

区域土壤侵蚀定量研究的国内外进展

杨勤科¹, 李锐¹, 曹明明²

(¹ 中国科学院水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学水土保持研究所 陕西 杨陵 712100;
² 西北大学城市与资源学系 陕西 西安 710069)

摘要 由于水土保持宏观决策的需要、土壤侵蚀学科自身的进步和全球变化研究的促进, 过去的 10 多年来, 国内外研究者对区域尺度土壤侵蚀研究给予了高度重视。已经开展的主要研究包括: 全球和区域(包括国家尺度)土壤侵蚀调查、区域土壤侵蚀过程和尺度效应、区域土壤侵蚀因子和区域土壤侵蚀模型等。将区域土壤侵蚀作为现代陆地地表过程的一部分, 充分考虑全球变化的影响, 集成土壤侵蚀研究成果与遥感和 GIS 技术, 开发分布式区域土壤侵蚀模型, 成为区域土壤侵蚀定量评价研究的基本趋势。在对国内外区域土壤侵蚀定量评价研究评述的基础上, 提出我国近期在区域土壤侵蚀方面研究的重点问题为: 区域土壤侵蚀过程及其尺度效应的量化描述、区域土壤侵蚀模型开发、区域土壤侵蚀动态模拟与趋势预测、区域土壤侵蚀与全球变化关系研究和区域土壤侵蚀数据处理与管理方法。

关键词 区域土壤侵蚀; 侵蚀模型; 尺度; 遥感; 地理信息系统

中图分类号: S157.1 文献标识码: A

1 引言

土壤侵蚀的定量评价和预报研究, 长期以来是在坡面和小流域尺度进行的^[1-3]。为了全面认识土壤侵蚀的过程, 即“剥蚀—搬运—沉积”这一完整序列, 评价土壤侵蚀及其治理对环境的影响, 理解全球变化与区域土壤侵蚀关系, 自 20 世纪 90 年代以来, 国内外学者对区域尺度土壤侵蚀研究给予了高度重视, 有关国际研究计划和组织开展了一系列全球和区域尺度的土壤侵蚀调查和评价研究。如地中海荒漠化和土地利用研究(Mediterranean Desertification and Land Use, MEDALUS), 全球变化和陆地生态系统研究(Global Change and Terrestrial Ecosystems, GCTE) 欧洲科技协调委员会(European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research,

COST) 土壤侵蚀组, 国际土壤标本和土壤信息中心(International Soil Reference and Information Centre, ISRIC) 等^[4-7]。区域尺度土壤侵蚀研究是在较长的时段和较大的空间区域进行的, 研究方法更加依赖土壤侵蚀试验研究与 GIS 技术方法的集成, 研究成果能更直接地为水土保持宏观决策提供支持, 又与全球变化研究相联系, 所以区域土壤侵蚀研究已成为土壤侵蚀学科的前沿研究领域^[8-10]。本文在综述区域土壤侵蚀研究现状基础上, 提出了今后研究的重点问题。

2 国外的区域土壤侵蚀定量研究

国际上区域尺度土壤侵蚀研究可概括为 3 个方面, 包括: 全球和区域(包括国家尺度)土壤侵蚀调查, 土壤侵蚀时空过程和尺度效应, 区域土壤侵蚀模

收稿日期: 2006-03-20, 修回日期: 2006-07-25。

* 基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目“黄土高原水土保持的区域环境效应研究”(编号: KZCX3-SW-421), 黄委会治黄专项二级课题“区域水土流失模型试验研究”(编号: 2004SZ01-04)资助。

作者简介: 杨勤科(1962-), 男, 陕西陇县人, 研究员, 博士, 主要从事区域水土流失、遥感与 GIS 应用研究。
E-mail: gkyang@ms.iswc.ac.cn

型开发。

2.1 全球和区域尺度土壤侵蚀调查与评价制图

这方面的研究在遥感和 GIS 技术被广泛应用前是利用常规制图方法来完成的。早在 20 世纪 50 年代前苏联就完成了全苏土壤侵蚀图^[11]。20 世纪 70 年代末 ISRIC 进行了全球土地退化制图。对风力侵蚀、水力侵蚀、物理退化和化学退化等 4 种土地退化类型进行研究,编制了全球土地退化图,并提出全球土壤侵蚀面积为 $16.42 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[12, 23]。

20 世纪 90 年代以来研究者开始将 GIS 技术与土壤侵蚀模型结合,进行区域尺度土壤侵蚀评价^[14, 25]。Lu Hua^[26]以 RUSLE 为基础,利用较粗分辨率(或较小比例尺)数据,在 GIS 支持下完成了澳洲大陆片蚀、细沟侵蚀的定量评价和制图。Batjes^[27]、Reich^[28]和杨大文^[19]等利用 0.5 经度 \times 0.5 纬度网格的全球数据和 USLE (或 RUSLE)对全球尺度土壤侵蚀进行定量分析;进行土壤侵蚀调查制图的国家和地区还有法国、印度和欧盟等^[20-22]。这一方向的研究,主要关注了区域尺度土壤侵蚀宏观格局和发展趋势,但对区域土壤侵蚀的尺度效应较少注意。区域土壤侵蚀调查方面富有特色的是美国农业部的土壤侵蚀抽样调查方法。该方法基于统计学原理在全国布设样点,利用 USLE 计算样点土壤流失量,经统计得到全美各类土壤侵蚀面积。样点数量从 1975 年的 41 000 个发展到 1997 年的 800 000 个^[22, 24]。1977—1982 年每 5 年调查一次,2001 年后成为一个逐年调查的业务化运行系统,调查样点大约 200 000 个^[25]。如果没有完善的基础数据、侵蚀预报模型和训练有素的工作人员,该方法将较难推广。

2.2 土壤侵蚀的时空尺度特征与尺度效应

基于对区域和全球尺度土壤侵蚀调查和动态监测,研究者开始注意土壤侵蚀的时空尺度特征。GCTE 项目^[6, 26, 27]和 COST 有关研究计划的一系列研究表明^[4, 7],土壤侵蚀是一个与时空尺度相关的过程。该过程在空间上可以划分为 4 个尺度,包括微尺度、小区尺度、田间尺度、流域尺度^[24]。不同的尺度具有不同的主导性或者控制性过程^[4, 6, 28]。同时认为存在建立较大尺度(国家和全球)侵蚀模型的物理过程,通过辨识各种尺度下侵蚀过程和主控因子,可以使多种尺度模型之间建立联系^[4]。主要针对全球尺度土壤侵蚀定量评价研究,对尺度效应和尺度变换问题进行了探索^[29-31]。有关尺度问题的研究,在坡度因子的变换方面取得了较大进

展^[29],但对尺度效应原理认识不够,也还没有提出比较全面而实用的尺度转换方法。

2.3 区域土壤侵蚀模型开发的探索

GIS 技术方法的应用,极大的方便了土壤侵蚀研究中的数据管理^[3, 32],研究者开始开发基于遥感和 GIS 技术的区域土壤侵蚀模型。Kirby 等^[28]在地中海土地利用变化研究项目中提出的土壤侵蚀模型,以小流域($1 \sim 20 \text{ km}^2$)为基本单元,详细描述了土壤侵蚀和径流泥沙输移过程,该模型可用于尺度达 $5 000 \text{ km}^2$ 的流域。法国进行的另外一项研究,提出了一个基于 250 m 分辨率 DEM、水平衡和泥沙运移规律,定量评价土壤侵蚀危险性的模型。该模型已在法国土壤侵蚀危险性评价中应用,并认为有可能被推广到全球尺度(分辨率 1 000 m)^[33]。荷兰学者将土壤侵蚀过程概化为产流阶段和产沙阶段,基于土壤侵蚀过程和 GIS 技术方法,初步建立了一个区域土壤侵蚀模型。该模型可用来模拟区域尺度的土壤侵蚀过程,模拟结果以土壤侵蚀系列图方式输出^[5]。该研究对区域土壤侵蚀模型开发是一个有益的尝试。

2.4 主要研究进展与存在的问题

过去的 20 多年,国外在区域尺度土壤侵蚀研究方面取得的主要进展可概括为:

(1)利用常规方法、遥感和 GIS 方法,对国家和全球尺度土壤侵蚀进行了调查和动态分析,积累了一批数据。

(2)分析了土壤侵蚀的尺度特征,认为可以在多种空间尺度上开发具有物理基础的土壤侵蚀模型。

(3)认识鉴别各种尺度土壤侵蚀过程、主导因子及其相互作用方式是尺度转换的基础。

(4)考虑全球环境变化,基于土壤侵蚀过程和 GIS 技术,开发分布式区域土壤侵蚀模型,成为区域土壤侵蚀定量评价研究领域的基本发展趋势。

目前存在的问题主要包括:

(1)对区域尺度土壤侵蚀过程缺乏清晰明了的认识和理解,限制了区域土壤侵蚀定量评价研究。

(2)侵蚀模型与 GIS 结合,大多还只是一种松散式的结合,致使侵蚀模型和 GIS 的优势均不能得到充分发挥。

(3)现有对区域土壤侵蚀的调查评价结果,大多是一种潜在侵蚀能力的评价,对土壤侵蚀的治理较少考虑,评价结果较难验证。

3 国内区域土壤侵蚀定量评价研究

我国已有对区域土壤侵蚀研究概括为3个方面,一是国家和区域土壤侵蚀调查和制图研究;二是区域土壤侵蚀因子分析;三是区域土壤侵蚀定量评价。这三个方面同时也是区域土壤侵蚀研究的3个发展阶段。大尺度流域水文模型,将给区域土壤侵蚀模型研究以启示,也可以认为是区域土壤侵蚀模型研究的基础,下文也予以简要述评。

3.1 区域土壤侵蚀调查与制图

早在20世纪50年代末,就利用第一次黄土高原综合科学考察成果编制了黄土高原土壤侵蚀类型和分区图^[34,35]。20世纪60年代,利用已有土壤侵蚀调查资料编制了全国土壤侵蚀图^[36]并于90年代修编再版^[37]。根据水文观测数据编制了全国输沙模数图^[38]。20世纪80年代和90年代末期,水利部先后两次组织进行了全国土壤侵蚀遥感调查,基本查清并公告了全国土壤侵蚀基本状况^[39],分析认识了全国尺度的土壤侵蚀特征及其与环境条件关系^[40,41]。目前对于大区域(省区和大流域)土壤侵蚀调查,大多根据水利部技术规程,利用植被盖度和坡度等有限指标完成对土壤侵蚀强度等级评定^[42],对调查分析方法研究进展缓慢。

3.2 中国土壤侵蚀因子研究

为了认识理解中国土壤侵蚀与环境条件的关系,满足区域土壤侵蚀定量评价的需求,对影响区域土壤侵蚀的基本因子进行了比较系统的研究。

气候、水文因子:主要研究包括,利用气候数据计算并分析了全国范围内降雨侵蚀力的空间分布特征^[43,44]。用水文数据分析了黄土高原水沙时空变化和治理前后侵蚀产沙强度的时空变化特征^[45,46],利用大约200个水文站数据,根据径流和泥沙平衡方程,通过水沙汇集计算,编制了全国范围径流和输沙模数系列图并对我国的径流、输沙时空动态进行了系统分析^[47-49]。

土壤因子:国内学者从两个方面研究了影响区域土壤侵蚀的土壤因子。一是USLE的K因子值计算^[50]与制图^[51]。二是根据朱显谟^[52]将土壤抗侵蚀能力区分为抗蚀性和冲抗性两个方面的认识,黄义端^[53]系统研究了全国主要土壤和母质类型的抗冲特性,蒋定生^[54]、张爱国^[55]和雷俊山^[56]等先后对全国和黄土高原土壤抗冲性指标(包括土壤抗冲性系数、土壤稳渗速率、土壤崩解速率、原状土抗剪强度)进行实地测试和制图研究。

地形因子:已有的研究采用了两种方法来求取适用于区域尺度土壤侵蚀定量评价的地形指标。一是根据侵蚀地貌学理论拟订替代指标,间接表示坡度的陡缓,如地形起伏度^[57]。二是对基于中低分辨率DEM提取的坡度进行变换,以使其能更好的反映地形的起伏,包括对坡度图谱的变换^[58,59]和对坡度表面的变换。

植被因子:植被和水土保持措施是影响水土流失的最主要因子。已有研究主要是利用粗空间分辨率的遥感图像(NOVA AVHRR 1 000 m分辨率)结合全国土地利用图等数据,提取植被指数,用以支持区域土壤侵蚀评价^[60]。

区域尺度土壤侵蚀因子研究方面,应将已有关于各种侵蚀因子的研究成果与土壤侵蚀模型开发结合,支持区域土壤侵蚀综合定量分析,同时促进侵蚀因子的进一步研究。

3.3 区域水土流失定量评价

针对全国和省、区(大流域)范围内周期性土壤侵蚀普查的需要,展开了定性评价和定量模型开发两方面的研究。

定性评价应用最广泛的是水利部的土壤侵蚀分级分类标准^[42]。为了支持第二次全国土壤侵蚀遥感普查,研究提出了水土流失快速调查的方法^[61]。为了探索全国范围内土壤侵蚀定量评价方法,选用降雨侵蚀力,土壤抗冲性,地形起伏度为指标,在GIS支持下完成了全国潜在水土流失评价^[62]。黄土高原土壤侵蚀制图研究中,建立了变权模糊数学模型,完成了对土壤侵蚀的评价和制图^[63]。

区域尺度上的定量评价方面,周佩华的研究将中国划分为7个水土流失区,分区建立了统计模型,完成了各区域的水土流失趋势预测^[64]。该研究表明,在区域尺度定量预测水土流失是必要的也是可能的。卜兆宏等^[65]根据USLE的基本形式,通过实测方法取得适合我国的有关参数,开发了水土流失遥感定量快速监测方法,并在南方的福建、江西、江苏和北方的山东等地推广应用。傅伯杰^[66]利用USLE完成了中等流域(延河)土壤侵蚀评价。在黄土高原,利用统计方法建立区域土壤侵蚀模型。该模型可实现对每个单元土壤侵蚀模数的计算并借助GIS完成土壤侵蚀制图^[67]。根据对土壤侵蚀机理的认识,基于区域土壤侵蚀因子的研究,水文地貌关

杨勤科,贾大韦,李锐,等.中低分辨率坡度变换方法的初步研究.测绘学报,2006,投稿.

系正确的 DEM^[68] 和 GIS 空间分析功能的应用,对区域土壤侵蚀模型做出了新的尝试^[69-72]。随着研究深入,开始关注土壤侵蚀的尺度效应^[73,74],认为土壤侵蚀空间变异是尺度转换的基础,尺度变换则是利用一种尺度上获得的信息和知识来推测、认识另一种尺度上的侵蚀特征^[75]。研究者也建议了一些尺度转换的方法^[76,77]。但是总的来说,对尺度效应的表现、尺度效应发生机理认识还不够深刻,提出尺度变换方法尚需要完善才能实用。

3.4 大尺度流域水文模型研究

土壤侵蚀和径流产生与汇集,是一个同时发生的过程。因而大尺度流域(指大流域的支流,如黄河的延河流域)水文模型的研究对区域土壤侵蚀定量评价和模型开发,具有重要参考意义。近年来,考虑降水和径流过程时空变化,以 DEM 为基础,与 GIS 技术紧密结合的分布式水文模型得到了迅速发展^[78,79]并在黄河流域探索将坡面、小流域、区域、全流域 4 个层次模型整合成一个完整的流域整体模型^[80]。大尺度水文模型研究的成果,如单元径流量估算方法,可以直接应用于土壤侵蚀模型。

3.5 主要研究进展与存在的问题

经过近 50 年的研究,特别是最近 20 年以来的研究,我国学者对区域土壤侵蚀定量评价研究取得了 3 个方面的主要进展。

(1) 完成了一批全国和地区尺度上的土壤侵蚀调查和制图,对我国土壤侵蚀类型、格局做出了分析研究。

(2) 针对认识区域土壤侵蚀环境和建立土壤侵蚀模型的要求,对区域尺度上影响土壤侵蚀的多种因子进行了调查、制图和分析研究,积累了一批数据。

(3) 对区域土壤侵蚀模型的开发做出了初步但却富有意义的探索。

目前存在的问题主要表现在:

(1) 尽管水土保持行政主管部门对区域土壤侵蚀评价方法要求十分迫切,全球变化研究方面也对模型提出了要求,但学术界对于进行区域土壤侵蚀模型研究的必要性尚未形成共识或心存疑虑。

(2) 对于区域土壤侵蚀因子的研究,缺乏与综合评价方法(或模型)之间的协调。

(3) 区域土壤侵蚀模型的研究未与大尺度水文模型研究紧密结合,使后者的研究成果不能得到有效借鉴。

4 区域土壤侵蚀定量研究展望

基于对国内外区域土壤侵蚀研究的分析,同时注意到了相关学科,如大尺度水文模型研究的进展,笔者认为区域土壤侵蚀近期研究重点问题为:

(1) 区域土壤侵蚀过程:在多时空尺度现代地表过程的宏观构架中,分析研究区域土壤侵蚀发生发展过程,区域土壤侵蚀格局与时空分异,区域土壤侵蚀因子与评价,区域土壤侵蚀的尺度效应等,为区域土壤侵蚀模型开发奠定理论基础。

(2) 区域土壤侵蚀模型设计和开发:借鉴国外区域土壤侵蚀模型^[5,28,33]和大尺度水文模型研究成果^[78-80]。以中低分辨率 DEM 的栅格(100 ~1 000 m)为空间单元,在 GIS 平台下,选择合适时间单元,构建单元模型,利用 GIS 功能完成径流和泥沙物质的汇集计算,开发区域土壤侵蚀模型。

(3) 区域土壤侵蚀时空动态模拟与趋势预测:基于上述模型,或者选用现有模型,利用已有区域土壤侵蚀因子研究成果,充分发挥 GIS 空间分析能力,对区域尺度土壤侵蚀强度,以及土壤侵蚀治理对径流泥沙影响进行时空动态分析研究。

(4) 区域土壤侵蚀与全球变化关系研究:首先是分析全球或区域性气候变化对区域土壤侵蚀强度的影响,其次是分析水土流失治理和土地利用变化对区域土壤侵蚀影响,第三是土壤侵蚀及其治理对土壤有机碳影响。

(5) 数据处理与管理方法:针对区域水土流失研究的数据密集性特征,完善区域土壤侵蚀试验观测和研究方法,建立完善的水土保持基础信息设施,为整个土壤侵蚀和水土保持学科研究提供基础信息支撑。

参考文献(References):

- [1] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Rainfall Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. USDA Agriculture Handbook No 703, 1997.
- [2] Flanagan D C, Neering M A, Laflen J M, eds. USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation[M]. NSEERL Report No. 10, USDA - ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, 1995.
- [3] de Roo A P J, Wesseling C G, Ritsma C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107-1117.
- [4] Kirkby M J. 2001 From plot to continent: Reconciling fine and

- coarse scale erosion model [C]. Stott D E, Mohtar R H, Steinhart G C, eds. Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting. May 24-29, 1999, West Lafayette, IN. International Soil Conservation Organization in cooperation with the USDA and Purdue University, West Lafayette, IN. 2001. 860-870.
- [5] de Jong S M, Paracchini M L, Bertolo F, et al. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data [J]. *Catena* 1999, 37(3-4): 291-308.
- [6] Valentin C, Boardman J, Favis-Mortlock D, et al. The GCTE Soil Erosion Network [C]. Jiao Juren, ed. Proceedings 12th ISCO Conference. Tsinghua University Press, vol. II 2002, 299-305.
- [7] European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research. COST Action 623: Soil Erosion and Global Change [M/OL]. <http://www.soilerosion.net/cost623/wgroups.html>. 2002.
- [8] Li Rui, Yang Qinke, ed. Research on Rapid Survey and Management Information System of Regional Soil Erosion [M]. Zhengzhou: Press of Yellow River Water Conservancy, 2000. [李锐, 杨勤科主编 区域水土流失快速调查与管理信息系统研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.]
- [9] Leng Shuying, Peng Renguo, Li Rui, et al. Key research issues on the sciences of soil erosion and soil conservation in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2004, 18(1): 2-6, 26. [冷疏影, 冯仁国, 李锐, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题 [J]. *水土保持学报* 2004, 18(1): 2-6, 26.]
- [10] Wang Lixian, Zhang Youshi, Li Rui, et al. On key research domain of science and technology for soil and water conservation in China [J]. *Science of Soil and Water Conservation* 2005, 3(1): 1-6. [王礼先, 张有实, 李锐, 等. 关于我国水土保持科学技术的重点研究领域 [J]. *中国水土保持科学* 2005, 3(1): 1-6.]
- [11] Zachar. Soil Erosion. Developments in Soil Science 10 [M]. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [12] Oldem L R, Hakkeling R T A, Sombroek W G. World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation: An Explanatory note (2nd) [M]. Nairobi: ISRIC Wageningen & UNEP. 1991.
- [13] Oldem L R. The global extent of soil degradation [C]. Greenland D J, Szabolcs I, eds. Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB International, Wallingford, 1994, 99-118.
- [14] Blaszczyński J. Regional Soil Loss Prediction Utilizing the RUSLE/GIS Interface [C]. Geographic Information Systems (GIS) and Mapping-Practices and Standards. STP1126, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1992, 122-131.
- [15] Brazier R E, Rowan J S, Anthony S G, et al. "MIRSED" towards an MIR approach to modelling hillslope soil erosion at the national scale [J]. *Catena*, 2001, 42(1): 59-79.
- [16] Lu Hua, Galant J, Prosser I P, et al. Prediction of Sheet and Rill Erosion Over the Australian Continent, Incorporating Monthly Soil Loss Distribution [M]. Canberra: CSIRO Land and Water Technical Report 13/01, 2001.
- [17] Batjes N H. Global assessment of land vulnerability to water erosion on a one half degree by one half degree grid [J]. *Land Degradation & Development* 1996, 7(4): 353-365.
- [18] Reich P, Eswaran H, Beinroth F. Global dimensions of vulnerability to wind and water erosion [C]. Stott D E, Mohtar R H, Steinhart G C, eds. Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting. West Lafayette, IN, 2001.
- [19] Dawen Y, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes [J]. *Hydrological Processes* 2003, 17: 2 913-2 928.
- [20] Le Bissonnais Y, Montier C, Jamagne M, et al. Mapping erosion risk for cultivated soil in France [J]. *Catena* 2002, 46(2-3): 207-220.
- [21] Singh G, Babu R, Narain P, et al. Soil erosion rates in India [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 1992, 47(1): 97-99.
- [22] Gobin A, Govers G, Jones R, et al. Assessment and reporting on soil erosion [R]. European Environment Agency. Copenhagen, 2003.
- [23] Nusser S M, Goebel J J. The national resources inventory: A long-term multi-resource monitoring programme [J]. *Environmental and Ecological Statistics* 1997, 4: 181-204.
- [24] Nusser S M, Kienzier J M, Fuller W A. Geostatistical Estimation Data for the 1997 National Resources Inventory [M]. Washington DC: 1999.
- [25] USDA Natural Resources Conservation Service. National Resources Inventory 2002 Annual NRI [EB/OL]. <http://www.nrcs.usda.gov/technical/land/nri02/>, 2004.
- [26] Poesen J W, Boardman J, Wilcox B, et al. Water erosion monitoring and experimentation for global change studies [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 1996, 51(5): 386-390.
- [27] Kirkby M J, Ineson A G, Bergkamp G, et al. Scaling up processes and models from the field plot to the watershed and regional areas [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 1996, 51(5): 391-396.
- [28] Kirkby M J, Abrahart R, McMahon M D, et al. MEDALUS soil erosion models for global change [J]. *Geomorphology* 1998, 24(1): 35-49.
- [29] Xiaoyang Z. Comparison of Slope Estimates from low Resolution DEMs Scaling Issues and a Fractal Method for Their Solution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* 1999, 24: 763-769.
- [30] Xiaoyang Z, Drake N A, Wainwright J W. Scaling land-surface parameters for global scale soil erosion estimation [J]. *Water Resources Research* 2002, 38(9): 1 180-1 189.
- [31] King D, Fox D M, Daroussin J, et al. Upscaling a simple erosion model from small areas to a large region [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 1998, 50: 143-149.
- [32] Yang Qinke, Li Rui. LISEM: A single event, physically based soil erosion & hydrological model for drainage basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 1998, 18(4): 82-89. [杨勤科, 李锐. LISEM——一个基于GIS的土壤侵蚀预报模型 [J]. *水土保持通报* 1998, 18(4): 82-89.]

- [33] Kirkby M J, Bissonais Y L, Coulthard T J, et al. The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2000, 81 (2) : 125-136.
- [34] Editorial Committee of Soil Science and Soil Conservation. *Pedology & Soil and Water Conservation—Selected Theses of Academician Zhu Xiannuo* [M]. Xi'an: People Press of Shaanxi, 2005. [土壤学与水土保持编辑委员会. 土壤学与水土保持: 朱显谟院士论文选集 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 2005.]
- [35] Huang Bingwei. Experience and lesson of mapping soil erosion region in middle reaches of Yellow River [J]. *Bulletin of Science* 1955, (12) : 15-21 [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) : 15-21.]
- [36] Zhu Xiannuo. 1:15 000 000 Soil Erosion Map of China [C]. *Atlas of Physical Geography*. Beijing: Science Press, 1965. [朱显谟. 1:15 000 000 中国土壤侵蚀图 [C]. 中华人民共和国自然地图集. 北京: 科学出版社, 1965.]
- [37] Zhu Xiannuo, Chen Daishong, Yang Qinke. 1:15 000 000 Soil Erosion Map of China [C]. *Atlas of Physical Geography*. Beijing: Sinomaps Press, 1965. [朱显谟, 陈代中, 杨勤科. 1:15 000 000 中国土壤侵蚀图 [C]. 中华人民共和国自然地图集 (第二版). 北京: 中国地图出版社, 1965.]
- [38] Institute of Water Resources and Hydropower Research, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources and Electric Power. *Atlas of Hydrology of China* [M]. Beijing, 1963. [中国科学院, 水利电力部水利水电科学研究院水文研究所编. 北京: 中国水文图集 [M]. 1963.]
- [39] Ministry of Water Resources. *Bulletin of Soil Erosion of China* [M]. Beijing, 2002. [中华人民共和国水利部. 全国水土流失公告 [M]. 北京, 2002.]
- [40] Xu Feng, Guo Suoyan, Zhang Zengxiang. The distribution of soil erosion in China at the end of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica* 2003, 58 (1) : 139-146. [许峰, 郭素彦, 张增祥. 20 世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征 [J]. *地理学报* 2003, 58 (1) : 139-146.]
- [41] Yang Qinke. *Types and Regional Characteristics of Soil Erosion of China* [C]. *Recently Research of Soil Sciences*. Beijing, Chinese Agricultural Press, 1994. 21-35. [杨勤科等. 我国土壤侵蚀的主要类型与区域特征 [C]. *现代土壤学研究*. 北京: 中国农业出版社, 1994. 21-35.]
- [42] Ministry of Water Resources. *Standards for classification and gradation of soil erosion (SL 190—96)* [M]. Beijing: China Water Power Press, 1997. [中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准. 中华人民共和国行业标准 SL 190—96 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.]
- [43] Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Spatial Distribution of Rainfall Erosivity in China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21 (1) : 33-40. [章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征 [J]. *山地学报* 2003, 21 (1) : 33-40.]
- [44] Wang Wanzhong, Jiao Juying, He Xiaopin. Distribution of rainfall erosivity R value in China [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil Conservation* 1996, 2 (1) : 29-39. [王万忠, 焦菊英, 郝小品. 中国降雨侵蚀力 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.]
- [45] Liu Baoyuan, Tang Keji, Jiao Juying, et al. Temporal Variation and Spatial Distribution of Runoff and Sediment Yields in the Yellow River Basin [M]. Beijing: Science Press, 1993. [刘宝元, 唐克丽, 焦菊英, 等. 黄河水沙时空图谱 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [46] Wang Wanzhong, Jiao Juying. Temporal and spatial variation features of sediment yield intensity on loess plateau [J]. *Acta Geographica Sinica* 2002, 57 (2) : 210-217. [王万忠, 焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征 [J]. *地理学报*. 2002, 57 (2) : 210-217.]
- [47] Wei Hongbo, Ren Hongyu, Yang Qinke. Study on long term average sediment transport modulus of China [J]. *Journal of Sediment Research* 2003, 1 : 39-44. [韦红波, 任洪玉, 杨勤科. 中国多年平均输沙模数的研究 [J]. *泥沙研究*, 2003, 1 : 39-44.]
- [48] Ren Hongyu, Yang Qinke, Han Lin, et al. Construction and application of national spatial hydrology database on a hydrological polygons basis [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2003, 23 (3) : 55-59. [任洪玉, 杨勤科, 韩琳, 等. 全国水文计算单元空间数据库的建立与应用 [J]. *水土保持通报*, 2003, 23 (3) : 55-59.]
- [49] Ren Hongyu. Spatial-temporal Change of Runoff and Sediment Discharge of China [D]. Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2003. [任洪玉. 基于 GIS 的中国径流输沙时空动态变化研究 [D]. 陕西杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2003.]
- [50] Zheng Keji, Cai Yongming, Liu Baoyuan, et al. Fluctuation of soil erodibility due to rainfall intensity [J]. *Acta Geographica Sinica* 2001, 56 (6) : 673-681. [张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 土壤可蚀性动态变化规律研究 [J]. *地理学报*, 2001, 56 (6) : 673-681.]
- [51] Bo Zhachong, Li Quanying. Preliminary study on the method of soil erodibility value mapping [J]. *Rural Eco-Environment* 1995, 11 (1) : 5-9. [卜兆宏, 李全英. 土壤可蚀性 (K) 值图编制方法的初步研究 [J]. *农村生态环境 (学报)* 1995, 11 (1) : 5-9.]
- [52] Zhu Xiannuo. Types and factors of water erosion in loess plateau [C]. *Editorial committee of Soil Science and Soil Conservation*, ed. *Pedology & Soil and Water Conservation—Selected Theses of Academician Zhu Xiannuo*. Xi'an: People Press of Shaanxi, 2005 : 340-356. [朱显谟. 黄土高原土壤水蚀的主要类型及其有关因素 [C]. *土壤学与水土保持编辑委员会. 土壤学与水土保持: 朱显谟院士论文选集*. 西安: 陕西人民出版社, 2005. 350-356.]
- [53] Huang Yiduan. Research on anticourability of soils of China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation of China* 1980, (1) : 41-43. [黄义端. 我国几种主要地面物质抗侵蚀性能的初步研究 [J]. *中国水土保持* 1980, (1) : 41-43.]
- [54] Jiang Dingsheng. *Soil Erosion and Control Models in the Loess Plateau* [M]. Beijing: China Water-Power Press, 1997. [蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式 [M]. 北京: 中国水利水电

- 电出版社, 1997.]
- [55] Zhang Aiguo, Zhang Pingang, Yang Qinke. Research on Soil Parameters of Regional Soil Erosion [M]. Beijing, Geology Press 2003. [张爱国, 张平刚, 杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003.]
- [56] Lei Junshan. Study on Soil Anti-erodibility factors on the Loess Plateau based on GIS[D]. Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2004 [雷俊山. 基于GIS的区域土壤抗侵蚀性因子研究[D]. 陕西杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2004.]
- [57] Liu Xinhua, Yang Qinke, Li Rui. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2001, 21(1): 57-59. [刘新华, 杨勤科, 李锐. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中应用[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-59.]
- [58] Tang Guoan, Yang Qinke, Zhang Yong, et al. Research on accuracy of slope derived from DEMs of different map scales[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2001, 21(1): 53-56. [汤国安, 杨勤科, 张勇, 等. 不同比例尺DEM提取地面坡度的精度研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 53-56.]
- [59] Chen Yan, Qi Qingwen, Tang Guoan. Research on slope-conversion-atlas in Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid areas 2004, 22(3): 180-185. [陈燕, 齐清文, 汤国安. 黄土高原坡度转换图谱研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 180-185.]
- [60] Wei Hongbo, Li Rui, Yang Qinke. Research advances of vegetation effect on soil and water conservation in China[J]. Acta Phytocologica Sinica 2002, 26(4): 489-496. [韦红波, 李锐, 杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 489-496.]
- [61] Yang Qinke, Li Rui, Zhang Xiaoping, et al. Primary study on rapid survey of regional soil erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 1999, 19(3): 36-39. [杨勤科, 李锐, 张晓萍, 等. 区域水土流失快速调查研究初报[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 36-39.]
- [62] Ma Xiaowei, Yang Qinke, Liu Baoyuan. Assessment of China Potential Soil and Water Loss Based on GIS[J]. Journal of Soil and Water Conservation 2002, 16(4): 49-53. [马晓微, 杨勤科, 刘宝元. 基于GIS的中国潜在水土流失评价研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 49-53.]
- [63] Lu Jinfu. Survey and mapping of soil erosion types and intensity in the Loess Plateau Region[C]. Survey and Series Mapping of Natural Resources and Environment in the Loess Plateau Region by Using Remote Sensing. Beijing: Seismological Press, 1992: 68-109. [卢金发. 黄土高原地区侵蚀强度与侵蚀类型遥感调查与制图[C]. 黄土高原地区资源与环境遥感调查和系列制图研究. 北京: 地震出版社, 1992.]
- [64] Zhou Peihua. Trend prediction and strategy of soil erosion of China in 2000[J]. Memoirs of Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences 1988, 7: 57-71. [周佩华. 2000年中国水土流失趋势预测与防治对策[J]. 中国科学院水土保持研究所集刊, 1988, 7: 57-71.]
- [65] Bu Zhaohong, Tang Wanlong, Yang Linzhang, et al. The progress of quantitative remote sensing method for annual soil losses and its application in Taihu-lake catchments[J]. Acta Pedologica Sinica 2003, 40(1): 1-9. [卜兆宏, 唐万龙, 杨林章, 等. 水土流失定量遥感方法新进展及其在太湖流域的应用[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 1-9.]
- [66] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(1): 73-85.
- [67] Hu Liangjun, Li Rui, Yang Qinke. Region-scaled water erosion assessment based on GIS[J]. Acta Pedologica Sinica 2001, 38(2): 167-175. [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): 167-175.]
- [68] Yang Q K, Van Niel T G, McVicar T R, et al. Developing a digital elevation model using ANUDEM for the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau, China[R]. CSIRO Land and Water Technical Report 7/05. Canberra, Australia, 2005.
- [69] Yang Qinke, Li Rui, et al. Regional Evaluation of Soil Erosion by Water: A case Study in the Loess Plateau of China[C]. Jiao Juren, ed. Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing, Tsinghua University Press, 2002, 4: 143-149.
- [70] Xu Tao. A regional soil erosion model research Based on GIS[D]. Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2003. [徐涛. 基于GIS的区域水土流失模型研究[D]. 陕西杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2003.]
- [71] Yang Qinke, Li Rui, Xu Tao, et al. On the regional soil erosion processes and its quantitative description[J]. Subtropical Soil and Water Conservation 2006, accepted. [杨勤科, 李锐, 徐涛, 等. 区域水土流失过程及其定量描述的初步研究[J]. 亚热带水土保持研究, 2006, 接收.]
- [72] Yao Zhihong, Yang Qinke, Wu Zhe, et al. Study on a Computational Method of District Runoff. —Algorithm Design[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, accepted. [姚志宏, 杨勤科, 吴?, 等. 区域尺度降雨径流估算方法研究, ——算法设计[J]. 水土保持研究, 2006, 接收.]
- [73] Su Lihong, Li Xiaowen, Huang Yuxia. An Review on Scale in Remote Sensing[J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(4): 544-548. [苏理宏, 李小文, 黄裕霞. 遥感尺度问题研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 544-548.]
- [74] Zhao Wenwu, Fu Bojie, Chen Lidong. Some fundamental issues in scaling[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(6): 905-911. [赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 尺度推绎研究中的几点基本问题[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 905-911.]
- [75] Wang Fei, Li Rui, Yang Qinke, et al. Effect of Scale and its Mechanism in Soil and Water Loss Research[J]. Journal of Soil and Water Conservation 2003, 17(2): 167-169, 180. [王飞, 李锐, 杨勤科, 等. 水土流失研究中尺度效应及其机理分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 167-169, 180.]

- [76] Liu Jigen, Cai Qianguo, Fan Liangxin, et al. Methods of scale transfer in modeling of soil erosion and sediment yield in catchments[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004, (3): 69-74. [刘纪根, 蔡强国, 樊良新, 等. 流域侵蚀产沙模拟研究中的尺度转换方法[J]. *泥沙研究*, 2004, (3): 69-74.]
- [77] Ni Jupai, Wei Chadu, Xie Deti. Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2 061-2 067. [倪九派, 魏朝富, 谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 2 061-2 067.]
- [78] Liu Changming, Li Daofeng, Tian Ying, et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(5): 437-445. [刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 437-445.]
- [79] Liu Changmin, Xia Jun, Guo Shengjian, et al. Advances in distributed hydrological model in the Yellow river basin[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 495-500. [刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 495-500.]
- [80] Wang Guangqian, Liu Jiahong, Li Tiejian. Digital watershed model of Yellow River[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 14(2): 1 452-1 458. [王光谦, 刘家宏, 李铁键. 黄河数字流域模型[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(1): 1-8.]

Advances of Quantitative Assessment on Regional Soil Erosion

YANG Qin-ke¹, LI Rui¹, CAO Ming-ming²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. Northwest University, Xian 710069, China)

Abstract: Because of the increasing demands for soil and water conservation policy-making, progress in soil erosion science and increasing global change in recent years, research into the quantitative assessment and modeling of regional soil erosion has taken on great importance. Recent research outcomes include soil erosion surveys at global, regional and national scales; establishing processes and scale effects in regional soil erosion; extraction of factors underlying regional soil erosion and the development of regional soil erosion models. The trend in quantitative regional soil erosion research is to treat regional soil erosion as a component of general land surface processes and take into account the effects of global change on regional erosion. Successful outcomes have used integrated remote sensing and GIS technologies with distributed regional soil erosion models to produce quantitative evaluations of soil erosion characteristics at multiple scales. This paper discusses the state of current quantitative assessment of regional soil erosion and suggests that further intensive study is needed in (1) quantitative analysis of regional soil erosion processes using spatio-temporal scaling approaches, (2) development of distributed regional soil erosion models, (3) dynamic analysis and prediction of regional erosion, (4) the relationships between soil erosion and the effects of global change, and (5) establishment of information infrastructure for data processing and management.

Key words: Regional soil erosion; Erosion prediction model; Scale; Remote sensing; GIS.