

# Improvement of Smoothing Method for Geological Models

Jinghua Shi<sup>1,2</sup>, Shaohua Li<sup>1\*</sup>, Qinglin Shu<sup>2</sup>, Yigen Zhang<sup>2</sup>, Jinbiao Yu<sup>2</sup>, Changsheng Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying Shandong

Email: 1153414972@qq.com, \*jpishli@sina.com

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 9<sup>th</sup>, 2020; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Categorical variable models built by pixel-based modeling methods frequently present unrealistic small scale variations (noise) that may have an impact on subsequent petrophysical property modeling and flow simulation. The Maximum A-Posteriori Selection (MAPS) method proposed by Clayton can clean such models in most situations. When there are some thin geological bodies such as mud interlayer, the MAPS will clean those thin geological bodies with thickness of one cell, no matter how long they are. A new method is proposed to solve this problem. The key idea behind the proposed method is to design a rectangle moving Windows according to the character of geological bodies, and assign bigger weights to center layer cells. In the situation with thin geological bodies, the proposed method can clean the noise, and at the same time, the thin geological bodies which are longer than the given minim length can be kept.

## Keywords

Geological Model, Smoothing, Interlayer, Stochastic Modeling, Weight

---

\*通信作者。

# 地质模型平滑后处理方法的改进

史敬华<sup>1,2</sup>, 李少华<sup>1\*</sup>, 束青林<sup>2</sup>, 张以根<sup>2</sup>, 于金彪<sup>2</sup>, 卢昌盛<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长江大学地球科学学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>中石化胜利油田分公司, 山东 东营

Email: 1153414972@qq.com, \*jpishli@sina.com

收稿日期: 2020年3月6日; 录用日期: 2020年4月9日; 发布日期: 2020年6月15日

## 摘要

基于像元的建模方法建立的地质模型通常会含有少量不符合地质认识的“噪点”, 这些噪点对后续的物性参数建模和油藏数值模拟都有影响。Clayton提出的后处理平滑方法MAPS在多数情况下能够取得较好的去噪效果。当模型中存在薄的地质体时, 如薄的泥岩夹层, MAPS方法处理时会将单层网格泥岩夹层完全平滑掉, 没有考虑夹层的延伸长度。针对这个问题, 对MAPS方法平滑窗口的搜索范围和权值进行改进。改进后的方法能够处理掉含泥岩夹层模型中的噪点, 并能够保留具有一定延伸长度的薄夹层。对比改进前后模型及原始模拟模型中泥岩夹层的长度分布, 结果表明改进后的方法得到的泥岩延伸长度更接近于先验的泥岩长度, 更加符合实际认识。

## 关键词

地质模型, 平滑, 夹层, 随机模拟, 权值

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

储层随机建模技术在现代油藏描述中得到越来越广泛的应用[1] [2], 该项技术能够更好地刻画储层的非均质性和定量描述储层中的不确定性[3] [4] [5]。储层随机建模方法按照模拟对象的不同, 可以分为基于像元(Pixel)、目标(Object)和样式(Pattern)三类[6] [7] [8]。基于像元的建模方法在模拟的过程中是一个网格一个网格逐个的模拟, 模拟的顺序是随机的, 因此建立的模型通常会含有一部分“噪点”, 也就是分布很离散、缺乏地质意义的一些相对孤立的网格点或少量网格点组合。针对这一问题, 加拿大学者 Clayton 提出了 MAPS 平滑方法[9], 该方法通过一个加权平均窗口对初始模拟结果进行平滑, 能够过滤掉认为不符合地质认识的孤立的网格点。国内学者尹艳树在此基础上提出了一种基于信息度的平滑方法[10], 在权值确定中考虑了条件数据的影响, 进一步完善了该平滑方法。在商业化软件中也增加了平滑处理的模块。在多数情况下, 平滑方法能够取得不错的效果。当模型中含有薄的呈线性(二维)或片状(三维)分布的地质体时, 例如薄的泥岩夹层, 这些地质体对渗流又有重要的影响[11] [12] [13] [14], 需要在模型中进行表征。MAPS 方法会把这种地质体完全平滑掉, 而不仅仅是把噪点去掉。针对这一问题, 对平滑方法 MAPS 进行了改进, 在存在薄的地质体时, 针对性地设计平滑的窗口和权值, 取得了较好的效果。同时对于边界

上的噪点也进行了处理, 原始的 MAPS 方法没有考虑这一问题。

## 2. 问题的提出

序贯指示模拟(SISIM)、多点地质统计学 SNESIM 等基于像元的建模算法, 在模拟离散变量(如岩性、岩相等)过程中, 采用的是根据随机路径确定的网格点逐点进行模拟。因为是单个网格单元的模拟, 容易导致模拟结果出现相对离散的点, 这些离散的点不符合地质认识, 是所谓的“噪点”。Clayton 教授提出了一种模型平滑方法 MAPS 可以在一定程度上解决该问题。在 MAPS 方法中, 主要采用了一种平滑窗口, 如二维情况可以采用  $3 \times 3$ 、 $5 \times 5$  窗口对模型进行平滑处理。图 1 为平滑前后的对比, 一般情况下 MAPS 可以取得较好的效果。但是在某些特殊情况下, 现有的平滑方法不适用。如图 2 所示, 该图为阿尔伯特塔大学地质统计学授课中的平滑原理示意图, 采用  $3 \times 3$  的模板, 权值分布采用的是各向同性的方法, 即中心点权值最大, 距离中心点距离相同的网格的权值一样。当平滑窗口处于如图中红色虚线框所示位置时, 中心点所属相类型的概率采用加权平均的方法。例如平滑窗口共有 9 个网格, 权值之和为 15, 而属于代码 1 的有两个网格, 其权值分别为 1 和 3, 因此中心点属于代码 1 的概率为  $4/15 = 0.27$ 。同理, 属于代码 2 的概率为  $(2 + 1 + 2 + 2)/15 = 0.47$ , 属于代码 3 的概率为  $(1 + 2 + 1)/15 = 0.27$ 。因此, 平滑后红色虚线框内的中心网格的属性将用概率最大的代码 2 所替代, 这样就去除了离散的点。在研究中发现, 当平滑窗口位于左下角时, 如图中蓝色虚线框所示, 则中心点属于代码 2 的概率为  $8/15 = 0.53$ , 而属于代码 3 的概率为  $7/15 = 0.47$ , 因此中心点会被代码 3 所替代。继续平移平滑窗口(向右平移一个网格), 下一个平滑窗口中心点的绿色(代码 3)也将被白色(代码 2)所替代。如此重复下去, 整个绿色条带都将被白色所替代。通过图 2 可以直观的看出, 绿色条带并不是孤立的, 连续性很好, 只是因为呈线性分布, 所以这种平滑方法针对线性分布的地质体是不适用的。

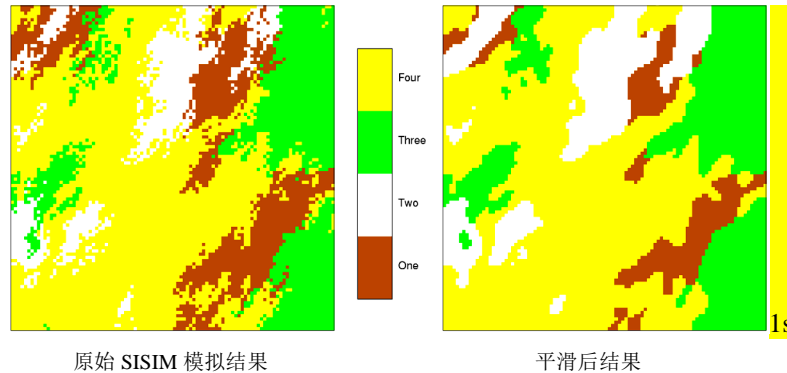


Figure 1. Comparison before and after smoothing

图 1. 平滑前后对比

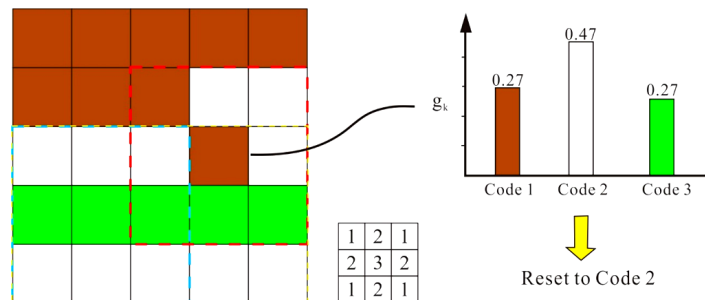


Figure 2. Schematic diagram of smoothing

图 2. 平滑处理的原理示意图

### 3. 方法的改进

改进处理方法主要针对 MAPS 方法中平滑窗口进行重新设计, 针对特殊的地质情况设计合理的平滑窗口和权值。原始 MAPS 算法中平滑窗口为各向同性, 而泥岩夹层的分布主要呈线性分布(二维)或薄片状分布(三维), 不同方向的连续性差别较大。采用各向同性的平滑窗口不仅把孤立的点平滑掉, 而且也会把线性分布的泥岩平滑掉。以薄层泥岩的平滑处理为例说明, 将各向同性平滑窗口改进为长方形的各向异性平滑窗口, 如图 3 所示, 窗口不再是规则的正方形网格, 而是根据地质体的空间分布特征来设置, 如本例中水平方向设置为 5 个网格, 而在垂直方向上设置为 3 个网格, 并且权值不再是各向同性分布, 例如本例中中间网格的权值明显高于上下层网格的权值, 这种窗口适合于图 2 中呈线性分布地质体的平滑。在实际应用中需要根据地质体的特点来设计合理的平滑窗口。

1	1	1	1	1
9	10	11	10	9
1	1	1	1	1

Figure 3. 5 × 3 smooth window  
图 3. 5 × 3 平滑窗口

使用改进后的平滑窗口对图 2 进行平滑, 当平滑窗口位于图中黄色虚线时。平滑窗口共有 15 个网格, 权值之和为 59。属于代码 1 概率为  $1/59 = 0.0169$ , 属于代码 2 的概率为  $9/59 = 0.1525$ , 属于代码 3 的概率为  $49/59 = 0.8305$ 。平滑后图中绿色相带就保留下来了, 而图中红色虚线内的离散点按照此平滑窗口也会正确的被白色所替代。提高平滑窗口中心点及其左右两边网格的权重可以满足线性分布岩相类型的平滑处理。

下面采用通用模板进一步说明改进平滑窗口的工作原理以及需要注意的问题: 假设岩相模型中单层泥岩分布代码如下, 0 代表背景或者其他岩相类型, 1 代表泥岩夹层, 红色表示泥岩分布的两端, 1 的数量为 L, 表示泥岩长度。

0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	...	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0

Figure 4. Distribution of single mudstone layer  
图 4. 单层泥岩分布

1	...	1	1	1	...	1
Kn	...	K1	K	K1	...	Kn
1	...	1	1	1	...	1

Figure 5. General 3\*m smooth window  
图 5. 通用 3\*m 平滑窗口

使用图5所示 $3 \times m$ 的平滑窗口去平滑图4所示泥岩夹层。当窗口中心点 $K$ 移动到图4中左边红色1处时,属于泥岩的权值为 $K + K_1 + \dots + K_n$ ,属于其他相的权值为 $K_1 + \dots + K_n + \text{sum}('1')$ , $\text{sum}('1')$ 表示平滑窗口中所有权值为1的和。为保证泥岩夹层两端(图4中红色1)不会被其他相类型(图4代码0)替代,属于其他相的权值应该小于属于泥岩的权值,所以平滑窗口应该满足 $K > \text{sum}('1')$ ,这样平滑过程中泥岩夹层两端不会被平滑掉,泥岩夹层中间也不会被平滑掉,这样整个泥岩夹层就完整保留下来。图5所示平滑窗口长度为 $m$ ,图4所示泥岩夹层长度 $L$ ,为保证窗口中心点 $K$ 移动到图4中左边红色1处时,窗口边缘点 $K_n$ 在图4右边红色1的左边,需要满足 $n \geq L$ ,其中 $m = 2 \times n + 1$ ,这样上述权值才能正确计算,泥岩夹层才能保留下来。所以若想在平滑过程中不保留长度为 $L$ 以下的泥岩夹层,则让 $n < L$ ,并且 $K_n > K - \text{sum}('1')$ ,这样在移动窗口的过程中所有泥岩夹层的权值都小于背景相权值而被平滑掉。

原始MAPS方法在平滑过程中当模板中心点 $K$ 位于模型的左上角时,平滑窗口的左上部分在泥岩夹层模型外部,只有中心点 $K$ 右面及下面平滑窗口权值参与计算。这样平滑窗口中的权值没有被完全使用,会损失部分信息。在改进方法中对原始泥岩夹层模型进行向外扩充,比如使用 $3 \times 5$ 平滑窗口对网格数量为 $200 \times 200$ 的泥岩夹层模型进行平滑,事先在模型上面和下面各增加一层背景相,在模型左面及右面各增加两层背景相,整个模型的网格数量为 $202 \times 204$ 。这样平滑窗口在 $202 \times 204$ 模型网格内部平滑就不会出现平滑窗口溢出到模型外部的情况,使得平滑窗口中每个权值都得到计算,避免了模型边界处的平滑误差。

#### 4. 改进前后的对比

在老油田SISIM方法经常被用于泥岩夹层模型的建立,一般来说由于网格大小的限制以及泥岩夹层厚度分布的特点,泥岩夹层一般呈条带状分布。如图6所示例子,网格大小为 $10 \times 1$ 米,泥岩夹层的厚度为1~2米,平均长度为200米,泥岩比例为10%。采用SISIM模拟,变差函数设置为水平方向变程为200米,垂直方向2米,理论模型为球状模型。图6左边为模拟的结果,可以看出夹层呈水平条带分布,局部存在一些离散的点或是横向延伸很短的线。右边为泥岩夹层的长度分布直方图。在统计泥岩延伸长度的过程中,由于相邻单层网格的泥岩会出现在垂向上叠加而形成较长的泥岩夹层的情况,单独统计某一层网格上的泥岩长度与实际泥岩长度不符,所以本文设置统计泥岩长度规则如下:所有能够与某一泥岩网格在上下左右或对角上相邻的泥岩网格都属于同一个泥岩夹层,网格在统计过程中不会被重复计算。统计夹层长度算法先遍历整个模型,提取出所有独立的相互不连通的泥岩夹层,再计算每个泥岩夹层的最大长度。计算的原始模型中泥岩长度平均值为140.4米,比输入的期望值200米(水平方向变程)小了近1/3,主要原因是因为存在一些离散的噪点。采用MAPS方法平滑,平滑样板 $3 \times 3$ ,平滑结果如图7所示,泥岩长度平均值为92.6米,小于平滑前的泥岩长度平均值。对比图6和图7可以看出,采用MAPS平滑泥岩夹层模型有如下特点,对于单层的泥岩夹层,MAPS方法会将其完全平滑为背景相,对于离散噪点MAPS方法去除不完全,处理后不仅仅导致泥岩长度变短,而且很多泥岩夹层都被平滑掉了,也大大改变了原始的泥岩百分比。

针对MAPS方法平滑存在的不足,采用上节提出的改进方法,按照改进平滑窗口设置规则,如果需要平滑掉长度为30米及30米以下的泥岩夹层,设置 $3 \times 9$ 大小的模板[1 1 1 1 1 1 1 1 1; 4 5 6 7 20 7 6 5 4; 1 1 1 1 1 1 1 1 1]对泥岩夹层模型(图6)进行平滑,迭代两次。平滑后的结果如图8所示。可以看出平滑后泥岩夹层最短长度为30米,所有30米及以下的泥岩夹层噪点都被平滑掉了。新平滑方法保留了原始泥岩夹层的分布特点,针对噪点及认为不合理的泥岩短线进行了剔除。统计直方图显示平均泥岩长度为164米,相对于MAPS处理后模型的140米,更接近期望值200米。

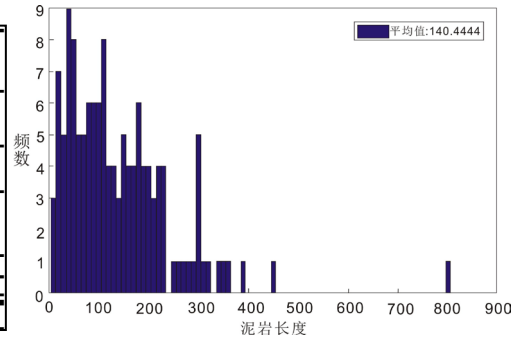
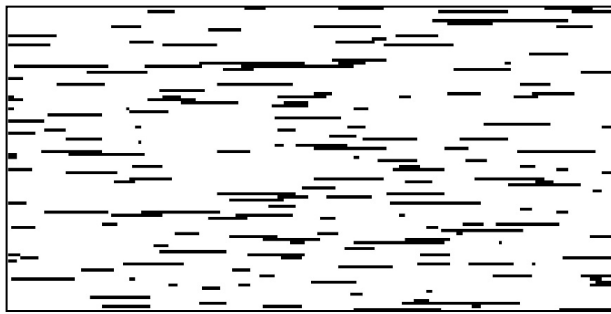


Figure 6. Interlayer distribution model simulated by SISIM  
图 6. SISIM 模拟夹层分布模型

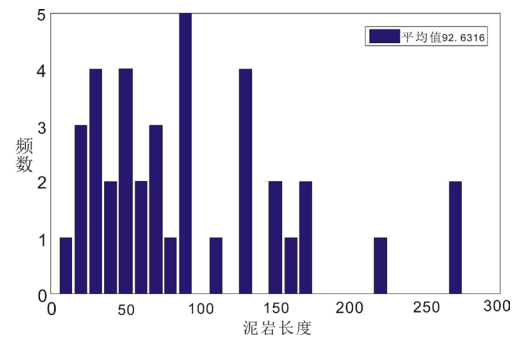


Figure 7. Smooth effect of MAPS method  
图 7. MAPS 方法平滑效果

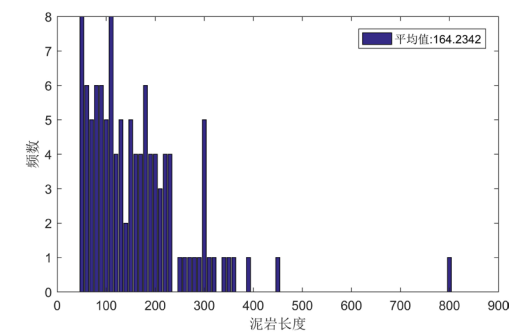


Figure 8. Smoothing results with mudstone length greater than 30 m  
图 8. 泥岩长度大于 30 米的平滑结果

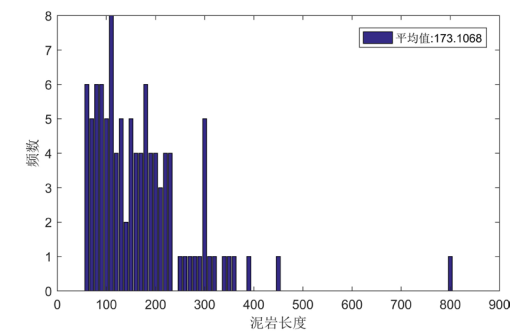


Figure 9. Smoothing results with mudstone length greater than 40 m  
图 9. 泥岩长度大于 40 米的平滑结果

该算法设计灵活,可以根据实际资料的情况设置不同的下限值,例如设置 $3 \times 11$ 大小的模板[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1; 4 5 6 7 8 2 4 8 7 6 5 4; 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]对泥岩夹层模型(图 6)进行平滑,可以平滑掉长度 40 米及 40 米以下的泥岩夹层,平滑结果如图 9 所示。对比图 8、图 9 和图 6 可以看出,新的平滑方法可以消除给定长度的噪点,平滑处理后的泥岩夹层的平均长度更接近模拟前预设的期望值,也就是说新的平滑方法效果明显。通过改变平滑窗口的长度能够保留长度在指定值以上的泥岩夹层,改进算法更具有针对性。

## 5. 结论

基于像元的建模方法如 SISIM、SNESIM 等经常被用于建立离散变量的模型,如微相、岩相、岩性模型等。由于算法本身的特点,会导致模拟结果中会出现一些不符合地质认识的离散的“噪点”,为了使模型更合理,通常需要做平滑后处理。Clayton 教授提出的 MAPS 平滑方法在多数情况下均能取得较好的效果,但是当存在薄的地质体时,例如薄的泥岩夹层,该平滑方法会把线性或片状分布的夹层完全平滑掉。针对这种情况,本文提出了改进方法,根据地质体的特点设计平滑窗口,并根据需要平滑掉的最短泥岩长度设计相应的权值,改进后的平滑方法不仅能够去除“噪点”,而且能够克服原始 MAPS 方法把薄的地质体平滑掉的不足。通过对比分析发现,改进后方法得到的地质模型更接近地质真实情况。本文给出的算例是二维模型,提出的算法可以很容易扩展到三维空间。

## 致 谢

本文是国家科技重大专项任务(辫状河储层构型建模算法模块编写及知识库应用系统研制,编号 2016ZX05011-001-004)的部分研究成果。

## 参考文献

- [1] 吴胜和,金振奎,黄沧钿,等. 储层建模[M]. 北京:石油工业出版社,1999.
- [2] 贾爱林. 中国储层地质模型 20 年[J]. 石油学报,2011,32(1): 181-188.
- [3] 李少华,张昌民,彭裕林,等. 储层不确定性评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2004,19(5): 16-19+24-2.
- [4] 霍春亮,刘松,古莉,等. 一种定量评价储集层地质模型不确定性的方法[J]. 石油勘探与开发,2007,34(5): 574-579.
- [5] 吴胜和,杨延强. 地下储层表征的不确定性及其科学思维方法[J]. 地球科学与环境学报,2012,34(2): 72-80.
- [6] 李少华,张昌民,汤军,等. 顺序指示模拟方法及其在濮城油田储层非均质性研究中的应用[J]. 江汉石油学院学报,1999,21(1): 13-17.
- [7] Deutsch, C.V. and Wang, L.B. (1996) Hierarchical Object-Based Stochastic Modeling of Fluvial Reservoirs. *Mathematical Geology*, **28**, 857-880. <https://doi.org/10.1007/bf02066005>
- [8] 吴胜和,李文克. 多点地质统计学——理论、应用与展望[J]. 古地理学报,2005,7(1): 137-144.
- [9] Deutsch, C.V. (1998) Cleaning Categorical Variable (Lithofacies) Realizations with Maximum A-Posteriori Selection. *Computer & Geosciences*, **24**, 551-562. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(98\)00016-8](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(98)00016-8)
- [10] 尹艳树,张昌民,李少华,等. 基于信息度的储层建模后处理方法[J]. 石油学报,2008,29(6): 889-893.
- [11] 何文祥,吴胜和,唐义疆,等. 河口坝砂体构型精细解剖[J]. 石油勘探与开发,2005,32(5): 42-46.
- [12] 牛博,高兴军,赵应成,等. 古辫状河心滩坝内部构型表征与建模——以大庆油田萨中密井网区为例[J]. 石油学报,2015,36(1): 89-100.
- [13] 徐丽强,李胜利,于兴河,等. 辫状河三角洲前缘储层隔夹层表征及剩余油预测——以彩南油田彩 9 井区三工河组为例[J]. 东北石油大学学报,2016,40(4): 9-18.
- [14] 白振强. 辫状河砂体三维构型地质建模研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2010,32(6): 21-24.