



普通高等教育“十二五”规划教材

(研究生教学用书)

河流动力学专论

Special Topics on River Dynamics

天津大学 徐国宾 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

(研究生教学用书)

河流动力学专论

天津大学 徐国宾 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分10章,分别讲述了流域侵蚀与产沙,河流泥沙基本特性及沉速和起动,河道水流运动基本规律,河流泥沙输移基本规律,高含沙水流运动,潮汐河口水流泥沙运动规律,河床演变基本原理,不同类型河流的河床演变特点,水库泥沙,河流模拟理论基础等内容。

本书全面系统地荟萃了当今国内外河流动力学领域的最新研究成果,内容丰富,资料翔实,论述精当,可作为水利工程专业的研究生教材使用,亦可供从事该专业科研、教学、规划设计、施工和管理等方面工作的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流动力学专论 / 徐国宾编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013.7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-1052-4

I. ①河… II. ①徐… III. ①河流—流体动力学—高等学校—教材 IV. ①TV143

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第158855号

审图号: GS (2013) 889 号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材(研究生教学用书) 河流动力学专论
作 者	天津大学 徐国宾 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.75印张 398千字
版 次	2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	34.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

河流动力学是研究河流在天然状态下以及修建水利工程后所发生冲淤变化过程的一门学科。天然河流总是处在不断冲淤变化过程之中的。如冲积性弯曲河流，凹岸不断冲刷后退，凸岸不断淤积前进，河流弯曲变形不断增大，最终导致裁弯取直；其后又将重复上述演变过程。当在河流上修建了各种水利工程后，会加剧河流的冲淤变化。例如在河流上修建水库后，便会引起泥沙在库区的落淤和回水的上延，水库的调蓄作用将会改变天然的水沙过程，这样又会引起下游河道的冲刷和滩地的坍塌。河流在天然情况下以及在修建工程之后所发生的演变过程，经常会给人类活动带来诸多麻烦甚至灾难。为了合理利用和有效地整治河流，就必须掌握河流动力学的理论知识，并能够对河流演变过程作出科学的预测。

河流，是水流与河床在地球物理诸多自然因素和人类活动交互作用下的产物。一方面水流作用于河床，改变了河床的几何形态；另一方面河床几何形态的变化又反过来影响了水流的运动，进而又对河床变化过程产生新的影响。这是一个动力反馈过程，即河床演变的结果又会影响到河床演变过程的本身。水流和河床的这种相互作用，是通过泥沙运动来表现出来的。例如，泥沙淤积会使河床升高，而泥沙冲刷又会使河床降低。泥沙运动是水流与河床相互作用的媒介。因此，河流动力学涉及的内容很广泛，包括了土壤侵蚀产沙、河流水力学、泥沙运动力学、河床演变以及河床变形预测等内容。

河流既有水利的一面，也有水害的一面。为了化害为利，人类不断地与大自然作斗争。在长期的治河斗争中，人们逐渐加深了对河流的了解，积累了关于河流泥沙运动及河床演变规律的知识，从而逐步形成了河流动力学这门学科。随着科学技术的进步和人们对河流认识的深化，

这门学科也日益发展和得以完善。尽管如此，河流动力学还是一门正在发展中的学科。由于它所研究问题的复杂性，在现阶段对有些问题还不可能完全从理论上求得解决。因此，在研究中就不得不对这些问题作出某些假定，进行一定程度的简化，同时还需广泛使用经验的或半经验的公式。因此，在利用河流动力学知识解决实际问题时，首先要从实际出发，尽可能掌握第一手资料，对问题进行全面地了解分析，选择符合实际情况的公式进行计算，然后再回到实际中去，检验所得结果的正确性，并逐步修正结果。

河流动力学与水利水电工程建设的关系十分密切。建设水库、港口，首先要正确地选择坝址、港址。而坝址、港址的选择除了须考虑国民经济建设的需要外，还必需弄清河道的冲淤变化情况及对整个河系带来的影响。在此基础上，再去规划设计水库的使用寿命、运用方式、下游河道整治方案，以及港口疏浚整治工程方案等，这才是唯一正确之道。

本书共分 10 章，全面系统地荟萃了当今国内外的最新研究成果，阐述了当今河流动力学所面临的 10 个方面的专题。通过本书的学习，能使 学生基本掌握河流泥沙运动规律、河床演变规律及河床变形预测等内容，能够运用河流动力学中所阐述的一些基本规律和方法，来解决水利水电工程中所遇到的实际问题。

本书在此次正式出版之前，已经在课堂上给学生们讲授过数次了，并根据学生们反映的意见进行了多次修改，包括内容取舍，最后才形成了这次的定稿。由于作者水平有限，书中难免还存在一些差错或不当之处，敬请读者批评指正。

本书的编写出版得到天津大学研究生创新人才培养项目资助。

作 者

2013 年 1 月于天津大学

目 录

前言

第一章 流域侵蚀与产沙	1
第一节 土壤侵蚀与流域产沙	1
第二节 侵蚀产沙计算模型	5
习题	10
第二章 河流泥沙基本特性及沉速和起动	11
第一节 河流泥沙基本特性	11
第二节 河流泥沙沉速	19
第三节 河流泥沙起动	24
习题	34
第三章 河道水流运动基本规律	36
第一节 河道水流运动基本特性	36
第二节 河道水流结构	37
第三节 河道水流阻力	45
习题	49
第四章 河流泥沙输移基本规律	50
第一节 推移质运动	50
第二节 悬移质运动	71
第三节 不平衡输沙与河床冲淤变化	84
习题	86
第五章 高含沙水流运动	88
第一节 高含沙水流基本特性	88
第二节 高含沙水流运动特性	92
第三节 高含沙水流运动及河床演变的若干特殊现象	98
习题	101

第六章 潮汐河口水流泥沙运动规律	103
第一节 潮汐河口水流运动特性	103
第二节 潮汐河口泥沙运动特性	111
习题	116
第七章 河床演变基本原理	117
第一节 河流类型与河型成因及转化	117
第二节 冲积河流的自动调整作用	128
第三节 河床演变中的一些基本概念	130
第四节 造床流量与河相关系	132
习题	140
第八章 不同类型河流的河床演变特点	142
第一节 山区河流的河床演变	142
第二节 平原河流的河床演变	145
第三节 潮汐河口的河床演变	154
习题	167
第九章 水库泥沙	168
第一节 水库来沙量分析和估算	168
第二节 水库泥沙淤积形态及规律	171
第三节 水库异重流	180
第四节 水库淤积终极状态估算	188
第五节 坝前局部冲刷漏斗	192
第六节 防治或减轻水库淤积的措施	196
第七节 水库下游河道冲淤变化	202
习题	208
第十章 河流模拟理论基础	210
第一节 河流数学模型	210
第二节 河流物理模型	238
习题	252
参考文献	254

第一章 流域侵蚀与产沙

土壤侵蚀和产沙是陆地表面普遍存在的一种自然现象，是侵蚀循环的主要过程之一。地表物质在雨滴、流水等外营力作用下分散和移动形成水蚀，同时还将被侵蚀的物质汇集到河流中，沿河流向下游运动，沿程发生沉积与推移，并最终到达流域出口，这个过程便构成流域土壤侵蚀和产沙。本章主要介绍土壤侵蚀与流域产沙，侵蚀产沙计算模型等内容。

第一节 土壤侵蚀与流域产沙

一、土壤侵蚀

(一) 侵蚀的概念

侵蚀的概念由于研究角度的不同，有着不同的解释。侵蚀一词很早就用于地学方面，多用以表达外营力夷平作用的形式。侵蚀可分为地质侵蚀和土壤侵蚀两种。地质侵蚀是指在陆地表面，内营力（主要指地壳运动）和外营力（指地球表面接受太阳能和重力而产生的各种作用力）相互作用下，形成高原、山脉、丘陵、盆地、平原、湖泊、河流和三角洲等地貌的全部过程。土壤侵蚀是指在水力、风、冻融和重力等外营力作用下，土壤、土壤母质及其他地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的全部过程。也有人称地质侵蚀为广义土壤侵蚀，称土壤侵蚀为狭义土壤侵蚀。在我国土壤侵蚀和水土流失常被作为同义语使用。我国对土壤侵蚀现象的认识可以追溯到 3000 年前，而将土壤侵蚀作为一门科学技术进行专门研究，则是从 20 世纪 20 年代开始的。大规模开展土壤侵蚀研究并取得重要进展则是从 20 世纪 50 年代开始的。

(二) 侵蚀类型

1. 按土壤侵蚀发生时代分类

就土壤侵蚀发生的时代而言，可将侵蚀分为古代侵蚀和现代侵蚀。人类出现以前的地质时期内发生的侵蚀，称为古代侵蚀。它的产生与发展主要取决于当时自然因素的变化。这种侵蚀作用，往往由于冰川融解及大量地表径流对地表的反复侵蚀和沉积而达到塑造地形的规模。现代侵蚀主要指人类出现以后，由于人类活动和自然因素变化而产生的土壤侵蚀现象。现代侵蚀是在古代侵蚀的地貌上进行的，所以，古代侵蚀塑造的地貌与现代侵蚀有着密切的关系。

2. 按土壤侵蚀作用的程度分类

按土壤侵蚀作用的程度，可将侵蚀分为正常侵蚀和加速侵蚀。在植被良好的森林和草地上或者在水土保持良好的农田上，土壤侵蚀的速度非常缓慢，常小于土壤形成的速度，

因而不仅不会破坏土壤及母质，反而会对土壤起到更新作用和提高土壤肥力，此种现象称为正常侵蚀。而由于人类不合理的经济活动，或自然因素突变（如地震、火山爆发及其他自然灾害变异等），使土壤遭到严重的侵蚀破坏，土壤侵蚀的速度大于土壤形成的速度时，通常把这种现象称为加速侵蚀。加速侵蚀也会发生在古代，人类出现以前的地质时期，与现代人类无关。

3. 按土壤侵蚀发生的性质分类

土壤侵蚀按其发生的性质，可分为水力侵蚀、重力侵蚀、泥石流侵蚀、风力侵蚀和人为侵蚀等类型。

(1) 水力侵蚀。水力侵蚀是指地表径流的侵蚀作用。地表径流根据流动方式可分为坡面漫流（亦称面流、片流）和线状水流两种。水力侵蚀也可分为面蚀与沟蚀两大类。

1) 面蚀。面蚀是指面流从地表冲走表层土粒的侵蚀作用。面流是降水或冰雪融化后在坡面上形成的一种暂时性地表径流。在面流作用下，在没有植被覆盖或覆盖较差的坡地上，往往会发生面蚀，使表土流失。面蚀又可分为以下几种。

a. 层状面蚀（片蚀）。面蚀的发生初期多是层状面蚀。植被覆盖较差的坡地一遇暴雨，土壤表面直接受到雨滴的击溅和湿润，土壤表层很快达到水分饱和。在地表径流形成的同时，土壤表层已处于泥沙浑浊的泥浆状态，同时顺坡面流动。

b. 细沟状面蚀。面流顺坡流动时，常在坡面上形成许多小股水流。在小股水流作用下，坡面上被冲出许多细密的小沟，这些小沟基本上沿着流线的方向平行分布，但相互连接沟通（图 1-1）。小沟的深度及宽度一般均不超过 20cm，这些小沟经过耕作后可恢复平整。

c. 鳞片状面蚀。当土地利用不合理，植物的覆盖率小，或在过度放牧的坡地上“羊道”密布成网时，暴雨时常发生显著的鳞片状面蚀（图 1-2）。这种面蚀分布不匀，形成局部间面蚀程度的差异。即有植物生长的部分面蚀轻微，而没有植物生长的部分面蚀严重，其结果在坡面上面蚀严重的小块地呈鱼鳞状分布。



图 1-1 细沟状面蚀平面示意

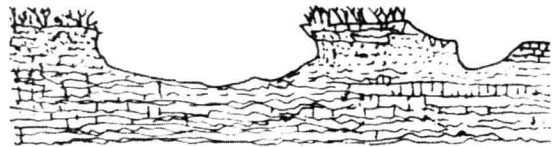


图 1-2 鳞片状面蚀剖面示意

2) 沟蚀。沟蚀是由线状水流冲刷所形成的沟槽。线状水流乃是坡面漫流往低洼地集中而汇合成的股流，它对地面成线状侵蚀，其结果形成线形伸展的沟槽及相应的堆积物。线状水流又分为暂时性水流和经常性水流。其中，由暂时性的线状水流冲刷地表土层或岩层而形成的沟槽，称为侵蚀沟，而经常性的线状水流侵蚀则形成河谷。

(2) 重力侵蚀。重力侵蚀是以重力作用为主引起的土壤侵蚀，主要以滑坡、崩塌、陷穴和山崩等方式进行，一般都发生在沟缘、沟壁或陡坡上。发生的原因主要由于岩（土）

层干湿交替频繁，流水淘刷和地下水的浸透等，破坏了原来相对稳定的状态。

(3) 泥石流侵蚀。泥石流是含有大量固体物质如石块、漂砾、沙土和黏土的山洪，是发生在山区或黄土沟壑地区的一种自然地质现象。泥石流爆发突然、历时短暂、来势凶猛，具有极强的侵蚀破坏力。泥石流的形成是水力和重力共同作用的结果，所以泥石流侵蚀是一种复合侵蚀。

(4) 风力侵蚀。由风力作用引起的土壤侵蚀。在黄土区、除植被良好的地方以外，普遍有风蚀现象，只不过是程度上的差别。由于黄土颗粒较细，风蚀多以黄土随风飞扬的状态进行，因地面经常翻耕，所以很少见有风蚀痕迹。在风沙区，沙土颗粒比黄土颗粒大，风蚀的方式以跳动和滚动为主，产生了沙波、沙垅、沙丘等地貌。

(5) 人为侵蚀。由人类不适当经济活动加剧的土壤侵蚀。

在上述几种侵蚀类型中，水力侵蚀在自然界普遍存在，也是最主要的侵蚀方式。

(三) 影响侵蚀的因素

影响土壤侵蚀的主要因素有气候、地形、地质、土壤、植被和人类活动等几个方面。

1. 气候

气候因素包括降水、气温、风速等。降水与土壤侵蚀关系最为密切，是水力侵蚀的主要动力因素。年温差和日温差是引起土壤风化剥蚀和冻融侵蚀的主要因素。风是导致风力侵蚀的直接动力，风速的大小决定着风力侵蚀的强弱。

2. 地形

地形主要通过坡度、坡长、坡面形状、海拔、相对高差、沟壑密度等对土壤侵蚀产生影响。

3. 地质

地质因素主要指岩性和地质构造运动、地震和岩石性质等。岩石的风化性、坚硬性、透水性对于沟蚀的发生和发展以及崩塌、滑坡、山洪、泥石流等侵蚀作用有着密切的关系。地壳抬升或下降引起侵蚀基准面的变化，从而导致侵蚀与堆积的变化。地震往往诱发大量滑坡、崩塌甚至泥石流的发生。

4. 土壤

土壤是侵蚀作用的主要对象，土壤特性决定其抗蚀和抗冲性能的差异，从而影响侵蚀强度的大小和侵蚀过程的发展。

5. 植被

植被具有截留降水、涵养水源、减缓径流、固结土体、提高土壤抗蚀和抗冲性能等功能，能够起到很好的蓄水固土作用。植被如果遭到破坏后，土壤侵蚀就会加剧。

6. 人类活动

人类活动是导致土壤侵蚀的主导因素。主要表现为人类对自然植被的破坏活动。如滥伐森林、开垦陡坡、过度放牧等都会破坏地表土壤结构，造成土壤侵蚀。同时，开矿、采石、修路、建房及其他工程建设等，如果未采取有效的水土保持措施，也会加剧土壤侵蚀。

(四) 侵蚀模数

土壤侵蚀的数量可以用侵蚀模数表示。侵蚀模数的定义是：单位时间内单位面积上的

土壤流失的数量。其常用单位为 $t/(km^2 \cdot a)$ 或 $m^3/(km^2 \cdot a)$ ，即每年每平方公里的土壤侵蚀量。也有用单位 t/km^2 或 m^3/km^2 表示一次降水过程每平方公里的土壤侵蚀量。

土壤侵蚀模数是衡量某一区域土壤侵蚀强度的重要指标，也为不同区域侵蚀状况的定量比较提供了依据。同时，土壤侵蚀模数还能够反映某区域土地利用的合理程度。根据土壤侵蚀模数，可以划分不同的土壤侵蚀强度级别。我国的土壤侵蚀强度分级见表 1-1。

由于各地区自然条件的差异，各地侵蚀模数的大小也不尽相同。中国是世界上土壤侵蚀最为严重的地区，尤其是西北黄土区、南方红壤区和东北黑土区的侵蚀最为严重。以侵蚀模数衡量，黄土高原是世界上侵蚀模数最大的地区之一，如黄河支流窟野河流域的多年平均侵蚀模数达 3.5 万 $t/(km^2 \cdot a)$ 。

土壤侵蚀模数可用以下几种方法得到：①测验法，通过径流场的长年野外观测记录得到，通常从小流域试验站以及流域进口站的观测资料中获取；②比较法，利用不同时期的地形图或地面标志进行重复测量，经过前后期的数量比较求得；③同位素¹³⁷Cs法，该技术具有快速测量的特点；④利用遥感（RS）、地理信息系统（GIS）以及全球定位系统（GPS）算法。利用 RS、GIS 及 GPS 进行土壤侵蚀模数计算，具有即时、便捷及高效等优点，是进行大范围土壤侵蚀模数估算的最主要方式。

需要指出，土壤侵蚀模数不同于流域输沙模数，前者是描述一个流域的土壤侵蚀强度；后者是描述流域的产沙数量。两者之间的换算关系：输沙模数 = 输移比 × 侵蚀模数。

表 1-1 土壤侵蚀强度分级

级别	平均侵蚀模数 [$t/(km^2 \cdot a)$]	平均流失厚度 (mm/a)
微度侵蚀	<200, 500, 1000	<0.15, 0.37, 0.74
轻度侵蚀	(200, 500, 1000) ~2500	(0.15, 0.37, 0.74) ~1.9
中度侵蚀	2500~5000	1.9~3.7
强度侵蚀	5000~8000	3.7~5.9
极强度侵蚀	8000~15000	5.9~11.1
剧烈侵蚀	>15000	>11.1

注 该表来源于 SL 190—96《土壤侵蚀分类分级标准》。

二、流域产沙

产沙是指某一流域或某一集水区内的地表侵蚀物向其出口断面的有效搬运过程。搬运到出口断面的侵蚀物的数量，称为产沙量。土壤侵蚀与产沙是紧密相连而又有区别的两个概念。产沙是从河流泥沙来源的角度而言的，而土壤侵蚀是指土壤、土壤母质及其他地面组成物质被外营力破坏、剥蚀、搬运和沉积的全部过程。有侵蚀才有产沙，被侵蚀的物质可以直接进入河道成为河流泥沙的一部分，也可以暂时停留在原地上成为后期的侵蚀、搬运对象。被侵蚀的物质在搬运过程中可能会有一部分沉积下来。所以，侵蚀量往往并不等于产沙量，产沙量一般小于侵蚀量。只有在有利的地面条件，搬运力很强的情况下，两者才会接近。

产沙方式与侵蚀方式一样也可分为 5 类，即水力侵蚀、重力侵蚀、泥石流侵蚀、风力

侵蚀和人为侵蚀。一个流域的总产沙量是各类产沙量的总和，因此在计算流域的产沙量时，必须分析各类产沙方式。

第二节 侵蚀产沙计算模型

土壤侵蚀产沙模型是预报水土流失，评价水土保持效益的有效工具。迄今为止，人们已经建立了众多的土壤侵蚀产沙模型。这些侵蚀产沙模型根据建立模型的方法、途径，一般可以分为经验模型、确定性模型与随机模型 3 大类。

一、经验模型

如前所述，影响流域侵蚀产沙的主要因素有气候、地形、地质、土壤、植被和人类活动等。但是，在不同的流域，这些因素对流域产沙的影响程度不同，所以在模型中的指标及表现形式也是不同的。经验模型是根据这些影响流域产沙的因素，通过多元回归或逐步回归分析，建立起产沙与它们之间的关系式。这些经验关系式有的适用于坡面侵蚀，有的适用于小流域侵蚀，使用时需注意。经验模型结构简单，应用方便，但模型的参数需用当地实测资料率定。目前国内外经验模型很多，这里只略举几个有代表性的模型。

1. 美国通用土壤流失方程 (USLE)

对于坡面土壤侵蚀，美国农业部 (1965) 提出一个通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation)，即

$$M_s = R_a K L_j C P \quad (1-1)$$

式中： M_s 为年平均单位面积坡面上的土壤流失量， $t/(km^2 \cdot a)$ ； R_a 为降雨侵蚀力因子，反映降雨量对土壤侵蚀的作用， $MJ \cdot mm/(km^2 \cdot h \cdot a)$ ； K 为土壤可蚀性因子，与土壤种类、结构等有关， $t \cdot h/(MJ \cdot mm)$ ； L_j 为地形因子，反映坡面坡度和长度的影响，无量纲； C 为植被覆盖因子，反映不同季节植被状况的影响，无量纲； P 为水土保持措施因子，表示各种水土保持措施对减少土壤流失的作用，无量纲。

USLE 模型是经验模型的代表，较全面地反映了各主要因素对坡面产沙的影响。应用 USLE 的关键是确定方程中各因子值，但这些因子的算法均来自于美国的长期试验资料，其他国家在引进和应用时，必须根据本国的具体情况和试验资料来确定方程中各因子的算法和参数。USLE 方程自 20 世纪 70 年代中期引入我国，经过数十年的消化、改进、发展，目前已建立了具有我国自己特色的 USLE，并得到较广泛应用。1985 年，美国有关部门和土壤侵蚀研究专家利用现代化的试验测试手段和计算机技术再次对 USLE 进行修正，并将其命名为修正通用土壤流失方程 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)。

2. 牟金泽公式

牟金泽等 (1983) 利用陕北绥德辛店沟小流域的 60 个测次的洪水泥沙资料，进行了相关分析计算，建立了如下坡面土壤侵蚀预报模型

$$M_s = \frac{51.1}{C^{0.15}} R^{1.2} I^{1.5} J^{0.26} P_a^{0.48} \quad (1-2)$$

式中： M_s 为一次洪水坡面土壤侵蚀模数， t/km^2 ； C 为植被度，%； R 为一次暴雨降雨量，

mm; I 为一次暴雨平均降雨强度, mm/min; J 为平均坡降, %; P_d 为雨前土壤含水量, %。

该式是一个基于一次暴雨的侵蚀产沙模型, 并在模型中考虑了土壤前期含水量的作用, 能够较好地反映一次降雨的侵蚀产沙状况, 可用于土壤地质条件和植被情况与之类似的黄土高原地区。

3. 江忠善公式

江忠善等 (1996) 以沟间地裸露地基准状态坡面土壤侵蚀模型为基础, 将浅沟侵蚀影响以修正系数的方式进行处理, 建立了计算沟间坡面的次降雨侵蚀量模型, 即

$$M_s = \alpha KR^{0.999} I_{30}^{2.637} J^{0.88} L^{0.286} GCP \quad (1-3)$$

式中: M_s 为一次降雨坡面土壤侵蚀模数, t/km²; α 为系数, 无量纲; K 为土壤因子系数, 无量纲; R 为一次降雨量, mm; I_{30} 为一次降雨过程 30min 最大降雨强度, mm/min; J 为坡度, (°); L 为坡长, m; G 为浅沟侵蚀影响系数, 无量纲, 当坡面无浅沟侵蚀时, $G=1$; C 为植被影响系数, 无量纲; P 为水土保持措施影响系数, 无量纲。对于无水土保持措施的裸露坡面, C 和 P 均为 1。

该模型特点, 一是模型结构符合黄土丘陵区地貌特点, 考虑了黄土高原坡面特有的浅沟侵蚀类型; 二是应用地理信息系统软件建立空间水土流失数据库, 实现了侵蚀预报模型与 GIS 相结合。

4. 李钜章公式

李钜章等 (1999) 在黄河中游流域选择了 155 个“闷葫芦”淤地坝, 采集每个坝的年均淤积量, 以及相应流域的侵蚀影响因素: 植被覆盖度、降雨量、沟谷密度、切割深度、地表组成物质、大于 15° 的坡耕地面积比等资料, 采用变权形式, 建立侵蚀强度宏观估算模型。最后用年降水量与年输沙量的关系对模型进行改进, 得到如下适用于多沙粗沙区的小流域侵蚀量计算模型

$$\lg M_s = \frac{21.3}{\frac{3}{G_m} + \frac{55}{H_{sd}} + \frac{9}{C_r} + \frac{10}{W_r}} + \left(0.92 - \frac{1.69}{\frac{3}{G_m} + \frac{70}{H_{sd}} + \frac{8}{C_r} + \frac{9}{W_r}} \right) \ln(R_s R_d) + 0.67 P_d - 6.85 \quad (1-4)$$

式中: M_s 为侵蚀模数, t/(km² · a); G_m 为沟壑密度, km/km²; H_{sd} 为沟谷切割深度, 即沟缘线至沟底的高度, m; C_r 为植被因子指标, 无量纲; W_r 为地表物质因子指标, 无量纲; R_s 为年汛期 (7、8、9 月) 降水量, mm; R_d 为年最大一日降水量, mm; P_d 为人为因子指标, 无量纲。

该模型采用的是淤地坝资料, 仅能反映多年平均状态, 不能反映年际侵蚀与降雨的变化对侵蚀的影响, 更不能反映单次暴雨对侵蚀的影响。

以上公式都只是从某些方面反映了对流域产沙的影响, 因此, 有相当大的局限性, 应结合本地区具体情况作必要修正。

二、确定性模型

确定性模型亦称为理论模型, 是基于侵蚀力学、水力学、水文学及泥沙运动力学等基本理论, 利用各种数学方法, 把流域侵蚀产沙、水沙汇流及泥沙沉积的物理过程经过简化, 所建立起来的能模拟物理过程的产流产沙模型。在建立模型时, 既考虑物理概念、物

理过程，又适当借用水文方法，灵活性较大。下面介绍几个有代表性的模型，特别是美国 WEPP 模型，该模型在我国也得到一定程度的推广应用。

1. 美国 WEPP 模型

WEPP (Water Erosion Prediction Project) 模型是美国农业部于 1985 年组织力量开发研制的侵蚀产沙预测软件，主要用来预测耕地、草地和林地中的土壤水蚀、暴雨径流、根系层土壤水分、蒸散作用、植物生长及积雪的融化等，还可用以评价各种流域的管理活动。历经 10 年，1995 年发布了第一个官方正式版本 WEPP' 95，在随后的年份中又分别发布了几种不同的版本。WEPP 包含坡面 (Hillslope version)、流域 (Watershed version) 与网络 (Grid version) 3 个版本。基本版本为坡面版，是其他两个版本的基础。坡面版可直接替代 USLE 方程，并比 USLE 的功能更强。流域版将具有不同均匀宽度的坡面单元与侵蚀沟及集水单元联系起来。WEPP 网格版，将许许多多坡面联系在一起，来模拟一个大区域的土壤侵蚀和泥沙输运过程，这一版本可模拟一次降雨过程中全区域内的产沙量。下面对 WEPP 模型的基本理论、模拟过程、结构、功能模块等进行简要介绍。

(1) 基本理论与模拟过程。WEPP 模型将整个流域划分为坡面、沟道和拦蓄设施 3 个基本部分。土壤侵蚀过程包括剥离、搬运和沉积。剥离发生在坡面和沟道中，沉积可以发生在任何地方。降雨所产生的径流和泥沙先由坡面从上往下输送，再经过沟道或拦蓄设施，最后离开流域出口。在此过程中沿途不断有剥离和沉积发生。在模拟过程中，首先计算坡面侵蚀，然后模拟沟道和拦蓄过程。坡面流过程概化为片流和细沟流两部分。坡面侵蚀包括细沟间侵蚀和细沟侵蚀。细沟间侵蚀被认为是雨滴击溅使土壤剥离，然后被片流输送到细沟，由细沟沿坡面向下搬运送入沟道或拦蓄设施。细沟侵蚀是径流剥离力、泥沙搬运力和输沙量的函数。坡面部分先计算径流过程，然后沿坡面从上到下模拟泥沙的剥离、搬运和沉积。只有最后一段坡面上的泥沙进入沟道。坡面模拟结束后，把模拟结果存入一个文件中，然后进行沟道和拦蓄模拟。储存坡面模拟结果的文件称为“传递”文件，主要存储如下信息：暴雨历时、汇流时间、径流深度、径流总量、洪峰流量、总剥离量、坡面上的总沉积量、各粒级的泥沙含量、各颗粒占总泥沙的比例等。在沟道中，当水力剪切力大于土壤临界剪切力并且泥沙含量小于泥沙搬运力时才出现剥离。当泥沙含量大于搬运力时出现沉积。

(2) 模型结构。WEPP 主体程序用 ANSI FORTRAN77 编写。它有一个方便的接口程序 (C 语言编写)，用于编辑、管理和查看输入参数和输出结果。模型结构主要包括以下几点。

1) 输入文件。WEPP 是一个以一天为步长的模拟模型。运行中，每一天对土壤侵蚀过程有重要影响的植物和土壤特征均被输入计算机。WEPP 的所有输入参数主要包含在 10~12 个文件中，这些输入文件以文本格式编辑和储存，一般都比较容易编辑，只有作物与管理数据文件较为复杂。这些输入文件主要有气象数据文件、坡面数据文件、土壤数据文件和作物与管理数据文件。每一类型的文件都有各自规定的格式和不同的内容项。若进行灌溉模拟，还需要其他相关的输入数据。在应用 WEPP 的流域版时，还需要流域沟道系统和汇水区数据文件。气象数据文件可通过天气发生器 (CLIGEN) 生成。用户可利用 WEPP 提供的界面进行气象数据输入，也可从外部输入。坡面数据文件可通过模型提

供的界面或人工输入两种方式生成。土壤数据文件可通过模型界面或文本编辑器生成。作物与管理数据文件包含的数据量最多也最为复杂，其参数类型也较多，可通过模型界面或文本编辑器生成。

2) 用户界面。WEPP 通过计算机运行，与所有的计算机软件一样，它向用户提供了各种运行程序的界面。通过用户界面，用户可以很方便地生成和修改输入数据，进行模拟、快速浏览输出结果等。界面采用下拉式菜单设计，通过菜单命令，用户可建立输入文件、编辑运行方式和定义输出数据格式，此外也可修改界面的颜色等。

3) 输出成果。根据用户的不同需要，WEPP 可生成不同种类和不同精度的输出结果。最基本的输出结果包括径流和侵蚀的主要信息，并且可输出每场降雨、月平均降雨以及年平均降雨的基础数据。输出结果包括坡面土壤流失量和平均泥沙沉积量，还包括泥沙输移量、受冲刷和被搬运泥沙颗粒的粒径分布以及特殊地段的泥沙沉积量。

WEPP 也可以生成某一坡面的输出结果，其最基本的输出结果包括整个流域径流和侵蚀的主要信息。整个流域以及流域的每一个单元，其泥沙输移比、泥沙沉积量、不同地表状况指标和泥沙颗粒粒径分布均可在输出模块中生成。若汇水区在流域内部，汇水区的输入和输出水量以及泥沙量也可生成。另外，还可输出与降雨过程相关的图表、曲线等，并输出土壤、植被、水分平衡、作物、冬季过程等相关数据。

(3) 功能模块。WEPP 模型功能可以概括为天气随机生成、水文过程、地表径流、土壤、植物生长和残留物分解、冬季过程、灌溉、侵蚀 8 个模块。

1) 天气随机生成模块。WEPP 模型所需要的气象数据可由用户直接输入或由天气发生器 (CLIGEN) 生成。CLIGEN 可生成日降雨量、日最高和最低气温、日太阳辐射量。日降雨量由 4 个变量来描述，即降雨深度、雨强峰值、降雨过程中达到雨强峰值的时间、降雨历时。

2) 水文过程模块。水文过程包括入渗、产流、地表蒸发、植物蒸腾、土壤水饱和浸透、植被和残茬截流、截持水量、土壤亚表层瓦管排水等。入渗过程采用修正后的 Green-Ampt 方程进行计算，产流采用运动波理论公式进行计算，水量平衡方程是修正后的 SWRRB 水量平衡方程。

3) 地表径流模块。该模块主要计算地表径流过程的水力学机制，其中包括土壤糙率、残茬覆盖和死地被物层对于流速、水流剪应力以及径流挟沙力的影响。

4) 土壤模块。土壤模块主要分析土地耕作对不同土壤特性以及模型参数的影响，也可模拟降雨过程以及对土壤参数的影响等。此外，土壤模块还考虑了耕作、风化、团聚体和降雨等对土壤及地面特征的影响，通过模拟分析计算，可向水文模块提供许多用以估算地表径流量、径流速度和渗透量等的必要资料。

5) 植物生长和残留物分解模块。植物生长和残留物分解模块可模拟农田及分布区内的植物生长和残茬物分解，并可模拟影响径流及侵蚀过程的植物变量的时间变化。植物生长模块可估计植被、地表残留物、覆盖残留物、茬与叶面指数、活根及死根、活生物量和作物产量数据等。残留物分解模块模拟的是地表残留物、覆盖残留物和残根的分解。

6) 冬季过程模块。冬季过程模块包括土壤冻融、降雨和融雪。土壤与外界环境之间的热量流动受每日温度、太阳辐射、残留物覆盖、植被及雪的影响，太阳辐射、气温和环

则共同作用于融雪过程。

7) 灌溉模块。灌溉模块模拟灌溉类型、灌溉量、径流量和侵蚀量等,可模拟喷灌和明渠灌溉两种灌溉方式。喷灌模拟可看作是一场标准雨强的降雨,而明渠灌溉则可模拟壤中流、明流和异重流的完整过程。

8) 侵蚀模块。WEPP 将土壤侵蚀过程分为剥离、输移和沉积 3 个阶段,土壤剥离(即侵蚀)分为细沟间和细沟侵蚀两种方式。WEPP 模型使用处于稳定状态下的泥沙连续方程,该方程可计算坡向纵剖面和流域泥沙冲刷及沉积的净值。模型把土壤的冲刷过程看作是雨强与流速的共同作用过程,把泥沙的输移过程看作是坡面与地表糙率共同作用的过程。以泥沙输移方程来估算沟道中的泥沙输移量,并根据径流中泥沙含量、径流输沙能力和泥沙的沉降速度来推算泥沙的沉积量。

WEPP 作为新一代土壤侵蚀预报模型,可以预报和模拟每天或每次的降雨、入渗、地面径流过程产生的侵蚀和泥沙输移等,还可以计算日、月、年平均径流和泥沙输移状况等,是指导水土保持措施优化配置、水土资源保护与持续利用的有效工具。近年来,在 WEPP 模型基础上,还利用地理信息系统(GIS)技术开发研制了 GeoWEPP (Geo-spatial interface for WEPP) 模型,其界面是基于 Arc View 开发而成的,可直接利用数字化数据对侵蚀量进行估算。同时,模型允许直接输入各种地理数据,如数字高程模型、地形图等,便于评价流域水土保持规划的可行性。WEPP 模型是一个迄今为止最为复杂的描述土壤侵蚀的模型,它克服了美国通用土壤流失方程 USLE 及其修正版 RUSLE 在预测中的缺陷,应用前景十分广阔。

2. 谢树楠模型

谢树楠等(1993)从泥沙运动力学基本理论出发,基于以下 9 个基本假定:暴雨产生的径流按坡面一维流动考虑;压强按静水压强分布;流动中的动量系数按常量考虑;坡面角度不变;坡面土层的组成是均匀的;泥沙不考虑黏性;在计算时段内降雨强度和渗透率不变;沟道泥沙的输移比为 1;不考虑前期含水量的影响。建立起坡面产沙量与降雨强度、坡长、坡度、径流系数和地表泥沙中值粒径的函数关系。在此基础上,考虑植被覆盖和土壤类型对土壤侵蚀的影响,得出流域产沙量的计算公式,并用黄河中游的中等流域资料进行了精度检验,结果表明该模型具有一定的计算精度。由于该模型公式的推导过程中一些参数的确定结合了具体的应用流域,使模型难以用于地形地貌差异较大的地区。

3. 蔡强国模型

蔡强国等(1996)在考虑了黄土丘陵沟壑复杂地貌特征和侵蚀垂直分带性的基础上,建立了一个有一定物理基础的能表示侵蚀—输移—产沙过程的小流域次降雨侵蚀产沙模型。它由 3 个子模型构成:坡面子模型;沟坡子模型;沟道子模型。模型考虑了降雨入渗、径流分散、重力侵蚀、洞穴侵蚀及泥沙输移等侵蚀过程。从侵蚀机理上对影响侵蚀过程的因子进行定量分析,从而建立了黄土丘陵区侵蚀产沙过程模型。该模型旨在从理论上阐明坡面侵蚀产沙规律,因此模型结构尤其是坡面子模型较为复杂,在推广应用时受到模型参数的限制。

4. 汤立群模型

汤立群(1996)认为坡面产沙量取决于坡面水流挟沙力与可供沙量的对比关系,若水

流挟沙力小于供沙量，则产沙量等于水流挟沙力；反之，水流将进一步冲刷表土，形成径流侵蚀，产沙量就等于供沙量与径流侵蚀量之和。据此，由坡面泥沙颗粒的动力平衡条件，推导出坡面上细颗粒泥沙的起动剪应力，由坡面径流的剩余输沙能力，导出坡面径流的侵蚀量计算公式，与雨滴溅蚀公式一起，构成了一个完整的流域产沙模型。此模型充分借鉴了国外已有的研究成果，模型结构简单，并考虑到黄土地区地形地貌和侵蚀产沙的垂直分带性规律，将流域划分为梁峁上部、梁峁下部及沟谷坡 3 个典型的地貌单元，分别进行水沙演算。但是模型中的雨滴溅蚀公式仅为初步研究成果，需要进一步率定。

三、随机模型

随机产沙模型是利用以往的资料和降水—径流—产沙过程的随机特性建立起来的，由于其发展和应用在很大程度上受到缺乏长期流域降雨径流和产沙记录资料限制，所以应用得较少。但是随着流域产沙模型研究技术的发展，不少研究者开始重视土壤侵蚀产沙随机模型的开发应用。目前，土壤侵蚀产沙随机模型在国外研究应用较多，而国内的研究尚处于起步阶段，并不多见。

习 题

- 1-1 何谓古代侵蚀和现代侵蚀？
- 1-2 何谓土壤正常侵蚀和加速侵蚀？
- 1-3 土壤侵蚀按其发生的性质，可分为哪几种类型？
- 1-4 分析影响土壤侵蚀的因素。
- 1-5 何谓土壤侵蚀模数？它有何重要意义？
- 1-6 我国的土壤侵蚀强度如何分级？黄河支流窟野河流域的多年平均侵蚀模数为多大？
- 1-7 侵蚀模数与流域输沙模数有何不同？
- 1-8 侵蚀产沙模型一般分为几大类？
- 1-9 写出通用土壤流失方程（USLE），并说明式中各变量的意义。
- 1-10 论述 WEPP 模型的特点，并说明其模型结构主要包括哪些部分。