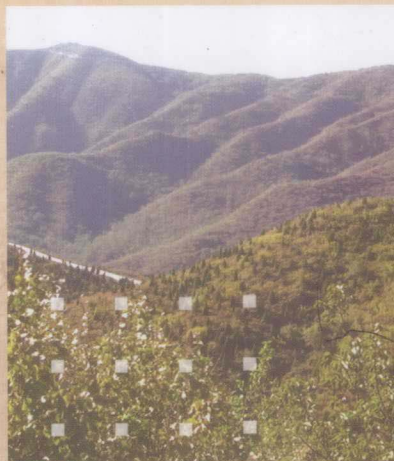


北京 土壤流失方程

Beijing Soil Loss Equation

刘宝元 毕小刚 符素华 等著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书包含北京土壤侵蚀研究的最新成果。全书以北京土壤流失方程为主线,系统地介绍了北京土壤流失量的预报方法,包含基本方程、各土壤侵蚀因子的计算公式、降雨侵蚀力、土壤可蚀性等基础数据库。全书共分9章,第一章主要介绍了土壤侵蚀基本概念;第二章重点介绍了土壤侵蚀模型的研究现状和北京土壤流失方程的基本形式;第三章介绍了降雨侵蚀力因子;第四章介绍了土壤可蚀性因子;第五章介绍了地形因子;第六章为覆盖与管理因子;第七章论述了水土保持工程措施因子;第八章主要介绍了容许土壤流失量与土壤流失方程应用;第九章重点介绍了北京土壤流失方程用户指南。

本书可供水土保持、水利、地理、资源、环境、生态等方面的管理者、科技工作者以及高等院校相关专业的师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

北京土壤流失方程/刘宝元等著. —北京:科学出版社, 2010. 5

ISBN 978-7-03-027385-7

I. ①北… II. ①刘… III. ①土壤侵蚀-研究-北京市 IV. ①S157.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第077570号

责任编辑:朱海燕 韦 沁 孙艳冬 / 责任校对:郑金红

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年5月第一次印刷 印张:12 1/4

印数:1—1 500 字数:273 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

土壤侵蚀是主要的环境问题之一，在长期的生产实践和研究中，人们对土壤侵蚀的认识越来越深入。美国水土保持之父 Bennett 曾指出：当人们举斧砍向森林，扶犁犁入土地时，土壤侵蚀就伴随着人类，造成危害甚至灾难。土壤侵蚀，即风和水对地表的分离和搬运，是一个随时随地发生的自然地表过程。土壤侵蚀主要是由于开垦农田、过度放牧、砍伐森林和不合理开发项目等造成的，其危害主要包括当地危害和异地危害两方面：当地危害主要是造成水土流失、生产力下降、土地沙化及侵蚀沟的出现，甚至彻底破坏土地资源；异地危害主要是淤积河渠，引发洪水、沙尘暴和水污染等。

北京市是国际性大都市，市政府在生态建设和环境保护方面做了大量工作，并取得了明显效果。但由于其人口众多、地位重要，土壤侵蚀的防治问题仍然不敢有半点松懈。北京山区，尤其是村镇居民点附近和果园地的土壤流失问题非常突出，不但给当地造成巨大损失，更直接威胁包括密云水库等重要饮用水源在内的下游地表水水质。要有效减少和控制这些危害就必须认识土壤侵蚀发生机理，定量评价土壤流失量，定量预报各种土地利用、田间管理和水土保持措施对土壤侵蚀的影响。土壤侵蚀预报方程就是这样一个技术工具。土壤侵蚀模型或土壤流失方程的发展需要大量的基础数据观测资料。北京从 1986 年起建立了 11 个坡地径流监测站、127 个坡面径流小区，共积累了 11.6 万条径流和泥沙资料，为北京土壤流失方程的建立奠定了基础。近年来北京市水务局和有关高校及科研院所的合作研究取得了大量成果，这些研究成果为土壤侵蚀模型的建立提供了保障。

本书以北京土壤流失方程为核心，以技术手册的形式系统介绍了土壤流失量的计算程序与方法，包括基本模型、各参数的获取方法或子模型，参数和子模型包括降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形、覆盖与管理 and 水土保持工程措施等 6 个因子；此外对计算机模型的使用、容许土壤流失量和基础数据库也做了介绍。

北京土壤流失方程的建立以及本书的完成是北京市水务局和有关高校及科研单位多年努力的结果。北京市水土保持工作总站下属单位密云、怀柔、延庆、门头沟、房山等区县水土保持试验站在野外观测中做了大量工作。方岚、赵玉明、杨威、刘和平、刘英娜、郭中领、王向亮等在试验研究中作出了贡献，在此一并感谢！

目 录

前言

第一章 引言	1
1.1 土壤侵蚀概念	1
1.2 土壤侵蚀类型	1
1.3 土壤侵蚀危害	2
1.4 北京土壤侵蚀概况	2
1.5 北京水土保持现状	5
参考文献	6
第二章 土壤流失方程简介	7
2.1 国内外土壤侵蚀模型简介	7
2.1.1 国外土壤侵蚀模型研究发展	7
2.1.2 国内土壤侵蚀模型研究进展	10
2.1.3 计算机技术、遥感技术与 GIS 技术在土壤侵蚀模型中的应用	13
2.2 北京土壤流失方程	14
参考文献	15
第三章 降雨侵蚀力因子	17
3.1 降雨侵蚀力指标	17
3.2 侵蚀性降雨标准	18
3.2.1 降雨量标准	19
3.2.2 最大 30 min 雨强标准	22
3.3 降雨侵蚀力因子的计算方法	22
3.3.1 次降雨侵蚀力计算	22
3.3.2 日降雨侵蚀力计算	26
3.3.3 月降雨侵蚀力计算	28
3.3.4 年降雨侵蚀力计算	28
3.4 降雨侵蚀力季节变化	30
3.5 多年平均年降雨侵蚀力等值线图	32
参考文献	34
第四章 土壤可蚀性因子	36
4.1 概述	36
4.2 北京土壤可蚀性因子	41
4.2.1 标准小区法	41

4.2.2 人工降雨试验法	42
4.2.3 公式估算法	46
4.2.4 诺漠图法	47
4.2.5 北京土壤可蚀性因子分布图	49
参考文献	51
第五章 地形因子	52
5.1 坡度因子	52
5.1.1 坡度对土壤侵蚀的影响	52
5.1.2 坡度因子计算公式	56
5.2 坡长因子	56
5.2.1 坡长对土壤侵蚀的影响	57
5.2.2 坡长因子指数	57
5.2.3 坡长因子计算公式	60
5.3 地形因子值的计算	60
5.3.1 直型坡全坡平均地形因子值	61
5.3.2 分段坡地形因子值的计算	63
参考文献	67
第六章 覆盖与管理因子	70
6.1 概述	70
6.2 农地覆盖与管理因子	72
6.2.1 冠层覆盖因子	73
6.2.2 地表覆盖因子	73
6.3 草地覆盖与管理因子	75
6.4 林地覆盖与管理因子	76
6.5 多年平均覆盖与管理因子	77
参考文献	80
第七章 水土保持工程措施因子	82
7.1 梯田措施因子	82
7.2 水平条措施因子	83
7.3 鱼鳞坑措施因子	85
7.4 树盘措施因子	87
参考文献	88
第八章 容许土壤流失量与土壤流失方程应用	89
8.1 概述	89
8.2 容许土壤流失量确定方法	92
8.2.1 专家经验法	92
8.2.2 土层厚度划分法	93
8.2.3 成土速率平衡法	93

8.2.4 侵蚀与生产力关系法	94
8.3 北京容许土壤流失量	96
8.3.1 容许土壤流失量模型的建立	96
8.3.2 北京主要土属的容许土壤流失量值	98
8.4 土壤流失方程应用	100
8.4.1 土壤流失方程验证	100
8.4.2 确定土地利用和工程措施类型	101
8.4.3 建设项目用地土壤流失量估算	102
参考文献	103
第九章 北京土壤流失方程用户指南	105
9.1 总体设计	105
9.2 系统安装与运行	107
9.3 因子计算菜单	109
9.3.1 降雨侵蚀力因子子菜单	110
9.3.2 土壤可蚀性因子子菜单	123
9.3.3 坡长坡度因子子菜单	127
9.3.4 覆盖与管理因子子菜单	132
9.3.5 水土保持工程措施因子子菜单	137
9.4 土壤流失量计算菜单	140
9.4.1 新建预报表菜单	140
9.4.2 打开预报表模块	145
9.5 数据库模块	146
9.5.1 数据库设计	146
9.5.2 数据库操作	149
9.5.3 数据表组织	168
9.6 地图功能模块	182

第一章 引言

1.1 土壤侵蚀概念

在土壤侵蚀或水土保持科学的理论与实践过程中，经常使用以下 3 个术语：土壤侵蚀（soil erosion）、土壤流失（soil loss）和水土流失（soil and water loss）。虽然这 3 个术语有其自明性，但人们的理解各有不同。相关学者和书籍对它们的解释或用词会有所不同，但本质上都比较一致，符合其基本含义。

在进行土壤侵蚀的调查、计算和科学评价中，最常用的 3 个主要术语是：土壤侵蚀量、土壤流失量和产沙量。英国学者 Kirkby 和 Morgan（1980）对这 3 个术语给出了较为清晰的定义：土壤侵蚀量是指雨滴和径流对土壤移动的总量，土壤流失量是指土壤被移出一个具体的坡面或田块的数量，产沙量是指泥沙被输送到一个特定点（断面）的数量；在很小的面积内，三者基本一致。一般情况下，产沙量或流失量为侵蚀量减去沉积量；产沙量是从河道和水库的角度，关心有多少泥沙进入其中；流失量是从田地的角度，关心某一特定田块上有多少土壤流走，造成土壤肥力和经济损失；土壤侵蚀量是一个理论值，一般不可能测量得到。水土流失是对土壤和水分损失的综合描述，有些中国学者则认为是水蚀过程中的水分和土壤损失，不包含风蚀；美国学者一般认为水土流失就是水分和土壤的损失，同时包括水蚀和风蚀造成的损失。水土流失实质是对自然界水分和土壤损失现象的通俗和综合描述。在科学调查中，一般只调查土壤流失量，水的损失则是通过蒸发、地表径流等进行水量平衡计算。

1.2 土壤侵蚀类型

土壤侵蚀按侵蚀营力划分，主要分为水力侵蚀（water erosion）和风力侵蚀（wind erosion）。水力侵蚀按侵蚀形态划分，又可分为片状侵蚀（sheet erosion）、细沟侵蚀（rill erosion）、浅沟侵蚀（ephemeral gully erosion）和切沟侵蚀（gully erosion）。此外还有各种特殊的侵蚀形态，如台状侵蚀或鳞片状侵蚀（fish scale erosion）、洞穴侵蚀（tunnel erosion）等。最常出现在农田上的侵蚀，按其发生位置可分为细沟间侵蚀（interrill erosion）和细沟侵蚀（rill erosion）；按侵蚀营力可分为雨滴击溅侵蚀（溅蚀，raindrop splash erosion）和径流冲刷侵蚀（runoff erosion）。

片状侵蚀是指在一个坡面上相对均匀地侵蚀掉一层土壤，侵蚀过后的坡面上没有明显差异；与之相区别的是细沟侵蚀，是指坡面上集中小股流的侵蚀现象。在一次或几次侵蚀后，坡面上会出现明显的小沟痕，这种小沟称为细沟（rill）。细沟的宽、深一般各为几厘米到十几厘米，一般的耕作器具能够将其消除。细沟间侵蚀是指发生在细沟与细

沟之间的片状侵蚀或溅蚀。浅沟 (ephemeral gully) 是比细沟大、比切沟小的一种坡面小沟, 一般的耕作器具可以通过, 但犁耕后仍能看到痕迹, 形成浅沟过程中造成的土壤侵蚀称为浅沟侵蚀。经过多次的侵蚀和耕作或其他过度放牧等活动, 在坡面上形成垂直于等高线的凹形地, 这种凹地再经历暴雨或融雪径流, 就更容易形成浅沟侵蚀, 甚至切沟侵蚀。切沟 (gully) 是在坡面上或古代侵蚀沟底部形成的、一般耕作工具不能通过的侵蚀沟, 大多数切沟的深、宽各为几十厘米到几米, 纵剖面多跌水, 切沟在形成和发展过程中造成的侵蚀称为切沟侵蚀。台状侵蚀 (鳞片状侵蚀) 是指地面有局部保护、周围侵蚀明显的一种侵蚀现象; 洞穴侵蚀在黄土高原尤为普遍, 是地表以下的侵蚀现象。

1.3 土壤侵蚀危害

土壤侵蚀危害根据其影响地域分为当地 (on-site) 和异地 (off-site) 两种情况。对土壤流失发生区的影响称为当地影响, 主要是指由于土壤流失造成的土地肥力和生产力的下降。例如, 根据《2007 年北京市水土保持公报》^①, 2007 年北京山区土壤流失量为 229 万 t, 径流中流失的总氮 239 t, 总磷 97 t, COD_{Mn} 1625 t。北京山区土壤土层厚度小于 30 cm 的土地占山区总面积的 40 % 以上, 严重的土壤流失使得农业产量低而不稳, 坡耕地产量仅为 1500~3000 kg/hm²。

对土壤流失发生区下游的影响称为异地影响, 主要是指土壤流失对水体质量的影响和造成的河道湖库的淤积。从河流湖库等水体中的污染物数量来看, 源于土壤流失的最多, 严重影响了水体水质。根据密云水库 2001~2005 年逐月水质监测结果 (张晓岚等, 2006), 密云水库周边地区的水土流失造成了水库 60.23 % 的氮污染问题, 其中从农田流失的 143.73 t 氮, 是造成 2001~2005 年密云水库水体三氮浓度逐步上升的重要原因。目前, 潮白河流域农田对所施化肥的利用率仅为 30 %~60 %, 其余的通过分解、渗漏和淋溶等方式流失, 污染了水体, 导致水库水体的富营养化。水土流失产生的大量泥沙进入河流湖库, 造成河道堵塞、水库淤积, 严重影响了航道和水库使用寿命, 同时也降低了河道、水库的泄洪能力。据不完全统计, 自 1955 年官厅水库建成蓄水到 2000 年以来, 已淤积逾 7 亿 m³ 的泥沙, 官厅水库向下游输沙总量为 4.25 亿 t (刘世海等, 2008)。向下游输沙进一步造成永定河下游河床的淤积, 目前永定河北京段河床比堤外高出了 3~5 m, 成了地上悬河。

1.4 北京土壤侵蚀概况

北京地处华北平原北端, 燕山山脉和太行山脉交汇处, 总面积 16410 km², 其中山区面积 10072 km², 占总面积的 61.4 %, 山高坡陡, 坡度大于 25° 的面积占山区面积的 46.7 %。气候上北京属于温带半湿润季风气候, 降雨主要集中于夏季的 7~8 月, 来自东南方向太平洋的夏季暖湿气流, 在遇到环绕北、西的山地后抬升, 形成北京山区迎风坡的降雨丰沛地带。这一独特的降雨特征和地形条件导致北京山区严重的土壤侵蚀, 其携带的

^① 北京市水务局. 2007. 2007 年北京市水土保持公报

面源污染物进入河流水库，是水库及城市污染严重的原因之一。新中国成立初期，全区土壤侵蚀面积 6640 km²；到 2000 年，土壤侵蚀面积为 4089 km²，其中轻度侵蚀面积 2975 km²，中度侵蚀面积 1114 km²。土壤侵蚀类型主要包括水力侵蚀、重力侵蚀和局部地区的风力侵蚀；水力侵蚀又主要分为片状侵蚀和沟蚀，由于山区植被盖度低，荒草坡上主要是鳞片状侵蚀；重力侵蚀主要是泥石流，多集中在百花山、黑坨山、云蒙山、磨盘山和大石河低山河谷、清水河低山河谷、汤河的低山河谷等地区。根据《2007 年北京市水土保持公报》^①，山区坡地共形成地表径流 31724 万 m³，土壤流失量 229 万 t，总氮流失 239 t，总磷流失 97 t，COD_{Mn} 流失 1625 t，土壤侵蚀强度为 200~1000 t/km²、1000~2000 t/km² 和 2000~2500 t/km² 的土地面积分别为 1886 km²、525 km² 和 7 km²（图 1.1）。土壤侵蚀主要发生在海拔低于 1000 m 的荒草地、800 m 以下的林地（灌草坡）、低山村镇附近和山区与平原的交接带。海拔低于 1000 m 的荒草地和 800 m 以下的林地（灌草坡）多位于沟道山坡处，坡度较大，且多为人工林，侵蚀量仍然较大。低山村镇附近是人类生产、生活活动集中频繁的地区，坡耕地和经济林一般分布在该区域，植被覆盖较差，土壤侵蚀比较严重（图 1.2）。山区与平原的交接带的人类开发建设活动强度大，人为破坏植被现象突出，土壤侵蚀相当严重，中度土壤侵蚀区多分布于此。

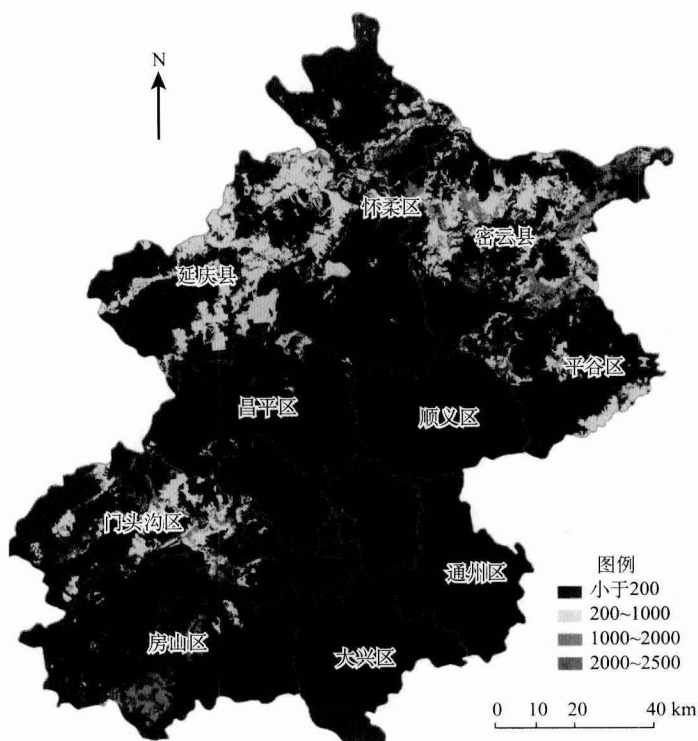


图 1.1 2007 年北京土壤流失强度空间分布图（单位：t/km²）

① 北京市水务局. 2007. 2007 年北京市水土保持公报



图 1.2 北京土壤侵蚀景观
a. 流域侵蚀景观；b. 坡面土壤侵蚀景观

为了有效地治理土壤侵蚀，北京市政府出台了《北京市人民政府关于划分水土流失重点防治区的通知》（京政发〔2000〕11号），把北京土壤侵蚀重点防治区划分为重点预防保护区、重点监督区和重点治理区（图 1.3）。重点预防保护区是指目前土壤侵蚀

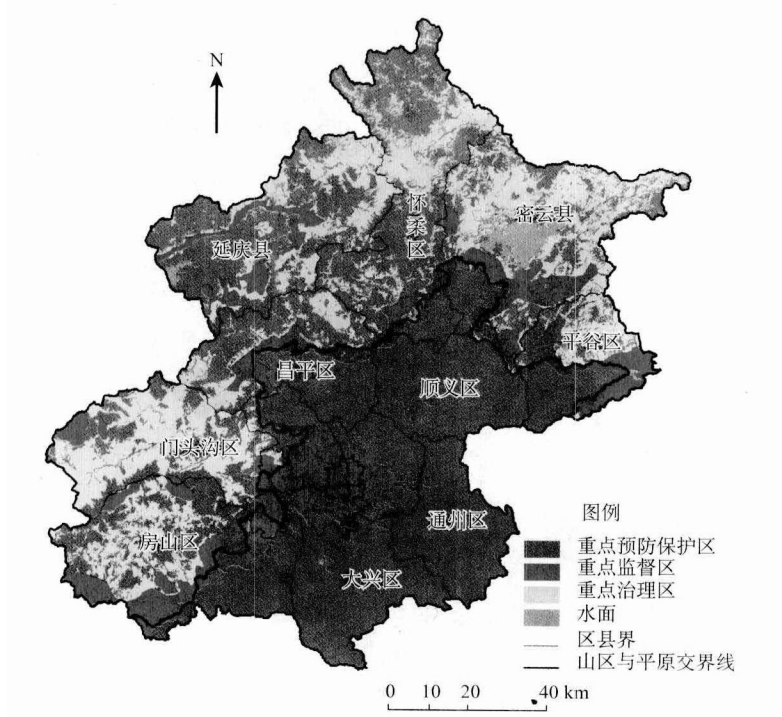


图 1.3 北京土壤侵蚀重点防治区划分布图

资料来源：北京市水务局，2007. 2007 年北京市水土保持公报

强度较轻,林草覆盖度大,但存在潜在土壤侵蚀危险的区域,面积为 4970 km²;重点监督区是指资源开发和基本建设活动较集中和频繁,损坏原地貌并易造成土壤侵蚀,土壤侵蚀危害后果较为严重的区域,面积为 1606 km²;重点治理区是指原生的土壤侵蚀较为严重,对当地和下游造成严重土壤侵蚀危害的区域,面积为 3496 km²。

1.5 北京水土保持现状

北京市政府一直十分重视山区的水土流失治理工作。到目前为止,北京山区的水土流失治理工作经历了 6 个阶段:1950~1958 年为第一阶段,主要采用修梯田、垒坝阶、建护地坝、建护村坝等措施来恢复耕地,稳定粮食生产;1959~1969 年为第二阶段,这一阶段开始出现了大规模开荒种地,植被遭到破坏,造成了新的水土流失,1963 年以后,提出山区以水土保持、植树造林为中心的建设方针,水土保持工作得到恢复,并有了较大规模的发展;1970~1980 年为第三阶段,主要是河滩造地,平整土地等农田基本建设;1981~1990 年为第四阶段,主要进行水土流失综合治理,以小流域为单元,自上而下采取工程、生物和农业耕作措施,达到山、水、林、田、路综合治理;1991~2003 年为第五阶段,以水土保持法为依据,以科技为先导,以预防监督和治理为手段,治山治水与脱贫致富相结合,由政府投资治理为主转向以农民承包租赁四荒(荒山、荒沟、荒滩、荒丘)为基础的户包治理,确定了农民的投资建设和经营四荒资源的主体地位,治理保开发,开发促治理,水土保持工作逐步走向法制化、规范化和投资多元化;2003 年以来为第六阶段,确立了构筑“生态修复、生态治理、生态保护”三道防线,扎实推进生态清洁小流域建设的工作思路,并积极实践,探索出了一条水源地保护新途径。

北京山区主要的水土保持工程措施有梯田、水平条、鱼鳞坑和树盘,其中梯田面积 200 km²,水平条面积 143 km²,鱼鳞坑面积 416 km²。梯田主要是石埂水平梯田和土埂水平梯田两种,在坡度为 15°以下,土质较好、距村庄较近、交通便利的坡耕地、经济林用地宜修筑梯田;水平条与水平梯田类似,田面呈水平,但宽度较窄,各块水平条将坡面分割成整齐的台阶,适用于 15°~25°的陡坡,水平条常用来种植水土保持林,根据所在地形条件,水平条宽度一般为 1 m 或者 2 m;鱼鳞坑是工程措施和植物措施相结合的一种水土流失治理方法,主要用在地形破碎、土层较薄、不能采取带状整地工程的地方,其作用是保证树木的成活,由林木植被作为水土保持设施而长期发挥作用;树盘的半径为 0.5~1.25 m,适用于坡度为 5°~15°,地形较为破碎的经济林地。

根据《2007 年北京市水土保持公报》,各项水土保持措施共拦蓄水量 3182 万 m³,减少土壤流失 147 万 t,减少流失总氮 76 t、总磷 47 t,水土保持措施使密云水库入库泥沙量减少 60 %以上。总之,40 多年来,北京市水土保持工作取得了一定成绩,治理效果较为显著,水土流失面积逐年减少;1949 年北京山区水土流失面积为 6640 km²,1989 年降到 4830 km²,1995 年降到 4396 km²,2000 年为 4089 km²;土壤侵蚀强度发展呈现出由强度→中度→弱度→微度的良好趋势,山区生态得到了改善。

参 考 文 献

- 刘世海, 胡春宏, 李希霞, 王净. 2008. 近 50a 来官厅水库上游流域泥沙输移平衡研究. 水土保持通报, 28 (3): 128~132, 172
- 张晓岚, 陈哉君, 温东辉. 2006. 密云水库水污染指标变化趋势分析. 环境保护, 9B (18): 63~65
- Kirkby M J, Morgan R P C. 1980. Soil Erosion. New York: John Wiley and Sons Ltd, 51~54

第二章 土壤流失方程简介

土壤流失方程是坡面土壤侵蚀模型中的一种表达方式，在水土保持建设中具有重要意义。一方面，土壤流失方程可以定量计算土壤流失量，评价研究区域土壤侵蚀发生的严重程度，为政府部门的正确决策提供基本的数据支撑；另一方面，土壤流失方程可用于比较不同治理措施的水土保持效益，为水土流失区提供科学的水土保持方案。因此，土壤流失方程是合理选择水土保持措施的有效工具，能够在水土流失治理过程的各阶段中都发挥重要作用。研究和开发北京土壤流失方程，对于治理北京山区水土流失、有效管理山区水土资源具有重要意义。

2.1 国内外土壤侵蚀模型简介

土壤侵蚀定量研究最早可追溯至 19 世纪末期，德国土壤学家 Wollny 于 1882 年通过布设径流小区，开始了土壤流失量的观测和侵蚀影响因子的定量研究，至今已有一个多世纪 (Baver, 1938)。随着国内外学者对土壤侵蚀规律认识的不断深入，以及水土保持工作的实际需求，土壤侵蚀模型研究受到越来越多的重视，并不断发展完善。根据建模手段和方法，可将土壤侵蚀模型分为经验统计模型和物理成因模型。经验统计模型通过试验资料和统计分析方法，确定出影响土壤侵蚀的因素，得出计算土壤流失量的方程式；物理成因模型以土壤侵蚀的物理过程为基础，利用水文学、水力学、土壤学、河流泥沙动力学以及其他相关学科的基本理论，根据已知降雨、径流条件描述土壤侵蚀过程，建立数学方程，从而预报给定时段内的土壤流失量。根据建模对象的不同，土壤侵蚀模型又有坡面土壤侵蚀模型和流域土壤侵蚀模型之分。

2.1.1 国外土壤侵蚀模型研究发展

在德国土壤学家 Wollny 于 1882 年定量观测土壤流失量的 30 年后，1912 年美国科学家开始在犹他州中部过度放牧的牧草地上建立定量观测土壤流失量的径流小区^①；随后在 1917 年，Miller 在密苏里农业试验站建立了长 90.75 ft (27.66 m)、宽 6 ft (1.83 m) 的径流试验小区 (Miller, 1926)，现在所用的土壤侵蚀小区的概念正源于此；1920~1930 年，美国农业部土壤局的土壤调查员 Bennett (1939) 开始意识到土壤侵蚀对人类生存所造成的威胁，并积极向政府和民众进行呼吁。在他的呼吁

^① Sampson A W, Weyl L H. 1918. Range Preservation and Its Relation to Erosion Control on Western Grazing Lands. Bulletin No 675, USDA, Washington D C. 35

下, 1929 年美国国会拨款 16 万美元进行土壤侵蚀调查, 并在 10 个土壤侵蚀严重区布设了水土保持试验站, 在各个试验站修建了长 72.6 ft (22.13 m)、宽 6 ft (1.83 m) 的径流试验小区 (Meyer, 1984), 这些小区的建立标志着美国大规模水土保持研究工作的开始, Bennett 因此被誉为“水土保持之父”。1936 年, Cook 提出了影响土壤侵蚀的 7 个主要因子: 土壤可蚀性、侵蚀力、入渗能力、地表填洼能力、坡度、坡长和地表覆盖, 为土壤侵蚀模型的发展提供了思路; 1940 年, Zingg 首次建立了土壤侵蚀速率与坡度坡长的定量关系; 一年后, 在 Zingg 建立的关系式基础上, Smith (1941) 增加了作物因子和水土保持措施因子对侵蚀的影响; Browning 等 (1947) 又研究了土壤可蚀性以及轮作和经营管理因子对土壤侵蚀的影响; Musgrave (1947) 综合分析了降雨、坡度、坡长、土壤可蚀性以及植被对土壤侵蚀的影响, 建立了 Musgrave 方程; 在美国农业部所属农业研究局、土壤保持局、公共道路局及国家气象局等单位领导的提议下, 美国农业研究局于 1954 年在 Purdue 大学成立了国家水土流失资料中心, 该中心主要负责收集、整理国内所有可得到的试验小区的降雨、径流和泥沙资料^①, 截至 1955 年, 该中心收集了约 8250 个小区年和 2500 个流域年的资料 (Wischmeier, 1955); 到 1978 年, 共收集了 49 个站点、10000 多个小区近 30 年的资料^②, Wischmeier 和 Smith^③通过对这些资料的统计分析和系统研究, 得到了经验性的通用土壤流失方程 USLE (Universal soil loss equation)。由于该方程基本上包括了影响坡面土壤侵蚀的主要因素, 采用的资料范围较广, 对变量进行了标准化处理, 统一了模型形式, 因此在世界各国得到了广泛应用。1985 年, 借助于计算机技术的发展, 并利用最新研究成果, 对 USLE 开始进行修正, 于 1997 年完成, 出版了修订版通用土壤流失方程 RUSLE (Revised universal soil loss equation) 用户手册^④。与 USLE 相比, RUSLE 最大的优点是用计算机软件编制成了计算机模型, 同时利用了当时相关研究的最新研究成果, 更仔细地考虑了影响土壤侵蚀的各个因子。例如, 土壤可蚀性因子考虑了季节变化; 植被覆盖与管理因子的计算采用了次因子法, 通过估计各次因子的值, 再相乘得到土壤流失率, 不再使用基于观测数据的土壤流失率表; 综合考虑降雨侵蚀力和作物覆盖的季节变化, 把作物覆盖渐变的生长周期划分为若干个时间段, 各个时间段的土壤流失率与相应降雨侵蚀力乘积的加权平均才是植被覆盖与管理因子值。尽管如此, 该方程的通用性仍是有限的。例如, 其中建立的坡度因子公式适用坡度范围为 3 %~18 %^{①②③④}, 是否适用于其他坡度范围需要进一步研究。

1972 年, 美国颁布 92-500 号法令, 提出保护和改善国家的水资源, 并拨款对不同类型的非点源污染进行观测, 以评价其影响。在这一背景下, 美国先后建立了许多田块

① Wischmeier W H, Smith D D. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. USDA Agricultural Handbook No 282

② Wischmeier W H, Smith D D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Handbook No 537

③ Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. 1997. RUSLE — a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation. USDA Agricultural Handbook No 703

④ $100 \% = \tan(45^\circ) \times 100 \%$

或流域尺度的土壤侵蚀模型, 以下仅介绍几个比较有代表性的模型。Knisel^①1980 年建立了农业管理系统中化学物质径流和侵蚀模型 CREAMS (A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems), 主要对坡面田块尺度上的径流、土壤流失量以及因使用化肥和杀虫剂导致的化学污染物迁移进行预报, 可用于评价不同农业管理措施下的非点源污染状况, 以选择最优管理措施, 模型包括径流、侵蚀产沙和化学污染物模拟 3 部分。径流计算采用曲线数 (curve number) 法或格林-安普特 (Green-Ampt) 下渗曲线法, 具体选用哪种方法根据所能得到的资料情况而定; 坡面土壤流失量计算采用 USLE; 汇沙计算采用 Foster 和 Meyer (1975) 提出的泥沙连续方程。由于其中的土壤流失方程包含了水土保持措施因子, 因此可将模型应用于水土保持规划。流域尺度的流域环境响应的面源污染模型 ANSWERS (Areal nonpoint source watershed environmental response simulation) (Beasley *et al.*, 1980) 是物理成因很强的分布式次降雨小流域土壤侵蚀模型, 模拟时将小流域划分为若干网格单元, 假设每个网格内的土壤、植被覆盖均匀分布, 对每一个网格进行参数输入, 然后计算每一网格上的径流、泥沙分散量、水流挟沙力以及流出网格单元的径流和泥沙量。该模型不仅可用于评价土地利用和农业管理措施等对土壤侵蚀和面源污染的影响, 而且能够揭示土壤侵蚀的空间变化特征。Young 等 (1989) 建立了次降雨农业非点源污染模型 AGNPS (Agricultural nonpoint source), 也属流域模型, 模拟时将流域划分为若干网格单元, 在每一个网格单元上输入所需参数, 单元格径流量计算采用曲线数法, 土壤流失量计算采用 USLE, 模型中还包括养分随径流流失的预测。Arnold 等 (1990) 研制的乡村流域水资源模型 SWRRB (Simulator for water resources in rural basins) 用来预报流域管理方案对流域水沙的影响, 该模型以天为时间步长, 能够模拟流域水文过程及其相关过程在很长时期内的连续变化, 还考虑了气温、太阳辐射、蒸发和作物蒸腾等对水文循环的影响, 虽然该模型为流域尺度的土壤侵蚀模型, 但缺乏沟道的汇流汇沙计算。水土资源评价工具 SWAT (Soil and water assessment tool)^② 是在 SWRRB 基础上, 进一步考虑了沟道汇流汇沙过程, 并结合 GIS 技术建立的能适用于较大流域的土壤侵蚀模型, 该模型也以天为时间步长。上述模型均涉及较多的因子, 需要大量的输入参数, 而这些参数并非在每个地方都能得到, 从而会限制这些模型在资料缺乏地区的应用。1985 年, 美国农业部农业研究局、林业局、水土保持局及国家土地管理局开始组织建立水蚀预报机理模型 WEPP (Water erosion prediction project)^③, 以取代经验模型 USLE。该模型研究于 1995 年基本完成, 是迄今为止最为复杂的描述与土壤水蚀相关物理过程的计算机模型, 模型中涉及的过程包括降雨入渗、灌溉、地表径流、土壤分离、泥沙运移与沉积、植物生长和残茬分解等, 能够模拟每天多层土壤含水量变化及作物的生长与残茬的

① Knisel W G. 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff, and erosions from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report No 26

② Williams J R, Neitsch S L, Arnold J G. 1999. Soil and Water Assessment Tool-User's Manual. Texas: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station

③ Flangan D C, Nearing M A. 1995. USDA water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. USDA-ARS, NSERL, Report No 10. West Lafayette, Indiana, USA

分解,还能模拟耕作方式及土壤压实对土壤侵蚀的影响。该模型目前发布了坡面版、流域版和网格版 3 个版本,其中以坡面版最为完善。

土壤侵蚀模型在欧洲和非洲各国也得到较深入的研究。20 世纪 60 年代初, Hudson 通过对非洲侵蚀性降雨的深入研究,建立了土壤流失量与土壤类型、坡度、坡长、农业管理、水土保持措施和降雨等因素之间的关系 (Kirkby and Morgan, 1980)。Elwell (1980) 建立的坡面土壤侵蚀模型,把土壤侵蚀环境分为气候、土壤、作物和地形 4 个自然系统,并将这 4 个系统有机地结合起来,构成一个完整的坡面土壤流失模型,该模型在南非地区得到广泛应用。澳大利亚 Misra 和 Rose (1996) 在 Hairsine 和 Rose (1991, 1992a, 1992b) 提出的坡面水流侵蚀理论及降雨溅蚀理论的基础上,提出了次降雨侵蚀产沙土壤侵蚀物理模型:格里菲思大学土壤侵蚀模型 GUEST (Griffith university erosion system template)。模型中考虑了有细沟和无细沟两种情况下的土壤侵蚀,较其他过程模型不同的是该模型还考虑了降雨和径流对新淤土层的二次分离、分散和搬运作用。Morgan 等 (1998) 建立的欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM (European soil erosion model) 是物理成因很强的次降雨分布式土壤侵蚀模型,它将土壤侵蚀分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀两部分,考虑了植被截流对下渗和降雨动能的影响,以及土壤表层岩石碎块覆盖对下渗、流速和溅蚀的影响,是现有物理成因模型中考虑土壤侵蚀影响因素最为详细的土壤侵蚀模型之一。荷兰的 De Roo (1996) 建立的 Limburg 土壤侵蚀模型 LISEM (Limburg soil erosion model) 也较详细地考虑了土壤侵蚀产沙的各个环节,能较好地模拟土壤侵蚀发生过程,并与 GIS 技术结合,是迄今为止最好的次降雨过程土壤侵蚀模型,但该模型中的许多参数不易获取,必须通过一系列野外观测试验才能获得,导致模型的运行费用较高。总的来说,国外的流域土壤侵蚀模型的框架结构已经比较成熟,但是由于国外土壤侵蚀主要发生在缓坡上,而我国在大于 15° 的陡坡耕地上土壤侵蚀严重,因此我国流域土壤侵蚀模型不能照搬国外模型。国外对流域土壤侵蚀模型的研究为建立我国流域土壤侵蚀模型提供了很好的思路。

2.1.2 国内土壤侵蚀模型研究进展

我国从 20 世纪 40 年代初开始对土壤侵蚀进行定量观测,并根据坡面径流试验小区资料建立了坡面侵蚀经验公式 (刘善建, 1953)。80 年代初 USLE 被引进到我国,鉴于它是经验模型,必须对因子的取值方法重新进行研究,国内学者对 USLE 在中国的应用开展了广泛研究。例如,张宪奎等 (1992) 利用黑龙江省克山县、宾县和牡丹江市的坡面径流试验小区资料,分析确定了降雨侵蚀力计算公式、土壤可蚀性因子值、地形因子计算公式、玉米和大豆等农作物不同生育期以及年平均的覆盖与管理因子值、草原和森林的覆盖与管理因子值以及水平梯田和生物防冲带等工程措施的水土保持措施因子值;黄炎和等 (1993) 利用福建省东南安溪官桥径流试验场的资料,确定出该区的土壤可蚀性因子值、地形因子计算公式、大豆和绿豆不同作物生育期的覆盖与管理因子值;林素兰等 (1997) 利用辽宁省西丰县安民乡泉河小流域的坡面径流小区资料,确定了土壤可蚀性因子值、坡度因子计算公式、玉米大豆轮作的作物管理因子和等高垄作的耕作

措施因子值；杨子生（1999）利用云南省的东北山区昭通市和东川市的坡面径流场资料，确定了降雨侵蚀力计算公式，土壤可蚀性因子值，地形因子计算公式，玉米、大豆和马铃薯不同生育期以及年平均的覆盖与管理因子值，水平梯田和生物防冲带的水土保持措施因子值；Liu 等（2002）建立了中国土壤流失方程 CSLE（Chinese soil loss equation），可计算坡面多年平均年土壤流失量，该模型确立了中国土壤侵蚀预报模型的基本形式，简单实用；史景汉（1991）利用陕西省绥德辛店沟、子州及山西省离石径流场的观测资料，定量分析了降雨、坡度、坡长和植被覆盖对土壤流失的影响；吴发启等（1998）在系统分析了淳化县泥河沟流域径流小区资料及彬县、黄龙、永寿、耀县和西峰部分径流小区试验资料基础上，建立了土壤流失量与 PI_{30} （侵蚀性降雨量 P 与最大 30 min 降雨强度 I_{30} 的乘积），坡度和坡长的相关关系。

我国建立的小流域土壤侵蚀经验统计模型中，由于试验观测资料的差异，模型中所考虑的土壤侵蚀影响因素也有所不同。对于任何一个流域，影响土壤侵蚀的因素可归纳为降雨和下垫面两大类因素；对于某个特定的流域，可近似认为下垫面条件是一个常量，因此影响土壤侵蚀的因素只有降雨。有的学者从这一观点出发，研究了降雨因素对土壤侵蚀的影响。例如，王孟楼和张仁（1990）提出了有效降雨和有效降雨强度的概念，并用陕西省子洲岔巴沟小流域的观测资料分析了次暴雨产沙量与有效降雨和有效降雨强度的关系，建立了用有效降雨和有效降雨强度表示的次暴雨产沙经验模型；王治华和黄联捷（1993）及田永宏等（1997）也进行了类似的研究。有的学者选择具有相似降雨特征的几个小流域，研究下垫面因素对土壤侵蚀的影响。例如，白占国（1993）以窟野河流域的神府东胜煤田区为研究对象，从地貌空间结构特征入手，分析了地形相对高差、坡度及沟壑密度对土壤侵蚀的影响，并用回归方法建立了流域的年土壤侵蚀模数计算公式；金争平等（1991）用调查和分析小流域库坝淤积泥沙量与小流域产沙影响因子的研究方法，在内蒙古准格尔旗皇甫川小流域分析了沟壑密度、沟壑切割深度、平均坡度、披砂岩面积比、风沙土面积比和植被盖度等对土壤侵蚀的影响，建立了侵蚀模数与上述因子之间的多元回归关系。还有的学者同时考虑降雨因素和下垫面因素对土壤侵蚀的共同作用。例如，牟金泽和孟庆枚^①根据河流动力学原理，认为水流挟沙力的大小决定于水流条件、河床特性以及泥沙性质等，而流域来沙量则与流域条件有关，同时考虑到黄土丘陵沟壑区的特点，决定用年径流模数、河道平均比降、泥沙粒径和流域长度来反映流域年侵蚀产沙量形成的流域条件和输沙机理，并根据实测断面资料，建立了小流域年产沙量预报公式；尹国康（1989）用综合分析的方法，建立了产沙模数与年径流模数、流域高差比、沟壑密度、沟壑切割深度、土壤抗蚀性和渗透性因子以及治理面积与流域总面积之比等因子的函数关系；曹文洪等（1993）用黄河中游地区 8 个小流域的实测资料，分析了土壤可蚀性、主沟比降、沟壑密度、次暴雨径流深、平均降雨强度以及水土保持措施因子对土壤侵蚀的影响，分别建立了毛沟产沙量、支干沟产沙量和泥沙输移比的计算公式，从而建立起黄土地区小流域次暴

^① 牟金泽，孟庆枚. 1981. 陕北中小流域年产沙量计算. 见：黄土高原水土流失综合治理科学讨论会资料汇编. 陕西：中国科学院西北水土保持研究所. 251~255