

Influence of Diabase Contact Thermal Metamorphism on Pre-Salt Carbonate Reservoir in R-Oilfield of Santos Basin

Guangfeng Wan¹, Kangxu Ren^{1,2}, Junfeng Zhao¹, Jian Zhao^{1,2}, Maria J.R.O.³, Yujin Yuan¹, Tongkui Wang¹

¹CNODC Brasil Petróleo e Gás Ltda, Rio de Janeiro, Brazil

²Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing

³Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), Rio de Janeiro, Brazil

Email: renkangxu@163.com

Received: Jul. 26th, 2019; accepted: Aug. 8th, 2019; published: Aug. 15th, 2019

Abstract

In view of the influence of magma intrusion contact thermal metamorphism on carbonate reservoirs in ultra-deep water environment, taking R-oilfield in Santos Basin as an example, the lithological changes, influence thickness and physical properties of pre-salt limestone reservoirs caused by diabase with different thickness in six wells are studied. The research shows that the pre-salt limestone in the ultra-deep water environment of R-oilfield is affected significantly by the contact thermal metamorphism of the thick diabase. The recrystallization is common, the minerals become coarse and the rock color changes to white but with obvious heterogeneity. The porosity of the reservoir drastically reduced, generally decreasing by four to eight times. The higher the porosity, the greater the reduction. The thickness of intrusive rocks is positively correlated with that of the carbonate contact metamorphism aureole, which fits the binomial equation $y = 0.001x^2 + 0.0801x + 0.2426$. However, the metamorphism influence thickness of the diabase in R-oilfield on the pre-salt country limestone is significantly lower than that in the Tarim Basin in western China. It believed that the high degree of recrystallization and cementation of the contact metamorphic aureole are the main reasons for the decrease of the reservoir space. The overlying huge gypsum and salt layers with high heat conduction effect and the lower temperature country rocks may probably be responsible for the thinner contact metamorphism aureole in R-oilfield.

Keywords

Diabase, Limestone, Contact Thermal Metamorphism, Influence, Santos Basin

桑托斯盆地R油田辉绿岩对盐下碳酸盐岩储层接触热变质影响

万广峰¹, 任康绪^{1,2}, 赵俊峰¹, 赵健^{1,2}, Maria J.R.O.³, 袁玉金¹, 王童奎¹

文章引用: 万广峰, 任康绪, 赵俊峰, 赵健, Maria J.R.O.3, 袁玉金, 王童奎. 桑托斯盆地 R 油田辉绿岩对盐下碳酸盐岩储层接触热变质影响[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(8): 712-719. DOI: 10.12677/ag.2019.98076

¹中油国际(巴西)公司, 巴西 里约热内卢

²中国石油勘探开发研究院, 北京

³Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), Rio de Janeiro, Brazil

Email: renkangxu@163.com

收稿日期: 2019年7月26日; 录用日期: 2019年8月8日; 发布日期: 2019年8月15日

摘要

针对岩浆侵入接触热变质作用对超深水环境盐下碳酸盐岩储层的影响问题, 以桑托斯盆地R-油田为例, 对6口井中不同厚度辉绿岩侵入对盐下灰岩储层的重结晶程度、影响厚度、物性变化等进行统计分析。研究表明, R-油田盐下的灰岩受巨厚层辉绿岩的接触热烘烤变质作用显著, 普遍发生大理岩化重结晶, 颗粒变粗大, 颜色白化, 但不均匀性也较强; 储层物性急剧降低, 一般降低幅度4~8倍, 孔隙度越高降低幅度也越大; 接触变质带厚度与侵入体厚度具有正相关关系, 符合二项式 $y = 0.001x^2 + 0.0801x + 0.2426$ 变化规律, 但明显低于塔里木盆地辉绿岩影响灰岩的幅度。研究认为, 接触变质带高度重结晶和胶结作用是导致储集空间降低的主要原因; 超深水环境较低的围岩温度以及侵入体上覆巨厚导热性好的膏盐岩是造成接触变质影响厚度偏低的主要原因。

关键词

辉绿岩, 灰岩, 接触热变质作用, 影响, 桑托斯盆地

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

炽热的岩浆侵位到沉积岩地层中时, 围岩受岩浆散发的巨大热能以及热流体挥发分影响, 发生变质作用及交代作用, 形成接触热变质岩。当变质作用是热能影响为主时, 其分布范围一般局限在岩浆与围岩的接触带上; 当围岩受岩浆中的挥发分和其他流体影响较大时, 发生接触交代变质作用[1], 其影响范围较复杂。围岩储层与岩浆接触发生变质作用后, 其物性特征也必然受到影响。例如前人指出, 基性岩浆侵入到碎屑岩储层中发生接触热变质作用常导致储层物性变差[2] [3] [4], 而基性岩浆侵入以及携带的流体对某些地区碳酸盐岩储层的作用导致其物性得到改善[5] [6] [7] [8] [9], 如果石灰岩与岩浆作用发生了矽卡岩化转变, 其孔隙度甚至可增大4~5倍以上[10]。

国外学者如 Armstrong (1995)、Bindeman *et al.* (2004)、Dickin (2005)曾论述岩浆侵入对碳酸盐岩围岩的变质作用[9], 但在探讨这种变质对储层物性变化、不同地质背景下受影响程度等方面报道较少。国内学者研究中国西部巴楚地区陆上较致密灰岩(孔隙度一般低于5%~6%)受岩浆侵入作用的影响, 认为二叠纪巨厚辉绿岩的侵入对奥陶纪灰岩储层的发育总体上是积极的[6] [9]。

对于储层物性相对较好(孔隙度一般大于10%)、位于超深水环境的碳酸盐岩储层, 岩浆侵入接触热变质作用有何特点? 储层物性会如何变化? 接触热变质带厚度遵循什么样的规律? 这些都是研究含油气盆地中岩浆与储层相互作用比较关注的问题, 但在这一方面国内外公开发表的文献比较匮乏。

本文以桑托斯盆地比较有代表性的 R-油田为例,分析超深水环境盐下地层中不同厚度辉绿岩侵入体对灰岩储层的直接影响:统计岩浆热烘烤对储层孔隙度的影响,分析孔隙变化的原因,剖析侵入体厚度与围岩接触变质带厚度的关系及其原因,为该地区储层预测和评价提供科学依据,同时也弥补学术研究的薄弱环节。

2. 地质概况

南大西洋巴西沿岸发育了诸多含油气盆地,桑托斯盆地是最富集油气的盆地之一,也是巴西东南部海上最大的盆地,迄今已发现诸如卢拉、里贝拉在内的数十个大油气田。桑托斯盆地北东与坎波斯盆地以卡布弗里乌(Cabo Frio)为界,西南边界至弗洛里亚诺波利斯(Florianópolis) [11],与里约热内卢州、圣保罗州、巴拉那州和圣卡塔琳娜州的海岸线接壤,面积约 $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ [12]。盆地沉积岩层巨厚,目前油气勘探重点在深-超深水区沉积层中下部的盐下,目的层是下白垩统阿普特期(Aptian)和巴雷姆期(Barremian)的巨厚层碳酸盐岩[13],其储层常具有较高的孔、渗特征[14],直接被下白垩统晚期 Ariri 组巨厚膏盐层覆盖(盖层最厚达 4000 m),烃源岩主要是下白垩统咸水湖相黑色富有机质页岩,石油成藏条件非常优越[15] [16]。

R-油田位于桑托斯盆地东北部,北端距海岸线约 180 km,水深 1800~2200 m,属于超深水油田,主要针对盐下 Barra Velha 组和 Itapema 组的湖相灰岩进行勘探(图 1)。目的层储层岩石类型主要包括介壳灰岩、球粒灰岩和藻叠层灰岩,储层分布面积大,累计厚达数百米,现今储层埋深约 5000~6000 m。灰岩储层物性较好,以发现井 2-ANP-2A 井为例,Barra Velha 组储层平均孔隙度 10%~14%,渗透率 353~2540 mD; Itapema 组平均孔隙度 15%,渗透率 2990 mD [17]。阿普特期晚阶段发育的蒸发岩为区域性盖层,具有分布范围广、厚度大、封盖能力强的巨大优点。

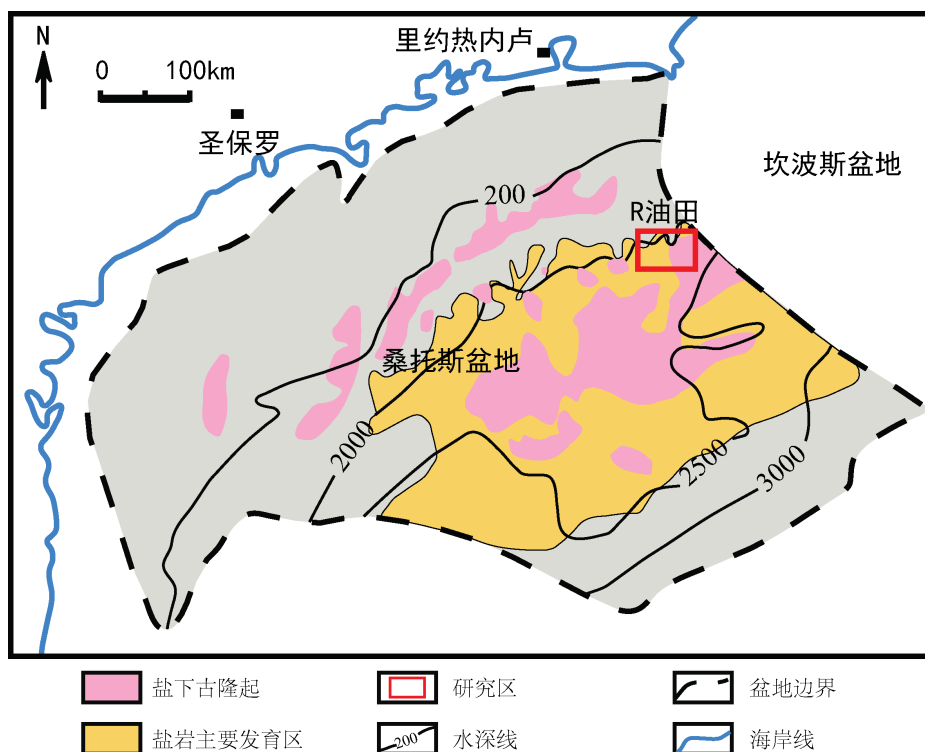


Figure 1. Location of R-oilfield (modified after literature [18])

图 1. R-油田分布位置示意图(据文献[18],有修改)

桑托斯盆地及周边地区主要发育四期岩浆活动,从老到新分别是瓦兰今阶-欧特里夫阶、阿普特阶、圣通阶-坎潘阶和始新统[18]。R-油田目前主要钻遇阿普特阶、圣通阶-坎潘阶两期火成岩,前者以喷出岩为主,主要分布在盐上 Itapema 组和 Piçrras 组中;后者以侵入岩为主,主要分布在盐底的 Barra Velha 组灰岩储层顶部(局部井区分布较分散,有时也在 Barra Velha 组中下部及 Itapema 组)以及盐上地层中,本文讨论中涉及的辉绿岩体就是圣通阶-坎潘阶岩浆活动的产物。

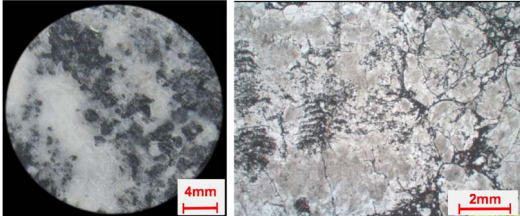
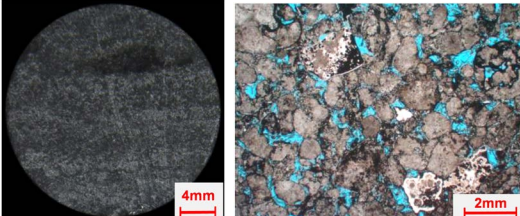
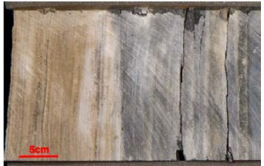


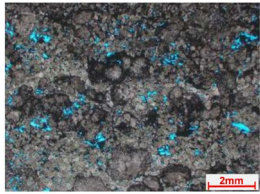
R-油田盐下地层中侵入的辉绿岩厚度变化较大,集中分布者厚度十余米到近百米,分散分布者厚度常常只有不足 1 m 到数米。岩石结晶程度通常较明显,肉眼容易辨识,主要矿物成分为辉石和斜长石,少量橄榄石、黑云母、磷灰石、磁铁矿等。当侵入体厚度较小(低于 1~2 m)时,由于冷却较快,结晶比较细小,肉眼观察与致密块状玄武岩不易区别,定名需要结合产状、薄片鉴定等。岩石一般为灰黑、深灰色,致密,密度偏大,块状构造,常发育构造裂缝,裂缝全充填或半充填,充填物通常是方解石、黏土矿物、黄铁矿等。其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄约 72.4~83.3 Ma [19]。

3. 辉绿岩侵入对灰岩的影响

3.1. 岩性的影响

R-油田西北区多口井 Barra Velha 组顶部钻遇巨厚碱性辉绿岩,由于其形成的岩浆温度通常大于 1000℃,而且厚度常常达到数十米,侵入体所携带的热量因此也非常巨大,在接触带直接对 Barra Velha 灰岩发生非常明显的热烘烤作用。通过对岩芯及井壁取芯样品的观察,可见接触带灰岩因受热烘烤作用发生了大理岩化变质:灰岩储层的颜色发生较明显的白化转变,白化作用不均匀分布;重结晶作用较强烈,方解石矿物变粗大;白化变质带边界大致平行岩体界面,储层普遍致密化(见表 1)。

Table 1. Macro and micro-features of the intrusive rock influence on representative limestone reservoirs in R-oilfield
表 1. 侵入岩对 R-油田代表性灰岩储层影响的宏、微特征统计

井名	接触带内代表性储层宏、微观特征	远离接触带未变质储层宏、微观特征
A	 <p>颜色明显白化,重结晶作用强,分布不均匀,粒度变粗,孔隙不发育</p>	 <p>无明显结晶变化,岩石颜色较深,组构总体较均一,粒间孔发育</p>
C	 <p>大理岩化强烈,白化特征明显,重结晶作用具有沿层分带性</p>	 <p>无明显结晶变化,岩石颜色较深,组构总体较均一</p>
D	 <p>显微结构显示重结晶作用强,孔隙不发育</p>	 <p>重结晶作用不明显,晶间孔隙发育</p>

注:表中的薄片均为铸体薄片,蓝色铸体。

从表 1 列出的 3 口代表性钻井中灰岩接触热变质带与远离热变质带的储层特征对比来看：接触热变质带内的灰岩颜色总体发白，而且常呈现条带状、斑杂状分布的特点，镜下可见重结晶作用非常强烈，矿物颗粒变粗，粒(晶)间孔、粒(晶)内孔极少发育，有时可见星点状的粒(晶)间微孔；未受热烘烤变质的灰岩保持了原有的黑灰、深灰色特征，组构特征总体较均一，铸体薄片可见岩石的粒(晶)间孔及粒(晶)内孔均比较发育。

3.2. 影响厚度

为了明确 R-油田不同厚度辉绿岩对灰岩储层接触热变质作用影响的厚度，采用核磁共振测井(NMR)、元素测井(ECS)、常规测井、常规取芯和井壁取芯、铸体薄片等资料进行综合判定。根据 6 口井中获得的厚度不同的辉绿岩对灰岩储层接触热变质带厚度的统计(见表 2)，可以看出厚度较小的辉绿岩对围岩的影响范围非常小，这个可能与其携带热能有限、岩浆冷却速度较快有关。例如当侵入岩厚度小于 1 m 时，其对围岩影响的厚度在测井曲线上通常不易观察，通过取芯和薄片资料分析表明这种情况下的影响厚度只有厘米级。对于数十米的辉绿岩侵入体，由于侵入的岩浆体积较大，所携带热能对围岩的接触热烘烤时间也较长，因此围岩直接受影响的厚度比较明显，在测井曲线上较容易观察，在 R-油田统计其变化范围从数米到十几米。拟合辉绿岩厚度与灰岩接触热变质带厚度，表明其具有正相关关系，符合二项式 $y = 0.001x^2 + 0.0801x + 0.2426$ 变化规律，相关系数 R^2 为 0.9961，表明拟合曲线的可信度较高(图 2)。

Table 2. Limestone contact metamorphism aureoles formed by diabase in R-oilfield

表 2. R-油田辉绿岩侵入对灰岩形成的接触变质带厚度统计表

井名	辉绿岩厚度/m	对上覆灰岩影响厚度/m	对下伏灰岩影响厚度/m	平均影响厚度/m
A	44.0	5.5	5.0	5.25
B	90.0	15.0	16.5	15.75
C	2.5	0.5	0.5	0.50
	18.5	2.5	2.5	2.50
D	65.5	/	9.5	9.50
E	54.5	8.0	8.0	8.00
F	56.0	/	8.0	8.00

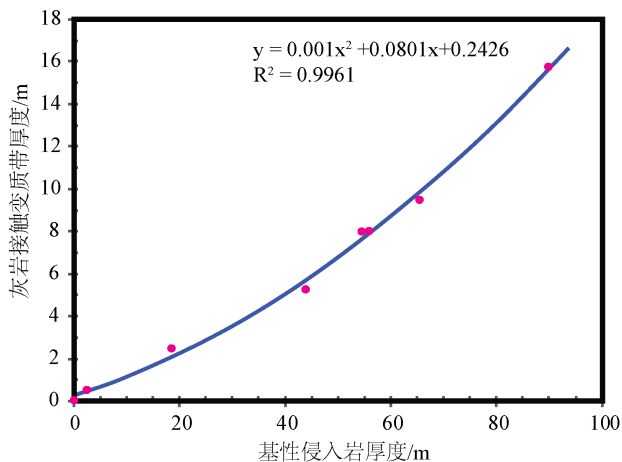


Figure 2. Relationship between thickness of intrusive rocks and limestone contact metamorphic aureoles of R-oilfield

图 2. R-油田侵入岩厚度与灰岩接触变质带厚度关系图

3.3. 物性的影响

R-油田辉绿岩侵入与灰岩发生接触热变质作用后，岩石物性从岩体向围岩具有比较明显的带状变化特征：基性侵入岩带一般表现为高密度、低声波时差，物性总体较差；接触热烘烤变质带物性呈现过渡性特征，测井密度、声波时差和补偿中子均表现出过渡性：密度值从高逐渐降低、声波时差从低逐渐变高、补偿中子从低变高，核磁测井 T_2 谱峰发育较差或呈过渡性，揭示该带储层孔隙总体不发育但向外逐渐过渡的特点；远离基性侵入岩体的未变质灰岩储层物性未发生明显变化，其测井密度值一般较低、声波时差值较大、补偿中子较大、核磁测井 T_2 谱具有大孔发育、谱峰既高又宽的特征，物性特征相对较好 (图 3)。

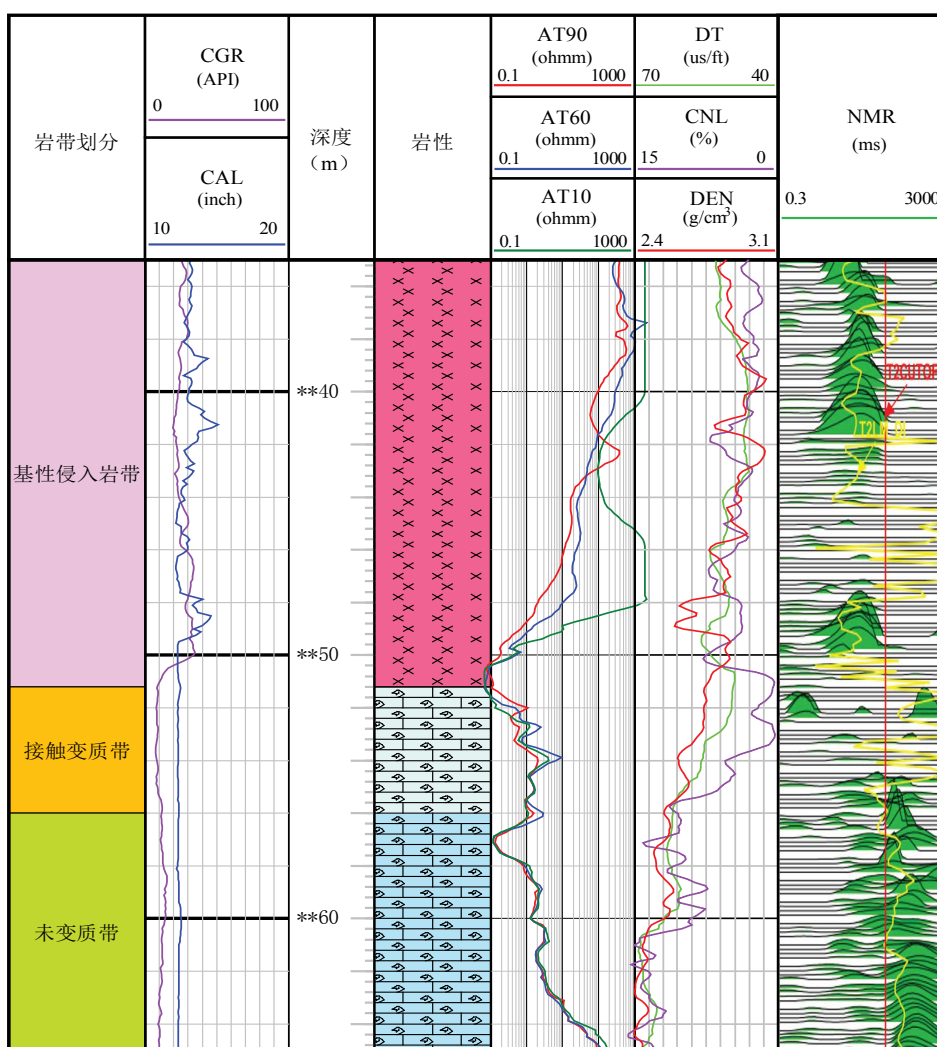


Figure 3. Logging responses of contact metamorphism by intrusive rocks on underlying limestone in A well

图 3. A 井侵入岩对下伏灰岩接触热变质作用的测井响应特征

为了明确接触热变质带灰岩与未变质带灰岩储层物性的定量化差异，对 6 口代表井中侵入岩体上覆段和下伏段接触热变质带灰岩储层孔隙度进行了统计，并与其最邻近的未变质带灰岩储层孔隙度进行对比(见表 3)。

Table 3. Limestone porosity of the contact metamorphic aureole and the non-metamorphic reservoir in R-oilfield
表 3. R-油田接触热变质带与未变质带灰岩储层孔隙度统计表

序号	井名	接触变质带平均孔隙度(%)		未变质带平均孔隙度(%)
		上覆段	下伏段	
1	A	0.60	0.23	13.60
2	B	3.34	2.13	7.07
3	C	2.31	1.90	9.82
4	D	膏盐层	4.42	9.02
5	E	1.13	0.97	7.75
6	F	膏盐层	1.55	6.20

注：数据为核磁孔隙度。

从表 3 的统计数据不难看出：1) 研究区的灰岩储层受到岩体侵入发生的接触热变质作用影响后，孔隙度均呈显著降低的特征，表明接触热变质作用对灰岩储层孔隙发育起消极作用；2) 未发生热变质作用的灰岩储层孔隙度(取紧邻变质带厚约 10 m 的平均值)相对较高，不同井中平均孔隙度约 6.20%~13.60%，而接触热变质带灰岩平均孔隙度约 0.23%~4.42%，降幅约为未变质储层的 4~8 倍，而且储层孔隙度越大者降幅也非常高。

4. 讨论

岩浆侵入对碳酸盐储层孔隙发育的影响是很多盆地油气勘探中经常遇到的问题，国内针对该现象的研究相对较多，开展了大量的野外观测和室内化验分析。从已发表的文献来看，所涉及实例中主要阐述岩浆侵入后对碳酸盐岩储层孔隙的发育起积极作用[5] [6] [7] [8] [9]。但是，本文在桑托斯盆地 R-油田观察到的情况却与此不同，多口井中岩浆侵入接触热变质作用主要导致中-高孔、渗的灰岩储层孔隙大量消失，物性变差，而且与侵入岩相关的热液活动也主要以硅化、云化、钙化沉积充填作用为主(热液影响另文讨论)，均不利于储层发育。综合分析认为，由于 R-油田盐下灰岩储层物性普遍相对较好，接触热变质带的灰岩主要经历强烈重结晶作用，细小的方解石经过有限的颗粒溶解和组分迁移，矿物重结晶变粗大、重新占位，在原来孔隙部位出现了大量方解石的结晶、胶结，从而导致孔隙空间的急剧减少。对比巴楚等地区受侵入岩影响的较致密灰岩储层，虽然在靠近岩体的接触变质带储层面孔率也呈现降低趋势，但由于孔隙度原本就比较低，这种降低趋势并不明显，而且相关热液的溶蚀作用较强，因此表现出储层物性总体上得到了改善，前人认为控制该致密储层改善的因素主要是岩相和高盐度热液[9]。

此外，对比侵入体对碳酸盐岩储层影响的厚度，发现巴西桑托斯盆地圣通阶-坎潘阶辉绿岩侵入对 R-油田盐下白垩纪灰岩的接触热变质影响厚度，明显低于中国西部塔里木盆地二叠纪辉绿岩侵入到奥陶纪灰岩中的影响厚度。通过分析，作者认为导致 R-油田出现这一现象有两种主要原因：一是岩体侵入时期围岩地层温度偏低。据汪新伟等的研究，桑托斯盆地盐下主要目的层碳酸盐岩在圣通阶-坎潘阶辉绿岩侵入时，其地层温度只有约 30℃ [20]，较低的温度导致侵入体中的热量散失较快；另一个原因是上覆巨厚的膏盐层导热效果较好。据孙波等的研究，盆地膏盐岩具有比其他沉积岩高数倍的导热能力[21]。R-油田盐下灰岩的直接上覆地层 Ariri 组发育上千米厚的膏盐岩，而辉绿岩又主要侵位到紧靠盐底的灰岩中，因此侵入体中的热能通过膏盐岩散失也非常快。

5. 结论

通过本文的研究，得到如下几点结论：

1) R-油田巨厚的辉绿岩侵入到盐下物性相对较好的灰岩储层中, 在接触变质带的灰岩储层发生较明显的大理岩化重结晶, 岩石明显白化, 方解石变粗大并且重新占位, 挤占原有储集空间, 物性明显变差, 而且孔隙度越大下降幅度越明显;

2) 桑托斯盆地盐下灰岩储层接触热变质带的厚度与辉绿岩侵入体厚度呈正相关关系, 符合二项式 $y = 0.001x^2 + 0.0801x + 0.2426$ 变化关系, 但这种影响明显低于中国西部塔里木盆地相似的影响程度, 原因主要是围岩的低温以及上覆膏盐层高导热性。

参考文献

- [1] 游振东, 王方正. 变质岩岩石学教程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988: 78-112.
- [2] 吴小洲. 辉绿岩及其接触变质岩储层简介[J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(3): 72-75+54.
- [3] 刘立, 彭晓蕾, 高玉巧, 等. 东北及华北含油气盆地岩浆活动对碎屑岩的改造与成岩作用贡献[J]. 世界地质, 2003, 22(4): 315-325.
- [4] 张小莉, 冯乔, 查明, 等. 惠民凹陷岩浆作用对碎屑岩储层的影响[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 655-662.
- [5] 杨宁, 吕修祥, 郑多明. 塔里木盆地火成岩对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(4): 1-4.
- [6] 聂保锋, 于炳松, 朱金富. 巴楚地区碳酸盐岩中深成侵入岩特征及其对储层发育的影响[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 90-99.
- [7] 万丛礼, 李钜源, 金强, 等. 岩浆活动对沾化凹陷碳酸盐岩储集性的改造作用[C]//中国石油学会, 中国地质学会, 中国矿物岩石地球化学学会. 第十三届全国有机地球化学学术会议论文集. 南宁, 2011.
- [8] 万丛礼, 金强, 李钜源, 等. 裂谷盆地岩浆活动控制油气概论[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 1-5.
- [9] Xu, K., Yu, B., Gong, H., *et al.* (2015) Carbonate Reservoirs Modified by Magmatic Intrusions in the Bachu Area, Tarim Basin, NW China. *Geoscience Frontiers*, 6, 779-790. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.02.002>
- [10] 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 107.
- [11] Luis, F.R., Ana, M.P.M., Carlos, M.A.S., *et al.* (2003) Volcanic Rock Fragments of Paraná Basin Provenance in the Upper Cretaceous Sandstones of Santos Basin, Eastern Brazilian Margin. Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás.
- [12] Moreira, J.L.P., Madeira, C.V., Machado, M.A.P. and Gil, J.A. (2007) Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15, 531-549.
- [13] 张金伟. 巴西桑托斯盆地盐下大型油气田成藏控制因素[J]. 特种油气藏, 2015, 22(4): 22-26.
- [14] Clemente, P. (2013) Petroleum Geology of the Campos and Santos Basins, Lower Cretaceous Brazilian Sector of the South Atlantic Margin. 1-32.
- [15] 刘深艳, 胡孝林, 李进波. 巴西 Santos 盆地盐下大发现及其勘探意义[J]. 中国地质勘探, 2011, 16(4): 74-81.
- [16] 陈凯, 康洪泉, 吴景富, 等. 巴西 Santos 盆地大型油气田富集主控因素[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 151-158.
- [17] Carlotto, M.A., Silva, R.C.B., Yamato, A.A., *et al.* (2017) Libra: A New Giant in the Brazilian Presalt Province. In: Merrill, R.K. and Sternbach, C.A., Eds., *Giant Fields of the Decade 2000-2010: AAPG Memoir 113*, AAPG, London, 165-176. <https://doi.org/10.1306/13572006M1133685>
- [18] 王朝峰, 邵大力, 唐鹏程, 等. 巴西 Santos 盆地深水区 S 油田火成岩地震响应及分布特征[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(6): 805-809.
- [19] Rancan, C.C., Oliveira, L.C., de Carmo, I.O., *et al.* (2018) Rochas Ígneas do Bloco de Libra, Bacia de Santos. Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, 20-24 August 2018, 2012.
- [20] 汪新伟, 邬长武, 郭永强, 等. 巴西桑托斯盆地卢拉油田成藏特征及对盐下勘探的启迪[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(3): 61-69.
- [21] 孙波, 蒋有录, 张善文, 等. 东濮凹陷北部膏盐岩分布特征及其对地层温度的影响[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 28-30.