
试验研究

中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究

李锐^{1,2}

(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 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 国家重点基础研究发展计划(973)项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”针对国家对土壤侵蚀防治对策基础理论的迫切需求和国际学科前沿重大问题,选择东北黑土漫岗丘陵区、西北黄土高原区、南方红壤丘陵区 and 西南紫色土山丘区等 4 个主要水力侵蚀区,从侵蚀过程、侵蚀模型和侵蚀调控 3 个层面进行了系统研究。揭示了不同方式和不同尺度下土壤侵蚀发生发展的过程及其空间格局、影响因子和作用机制;构建了中国多尺度水蚀预报模型;提出了水土流失与水土保持的环境效应评价指标体系与方法;综合集成了适应自然生态过程和人类活动的水土流失调控范式。该项研究成果丰富和发展了具有中国特色的水土保持科学,为国家制定水土保持战略和规划提供了理论依据。

关键词: 水蚀; 侵蚀过程; 侵蚀模型; 侵蚀调控

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0001-06

中图分类号: S157.1

Research into Soil Erosion Processes and Control in Major Water Erosion Regions of China

LI Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The project, “Research into soil erosion processes and control in the major water erosion regions of China”, aims to address the urgent needs of China’s national strategy and scientific developments of soil and water conservation. Taking the 4 water erosion regions of northeast black soil, northwest loess, South China red soil and southwest purple soil as the main study areas, the research has concentrated on soil erosion process, modeling and control mechanisms. After more than 4 years research, the following have been achieved: revealing soil erosion development processes and spatial patterns, factors and mechanisms of different types at different scales; developing a Chinese multi-scale soil erosion prediction modeling system; developing methods of evaluation for impacts of soil erosion/conservation on environment, and integrating soil erosion control models to fit into the natural ecology and social economy in different regions. All of these achievements have enriched and developed soil and water conservation science, and provide a theoretical basis for the national soil and water conservation strategy and planning in China.

Keywords: water erosion; soil erosion process; soil erosion model; soil erosion control

水土流失是制约人类生存和社会可持续发展的重大环境问题,也是中国各种生态问题的集中反映。中国退化耕地的 1/3 是由水土流失造成的,水土流失不但造成土壤退化,土地生产力下降,还引起江河淤积,水体污染,洪涝灾害加剧,导致生态恶化和区域贫困。随着世界人口的增加,人类为了获取更多的食物资源,加大了对有限土地资源的利用程度与规模,加速了土壤侵蚀的发生,使土壤这一可再生资源在人类

社会发展过程中变为实际上的不可再生。揭示土壤侵蚀机理与过程,构建适用于中国的土壤侵蚀预报模型,提出水土流失与水土保持环境效应评价的理论与方法,综合集成不同区域的水土流失治理模式,对确保国家生态安全、粮食安全和经济可持续发展,推动水土保持科技创新和学科发展具有极其深远的意义。

2005—2007 年,水利部、中国科学院和中国工程院联合组织了“中国水土流失与生态安全综合科学考

察”,考察结果表明,中国水土流失的形势依然十分严重,还有许多科学问题迫切需要研究。为了适应这种需求,国家于 2007 年正式立项启动了国家重点基础研究发展计划(973)项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”。该项目由中国科学院和水利部牵头,组织了中国科学院水利部水土保持研究所,中国科学院南京土壤研究所,中国科学院地理科学与资源研究所,中国科学院生态环境研究中心,北京师范大学,北京大学,清华大学,华中农业大学,北京林业大学,以及黄河、长江流域相关研究单位等 10 多家科研院所和高等学校近百名水土保持与土壤侵蚀领域的优秀科学家,在东北黑土区、西北黄土区、南方红壤区、西南紫色土区等主要水力侵蚀区,依托国家和地方的野外台站和研究基地,进行了系统的土壤侵蚀观测和试验,对典型区实施了专题考察与定位监测,获得了大量的数据与资料,就土壤侵蚀过程、侵蚀模型与治理模式等理论和实践中的问题展开系统研究。通过 5 a 的努力,完成了既定任务,实现了预期目标,取得了一批具有创新性和应用价值的成果。

1 土壤侵蚀过程与机理研究取得了创新性进展^[1-10]

系统研究了不同类型区坡面土壤侵蚀发生和演变的过程及驱动机制,探讨了坡面—沟道—河流系统中坡面侵蚀产沙、沟道产沙、泥沙输移之间的内在联系,为建立不同尺度土壤侵蚀模型,预报江河泥沙动态变化提供了理论依据。

1.1 建立了坡面水沙二相流侵蚀动力学的理论描述方程和关键参数

基于对坡面降雨径流侵蚀输沙过程复杂边界条件的概化,以泥沙群体、水沙复合体的相互作用与土壤动力结构参数为切入点,提出径流分散、径流挟沙和径流输沙的物理表达式,实现了对坡面水沙二相流侵蚀动力学过程的理论描述。另一方面,通过大量模拟实验建立了输沙率与坡面流流态、水深、流速、阻力、水流剪切力、水流功率及单位水流功率间的定量关系,为建立基于过程的侵蚀预报模型奠定了理论基础。在较大坡度范围内定量描述了径流挟沙力与常用水动力学参数间的定量关系,改进了 WEPP 模型挟沙力方程,为建立适应中国国情的土壤侵蚀物理过程模型提供了科学依据。

1.2 揭示了黄土区土壤侵蚀形态发生演变过程

基于天然降雨下野外原型动态监测、实体模型的模拟降雨试验研究了沟蚀发育动态过程,成功地应用高精度 GPS 技术和三维激光扫描技术(LIDAR)动

态监测了沟蚀发育过程,确定了各侵蚀形态发生的临界阈值;完整模拟了自然坡面无人犁耕条件陡坡片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程,建立了试验条件下侵蚀形态演变过程的模拟模型,分析了沟蚀空间分布规律及其沟蚀的产沙贡献。本研究结果用于校正和丰富 RUSLE 模型和 Geo-WEPP 模型。

1.3 揭示了东北黑土区长坡面侵蚀的发生过程,估算了黑土侵蚀速率

基于模拟降雨试验,分析了次降雨条件下黑土区直形坡土壤侵蚀空间分布规律。在 5°和 50 mm/h 的小坡度和小降雨强度下,坡面以片蚀为主,坡面侵蚀量沿坡长表现出增加—减少—增加的变化规律。而降雨强度为 100 mm/h 时,坡面侵蚀量沿坡长表现出增加趋势,且坡长大于 110 m 时,侵蚀量增加趋势更加明显,为 50 mm/h 降雨强度下的 1.3~3.3 倍。当坡面出现沟蚀,侵蚀量急剧增加,尤其在坡长为 160~210 m 时侵蚀量增加更加明显。相同试验条件(5°和 50 mm/h)下,沟蚀量是片蚀量的 7.9~53.5 倍。当坡面以沟蚀为主时,坡度由 5°增加至 10°,侵蚀量增加 3.4~12.2 倍。

复合示踪元素¹³⁷Cs 和²¹⁰P_{bex}研究表明,直型坡耕地 50 和 100 a 坡面侵蚀速率分别为 3 054 和 2 794.7 t/(km²·a),即每年大约流失土层 0.24~0.26 cm。开垦后 54 a 的年均侵蚀速率为 3 771 t/(km²·a),几乎为开垦前的 17 倍。

1.4 揭示了细沟形成发育过程中的重力作用机理,建立了沟蚀发育过程模拟模型

国内外过去关于细沟发育的研究都不能合理地考虑重力侵蚀,因而也不能全面深刻地揭示细沟发育和发展的机理。事实上,细沟在具有一定坡度的坡面上发育的过程往往是通过溯源侵蚀来实现,而溯源侵蚀又在某种程度上通过重力侵蚀(如泻溜、崩滑或崩塌等)的形式推进。本研究提出的能够合理考虑重力侵蚀的细沟发育自组织模拟模型,恰当地考虑了重力侵蚀发生的随机性,开发了描述重力侵蚀特征的计算模块,通过与国内外不同作者研究的实验资料比较论证了不同坡度、不同雨强下模型的合理性。该模型不仅能够较好地模拟坡面降雨侵蚀过程和径流冲刷侵蚀过程,而且能够模拟降雨和径流共同存在时的坡面侵蚀过程和细沟发育过程。

1.5 揭示了不同类型切沟的发育过程及其对流域产沙贡献^[16]

切沟侵蚀虽早已为土壤侵蚀所关注,但受观测手段限制,进展缓慢。本研究追踪这一前沿,采用目前国际上先进的两大测量技术:高精度的测量型 GPS

(仪器测量精度为 1~2 cm)和示踪核素¹³⁷Cs 分析,分别从沟蚀发育和下游沉积角度研究切沟侵蚀及其对流域产沙的贡献。通过对选定的切沟每年 2 次重复测量,获取了切沟在不同季节形态变化的参数,由此区分出具有不同发育过程的切沟类型,总结了不同类型切沟的发育规律;构建了沟蚀预报的动力因子,对不同类型切沟侵蚀速率的预报进行了探讨。通过对研究区水库沉积物的¹³⁷Cs 含量、机械组成分布,以及沉积物层理变化分析,对比流域的¹³⁷Cs 含量与机械组成,确定了小流域内切沟侵蚀占流域土壤侵蚀总量的比例,估算了切沟在小流域尺度上的输沙率。

1.6 编制了全国水土流失评价单元图,发展了水文站数据推算区域侵蚀量的方法^[11-12,15]

分析了区域水土流失特点,采用 1:400 万水资源数据,90 m×90 m 和 30 m×30 m 分辨率 DEM 数据,参考 1:25 万水资源分区方案,划分了全国水土流失评价单元。全国共分为 10 个 1 级单元,80 个 2 级单元,436 个 3 级单元,为中国水土流失定量评价、动态监测打下了良好基础。

结合与侵蚀产沙和泥沙输移比相关的定性定量指标,发展了“层次类剔法”,利用水文观测站数据推算了区域水土流失量。系统研究了近代东北黑土区水土流失与环境演变进程,分析了西北黄土区环境演变与水沙关系,揭示了黄土高原不同土壤侵蚀类型区侵蚀产沙时空变化。分析中国水土流失的历史过程、典型地区水土流失动态,对中国主要水蚀区水土流失趋势进行了预测。

2 构建了适用于中国侵蚀环境的多尺度土壤侵蚀预报模型^[1-20]

基于中国土壤侵蚀发生发展过程与驱动机制的研究结果,提出了不同尺度土壤侵蚀因子评价指标和计算方法,明确了水沙在单元之间的相互传递关系,建立了坡面、小流域和区域尺度的土壤侵蚀模型,已被用于第一次全国水利普查中的土壤水土流失调查。

2.1 建立了中国坡面土壤侵蚀模型

利用模拟降雨实验,及全国主要水蚀区径流小区历史观测资料和水土保持措施研究成果,修正、完善并建立了适合中国国情的坡面土壤侵蚀预报模型(Chinese soil loss equation, CSLE)。发展和完善了适于中国降雨侵蚀力 R 的计算方法,利用我国陡坡小区资料,补充了陡坡情况下的地形因子计算公式;解决了土壤可蚀性因子 K 、生物措施因子 B 、工程措施因子 E 和耕作措施因子 T 的计算与取值问题,特别是修订了国际上土壤可蚀性因子的计算公式,实现

了用土壤理化性质资料精确计算土壤可蚀性因子值。为小流域分布式土壤侵蚀预报模型和区域土壤侵蚀预报模型提供了坡面流失量和单元流失量的计算基础。

2.2 开发了分布式流域水力侵蚀产沙模型^[6,8-10]

综合应用数据库技术、GIS 和 RS 技术,开发了一个具有较强物理机制的分布式流域水力侵蚀产沙模型。实现了降雨和水沙信息的自动观测及数据的传输和存储;深入研究了雨滴溅蚀的 5 个要素,提出了坡面流水深对溅蚀屏蔽作用的公式,改进了雨滴溅蚀模型;以水流功率作为坡面流输沙的主导因素,通过量纲分析得到了基于水流功率的坡面流挟沙力模型;开发了坡面侵蚀产沙模型,其子模型包括坡面雨滴溅蚀模型、坡面流挟沙力模型以及坡面流侵蚀产沙模型;按照流域水沙运动物理过程之间的联系,将坡面模型与沟道模型集成,构建了基于物理过程的分布式流域水力侵蚀产沙模型,其应用结果令人满意。

2.3 构建了区域土壤侵蚀模型

基于对坡面和小流域土壤侵蚀及其模型的理解,和对区域土壤侵蚀过程的认识,利用区域土壤侵蚀因子研究成果,划分研究单元,概化降水产流产沙过程,水沙物质汇集过程和水土流失治理过程,根据水文地貌学原理,在 GIS 空间分析功能支持下,完成单元间径流泥沙的产、汇、积的运算,构建了区域土壤侵蚀模型。可输出研究地区的土壤侵蚀图。区域土壤侵蚀模型开发一直受到应用部门的支持和重视,并先后在水利管理部门的支持下,将模型应用于土壤侵蚀普查试点,对陕西省延河流域和江西省赣南地区的土壤侵蚀定量评价,取得了良好的效果。

2.4 提出了区域水土流失因子的指标与算法

建立并完善了影响区域水土流失自然因子指标和计算(提取)方法,为进行区域水土流失评价及预测预报奠定了基础。

2.4.1 气候因子 建立了用不同时间尺度常规降雨资料估算降雨侵蚀力的方法,并对其进行误差评估。提出采用 GEV 广义极值分布计算不同重现期年降雨侵蚀力和次降雨侵蚀力,绘制了中国年降雨侵蚀力及 24 个半月降雨侵蚀力空间分布图,为全国各地估算侵蚀力提供依据。

2.4.2 植被因子 根据植物群落垂直结构特征及不同结构层次在水土保持作用方面的差异,提出结构化植被因子指数的概念和算法,解决了单纯投影盖度在估算水土保持效益时的误差问题,消除了植被建造中单纯追求覆盖率的误区,为水土保持效益评估,人工植被建造和规划等提供重要的科学依据。

2.4.3 地形因子 提出“侵蚀势能”概念,即用单位面积内等高线的长度与等高距、区域高差的乘积,来表征区域水土流失地形因子。建立了坡度、坡长在不同比例尺间的转换计算模型,解决了地形图分辨率减小对地形因子(坡度、坡长)的影响。

2.4.4 土壤因子 建立了基于能量意义的,适宜于区域尺度水土流失模型的土壤抗侵蚀指标,进一步完善和改进了土壤因子的定量表征与计算方法,生成了典型区和全国的水土流失土壤因子系列图与数据库。

这些阶段性的成果被国家第一次水利普查水土保持(土壤侵蚀)普查采用,对中国定期进行水土保持信息公报制度的顺利执行奠定了理论和基础,并提供了技术与方法。

3 提出了水土流失与水土保持的环境效应评价理论与指标体系,凝练了不同类型区水土流失综合治理范式^[21-35]

3.1 提出了水土流失及其治理的环境效应评价指标与方法

系统分析了地块、坡面、流域等不同尺度下垫面变化及空间格局变化引起的水沙演变特征,揭示了流域水土流失的尺度效应,辨析了水沙变化中人类活动的贡献率。黄土高原典型小流域综合治理的减沙效益分析结果表明,降雨变化因素造成流域输沙量减少的 30%,水土流失治理措施的作用约占 70%。基于超渗产流理论建立了描述流域降雨径流和侵蚀产沙物理过程的数学模型,用于评价水土流失及保持措施的水沙效应。林草植被盖度 30% 以上时水沙效应开始显著,植被盖度 40% 以上基本达到减水 50%~60%,减沙 80% 的稳定发挥效益阶段。分别从降雨—产流—产沙—养分输出过程链和 DPSIR 因果效应链角度,构建了水土保持环境效应评价框架,拟定了评价指标体系,并进行了实证研究。研究结果可直接服务于黄河治理的宏观决策,为黄土高原流域管理与黄河治沙,水资源配置及生态建设规划提供技术支撑。

3.2 发展了基于“双套对偶评价指标体系”的水保措施适宜性评价方法,丰富和完善了水土保持措施效益的评估体系

建立了 4 大水蚀区主要水土保持措施的系统诊断方法,提出了基于“双套对偶评价指标体系”的水保措施适宜性评价方法;提出了水土保持措施效益的评估理论、指标体系和评估方法;提出的小流域治理度和水保效益评价体系,为小流域水土流失综合治理评价提供了新的有效途径,可为国家有关部门制定技术

标准提供建议;构建的小流域水土保持措施效益评价指标体系,可以直接用于修正和改进相关国家标准,使其更适宜于流域尺度的水土保持效益评价。

3.3 提出了区域水土保持植被措施的定量评价方法,建立了南方林下水土流失区的判别标准

揭示了植被覆盖类型、秸秆覆盖和土壤前期含水量对地表产流产沙的影响,不同水土保持植被措施类型的 LAI 季节性演变规律,提出了以植被叶面积指数 LAI 替代植被覆盖度 VFC 定量表征植被水土保持功能的科学依据,克服了单纯利用植被覆盖度表征植被水土保持措施效益的缺陷,使得植被结构单一的林下水土流失状况得以更准确地揭示。

通过定量比较,发现在各种植被措施中,近地表植被覆盖对防治土壤侵蚀的效果最为显著,揭示了南方“林下流”发生的基本规律;建立了区域水土保持植被措施定量评价以及“林下流”的判别标准,克服了传统上只基于遥感数据没有地面数据支撑评价方法的局限性,提出了基于地面土壤流失观测数据和遥感数据的“林下流”区域鉴别方法,并采用植被恢复度判别南方水土保持的效益和功能。

3.4 凝练了不同类型区水土流失综合治理范式,构建了基于生态—水文—侵蚀过程的情景模拟工具,对不同治理范式情景下的生态、经济效益进行了分析

系统阐述了中国主要水蚀类型区水土流失的特点和面临的生态问题,在对研究区域 50 a 来水土流失治理的演变过程、土地利用变化及其驱动机制深入分析的基础上,总结了各主要水蚀类型区的水土流失综合调控范式。构建了能够定量模拟评价水土保持综合调控措施的生态效应和水土流失综合治理与生态经济协调发展情景分析工具,可以定量模拟评价水土保持综合调控措施的生态效应和经济效益,具备模拟流域过程空间详细变异的的优势,对流域治理措施的空间配置方面的详细设计具有重大意义。基于所构建的情景模拟分析工具,模拟了各种治理范式情景下流域的响应,实现不同治理范式情景下生态效益分析,可定量评价流域水土流失调控对策和治理的经济效益和环境效益,奠定流域综合治理方案的科学基础,可直接用于各类型区水土流失综合治理范式的定量评价和优化,服务于国家水土保持宏观战略决策。

4 取得了一些重要基础性研究成果

在项目执行过程中,始终把建立和完善中国土壤侵蚀基础研究体系和基础设施与观测体系建设作为主要目标之一。

4.1 补充和完善了室内、室外试验与观测基础设施,为建立全国土壤侵蚀野外观测试验体系奠定了基础^[16,21,26]

结合中国主要水蚀区水土流失的特征,在过去研究的基础上补充和完善了室内与野外试验与观测基础设施,在主要水蚀类型区修复和新建了土壤侵蚀实验观测小区,选择典型区修建和布设了定位观测小流域和观测、试验、研究样区,构建了较为完善的水土保持与土壤侵蚀野外观测、研究平台,提出了小区观测的技术标准与规范,为建立全国土壤侵蚀野外观测试验体系奠定了基础。

4.2 研发了一批土壤侵蚀基础研究的实验观测技术或设备,极大地提高了中国土壤侵蚀基础研究的技术水平^[11,16]

开发了一批具有自主知识产权的实验观测技术和设备,将三维激光扫描技术与可移动水土流失实验系统有机结合,实现了降雨侵蚀前后坡面地表微形态变化的精确、快速测量,为坡面侵蚀过程研究提供了新的技术手段。通过在不同类型区建设规格、标准统一的野外土壤侵蚀试验观测设施,为建立中国水土流失观测技术体系与监测系统提供了依据和方法。研制的野外人工模拟降雨机实现了土壤侵蚀研究方法的创新,该降雨机雨滴终点速度和动能与天然降雨类似,空间分布均匀,防风性强,侵蚀规律与天然降雨侵蚀规律相似,性能上达到了国际先进水平;降雨机、水电、径流小区等配套设施齐全,自成体系,独立运行,便捷实用,操作性强,居于国际领先水平。

4.3 构建了中国水土流失基础信息平台^[11]

建设中国水土流失基础信息平台,挖掘并集成历史科学研究积累,汇集该项目数据与成果,这是促进中国水土保持科学研究及生产实践可持续发展的重要基础,也是信息技术与水土保持学科相互融合,提升水土保持科学研究水平的重要途径。基于该项目数据汇交成果并集成已有研究积累,设计并初步建成了中国水土流失基础信息平台,该平台集成了土壤侵蚀水土保持试验观测与统计表格、调查制图和遥感图像等数据共 142 GB,编写了相应元数据文档,为土壤侵蚀水土保持科学研究数据共享奠定了基础。

4.4 编制了《中国土壤侵蚀地图集》^[11]

《中国土壤侵蚀地图集》(以下简称《图集》)以该项目的成果为基础,吸收和集成以往积累的资料,以图文并茂的形式系统反映中国土壤侵蚀的形成环境背景、空间分布格局、历史演变过程以及综合治理的研究成果。《图集》由三大部分构成,包括:(1)序图。显示全国的总体状况和影响土壤侵蚀的主要环境背

景;(2)土壤侵蚀影响因子。从气候、土壤、地形、植被和水土保持措施等方面,全面、宏观地反映中国土壤侵蚀的影响因子;(3)土壤侵蚀及其防治。包括全国土壤侵蚀的类型、强度与区域分布特征、全国土壤侵蚀的治理状况。《图集》将为中国的水土保持和生态建设宏观规划,水土保持土壤侵蚀及其相关学科的科研、教学和科学普及提供全面、翔实的基础资料,也将会促进中国土壤侵蚀与水土保持专题地图理论和技术体系的发展与完善。

4.5 凝聚了一支水土保持与土壤侵蚀基础研究队伍
该项目通过 5 a 的实施,凝聚了一批水土保持与土壤侵蚀领域年轻的学科带头人和学术骨干,培养了具有国际竞争力的中青年科学家,先后有 2 人入选中国科学院“百人计划”,多人入选省(部)人才计划,强化了现有的水土保持科学的研究队伍。有 1 人当选世界水土保持协会主席,极大地提高了中国在世界水土保持研究领域的地位。

致谢:本文是依据国家重点基础研究发展计划(简称 973)项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB407200)课题负责人中国科学院水利部水土保持研究所郑粉莉教授、北京大学倪晋仁教授、北京师范大学刘宝元教授、中国科学院水利部水土保持研究所刘国彬研究员、中国科学院南京土壤研究所史学正研究员、中国科学院地理科学与资源研究所蔡强国研究员等和项目其他骨干成员课题研究成果报告撰写的,并得到了项目办公室中国科学院水利部水土保持研究所上官周平研究员、杨勤科教授、张晓平研究员等的帮助,谨此一并致谢!另外,由于该项目尚处于结题总结阶段,加之本人水平有限,再加上文章篇幅的限制,难免会有一些表达不准确,取舍不当的现象,特表歉意!

[参 考 文 献]

- [1] 郑粉莉.《不同类型区土壤侵蚀过程与机理》结题总结报告[R]. 陕西 杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所, 2011.
- [2] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I transport capacity estimation; II Sediment feedback relationship[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1291-1304.
- [3] 王占礼,靳雪艳,马春艳,等.黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J].水土保持学报,2008,22(2): 24-28.
- [4] 郑粉莉,肖培青.黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙

- [M]. 北京:科学出版社,2009.
- [5] Liu Gang, Yang Mingyi, Warrington D N, et al. Using Beryllium-7 as a tracer to monitor the dynamics of inter-rill and rill erosion on cultivated slopes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010,36(4):439-448.
- [6] 倪晋仁.《流域侵蚀产沙机制与水沙运移规律》结题总结报告[R]. 北京:北京大学,2011.
- [7] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J]. *地理学报*,2007,62(11):1165-1173.
- [8] NI J R, LI X X, Brorthwick L A G. Soil Erosion Assessment based on minimum polygons in the Yellow River Basin [J]. *China Geomorphology*, 2008,93:233-252
- [9] 李勉,杨剑锋,侯建才,等.黄土丘陵区小流域侵蚀产沙空间分布特征研究[J]. *天津大学学报*,2008,41(S):237-241.
- [10] 李秀霞,李天宏,倪晋仁.黄河流域水蚀区土壤侵蚀空间尺度效应分析[J]. *地理科学进展*,2008,27(6):49-56.
- [11] 李锐.《区域水土流失过程与趋势分析》结题总结报告[R]. 陕西 杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所,2011.
- [12] 焦菊英,景可,李林育.应用输沙量推演流域侵蚀量的方法探讨[J]. *泥沙研究*,2008(4):1-7.
- [13] 杨勤科,李锐,刘咏梅.区域土壤侵蚀普查方法的初步讨论[J]. *中国水土保持科学*,2008,6(3):1-6.
- [14] 谢云,林小鹃,殷水清,等.中国次雨量特征及其区域分异[J]. *地理学报*,2009,64(3):323-330.
- [15] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in stream-flow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011,15:1-10.
- [16] 刘宝元.《多尺度土壤侵蚀预报模型》结题总结报告[R]. 北京:北京师范大学,2011.
- [17] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in northeast China[J]. *Science in China Series D:Earth Science*, 2009, 52(7):1005-1021.
- [18] Zhang Y G, Nearing M A, Zhang X C, et al. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010,384:97-106.
- [19] 符素华,刘宝元,路炳军,等.官厅水库上游水土保持措施的减水减沙效益[J]. *中国水土保持科学*,2009,7(2):18-23.
- [20] 姚志宏,杨勤科,吴喆,等.区域尺度侵蚀产沙估算方法研究[J]. *中国水土保持科学*,2007,5(4):13-17.
- [21] 刘国彬.《水土流失的环境效应评价理论与指标体系》结题总结报告[R]. 陕西 杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所,2011.
- [22] 许明祥,刘国彬,赵允格.黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J]. *应用生态学报*,2011,22(2):409-417.
- [23] 吕一河,刘国华,冯晓明.土壤水蚀的环境效应:影响因素、研究热点与评价指标的评述[J]. *生态与农村环境学报*,2011, 27(1):93-99.
- [24] 刘普灵,郑世清,琚彤军,等.黄土高原燕沟流域生态环境建设模式及效益研究[J]. *中国生态农业学报*,2007, 15(3):175-178.
- [25] 秦伟,朱清科,刘广全,等.北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. *水利学报*,2010,41(11):1325-1332.
- [26] 史学正.《水土保持措施作用机理和适宜性评价》结题总结报告[R]. 南京:中国科学院南京土壤研究所,2011.
- [27] Liang Y, Li D C, Su C L, et al. Soil erosion assessment in the red soil region of Southeast China using an integrated index[J]. *Soil Science*, 2009,17:574-581.
- [28] 刘刚才,张建辉,杜树汉,等.关于水土保持措施适宜性的评价方法[J]. *中国水土保持科学*,2009,7(1):108-111.
- [29] Shi X Z, Wang H J, Yu D S, et al. Potential for soil carbon sequestration of eroded areas in subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009,105(2):322-327.
- [30] 陈梓玄,李占斌,李鹏,等.陕北黄土高原县域水土保持治理适宜性评价[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*,2009,37(12):159-167.
- [31] 蔡强国.《水土流失综合调控原理与治理范式》结题总结报告[R]. 北京:中国科学院地理科学与资源所,2011.
- [32] Zhu A X, Liu F, Li B L, et al. Differentiation of soil conditions over flat areas using land surface feedback dynamic patterns extracted from MODIS[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010,155(3/4):166-174.
- [33] 陈攀攀,毕华兴,陈智汉,等.50年来黄土高原沟壑区典型小流域土地利用动态变化及其驱动力分析[J]. *中国水土保持科学*,2010,8(1):71-76.
- [34] 张森,查轩.红壤侵蚀退化地综合治理范式研究进展[J]. *亚热带水土保持*,2009,21(4):34-39.
- [35] He J J, Cai Q G, Wang Z K. Integrated erosion control measures and environmental effects in rocky mountainous areas in northern China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2010,25:294-303.