549845? from=sina

袁明,瞿礼嘉,王小菁,钱前,杨维才,王台,孔宏智,蒋高明,种康. 2014. 2013 年中国植物科学若干领域重要研究进展. 植物学报,49(4):347~406.

曾红玲,季劲钧,吴国雄. 2010. 全球植被分布对气候影响的数值试验. 大气科学,34(1):1~11.

曾勇. 1994. 内蒙古准格尔晚石炭世"约代尔"旋回沉积及其地质意义. 中国煤田地质,6(2):12~16.

张鹏飞,邵龙义,代世峰. 2001. 华北地台晚古生代海侵模式雏议. 古地理学报,3(1):15~24.

张昀. 1998. 生物进化. 北京:北京大学出版社: 1~258.

朱菁,肖长永,王敏. 2017. 植物根系固坡机理的理论分析. 产业与科技论坛,16(11):67~68.

Anon. Qomolungma Peak: The story of your life(Count_Surging News [OL]. [2021-08-05] http://m. thepaper. cn/rss_ newsDetail_7549845? from=sina

Chen Jinchu, Wu Tieshan, Zhang Pengyuan, You Wencheng, et al. 1997 #. Regional Stratigraphy of North China. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1~199.

Chen Zhonghui, Wu Fadong, Zhang Shouliang, Zhang nianmao, Ma Jinxian, Ge Ligang, et al. 1993#. Sedimentary Environment and Coal Accumulation Regularity of Late Paleozoic Coal bearing Strata in North China. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1~153.

Cheng Baozhou. 1992 #. Sedimentary Environment and Coal Accumulation Regularity of Late Paleozoic in Shanxi. Taiyuan: Shanxi science and Technology Press: 1~253.

Gong yunyun. 2017&. Cyanobacterial calcification. Geoscience and technology information, 36 (2): 112~118.

He Qi Xiang, Ye Yezheng, Zhang Ming Shu, Li Hao. 1991&. Transgressive model of restricted surface sea. Acta Sedimentologica Sinica, 9 (1): 1~9.

Hu Yicheng, Liao Yuzhi. 1999&. Genetic mechanism of Early Permian coal accumulation in southern North China Basin. Geoscience Frontiers, 6(S1): 111~115.

Jiang Ruijie, Cheng Peng, Gao Jianhua, Wang Aijun. 2020&. Effect of Mangrove on dynamic process of tidal bottom boundary layer. Marine Geological Frontiers, 36 (4): 37~44.

Li Xiaojing, Liu Ying, Wang Dongdong, Liu Haiyan, Liu Fusheng. 2019&. Cycle types and asymmetric genesis in sedimentary sequence of energy series. Coal Geology of China, 31 (10): 1~7.

Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Liu Ying. 2005#. Coal Geology. Beijing: Geology Press: 1~254.

Lü Dawei, Li Zengxue, Wang Dongdong, Liu Haiyan, Jia Qiang, Wang Pingli, Yu Deming, Wu Xiaoyan. 2015&. Micro sedimentary characteristics and coal formation of transgressive events in the late Paleozoic epicontinental sea basin of North China. Acta Sedimentologica Sinica, 33 (4): 633~640.

Mao Jiehua, Xu Huilong. 1999#. Prediction and Evaluation of China's Coal Resources. Beijing: Science Press: 1~465.

Mei Mingxiang. 2014&. Characteristics and properties of microbial mat: theoretical basis of microbial mat sedimentology. Acta Palaeogeographic Sinica, 16 (3): 285~304.

Moore D. 1959. Role of deltas in the formation of some British lower Carboniferous cyclothems. Geology,67:522~539.

Rahmaai R A,Flores R M. 1988. 煤和含煤地层沉积学. 李濂清,等. 译. 北京:地质出版社:1~290.

Shao longyi, Lu Jing, Wang Hao, Zhang Pengfei, Han Dexin. 2008&. Research progress on sedimentology and sequence stratigraphy of offshore coal bearing strata. Acta Palaeogeographic Sinica,10(6): 561~570.

Shi Yanqiang, Xing Lijie. 2009&. Dynamic coal accumulation model and the leading role of coal forming plants in coal accumulation environment. Coal Geology of China, 21 (S1): 6~8, 39.

Wang Shousong, Chen Changming, Chen Zhiming, Huang Jiakuan, Ke Baojia, Chen Anning. 1989#. Discovery and significance of Late Paleozoic "Yoredale" cyclic deposits in North China. Science Bulletin, (15): 1165~1167.

Wilson J L. 1975. Carbonate Facies in Geologic History. New York: Spiringer-Verlag.

Xu Wei, Du Xiaofeng, Huang Xiaobo, song Zhangqiang, Li Zhengyu. 2019&. Research progress and key problems of mixed sediments. Acta Sedimentologica Sinica, 37 (2): 225~238.

Yan Jiaxin, Meng Qi, Wang Xia, Liu Zhichen, Huang Heng, Chen Fayao, Guo Quanding. 2019&. Carbonate factory and shallow water carbonate platform: research progress and prospect. Acta Palaeogeography Sinica, 21 (2): 232~253.

Yang Qi, Han Dexin. 1979#. Chinese Coalfield Geology (Volume 1). Beijing: Coal Industry Press: 1~261.

Yuan Ming, Qu Lijia, Wang Xiaojing, Qian Qian, Yang Weicai, Wang Tai, Kong Hongzhi, Jiang Gaoming, Zhong Kang. 2014&. Important research progress in several fields of Plant Science in China, 2013. Acta Botany Sinica, 49 (4): 347~406.

Zeng Hongling, Ji Jinjun, Wu Guoxiong. 2010&. Numerical experiment on the influence of global vegetation distribution on climate. Atmospheric Science, 34 (1): 1~11.

Zeng Yong. 1994&. Late Carboniferous Yoredale cycle deposits in Junggar, Inner Mongolia and their geological significance. Coalfield Geology of China, 6(2): 12~16.

Zhang Pengfei, Shao Longyi, Dai Shifeng. 2001&. A preliminary discussion on the late Paleozoic transgression model of North China platform. Acta Palaeogeography Sinica, 3 (1): 15~24.

Zhang Yun. 1998. Biological Evolution. Beijing: Peking University Press: 1~258.

Zhu Jing, Xiao Changyong, Wang Min. 2017&. Theoretical analysis of slope reinforcement mechanism by plant roots. Industry and Technology Forum, 16 (11): 67~68.

My view on the formation mechanism of the Yoredale cycle

——A case study of Late Paleozoic coal formation deposits in the North China Craton

SHI Yanqiang

Beijing Dadigaoke Geological Exploration Co. Ltd., *Beijing*, 100040

Abstract: Yoredale cycle, including limestone, coal seam and terrigenous clastic rock, is characterized by direct sedimentary contact between coal seam roof and marine limestone. Previous studies have given several completely different causes for this cycle. In order to explore the real formation mechanism of the cycle, the sedimentary characteristics of coal accumulation period in geological history are compared with the sedimentary regularities of modern vegetation, peat—swamp and carbonate rock. The analysis results show that the plants were extremely prosperous in the coal accumulation period of geological history, and dominated the basin evolution stage. Under the confinement of advance vegetation, extremely less terrigenous debris input into the basin, forming a dynamic peat—swamp. After the peat—swamp is covered by water, even shallow water is very clear. The formation of limestone is promoted by the interaction of aquatic organisms with the deposited organic matter, and the subsequent diagenesis cementation. From the top of the coal seam to the bottom of the limestone, it represents the littoral without detrital input, forming a sedimentary sequence with gradually increasing water depth. Limestone and underlying coal seam are continuous deposition. The formation of Yoredale cycle is due to the limitation of terrigenous clastic input by advance vegetation, which leads to clear and normal transgressive and regressive sediments. Although the thickness of limestone and coal seam is not very large, the lateral continuity is good. The coal seam thickens and the limestone thins in the direction of terrigenous source, while the coal seam thins and the limestone thickens in the direction of sea. Thick coal seam can be formed in the continental direction of the Yoredale cycle. The discovery of the truth of Yoredale cycle has laid a solid foundation for the study of sedimentary paleogeography and sequence stratigraphy, as well as accurate regional correlation and exploration of coal accumulation regularity.

Keywords: Yoredale cycle; advance vegetation; dynamic peat—swamp; terrigenous detritus; dynamic coal accumulation model; carbonate deposition; North China Craton

Acknowledgements: The author would like to thank Professor MAO Xiaoping and Prof. ZHANG Yuxu reviewed the manuscript and put forward many valuable modification suggestions; senior engineer CHEN Hao for redrawing and modifying thefigures; engineer SUN Qiaoqi for the translation and revision

About the author: SHI Yanqiang, male, born in 1966, bachelor's degree, senior engineer, mainly engaged in coal geological exploration and research; Email: shxshyq@126.com

Manuscript received on: 2020-12-01; Accepted on: 2021-08-05; Network published on: 2021-08-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.08.013 **Edited by**: ZHAO Xue, ZHANG Yuxu