

古三角洲砂体入湖距离的动力学预测

钱 凯

屈平彦 宋 凯

(胜利油田地质研究院)

(青海石油局研究所)

在油气勘探储层预测工作中,常规相分析法得到了普遍的应用,地震地层学方法也正引起人们的重视。但是,前者主要是定性分析,并在勘探程度较高时才能做到。后者对地震工作提出了严格的要求,并需一套相应的处理技术。而砂岩储层的动力学预测可在不同的条件下进行,实际上迫切需要对储层分布作出预测的时候,往往正是勘探程度较低而又缺乏高精度、高密度地震资料的时候。因此,在油气勘探中,储层分布的动力学预测可以发挥独到的作用。

前人在河口输出物扩散模型的建立,古河流及湖泊水文参数计算,古盐度测定等方面提供了有益的参考资料。我们的研究,一是将其作了必要的引伸,使之转入实用;二是把个别环节的分散研究综合连贯起来解决古沉积问题。

下面,就三角洲砂体入湖距离的定量动力学预测谈谈我们的粗浅认识。

一、理论上的考虑

计算三角洲砂体入湖距离,至今并无现成的公式。但是,我们认为,只要将L.D. Wright总结的河口输出物扩散模型作适当变换,并对三角洲砂体边界的最小粒度界限作出规定,便可得到下列反映输出物入湖距离的公式

对于轴状紊流喷射:

$$X = \frac{b_o h_o V_o}{2E \cdot L \cdot V_{max}} \dots \dots \dots (1)$$

X——输出物进入盆地水体的距离(自河口算起)

b_o 、 h_o 、 V_o ——分别为河流出口处的宽度、深度和流速。

E——射流扩散、对于完全紊流喷射,可取常数0.22。

L——相似积分,对完全紊流喷射,可取0.316。

V_{max} ——输出物进入盆地水体后的最大轴线速度,当我们以粗粉砂岩为三角洲砂体分布区的边界时,(边界粒径的选择考虑了储集层性质与粒径的关系)可限定为粗粉砂级颗粒开始沉降的速度:0.4厘米/秒对于平面喷射:

$$X = \frac{b_o V_o}{2E \cdot L \cdot V_{max}} \dots \dots \dots (2)$$

对于底摩擦显著的平面喷射

$$X = 2.3026 \frac{h}{k} \text{Log} \frac{V_0}{V_{\max}} \dots\dots\dots(3)$$

K——常数，等于g/C²

g——重力加速度。C——谢才（chezy）系数

h——水深，此种情况可考虑砂体入湖后远端至少可能达到的距离，因而可令 h = h₀。

此外，还有一种浮力显著的喷射，由于在湖泊沉积中遇到的较少，此处从略。

在具体选择应用上述公式时，必须求出：

- (1)古入湖河流的水文参数；
- (2)古湖泊水体的静态特征；
- (3)古湖泊水体的动态特征；
- (4)搬运、沉积的碎屑颗粒的性质。

上述四个问题，特别是前三个问题，对于古代河流、湖泊而言，虽是相当困难，但却是有可能解决的。解决第一个问题的方法，在“古河流水文参数计算法摘要”一文中曾有介绍，并列举了必要的参考文献，第二个问题，可据相分析、古生态及地球化学方法解决。作为静态特征之一的古湖水密度，主要取决于古盐度。因为盐度引起的密度变化非常显著，每升100毫克的悬浮物质引起的密度增量只有0.0001克/厘米³，而盐度从0‰升到35‰时，密度由1克/厘米³升到1.028克/厘米³。所以要得知对喷射类型有重要影响的古湖水密度，必须求得古盐度。为此，在水体中含砾量不超过粘土矿物平衡吸附的浓度，并且成岩过程中粘土矿物组分变化不大时，可借用E LTON·L·COUCH提出的公式。如果粘土矿物成岩变化显著，可利用钱凯等就东营盆地提出的式子。第三个问题，可主要考虑沿岸流，因为它是对河流带来的碎屑物质进行再分配的主要动力。沿岸流的速度可据下式求得：

$$V = \frac{a}{2} \left[\sqrt{H - 4 \frac{c}{a} \text{Sin}^2 - 1} \right] \dots\dots\dots(9)1)$$

$$a = \frac{2.61mH \cdot \text{Cos} \alpha}{K \cdot T}$$

H——风浪波高，T——风浪周期

C——波速 = $\sqrt{2.28gH}$

g——重力加速度，m——边滩坡高

α——波峰线与岸线夹角，K——摩擦系数

第四个问题可以岩矿或机械分析法解决。

二、现代沉积的检验

为了检验上述理论是否正确，可对上述数学模型进行抽查检验。

1)国家海洋局第二海洋地质研究所李全兴同志推荐。

以注入青海湖的布哈河为例。该河宽22公尺，一般出口流速26.4厘米/秒。由于河口主流线水深5.8公尺，河口一侧水深28公尺，可以作为不考虑底摩擦显著的喷射模型。青海湖平均含盐度12.5‰，属中等数值，故既不宜选用轴状喷射，也不宜选用浮力喷射。综合考虑诸因素，应选用平面喷射模型，即用(2)式计算三角洲砂体的入湖距离。将有关数值代入，则得：

$$X = \frac{b_0 V_0}{2E \cdot L \cdot V_{\max}} = \frac{22\text{m} \times 26.4\text{cm/秒}}{2 \times 0.22 \times 0.316 \times 0.4\text{cm/秒}} = 10\text{公里}$$

青海湖的实际调查表明，布哈河入湖确为“平面射流”。“在河口主流线上，砂、粉砂的分布范围大大加宽，一直延伸到13公里远处的28米深湖区”。但是，此时沉积物分选甚差，粉砂含量仅56%，泥质含量高达40%以上“沉积物中径的明显增高，大致出现于水下三角洲前缘陡坡底部（这里距布哈河口8—9公里，水深25公尺）。可以认为：这是分选、对称性都好的河口三角洲砂体发育的前缘（图1）。也就是说，真正的布哈河三角洲砂体入湖距离最大约为9公里。因此，可以认为理论计算与实际调查的结果比较符合。

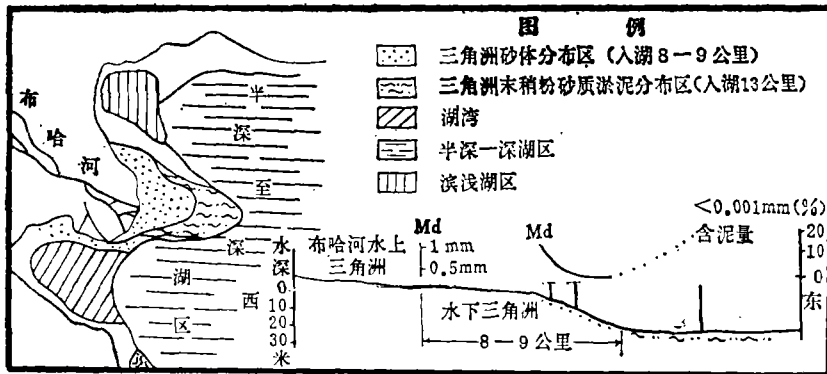


图1 布哈河三角洲砂体入湖距离图示

(据青海湖综合考察报告简化)

Fig. 1 Sketch map of distance of Buha River deltaic sandbody entering into the lake

这里有必要指出，盐度因素是不可忽视的。如果不考虑这个因素，则将按照河流入湖通常为轴状喷射的一般认识去选用教学模型，算出的布哈河三角洲砂体入湖距离竟达61公里，几为实际距离的七倍。由此不难看出考虑盐度因素的重要性。

三、古代沉积砂体的预测

作为例子，我们选择了柴达木盆地的油砂山地区，该区上新统下油砂山组地层厚度300—700公尺，向东至盆地内部加厚至1000余公尺，向南、北、西三面山区减薄尖灭。这里以地表广泛出露油砂著称。油砂累计厚度达167公尺，单层最大厚度7公尺。目前已发现一些油田。经研究，该区砂岩为典型的快速向湖推进的三角洲沉积。

三角洲砂体向东延伸距离的预测按下述步骤进行。

1. 古河流水文参数的确定

相分析表明，上新世早期，盆地西部有两个三角洲，一个源自阿尔金山，可称狮子沟三角洲，规模较小（图 2）；一个源自昆仑山，我们称之为朶斯三角洲，规模较大，油砂山上新统砂岩基本都属于该体系。砂岩骨架要素表明，这里曾有四条主要分流，其中

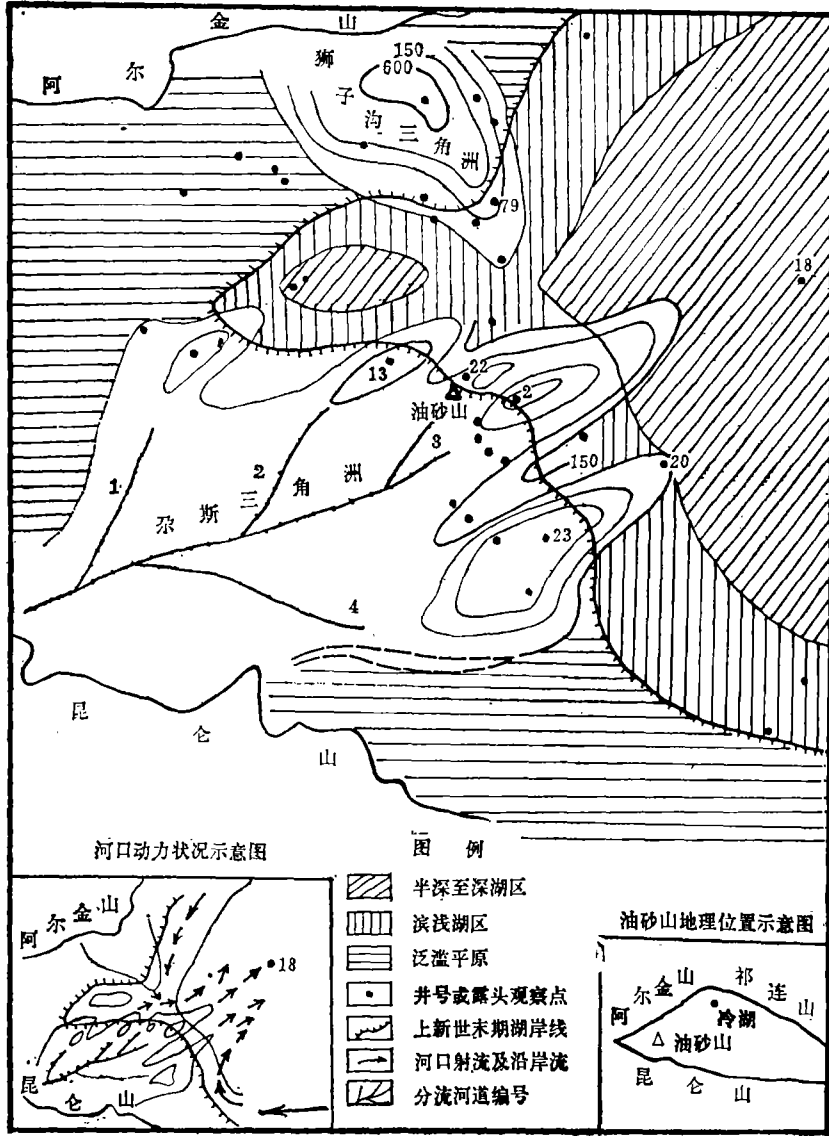


图 2 油砂山地区上新世三角洲砂体分布预测图

Fig. 2 Prediction map of the Pliocene deltaic sandbody of Youshashan Area

以西起第三支最大。河口在 22 及 2 号井附近砂体向北东方向延伸。由于三角洲快速向湖推进，参数主要根据剖面上部岸线附近沉积构造及岩石分析资料取得（水进型三角洲则

应据剖面下部岸线附近资料取参数)。

古河水深度 古水深可据沙波高度或交错层系厚度求得。最小水深至少为后者的二倍，而最大水深大致相当于完整交错层系组的厚度，对于厚度可以分米计的同向板状交错层，可用J.R.Allen的水深与交错层系厚度关系图求得。该区露头找到的板状交错层最大厚度22公分，最大块状层系组厚度近6米。据前者查图，水深为5.5公尺，据后者判断，水深应近6米。因为前者更清晰，故取5.5公尺。

古流速 流速可据粒度资料查Hjulstrum的图版求得。Jopling(转引自成治, 1976)曾指出，对于分选较差的沉积物，以查出的值，增加20%作为流速。对于悬浮搬运的沉积物，则需增加2—2.5倍。该处砂岩中值粒径为0.4毫米，粒径参数值的第一百分位数值为0.7毫米，分选系数1.423—1.947，属于分选较好的。概率图显示，以滚动和跃移搬运为主。因为要求的是砂体入湖最大距离，故以C值查图得知，古河流最大流速为28厘米/秒。

河流宽度 据粒度分析，砂岩中粉砂级和粘土级含量19%，故河宽为 $225 \times 19^{-1.08} \times 5.5 = 51$ (米)这个数值与油砂山露头追踪数值相近。

河流密度 据孢粉资料，盆地该时期大约相当于我国现今黄河以南，长江以北地区。以南阳盆地作比较，取山间河流含砂量一般为1—5公斤/米³，比重最大为1.005，密度1.005克/厘米³。

2. 古湖泊特征

1) **湖泊大小** 柴达木盆地面积约10万平方公里。但据露头及探井资料分析，上新世早期柴达木湖面积只有1万8千平方公里左右。研究区内，岸线通过2、22、37、13诸井，绕过湖湾至北部79井附近。岸线以上红色泥岩占60%以上，岸线附近，泥裂发育常见对称波痕、虫孔、岸线以下，暗色泥岩逐渐增多至90%以上，湖相化石丰富。

2) **湖泊深度** 杨藩研究了盐度大于、近于和小于柴达木盆地上新统早期湖水古盐度的尕斯湖、青海湖和苏干湖的现代沉积与生态学，并将其与柴达木盆地的沉积相和古生态作了深入的比较分析¹⁾。不但确定了古岸线，而且进一步提出了确定水深的可靠性。研究认为，轮藻大量繁生的下限是3米，可作滨浅湖的界线。当轮藻少到无，介形类分异度下降，肥胖真星介出现高值，介形类壳瓣数分布曲线出现拐点时，水深大约12米，可作浅、半深湖间的界线。介形类分异值从最高0.677、平均0.46降至0.30，壳瓣数从2000以上降到趋近于0，约在26公尺深处，可作半深湖与深湖的界限。图2标出了古水体深度分区。由于研究区地处盆地西部，坡度较陡，滨湖区范围较窄，故滨、浅湖划为一个区域。同时，由于将半深湖与深湖相划在一起对三角洲砂体入湖距离的预测无显著影响。

3) **湖泊动力特征** 这里没有必要去全面恢复整个湖泊的古水动力状况，因为我们研究区仅限于一角，而且有些因素的影响据地貌分析即可判别，严格地说研究区处于盆地西南角，被阿尔金、昆仑两山所夹持，北风、西北风、西南风及南风在该区都不能形成影响

1) 杨藩，从化石资料讨论柴达木盆地上、下干柴沟组沉积时期古湖岸线的位置与变迁，甘、青、藏石油勘探开发会战指挥部地质研究所，石油地质研究所报告集，上集，P29—54。

沉积物分布的强风浪。原因有二：一是高山屏障，二是吹程太短，风浪还不能充分成长。可能有影响的是东北风、东风、东南风。东南风在盆地东北边缘形成沿岸流向西北流动，在祁连山、阿尔金山两山系汇合处的盆地边缘，因入射角变大而能量大减，不足以向西索影响三角洲砂体的沉积与分布。东风有可能在南坡形成沿岸流，但由于与南坡夹角基本为零，与湖底及边坡摩擦力太大，也将没有足够的流速影响三角洲砂体的分布。唯一可能的是东风形成的波浪在盆地西端直接破碎形成的横向流可能在滨湖至岸边形成一些沿岸砂坝，但由于滨湖区很窄，这个作用（与河口喷射作用相比）也将是次要的。这样，唯一需要考虑的就是东北风了。东北风与阿尔金山脚下的湖泊边坡夹角近于零，沿岸流不会太大。但是东北风与南山夹角却在 45° 左右，可形成最强的沿岸流，对于古代的风速，我们难以恢复。考虑到上新世距今不远，我们以地球上今日常见的六级风计。风时可以认为是充分的。吹程可以根据古湖泊大小直接量出（从岸边算起），对东北风而言，约90公里。这样，根据有效波预报法，可求得有效波高为2.5公尺，有效周期6.6秒，这些数值根据一般风浪预报图解也都可以查得¹⁾有效波传入浅水时，将其看成孤立的分界深度。根据运动量结果，计算趋于定常状态时的沿岸流速。用前述（9）式。据相分析及压实效应，边滩坡度取0.008。摩擦系数取0.05。于是：

$$a = \frac{2.61 \times 0.008 \times 2.5 \times \text{Cos}45^\circ}{0.05 \times 6.6} = 0.11$$

$$C = \sqrt{2.28 \times 0.098 \times 2.5} = 0.75$$

$$V = \frac{a}{2} \left[\sqrt{H + 4 \frac{c}{a} \text{Sin}\alpha - 1} \right]$$

$$= \frac{0.11}{2} \left[\sqrt{2.5 + 4 \frac{0.75}{0.11} \text{Sin}45 - 1} \right] \cong 0.20 \text{ (米/秒)} = 20 \text{ 厘米/秒}$$

这个数值表明，沿盆地南坡向西的沿岸流是足以搬运砂级碎屑的。但是地貌分析又表明，当其达到湖泊西端，三角洲根部时，由于岸线的转折，流速将大为降低，并发生向北东方向弯转的回流。大部分物质将在三角洲根部沉积下来。小部分在弯转的回流作用下向三角洲砂体前进方向移动。但是，由于其原来速度（20厘米/秒）就不及形成孛斯三角洲的河流出口流速，遇阻转弯后就更小了，因其搬运作用将远不及河流的作用。这样古湖泊西部的动力状况基本上可简化如图2所示。起主导作用的是河口输出物的喷射作用。南系沿岸流在孛斯三角洲根部起作用，北系沿岸流可给狮子沟三角洲带来一些物质，对我们预测的孛斯三角洲基本上没有影响。三角洲砂体呈线状向盆地内部迅速伸展，也证明了这一点。

4) **古盐度** 用前文附注中的公式，计算了柴达木盆地的数十个点的古盐度。发现上新统早期，湖水已开始浓缩，平均含盐度达20‰，靠近河口地区，盐度变化于10—20‰之间。

3. 古三角洲砂体入湖距离的计算

上述讨论说明，古湖泊面积甚大，三角洲有充分发育的余地。湖泊西岸较陡，滨湖区范围狭窄，河口输出物可以很快进入浅湖、半深湖区，河流出口深度只有5.5米，而

1) 国家海洋局“海浪计算手册”，1973年。

浅湖、半深湖区深度，据前述讨论大多超过这个深度，更不用说深湖区了。因此底摩擦不可能占优势。湖水盐度中等，因而比重略大于河水，不能形成轴状喷射，但是因为密度相差并不太大，又不致于形成以浮力为主的喷射，所以只能形成平面喷射。情况与布哈河注入青海湖相类似，因而也就完全可以应用经过布哈河三角洲检验的数学模型进行计算。于是

$$X = \frac{b_0 v_0}{E \cdot L \cdot V_{\max}} = \frac{51\text{m} \times 28\text{cm/秒}}{2 \times 0.22 \times 0.316 \times 0.4\text{cm/秒}} = 26 (\text{公里})$$

将这里计算的结果与勘探现状联系起来，可以得到两条重要认识。(1)油砂山地区上新统下部(下部油砂山组)有利勘探地区还可进一步向东扩大20余公里。(2)现有钻探资料有利于肯定这个计算结果。这里，2井砂岩厚达406公尺，占地层总厚的53%，至东北约40公里的18井，砂岩只有58米，只占地层厚度的4%，以砂岩含量20%作为三角洲砂体的尖灭带，则第三支河流的三角洲砂体自2井起向18井方向可延伸24公里，从22井附近的岸线算起(与上述计算起点一致，便于比较)则为28公里，只比上述结果远2公里。因此，应该认为是对计算结果的一种肯定，肯定古三角洲砂体入湖距离动力学预测的一定可靠性，肯定古三角洲砂体入湖距离动力学预测在油气勘探上的重要意义。

四、结 束 语

储层动力学预测工作牵涉面甚广。限于水平和实践，本文只能算作初步的尝试仅就三角洲砂体入湖距离的预测而言，我们也只检验、应用了四种模型中的一种。并且对于实际条件也常予以简化。比如，对三角洲成长有重要影响的河流输砂量就在求的是最大入湖距离这一前题下被简化了，将各河流的输砂量都看作是充足的，而实际情况要复杂得多。对于不同类型的三角洲，也未加以分别讨论。对于露头和岩心观察中的注意事项，更没有专门说明。这些，有的可能是无需详加讨论的，但更多的则是需要进一步研究的。而且鉴于储层动力学预测在油气勘探上具有重要意义，十分有必要及早花大力气进行研究。

这项工作曾得到山东海洋学院庄振业，国家海洋局李全兴及同济大学李从先的热情帮助。青海石油局地层沉积研究室广大同志完成了大量野外及室内工作。李玉兰及石油部石油勘探开发研究院的高贵生也曾多方给予具体协助。胜利、大庆、青海和玉门油田研究院作了大量岩矿、地化、古生物及粒度分析工作。均此致谢。

(收稿日期 1982年5月11日)

参 考 文 献

- [1] 钱凯等, 1980, 古河流水文参数计算法摘要“石油勘探与开发”, 4期
- [2] 钱凯等, 1982, 东营盆地古盐度的计算“石油学报”, 4期, 95—102
- [3] 中国科学院兰州地质研究所等 1979, 青海湖综合考察报告, 科学出版社
- [4] 成治, 1976, 某地白垩系中的沉积相, 地质科学, 4期, 337—352
- [5] 成都地质学院岩石教研室编, 1978, 岩石学简明教程, 地质出版社

- [6] 沙立清 1956, 泥砂运动的基本规律, 泥砂研究, 1 卷 2 期, 17—37
- [7] 袁斯茂尔, H.M., 1958, 暗槽中悬移质泥砂与紊动传递作用。泥砂研究 1 卷 3 期, 100—104
- [8] Wright, L. D., 1978, River Deltas, Coastal Sedimentary environments, 16—32
- [9] Elton, L. Couch, 1971, Calculation of Paleosalinities from boron and Clay mineral date. A. A. P. G. V.55. 1829—18137
- [10] Allen, J. R., 1963, The classification of cross stratified units, with notes on their origin. Sedimentology 93—114

DYNAMIC CALCULATION OF THE DISTANCE OF ANCIENT DELTAIC SANDBODY ENTERING INTO LAKE

Qian Kai

(Research Institute of Geology, Shengli Oil Field)

Qu Pingyan Song Kai

(Research Institute of Geology, Qinghai Petroleum Administrative Bureau)

Abstract

To calculate the distance between an ancient river mouth and the area where the deltaic sandbody enters into an ancient lake, the dynamic calculative method can obtain quantitative or semi-quantitative results compared with sedimentary facies analyses. Sometimes, it is easier to get the required information without complex treatment as compared with seismic stratigraphic analyses. So the dynamic calculative method cannot be replaced by other.

The mathematical foundation of the calculation is the diffuse pattern of the outflowing materials at a river mouth, which was summarized by L. D. Wright. According to the pattern, formulas can be obtained to calculate the distance (x) between river mouth and deltaic sandbody. For example, the axis-shaped jet of turbulent flow: $X = \frac{bohoVo}{2E \cdot L \cdot V_{max}}$; the plane jet: $X = \frac{boVo}{2E \cdot L \cdot V_{max}}$ the plane jet if bottom friction is marked: $X = 2.3026 \frac{h}{k} \log \frac{boVo}{V_{max}}$.

To calculate the distance, it is necessary to obtain the hydrologic parameter of the ancient river, the static and the dynamic characteristics of the ancient lake, as well as the property of clastic grain. All these are discussed briefly and the essential references are listed in this paper.

The dynamic calculation method has been checked with modern deltaic data of

the Buha River in Qinghai Province. The distance obtained by calculation is in accord with the result of the investigation. The method checked has been used to calculate the distance of the Pliocene deltaic sandbody entering into the ancient lake in Youshashan area, Qaidam Basin. As far as sandbody is concerned, the result shows that the area favourable to oil and gas exploration can extend 20km more towards the east. This result is consistent with that made by the analyses according to the drilling data.

According to the above facts, the authors consider that dynamic calculation method is important in oil and gas exploration and its application and study should be strengthened.