



北美主要页岩层系 油气地质特征

孙 健 易积正 胡德高◎编著



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

北美主要页岩层系油气地质特征

孙 健 易积正 胡德高 编著

中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

北美主要页岩层系油气地质特征 / 孙健, 易积正, 胡德高编著.
—北京: 中国石化出版社, 2018.6
ISBN 978-7-5114-4818-7

I. ①北… II. ①孙… ②易… ③胡… III. ①页岩—
石油天然气地质—北美洲 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第105763号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市朝阳区吉市口路9号
邮编: 100020 电话: (010) 59964500
发行部电话: (010) 59964526
<http://www.sinopec.press.com>
E-mail: press@sinopec.com
北京富泰印刷有限责任公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787 × 1092毫米16开本22印张505千字
2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷
定价: 128.00元

前 言

随着经济社会的快速发展，我国能源对外依存度不断增加，环保与社会发展矛盾凸显，页岩油气，特别是页岩气作为新型优质清洁能源，在保障能源安全、优化能源结构、促进节能减排中的地位日益突出。加之我国页岩油气资源规模巨大，加快页岩油气勘探开发是我国能源战略的重要选择。

页岩油气是目前全球非常规油气勘探中的热点。北美地区是全球最早发现和勘探开发页岩油气的地区，自 1821 年美国在阿巴拉契亚盆地成功钻探第一口页岩气井以来，页岩油气的勘探开发已有近 200 年的历史。但直至 20 世纪末，页岩油气勘探理论取得长足发展，水平钻井和大型分段水力压裂技术取得重大突破后，页岩油气才真正进入大规模的勘探开发阶段。目前，北美地区的美国和加拿大已经成为页岩油气规模开发的两个主要国家。从 EIA（美国能源信息署）2012 年公布的《1990~2040 年美国天然气产量展望》来看，2000 年之前页岩气的产量还不到美国天然气产量的 2%，2005 年也仅占其天然气总产量的 4.5%，而到 2011 年美国页岩气产量已经占到美国天然气总产量的 34%，并预测在 2035 年前后页岩气的产量将占据美国天然气总产量的半壁江山。

我国真正意义上的页岩油气勘探工作在 21 世纪初才开始，发展至今也不过十余年，页岩气在涪陵、威远、长宁、彭水等地区取得了一定的突破，特别是在涪陵地区，目前百亿方产能建设已进入收官阶段，页岩油也在少数几个盆地获得工业油流。尽管目前我国页岩油气勘探开发工作取得了一定的发展，但总体而言国内页岩油气勘探开发工作仍处于起步阶段，勘探开发理论体系、高效开发工程工艺技术还需要进一步发展完善。这就要求我们在立足自身独特地质特征的基础上，充分消化吸收全球领先的研究成果，站在巨人肩膀上大踏步前进。为此，我们组织了 20 余名长期从事页岩油气勘探开发工作的专家，系统收集调研北美 20 多套页岩油气层系的资料，进行了研究和整理，编著了本书。

本书对北美页岩油气主要勘探开发层系地质特征进行了系统解剖。内容主要包括页岩层系的勘探开发历程、区域构造、地层、沉积、地化、储集、可压性、含气性及潜力分析等内容，基本涵盖了当今页岩油气层系地质特征研究的大部分内容。本书可供科研院所、高校、油公司等从事页岩油气研究的相关科研人员借鉴参考。

本书共分为 23 章，由孙健进行整体结构设计，并拟定了提纲，由近年来参与涪陵页岩气田开发研究的专业技术人员直接参加编写。其中，第 1 章由孙健、易积正、胡德高编写；第 2 章由孙健、张柏桥、包汉勇编写；第 3 章由易积正、舒志国、钱华编写；第 4 章由胡

德高、包汉勇、孟志勇编写；第5章由张柏桥、王进、武加鹤编写；第6章由舒志国、王超、汪先珍编写；第7章由包汉勇、刘尧文、李大荣编写；第8章由王超、马莉、张广英编写；第9章由王进、李继庆、程芳编写；第10章由孟志勇、舒向伟、李大荣编写；第11章由孟志勇、陆亚秋、汪先珍编写；第12章由甘玉青、李争、段奕编写；第13章由张柏桥、陆亚秋、刘世平编写；第14章由包汉勇、甘玉青、程芳编写；第15章由张梦吟、李凯、段奕编写；第16章由李凯、武加鹤、刘世平编写；第17章由武加鹤、刘莉、刘世平编写；第18章由张梦吟、刘颀、周文编写；第19章由王超、李争、刘强编写；第20章由甘玉青、段奕、蔡进编写；第21章由李凯、刘超、钱华编写；第22章由包汉勇、李凯、刘强编写；第23章由王进、吕娟、王郁编写。

本书得到了国家科技重大专项《涪陵页岩气开发示范工程》（编号：2016ZX05060）的资助。此外，书中引用了大量的国内外页岩油气勘探开发方面的研究成果，由于资料众多，难以一一列举，在此一并致谢！

由于本书涉及页岩油气层系众多，资料收集渠道和编者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

1 概论 1

1.1 北美主要页岩层系展布特征概述.....	1
1.2 北美页岩气勘探开发历程.....	6
1.3 北美页岩油勘探开发历程.....	9
参考文献.....	11

2 Antrim 页岩油气地质特征 12

2.1 勘探开发历程.....	12
2.2 构造特征.....	13
2.3 地层特征.....	15
2.4 沉积特征.....	18
2.5 地化特征.....	18
2.6 储集特征.....	20
2.7 可压性特征.....	20
2.8 含气性特征.....	21
2.9 潜力分析.....	21
参考文献.....	23

3 Baxter 页岩油气地质特征 24

3.1 勘探开发历程.....	24
3.2 构造特征.....	25
3.3 地层特征.....	26
3.4 沉积特征.....	30
3.5 地化特征.....	31
3.6 储集特征.....	31
3.7 岩矿特征.....	32
3.8 含气性特征.....	33
3.9 潜力分析.....	34
参考文献.....	35

4 Bakken 页岩油气地质特征 36

4.1 勘探开发历程	36
4.2 构造特征	40
4.3 地层特征	41
4.4 沉积特征	44
4.5 地化特征	46
4.6 储集特征	47
4.7 可压性特征	50
4.8 含油气性特征	52
4.9 潜力分析	54
参考文献	55

5 Barnett 页岩油气地质特征 57

5.1 勘探开发历程	57
5.2 构造特征	58
5.3 地层特征	61
5.4 沉积特征	63
5.5 地化特征	70
5.6 储集特征	75
5.7 可压性特征	83
5.8 含油气性特征	85
5.9 潜力分析	87
参考文献	88

6 Bossier 页岩油气地质特征 90

6.1 勘探开发历程	90
6.2 构造特征	90
6.3 地层特征	91
6.4 沉积特征	92
6.5 地化特征	97
6.6 储集特征	98
6.7 可压性特征	99
6.8 含气性及潜力分析	101
参考文献	101

7 Conasauga 页岩油气地质特征 102

7.1 勘探开发历程	102
7.2 构造特征	103
7.3 地层特征	104
7.4 沉积特征	106
7.5 地化特征	109
7.6 储集特征	112
7.7 可压性特征	112
7.8 含气性特征	115
7.9 潜力分析	117
参考文献	119

8 Duvernay 页岩油气地质特征 120

8.1 勘探开发历程	120
8.2 构造特征	120
8.3 地层特征	121
8.4 沉积特征	122
8.5 地化特征	123
8.6 储集特征	124
8.7 可压性特征	126
8.8 潜力分析	126
参考文献	127

9 Eagle Ford 页岩油气地质特征 128

9.1 勘探开发历程	128
9.2 构造特征	129
9.3 地层特征	130
9.4 沉积特征	131
9.5 地化特征	132
9.6 储集特征	135
9.7 可压性特征	135
9.8 含油气性特征	136
9.9 潜力分析	137
参考文献	138

10 Fayetteville 页岩油气地质特征 140

10.1 勘探开发历程	140
10.2 构造特征	140
10.3 地层特征	140
10.4 沉积特征	141
10.5 地化特征	145
10.6 储集特征	146
10.7 可压性特征	147
10.8 潜力分析	148
参考文献	148

11 Floyd 页岩油气地质特征 149

11.1 勘探开发历程	149
11.2 构造特征	150
11.3 地层特征	155
11.4 沉积特征	156
11.5 地化特征	156
11.6 储集特征	158
11.7 可压性特征	159
11.8 含气性特征	160
11.9 潜力分析	161
参考文献	162

12 Gothic 页岩油气地质特征 163

12.1 勘探开发历程	163
12.2 构造特征	164
12.3 地层特征	165
12.4 沉积特征	166
12.5 地化特征	168
12.6 储集特征	173
12.7 可压性特征	174
12.8 含气性特征	174
12.9 潜力分析	175
参考文献	177

13 Haynesville 页岩油气地质特征 178

13.1 勘探开发历程	178
13.2 构造特征	178
13.3 地层特征	180
13.4 沉积特征	183
13.5 地化特征	187
13.6 储集特征	188
13.7 可压性特征	188
13.8 含气性特征	189
13.9 潜力分析	189
参考文献	190

14 Horn River 页岩油气地质特征 192

14.1 勘探开发历程	192
14.2 构造特征	193
14.3 地层特征	193
14.4 沉积特征	195
14.5 地化特征	198
14.6 储集特征	199
14.7 可压性	207
14.8 含气性特征	208
14.9 潜力分析	208
参考文献	208

15 Lewis 页岩油气地质特征 211

15.1 勘探开发历程	211
15.2 构造特征	211
15.3 地层特征	212
15.4 沉积特征	213
15.5 地化特征	215
15.6 储集特征	218
15.7 可压性特征	219
15.8 含气性特征	219
15.9 潜力分析	220
参考文献	220

16 Mancos 页岩油气地质特征 222

16.1 勘探开发历程	222
16.2 构造特征	222
16.3 地层特征	223
16.4 沉积特征	225
16.5 地化特征	226
16.6 储集特征	227
16.7 可压性	228
16.8 潜力分析	229
参考文献	230

17 Marcellus 页岩油气地质特征 231

17.1 勘探开发历程	231
17.2 构造特征	232
17.3 地层特征	234
17.4 沉积特征	236
17.5 地化特征	237
17.6 储集特征	239
17.7 可压性特征	241
17.8 含气性特征	242
17.9 潜力分析	242
参考文献	245

18 Monterey 页岩油气地质特征 247

18.1 勘探开发历程	247
18.2 构造特征	247
18.3 地层特征	249
18.4 沉积特征	250
18.5 地化特征	252
18.6 储集特征	254
18.7 可压性特征	256
18.8 潜力分析	256
参考文献	256

19 Montney 页岩油气地质特征 258

19.1 勘探开发历程	258
19.2 构造特征	258
19.3 地层特征	259
19.4 沉积特征	260
19.5 地化特征	261
19.6 储集特征	262
19.7 可压性特征	263
19.8 含气性特征	264
19.9 潜力分析	264
参考文献	265

20 New Albany 页岩油气地质特征 267

20.1 勘探开发历程	267
20.2 构造特征	268
20.3 地层特征	268
20.4 沉积特征	270
20.5 地化特征	270
20.6 储集特征	272
20.7 可压性特征	274
20.8 含气性特征	275
20.9 潜力分析	277
参考文献	277

21 Niobrara 页岩油气地质特征 279

21.1 勘探开发历程	279
21.2 构造特征	280
21.3 地层特征	282
21.4 沉积特征	284
21.5 地化特征	285
21.6 储集特征	286
21.7 可压性特征	292
21.8 含油气性特征	293
21.9 潜力分析	294
参考文献	295

22 Utica 页岩油气地质特征 296

22.1 勘探开发历程 296

22.2 构造特征 297

22.3 地层特征 297

22.4 沉积特征 299

22.5 地化特征 301

22.6 储集特征 304

22.7 可压性特征 306

22.8 含气性特征 306

22.9 潜力分析 307

参考文献 308

23 Woodford 页岩油气地质特征 310

23.1 勘探开发历程 310

23.2 构造特征 311

23.3 地层特征 312

23.4 沉积特征 315

23.5 地化特征 317

23.6 储集特征 322

23.7 可压性特征 327

23.8 含气性特征 331

23.9 潜力分析 332

参考文献 332

附录 本书涉及的单位换算 334

后记 335

1

概论

页岩是指由粒径小于 0.0039mm 的碎屑、黏土、有机质等组成的，具有页状层理、容易碎裂的一类细粒沉积岩。页岩气是指以游离态、吸附态和溶解态赋存于富有机质页岩及夹层中的热成因或生物成因的天然气，游离态页岩气主要赋存于有机质孔隙、无机孔隙和微裂隙中，吸附态页岩气主要吸附在黏土矿物颗粒、有机质孔隙及微裂缝等表面，溶解态页岩气赋存于地层水、沥青质和有机质中（Curtis 等，2002；Ross 等，2007）。目前对于页岩油的定义还没完全统一，存在广义和狭义之分，广义上将产自页岩、页岩夹层及毗邻的致密岩系中的石油统称为页岩油（Jarvie，2012），而狭义上仅指产自页岩及页岩夹层中的石油。不同于常规油气，页岩油气主要赋存于页岩地层中，且不受圈闭的控制，其分布范围广、开采时间和生产周期长。页岩储层孔隙结构复杂，多以微纳米级孔隙为主，孔隙度和渗透率都很低，单井无自然产能。因此，页岩油气实现效益开发多需经过后期大规模工程改造。

1.1 北美主要页岩层系展布特征概述

1.1.1 北美地区构造特征

北美地区主要是指被落基山褶皱冲断带、马拉松—沃希托褶皱冲断带、阿巴拉契亚褶皱冲断带和因努伊特褶皱带所夹持的北美克拉通以及北大西洋被动大陆边缘的一部分（图 1-1）。

在现今的构造格局中，北美地区西部由于太平洋板块向北美板块俯冲而处于挤压应力环境，东部和南部由于大西洋的扩张而处于拉张环境，北部由于北冰洋的扩张而呈现拉张环境。

根据地壳性质和典型构造样式，北美地区可大体分为两大构造单元：

（1）克拉通盆地，即板块内部地壳稳定、构造平缓的地区，是北美大陆的的主体部分。

（2）褶皱冲断带，即围绕北美克拉



图 1-1 北美大地构造单元略图（据高金尉等，2011）

通分布的地壳活动及构造强烈变形的地带，主要为环北美大陆东部、南部和西部的褶皱冲断带。根据不同地质年代的大洋开合和板块碰撞拼合情况，褶皱冲断带又可细分为：①早古生代加里东期纽芬兰褶皱带；②晚古生代海西期褶皱冲断带，包括阿巴拉契亚褶皱冲断带、马拉松—沃希托褶皱冲断带和因努伊特褶皱带；③中、新生代落基山褶皱冲断带(Aitken, 1993)。

1.1.2 北美主要页岩层系区域展布特征

1. 美国主要页岩层系区域展布特征

美国是全球页岩油气勘探开发最早也是最成功的国家，其页岩层系多、分布范围广、资源规模大。据美国能源信息署(EIA, 2013)发布的资源评估报告，仅美国页岩气技术可采储量就达 $18.82 \times 10^{12} \text{m}^3$ ；美国页岩油技术可采储量为 $65.48 \times 10^9 \text{t}$ ，资源规模仅次于俄罗斯，位居世界第二。另外，从近期美国能源信息署(EIA, 2016)公布的数据表明，仅在美国本土 48 个州就针对 40 多套页岩层系开展了页岩油气的勘探开发工作，这些页岩主要分布在两大构造单元的 20 多个盆地中，其中有 30 多套页岩，如 Antrim、Bakken、Barnett、Fayetteville、Woodford、Niobrara、Lewis、New Albany 等分布在落基山褶皱冲断带以东、马拉松—沃希托褶皱冲断带以北、阿巴拉契亚褶皱冲断带以西的多个克拉通盆地内；另外还有少数几套页岩，如 Eagle Ford、Haynesville、Monterey 等分布在三个褶皱冲断带内部的前陆盆地内(图 1-2)。

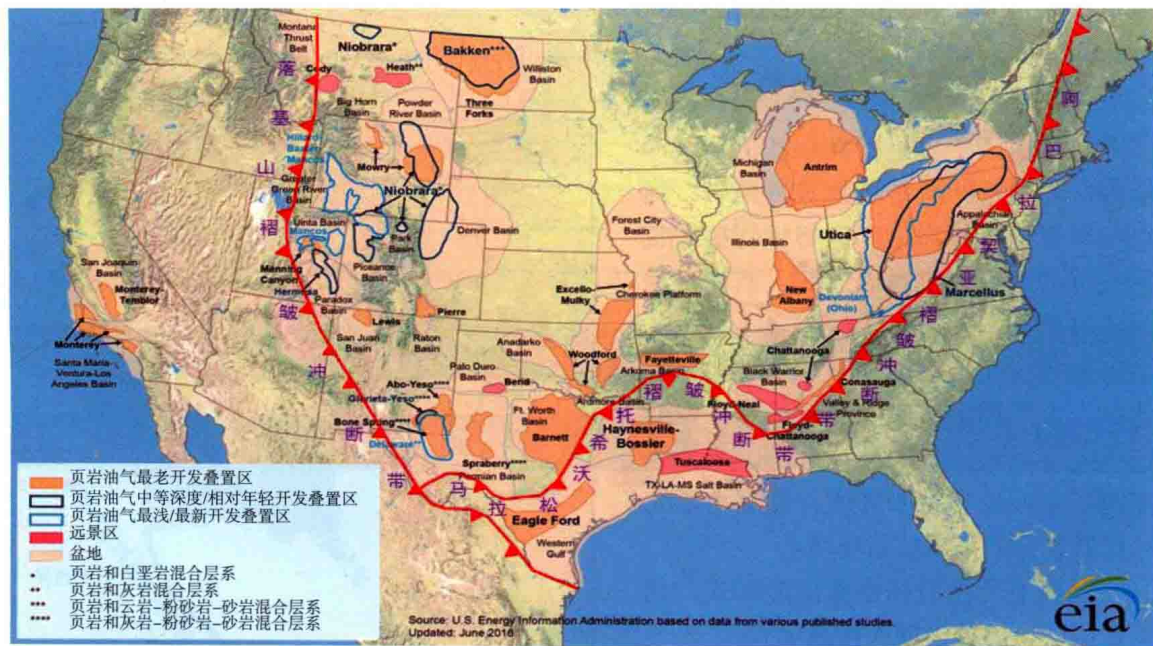


图 1-2 美国南部 48 个州主要页岩油气开发层系分布图(据 EIA, 2016 修改)

从美国页岩的发育时期来看，主要在晚古生代—中生代，早古生代及新生代页岩油气勘探层系较少。另外，沉积环境以海相为主，湖相及海陆过渡相则相对较少(表 1-1)。

表 1-1 美国主要页岩层系发育特征

序号	页岩名称	构造位置	所属州	发育年代
1	安特里姆 (Antrim)	密歇根盆地 (Michigan)	密歇根	晚泥盆世
2	巴克斯特 (Baxter)	大绿河盆地 (The Great Green River)	科罗拉多、怀俄明	晚白垩世
3	巴肯 (Bakken)	威利斯頓盆地 (Williston)	蒙大拿、北达科他	晚泥盆世—早密西西比世
4	巴内特 (Barnett)	福特沃斯盆地 / 二叠盆地 (Fort Worth/Permian)	得克萨斯	密西西比纪
5	本德 / 阿托卡 (Bend/Atoka)	帕洛杜罗盆地 (Palo DuRo)	得克萨斯	宾夕法尼亚纪
6	博西尔 (Bossier)	得克萨斯盆地 (Texas)	得克萨斯、路易斯安那	晚侏罗世
7	凯恩克里克 (Cane Creek)	帕拉朵克斯盆地 (Paradox)	犹他	宾夕法尼亚纪
8	凯尼 (Caney)	阿科马盆地 (Arkoma)	俄克拉荷马	密西西比纪
9	查塔努加 (Chattanooga)	黑勇士 (Black Warrior)	阿拉巴马、阿肯色、肯塔基、田纳西	晚泥盆世
10	烟囱石 (Chimney Rock)	帕拉朵克斯盆地 (Paradox)	科罗拉多、犹他	宾夕法尼亚纪
11	克利夫兰 (Cleveland)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	俄亥俄、肯塔基	泥盆纪
12	克林顿 (Clinton)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	纽约、肯塔基等	早志留世
13	科迪 (Cody)	蒙大拿冲断带 (Montana)	怀俄明、蒙大拿、爱达荷	白垩纪
14	科纳索加 (Conasauga)	黑勇士盆地 / 阿巴拉契亚盆地 (Black Warrior/Appalachian)	阿拉巴马	中、晚寒武世
15	敦刻尔克 (Dunkirk)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	纽约	晚泥盆世
16	鹰滩 (Eagle Ford)	马弗里克 (Maverick)	得克萨斯	晚白垩世
17	埃尔斯沃思 (Ellsworth)	密歇根盆地 (Michigan)	密歇根	晚泥盆世
18	埃克塞洛 (Excella)	阿科马盆地 (Arkoma)	堪萨斯、俄克拉荷马	宾夕法尼亚纪
19	费耶特维尔 (Fayetteville)	阿科马盆地 (Arkoma)	阿肯色	密西西比纪
20	弗洛伊德 (Floyd)	黑勇士盆地 (Black Warrior)	阿拉巴马、密西西比	晚密西西比纪
21	嘎门 (Garnon)	威利斯頓盆地 (Williston)	蒙大拿	晚白垩世
22	哥特 (Gothic)	帕拉朵克斯盆地 (Paradox)	科罗拉多、得克萨斯	宾夕法尼亚纪

续表

序号	页岩名称	构造位置	所属州	发育年代
23	绿河 (Green River)	帕拉朵克斯盆地 (Paradox)	科罗拉多、怀俄明、犹他	始新世
24	海因斯维尔 (Haynesville)	萨宾隆起 (Sabine)、 路易斯安那盆地 (Louisiana)	路易斯安那、阿肯色、 得克萨斯	晚侏罗世
25	霍文威普 (Hovenweep)	帕拉朵克斯盆地 (Paradox)	科罗拉多、得克萨斯	宾夕法尼亚纪
26	休伦 (Huron)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	肯塔基、俄亥俄、弗吉尼亚、 西弗吉尼亚	泥盆纪
27	路易斯 (Lewis)	圣胡安 (San Juan)	科罗拉多、新墨西哥	晚白垩世
28	曼科斯 (Mancos)	圣胡安 (San Juan)	新墨西哥、犹他	白垩纪
29	曼宁峡谷 (Manning Canyon)	尤因塔 / 帕拉朵克斯盆地 (Uinta/Paradox)	犹他	密西西比纪
30	马塞勒斯 (Marcellus)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	纽约、俄亥俄、宾夕法尼亚、 西弗吉尼亚	泥盆纪
31	麦克卢尔 (Mc Clure)	圣华金盆地 (San Joaquin)	加利福尼亚	中新世
32	蒙特利 (Monterey)	圣华金 / 桑塔玛丽亚 / 洛杉矶盆地 (San Joaquin/Santa Maria/Los Angeles)	加利福尼亚	中新世
33	穆尔菲尔德 (Moorefield)	阿科马盆地 (Arkoma)	阿肯色	密西西比纪
34	莫里 (Mowry)	比格霍恩 / 保德河盆地 (Bighorn/Powder River)	怀俄明	白垩纪
35	新奥尔巴尼 (New Albany)	伊利诺伊盆地 (Illinois)	伊利诺伊、印第安纳	泥盆纪—密西西比纪
36	奈厄布拉勒 (Niobrara)	丹佛盆地 (Denver)	科罗拉多	晚白垩世
37	俄亥俄 (Ohio)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	肯塔基、俄亥俄、 西弗吉尼亚	泥盆纪
38	皮尔索尔 (Pearsall)	马弗里克盆地 (Maverick)	得克萨斯	白垩纪
39	皮尔 (Pierré)	拉顿盆地 (Raton)	科罗拉多	白垩纪
40	莱茵街 (Rhinestreet)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	纽约	泥盆纪
41	森伯里 (Sunbury)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	俄亥俄	密西西比纪
42	尤蒂卡 (Utica)	阿巴拉契亚盆地 (Appalachian)	纽约、俄亥俄、宾夕法尼亚、 西弗吉尼亚、加拿大魁 北克省	奥陶纪
43	伍德福德 (Woodford)	阿纳达科 / 阿德莫 / 阿卡马盆地 (Anadarko/ Ardmore/Arkoma)	俄克拉荷马、得克萨斯	泥盆纪—密西西比纪