

土壤侵蚀学科发展战略

郑粉莉^{1,2}, 王占礼^{1,2}, 杨勤科²

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;
2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 进入 21 世纪, 我国土壤侵蚀研究迎来了新的发展机遇和挑战。详细述评了国内外土壤侵蚀学科发展历程, 提出了土壤侵蚀学科研究存在的问题, 如研究对象的复杂性和不确定性, 基础数据积累不足与共享性差, 研究思路和方法急需创新, 基础科学研究落后于生产实践等。基于对我国土壤侵蚀学科研究的社会需求和科学需求的分析, 提出了土壤侵蚀学科前沿布设和优先领域, 如土壤侵蚀过程与机理, 土壤侵蚀预报模型, 土壤侵蚀环境效应评价, 侵蚀灾害预警, 重大工程及全球变化对侵蚀环境影响和土壤侵蚀研究新技术与方法等。

关键词: 土壤侵蚀学科; 前沿领域; 发展战略

中图分类号: S 157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 04-0001-10

Development Strategy on Soil Erosion Science in China

ZHENG Fen-li^{1,2}, WANG Zhan-li^{1,2}, YANG Qin-ke²

(1. *The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2. *Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Coming into the 21st century, scientific researches on soil erosion meet new opportunities and challenges. Based on the detailed reviewing development progresses in soil erosion science in the world, main existing problems for scientific researches on soil erosion in China were pointed out, such as the complexity and uncertainty of research object, shortage of data accumulation and weakness of data share, innovation of research ideas and technologies, basic scientific research being behind practices. Based on analyzing the social and scientific needs for soil erosion science, front and priority issues on soil erosion science were identified, including soil erosion processes and mechanisms, soil erosion prediction models, environmental impact assessment of soil erosion, soil erosion disaster forewarning, the major project and global change impact on erosive environment, and new technologies and methods for soil erosion research.

Key words: Soil Erosion Science; front research issues; development strategies

土壤侵蚀是限制当今人类生存与发展的全球性环境灾害, 严重制约着全球社会经济持续发展。全球水土流失面积约 $16.43 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占地表总面积的 10.95%。土壤侵蚀不仅给当地生态、环境、人类生存和社会经济发展等带来严重影响, 而且也给相邻地区(例如位于侵蚀流域的下游地区、湖泊和近海地区)带来严重危害。据估算, 中国因土壤侵蚀造成的经济损失每年在 100 亿元以上^[1], 在美国造成经济损失为 30~60 亿美元。因此, 防治土壤侵蚀、改善生态环境、实现人与自然协调和资源—环境—社会经济可持续发展, 已成为全世界普遍关注的重大环境问题和人类生存发展的重要问题。有关全球性重大研究计划和国际组织, 如陆地生态系统全球变

化、地中海荒漠化和土地利用研究和国际土壤标本和信息中心等都将土壤侵蚀列为重要研究内容。由于土壤侵蚀是世界性的环境问题, 影响到全球粮食供应和生态安全等, 因此, 将土壤侵蚀、土壤保持与全球环境变化相联系已成为各国政府官员和科学家共同关注的热点问题。

土壤侵蚀过程发生在陆地表面各圈层相互作用最为强烈的地区。土壤侵蚀过程中耦合了多种复杂的环境要素过程和环境要素间的相互作用过程。土壤侵蚀的主要任务是揭示土壤侵蚀及其相关的地表过程与机理, 探索自然因素和人为活动对土壤侵蚀的作用方式, 建立土壤侵蚀预报模型, 评价土壤侵蚀的环境效应及其对区域和全球环境的影响, 提出预

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 国家自然科学基金重点项目“黄土高原小流域分布式水蚀预报模型研究”(40335050), 中国科学院知识创新重要方向项目“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-422)
作者简介: 郑粉莉(1960-), 女, 陕西蓝田人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报及侵蚀环境效应评价研究。

防和治理土壤侵蚀、合理利用水土资源、建设良性生态环境的战略方案与技术途径。

1 土壤侵蚀学科发展回顾与进展

1.1 土壤侵蚀科学发展的历程

1.1.1 国外土壤侵蚀科学发展历程

土壤侵蚀(Soil Erosion)术语最初于 1911 年由 McGee 以英文提出,并出现在 1936 年 Ayres 出版的《土壤侵蚀及其防治》一书中,以其它语言出现则在 1937 年以后。土壤侵蚀作为一门学科进行研究始于 19 世纪后期。土壤科学的奠基人前苏联科学家 Dokuchaev(1877 年,1879 年)首次关注土壤侵蚀带来的危害。美国土壤学家 Wollny(1877~1895 年)首次进行了降水对土壤冲刷影响的实验研究,Kozmenko 则对片状侵蚀和细沟侵蚀率先进行了研究(1909 年,1910 年)。美国密苏里大学 Miller 及其同事于 1917 年在密苏里农业实验站(Missouri Agricultural Experiment Station)首次布设径流小区开展农作物及轮作对侵蚀和径流的影响研究,并于 1923 年第一次出版了野外试验小区的成果,该方法后来为各国水土保持工作者所沿袭利用,并且成为土壤侵蚀研究的经典方法。20 世纪 20 年代,被誉为美国土壤保持之父,土壤侵蚀科学的奠基人,后出任第一任美国农业部土壤保持局长的 Bennett 根据从 19 世纪 80 年代后期全美土壤普查中认识到土壤侵蚀在美国的普遍存在及其严重性,以及 Miller 的径流和侵蚀定量评价的研究方法,首次在全美不同自然地理区建立了 10 个代表不同土壤和气候条件的土壤侵蚀试验站网,开展土壤侵蚀的试验研究,为土壤侵蚀科学研究的发展奠定了初步基础。

在欧洲 19 世纪后期促使土壤侵蚀学科发展的一个重要方面是 Surell 和 Demontzey 等科学家对山洪和雪崩发生过程及防治原理的研究。基于在对山区山洪和雪崩研究,1860 年出版了《山区土壤保持和山洪防治手册》;1884 年颁布奥地利—匈牙利 177 号议案。此后,土壤侵蚀研究工作除继续研究减少河流泥沙输移和河槽沉积外,对土壤侵蚀特征和土壤侵蚀防治工作也给予了极大关注。早期从事水文学、冰河学、农学、森林学、植物地理学的研究者主要根据本专业的科学原理和方法对土壤侵蚀现象和过程进行观测描述。如水文学家从河流和湖泊形成及沉积物造成水体污染方面对侵蚀现象进行描述;冰河学家从冰、雪、水、风和冻融等外营力造成陆地表面演变和形成及土壤遭受破坏等现象对土壤侵蚀进行观测;植物地理学家从土壤与植被关系方面对土壤侵蚀进行研究;农学家强调农业管理对侵蚀防治的重要性;森林学家通过对森林保护土壤作用的功能研究森林植被对土壤侵蚀的防治。

土壤侵蚀工作引起世界各国政府广泛关注并广泛开展研究工作则发生在 20 世纪早期。1934 年美国西部大平原发生美国有史以来第一次大尘暴,其造成的巨大破坏,使美国政府和国民深刻认识到土壤侵蚀的危害。随之美国成立了土壤保持局(后改为自然资源保持局),并将原来的 10 个土壤侵蚀试验站网扩大到 44 个,遍及 26 个州;同时有关高等院校也纷纷建立了一批土壤侵蚀试验站。由于 20 世纪 20 和 30 年代在美国建立的土壤侵蚀试验观测站,在试验设计、观测

方法、资料处理上的一致性和规范化,为后来美国土壤侵蚀研究和重大创新性成果的产生(如著名的土壤流失预报方程—USLE^[2~4)]) 积累了大量的科学资料。可以说,20 世纪 40 年代以前美国土壤侵蚀科学研究主要进展是确定了美国土壤侵蚀研究大体轮廓,分辨出了影响侵蚀的主要因素,并进行了单影响因子及多因子的定量分析。此阶段最有代表性的著作是土壤侵蚀学的奠基人 Bennett 于 1939 年出版了《土壤保持》^[5]。

从 20 世纪 40 年代开始,土壤侵蚀科学研究对对侵蚀现象的一般描述和对影响因子的试验研究步入对土壤侵蚀过程及其机理的定量化研究。1944 年 Ellison 首次通过实验揭示出降雨击溅是水蚀过程中的一种主要营力^[6~8]。对降雨击溅的认识,导致了土壤侵蚀防治工作的一场革命,即由过去人类历史以来以防治径流侵蚀的工程防护措施为主转变为以消除雨滴击溅作用的“给土地穿上衣裳”之覆盖措施为主(如免耕法、最少耕作法等)的防治思想。随着降雨雨滴击溅在土壤侵蚀过程中的重要作用的认识,降雨物理特性及其溅蚀的研究得到迅速发展,并进一步促进了人工模拟装置的研发与应用^[9],极大地加快了研究工作的进度。在土壤本身抵抗侵蚀的能力方面,对土壤可蚀性进行了大量研究,取得了重要进展。与此同时,Ellison 也对侵蚀过程进行了深层次的研究,并将侵蚀过程刻化为雨滴侵蚀过程、径流侵蚀过程、雨滴搬运过程和径流搬运过程四个子过程^[6~8,10]。1969 年, Meyer 和 Wischmeier 对 Ellison 划分的土壤侵蚀的 4 个亚过程进行了数学模拟,应用“受分散限制的”和“受搬运限制的”的概念,计算了单元产沙量^[11~13]。后来,Foster 和 Meyer 等人基于 Ellison 的研究结果,提出了侵蚀率受输沙率和输沙能力的制约和细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主、细沟侵蚀以径流侵蚀为主的侵蚀概念模型。与此同时,土壤侵蚀预报研究也取得了重要进展。1954 年,美国农业部在美国中西部印第安纳州 West Lafayette City 建立了国家径流泥沙数据中心,组织全美力量汇总全国径流泥沙观测资料。并基于当时对土壤侵蚀过程及其侵蚀机理的认识和对大量的径流泥沙观测数据的统计分析,由国际著名土壤侵蚀学者 Wischmeier 组织有关政府部门和科研、教学和生产单位联合攻关,建立了著名的通用土壤流失方程(USLE—Universal Soil Loss Equation),并由 Wischmeier 于 1959 年以文献的形式提出,由 Wischmeier 和 Smith 1960 年在国际土壤学大会上公布,由 USDA 于 1965 以农业手册 282 号出版第一个官方版^[14],1978 年以农业手册 537 号出版第二版^[15]。

综上所述 20 世纪 80 年代前土壤侵蚀和水土保持的主要研究成就为:(1)土壤侵蚀过程及影响因子的分辨与定量表述;(2)人工模拟降雨试验技术的开发;(3)以免耕等水土保持耕作法为代表的耕地土壤侵蚀防治技术的研发和推广;(4)通用土壤流失方程式的问世与推广。

20 世纪 80 年代以来,引入现代新技术新方法,以预测预报模型研究带动侵蚀机理、过程研究,重视土壤侵蚀和水土保持的环境与经济效应,主要研究进展:(1)修正完善通用土壤流失方程式(RUSLE2.0^[16]);(2)深化风蚀和水蚀过程研究,强化研究成果的集成,研发水蚀预报的物理模型,如 WEPP^[17],EUROSEM^[18,19]、LISEM^[20,21]和风蚀预报模型

RWEQ 和 WEPS; (3) 强化对土壤侵蚀环境效应评价研究, 建立评价模型, 包括土壤侵蚀与土壤生产力模型如 EPIC^[22], SWAT 和非点源污染模型 AGNPS^[23]、ANSWER^[24]、CREAMS^[25]。(4) 坡面水土保持措施研究注重水土保持措施与现代机械化耕作相结合, 深化研究少耕、免耕、残茬覆盖等水土保持措施的作用机理, 强化植物根系层的提高土壤抗侵蚀能力的研究; (5) 重视民众参与提高公众环境意识, 水土保持措施研究与农场主需求相结合; (6) 土壤侵蚀与水土保持与生态经济交叉与结合的研究也日趋活跃。

关于风力侵蚀的研究在很长一段时期内风力侵蚀研究没有引起足够的重视。20 世纪 30 年代, 美国和前苏联的中亚地区的黑风暴才引起人们对风蚀的高度关注。关于风蚀的研究或以划分为三个阶段: (1) 20 世纪 30 年代至 60 年代, 风蚀研究开始有了较大进展, 实现了定性描述到定量研究的飞跃^[26], 如拜格诺进行了一系列风沙运动的实验研究, 创立了“风沙物理学”^[27]。他的代表著作《风沙和荒漠沙丘物理学》的出版标志着土壤风蚀研究的一场革命。此阶段风蚀研究的主要内容有风蚀物理机制, 如土壤颗粒在风力作用下的运动性质, 颗粒起动风速、气流输沙通量, 风蚀流的磨蚀作用, 风蚀流的累积强度和风力作用下土壤物质的分选等等^[28]。同时, 也开始了风蚀影响因子的系统研究, 建立了风蚀预报方程(WEQ)。(2) 20 世纪 60 年代中期, 风蚀研究的重点转向土壤风蚀防治原理及风沙工程。评价各种风蚀措施的防护效益, 并在理论指导下布设风蚀防治措施。此时风蚀方程的应用, 数理分析方法, 计算机处理技术等被引入土壤风蚀研究。在学科间的相互渗透作用推动下, 土壤风蚀研究取得较大进展, 如区域土壤风蚀的宏观评价, 土壤风蚀的仿真研究, 风蚀危害程度评价与预测, 以及各种风蚀模型建立等^[29]。(3) 20 世纪 70 年代以后, 全球土地荒漠化扩展, 引起各方面的关注, 风蚀研究进入全新阶段, 研究的方法和技术也有了新的发展研究的重点由野外的定位观测转向室内的风洞模拟实验, 侧重风蚀动力机制和各风蚀影响因子相互作用过程研究, 风蚀预报研究取得较大的进展, 研发了 RWEQ 和 WEPS 等风蚀预报模型。

1.1.2 国际土壤侵蚀研究的主要成功经验

国际土壤侵蚀研究的主要经验表现在以下几个方面:

(1) 政府高度重视: 20 世纪 30 年代在美国本土发生的大面积高强度沙尘暴(黑风暴), 使美国政府和国民深刻地认识到土壤侵蚀带来的严重后果, 并采取积极行动, 投入大量人力、物力开展土壤侵蚀试验观测、预报和防治研究。美国总统罗斯福 1935 年给各州长写信指出: “破坏自己的土壤的国家, 最终必然要毁掉自己”。同年, 国会通过水保法案, 规定农业部设水土保持局(后改为自然资源保护局)。1944 年, 《洪水控制法》(PL78—534 号法令) 开始实行。要求选择一些典型地区实施授权流域(Authorized watershed)综合治理。1954 年, 通过《流域保护和洪水防治法》(PL83—566 号法令), 授权农业部实施示范流域(Pilot watershed)综合治理。根据《流域保护和洪水防治法》, 1955 年, 实施小流域综合治理项目(Small watershed program)。

(2) 土壤侵蚀监测的统一性、规范性和高度的组织管理: 例如, 美国从农业部 20 世纪 20 和 30 年代在全美建立的土

壤侵蚀试验观测站, 在试验设计、观测方法、资料处理上的高度的一致性和规范化, 为后来美国土壤侵蚀重大创新性成果的产生(如 USLE—RUSLE—WEPP; WEQ—RWEQ—WEPS 等)提供了创新研究基地。再如, 美国农业部 1954 年在美国中西部印第安纳州 West Lafayette City 建立了国家径流泥沙数据中心, 组织全美力量汇总全国径流泥沙观测资料, 并由国际著名土壤侵蚀学者 Wischmeier 组织有关政府部门和科研、教学和生产单位联合攻关, 于 1956 年建立了著名的通用土壤流失方程(USEL—Universal Soil Loss Equation)。

(3) 稳定连续的高强度投入: 例如, 美国农业部从 1986 年开始立项, 研发新一代水蚀预报模型(Water Erosion Prediction Project—WEPP)。该研究项目计划利用 30 年左右的时间, 完成用于坡面水蚀预报模型、小流域水蚀预报模型和大集水区和水域的水蚀预报模型。该项目 1986 年起动以来, 每年有足够的科研经费用于模型的研发。经过 1 年的努力, 于 1987 年完成了用户需求报告, 规定了 WEPP 的基本框架, 并于 1995 年发布了第一个官方正式坡面版本。目前正在研发 GIS 技术支撑下的流域水蚀预报模型 GeoWEPP^[30]。

(4) 注重研究成果的集成与创新: 例如, 美国农业部研发的水蚀预报模型 USLE、RUSLE、WEPP 和风蚀预报模型 WEQ、WEPS 及农业非点源污染模型(AGNPS) 中, 都注重研究成果的集成与创新。

1.1.3 中国土壤侵蚀科学发展历程

中国对土壤侵蚀现象的认识可以追溯到 3 000 年前。而将土壤侵蚀作为一门科学技术进行专门研究, 则是 20 世纪 20 年代开始的。尽管土壤侵蚀科学研究在中国起步较晚、历史不长, 但由于中国土壤侵蚀的复杂性以及土壤保持工作在中国农业生产、生态环境建设, 以及人类生活与社会发展中的重要作用, 中国土壤侵蚀研究取得了较大的进展。进入 21 世纪, 中国土壤侵蚀研究工作迎来了新的发展机遇, 同时, 也面临着严峻的挑战。

(1) 我国土壤侵蚀科学发展现状。我国土壤侵蚀的研究始于 20 世纪 20 年代, 当时金陵大学森林系的部分教师在晋鲁豫进行了水土流失调查及径流观测, 20 世纪 30 年代在该校开设土壤侵蚀及其防治方法课程。1933 年原黄河水利委员会成立并设置林垦组, 从事防治土壤冲刷工作。20 世纪 40 年代黄瑞采等学者对陕甘黄土分布、特性与土壤侵蚀的关系等进行了深入的考察研究。此后, 相继在水天(1941)、西安、平凉和兰州(1942)、西江和东江(1943)、福建长汀(1939) 建立了水土保持实验站^[31,32], 可以说这个时期是我国土壤侵蚀科学发展的初期阶段。

我国大规模开展土壤侵蚀研究并取得重要成果则是从 20 世纪 50 年代开始的。1957 年成立了全国水土保持委员会, 先后有 20 多所高等院校设立了水土保持系或水土保持专业, 一些农林水专科学校也相应设立了水土保持专业。特别是 1955~1958 年的黄河中游水土保持综合考察, 取得了一批宝贵的基础资料、图件和成果。黄秉维、朱显谟、席承藩等对黄土高原土壤侵蚀分类和分区等做了大量开创性的工作, 为我国的土壤侵蚀科学发展奠定了重要基础。

20 世纪 70 年代末,我国实施改革开放政策以来,随着经济的发展和综合国力的增强,土壤侵蚀科学也得到了全面、迅速的发展。国家科技部组织开展了第二次黄土高原综合考察、进行了连续数个 5 年计划的黄土高原典型地区综合治理试验示范研究,并将研究尺度由小流域扩大到区域,进行了长江流域和全国土壤侵蚀区划,建立了土壤侵蚀国家重点实验室及与其配套的世界第二大人工模拟降雨实验大厅,各研究机构、高等学校和各级水利水保部门布设了一系列水土流失观测站进行观测,并研制了不同的室内外人工模拟降雨装置开展系统研究,编制了全国水土流失技术标准和监测规程,各大江大河流域和各级行政相继建立了水土保持与生态环境监测机构,国家基金委、水利部和黄委会等联合或单独设立了水土保持研究基金资助开展研究,三峡工程的建设促使其上游地区的水土流失研究受到关注,3S 等技术在土壤侵蚀调查研究和空间评价中得到广泛使用。《水土保持法》的颁布、西部大开发对生态环境建设的需求及国家将实施的经济与社会协调发展的战略正在推动土壤侵蚀科学研究向定量化的方向发展。

(2) 我国土壤侵蚀科学研究进展。我国土壤侵蚀科学研究从 20 世纪 50 年代开始的,取得了一批宝贵的研究成果,为我国土壤侵蚀学科发展奠定了重要基础。

① 土壤侵蚀分类和分区。建立了较为合理、完善的土壤侵蚀分类系统,按照侵蚀营力的不同,将土壤侵蚀主要划分为水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀、冻融侵蚀和人为侵蚀,在每一侵蚀类型中又进一步根据侵蚀过程的发展阶段划分侵蚀方式^[33,34]。20 世纪 90 年代又增加了水蚀风蚀复合侵蚀类型^[35]。近年来随着经济的发展,资源开发、工矿建设引起的新的人为加速侵蚀^[36,37]以及城市土壤侵蚀的研究受到了重视^[38]。新近又认识到了耕作侵蚀,并开展了相应研究。

20 世纪 50 年代黄秉维采用 3 级分区方案编制的黄河中游土壤侵蚀分区图,既简明扼要,又突出了重点,沿用至今,对黄土高原水土保持工作起到了重要的指导作用^[39]。朱显谟根据黄河中游不同区域尺度的要求,提出了土壤侵蚀 5 级分区方案,即地带、区带、复区、区和分区。20 世纪 80 年代辛树帜将全国土壤侵蚀类型划分为水力、风力和冻融 3 个一级区,并将水蚀区分为 6 个二级区^[40]。1984 年开展了应用遥感技术编制全国和各大流域土壤侵蚀图(1:250 万和 1:50 万)。近期完成了全国土壤侵蚀遥感调查,分析研究 1990 与 2000 年前后两时段全国土壤侵蚀动态变化。

② 土壤侵蚀过程与机理。对水蚀、风蚀、重力侵蚀、开发建设区水土流失过程及机理进行了比较系统地研究,特别是基于黄土坡面侵蚀方式演变过程及土壤侵蚀垂直分带性,较深入地研究了溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、浅沟、洞穴侵蚀过程、机理及其防治途径^[41~47];近期开展了发育活跃期切沟侵蚀和耕作侵蚀及其效应研究。对人为破坏植被引起的加速侵蚀进行了长期动态观测研究,评价了自然侵蚀和人为加速侵蚀速率^[48]。20 世纪 80 年代以来,开展水蚀-风蚀混合侵蚀的交互作用及其机理研究,定量分析了水蚀、风蚀和重力侵蚀对小流域侵蚀产沙的贡献。基于黄土丘陵区梁峁坡面土壤侵蚀垂直分带性,对不同侵蚀带的产流产沙贡献进行了研究,分析了坡面产沙来源与降雨特征值(最大 30 min 降雨强度)和

降雨能量的关系^[49]。

降雨是影响侵蚀的主要动力因素之一,在天然降雨雨滴特性^[50,51]、降雨动能^[52]、侵蚀性暴雨^[53,54]研究中取得明显进展。提出了全国不同侵蚀区的侵蚀性暴雨标准,建立了适合全国不同侵蚀区的降雨侵蚀力指标^[55,56]。

朱显谟首次将土壤抗侵蚀性分为抗蚀性和抗冲性,并根据黄土的物理特性和抗冲性提出了“全部降水就地入渗拦蓄”这一水土保持方略^[57,58]。20 世纪 80 年代以来关于植被根系对土壤抗冲性的研究取得了重要进展,发现反映土壤抗蚀性的重要指标为风干土的水稳性团粒含量,而土壤腐殖质和物理性黏粒含量是影响土壤风干土水稳性团粒含量的主要指标^[59,60]。关于地形因子与土壤侵蚀的关系,研究结果表明,存在影响土壤侵蚀的临界坡长及临界坡度^[61~63],唐克丽等根据浅沟侵蚀发生的临界坡度论证了黄土高原地区的退耕坡度^[47]。建立全国不同水蚀区坡面土壤流失量与坡度、坡长的关系式^[64~71]。有关地形因子对区域水土流失影响,选取地形起伏度作为影响区域水土流失的地形因子指标。

有关植被对土壤侵蚀的影响,集中在植被林冠层对降雨再分配的影响研究、地被物消减雨滴能量及防冲机理,植被根系增强土壤抗侵蚀性的物理学过程和生物化学过程、有效植被覆盖度等^[72]。在植被影响区域土壤侵蚀研究方面,已结合遥感技术用近地面植被绿度指数替代过去的植被覆盖度,更加反映植被对土壤侵蚀的影响。

有关人类活动对土壤侵蚀的影响,集中在水土保持效益评价和人为不合理开发利用自然资源方面。对资源开发、工矿建设引起的新的人为加速侵蚀进行了评价^[35~37];近期城市土壤侵蚀的研究也受到了重视^[38]。对人为破坏植被引起的加速侵蚀进行了长期动态观测研究,并从历史考证、现在不合理开垦和坡耕地土壤侵蚀现状等方面对自然侵蚀和人为加速侵蚀做出了科学评价^[48,73,75],为黄土高原植被恢复与重建及减少入黄河泥沙提供了重要依据。基于流域侵蚀-产沙关系的研究,提出了黄土高原泥沙输移比接近 1 的重要研究结果^[76];近期开展了长江流域泥沙输移比的研究,认为长江流域泥沙输移比变化于 0.15~0.61 之间^[77~82]。

③ 土壤侵蚀预测与预报。20 世纪 80 年代初引入美国通用土壤流失方程,结合各地自然条件建立了适合各地的模型参数指标,其中对降雨侵蚀力指标、标准径流小区选定等进行了修正。在对单因子进行定量分析研究的基础上,开始尝试坡面土壤流失模型的研发^[66~71],近期初步提出了中国土壤坡面水土流失方程(CSLE)。20 世纪 80 年代以来,基于小流域水沙观测资料,建立了估算小流域侵蚀产沙统计模型^[83~88];并在滑坡、泥石流预警研究方面取得了一定进展。20 世纪 90 年代开始探索坡面侵蚀预测物理模型、地理信息系统支持下的流域水蚀预报模型研究^[89,90]。

在区域水土流失趋势预测方面,20 世纪 80 年代末周佩华等率先进行了全国水土流失趋势预测研究^[91,92]。20 世纪 90 年代,基于对影响土壤侵蚀因子趋势变化的分析,并结合水土流失治理进度和粮食自给的需求,对黄土高原未来水土流失趋势进行了预测^[93]。近期开始探索区域水土流失及其趋势预测的研究^[94]。

④ 新技术新方法的应用。常规的宏观调查法、径流小区

法、小流域定位观测法仍是土壤侵蚀研究的主要方法。20 世纪 70 年代以来开展的人工模拟降雨技术在土壤侵蚀机理、土壤侵蚀定量评价和土壤侵蚀动力过程研究中发挥了重要的作用。20 世纪 80 年代以来, 利用¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、⁷Be 等放射性核素示踪方法, 创建稀土元素示踪技术对侵蚀空间分布和沉积及泥沙来源进行了研究^[95, 96]。遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)技术在水土流失调查评价和空间分析等发挥了重要作用。

⑤土壤侵蚀环境效应评价。对土壤侵蚀引起的土壤质量退化过程。包括土壤物理学、化学、生物学退化过程研究较多, 但尚未建立起土壤侵蚀与土壤生产力关系模型。对土壤侵蚀引起的水体污染等环境负效应和由土壤侵蚀造成的直接经济损失的评价研究较少。尚需加强这些方面的研究。

⑥泥沙来源与水土保持减沙效益评价。基于黄河流域水沙区域差异的特征及其对黄河泥沙的贡献, 对黄河泥沙来源进行了大量的研究, 界定出黄河中游流域的多沙粗沙区和重点治理区。针对 20 世纪 80 年代黄河泥沙明显减少现象, 开展了大量的降水与水土保持减沙效益分析研究, 提出了水保法和水文法的评价方法。

⑦开展了以小流域为单元的综合治理试验研究, 注重生态修复研究。20 世纪 80 年代以来, 开展了小流域综合治理试验示范研究, 取得了一大批的研究成果, 建立了适应于我国不同侵蚀类型区的水土保持技术体系, 并在生产实践中得到了广泛应用。例如, 在水土流失极为严重的北方黄土高原地区, 建立了以全部降水就地入渗拦蓄利用为核心的水土保持生态环境建设技术体系; 在南方山丘区建立了以“蓄排结合, 以用为主”的水土保持技术体系; 在东北漫岗区建立了以水土资源有效合理利用, 并与发展旱地农业相结合的水土保持技术体系; 在沙漠与荒漠地区建立了以林草植被建设为主体, 以防风固沙为主要内容的水土保持林技术体系等。

近期提出了依靠生态自我修复能力, 加快土壤侵蚀综合治理步伐的研究思路; 开展了中尺度水土流失综合治理试验示范研究。

⑧风蚀研究。我国风蚀研究在 1950 年前基本是空白。1950 年后, 我国政府十分重视风蚀的治理与防治。20 世纪 50 年代国务院召开两次全国治沙工作会议, 促进治沙工作的开展, 推动风蚀科学研究。20 世纪 50 年代末中国科学院组建了“中国治沙队”, 对我国主要沙漠与戈壁地区展开大规模的综合科学考察, 基本查明我国主要沙漠的分布范围, 沙漠砂的来源, 沙丘成因类型及其发育过程和移动规律, 为以后风蚀研究及其防治奠定了基础。20 世纪 60 年代中后期, 风沙工作由宏观调查转入以沙害治理研究为主题的专题研究, 同时结合沙区铁路建设, 开展沙漠地段铁路选线及沙害治理措施的研究。如开展沙通、兰新、南疆等沙害地段铁路沿线的沙害和风害防治措施的试验研究。与此同时, 风蚀机理研究也受到重视, 建立了室内风洞实验室, 开展了风沙运动和防沙工程的风洞模拟实验。20 世纪 70 年代以土地荒漠化问题为中心, 深入地开展了沙漠化的现状及成因、过程与整治的研究。20 世纪 80 年代以来, 风蚀研究在理论和实践上都取得了新的进展^[97~99], 主要表现为: (1) 20 世纪 80 年代以来, 先后在鄂尔多斯、科尔沁、青海共和盆地、浑善达克、松

嫩平原, 巴丹吉林和塔克拉玛干等地系统地开展沙漠形成演变的研究, 充分地论证了沙漠化过程, 初步建立了可以与黄土、海洋沉积和冰期气候波动对比的沙区第四纪地层序列, 并在沙漠的成因分类和区域分异的研究方面也取得新的进展。同时, 通过土壤侵蚀的遥感调查, 基本掌握了我国风蚀区的基本态势。(2) 加强了不同自然条件下沙漠化治理示范基地的建设, 并扩大到湿润地带, 逐步建立了干旱地绿洲周围, 干旱沙质荒漠, 荒漠草原, 半干旱农牧交错地区, 半湿润风蚀沙化土地沙漠化的防治与治理。(3) 风蚀研究的技术与手段有了新的发展。系统地进行了土壤风蚀风洞模拟实验, 定量半定量地确定了自然和人为因素在土地风蚀中的作用, 深化了风蚀物理过程的认识, 建立了风沙运动的力学数学模型; 系统地进行了多种防沙工程措施的野外和室内风洞模拟实验研究, 对各种风沙工程的防沙作用原理有了深刻的认识, 并在防沙实践中如沙漠公路沙害防治、铁路沙害防治中得到较好的应用。随着空间科学技术的发展, 应用遥感和地理信息(GIS)等技术进行沙漠和荒漠化的动态监测, ¹³⁷Cs 同位素示踪元素在风蚀过程研究中的应用, 定量评价了影响风蚀的相关因素, 初步建立了风蚀预报模型。

综上所述, 我国土壤侵蚀的主要研究成果表现为初步摸清了中国土壤侵蚀的基本规律, 完善了中国土壤侵蚀的分类分区系统, 揭示了土壤侵蚀过程及其机理, 初步建立了坡面土壤流失量的统计模型, 开展了小流域侵蚀预报和区域水土流失评价及趋势预测的研究和小流域综合治理试验示范研究, 建立了土壤侵蚀研究方法和技术体系。

与世界土壤侵蚀科学研究相比, 我国在土壤侵蚀宏观区域分异规律和土壤侵蚀分类、侵蚀环境演变、土壤侵蚀研究方法与技术、土壤侵蚀综合防治等方面已经达到或接近世界先进水平。但我国在土壤侵蚀物理过程、土壤侵蚀预报物理模型及土壤侵蚀环境效应评价等方面的研究落后于世界先进水平。

我国土壤侵蚀研究存在的主要问题为缺乏统一的组织管理和顶层设计; 缺乏稳定连续的项目投资, 且项目执行时间短和研究目标分散, 很难取得创新性的研究成果; 缺乏统一的土壤侵蚀试验观测标准和规范。

1.2 土壤侵蚀的分支学科

经过近几十年土壤侵蚀学的发展, 土壤侵蚀学科基本框架初步形成, 主要有土壤侵蚀动力学, 土壤侵蚀预测预报, 土壤侵蚀地理学, 土壤侵蚀环境学, 实验土壤侵蚀学, 土壤侵蚀社会经济学。

1.2.1 土壤侵蚀动力学

主要研究在各种影响因子条件下, 水力、风力、冻融、重力、生物力和机具动力等侵蚀营力(包括多种侵蚀营力的复合)与土壤(地表物质)抗侵蚀力的相互作用, 揭示土壤侵蚀的发生演变的动力学机制, 定量评价影响土壤侵蚀的各种因子, 建立侵蚀过程定量表达式, 为侵蚀预报物理模型的建立奠定理论基础, 并为侵蚀防治提供科学依据。

1.2.2 土壤侵蚀预测预报

基于侵蚀过程和土壤侵蚀影响的研究成果, 研发不同尺度(地块、坡面、小流域土壤侵蚀(风蚀、水蚀)预测预报模型; 预测土壤侵蚀影响因子的变化趋势, 建立区域土壤侵蚀预测

模型;同时也应关注侵蚀灾害(如灾害性滑坡、滑塌和泥石流等)的预警与防治研究。

1.2.3 土壤侵蚀地理学

主要研究土壤侵蚀区域分布规律,以建设中的中国水土保持监测网络为依托,深入研究不同自然和社会条件下土壤侵蚀的区域分布规律,演变特征,预测变化趋势,为土壤侵蚀防治宏观决策的制定提供理论依据和基础信息资料,为大江大河综合治理服务。当务之急是应尽快建立全国统一的土壤侵蚀指标体系及信息采集、数据处理、图件编制等规范,建立国家水土保持信息数据库系统,动态监测全国水土流失状况,为全国水土保持规划、生态环境建设及水土资源持续高效利用决策的制定提供技术支撑。

1.2.4 土壤侵蚀环境学

主要研究土壤侵蚀与土壤质量退化过程的耦合关系,提出评价土壤质量退化的物理学、化学和生物学指标体系,建立土壤侵蚀与土壤生产力关系评价模型;研究土壤侵蚀过程对区域和全球环境的影响;阐明土壤侵蚀对空气质量、生物多样性和碳循环的影响,建立土壤侵蚀造成经济损失的估算模型;预测土壤侵蚀对全球气候变化和土地利用格局变化的响应,为国土资源整治提供科学依据。

1.2.5 实验土壤侵蚀学

主要研究土壤侵蚀模拟试验的原理与方法,土壤侵蚀过程快速监测与土壤侵蚀定量评价的新技术和新方法,为土壤侵蚀定量评价提供技术支撑。

1.2.6 土壤侵蚀社会经济学

主要研究政策、方针、法律、人类活动、工农业布局和社会经济发展等对土壤侵蚀的影响,为国家决策提供科学依据。

2 土壤侵蚀学科发展面临的挑战

2.1 国家可持续发展需求对土壤侵蚀科学提出的挑战

中国是世界上的人口大国与农业大国,也是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一。建国以来,我国土壤侵蚀防治工作一直受到党和国家的高度重视,并投入了大量的人力、物力和财力开展了土壤侵蚀防治工作。经过 50 多年长期不懈的努力,全国已累计治理水土流失面积 87.41 万 km²,兴修梯田 1 475.21 万 hm²,修建数百万座小型水利水保工程。我国的土壤侵蚀防治工作取得了显著的成绩,并产生了巨大的生态、经济和社会效益。例如,全国水蚀面积减少 14 万 km² (1989 年遥感普查统计,全国水蚀 179 万 km²;2002 年第二次全国土壤侵蚀遥感普查,全国水蚀 165 万 km²);黄河中游地区每年减少入黄泥沙 3 亿 t^[1]。然而,在我国,截止目前仍有近 200 万 km² 土壤侵蚀面积需要治理。近 20 多年来资源开发、基础设施建设和小城镇发展,都有可能产生新的土壤侵蚀。再加上受全球气候变化的影响,我国水土流失治理的任务仍很艰巨。近年来西北地区的数十次黑色沙尘暴及长江和松花江流域的“9·8”洪涝灾害更加深刻地警示,严重的土壤侵蚀已成为制约我国国民经济持续、协调发展和区域生态安全的重要因素。

20 世纪 90 年代以来,随着我国经济实力的增强,党和政府对水土保持工作高度重视。十五大报告中明确提出了

“植树种草,搞好水土保持,防止荒漠化,改善生态环境”的战略方针,决心从根本上解决历史遗留下来的恶劣生态环境,再造祖国秀美山川的战略决策。国家计委制定了《全国生态环境建设规划》(国家计划委员会,1997),将以水土保持为主要内容的生态环境建设正在扎扎实实的开展和实施。与此同时,《中华人民共和国水土保持法》等法规中已明确要求水行政主管部门(水利部)对全国的水土流失与治理状况进行预报和定期公告。随着社会公众环境意识的加强,全国水土流失与治理的基本状况及其治理效益评价更加受到多方面的关注。

进入 21 世纪,中国政府已将水土保持生态建设确立为 21 世纪经济和社会发展的一项重要的基础工程,并提出了新世纪水土保持的宏伟战略目标。党中央、国务院从我国经济社会可持续发展和国家生态安全的战略高度,明确把水土保持作为改善农业生产条件和生态环境、治理江河的根本措施。在西部大开发战略中,把水土保持为中心的生态建设作为西部大开发的根本和切入点。因此,新的形势下,防治土壤侵蚀,保护生态环境、保证食物和生态安全等对土壤侵蚀科学研究提出了更高的要求。

2.2 区域和全球可持续发展的要求

土壤侵蚀不仅给当地生态、环境、人类生存和社会经济发展带来严重影响,而且也给相邻地区(例如位于侵蚀区下游的河流、湖泊和近海地区)生态、环境、人类生存和社会经济发展带来严重影响。因此,土壤侵蚀及其对区域和全球环境影响评价研究,是一个备受关注的社会问题和科学问题。防治土壤侵蚀、改善生态环境是实现人与自然协调和资源—环境—社会经济可持续发展的根本保障。通过认识和揭示土壤侵蚀过程及其发生演变机理、分析和评价土壤侵蚀对区域和全球环境变化的影响方式、范围和程度,提出治理土壤侵蚀和保护生态环境的战略措施,将是协调人与自然关系,实现资源—环境—社会经济持续发展的理论基础。再者,土壤侵蚀是世界性的环境问题之一,影响到全球粮食供应和生态安全等,将土壤侵蚀、土壤保持与全球环境变化相联系已成为各国政府官员和科学家共同关注的热点问题。因此,区域和全球资源—环境—社会经济持续协调发展也对土壤侵蚀科学研究提出了的要求。

2.3 土壤侵蚀科学自身发展面临的问题

土壤侵蚀是主要发生在山坡地的一种自然现象,其影响因素包括到几乎所有自然因子和诸多人类活动。土壤侵蚀的下垫面地形条件极其复杂多变,土壤松散体结构极其复杂多样。土壤侵蚀虽然发生在特定的地理空间(分水岭到河道之间的坡地地段),具有独特的水—土界面和风—土(沙)相互作用机制和侵蚀地貌演化规律。土壤侵蚀研究尽管在研究技术和方法上有所突破,但理论研究相对薄弱,严重制约了该学科的发展。因此,土壤侵蚀学科自身发展面临的问题还很严重,进一步发展和完善土壤侵蚀学科任重道远,将是一项长期而艰巨的工作。土壤侵蚀学自身发展面临的主要问题有:

2.3.1 土壤侵蚀研究对象的复杂性和不确定性

土壤侵蚀不仅受到气象、水文、生物、地形地貌及土壤本身等几乎所有自然因素的作用,而且还受到各种人类活动的深刻影响。各影响因子虽然有规律可循,但各种因子对土壤

侵蚀综合影响的结果,使土壤侵蚀过程极其复杂和在空间和
时间上分布的随机性和不确定。因此,很难把握其发生、发展
演变的客观规律,进而予以科学的定量描述。另外,我国地域
辽阔,各地自然与人文环境背景差异巨大,造成侵蚀特征各
异,更加重了人们对土壤侵蚀规律认识的难度。总之,土壤侵
蚀影响因素的多样性、随机性、区域特征的差异性和时间上
的不确定性,都在很大程度上影响了土壤侵蚀科学的迅速发展。

2.3.2 基础数据积累不足、共享性差

基础工作与基础数据是学科发展的基石,获取基础数据
一直为各学科开展研究的首要任务。我国对土壤侵蚀的监测
从 20 世纪 40 年代就已开始,可以说,到目前为止,的确布
设了不少各类监测网、站、点,并取得了一定的监测资料。然
而,土壤侵蚀监测工作尚未引起高度的重视,存在的问题是
经费投入少,设备简陋、缺乏统一的组织与规划。因此,各
地、各时期、各部门和各研究者大都是根据不同的目的设置
有关监测,不仅监测标准不统一,方法不一致,内容不相同,
使得监测获得的资料不具可比性,而且监测的空间布局不合
理,没有代表性,有些地区还是空白,不能反映出区域特征
与规律,监测项目也不具有连续性,资料序列长短不一,无
法使用,难以进行动态变化分析与评价。

没有基础数据的支持,学科难以发展。资料不能共享,会
使研究水平的提高受到限制。我国目前资料不能共享的原
因主要有:一是观测资料不规范,试验方案不稳定,试验精
度不高,观测项目共性较差。二是部门分割比较严重,思想
意识比较保守。

2.3.3 研究思路和方法急需创新

土壤侵蚀虽然发生在特殊的地理空间(分水岭到河道之
间的坡地地段),具有独特的水—土界面和风—沙(土)界
面相互作用机制和独特的微地貌演化规律。目前土壤侵蚀
过程机制等方面的研究,仍套用着相邻和相近学科的理论
(如河流泥沙运动理论、明渠水力学理论等),而没有形成
自身的学科理论体系,严重制约了该学科的深入发展、研
究进展和已有研究成果的精确水平。

目前土壤侵蚀的主要研究方法仍然利用野外径流小区
和小流域把口站进行水文泥沙的监测。但由于这些监测设
备自动化程度低,不能全面收集过程资料,因而限制了过程
研究;二是观测设施(如分水箱)的设计不合理,径流观测
不够准确;三是泥沙取样不精确。遥感(RS)技术虽然给
侵蚀宏观研究带来了曙光,但该技术只能通过对影响因子
的解译间接评价土壤侵蚀,无法直接获得侵蚀强度。再者,
水土保持效益评价的方法、水土保持措施设计的技术与方
法等都急需创新。

2.3.4 基础科学研究落后于生产实践

土壤侵蚀科学服务的对象是水土保持。我国是自然条
件复杂,人为活动影响深刻,水土流失最为严重的国家。我
国劳动人民在创造几千年灿烂文明的同时,虽然由于不合
理的资源利用和改造等活动导致了严重的水土流失,但同
时也积累和创造了大量的土壤保持经验与技术。至今,我
国水土保持措施的多样性、实效性等在国际上都是罕有
的,但我国土壤侵蚀学科的发展却一直滞后于水土保持实
践,不仅对以往和

目前水土保持综合治理的减沙效益等工作不能做出科学
的评判,而且也无法科学地指导未来的环境整治及土地利
用规划等,使我国目前的水土保持与生态环境建设工作带
有盲目性,给国民经济造成了不应有的损失。

科学研究与生产实践相对脱节的另一表现为科学家关
注的研究问题与管理者关心的问题往往不一致,使得科学
研究成果很少应用于实践当中。一方面是针对政府亟待
解决的问题,由于对科研人员的支持力度不够,而无法进
行深入研究。另一方面是管理者难以及时了解新的研究成
果,这就使得研究与实践出现了脱节,同时也制约了学科的
发展。

3 土壤侵蚀学科前沿和优先领域

3.1 土壤侵蚀学科的前沿布设

土壤侵蚀学科的前沿布设应注重多学科相互交叉与
渗透,特别强调土壤侵蚀学与景观生态学、地貌学、水文
和水力学、资源环境科学及生态经济学的交叉,并注重新
技术在土壤侵蚀研究中的应用。同时,还应根据国家水土
保持和生态环境建设对土壤侵蚀学科发展的要求,凝练研
究目标,突出科学问题。

3.1.1 土壤侵蚀过程与动力学机制

注重水—土和风—土界面的复杂力学关系,集中研究
水蚀和风蚀过程的动力学过程及其机制,揭示降雨侵蚀
力、径流侵蚀力与土壤抗侵蚀力及其风力与土壤抗侵蚀力
之间的复杂关系,建立水蚀过程和风蚀过程的定量表达
式。当前应根据建立侵蚀预报模型的迫切需求,重点研究
坡面降雨径流侵蚀与输沙过程及其机制、坡面与沟道水沙
汇集与输移过程、小流域水蚀过程及水沙汇集传递关系;
揭示产流汇流—土壤侵蚀—泥沙搬运—沉积过程的动力
学机制及侵蚀产沙与河流泥沙输移关系;研究风蚀与风积
的动力学过程及沙尘暴发生的机制及源区界定,定量描述
土壤抗侵蚀力,为我国土壤侵蚀预报模型的建立提供理论
基础。

3.1.2 水蚀和风蚀预测与预报

根据我国水土保持和生态环境建设对土壤侵蚀预报模
型的要求,结合国际土壤侵蚀预报发展的最新动态,针对
我国土壤侵蚀的特点,开展多尺度的水蚀和风蚀预报模
型研究。近期研究重点是土壤可蚀性因子表述、定量评
价地形和水土保持措施对侵蚀的影响,建立坡面水蚀预
报模型、小流域分布式水蚀预报模型、风蚀预报模型、农
业非点源污染模型等。

针对环境演变研究的需要,阐明区域水土流失影响因
子的变化趋势,分析水土保持和生态环境建设减少土壤
侵蚀程度及潜力,建立区域水土流失观测模型。

3.1.3 土壤侵蚀环境效应

(1) 土壤侵蚀对土壤生产力的影响的定量评价:揭示
土壤侵蚀与土壤质量退化过程的耦合关系,提出评价土
壤质量退化的物理学、化学和生物学指标体系,建立土
壤侵蚀与土壤生产力关系评价模型

(2) 土壤侵蚀造成的非点源污染预测预报:揭示径流
泥沙运输过程中污染物迁移规律,科学的评价土壤侵蚀
过程对水质的影响,提出土壤侵蚀对水体质量影响的评
价指标,建立评价模型。

3.1.4 重大工程及全球变化对侵蚀环境的影响

(1) 重大工程建设对侵蚀环境的影响: 着眼正在开展的重大生态工程和大规模的土壤侵蚀治理, 分析土壤侵蚀治理模式对区域地表过程和农村经济发展等方面的影响。

(2) 全球变化对侵蚀环境的影响: 重点研究土壤侵蚀对全球变化和土地利用被覆变化的响应; 全球变化背景下风蚀对大气质量的影响; 土壤侵蚀对区域和全球食物和生态安全的影响等。

3.1.5 侵蚀灾害(灾害性滑坡、滑塌、泥石流、洪水等)预警

重点研究灾害性滑坡、滑塌、泥石流、洪水发生发展规律及其机理, 建立预防监督系统, 提出预警方案 and 对策。

3.1.6 土壤侵蚀研究的新技术与新方法

(1) 土壤侵蚀试验观测技术。主要研究雨滴能量观测、坡面水流(薄层水流及股流)水力学参数的观测技术与仪器研制、坡面侵蚀泥沙监测技术、沟蚀过程监测技术、高含沙水流含沙量观测、风蚀监测技术、坡面和小流域径流泥沙监测技术;

(2) 坡面和小流域土壤侵蚀与水土保持模型试验研究。主要研究坡面和小流域土壤侵蚀与水土保持模型试验的相似性、模拟降雨的相似性、土壤和泥沙颗粒组成的相似性等;

(3) 土壤侵蚀过程研究的核素示踪技术与方法。

(4) 区域尺度土壤侵蚀试验研究技术。主要研究侵蚀因

参考文献:

[1] 陈雷. 中国的水土保持[J]. 中国水土保持, 2002, (4): 4– 6.

[2] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil loss equation to guide conservation farm planning[J]. Trans. 7th International Cong. Soil Sci. 1960, 1: 418– 425.

[3] Wischmeier W, H. Use and misused of the universal soil loss equation[J]. J Soil and Water Cons., 1976, 31(1): 5– 9.

[4] Meyer L, D. Evolution of the Universal Soil Loss Equation[J]. J. Soil and Water Cons., 1984, 32(2): 99– 104.

[5] Bennett, H. H. Soil conservation[M]. New York: McGraw– Hill Book Co., 1939.

[6] Ellison W D. Studies of raindrop erosion[J]. Aric. Eng., 1944, 25: 131– 136.

[7] Ellison W D. Soil Erosion Study– Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash[J]. Aric. Eng., 1947, 28: 197– 201.

[8] Ellison W D. Soil Erosion Study– Part V: Soil transport in the splash process[J]. Aric. Eng. 1947. 28: 349– 351, 353.

[9] Foster, G R, F P Eppert, L D Meyer. A programmable rainfall simulator for field plots[S]. Agric. Rev. and Manuals ARM– W– 10. USDA– ARS. Oakland: Western Region, CA, 1979. 45– 49.

[10] Ellison W, D Ellison O T. Soil Erosion Study– Part VI: Soil detachment by surface flow[J]. Aric. Eng, 1947, 28: 402– 405, 408.

[11] Meyer L D, Foster G R. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow[J]. Trans. of ASAE, 1965, 8(4): 689– 693.

[12] Foster G R, Meyer L D. A closed-form soil erosion equation for upland areas[A]. In: H. W. Shen (ed.) Symposium of Sedimentation[C]. Colorado, 1972. 12. 1– 12. 7.

[13] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Trans. of ASAE, 1977, 20(4): 678– 68.

[14] Wischmeier, W H, D D Smith. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [S]. Agriculture Handbook 282, Washington, D. C: U. S. Department of Agriculture, 1965.

[15] Wischmeier, W H, D D Smith. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning[S]. Agriculture Handbook 537, Washington, D. C: U. S. Department of Agriculture, 1978. 58.

[16] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Coordinators. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[S]. USDA Agricultural Handbook, 1997. 703.

[17] Nearing M A, Foster G R, Lane L J. A process-based soil erosion model for USDA– water erosion prediction project technology[J]. Trans. of ASAE, 1989, 32(5): 1587– 1593.

[18] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach

子信息采集和提取技术、区域土壤侵蚀快速调查技术、水沙汇集传递过程的演算方法、工程项目建设区新增水土流失监测技术。

3.2 优先领域

3.2.1 土壤侵蚀过程及其机理

(1) 土壤水蚀、风蚀动力学过程。

(2) 土壤侵蚀与土壤质量和土地生产力退化的相互作用与过程。

(3) 土壤侵蚀过程对水体污染的作用过程及其机理。

(4) 沙尘暴发生机制及源区界定。

(5) 陡坡地土壤侵蚀模拟。

(6) 土壤可蚀性的物理描述。

(7) 水土保持措施对土壤侵蚀的影响机理及定量描述。

3.2.2 侵蚀预报模型

(1) 坡面土壤流失预报模型。

(2) 小流域分布式水蚀预报模型。

(3) 区域土壤侵蚀预测预报。

3.2.3 重大工程及全球变化对侵蚀环境影响

(1) 土壤侵蚀对全球变化和景观格局变化的响应。

(2) 退耕还林草工程对环境要素及其过程的影响评价。

(3) 淤地坝工程的环境影响评价。

(4) 大规模水土保持对环境要素及其过程的影响评价。

for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527– 544.

[19] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM) [S]. Documentation and user guide, version 3. 6. Silsoe College, Cranfield University, 1998.

[20] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsema C J, LISEM: A Single– event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins[J]. I: Theory, Input and Output. Hydrological Processes, 1996, 10(8) : 1107– 1118.

[21] De Roo A P J, Jetten V G. Calibrating and validating the LISEM Model for two data sets from the Netherlands and South Africa[J]. Catena, 1999, 37(3– 4): 477– 493.

[22] Froster D L, R P Richards, D B Baker, et al. Blue EPIC modeling of the effects of farming practice changes on water quality in two lake Erie watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(1) : 85– 90.

[23] Young R A. AGNPS: A non–point source pollution model for evaluating agricultural watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2) : 168– 173.

[24] Bouraoui F, Dillaha T A. ANSWERS– 2000: Runoff and sediment transport model [J]. Journal of Environmental Engineering, 1996, 122(6) : 493– 502.

[25] Foster G R, Lane L J, Nowlin J D, et al. A model to estimate sediment yield from field–sized areas: Development of model [A]. In: W. G. Knisel (ed.) CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems[M]. USDA, Sci. and Educ. Admin. , Conser. Rep. No. 26, 1980. 36– 64.

[26] Bagnold, R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Chapman and Hall, 1941. 265.

[27] Woodruff, N P, Siddoway, F H. A wind erosion equation[J]. Proc Soil Sci Am, 1965, 29: 602.

[28] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

[29] 卢琦, 等. 全球沙尘暴警世录[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.

[30] Renschler C S, Flanagan D C, et al. GeoWEPP–The Geo–spatial interface for the Water Erosion Prediction Project[C]. ASAE Conference Paper, 2002.

[31] 钱正英. 全国贯彻执行《水土保持工作条例》, 为防治水土流失, 根本改变山区面貌而奋斗[J]. 水土保持通报, 1982, 2(5) : 5– 13.

[32] 夏卫生. 具有中国特色的水土保持科学体系[J]. 水土保持通报, 1989, 9(4) : 30– 35.

[33] 黄秉维. 陕西黄土区土壤侵蚀的因素和方式[J]. 科学通报, 1953, (9) : 63– 75.

[34] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2) : 99– 116.

[35] 唐克丽. 神府– 东胜矿区一、二期工程环境效应考察专辑[J]. 水土保持研究, 1994, 1(4) : 18– 22.

[36] 李文银, 王治国, 蔡继清. 工矿区水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[37] 卞正富, 张国良, 胡喜宽. 矿区水土流失及其控制研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4) : 31– 36.

[38] 孙虎, 甘枝茂. 城市周边地区侵蚀景观特征分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4) : 37– 43.

[39] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训[J]. 科学通报, 1955, (12) : 15– 24.

[40] 辛树帜, 蒋德麒. 中国水土保持概论[M]. 北京: 农业出版社, 1982.

[41] 吴普特. 动力水蚀实验研究[M]. 西安: 科学技术出版社, 1997.

[42] 沙际德, 将允静. 试论初生态侵蚀性坡面薄层水流的基本特性[J]. 水土保持学报, 1995, 9(5) : 29– 35.

[43] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1981, (3) : 1– 9, (4) : 13– 18, 1982, (1) : 25– 30, (3) : 40– 44.

[44] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 黄土高原坡耕地细沟侵蚀的发生、发展及其防治途径[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1) : 36– 48.

[45] 张科利, 唐克丽. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2) : 59– 62.

[46] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000.

[47] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报, 1998, 40(2) : 200– 203.

[48] 唐克丽. 土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993. 第 17 集: 1– 10.

[49] 郑粉莉, 康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J]. 地理学报, 1998, 53(5) : 422– 428.

[50] 牟金泽. 雨滴速度计算公式[J]. 中国水土保持, 1983, (3) : 40– 41.

[51] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983, (3) : 32– 36.

[52] 周佩华, 窦葆璋, 孙清芳, 等. 降雨能量试验研究初报[J]. 水土保持通报, 1981, 1(1) : 51– 60.

[53] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. 地理学报, 1983, 39(4) : 416– 425.

[54] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀标准[J]. 水土保持通报, 1987, 7(1) : 38– 44.

[55] 王万中, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[56] 王万忠, 焦菊英, 等. 中国降雨侵蚀 R 值的计算与分布(II) [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1) : 29– 39.

- [57] 朱显谟. 论高原地区水土保持战略问题[J]. 水土保持通报, 1984, 4(1): 15– 18.
- [58] 朱显谟. 黄土高原土地的整治问题[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 1– 6.
- [59] 王佑民, 郭培才. 黄土高原土壤抗冲性的研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 11– 16.
- [60] 高维森, 王幼民. 土壤抗冲性研究综述[J]. 水土保持通报, 1992, 12(5): 59– 63.
- [61] 曹银真. 黄土地区梁坡的坡地特征与土壤侵蚀[J]. 地理研究, 1983, 2(3): 19– 29.
- [62] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵地区坡地的发育[J]. 地理集刊, 1976, 第 10 集: 35– 51.
- [63] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[J]. 中国水土保持, 1989, (8): 23– 24.
- [64] 牟金泽, 孟庆枚. 降雨侵蚀土壤流失方程的初步研究[J]. 中国水土保持, 1983, (6): 25– 27.
- [65] 范瑞瑜. 黄河中游地区小流域土壤流失量计算方程的研究[J]. 中国水土保持, 1985, (2): 12– 18.
- [66] 张宪奎, 许靖华, 邓育江, 等. 黑龙江省土壤侵蚀方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1– 9.
- [67] 黄炎和, 卢程隆, 付勤. 闽东南土壤流失预报研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(4): 13– 18.
- [68] 周伏建, 陈明华, 林福兴. 福建省土壤流失预报研究[J]. 水土保持通报, 1995, 9(1): 25– 30.
- [69] 江忠善, 王志强, 刘志. 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究[A]. 见: 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995. 207– 275.
- [70] 江忠善, 王志强, 刘志. 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 84– 97.
- [71] 林素兰, 黄毅, 聂振刚, 等. 辽北低山丘陵区坡耕地土壤流失方程的建立[J]. 土壤通报, 1997, 28(6): 261– 253.
- [72] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [73] 唐克丽, 王斌科, 郑粉莉. 黄土高原人类加速侵蚀与生态环境演变[J]. 人民黄河, 1994, 7(2): 13– 16.
- [74] 郑粉莉, 唐克丽, 等. 自然侵蚀和人为加速侵蚀与生态环境的演变[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 251– 259.
- [75] 郑粉莉, 等. 黄土高原人类活动与生态环境演变的研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1(5): 36– 42.
- [76] 景可, 陈永宗, 李凤新. 黄河泥沙与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [77] 史德明. 长江流域土壤侵蚀的特点及其潜在危险[J]. 中国水土保持, 1983, (3): 16– 18.
- [78] 史德明, 等. 三峡库周地区土壤侵蚀对库区泥沙来源的影响及其对策[A]. 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究文集[C]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [79] 向治安, 等. 长江泥沙输移特性分析[J]. 水文, 1993, (6): 8– 13.
- [80] 林承坤. 长江三峡与葛洲坝的泥沙及环境[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989.
- [81] 吴成基. 陕南河流泥沙输移比问题[J]. 地理科学, 1998, (1): 39– 44.
- [82] 张信宝. 长江上游水土流失治理的思考[J]. 水土保持科技情报, 1996, (4): 7– 9.
- [83] 牟金泽, 孟庆枚. 陕北部分中小流域输沙量计算[J]. 人民黄河, 1983, (4): 35– 37.
- [84] 江忠善, 宋文径. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算[A]. 见: 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 光华出版社, 1980. A3– 1– A3– 10.
- [85] 王孟楼, 张仁. 陕北岔巴沟流域次暴雨产沙模型的研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(11): 11– 18.
- [86] 尹国康, 陈钦彦. 黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式[J]. 地理学报, 1989, 44(1): 31– 45.
- [87] 王星宇. 黄土地区流域产沙数学模型[J]. 泥沙研究, 1987, (3): 55– 60.
- [88] 谢树楠, 王孟楼, 张仁. 黄河中游黄土沟壑区暴雨产沙模型的研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [89] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模拟[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108– 116.
- [90] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [91] 周佩华, 李银锄, 黄义端, 等. 2000 年中国水土流失趋势预测及其防治对策[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 第 7 集: 57– 71.
- [92] 胡良军, 李锐, 杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 169– 174.
- [93] 李矩章, 景可, 李凤新. 黄土高原多沙区侵蚀模型探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 46– 53.
- [94] 周佩华, 柴宗新, 刘万铨, 等. 黄土高原与长江上游地区水土流失变化趋势预测[A]. 见: 丁一汇. 中国西部环境演变评估[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 114– 139.
- [95] 张信宝. 黄土高原小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 法的研究[J]. 科学通报, 1989, (3): 210– 213.
- [96] 田均良, 周佩华, 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 23– 27.
- [97] 董光荣, 等. 中国北方半干旱和半湿润地区沙漠化的成因[J]. 第四纪研究, 1998, (2): 136– 144.
- [98] 朱震达. 中国沙漠化研究进展[J]. 中国沙漠, 1989, (1): 72– 78.
- [99] 王涛, 等. 中国沙漠科学的发展[J]. 中国沙漠, 1999, (4): 299– 311.