

中国科学院、水利部水土保持研究所知识创新领域前沿项目
“中国水土流失宏观分析与评价研究”系列成果之一

区域水土流失

土壤因子研究

QUYU SHUITU LIUSHI TURANG YINZI YANJIU

张爱国 张平仓 杨勤科 著



地质出版社

中国科学院、水利部水土保持研究所知识创新领域
“中国水土流失景观分析与评价研究”系列片

区域水土流失土壤因子研究

QYU SHUITU LIUSHI TURANG YINZI YANJIU

张爱国 张平仓 杨勤科 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是以中国科学院、水利部水土保持研究所知识创新领域前沿项目“中国水土流失宏观分析与评价研究”的现有成果为基础,系统分析区域水土流失土壤因子特征的一部专著。从区域水土流失土壤因子的研究现状出发,书中重点探讨了区域水土流失土壤因子的评价指标、野外测试、模型建立和应用、分类和分区研究以及区域水土流失土壤因子与区域水土保持措施配置的关系等问题。

本书体系清晰,结构严谨,资料充分,图表丰富,可供土壤侵蚀研究人员、水土保持规划和决策人员以及土壤、农林、水利、地理、资源与环境等相关专业的师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

区域水土流失土壤因子研究/张爱国等著. -北京:地质出版社, 2003. 6
ISBN 7-116-03410-2

I. 区… II. 张… III. 水土流失-土壤-因子-研究 IV. S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 21434 号

责任编辑:蔡卫东

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社 址:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324571 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787mm×1092mm ¹/₁₆

印 张:9

字 数:200 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2003 年 6 月北京第一版·第一次印刷

定 价:25.00 元

ISBN 7-116-03410-2/S·26

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

“中国水土流失宏观分析与评价研究” 项目系列专著编委会

主 任：李 锐

主 编：杨勤科

编 委：（按姓氏笔划为序）

马晓微 王 飞 韦红波 任洪玉

刘新华 张平仓 张晓萍 张爱国

杨勤科 温仲明 焦 峰 韩 琳

序 一

水土流失的定量评价和预测预报研究及其成果的应用,长期以来一直被限制在坡面和小流域尺度上。自20世纪90年代以来,由于水土保持宏观决策、规划,小流域治理模式示范推广等方面的需要,区域水土流失的研究因此受到重视。

自1997年以来,我们在中国科学院资源环境重点研究项目、水利部水利科技基金项目支持下,首先瞄准第二次全国土壤侵蚀调查的需要,开展了区域水土流失快速调查研究。1999年,“中国水土流失宏观分析与评价研究”被列入中国科学院、水利部水土保持研究所知识创新领域前沿项目和水利部水土保持监测中心有关项目。区域水土流失定量评价的系统研究和探索得以全面开展。几年来,先后进行了区域水土流失监测评价指标体系(该成果反映在《水土保持监测技术规程,SL277—2002》中),区域水土流失因子(包括地形因子、植被因子、土壤因子、径流泥沙因子和水土保持措施因子),区域水土流失快速调查与制图,区域水土流失定量评价(包括潜在水土流失评价和水土流失现状评价),区域水土保持研究的基础信息设施等方面的系统研究。土壤因子的研究属于整个研究计划的一部分。

将土壤作为水土流失的对象和因子进行研究,长期存在两种流派。一是学习和借鉴美国通用土壤流失方程式设计思路,通过野外观测和实验分析计算的方式,研究土壤可蚀性。二是朱显谟先生首倡的土壤抗冲性和土壤抗蚀性研究。本书反映的研究思路属于第二个方面,是在前人研究的基础上,将土壤作为水土流失的对象和重要的影响因素,力图研究拟订一个土壤指标用于区域水土流失定量评价模型中。为了实现这种目标,在水利部水土保持监测中心和各地水利水土保持部门的大力支持下,利用统一的技术和方法、统一的指标体系,对全国水蚀地区水土流失土壤因子进行了控制性测试。较之前人的同类研究,该研究的特色在于将土壤指标(例如土壤抗冲)作为土壤学的基本属性,较多地重视了土壤因子与其他因子的相对独立性,同时注意了这些指标在我国水蚀地区的宏观分布特征。

《区域水土流失土壤因子研究》一书反映的是上述研究阶段性成果的初步总结和前人有关研究的系统集成。本书的作者们对区域水土流失土壤因子评价指标、区域水土流失土壤因子测试方法和我国水蚀地区水土流失土壤因子的宏观分布特征等方面进行了比较系统的分析论述和大胆探索。这些必将为区域水土流失的定量评价奠定基础。但是,该领域有待研究解决的问题依然很多,希望作者继续作出努力,以便使区域水土流失学科的研究能尽早进入世界同类研究的先进行列。

中国科学院、水利部水土保持研究所所长 李 锐
国际水土保持学会副主席

2003年2月22日

序 二

土壤是被侵蚀的对象，土壤的一切性征无疑将对土壤侵蚀有影响，这些问题首先被土壤学家所注意。早在 19 世纪末 20 世纪初就有这方面的论文发表，但都是一些定性的描述；不少人企图通过在实验室中测定的土壤性质来说明自然条件下该种性质对土壤侵蚀的影响，所研究的土壤性质有数十种之多，其中有一部分能说明一些问题，但这些试验研究缺少一个环节，即这些土壤性质与该土壤在已知降雨侵蚀力的降雨作用下所产生侵蚀量之间的关系，因此，所得结果带有一定主观性。美国曾对 23 种主要土壤的可蚀性，用径流小区法作了直接测定，并与土壤有关特性进行相关分析，得出土壤可蚀性因子与土壤性质之间的相关方程，这仅仅是坡面尺度的经验方程。我国在这方面针对中国土壤侵蚀的特色也开展了一些有成效的试验研究工作。总的看来，有关土壤因子的研究工作是一个薄弱环节，研究工作不够系统，至今尚缺少统一的试验研究方法和规范，特别是区域尺度水土流失土壤因子方面的研究工作更少，基本上还是空白。

随着遥感技术、地理信息系统和计算机技术的引用，土壤侵蚀研究方法有了重大发展，提高到现代化高技术研究阶段。特别是在世纪之交的历史时刻，党中央领导提出再造祖国秀美山川的战略决策，与此同时我国的水土保持工作也由小流域治理为主转向较大区域集中连片治理的新阶段，这就为土壤侵蚀研究工作提出了更高的要求，在这种新形势下，深感土壤因子的研究工作不能满足生产实践的需要。

《区域水土流失土壤因子研究》一书，较系统地探讨了区域尺度土壤因子的评价指标、野外测试、模型建立和应用等问题，不仅满足了当前水土保持工作的需要，而且使这方面的研究工作向前迈进了重要的一步，可以说跨入一个新的研究领域，这将对土壤因子的研究工作起重要的促进作用。但必须指出这仅仅是目前的阶段性成果，需要深入研究的问题还很多，希望作者精益求精、不懈努力，继续深入探讨。时值此书即将出版之际，仅以此片言只字聊表祝贺及对作者的钦佩之意。

周佩华

2002 年 11 月

前 言

本书是在中国科学院知识创新领域前沿项目“中国水土流失宏观分析与评价研究”(99-01-05)的成果基础上进行理论总结的结果,在写作过程中,参阅了国内外同行的文章和著作。本书重点探讨区域水土流失土壤因子的评价指标、野外测试、模型建立和应用、分类和分区研究问题。

本书首先从土壤因子分析区域水土流失问题,同时考虑水土流失土壤因子的区域性特征。由于目前国内外对区域尺度水土流失土壤因子进行的宏观性研究工作做得很少,所以从某种意义上讲,此项研究以及本书的写作都是在尝试探索和思路创新中进行的,主要采用了定量模型方法、GIS方法研究区域尺度水土流失土壤因子问题,在书中以较多的数理公式、数据表格和专业图件反映研究成果。

本书首先概述了区域水土流失土壤因子的国内外研究现状与存在问题、研究意义、研究思路、研究内容、研究方法;第二章研究了区域水蚀土壤因子的评价指标问题(包括土壤因子评价指标研究的理论与实践意义、现有评价指标的评述、确定评价指标的主要原则和理论依据、评价指标的分类体系、评价指标研究的数据基础);第三章分析区域水土流失土壤因子的野外测试问题(包括野外测试的重要性和现状分析、测点选择原理、测试指标选择、具体测试方法、测试设备配置、区域一级控制点的测量过程和成果等);第四章从区域水蚀土壤因子定量评价模型的研究现状、建模数据基础、建立过程和验证、模型应用等方面,对区域水蚀土壤因子定量评价模型问题进行了比较详细的研究;第五章进行区域水土流失土壤因子的抗冲性能、入渗性能、崩解性能、抗剪性能的分类研究;第六章进行区域水蚀土壤因子的分区案例研究,重点分析了全国水蚀土壤指示因子的区域分异规律以及我国两个重点水蚀区的水力侵蚀土壤因子问题(黄土高原地区水土流失土壤指示因子问题,我国南方主要易蚀土壤的综合因子问题);第七章进行了区域水蚀土壤因子的改良措施研究,分析了提高土壤抗冲性的主要途径、强化土壤入渗性能的水土保持措施和提高土壤抗蚀性的基本对策问题。

本书是在李锐研究员和蒋定生研究员的精心指导下完成的。李锐先生敏锐的学术思想和清晰的科研思路为本研究奠定了技术路线和工作方法上的坚实基础;蒋定生先生在本研究中的土壤评价指标筛选、野外测试方法确定及测试设备配置等方面给予了精心指导。

十分感谢李锐先生和周佩华先生为本书作序;感谢马安民为本书清绘图件;感谢刘国彬、王占礼、景可、韦红波、张晓萍、焦峰、王飞、温仲明、韩琳、任洪玉、赵爱秋、段永锋、李智广、穆兴民、谢永生、马晓微、李英奎、翟连宁、史竹叶、从怀军、李构霞、雍绍平、巨凤生等人在土壤因子野外测试、室内分析和科研过程中给予的大力帮助;本书中多处引用了朱显谟、蒋定生、李勇、王占礼、田积莹、胡良军、马晓微、刘国彬、高维森、郭培才、吴普特、王佑民、阮伏水、吕喜玺等人的研究成果,对他们的劳动及其成果在此表示衷心的感谢和尊重!也十分感激地质出版社地球科学室蔡卫东先生在本书出版过程中给予的大力协助。

本书第二章由张平仓撰写，第三章由杨勤科、张爱国撰写，其余章节由张爱国执笔撰写。

本书可供土壤侵蚀研究人员、水土保持规划和决策人员以及土壤、农林、水利、地理、资源与环境等相关专业的师生参阅。由于水平所限，书中不妥之处恳祈读者不吝指正。通信地址：712100 陕西省杨凌区中国科学院、水利部水土保持研究所；电话：029—7012482；E-mail：qkyang@ms.iswc.ac.cn。

张爱国 张平仓 杨勤科

2002年11月于陕西杨凌

目 录

序 一	李 锐
序 二	周佩华
前 言	张爱国 张平仓 杨勤科
第一章 绪论	(1)
第一节 区域水蚀土壤因子的研究现状	(2)
第二节 区域水蚀土壤因子的研究意义	(12)
第三节 区域水蚀土壤因子的研究思路、内容与难点	(13)
第四节 区域水蚀土壤因子的研究方法	(15)
第五节 区域水蚀土壤因子研究的目的与方向	(17)
第二章 区域水蚀土壤因子的评价指标研究	(19)
第一节 研究区域水蚀土壤因子评价指标的意义	(19)
第二节 区域水蚀土壤因子现有评价指标的概述	(19)
第三节 确定区域水蚀土壤评价指标的原则	(24)
第四节 确定土壤因子评价指标的理论依据	(25)
第五节 区域水蚀土壤因子评价指标的分类	(27)
第三章 野外测试方法论	(30)
第一节 野外测试概论	(30)
第二节 区域一级控制点的测量	(36)
第四章 区域水蚀土壤因子评价模型的建立与应用	(41)
第一节 区域水蚀土壤因子定量评价模型的概念	(41)
第二节 区域水蚀土壤因子定量评价模型的研究现状	(42)
第三节 建立区域水蚀土壤因子定量评价模型的数据基础	(54)
第四节 区域水蚀土壤因子定量评价模型的建立	(55)
第五节 区域水蚀土壤因子定量评价模型的验证	(60)
第六节 区域水蚀土壤因子定量评价模型的应用	(62)
第五章 区域水蚀土壤因子的分类研究	(74)
第一节 土壤抗冲性能研究	(74)
第二节 土壤入渗性能研究	(82)
第三节 土壤崩解性能研究	(92)
第四节 土壤抗剪强度研究	(96)
第六章 区域水蚀土壤因子的分区案例研究	(100)
第一节 中国水蚀区土壤可蚀性区划	(100)
第二节 全国水蚀土壤指示因子的区域分异规律	(108)
第三节 黄土高原地区水蚀土壤因子研究	(114)

第四节 我国南方主要易蚀土壤的综合因子研究.....	(124)
第七章 区域水蚀土壤因子的改良措施.....	(125)
第一节 提高土壤抗冲性的主要途径.....	(125)
第二节 强化土壤入渗性能的水土保持措施.....	(126)
第三节 提高土壤抗蚀性的基本对策.....	(128)
参考文献.....	(130)

第一章 绪 论

区域水土流失土壤因子研究,是指在一个较大的区域范围内,分析土壤因子的发生、发展、空间变化及其对区域水土流失的影响,研究区域水土流失土壤因子的评价指标选择、野外和室内测试方法,进行土壤抗侵蚀性的分类、分级和分区探讨,建立区域水蚀土壤因子模型和预测其发展趋势,进而为区域水土流失整治的宏观决策服务。

“区域水土流失土壤因子研究”这一命题,主要包涵以下 3 个含义:

(1) 土壤因子研究。影响土壤侵蚀量或流失量的主要因素有降雨径流因子、土壤因子、地形地貌因子、地面覆盖或植被因子、人为活动因子等。土壤因子是影响土壤流失量的主导因子之一。本研究强调土壤因子的相对独立性,不探讨土壤因子与其他因子的相互影响,只考虑影响土壤流失量的土壤因子。

(2) 区域尺度研究。水土流失土壤因子在研究尺度上表现为 3 个层次:坡面($<100\text{m}^2$)、小流域($100\text{m}^2\sim 100\text{km}^2$)、区域(区域或国家, $>100\text{km}^2$)。本研究区域的重点是区域尺度的水土流失土壤因子问题,但也借鉴坡面和小流域尺度水土流失土壤因子研究的思路、方法和成果。

(3) 水力侵蚀研究。区域土壤侵蚀类型有水力侵蚀、重力侵蚀、冻融侵蚀、冰川侵蚀、混合侵蚀、风力侵蚀、生物侵蚀等各种形式。本研究只是针对水力侵蚀而言,不考虑其他土壤侵蚀类型对区域水力侵蚀的影响,所以后面所有论及的“土壤侵蚀”皆指水力侵蚀,简称“水蚀”。

影响区域水蚀土壤流失量的主要因素有降雨径流因子、土壤因子、地形地貌因子、地面覆盖或植被因子和人为活动因子(包括水土保持措施)。在这几大因子中,降雨径流因子是区域水蚀土壤流失量发生的激励因子,土壤自身的抗侵蚀性是影响区域水蚀土壤流失量的内在因子,而地形地貌因子、地面覆盖或植被因子、人为活动因子等是影响区域水蚀土壤流失量的辅助控制因子;在将要构建的区域水土流失定量评价模型中,把降雨径流因子和土壤因子定义为带量纲单位的分析对象,把地形地貌状况、地面覆盖或植被条件、人为活动因子定义为不带量纲单位的辅助控制因子。

研究任何一个单因子对土壤侵蚀的影响,其余因子必须保持不变,惟有此因子可变才行。在区域水土流失定量评价模型中,上述几大因子应该是相对独立的,其表现形式可以是一个值,也可以是一个子模型。按中国科学院、水利部水土保持研究所目前开发的子模型情况,降雨径流因子以降雨-径流侵蚀力为指标,地形地貌因子以起伏度为主要指标通过 DEM 手段在 GIS 支持下取得,植被因子以标准化差值指数为主要指标通过遥感手段取得,人为活动因子主要以土地利用和人口等指标计算,其中的水土保持措施指标将通过水土保持统计方法取得。土壤是水土流失过程中各种营力作用的对象,土壤因子(模型)是一个由土壤自身的理化性质所决定的指标,尽管受到其他指标的影响,但必须与其他指标

相对独立^①。这是因为土壤因子对土壤侵蚀的影响主要是通过抵抗侵蚀动力对其分散、搬运及侵蚀动力的一些特征（如入渗）表现出来的，由于土壤是一个具备一定结构和富含有机质的结构体，相对母质而言它的结构松散，随着条件的变化，它的一些性质也发生变化，虽然土壤表面的处理情况（如地面覆盖或植被因子、人为活动因子）也影响土壤侵蚀，但在研究过程中，一旦确定了统一的参考基础，那么这些表面处理情况就应视为影响土壤侵蚀的另一种因子，至于土壤因子影响入渗等侵蚀动力的特征，实际上是直接影响了侵蚀动力条件，间接影响了土壤侵蚀。经过对国内外土壤水蚀评价模型的分析，根据我们对区域水土流失过程的认识和在黄土高原地区对区域水土流失评价模型的初步研究，我们认为，必须强调土壤指标的独立性，这是研究区域水土流失土壤因子的一个关键问题。

第一节 区域水蚀土壤因子的研究现状

一、国外研究区域水蚀土壤因子的现状

从区域水土流失土壤因子的研究现状来看，在国外主要是土壤的可蚀性统计分析和土壤的水蚀过程研究，前者以美国通用土壤流失方程（USLE）中的土壤可蚀性因子（ K 因子）研究为代表，后者以荷兰的土壤侵蚀预报模型（LISEM）中的土壤水蚀过程研究为代表。

1. USLE 模型中的土壤因子研究

1956 年，Wischmeier 等人根据大量的实测资料，提出了著名的通用土壤流失方程，即 USLE 模型，该模型的基本结构为：

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1.1)$$

式中： A ——预测土壤侵蚀量（ $t/hm^2 \cdot a$ ）； R ——降雨侵蚀力（ $J/m^2 \cdot a$ ）； K ——标准小区条件下的土壤可蚀性因子值； LS ——坡长和坡度参数； C ——植物覆盖与管理因子参数； P ——水土保持措施影响因子参数。

在美国通用土壤流失方程中， K 值反映了土壤的可蚀性特征，即当其他因素不变时土壤特性对侵蚀量的影响，也就是在标准小区条件下单位侵蚀力所产生的土壤流失量。

美国学者曾对美国境内 23 种主要土壤的 K 值作了直接的测定， K 值的获取是在坡长为 22.1m，宽为 1.83m，坡度为 9% 的标准小区内测定的（ K 值测定的条件是：标准小区上没有任何植被，完全休闲，并且无水土保持措施）。

在降雨后收集沉沙池内的泥沙烘干称重，然后由下式计算 K 值：

$$K = \frac{A}{R \times LS \times 2.24} \quad (1.2)$$

式中： A ——土壤流失量（ $t/hm^2 \cdot a$ ）； R ——降雨侵蚀力指标（ $J/m^2 \cdot h$ ）； LS ——地形因子（由统计关系确定的无量纲因子）；2.24——将英制单位换算成公制单位的换算系数。

标准小区内直接测定 K 值所需时间较长，花费也多，在此背景下，美国学者 Wischmeier 等人于 1971 年根据土壤性质与实测到的土壤可蚀性值，建立了土壤可蚀性因子与土壤性质

① 杨勤科、李锐，区域水土流失宏观评价研究——土壤指标研究计划，1999.10

之间的著名关系式，即如下土壤 K 因子模型：

$$100K = 2.1M^{1.14} \times 10^{-4}(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (1.3)$$

式中： M ——颗粒分析参数； a ——有机质百分含量； b ——土壤结构的级别参数； c ——反映土壤渗透级别的参数。

从上式中可以看出， K 值的大小主要受土壤质地、土壤中的有机质含量、土壤结构、土壤渗透性等因素的影响。如果土壤颗粒粗、有机质含量高、结构粗大或渗透性强， K 值就低，反之则高；抗侵蚀力强的土壤 K 值低，反之则 K 值高。

总的来说，USLE 中的土壤可蚀性因子研究具有开创性，尤其是模型分析用的数据基础较好，但 USLE 模型尚有几个缺陷：一是模型应用必须考虑标准小区的概念，只能用于坡度不太大的坡耕地（面蚀、细沟侵蚀）的土壤流失量和土壤指标评价，不能进行沟蚀土壤流失量的预测，实践证明，USLE 不太适用于预测垄作、等高耕作以及那些使泥沙就地沉积的带状耕作措施的坡地侵蚀量。另外，该方程没有明确反映径流的影响，这就大大降低了方程应用于截流措施的有效性；同时，USLE 中的土壤可蚀性因子研究属于统计学范畴，相对缺乏水蚀过程的机理分析。

2. RUSLE 模型中的土壤因子研究

随着 USLE 在农业开发等领域的应用研究的深入，USLE 的局限性逐渐地被水土保持研究者所认识，所以美国农业部自然资源保护局（NRCS）于 1992 年 10 月正式决定实施 RUSLE（对 USLE 进行修正的土壤侵蚀预报模型的英文缩写）方案。

在 RUSLE 中，对 USLE 中的 K 因子作了进一步的修正。USLE 模型的研究者认为，土壤的可蚀性是随时间而变化的，如冻融循环使土壤变得松散，而在生长期由于土壤水分的消耗又使得土壤重新固结，所以在 USLE 中，可蚀性因子 K 被定义为单位降雨侵蚀力的长期平均侵蚀率；在 RUSLE 模型中，还考察了土粒的分散过程和侵蚀过程的相互作用，认为侵蚀过程取决于细沟侵蚀和面蚀之比值。

3. LISEM 模型中的土壤因子研究

荷兰学者以荷兰南部黄土区土壤侵蚀和水土保持规划研究为背景，于 20 世纪 90 年代初开发出了一个基于土壤侵蚀物理过程和 GIS 的土壤侵蚀预报模型——LISEM，其中对水蚀过程中的土壤因子进行了研究。在 LISEM 的水蚀过程模拟中，考虑的主要过程有降雨、截留、填洼、渗透、水分垂直运动、表层水流、沟道水流、土壤分散、泥沙输移等。LISEM 的研究者们针对这些主要过程分别建立了许多过程子模型，其中与土壤因子直接有关的过程子模型有：渗透与水分运动过程子模型，溅蚀分散过程子模型，细沟、细沟间侵蚀子模型。

LISEM 相对于 USLE 中的土壤可蚀性因子研究而言，在土壤水蚀的过程研究上有了很大的突破，更多地运用了基于物理过程的数学关系式，可以不断吸收新开发的数学关系和新的数据使模型自身不断趋于完善；同时由于模型与栅格 GIS 的集成，使土壤因子空间变异的精确定位研究成为可能。LISEM 中的土壤水蚀过程研究存在的主要问题是数据需求量大，而面上数据的获取又是非常困难的；另外，个别土壤水蚀过程尚未考虑在模型之中，预测结果与实测值之间还有一定的差距，即模型预测精度还不高。

4. WEPP 模型中的土壤因子研究

为了弥补 USLE 模型在土壤侵蚀过程分析上的不足，新一代的土壤水蚀预测模型

WEPP 应运而生, WEPP 模型是一个物理过程模型, 因其适用的对象不同而对应有 3 种不同的版本: 坡面模型、小流域模型和网络模型。其中网络模型适用于区域面上的土壤侵蚀预测, 可以解决区域之间的泥沙输移问题。WEPP 模型中分析了影响水土流失的六大过程, 其中的水分入渗过程和冻结过程、土壤属性 (容重、饱和导水率和可蚀性参数) 的日变化过程等与土壤因子有关。

从以上的分析中可以看出, 目前国外的土壤可蚀性统计分析和土壤水蚀过程研究, 虽然较国内偏重于土壤抗冲性研究来说考虑得要全面一些, 但总的来说, 在指标体系、测试方法、定量分析和具体应用等方面还缺乏系统的研究。

二、国内研究区域水蚀土壤因子的现状

以下从区域水蚀土壤因子的过程和机理、指标体系、时空分布、分类评价、分级研究、模型分析等 6 个侧面进行研究现状综述。

1. 过程和机理研究

土壤因子对区域水土流失的影响主要是通过抵抗侵蚀动力对其分散、搬运及侵蚀动力的一些特征 (如入渗) 表现出来的 (王占礼, 2000)。所以, 区域土壤特性对水蚀的影响主要表现在 3 个过程和机能上: 一是表现为抵抗降雨或径流对土壤物质的分散崩解; 二是决定了雨水入渗过程中的入渗速度; 三是在冲刷搬运过程中土壤表现出来的抵抗搬运的能力。

(1) 分散崩解过程和机理研究

降雨或径流发生时影响侵蚀量的土壤特性是土壤分散的难易。有关实验表明, 土壤分散的难易主要取决于土粒和水力的亲和力, 亲和力越大土壤越易分散悬浮, 团粒结构也越易受到破坏而解体, 同时引起土壤透水性的变小, 即使径流速度很小和机械破坏力不大, 也会由于悬浮作用而产生侵蚀; 湿土层的抗分散力明显地随粘粒含量的增大而加强; 土壤中水稳性团聚体含量尤其是腐殖质含量对土壤分散程度有重大影响, 因水稳性团聚体的形成要求有一定的胶结物质, 而腐殖质能够胶结土粒形成较好的团聚体; 蒋定生 (1995) 曾对黄土高原地区土壤基本理化属性和土壤类型差别对崩解速率的影响、土壤崩解性能与抗冲性的关系进行过研究。

(2) 入渗过程和机理研究

土壤入渗是指地表水体经过 (土壤孔隙进入土体并在整个土壤剖面上) 运移的全过程。降雨到达地表以后, 水分在土中的运动是在分子力、毛管力与重力的综合作用下寻求平衡的过程。入渗过程按水分所受作用力及运动特征可分为渗润过程、渗漏过程和渗透过程。就土壤侵蚀而言, 如果土壤入渗速率大, 水就会迅速渗过土壤表面蓄纳于土体之中, 从而减少地表径流量和冲刷量, 减缓区域水蚀过程和强度, 可见土壤入渗性能可以直接影响地表产汇流过程, 进而决定地表径流的冲刷能力和水蚀过程。土壤的入渗能力大小主要取决于 3 个因素: 一是以通气孔隙度为代表的表层土壤条件; 二是降雨时的土壤含水量; 三是土壤剖面表层的有机质含量分布状况。朱显谟等人深入研究过土壤抗冲性与入渗性能的关系 (朱显谟、田积莹, 1993); 蒋定生、潘剑君、梁音、白丹等人在土壤入渗过程和机理方面都做过比较深入的研究工作 (蒋定生, 1986、1997; 潘剑君, 1995; 梁音, 1997; 白丹, 1997)。

(3) 抗冲-抗剪过程和机理研究

土壤抗冲性和抗剪性表现为抗侵蚀动力的机械力学和生物力学作用。在抗冲过程和机理方面,吴普特初步研究了土壤抗冲性的动力过程问题,认为土壤抗冲与径流冲刷的关系实际上是以径流为动力、土壤抗冲为阻力的一种动力过程,这一过程不单是一个简单的普通力学问题,更重要的在于它是一个生物力学作用过程(吴普特,1997);蒋定生对黄土高原土壤抗冲性的影响因素进行了深入研究,结果表明影响黄土区土壤抗冲性的主要因素有3个,即土壤表面生物生长情况、根系在土体中的分布、土壤质地状况(蒋定生,1997);李勇等人对同一地区的研究结论是,决定土壤抗冲性的主导因素是粗粉粒(0.05~0.01mm)、砂粒(0.05mm)、紧实度、水稳性团聚体含量和总孔隙度(李勇、朱显谟,1990);朱显谟和李勇等人深入研究了土壤抗冲性与入渗性能的关系、植物根系与抗冲性强弱的关系(朱显谟、李勇、吴钦孝、徐晓琴,1990、1991、1992);朱显谟曾分析过土壤剖面的垂直构型特征与抗冲性的关系(朱显谟,1994)。

在土壤抗剪过程和机理方面,国内外已有不少研究者在乔木、草本根系抗拉强度特征、根系数量、截面积与抗剪的关系及坡面稳定性等方面进行了一系列分析研究(蒋定生,1997;杨维西,1988;陆兆熊,1990;解明曙,1990;孙立达,1987;L. J. Waldrow, J. S. Dakessian 和 J. A. Nemson, 1983)。研究表明,根系提高土壤抗剪强度的作用主要在于增加了土壤的凝聚力,解明曙等人采用野外原位水平挤出法直接剪切测定了土壤的抗剪强度,发现土壤含根率对于凝聚力的增量影响较为显著,孙立达等人发现剪切面上根的截面积和抗剪强度增加值有正相关关系;蒋定生先生曾研究过黄土高原地区土壤基本理化属性(容重和天然含水量)对抗剪强度的影响。

在区域土壤因子水蚀过程和机理研究上,目前尚有几个问题需要澄清和进一步研究:

①土壤崩解状况反映的是土壤抗蚀能力大小还是土壤抗冲能力大小?

长期以来,国内许多学者一直把土壤崩解看做是土壤抗冲性的一种反映,一些文献(刘国彬,1997;吴普特,1997)中把崩解测试(尤其是黄土高原的崩解测试)列入抗冲测试方法之一,但按照土壤抗冲性和抗蚀性的定义,以及土壤崩解速率与土壤抗冲系数之间的测试数据相关分析结果,这一定论值得怀疑。

②土壤入渗能力能否影响或改变土壤本身的抗冲刷能力?

强化土壤入渗能力能改善区域土壤抗冲刷能力,这一论断是否成立?从机理上讲,入渗能力和抗冲能力是土壤两种不同的性能,土壤入渗性能主要是影响地表径流的冲刷能力,但不能改变土壤本身的抗冲刷能力;土壤入渗速率与土壤抗冲系数之间的测试数据缺乏明显的统计相关性。

③从泥沙动力学角度看,土壤抗剪力是否与土壤抗冲力是一回事?即抗剪力是否为土壤抗冲性的力学本质?

2. 评价指标研究

区域水土流失土壤因子的评价指标,是指在一个较大的区域内(自然区域或行政区域),对其水土流失土壤因子宏观状况进行现状分析与趋势预测的具体度量单位。土壤评价指标既是野外或室内测试的对象,又是数理分析、预测和制图的对象,尤其是作为建立土壤因子评价数学模型的基本元素,只有从区域这个层次出发确定出合适的度量指标,才能宏观地、定量地研究区域的水土流失土壤因子规律,为决策机构提供科学的依据;目前关于水土流失土壤因子的评价指标研究主要集中在坡面和小流域的层次上,在区域层次上的

研究还是一个薄弱环节,而且目前采用的区域水土流失土壤因子评价指标尚存在许多理论问题。

在确定区域水蚀土壤评价指标的原则上,据马晓微(2000)和胡良军(2001)研究,由于影响水蚀土壤综合特征的因子多种多样,所以区域水蚀土壤评价指标的选择,或者是基于区域水土流失的过程反映,或者是基于统计学分析对土壤影响因子的具体量化,必须遵循以下几个原则:一是系统性,即影响水土流失土壤因子的各个要素要全部有所反映;二是科学性,各个评价指标能客观地揭示水土流失土壤因子发生的规律性;三是实用性,主要是与数据管理手段、评价方法和评价模型、评价的空间尺度和评价精度要求、该指标的测试分析手段等相协调。

在评价指标的分类研究上,对于目前现有众多的区域水蚀土壤因子评价指标,我们将其概述为3个层次的指标体系——微观的属性指标、中观的指示指标、宏观的综合指标。其研究现状综述如下:

(1) 属性指标研究

属性指标就是常说的土壤性能的影响因素指标。土壤抵抗侵蚀的能力最终取决于土壤自身的理化属性,包括物理上的、化学上的和生物上的诸方面,目前已确定的反映这些属性的指标也很多,有反映土壤质地的粒径、粘粒率、粉/粘,反映土壤结构的容重、密度、孔隙度、大于0.5mm或大于0.25mm风干土水稳性团粒含量、团聚体表面率、团聚体不稳定指标、水稳性指数,还有阳离子交换量、盐基饱和度、pH值、有机质含量、有效根系量、含水量等。

王佑民(1984, 1994)、郭培才(1989, 1992)、高维森(1991, 1992)、阮伏水(1996)对反映土壤可蚀性和抗蚀抗冲性的属性指标的分类和适用性进行了深入讨论;胡良军(1998)认为大于0.25mm的风干土水稳性团粒含量作为黄土高原地区水土流失土壤因子的评价指标比较合理;王夏晖等人(2000)根据实测资料对黄土高原地区具有代表性的黄绵土、黑垆土等的物理特性进行了分析,包括土壤机械分析、土壤团聚体和微团聚分析、土壤密度、土壤容重、下塑限、粘结力和有机质含量等方面;王文龙等人(1998)分析了黄土理化性质与土壤侵蚀的关系,提出了土壤质地、机械组成、水稳性团粒结构、粘粒含量、有机质、易溶盐含量是土壤侵蚀模拟实验中土壤相似应考虑的主要控制因素;蒋定生(1997)曾研究过黄土高原地区土壤容重和含水量指标对抗剪强度的影响;李勇等人(1990)对黄土高原土壤属性指标的研究结论是,决定土壤抗冲性的主导因素是粗粉粒(0.05~0.01mm)、砂粒(0.05mm)、紧实度、水稳性团聚体含量和总孔隙度。

(2) 指示指标研究

从层次分析法的角度看,目前已有的崩解速率、崩解度、抗剪强度、抗冲系数、冲刷模数、抗冲指数、抗冲强度、入渗速率等指标与上述土壤属性指标有所不同,这些指标的每一个都可能是若干土壤属性指标的集合;土壤因子对水土流失的影响,主要是通过抵抗侵蚀动力对它的分散崩解、冲刷搬运、水分入渗来体现的,如果从土壤侵蚀的过程来考查,崩解速率可以反映其分散子过程,抗冲系数和抗剪强度能反映其剥蚀和搬运等冲刷子过程,入渗速率能影响侵蚀动力的特征。由于土壤抗冲系数、稳渗速率、崩解速率、抗剪强度几个关键性指标能比较准确地“指示”土壤侵蚀的主要过程,所以把这4个指标称为土壤水蚀的“指示指标”。在4个指示指标中,抗冲系数指标研究得比较深入,我国学者主要在黄

土高原区和江南丘陵区使用抗冲系数这一指标，黑土侵蚀区使用此指标的仅见文献一篇（赵兴安等，1981）；国内对抗冲系数指标研究最为深入的当数朱显谟和蒋定生的研究成果；黄土高原是我国水土流失土壤因子研究得最多的一个区域，由于该区土壤结构性特差，雨滴一打或径流一冲即散，所以在该区一般是用抗冲指标来反映该区的土壤抗侵蚀性；黄义端等人曾对我国主要地面物质（岩石母质）的抗冲系数值进行了研究，马晓微以土壤的抗冲系数作为全国潜在水土流失土壤因子的评价指标。

（3）综合指标研究

综合指标是一个最终取决于土壤理化属性、可以体现土壤指示指标的协同效应、反映区域土壤可侵蚀性的全息指标。在不考虑降雨径流因子、地形、植被等的影响条件下，只有综合指标才能全面反映区域水蚀的过程、形态和危害。目前反映土壤可侵蚀性的综合指标只有一个 K 因子指标。

总结上述水土流失评价指标的研究现状可以看出，虽然国内外在评价指标方面已有一定的研究积累，但目前采用的区域水土流失土壤因子评价指标尚存在一些问题，主要表现在：

①对评价指标的水土流失过程机理认识不够深入。以抗冲系数为例，在理论上它反映的是土壤对抗径流冲刷破坏的能力，与抗蚀指标不同，但实际测得的抗冲系数尚不能消除抗蚀与入渗的协同影响；崩解速率在理论上反映的是土壤抵抗降雨击溅分散或径流分散的抗蚀特征，但许多文献中把崩解速率又列入抗冲测试指标之一。

②评价指标体系不够规范，缺乏层次观念。以 K 因子为例，诺模公式中把土壤机械组成、结构、有机质含量这些属性指标与土壤渗透性指示指标这两种不同层次的东西混在一起，实际上决定土壤渗透性的还是土壤机械组成、结构、有机质含量等这些属性指标。关于 K 因子综合指标的主要问题，一是无量纲，土壤侵蚀学意义不明；二是该指标的计算方法单一，不便应用。如国内大多数土壤专著中少有土壤结构系数和渗透级别的测定数据，难以应用 K 因子公式把我国各类土壤的可蚀性因子 K 值确定下来。所以在评价指标体系上，目前最为重要的事情之一就是寻找一个土壤侵蚀学意义明确、带量纲单位且与侵蚀动力因子量纲单位相匹配的土壤综合指标。

3. 时空分布研究

从以下 3 个方面进行综述：

（1）土壤指示指标的时空分布研究

对于较大尺度土壤抗冲系数的影响因素、水平与垂直分异特征和分区研究最为系统的是蒋定生等人在黄土高原地区的工作，他们采用原状土冲刷法对黄土高原的土壤抗冲性进行测试和分析后，总结出了该区土壤抗冲性的水平变化规律和沿土壤剖面的 3 种垂直变化类型（农耕影响型、生物生长影响型、成土过程影响型）。马晓微（2000）在全国潜在水土流失土壤因子评价研究后得出的结论是，在全国范围内，黄土高原地区的土壤抗冲能力最弱，东北地区、四川盆地、东南沿海地区等土壤侵蚀强烈地段的抗冲级别普遍较低。

廖松等人（1991）认为天然条件下的区域入渗特征有：一是不再能保证充分供水，必须考虑可能入渗能力与降雨强度的对比关系来确定区域的实际入渗能力；二是必须考虑入渗在空间区域上的变化；蒋定生等人（1986）研究了黄土高原地区土壤入渗速率的水平变化规律，并以 $>0.25\text{mm}$ 水稳性团粒含量、稳定入渗速率和表土容重作为参数指标对该区入