

文章编号: 1009-3850(2014)03-0001-11

全球二叠系顶部白云岩与沉积相关系统计 及其白云石化机制的意义

赵 锐, 吴亚生, 谭俊英, 姜红霞, 刘丽静

(中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029)

摘要: 本文对全球范围内 23 个典型的研究程度较高的晚长兴期露头进行了研究,逐一检查了晚长兴期白云岩前身沉积的沉积相,结果发现所有白云岩的前身都是浅水相的(除汉中梁山一个剖面外)。相反,目前已经研究的深水相上二叠统碳酸盐沉积物都没有发生白云岩化。这一结果表明,世界范围内上二叠统顶部白云岩的形成机制可能都与海平面下降有关,很可能是蒸发成因的浓缩卤水使沉积物发生白云岩化。据此推断,四川盆地东北部长兴组白云岩也应当是此种成因。

关键词: 上二叠统; 长兴阶; 沉积相; 白云岩; 川东北; 白云石化机制

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

1 概述

自 20 世纪 60 年代开始,相继出现了许多白云岩成因模式,比较成熟的模式有: (1) 沉积模式: 原生白云石直接从沉积物与水界面上的水体中沉淀而来,深泉湖^[1-3]和巴芬湾^[4]是著名的现代原生白云石产地,其沉积环境分别为干旱区的小泉源湖和含正常海相化石的局限海湾,具超咸化水体; (2) 渗透回流模式: 潮上带受局限的蒸发泻湖环境中,随着蒸发作用加强,高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比的卤水沉淀出石膏后,卤水下渗,引起底质白云石化,通常白云岩位于蒸发岩之下,伴生硬石膏包体、石盐包体^[5]; (3) 萨布哈模式: 潮间-潮上带潮坪环境的盐沼地区,季节性潮汐补给的海水由于蒸发强烈而浓缩,使沉积物发生白云石化,通常伴生鸟眼、干裂、蒸发盐^[6-8]; (4) 地下混合水带模式: 分内陆与海岸型混合水带,在台缘地下水与海水交汇处以及孤立台地大气降水与海水混合处形成白云石化^[9,10],其沉积环境通常为台缘古地形高部位与滨线附近,与该模式类似的有“变盐度白云石化”,指水体经历从超盐度到低

盐度的剧烈交替环境,如干旱的潮上坪、浅的超咸湖和一些地下水环境^[11,12]; (5) 区域深埋藏模式: 包括埋藏压实^[13]、地形-重力驱动流体^[14]、环形热对流模式^[15],其白云石化流体分别为盆地演化早期毗邻台地或陆架边缘的深水盆地沉积物压实驱入的地层水、重力驱动的源自成熟期盆地的热水(温度大于 60℃)、地下深处经地温加热后与周围冷海水环形对流的台地内热水; (6) 构造热液模式: 区域构造作用、岩浆侵入作用、火山作用及变质作用产生的热液(至少高于环境温度 5℃以上)沿断层、渗透性好的灰岩孔隙进入上覆地层,使之白云石化。

以上模式中, (2)、(3)、(4) 都与相对海平面下降有关。正常情况下,当碳酸盐岩沉积物堆积到海平面附近时,就会停止,除非当时海平面相对上升。而当海平面下降,到达海平面附近的碳酸盐沉积物就会暴露,进入蒸发环境。若海平面进一步下降,浅水台地相的沉积物也会暴露,进入蒸发环境。在碳酸盐沉积物暴露进入潮上带环境后,蒸发作用可能会导致白云石化作用。在形成岛屿的情况下,淡水-海水混合带可能会发生白云石化作用。除非海

平面下降幅度很大,否则深水相很难暴露,一般来说,深水相的水深超过 150m 以上^[16]。所以要使深水相进入暴露环境,需要海平面有 150m 以上的下降幅度。

国外研究二叠系-三叠系界线地层的学者一直否认二叠纪-三叠纪之交存在海平面事件^[17]。但吴亚生等(2003)首次在贵州紫云剖面发现二叠纪末海平面下降的证据,目前已经被越来越多的研究所支持^[18,19]。吴亚生定量计算得出在贵州紫云剖面上,二叠纪末海平面下降幅度达到 89m 以上。这样大的下降幅度将使所有的浅水相碳酸盐沉积抬升到潮间或潮上环境,但这样的下降幅度不能使深水相沉积暴露。冯庆来等研究盆地相的剖面发现海平面下降幅度较大,使盆地相显著变浅,但没有达到暴露的程度(私人交流)。全球性的大规模海平面下降会普遍地使浅水的台地相沉积物进入暴露环境,但由于各个地区的构造运动性质和速率的差异,全球海平面下降在各地的反映会有所不同。在构造上升的地区,相对海平面下降会大于全球海平面下降。反之,在构造下降的地区,相对海平面下降会小于全球海平面下降。如果相对海平面下降时沉积物进入潮上蒸发环境,蒸发卤水的下渗会使原来的碳酸钙沉积物发生白云石化,形成规模不等、特征有别的白云岩。

四川盆地上二叠统长兴阶除底部以外普遍白云石化,并构成了四川盆地的主要优质储层之一。我们的研究认为,长兴阶中上部白云石化之前的灰岩普遍为生物礁和浅水开阔台地相。确定这套白云岩的形成机制是储层研究的核心内容之一。许多学者对白云岩的形成机制进行了研究,但是一直没有取得一致的认识。这些认识可以归结为两类:准同生期蒸发或混合水成因的,或埋藏成因的^[20-29]。

为了进一步确定这套白云岩的成因,我们设计和开展了白云岩与其前身沉积相关性的统计研究。其原理是:如果我们通过研究证明所有长兴阶顶部白云岩的前身沉积都是浅水相的,而深水相的长兴阶顶部都没有白云石化,我们就可以初步确定长兴阶顶部白云岩的形成很可能与全球海平面下降事件有关。在全球海平面下降的大背景下,大多数的浅海相,尤其是发育生物礁的地区,会进入潮坪或潮上蒸发环境,从而发生白云石化作用。发生快速构造下降的地区或者深水相地区不能进入潮坪或潮上环境,所以不发生准同生型的白云石化作用。

现将世界范围内所有已知的保存和出露较好

的上二叠统-下三叠统剖面逐一进行沉积相和白云岩关系的统计分析。

2 全球晚长兴阶剖面统计与对比

长兴阶为上二叠统(乐平统)的最后一个阶,也是二叠系的最后一个阶。目前,对上二叠统长兴阶与下三叠统最下部的 Griesbachian 阶的分界线上、下的地层,即界限地层的认识已经比较深入。2005 年 9 月,长兴阶底界层型和点位(GSSP)在浙江长兴煤山 D 剖面被批准确立。根据煤山 D 剖面建立的牙形刺化石带已成为世界长兴阶地层对比的主要工具之一。煤山 D 剖面二叠系-三叠系界限地层成熟的牙形刺化石带划分方案由 Yin et. al (2001) 提出,并由吴亚生^[30]进行了修订(表 1)。据表 1,长兴阶顶部自上而下依次划分出 *Hindeodus changxingensis* 带、*Clarkina meishanensis* 带、*Clarkina yini* 带。下三叠统底部由下而上依次划分出 *Hindeodus parvus* 带、*Isarcicella staeschei* 带。

表 1 浙江长兴煤山 D 剖面二叠系-三叠系界限地层生物地层划分

Table 1 Biostratigraphic division of the Permian-Triassic boundary strata in the Changxingian D section, Meishan, Zhejiang

年代地层	亚层	牙形刺化石分带		
		Yin et.al, 2001	Wu, 2005	
下二叠统	Griesbachian	28	<i>Isarcicella isarcica</i> Zone	<i>Isarcicella staeschei</i> Zone
		27d		
		27c	<i>Hindeodus parvus</i> Zone	<i>Hindeodus parvus</i> Zone
上二叠统	Changxingian	27b		
			<i>Hindeodus typicalis</i> Zone	<i>Hindeodus changxingensis</i> Zone
		27a		
		26	<i>Clarkina meishanensis</i> Zone	<i>Clarkina meishanensis</i> Zone
		25		
		24e	<i>Clarkina yini</i> Zone	<i>Clarkina yini</i> Zone

二叠纪末的海退使特提斯海域大部分成为陆地,上二叠统长兴阶海相地层普遍遭受抬升剥蚀,仅零星分布于中国南方、泰国、马来西亚、越南、锡霍特山脉、帕米尔、外高加索、北高加索、伊朗、希腊和南斯拉夫等地^[31]。由于二叠纪末的构造抬升,世界范围内二叠系顶部和三叠系底部都有保存的地层剖面并不多,而且大多数剖面在中国。很多其它国家的长兴阶露头仅相当于长兴阶的中下部,例如:日本九州东部露头的 Mitai 组大致相当于中国南方长兴阶下部,伊朗北部、西北部和俄罗斯外高加索地区的长兴阶露头相当于中国南方长兴阶下部^[31]。这些露头都缺乏长兴阶顶部地层,不符合我们的统计要求。根据对前人研究成果的统计,保存

有上二叠统长兴阶地层的典型露头有 36 个(表 2)。由于剖面数量有限,通过列举法就可以对长兴阶顶部白云岩与原岩沉积相的关系进行分析和探讨。

在严格以牙形刺化石带进行地层对比的基础上,本文对全球范围内研究程度较高,保存较好的长兴阶顶部到三叠系底部地层剖面的岩石特征和沉积相进行逐一介绍,以揭示白云岩发育与原岩沉积相之间的关系。

保存较好的长兴阶顶部—下三叠统底部露头剖面(包括与之同期的大隆组上部,而外高加索及伊朗二叠系顶部的 Dorashamian 阶仅相当于长兴阶下部,故不在统计范围内^[32])主要分布于阿曼、匈牙利、日本、土耳其、斯洛文尼亚、加拿大和中国华南,大致沿古特提斯边缘分布(图 1),其中华南地区露

头最多,出露最为广泛。

本文的沉积相划分方案采用 Willson(1975)的方案,将现代碳酸盐台地由海向陆分为 9 个相带:盆地、开阔陆棚、碳酸盐斜坡脚、前斜坡、台缘生物礁、台地边缘浅滩、开阔台地、局限台地、蒸发台地。其中前 4 个相水深一般大于 50m,在本文归入深水相范畴。后 5 个相带归入浅水相的范畴。实际上,局限台地及蒸发台地相水深只有几米或暴露于海面之上。

我们从表 2 中选取了 23 个研究程度高、沉积相划分明确的露头作为重点统计对象,介绍如下。

2.1 深水相剖面

2.1.1 阿曼 Maqam(Sumeini)剖面(图 2A)

位于阿曼与阿拉伯联合酋长国交界处。Maqam

表 2 全球上二叠统长兴阶露头统计
Table 2 Statistics of the world-wide Upper Permian Changxingian outcrop sections

剖面名称	位置	剖面名称	位置	剖面名称	位置
凤凰山剖面 ^[33]	陕西省汉中梁山地区	湖南慈利县黄莲峪剖面 ^[34]	慈利县熊家庄南 7km 黄莲峪	浙江长兴煤山 D 剖面 ^[35]	浙江长兴
土地垭剖面 ^[36]	四川盆地东南边缘华蓥山脉的北碚观音峡附近	陕西镇安西口剖面 ^[34]	镇安溪口的聂家沟	朝天剖面 ^[37,38]	位于川北,距广元县城 30 公里,处于扬子台地的西北边缘
无锡嵩山剖面 ^[39,40]	无锡市东郊安镇南部	四川重庆北碚代家沟剖面 ^[34]	代家沟公社三财升煤矿以北 1km 处	匈牙利 Gerennavár 剖面 ^[41]	匈牙利 Bükk Mountains 地区
湖北利川小河剖面 ^[34]	鄂西利川小河区小河煤矿至龙塘埔简易公路旁	江苏宜兴九里山剖面 ^[34]	宜兴鼎蜀镇西南湖汊乡九里山	阿曼 Saih Hataf 地区 Aday 1 剖面 ^[42]	阿拉伯板块 Wadi Aday 东部边缘中心地区
湖北利川见天坝剖面 ^[34]	利川见天坝乡吴家湾村	安徽铜陵塘山-尖山剖面 ^[34]	安徽铜陵县朱村乡,东风村塘山-尖山	大文剖面 ^[18,43,44]	贵州南盘江盆地
湖北黄石冶钢二门剖面 ^[34]	湖北黄石市大冶钢厂二门	福建大田崆峒山剖面 ^[34]	福建省大田县崆峒山采石场	匈牙利 Bálvány-North 剖面 ^[45]	匈牙利 Bükk Mountains 地区。
湖南桑植县仁村坪剖面 ^[34]	桑植县凉水口镇北约 7km 仁村坪村旁澧水河两岸	上寺剖面 ^[46]	川北广元市	阿曼 Wadi Sahtan (autochthonous) 剖面 ^[47]	位于 Fashah village 北部 Wadi Sahtan 峡谷
湖南慈利县江垭石灰窑剖面 ^[34]	慈利县江垭镇西北 3km 澧水河岸	加拿大 Otto Fiord South 与 Griesbach Creek 剖面 ^[48]	分别位于 Sverdrup 盆地中 Ellesmere 岛屿西北部和 Axel Heiberg 岛屿	阿曼 Maqam (Sumeini) 剖面 ^[47]	位于阿曼与阿拉伯联合酋长国交界处
江西上高县七宝山 ^[34,49,50]	江西省上高县七宝山铁矿区	日本 Sasayama 地区 A 剖面 ^[51,52]	Mino-Tanba 构造带	日本 Gujo-hachiman 剖面 ^[53]	
湖南慈利县黄莲峪剖面 ^[34]	慈利县熊家庄南 7km 黄莲峪	藏南色龙西山剖面 ^[54-56]	藏南聂拉木县,紧邻希夏邦马峰	凉风垭剖面 ^[57]	位于重庆以西 13km 处
贵州紫云石头寨、旦旦 ^[34,58,59]	位于贵州省紫云县城附近	老龙洞剖面 ^[60,61]	重庆北碚天府煤矿一带	斯洛文尼亚 Lukac 剖面 ^[62]	位于斯洛文尼亚西北部 Ziri 地区西北方 4km,在 Mrzlivrh 与 Ledinskigri 之间的峡谷中
贵州安顺轿子山剖面 ^[34]	安顺市北约 20km 的轿子山煤矿	修水剖面 ^[63,64]	江西省修水四都镇东岭村	盘龙洞剖面(本文)	位于川东北鸡唱乡

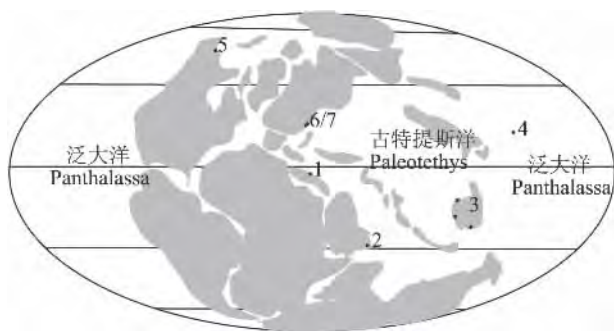


图1 二叠纪-三叠纪过渡时期全球古地理格局图(Erwin , 1994)

Fig. 1 Palaeogeographic framework on the globe at the Permian - Triassic boundary (after Erwin , 1994)

剖面 B6 亚层为长兴阶顶部地层,厚 6m,岩性为具波状层理(厚度约 5 ~ 15cm)的褐色灰岩与薄层红色泥岩互层,泥岩中含少量牙形刺与燧石,常见滑塌构造与角砾,被认为是斜坡相沉积^[47]。

2.1.2 匈牙利 Bálvány-North 剖面(图 2B)

位于匈牙利 Bükk Mountains 地区。该剖面 Nagyvisnyo 灰岩的 1 ~ 7 层为长兴阶顶部地层,其下段为褐色粘土质及粉砂质灰岩,含极少量细砂-粉砂级的棘屑、介形虫和有孔虫,上段为泥岩层与棕色的粉砂质泥灰岩,含牙形刺,前人认为是碳酸盐缓坡相沉积^[45]。

2.1.3 匈牙利 Gerennavár 剖面(图 2C)

位于匈牙利 Bükk Mountains 地区,与 Bálvány-North 剖面有相似的沉积。Nagyvisnyo 地层顶部为长兴阶顶部地层,包括 4 层深褐色-黑色生屑粒泥岩,每层厚度约 10 ~ 15cm,生屑颗粒小于下伏地层,最顶部出现大量有孔虫 Hemigordius^[41],被认为是斜坡相沉积。

2.1.4 日本 Gujo-hachiman 剖面

长兴阶地层自下而上包括灰白色含放射虫的燧石层、灰白色硅质泥岩层(10cm)、黑色页岩沉积(晚长兴期),代表深水缺氧的环境^[53]。

2.1.5 日本 Sasayama 地区 A 剖面

该剖面位于 Mino-Tanba 构造带。长兴阶地层岩性与 Gujo-hachiman 剖面类似,包括灰色层状燧石层(11.5m,含黄铁矿)、硅质粘土层(0.8m,含微晶石英、伊利石,特征是含结核状凝块与黄铁矿细脉)及薄层炭质泥岩(细粒、黑色、块状、富含有机质,含石英、伊利石、黄铁矿与炭质),代表深水缺氧的环境^[51, 52]。

2.1.6 加拿大 Otto Fiord South 与 Griesbach Creek 剖面

分别位于 Sverdrup 盆地中 Ellesmere 岛屿西北部和 Axel Heiberg 岛屿。长兴阶顶部地层自下而上依次为含黄铁矿的深褐色至黑色层状粉砂质泥岩、含黄铁矿的黑色泥岩(MFS)、深褐色至黑色层状粉砂质泥岩,被解释为深水相沉积^[48]。

2.1.7 煤山 D 剖面(图 2D)

位于浙江长兴。长兴阶顶部为灰黑色、灰色中-厚层状、局部含燧石结核和硅质条带的生屑微晶灰岩,被认为是斜坡相沉积^[35]。

2.1.8 朝天剖面(图 3A)

位于川北,距广元县城 30km,处于扬子台地的西北边缘。长兴阶顶部地层为大隆组,由下部的水平层理褐色粒泥岩、黑色泥岩及上部的具波状层理泥晶灰岩与粒泥岩(D 亚层)组成。上部地层中含丰富放射虫化石,常见黄铁矿颗粒,被认为是盆地相沉积^[37, 38]。

2.1.9 上寺剖面

位于川北广元市。长兴阶顶部地层(大隆组)自下而上依次为硅质页岩、页岩、硅质灰岩、泥晶灰岩与粘土互层、顶部的粘土层,被认为是盆地相沉积^[46]。

2.1.10 凉风垭剖面(图 3B)

位于重庆以西 13km 处。长兴阶顶部地层以生屑泥岩为主,顶部 90cm 处夹两层黄色泥岩,含有孔虫,被认为是斜坡相沉积^[57]。

2.1.11 七宝山剖面(图 3C)

位于江西省上高县七宝山铁矿附近。晚长兴期地层为灰黑色薄层状硅质岩及含生屑和燧石团块的泥晶灰岩,产牙形刺、有孔虫等,被认为是深水相沉积^[49, 50]。

2.2 浅水相剖面

2.2.1 阿曼 Wadi Satan(原地)剖面(图 3D)

位于 Fashah village 北部 Wadi Sahtan 峡谷。长兴阶顶部 Saiq 段 B4 层上部为层状白云岩,含蜓、有孔虫、海百合等生屑,被认为是浅水台地相沉积^[47]。

2.2.2 阿曼 Saih Hatat 地区 Aday 1 剖面

位于阿拉伯板块 Wadi Aday 东部边缘中心地区。长兴阶顶部 Saiq 段白云岩,含丰富的苔藓虫、钙质海绵、海百合,被认为是开阔台地相沉积,局部顶面见暴露侵蚀面^[42]。

2.2.3 藏南色龙西山剖面(图 4A)

位于藏南聂拉木县,紧邻希夏邦马峰。长兴阶顶部为 Kangshare 组底部 Waagenites 亚层,岩性为白云质生屑灰岩,含丰富介形、腹足等,沉积环境为水

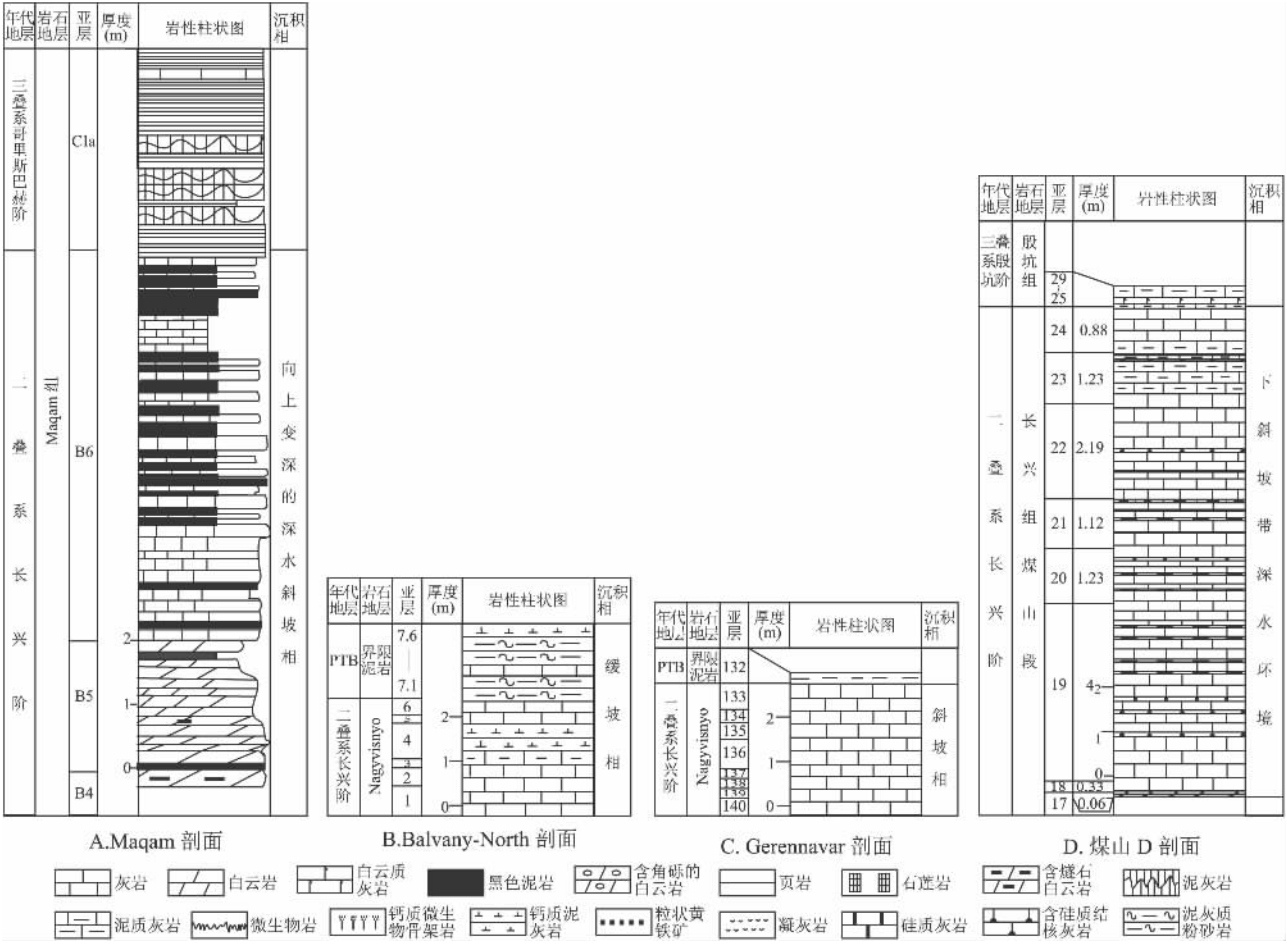


图2 Maqam、Balvany-North、Gerennavar、煤山 D 剖面图

Fig.2 Vertical sequences of the Maqam , Balvany-North , Gerennavar sections and D section in Meishan

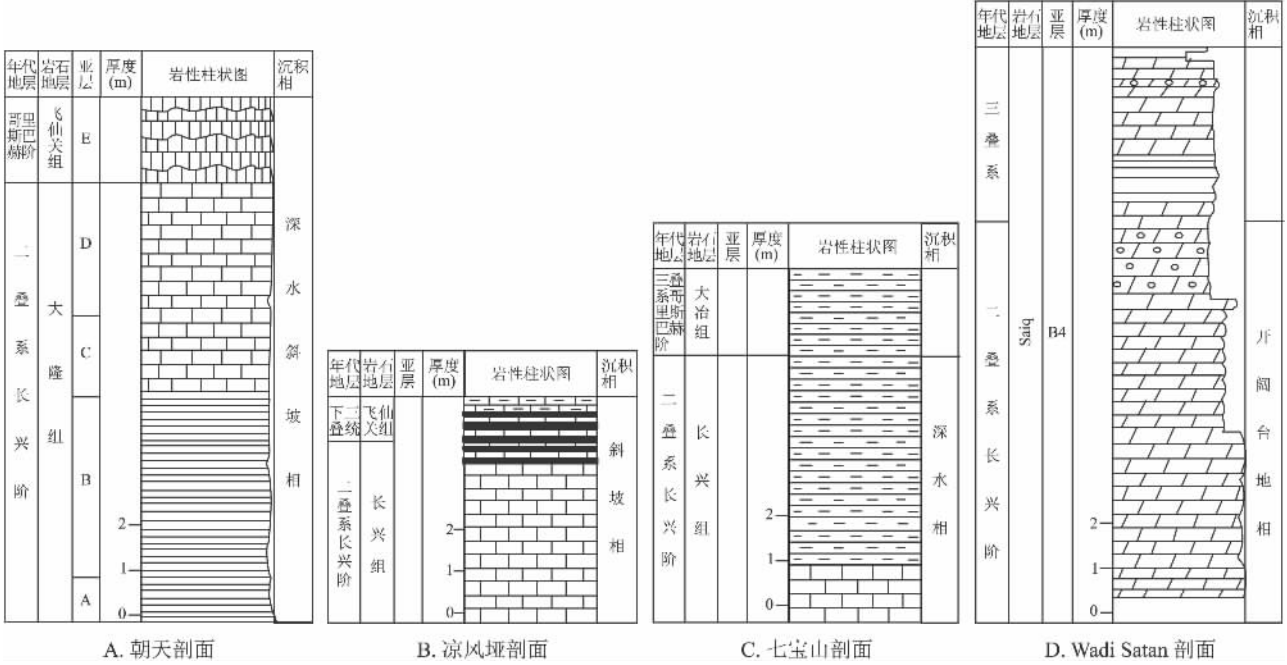


图3 朝天、凉风垭、七宝山、Wadi Satan 剖面图(图例同图2)

Fig.3 Vertical sequences of the Chaotian , Liangfengya , Qibaoshan and Wadi Satan sections

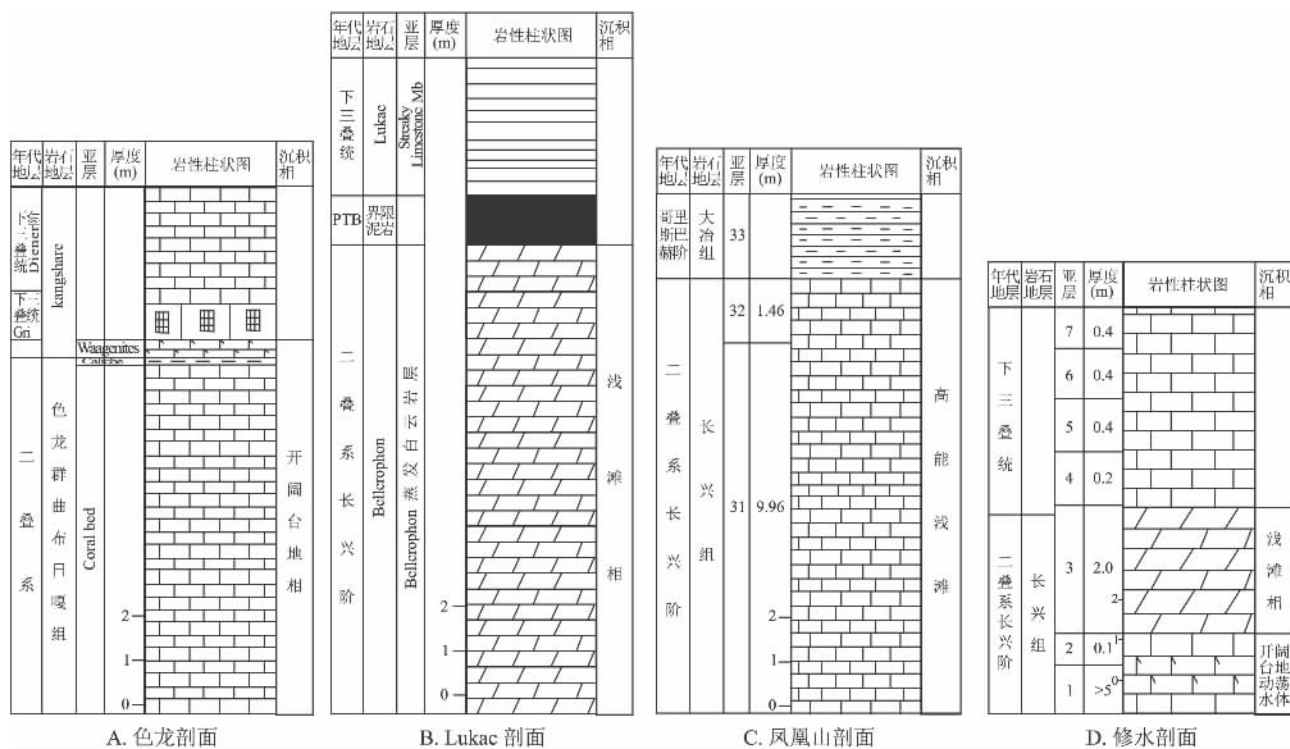


图4 色龙、Lukac、凤凰山、修水剖面图(图例同图2)

Fig. 4 Vertical sequences of the Selong , Lukac , Fenghuangshan and Xiushui sections

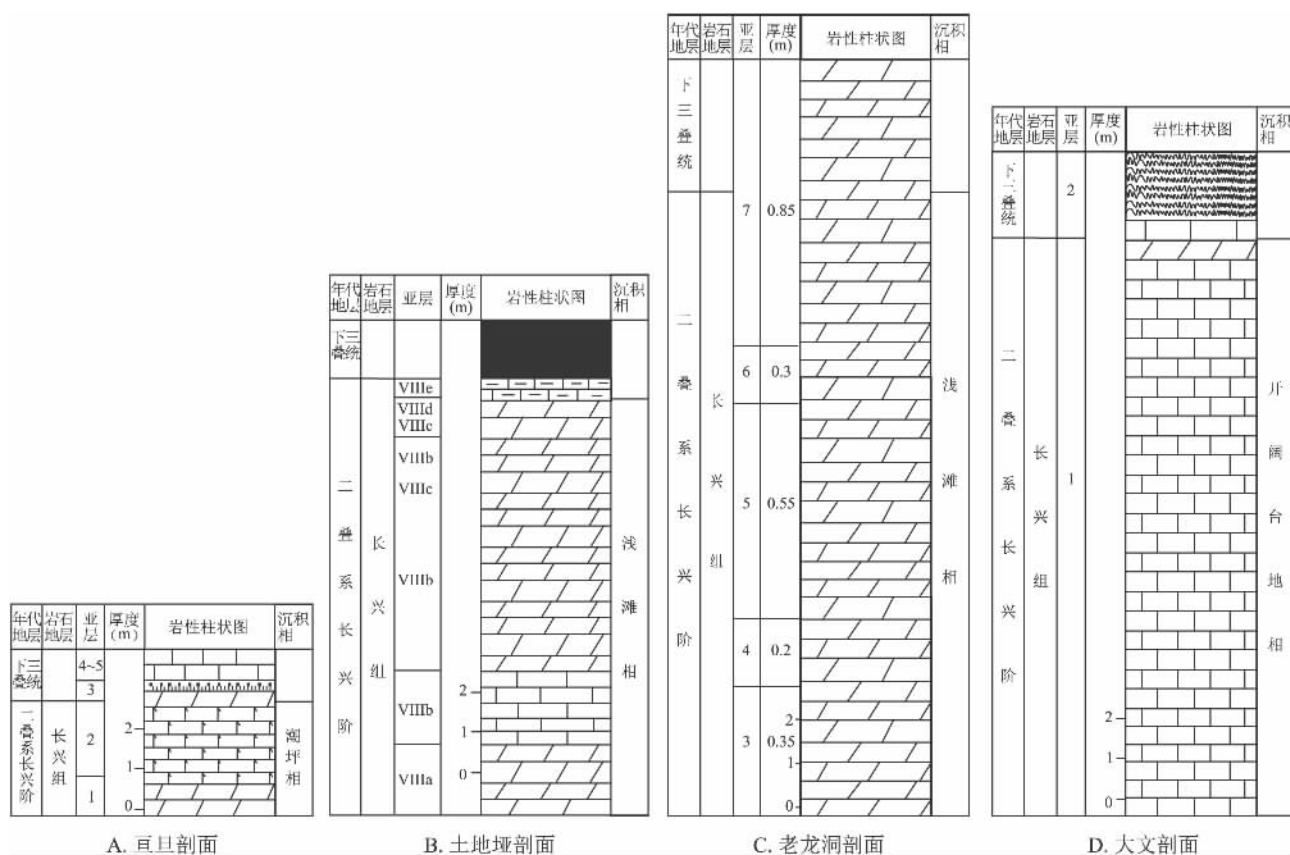


图5 亘旦、土地垭、老龙洞、大文剖面图(图例同图2)

Fig. 5 Vertical sequences of the Gendan , Tudiya , Laolongdong and Dawen sections

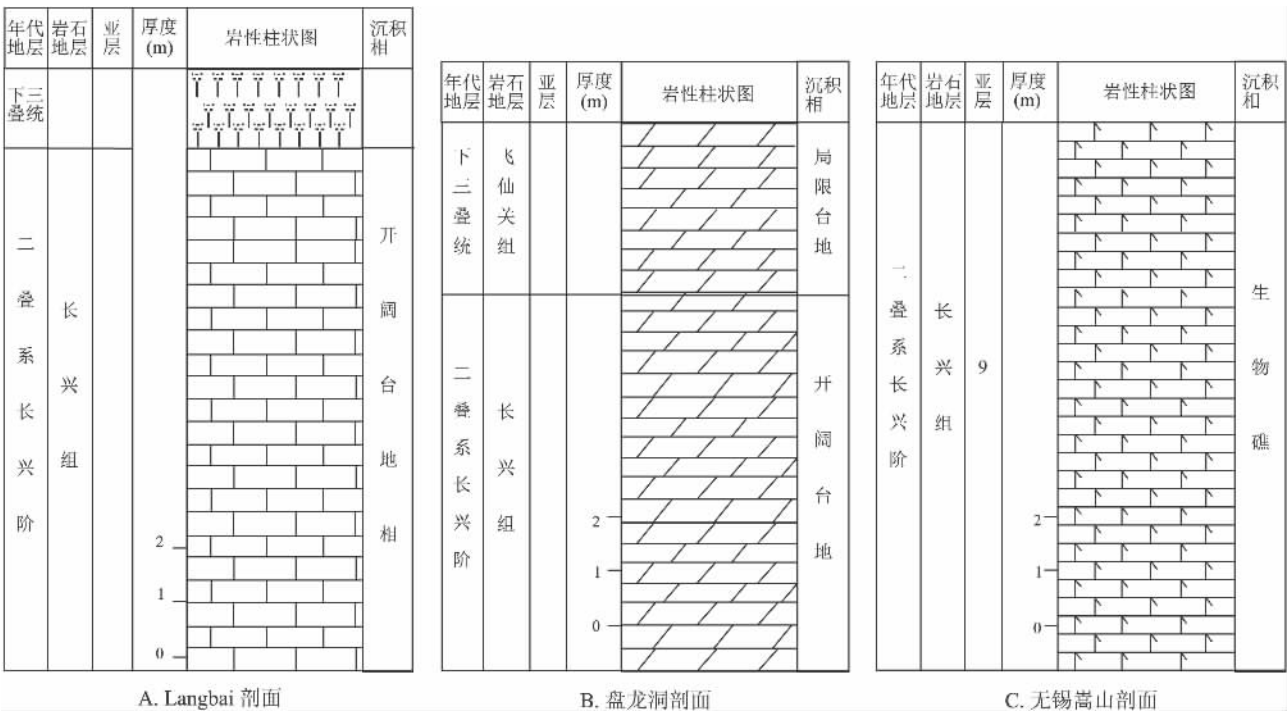


图6 Langbai、盘龙洞、无锡嵩山剖面图(图例同图2)

Fig. 6 Vertical sequences of the Langbai , Panlongdong , and Songshan section in Wuxi

动力强度中等的浅滩与滩间洼地^[54-56]。

2.2.4 斯洛文尼亚 Lukac 剖面(图4B)

位于斯洛文尼亚西北部 Žri 地区西北方 4km , 在 Mrzli vrh 与 Ledinskigri 之间的峡谷中。长兴阶顶部地层包括下部的灰岩和上部的“蒸发白云岩层”(均属 Bellerophon 地层)。白云岩亚层呈平板状(厚度约 0.5~3m),含厘米级大小的蒸发盐溶模孔,指示潮上带超盐度环境^[62]。

2.2.5 凤凰山剖面(图4C)

位于陕西省汉中梁山地区。长兴阶顶部地层为中厚层状略带红色的浅灰色生屑灰岩,颗粒支撑、砂砾级生屑、珊瑚、钙藻、有孔虫等生屑丰富,被认为是高能浅滩相沉积^[33]。

2.2.6 修水剖面(图4D)

位于江西省修水四都镇东岭村。晚长兴期地层包括下部的白云石化亮晶颗粒岩(颗粒被粉晶白云石交代且表面具褐铁矿)及上部的杂色白云质灰岩,含去云化残留的大量破损白云石晶体以及去白云石化留下的雾心菱形方解石晶体,代表原来的白云岩受到去云化作用的改造。统计结果表明,原始白云石化程度自上而下由 70% 降至 45%。原岩亮晶胶结,含丰富生物碎屑,为浅水台地相沉积,在进入潮坪环境后发生了白云石化作用^[63 64]。

2.2.7 紫云亘旦剖面

位于贵州省紫云县城附近(图5A),长兴阶最

顶部 2.4m 为具有藻纹层的白云岩,其下的白云岩含有蜓、腕足类、钙质海绵碎屑,代表浅水的开阔台地环境^[58 59]。

2.2.8 土地垭剖面

位于四川盆地东南边缘华蓥山脉的北碚观音峡附近(图5B)。长兴阶顶部地层为微晶白云岩,介形与腹足化石、石膏、蒸发矿物溶模孔、鸟眼、藻纹层的存在指示其沉积相为潮间-潮上带^[36]。

2.2.9 老龙洞剖面

位于重庆北碚天府煤矿一带(图5C)。长兴阶最顶部为具斑点或树枝结构的去云化灰岩,含大量去白云石化作用留下的白云石残余以及方解石菱面体,原岩是浅水潮下环境的微生物岩,在海平面下降进入潮坪蒸发环境后发生白云石化作用,后来又遭到去白云石化作用改造^[60 61]。该层之下为浅水开阔台地相的海百合颗粒岩。

2.2.10 大文剖面

位于贵州南盘江盆地(图5D)。长兴阶顶部地层为灰色中厚层泥晶生屑灰岩,白云岩化程度小于 30%,高分异度的生屑与高颗粒含量、顶部亮晶胶结物均表明其沉积环境为浅水台地相。附近还发育 Langbai 剖面(图6-A),岩性与大文剖面相似,也为浅水台地相^[18 43 44]。

2.2.11 盘龙洞剖面

位于四川省宣汉县鸡唱乡(图6B)。根据我们

的研究,长兴阶顶部 40 余米厚的地层系原岩为开阔台地相的含棘屑、腕足、有孔虫的生屑粒泥岩,现已全部白云石化,转变为粉晶-细晶白云岩。

2.2.12 无锡嵩山剖面

位于无锡市东郊安镇南部(图 6C)。长兴阶顶部地层为海绵生物礁相沉积,最顶部为含瓣鳃类、棘屑、砂屑以及海绵碎片的灰质白云岩,原作者解释为礁顶相^[39,40],我们认为属于开阔台地相沉积。

根据王恕一等的研究(1990a),中国苏、皖、浙毗邻地区晚长兴期处于台缘礁滩相地区(沿沙洲-无锡嵩山-苏州西山-吴兴南皋桥),普遍发生白云岩化,与本地区盆地边缘及盆地相缺乏白云岩的深水沉积形成鲜明对比^[65]。

3 讨论

此次统计含深水相剖面 11 个,其中 0 个白云石化;统计浅水相剖面 13 个,其中 11 个白云石化,1 个未白云石化。晚长兴期发育白云岩的地层,其前身均为浅水相,而前身为深水相的地层均不发育白云岩。因此可以认为,长兴期末的白云石化作用只影响浅水台地相沉积。这使我们不得不推论:此次白云石化作用可能与海平面下降有关。当海平面下降时,世界浅水台地相长兴阶顶部的沉积物很容易进入潮坪蒸发环境或暴露环境,由于蒸发作用或混合水作用,发生白云石化作用。由于不同地区当时构造性质不同,相对海平面变化有所不同,所以白云石化情况在大趋势下会有小差别。

现代白云石多形成于蒸发或者暴露环境,包括蒸发的泻湖和萨布哈,如澳大利亚库隆泻湖南端的一系列季节性湖泊与丘间洼地均产出现代白云石^[66,67],卡塔尔半岛的费哈泻湖与特鲁西尔海岸的阿布扎比地区是产出现代白云石的典型萨布哈^[8],巴哈马-佛罗里达群岛的潮上沉积物中产出现代白云石^[68],加勒比海博内尔岛超咸水湖岸产出现代白云石^[69]。这些都是蒸发环境发生白云石化的典型实例。而蒸发环境的形成有一个历史的过程,即曾经发生过海平面下降或遭受构造抬升作用的影响,或两者的共同影响。

前人研究表明,二叠纪末期发生了全球性的海平面下降^[19,25,59],这必然会导致很多浅水相沉积物进入潮坪或潮上蒸发环境。由于蒸发浓缩卤水的作用,使得碳酸盐沉积物发生不同规模不同程度的白云石化作用。对于深水相而言,海平面下降幅度不足以使沉积物暴露,所以不发生白云石化作用。

4 结论

四川盆地长兴阶白云岩是重要的油气产层。对该白云岩的成因一直存在两种对立的观点:准同生成因的和埋藏成因的。准同生白云石化作用大多发生在潮坪或潮上蒸发环境,对沉积物的改造是自上而下的。本文通过对世界上保存较好、研究程度较高的长兴阶统计,发现长兴阶顶部白云石化的剖面都是浅水相,浅水相的长兴阶顶部大多数发生白云石化,而深水相的剖面都没发生白云石化。由此推测,长兴阶顶部的白云石化可能是海平面下降造成的。这一认识与长兴期末存在大的海平面下降事件的认识是吻合的,为长兴阶中上部,特别是顶部白云岩的成因认识提供了新依据。四川盆地东北部浅水开阔台地相普遍发生白云石化,变成了白云岩储层。其白云石化机制很可能同世界其它地区的浅水台地相一样,是受同一个大的海平面下降事件控制的。

参考文献:

- [1] PETERSON M N A, BIEN G S, BERNER R A. Radiocarbon studies of recent dolomite from Deep Spring Lake, California [J]. *Geophysical Research*, 1963, 68(24): 6493-6505.
- [2] PETERSON M N A, BORCH C C, DER V, BIEN G S. Growth of dolomite crystals [J]. *American Journal of Science*, 1966, 264(4): 257-272.
- [3] CLAYTON R N, JONES B F, BERNER R A. Isotope studies of dolomite formation under sedimentary conditions [J]. *Geochim Coschim Acta*, 1968, 32(4): 415-432.
- [4] BEHRENS E W, LAND L S. Subtidal Holocene dolomite, Baffin Bay, Texas [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1972, 42(1): 155-161.
- [5] ADAMS J E, RHODES M L. Dolomitization by seepage refluxion [J]. *AAPG Bulletin*, 1960, 44(12): 1912-1920.
- [6] ILLING L V, WELLS A J, TAYLOR J C M. Penecontemporary dolomite in the Persian Gulf [A]. L C Pray and R C Murry. *Dolomitization and Limestone Diagenesis* [C]. Tulsa: SEPM Special Publication, 1965, 13: 89-111.
- [7] HSU K J, SIEGENTHALER C. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem [J]. *Sedimentology*, 1969, 12(1/2): 11-25.
- [8] MCKENZIE J A, HSU K J, SCHNEIDER J F. Movement of subsurface waters under the Sabkha, Abu Dhabi, UAE, and its relation to evaporative dolomite genesis [A]. D H Zenger, J B Dunham, and R L Ethington. *Concepts and Models of Dolomitization* [C]. Tulsa: SEPM Special Publication, 1980, 28: 11-30.

- [9] HANSHAW B B, BLACK W, DEIKE R G. A geochemical hypothesis for dolomitization by groundwater [J]. *Economic Geology* 66(5): 1971 710–724.
- [10] LAND L S. Holocene meteoric dolomitization of Pleistocene limestones, North Jamaica [J]. *Sedimentology* 1973 20(3): 411–424.
- [11] FOLK R L, SIEDLECKA A. The “schizohaline” environment: Its sedimentary and diagenetic fabrics as exemplified by late Paleozoic rocks of Bear Island, Svalbard [J]. *Sedimentary Geology* 1974 11(1): 1–15.
- [12] FOLK R L, LAND L S. Mg/Ca ratio and salinity: Two controls over crystallization of dolomite [J]. *AAPG Bulltin* 1975 59(1): 60–68.
- [13] MATTES B W, MOUTJOY E W. Burial dolomitization of the upper Devonian iette buildup, Jasper National park, Alberta [A]. D H Zenger, J B Dunham and R C Ethington. *Concepts and Models of Dolomitization* [C]. Tulsa: SEPM Special Publication, 1980 28: 259–297.
- [14] GREGG J M. Regional epigenetic dolomitization in the Bonneterre Dolomite (Cambrian), southeastern Missouri [J]. *Geology* 1985, 13(7): 503–506.
- [15] FANNING K A, BYRNE R H, BRELAND J A, BETZER P R, MOORE W S, ELSINGER R J. Geothermal springs of the west Florida continental shelf: evidence for dolomitization and radionuclide enrichment [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 1981 52(2): 345–354.
- [16] WILLSON J L. Carbonate facies in Geologic History [M]. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [17] WIGNALL P B, HALLAM A. Anoxia as a cause of the Permian–Triassic extinction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 1992 93: 21–46.
- [18] COLLIN P Y, KERSHAWFI S, SOLEAU S C, FENG Q. Facies changes and diagenetic processes across the Permian–Triassic boundary event horizon, Great Bank of Guizhou, South China: a controversy of erosion and dissolution [J]. *Sedimentology* 2009, 56: 677–693.
- [19] 王海峰, 刘建波, 江崎洋一. 贵州罗甸大文二叠–三叠系界线剖面海平面变化及其全球对比[J]. *北京大学学报(自然科学版)* 2012 48(4): 589–602.
- [20] 雷卡军, 强子同, 陈季高. 川东北上二叠统生物礁成岩作用与孔隙演化[J]. *石油与天然气地质* 1991 12(4): 364–375.
- [21] 雷卡军, 强子同, 文应初. 川东及邻区上二叠统生物礁的白云岩化[J]. *地质论评* 1994 40(6): 535–543.
- [22] 王运生. 四川盆地长兴组生物礁及礁型气藏[J]. *矿物岩石*, 1996 16(2): 62–69.
- [23] 范嘉松, 吴亚生. 川东二叠纪生物礁的再认识[J]. *石油与天然气地质* 2002 23(1): 12–18.
- [24] 牟传龙, 马永生, 王瑞华, 等. 川东北地区上二叠统盘龙洞生物礁成岩作用研究[J]. *沉积与特提斯地质* 2005 25(1–2): 198–202.
- [25] 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部长兴组层序地层与储层分布[J]. *地学前缘* 2005 12(3): 179–185.
- [26] 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. *矿物岩石* 2007 27(4): 78–84.
- [27] 黄思静, 吕杰, 兰叶芳, 等. 四川盆地西部中二叠统白云岩/石的主要结构类型—兼论其与川东北上二叠统—三叠系白云岩/石的差异[J]. *岩石学报* 2011 27(8): 2253–2262.
- [28] 徐维胜. 沉积相和成岩作用对生物礁储层成因的控制研究[J]. *断块油气田* 2012 19(1): 51–54.
- [29] 陈琪, 胡文瑄, 李庆, 朱井泉. 川东北盘龙洞长兴组—飞仙关组白云岩化特征及成因[J]. *石油与天然气地质* 2012 33(1): 84–93.
- [30] WU Y S. Conodonts, reef evolution and mass extinction across the Permian–Triassic boundary [J]. Beijing: Geological Publishing House 2005. 1–90.
- [31] 范嘉松. 中国生物礁与油气 [M]. 北京: 海洋出版社, 1996. 177–178.
- [32] NAKAZAWA K. The Permian–Triassic boundary Revisited [J]. *Albertiana* 1992 10: 23–30.
- [33] 芮琳, 赵嘉明, 穆西南, 等. 陕西汉中梁山吴家坪灰岩的再研究[J]. *地层学杂志* 1984 8(3): 179–192.
- [34] 杨遵仪, 吴顺宝, 殷鸿福, 等. 华南二叠–三叠纪过渡期地质事件 [M]. 北京: 地质出版社, 1991. 139–167.
- [35] 曹长群, 郑全锋. 浙江煤山 D 剖面二叠系长兴组高精度岩石地层 [J]. *地层学杂志* 2007 31(1): 14–22.
- [36] REINHARDT J W. Uppermost Permian reefs and Permo–Triassic sedimentary facies from the southeastern margin of Sichuan Basin, China [J]. *Facies* 1988 18: 231–288.
- [37] JI Z S, YAO J X, ISOZAKI Y, MATSUDA T, WU G C. Conodont biostratigraphy across the Permian–Triassic boundary at Chaotian in Northern Sichuan, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2007 252: 39–55.
- [38] ISOZAKI Y, SHIMIZU N, YAO J X, JI Z S, MATSUDA T. End–Permian extinction and volcanism-induced environmental stress: The Permian–Triassic boundary interval of lower-slope facies at Chaotian, South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2007 252: 218–238.
- [39] 王恕一, 朱洪发, 陈亚中. 无锡高山长兴组海绵生物礁的发现及其意义[J]. *地层学杂志* 1990 14(4): 308–311.
- [40] 李勇, 陆彦邦, 王栋, 等. 苏南无锡地区二叠纪长兴组生物礁初探[J]. *岩相古地理* 1990 6: 14–20.
- [41] HAAS J, DEMENY A, HIPS K, ZAJZON N, WEISZBURG T G, SUDAR M, PALFY J. Biotic and environmental changes in the Permian–Triassic boundary interval recorded on a western Tethyan ramp in the Bükk Mountains, Hungary [J]. *Global and Planetary Change* 2007 55: 136–154.
- [42] WEIDLICH O, BERNECKER M. Differential severity of Permian–Triassic environmental changes on Tethyan shallow-water carbonate platforms [J]. *Global and Planetary Change* 2007 55: 209–235.
- [43] 刘建波, 汪崎洋一, 杨守仁, 等. 贵州罗甸二叠纪末生物大灭绝事件后沉积的微生物岩的时代和沉积学特征[J]. *古地理学报* 2007 9(5): 473–486.
- [44] PAYNE J L, LEHRMANN D J, FOLLETT D, SEIBEL M, KUMP L R, RICCARDI A, ALTINER D, SANO H, WEI J Y. Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and

- implications for Permian-Triassic boundary events [J]. Geological Society of America Bulletin 2013 ,119(7 - 8) : 771 - 784.
- [45] SUDAR M ,PERRI M C ,HAAS J. Conodonts across the Permian-Triassic boundary in the Bükk Mountains(NE Hungary) [J]. Geologica Carpathica 2008 ,59(6) : 491 - 502.
- [46] LAI X L ,YANG F Q ,HALLAM A ,WIGNALL P B. The Shangsi Section ,candidate of the global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic Boundary [A]. Yin Hongfu. The Palaeozoic-Mesozoic Boundary [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press ,1996. 113 - 124.
- [47] RICHOS S ,KRYSTYN L ,BAUD A ,BRANDNER R ,HORACEK M ,AGHAI M P. Permian-Triassic boundary interval in the Middle East(Iran and N. Oman) : Progressive environmental change from detailed carbonate carbon isotope marine curve and sedimentary evolution [J]. Journal of Asian Earth Sciences ,2010 ,39: 236 - 253.
- [48] HENDERSON C M ,BAUD A. Correlation of the Permian-Triassic boundary in Arctic Canada and comparison with Meishan ,China [A]. Proceedings of the 30th International Geological Congress [C]. Utrecht: VSP ,1997. 11: 143 - 152.
- [49] 李玉成. 华南二叠系长兴阶灰岩的碳同位素地层对比[J]. 地层学杂志 ,1998 ,22(4) : 278 - 285.
- [50] 曾书明 ,游玮 ,覃兆松. 赣中西部早二叠世晚期一晚二叠世地层[J]. 地质通报 ,2010 ,29(11) : 1619 - 1632.
- [51] ISOZAKI Y. Permo-Triassic Boundary Superanoxia and Stratified Superocean: Records from Lost Deep Sea [J]. Science ,1997 ,267: 235 - 238.
- [52] KATO Y ,NAKAO K ,ISOZAKI Y. Geochemistry of Late Permian to Early Triassic pelagic cherts from southwest Japan: implications for an oceanic redox change [J]. Chemical Geology ,2002 ,182: 15 - 34.
- [53] WIGNALL P B ,BOND P G ,KUWAHARA K ,KAKUWA Y ,NEWTON R J ,POULTON S W. An 80 million year oceanic redox history from Permian to Jurassic pelagic sediments of the Mino-Tamba terrane SW Japan and the origin of four mass extinctions [J]. Global and Planetary Change ,2010 ,71: 109 - 123.
- [54] SHEN S Z ,JIN Y G. Brachiopods from the Permian ± Triassic boundary beds at the Selong Xishan section ,Xizang(Tibet) , China [J]. Journal of Asian Earth Sciences ,1999 ,17: 547 - 559.
- [55] 沈树忠 ,曹长群 ,王向东 ,等中国西藏南部喜马拉雅相的乐平统[J]. 地质学报 ,2002 ,76(4) : 454 - 461.
- [56] SHEN S Z ,CAO C Q ,CHARLES M ,HENDERSON WANG X D ,GUANG R ,WANG S Y ,WANG W. End-Permian mass extinction pattern in the northern peri-Gondwanan region [J]. Palaeoworld ,2006 ,15: 3 - 30.
- [57] SONG H J ,TONG J N ,CHEN Z Q. Evolutionary dynamics of the Permian-Triassic foraminifer size: Evidence for Lilliput effect in the end-Permian mass extinction and its aftermath [J]. Palaeogeography ,Palaeoclimatology ,Palaeoecology ,2011 ,308: 98 - 110.
- [58] 吴亚生 ,姜红霞 ,Yang Wan ,范嘉松. 二叠纪-三叠纪之交缺氧环境的微生物和微生物岩[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学 ,2007 ,37(5) : 618 - 628.
- [59] 吴亚生 ,范嘉松 ,金玉轩. 晚二叠世的生物礁出露及其意义[J]. 地质学报 ,2003 ,77(3) : 289 - 296.
- [60] KERSHAW S ,ZHANG T S ,LAN G Z. A microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China ,and its palaeoenvironmental significance [J]. Palaeogeography ,Palaeoclimatology ,Palaeoecology ,1999 ,146: 1 - 18.
- [61] JIANG H X ,WU Y S. Diagenesis of the microbialites in the Permian-Triassic boundary section at Laolongdong ,Chongqing , South China [J]. Journal of Palaeogeography 2013 ,2(2) : 183 - 191.
- [62] JURKOVSEK T K ,JURKOVSEK B ,ALJINOVIC D ,GALINA P. Stratigraphy of Upper Permian and Lower Triassic Strata of the Žiri Area (Slovenia) [J]. Geologija 2011 ,54/2: 193 - 204.
- [63] 吴亚生 ,Yang Wan ,姜红霞 ,范嘉松. 江西修水二叠纪-三叠纪界线地层海平面下降的岩石学证据[J]. 岩石学报 ,2006 ,22(12) : 3039 - 3046.
- [64] 姜红霞 ,吴亚生. 江西修水二叠系-三叠系界限地层树枝状微生物岩状岩石成因初解[J]. 地质评论 ,2007 ,53(3) : 323 - 328.
- [65] 王恕一 ,朱洪发 ,陈亚中 ,施伟军. 苏浙皖毗邻地区晚二叠世长兴期沉积相展布规律[J]. 石油实验地质 ,1990 ,12(3) : 297 - 306.
- [66] BORCH C C ,VON DER. Source of ions for Coorong dolomite formation [J]. American Journal of Science ,1965 ,263(8) : 684 - 688.
- [67] BORCH C C ,DER V ,JONES J B. Spherular modern dolomite from the Coorong area south Australia [J]. Sedimentology ,1976 ,23(4) : 587 - 591.
- [68] SHIN E A ,GINSBURG R N. Formation of recent dolomite in Florida and Bahamas(abstract) [J]. AAPG Bulltin ,1964 ,48(4) : 547.
- [69] FRIEDMAN G M ,SANDERS J E. Origin and occurrence of dolostones [A]. G V Chilingar ,H J Bissell and R W Fairbridge. Carbonate Rocks: Origin ,Occurrence ,and Classification [C]. Amsterdam: Elsevier ,1967. 267 - 348.

Sedimentary facies and genetic mechanisms of the dolostones in the world – wide end – Permian strata

ZHAO Rui , WU Ya-sheng , TAN Jun-ying , JIANG Hong-xia , LIU Li-jing

(*Key Laboratory of Petroleum Resources Research , Institute of Geology and Geophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China*)

Abstract: The statistics and correlation in the present paper are involved into 23 world-wide representative and well-documented Permian – Triassic (late Changxingian) boundary sections and the precursory sedimentary facies of the late Changxingian dolostones. Except from one section from the Liangshan in Hanzhong , Shaanxi , all the other previous deposits of the late Changxingian dolostones belong to the shallow-water sedimentary facies. On the contrary , the known deep-water Upper Permian carbonate deposits have not been dolomitized up to now. This implies that the genetic mechanisms of the world-wide dolostones from the topmost parts of the Upper Permian strata may be related to the rapid global sea-level falls , which led to the exhumation of the shallow-water carbonate deposits to the intertidal and/or supratidal environments. The concentrated brines in these evaporation environments penetrated into the pre-existing carbonate deposits and gave rise to the dolomitization and finally to the formation of the dolostones. A similar example is provided by the Changxing Formation dolostones as excellent reservoir rocks in northeastern Sichuan Basin , where the pervasive dolomitization took place in the pre-existing organic reef facies and shallow-water open platform carbonate deposits , and the dolomitization mechanisms may well be controlled by the same sea-level falling event as the other parts of the world.

Key words: Upper Permian; Changxingian; sedimentary facies; dolostone; northeastern Sichuan; genetic mechanism of dolomitization