

# 土壤侵蚀的流体力学机制 (I)——水蚀\*

戚隆溪 王柏懿

中国科学院力学研究所, 北京 100080

**提要** 土壤的加速侵蚀对农业发展和人类生存构成了严重威胁, 变为当前全球性环境灾害之一。因此, 对土壤侵蚀及其预防、控制途径的研究引起了人们的普遍关注。本文通过对国外文献的广泛调研, 系统地分析与评价了有关土壤水力侵蚀的研究进展。

**关键词** 土壤物理; 水蚀; 流体力学机制

目前, 土壤的加速侵蚀已构成了对农业发展和人类生存的严重威胁, 变为当前全球性环境灾害之一。它既是土地长期生产力退化的主要原因, 又是水体非点源污染的重要方面。这一点对于象中国和印度这样的发展中国家更为严重。世界观察研究所主席 Brown 曾写道<sup>[1]</sup>: 由于世界上1/3—1/2的耕地是以眼光短浅的方式经营, 这部分土地的土壤已由再生资源变为非再生资源。以目前严重的侵蚀速率推算, 土壤资源正以每年0.7%的速度减少。世界耕地中还有许多被采矿业所占, 也实际上是把耕地作为象石油那样的消耗性资源来对待。粗略估计表明<sup>[2]</sup>: 全世界因土壤侵蚀和荒漠化使每年的农地损失分别为300万公顷和200万公顷; 到2000年, 农地可能损失1/5—1/3; 全球每年流入海洋的泥沙已由农业发展前的20亿吨增加到现在的240亿吨。因此, 对土壤侵蚀及其预防、控制途径的研究引起了人们的普遍关注。

按最广义的见解, 土壤侵蚀是自然景观发展中的一种地表剥蚀过程, 它是从地球诞生起就发生着并将继续发展下去, 一般包括地质侵蚀和人为侵蚀两大类。前者是一种自然侵蚀过程, 亦称正常侵蚀, 是风化与成土过程的重要组成部分。后者则是人类在开发利用土地过程中(包括耕作, 砍伐或其它毁坏损伤植被使土壤裸露的活动)造成的加速侵蚀, 其速度和规模往往比自然侵蚀大得多。许多侵蚀控制措施都是针对人为侵蚀而设计的。不言而喻, 侵蚀研究、土壤流失预报和侵蚀控制技术的应用必须密切结合, 作为一个整体加以考虑。从力学角度来看, 土壤侵蚀是一种做功的过程, 引起侵蚀的主要作用力是水和风, 是流体介质造成

\* 国家自然科学基金资助项目

土壤颗粒的运动。因此我们认为这是一种流体力学过程，或者更严格地讲，是两相流动过程（对于水蚀和风蚀，还可以分别看作是液固两相和气固两相流体动力学过程）。当侵蚀力超过土壤介质的内聚力或抵抗力时，它们就可以使土壤团粒破碎、分散，使个别颗粒从土壤母体中分离出来并发生输运。从这个意义上讲，土壤侵蚀是一种双阶段过程。当侵蚀介质的能量不足以挟带输运这些颗粒时就会发生沉降和淤积，这可称之为第三阶段。这样区分是由于有些研究（例如广泛应用的通用土壤流失方程）只考虑了土壤的流失（或侵蚀）部分而未计入沉积部分。因此，从狭义的理解，土壤侵蚀只是指水或风所引起的地表物质的移动，本部分将分析水力侵蚀过程。

任何国家或地区的土壤保持规划都必须以可靠的侵蚀速度和流失数量的数据为依据，这要收集和积累各类基础资料。例如，美国曾对南非联邦土地上近20万个样区进行了调查，才做出约有1/3耕地正在遭受严重侵蚀的报告。后来的另一次类似的预测抽样数目则超过100万。这不仅耗费大量的人力、物力和财力，而且通常需要经过数年甚至数十年的时间。尤其应指出的是，侵蚀资料往往具有局限性。这是因为侵蚀量级和类型在空间和时间上的变化性极大，简单地推广某一地域的数据可能导致很大的误差。因此对侵蚀过程的物理机制进行细致的分析，并建立预报理论就越来越受到重视。一种成功的预报方法往往能够外推。这对于一些几乎没有原始资料的发展中国家尤为重要<sup>[3]</sup>。因此，一个多世纪以来，地貌学、土壤科学、农业工程学、土木工程学、水文学、气象学、生态科学和环境科学，甚至社会科学和经济学等众多学科领域的专家、学者和工程师们在土壤侵蚀的灾害评估、形式分析、预报模型、监测方法及控制对策等方面开展了广泛的工作并出版了一系列专著<sup>[2,4-14]</sup>。但是，鉴于土壤侵蚀问题的复杂性，精确可靠地预报土壤侵蚀的规模（包括其范围，程度和速率）以及它在经济和环境方面所造成的后果仍然是困难的。所以深入地探讨土壤侵蚀的机制，对侵蚀过程作出更加科学的定量预测成为各国科学家共同奋斗的目标。

## 1 水蚀研究进展的回顾和展望

关于土壤侵蚀的第一个科学研究是德国土壤学家 Wollny 在 1877—1895 年间完成的实验。1915年，美国林业局在犹他州开始了第一个定量试验。1917年，Miller 则在密苏里州进行了农作物及轮作对侵蚀和径流影响的小区试验研究。这些试验导致了美国在1923年出版了第一批野外试验小区研究成果。1928年美国国会的拨款更推进了这类研究，使 Bennett 得以在1928—1933年间建立起10个田间试验站网。1935年美国土壤保持局成立。在随后的10年间，试验站又扩大到44个，这些早期的现场实验工作为土壤侵蚀的研究积累了宝贵的数据。当然，除了美国，在英国、非洲、亚洲和澳大利亚等地区都开展了不少田间试验研究。上述这些研究大多是应用研究，包括侵蚀防治措施和小流域径流的试验等，基本上是经性的。

一般而言，任何一门研究可以称之为科学时，必须具备两个条件：首先它要能够确定所研究过程的起因与结果之间的定量关系；其次它应能够预测该过程在已知条件下的演化规律，因此，人们亦要求土壤侵蚀的研究从对现象的描述推进到对过程的分析上来。关于土壤侵蚀机理的基础研究是从40年代逐步开始的。1940年，Laws<sup>[15]</sup>第一次完成了关于自然降雨的详尽研究，随后，Ellison<sup>[18]</sup>第一个完成了关于雨滴对土壤机械作用的分析探讨，

从而为土壤侵蚀科学开辟了一个新的领域。

同时，一批美国科学家开始尝试建立土壤侵蚀预报的经验方程式。Zingg<sup>[17]</sup>第一个给出关于片蚀和细沟蚀的预报模型。1941年Smith<sup>[18]</sup>给出了四种作物-土地处理组合的估算曲线。Browning等人<sup>[19]</sup>则对土壤的可蚀性及栽培的影响进行了专门的研究。Musgrave<sup>[20]</sup>在1947年提出了降雨特性和土壤侵蚀总量之间的关系式，这个坡度-措施方程曾被广泛应用于估算流域的总侵蚀量达十年之久。后来Smith和Whitt<sup>[21]</sup>还根据坡度、坡长、作物轮作、土壤保持措施和土壤类型等因素给出一个估算密苏里州粘壤土土壤流失量的方程。此方程与后来的通用土壤流失方程在形式上很相似，只是没有独立的降雨因子。从50年代中期开始，美国开展了一系列更广泛、细致和系统的研究项目，使土壤侵蚀的定量预报研究出现了一个崭新局面。此时，侵蚀研究试验扩大到26个州的48个试验站。他们通过定量测定农地试验小区和单一作物小流域在自然降雨条件下产生的径流和土壤流失量，研究了地形、作物种植法、管理技术及预防措施的影响。许多工作是先完成侵蚀机制的实验室研究后，再补充野外现场试验的。60年代以后，由于使用了降雨模拟装置，大大加快了野外田间试验的进度。特别应当指出的是，1954年在Purdue大学建立了由Wischmeier领导的侵蚀研究资料分析实验室，确定了土壤侵蚀预报研究要克服区域性研究的固有缺点。于是开始对来自21个州36个地区的200多个小区的6500个暴雨资料、8250个小区每年土壤侵蚀资料和2500个每年降雨冲刷模拟数据进行了统一汇编和分析。由于所有试验站都按照标准的设计程序进行实验，就使得人们可能对差异很大条件下影响侵蚀的诸因子加以评定。在对各种因素不同算术排列组合进行多重回归试验分析工作基础上，Wischmeier及其合作者们导出了所谓的“通用土壤流失方程”(USLE)<sup>[22]</sup>。这是一个基于因子的方程。它借助于现代化的数据统计分析方法使美国所有田间试验小区的结果发生了关联，通过降雨因子、土壤可蚀性因子、坡长因子、坡度因子、作物覆盖与经营因子以及土壤保持措施因子等6个因子的连乘值这种线性关系来表示土壤的流失量，并将6个因子的数值通过一系列图表(如降雨年侵蚀力线图——EI图和EI分布曲线，土壤可蚀列值线图，坡度作用图等)给定，这样可以对已知环境条件下的侵蚀作出预报。在1987年，美国的ARS和SCS等单位开始了一个修订USLE的合作研究计划<sup>[23]</sup>。他们通过评价USLE及其数据库、分析最新获得的资料 and 理论来建立所谓的修正通用流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation)。在RUSLE中仍然保持着USLE采用的6个因子，但它们的内涵和取值都有很大的更新。

在60年代末，Meyer和Wischmeier<sup>[24]</sup>根据已有的土壤侵蚀知识，发展了一个基于物理过程的预报模型框架(process-based technology)。它能计算沿着非均匀斜坡上的侵蚀和沉积。但是该模型一直未应用于现场，原因是当时的数据库不完备及计算机能力不充足，因此该预报技术的发展就搁浅了。总的来看，在60—70年代期间，通用土壤流失方程一直是主导的侵蚀模型，其本身的发展不大，尽管人们围绕它作过一些局部的调整和改进。

应当强调指出的是，由于科学基础差而且一些基本假设的合理性尚待证明，通用土壤流失方程一直受到相当数量学者的批评。特别是社会与科学发展到今天，USLE已不能满足当代人们对土壤侵蚀预报的要求<sup>[25]</sup>。例如它不能反映现场数据的变化趋势；不能很好地应用于垄作体系；不能明确地表示出径流效应等基本的水力侵蚀诸过程。因此土壤侵蚀研究界一直有彻底取代USLE的呼声<sup>[26]</sup>，他们指出，改进通用土壤流失方程的根本途径是应当回到

侵蚀机制的基本原理上来, 根据可靠的物理-力学基础来建立侵蚀体系模型。这点对于估算随时间变化的侵蚀速率而言更具有实际意义。目前, 由于计算机能力的扩大, 气候、土壤和作物数据库的建立, 以及在气象学、水力学和侵蚀科学方面知识的深化, 新一代土壤侵蚀预报技术已经可以形成并逐步取代 USLE, 其特征是突出基本过程和流体力学基本概念。美国农业部 (USDA) 在 1985 年决定开始为期 10 年的改进水蚀预报技术的研究发展计划。据 SCS 预计, 到 1995 年 WEPP 可以全部完成并提供使用。

## 2 水蚀的力学机制

由水所引起的土地表面物质的移动称为水蚀。从根本上来讲, 水蚀来自降雨事件。当降雨量大于入渗率时, 就会出现地表径流, 这是历时短、强度大的突发性降雨或暴雨条件下常常发生的情况。在地表径流占优势的区域, 水蚀现象总是比较活跃的, 特别是对于那些没有植被覆盖着的土壤。因此, 从起源来看, 水蚀包括降雨侵蚀和径流侵蚀。在平缓斜坡上, 降雨是导致土壤颗粒分离的主要因素, 径流是造成土壤颗粒输移的主要因素。但是, 当坡度增加时, 径流亦可能成为导致分离的主要动力, 而雨滴的输运能力也可增加。不过, 总的来说, 农地土壤侵蚀的根本原因在于降雨, 它是降雨-径流与土壤相互作用的结果。因此对土壤水蚀影响最大的因素是年均降雨量。图 1<sup>[27]</sup> 表明当有效年均降雨量为 300mm 左右时, 水蚀将达到其最大值。在降雨稀少的地区, 降雨侵蚀轻微, 径流量亦小, 故总侵蚀并不严重而且侵蚀随降雨量的增加而加剧。对于年降雨较大地区, 植被覆盖将会增多从而保护了地表土壤免受侵蚀。因此当年降雨量超过 300mm 时, 土壤侵蚀便随雨量的增加而减弱。但是 Douglas<sup>[28]</sup> 又指出, 当降雨量增加到一定程度后会使得径流有显著的提高, 仍可能使土壤侵蚀变得更加严重 (参见图 2)。当然, 除了雨量以外, 不同降雨雨型的侵蚀后果亦有很大的差异。例如, 温带降雨的分布特性和热带降雨完全不同, 其中 95% 为雨强小于 25mm/h 的低强度雨, 而能引起土壤侵蚀的起始降雨强度约等于此值。因此温带降雨中大部分雨量并未造成侵蚀。

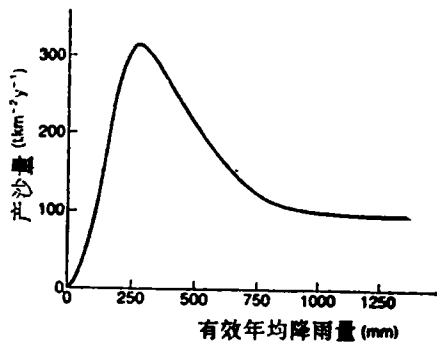


图 1 产沙量与有效年均降雨量的关系

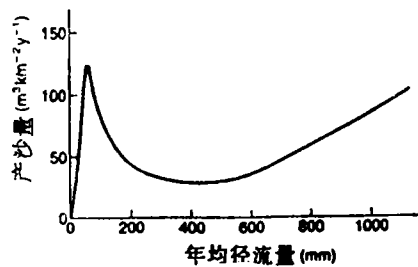


图 2 产沙量与年均径流量的关系

降雨引起土壤侵蚀的能力与其动能有关。雨滴的打击能量可以使土壤团粒破坏, 使土壤颗粒从其母体中分离出来, 并使其抛散到几厘米远处。径流可以通过其流体剪切作用使土壤颗粒从母体中冲散出来, 并可以挟带、搬运被分散的颗粒。Pearce<sup>[29]</sup> 指出, 降雨能量的大部分都消耗在与地面的摩擦中, 只有很小一部分能量 (对于雨滴是 0.29%, 对于径流是

3—4%)用于侵蚀。利用这些数字可以估计水蚀中各种过程的相对有效性。研究表明<sup>[13]</sup>:细沟中集中的流水对于侵蚀而言最有效,雨滴能量主要用于冲散分离土壤颗粒,漫流在输沙方面较沟流弱但比雨滴强。

当然,支配土壤侵蚀的物理过程十分复杂。降雨的侵蚀性(即侵蚀力分离和输运土壤颗粒的能力)和土壤的可蚀性(即土壤对侵蚀力分离-输运作用的抵抗能力)这两个因素的定量表述便构成理解侵蚀过程的基础。一般而言,气候的侵蚀力、土壤的可蚀性和地形的结合代表着某个地点的潜在侵蚀性,土地的合理利用(包括耕作制度和保持措施)则是借以控制侵蚀的重要因素。

按照地表径流逐渐集中的过程,可以将水力侵蚀形态划分为雨滴溅、片流侵蚀(或细沟间侵蚀)、细沟侵蚀、间歇性沟道侵蚀、切沟侵蚀和河道侵蚀等等;这些侵蚀形态的相对重要性一般依赖于人们防止侵蚀的目的。例如,若需要防止粮食生产受到的侵蚀危害,农地的溅蚀和沟蚀就是最重要的侵蚀类型;若需要考虑灌溉水库淤积的危险,那么切沟侵蚀和河道侵蚀便是最重要的来源。关于细沟、切沟和河道的侵蚀,学术界的看法比较一致。河道是指常年流水的溪流江河等,它通常不影响农地(除非河槽扩大沿着农地边界)。细沟是指地表上能够被耕作活动平整掉的小沟道,它们往往是间断的,沟深只有数厘米,一般不与河道等永久性排水系连接。切沟是坡面上的细沟合并后向宽深扩展而形成的渠道,农具已无法跨越,相对稳定,沟深可达1m左右,而且边坡较陡峭。间歇性沟道是近年来单独划分出来的一种切沟型式,它主要是指农地内一些天然的干排水沟,通常的农具仍然能够跨越。它们不是永久性沟渠,每年都会被犁平,但以后往往可在同一位置上重现。在早期的水蚀预报方程USLE中没有考虑这类间歇性短暂切沟流,故总是低估了侵蚀效应,从而引起了人们的关注<sup>[30-34]</sup>。对于初始阶段的几种侵蚀形态(即雨滴溅蚀、片流侵蚀、细沟间侵蚀),学术界的认识与提法尚不完全统一,在早期,许多学者忽略了雨滴溅蚀,而只考虑片蚀机制,后来有些研究者指出了溅蚀是侵蚀过程的重要阶段,但认为片蚀是一种想象出来的过程。他们主张摒弃“片蚀”概念而以溅蚀代替之。但是,直到现在,片蚀的提法仍在文献中屡见不鲜。当然这里有人认为片蚀主要是雨滴溅蚀。细沟间侵蚀也是近年来出现的提法,人们将径流沟道之间的土地称为细沟间面积。有人定义沟间侵蚀主要是雨滴溅蚀,有人则将它与片蚀视为一,总之现有文献中常常将这三个术语交互使用。

下面简要介绍各种侵蚀过程的流体力学机制<sup>[35-55]</sup>:

### 2.1 雨滴溅蚀(Rainsplash erosion)

雨滴撞击到地表可导致三种作用:(1)将土壤颗粒破碎,冲散并溅射出来,造成侵蚀;(2)压实封堵地面,减少雨水入渗;(3)增加径流湍流度。雨滴撞击是土壤颗粒从无遮蔽土地上分离出来的主要能量来源。天然降雨的雨滴粒径分布很宽(从细微的雾粒直到7.0mm左右大雨滴),它一般随雨强而增大,最具侵蚀性的粒径为1—3mm。雨滴撞击速度(一般达到自由沉降的终端速度)范围为5—9m/s,对于粒径2mm左右的普通雨滴,其值为6—7m/s。雨滴溅蚀的发生在本质上是水滴的打击力。雨滴降落到潮湿土壤时会形成一个击溅隆起。每个隆起由若干个土壤颗粒组成,外面包裹着水膜,在横向以抛物线形式运动(参见图3)。图4则给出雨滴击溅几何形状的示意图,其主要的几何参数有雨滴外膜角 $\alpha$ 、外膜半径 $r$ 、溅射角 $\beta$ 、溅射高度 $H$ 和陷穴宽度 $W$ 。而图5则是雨滴溅射所造成的土壤

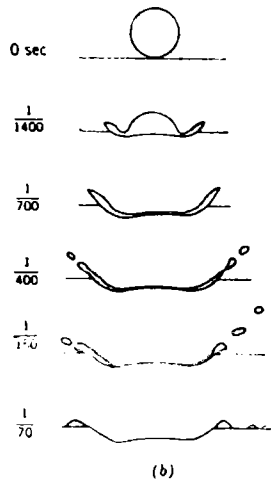


图3 雨滴冲击地面过程

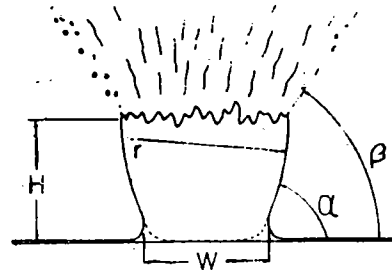


图4 雨滴溅射几何特性

颗粒运动情况的示意图。传递给土壤的动量有两个作用：一是压实效应，形成表面结皮；一是分散效应，使土壤颗粒从母体中脱离出来并由水滴挟带抛入空中。研究表明，水滴从撞击点弥散开时，其横向射流的局部速度几乎为雨滴撞击速度的2倍，因此其分散作用是相当大的。当然，土壤被雨滴分散情况还取决于它本身的剪切强度。当雨滴降落在有地表水（积水或漫流）的表面时，击溅的有效性依赖于水深。而且，存在着一个临界水深。水深超过此值时，雨滴所有的能量都消耗于地表水中，从而屏蔽了雨滴的撞击作用。雨滴溅蚀的特点是在整个地面上均匀分布，而且它主要是造成土壤颗粒的冲散分离，输运能力很差。因此如果没有地表径流将击溅的颗粒输移走的话，雨滴溅蚀只是一种局部效应。

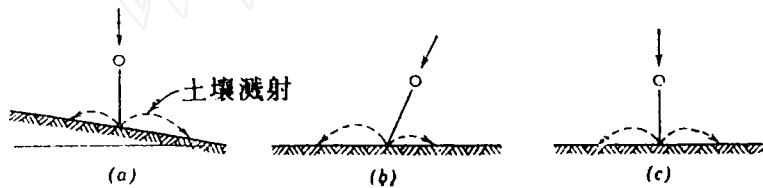


图5 雨滴溅射造成的土壤颗粒运动

## 2.2 细沟间侵蚀或片蚀 (Interrill erosion or sheet erosion)

人们定义片蚀为表层土壤被薄层水流均匀移除的现象，它是雨滴溅蚀和地表径流运输的共同结果。近年来，人们更多地采用“细沟间侵蚀”这个术语。

如前所述，当降雨速率大于入渗速率时，地表径流便可形成。通常径流开始以很浅的深度（薄膜）在整个地面均匀地流动一个较短的距离，这就是所谓的漫流，当漫流沿下坡方向运动时，总会遇到各种耕作行为或地形本身微起伏所造成的细沟，从而逐渐汇集。集中在这些小沟道中的径流称为细沟流，而仍然在沟间面积上的漫流则构成沟间流。漫流流动状态取决于流动 Reynolds 数： $Re = vr/\nu$ （其中  $v$  为流速， $r$  为水深， $\nu$  为流水的动力粘性系数）。

当  $Re < 500$  时, 流动处于层流状态; 当  $Re > 2000$  时, 流动为充分发展湍流。湍流有较大的侵蚀能力。在细沟间侵蚀中, 土壤是比较均匀地被分散和运输的, 显然, 它是雨滴和径流共同作用的结果。由于薄膜漫流冲散土壤颗粒的能力很小, 雨滴撞击是影响侵蚀率的主控因素。但是, 被雨滴溅蚀的大部分土壤颗粒要借助于沟间流而运输到农地以外, 这样才能构成明显的侵蚀效应, 其原因在于雨滴将土壤颗粒溅射到细沟中的百分比近似地等于总面积中细沟面积所占的百分比(它一般很小, 约为10%左右)。鉴于土壤本身具有抵抗侵蚀的能力, 漫流速度必须超过一定的阈值才能发生侵蚀。图6画出流速临界阈值随土壤颗粒直径的变化情况。漫流速度  $v$  可由曼宁方程确定。

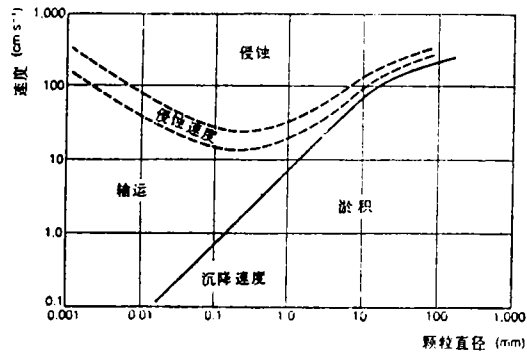


图6 临界流速与土壤颗粒直径的关系

### 2.3 细沟侵蚀 (Rill erosion)

细沟侵蚀和沟间侵蚀一样主要发生在倾斜坡地上。细沟具有间歇特性, 即某次降雨中所形成的细沟往往在下次降雨来临前已被破坏掉, 第二次降雨新形成的沟道通常是完全不同于以前的网络结构。一般而言, 细沟是从距坡顶某个临界距离以后才开始出现的, 它和漫流中驻波的出现相关联。Boon 和 Savat 给出了预报细沟形成判据:

- (1) 当  $F \leq F_c$  时, 细沟不会形成;
- (2) 当  $F > F_c$  而且泥沙含量  $\leq 20,000\text{ppm}$  时, 细沟可能形成;
- (3) 当  $F > F_c$  而且泥沙含量  $> 20,000\text{ppm}$  时, 细沟肯定形成。

其中  $F = v/\sqrt{gr}$  为流动 Froude 数, 而  $F_c$  为临界 Froude 数:  $F_c > 1 + 0.0035 d$  (这里  $d$  为土壤颗粒的中值粒径)。从漫流向沟流发展一般有四个阶段: (a) 未集中的漫流; (b) 带有集中水流路径的漫流; (c) 没有沟头的细沟道; (d) 带有沟头的细沟道。集中水流是沟流的主要特征。当流动的剪切作用超过土壤的抵抗力时, 细沟中的集中水流就会造成土壤的冲刷。因此细沟侵蚀中分散和运输两个子过程都是由于流水造成的。当然它所运输的部分土壤颗粒是从细沟间面积上溅射进来的。鉴于沟流的速度较大(一般为  $5-9\text{m/s}$ ), 它具有更大的侵蚀能力。故除了坡顶部分外, 坡地土壤流失的主要贡献来自于细沟侵蚀。一般而言, 细沟侵蚀随着坡地的长度和坡度的增加而增加。

### 2.4 切沟侵蚀 (Gully erosion)

切沟是连续性或者间歇性的水道, 其沟深且坡陡, 并相对稳定, 一般是长久存在的。当洪水径流增大, 或排水道泄水能力减小时, 就可能使水道的亚稳平衡状态受到破坏, 从而发生切沟侵蚀。切沟侵蚀常常以溯源前进的沟头有一跌水为特征。跌水通常是切沟中最活跃的侵蚀部位。跌水既冲刷了它所跌入的地面, 又击溅、掏刷了跌水面。跌水面的底部被侵蚀掉之后, 上部的土体悬空, 还可能发生崩塌而形成一个垂直面, 于是开始新的循环。研究切沟的发展总是要求分析沟头的前进及沟道剖面的增长。切沟侵蚀是因水流冲刷或边坡不稳定而引起的土壤流失。集中水流的挟带能力取决于泥沙尺寸、形状与密度、水流的速度、湍流度和流量, 以及沟道截面和水动力学粗糙度等。当径流的输沙能力大于其泥沙载荷时, 它就可

以冲刷河道以获取更多的泥沙，反之则会出现沉积。一般而言，切沟侵蚀很容易察觉，它是河道中泥沙的主要来源。但依照对农地或农业减产的危害性来看，切沟侵蚀不一定最重要。因为遭受严重切沟侵蚀的大多数土地，农业利用价值往往不高。但它在土壤瘠薄、植被稀少的半干旱地区分布较为广泛。最后关于坡面上土壤侵蚀和泥沙运输，可根据单元地表面积上的质量守恒原理给出下列基本方程（参见图7）：

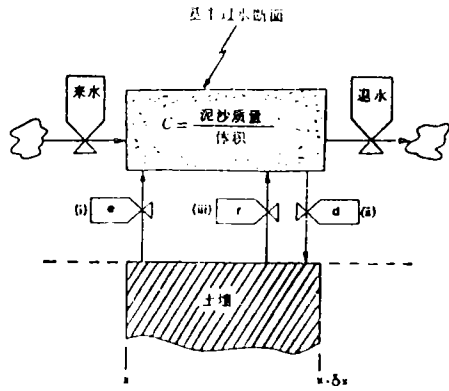


图7 三种侵蚀沉积过程的简示图

$$\frac{\partial}{\partial t}(DC) + \frac{\partial}{\partial x}(qC) = e - d + r,$$

其中  $D$  和  $q$  为地表径流的深度和流量， $C$  为单位体积流水中的含沙量， $e$  为降雨分离率， $d$  为泥沙沉积率， $r$  为水流挟移率。上式右端三项代数和表示净侵蚀率。只要给出地表水流的  $D$  和  $q$  以及侵蚀因子  $e$ ， $d$  和  $r$  的表达式（其中  $r$  可依照河流中推移质输运关系导出），就可以求解上述偏微分方程。

### 3 水蚀预报体系

预报水力侵蚀所造成的土壤流失量是侵蚀科学的重要任务。预报体系可以是基于因子的经验性方程，也可以是基于过程的分析性方程，可以是研究型模型，也可以是应用型模型。

#### 3.1 通用土壤流失方程 (USLE)

Wischmeier 等人在60年代中期完成的通用土壤流失方程是最早形成并得到最广泛应用的水蚀预报的经验性模型，它计算了丘陵地带农地上因细沟/细沟间侵蚀所造成的土壤损失，这里未计入切沟侵蚀和河道侵蚀的作用，亦未考虑泥沙淤积。其表达式为

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

其中  $A$  为年均土壤流失量， $R$  为降雨-径流侵蚀性因子， $K$  为土壤可蚀性因子， $L$  为斜坡长度因子， $S$  为斜坡坡度因子， $C$  为作物覆盖及管理因子， $P$  为水土保持工程措施因子。这里，除  $C$  和  $P$  以外，其余的因子都是由自然环境条件确定的，人们一般无法控制与改变。进一步分析 USLE 方程可以发现， $A$ 、 $R$ 、 $K$  为三个有量纲参数，构成了一个基本的方程  $A = RK$ 。这里  $A$  为气候与土地条件给定时长期平均的年流失量。当 USLE 用来选择适当的农业措施时， $A$  值便为允许的土壤年流失量，即土地生产力不出现衰退时的最大允许流失量（对于美国，其值范围为 0.4—1.8 公吨/公顷·年）。另外两个基本因子则简要说明如下：

(1)  $R$  因子： $R$  因子作为一种输入将驱动细沟/细沟间侵蚀过程，其值的不同代表着气候（降雨）侵蚀力的差异。按照定义，它根据通过降雨数值而获得的年均累积侵蚀指标  $EI_{30}$ ，即降雨动能及其最大 30 分钟雨强的乘积<sup>[58]</sup>： $R = EI_{30}/100$ 。

(2)  $K$  因子： $K$  为标准地块中单位侵蚀力所产生的土壤年流失量。它是某一特定土壤固有可蚀性的一种定量描述，表示土壤对分离及输运作用的抵抗能力，其相对值范围为 0.10—0.45。所谓的标准地块是指长度为 22.13 m、宽度为 1.83 m、坡度为 9% 的顺坡犁翻



的无遮蔽休闲地。从土壤本身的特性而言,可蚀性因子取决于质地、团聚体稳定性、剪切强度、渗透能力,以及有机质含量与化学成分等。人们曾利用各种途径(包括实验室及现场的静态或动态方法)来确定土壤的可蚀性。Olson等人<sup>[57]</sup>曾对23种美国主要土壤的 $K$ 值进行了直接测量。近年还有人试图在实验室内利用扰动土样来测定 $K$ 因子<sup>[58]</sup>。不过,这些都需要大量的时间,而且费用昂贵。Wischmeier等<sup>[59]</sup>建立了土壤性质与可蚀性的相关式,还给出了土壤可蚀性诺谟图。

通用方程USLE中涉及到的其它4个因子都是补充性因子,表示各种条件对基本方程标准条件的比率。例如,长度因子 $L$ 表示特定坡长地块流失量对于标准长度(22.13m)地块流失量之比。依此类推,相应于坡度因子、作物经营因子 $C$ 和保持措施因子 $P$ 的标准条件分别为标准坡度的9%(5°)、标准经营条件(无遮蔽的犁翻地)和无任何水土保持工程措施的标准状况。

### 3.2 修正的通用土壤流失方程(RUSLE)

80年代提出的修正的通用土壤流失方程除了将所有的算法实现了计算机化(整个计算可以在微机机上完成)外,还在原有的通用土壤流失方程基础上引入了下述变化:

(1)  $R$ 因子 USLE可预报的范围主要是Rocky山脉以东的丘陵地带,不包括径流能量和线性侵蚀占主导的降雨特征差异很大的山区。它根据1200多个观测点的实测数据给出了美国西部降雨-径流侵蚀性因子的新值,还修订了东部地区的数据,从而画出一个新的等侵蚀力图。它还重新计算了平缓坡地在长期的强暴雨期间的 $R$ 值,这里考虑到土壤表面的积水会减少雨滴溅击的侵蚀力,因而 $R$ 值应当降低。此外,它还计入了有积雪或部分冻结土壤上冰雪融化和降雨的联合效应。

(2)  $K$ 因子 RUSLE在估算 $K$ 值时认为它与15天间隔的 $RI$ 值成比例,并采用加权方法给出了可随季节变化的土壤可蚀性因子<sup>[60]</sup>。它重新评估了世界上各类土壤的可蚀性数据,并发展了一个关系式,可以将 $K$ 因子表示为土壤颗粒“平均”直径的函数,这样就解决了用户在确定某个现场地块 $K$ 值时所遇到的困难。此外还计入了土壤表面及其内部的岩石碎片的影响。

(3)  $LS$ 因子 实践表明在USLE中 $L$ 因子和 $S$ 因子的10%误差所导致的土壤流失量估算值的误差分别为5%和20%。特别是选择坡长往往要取决于人们的判断,因此RUSLE改进了确定坡长的方法,分别给出了三个坡长关系式。对于坡度,它给出一个几乎是线性的关系式,这样可以解决陡坡情况下实验数据及现场观测均与USLE的二次关系式不一致的问题。此外,RUSLE关于地形因子 $LS$ 的新算法可以反映出细沟侵蚀和细沟间侵蚀的比率而且可以更好地表示出复杂地形的坡度效应。

(4)  $C$ 因子 在一些实际应用中,往往难以得到许多作物经营条件下的 $C$ 因子。故RUSLE采用子因子方法来计算作物覆盖管理因子项: $C = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR$ 。其中 $PLU$ 为前期土壤使用因子, $CC$ 为作物植冠因子, $SC$ 为地表覆盖因子, $SR$ 为表面粗糙度因子,子因子 $PLU$ 和 $SR$ 的数值可根据土壤中作物根系和残茬所构成的生物质累积量来计算<sup>[61]</sup>,而子因子 $SC$ 的值则可由下式确定: $SC = e^{-bM}$ (这里 $M$ 为地面覆盖的百分数,系数 $b$ 的取值范围为0.025—0.050),它随着细沟侵蚀(相对于细沟间侵蚀)的增加而增大。

(5)  $P$ 因子 在USLE的6个因子中, $P$ 因子可表示地表状况是如何影响水流路径

和流动特性的，但其数值最难准确测定。在RUSLE中，重新分析评估了等高耕作等效效应并导出了等高耕作、梯田、条播轮作，地下排灌和牧场经营等情况下P因子的新值。

表1<sup>[22]</sup>给出了分别采用RUSLE和USLE计算土壤流失量的结果，其中分析了两个典型农地实例——Indiana州Indianapolis处的一块玉米地和Arizona州Tombstone处的一片牧场。

**表 1 两个典型农地条件下采用 RUSLE 和 USLE 预报土壤流失的比较**

因 子	地		点	
	玉 米 地 (Indiana 州)		牧 场 (Arizona 州)	
	RUSLE	USLE	RUSLE	USLE
R	180	175	65	70
K	0.32	0.37	0.32	0.26
LS	1.94	1.72	1.52	1.72
C	0.236	0.252	0.014	0.0381
P	1.0	1.0	1.0	1.0
A	26.4	28.1	0.44	1.19

从科学上讲，USLE、RUSLE的限制是没有明确地表示出基本的流体力学（水力学）过程和侵蚀过程以及它们之间的相互作用。例如，径流效应应该在流体力学模型中反映出来，但在USLE、RUSLE中均没有直接采用某个因子将径流效应单独地表示出来。这样，如果要使USLE计及这一效应，就必须考虑修正其中的每一项。此外，USLE、RUSLE没有给出在农地内犁沟中的泥沙沉积。由于沉积是侵蚀过程的重要部分，特别是要求预报最终的流失量时。因此采用USLE、RUSLE预报的结果，有时会与现场数据出现明显的差异。当然，应当说明的是，作为一个从实验数据归纳出的经验方程，从表示影响细沟-细沟间侵蚀的各个因素的一阶效应而言，USLE、RUSLE是足够精确的了。

### 3.3 新一代水蚀预报体系 (WEPP)

90年代中期即将完成的水蚀预报体系是基于物理过程的新一代预报技术。这是一个可以按日计算的数值模拟模型。这就是说，在WEPP中与侵蚀过程相关的植物-土壤特性，每天都要更新一次。当有降雨时，WEPP就利用这些特性来判定径流是否会发生。如果模型预测应当出现径流，WEPP就会按照用户所选定的版本来计算空间各点处（或者在沟渠及小水库中）土壤的分离，输运和沉积。

WEPP包括三个版本：剖面，流域和格网。WEPP所考虑的侵蚀过程限于片蚀、细沟侵蚀以及沟渠中由于流体剪切冲刷而造成的泥沙分离，但它不包括经典意义上的切沟侵蚀（这里，切沟是指连续持有流水的大型沟渠）。WEPP中考虑了6种过程，现分别叙述如下：

(1) **侵蚀过程** WEPP包括泥沙的分离，输运和沉积三个过程。它运用细沟-细沟间概念来描述泥沙从土壤母体中的分离<sup>[30]</sup>。这里的细沟间侵蚀是指雨滴和甚浅水流所造成的

泥沙分离与输运,它是沟间斜率和雨强平方的函数(该雨强已考虑了地表覆盖和作物植冠等影响因素的修正)。细沟侵蚀则是指流水造成的泥沙分离,它可依照流动剪切作用来估算。泥沙在细沟和沟渠中的输运可采用 Yalin 方程<sup>[62]</sup>来估算,泥沙在流水中的沉积则根据泥沙载荷、输运能力和沉降速度得到。泥沙在贮水池中的沉积可依照 CREAMS 模型的方式求算<sup>[63]</sup>。

(2) **水文模型** WEPP 包括气候、入渗和“冬季”三个组成部分。气候组元利用人为生成的或实际测得的气候变量(包括暴雨量及持续期、峰值雨强与平均雨强之比、峰值雨强持续时间,每日的最高/最低气温、风速和风向、太阳辐照等)来估算径流的持续时间、峰值流率和总量等。WEPP 有一个气候生成单元<sup>[64]</sup>可以给出一组 15 年气候数据。入渗组元的基础是 Green-Ampt 方程<sup>[65]</sup>,但计入了地表积水效应。径流速率可根据降雨余量(降雨量与入渗量之差)求得。冬季组元是为了处理土壤冻结、积雪和冰雪融化等现象,它们都会影响地表径流的特性。

(3) **植物生长和残余根茬过程** WEPP 包括植物生长和根茬分解两个组成部分,用于估算在农地和牧场地表上下植物与根茬的状态。它可逐日地求算植物(包括地上或地下、生长着或已死亡等各种情况)的植冠覆盖高度和数量,叶面指数和根基面积,以及根茬覆盖等。

(4) **水利用过程** WEPP 的水平衡组元利用气候组元,入渗组元和植物生长组元等所给出的信息来计算土壤中各个指定分层的含水量,最底层的渗出量,以及潜在蒸腾量等。它也可以给出每日的土壤水状态。

(5) **流体水力学过程** WEPP 的水力学组元利用有关地表径流量,水动力学粗糙度,径流持续时间及峰值流率等信息来计算地表径流施加于土壤表面的流体剪切作用力,这是预报细沟侵蚀所必需的参数。这里要求计算细沟形状和水流深度。当然,在实际计算中还有许多具体问题,例如斜坡面上各种条垄如何表示的问题。有的条垄内可能有径流,有的条垄内没有,径流还可能在半途中断。这都给流体水力学过程的描述带来困难。

(6) **土壤过程** WEPP 的土壤组元逐日地计算土壤状态和地表变量(包括无规粗糙度、土垄高度以及土壤的密度,饱和导水率)以及土壤可蚀性参数和临界剪切力等。它考虑了耕作、风化、固结和降雨等因素的影响,而且特别注重广泛的现场研究<sup>[66]</sup>来确定土壤可蚀性。

总之,新一代的水蚀预报体系力求为一个能长期应用的预报技术提供适当的框架并发展成为一个动态的模型。它能够不断地进行修正改进,并及时采纳新的科学知识,以满足人们对侵蚀预报技术的各种新要求。除了发展模型本身外,人们还开展了各种研究对 WEPP 进行可靠性分析、不确定性分析等<sup>[67-89]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 Brown L R The global loss of topsoil. *J. Soil and Water Cons.*, **39** (1984): 162-165
- 2 Lal R. (Ed.). *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society (1988) (中译本《土壤侵蚀研究方法》,黄河水利委员会宣传出版中心译,科学出版社,1991年)
- 3 Foster G R, W C Moldenhauer and W H Wischmeier. Transferability of U. S. technology for prediction and control of erosion in the tropics. In: *Soil Erosion and Conservation in the Tropics*. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin (1982): 135-149

- 4 SCSA, Soil Erosion: Prediction and Control, The Proceedings of a National Conference on Soil Erosion, Purdue University, West Lafayette (1977): 24—26. Indiana (中译本《土壤侵蚀预报与控制》, 龚葆琼译, 农业出版社, 1981年)
- 5 Kirkby M J and R P C Morgan(Eds). Soil Erosion, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England (中译本《土壤侵蚀》, 王礼先等译, 水利电力出版社, 1987年)
- 6 Hudson N W. Soil Conservation (2rd ed.), Cornell University Press, Ithaca, N. Y. (1981)
- 7 Morgan R P C. (ed.). Soil Conservation: Problems and Prospects, John Wiley & Sons, Chichester (1981)
- 8 Schwab G O, Frevert R K, Edminster T W and Barnes K K. Soil and Water Conservation Engineering (3rd Edition), John Wiley & Sons (1981)
- 9 Zachar D. Soil Erosion, Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam (1982)
- 10 Arakeri H R and R Donahue. Principles of Soil Conservation and Water Management, Rowman & Atanheld Publishers (1984)
- 11 Hadley R F and D E Walling (Eds.). Erosion and Sediment Yield: Some Methods of Measurement and Modellings, Cambridge University Press (1984)
- 12 Beasley R P. Erosion and Sediment Pollution Control (2rd ed.), Iowa State University Press (1984)
- 13 Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation. Longman Scientific & Technical, Hongkong (1986)
- 14 Morgan R P C (Eds. ). Soil Erosion and Its Control, Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York (1986)
- 15 Laws J O. Recent studies in raindrops and erosion. *Agr. Eng.* **21** (1940) : 431—433.
- 16 Ellison W D. Studies of raindrop erosion. *Agr. Eng.* **25** (1944) : 131—136, 181—182.
- 17 Zingg A W. Degree and length of landslope as it affects soil loss in runoff. *Agr. Eng.* **21** (1940): 59—64
- 18 Smith D D. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agr. Eng.* **22** (1941) : 173—175
- 19 Browning G M, C L Parish and J Glass. A method for determining the use and limitations of rotation and conservation practices in the control of soil erosion in Iowa. *J. Am. Soc. Agro.* **39** (1947): 65—73
- 20 Musgrave G W. The quantitative evaluation of factors in water erosion. *J. Soil and Water Cons.* **38**, 2 (1983) : 133—138
- 21 Smith D D and D M Whitt. Estimating soil losses from field areas of claypan soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **12**, 9 (1947) : 485—490
- 22 Wischmeier W H and D D Smith. Predicting rainfall-erosion losses. Agricultural Handbook No. 537. U. S. Department of Agriculture, Washington D. C. (1976)
- 23 Renard K G, G R Foster, A Weesies and J P Porter. RUSLE: revised soil loss equation. *J. Soil and Water Cons.* **46** (1991) : 30—33
- 24 Meyer L D and W H Wischmeier. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. ASAE* **12** (1969) : 754—758, 762
- 25 Foster G R and L J Lane. 1987, Beyond the USLE: Advancements in soil erosion prediction. In: Future Developments in Soil Science Research. Soil Sci. Soc. Am. Madison Wisc. (1987) : 315—326
- 26 Foster G R, C V Alonso and J M Laflen. A replacement for the USLE. In: Proceedings of the ARS-SCS Natural Resources Modeling Symposium. ARS-30, Agr. Res. Serv. USDA, Washington D. C. (1985) 468—472
- 27 Langbein W B and S A Schumn. 1958, Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Trans. Am. Geophys. Un.* **39** (1958) : 1076—1078
- 28 Douglas I. Man vegetation and sediment yield of rivers. *Nature*, **215** (1967) : 925—928
- 29 Pearce A J. Magnitude and frequency of erosion by Nortonain overland flow. *J. Geology*, **84** (1976) : 65—80
- 30 Foster G R, L J Lane, J D Nowlin, J M Laflen and R A Young. Estimating erosion and sediment yield on field-size areas. *Trans. ASAE*. **24** (1981) : 1253—1262
- 31 Foster G R. Modeling the soil erosion process. In: Hydrologic Modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan. (1982) : 297—302
- 32 Foster G R, L J Lane and W F Milder. Seasonally ephemeral cropland gully erosion. In: Proceedings of ARS-SCS Natural Resources Modeling Workshop, Agricultural Research Service, USDA, Washington D. C (1985) : 463—467
- 33 Foster G R. Understanding ephemeral gully erosion. In: Soil Conservation Assessing the National

- Resources Inventory. Vol. 2 (1986) : 90—128
34. Thoms A W and R Welch. Measurement of ephemeral gully erosion. *Trans. ASAE* **31** (1988) : 1723—1728
  35. Huang C, J M Bradford and J H Cushman. A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **46** (1982) : 14—19
  36. Al-Durrah M U and J M Bradford. Parameters for describing soil detachment due to single water drop impact. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **46** (1982) : 836—840
  37. Schutz J P, A R Jarrett and J R Hoover. Detachment and splash of a cohesive soil by rainfall. *Trans. ASAE*. **28** (1985) : 1878—1884
  38. Julien P Y and D B Simons. Sediment transport capacity of overland flow. *Trans. ASAE*. **28** (1985) : 755—762
  39. Finkner S C, M A Nearing, G R Foster and J E Gilley. A simplified equation for modeling sediment transport capacity. *Trans. ASAE*. **32** (1989) : 1545—1550.
  40. Khanbilvardi R M, A S Rogowski and A C Miller. Modeling upland erosion. *Water Resour. Bull.* **19** (1983) : 29—35
  41. Khanbilvardi R M and A S Rogowski. Mathematical model of erosion and deposition on a watershed. *Trans. ASAE*. **27** (1984) : 73—79, 83
  42. Alonso C V, W H Neibling and G R Foster. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Trans. ASAE*, **25** (1981) : 1211—1220, 1226
  43. Borah D K. Sediment discharge model for small watersheds. *Trans. ASAE*. **32** (1989) : 874—880
  44. Borah D K. Runoff simulation model for small watersheds. *Trans. ASAE*, **32** (1989) : 881—886
  45. Borah D K and P K Bordoioi. Nonuniform sediment transport model. *Trans. ASAE*. **32** (1989) : 1631—1636
  46. Das G and A Agarwal. Development of a conceptual sediment graph model. *Trans. ASAE*, **33** (1990) : 100—104
  47. McGregor K C, R L Bengtson and C K Mutchler. Surface and incorporated wheat straw effect on interrill runoff and soil erosion. *Trans. ASAE*, **33** (1990) : 469—474
  48. Meyer L D. How rain intensity affect interrill erosion. *Trans. ASAE*, **24** (1981) : 1472—1475
  49. Roy B L and A R Jarrett. The role of coarse fragments and surface compaction in reducing interrill erosion. *Trans. ASAE*, **34** (1991) : 149—154
  50. Moss A J, P Green and J Hutka. Small channels: their formation, Nature and significance. *Earth Surf. Proc. Landf.* **7** (1982) : 401—415
  51. Merritt E. The identification of four stages during microrill development. *Earth Surf. Proc. Landf.* **9** (1984) : 493—496
  52. Line D E and L D Meyer. Evaluating interrill and rill erodibilities for soil of different textures. *Trans. ASAE*, **32** (1989) : 1995—1999
  53. Brown L C, G R Foster and D B Beasley. Rill erosion as affected by incorporated crop residue and seasonal consolidation. *Trans. ASAE*, **32** (1989) : 1967—1978
  54. Foster G R, L F Huggins and L D Meyer. A laboratory study of rill hydraulics (Part I and II) . *Trans. ASAE*, **27** (1984) : 790—796, 797—804
  55. Gilley J E, E R Kottwitz and J R Simanton. Hydraulic characteristics of rills. *Trans. ASAE*, **33** (1990) : 1900—1906
  56. Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **23** (1959) : 246—249
  57. Olson T C and W H Wischmeier. Soil erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **27** (1963) : 590—592
  58. Varies E D and R D Vonbernth. A laboratory study of the erodibility of disturbed soil. *Trans. ASAE* **33** (1990) : 1497—1502
  59. Wischmeier W H, C B Johnson and B V Cross. A soil erodibility nomogram for farmland and construction sites. *J. Soil and Water Cons.* **26** (1971) : 189—192.
  60. Mutchler C K and C E Carter. Soil erodibility variation during the year. *Trans. ASAE*, **26** (1983) : 1102—1104, 1108
  61. Gregory J M, T R McCarty, F Ghidry and E E Alberts. Derivation and evaluation of a residue decay equation. *Trans. ASAE*, **28** (1985) : 98—101, 105
  62. Yalin Y S. An expression for bed-load transportation. *J. Hydraulics Div. Proc. Am. Soc. Civil Engrs.* **89** (HY3) (1963) : 221—250

- 63 USDA. CREAMS-A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, Cons. Res. Rpt. 26, Sci. Edu. Admin. USDA, Washington, D. C. (1980)
- 64 Nicks A D and L J Lane. Weather generator, In: USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile model Documentation, NSERL Rpt. No. 2, Nat. Soil erosion Res. Lab. Agr. Res. Serv. USDA, West Lafayette Indiana. (1989)
- 65 Green W H and G A Ampt. Studies in soil physics, I. The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.* **4** (1911) : 1-24
- 66 Simanton J R, L T Wesa and M A Weltz. Range land experiments for the water erosion prediction project, Paper no. 87-25450. Am. Soc. Agr. Eng. St. Joseph, Mich. (1987)
- 67 Nearing M A, L Dear-Ascough and J M Laflen. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Trans. ASAE*. **33** (1990) : 839-849
- 68 Wilson B N and C T Haan. Bayesian estimation of erosion parameters (Part I and II) . *Trans. ASAE* **34** (1991) : 809-820, 821-830
- 69 Chaves H M L and M A Nearing. Uncertainty analysis of the WEPP soil erosion model. *Trans. ASAE*. **34** (1991) : 2487-2443

## HYDRAULIC MECHANISM OF SOIL EROSION ( I ) —— WATER EROSION

Qi Longxi Wang Boyi

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

**Abstract** The rapid increase of soil erosion poses a severe threat against the agriculture development and human sustenance and becomes one of the global environmental disasters. Hence, more and more attention has been attracted to the studies of soil erosion as well as to the prediction and control of erosion. In the present paper, a comprehensive literature survey is made on water erosion and the relevant investigation progress is analyzed and estimated.

**Keywords** *Soil physics; Water erosion; Hydraulic mechanism*