

# 岸滩侧向淘刷及崩塌模拟技术研究综述

刘月楼, 何士华\*, 陈进佳 (昆明理工大学电力工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要** 在综述国内外岸滩侧向淘刷及崩塌研究进展的基础上, 了解其冲刷机理及其成因, 总结出其冲刷过程的3种模拟方法, 即经验模拟法、极值假说模拟法和力学模拟技术。论述岸滩侧向淘刷及崩塌模拟的过程以及存在的问题, 并分析了3种模拟技术的适用条件及优缺点。最后, 对其淘刷机理及崩塌模拟技术有待进一步解决的问题和改进意见进行展望。

**关键词** 岸滩淘刷; 崩塌机理; 模拟技术

**中图分类号** TV 143 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)05-0207-04

## Research Summary of Simulation Technology of Lateral Beach Scour and Collapse

LIU Yue-lou, HE Shi-hua\*, CHEN Jin-jia (Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500)

**Abstract** Based on the proceedings of simulation technology of lateral beach scour and collapse at home and abroad, according to the erosion mechanism and its origin, three main simulation methods were identified, which were empirical simulation method, extreme hypotheses simulation method, mechanics simulation technology. The simulation process of lateral beach scour and collapse and existent problems were reviewed, the applicable conditions and advantages and disadvantages of three methods were analyzed. At last, the further problems and improving suggestions of simulation technology of lateral beach scour and collapse were prospected.

**Key words** Beach scour; Collapse mechanism; Simulation technology

岸滩侧向淘刷及崩塌在冲积平原河流中时有发生, 是指河岸在天然情况或者人为因素影响下产生冲刷或崩塌使河宽增加的过程, 它不但影响河岸土地的综合规划利用, 而且影响堤防的安全和稳定。因此, 研究冲积河道在天然情况或人为因素干扰下岸滩侧向淘刷及崩塌的模拟技术, 具有十分重要的意义。尽管人们对此方面的研究取得了一定的进展, 但未对其进行系统的阐述与分析。笔者对岸滩侧向淘刷及崩塌研究机理、影响因素以及模拟方法进行全面的分类和总结, 针对各类方法的适用范围、优缺点及该领域未来研究问题提出具体的建议。

## 1 国内外研究现状

研究岸滩侧向淘刷及崩塌的机理不仅能够预测其变化趋势、丰富河床演变的理论, 还能够对河道工程的整治进行指导, 从而达到趋利避害的作用。随着专家学者对该领域的大量研究, 使得岸滩侧向淘刷及崩塌理论得到了很好的发展。Frydman等<sup>[1]</sup>对河岸稳定性进行了离心模拟试验, 分析了河岸土体滑移面和河岸坡度位移变化规律; Darby等<sup>[2]</sup>认为河岸的压实程度越大、细砂掺混以及底部泥沙黏度越高, 河岸的稳定性越高, 并提出了泥沙中值粒径与摩擦休止角是河岸稳定的2个重要因素; Osman等<sup>[3]</sup>和Thorne等<sup>[4]</sup>认为黏性河岸的稳定性与河床冲蚀深度及河岸冲蚀两方面有关, 引起岸滩侧向崩塌最基本的原因是冲刷使河岸的宽度增加以及河岸的坡度变陡, 同时, 在冲刷过程中河床的下切会增加河岸的高度; 在利用数学模型解决河岸冲刷及崩塌的模拟技术上, Nagata等<sup>[5]</sup>建立非平衡输沙数学模型研究平面岸线崩塌的变化速率与河床变形的关系; 美国土木工程协会<sup>[6-7]</sup>根

据黏性河岸与非黏性河岸的明显差别提出了河宽调整模型, 认为黏性河岸比非黏性河岸更加稳定。

相对于西方国家的研究, 我国理论方面起步稍晚。1949年初进行了多次河岸稳定与防护工作的研讨会议, 具有代表性的是中国科学院地理研究所分析了九江至河口段的河床边界条件与河岸崩塌的关系<sup>[8]</sup>; 陈引川等<sup>[9]</sup>从河流动力学角度分析河岸崩塌发生的条件; 孙梅秀等<sup>[10]</sup>对泥沙运动特征进行研究, 这些都是早期国内学者对研究工作进行的经验性总结。20世纪90年代后我国对河岸冲刷及崩塌机理的研究更加深入, 取得了较为丰硕的成果, 如李宝璋<sup>[11]</sup>在对长江南京河段的河岸崩塌原因进行分析时, 提出了造成崩塌的动力是大尺度的纵轴螺旋流; 夏军强等<sup>[12]</sup>建立了准二维数学模型和平面二维数学模型对河岸冲刷机理进行研究, 这2个模型可以同时反映河岸的冲刷以及河岸的崩塌过程; 黄本胜等<sup>[13]</sup>根据边坡理论分析了几种河岸崩塌的影响因素; 张幸农等<sup>[14]</sup>总结了长江崩岸类型、成因以及影响因素等。这些成果均为我国河岸冲刷及崩塌研究奠定了理论基础。

国内外许多学者通过经验总结、试验研究和编著论述了河岸边坡的稳定与防护工作, 并取得了较多成果, 目前仍有许多该领域的学者对河岸稳定问题进行了深入探讨。

## 2 岸滩侧向淘刷及崩塌模拟技术的方法

虽然以往多数河道冲淤数学模型已应用于工程实践, 但这些模型通常均假设河岸是不可冲刷或对河岸冲刷机理和冲刷速率进行大量假设与简化, 较少考虑到河岸组成物质、几何形态以及土体特性等对河岸冲刷的影响。它们一般适用于河道宽度变化较小的变形模拟, 对一些河宽变化较大的河道进行模拟时存在较大误差。为了使河道冲淤数学模型能够广泛适用于岸滩侧向淘刷的变形模拟, 将具体介绍岸滩侧向淘刷与崩塌机理及其模拟技术的3种方法。

**2.1 岸滩侧向淘刷及崩塌机理** 岸滩侧向淘刷及崩塌是一种很重要的侧向演变过程, 在冲积平原河流中十分常见, 我

**基金项目** 国家自然科学基金资助项目(51369013)。

**作者简介** 刘月楼(1992—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向: 水工结构。\* 通讯作者, 教授, 博士, 从事流体动力学分析与计算研究。

**收稿日期** 2016-12-31

国的长江、黄河下游岸滩侧向淘刷和崩塌现象特别明显。同时,河岸冲刷及崩塌条件多,变形机理复杂,又因其具有普遍的危害性,使得多数学者致力于该领域的研究,并取得较多成果。岸滩侧向淘刷及崩塌机理可从其控制条件,洪水期与枯水期对其影响的大小,以及土体颗粒与内摩擦角对其影响的角度进行分析。按控制条件可分成2种:第1种是受冲刷作用控制的河岸冲刷机理,主要是由于河流直接冲刷河岸,同时在重力作用下引起了岸滩的崩塌;第2种是非冲刷作用影响的河岸冲刷引起岸滩崩塌,包括外界条件引起河岸土体强度减小从而造成了河岸崩塌。从枯水期及洪水期的角度分析,在枯水期,由于低水位造成的水流紊动和范围变形,水流方向与岸边形成一个夹角,造成河岸冲刷及岸脚淘刷;在洪水期,洪水水位急剧变化加上河岸土体条件的改变等对河岸淘刷及崩塌起到了重大作用,且洪水季节岸滩崩塌产生的危害远大于枯水期。从河岸土体颗粒粒径及内摩擦角这2个影响因素分析,土的抗剪力一般由黏聚力和内摩擦力组成,河岸土体颗粒粒径和密实程度影响土体颗粒之间的摩擦力和咬合力,岸滩土体颗粒之间越不密实,其摩擦力越小,更易造成岸滩崩塌,同时岸边植被对河水淘刷的内摩擦角也产生一定的影响。

## 2.2 模拟方法的分类及优缺点分析

### 2.2.1 经验模拟法。

岸滩淘刷及崩塌模拟过程十分复杂,在水沙数学模型中,经验模拟法是用来模拟河岸冲刷过程的模拟方法之一,其主要思想是根据大量实测经验资料建立相关的经验公式来估计河道宽度变化,从而分析河岸的冲淤状况。我国许多学者采用经验模拟法对河岸冲刷进行了研究,梁国亭等<sup>[15]</sup>在研究黄河禹门口至潼关河段的数学模型时利用河相关系数来估算河宽变化,采用以下的河相关式:

$$W_k = \alpha(A + \Delta A)^\beta \quad (1)$$

式中, $W$ 为河槽宽度; $A$ 为河槽面积; $\beta$ 、 $\alpha$ 分别为指数和待定系数。根据该河段多年的汛前及汛后的实测资料,该河段的断面形态经过回归求出待定系数 $\alpha$ 和指数 $\beta$ ,再假设冲淤面积为 $\Delta A$ , $W_k$ 为新主槽宽度, $h$ 为水深,当 $W > W_k$ ,且 $\Delta A > A$ 或者 $W < W_k$ , $\Delta A < A$ 时,河宽变化量 $\Delta W$ :

$$\Delta W = \frac{-\Delta A}{h}, \left| \frac{-\Delta A}{h} \right| \leq |W_k - W| \quad (2)$$

$$\Delta W = W_k - W, \left| \frac{-\Delta A}{h} \right| > |W_k - W| \quad (3)$$

许炯心<sup>[16]</sup>认为河宽变化是岸壁水流切应力和河岸抗冲指标比值的函数,并提出了河宽变化与河岸土体抗冲指标之间的关系式:

$$\frac{\Delta B}{B} = k_1 - k_2 \frac{\ln M}{0.76\gamma HJ} \quad (4)$$

式中, $M$ 表示河岸的抗冲性指标; $\gamma$ 为水的比重; $H$ 为水深; $J$ 为比降。 $k_1$ 和 $k_2$ 为系数,与河岸卵石的出露程度有关。许炯心<sup>[16]</sup>结合Lane<sup>[17]</sup>的河岸及河底抗冲指标公式,建立了适用于汉江河岸冲刷的数值模拟经验公式,但其仅适用于黏性物质,对非黏性物质并不适用。

周建军等<sup>[18]</sup>也采用经验方法模拟河流展宽,指出河宽

变形速度和河岸土体的起动切应力有关,并建立了水流侧向冲刷的河岸速率公式:

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{C}{\gamma_s \gamma} (\tau_f - \tau_x) \tau_f \quad (5)$$

式中, $\Delta B$ 为靠近水的边滩在迎水面方向的宽度; $C$ 为冲刷系数; $\tau_f$ 为水流作用于河床的剪切力; $\tau_x$ 为临界切应力。

周建军等<sup>[18]</sup>建立的经验公式基于明渠非恒定流基本方程和不平衡输沙模式,反映了水流作用力与边界反作用力的对比关系对坍岸速率的影响,曾用于三峡水库回水变动区九龙坡河段的河床变形计算,并与实体模型试验结果进行比较,精度满足实际工程计算。采用经验方法模拟的冲刷过程,方法较为简便,但对不同河道具有局限性。第一是它们只在资料来源的范围内适用;第二是它们未考虑到河岸的几何形态对河道展宽的作用;第三是这些方法也未考虑河岸冲刷、崩塌时内在的力学机理。

### 2.2.2 极值假说模拟法。

极值假说模拟法应用于岸滩淘刷与崩塌的原理是利用现有的冲淤变形泥沙数学模型,然后加入一个附加方程来预测河岸宽度的变化,首先根据水流条件确定河岸宽度的调整方向,其次是根据近岸的水沙条件以及河岸可冲刷程度来确定河岸宽度的调整速率。具有代表性的有张海燕<sup>[19]</sup>的FLUVIAL模型及美国垦务局开发的GSTARS模型<sup>[20]</sup>。

FLUVIAL模型主要功能有河床冲淤、宽度调整以及弯道变化而产生的河床变形计算。由于泥沙运动与河床的几何形态变化比水流条件的变化缓慢,此模型假设冲淤过程和河流计算不耦合、水流计算同弯道变化相耦合<sup>[19]</sup>。GSTARS系列模型的主要特征之一是最优化方法的运用,其用于河流侵蚀、沉积、河流形态、河流工程以及河流恢复研究<sup>[21-22]</sup>。2个模型都是根据泥沙输移模型得出的断面冲淤面积,其值代表河床及河岸总的冲淤变化面积。而总冲淤面积在断面上的分配是首先计算出河岸宽度调整的大小,再将计算出的总冲淤面积分配到河床和河岸上,但对于河宽调整量的大小是在假设的河段水流功率趋近于均匀化或者水流的能量耗散趋近于最小值的前提下计算得到。

Lane<sup>[17]</sup>建立临界切应力方法确定河宽,此种方法要求河岸的允许切应力不小于水流切应力,在一定的流量、比降、糙率等条件下,并加入曼宁公式可得到切应力与河宽的关系。在已知河床颗粒的粒径后,可通过Lane<sup>[17]</sup>提出的切应力与河宽关系曲线,查出切应力对应的河宽值,当所查河宽大于原河宽时,岸滩发生冲刷。

虽然极值假说法运用较多,但在模拟河道展宽过程亦具有很大的局限性,Griffiths<sup>[23]</sup>表明极值假说法所得结果与实际观测的结果存在一定差异。极值假说模拟法仅适用于非黏性河岸的侧向淘刷及崩塌的模拟,可估计河流由不平衡状态向平衡状态的河宽调整状态,但不能预测河流不平衡状态下的河宽调整过程。再者,极值假说仅能估计河宽变化的总量,无法准确估计河岸的变化情况。

### 2.2.3 力学模拟技术。

力学模拟技术主要根据水动力学模

型计算河床的冲淤变形状况,然后采用土力学模型进行河岸稳定性分析,可用于黏性土河岸、非黏性土河岸及混合土河岸的数值模拟。

对于黏性土河岸的力学模拟,以 Osman 等<sup>[3]</sup>和 Thorne 等<sup>[4]</sup>的方法为代表,该方法根据河岸的冲刷速率经验公式计算出河岸侧向冲刷后退距离,再进行河岸的边坡稳定性分析。

黏性河床水流侧向冲刷后退距离公式:

$$\Delta B = [k \times \Delta t \times (\tau - \tau_c) e^{-1.3\tau}] / \gamma_s \quad (6)$$

式中,  $\Delta B$  为  $\Delta t$  时间内黏性河岸侧向冲刷间隔;  $k$  为侧向冲刷系数;  $\tau_c$  为河岸土体起动切应力;  $\tau$  为河道水流切应力;  $\gamma_s$  为河岸土体的容重。该力学分析方法模拟河岸的横向展宽已采用数学模型。

王新宏<sup>[24]</sup>和黄金池等<sup>[25]</sup>对 Osman 等<sup>[3]</sup>提出的横向冲刷距离计算公式进行了改进,他们分别考虑了水位变化和休止角等对河岸土体物理特征的影响,黄金池等<sup>[25-26]</sup>提出了冲击河流数学模型的简化处理模式(图1)。

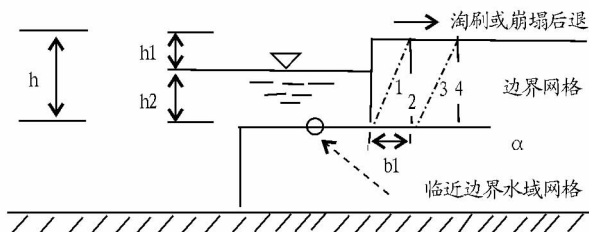


图1 崩塌计算模式简化处理示意

Fig.1 Simply processing of calculation mode of lateral beach scour and collapse

图1中1、3为崩塌滑动坡面线;2、4剖面线为岸滩崩塌临界线;  $b_l$  为河岸塌落度,即河岸冲刷的横向展宽。黄金池等<sup>[25-26]</sup>认为水上岸滩的崩塌是由于河岸发展变陡峭后引起的,假定岸坡产生崩塌前临河剖面与水流方向垂直,临界滑动面为直线,水上部和水下部的休止角均相同,带入 Osman 等<sup>[3]</sup>的黏性河岸侧向冲刷公式可计算黄河中游一支流的河岸冲刷横向展宽。

对于非黏性土河岸的数值模拟,主要以 Nagata 等<sup>[5]</sup>、Pizzuto<sup>[27]</sup>、Duan 等<sup>[28]</sup>提出的河岸淘刷与崩塌模型为代表。他们认为岸滩淘刷崩塌过程是由于河岸边坡处河床的冲刷,其引起岸滩坡度发生变化,河岸陡峭、岸滩增高,致使河岸发生崩塌。崩塌后的河岸土体在岸坡前淤积,淤积物被水流冲走,又开始新的冲刷和崩塌。因此,这是一个冲刷、崩塌、淤积的循环过程。此外,在室内试验和野外观测中还发现,河岸崩塌的岸坡角度与原坡面形态相似,且该角度等于水下休止角。通过此方法,Nagata 等<sup>[5]</sup>模拟出河道由顺直向弯曲演变的过程,且与室内试验结果符合良好。

对于混合土河岸冲刷过程的力学模拟技术以 Fukuoka<sup>[29]</sup>为代表。他认为自然河岸是由砂、黏土、粉砂以及各种类型的土体构成的层状结构,河岸冲刷过程不能单从某一土体结构进行研究,因为这反映不出自然河岸的冲蚀面貌。

Fukuoka<sup>[29]</sup>通过大量实地勘察和研究得出,对于混合土河岸的自然冲蚀过程分为3个重复的阶段,即冲蚀、崩塌和输移,同时还对土块输移机理、输移所需时间和预测岸滩崩塌的临界长度分析法进行研究。

力学模拟技术比以前的方法有较大进步,可用于多种形态的河道淘刷与崩塌模拟,但仍存在以下缺点:首先其未对静水压力和孔隙水压力对河岸稳定性进行分析;其次由于河岸崩塌滑动面须通过岸坡脚,且河岸崩塌滑动面计算较为复杂,与实际情况存在一定误差。

### 3 小结与讨论

该研究采用经验模拟法、极值假说模拟法模拟河道侧向淘刷及崩塌过程,考虑的是河岸冲刷及崩塌的力学机理;力学模拟法不仅考虑河岸冲刷及崩塌时的力学机理,同时考虑了非黏性河岸和黏性河岸的河床冲淤变形状况,建立了水土力学模型进行岸滩稳定性分析,是今后发展的主要方向。但由于岸滩淘刷与崩塌的模拟过程较为复杂,对存在的问题和改进方法仍需要在以下方面进行深入研究:①大多黏性河岸稳定性分析方法用于一般的矩形或者梯形断面,但对于天然河道断面形态不适用,因为一方面稳定性分析复杂,另一方面难以确定从河岸冲刷或崩塌下来的泥沙在横断面上的分布。对非黏性河岸而言,确定河岸侧向淘刷时的后退距离及损失面积、河岸崩塌的体积变化与侵蚀土方量变化等均相当困难;②这些模拟技术大多是来自室内试验的成果,若把这些公式或模型用于实际河道计算会有一些的差异,因此在这方面必须进行深入的研究,使其用于实际天然河岸的计算;③目前我国多数的河岸侵蚀研究局限于长江流域或黄河下游的某一段河道,一方面选取的河段虽具代表性,但不同河段地形地貌、侵蚀类型及严重程度在空间分布上有所差异,另一方面我国其他流域的河岸侵蚀研究缺乏详细的调查资料及模拟试验数据支撑,运用一般的理论分析方法或数学模型不能有效地解决河岸侵蚀的问题;④岸边植被对河岸冲刷过程和河岸边坡稳定具有重要影响,且植被的覆盖率与河岸土体起动切应力有关,但目前缺乏定量对河岸植被与河岸抗冲刷的研究,植被对河岸土体抗冲的影响是未来该领域不能忽略的一个问题。

### 4 展望

由于河岸侵蚀问题影响因素复杂,对具体的研究对象,可在以往的理论基础及经验方法上,充分结合自然灾害、地质灾害、风险评估、环境管理等学科进行具体分析,进一步研究河岸侵蚀与泥沙的冲刷、搬运和堆积的机理,明确河岸侵蚀对河流泥沙的影响;其次,加强对河岸的直接观察和测量的标准与规范制订,对具体河道采用适宜的观测方法,尽量避免观测误差,同时可利用先进的“3S”技术对河岸侵蚀的风险因素进行收集量化分析,得出诸因素的时空分布规律,并对河岸侵蚀的强烈程度进行风险评估;再者,室内对水流泥沙的基本运动规律进行试验及对具体河段进行实体模型试验时,要充分认识室内环境的局限性,对特殊的天然河道实体模型须加入附加影响条件,最大化使模拟条件同天然条件

一致;最后,充分借助电子计算机推求水流泥沙运动与河床演变问题的近似解,通过模拟计算的结果与数学模型结果进行验证,并对比模型与实测资料的吻合程度,不断进行优化,以此满足工程的需要。

### 参考文献

- [1] FRYDMAN S, BEASLEY D H. Centrifugal modelling of riverbank failure [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1976, 102(5): 395-409.
- [2] DARBY S E, THORNE C R. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers [J]. Journal of hydraulic engineering, 1995, 121(4): 1343-1363.
- [3] OSMAN A M, THORNE C R. River bank stability analysis I: Theory [J]. Journal of hydraulic engineering, 1988, 114(2): 134-150.
- [4] THORNE C R, OSMAN A M. River bank stability analysis. II: Application [J]. Journal of hydraulic engineering, 1988, 114(2): 51-172.
- [5] NAGATA N, HOSODA T, MURAMOTO Y. Numerical analysis of river channel processes with bank erosion [J]. Journal of hydraulic engineering, 2000, 126(4): 243-252.
- [6] ASCE ask committee on hydraulic, bank mechanics, and modeling of river width adjustment. River width adjustment. I: Processes and mechanisms [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998, 124(9): 881-902.
- [7] ASCE task committee on hydraulic, bank mechanics, and modeling of river width adjustment. River width adjustment. II: Processes and mechanisms [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998, 124(9): 903-918.
- [8] 中国科学院地理研究所. 长江九江至河口段河床边界条件及其与崩岸的关系[M]. 武汉: 科学出版社, 1978: 8-18.
- [9] 陈引川, 彭海鹰. 长江下游大窝崩的发生及防护[C]//水利部长江水利委员会. 长江中下游护岸工程论文集: 第三集. 武汉: 长江水利水电科学研究院, 1985: 112-116.
- [10] 孙梅秀, 吴道文, 李昌华. 长江八卦洲洲控制工程及江岸崩窝的试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1989.
- [11] 李宝璋. 浅谈长江南京河段崩窝成因及防护[J]. 人民长江, 1992, 23(11): 26-28.
- [12] 夏军强, 王光谦, 吴宝生. 平面二维河床纵向与横向变形数学模型[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004, 34(Z1): 165-174.
- [13] 黄本胜, 李思平, 邱静, 等. 冲积河流岸坡的稳定性计算模型初步研究[C]//李天义. 河流模拟理论与实践. 武汉: 武汉水利电力大学出版

社, 1998: 50-55.

- [14] 张幸农, 杨红. 长江下游崩岸及其治理[C]//中华人民共和国水利部, 荷兰交通公共工程与水管理部. 中荷水管理研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 494-499.
- [15] 梁海亭, 张仁. 黄河小北干流一维分组泥沙冲淤数学模型[J]. 人民黄河, 1996(9): 37-39.
- [16] 许炯心. 边界条件对水库下游河床演变的影响: 以汉江丹江口水库下游河道为例[J]. 地理研究, 1983, 2(4): 60-71.
- [17] LANE E W. Design of stable channels [J]. Transactions of the american society of civil engineers, 1955, 120(1): 1234-1260.
- [18] 周建军, 林秉南, 王连洋. 平面二维泥沙数学模型的研究及应用[J]. 水利学报, 1993(11): 10-19.
- [19] 张海燕. 河流演变工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 243-244.
- [20] YANG C T, TREVINO M A. User's manual for GSTARS2. 0[M]. Denver, Colorado: U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Sedimentation and River Hydraulics Group, 1998.
- [21] YANG C T, SIMÕES F J M, HUANG J, et al. 淤积河流和水库淤积物综合传输模型[C]//第二届黄河国际论坛论文集. 郑州: 中国水利部, 2005.
- [22] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 167-172.
- [23] GRIFFITHS G A. Extremal hypotheses for river regime: An illustration of progress [J]. Water resource research, 1984, 20(1): 113-118.
- [24] 王新宏. 冲积河道纵向冲淤和横向变形数值模拟研究及应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- [25] 黄金池, 万兆惠. 黄河下游河床平面变形模拟研究[J]. 水利学报, 1999(2): 13-18.
- [26] 黄金池. 黄河下游河床演变平面二维的数学模型研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1997.
- [27] PIZZUTO J E. Numerical simulation of gravel river widening [J]. Water resource research, 1990, 26(9): 1971-1980.
- [28] DUAN J G, WANG S S Y. The applications of the enhanced CCHE2D model to study the alluvial channel migration processes [J]. Journal of hydraulic research, 2001, 39(5): 469-780.
- [29] FUKUOKA S J. 自然堤岸冲蚀过程的机理[J]. 赵谓军, 译. 水利水电快报, 1996(2): 29-33.

(上接第 163 页)

素对贮存析油量具体有何影响有待进一步研究。③助剂对载体或制剂的乳液稳定性、助剂在所用载体中对原药的分散性能能够从一定程度上反映制剂的稳定性、乳化性能和乳液稳定性好、对原药本身分散性好的助剂易加工出稳定性好的制剂。④该研究所用的 1 号和 4 号助剂在大豆油中易导致烟嘧磺隆原药絮凝, 但配合其他组分加工成制剂后则无絮凝现象, 说明助剂的应用性能及制剂的稳定性与配方组分搭配关系很大, 具体原因有待研究。

总而言之, 相同配方条件下 6 种市售植物油类乳化分散剂在 4% 烟嘧磺隆 OD 加工中应用性能的差别主要表现在制备的样品的乳液稳定性、黏度和贮存析油量方面。其中, 2 号助剂乳化性能最好, 有助于抑制样品常温贮存析油; 1 号和 6 号助剂有助于降低研磨粒径; 5 号助剂有助于降低样品黏度, 控制热贮析油。加工可分散油悬浮剂时, 可根据所加工的有效成分特点及所选用的载体类型搭配使用乳化性能好、对样品贮存析油有明显控制作用的助剂, 从而获得稳定性好的

配方。

### 参考文献

- [1] 张宗俭, 张鹏. 可分散油悬浮剂(OD)的加工技术与难点解析[J]. 农药, 2016, 55(6): 391-395.
- [2] 张春华, 张宗俭, 刘宁, 等. 农药喷雾助剂的作用及植物油类喷雾助剂的研究进展[J]. 农药科学与管理, 2012, 33(11): 16-18.
- [3] 华乃震. 农药可分散油悬浮剂的进展、加工和应用(I)[J]. 现代农药, 2014, 13(3): 1-4, 16.
- [4] 翟利利, 路福绥, 夏慧, 等. 4% 烟嘧磺隆油悬浮剂在水中的分散性能[J]. 农药, 2012, 51(9): 651-653, 666.
- [5] 郭武隼. 液体制剂[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] 江苏龙灯化学有限公司. 农药悬浮率测定方法: GB/T 14825—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] 薛背背, 路福绥, 陈甜甜, 等. 溶剂替换法制备氟铃脲水悬浮剂及其分散稳定性[J]. 应用化学, 2011, 28(1): 72-76.
- [8] 张强, 陈颖, 付文静, 等. TURBISCAN LAB 稳定性分析仪研究农药 WDC 悬浮液稳定性[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4): 843-846.
- [9] 姚淑华, 石中亮, 王传胜. 乳化液膜稳定性的研究[J]. 沈阳化工学院学报, 2002, 16(4): 254-256.
- [10] 程敬丽, 朱金文, 魏方林, 等. 机械能与界面张力在农药水乳剂制备中的作用机理研究[J]. 农药学报, 2004, 6(2): 62-67.
- [11] 路福绥. 农药悬浮剂的物理稳定性[J]. 农药, 2000, 39(10): 8-10.