" -E 9-.-0; C./E –C.0 C

Contents lists available at ScienceDirect

"

journal homepage: www.keaipublishing.com/en/journals/petroleum-science

1. Introduction

' 8) ,
,)
, D 7
9 6 -.-E ;6 $,
4 ,)
) , 9>
-. *CF 6 -.-- ;6 >, 7 4 5
G D H 8 ,
4) ,) , 92I(;

9 6 -.-- F: 6 -./ ;6 # H ,
— G)
—) 7 8 , 6
,
, G 5 ,
) G , 91 1 6
-.-. F# 5 -. *. ;6 1
) , 9 6 -.-- F% 6
-./ ; 8
) , 7 ,
) , 9 6 -.-C F 6 -.- *;6
&) 8 , —
:) " 5 H ,
— , 7 G
9' 6 -.-E F 6 -./ ;6
4))) 7

6
2 0 4 ,J 6 6 9&6%6' ;6
) 4 , # I) ,
9> D ;6

ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.-06.E6./+
*++/ =--0B © -.-0 & 1 6) , 2) >6?6 @1 # # 6 6 & ## >%:# :
9 ABB) 6 B B , BC6.B ;6

4 8 ,
8 5 9
1 5 -.-C ;6 3
5 , H ,) ,
6 # H ,
8 , 4) ,
6
& , ,
9$;) 8
, 5)
9 6 -.-C F$ 6 -./ F$) 6
-.-. ;6') 9(3;
) 9"?$; 1 ! 4 5
) 8 , 9> , 6 -. *+F #
6 -.-- F 6 -./ ; , 4 K
,L 4
, , 6&
7 9 ;
— , 9 "&$;
9!(I; 4 4 5 9 3:::; —)
, , 7
9 6 -.- *F$ 6 -.-- F
) ' 5 6 -.-- ;6 3 ,
9 6 6 #:: !(I;)
8
9# 6 -.-C F% 6 -.-- F 6 -./ ;6 4)
7 , 8 ,
H ,) 5 7
) 6 & ,
, ,
6
7, 4
7) 9,
6 -. *0;6 4)) 7
) 6 #
H , 4
7 9
6 -.-. ;6 "4 — ,
4 9 " ;
9! 1; —) ,
9# @ , -. .- F 6
-. .- ;6 "))
9$ 6 -.-- ; 4 ! 1
) 7)
9 6 -.-- ;6
)) ,
) 6 "
8 ,
,
7 8 6
& ,) , 4 5
4) 4
6 & !
8 9! 13; 4 , *
-
, 4
6 1 4 5
4) , 4
) 4 9# " ;
6 & 4 5) ,
H
, 4
) , 6 &

8 ,
8 ,) 6

2. Experiment

$3 3 4 , , 5 1 6 1 67 1

3 6 * 4 5G 4
4 6 &
) 4 5 9#::; 7)
! 13 4 H ,
4 ,
9$;6 & 7 4
) D
$ 6& $ 7
4 4
6 3 , D
") ,)
) ,
8 7 ,
6

$3$38)

! 13) H
H 4 9
-. */ ;6 4 ,
H 6 3 6 - 8
H $\mathbf{X} = \{9_*, 9_., \ldots, 9\ \}6$
" H , H (,9) #
, (, ϕ)6 >,
4 ϕ ϕ ×
! 7 4
4 , 4 (,) H 6
3 , ! 8 9**GADF**; !
8 9**GASF**; 8 2H 6 9*; 9-; 8
4 3 6 E9 ; 9 ;6 &
) , H 4
) 7
#:: 8 , 7
H 9 6 -.-C ;6

$$\mathbf{GADF} = \left[\left(\phi - \phi \right) \right]$$ 9*;

$$\mathbf{GASF} = \left[\left(\phi + \phi \right) \right]$$ 9-;

4 H 7
A = 94 : H ;F 9
)
A ϕ = (9)6

$3.3 1 6

#:: 4 5 4 ,
)
8 9 6 *++=;6 1 ,
, , ,
) 5)
5 ,)
4 H , 9 3 5 *+=. ;6
#:: ,) , ,
, , 4) ,)
7) 6

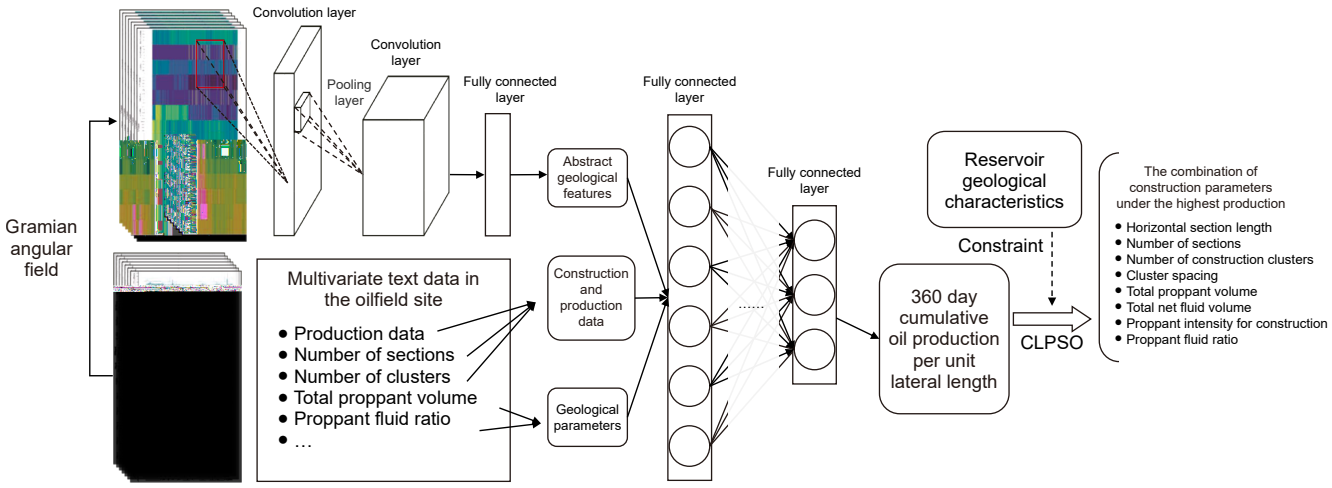


Fig. 1. 3 G 4 6

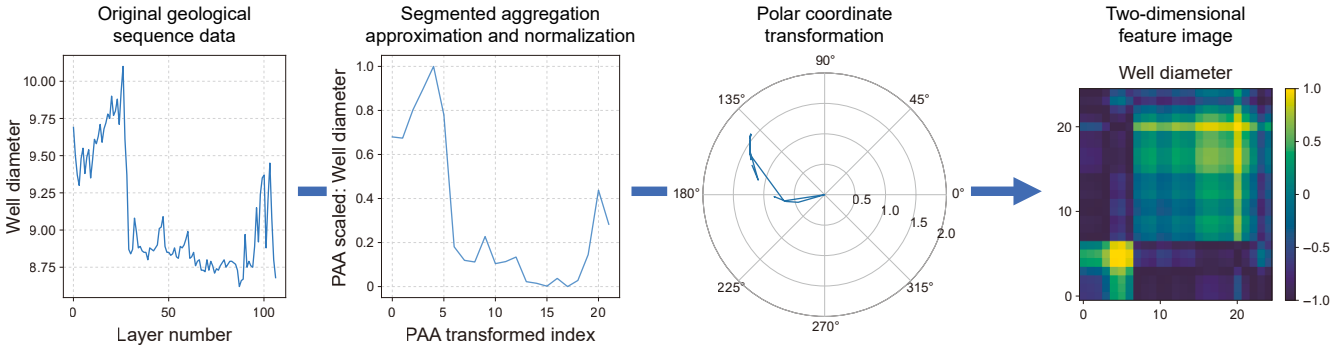


Fig. 2. ! 8 6 11A 4 7 6

) 7) 8 7) ,
4) 8 9) 5 ; , , 6 & $12)
,)) 4 6 & 4)
) , 7) 6) ,
&) , 2H69E;6 , 2H 69/; 90;A

$$, = \sum_{=.}^{6-*} \sum_{=.}^{6-*} 9_{+} \; , + 1 \; , + \qquad 9E;$$

$$\$\,2 = \frac{*..<}{} \sum_{=*} \frac{(\,) \quad - \quad (\,)}{(\,)} \qquad 9/;$$

4 9 1) 5
6) 5
) 6
, ,) ,
,
4 5) 6 &
7) 6 &
, 7 2H69C; 7
7) 6
1 7)) ,
4 5 , , , 8
6

$$\$12 = - \frac{*}{-} \sum_{=*} \left| (\,) \quad - \quad (\,) \right| \qquad 90;$$

$3%3 , , 1 , 5
& # " " ,
) , 8
9@ ,
2 *++/ ;6 3 6 C 4 5G 4
" 4
) 6 2
8 , 4 ,) A
) , 6& 5 ,
) ,) 6 &
)

$$, = 7 \; , 9_{+} \; , + \qquad 9C;$$

& , , H 9($"2; 8
9 ¯; 9$ 2;
9$12; ,
6 & $ 2) 4

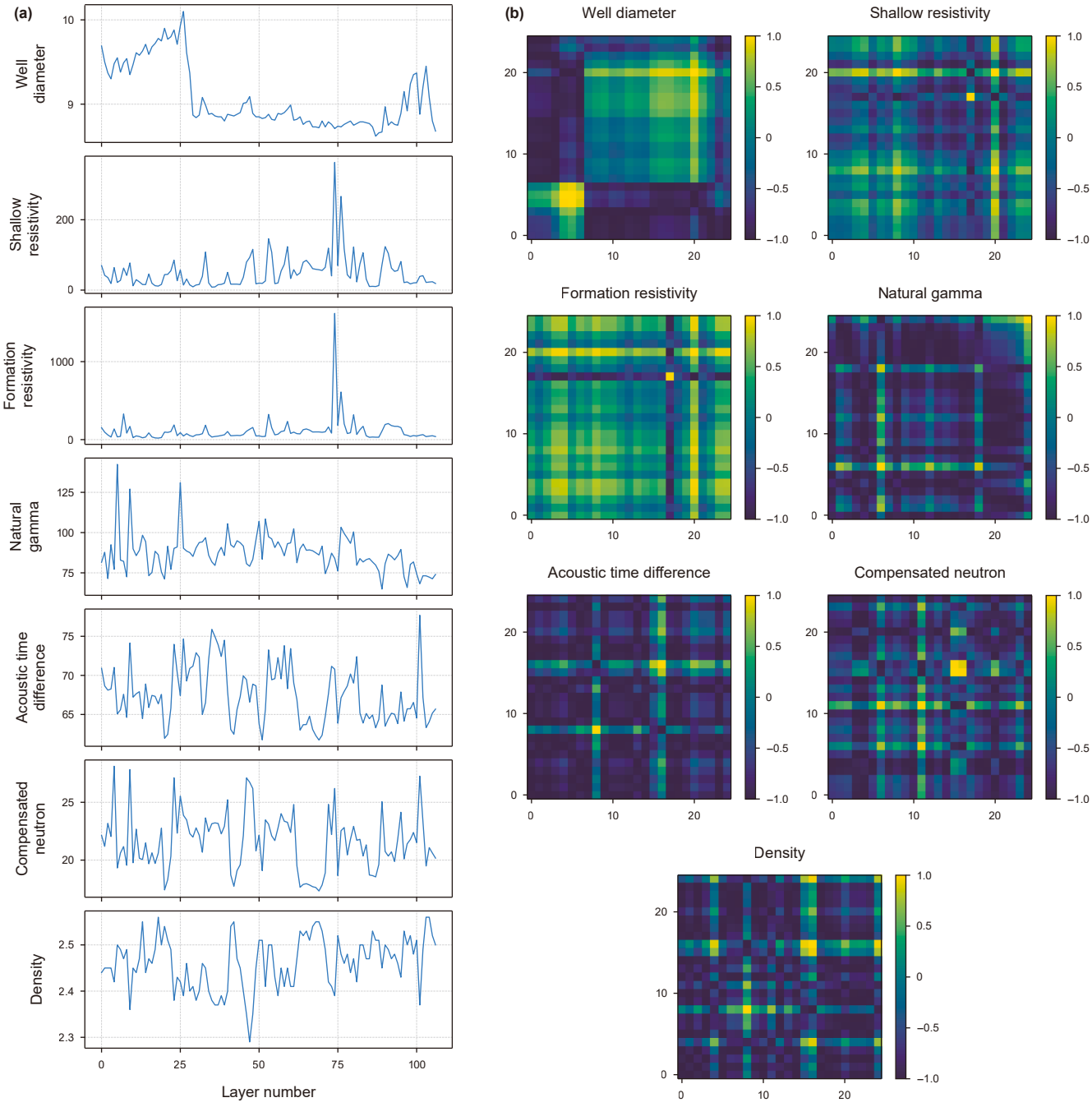


Fig. 3. & ! 13 A 9a; F 9b; ! 13 6

4 5)
6 & 7 " 6& 8))
) , , 7
7 9 6 -. .0 ;6 D)) 4 8)
&) ,) 6
2H 6 9M; 9=;6" 8 , 2H6 9M;
") " ,) $\nu^{(+*)}_{,} = 1 \square \nu^{(\,)}_{,} + \square_{,} \left({}^{(\,)}_{(\,),} - 9^{(\,)}_{,} \right)$ 9M;
9 ; 6
, 7 4 $\mathbf{x}^{(+*)} = \mathbf{x}^{(\,)} + \boldsymbol{\nu}^{(+*)}$ 9=;
,
9 ;))
) ,) 6 &) ,

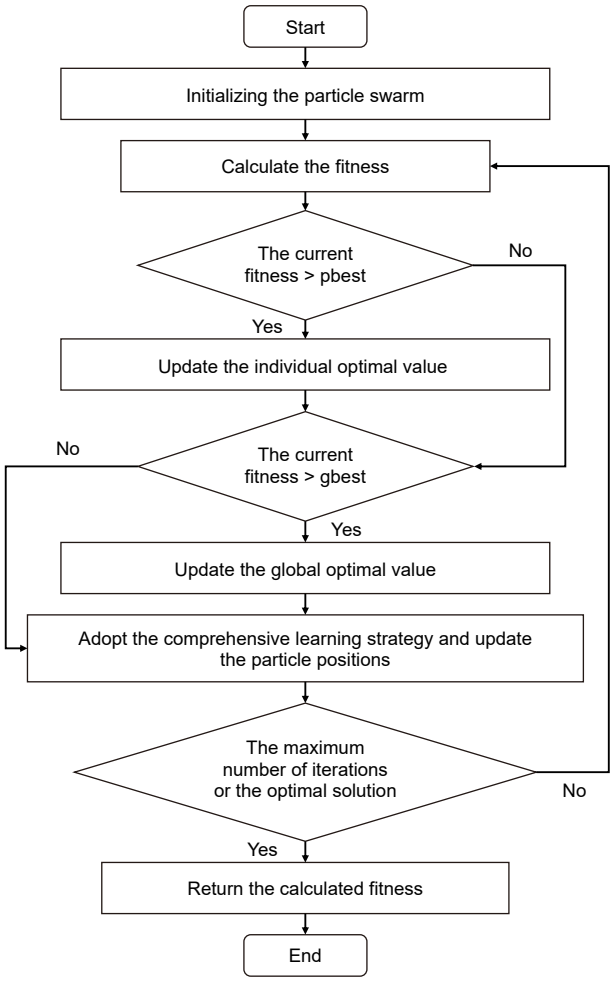


Fig. 4. # " 4 5 G4 6

4 $v^{(\,)}_{,}$ $9^{(\,)}_{,}$) ,) , F $\boldsymbol{\nu}^{(+*)}$ $\mathbf{x}^{(+*)}$) ,) F1 4 7 7 F F , 4 N. *O , F $^{(\,)}_{(\,),}$ 8 7 6

3. Result and discussion

.3'3 > ,

& , 8 M 4 8 6 & H , —) —) 4 6 &)) @ 9@:::; Eσ 9 ; 8 ,) 6 8) , 4 , 7 7 4 6 !) , , 8

6 & D)) , ,) 6 3 7 4 , H A 8 , , 9!(1; " ,) 7 9" 1 ; 1 ! 6 " H , , 4 92'$; 4 D) 4 4) 76 2'$ 4 ,) ,) , D) 4 6 3 , 2'$) 4 7 4 5 4 8 6 & EE A 6 " 8 , M H 94 4) ,) , , ,) ; *- *E *) 4 & *6

8 7) 8 6 & , 8) 6 & 4 , , 6

.3$3 B

, 7) 4 5 6 & , 4 5 , , 8 6 & D) 9 D) ; H 9$"2; 6 & 8) ,) , 6 & - 5 , ,) 6 1 /. 9& 2; 4 8 , 7 ,) , 8 6 I 8 8 4 6 8 , 4) ,)) 8) 6 3 6 / #:: $)) , 6 & 4 1 4 8 .6. . .E6 1 7 4 *. . . . -=-- , 6 & E 8 , # " 6 # " 87 6 & , / +/)) 6 & G 4 , , 6

Table 1
27 , 6

!	2	3
( ) 5 #) #) #) $ 7 , < 1) , < 1) < , , & 5	1 " # 1) B &) & G) 3 – < 3 , EB , EB G < 1) < $ D EB $ 7 D EB	' E0. ,) " 4) , 3) , : 1 # ,

Table 2
$, 6 "! A 6

$,	" ,)
&) , & , ,	N= *0 -CO N*0 E- 0CO 9.6E–.6/; 9.6...*–.6.*; N1 1 ' "! O 9.6....*–.6.*;
,	*0 0C .6E .6...* 1 .6..=C

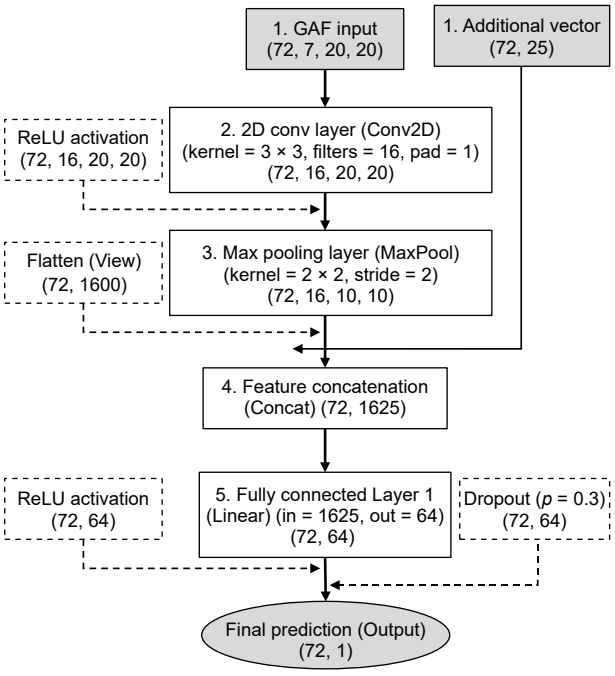


Fig. 5. #:: $ 6

Table 3
" 6

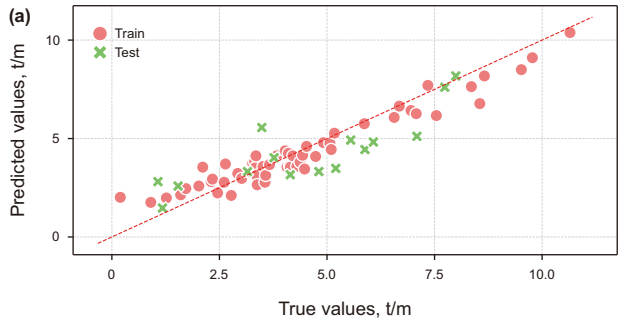
2	P	#P	'P	'P 7	$ 7PG
*..	E/	*/	.6/Q*6/		/

>
4 5 8
,
7

6 & 7 # "
8 8 4
) *. . 4 H E.
6 & 7)
,)
6

.3.3 , ,

&)) , #:: $
1 ! 91 $;
4 5 4 5 6 &
4
4 5 4 7
K PH ,L 4))
, 6 &
) 8 , 5 4 F M
) 4 */ 4 ,
, , 6
3 609 ; 9 ;
4 7 , 6& #::
$ 4 5 1 !
4 A ($"2 $12 $1 6
&) & C6
27 #:: $
8 , 1 !)
6 , #:: $
) ($"2 $12 $ 2) *6-E *6.- EE6C-
-E6 E< -.6E*< C-6.-<
1 ! 6
1 , 8 ,
#:: $) .6+*
7 , 4 6
4 .60=61
) 8
6 1 !
) , .6/ M



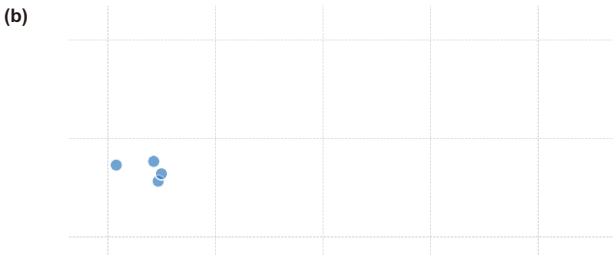


Fig. 6. #:: $ 4 569a; #:: $ F 9b; 1 ! 4 56

Table 4
)) 6

$		2) 7			
		($"2	$12	$ 2	-
#:: $	&	.60M	.6/E	E-6.C	.6+*
	&	*6-E	*6.-	EE6C-	.60=
1 !	&	*6/=	*6-+	0=6+M	.6/M
	&	*60.	*6-=	/M60C	.6*0

.6*0 8
) , , 6
) #:: $
8 ,)
5 6 ,

,) 8 6 3
7
, , 6
27)
4 5 4

E0. , ,)
, 6 &
#:: $,) ,
) ,
G ,
,
6 3
#:: $ 8 7
4 6

.3%3(, 5 ,

& ,)
*. 4 8 6 & 5
) E. M. 4)
-. . . C. . . 6 &
8 4 7 4 9 4 * –0;

4 9 4 * –C; 4 5
)) 6 3 6 M
4
7 8
,) 6
& 7 ,
4 5G 4)
4 8 & /
4 8 6

C./+

Fig. 7. ( ) 4 6

3 6 =9 – ;
4 A) 5 5)
, 8 6 &
)) 4 5’
,)))
7 6
& 8 4
) 4 7 4
4 9 6
-.-E ;6 & 0 ,)
* -6
I H)
4
, , ,
D) 6 &
C<–=< 4 4
)) F
) -< –C<
))
8 , , , 6

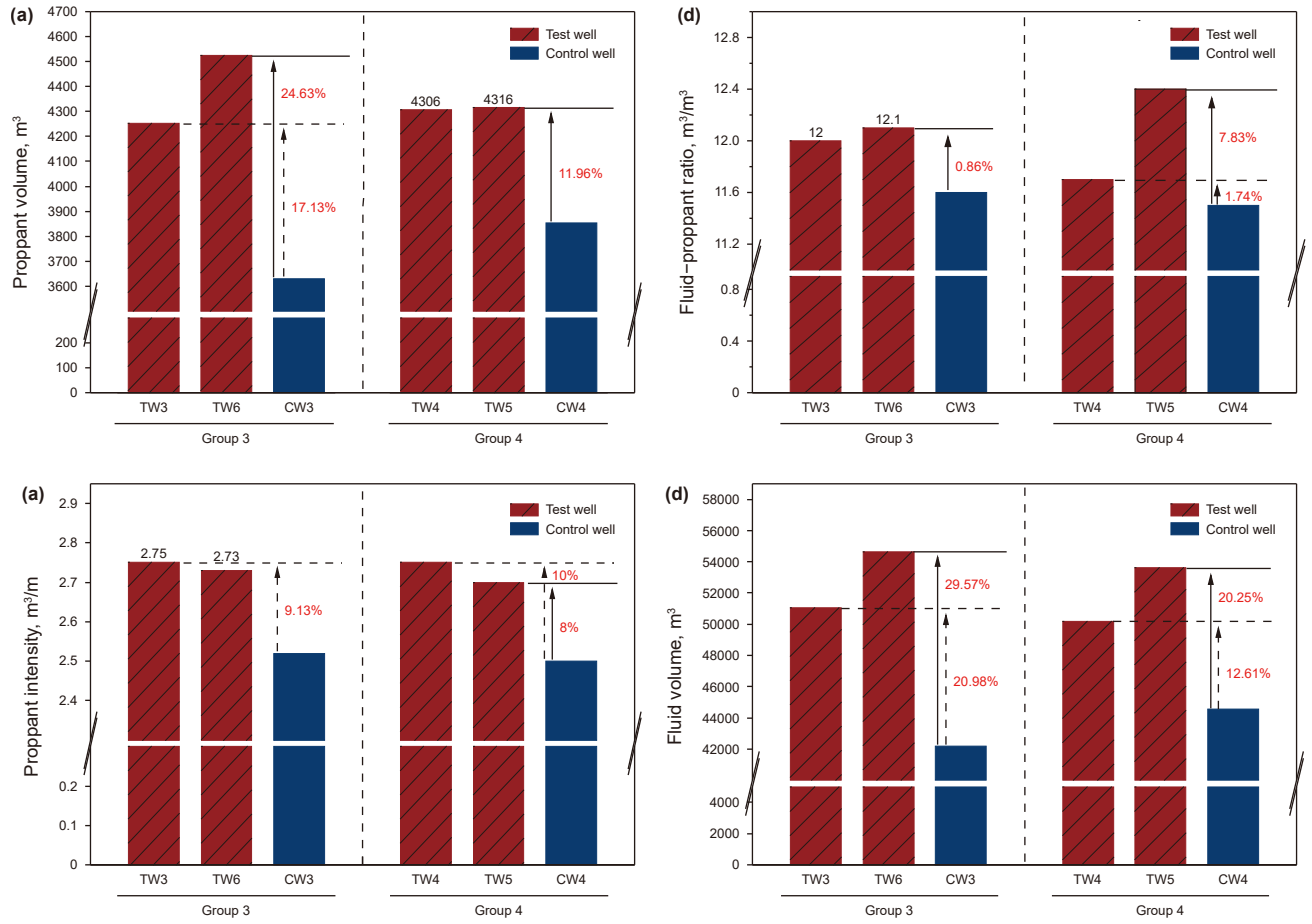


Fig. 10. E C69**a**;) F 9**b**; G) F 9**c**; ,F 9**d**; G – 6

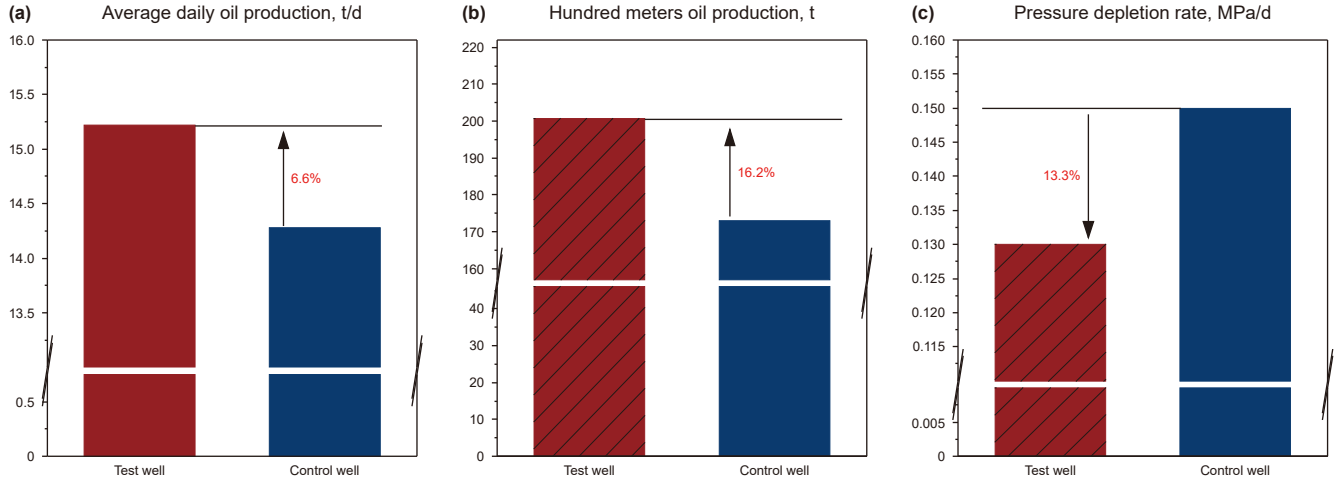


Fig. 11. 4 * -6 9**a**; 1) , F 9**b**; *. . F 9**c**; 6

) G)

)

4. Limitations and future work

, ' ,)

)) 5

) 6 $) 4 5) 5 4 6 1 ,

) , , , 6 1 M

G 4) 7 8 , 6 8) #:: $

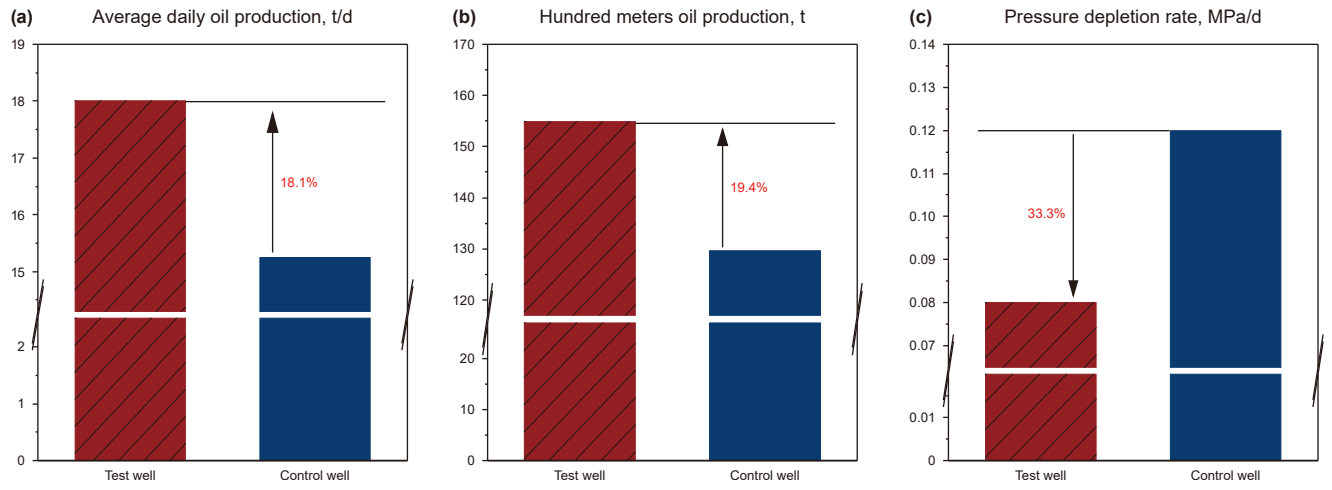


Fig. 12. 4 E C69**a**; 1) , F 9**b**; *. . F 9**c**; 6

7) 8 , K , L— 8 ,) 4 , 4 , 6 & 5 , 7 ,)) 4 6 3 7) 9 4 , ;) 8) 4 6 1 , 4) 7) , 8 F ,) 4 H) 8 6 3 H ') , 8 , 6 3 8 4 7 4 4 6 ' , 8 8 6 # H , 8) , , 4 56

5. Conclusions

& #:: 9) 4 5; $ 9 , ; 4 5 4 # " 9) 4 ; 6& 4 5 ! 13 9! 8 ; H)

)) , 6 & # " 8 4 ,) 6 3) 7 8 , 6& , 4 6

9*; 1 ! 4 5 #:: $ 7) , 4 , 8 , D

4 , , -.<6 9-; ' 7) ,) G) , , 7 4 56&) 8 , G 4 4 , 6 # H , G 4 , 4 4 6 9E; 3 *E= *=/ , 8 4 ,) 060< *=6<) , 4 ,) 6 #) *. . , *06-< *+6C<4 , *E< E=6/<6& 8 , , 4 4)) 4 6 4) , 8 ,) H) 6

& 4 5 4 4 5 4 # " 7))) ,) , 6 & H 5) , 5 6

CRediT authorship contribution statement

Jie Li: ' –) 4 ' – $, 6 **Quan-Zhen Xiu:** ' –) 4 ' –) 6 **Xiao-Dong He:** ' –) 4 ' – 6 **Gen-Sheng Li:** ? (D 3 H 6 **Chang Li:** D) 3 H 6 **Mao-Ya Xu:** ' –) 4 ' – $, 6**Tian-Xiang Zhou:** ' –) 4 ' – 6 **Shou-Ceng Tian:**

") D 3 H 6 **Tian-Yu Wang:** ") (D 6

Conflict of interest

: G 7
) ,
6

Acknowledgements

& , 5 4 8
) 9(; # 27
D # 9: 6 /-E-. *./. .-;6

References

1 1 6 1 6 1 @ $6 6 -.-.6
, ,) 6 6 6 27 6
6 & 6 *. 9=; EEOM-EEO*6 ABB 6 B* .6*. .MB *E-.- .-. . .++. 0 6
> (6 6 -. *C61) 4 G , ,
4 6 61 6 , 6 " 6 *E* 9*0; C.ME/6 ABB
6 B* .6*. .-B 6C.M E/ 6
> , "6 ! 5 6@6 &6(6 6 -. *+61)
, , , ,
8 A 1 ,
$: 1 6 6 6 " 6 2 6 *M0 M.-– M*/6 ABB
6 B* .6*. *0BD6 6-. *+6.*6.*E6
6 ? 6 ?, 6 6 -.--6) ,
H 6 6 6 " 6 2 6 -*M
**.M/ M6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.--6 **.M/ M6
!6 & 6 &6 6 -.-C6 &
) , ,) #:: !(I 4 56
! , " 6 2 6 -EE -*-/-=6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.-E6- *-/-= 6
5 626-. *.6 1 , G A , G 6 6 6
" 6 2 6 M. 9E; *+*–*+M6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-. .+6**6.*. 6
$6 @ , 6 -. .-6 & 4 7 ,)
7 6 222 & 6 2) 6 # 6 0 9*;
/=–ME6 ABB 6 B* .6**.+BC-E/6+=/0+- 6
) ' 5 (6 (6 $ (6 6 -.--6)
6 6 6 " 6 2 6 -*.
.++E M6 ABB 6 B .6*. *0BD6 6-.- *6.++E M6
@6 16 1 4 "6 6 -. .-6 1 D)
A :"! 1 6 222 & 6 2) 6 # 6 0 9-; *=-–*+M6 ABB 6 B
*.6**.+BC-E/6++0. *M6
3 5 @6*+=.6 : A 4 5
, 6 > 6 #, 6
E0 9C; *+E–-.-6 ABB 6 B* .6*. .MB>3.. ECC-/ *6
! 6 $ 6 %6 -.-C6 1 ,
) , 6 ! 6
! , 6 ! ! 6*. 9*; *.-6 ABB 6 B* .6*. .MB C.+C=
.-C . .=* + . 6
6!6 > 636 6$6 -.-.6 ,
D) H
G 4 5 4 , 6 6 2 6 # 6 (6
/+ 9EC; */-+=–* /E.=6 ABB 6 B* .6*.- *B 6 6. .-=0M 6
$6 $ 6 & "6 6 -.-C6 ! 7)
4 6 A 1($1 /= I 6"6(5
$ B! ", 6 A ABB 6 B1($1 I"($"B
B1($1- CB1($1-CB .C-"./=(. *.B/C+C-E 6
"6 " $6 " "6 6 -.-E6 B
4)
8 , 6 : 6 ! 6 6 >6*. 90; /=E–/+ .6 ABB 6 B
*.6EM=MBD6 *.6. . .+ M06-.-E6.M6..0 6
, 6 6 $ 6 ? 4 6"6 6 -. *06I
, A 1 6 6 & 6 (6 " 6 16EMC 9-.M=;
-. */.C-06 ABB 6 B* .6*.+=B 6-. */6.C-0 6
16 1 5 "6 -.-C6 1)) 4
, 6 6 6: 61 6 $! $ 6 C=
9/; *CEE±C/+6 ABB 6 B* .6*. .-B 6E0=+ 6

@ , 6 2 (6 *++/6 4 6 6 #::R+/ 6
# 6 : : 4 6C *+C-–*+C=6 ABB 6 B* .6**.+B #::6 *++/6C==+0=6
%6 > 6 > %6 6 *++=6 !
6 6 222 =0 9**; -- M=–-E-C6 ABB 6 B* .6**.+B
/6M-0M*6
!6 " 6 & "6 6 -.-- 6 A 1) 4 6
2 *= EE–C=6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.--6.M 6.*C6
%6 %6 $ 6 6 -.-- 6 " ,)
) G 6 3 6 2 , (6 *.
. .M--C6 ABB 6 B .6EE=+B 6-.--6 *. .M--C 6
' 6 &6 6 6 -.-C6 $
4 5 8 6 " 6 (6 *C 9*; 0.C06
ABB 6 B* .6*.E=B C*/+= .-C /000. = 6
6 6 16@6 6:6 6 -. .06 #)
4 6 222 & 6
2) 6 # 6 *. 9E; -=*– -+/6 ABB 6 B* .6**.+B&2?#6-. ./6=/ M0*. 6
%6%6 $ 6 6 6' 6 6 -.- *6 1
) , 92I(; 4 6 6 " 6 *=
9/; *C/.– *C0C6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.- *6.=6..M6
#6 6 "6 6 -.--6 ,
4 A 1 , # 6 6 6
" 6 2 6 -*C **./0=6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.--6 **./0= 6
$ 6 ' 6 6 6 -.-/6
, , 6
! , " 6 2 6 -/. -*E=*=6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.-/6- *E=*=6
$ 6 2 5 $6 & #6 6 -.--6
4) 4
6 6 " 6 & 6 C. 9C; CC/–C0=6 ABB 6 B* .6*.=.B
*.+ *0C006-.- *6-. . */-0 6
$) 16 6 5) 6 6 , 5) ?6$6 6 -.-.6)
, A 3
6 6 6 " 6 2 6 *+C *.M/.C6 ABB 6 B* .6*. *0B
D6 6-.-.6 *.M/.C 6
$ &6 ", 36 6 16@6 6 -.--6 "
,
6 6 2 , (6& 6 *CC 9M;
.ME-. *6 ABB 6 B* .6***/B*6C./- *=- 6
: 626 > , @6" 36 6 -.-/6 1) ,
)) 4 ,
) A , 4) > 5 > 1 6
6 6 27 6 6 & 6 */ 9*.; */+6 ABB 6 B* .6*. .MB *E-.-
.-/ .-.-C / 6
6 $6 >6 6 -.-E6 $) ,)
6 2 " 6 ( ) 6 -CE *.C CM-6 ABB 6 B
.6. *0BD6) 6-.-E6*.C CM-6
" !6 6 6 $ 6 6 6 -.-E6 1 4 G 4
7 , , A 3
6 6 " 6 -. 9/; E. .-–E. *-6 ABB 6 B* .6*. *0B
D6 6-.-E6.E6.-0 6
' 6 &6 -. */6) 8
6)) A*/.06. .E- M6 ABB 6 B* .6C=//.B
) 6*/.06. .E- M6
' 6 6 6 6 -.--6 1)
6 6: 6 ! " 6
2 6 *. * *.C/./6 ABB 6 B* .6*. *0BD6D 6-.--6*.C/ ./ 6
% (6 6 ' 6 6 -.--6 1 ,) 4 5G 4
4 8
4 56" 2 6-M 9E; */E *–*//-6 ABB 6 B* .6-**=B-./+.E 16
% $6 % 6 %6 6 -.-/6 ,
) B
6 6 6(5 $ 6 $ 6 " 6 *+* *.0 *-06 ABB 6 B
.6. *0BD6 6-.-/6 *.0 *-0 6
"6 # $6 $ 6 6 -.- *6( )
, 6 D ! *M 9E; 0M–M* 9
;6
6 6 ! #6 6 -.-/6 1) , 32$ 3?$
, 6 # 6
! 6 *MM*.0 =-*6 ABB 6 B* .6*. *0BD6 6-.- C6.0= - *6
%6 6 6%6 6 6 6 -.-/6 I)
1$ 6 6 " 6 ABB 6 B* .6*. *0B
D6 6-.-/6 *-6. */ 6
(6 :6 %6 6 -.-/6 '
4 , 6
2 *= 9*; ++6 ABB 6 B* .6EE+.B * =. *. .++ 6