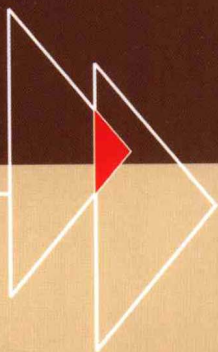
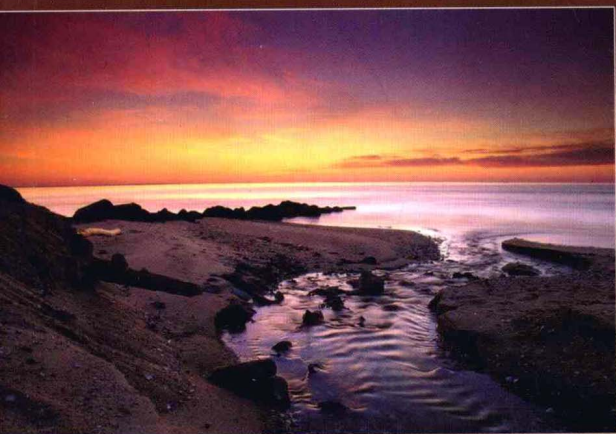


海岸与河口黏性泥沙 运动规律的研究和应用

黄建维 编著



海洋出版社

海岸与河口黏性泥沙运动 规律的研究和应用

黄建维 编著

海洋出版社

2008 年 · 北京

图书在版编目(CIP)数据

海岸与河口黏性泥沙运动规律的研究和应用/黄建维编著. —北京:海洋出版社,2008. 11

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7145 - 4

I. 海… II. 黄… III. ①海岸—泥沙运动—运动规律—研究
②河口—泥沙运动—运动规律—研究 IV. TV142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 170923 号

责任编辑:陈莎莎

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京海洋印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月北京第 1 次印刷

开本:880mm×1230mm 1/32 印张:5.5

字数:150 千字 定价:38.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

我国淤泥质海岸有广泛的分布,主要分布在辽东湾、渤海湾、莱州湾、苏北、长江口、浙闽港湾和珠江口外等岸线,其总长度在 4 000 km 以上,约占全国海岸线长度的四分之一。我国属淤泥质河口的有长江口、黄河口和珠江口,基本包括了我国的所有大江大河口。淤泥质海岸在欧洲北海沿岸和法国西海岸、美国 and 南美洲、印度等均有广泛的分布。

淤泥质海岸河口的泥沙均属黏性细颗粒泥沙,由于泥沙颗粒极细受胶体化学絮凝因素的影响,其运动特性和规律十分复杂,而我国海岸、河口、一系列港口、河口开发和工程建设均面临和必须解决这些技术难题。在过去半个世纪的漫长岁月中,中外泥沙科技工作者艰难创业、填补空白,对海岸河口黏性泥沙的工程问题经历了从定性到定量、从絮凝机理研究到工程应用两大阶段。目前世界各国已出版多部专著,并经常组织和召开这方面的国际性专业学术会议,我国科技工作者已能较好地定量解决一系列海岸河口黏性泥沙的工程问题,但迄今为止还没有组织过一次专业性的学术会议,也没见出版过这方面的专著。笔者在过去半个世纪时间里亲身经历了海岸河口黏性泥沙科研工作的全过程,并于 1996 年获钱宁泥沙科学论文奖,本书以笔者的科研工作和成果为主线,结合中外学术界和工程界在该

领域的重要贡献和新近的科研成果,在海岸与河口黏性泥沙运动规律的研究和应用方面进行一个初步的系统总结,希望达到系统总结和交流应用的目的。

在笔者为本书而开展的近半个世纪的科研工作中,先后得到黄胜教授、刘家驹教授级高级工程师、唐存本教授级高级工程师、金缪教授的关心和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

本书由南京水利科学研究院出版基金资助出版,谨此表示感谢。

黄建维

2008 年 4 月于南京

目 次

第一章 海岸河口黏性泥沙输移规律研究	(1)
第一节 黏性泥沙的絮凝机理	(1)
第二节 海岸河口黏性泥沙静水沉降规律	(4)
1.2.1 黏性泥沙静水沉降的基本物理图案	(4)
1.2.2 黏性泥沙絮凝沉速的测试方法和计量标准	(6)
1.2.3 盐度对絮凝沉速的影响	(9)
1.2.4 沉降距离和含沙量对絮凝沉速的影响	(11)
1.2.5 水温对絮凝沉速的影响	(12)
1.2.6 粒径对絮凝沉速的影响	(14)
1.2.7 絮凝沉速的结构式	(16)
第三节 海岸河口黏性泥沙的淤积模式和动水沉速	(18)
1.3.1 淤积模式	(18)
1.3.2 黏性泥沙在动水中沉速的研究途径及试验方法 的探讨	(20)
1.3.3 黏性泥沙在流动盐水的沉降特性和淤积模式 ...	(22)
1.3.4 黏性泥沙动水沉速结构式	(24)
第四节 淤泥的流变特性	(29)
1.4.1 淤泥的黏性及流型	(29)
1.4.2 淤泥的宾汉极限剪应力	(34)
第五节 黏性泥沙的群体和密实沉降	(36)
第六节 黏性泥沙的起动流速	(39)

1.6.1	黏性泥沙起动流速公式的述评	(39)
1.6.2	实验公式	(43)
1.6.3	黏性泥沙絮凝理论的应用	(45)
第七节	黏性泥沙的冲刷率	(48)
1.7.1	前人研究成果的简要回顾	(49)
1.7.2	黏性泥沙冲刷试验方法简介	(50)
1.7.3	冲刷床面类型和冲刷性态	(52)
1.7.4	新淤泥冲刷率关系式的探讨	(56)
第二章	海岸河口黏性泥沙运动规律的工程应用	(59)
第一节	适航水深的研究和应用	(59)
2.1.1	淤泥质港口河口适航水深资源开发的意义	(59)
2.1.2	国内外适航水深资源开发应用概况	(60)
2.1.3	适航水深的界定和适航容量	(62)
2.1.4	适航水深的现场测量技术	(71)
第二节	淤泥质港口河口疏浚技术的研究和应用	(76)
2.2.1	疏浚技术应用研究的意义	(76)
2.2.2	淤泥质港口维护性疏浚工程土方量计量技术的研究 和应用	(77)
2.2.3	淤泥质港口河口的备淤深度和强淤时疏浚对策的 研究和应用	(82)
第三节	淤泥质海岸河口开挖航槽泥沙回淤计算的研究和 应用	(89)
2.3.1	运用无黏性泥沙淤积模式进行移植和改进的 途径	(89)
2.3.2	运用黏性泥沙淤积模式所建立的回淤预报	

公式	(100)
第四节 淤泥质海岸河口浑水动床物理模型模拟技术的研究 和应用	(117)
2.4.1 黏性泥沙与无黏性泥沙浑水动床物理模型设计的 基本区别	(117)
2.4.2 淤泥质海岸河口工程实例的水沙运动及淤积的 特点分析	(118)
2.4.3 淤泥质海岸河口浑水动床物理模型设计的 技术思路	(122)
2.4.4 模型相似准则、比尺和模型沙的选择	(123)
2.4.5 代表潮、代表波和主波向	(130)
2.4.6 模型布置及设备系统的选型和设计	(132)
2.4.7 验证试验	(134)
2.4.8 潮波综合作用下淤泥质海岸河口浑水动床物理 模型模拟技术总结概要	(138)
第五节 淤泥质海岸河口黏性泥沙数学模型的研究和 应用	(140)
2.5.1 黏性泥沙数学模型在泥沙理论应用方面的 研究进展	(140)
2.5.2 用无黏性泥沙运动理论改进的黏性泥沙数学 模型	(142)
2.5.3 用黏性泥沙运动规律建立的黏性泥沙数学 模型	(146)
第六节 吹填筑陆和软基加固技术在淤泥质港口筑港开发中的 研究和应用	(148)

2.6.1 吹填筑陆成为淤泥质港口减淤达成良性循环的有效措施 (149)

2.6.2 软土地基处理技术及其在淤泥质港口建设中的应用 (157)

参考文献 (161)

第一章 海岸河口黏性泥沙 输移规律研究

第一节 黏性泥沙的絮凝机理

早年研究黏性泥沙絮凝机理的有清华大学夏震寰教授、宋根培教授,北京水利科学院钱宁、万兆惠教授在其《泥沙运动力学》^[1]一书中作了系统介绍。近年清华大学杨铁笙等^[2]对该领域进行了系统完整的论述。

杨铁笙等指出:对絮凝过程的研究有三个重要阶段,即 M. Von Smoluchowski 的絮凝动力学理论、胶体稳定性(DLVO)理论和分形几何理论在絮凝中的应用。

1917 年, M. Von Smoluchowski 基于扩散理论,建立了离散型的絮凝动力学方程,在 6 个假设前提下,给出了由循直线路径相互碰撞并无条件黏结的两颗粒(或絮团)生成新颗粒(絮团)的速率方程,时至今日,该方程仍然是胶体化学中讨论絮凝动力过程的基础。由于假设简单,当时胶体稳定性理论和分形几何理论尚未建立,所以 Smoluchowski 的絮凝速率不能直接用于分析实际发生的许多絮凝现象。描述絮团碰撞概率的碰撞频率函数 $\beta(i, j)$ 和描述碰撞絮团或颗粒发生黏结比例的碰撞效率系数 α 均无法确定。此外,当时在没有发明计算机的情况下,用 M. Von Smoluchowski 理论进行絮凝发展过程的直接模拟也是不可想象的。

天然河流的黏性细颗粒泥沙矿物成分多由铝或镁的硅酸盐晶体

构成。因异价离子的同晶代换效应,在水中泥沙颗粒表面电荷显负,可以用胶体化学中的胶体稳定性理论解释其聚散行为。1879 年 H. Von Helmholtz 提出用平板双电层模型解释表面带电微粒在溶液中的电动现象,后经 G. Gouy 和 D. L. Chapman 的改进,形成扩散双电层模型,用以描述有电解质存在的溶液中带电微粒周围电位分布状况,并在一定假设条件下获得电位分布微分方程:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{2n_0ze}{\varepsilon} \text{sh}(ze\varphi/K_B T), \quad (1)$$

式中, φ 为扩散双电层电位; x 为双电层某处到颗粒表面的距离; n_0 为电解质(盐)浓度; z 为电解质阳离子化合价; e 为电荷量; ε 为介质的介电常数; K_B, T 分别为 Boltzmann 常数和温度。当微粒表面电位较低时,式(1)可线性化,并求得近似解为

$$\varphi = \varphi_0 \exp(-kx), \quad (2)$$

$$k = \left[\frac{2n_0z^2e^2}{\varepsilon K_B T} \right], \quad (3)$$

式中, φ_0 为颗粒表面电势; k^{-1} 为双电层的厚度(具有长度量纲)。用式(3)可以解释温度、盐分浓度和盐分阳离子化合价对水中黏性泥沙絮凝的影响作用。从式(2)可以看出带电微粒间的相斥作用随距离的变化。

范德华(Van Der Waals)引力系指溶液中两个颗粒间的吸引力,它起源于作用于原子或分子间的同类作用力,即伦敦(London)力。在胶体化学中,假设组成胶体颗粒的原子或分子伦敦力可以叠加,于是两颗粒间的作用可由颗粒内原子或分子作用叠加和代替,叠加结果就是颗粒间的范德华引力。

20 世纪 40 年代,前苏联学者 B. V. Deryagin, L. Landau 和荷兰学者 E. J. Verwey, J. T. G. Overbeek 分别研究了扩散双电层引起的斥力和范德华引力交互作用下胶体颗粒间的交互作用能,提出的关于各种形状微粒之间的相互吸引能,解释了颗粒发生可逆聚集(絮凝)和不可逆聚集(凝聚)的原因。根据交互作用能对距离的微商为零

且全为零的两个条件,导出胶体颗粒发生聚沉时电解质浓度的临界值 $n_{0,c}$,即胶体稳定性条件:

$$n_{0,c} = C \frac{\varepsilon^3 (K_B T)^5 \gamma_0^4}{A^2 z^6}, \quad (4)$$

式中, $\gamma_0 = \frac{\exp(ze\varphi_0/2K_B T) - 1}{\exp(ze\varphi_0/2K_B T) + 1}$; C 为计算机常数; A 为 Hamaker 常数,它与组成粒子的分子之间的相互作用参数有关,是物质的特征常数。

据此,两个黏性细颗粒泥沙之间的交互作用能与两颗粒表面之间距离的关系可用图 1-1 表示。可见,当两颗粒逐渐靠近时,交互作用能出现 3 个极值,分别为第二极小值、极大值、第一极小值。在极大值处,两颗粒之间出现最大的斥能作用,称之为垒,在第二极小值处的黏结是可逆黏结;颗粒如能超过垒,则将在第一极小值处发生不可逆黏结。

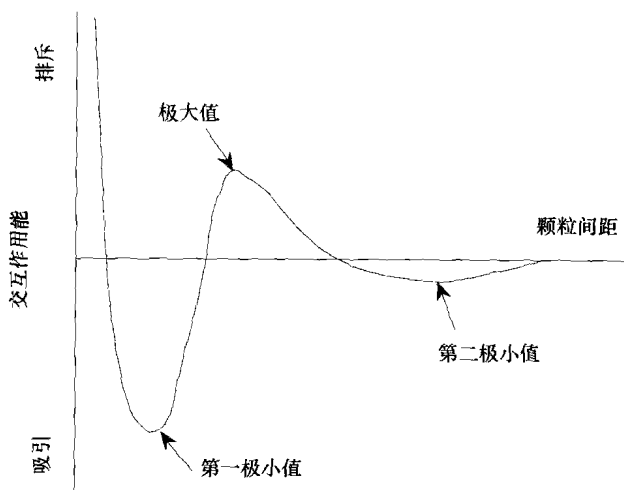


图 1-1 颗粒交互作用能曲线

M. Von Smoluchowski 当初在建立方程时,假设所有两两碰撞的絮团都是实心球体,絮团密度与单个微粒相同,并且碰撞后仍然形成实心球体,其体积等于碰撞絮团之和,但大量试验和野外观测表明,絮团并非是一简单球体,颗粒排列模式很复杂;絮团密度是变化的,半径越大,越显疏松。在分形几何理论确立并被应用于研究胶体颗粒聚集现象之后,就能够根据观测到絮团形态确定其尺寸,进而确定其密度、沉速和更合乎实际的碰撞频率函数 $\beta(i,j)$,加之高性能的计算机的出现,使絮凝发育过程的直接模拟成为可能。

第二节 海岸河口黏性泥沙静水沉降规律

1.2.1 黏性泥沙静水沉降的基本物理图案^[3~4]

水体中不同含沙浓度下无黏性泥沙的沉降性态和规律已为大家所熟知,大多数学者根据沉降机理的不同分为低含量和高含量两大类,尽管它们的机理和沉降特性有所不同,但却始终保持沉速随含沙量的增大而减小这一趋向(尽管衰减程度不同)。

黏性泥沙由于其颗粒极细,特别在电解质(海水)的作用下会发生絮凝现象,即除了原有的物理力学作用外,胶体化学的作用占了很大的比重,沉降性态和机理发生了很大的变化。根据笔者的试验结果,黏性泥沙随水体中含沙量的不同,按其沉降性态和机理之不同,大致可以区分出四个性质不同的区段^[3],如图1-2所示含沙量的影响是主要因素,但不是唯一因素,关于各区段的界定问题尚有待今后进一步研究探明。

1. 絮凝沉降段

当含沙量较低时,含沙量除了引起沉速减缓的作用外,更由于絮凝作用而加速沉降,并且大大超过前者。这种絮凝作用的结果,将使整个问题不再属于恒定运动的范畴,任何一个水平断面的平均沉速将是时间的函数,黏性泥沙沉速随时间而变化的典型过程线如图

1-3所示。由图中可看出,絮凝沉降段内的沉速随含沙量、沉距和水温的增加而增大,这是絮凝沉降的基本属性,也是无黏性泥沙所不具备的特性。

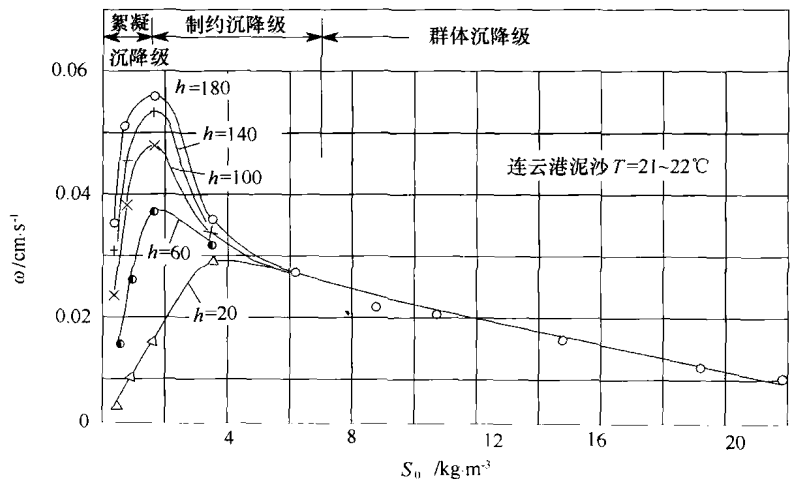


图 1-2 沉速随沉距和含沙量变化图

ω 为絮凝沉速, S_0 为初始含沙量, h 为沉降距离 (cm), T 为水温

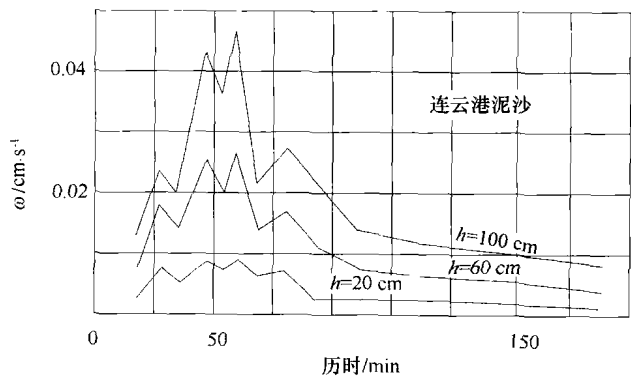


图 1-3 黏性泥沙典型沉降过程线

2. 制约沉降段

起始含沙量超过一定程度后,含沙量的阻滞作用超过了絮凝的加速作用。随着含沙量的增加,沉速迅速减小,沉速仍是不恒定的。

3. 群体沉降段

随着含沙量进一步增大,黏性泥沙之间的絮凝羁绊而形成一个整体结构,沿水深各处颗粒之间的相对位置保持一种相对稳定状态。从外观上看,表现为搅拌均匀后的浑水经过大约 2 ~ 30min 后开始形成一个清浑水交界面,界面沉降是随时间以均匀速度下沉的,平均沉速不再随时间和深度而变化。在这一区段内的沉降机理,与无黏性泥沙在高含量下的沉降有类同之处,但由于絮凝羁绊力的影响,沉速随含沙量的增长而产生的衰减,远较无黏性泥沙衰减得快。

4. 密实段

等速沉降不存在,随着颗粒间孔隙水的溢出而逐步固结,流态从塑性状态最后发展成固态。

絮凝沉降段为一般港池航道中最为常见的悬移质状态,通常应用在航道的冲淤计算中;在疏浚挖泥和航行条件中,群体沉降有重要的应用价值,而密实段的机理和规律则广泛应用在港口吹填筑陆和软基加固技术中。

1.2.2 黏性泥沙絮凝沉速的测试方法和计量标准

作为水体中微粒子的粒度测定方法有多种,例如:光电或电子显微镜法、沉降分析法、放射线法、光线分散或吸收法和表面吸着法等^[4]。在沉降分析法中,大致有液体比重计法、吸管法和累积重量法等。比重计法精度较差,对于测定小含沙量下的絮凝沉降,以吸管法和累积重量法较为切实可行。

众所周知,上述种种粒子粒度的测定方法均是将水中粒子进行机械的和化学的分散处理,所测的粒度是粒子全分散时的粒度,所以用这种方法测定粒度后反算的粒子沉速是代表全分散状态下的单个粒子的沉速,而工程泥沙中关心的是黏性泥沙在海水中的絮凝沉速。

关于黏性泥沙的测试方法一般常用沉降分析法,到目前为止,其计算方法大致有三种。

1. 累计重量法 (R. T. Mclaughlin)

根据沙量连续方程式可得

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\omega}S)}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

对水深 z 积分得

$$(\bar{\omega}S)_{z=h} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h S dz. \quad (6)$$

通过测定不同沉降历时沿水深 h 的含沙量分布,运用图积分或有限差分法,即可求出不同水深 h 处的瞬时沉速随沉降历时 t 的变化,求各水深处的断面平均沉速,一般以含沙量达到初始含沙量的 50% 时的沉降历时 $t_{0.5}$ 内的平均值,得水深 h 处的断面平均沉速为

$$(\omega_{50\%})_{MC} = \frac{1}{t_{0.5}} \int_0^{t_{0.5}} \omega_i dt. \quad (7)$$

2. 中值沉速计算方法

中值沉速计算法是根据各水深 h_i 处的含沙量为初始含沙量的 50% 时的沉降历时的平均值 $t_{0.5}$ 得到的沉速 ω_{50} 作为计算标准,即

$$\omega_{50} = h/t_{0.5}. \quad (8)$$

3. 沉降历时线法

宋根培以各种不同的含沙量比(等含沙量线)的沉降历时曲线($h-t$)可获得水深 h 处沉降历时 t 的沉速 $\omega^{[5]}$ 为

$$\omega = dh/dt. \quad (9)$$

沉降历时线可以分为三个区段(见图 1-4),即变速段、恒定段和受阻段,宋根培建议用恒定段沉速作为代表沉速^[5]。

笔者认为,在方法论上,Mclaughlin 方法类似于欧拉法或“场的方法”,而沉降历时线法类似于拉格朗日法或“跟踪法”,因此,前者求出的是整个沉降期间通过各固定断面的各级颗粒的断面平均沉

速,而后者则是对表面粒子的跟踪沉降直至恒定段为止。应当看到这两者对进一步分析黏性泥沙静水沉降特性都是有益的。

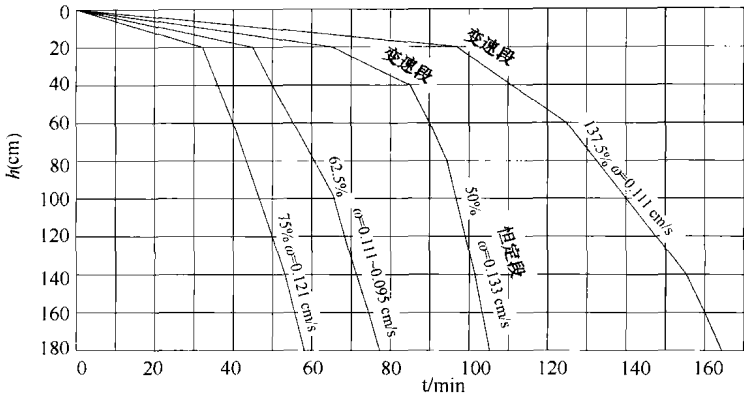


图 1-4 沉降历时线法不同含沙量比沉速的演变

就工程实用观点来看,在有潮港口河口的憩流期间,由外海掀起、悬扬和输送至港池、航道的泥沙沉积,采用累计重量(Mclaughlin)方法所得的沉速分析淤积过程和淤积量较为合理。沉降历时线法不计变速段,但在实际回淤过程中又确实存在,而且泥沙越细,含沙量和盐度越小,变速段历时越长。如若仅以恒定段沉速计算回淤量就会偏大很多。以此沉速计算港池淤积过程将会很快澄清,但实际却远未澄清。因此,从港口、河口、港池航道回淤分析预报的实际要求出发,我们着重研究按累计重量算法所得断面平均沉速的试验研究成果。

利用式(5),通过测定不同时间含沙量的垂线分布,运用图积分的方法,即可求出不同水深处的瞬时沉速 $\bar{\omega}$ 随时间的变化。Mclaughlin 命名此法为“重复深度吸管法”,它实质上是“吸管法”的进一步改进。

根据以上讨论,笔者曾选用“重复深度吸管法”进行有关黏性泥