

# 页岩气开发区块地形适宜性选区评价方法

王泽根<sup>1</sup> 胡思源<sup>1</sup> 雍志玮<sup>1</sup> 朱博天<sup>1</sup> 孔 波<sup>2</sup>

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;

2. 中国石油西南油气田公司科技处, 四川 成都 610051

**摘 要:** 为了降低页岩气勘探开发成本及环境风险, 实现绿色发展, 需要对页岩气开发区块进行地形适宜性选区评价。选择 4 个地形评价指标, 使用均值变点分析法、熵权法和 GIS 技术, 建立页岩气开发区块地形适宜性选区评价方法, 并将其应用到昭通区块。应用结果显示: 高适宜区和较高适宜区大部分分布在昭通市西南部, 即昭阳区及鲁甸县的东部和北部; 中等适宜区在整个区块内广泛分布, 多呈现为零星小块; 低适宜区和较低适宜区主要沿地貌交替地带呈褶皱状分布, 在巧家县、鲁甸县西部和永善县西、北部较为聚集。昭通区块的地形适宜性以中等适宜为主。运用该评价方法在昭通区块筛选出了 879 处大面积的高适宜区, 为页岩气开发选址提供位置参考。

**关键词:** 页岩气; GIS; 地形; 开发选区; 昭通

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2021.06.013

## Evaluation method for site selection of terrain suitability for shale gas development block

WANG Zegen<sup>1</sup>, HU Siyuan<sup>1</sup>, YONG Zhiwei<sup>1</sup>, ZHU Botian<sup>1</sup>, KONG Bo<sup>2</sup>

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China;

2. Science and Technology Department, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610051, China

**Abstract:** In order to reduce the capital cost and environmental risk of shale gas exploration and development and realize green development, it is necessary to evaluate the terrain suitability for shale gas development zones. Four terrain evaluation indexes are selected, and the evaluation method of terrain suitability for shale gas development block is established using mean change-point analysis method, entropy weight method and GIS spatial analysis technology. The results show that highest and higher suitability areas are mostly distributed in the southwest part of Zhaotong city, namely the east and north of Zhaoyang district and Ludian county, while medium suitability areas are widely distributed in the whole block, mostly presented as sporadic small pieces. The lowest and lower suitable areas are mainly distributed in fold shape along the landform alternating zone, and are clustered in Qiaojia county, the west of Ludian county, and the west and north of Yongshan county. The terrain suitability of Zhaotong block is mainly medium suitability. Upon this evaluation method, 879 large areas of the highest suitability were selected in zhaotong block to provide reference for site selection in shale gas development.

收稿日期: 2021-07-28

基金项目: 中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目“油基岩屑深井回注理论与关键技术研究”(2020CX020303)

作者简介: 王泽根(1967-), 男, 四川崇州人, 教授, 博士, 主要从事地理信息系统理论与技术研究。E-mail: Zegen01@126.com

Keywords: Shale gas; GIS; Terrain; Site selection in development; Zhaotong city

0 前言

2020 年 9 月 22 日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会上郑重宣布中国将增加自主减排贡献,力争二氧化碳排在 2030 年前达到峰值,2060 年前实现碳中和。页岩气具有储量大和清洁高效的特点,在碳中和目标的实现中将发挥重要作用。

生态优先和绿色发展理念对页岩气勘探、开发、生产、输送等全过程的安全、环保提出了高要求。选区评价有利于页岩气的高效、经济开发,传统选区评价常采用地质参数作为评价指标,如埋深、页岩厚度等,缺少地表因素的参与<sup>[1]</sup>。我国主要页岩气开发区块地形复杂,导致地面施工难度、环境风险和成本高。已有部分学者将地形因素纳入选区评价指标,但仍以地质指标为主,地形因素仅作为次要指标,且评价因子较为单一<sup>[2-8]</sup>。因此,本文提出了一种基于地理信息系统(Geographic Information Systems, GIS)技术的页岩气开发区块地形适宜性选区评价方法,并对昭通区块进行了地形适宜性选区评价。

1 页岩气勘探开发地形研究现状

随着页岩气勘探开发在全球逐步推广,地形的阻碍愈发受人重视,在此情况下,国内外学者对地形在页岩气勘探开发中的影响进行了研究。

在国内,高程、坡度因子被用于优选页岩气勘探地貌有利区和钻场选址,并使用 GIS 技术进行可视化<sup>[2-3]</sup>。地貌类型作为经济性指标之一,被陆亚秋等人引入其建立的页岩气开发选区评价方法中<sup>[4]</sup>。张禾等人对地形起伏条件下的页岩气管网布局进行了优化<sup>[5]</sup>。

在外文研究中,区块地形是 Zhen Li 等人建立的页岩气有利区评价体系的指标之一<sup>[7]</sup>。Drohan P J 等人调

查发现宾夕法尼亚州 50% ~ 70% 的页岩气平台位于斜坡上,有过量地表水流动和局部侵蚀的风险<sup>[9]</sup>。Taiwo O M 针对油气生产场所建立的水力模型,能在非常浅的水深和陡峭地形下求解,进行储备坑选址,降低对环境的污染风险<sup>[10]</sup>。Zhu Lihui 等人将地形差异作为参数引入到页岩气地面设施成本估算公式中,显著提高了成本预估的准确性<sup>[11]</sup>。

由此可见,页岩气勘探开发地形研究方向较为多样,但研究数量较少,在选区评价中地形因素的重要性较低且评价指标单一,亟待更深入全面的研究。

2 地形适宜性选区评价方法

2.1 地形评价指标

为确定地形评价指标,首先需明确地形对页岩气勘探开发活动的影响。综合前人研究及实际情况,地形对页岩气勘探开发活动的影响体现在两方面。

1)从经济角度,影响页岩气勘探开发地面设施建设成本。页岩气勘探开发井场及附属设施、作业卡车进场道路的建设,其建设成本和便利度都受到地形制约。

2)从环保角度,影响页岩气勘探开发的环境污染风险。页岩气开发需要使用大量的水和钻井液,处置不当就有污染土壤、地表水的可能<sup>[12]</sup>,地形影响着污染液体扩散的方向和速度。

基于以上考虑,本研究选取坡度、剖面曲率、地形起伏度和地貌 4 个地形评价指标。

2.1.1 坡度

页岩气勘探开发井场及附属设施的建设难度、成本和各类液体在地表的扩散速度随着坡度递增。根据国际地理学会对坡度的分级,将坡地划分为 7 种类型<sup>[13]</sup>,见表 1。

表 1 坡地类型与建筑区布局特征表  
Tab. 1 Slope and building layout characteristics

| 坡地类型     | 坡度 / (°) | 建筑区布置特征                          |
|----------|----------|----------------------------------|
| 平原至微倾斜平原 | <2       | 房屋及道路可自由布置,但需注意排水                |
| 缓斜坡      | 2 ~ 5    | 房屋及道路布置不受地形约束                    |
| 斜坡       | 5 ~ 15   | 建筑区内需设置阶地,道路不宜垂直于等高线分布           |
| 陡坡       | 15 ~ 25  | 建筑区的空间布局与设计受到地形限制,道路需与等高线呈较小锐角布置 |
| 急坡       | 25 ~ 35  | 建筑区的空间布局与设计需作特殊处理,道路以曲折盘旋为主      |
| 急陡坡      | 35 ~ 55  | 房屋及道路建造难度大,工程费用高                 |
| 垂直坡      | >55      | 房屋布置在梯级阶地或为洞穴形式                  |

2.1.2 剖面曲率

剖面曲率影响流经表面的液体加速度的增减,见图1。剖面曲率值为负时,像元表面向上凸,流速减小;剖面曲率为正时,像元表面向下凹,流速加大;值为0时,像元表面平直。

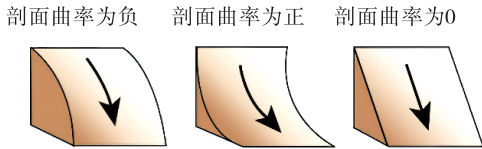


图1 剖面曲率原理示意图  
Fig.1 Profile curvature principle diagram

根据王峰<sup>[14]</sup>的研究对剖面曲率分类,剖面曲率小于-0.5的为凸坡面,-0.5~0.5之间的为平直坡面,大于0.5的为凹坡面。

2.1.3 地形起伏度

地形起伏度是单位面积内最大相对高程差,地形起伏度越大,页岩气勘探开发活动的井场及附属设施建设、各类物资运输的难度越大。计算公式:

$$R = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

式中: $R$ 为地形起伏度,m; $H_{\max}$ 为单位面积内最大高程值,m; $H_{\min}$ 为单位面积内最小高程值,m。

地形起伏度计算关键在于选择计算单元区域面积,使用均值变点分析法确定页岩气勘探开发区块地形起伏度的最佳计算单元区域面积。在国内外地貌传统分类的基础上,将地形起伏度划分为7个等级,见表2。

表2 地形起伏度分类表

Tab.2 Classification of relief amplitude

| 起伏类型 | 地形起伏度 /m      |
|------|---------------|
| 平坦   | 0 ~ 30        |
| 缓起伏  | 30 ~ 70       |
| 微起伏  | 70 ~ 200      |
| 小起伏  | 200 ~ 500     |
| 中起伏  | 500 ~ 1 000   |
| 大起伏  | 1 000 ~ 2 500 |
| 极大起伏 | > 2 500       |

2.1.4 地貌

采用高玄或方案<sup>[15]</sup>的地形起伏度和高程分类指标,对页岩气开发区块的地貌类型进行分类,见表3。越平坦、越低海拔的地貌越有利于页岩气勘探开发。

表3 地貌基本形态主客分类表(高玄或方案)

Tab.3 The subjective and objective classification of geomorphology (Gaoxuanyu scheme)

| 地貌类型 | 相对高度 /m     | 绝对高度 /m       |
|------|-------------|---------------|
| 平原   |             |               |
| 低位平原 | <20         | 0 ~ 1 500     |
| 中位平原 | <20         | 1 500 ~ 4 000 |
| 高位平原 | <20         | >4 000        |
| 丘陵   |             |               |
| 低位丘陵 | 20 ~ 200    | 0 ~ 1 500     |
| 中位丘陵 | 20 ~ 200    | 1 500 ~ 4 000 |
| 高位丘陵 | 20 ~ 200    | >4 000        |
| 低山   |             |               |
| 低位低山 | 200 ~ 500   | 0 ~ 1 500     |
| 中位低山 | 200 ~ 500   | 1 500 ~ 4 000 |
| 高位低山 | 200 ~ 500   | >4 000        |
| 中山   |             |               |
| 低位中山 | 500 ~ 1 000 | 0 ~ 1 500     |
| 中位中山 | 500 ~ 1 000 | 1 500 ~ 4 000 |
| 高位中山 | 500 ~ 1 000 | >4 000        |
| 高山   |             |               |
| 低位高山 | >1 000      | 0 ~ 1 500     |
| 中位高山 | >1 000      | 1 500 ~ 4 000 |
| 高位高山 | >1 000      | >4 000        |

2.2 研究方法

2.2.1 均值变点分析法

均值变点分析法可用于确定最佳地形起伏度计算单元,是一种客观且广泛使用的方法<sup>[16]</sup>。地形起伏度随统计单元面积的增大,先迅速增大,经某一拐点后增速降低并缓慢增大,呈 logarithmic 曲线<sup>[17]</sup>,最佳统计单元即为该拐点的统计面积<sup>[18]</sup>。本研究使用均值变点分析法寻求拐点,以渐变分析窗口下的平均地形起伏度作为样本序列 $X, \{x_t, t = 1, 2, 3, \dots, N\}$ ,基本计算步骤<sup>[19]</sup>如下。

1) 令  $i = 2, \dots, N$ ,对每个  $i$  将样本分为两段。

$$x_1, x_2, \dots, x_{i-1} \text{ 和 } x_i, x_{i+1}, \dots, x_N \quad (2)$$

计算每段样本的算术平均数  $\bar{X}_{i1}$  和  $\bar{X}_{i2}$  及统计量  $S_i$ :

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (x_t - \bar{X}_{i1})^2 + \sum_{t=i}^N (x_t - \bar{X}_{i2})^2 \quad (3)$$

2) 计算总样本算术平均数  $\bar{X}$  及统计量  $S$ 。

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \tag{4}$$

$$S = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \tag{5}$$

3) 计算  $S - S_i, i = 2, 3, \dots, N$ 。变点使得总样本的统计量  $S$  与样本分段后的统计量  $S_i$  之间的差距增大, 最大值所对应的窗口大小即为最佳分析窗口。

2.2.2 熵权法

熵权法是一种客观赋权方法, 其主要步骤如下。

1) 原始数据归一化, 本研究中的地形影响因子都为负向指标。

采用以下公式进行归一化处理。

$$x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_j}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{6}$$

式中:  $x_j$  为第  $j$  项指标值;  $x_{\max}$  为第  $j$  项指标的最大值;  $x_{\min}$  为第  $j$  项指标的最小值;  $x'_{ij}$  为归一化值。原始样本有  $m$  个样本,  $n$  个评价指标。

2) 计算各评价指标信息熵  $e_j$ 。

$$e_j = -K \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \tag{7}$$

其中

$$K = \frac{1}{\ln m} \tag{8}$$

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \tag{9}$$

3) 计算各评价指标权重  $W_j$ 。

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m 1 - e_j} \tag{10}$$

2.2.3 GIS 技术

使用 GIS 技术, 计算页岩气勘探开发区块的地形适宜度。表 4 为地形适宜度评价指标表, 根据表 4 对 4 个地形评价指标栅格数据计算适宜度得分, 再根据熵权法确定的各评价指标权重, 计算区块地形适宜度。

地形评价指标的加权栅格计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^4 W_i R_i \tag{11}$$

式中:  $P$  为某一栅格单元的地形适宜度;  $W_i$  为第  $i$  个地形评价指标的权重值;  $R_i$  为第  $i$  个地形评价指标的栅格像元值。

表 4 地形适宜度评价指标表

Tab.4 Terrain suitability evaluation index

| 坡度 /<br>(°) | 地形起伏<br>度 /m  | 剖面<br>曲率   | 地貌<br>类型 | 适宜度<br>得分 /分 |
|-------------|---------------|------------|----------|--------------|
| <2          | 0 ~ 30        | < -0.5     | —        | 1.0          |
| —           | —             | —          | 低位平原     | 1.4          |
| —           | —             | —          | 中位平原     | 1.8          |
| 2 ~ 5       | 30 ~ 70       | —          | —        | 2.0          |
| —           | —             | —          | 高位平原     | 2.2          |
| —           | —             | —          | 低位丘陵     | 2.6          |
| 5 ~ 15      | 70 ~ 200      | —          | 中位丘陵     | 3.0          |
| —           | —             | —          | 高位丘陵     | 3.4          |
| —           | —             | —          | 低位低山     | 3.8          |
| 15 ~ 25     | 200 ~ 500     | -0.5 ~ 0.5 | —        | 4.0          |
| —           | —             | —          | 中位低山     | 4.2          |
| —           | —             | —          | 高位低山     | 4.6          |
| 25 ~ 35     | 500 ~ 1 000   | —          | 低位中山     | 5.0          |
| —           | —             | —          | 中位中山     | 5.4          |
| —           | —             | —          | 高位中山     | 5.8          |
| 35 ~ 55     | 1 000 ~ 2 500 | —          | —        | 6.0          |
| —           | —             | —          | 低位高山     | 6.2          |
| —           | —             | —          | 中位高山     | 6.8          |
| >55         | >2 500        | >0.5       | 高位高山     | 7.0          |

2.3 试验数据

本研究采用 ALOS PALSAR 12.5 m 分辨率 DEM, 源于美国 Alaska Satellite Facility 网站。昭通区块矢量数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心网站。

3 结果与分析

3.1 最佳地形起伏度分析窗口确定

使用 arcgis 的 python 编程模块, 计算了昭通区块不同分析窗口下的地形起伏度, 表 5 为昭通区块地形起伏度的分析窗口大小与平均地形起伏度的对应关系。

表 5 昭通区块分析窗口与平均地形起伏度表

Tab.5 Analysis window and average relief amplitude of Zhaotong block

| 窗口大小      | 面积 /km <sup>2</sup> | 平均地形起伏度 /m |
|-----------|---------------------|------------|
| 2 × 2     | 0.000 625           | 7.435 6    |
| 3 × 3     | 0.001 406           | 14.811 3   |
| 4 × 4     | 0.002 500           | 22.092 3   |
| ...       | ...                 | ...        |
| 50 × 50   | 0.390 625           | 258.712 5  |
| 51 × 51   | 0.406 406           | 262.598 7  |
| 52 × 52   | 0.422 500           | 266.452 0  |
| ...       | ...                 | ...        |
| 98 × 98   | 1.500 625           | 416.223 9  |
| 99 × 99   | 1.531 406           | 419.012 2  |
| 100 × 100 | 1.562 500           | 421.784 8  |

使用均值变点分析法,以平均地形起伏度为样本序列  $X$ ,计算总样本统计量  $S-S_i$ ,以分析窗口大小为横坐标,绘制平均地形起伏度和  $S-S_i$  的散点图,并进行对数方程拟合,见图 2。 $S-S_i$  最大值所对应的窗口大小为平均地形起伏度增速的拐点,即为最佳分析窗口。

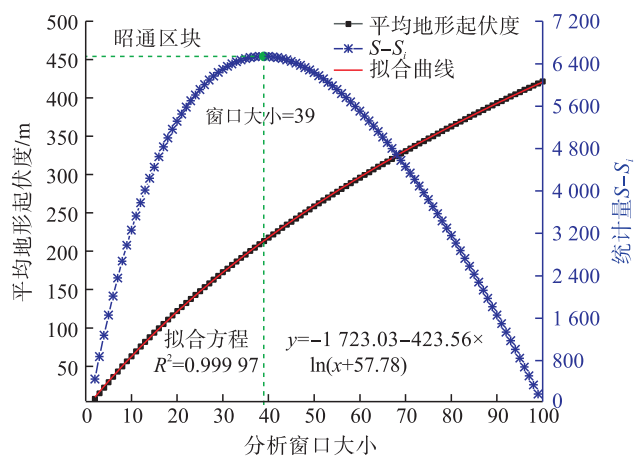


图2 昭通区块平均地形起伏度、统计量  $S-S_i$  与分析窗口大小关系示意图

Fig. 2 Relationship between average relief amplitude, statistical magnitude  $S-S_i$  and analysis window in Zhaotong block

由此可知,在使用 12.5 m 分辨率 DEM 数据时,昭通区块的地形起伏度最佳分析窗口大小为  $39 \times 39$  ( $0.237\ 656\ \text{km}^2$ )。

### 3.2 地形评价指标计算

以  $39 \times 39$  分析窗口计算昭通区块地形起伏度,得该区块地形起伏度图,见图 3。

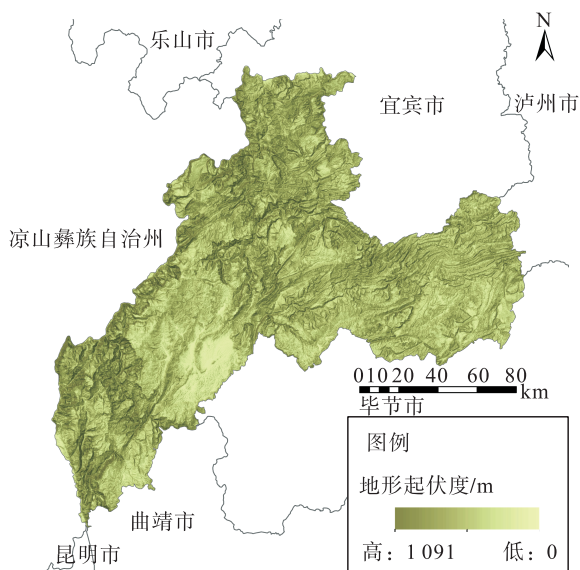


图3 昭通区块地形起伏度示意图

Fig. 3 Relief amplitude of Zhaotong block

使用昭通区块的 DEM 数据和上步所得的地形起伏度数据,依据表 4 对昭通区块进行地貌分类,见图 4。

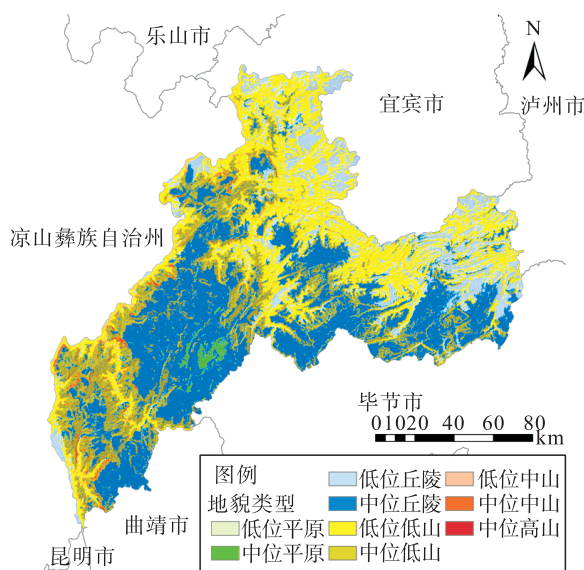


图4 昭通区块地貌类型图

Fig. 4 Physiognomy type of Zhaotong block

昭通区块的坡度和剖面曲率使用 arcgis 软件计算,并将其各自分类。

### 3.3 昭通区块地形适宜性

使用熵权法计算得到了地形影响因子权重,坡度指标权重为 0.373 70,剖面曲率指标权重为 0.227 18,地形起伏度指标权重为 0.203 58,地貌类型指标权重为 0.191 94。据式(11)计算得昭通区块的地形适宜度,并将昭通区块划分为高适宜区、较高适宜区、中等适宜区、较低适宜区和低适宜区,见图 5。

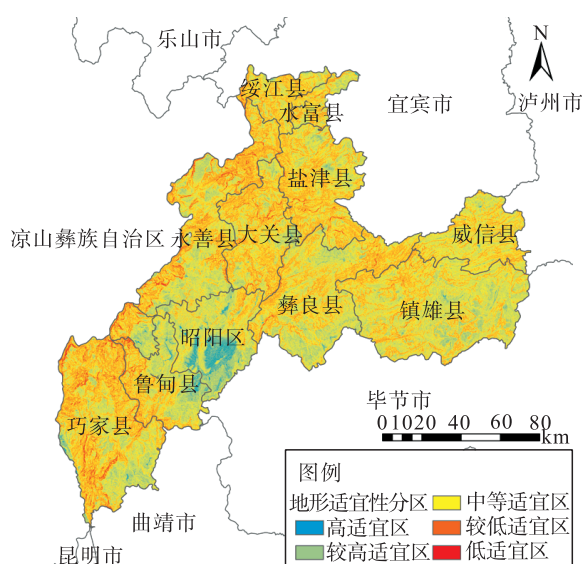


图5 昭通区块地形适宜性分区示意图

Fig. 5 Zoning of terrain suitability in Zhaotong block

分析可知,昭通区块的地形适宜性以中等适宜为主,占总面积的49.07%,面积约11 008.68 km<sup>2</sup>。高适宜区仅占总面积的1.41%,面积约315.522 km<sup>2</sup>。较高适宜区占总面积的28.56%,面积约6 407.394 km<sup>2</sup>。较低适宜区面积约4 551.965 km<sup>2</sup>,占总面积的20.29%。低适宜区较少,面积约149.313 9 km<sup>2</sup>,只占总面积的0.67%。

高适宜区、较高适宜区主要分布在昭通市西南部即昭阳区及鲁甸县的东部和北部,但昭阳区同时也是昭通市经济发达、人口密集的市区,其社会经济条件不利于进行勘探开发活动。在其他各县市,也散布有高适宜区

和较高适宜区,多与一般适宜区混杂,呈零星的块状分布。中等适宜区则在整个区块内广泛分布,多呈现为零星小块。低适宜区和较低适宜区主要沿地貌交替地带呈褶皱状分布,在巧家县、鲁甸县西部和永善县西、北部较为聚集。

页岩气开发井场及附属设施需要一定面积,筛选出单个图斑面积在 $1 \times 10^4$  m<sup>2</sup>以上的高适宜区879处,大部分位于昭阳区、鲁甸县和巧家县西部长江沿岸,见图6。本方法为页岩气开发井场的选址提供初步参考位置,以便后续进行高效、经济化的勘查工作。

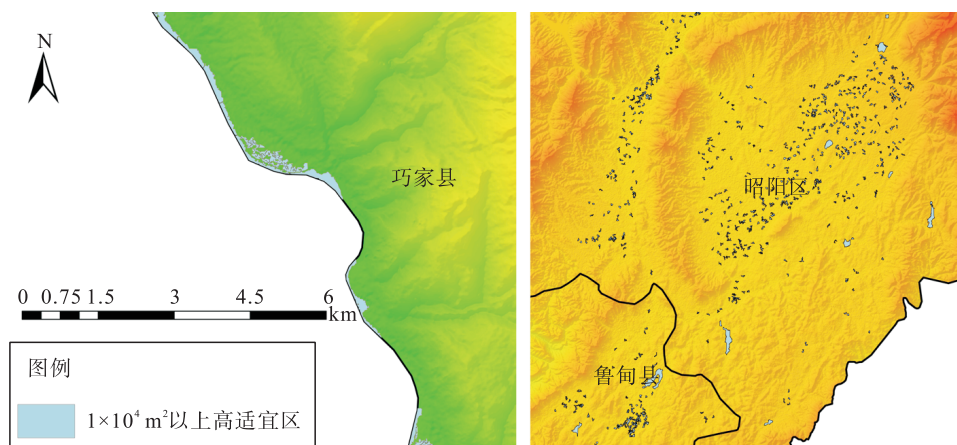


图6 昭通区块 $1 \times 10^4$  m<sup>2</sup>以上高适宜区的主要分布图

Fig. 6 Mainly distribution of highest suitability areas more than 10 000 m<sup>2</sup> in Zhaotong block

#### 4 结论

我国南方页岩气开发区块多山地丘陵地形,地貌复杂、井场难找,本研究提出一种页岩气勘探开发区块地形适宜性选区评价方法,并将其应用到昭通区块。该方法基于DEM数据,选取坡度、剖面曲率、地形起伏度和地貌类型4种地形评价指标,利用均值变点分析法、熵权法和GIS技术,将开发区块的地形适宜性分为高适宜、较高适宜、中等适宜、较低适宜、低适宜5个等级,为页岩气开发选址提供了位置参考。

#### 参考文献:

- [1] 陈治军,高怡文,袁芳政,等. 鄂尔多斯盆地南部延长组油页岩特征及页岩气有利区预测[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(4): 15-18.  
CHEN Zhijun, GAO Yiwen, YUAN Fangzheng, et al. Oil shale features and shale gas favorable area prediction in Yanchang formation of the south area in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26 (4): 15-18.
- [2] 张 聪,包书景,段文哲. 遥感技术在复杂山区页岩气早期

勘探中的应用[J]. 地质与资源, 2014, 23(5): 492-494.

ZHANG Cong, BAO Shujing, DUAN Wenzhe. Application of remote sensing technology in early exploration for shale gas in complex terrain [J]. Geology and Resources, 2014, 23 (5): 492-494.

- [3] 谢洪斌,姚光华,罗真富,等. GIS与RS技术在页岩气钻场选址中的应用——以重庆酉阳东页岩气勘查区块为例[J]. 遥感信息, 2017, 32(4): 152-156.

XIE Hongbin, YAO Guanghua, LUO Zhenfu, et al. Application of GIS and RS technology in field selection of shale gas drilling: a case study of east Youyang, Chongqing [J]. Remote Sensing Information, 2017, 32 (4): 152-156.

- [4] 陆亚秋,王 进,曹梦茜. 基于改进的层次分析法的页岩气开发选区评价方法[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11 (2): 70-77.

LU Yaqiu, WANG Jin, CAO Mengxi. Evaluation method of shale gas development area selection based on improved analytic hierarchy process [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11 (2): 70-77.

- [5] 张 禾,周 军,董建蓉,等. 地形起伏条件下页岩气管网布局优化研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(5): 170-174.

- ZHANG He, ZHOU Jun, DONG Jianrong, et al. Optimization of shale gas pipeline network layout under topographic relief [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26 (5): 170-174.
- [6] JIANG Yuqiang, ZHANG Qichen, ZHANG Hu, et al. Gas-prospective area optimization for Silurian shale gas of Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin, China [J]. *Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists*, 2015, 3 (2): 49-59.
- [7] LI Zhen, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, et al. Approaches for the evaluation of favorable shale gas areas and applications: implications for China's exploration strategy [J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8 (2): 270-290.
- [8] XU Xiaofeng, SHI Wanzhong, ZHAI Gangyi, et al. A novel approach of evaluating favorable areas for shale gas exploration based on regional geological survey and remote sensing data [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 88: 103813.
- [9] DROHAN P J, BRITTINGHAM M. Topographic and soil constraints to shale-gas development in the northcentral appalachians [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 76 (5): 1696-1706.
- [10] TAIWO O M. Mathematical modeling of fluid spills in hydraulically fractured well sites [D]. Fayetteville: University of Arkansas, 2012.
- [11] ZHU Lihui, YUAN Jiehui, LUO Dongkun. A new approach to estimating surface facility costs for shale gas development [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36 (Part A): 202-212.
- [12] MENG Qingmin. Spatial analysis of environment and population at risk of natural gas fracking in the state of Pennsylvania, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 515: 198-206.
- [13] 刘元保,唐克丽.国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成[J]. *水土保持通报*, 1987, 7(8): 59-65.
- LIU Yuanbao, TANG Keli. On classification of slope steepness at home and abroad and its composition in Wangdonggou experiment area of Changwu county, Shaanxi province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1987, 7 (8): 59-65.
- [14] 王 峰.四川省南江县地质灾害易发性区划研究[D].成都:成都理工大学, 2015.
- WANG Feng. Study on geohazards susceptibility mapping of Nanjiang county, Sichuan province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [15] 高玄或.地貌基本形态的主客分类法[J]. *山地学报*, 2004, 22(3): 261-266.
- GAO Xuanyu. The subjective and objective classification of geomorphologic forms [J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22 (3): 261-266.
- [16] 陈学兄,常庆瑞,毕如田,等.地形起伏度最佳统计单元算法的比较研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 52-56.
- CHEN Xuexiong, CHANG Qingrui, BI Rutian, et al. Comparison study on the best statistical unit algorithms of relief amplitude [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (1): 52-56.
- [17] 张 伟,李爱农.基于DEM的中国地形起伏度适宜计算尺度研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(4): 8-12.
- ZHANG Wei, LI Ainong. Study on the optimal scale for calculating the relief amplitude in china based on DEM [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28 (4): 8-12.
- [18] 钟 静,卢 涛.中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度确定[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 175-181.
- ZHONG Jing, LU Tao. Optimal statistical unit for relief amplitude in southwestern China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38 (1): 175-181.
- [19] 项静恬,史久恩.非线性系统中数据处理的统计方法[M].北京:科学出版社, 1997: 3-6.
- XIANG Jingtian, SHI Jiuen. Statistical methods of data processing in nonlinear systems [M]. Beijing: Science Press, 1997: 3-6.