

高分辨率层序地层学在第四纪含水层划分中的应用研究综述

赵红梅^{1,2}, 卫文², 刘嘉麒³

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄, 050061; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:在综述高分辨率层序地层学的形成、发展及其在第四纪地层和河流相地层对比中的应用的的基础上,分析了高分辨率层序地层学在第四纪含水层划分与对比中的应用前景;应用高分辨率层序地层学理论,深入分析基准面旋回、可容纳空间变化与地层响应的关系,建立河流相等时地层格架,获取不同微相的分布特征和砂体的时空展布规律,可为平原区广泛分布的松散河流相第四纪含水层(组)的科学划分和对比提供新思路。指出高分辨率层序地层学在第四纪含水层划分与对比的应用中,需加强量化研究,在明确各级次基准面旋回时限范围的基础上,对不同级次基准面旋回进行规范识别和划分;应尤其重视在地质过程-响应的沉积动力学分析的基础上区分河流相地层的自旋回和异旋回作用。

关键词:高分辨率层序地层学;第四纪地层;河流相;含水层;综述

中图分类号:P641.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0088-07

Review of application of high-resolution sequence stratigraphy in Quaternary aquifer division//ZHAO Hongmei^{1,2}, WEI Wen², LIU Jiaqi³ (1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The formation and development of high-resolution sequence stratigraphy and its application in the comparison of Quaternary and fluvial facies strata are reviewed. Potential future applications of high-resolution sequence stratigraphy in division and comparison of the Quaternary aquifer are analyzed. Using the high-resolution sequence stratigraphy theory, the relationship between the base level cycle, accommodation, and stratum response can be analyzed, the isochronal stratigraphic framework of fluvial facies can be established, and the distribution characteristics of different microfacies and spatio-temporal distribution of a fluvial sand body can be found, which is conducive to the reasonable division and comparison of the loose Quaternary aquifer (group) of fluvial facies in plain regions. In the application, quantitative study should be strengthened. On the basis of defining the time range, all levels of base level cycles can be identified and divided on specification. Special attention should be paid to distinguishing the auto-cycle and allo-cycle of the fluvial facies stratum based on the sedimentary dynamics analysis of geological process-response.

Key words: high-resolution sequence stratigraphy; Quaternary stratum; fluvial facies; aquifer; review

随着社会经济的快速发展,人们对地下水的需
求越来越大,而地下水是有限的资源,如何更科学有
效地管理地下水、实现地下水的可持续开发利用是
目前尤为现实而紧迫的问题。平原区的地下水多以
孔隙水的形式赋存在松散的第四纪含水层中,以往
的地下水资源评价、地下水开发利用等水文地质研
究成果大多是建立在传统的第四纪地层划分与对比

基础上的,即认为深度大致相当时,岩性相同或相似
的砂层之间就可以简单地相连和对比。这种粗犷、
概化的含水层(组)划分与对比方法曾经在找水水
文地质学、资源水文地质学中发挥了重要作用,但已
经无法满足以可持续发展为目标、注重构建人与地
下水系统协调且良性循环的当代生态环境水文地质
学的需要^[1]。地下水系统作为一个复杂系统,只有

基金项目:国家自然科学基金(41302191);国土资源部公益性行业科研专项(201211079-01)
作者简介:赵红梅(1981—),女,助理研究员,博士研究生,主要从事第四纪地质及水文地质研究。E-mail:zhmay81@126.com
通信作者:卫文(1982—),男,助理研究员,博士,主要从事同位素水文地质研究。E-mail:wwen82@126.com

更精细地把握和刻画其非均质性和各向异性,才能更深入地掌握地下水的演变规律,实现区域地下水科学理论的创新与突破,从而更科学地规划管理地下水、实现其可持续利用的最高目标。

掌握含水层复杂结构属性的关键是要解决含水砂层的沉积相变及其高精度识别与对比这一关键科学问题,为解决这一关键科学问题,不但需要密集打钻和取样来获取海量基础数据,同时也需要更先进、更科学的地层精细划分和孔间对比方法。传统的含水层划分与对比方法以原始水平律、层序叠覆律等理论为基础,是对地层中静态属性之间的对比,且由于“地层与沉积环境的记录在横向上的不均一性和纵向上的不完整性”^[2],使对比结果或多或少存在一些人为性及不确定性,尤其是对于水动力条件变化不定、沉积结构复杂的冲洪积-河流相地层。因此,第四纪含水层的划分与对比需要引入更科学更可靠的地层划分和对比方法。本文在综述高分辨率层序地层学的形成、发展及其在油气、煤成气勘探和储层预测中的广泛应用,尤其是在第四纪地层和河流相地层对比中的应用的的基础上,分析其在第四纪含水层划分与对比中的应用前景,提出在应用过程中需深入研究的几个问题,为平原区广泛分布的松散河流相第四纪含水层的划分和对比提供参考。

1 层序地层学在第四纪含水层划分和对比中的应用及问题

层序地层学(sequence stratigraphy)是以地震地层学为基础,综合利用地震、钻井及露头资料,通过识别由海平面升降周期性变化所产生的沉积特征,结合沉积学分析,对地层层序格架进行综合解释的科学^[3]。由于与沉积学紧密相连以及细致研究地层结构及其与海平面变化的成因关系,使地层学进入动态成因的研究阶段^[2],并逐渐形成为一门理论方法体系相对独立的地球科学分支学科。层序地层学最初主要应用于石油勘探和开发领域,随着其理论不断发展,应用范围也越来越广泛。20世纪90年代开始,国内外就开展了众多运用层序地层学理论进行第四纪地层划分与对比的研究工作^[4-8]。由于层序地层学提供了一种框架,能用于了解含水层的结构,因而水文地质工作者也利用层序地层学概念和理论预测含水层和隔水层的特征,继而推断地下水流动和污染物迁移的路径^[9-11]。这些应用 Vail 等^[12]所提出的经典层序地层学理论开展的研究工作,虽然为第四纪松散沉积地层和含水层的划分与对比研究提供了新思路,但存在两个重要问题:①经典层序地层学研究分辨率不够高,通常对应于三级

层序,对应时间尺度范围较大,为 $0.5 \sim 3 \text{ Ma}$ ^[13],其动力学机制一般认为是板内应力引起的构造海平面波动、球外星体的影响或者壳幔过程的影响^[14];②经典层序地层学强调全球海平面变化是层序发育的主控因素^[3],它适合于开展海相地层以及海岸交界带的地层分析,在远离海平面影响的陆相沉积地层中却并不适用,虽然目前在内陆湖盆中可用湖平面来类比海平面进行研究,但对于非湖相的其他陆相沉积则显得无能为力。

2 高分辨率层序地层学在第四纪含水层划分中的应用

2.1 高分辨率层序地层学的形成与发展

近年来在经典层序地层学基础上发展起来的高分辨率层序地层学(high-resolution sequence stratigraphy)可以很好地解决经典层序地层学在陆相沉积地层研究中存在的问题。高分辨率层序地层学由以 Cross^[15]为首的美国科罗拉多矿业学院成因地层研究组提出,其理论核心为:在基准面旋回变化过程中,由于可容纳空间和沉积物补给通量比值(A/S)的变化,在相同的沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用,导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型以及岩石结构发生变化。这些变化是其在基准面旋回中所处的位置和可容纳空间的函数。基准面旋回所控制的地层单元的地层分布形式是有规律可循的,因此是可以预测的^[16]。这里所谓的“高分辨率”,是指对多级次地层基准面旋回进行划分和对比的高精度时间分辨率,尤其是高级次地层基准面旋回的划分和对比,增加了研究地层在垂向上的分辨率,从而提高了地层预测的精度与准确度。

高分辨率层序地层学与经典层序地层学的主要区别在于:①高分辨率层序地层学理论中的基准面是控制地层形成的不同地质过程的综合反映,不需要以海平面为参照面,因此可以同时应用于海相盆地和陆相盆地;②高分辨率层序地层学将层序地层学与沉积学相结合,以相互标定的岩心、测井与高分辨率地震资料为基础,依据可容纳空间和 A/S 值的变化趋势识别基准面旋回界面,因而各级次、不同性质的基准面旋回均具有可识别性,在缺乏不整合发育的地层中,根据沉积作用的转换即可识别高频时间界面,因此可以进行高分辨率层序地层划分^[17]。相比经典层序地层学,高分辨率层序地层学更适用于陆相沉积盆地高分辨率层序地层格架的建立。

自提出至今,高分辨率层序地层学已经在国内外高精度地层研究以及油气勘探、开发中发挥着显

著作用和重要影响^[18-22],这突出地反映了高分辨率层序地层学的新概念、新方法的先进性和实用性。20世纪90年代中期,邓宏文教授^[23]将高分辨率层序地层学理论引入我国,在国内沉积学和地层学研究中引起巨大反响。石油地质工作者更是将其基本原理与分析方法广泛应用于我国复杂多变的陆相沉积盆地的层序地层分析及盆地区域、区带至油藏级别的高精度时间地层格架的建立,应用范围涉及沉积矿产勘探开发的整个过程^[24-26],极大地提高了储集层分布预测的精确度和准确度。除了应用于油气勘探开发之外,高分辨率层序地层学近几年来还被应用于聚煤作用分析和煤成气勘探等领域^[27-28]。

2.2 高分辨率层序地层学在第四纪地层研究中的应用

高分辨率层序地层学在油气、煤成气勘探和储层预测中得到了广泛的应用,将其应用到地下水的主要储藏空间——第四纪松散沉积地层中也非常值得尝试。目前国内已经有少数第四纪地质学者开展了一些相关工作,如陈忠大等^[29]在1:25万杭州市幅区域地质调查过程中,从标准孔研究入手,通过古土壤、古暴露面及其所对比的剥蚀面和沉积界面的识别标志研究,解决了标准孔与一般钻孔的等时对比问题,并利用“基准面旋回”等时性的理论,建立了杭嘉湖平原第四纪等时地层格架;邱鸿坤等^[30]通过研究区第四纪地层研究和填图实践,初步总结出“以气候旋回及基准面旋回等时性理论为基础,从古气候旋回宏观识别标志研究入手,以标准孔为基准点外延扩展,在反复认识与验证的基础上,进行层序地层划分,建立剖面等时格架,制作高精度对比的剖面图及准瞬时岩相古地图”的研究方法,不仅提高了研究区第四纪地层研究精度,也为沿海平原、河口三角洲地区第四纪地层结构研究提供了新思路;杨建梅等^[31]进一步系统论述了传统地层对比方法的缺陷,探讨了高分辨率层序地层对比方法在第四纪地层结构研究中的适用性。虽然目前高分辨率层序地层学在第四纪地层研究中应用还不广泛,但少数研究者进行的尝试证明了高分辨率层序地层学理论不仅适用于含油气盆地中较古老的成岩地层,在第四纪松散沉积地层中同样适用。

2.3 高分辨率层序地层学在河流相地层对比中的应用

平原区含水层主要由第四纪冲洪积-河流相地层组成。虽然目前缺乏第四纪河流相的高分辨率层序地层研究,但由于河流相是我国中、新生代陆相盆地重要的油气储集层系类型之一,因此石油地质工作者们对河流相层序地层的研究尤为重视。河流相

地层复杂而多变,其沉积剖面中岩性标志层通常不发育,因此河流相地层的划分与等时对比一直是个难题^[32]。应用高分辨率层序地层学进行第四纪河流相含水层的划分和对比研究,需要多方参考和借鉴石油地质工作者在这方面的理论分析和应用研究成果。

从邓宏文等^[33]运用高分辨率层序地层学理论建立河流相等时地层对比格架的研究方法以来,国内学者开展了许多关于河流相高分辨率层序地层的理论和应用研究。理论方面,由于分辨率更高,因此在不同级次基准面旋回的识别及层序模式方面有更为广泛的讨论,如郑荣才等^[34]从深入分析河流砂体与基准面旋回的关系出发,详细讨论了河流砂体在地层格架中的发育位置、分布规律、成因特征,以及层序界面对河流砂体几何形态、稳定性和储集性等特征的直接控制作用;邓宏文等^[35]以河流相沉积学研究为基础,运用基准面旋回理论探讨了河流相层序地层单元的构成模式;纪友亮等^[36]讨论了河流相地层高精度地层构型界面的形成机制及识别方法。这些理论研究成果在河流相地层层序界面的选取、不同级次基准面旋回的识别方法等方面,将为高分辨率层序地层学在第四纪含水层划分与对比研究中的应用提供重要参考和借鉴。其他众多关于高分辨率层序地层学在河流相储层层序分析和对比中的应用研究成果^[32,37],进一步证实了高分辨率层序地层学理论与方法能加深对河流相地层形成和演化的认识,从而获得河流相的分布特征和规律,提高河流相储层的预测精度。

2.4 高分辨率层序地层学在第四纪含水层划分与对比中的应用前景

广泛分布在第四纪松散地层中的地下水作为重要的资源,与石油、天然气在国家发展战略上具有同等重要的意义。在地下水的过度开发、气候干旱等导致地下水资源严重短缺的情况下,科学配置和合理开发利用地下水资源至关重要,故而作为基础研究的第四纪含水层结构的高精度研究也越来越受到相关政府部门和专家学者的重视。目前较为粗犷的含水层(组)划分及概化模式,已无法满足快速发展的地下水科学研究各个领域的需要,因此必须加强含水层的高精度识别与对比方面的研究工作。高分辨率层序地层学理论在陆相油气、煤成气储集层、第四纪地层划分与对比中的应用,尤其是河流相层序地层研究方面的成功应用及其取得的大量成果,充分证实了高分辨率层序地层学摆脱了与海平面变化相联系的束缚,对于远离海洋的陆相地层尤其是河流相地层而言,具有明显的理论优势和实践意义,适用于内陆流域第四纪含水层的划分和对比。在深入

分析河流相地层基准面旋回、可容纳空间变化与地层响应关系的基础上,建立河流相含水层等时地层格架,获取不同微相的分布特征和河流相砂体的时空展布规律,提高河流相含水层的预测精度,可为区域含水层(组)的进一步科学划分提供依据,也为地下水资源的科学管理和可持续开发利用等提供理论和技术支撑。

3 研究展望

将高分辨率层序地层学理论和方法应用于第四纪含水层划分和对比的过程中,需特别注意加强以下三方面的研究。

3.1 基准面旋回的多级次划分

高分辨率层序地层学理论与技术应用的关键是如何在地层记录中识别代表多级次基准面旋回的多级次地层旋回^[16]。对于不同级次基准面旋回的划分,邓宏文^[38]强调短期旋回具有成因层序的意义,因此应以短期旋回为基本单元,通过叠加样式的逐级组合,可以依次划分中期旋回、长期旋回、巨旋回或超长期旋回等。但由于并未界定各级次基准面旋回的时限,造成基准面旋回级次划分的混乱,如存在将同一套地层被一些研究者划分为长期旋回,却被另一些研究者划分为中期旋回或者短期旋回的情况。这显然是缺乏统一的层序划分方案而造成的。基于此,郑荣才等^[39]在分析不同级次基准面旋回主控因素的基础上,提出巨旋回、超长期旋回、长期旋回、中期旋回、短期旋回和超短期旋回6个级次的划分方案,并明确了各级次基准面旋回的时限范围,使基准面旋回的级次划分有了一个统一的标准。

另外,由于中期洪泛面易识别,在较大范围内基本等时,且其两侧短期层序于区块范围内具有同步发育的特点,郑荣才等^[34,40]提出在分析短期层序与中期层序界面和洪泛面的关系及其在层序地层格架中出现的位置的基础上,采用“以中期洪泛面为起始点,以层序界面为终点,对洪泛面之上的中期下降半旋回相域中的短期层序,进行自下而上的逐层对比,而对洪泛面之下的中期上升半旋回相域中的短期层序进行自上而下的逐层对比”的层序地层格架中砂体等时对比技术进行地层对比。这种对比技术相比邓宏文^[38]提出的“以短期旋回为基本单元,通过叠加样式的逐级组合,来划分较长期旋回”的方法,在河流相地层划分和对比中更具有可操作性。

3.2 高分辨率层序地层学理论方法中的定量研究

不同级次基准面旋回的识别与划分往往以定性研究为主,这也是造成不同级次基准面旋回划分混乱的一个重要原因。量化识别不同级次基准面旋

回,可以使不同级次基准面旋回的识别更加准确、在不同研究之间更具有可比性,从而使高分辨率层序地层学应用前景更为广阔。对于第四纪松散地层而言,量化研究无外乎多方利用环境指标测试数据,如利用地球化学资料等来定量识别层序地层单元。由于需要全岩心取样、采集连续的样品来测试,工作量大,且花费不低,因此建议仅在标准孔中进行。以标准孔的量化高分辨率层序地层分析为基础,以地层的过程-响应动力学原理为指导,进行合理的孔间对比,结合精细的岩-电-震相互标定,完成区域地层的划分和对比。

绝对年龄的获取是高分辨率层序地层学研究量化的另一个关键问题。目前第四纪松散地层中绝对年龄的获取主要依靠放射性测年技术,包括¹⁴C测年法、K-Ar和Ar-Ar测年法、U系物测年法、裂变径迹测年法、释光测年法、电子自旋共振测年法等。由于不同测年方法所需的测试材料和测年时限不同,因此在以河流相地层为主的第四纪含水层划分和对比研究中,实际可用的测年方法以¹⁴C、释光、电子自旋共振为主,因而较为可靠的测年上限也基本限制在1.5Ma,对于超过这一年龄的第四纪地层,只能另寻他法。即便如此,如能获取一些低级次基准面旋回转换点位置的绝对年龄值,就基本上控制了大段地层的年龄跨度,据此便可以使较高级次基准面旋回的识别和划分相对更为准确可靠。

3.3 河流相地层的自旋回与异旋回的识别

与其他沉积环境相比,河流相的自旋回作用更加明显^[32]。自旋回作用是局部的事件性沉积^[41],通常只控制沉积相序的内部结构和各岩相的比例,与基准面旋回变化关系不明显。河流相自旋回的形成多与河流水动力条件的变化^[41]、河道的决口、决口扇朵叶体的迁移、河道凸岸沉积的侧向迁移^[42]等沉积作用有关;而河流异旋回才是具有时间地层对比意义的成因地层单元,即基准面变化旋回。因此,在对河流相进行等时地层单元划分时,首先要识别河流自旋回及其与基准面变化相关的异旋回。张明禄等^[40]认为自旋回过程对应超短期基准面旋回,在储层相类型中为单砂体,是最小成因地层单元。纪友亮等^[36]持同样观点,提出河流相的自旋回对比即是进行河道、决口河道的形态分析,掌握同一条河道平面上的厚度变化与时空分布特征以及与相邻相域(决口河道、决口扇、冲积平原)的配置关系,继而进行单层的追踪。对比时需在完成短期旋回等时对比的基础上,依据河流沉积自旋回特点,在短期旋回内依次标出超短期旋回,基准面上升短期旋回自上而下逐次对比,基准面下降短期旋回自下而上逐次对

比。另一些学者则认为短期旋回也可能受到自旋回与异旋回的共同影响^[32,41]。邓宏文等^[32]强调构成河流相的任何一种单独的相域(微相)类型与基准面变化的旋回均没有任何直接的联系,只有相域(微相)的叠加样式才能反映A/S的增加或减少,从而提供基准面旋回变化的重要信息。事实上,关于河流自旋回作用究竟对应于短期旋回还是超短期旋回,尚无定论。在实际工作中,仍需在地质过程-响应的沉积动力学分析的基础上加以仔细甄别。

4 结 语

目前较为粗犷的含水层(组)划分及概化模式,已无法满足快速发展的地下水科学研究各个领域的需要,因此必须加强含水层的高精度识别与对比方面的研究工作。高分辨率层序地层学摆脱了与海平面变化相联系的束缚,对于远离海洋的陆相地层尤其是河流相地层而言,具有明显的理论优势和实践意义,适用于内陆流域第四纪含水层的划分和对比。在研究过程中,需谨慎对待不同级次基准面旋回的划分及其定量化、自旋回与异旋回的识别和对比等重要问题。同时也应注意到第四纪地层存在着与成岩地层不同的特点,如岩性松散、埋深相对较浅、取芯和样品采集相对容易等,使其在进行高分辨率层序地层分析过程中存在一定的优势,如易于获取可供定量化研究的环境指标及绝对年龄,从而建立准确的地层年代框架,在此框架内进行不同级次基准面旋回的划分和对比,结果更为准确可靠,也更利于进行区域地层对比。

参考文献:

[1] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.当代水文地质学发展趋势与对策[J].水文地质工程地质,2005,32(1):51-56. (ZAANG Renquan, LIANG Xin, JIN Menggui, et al. Then trends in contemporary hydrogeology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(1): 51-56. (in Chinese))

[2] 赖维成,姜培海,徐长贵,等.试论传统地层学与层序地层学间的统一性和继承性[J].地层学杂志,2004,28(4):331-335. (LAI Weicheng, JIANG Peihai, XU Changgui, et al. Discussion on the unification and inheritance between traditional stratigraphy and sequence stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2004, 28(4): 331-335. (in Chinese))

[3] 龚一鸣,张克信.地层学基础与前沿[M].北京:中国地质大学出版社,2005:119.

[4] KENNETH G E, ANDREA W S, GRAHAM G S. Quaternary sequence stratigraphy of the Brisbane River Delta, Moreton Bay, Australia[J]. Marine Geology, 1992, 107 (Sup1): 61-68.

[5] KARISIDDAIAH S M, VEERAYYA M, VORA K H. Seismic and sequence stratigraphy of the central western continental margin of India: late-Quaternary evolution [J]. Marine Geology, 2002, 192(4): 335-353.

[6] CAROLINE L, MICHEL T, BERNARD G. Integration of high and very high-resolution seismic reflection profiles to study Upper Quaternary deposits of a coastal area in the western Gulf of Lions, SW France[J]. Marine Geophysical Researches, 2005, 26: 109-122.

[7] 朱大岗,孟宪刚,邵兆刚,等.西藏阿里札达盆地上新世-早更新世河湖相地层层序地层分析[J].地学前缘, 2006, 13(5): 308-315. (ZHU Dagang, MENG Xiangang, SHAO Zhaogang, et al. Sequence stratigraphy of the Pliocene-early Pleistocene fluvio-lacustrine facies strata in the Zanda Basin, Ali, Tibet [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(5): 308-315. (in Chinese))

[8] 王强,李从先.中国东部沿海平原第四系层序类型[J].海洋地质与第四纪地质,2009(4):39-51. (WANG Qiang, LI Congxian. The type of Quaternary sequence in the East China Coastal Plain [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009(4): 39-51. (in Chinese))

[9] SHAMSUDDUHA M. Mineralogical and geochemical profiling of arsenic-contaminated alluvial aquifers in the Ganges-Brahmaputra floodplain Manikganj, Bangladesh [D]. Auburn, Alabama: Auburn University, 2007.

[10] SHAMSUDDUHA M, UDDIN A, SAUNDERS J A, et al. Quaternary stratigraphy, sediment characteristics and geochemistry of arsenic-contaminated alluvial aquifers in the Ganges-Brahmaputra floodplain in central Bangladesh [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2008, 99(1): 112-136.

[11] UDDIN A, SHAMSUDDUHA M, SAUNDERS J A, et al. Mineralogical profiling of alluvial sediments from arsenic-affected Ganges-Brahmaputra floodplain in central Bangladesh[J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(4): 470-483.

[12] VAIL P R, MITCHUM R M, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: part 3 relative changes of sea level from coastal onlap[C]//PAYTON C E. Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 63-81.

[13] VAIL P R, WORNARDT W W. An integrated approach to exploration and development in the 90's: well-log-seismic sequence stratigraphy analysis [J]. Aapg Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 1991, 75(9): 1541-1541.

[14] NYSTUEN J. P. History and development of sequence stratigraphy[C]//GRADSTEIN F M, SANDVIK K O, MILTON N J. Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications. Stavanger, Norway: Norwegian Petroleum Society, 1998: 31-116.

[15] CROSS T A. Controls on coal distribution in transgressive-

- regressive cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, USA [C]//WILGUS C K, HASTINGS B, KENDALL C G, et al. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Tulsa, Oklahoma: Society for Sedimentary Geology, 1988: 371-380.
- [16] 邓宏文, 李熙哲. 层序地层基准面的识别、对比技术及应用[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 177-184. (DENG Hongwen, LI Xizhe. Identification and correlation techniques of Sequence stratigraphic base-levels and their application[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(3): 177-184. (in Chinese))
- [17] 邓宏文, 王红亮, 祝永军, 等. 高分辨率层序地层学原理及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [18] CROSS T A, BAKER M R, CHAPIN M A, et al. Applications of high-resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis [C]//ESCHARD R, DOLIGEZ B. Subsurface Reservoir Characterization from Outcrop Observations. Paris: Technip, 1993: 11-33.
- [19] CROSS T A, LESSENGER M A. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation [C]//GRADSTEIN F M, SANDVIK K O, MILTON N J. Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications. Stavanger, Norway: Norwegian Petroleum Society, 1998: 171-195.
- [20] CROSS T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 322-350.
- [21] ANTHONY C R, JAMES F M, ROBERT M M, et al. High-resolution sequence stratigraphy of lower Paleozoic sheet sandstones in central North America: the role of special conditions of cratonic interiors in development of stratal architecture[J]. Geological Society of America, 2007, 119(7/8): 860-881.
- [22] BRADLEY D C, MARK A K, CARLTON E B, et al. Paleobiogeography, high-resolution stratigraphy, and the future of Paleozoic biostratigraphy: fine-scale diachroneity of the Wenlock (Silurian) conodont Kockelella walliseri [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2010, 294(3/4): 232-241.
- [23] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派: 高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89-97. (DENG Hongwen. A new school of thought in sequence stratigraphic studies in USA: high resolution sequence stratigraphy[J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 89-97. (in Chinese))
- [24] 邓宏文, 王洪亮, 翟爱军, 等. 中国陆源碎屑盆地层序地层与储层展布[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 108-114. (DENG Hongwen, WANG Hongliang, ZHAI Aijun, et al. Sequence stratigraphy and reservoir distribution in China's terrigenous clastic basins[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(2): 108-114. (in Chinese))
- [25] 郑荣才, 彭军. 陕北志丹三角洲长6油层组高分辨率层序分析与等时对比[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 92-100. (ZHENG Rongcai, PENG Jun. Analysis and isochronostratigraphic correlation of high resolution sequence stratigraphy for Chang-6 oil reservoir set in Zhidan Delta, Northern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 92-100. (in Chinese))
- [26] 刘宗堡, 马世忠, 孙雨, 等. 三肇凹陷葡萄花油层高分辨率层序地层划分及沉积特征研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 399-406. (LIU Zongbao, MA Shizong, SUN Yu, et al. High-resolution sequence stratigraphy division and depositional characteristics of Putaohua Reservoir, Sanzhao Depression [J]. ACTA Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 399-406. (in Chinese))
- [27] 杜振川, 金敏昆, 闫纯有, 等. 百色盆地早第三纪高分辨率层序地层特征及聚煤作用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 463-467. (DU Zhenchuang, JIN Kankun, YAN Chunyou, et al. High-resolution sequence stratigraphic characteristics and coal-accumulation in paleogene period of Baise Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 463-467. (in Chinese))
- [28] 彭立才, 杨慧珠. 柴达木盆地大煤沟侏罗系剖面高分辨率含煤层序分析[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, 17(1): 6-10. (PENG Licai, YANG Huizhu. High-resolution coal-bearing sequence analysis of Jurassic section in Dameigou, Chaidamu Basin [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2002, 17(1): 6-10. (in Chinese))
- [29] 陈忠大, 覃兆松, 梁河, 等. 杭嘉湖平原第四纪地层高精度对比方法研究[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 275-280. (CHEN Zhongda, TAN Zhaocong, LIANG He, et al. High-resolution stratigraphic correlation method of the Quaternary in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain [J]. Geology in China, 2002, 29(3): 275-280. (in Chinese))
- [30] 邱鸿坤, 陈忠大, 汪庆华, 等. 厚覆盖区1:25万区域地质调查工作方法研究[J]. 资源调查与环境, 2004, 25(2): 79-87. (QIU Hongkun, CHEN Zhongda, WANG Qinghua, et al. Methodological study of the heavy-cover area in 1:250 000 regional geological survey [J]. Resources Survey & Environment, 2004, 25(2): 79-87. (in Chinese))
- [31] 杨建梅, 罗以达, 顾明光, 等. 杭州城市第四系三维地质结构模型建立中的孔间地层对比方法分析[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 104-108. (YANG Jianmei, LUO Yida, GU Mingguang, et al. Analysis of the correlation method of infer-borehole strata for the construction of a Quaternary 3D geological configuration model of Hangzhou City [J]. Geology in China, 2006, 33(1): 104-108. (in Chinese))
- [32] 邓宏文, 吴海波, 王宁, 等. 河流相层序地层划分方法: 以松辽盆地下白垩统扶余油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 621-627. (DENG Hongwen, WU Haiho, WANG Ning, et al. Division of fluvial sequence stratigraphy: an example from the Lower Cretaceous Fuyu oil-bearing layer, the Songliao Basin [J]. Oil & Gas

- Geology, 2007, 28(5): 621-627. (in Chinese))
- [33] 邓宏文, 王洪亮, 李小孟. 高分辨率层序地层对比在河流相中的应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 90-95. (DENG Hongwen, WANG Hongliang, LI Xiaomeng. Application of high-resolution sequence stratigraphic correlation to fluvial facies [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(2): 90-95. (in Chinese))
- [34] 郑荣才, 柯光明, 文华国, 等. 高分辨率层序分析在河流相砂体等时对比中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 641-647. (ZHENG Rongcai, KE Guangming, WEN Guohua, et al. Isochronic correlation of fluvial sandbodies by high-resolution sequence technique [J]. Journal of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(6): 641-647. (in Chinese))
- [35] 邓宏文, 王红亮, 阎伟鹏, 等. 河流相层序地层构成模式探讨[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 373-379. (DENG Hongwen, WANG Hongliang, YAN Weipeng, et al. Architecture model of sequence stratigraphy in fluvial facies [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 373-379. (in Chinese))
- [36] 纪友亮, 周勇, 吴胜和, 等. 河流相地层高精度地层构型界面形成机制及识别方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 8-15. (JI Youliang, ZHOU Yong, WU Shenghe, et al. Formation mechanism and recognizing method of high resolution strata architecture boundary in fluvial strata [J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(2): 8-15. (in Chinese))
- [37] 邓宏文, 马立祥, 姜正龙, 等. 车镇凹陷大王北地区沙二段滩坝成因类型、分布规律与控制因素研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 715-724. (DENG Hongwen, MA
- Lixiang, JIANG Zhenglong, et al. Sand band generation types and its controls on their distribution, the second member of Shahejie Formation, Lower Tertiary, Dawangbei, Chezhen Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 715-724. (in Chinese))
- [38] 邓宏文. 高分辨率层序地层学应用中的问题探析[J]. 古地理学报, 2009, 11(5): 471-480. (DENG Hongwen. Discussion on problems of applying high resolution sequence stratigraphy [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(5): 471-480. (in Chinese))
- [39] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-255. (ZHENG Rongcai, PENG Jun, WU Chaorong. Grade division of base level cycles of terrigenous basin and its implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 249-254. (in Chinese))
- [40] 张明禄, 郑荣才, 达世攀, 等. 砂体等时对比的高分辨率层序分析技术[J]. 矿物岩石, 2004, 24(1): 113-120. (ZHANG Minglu, ZHENG Rongcai, DA Shipan, et al. Isochronic correlation of sandy bodies by high-resolution sequence technique [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(1): 113-120. (in Chinese))
- [41] 黄彦庆, 张尚锋, 张昌民, 等. 高分辨率层序地层学中自旋回作用的探讨[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(2): 6-8. (HUANG Yanqing, ZHANG Shangfeng, ZHANG Changmin, et al. Discussion on problems of autocyclicity in high resolution sequence stratigraphy [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(2): 6-8. (in Chinese))
- [42] EMERY D, MYERS K J. Sequence stratigraphy [M]. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd., 1996: 111-133.

(收稿日期: 2015-06-16 编辑: 熊水斌)

(上接第9页)

- [14] 张新华, 李红霞, 肖玉成, 等. 河流最小生态基础流量计算方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 66-73. (ZHANG Xinhua, LI Hongxia, XIAO Yucheng, et al. Study on computational methods for minimum environmental flows [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(1): 66-73. (in Chinese))
- [15] 尚松浩. 水资源系统分析方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 134-138.
- [16] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水量[J]. 水利学报, 2001(9): 22-28. (NI Jinren, CUI Shubin, LI Tianhong, et al. On water demand of river ecosystem [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(9): 22-28. (in Chinese))
- [17] 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J]. 水利学报, 2002(10): 1-7. (NI Jinren, JIN Ling, ZHAO Yean, et al. Minimum water demand for ecosystem protection in the Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(10): 1-7. (in Chinese))
- [18] 吉利娜. 水力学方法估算河道内基本生态需水量[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [19] TENNAT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976(4): 6-10.
- [20] 于松延, 徐宗学, 武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2/3): 175-179. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei. Ecological baseflow in the Guanzhong Reach of the Wei River estimated by using different hydrological methods [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(2/3): 175-179. (in Chinese))
- [21] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 41-44. (SHANG Songhao. Comparison among several wetted perimeter methods to determine the minimum environmental flows of rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 41-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-04-14 编辑: 郑孝宇)