

文章编号 :1000-0550(2002)02-0255-06

利用砂岩中波痕的特征估算沉积环境的物理参数 ——以宣化地区长城系下部石英砂岩为例^①

聂逢君¹ 姜美珠¹ 吴河勇² 刘文龙²

1(华东地质学院 江西临川 344000)

2(大庆勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

3(中国地质大学 武汉 430074) 4(中国地质大学 北京 100083)

摘要 从 20 世纪 70 年代开始,沉积学步入了定量和半定量的阶段,欧洲学者在 20 世纪 80 年代对阿尔卑斯地区海相沉积和英国的设得兰地区的陆相沉积的波痕构造作了大量的开创性工作,建立了一系列的数学表达规律。本文利用了他们的研究成果,在宣化地区长城系下部石英砂岩中进行了应用研究。结果表明,处于特殊沉积环境下的石英砂岩 A、B、C 的环境物理参数有规律地变化,石英砂岩 A→石英砂岩 B→石英砂岩 C,水质点的运动速度由大到小,再由小变大,运动周期(T)由长变短,又由短变长,水深由深至浅,又由浅至深,波浪的高度由大变小,又由小变大,水体的能量由大到小,又由小到大。计算结果与实际观察较吻合。结合粒度分析,三层石英砂岩中砂质颗粒在水中主要作跳跃运动,其次是跳跃运动与悬浮运动的转换运动,部分质点作悬浮运动,反映了水体浅,能量较高。

关键词 宣化地区 石英砂岩 波痕 估算 物理参数

第一作者简介 聂逢君 男 1962 年出生 博士 石油地质学与盆地分析

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 概况

用沉积岩中的沉积构造来再造古沉积环境是沉积地质学研究的重要内容之一,定量地研究古环境的物理参数的方法还很不成熟,处于探索阶段。已有一些学者在此方面进行了有意义的探索。实验研究表明,尖峰状的摆动波痕的波长与摆动流近床底幅度密切相关^[1]。因此,保存在地质体中的尖峰状的摆动波痕为重塑古沉积环境的参数提供了良好的基础^[2]。P. A. Allen^[3]对英国设得兰地区泥盆系的湖相沉积物中波痕作了详细研究;Homewood 和 Allen^[4]对瑞士西部的海相磨拉石中的波痕特征与沉积环境的关系进行了探讨。P. A. Allen^[5]指出,在一定的条件下,古波的周期是沉积物颗粒大小和波痕波长的函数。Diem^[2]选择了瑞士至德国阿尔卑斯前渊盆地中中新世一下中新世的海相磨拉石作为研究对象,估算了砂岩波痕形成时的古沉积环境的水体物理参数。估算结果与地层中的其他环境标志基本一致。

2 地质背景

河北宣化地区晚前寒武纪的常州沟—串岭沟组沉积于燕辽沉降带西侧的宣龙内陆海内^[6]。“吕梁”运

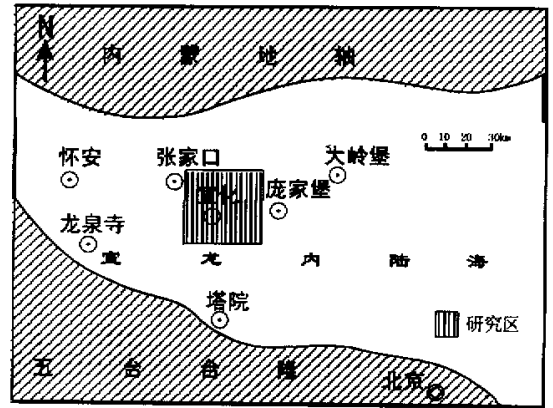


图 1 研究区的大地构造位置图

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic location of the study area.

动以前,该地区处于长期的风化、剥蚀和准平原化阶段^[7]。北部为内蒙地轴,而南部为五台台隆(图 1)。作为华北地台的第一积盖层的长城系地层以角度不整合直接覆盖于太古代的石榴石角闪片麻岩之上,长城系共分五个组:常州沟、串岭沟、团山子、大红峪、高于

① 国家自然科学基金项目(批准号:49732005)资助

收稿日期 2001-03-22 收修改稿日期 2001-07-11

庄,总厚度在研究区逾1500m。常州沟组在研究区内的厚度为160~171m之间变化,主要由一套潮汐作用形成的中-细粒砂岩与页岩互层及前滨-近滨由波浪作用形成的很纯净的石英砂岩(因成岩期的硅质胶结强而变成了石英岩状砂岩,通常称石英岩)。串岭沟组是一套潮汐砂泥岩互层夹肾状、鲕状铁矿层,即著名的“宣龙式”铁矿。该组上部为厚层纯净的深水页岩。聂逢君^[8]对长城系的常州沟-串岭沟组的砂岩的物质成分、物质来源及与大地构造关系进行了探讨,认为砂岩来源于大陆块蚀源区的克拉通源区内。肾状铁岩潮间带附近由生物化学和胶体化学共同作用形成,而鲕状铁岩在鲕滩由机械搅动和胶体化学联合作用的结果^[9]。

本文选择了常州沟组中的三层石英砂岩A、B、C作为主要研究对象。下部石英砂岩A,岩石在风化面上呈黄白色,土黄色,新鲜面上呈灰白色、乳白色,碎屑颗粒主要是单晶石英、多晶石英,长石和云母几乎不见,颗粒大小为0.2~0.6mm,呈次圆状,少数圆状,分选好,原始颗粒以点接为主,孔隙发育,绝大多数颗粒有次生加大边,其宽度一般为颗粒直径的1/10,在颗粒和次生加大边之间有一铁质和粘土质的氧化圈,

利于鉴别加大部分和颗粒部分。砂岩的粒度分析结果表明,在累计概率曲线图上,缺失滚动组分,主要是跳跃组分和介于跳跃和悬浮组分之间的组分,悬浮组分亦有一定的含量(图2A所示)。砂岩中发育大量的波痕,波痕有直线脊,有对称和非对称的,波长4~7cm,波高1~1.5cm,大量的波痕是尖脊的,但由于砂岩时代老,有不同程度的压实,其尖峰稍有圆滑现象(图3A)。岩石中还发育大量的冲洗交错层理和波状交错层理。中部石英砂岩B,呈灰色、灰白色,以单晶石英颗粒为主,大小为0.2~0.4mm,呈圆形和卵圆形,圆状,次圆状,发育次生加大边,其宽度为颗粒直径的1/8~1/10,此层石英岩中含有少量的长石颗粒,占1%~2%左右,重矿物主要是独居石和锆石。在累计概率曲线图上,和(A)一样,本层砂岩中缺失滚动组分,跳跃组分占绝对优势,达85%。曲线上也有跳跃与悬浮转换组分,悬浮组分有一定的含量。岩石发育低角度斜交冲洗交错层理和槽状交错层理,见较多的波痕构造,走向20~30°,波长4~6cm。上部石英砂岩C,呈灰白色、黄白色,由单晶石英,多晶石英及少量的长石组成,三者含量分别为90%~94%,5%~8%,1%~7%,圆状、次圆状,分选好,多数颗粒发育次生加大边,

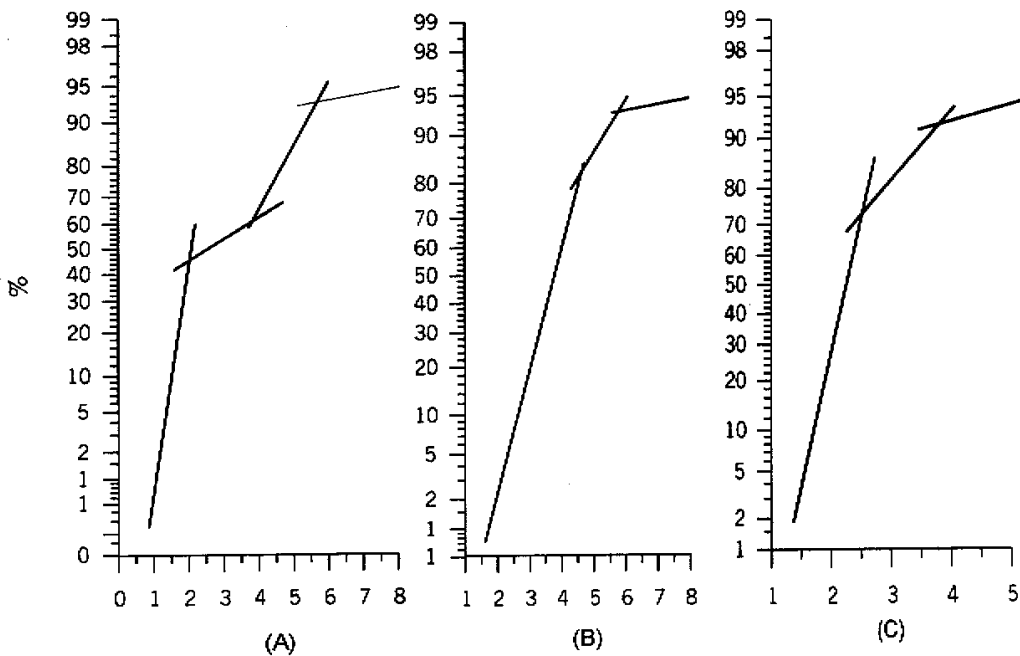
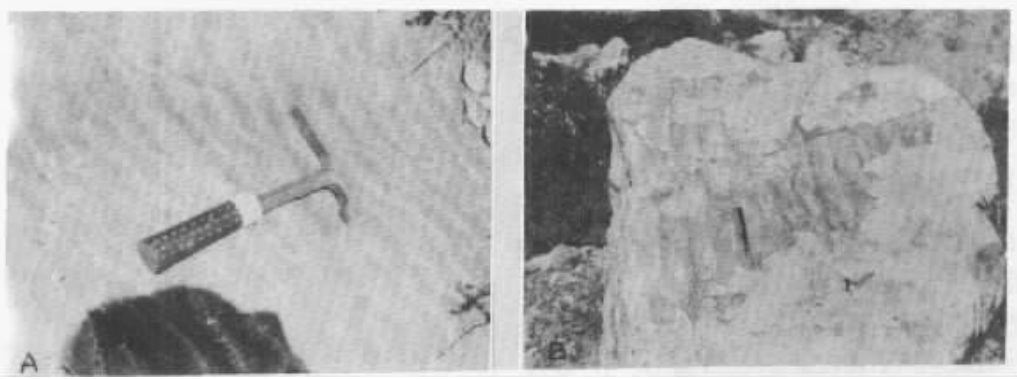


图2 宣化地区常州沟-串岭沟组石英砂岩(A)(B)(C)粒度概率曲线图

Fig.2 Diagram showing the probability curves of grain size analysis of quartz sandstones (A)(B)and(C)in Changzhougou-Chuanlinggou Formations, Xuanhua Area.



A. 发育于石英砂岩(A)段中央脊,音叉状波痕;B. 发育于石英砂岩(B)中的压实波痕。

图 3 石英砂岩中的波痕构造

A. Steep trochoidal ripple marks in quartz sandstone; B. Compressed ripple marks in quartz sandstone

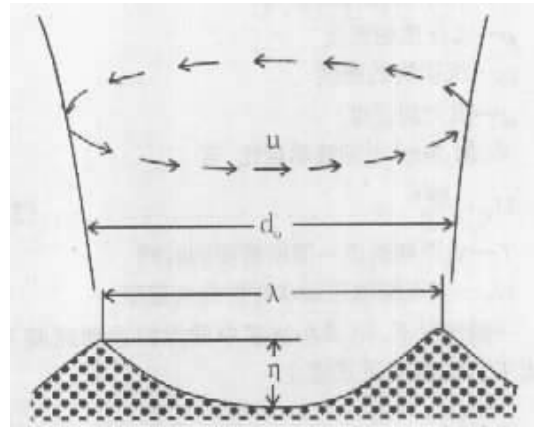
Fig. 3 Ripple mark structures in quartz sandstone of the study area.

累计概率曲线表明,颗粒的主要搬运方式是跳跃,跳跃组分的含量比(A)少,但比(B)多,与(A)和(B)相同的是,也有一跳跃与悬浮转换组分,少量的悬浮组分。砂岩中见大量的波痕构造,波长 4~10 cm 不等,波高 3~6 cm,图 3B 所示。其中有一大型的波状冲刷界面,波长达 30~50 cm,波高 2~8 cm;小型的对称波痕交错层理十分发育,中上部还发育槽状交错层理和冲洗交错层理,前积层与冲洗面的交角为 10°~20°。

3 选取波痕的依据

目前对古波痕研究已发展到应用数学表达式来估算古水深及古波痕的形成条件。而古水深及古波浪的特征对研究恢复与盆地有关的垂直运动,以及某个部位或某个范围里古波的变化趋势和盆地的形态有着重要的指示意义^[2]。为了描述的方便,图 4 是描述波痕与运动水体之间关系术语示意图。为了比较准确地估算形成砂岩(石英砂岩)波痕的运动水体参数,所测量的波痕类型需满足一定的条件。

据 Dien(1985)的研究资料,在所有的波痕中只有横断面上是尖脊的波痕,最大的波痕对称指数被限制在 1.5 内,而垂直形态指数不能超过 9,但 Allen^[10]研究表明,垂直形态指数必须限制在 7.5 以内方可使用。在宣化地区常州沟组的石英砂岩中,尽管岩石形成时间较早,岩石并没有强烈的变质作用,只是受了一定的后期成岩改造作用,大多数的碎屑颗粒出现了次生加大现象。又薄片鉴定结果表明,石英岩中负胶结物孔隙度普遍在 15%~20% 左右,所以,考虑到后期的压实作用,垂直形态指数在 Allen 的标准上有所展广,本文将其限制在 9 以内。



u. 水质点运动轨道速度; η . 波痕高度;
 λ . 波痕的波长; d_0 . 近底水质点轨道直径

图 4 描述波痕术语与水介质运动关系示意图

u. speed of water particle along the motion track;
 η . ripple mark height; λ . ripple mark length;
 d_0 . diameter of motion track of water particles.

Fig. 4 Sketch map showing the relationship between ripple mark terms and water motion.

有些沉积学家^[3,4,5,10]指出,用波痕估计出来的古环境的物理参数去解释沉积环境的相对变化趋势,或去解决某个特定区段里的古水波条件时,如果把估算出来的参数与古地理的某些资料相结合,将是一种强有力的手段。在本研究区中,选取石英砂岩 A、B、C 中波痕来研究基本符合所需限制条件。所选的砂岩在一个特定的层位里,它的上下地层均受到过古赤道风暴作用的影响,沉积构造如波痕和交错层理等均保存完

好,又因石英砂岩中碎屑颗粒的成分成熟度和结构成熟度均高,除了成岩作用形成了次生加大边以外,碎屑岩成分和结构保持不变,这正是选择本层作参数估算的理由所在。

4 估算所用数学表达式

Miller 和 Komar^[11]的研究资料中指出,对于尖脊的波痕有:

$$d_0 = \lambda / 0.65 \dots\dots\dots(1)$$

d_0 —近底质点运动轨道直径(图 1)

λ —为波痕的波长

Komar 和 Miller(1973)发现,启动沉积物的速度(即临界速度) U_t 可用下式来表示:

$$U_t^2 = 0.211(d_0/D)^{1/2}(\rho_s - \rho)gD/\rho$$

当 $D < 0.5\text{mm}$ (2)

D —沉积物颗粒的直径

ρ —水介质的密度

ρ_s —沉积物的密度

g —重力加速度

又据 Airy^[13]的波动理论,有

$$U_m = \frac{\pi d_0}{T} \dots\dots\dots(3)$$

T —质点绕轨道一周所需要的时间

U_m —质点绕轨道运动时的最大速度

一般情况下,记录在波痕中质点的运动速度 U_m 要比 U_t 大,故有下式成立:

$$\frac{\pi d_0}{T} > U_t \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{即 } T < \frac{\pi d_0}{U_t} \dots\dots\dots(5)$$

另外,相对于 U_t 的深水波长 $L_{t\infty}$ 有如下的表达式成立:

$$L_{t\infty} = \frac{\pi d_0}{2U_t^2} \dots\dots\dots(6)$$

Diem^[2]在 Airy 的波动理论上研究得出:

$$U_m < \sqrt{0.112gd} \dots\dots\dots(7)$$

合并(3)和(7)得:

$$T \geq \pi \sqrt{8.9d_0/g} \dots\dots\dots(8)$$

Komar(1974)研究表明:

$$H_{\max} = 0.142 \times L_{t\infty} \dots\dots\dots(9)$$

H_{\max} 相对波长为 $L_{t\infty}$ 的水波波高

如果在浅水区, Diem(1985)的经验公式为:

$$H/h = 0.89 \dots\dots\dots(10)$$

h —水深

据 Komar(1974)的能量 P 和最大波长 L_{\max} 的经验计算公式为:

$$P = \frac{1}{16} \rho g H^2 \left(1 + \frac{4\pi h}{L \sin(4\pi h/L)} \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tan(2\pi h/L)} \right) \dots\dots(11)$$

$$L_{\max} = 1.56 T^2 \dots\dots\dots(12)$$

5 计算结果

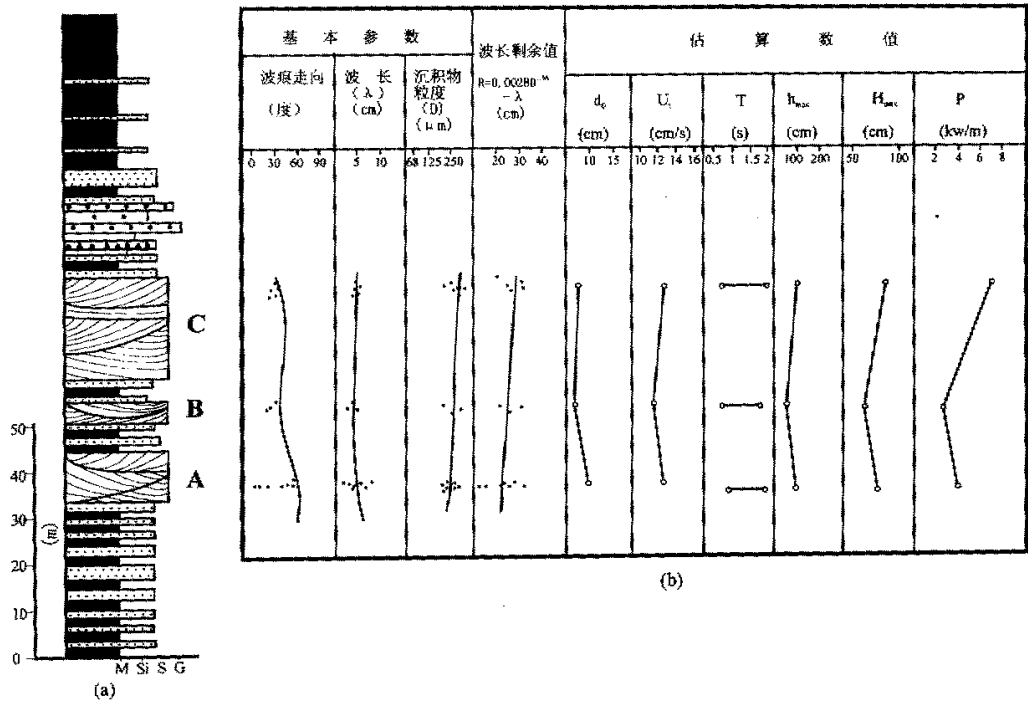
在宣化地区的剖面上统计石英砂岩中的波痕情况如下:

石英砂岩 A 中统计了七个点,每个点所测量的数值不少于五组,测定波痕的走向、波长、波高、 L_1 和 L_2 等值,然后取平均值。石英砂岩 B 中统计三点,石英砂岩 C 中统计了五个点,取平均值法与石英砂岩 A 中相同。测量和计算的结果表达在图 5 中,需要指出的是在计算 d_0 、 U_t 、 T 、 H_{\max} 、 L_{\max} 、 P 时所用的 D (沉积物粒度)和 λ (波长)是同一层砂岩中各个点的平均值。图 5 中 R 代表波长剩余值。Diem(1985)研究认为,当 $R > 0$ 时,波长(λ)与水体底部轨道直径(d_0)有关,而当 $R < 0$ 时,波长(λ)只与沉积物颗粒大小有关。本研究中 R 的值均大于 0,所以在计算时选用了与 d_0 有关的公式。由公式(1)可以计算砂岩 A、B、C 各层的 d_0 值;由(2)式可以计算出各层的 U_t 值;根据(5)和

(8)可得 $\pi \sqrt{8.9d_0/g} \leq T < \frac{\pi d_0}{U_t}$,即水质点绕轨道一周所需要的时间;据(6)(9)(10)(12)可计算出 h_{\max} 、 H_{\max} 、 L_{\max} 值;最后,从(11)中计算出能量 P 的值。所有的测量及计算的结果均绘在图 5 中。

6 结果解释

石英砂岩 A、B、C 的上下岩层中均保存着良好的风暴作用标志(如丘状交错层理,岩石的基底式胶结类型等),它们是在风暴时期(非正常天气)受风暴流影响的形成的结构构造。而石英砂岩 A、B、C 则是在正常天气下,受波浪的分选、淘洗作用,三层石英砂岩形成的大环境基本相同,即是波浪作用强烈的浅水环境,但就其波浪作用强弱的细微变化则有所不同,通过上述计算,由图 5 可知,从石英砂岩 A→石英砂岩 B→石英砂岩 C,水质点的运动速度由大到小,再由小变大;运动周期(T)由长变短,又由短变长;水深由深至浅,又由浅至深;波浪的高度由大变小;又由小变大;水体的能量由大到小,又由小到大。从上述的变化中我们可以看出,波痕的大小极为敏感地反映环境中运动水体要素的改变,因此,石英砂岩 A、B、C 反映了宣龙内陆海中水体深浅的交错变化规律。从粒度分析曲线上看,三层砂岩均缺失滚动组分,都以跳跃组分为主,而



a. 常州沟—串岭沟组沉积柱状图 b. 利用波浪估算的古沉积环境的各种物理参数

图 5 宣化地区晚前寒武系石英岩状砂岩中波痕参数及形成波痕时水体的动力参数

Fig. 5 Diagram showing the ripple mark parameters and water dynamic parameters in the paleo-environment of the Changchengian quartz sandstone Xuanhua Area.

且均有跳跃与悬浮转换组分的存在,说明水体不深,能量较强,砂质在水体中的运动十分活跃,主要作跳跃运动,有时跳跃运动和悬浮搬运相互转换。同时,在石英砂岩的沉积构造观察上见到,冲洗交错层前积层,的角度由大变小,又由小变大,最后在石英砂岩 C 中形成槽状交错层理,这一海进→海退→海进的规律贯穿着宣龙内陆海的晚前寒武纪早期的整个时期,在石英砂岩 C 之后,又属海退环境,水变浅,以至沉积物露出水面。另外,泥质成分的增加和波浪作用的消失,研究区发育泥坪环境,处于赤道的炎热气候下,出现了泥裂、雨痕、石盐假晶等典型的水上沉积构造。

7 结论

利用沉积构造的特征来定量地估算古环境的物理参数是定量沉积学发展的必然方向,本文利用宣化地区长城系常州沟组的石英砂岩中波痕研究来估算古沉积环境的各项物理参数效果较明显,计算结果与其他沉积标志相互映证,共同证明了石英砂岩形成于浅水。石英砂岩 A 由至 B 再到 C,水体的其他物理参数亦有规律性的变化。

致谢 本文的野外工作得到了石家庄经济学院的杜汝霖教授的帮助,室内工作得到了中国地质大学孟祥化教授和葛铭教授的指导,在此一并致谢。

参 考 文 献 (References)

- 1 Lofquist K E B. Sand ripple growth in an oscillatory-flow water tunnel [R]. Tech. Pap. U. S. Coastal Eng. Res. Center, 1978. 78~5, 101
- 2 Diem B. Analytical method for estimating palaeowave climate and water depth from wave ripple marks [J]. Sedimentology, 1985, 32: 705~720
- 3 Allen P A. Wave-generated structures in the Devonian lacustrine sediments of SE Shedland, and ancient wave conditions [J]. Sedimentology, 1981a, 28: 369~379
- 4 Homewood P, Allen P A. Wave-tide-and current-controlled sandbodies of Miocene Molasse, western Switzerland [J]. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 1981, 65: 2 534~2 545
- 5 Allen P A. Reconstruction of ancient sea conditions with an example from the Swiss Molass [J]. Mar. Geol., 1984, 60: 455~473
- 6 王鸿祯等. 中国古地理图集 [M]. 北京: 地图出版社, 1985 [Wang Hongzhen, et al. Atlas of the palaeogeography of China [M]. Beijing: Cartographic Publishing House, 1985]
- 7 叶连俊. 华北地台沉积建造 [M]. 北京: 地质出版社, 1983 [Ye Lianjun. Sedimentary Formation of the North China Platform [M]. Beijing:

- Geological Publishing House ,1983]
- 8 聂逢君. 碎屑岩的物质成分、物质来源与大地构造关系[J]. 华东地质学院学报 ,1996 ,19(4) :363~369 [Nie Fengjun. Relation of elastic material and provenance to tectonics -- analyses of Changchengian Changzhougou-Chuanlinggou Formations in Xuanlong in-land sea ,west Hebe[J]. Journal of East China Geological Institute ,1996 ,19(4) :363~369]
- 9 聂逢君. 宣龙地区中元古代铁岩建造成因探讨[J]. 华东地质学院学报 ,1997 ,20(1) :9~16 [Nie Fengjun. Discussion on the genesis of the Middle Proterozoic Ironstone formation ,Xuanlong area ,west Hebe[J]. Journal of East China Geological Institute ,1997 ,20(1) :9~16]
- 10 Allen P A , Some guidelines in the reconstructing ancient sea from wave ripple marks[J]. Mar. Geol. ,1981b ,43 :59~67
- 11 Miller M C , Komar P D. Oscillation sand ripples generated by laboratory apparatus[J]. J. Sedim. Petrol. ,1980a ,50 :173~182
- 12 Komar P D , Miller M C. The threshold of sediment movement under oscillatory water waves[J]. J. Sedim. Petrol. ,1973 ,43 :1101~1110
- 13 Airy G G. Tides and waves[J]. Encycl. Metrop. Art. ,1845 ,192 :241~369
- 14 Komar P D. Oscillatory ripple marks and the evaluation of ancient wave conditions and environments[J]. J. Sedim. Petrol. ,1974 ,44 :169~180

Estimates of Physical Parameters in Sedimentary Environments

by Means of Ancient Ripple Marks

—Case of Changchengian quartz sandstones
in Xuanhua Area , Northwest Hebei

NIE Feng-jun^{1 3} JIANG Mei-zhu¹ WU He-yong^{2 4} LIU Wen-long²

1 (East China Geological Institute , Linchuan Jiangxi 344000)

2 (Research Institute of Exploration Development , Daqing Heilongjiang 163712)

3 (China University of Geosciences , Wuhan , Hubei 430074)

4 (China University of Geosciences , Beijing 100083)

Abstract Since the 1970^s , sedimentology has entered into a quantitative study era. The Europe an sedimentologist creatively did a lot of quantitative study on ancient ripple marks in the marine sediments in Alps and lacustrine sediments in Shedland of England in the 1980s. A series of mathematical formulae have been established. A number of physical parameters of sedimentary environments of Changchengian quartz sandstones A , B , and C in the Xuanhua area , northwest Hebei are estimated based on the mathematical formula in this study. The calculation results show the velocities of water particles of sedimentary environments from sandstones A via B to C becom smaller , then bigger ; the motion periods for water particles become shorter , then longer ; the water depths of environments become shallower , then deeper ; the wave heights of waters become lower , then higher ; the energy of waters becomes smaller , then larger. These estimations are in fair harmony with the observations in the field. The grain size analyses demonstrate the jumping population of sandstones dominated in sedimentary environments and the suspension population at 20~40% of the total grains. No tractive population is present in the analyzed samples. So , the grains are transport in the form of jumping and suspension. in shallower water bodies.

Key words Xuanhua Area , quartz sandstone , ripple mark , physical parameter