

Φ 值表达的粒度与分选系数的单位问题

陈奇¹, 唐雯雯¹, 薛成凤¹, 杨阳², 高文华³, 杨建英⁴, 贾建军¹

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

2. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 南京 210023

3. 河南大学地理与环境学院, 河南开封 475004

4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055

摘要 【目的】粒度参数是表征碎屑沉积物和沉积岩基本特征的重要指标,也是判别沉积环境的重要参考依据。长期以来,基于等比制和负对数转换的粒度 Φ 值及粒度参数在地质学和海洋科学领域得到广泛应用,甚至成为国家标准。其中,分选系数的数学内涵与标准偏差有密切关系,因而分选系数是否与粒度一样具有量纲、用什么单位,就成为有争议的问题。【方法】为了澄清这一问题,文章回顾了 Φ 值的由来以及分选系数等粒度参数计算公式的演变过程,统计了国内学者近期的使用习惯。【结果】(1) Φ 值的计算公式已经将其修正为无量纲参数,使得 Φ 值成为表达粒度大小的一个便利性指标,但是它不具有计量单位的内在属性,不能作为一个长度量纲(即粒度)的单位来使用;(2)虽然分选系数源于统计学的标准偏差,但是已经独立发展为描述碎屑沉积物分选性的重要参数,与偏度系数、峰度系数等并列,建议使用时不必添加单位,并参考McManus去量纲的做法对分选系数的公式进行了改进;(3)国内多数学者倾向于使用沉积学术语“分选系数”而不是统计学术语“标准偏差”,且在描述分选结果时不使用单位;(4)现行国家标准GB/T 12763.8—2007规定分选系数的单位为 Φ ,且关于粒度参数计算公式的说明文字存在打印校对错误,建议在修订标准时加以改正。【结论】上述工作,可以为海洋调查规范的修订与改善建言献策,为推进术语统一与标准化提供建议。

关键词 Φ ; 粒度参数; 分选系数; GB/T 12763.8—2007

第一作者简介 陈奇,男,2000年出生,博士研究生,河口海岸动力沉积地貌,E-mail: cqxchenqi@foxmail.com

通信作者 贾建军,男,研究员,E-mail: jjjia@sklec.ecnu.edu.cn

杨建英,女,研究员,E-mail: jcyangjianying@mail.cgs.gov.cn

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

0 引言

中华人民共和国国家标准(以下简称“国标”)包括各个行业所实行的强制标准(GB)与推荐标准(GB/T),对于推行行业规范化与标准化具有重要作用。因此,国标的正确与否对一个行业的方方面面都具有重要意义。GB/T 12763.8—2007《海洋调查规范第8部分:海洋地质地球物理调查》(以下简称“规范”)规定了海洋地质调查的基本内容、方法、资料整理及调查成果的要求,其中“6.3.3.3 粒度参数计算”这一条款的内容与其文献来源有出入。首先,规范的文本明确规定“粒度参数采用福克和沃德公式计算”以

及“ M_z —平均粒径,单位为mm”,然而Folk-Ward公式的原文以 Φ 值来表征碎屑沉积物的粒度^[1],规范与之并不相符。其次,规范在叙述分选系数计算公式时,并没有单位,而在讨论分选结果时,显示分选系数单位为 Φ ;不仅上下文相互对应,与Folk-Ward公式的原文也不符^[1-2]。

针对上述第一个问题,在与Folk-Ward公式原文进行校验后,可以看出规范的文本存在打印校对错误。第二个问题则值得进一步商榷。Folk *et al.*^[1]对表征分选(sorting)的指标——标准偏差(standard deviation)——以 Φ 值进行描述,而在讨论时,对分选系数(sorting coefficient)的描述并没有使用 Φ 为单

收稿日期:2022-10-12;修回日期:2023-01-10;录用日期:2023-02-20;网络出版日期:2023-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(42276050, U2240220);中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心地质调查项目(ZD20220611)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42276050, U2240220; Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, No. ZD20220611]

位^[1]。因此, Φ 值是否可以作为粒度的计量单位来使用, 标准偏差与分选系数的异同以及分选系数是否具有单位等问题, 值得讨论。

通过查阅粒度参数计算公式有关的原始文献, 本文回溯了 Φ 值与粒度参数计算公式的演变历程; 同时, 对粒度参数的算法研究和实际应用(沉积物粒度特征分析)进行文献统计与分析, 归纳分选系数和标准偏差两个术语的使用以及分选系数的描述有无附带单位的情况, 从而得到分选系数使用习惯的演变。上述工作, 可以为海洋调查规范的修订与改善建言献策, 为推进术语统一与标准化提供建议。

1 Φ 与粒度参数的演变进程

粒度是沉积学的一个重要指标, 主要受物源与水动力控制。粒度分析结果的表达走过了 Φ 值的提出及粒度参数计算公式演变等道路, 沉积学家发展了“三段式”累积曲线图、C-M图、敏感粒级、粒径趋势分析、粒度端元分解等多种方法, 用来建立沉积物粒度组分与沉积动力之间的关系, 进而用于判断沉积环境^[3-7]。分解的粒度端元在较为稳定的沉积环境中可以指代沉积物物源^[8-10]。

1.1 Φ 的演变

1.1.1 等比制的提出

Φ 最早的起源为等比制粒度分级。1898年, 美国地质学者 Udden^[11] 对风成沉积物进行分析, 以2为公比建立了等比制粒级分类, 并于1914年进一步提出了1/2 048 mm~256 mm的粒级划分方案^[12]。Udden的方案首先根据碎屑沉积物的粗细使用了岩块(boulder)、砾(gravel)、砂(sand)、粉砂(silt)和黏土(clay)等5类术语, 每一类又进一步划分为大小相连的若干粒级, 每一个粒级的最大值是最小值的2倍; 整个粒级分类方案的粒级分界均为2 mm的整数幂(表1)。

1922年, Wentworth^[13] 对 Udden 粒级分类进行改进, 提出了针对松散沉积物与固结沉积岩的粒级划分规则。Wentworth 方案覆盖的粒径范围是开边界的, 即最大与最小粒级没有限定(表2); 相较于 Udden 方案, Wentworth 方案的粒级数量更少, 对于最粗与最细部分沉积物的分类不如 Udden 方案详尽。

在 Udden 和 Wentworth 两个粒级分类的基础上, 形成了目前国际通用的 Udden-Wentworth 等比制粒级分类标准。该粒级分类标准结合了 Udden 粒级分类的详尽与 Wentworth 粒级分类粒径范围广的优点,

表1 Udden 粒级名称及粒径范围分布表^[12](mm)
Table 1 Udden classification of particle-size name and range^[12] (mm)

序号	粒级名称	粒径范围	
		最大值	最小值
1	大石块(large boulders)	256	128
2	中石块(medium boulders)	128	64
3	小石块(small boulders)	64	32
4	极小石块(very small boulders)	32	16
5	极粗砾(very coarse gravel)	16	8
6	粗砾(coarse gravel)	8	4
7	砾石(gravel)	4	2
8	细砾(fine gravel)	2	1
9	粗砂(coarse sand)	1	1/2
10	中砂(medium sand)	1/2	1/4
11	细砂(fine sand)	1/4	1/8
12	极细砂(very fine sand)	1/8	1/16
13	粗粉砂(coarse silt or dust)	1/16	1/32
14	中粉砂(medium silt or dust)	1/32	1/64
15	细粉砂(fine silt or dust)	1/64	1/128
16	极细粉砂(very fine silt or dust)	1/128	1/256
17	粗黏土(coarse clay)	1/256	1/512
18	中黏土(medium clay)	1/512	1/1 024
19	细黏土(fine clay)	1/1 024	1/2 048

表2 Wentworth 粒级名称及其粒径范围分布^[13](mm)
Table 2 Wentworth classification of particle-size name and range^[13] (mm)

序号	粒级名称	粒径范围	
		最大值	最小值
1	巨砾(boulder gravel)	—	256
2	粗砾(coarse gravel)	256	64
3	中砾(pebble gravel)	64	4
4	细砾(fine gravel)	4	2
5	极粗砂(very coarse sand)	2	1
6	粗砂(coarse sand)	1	1/2
7	中砂(medium sand)	1/2	1/4
8	细砂(fine sand)	1/4	1/8
9	极细砂(very fine sand)	1/8	1/16
10	粉砂(silt)	1/16	1/256
11	黏土(clay)	1/256	—

并在此基础上将沉积物按粒度划分为5个粒组, 分别为岩块、砾石、砂、粉砂以及黏土。我国现行的海洋地质调查国家标准(GB/T 12763.8)即采用了该粒级分类方案(表3)^[2]。

1.1.2 Φ 值的提出与演变

1934年, Krumbein^[14] 提出了将等比制粒度进行对数转换的想法, 引入了 Φ 值, 其计算公式如下:

$$\Phi = -\log_2 \xi \quad (1)$$

表3 Udden-Wentworth 等比制粒级分类表^[2]
Table 3 Proportional granulation classification by Udden-Wentworth^[2]

粒组类型	粒级名称		粒径范围	
	简分法	细分法	单位/mm	单位/ μm
岩块(R)	岩块(漂砾)	岩块	>256	
		粗砾	256~128 128~64	
砾石(G)	砾石	中砾	64~32 32~16 16~8	
		细砾	8~4 4~2	
		极粗砂	2~1	2 000~1 000
		粗砂	1~0.5	1 000~500
砂(S)	砂	中砂	0.50~0.25	500~250
		细砂	0.250~0.125	250~125
		极细砂	0.125~0.063	125~63
		粗粉砂	0.063~0.032	63~32
粉砂(T)	粉砂	中粉砂	0.032~0.016	32~16
		细粉砂	0.016~0.008	16~8
		极细粉砂	0.008~0.004	8~4
		粗黏土	0.004~0.002	4~2
黏土(泥)(Y)	黏土	细黏土	0.002~0.001	2~1
		极细黏土	<0.001	<1

式中: ξ 为粒径, 单位为 mm。相较于以 mm 为单位的等比制粒径, Krumbein^[14] 所提出 Φ 值可以在较小的数值范围 (Φ 为 -20~20, 相当于 0.001 μm ~1 050 m) 内, 覆盖地球表面所能见到的所有粒度^[2]。不仅如此, Φ 值在粒度分析及其绘图与计算方面具备明显的优势^[15-16]。基于此, 在 Udden-Wentworth 粒级分类标准基础上改进形成了如今国际通用的 Udden-Wentworth- Φ 值粒级分类标准^[11-13]。

1963 年 McManus^[17] 指出, 自引入 Φ 值以来, 地学界对其使用有三方面的错误倾向: (1) Φ 值与毫米错误关联, (2) 表达标准偏差时误用 Φ 为单位, (3) 将 Φ 误用为粒度的单位。因此, McManus^[17] 建议将 Φ 值重新定义为沉积物颗粒直径与标准直径之比的负对数, 用以纠正以上错误使用方式对 Φ 值含义造成的混乱, 从而提出了改进的 Φ 值计算公式^[17]:

$$\Phi = -\log_2 \frac{\xi}{\xi_0} \quad (2)$$

式中: ξ_0 为标准粒径, 取值为 1 mm。在不影响 Krumbein 公式计算结果的前提下, McManus^[17] 提出的 Φ 公式将粒径除以 1 mm, 消去了长度量纲的单位, 使得 Φ 值成为一个无量纲参数。

1.2 粒度参数公式的演变

粒度参数在评判沉积物粒度特征时具有重要作用, 其中最为广泛使用的粒度参数主要包括中值粒

径^[18]、平均粒径、分选系数^[19]、偏度^[20]及峰度^[21], 在统计意义上分别对应中位数、平均值、标准偏差、三阶矩和四阶矩。

1.2.1 图解法粒度参数公式

粒度参数计算公式可以大致分为两类, 图解法公式与矩值法公式。图解法主要是以累积曲线上一些特定累计百分比处的颗粒直径进行计算, 方法简便, 且能与累积频率曲线进行对比, 更直观地展现粒度分布特征。矩值法则不需累积频率曲线, 直接将粒度分析的所有粒级占据的百分比进行汇总计算, 能够全面反映沉积物粒度分布的特征, 但计算过程较为复杂。

图解法的发展大致可以分为三个阶段(表 4), Trask^[18] 的四分位法、Inman^[22] 的图解法、Folk *et al.*^[11] 的全面图解法。我国现行国家标准(GB/T 12763.8)采用了福克—沃德公式计算粒度参数。

Trask^[18] 认为, 可以用中值粒径来表示沉积物的特征, 因此, Trask 公式用中值粒径代替平均粒径。后来, Inman^[22] 采用累积频率曲线 16% 与 84% 处的粒度值计算平均粒径, 使其能覆盖的粒度分布范围更广。Folk *et al.*^[11] 在 Inman 公式的基础上, 将累积频率曲线 50% 处的粒度值加入平均粒径的计算公式, 这样既考虑了粒度的覆盖范围, 又纳入了中值粒径的权重。

表4 常用图解法粒度参数计算公式

Table 4 The formulas used in the calculation of the particle size parameters of the graphical method

粒度参数	Trask ^[18]	Inman ^[22]	Folk et al. ^[11]
中值粒径	$Md = \Phi 50$	$Md_{\phi} = \Phi 50$	—
平均粒径	$M = \Phi 50$	$M_{\phi} = \frac{\Phi 16 + \Phi 84}{2}$	$M_z = \frac{\Phi 16 + \Phi 50 + \Phi 84}{3}$
分选系数	$S_0 = \sqrt{Q_1/Q_3}$	$\sigma_{\phi} = \frac{\Phi 84 - \Phi 16}{2}$	$\sigma_l = \frac{\Phi 84 - \Phi 16}{4} + \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{6.6}$
偏度	$Sk = Q_1 Q_3 / Md^2$	$\alpha_{\phi} = \frac{\Phi 16 + \Phi 84 - 2\Phi 50}{\Phi 84 - \Phi 16}$ $\alpha_{2\phi} = \frac{\Phi 5 + \Phi 95 - 2\Phi 50}{\Phi 84 - \Phi 16}$	$SK_1 = \frac{\Phi 16 + \Phi 84 - 2\Phi 50}{2(\Phi 84 - \Phi 16)}$ $+ \frac{\Phi 5 + \Phi 95 - 2\Phi 50}{2(\Phi 95 - \Phi 5)}$
峰度	$K = \frac{Q_3 - Q_1}{2(\Phi_{90} - \Phi_{10})}$	$\beta_{\phi} = \frac{(\Phi 95 - \Phi 5) - (\Phi 84 - \Phi 16)}{\Phi 84 - \Phi 16}$	$K_c = \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{2.44(\Phi 75 - \Phi 25)}$

注： Q_1 、累积频率曲线上25%处所对应的粒径值 Φ ； Q_3 、累积频率曲线上75%处所对应的粒径值 Φ ； $\Phi 5$ 、 $\Phi 10$ 、 $\Phi 16$ 、 $\Phi 25$ 、 $\Phi 50$ 、 $\Phi 84$ 、 $\Phi 95$ ：分别为累积频率曲线上5%、10%、16%、50%、84%和95%处所对应的粒径值 Φ 。

Trask^[18]提出的分选系数计算公式通过累积分布曲线75%与25%对应粒度值之比来判断一个样品的粒度分散程度,其优点在于通过比值消除了单位的影响。Inman^[22]和Folk et al.^[11]则是通过累积曲线不同百分比对应粒度值之差计算分选系数。Inman^[22]给出的公式用 $\Phi 84$ 与 $\Phi 16$ 来计算分选系数,Folk et al.^[11]提出的分选系数公式进一步扩大了参与计算的粒度分布范围,并将两个区间的占比($\Phi 84$ - $\Phi 16$, $\Phi 95$ - $\Phi 5$)与正态分布特征值相结合,有了更广泛的适用性^[1]。

偏度与峰度公式演变大同小异,通过更换累积频率曲线的百分位数来修改公式。Trask^[18]给出的偏度公式仅用到了四分位(即25%、50%、75%)的粒度值,峰度公式用到了首尾各两个四分位(25%、75%)和十分位(10%、90%)的粒度值。Inman^[22]修改的公式使得偏度与峰度的覆盖范围相较于Trask公式更为全面,Folk et al.^[11]在Inman公式基础上的修改则使偏度的计算能够更好地衡量一个样品的总体偏度,峰度的计算则进一步添加了不同百分位数之间的离散度,起到了将峰度公式与粒度分布曲线进行可视化联系的效果^[1]。

1.2.2 矩值法粒度参数公式

常用矩值法的公式由Friedman^[23]与McManus^[24]提出(表5),这两组公式均符合矩值的原始定义,同时又对高阶矩进行了消阶处理,使得矩值法计算结果能与图解法结果处于同一个数量级,增强了图解法与矩值法结果对比的便捷性^[25]。目前的SY/T 5434—2018《碎屑岩粒度分析方法》采用Friedman公式^[26],国家海洋局主持的908专项《海洋底质调查技术规程》则使用了McManus公式^[27]。

表5 常用矩值法公式

Table 5 The formulas used in the calculation of the particle size parameters of the moments method

粒度参数	Friedman(1962)	McManus(1988)
平均粒径	$\bar{x}_{\phi} = \frac{\sum f m_{\phi}}{100}$	$\bar{x} = \frac{\sum f m_{\phi}}{100}$
分选系数	$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum f (m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^2}{100}}$	$\sigma^2 = \frac{\sum f (m_{\phi} - \bar{x})^2}{100}$
偏度	$a_{3\phi} = \frac{\sum f (m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^3}{100\sigma_{\phi}^3}$	$\alpha^3 = \frac{\sum f (m_{\phi} - \bar{x})^3}{100}$
峰度	$a_{4\phi} = \frac{\sum f (m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^4}{100\sigma_{\phi}^4}$	$k^4 = \frac{\sum f (m_{\phi} - \bar{x})^4}{100}$

注： f 、粒级分组含量,用百分数表示； m_{ϕ} 、粒级分组中值粒径,用 Φ 值表示。

2 分选系数使用的演变

为了解国内学者对粒度参数这一术语及其单位的使用方法与使用习惯,以CNKI中国知网数据库为数据源,以“粒度参数”与“粒度”等为主题词进行了文献检索,检索时间跨度为1970—2022年。针对粒度参数计算方法、分选系数或标准偏差命名、分选系数或标准偏差是否使用 Φ 作为单位等问题,对检索的文献进行统计,分析其演变趋势。

2.1 粒度参数专题研究中术语使用的变化

检索到1970年以来专题研究粒度参数的文献74篇,关于分选系数与标准偏差的术语使用大致可以分为三类(图1a):(1)使用分选系数,(2)使用标准偏差,(3)两者均提及。1970—2022年,随着时间的推移,越来越多的研究成果使用分选系数这一术语。关于分选系数的单位,可分为三种情况:(1)分选系数单位为“ Φ ”,(2)分选系数单位为“mm”,(3)分选系

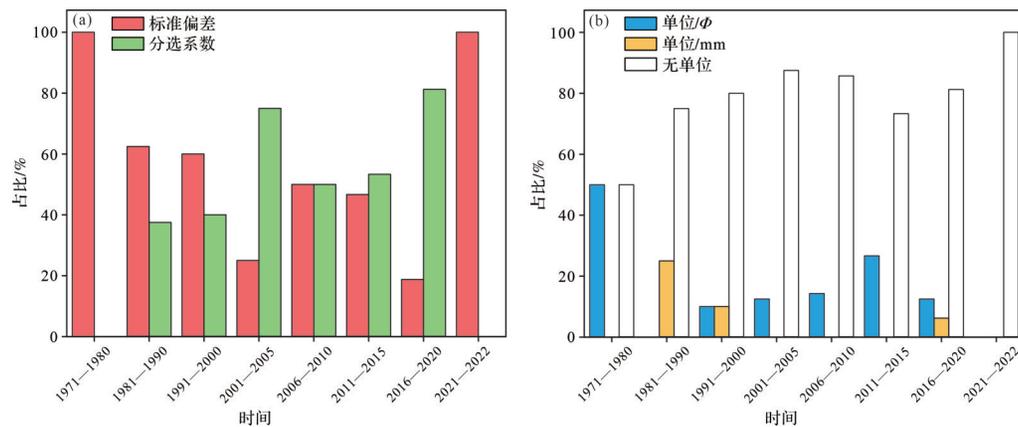


图1 1970年以来粒度参数专题研究中术语及单位使用情况

(a)为使用术语统计;(b)为使用单位统计

Fig.1 The general situation of terms and units used in granulometry parameter research since 1970

(a) statistics of using terms; (b) statistics of using units

数不使用单位。总体而言,多数文献描述分选系数/标准偏差时未使用单位(图1b)。

74篇文献中,关于粒度参数的计算方法可以分为四类(图2):(1)单一矩值法,(2)单一图解法,(3)两种方法均有涉及(一般为针对不同计算方法进行对比研究的文献),(4)计算方法不详(仅使用粒度参数结果进行深入分析)。可以看出,明确提出图解法与矩值法的文献中,分选系数的使用频数占比随着时间的变化在逐步攀升;关于描述分选时是否使用单位这一问题,不使用单位的文献占比总体高于以 Φ 或mm作为单位的文献占比。部分文献未说明粒度参数计算方法,在描述分选时,多数使用标准偏差且不使用单位。

2.2 粒度参数实际应用中术语使用的变化

从文献检索结果中甄选了203篇文献,这些文献侧重于使用粒度参数对某一地区的沉积物特征进行描述与分析。统计显示,分选系数使用占比始终高于标准偏差;1970—2022年,随着时间的变化,分选系数使用占比逐步升高;2021—2022年的最新文献全部使用分选系数。对于描述分选是否使用单位的问题,1970—2022年各年代不使用单位的文献均超过60%,且占比同样呈整体上升趋势。

关于粒度参数的计算方法,在203篇文献中,仅有4篇文献对两种方法均有提及,14篇文献无相关计算方法说明,剩余185篇文献均为单独使用矩值法或图解法其中一种。统计分析表明(图4),矩值法相关文献中,分选系数的使用占比始终高于标准偏差,且大多数不使用单位,1970—2022年使用分选系数与不使用单位的文献占比均逐步上升。所筛选的2021—

2022年9月期间发表的文献中,矩值法相关文献均使用分选系数术语对分选进行描述,且全无单位。

图解法相关文献结果则变化较多。2006年之前,图解法相关文献中标准偏差的使用占比要高于分选系数;2006年之后,更多的研究开始使用分选系数,且占比逐步攀升至100%。在分选的单位使用方面,更多的研究在描述分选时不使用单位,这一倾向随时间的发展整体呈上升趋势。

3篇矩值法与图解法均使用的文献中,对分选性进行描述时均使用分选系数且无单位。14篇未说明粒度参数计算方法的文献中,有11篇文献使用分选系数,有13篇文献未使用单位。

3 讨论

3.1 无量纲参数 Φ

可以数字化的统计数据有四类,分别为定类数据、定序数据、定距数据和定比数据。其中,凡是具有计量单位的物理量,均属于定距(例如温度)和定比(例如质量和长度)。定距和定比的数据具有一项共同特征,即在同等单位尺度下,相同间隔的变化量总是绝对相等的^[28]。例如,1 mm与2 mm之间的间隔以及10 mm与11 mm之间的间隔均为1 mm,且这两个1 mm绝对相等。然而,随着 Φ 值的变化,相同的 Φ 值间隔与相应的粒径值的变化却并不相等。例如,-6 Φ 与-4 Φ 以及4 Φ 与6 Φ 之间的间隔,从直观数值上来看相等,但是,用长度量纲来衡量,前者间隔为48 mm,后者间隔则为0.047 mm,差距极为悬殊(图5)。这表明, Φ 值的数量关系转换为国际标准单

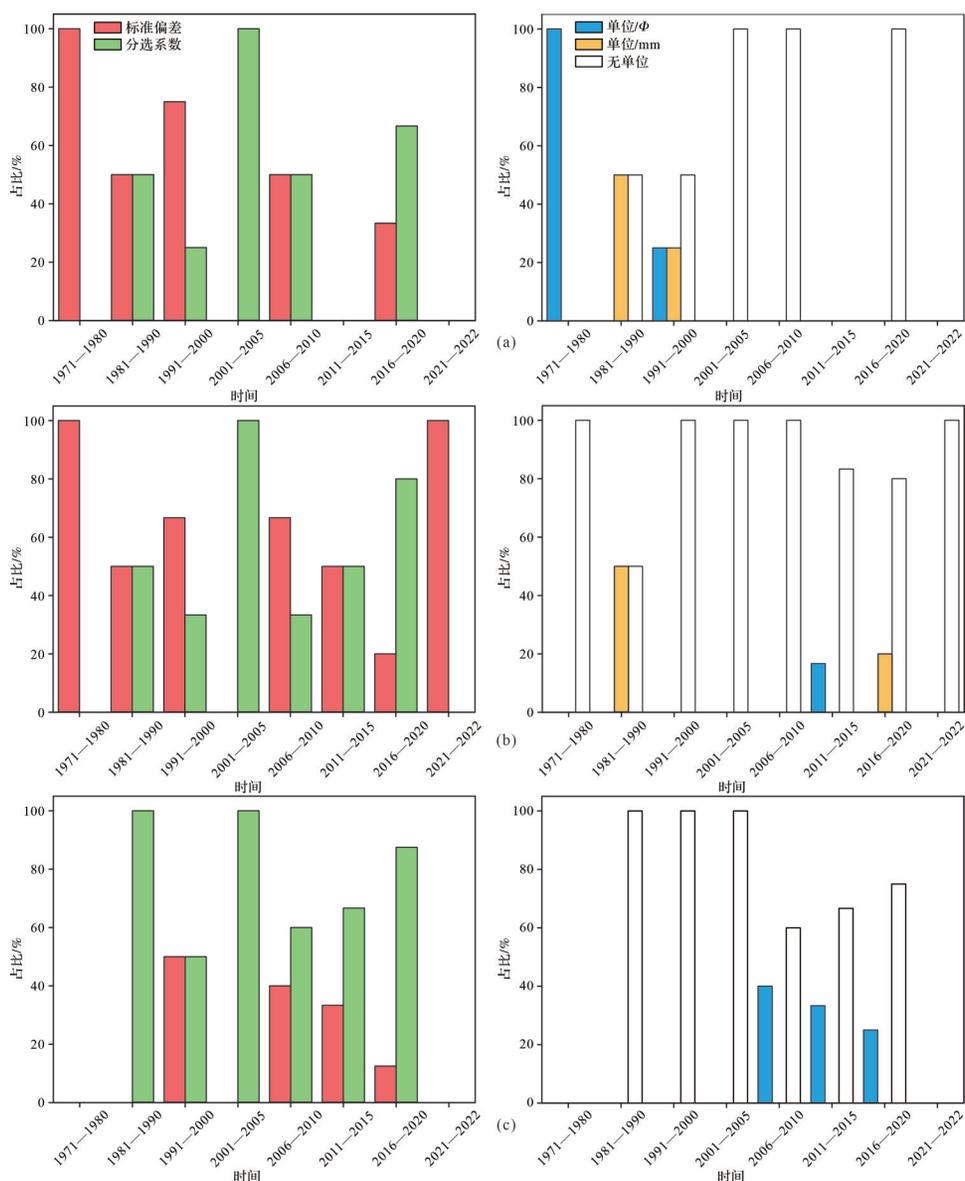


图2 1970年以来不同方法研究粒度参数的术语及单位使用情况

(a)矩值法;(b)图解法;(c)两者兼备

Fig.2 The terms and unit usage of the granulometry parameters studied by the different methods since 1970

(a) moment method; (b) graphic method; (c) both

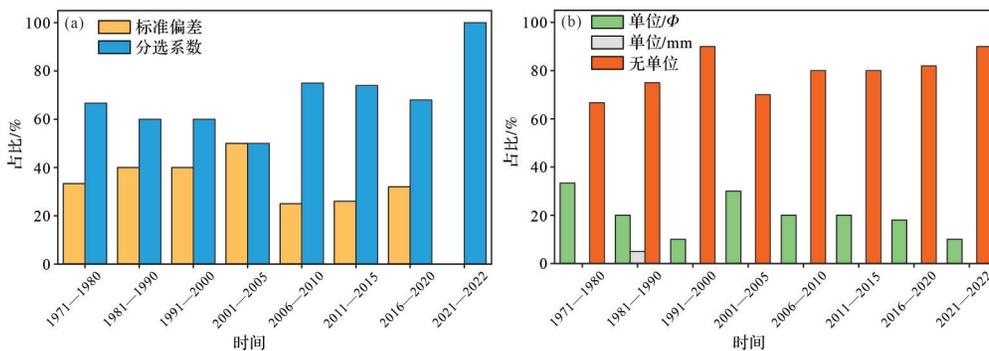


图3 1970年以来粒度相关研究术语及单位使用情况

(a)使用术语统计;(b)使用单位统计

Fig.3 The general situation of granulometry-related terms and their usage in units since 1970

(a) statistics of using terms; (b) statistics of using units

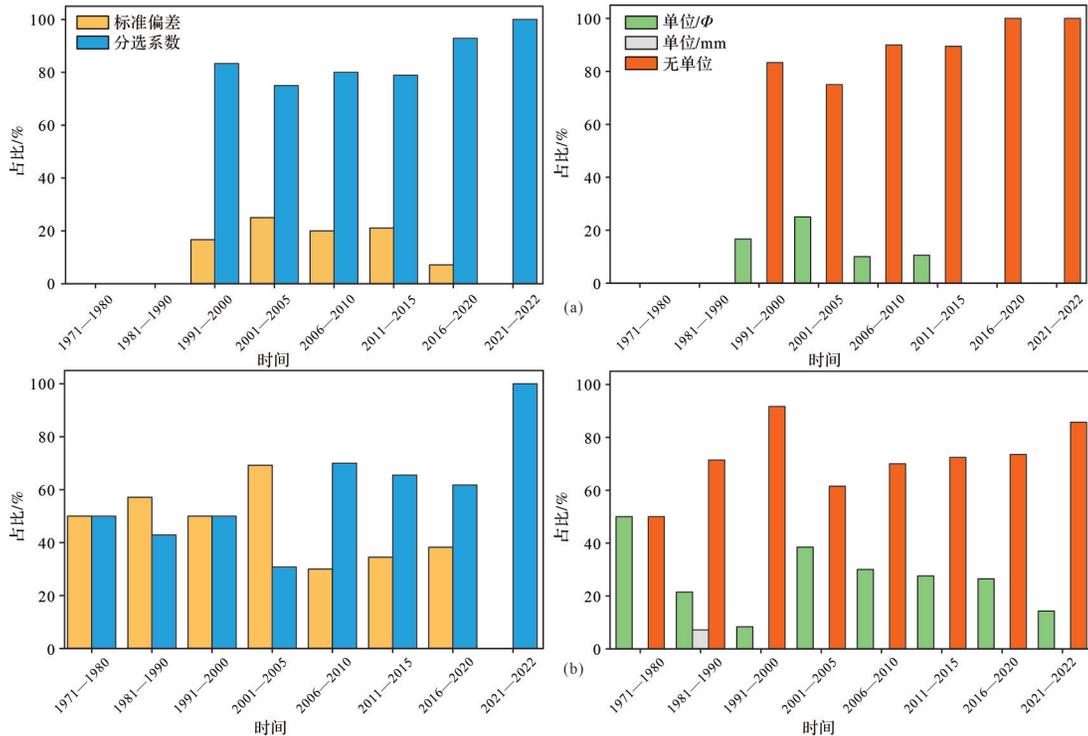


图4 1970年以来不同方法研究粒度的术语及单位使用情况

(a)矩值法;(b)图解法

Fig.4 The usage of terms and units for different methods of granularity-related research since 1970

(a) moments method; (b) graphic method

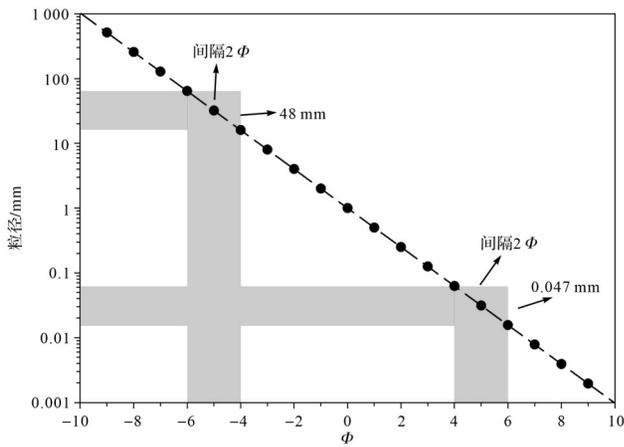


图5 粒度的 Φ 值与长度 (mm) 的对应关系

Fig.5 The correspondence between Φ and the length (mm) of the granularities

位制后,不仅不具有定距或定比的性质,同时 Φ 也不具有单位应有的衡量同类量的作用,因此不能将 Φ 作为单位使用^[29]。

3.2 分选系数

标准偏差主要用来衡量样本数据值偏离算数平均值的程度^[30]。标准偏差越小说明数据值偏离程度越小,数据分布越集中,反之数据分布越分散。分选

系数则是用来评判碎屑沉积物粒度数据离散程度的一个参数^[31-32]。沉积学的分选系数计算公式与统计学的标准偏差计算方式部分重合,但并不完全相同,因此并不能将两者混淆。在碎屑沉积物分选性的评判中,标准偏差已经逐渐演变为分选系数,分选系数已经成为评判碎屑沉积物分选性的专有名词。从众多分选系数计算公式体现的物理本义来看,分选系数的单位并未消除,但从具体运用的角度而言,根据计算公式要求添加单位并无必要。

在数学以外的学科中,系数常用来表示某种性质的程度或者比率的值,或者一个量与另一个量之间的变化关系;系数一般是常数,且不具备任何物理意义。因此,一般而言,系数(例如偏度系数与峰度系数等)并无单位。早在1930年,Trask^[18]已经提出了分选系数(the coefficient of sorting)的术语,用以代替标准偏差。后来的众多学者在表达粒度特征时,将分选系数与偏度系数、峰度系数等处于同等地位。无论是Trask^[18]、Inman^[22]以及Folk *et al.*^[11]对图解法粒度公式的研究,还是Friedman^[23]与McManus^[24]对矩值法粒度公式的研究,均将分选系数、偏度与峰度并列,且在讨论分选时,大多数情况下并未使用单位。

从分选系数的计算公式来看,图解法公式除 Trask 以外,其余公式均无法将物理意义上的单位消除,矩值法计算公式同样如此。然而,在描述分选系数的结果时携带单位,不仅不符合目前大多数学者的使用习惯,更不符合脱离标准偏差后的分选系数的定义。为了解决这一问题,可以效仿 McManus^[17]对 Φ 的计算公式的修正方法,在相应公式的分母添加标准粒径 D (令 $D=1\Phi$),既能保证计算结果的数值大小不受影响,又能使其满足分选系数的定义与功能。建议公式修改如表 6 所示。

3.3 GB/T 12763.8—2007 国标内容

GB/T 12763.8—2007 国标内影响准确性的问题主要有两点:(1) 国标内容与引用文献原文内容不符,(2) 国标上下文不符。第一个问题出现于 6.3.3.3 款,该款对粒度参数公式进行了叙述,明确说明粒度参数采用 Folk-Ward 公式计算, M_z 为平均粒径,单位为 mm;而在福克和沃德公式原文中,则是以 Φ 对平均粒径进行描述。

第二个问题涉及两款,6.3.2.4 款“表 3 粒度分析允许误差范围”与 6.3.3.3 款“表 4 分选程度等级表”内(表 7, 8),分选系数栏均显示单位为 Φ ,而在 6.3.3.3 款粒度参数公式叙述时,分选系数并没有使用单位。

结合国标内出现错误处的上下文,猜测在出版校对或文字编辑时出现了差错,导致现行国标内容

存在的小问题。但由于国标的重要性与权威性,极小的差错将带来较大的影响,建议后期修订时加以改正。

4 结论

(1) 无论是定比单位还是定量单位,在使用时,等值的间隔均需要对应等值量纲差异,而 McManus 对 Φ 定义公式的修正尤其强调了 Φ 无量纲参数的属性。因此,无论是以单位的定义还是 Φ 的属性,均说明 Φ 不能作为单位来使用。

(2) 描述碎屑沉积物分选性最初的参数为标准偏差,但随着时间的变化,分选系数已经逐渐摆脱标准偏差,成为独立地用来描述碎屑沉积物分选性的系数,在使用中往往与偏度系数、峰度系数并列,虽然其公式的物理本义并未完全消除其单位,但是具体使用时无需添加单位。今后,应参考 McManus 去量纲的做法来改进分选系数的公式,选择添加标准粒径来消除其公式中的单位。

(3) 1970—2022 年期间,分选系数的使用频次逐步超越了标准偏差,这一状况在实际地域的粒度特征研究中尤为明显。此外,多数研究均不使用单位对分选性进行描述,且此类文献占比随时间逐步升高。综上所述,1970 年至今,更多的学者倾向于使用分选系数,且不使用 Φ 作为单位对分选性进行评判。

表 6 分选系数公式改善建议表

Table 6 Suggestions for improving the sorting coefficient formulas

方法类别	公式来源	原有公式	修改建议
图解法	Inman ^[22]	$\sigma_{\phi} = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{2}$	$\sigma_{\phi} = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{2D}$
	Folk et al. ^[11]	$\sigma_{\phi} = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$	$\sigma_{\phi} = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4D} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6D}$
矩值法	Friedman ^[23]	$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum f(m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^2}{100}}$	$\sigma_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum f(m_{\phi} - \bar{x}_{\phi})^2}{100D^2}}$
	McManus ^[24]	$\sigma^2 = \frac{\sum f(m_{\phi} - \bar{x})^2}{100}$	$\sigma^2 = \frac{\sum f(m_{\phi} - \bar{x})^2}{100D^2}$

注: f : 粒级分组含量,用百分数表示; m_{ϕ} : 粒级分组中值粒径,用 Φ 值表示; D : 标准粒径,以 Φ 值计量, $D=1\Phi$ 。

表 7 粒度分析允许误差范围^[2]

Table 7 Permissible error range for granularity analysis^[2]

分析方法	内检数/%	校正系数	平均粒径(M_z)	分选系数(σ_{ϕ})
综合法	20~30	0.95~1.05	0.40 Φ	0.3 Φ
筛析法	10~20	0.99~1.01	0.15 Φ	0.1 Φ
沉析法	20~30	0.95~1.05	0.40 Φ	0.3 Φ
激光法	5~10	0.99~1.01	0.15 Φ	0.1 Φ

表8 分选程度等级表^[2]Table 8 Sorting classification levels^[2]

分选等级	σ_s
分选极好	<0.35 ϕ
分选好	0.35~0.71 ϕ
分选中等	0.71~1.00 ϕ
分选差	1.00~4.00 ϕ
分选极差	>4.00 ϕ

(4) 现行国标中对 Folk-Ward 公式的引用以及分选系数单位的描述均存在较为明显的出版错误,需要在修订时加以改正。

致谢 王孟瑶、何方婷在写作中提供了帮助与建议,谨致谢忱。

参考文献(References)

- [1] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763. 8—2007 海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查[S]. 北京:中国标准出版社,2008: 8-9. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763. 8-2007 Specifications for oceanographic survey - Part 8: Marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 8-9.]
- [3] 孙有斌,高抒,李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83-86. [Sun Youbin, Gao Shu, Li Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 83-86.]
- [4] 田元,范德江,张喜林,等. 东海内陆架沉积物敏感级级构成及其地质意义[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(2): 319-326. [Tian Yuan, Fan Dejiang, Zhang Xilin, et al. Sensitive grain size components and their geological implication in the inner shelf of the east China sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(2): 319-326.]
- [5] 张晓东,翟世奎,许淑梅. 端元分析模型在长江口邻近海域沉积物粒度数据反演方面的应用[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 159-166. [Zhang Xiaodong, Zhai Shikui, Xu Shumei. The application of grain-size end-member modeling to the shelf near the estuary of Changjiang river in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 159-166.]
- [6] 石学法,刘升发,乔淑卿,等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 19-30. [Shi Xuefa, Liu Shengfa, Qiao Shuqing, et al. Depositional features and palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 19-30.]
- [7] Gao S, Collins M B. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments[J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 70-78.
- [8] 阮美娜,李炎,陈一宁,等. 夏季台湾海峡的悬浮颗粒通道:现场粒度端元分析的证据[J]. *科学通报*, 2012, 57(36): 3522-3532. [Ruan Meina, Li Yan, Chen Yining, et al. Summer pathways for suspended particles across the Taiwan Strait: Evidence from the end-member analysis of in-situ particle size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(36): 3522-3532.]
- [9] 孙东怀,安芷生,苏瑞侠,等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(3): 269-276. [Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia, et al. Mathematical methods for separation of grain size. Components in paleoenvironment and their applications[J]. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(3): 269-276.]
- [10] 薛成凤,贾建军,高抒,等. 中小河流对长江水下三角洲远端泥沉积的贡献:以椒江和瓯江为例[J]. *海洋学报*, 2018, 40(5): 75-89. [Xue Chengfeng, Jia Jianjun, Gao Shu, et al. The contribution of Middle and small rivers to the distal mud of subaqueous Changjiang Delta: Results from Jiaojiang River and Oujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(5): 75-89.]
- [11] Udden J A. The mechanical composition of wind deposits[M]. Rock Island: Lutheran Augustana Book Concern, 1898: 1-69.
- [12] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments[J]. *GSA Bulletin*, 1914, 25(1): 655-744.
- [13] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [14] Krumbein W C. Size frequency distributions of sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1934, 4(2): 65-77.
- [15] Krumbein W C. Application of logarithmic moments to size-frequency distributions of sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1936, 6(1): 35-47.
- [16] Krumbein W C. Size frequency distributions of sediments and the normal phi curve[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1938, 8(3): 84-90.
- [17] McManus D A. A criticism of certain usage of the phi-notation [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1963, 33(3): 670-674.
- [18] Trask P D. Mechanical analyses of sediments by centrifuge[J]. *Economic Geology*, 1930, 25(6): 581-599.
- [19] 宋进喜,于芳,王珍. 渭河陕西段河床沉积物的粒度参数分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 75-78. [Song Jinxi, Yu Fang, Wang Zhen. Parameter analysis on grain size distribution of streambed sediment in the Weihe river of Shaanxi province [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(4): 75-78.]
- [20] 梁小筠. 正态性检验[M]. 北京:中国统计出版社,1997: 1-32. [Liang Xiaojun. Normality test[M]. Beijing: China Statistics Press, 1997: 1-32.]

- [21] 贾俊平,何晓群,金勇进. 统计学[M]. 4版. 北京:中国人民大学出版社,2009:106. [Jia Junping, He Xiaoqun, Jin Yongjin. Statistics[M]. 4th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2009: 106.]
- [22] Inman D L. Measures for describing the size distribution of sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1952, 22(3): 125-145.
- [23] Friedman G M. On sorting, sorting coefficients, and the lognormality of the grain-size distribution of sandstones[J]. The Journal of Geology, 1962, 70(6): 737-753.
- [24] McManus J. Grain size determination and interpretation[M]// Tucker M. Techniques in sedimentology. Oxford: Blackwell Scientific, 1988: 63-85.
- [25] 蔡廷禄,贾建军,汪亚平. 河口海岸和近海沉积物的粒度资料同化技术[J]. 海洋地质与第四纪地质,2014,34(1):185-193. [Cai Tinglu, Jia Jianjun, Wang Yaping. Techniques for particle size data standardization: An example from estuarine and coastal sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(1): 185-193.]
- [26] 国家能源局. SY/T 5434—2018 碎屑岩粒度分析方法[S]. 北京:石油工业出版社,2018:10. [National Energy Administration. SY/T 5434-2018 Analysis method for particle size of clastic rocks[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 10.]
- [27] 国家海洋局908专项办公室. 海洋底质调查技术规程[M]. 北京:海洋出版社,2006. [908Special Office of State Oceanic Administration. Oceanic survey technology regulations[M]. Beijing: Ocean Press, 2006.]
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 3358.2—2009 统计学词汇及符号 第2部分:应用统计[S]. 北京:中国标准出版社,2010. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 3358.2-2009 Statistics-vocabulary and symbols-Part 2: Applied statistics[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.]
- [29] 刘珊珊. 关于粒径“ Φ ”的规范表达[J]. 编辑学报,2019,31(增刊1):146-147. [Liu Shanshan. Discussion on the normative expression of sediment grain size ‘ Φ ’[J]. Acta Editologica, 2019, 31(Suppl. 1): 146-147.]
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 3358.1—2009 统计学词汇及符号 第1部分:一般统计术语与用于概率的术语[S]. 北京:中国标准出版社,2010. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 3358.1-2009 Statistics-vocabulary and symbols-Part 1: General statistical terms and terms used in probability[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.]
- [31] 中国石油学会,石油大学. 石油技术辞典[M]. 北京:石油工业出版社,1996. [Chinese Petroleum Society, China University of Petroleum. Petroleum technology dictionary[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.]
- [32] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(11): 1237-1248.

The Φ Value Expresses Granularity and the Unit Problem of the Sorting Coefficient

CHEN Qi¹, TANG WenWen¹, XUE ChengFeng¹, YANG Yang², GAO WenHua³, YANG JianYing⁴, JIA JianJun¹

1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2. School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

3. The College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China

4. Comprehensive Survey Command Center for Natural Resources, China Geological Survey, Beijing 100055, China

Abstract: [Objective] The grain-size parameter plays a vital role in characterizing the basic features of sediments, and it is a crucial reference for distinguishing sedimentary environments. For a long time, the particle size, Φ , and particle-size parameters based on the equal ratio system and negative logarithm conversion have been widely used in the field of geology and marine science, and have become the national standard. Among them, the mathematical connotation of the sorting coefficient is closely related to the standard deviation, so whether the sorting coefficient has the same dimension as the particle size, and what units the sorting coefficient should have, have become a controversial issues. [Methods] In order to clarify this problem, this paper reviews the Udden-Wentworth equal ratio system and

the origin of the Φ value, and provides modifications to the currently used calculation formulas. We discuss the evolutionary process of the calculation formulas used for determining particle-size parameters, such as the sorting coefficient used in the graphic and the moment methods, and analyze the usage habits of the terms and units of the sorting coefficient used by Chinese scholars since 1970. [Results] (1) In 1963, McManus modified the calculation formula of Φ and established it as a dimensionless parameter, making Φ a convenient index to express the particle size; however, Φ does not have the inherent property of a unit of measurement, and it cannot be used as a unit of length dimension (i.e., particle size). (2) Although the sorting coefficient is derived from the statistical standard deviation, it has been independently developed as an important parameter to describe the sorting of detrital sediments, which is parallel with the skewness coefficient, kurtosis coefficient, etc. It is recommended that units should not be added when Φ is used, because there are still units in the results of the existing sorting coefficient calculation formula. Therefore, the formula of the sorting coefficient is improved by referring to McManus' method of removing its dimension. (3) The results of literature statistics show that most domestic scholars tend to use the term "sorting coefficient" rather than the statistical term "standard deviation", and do not use units when describing the sorting results. In all statistical kinds of literature, with the shortening of time, the proportion of literature using the term "sorting coefficient" and describing the sorting results without using units has increased. (4) The current national standard GB/T 12763.8-2007 states that the unit of the sorting coefficient is Φ . We find that there is a typographical error in the description of the particle size parameter calculation formula, and it is suggested that this needs to be corrected when next revising the standard. [Conclusions] In this paper, the origin and evolution of Φ and the existing commonly used sorting coefficient calculation formulas are reviewed based on various definitions, and the current situation of the usage of terms and units of the sorting coefficient in China is analyzed. Finally, on the basis of previous studies, some suggestions are put forward to modify the sorting coefficient calculation formula. The above work can provide suggestions for the revision and improvement of marine investigation norms, and provide suggestions for promoting the unification and standardization of terms.

Key words: Φ ; grain-size parameters; sorting coefficient; GB/T 12763.8-2007