

郭桂红,郝重涛,石双虎等. 沉积盆地中地震波速度与地层年代的关系. 地球物理学报, 2009, 52(7):1793~1799, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.013

Guo G H, Hao C T, Shi S H, et al. The relationship between seismic wave velocity and geologic time in sedimentary basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(7):1793~1799, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.013

沉积盆地中地震波速度与地层年代的关系

郭桂红^{1,2}, 郝重涛², 石双虎³, 闫建萍⁴

1 西部灾害与环境力学教育部重点实验室 & 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000

2 中国地震局地质研究所, 北京 100029

3 东方地球物理公司国际勘探事业部, 涿州 072751

4 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘 要 地层年代确定是地质学研究领域的重要课题,地质类定年方法具有各种不利因素. 本文选择地球物理方法确定地层年代,以中国大陆沉积盆地为研究区,通过对盆地中实测速度、深度和年代三者间关系的深入研究,应用统计、拟合和扫描的方法,建立了中国大陆沉积盆地中速度、深度和年代之间的定量关系,此关系式为测定年代提供了一种新的方法. 利用此关系式计算了沉积盆地基底的年代范围,并与同位素实测的年龄作了比较,表明该方法可以粗略确定稳定基底年代. 计算基底年龄和实测数据之间存在误差,其原因主要是本文把中国大陆沉积盆地看作一个构造单元所致.

关键词 年代,地球物理方法,沉积盆地,速度,深度,扫描

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.013

中图分类号 P631

收稿日期 2008-12-03,2009-06-16 收修定稿

The relationship between seismic wave velocity and geologic time in sedimentary basin

GUO Gui-Hong^{1,2}, HAO Chong-Tao², SHI Shuang-Hu³, YAN Jian-Ping⁴

1 *The Key Laboratory of Western China Disaster and Environmental Mechanics & College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2 *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

3 *BGP International, CNPC, Zhuozhou 072751, China*

4 *School of Resources and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

Abstract Dating is an important subject in geological research. The geologic dating methods face some different difficulties. Consequently, in this study, a new geophysical method is used to do the dating research in Chinese continental sedimentary basins. Based on the methods of statistics, fitting and scanning, the relations of velocities, depths and ages in basins were investigated and a new method to determine absolute ages was proposed. According to the formula, the range of sedimentary basement age is also determined and compared with the results by isotopic methods. The result shows the formula also can be used to determine the range of sedimentary basement ages. Errors may be brought because China continental sedimentary basins are thought as one tectonic unit.

Keywords Dating, Geophysical method, Sedimentary basin, Velocity, Depth, Scanning

1 引言

“地质学是一门时间起特别关键作用的学科,对时间的这种依赖性给地质现象增添了一个独一无二的维”^[1,2],这个时间维在研究大陆地壳演化时起了非常重要的作用. 定年研究是地球科学研究的重要内容. 地质年龄是理解地球内部形成与演化的关键参数,对于资源开发也有重要作用. 前人已建立的地质定年方法(同位素法、古生物法和古地磁法)给出了地质事件的“绝对年龄”或“相对年代”. 由于地质类方法在确定地质年龄方面各存在不同的不利之处,利用地震资料推演地质年龄有利于全空间重构地质年龄图像,显然开展地球物理定年具有重要的理论意义和潜在的实用价值^[3].

如果可以找到地球物理参数和年代的关系,将地球物理学和地质学联系起来,对地下的情况将可以做出更大范围和更合理的解释. 因此有必要建立这种联系,前人在这方面也已经开展了系列前期研究^[4~12]. 其中 Faust^[8,10] 给出层速度、年代和深度之间的定量关系式,以及考虑地层岩性变化,获得以埋深和地层电阻率作为参数表示速度的公式,两个公式的形式相似. 但由于地层电阻率值一般需要电阻率测井才可以获得,因此考虑岩性变化公式的实用范围受到限制. Acheson^[12] (1963) 研究了加拿大西部盆地中地层年代与地震波速度关系,认为 Faust 公式中 n 是变化的,而 Faust 给出的 n 是固定的. 自此以后就很少有人再研究速度与年之间的关系,原因可能是由于不同地区的地质条件相差太大,要建立这样一个普遍适用公式很困难,而且这样一个公式在具体地区使用时可能会有比较大的偏差,此外在浅层沉积盆地中人们更常使用钻井取芯获得样品测年,认为这样获得的数据更准确,为了追求更准确的年代值,人们把注意力更多放在地质方法测年上. 而用波速研究年代是对沉积盆地中砂泥岩剖面作出初始的年代估计,准确性差,因此后来很少有人再进行这方面的研究. 但对于新区,在没有其他地质资料用于定年时,此方法可以给出地层年代大概范围,依然有一定的实用价值,赋予速度以年代的地质含义.

中国大陆沉积盆地超过 500 多个,沉积岩面积达 670 万 km^2 . 其中面积为 10~60 万 km^2 的大型盆地 12 个,面积为 1~10 万 km^2 的中型盆地 38 个,面积小于 1 万 km^2 的小型盆地约 169 个. 从元

古代到新生代,中国的陆地和大陆架经历了比较复杂的地质演化历史,多数含油气盆地从早期至晚期的发育过程,都具有多旋回叠加盆地的形成特征.

本文以中国大陆沉积盆地作为研究区,开展地震波速度与地质年代关系研究,广泛收集了中国大陆沉积盆地地震波速度与年龄数据,构建了适于中国大陆沉积盆地地震波速度与地质年龄之间的关系. 首次建立了中国大陆沉积盆地地震波速度与地层埋深及年代的关系式,从而赋予地震波速度的年代含义. 地震波速度数据主要来自于 8 个沉积盆地(图 1)中地震测井资料以及一些文献上的速度资料,岩性主要是砂泥岩.

2 沉积盆地中速度和年代关系

2.1 速度和年代关系的计算方法

Faust(1951)发表了在美国和加拿大沉积盆地中得到的层速度、年代和深度的定量关系式. 由于此关系是根据砂泥岩剖面得出的,而在碳酸盐岩剖面中认为速度随年代的增大变化相对小一些,并且认为在这个关系式中如果年代的测定用¹⁴C 同位素结果将使定量关系式中的参数取值更准确. Faust 给出了速度、年代和深度的关系式如下:

$$v = a(TZ)^{1/6},$$

式中, v 是地层层速度, T 是地层年代, Z 代表地层深度, a 为常数. 当速度单位为 ft/s, 年代单位为年, 深度单位为 ft, $a=125.3$. 当速度为 m/s, 深度为 m, $a=46.5$.

本文假定速度、深度、年代的关系是: $v=a(TZ)^{1/n}$, a 和 $1/n$ 是待定的常数, 给定 a 和 $1/n$ 的初值, 计算扫描拟合实际的 VSP 速度测井资料的层速度得到最佳的这 2 个待定参数. VSP 测井资料来自 8 个沉积盆地中地震测井, 测井的点距为 20 m 或者 25 m.

2.2 塔里木盆地速度和年代的关系

塔里木盆地是中国最大的沉积盆地, 它位于天山以南, 昆仑山以北, 总面积为 56 万 km^2 , 为一菱形展布的大型叠合盆地. 由于塔里木盆地地层发育比较齐全, 选择塔里木盆地为例说明沉积盆地中速度、年代和深度的关系. 此次所收集的井位主要分布在西南拗陷区和满加尔凹陷区, 发育有第三系、白垩系、三叠系、二叠系、石炭系、志留系、奥陶系地层, 其中二叠系和志留系保存地层厚度比较薄, 除石炭系含有厚度比较薄的碳酸盐岩, 奥陶系为碳酸盐岩与砂泥岩外, 其他地层均为保存比较厚的砂泥岩.

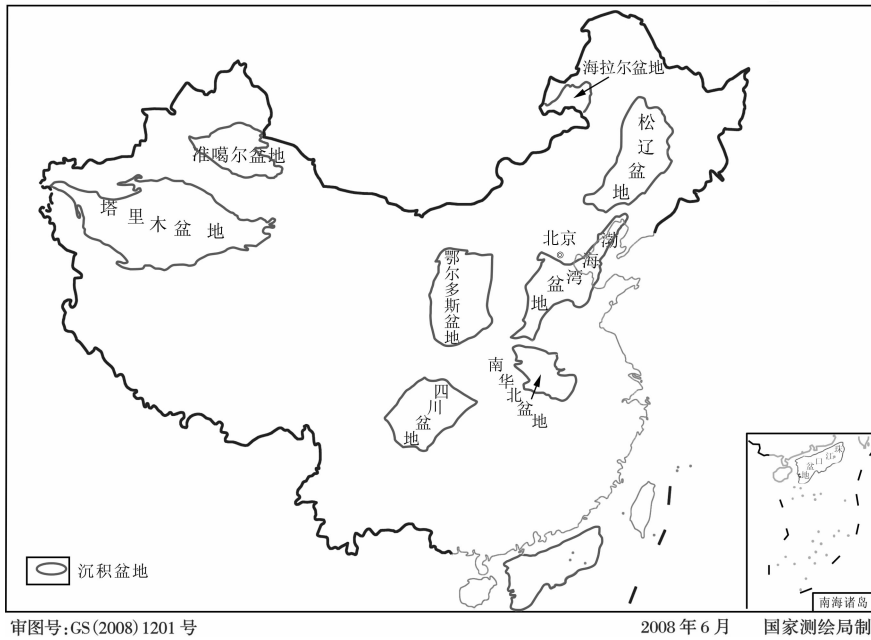


图 1 中国沉积盆地研究区分布图

Fig. 1 Distribution of sedimentary basin in China

取塔里木盆地中 22 口 VSP 测井数据, 绘制层速度和深度的关系图. 从图 2、3(图中字母代表某口井)可以看出, 随着深度增加, 层速度也相应增加, 但对于不同构造位置的井, 增加速率不同, 这与前人研究结果一致. 从图 2 上可以看出不同时代地层层速度随着深度增加, 增加的速率近似平行. 由于各个时代沉积厚度比较薄, 速度随深度变化比较快, 同一时代不同位置井在速度深度关系上不完全在同一条直线上, 这也反映了中国沉积盆地与国外沉积盆地中比较稳定的沉积不同, 有其特殊的地方. 其他沉积盆地也有相类似的特点.

3 计算结果

3.1 波速的影响因素

影响地震波速的因素很多, 最主要是岩性, 由于本文采用的是砂泥岩剖面的速度, 因此与岩性有关的因素对波速的影响是同等的, 对于深度影响本文给予考虑, 而压力对速度的影响可以认为是压实作用, 这种影响是非线性的, 用深度和年代两个参数可以反映这一因素的影响. 温度也是影响地震波速度的因素之一, 一般温度每升高 100°C , 速度减少 $5\% \sim 6\%$.

应用上述的统计数据按照前述计算方法, 本文对速度做了温度校正, 计算时采用 5.5% 速度梯度计算. 温度参数取自文献[13~16], 得到如下计算结果.

3.2 塔里木盆地扫描参数

由于满加尔凹陷区属于塔里木盆地比较稳定的沉积区, 采用了满加尔凹陷多口井按照同一层位, 进行参数扫描, 对比作了温度校正后的结果见表 1.

塔里木盆地中石炭系地层含有碳酸盐岩的地层, 本文仅选取砂泥岩段的速度和年代数据, 用于扫描拟合待定的两个参数. 而奥陶系的岩性为碳酸盐岩, 本文用碳酸盐岩剖面的数据也扫描拟合得到两个参数, 但取扫描的两个参数的平均值时没有包括奥陶系得到的这两个参数. 从计算的结果可以看出, 多口井若按同一层位, 每个层位扫描拟合的两个参数

表 1 塔里木盆地按同一层位扫描参数

Table 1 The parameters scanned from each layer in Tarim basin

地层	未做温度校正		做温度校正	
	参数 a	参数 $1/n$	参数 a	参数 $1/n$
奥陶纪	31.5	0.135	31.5	0.135
志留纪	69.5	0.135	36.0	0.155
泥盆纪	69.5	0.135	60.0	0.135
石炭纪	32.5	0.16	52.5	0.14
二叠纪	38.0	0.155	76.0	0.13
三叠纪	31.0	0.165	36.0	0.155
白垩纪	43.0	0.155	59.5	0.14
下第三纪	31.5	0.14	30.0	0.14
上第三纪	31.5	0.15	30.0	0.14

并不完全相同. 取得到两个参数的平均值, 结果为: 未做温度校正 $a = 34$, $1/n = 0.15$; 做温度校正 $a = 32.2$, $1/n = 0.14$.

按每口井包含的层位用西南凹陷和满加尔凹陷数据做扫描获得参数值见表 2.

按每口井包含的层位扫描拟合获得的 2 个参数也有一定差别.

取两个参数的平均值后, 得到的结果为: 未做温度校正 $a = 32.8$, $1/n = 0.14$; 做温度校正 $a = 33.1$, $1/n = 0.13$.

3.3 沉积盆地扫描参数

(1) 对其他沉积盆地中收集到的井资料同样做了扫描得出如下参数(表 3), 其中塔里木盆地采用满加尔凹陷区的井资料, 不包含奥陶纪的地层.

温度校正前后, 不同沉积盆地按钻穿的所有层位, 拟合扫描获得 2 个参数有一定差别. 取得到两个

表 2 塔里木盆地不同井扫描参数

Table 2 The parameters scanned by the different wells in Tarim basin

顺序号	未做温度校正		做温度校正	
	参数 a	参数 $1/n$	参数 a	参数 $1/n$
1	33.0	0.145	30.0	0.14
2	36.5	0.12	32.5	0.12
3	30.5	0.13	31.5	0.13
4	33	0.135	35.5	0.13
5	31.5	0.135	31.5	0.135
6	30.5	0.135	33	0.13
7	32.0	0.135	33.5	0.125
8	35.0	0.135	30.0	0.13
9	43.5	0.125	36.0	0.13
10	36.5	0.125	31.0	0.135
11	30.5	0.135	31.5	0.135
12	32.0	0.135	32.0	0.135
13	32.0	0.13	39.5	0.12
14	32.5	0.135	30.0	0.135
15	33.0	0.135	31.0	0.125
16	31.5	0.135	32.0	0.13
17	31.5	0.14	30.0	0.14
18	30.5	0.13	33.0	0.125
19	30.5	0.165	42.5	0.15
20	30.5	0.165	35.0	0.155
21	31.0	0.165	36.0	0.155
22	32.5	0.16	36.0	0.155

参数的平均值, 结果为: 未做温度校正 $a = 37.15$, $1/n = 0.180$; 做温度校正 $a = 37.15$, $1/n = 0.181$.

(2) 不同沉积盆地中按照同一层位, 塔里木盆地用满加尔凹陷区数据进行参数扫描, 得到如表 4 的参数值.

取得到两个参数的平均值, 结果为: 未做温度校正 $a = 41.79$, $1/n = 0.172$ 做温度校正 $a = 36.15$, $1/n = 0.17$.

以上结果表明, 不同沉积盆地中按照同一层位进行参数扫描, 得到的 2 个参数值比较一致.

表 3 不同沉积盆地井扫描参数

Table 3 The parameters scanned from wells in different sedimentary basins

名称	未做温度校正		做温度校正	
	参数 a	参数 $1/n$	参数 a	参数 $1/n$
珠江口盆地	31.0	0.16	30.5	0.19
	49.5	0.16	43.0	0.165
四川盆地	38.5	0.17	60	0.155
	31.5	0.19	36.5	0.175
华北盆地	30.5	0.195	32	0.205
南华北盆地	33.0	0.19	32.0	0.19
	35.0	0.215	38.0	0.21
渤海湾盆地	35.0	0.21	34.5	0.21
	35.5	0.185	39.0	0.18
塔里木盆地	32.5	0.16	36.0	0.155
海拉尔盆地	64.5	0.155	30.0	0.175
	33.5	0.185	35.0	0.185
松辽盆地	33.0	0.175	36.5	0.17

表 4 不同沉积盆地按同一层位扫描参数

Table 4 The parameters scanned from each layer in different sedimentary basins

顺序号	未做温度校正		做温度校正	
	参数 a	参数 $1/n$	参数 a	参数 $1/n$
奥陶纪	30.5	0.185	49.5	0.165
志留纪	69.5	0.135	36.0	0.155
石炭纪	32.5	0.175	30.0	0.135
二叠纪	56.0	0.165	51.5	0.165
三叠纪	31.0	0.165	31.0	0.185
白垩纪	40.5	0.175	35.0	0.185
下第三纪	30.5	0.195	30.5	0.19
上第三纪	32.5	0.19	39	0.175

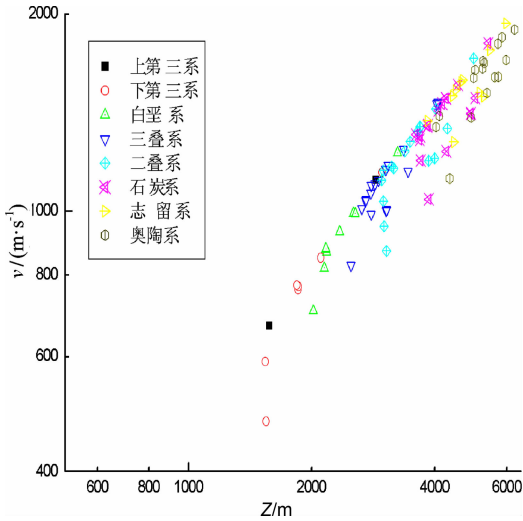


图 2 不同时代速度和深度关系图(塔里木盆地)
Fig. 2 Velocity-depth relations for different age (Tarim basin)

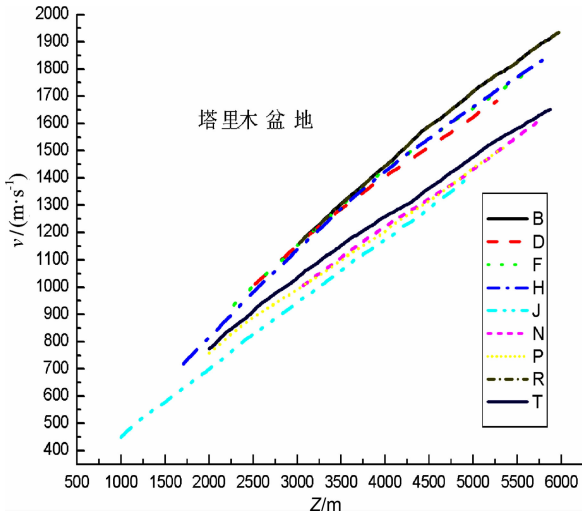


图 3 不同井的速度和深度关系图(塔里木盆地)
Fig. 3 Velocity-depth relations for different wells (Tarim basin)

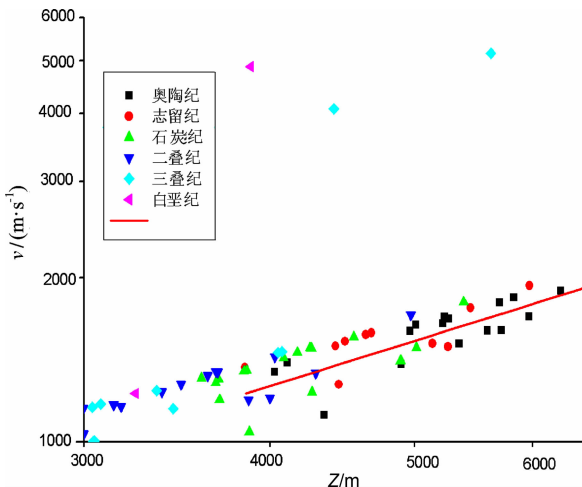


图 4 每个地质年代地层层速度和深度的对数关系图,直线的斜率近似为 0.17
Fig. 4 Velocity-depth for each age on logarithmic scale. All the slopes are close to 0.17

3.4 速度、深度和年代关系式

从以上得到参数可以看出,不同盆地所获得参数并不完全一致,温度校正后进行速度扫描也得到同样结论.对所收集的不同沉积盆地中按照同一层位做扫描后,未做温度校正,获得两个参数有着比较相近的数值,选取所得到两个参数的平均值得到: $a = 41.79, 1/n = 0.172$,这样就得到了适合于中国大陆沉积盆地的速度、深度和年代的定量表达式,即

$$v = 41.79(TZ)^{0.172},$$

把上式变换一下,解出时间 T ,就得到地球物理定年的时间表达式,即

$$T = \frac{\left(\frac{v}{41.79}\right)^{5.81}}{Z}.$$

把各个时代的速度-深度按照对数坐标做到一张图上(图 4),速度对数和深度对数在各个时代基本成一条直线,直线的斜率是 0.17,出现一些偏离直线很远的点是由于 VSP 测量时岩性除砂泥岩外还有其他岩性和测量数据有误差引起的,不同时代在速度轴上的截距有小的差异也验证了本文得到的沉积盆地中速度、深度和年代的公式是合理的.用本文得到的定年公式和 Faust 公式分别计算了塔里木盆地某口井的地质年代,计算结果如表 5,可以看出用本文得到的公式计算的年代比 Faust 公式获得年代更接近实际的年龄数据,误差的原因可能是地层有部分缺失而不是一个完整的沉积剖面引起的,用大尺度下中国大陆沉积盆地获得的公式应用于小尺度西部塔里木盆地出现偏差,提出我们下一步研究方向将是不同尺度下的年代和速度深度的关系.

本文得到的公式与 Faust 从美国和加拿大的沉积盆地中的公式不同,可能是由于中国大陆沉积盆地是陆相沉积,经历了多期次的构造运动,沉积不连续现象比较常见,不同沉积盆地相同沉积时代沉积厚度变化大,而美国和加拿大是海相沉积,沉积比较稳定.

3.5 计算盆地基底年龄

本文阐述的基底是指盆地中沉积盖层之下的地层,为资源勘探中最后目的层之下的基岩.

计算的沉积盆地基底是沉积比较稳定地区的基底,计算基底年龄的方法是按照获得的中国大陆沉积盆地中建立的定量关系式变形后的形式:

$$T = \frac{\left(\frac{v}{41.79}\right)^{5.81}}{Z}.$$

表 5 某井计算和实测年代比较

Table 5 Comparison of computational ages and observed ages in a well

深度 (m)	层速度 (m/s)	实测年代 (Ma)	本文公式 计算年代 (Ma)	Faust 公式 计算年代 (Ma)
1489.0	2785.10	2.6~5.3	26.5	31.00
1704.8	3508.09	5.3~23.3	88.46	108.15
2840.5	3352.55	23.3~65.0	40.79	49.45
3440.0	3436.45	65.0~137.0	38.89	47.35
4060.0	3699.23	137.0~227.0	50.56	62.43
4295.0	3635.21	227.0~241.0	43.18	53.14
4300.0	3720.95	241.0~250.0	49.38	61.05
4610.0	5310.33	250.0~295.0	363.79	481.18
4990.0	4538.18	295.0~354.0	134.88	173.17
5553.5	4533.83	354.0~438.0	120.52	154.70
6050.0	5002.57	438.0~455.0	195.94	256.26
6370.0	6173.39	455.0~465.0	631.50	859.57

表 6 沉积盆地基底年代计算与实测对比表

Table 6 Comparison of computational ages and observed ages on sedimentary basins

盆地名称	深度 (m)	速度 (m/s)	计算年代 (Ma)	实测年代 (Ma)
松辽盆地(松基 6 井) ^[17]	4597	5100	199.92	213.5~112.7
准噶尔盆地 ^[18]	5500	5400	232.51	双层基底, 海西期和古老陆块
四川盆地(女基井) ^[19]	6011	5850	337.90	710.54
珠江口盆地 ^[20,21]	11000	6200	258.35	中生界
渤海湾盆地 ^[22,23]	4600	5300	249.54	古生界和中生界的沉积基底
塔里木盆地(塔参 1 井)	7200	6300	432.94	900
鄂尔多斯盆地(庆深 1 井)	4600	5800	420.18	1900

本文利用在盆地中钻到基底的参数井计算沉积盆地基底的年代. 沉积盆地中基底的速度范围一般在 5.5~5.8 km/s 之间. 用计算的沉积盆地基底与实测基底的同位素年龄做对比, 分析这个公式能否计算沉积盆地基底年龄.

沉积盆地由于所处构造位置不同, 出露基底的岩性也不同, 一般盆地边缘出露比较老的地层, 凹陷区的地层相对新一些. 在盆地中比较稳定区, 大多按照钻井中的参数井钻到基底以下, 通过实测年龄对比计算获得基底底界年龄的差别.

从以上沉积盆地基底的计算(表 6)可以看出,

用所给出的公式大体可以计算盆地基底的年代, 但一般是指在盆地中沉积比较稳定地区的基底. 盆地基底计算值与实测的同位素年龄存在一定差别的原因, 一方面是由于本文选择的井的数据不一定代表了整个区域的情况, 另一方面, 本文把中国大陆沉积盆地看作一个构造单元获得公式, 对某一具体沉积盆地可能会有误差.

4 结 论

本文在广泛收集中国大陆沉积盆地资料的基础上, 以中国大陆沉积盆地作为研究区, 寻求盆地中速度和年代关系, 应用统计分析、扫描、拟合等方法, 发现中国大陆沉积盆地地球物理参数速度和地层年代间存在一定的关系, 据此初步建立了对中国大陆沉积盆地较适用的速度和年代间定量关系, 提出了地球物理定年法, 探讨了该方法在盆地基底年代计算的应用, 为地质学和地球物理学相结合提供了一个有效途径. 使用该公式计算存在误差, 表明本文把中国大陆沉积盆地看作一个构造单元获得公式, 对具体某个盆地还存在误差. 因此, 下一步的研究是把中国大陆沉积盆地划分成更小的单元来获得具体某个盆地年代、深度和速度的定量关系式.

致 谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所的张中杰研究员对本文的指导和帮助, 感谢吉林大学何樵登教授对本文的指导和帮助, 感谢大庆物探公司、中石油东方地球物理公司、辽河物探公司、中石化西北石油局提供 VSP 测井数据, 评审专家提出建设性意见, 在此表示感谢.

参考文献(References)

- [1] 陆松年, 张学祺, 黄承义等. 蓟县—平谷长城系地质年龄数据新知及年代格架讨论. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊, 第 23 号, 北京: 地质出版社, 1989. 11~23
Lu S N, Zhang X Q, Huang C Y, et al. Jixian-Changcheng system geology age data and review on age framework. In: The Publication of Tianjin Geologic and Mineral Resource Institute of Geologic Science Institute. No 23(in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989. 11~23
- [2] 陆松年. 大陆地壳演化时间维的确定及存在问题. 新疆地质, 1995, 13(1): 13~19
Lu S N. Determination of chronological dimensions of the evolution of continental crust and existing problems. *Xinjiang Geology* (in Chinese), 1995, 13(1): 13~19
- [3] 郭桂红, 韩 锋. 地质定年方法综述与地球物理定年. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 87~94

- Guo G H, Han F. The overview of dating methods and the geophysical dating. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(1):87~94
- [4] Weatherby B B, Faust L Y. Influence of geological factors on longitudinal seismic velocities. *Bulletin A A P G.*, 1935, **19**(1):1~8
- [5] Faust L Y. Influence of geological factors on Longitudinal seismic velocities. Presented at Midyear Meeting of SEG. Dallas, Texas, 1935
- [6] Haskell, Baskell N A. The relation between depth lithology and seismic wave velocity in Tertiary sandstones and shales. *Geophysics*, 1941, **VI**:318~326
- [7] Stulken E J. Seismic velocities in the southeastern San Joaquin Valley of California. *Geophysics*, 1941, **VI**:327~355
- [8] Faust L Y. Seismic velocity as a function of depth and geologic time. *Geophysics*, 1951, **XVI**(2):192~206
- [9] Vogel C B. A seismic velocity logging method. *Geophysics*, 1952, **XVII**(3):586~597
- [10] Faust L Y. A velocity function including lithologic variation. *Geophysics*, 1953, **XVIII**(2):271~288
- [11] George H S, Hans B, John E, et al. Physical analysis of deep sea sediments. *Geophysics*, 1957, **XVIII**(4):779~812
- [12] Acheson C H. Time-depth and velocity-depth relations in western Canada. *Geophysics*, 1963, **28**(5):894~909
- [13] 王 钧, 黄尚瑶, 黄歌山等. 中国地温分布的基本特征. 北京:地震出版社, 1990
Wang J, Huang S Y, Huang G S, et al. Basic Characteristics of the Earth's Temperature Distribution in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1990
- [14] 王 钧, 黄尚瑶, 黄歌山等. 华北中、新生代沉积盆地的地温分布及地热资源. 地质学报, 1983, (3):304~316
Wang J, Huang S Y, Huang G S, et al. Geotemperature distribution and geothermal resources in the Meso-Cenozoic basins of north China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1983, (3):304~316
- [15] 王 钧, 黄尚瑶, 黄歌山等. 中国南部地温分布的基本特征. 地质学报, 1986, (3):297~309
Wang J, Huang S Y, Huang G S, et al. Basic characteristics of the earth's temperature distribution in southern China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1986, (3):297~309
- [16] 汪集旻, 黄少鹏. 利用地热资料确定岩石圈厚度——以攀西地区为例. 科学通报, 1988, **33**(1):51~54
Wang J Y, Huang S P. Using heat flow to estimate the thickness of lithosphere in Panxi region. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1988, **33**(1):51~54
- [17] 大庆油田石油地质志编写组编. 中国石油地质志 卷二 大庆、吉林油田(上册). 北京:石油工业出版社, 1993
Editorial Group of "Petroleum Geology of Daqing". Daqing, Jilin Oil Field (First Part), *Petroleum Geology of China* (Vol. 2) (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1993
- [18] 陈俊湘, 陈景亮. 准噶尔盆地基底及其地震速度特征. 新疆石油地质, 2002, **23**(6):474~477
Chen J X, Chen J L. Basement of Junggar basin and its seismic velocity characteristics. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 2002, **23**(6):474~477
- [19] 宋鸿彪, 罗志立. 四川盆地基底及深部地质结构的研究进展. 地学前缘, 1995, **2**(3-4):231~237
Song H B, Luo Z L. The study of the basement and deep geological structures of Sichuan basin, China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 1995, **2**(3-4):231~237
- [20] 黄春菊, 周 蒂, 陈长民等. 反射地震剖面所揭示的白云凹陷的深部地壳结构. 科学通报, 2005, **50**(10):1024~1031
Huang C J, Zhou D, Chen C M, et al. Deep crustal structure of Baiyun Sag, northern South China Sea as interpreted from deep seismic reflection profile. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2005, **50**(11):1131~1138
- [21] 王家林, 张新兵, 吴健生等. 珠江口盆地基底结构的综合地球物理研究. 热带海洋学报, 2002, **21**(2):13~22
Wang J L, Zhang X B, Hao J S, et al. Integrated geophysical researches on base texture of Zhujiang river mouth basin. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2002, **21**(2):13~22
- [22] 张成科, 张先康, 赵金仁等. 渤海湾及其邻区壳幔速度结构研究与综述. 地震学报, 2002, **24**(4):428~435
Zhang C K, Zhang X K, Zhao J R, et al. Study and review on crust-mantle velocity structure in Bohai Bay and its vicinity. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, **24**(4):428~435
- [23] 张建中, 戴 云, 钟本善. 下辽河裂谷型断陷盆地基底的重力解释方法. 物探化探计算技术, 1999, **21**(3):252~256
Zhang J Z, Dai Y, Zhong B S. Gravitational method for determining the basement of Liaohe rifted basin. *Computing Techniques Geochemical Exploration* (in Chinese), 1999, **21**(3):252~256

(本文编辑 胡素芳)