

文章编号:1009-3850(2019)04-0001-13

## 四川南江地区上震旦统灯影组 混积层系特征及成因

马志鑫<sup>1</sup>, 罗茂金<sup>1</sup>, 刘喜停<sup>2</sup>, 任京伟<sup>3</sup>, 黄腾<sup>4</sup>, 孙志明<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国海洋大学海洋地球科学学院海底科学和探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 4. 四川冶金地质勘查局六〇五大队, 四川 眉山 620860)

**摘要:**陆源碎屑和碳酸盐混积层系是一种沉积机理特殊而又有重要意义的沉积现象。四川南江新立村下震旦统灯影组剖面碎屑岩-碳酸盐岩混积层系发育良好。在该剖面上共识别出4类混积层系岩石组合类型:细砂岩-泥晶白云岩组合(I)、粉砂岩-泥晶白云岩组合(II)、粉细砂岩-含粉砂白云岩组合(III)、含砾砂岩-白云岩组合(IV)。通过岩石类型、岩石组合特征的分析,显示出灯影组二段上部-三段由下向上发育混积中潮坪、潮下浅滩、潮道、低潮坪4种沉积亚相,而混积层系主要产于混积中潮坪和潮道亚相。微量元素指示研究地层整体形成于氧化环境,但发生混积层位的形成环境相对缺氧。根据当时海平面变化和大地构造演化,认为灯影组陆源碎屑和碳酸盐混积层系的出现与桐湾运动I幕之后海平面下降导致的陆源碎屑输入增强有关。

**关键词:**混积层系;灯影组;南江;震旦纪

**中图分类号:**P512.2

**文献标识码:**A

### 引言

陆源碎屑和碳酸盐混合沉积是一种沉积机理特殊而又有重要意义的沉积现象,在国内外各大盆地分布广泛<sup>[1-6]</sup>。狭义的混合沉积也称混积岩,指的是同一岩层内碳酸盐组分与陆源碎屑组分的混合;广义的混合沉积包括混积岩,还包括陆源碎屑与碳酸盐互层、夹层沉积,即混积层系<sup>[2,7]</sup>。混合沉积的研究,一方面有助于解释沉积动力学、区域地壳沉降、海平面变化、气候、物源及其之间的相互作用过程<sup>[2,8]</sup>;另一方面混合沉积往往是良好的油气

储层和沉积矿床的控矿层位,具有非常重要的经济意义<sup>[9-11]</sup>。陆源碎屑岩和碳酸盐岩的沉积学理论研究已经相对成熟,加强对混合沉积的研究将为沉积动力学、地壳演化、古地理环境及相关能源矿产的研究提供新的依据和思路<sup>[7]</sup>。

Mount在1984年首先提出混合沉积物(mixed sediments)的概念,按成因将其分为4类,包括相混合、间断混合、原地混合和蚀源混合<sup>[12]</sup>,并提出了基于组构-组分的初步分类方案<sup>[3]</sup>。在我国,张锦泉和叶红专(1989)最早对不同沉积环境中的混合沉积进行了论述,并对其控制因素进行了初步总

收稿日期:2019-07-30; 改回日期:2019-09-23

作者简介:马志鑫(1983-)男,高级工程师。主要从事沉积学与矿床学研究工作。E-mail:zhixinma83@126.com

通信作者:罗茂金(1963-),男,高级工程师。主要从事区域矿产地质研究工作。E-mail:465310152@qq.com

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(项目编号:DD20160017)资助

结<sup>[4]</sup>。杨朝青和沙庆安(1990)引入混积岩的概念,即陆源碎屑与海相碳酸盐这两种沉积物混合而成的岩石,并在统计研究的基础上,提出了由碳酸盐、陆源碎屑、粘土3个端元组成的混合沉积岩石分类图<sup>[1]</sup>。张雄华(2000)采用粘土、陆源碎屑、碳酸盐岩三个端元组分,将混积岩细分为4类:含陆源碎屑碳酸盐混积岩(碳酸盐为主,陆源碎屑含量5%~25%)、陆源碎屑质碳酸盐混积岩(碳酸盐为主,陆源碎屑含量25%~50%)、含碳酸盐陆源碎屑混积岩(陆源碎屑为主,碳酸盐含量5%~25%)和碳酸盐质陆源碎屑混积岩(陆源碎屑为主,碳酸盐含量25%~50%)<sup>[13]</sup>。董桂玉等(2007)认为粘土矿物多来自母岩风化,将粘土岩归入陆源碎屑岩,将混积岩的分类命名通过陆源碎屑和碳酸盐两个端元进行,且命名上省去了“混积岩”这个中心词,细分为4类,即含碳酸盐-陆源碎屑岩和碳酸盐质-陆源碎屑岩、含陆源碎屑-碳酸盐岩、陆源碎屑质-碳酸盐岩。同时,董桂玉等(2007)将混积层系划分为陆源碎屑-碳酸盐岩层系、陆源碎屑岩-混积岩层系、碳酸盐岩-混积岩层系和混积岩层系<sup>[2]</sup>。伏美燕等(2012)根据混合作用发生的强度和陆源碎屑与碳酸盐的相对含量,将混积岩分为高度混积岩、混积型的碎屑岩和混积型的碳酸盐岩<sup>[14]</sup>。

近年来,研究人员对世界各地不同地史时期的混积物或混积岩进行了不同程度的报道和研究<sup>[6, 9, 14-16]</sup>。一些研究者将混积岩应用到层序划分、海平面变化、古气候特征、油气储层等相关领域,为深入探讨混积岩的成因和应用开辟了新的思路<sup>[5, 9-11, 17-18]</sup>。

本文在四川南江新立地区上震旦统灯影组二段上部 and 三段中发现了陆源碎屑和碳酸盐岩的混积层系,并对其岩石类型、岩性组合特征、地球化学特征进行深入研究,以期对其沉积古环境进行揭示,对其形成因素进行详细探讨。这对认识扬子陆块北缘灯影组古海洋环境演化、示踪古构造活动具有重要的意义,对丰富混合沉积的研究也具有重要价值。

## 1 地质背景

研究区位于扬子克拉通北缘,北侧为米仓山推覆构造带和秦岭造山带,西侧为北东向龙门山推覆构造带,东侧为北西向大巴山推覆构造带,总体上

是造山带和克拉通的过渡带<sup>[19-20]</sup>。前人研究表明,本区先后经历了5个主要构造演化阶段:晚太古-早元古代克拉通结晶基底形成阶段、晋宁-澄江期克拉通褶皱基底形成阶段、澄江期大陆裂谷形成阶段、晚震旦世-中三叠世盖层形成阶段和印支运动以来陆内盆山耦合-推覆构造阶段<sup>[21-22]</sup>。本区构造活动十分强烈,多期活动叠加或置换。

研究区地层出露较齐全,由老到新依次出露古元古界后河岩群、中新元古界火地垭群、震旦系、寒武系、奥陶系、二叠系、三叠系、侏罗系、第四系,缺少泥盆系、石炭系、白垩系。区内上震旦统灯影组地层大片出露,并且呈北东向分布于米仓山基底边缘。本文实测剖面位于南江县柳湾乡新立村附近,灯影组地层出露良好(图1)。

研究区灯影组地层与上覆寒武系筇竹寺组碳质页岩呈平行不整合接触,与下伏观音崖组的石英细砂岩夹泥质粉砂岩呈整合接触。前人将灯影组分为4段:灯影组一段由块状白云岩组成,厚20~30m;二段以葡萄状、雪花状构造发育的厚层-块状含藻白云岩为特点,厚度大于500m;三段发育以碎屑岩夹薄层泥质白云岩为特点,局部见硅质岩,厚26~120m;四段以含硅质条带与团块白云岩为特点,厚200~300m<sup>[23-24]</sup>。本文研究的重点为灯影组二段上部和三段,主要岩性为碎屑岩与碳酸盐的混积层系,具体剖面结构见表1。

## 2 混积层系特征

### 2.1 岩石类型及岩矿特征

对研究区混积岩岩石的命名,本文基本采用了董桂玉等(2007)的四分方案,并对碳酸盐成分和碎屑岩成分、粒级进行了考虑。在南江新立地区灯影组地层中,共发育以下8种岩石类型,包括中细粒长石石英杂砂岩、中粗粒石英砂岩、白云质含砾砂岩、中细晶白云岩、藻屑白云岩、泥晶白云岩、含砂质泥晶白云岩、白云质粉细砂岩。

#### 2.1.1 中细粒长石石英杂砂岩

岩石为黄褐色细粒砂状结构,块状构造(图2a, 3a)。砂屑成分主要为石英,少量长石及岩屑。分选中等,磨圆中等,胶结类型为基底式胶结。石英含量75%~77%,单晶颗粒为主,次棱角状-次磨圆状为主,部分棱角状,主要为中-细砂,粒径0.06~0.5mm之间,见零星粗砂,粒径可达0.75mm,部分

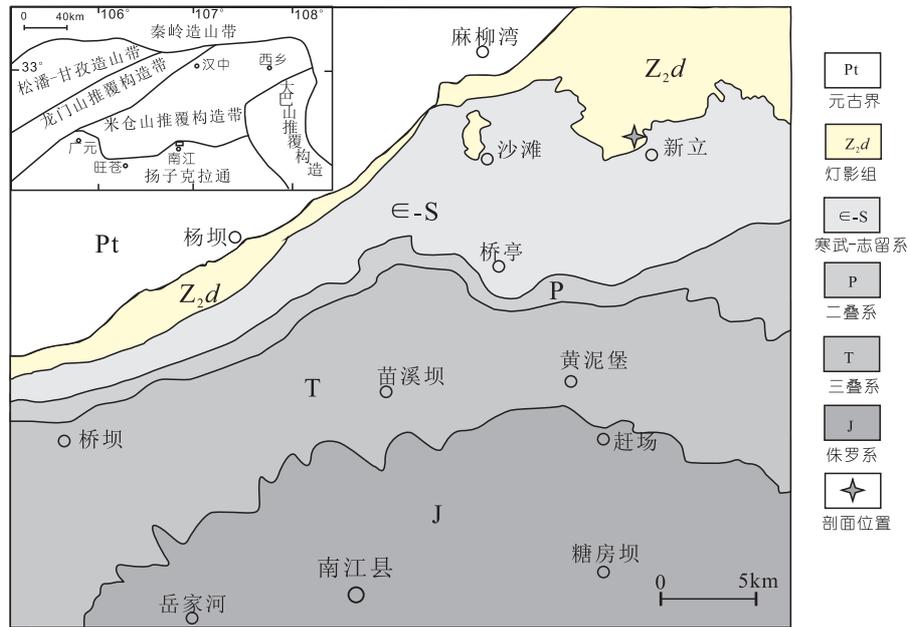


图 1 区域地质及剖面位置简图(据 1:5 万关坝幅地质图)

Fig. 1 Location and simplified geological map of the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan

表 1 四川省南江县新立村灯影组地层岩性特征

Table 1 Lithological description of the Dengying Formation in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan

段	层号	岩性描述	厚度(m)
灯影组四段	21	灰色-深灰色薄层硅化白云岩,含泥质,风化后呈砂状,向坡下露头较差,产状变陡	32.7
	22	黄褐色色薄纹层状细粒杂砂岩,单层厚度约 1 厘米,含少量钙质白云质	10.3
	23	灰白色中薄层中粒岩屑石英砂岩,单层厚度 10-15 厘米,表面具褐铁矿化	12.6
灯影组三段	24	灰白色中薄层中粗粒岩屑石英砂岩,单层厚度约 15-25 厘米,具一定变质	8.4
	25	灰白色粗粒含砾石英砂岩与白云岩交互产出。砾石大小 2-55 毫米,磨圆较好,砾石成分主要为石英、砂岩、白云岩等。下部发育两个白云岩-含砾砂岩的韵律旋回	12.7
灯影组二段	26	灰色厚层-块状细晶白云岩,具硅化,风化剥蚀强,单层厚度 40-50 厘米	41.1
	27	灰色薄层含泥质粉砂质条带泥晶白云岩,单层厚度约 5 厘米,层面较平直,发育水平层理,条带单层厚度约 1-0.5 厘米	20.3
	28	紫红色-灰白色中薄层含泥质条带白云岩夹紫红色砂岩,砂岩厚度约 5 厘米	20.3
	29	灰白色厚层-块状细晶白云岩,下部具硅化,岩石致密,含少量角砾	26.2

波状消光。长石含量约 5%,包括钾长石及斜长石,次棱角-次磨圆状,部分颗粒保留板柱状晶形轮廓,粒径介于 0.1~0.5mm 之间,部分长石颗粒具泥化和绢云母化。岩屑含量 3%~5%,成分为泥岩屑及粉砂岩屑,少量白云母,形态多不规则,细-中砂颗粒,粒径 0.1~0.5mm 之间。填隙物含量 15%,成分为泥质物、碳酸盐及不透明矿物,胶结砂屑。泥质物呈泥晶状,不规则状,粒径 < 0.004mm,部分重结晶为显微鳞片状绢云母;碳酸盐矿物不规则粒状,粒径 0.01~0.05mm,零星不均匀分布。

### 2.1.2 中粗粒石英砂岩

岩石为灰色中粗粒砂状结构,块状构造,镶嵌状胶结(图 2b、c、3b)。主要矿物成分为石英,少量长石及岩屑。石英含量 92%,单晶为主,粒状,不规则状,粒径 0.02~3mm,镶嵌状胶结,部分颗粒发生重结晶作用,发育波状消光。长石含量约 5%,包括钾长石及斜长石,多保留板柱状晶形轮廓,粒径 0.1~1.5mm,稀疏状不均匀分布于石英颗粒间隙。岩屑含量约 3%,成分为泥岩屑、砂岩屑及板岩屑,形态多不规则,直径 0.1~1.3mm,零星可见,不均匀分

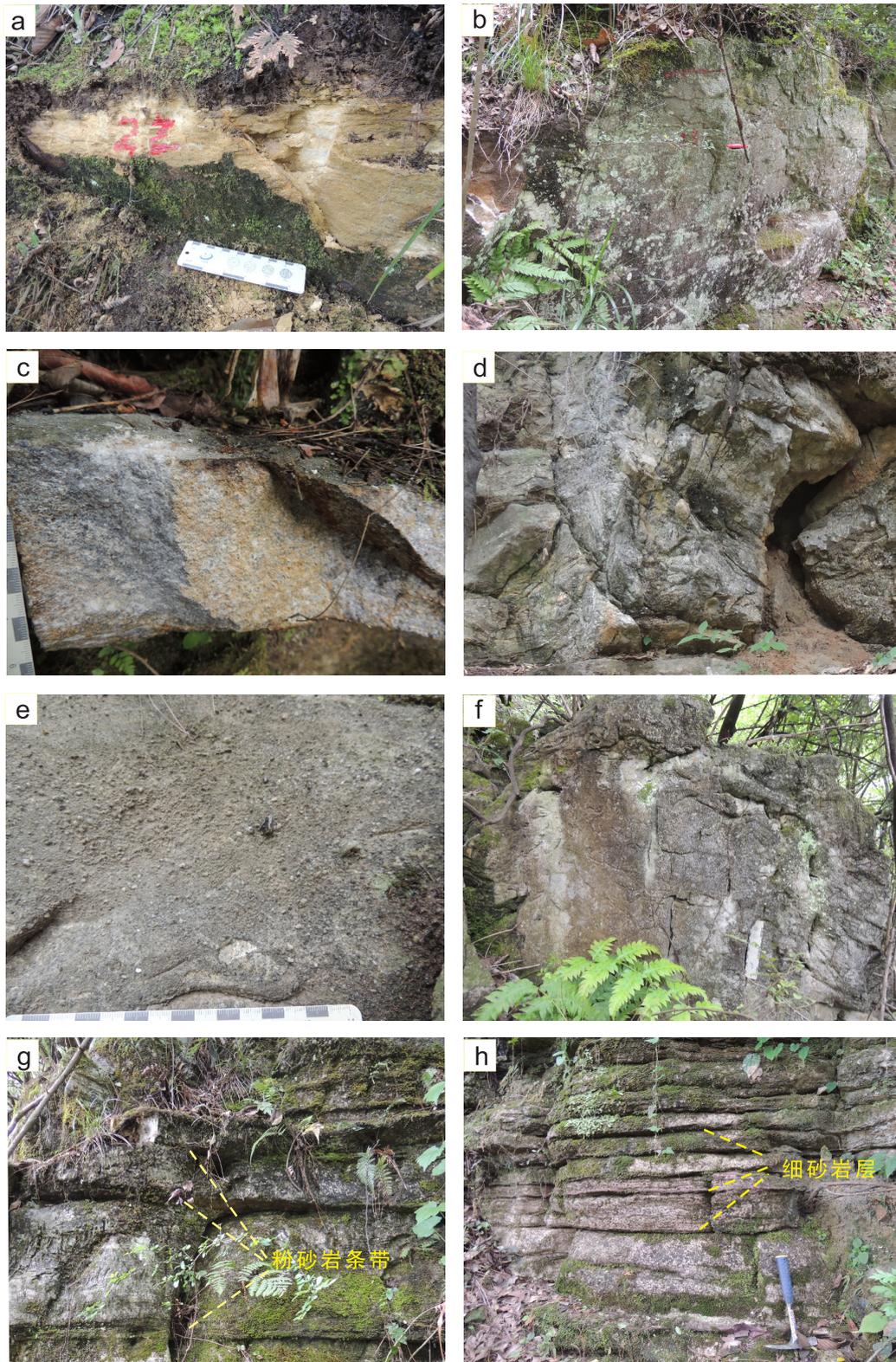


图2 南江新立地区灯影组露头特征

a. 细粒杂砂岩,22层;b. 中细粒岩屑石英砂岩,23层;c. 粗粒岩屑石英砂岩,24层;d. 粗粒含砾砂岩与白云岩交互产出,25层;e. 含砾砂岩,25层;f. 块状白云岩,26层;g. 中薄层白云岩夹粉砂岩条带,27层;h. 白云岩夹紫红色砂岩条带,28层

Fig. 2 Outcrop occurrence in the Dengying Formation in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan

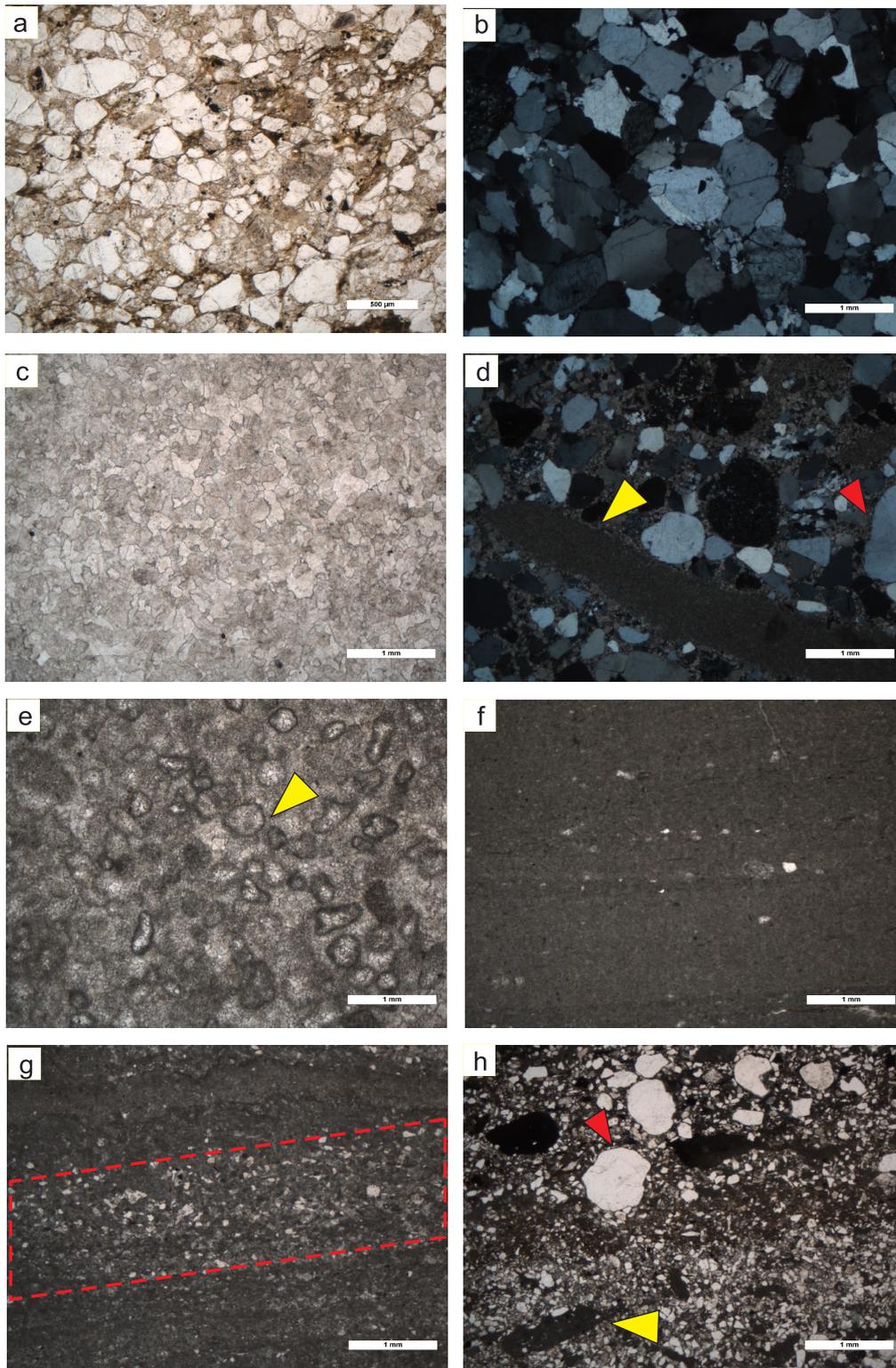


图3 南江新立地区灯影组显微镜下特征

a. 岩屑石英细砂岩,22层; b. 中粗粒石英砂岩,23、24层; c. 细晶白云岩,25层下部; d. 白云质含砾砂岩,石英砾石(红色三角),泥晶白云岩砾石(黄色三角),25层上部; e. 藻屑亮晶白云岩,球状藻屑(黄色三角),26层; f. 泥晶白云岩,27层; g. 含粉砂泥晶白云岩,粉砂质条带(红色虚线框),28层; h. 白云质粉细砂岩,石英颗粒(红色三角),泥晶白云岩颗粒(黄色三角),28层

Fig. 3 Photomicrographs of the rock types from the Dengying Formation in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan

布。

### 2.1.3 中细晶白云岩

岩石为灰色粒状结构,块状构造(图 2d,3c)。主要矿物成分为白云石,少量石英。白云石含量 97%,粒状,不规则状,粒径 0.02 ~ 0.5mm 不等,多发生结晶作用,颗粒状接触。局部发育白云石脉,颗粒垂直脉壁生长。石英含量约 2%,粒状,不规则状,粒径 0.02 ~ 0.4mm,星点状不均匀分布于白云石颗粒间。白云石脉中局部可见,粒径可达 1mm 左右。

### 2.1.4 白云质含砾砂岩

岩石为灰色含角砾不等粒砂状结构,块状构造(图 2e,3d)。角砾含量 5% ~ 10%,成分主要为石英,次为微斜长石,见白云岩角砾,次磨圆状。砂屑成分以石英为主,少量长石及岩屑,分选较差,磨圆较好,胶结类型为基底式胶结。石英含量约 65%,单晶为主,次磨圆 - 磨圆状为主,颗粒差异大,直径介于 0.1 ~ 2mm 之间,部分波状消光。长石含量约 3%,包括钾长石及斜长石,次磨圆状为主,部分保留原板状晶形,直径 0.1 ~ 2mm,稀疏状不均匀分布。岩屑含量约 3%,成分为泥岩屑、砂岩屑,次磨圆 - 磨圆状,部分形态不规则,直径 0.25 ~ 2mm,稀疏状不均匀分布。胶结物含量 20% ~ 25%,成分主要为白云石,零星见不透明矿物。白云石为粒状,不规则状,粒径 0.005 ~ 0.2mm;不透明矿物粒状,不规则状,粒径 0.01 ~ 0.25mm,零星可见。

### 2.1.5 藻屑白云岩

岩石为灰色厚层 - 块状结构,显微镜下颗粒以藻屑为主,泥晶 - 亮晶胶结(图 2f,3e)。藻屑颗粒主要为次圆形 - 椭圆形,其边缘为泥晶结构,中间为亮晶充填,藻屑大小约 0.05 ~ 0.3mm,含量约 45%,分选中等 - 较差。胶结物为泥晶 - 亮晶过渡,体现出相对动荡的水体环境。

### 2.1.6 泥晶白云岩

岩石为灰色泥晶结构,块状构造(图 2g,3f)。主要矿物成分为白云岩,偶见石英。白云石含量约 99%,粒状,不规则状,主要为泥晶颗粒,粒径 < 0.004mm。岩石受应力产生不规则状裂隙,白云石颗粒发生不均匀的结晶作用,呈脉状、不规则团状集合体沿裂隙充填形成白云石脉体。石英含量约 1%,粒状,棱角状 - 次磨圆状,粒径 0.02 ~ 0.6mm,零星不均匀分布。

### 2.1.7 含砂质泥晶白云岩

岩石为浅紫红 - 灰色,具含砂结构、泥晶结构,纹层状构造(图 2g,h,3g)。砂屑含量约 10%,棱角、次棱角状,粒径大部分 0.03 ~ 0.1mm,少量粒径可达 0.5mm,星散状及纹层状分布。白云石含量约 90%,泥晶隐晶质结构,粒径 < 0.001mm,定向分布。沿层理方向有微裂隙发育,裂隙内有褐铁矿呈细脉状充填。

### 2.1.8 白云质粉细砂岩

岩石灰色 - 紫红色,粒状结构,块状构造(图 2h,3h)。中 - 粗砂含量 10%,成分为石英、长石、岩屑,次磨圆状为主,直径 0.25 ~ 1.25mm,不均匀分布。粉 - 细砂含量 60% ~ 65%,成分主要为石英,少量长石及岩屑,棱角状 - 次棱角状,少量不规则状,粒径主要为 0.01 ~ 0.25mm。白云质含量 25% ~ 30%,泥晶状,不规则状,粒径 < 0.004mm,与粉细砂质混合产出。

## 2.2 混积层系岩石组合

根据混积层系的成分、结构,结合前人对混合沉积的划分<sup>[2,13]</sup>,本文将南江新立剖面发现的混积层系岩石组合类型进行了划分,主要分为 4 类:细砂岩 - 泥晶白云岩组合(I)、粉砂岩 - 泥晶白云岩组合(II)、粉细砂岩 - 含粉砂质白云岩组合(III)、含砾砂岩 - 白云岩组合(IV)。

### 2.2.1 组合 I 细砂岩 - 泥晶白云岩组合(图 4a)

主要由细砂岩和泥晶白云岩两个端元组成,单个组合厚度约 6 ~ 11cm。宏观上显示为灰白色泥晶白云岩夹紫红色砂岩条带,前者单层厚约 5 ~ 10cm,后者厚约 0.5 ~ 1cm,二者厚度比例约 5:1 ~ 10:1。显微镜下,砂岩端元为白云质细砂岩,细砂含量约 65%,成分主要为石英,少量长石及岩屑,次棱角状,少量不规则状,粒径主要为 0.01 ~ 0.25mm。泥质白云质含量 25% ~ 30%,泥晶状,不规则状,为泥质和白云石混合的产物。泥晶白云岩端元在显微镜下为泥晶结构,局部显示藻纹层结构。主要矿物成分为白云岩,白云石含量约 99%,泥晶结构,不规则状。见于 28 层。

### 2.2.2 组合 II 粉砂岩 - 泥晶白云岩组合(图 4b)

主要由粉砂岩和泥晶白云岩两个端元组成,单个组合厚度约 11 ~ 23cm。露头上显示为灰色中薄层泥晶白云岩,夹粉砂岩条带,白云岩单层厚度约 10 ~ 20cm,层面较平直,发育水平层理,粉砂岩条带

单层厚度约1~3cm,二者厚度比例约10:1~15:1。显微镜下,粉砂岩端元主要为白云质粉砂岩,粉砂含量62%~67%,成分主要为石英,少量长石及岩屑,次棱角状,粒径主要为0.01~0.25mm,与泥质白云质混合产出。泥晶白云岩端元为泥晶结构,局部见藻屑凝块结构,显示藻纹层结构。主要见于27层。

### 2.2.3 组合Ⅲ 粉细砂岩-含粉砂质白云岩组合(图4c)

主要由粉细砂岩和含粉砂质白云岩两个端元组成,单个组合厚度约5~15cm。粉细砂岩端元为细粒结构,成分主要为石英,少量长石及岩屑,次棱角状,粒径主要为0.01~0.25mm。含粉砂质白云岩端元主要为泥晶结构,含少量砂屑颗粒,砂屑含量约10%,棱角、次棱角状,粒径大部分0.03~0.1mm,少量粒径可达0.5mm,星散状分布。白云石含量约90%,粒径<0.001mm,略显定向分布。主要见于27、28层。

### 2.2.4 组合Ⅳ 含砾砂岩-白云岩组合(图4d)

主要由含砾砂岩和白云岩两个端元组成,单个组合厚度约40~60cm。露头上显示为灰白色粗粒含砾石英砂岩与白云岩交互产出,见两个白云岩-含砾砂岩的韵律。含砾砂岩端元为灰色含角砾不等粒砂状结构,块状构造(图2e,3g)。角砾含量5%~10%,成分主要为石英、砂岩角砾、微斜长石角砾、白云岩角砾,次磨圆状,分选较差。砂屑成分以石英为主,少量长石及岩屑,分选较差,磨圆较好,胶结类型为基底式胶结。胶结物含量20%~25%,成分主要为粒状白云石,粒径0.005~0.2mm。白云岩端元为浅灰色粒状结构,主要矿物成分为白云石,少量石英。白云石含量97%,粒状,不规则状,粒径0.02~0.5mm不等,主要为中等大小的颗粒,颗粒状接触。主要见于25层。

## 2.3 地球化学特征

混积层系的微量元素的分布与环境密切相关。海平面变化是影响沉积环境继而影响微量元素分布的重要因素<sup>[25-26]</sup>。因此,微量元素变化与海平面变化具有对应的关系,可以通过地层层序的微量元素变化曲线来讨论相应时期的海平面变化<sup>[8, 27-28]</sup>。

沉积岩中一些微量元素或比值的分布与其形成环境密切相关,且受成岩作用影响较小,是判别沉积环境氧化还原条件的良好指标<sup>[29]</sup>。研究表明,沉积岩中的V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)可作为判别

古海洋环境氧化还原状态的参数<sup>[30]</sup>。Ni/Co小于5指示氧化环境,Ni/Co为5~7指示贫氧环境,Ni/Co大于7指示缺氧环境<sup>[30-31]</sup>。研究区Ni/Co为1.1~11.8,平均值4.3,指示总体为氧化环境。其中27层、24层有两个值大于7,最大值达到11.8,指示缺氧环境。

Cr在富氧的海水条件下呈现为可溶的铬酸盐( $\text{CrO}_4^{2-}$ )形式,而在缺氧条件下,被还原成Cr(OH)<sup>2+</sup>等水合离子。这些水合离子容易被Fe、Mn的氢氧化物或腐殖酸汲取而进入沉积物<sup>[32]</sup>。此外,陆源碎屑物中也含有大量Cr<sup>[31]</sup>。Cr元素是氧化还原环境的敏感元素,易在缺氧环境下发生富集<sup>[33-34]</sup>。研究区的Cr含量为(10~56.9)×10<sup>-6</sup>,平均值22.8×10<sup>-6</sup>,整体含量较低,代表氧化环境。其中27层、24层、22层有4个值大于20,代表相对缺氧还原环境。

Mo在氧化水体中,以高价态(+6)溶解于水体中,在还原水体中,被还原为低价态(+4)沉积下来。其从水体中分离出来主要是因为水体氧化还原环境的变化,因此其在沉积物中富集的差异可以反映水体氧化还原的程度<sup>[32, 35]</sup>。研究区的Mo含量为(0.21~0.7)×10<sup>-6</sup>,平均值0.36×10<sup>-6</sup>,整体含量较低,代表氧化环境。其24层有两个值较大,达到0.7×10<sup>-6</sup>,代表相对缺氧还原环境。

从以上地球化学指标得出,研究区灯影组二段-三段整体形成于氧化环境,其中夹有两段相对缺氧环境(27层、24层),主要是因为灯影组三段早期海侵,陆源碎屑的输入迅速增多导致。研究表明,陆源碎屑输入不但可以携带大量有机物,而且可以在近岸区形成温盐跃层,限制水体交换,导致底层水体缺氧<sup>[36]</sup>。

## 3 混积层系形成主控因素

前人研究表明,陆源碎屑与碳酸盐的混积层系岩石类型多样,影响因素复杂,而且多数情况下,形成因素之间是相互作用的<sup>[2]</sup>。综合分析得出,研究区混积层系的发育,主要受到沉积环境、海平面变化和构造活动三方面因素的控制(图6)。

### 3.1 沉积环境

通过岩石类型、岩石组合特征的分析,灯影组二段上部-三段由下向上发育混积中潮坪、潮下浅滩、潮道、低潮坪4种沉积亚相(图5)。

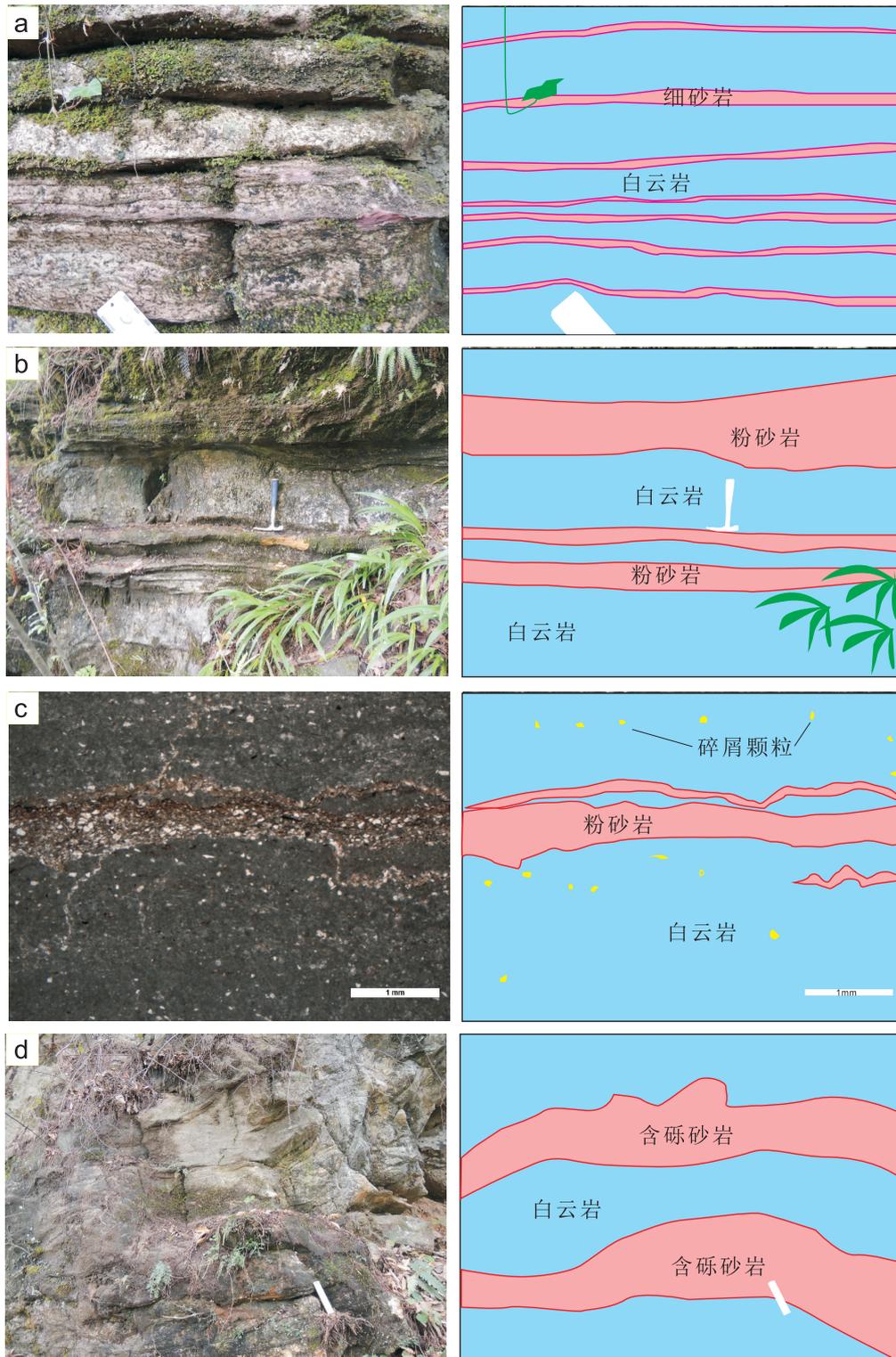


图4 四川南江新立灯影组混积层系岩石组合类型

a. 细砂岩-泥晶白云岩组合,28层;b. 粉砂岩-泥晶白云岩组合,27层;c. 粉细砂岩-含粉砂质泥晶白云岩组合,28层,27层;d. 含砾砂岩-白云岩组合,25层

Fig.4 Lithological associations in the mixed siliciclastic-carbonate successions of the Dengying Formation in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan

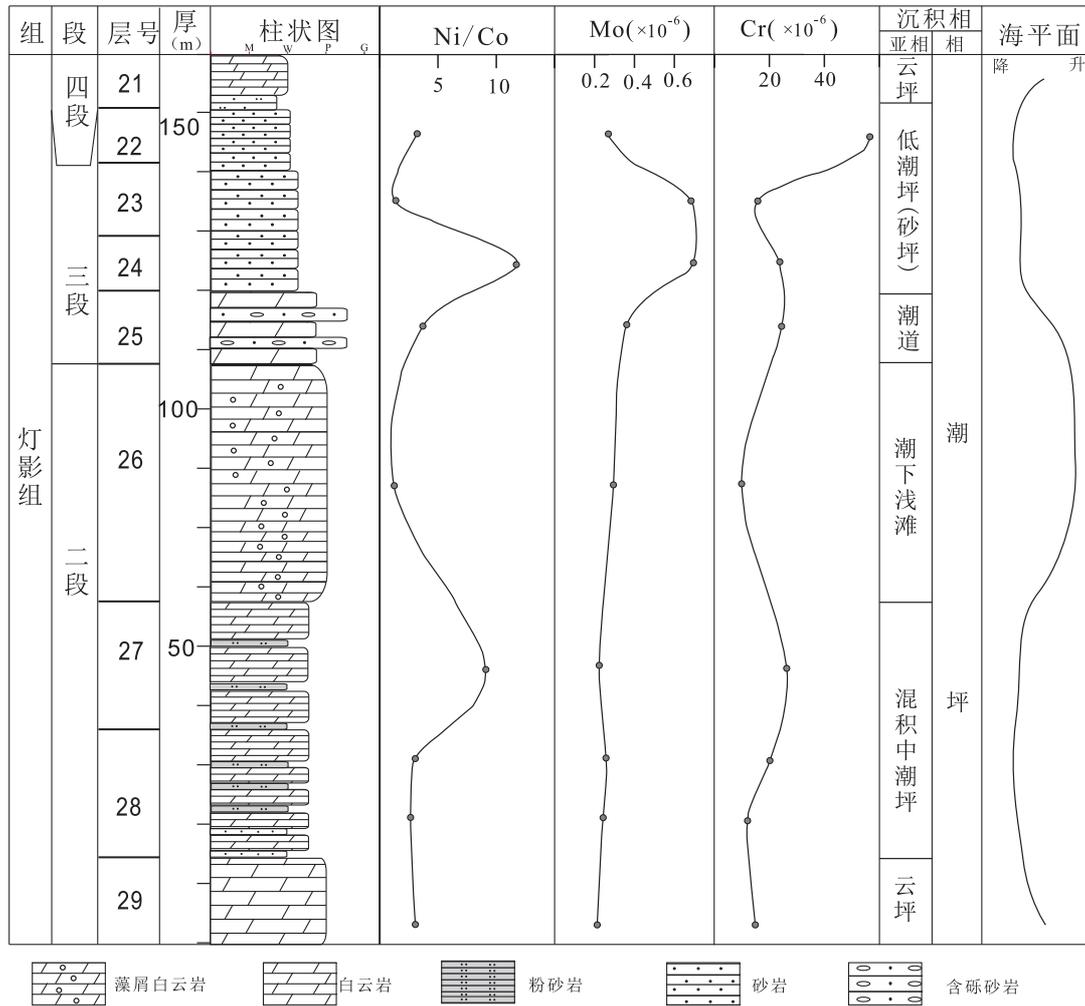


图5 南江新立剖面灯影组沉积地球化学特征与沉积环境及海平面变化

Fig.5 Column showing geochemical signatures, sedimentary environments and sea-level changes in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan

混积中潮坪环境主要发育于灯影组二段27层、28层,主要表现为中厚层泥晶白云岩与薄层粉细砂岩的互层韵律。泥晶白云岩的厚度比例相对较大,显示出碳酸盐沉积为主,有一定含量的陆源碎屑供给的中低能的中潮坪环境。根据混积程度的不同,识别出细砂岩-泥晶白云岩组合(I)、粉砂岩-泥晶白云岩组合(II)、粉细砂岩-含粉砂白云岩组合(III)3种混积层系岩石组合。地球化学上显示 Ni/Co 的高值、Cr 的富集(图5),代表氧化-缺氧过渡的环境,由下向上,氧化还原条件从氧化过渡到缺氧。

潮下浅滩环境主要发育于灯影组二段26层,主要岩石特征为灰色块状白云岩,显微镜下为亮晶砂屑结构。砂屑颗粒主要为藻屑颗粒,其边缘为泥晶

结构,内部为亮晶白云石充填,颗粒之间以亮晶胶结为主,少量胶结物为泥晶。综合分析认为,其代表了水体相对动荡的浅滩沉积环境,碳酸盐沉积为主,缺少陆源碎屑供给。微量元素地球化学方面 Ni/Co 小于5, Cr、Mo 含量均较低,代表了氧化水体条件,与沉积相分析的结果一致。

潮道环境发育于灯影组三段25层,主要表现为含砾砂岩-白云岩混积层系岩石组合(IV)。露头上为灰白色粗粒含砾石英砂岩与白云岩交互产出,局部见槽状交错层理。显微镜下观察,含砾砂岩中角砾含量5%~10%,次磨圆状,成分主要为石英岩、砂岩,白云岩。砂屑成分以石英为主,分选较差,磨圆较好。胶结物主要成分为细晶白云石,少量石英。综合分析得出,其代表了高能的潮汐水道

环境,具有陆源碎屑和碳酸盐的显著混积特征。沉积地球化学上显示 Ni/Co 小于 5, Mo 含量也较低,但高于 26 层, Cr 含量较高,与 27 层相当,代表了氧化-贫氧的过渡环境,与沉积相分析的结果一致, Cr 的高值可能是陆源输入增多导致的。

低潮坪环境主要发育于灯影组三段 22、23、24 层。主要岩石为灰色中-细粒岩屑长石石英砂岩。主要矿物成分为石英,含少量长石及岩屑。由下向上,砂岩粒径减小,颗粒含量减少,泥质增多。总体上代表了碎屑岩沉积为主的低潮坪环境,缺少碳酸盐。沉积地球化学上显示 Ni/Co 大于 7, Mo 含量达到最高,指示相对贫氧的水体条件,与沉积相分析的结果一致。

前人对灯影组一段、二段、四段白云岩的沉积环境认识基本一致,多认为是潮坪环境,但是对于灯影组三段碎屑岩夹白云岩的沉积环境研究相对较少,且多为笼统认为是无障壁海岸的滨海陆屑滩相<sup>[37]</sup>或者混合滩-台盆环境<sup>[38]</sup>、滨岸-潮坪环境<sup>[39]</sup>。本文立足于灯影组二段上部和三段沉积中含有碳酸盐和碎屑岩两种组分,且具有不同程度混合沉积作用的特征,来深入分析其沉积环境演化。由下向上,可以划分出混积中潮坪、潮下浅滩、潮道和低潮坪 4 种沉积亚相。在混积中潮坪和潮道环境,混合沉积作用程度相对较高。混积中潮坪环境主要为紫红色泥晶白云岩与粉砂岩、细砂岩条带的混合,而潮道环境中表现为白云质含砾砂岩与中细晶白云岩的组合。浅滩和低潮坪环境,混合沉积作用发育较弱。浅滩环境主要为藻砂屑亮晶白云岩,低潮坪环境主要发育细砂岩-粉砂岩。从地层接触关系看,混积岩与碳酸盐岩是渐变过渡的,从沉积相的时空分布看,混合沉积是频繁发生的。Tucker(1982)研究挪威晚寒武世风暴沉积时发现,潮下较深水环境的背景沉积为灰泥,细粒砂是由风暴大潮从近滨带入的<sup>[40]</sup>。Markello 对古代陆棚沉积的研究表明,风暴作用可以将生物碎屑和石英砂一起带入一般浪基面下的潮下环境,从而形成碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积<sup>[41]</sup>。在陆源碎屑沉积与浅水碳酸盐沉积毗邻的环境(如潮缘),两种沉积作用可以同时进行,进而形成大量的混合沉积<sup>[8, 42]</sup>。

### 3.2 海平面变化

陆源碎屑和碳酸盐混积层系的特征,陆源碎屑沉积反映了海平面下降而带进的盆地外源的沉积

物堆积,并抑制了碳酸盐沉积;而碳酸盐体现了海平面上升而发育的清水盆内沉积<sup>[6, 43-44]</sup>。

灯影组一、二段,在扬子碳酸盐台地上沉积了潮下-潮上带藻白云岩及白云岩。蓝藻、似红藻等大量繁殖,在潮下高能带形成核形石,潮间-潮上带形成叠层石及藻屑白云岩。此外还有泥晶、粉晶白云岩、亮晶白云岩、葡萄状白云岩。此后,在灯影组三段早期,由于构造运动,地壳发生局部隆起,沉积环境发生短暂的变化,海平面也相对下降<sup>[45-46]</sup>。陆源碎屑供给增多,碳酸盐台地由清水沉积变成混水沉积,沉积了几十米厚的碎屑岩,在古陆边缘为粉砂岩、海绿石砂岩偶夹砂砾岩及泥质白云岩。灯影组四段又过渡为潮坪沉积环境,沉积了泥晶、微晶白云岩夹薄层硅质条带和结核<sup>[47-48]</sup>(图 6)。

研究区以西广元旺苍地区的灯影组三段发育含泥质白云岩、泥岩、粉砂岩、细砂岩、硅质岩,与下伏灯影组二段白云岩呈突变接触<sup>[39]</sup>。在南江县杨坝镇地区灯影组三段由下向上出露泥岩、硅质岩、砂岩序列,反映出快速海侵的沉积特征<sup>[39]</sup>。在川西南先锋剖面中,灯影组二段浅灰色厚层白云岩与上覆灯影组三段蓝灰色泥岩呈突变接触。川东巫溪康家坪剖面灯影组二段灰白色藻白云岩与灯影组三段浅灰色薄层泥岩之间呈突变接触。威远-资阳地区岩心揭示灯影组二段顶部发育大量因地层隆升导致的风化侵蚀和大气淡水溶蚀形成的溶蚀孔洞<sup>[49]</sup>。灯影组二段上部和三段的混积层系很可能是由于海平面相对下降、陆源碎屑供给增多、与碳酸盐不同程度混合沉积形成。

### 3.3 构造抬升

混积层系是在海陆交互环境下碎屑岩与碳酸盐岩交互沉积的产物。构造活动的强弱程度直接影响陆源碎屑供给量,构造抬升时期源区剥蚀增强,陆源碎屑供给显著增多<sup>[15]</sup>。

晚震旦世到早寒武世,中国南方长期处于拉张环境。震旦纪-寒武纪之交的桐湾运动表现为以垂直升降为主。上扬子地区晚震旦世-早寒武世发育三套不整合面,反映桐湾运动的三幕式特征<sup>[39, 50]</sup>。其中,桐湾运动 I 幕发生在灯影组二段末期,表现为灯二段与灯三段间的不整合接触。灯影组二段地层暴露并遭受不同程度的剥蚀。灯影组三段、四段沉积期,上扬子地区进入新一轮的海侵-海退旋回。灯三段沉积期,由于海平面快速上

升,盆地内普遍发育一套以碎屑岩为主的沉积物,岩性以灰色泥岩、粉砂岩、硅质岩和含砾砂岩为主,局部地区相变为含泥质白云岩,沉积厚度为几米到几十米不等。区域上,灯影组三段总体处于潮坪-陆棚-次深海的沉积背景。在广元-内江地区发育一个近南北向展布的深水陆棚区,其两侧为浅水

陆棚-潮坪沉积<sup>[39]</sup>。

因此,在桐湾 I 幕的构造抬升,下伏地层遭受剥蚀后,上扬子地区又经历了构造沉降、迅速海侵等过程,沉积了灯影组三段混积层系地层序列<sup>[49]</sup>。灯影组三段混积层系中陆源碎屑的来源主要源自桐湾运动 I 幕抬升导致的。

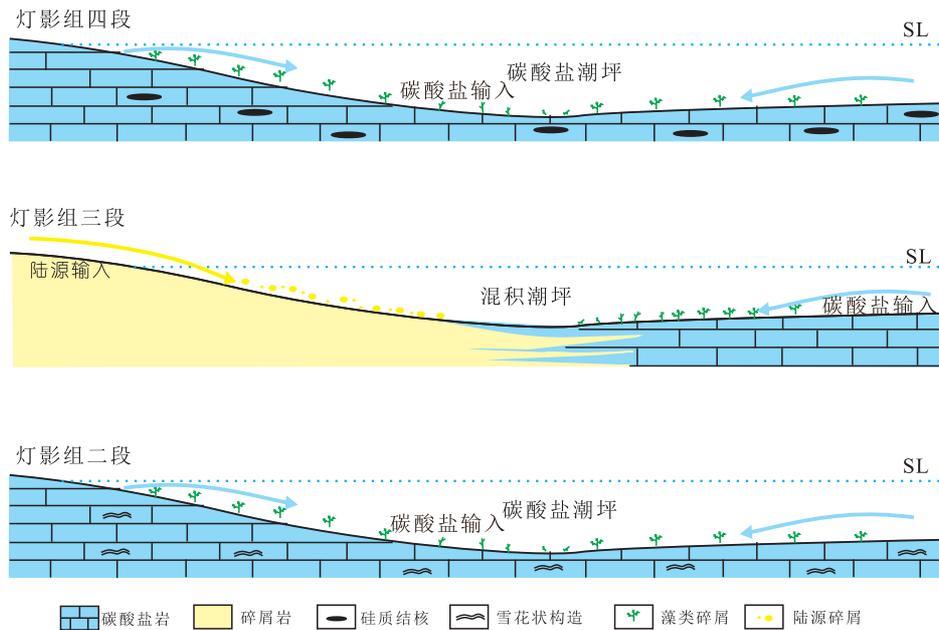


图6 四川南江新立剖面灯影组三段混积层系成因模式

Fig. 6 Genetic model for the mixed siliciclastic-carbonate successions in the 3rd member of the Dengying Formation in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan

## 4 结论

(1)在四川南江新立灯影组剖面发现的碎屑岩-碳酸盐岩混积层系,识别出4类混积层系岩石组合类型:细砂岩-泥晶白云岩组合(I)、粉砂岩-泥晶白云岩组合(II)、粉细砂岩-含粉砂质白云岩组合(III)、含砾砂岩-白云岩组合(IV)。

(2)通过岩石类型、岩石组合特征的分析,灯影组二段上部-三段由下向上发育混积中潮坪、潮下浅滩、潮道、低潮坪4种沉积亚相。混积层系主要发现于混积中潮坪和潮道亚相。

(3)灯影组二段上部与三段陆源碎屑和碳酸盐混积层系的出现,与桐湾运动 I 幕启动,海平面相对下降,陆源碎屑输入迅速增加有关。

## 参考文献:

- [1] 杨朝青,沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境:一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. 沉积学报,1990,8(2):59-66.
- [2] 董桂玉,陈洪德,何幼斌,等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. 地球科学进展,2007,22(9):931-939.
- [3] Mount J. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification [J]. Sedimentology, 1985, 32(3):435-442.
- [4] 张锦泉,叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. 成都地质学院学报,1989,16(2):87-92.
- [5] Zecchin M, Catuneanu O. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves VI: Mixed siliciclastic-carbonate systems [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 88:712-723.
- [6] Chiarella D, Longhitano S G. Distinguishing depositional environments in shallow-water mixed, bio-siliciclastic deposits on the basis of the degree of Heterolithic Segregation (Gelasian, Southern Italy) [J]. Journal of Sedimentary Research, 2012, 82(11-12):969-990.
- [7] 郭福生,严兆彬,杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论

- [J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 68-68.
- [8] 江茂生, 沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. 地球科学进展, 1995, 10(6): 551-554.
- [9] 郭书元, 张广权, 陈舒薇. 陆表海碎屑岩-碳酸盐岩混积层系沉积相研究—以鄂尔多斯东北部大牛地气田为例[J]. 古地理学报, 2009, 11(6): 611-627.
- [10] 郑荣才, 周刚, 董霞, 等. 龙门山甘溪组谢家湾段混积相和混积层序地层学特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 33-41.
- [11] 冯进来, 胡凯, 曹剑, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混积岩及其油气地质意义[J]. 高校地质学报, 2011, 17(2): 297-307.
- [12] Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. *Geology*, 1984, 12(12): 432-435.
- [13] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 31-34.
- [14] 伏美燕, 张哨楠, 赵秀, 等. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区石炭系混合沉积研究[J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 155-164.
- [15] 郭福生. 浙江江山藕塘组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 136-141.
- [16] Borer J M, Harris P M. Depositional Facies and Model for Mixed Siliciclastics and Carbonates of the Yates Formation, Permian Basin [J]. *Core Workshop Notes*, 1991, (15): 1-133.
- [17] 高岗, 杨尚儒, 屈童. 混合沉积研究现状及其与油气富集的关系[J]. 地质科技情报, 2018, 37(6): 82-88.
- [18] Barnaby R J, Ward W B. Outcrop Analog for Mixed Siliciclastic-Carbonate Ramp Reservoirs-Stratigraphic Hierarchy, Facies Architecture, and Geologic Heterogeneity: Grayburg Formation, Permian Basin, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(1-2): 34-58.
- [19] 杜思清, 魏显贵, 刘援朝, 等. 汉南-米仓山区叠加东西向隆拗的北东向推覆构造[J]. 成都理工大学学报(自科科学版), 1998, 25(3): 367-374.
- [20] 肖安成, 魏国齐, 沈中延, 等. 扬子地块与南秦岭造山带的盆地系统与构造耦合[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 601-611.
- [21] 魏显贵, 杜思清, 何政伟, 等. 米仓山地区构造演化[J]. 矿物岩石, 1997, 17(s1): 107-113.
- [22] 魏显贵, 杜思清, 刘援朝, 等. 米仓山推覆构造的结构样式及演化特征[J]. 矿物岩石, 1997, 17(s1): 114-122.
- [23] 邓胜徽, 樊茹, 李鑫, 等. 四川盆地及周缘地区震旦(埃迪卡拉)系划分与对比[J]. 地层学杂志, 2015, 39(3): 239-254.
- [24] 刘宏, 罗思聪, 谭秀成, 等. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 283-293.
- [25] 汪凯明, 罗顺社. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义—以冀北拗陷长城系高于庄组为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, (3): 343-349.
- [26] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91-99.
- [27] 汪凯明, 罗顺社. 海相碳酸盐岩铍同位素及微量元素特征与海平面变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 51-59.
- [28] 马志鑫, 李波, 刘喜停, 等. 黔东南寒武统清虚洞组地球化学特征及其对沉积环境演化的指示[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 71-77.
- [29] 颜佳新, 张海清. 古氧相——一个新的沉积学研究领域[J]. 地质科技情报, 1996, 15(3): 7-14.
- [30] Jones B, Manning D A. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1-4): 111-129.
- [31] 林治家, 陈多福, 刘芊. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(1): 72-80.
- [32] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update [J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1): 12-32.
- [33] 梁文君, 肖传桃, 肖凯, 等. 藏北安多晚侏罗世古环境、古气候与地球化学元素关系研究[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 1079-1091.
- [34] 王随继, 黄杏珍, 妥进才. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 65-70.
- [35] Algeo T J, Tribouillard N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation [J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3-4): 211-225.
- [36] 郑静静, 刘桂梅, 高姗. 海洋缺氧现象的研究进展[J]. 海洋预报, 2016, 33(4): 88-97.
- [37] 王东, 王国芝. 四川南江灯影组白云岩葡萄状构造成因分析[J]. 四川地质学报, 2010, 30(4): 454-456.
- [38] 吴德超, 魏显贵, 何政伟, 等. 1:5 万关坝幅地质图说明书, 1995.
- [39] 邢凤存, 侯明才, 林良彪, 等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 115-125.
- [40] Tucker M. Storm-surge Sandstones and the Deposition of Interbedded Limestone: Late Precambrian, Southern Norway [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1982.
- [41] Markello J R, Read J F. Carbonate ramp-to-deeper shale transitions of an Upper Cambrian intrashelf basin, Nolichucky Formation, Southwest Virginia Appalachians [J]. *Sedimentology*, 2010, 28(4): 573-597.
- [42] Yose L A, Heller P L. Sea-level control of mixed carbonate-siliciclastic, gravity-flow deposition: Lower part of the Keeler Canyon Formation (Pennsylvanian), southeastern California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(3): 427-439.
- [43] Zonneveld J P, Gingras M K, Beatty T W, et al., Chapter 26-Mixed Siliciclastic/Carbonate Systems, in *Developments in Sedimentology* [M]. vol. 64, D. Knaust and R. G. Bromley. Elsevier, 2012. 807-833.

- [44] 龚文平,肖传桃,胡明毅,等. 藏北安多—巴青地区侏罗纪含礁层系岩相及沉积环境[J]. 地质科学,2006,41(3):479-488.
- [45] 汪泽成,姜华,王铜山,等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3):305-312.
- [46] 罗贝维,贾承造,魏国齐,等. 四川盆地上震旦统灯影组风化壳古岩溶特征及模式分析[J]. 中国石油大学学报自然科学版,2015,(3):8-19.
- [47] 杨暹和,陈远德. 西南地区地层总结—震旦系[M]. 重庆:重庆出版社,1981.
- [48] 王东. 南江地区灯影组白云岩优质储层形成机制研究[D]. 成都:成都理工大学,2010.
- [49] 武赛军,魏国齐,杨威,等. 四川盆地桐湾运动及其油气地质意义[J]. 天然气地球科学,2016,27(1):60-70.
- [50] 冯伟明,谢渊,李嵘,等. 川东南—黔西北桐湾Ⅲ幕岩溶古地貌恢复[J]. 地质论评,2017,63(5):1270-1280.

## Characteristics and genesis of the mixed siliciclastic-carbonate successions in the Upper Sinian Dengying Formation in the Nanjiang region, Sichuan

MA Zhixin<sup>1</sup>, LUO Maojin<sup>1</sup>, LIU Xiting<sup>2</sup>, REN Jingwei<sup>3</sup>, HUANG Teng<sup>4</sup>, SUN Zhiming<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Technology supported by the Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. No. 605 Geological Party, Sichuan Bureau of Metallurgical Geology and Exploration, Meishan 620860, Sichuan, China)

**Abstract:** The mixed siliciclastic-carbonate successions represent a special type of depositional mechanisms and significant deposition. They are well developed in the Upper Sinian Dengying Formation in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan. Four lithologic associations have been distinguished, including (1) fine-grained sandstone-dolomicrite association; (2) siltstone-dolomicrite association; (3) silty sandstone-silty dolostone association, and (4) gravelly sandstone-dolostone association. Four sedimentary subfacies types are also recognized on the basis of the rock types and associations, including the mesotidal flat, subtidal shoal, tidal channel and lower tidal flat subfacies. The mixed siliciclastic-carbonate successions occur primarily in the mesotidal flat and tidal channel subfacies. The trace element data show that the studied strata are generally formed in the oxidation environments. However the mixed siliciclastic-carbonate successions are formed in the anoxic environments. In the light of the sea-level changes and tectonic evolution, the development of the mixed siliciclastic-carbonate successions in the Dengying Formation in the Xinli section, Nanjiang region, Sichuan may be accompanied by the siliciclastic input caused by the negative movements following the phase I of the Tongwan Movement.

**Key words:** mixed siliciclastic-carbonate succession; Dengying Formation; Nanjiang; Sinian