

水土保持监测 理论与方法

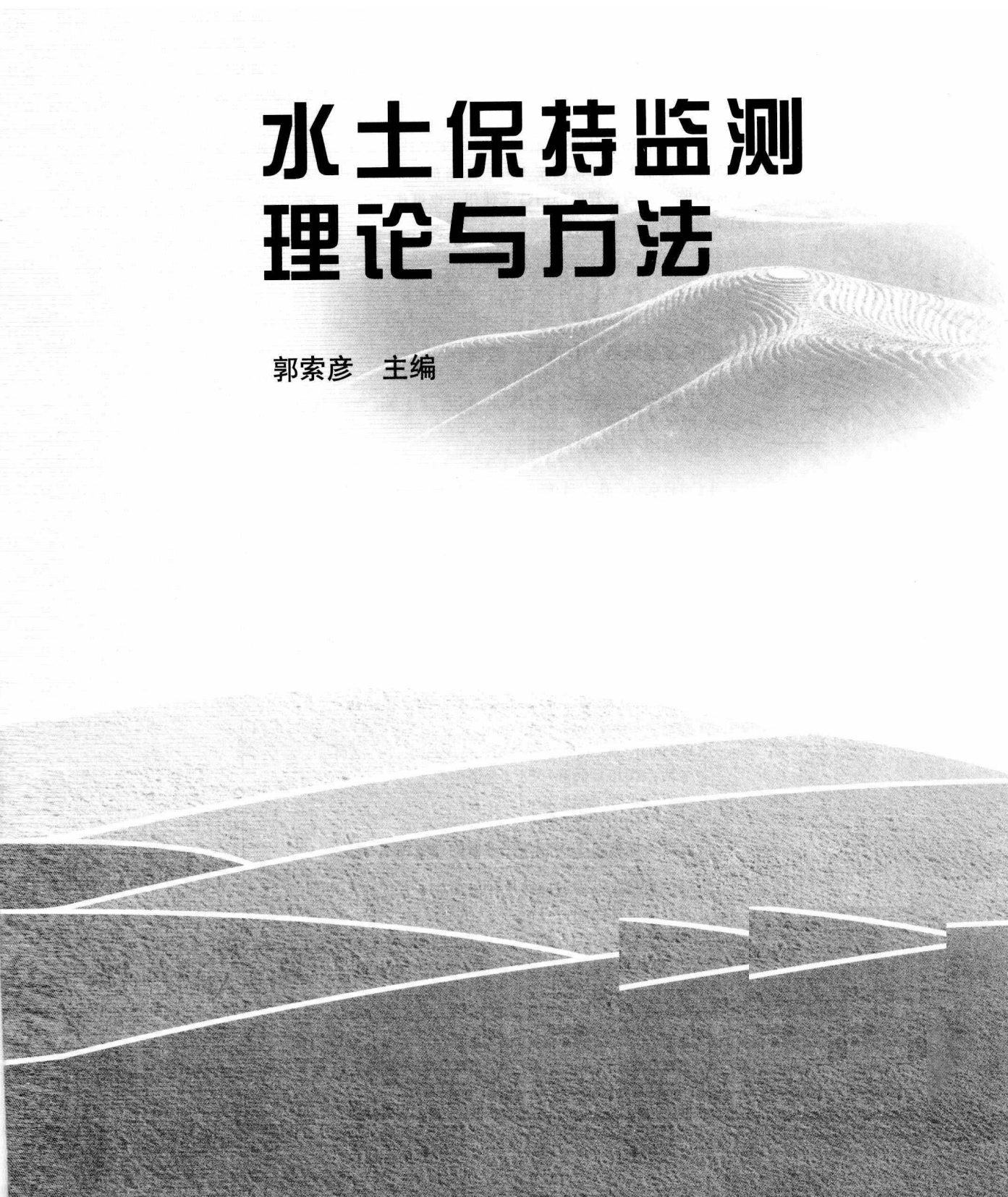
郭索彦 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水土保持监测 理论与方法

郭索彦 主编



内 容 提 要

本书系统总结了我国水土保持监测的理论和实践成果,介绍了国外水土保持监测的先进技术和方法,内容涵盖水土保持监测理论基础、监测网络体系、监测指标体系、监测技术与方法体系,包括水蚀、风蚀、冻融侵蚀等主要水土流失类型及其影响因素、流失状况及危害监测的理论和方法,涉及坡面径流小区、小流域和区域等不同的空间尺度,以及随着社会经济发展而发展起来的开发建设项目的水土保持监测。

本书章节结构符合我国水土保持监测实际,文字朴实易懂,计算公式简明准确,图表适宜扼要,是水土保持监测技术人员必备的工具书。可供各级水土保持、生态环境等方面的监测机构、管理部门参考使用,也可作为相关高等院校和研究所教学研究的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水土保持监测理论与方法 / 郭索彦主编. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2010.9
ISBN 978-7-5084-7945-3

I. ①水… II. ①郭… III. ①水土保持—监测 IV.
①S157

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第189011号

书 名	水土保持监测理论与方法
作 者	郭索彦 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 31.25印张 741千字
版 次	2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	78.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

由于特殊的自然地理环境和悠久的人类活动，我国发育了多种多样的水土流失，流失面积广、强度大，严重影响着国民经济建设和人民生存生活质量。加快水土流失防治，以水土资源的可持续利用促进社会经济的可持续发展，促进资源节约型、环境友好型社会建设，实现生态文明，对水土保持监测提出了新的更高要求。为了规范水土保持监测技术和方法，提高水土保持监测成果质量，我们编写了这本《水土保持监测理论与方法》。

本书系统总结了我国几十年来水土保持监测的理论和实践成果，介绍了国外水土保持监测的先进技术和方法，内容涵盖了水蚀、风蚀、冻融侵蚀等主要水土流失类型及其影响因素、流失状况与危害、水土保持措施及其成效的监测，以及监测技术管理等。其中，既有水土流失与水土保持的基本理论，也有各种指标监测和检验基本理论需要的技术和方法；既有传统的、成熟的原形监测技术和方法，也有近年理论和实践创新的新技术和新方法；既有小尺度的径流小区和试验场径流泥沙测验与数据处理方法，也有大尺度的区域水土流失分布、面积与强度评价方法。有些监测方法虽然正在探索、尚在讨论完善之中，也给出了现阶段主要成果、应用以及发展方向，尤其是遥感、地理信息系统、全球定位技术、信息自动获取与传输技术及其集成设施设备，使得水土保持监测变得快速而且准确，大大提高了监测的动态性、现势性，真正实现了水土保持监测的精确定位、精准定量。

本书在编写中，既考虑了理论的系统性，又兼顾了方法的实际操作运用；既有监测数据的采集，也有监测成果的汇总、交流与管理。力求结构层次清晰，文字通俗易懂，计算公式简明准确，图表适宜扼要。本书第一章由郭索彦、刘秉正、郑粉莉编写，第二章由郑粉莉、侯庆春、刘宝元编写，第三章由郭索彦、李智广、张光辉编写，第四章由刘秉正、李智广、张光辉编写，第五章由何兴照、喻权刚、郭索彦编写，第六章由杨勤科、刘宝元编写，第七章由严平、展秀丽编写，第八章由张平仓、刘晓路、刘纪根编写，第九章由郭索彦、刘宪春、李智广编写。全书由郭索彦、刘秉正统稿。

限于我们的实践范围、知识水平和思考深度，书中难免会有遗漏、不足和错误之处，诚望广大读者不吝指正。

作者

2010年6月30日

目 录

前言

第一章 绪论	1
第二章 水土保持监测理论基础	15
第一节 土壤侵蚀基本原理	15
第二节 土壤侵蚀分区	60
第三节 土壤侵蚀危害	85
第四节 水土保持基本理论	88
参考文献	114
第三章 水土保持监测体系	118
第一节 水土保持监测站网体系	118
第二节 水土保持监测尺度体系	128
第三节 水土保持监测内容体系	132
第四节 水土保持监测方法体系	147
第五节 水土保持监测数据管理体系	158
参考文献	170
第四章 坡面水土保持监测	171
第一节 坡面水土保持监测内容与方法	171
第二节 影响坡面水土流失因素监测	175
第三节 小区径流泥沙监测	197
第四节 坡面水土保持与效益监测	213
参考文献	225
第五章 小流域水土保持监测	227
第一节 小流域水土保持监测内容	227
第二节 水土保持综合调查	229
第三节 监测点布设	249
第四节 小流域径流观测	253
第五节 小流域泥沙观测	261
第六节 小流域污染物监测	269
第七节 黄土高原小流域坝系水土保持监测	276

参考文献	288
第六章 区域水土流失监测	289
第一节 区域水土流失监测方法概述	289
第二节 基于部颁标准的水土流失定性评价	293
第三节 基于 CSLE 水土流失定量评价	303
第四节 基于区域水土流失模型的水土流失定量评价	312
第五节 区域水土流失抽样调查方法	321
参考文献	333
第七章 风蚀监测	337
第一节 风蚀概况	337
第二节 风蚀机理	346
第三节 风蚀监测的内容与方法	355
第四节 风蚀预报模型	371
参考文献	376
第八章 重力侵蚀与冻融侵蚀监测	380
第一节 概述	380
第二节 滑坡监测	387
第三节 泥石流监测	407
第四节 泻溜、崩塌及崩岗监测	423
第五节 重力侵蚀边坡稳定性监测	429
第六节 冻融侵蚀监测	435
参考文献	443
第九章 开发建设项目水土保持监测	444
第一节 开发建设项目与水土流失	444
第二节 开发建设项目水土保持监测的发展形势及依据	453
第三节 开发建设项目水土保持监测范围及监测重点	458
第四节 开发建设项目水土保持监测分区与样点布局	463
第五节 开发建设项目水土保持监测点典型设计	469
第六节 开发建设项目水土保持监测指标与方法	474
参考文献	492

第一章 绪 论

水土保持 (water and soil conservation) 是由我国科技工作者首先提出并被世界各国科学技术界所接受的。在《中国大百科全书·农业卷》(1996) 中水土保持的定义为: 防治水土流失, 保护、改良与合理利用山丘区和风沙区水土资源, 维护和提高土地生产力, 以利于充分发挥水土资源的经济效益和社会效益, 建立良好生态环境的事业。水和土是人类赖以生存的基本物质, 是发展农业生产的基本因素。21 世纪是全球致力于经济和自然协调发展的重要时期, 为促进经济社会和人口的全面发展, 加强生态环境保护和建设, 水土保持生态环境建设已成为经济社会可持续发展的一项重要基础工程。随着我国以及全球人口的增加, 21 世纪中叶我国将面临水土资源匮乏的挑战, 保护和合理利用水土资源, 实现人口与社会协调发展, 是水土保持的主要目标。因此, 从全国到区域、从宏观到微观、从流域源头到大江大河, 按自然界固有的规律从时间、空间、工程顺序、措施配置等方面对水土保持作出综合决策, 并将水土保持科学和生态环境效益深入到国民心中, 查清水土流失现状、科学评估水土保持效益、发现工程建设对水土流失的影响关键因素, 为广民众提供水土保持生态服务, 是非常必要的。围绕这一目标, 从当前实际工作出发, 根据水土保持和监测技术发展趋势, 我们编写了《水土保持监测理论与方法》, 旨在系统总结以往经验、展望未来, 规范和提高水土保持监测水平, 更好地为社会服务。

一、监测目的

借助于一些科学仪器设备和方法监视、调查和测量事物的动态变化, 称为监测。通过水土流失监测摸清其类型、程度、强度与分布特征、危害及影响情况、发生发展规律、动态变化趋势, 对水土流失综合治理和生态环境建设宏观决策以及科学、合理、系统地布设水土保持各项措施具有重要意义; 通过治理监测认清在一定地理环境、地貌、土壤条件下不同的水土保持措施的布局 and 施工顺序, 以及蓄水保土、生态环境改善、经济产出等效益, 对同类地区治理规划设计具有理论指导意义; 通过开发建设项目水土保持监测, 分清开发建设前后水土流失状况、对地表土体干扰程度、水土保持治理情况, 为水土保持监督管理提供依据, 对准确执行法律政策具有现实意义; 通过定位实验观测并与其他各类监测相结合, 为水土保持科学研究、水土流失动态预报以及科学地制定有关法律法规和政策具有重要意义, 并为面向社会公众提供水土保持信息服务提供重要途径。因此, 我国从国家生态环境持续发展的高度, 以《中华人民共和国水土保持法》的形式, 规定了水土保持监测工作。

从水土保持工作不断发展的需求出发, 监测的主要目的概括为查清水土流失现状、科学评估水土保持效益、发现工程建设对水土流失的影响关键因素、为科学研究提供基础资料、为政府决策和监督执法提供依据、为广民众提供水土保持生态服务等几个方面。



(一) 查清水土流失现状

水土流失 (water and soil loss) 在《中国大百科全书·水利卷》(1992) 中定义为: 在水力、重力、风力等外营力作用下, 水土资源和土地生产力的破坏和损失, 包括土地表层侵蚀及水的损失, 亦称水土损失。土地表层侵蚀指在水力、风力、冻融、重力以及其他外营力作用下, 土壤、土壤母质及岩屑、松软岩层被破坏、剥蚀、转运和沉积的过程。水土流失的形式除雨滴溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀等典型的土壤侵蚀形式外, 还包括河岸侵蚀、山洪侵蚀、泥石流侵蚀以及滑坡等侵蚀形式。它包括自然因素引起的流失和人为因素引起的流失。

《中国大百科全书·水利卷》(1992) 对土壤侵蚀 (soil erosion) 的定义为: 土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力等外营力作用下, 被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程。土壤及其母质在外营力作用下产生位移的物质质量, 称土壤侵蚀量 (the amount of soil erosion)。单位面积单位时间内的土壤侵蚀量即土壤侵蚀速度 (the rate of soil erosion)。在特定时段内通过小流域出口某一观测断面的泥沙总量, 称为流域产沙量 (sediment yield)。

水土流失一词在我国早已被广泛使用, 土壤侵蚀一词为传入我国的外来词, 从广义理解常被用做水土流失的同一语。随着水土保持这一学科的逐渐发展和成熟, 尽管在教学和科研方面人们对两者的差异给予了重视, 而在生产习惯上人们常把水土流失和土壤侵蚀作为同一语来使用。

水土流失是资源破坏、生态恶化的症结, 需要查清水土流失的范围、程度、强度 (潜在危险性)、危害、流失量等水土流失现状, 用相对的指标回答水土流失动态变化问题。通常从以下几个方面进行。

1. 宏观尺度的水土流失现状

一般在 1:25 万~1:100 万比例尺下, 从宏观上掌握全国或大流域范围内水土流失发生的大致范围和侵蚀强度 (intensity of soil erosion), 或者从较长历史时期分析土壤侵蚀程度 (degree of soil erosion)。宏观尺度的水土流失监测主要掌握土壤侵蚀一级类型及其分布位置、大致面积、总体发展的趋势, 为国家级或大流域级水土保持战略决策、水土保持区划提供依据, 为国民经济发展中水资源、土地资源和人口布局的导向提供依据。

土壤侵蚀强度是指常用单位面积上在一定时间内土壤及其母质被侵蚀的重量。土壤侵蚀强度是根据土壤侵蚀的实际情况, 按微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈等分为不同级别。土壤侵蚀程度是指自侵蚀发生始, 到目前为止的发展状况, 以未侵蚀的土壤剖面各发生层被侵蚀的程度来表达。它包含允许土壤流失量与土壤侵蚀潜在危险性两方面的含义。

2. 中尺度水土流失现状

一般在 1:5 万~1:10 万比例尺下, 基本掌握大、中流域范围内, 水土流失发生的范围和侵蚀强度, 10~20 年的历史时期分析土壤侵蚀程度。中尺度的水土流失监测主要掌握土壤侵蚀亚类型及其分布位置、面积、发展趋势, 为流域或省级水土保持中期规划提供依据, 为水土保持生态建设项目提供可行性研究资料, 为大范围的开发建设项目水土保持方案或监测提供本底数据, 为国民经济发展规划提供基础资料。



3. 小尺度水土流失现状

在1:1万比例尺或更大比例尺下,较详细地掌握区域或中、小流域水土流失发生的范围和侵蚀强度,5~10年的时段内土壤侵蚀程度变化。小尺度的水土流失监测掌握土壤侵蚀类型及其准确分布位置、面积、发展阶段、水土流失危害等,对区县级水土保持可行性研究、为小流域治理初步设计的措施布局、小范围的开发建设项目水土保持提供基础资料。

4. 典型水土流失类型区(小流域尺度)水土流失现状

研究不同水土流失类型区水土流失规律,定位、定量观测在不同地形、土壤、地表覆盖、外营力特征等条件下的水土流失量,地表土壤的剥蚀程度、坡面细沟发育年度内发展变化趋势,泥沙迁移及化学物质随泥沙输移规律(面源污染),沙丘移动位移等,为水土保持措施设计、建设项目设计提供详细参数。

5. 指定断面水土流失量

摸清坡面向沟道、小流域向大流域以及上游向下游输沙量及沟道侵蚀规律,设置固定断面或随机制定断面,监测其不同时间范围或时刻的水土流失量,主要为河道及河流沿岸工程建设提供数据。

(二) 回答水土保持生态建设的状况和效益

水土流失综合防治是水土保持生态建设的主要任务,通过水土保持监测,能够准确获得建设项目实施进度、质量状况,成为项目验收的基础;评价不同措施配置对水土流失的防治效果(即传统的水土保持效益),可回答水土保持综合治理的措施配置和施工顺序等问题;分析宏观水土保持生态环境效益,为水土保持规划或可行性研究提供理论依据。

1. 水土保持生态工程实施状况

通过监测准确获得水土保持生态建设项目实施状况,包括各项治理措施的分布位置、数量、规格、质量、进度是否符合国家标准、行业标准或地方标准,是否与设计指标一致,是否按期完成。水土保持治理状况监测结果可以为建设项目监理、项目验收等提供基础依据。

2. 水土保持防治效果

水土流失综合防治效果,可利用地面监测、遥感监测、典型调查等方法,能获得治理前后不同措施布局及其数量、地表植被覆盖度等;分析实施这些措施后地表破坏减轻程度、拦蓄泥沙能力和蓄水能力变化、养分流失减少量、措施增加的直接经济产值等,用这些指标来阐明综合治理效果。通常用相似的未经过治理的小流域进行对比分析,或者用治理前后相同微区域观测值的变化来说明治理效果。

通过对水土保持耕作措施监测可以验证各种耕作管理方法,改变微地形带来的效果;通过对水土保持生物措施监测可以验证林草覆盖地表,改良土壤,控制水土流失的效果;通过水土保持工程措施监测可以验证各种工程措施控制水土流失的效果。用这些措施水土流失防治直接效果以及措施配置防治水土流失效果,为水土保持综合治理的措施配置和施工顺序提供依据。

3. 宏观水土保持生态环境效益

宏观水土保持生态环境效益是指区域水土流失治理后,对周边生态环境的影响或对下



游水沙输移、富营养物迁移的影响。可以利用流域—水系拓扑关系,采用空间分析的方法,从宏观尺度分析治理对生态环境的影响。分析水土保持生态环境效益,可以让我们从较大的视野看待水土保持治理效果,避免“站在治理区谈水土保持效益”的狭隘观点,为水土保持规划或可行性研究提供理论依据。

(三) 跟踪开发建设项目水土保持动态

开发建设项目水土保持监测主要目的包括以下内容:

及时掌握项目区水土流失发生的时段、强度和空间分布等情况,了解水土保持措施的防护效果,及时发现问题,以便采取相应的补救措施,确保各项水土保持措施能正常发挥作用,最大限度地减少水土流失。

为同类开发建设项目水土流失预测和制定防治措施体系提供借鉴。通过各类建设项目的实地监测,积累大量的实测资料,为确定水土流失预测模型、参数等提供服务。同时,对水土保持方案提出的防治措施进行实地检验、评价与总结,促进防治措施体系有针对性和实效性。

为水土保持监督管理提供数据资料。通过积累各类建设项目建设过程中的水土保持监测成果,可以分析总结不同建设时段中易发生水土流失的环节及空间分布,为监督检查和管理服务,提高管理水平。

促进水土保持方案的实施。通过地面监测、现场巡测、调查监测等手段,对新增水土流失的成因、数量、强度、影响范围和后果进行监测,了解水土保持方案的实施情况及效果。对水土保持措施没有实施到位的,通过监测督促其实施,并总结、改善和完善水土流失防治措施体系,以达到全面防治水土流失、改善当地生态环境的目的。

通过全过程的水土保持监测,评价项目建设过程中的施工准备、建设实施、生产运行等环节的水土流失防治效果,判别是否达到国家规定的防治标准和方案确定的防治目标,为项目的水土保持专项验收提供依据。

按项目性质,分为“建设类项目”和“生产类项目”,用水土流失总治理度、土壤流失控制比、拦渣率、扰动土地整治率、林草覆盖率、植被恢复系数等指标,评价施工建设期、试运行期、生产运行期的水土流失防治情况。

(四) 为政策法规制定和科学管理服务

从不同尺度和不同方面的水土保持监测,能够从宏观到微观获得不同区域空间水土保持真实情况,对支撑行政决策、政策法规制定提供依据;长系列的动态监测成果是科学研究和水土保持学科发展重要基础和条件,也为科学管理和规划及公众信息服务打下基础。

(五) 为社会公众提供水土保持生态服务

为社会公众提供水土保持生态服务是水土保持监测的新课题,也是水土保持发展的新途径之一。目前尚没有成熟的服务模式和内容,随着人们生态意识提高和提高生产效率的需求增加,这种服务需求会越来越多。举例来说,通过监测可以提供节约肥料的耕作措施、防止面源污染的种植措施、生态安全预报、水土保持法律相关的技术咨询等服务。

二、监测原则

水土保持监测及土壤侵蚀预测预报是为工农业生产、防灾减灾、科学研究,以及国家



发展宏观决策服务的，有很强的针对性。因而，水土保持监测要坚持科学性、系统性、实用性和持续性原则。

（一）科学性原则

水土流失的发生和发展既受自然因素影响，也受人为活动因素制约，水土保持生态建设的核心是保护和利用水土资源，防止侵蚀，改善生态环境，发展和提高生产力，从实际出发，配置各项水土保持措施。水土保持监测面对复杂的流失类型、方式和多种多样水土保持措施，必须用水土保持理论作科学分析，把侵蚀成因与侵蚀特点结合起来，把宏观特征与微观表现结合起来，科学选择监测方法，合理配置监测设施，及时而准确地实施监测，才能抓住关键，透过现象揭露本质，把握土壤侵蚀规律，掌握水土保持要领，实施针对性的综合治理。

坚持科学性原则即坚持理论与实践相统一原则、实事求是原则，要把对土壤侵蚀规律、影响因素、变化特征与危害的认识与监测项目的内容、监测过程及监测区域、方法统一起来；要把人为活动的方式、特点、区域分布和监测的范围、监测重点与监测的时间、空间调配统一起来；要把各项治理措施的规格、结构及配置与监测典型、监测时效与频次统一起来等，实施有效的、及时的、精确的监测，取得真实、可信的监测结果。

（二）系统性原则

水土保持监测包括影响水土流失因素监测、水土流失状况监测、水土流失灾害监测、水土保持措施及效益监测四个方面，无论对某一侵蚀类型和侵蚀方式，还是对坡面、小流域、区域的不同尺度，还是工程项目、重点治理，均应包含这四个方面的监测，组成完整的水土保持监测系统，才能回答诸如侵蚀类型、侵蚀强度、减沙机理、效益大小等问题，疏漏任何一个方面，都不能实现完整的监测目的。

水土保持监测是一项复杂的系统工程，国家已建立了水土保持监测网络体系，颁布了一套组织、管理法规、制度。这一体系既是水土保持监测数据采集、传递、整编、交流和发布的数据交换网络，又是一个可从公用数据网络及相关监测网络获取信息，并向社会各层次提供信息和开放的网络。因此，系统性原则不仅涉及监测的项目内容，还要满足监测网络体系中采集、传递、整编等要求，适应社会不同层次的需求。

（三）实用性原则

水土流失和水土保持措施监测成果，以及水土流失预测预报都是为土壤侵蚀防治、生产建设、水土资源可持续利用等服务的，因此监测的目标要明确，内容要完整，方法要实用，手段要能适应不同情况，以便能够取得满足需要的监测成果。

随着科学技术的进步，水土保持监测方法也有了新的发展，监测的内容和指标也在不断丰富和拓展，除了传统的监测方法、内容、指标外，还积极鼓励采用新技术、新方法，深化和发展水土保持科学。限于我国当前的技术经济条件以及区域间发展不平衡，应该选用可操作性强、容易实施、简捷实用的方法和运算灵活方便、指标容易获得的模型，这样能够快速推广、分析应用，推进水土保持监测的精度提高、水平提升。

（四）持续性原则

水土保持监测的对象随时随地都在变化，尤其侵蚀动力更是如此，变化复杂而幅度



大,被称为随机事件(现象)。对于随机事件的监测,只有通过长期的持续观测,才能透过现象抓住本质,获得规律性认识,这就是统计规律。从数理统计学原理出发,观测样本越大,样本标准差越小,总体误差越趋近于零,样本的特征值越接近总体真值。这个真值是我们认识事件的本质,因而,只有通过长时期的持续观测,积累资料,取得大样本,才能统计出基本规律,实现科学研究的重复性,除此之外,别无选择。

持续性原则还体现在监测典型(含区域、侵蚀事件)、监测指标基本保持不变、采用的监测方法和手段要保持延续性或不同方法之间具有可比性,尤其对比观测更应如此。这里强调了时间上的持续性,应用同一监测方法、手段开展长期监测,取得长序列资料;又强调了空间上的持续性,应用规范的统一方法,取得可以互相对比的观测资料。统计分析这些资料,可以掌握时空变化规律,满足社会不同层次的需要。

三、监测历程与发展

现代水土保持监测起始于18世纪末到19世纪初,历经100余年来的发展,至今已经形成了地面监测和遥感监测两类体系。随着科学技术的进步和社会发展的需求上升,水土保持监测正在向更广阔的领域和更深入的层次推进。

(一) 国外水土保持监测发展现状

1877~1895年,德国土壤学家沃伦(Ewald Wollny)建立第一个坡面径流小区(径流场),研究地形、土壤和植被对土壤侵蚀的影响,此后的几十年间在世界侵蚀严重的国家和地区迅速推广应用。其中前苏联提出了新的监测方法,欧洲各国在监测雪崩、滑坡、泥石流方面迈出了一大步,美国在20世纪五六十年代总结了径流小区观测成果,推出了通用土壤流失方程(USLE)和此后的修正方程及风蚀方程等。水土流失的监测研究,提高了人们对环境的认识,促成了1992年巴西里约热内卢“联合国环境与发展”会议的召开,水土保持监测也向环境与持续发展方向拓展。

基于全球气候和土地利用变化导致区域性土壤侵蚀加剧、工业化发展带来区域环境问题以及土壤侵蚀科学从坡面观测向地域尺度监测的转化,水土保持监测方法除了原有径流小区、小流域监测外,还出现了区域监测方法,主要有抽样调查法、网格估算法和遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术集成等。

1. 抽样调查法

抽样调查法是基于统计学原理,按照一定的原则在区域范围内抽取典型样区,采用定位监测的方法获取抽样单元内的土壤侵蚀状况,然后通过信息汇总(Aggregation)和尺度转换的方式获取区域尺度土壤侵蚀的整体信息。该法在美国获得成功。美国农业部自然资源保护局(NRCS)将全国划分为六个工作区,布设由监测点组成的监测系统,并派驻专职联络员,定期采集各项土壤侵蚀参数信息,然后利用通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)对土壤侵蚀强度进行定量计算,通过汇总统计分析,掌握全国土壤侵蚀及其治理信息。监测点数量由1975年的41000个发展到1997年的800000个,1977~1982年每5年汇总统计并公告一次,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200000个。



2. 网格估算法

网格估算法是将区域划分成一定大小的网格,采用土壤侵蚀模型计算网格内土壤流失量并进行汇总,该方法充分利用了RS和GIS技术,结合微观尺度模型和地面观测数据,实现区域尺度土壤侵蚀模拟与评价。欧洲环境保护局(EEA)自1992年起先后采用的多种方法均属此类。Hua Lu等基于RUSLE和GIS,集成时间序列的遥感影像、降水、土壤、地形等数据,完成了澳大利亚片蚀、细沟侵蚀的定量评价,编制了全澳逐月和年平均土壤侵蚀强度图。Batjes、Reich和杨大文等,利用 0.5° 经度 $\times 0.5^\circ$ 纬度网格的全球数据和USLE(或RUSLE)对全球尺度土壤侵蚀进行了定量分析。Vnader Knijm等于2000年初次采用这个方法对全球大陆的坡面侵蚀进行了定量的土壤侵蚀制图。

3. 遥感与GIS集成监测法

遥感技术为区域性、大范围的环境调查和监测提供了时间和空间上连续覆盖的信息源,GIS技术为空间数据的管理和分析提供了强有力的工具。基于土壤侵蚀过程机理,结合遥感和GIS技术,构建机理性的区域土壤侵蚀模型,逐渐发展成为土壤侵蚀定量研究的主要方向。

有代表性的是荷兰学者De Jong构建的地中海区域土壤侵蚀模型(EMMED),Brazier等提出的坡面土壤侵蚀速率定量评估与制图模型(MIRSED)等。模型与GIS完全集成并直接以遥感数据为数据源,基于土壤侵蚀物理过程,将土壤侵蚀过程概化为径流侵蚀和输沙过程,各个模块分别运算,结合区域土壤侵蚀定量评价。此外,欧洲以及澳大利亚、加拿大、新西兰、日本等国家,包括我国的台湾省,为了保护有限的水土资源,也利用卫星开展了多次土壤侵蚀监测,取得了显著的成效。遥感与GIS集成监测法逐渐成为全球的主流技术手段。

(二) 我国水土保持监测历程

我国水土保持监测起步较晚,基础薄弱,新中国成立后党和政府十分重视水土保持,水土保持监测发展很快,在监测技术、预测模型、网络建设、法律法规等方面取得瞩目成就。

1. 初期典型实验与调查

1922~1927年间,我国首次在山西沁源、宁武和山东青岛建立了首批径流小区,观测森林植被对水土流失的影响。嗣后,又在四川内江(1939年)、重庆北碚(1938年)、甘肃兰州(1941年)等地设置径流小区,观测坡度、坡长和耕作管理对水土流失的影响。1941~1942年,黄河水利委员会在甘肃天水、陕西长安荆峪沟设立水土保持实验区;1951~1952年又在甘肃西峰和陕西绥德建立水土保持科学试验站,此间陕西、山西、甘肃、宁夏、青海、海南等省区也建立了一批试验站,开始坡面水土流失规律观测和小流域径流、泥沙观测研究。

为开展全国水土保持工作,20世纪五六十年代由黄河水利委员会、中国科学院组织多次大规模水土保持综合调查,查清了黄河中游多沙粗沙区域情况,提出了我国土壤侵蚀类型、形式、强度及区划的基本理论和方法,划分了全国水土流失类型区及水土保持区划,为指导水土保持工作开展奠定初步基础。



2. 中期技术探索与发展

为适应水土保持发展的需要,长江、松辽、海河、淮河等流域先后设立水土保持研究所,中国科学院地理所和水保所在黄土高原建立实验基地,其中水保所茶坊村基地规模大、设施全,研究不同地形、植被、措施的流失规律,以及土壤养分、水分平衡和生物量等。“七五”、“八五”期间,国家组织大批力量开展“黄土高原区域综合治理”攻关项目、综合考察项目,对明确以小流域为单元,紧紧抓住改造利用坡耕地资源、有效控制水土流失、提高土地资源总体生产力,建立资源节约型农业体系,以及黄土高原综合治理方面应是强化生态建设、控制水土流失、建设各具特色的生态农业体系等均十分重要。此外,中国科学院等单位建立了宁夏中卫风沙实验站、云南泥石流监测站,以及长江上游滑坡监测站、中游崩岗监测站等,水土保持监测全面发展。

20世纪末,随着计算机技术的发展,遥感技术、地理信息系统、数据库等开始在我国水土保持中初步应用。中国科学院水保所开发出基于DOS系统的水土保持信息系统,北京林业大学在北京门头沟区建立了水土保持数据库,北京大学开发出北京市水土流失信息系统,并将GIS软件应用到水土保持制图中。水利部分别在1985年和1999年的两期全国土壤侵蚀普查中,以较高分辨率MSS和TM遥感影像为信息源,对水蚀、风蚀和冻融侵蚀开展了全面详查,查清了全国水土流失现状,划分出水蚀风蚀交错区,为国家“生态建设规划”和“生态保护规划”,以及明确黄河中游、长江上中游、珠江上游、东北黑土区为重点治理区域决策起了重要作用。

3. 近期法制建设与快速发展

1991年《中华人民共和国水土保持法》发布,1993年《中华人民共和国水土保持法实施条例》由国务院发布实施,明确了水土保持监测机构及任务。水利部依据水土保持法规要求,制定了一系列规章制度,加强监测工作的规范管理;建设了从中央到地方五级监测机构、技术标准、监测网络,并开始建立全国水土保持信息库。

截至目前,全国已建成水土保持监测点738个,其中,观测场40个、小流域控制站338个、坡面径流场316个、风蚀监测点31个、重力侵蚀监测点4个、混合侵蚀监测点5个、冻融侵蚀监测点4个。2004年以来,又开始创建水土保持科技示范园,已有北京市延庆县上辛庄等49条小流域综合试验区被水利部命名为“水利部水土保持科技示范园区”。

在水土保持法规的导向支持下,各管理职能部门科学规划、努力工作,这些监测站点和示范园区,在坡面和小流域的监测设备、技术方法都有了飞跃式发展和提升。数据的自动采集、测试分析、记录建库和网络传输已全面引入典型试验观测中,监测频率设计、水土流失过程记录、结果处理更科学、更可靠;包括降水、风速等侵蚀营力以及土地利用、植被分布与覆盖、坡长与坡度、坡面产流、沟道径流与泥沙等监测成果,以专题图、记录表、视频等多媒体方式管理和应用,在更大范围、更深层次为各行业服务;尤其科技示范园为土地利用结构优化、水土保持治理,以及实体模型建立等方面,树立了资源节约、生态和谐和效益良好的典型。

(三) 我国水土流失模型研究及遥感动态监测

区域水土流失研究从早期的调查研究到利用水文资料结合区域调查,走过了数十年,



但水土流失预报模型的研究,才是区域水土保持监测与水土流失环境危害和防治效益评价的核心。近 10 年来,我国在黄土高原长江中上游等地区开展了水土流失预测预报模型研究,并积累了丰富的经验,在区域水土流失制图、区域侵蚀因子研究和区域土壤侵蚀定量评价方面取得了较大进展。下面将其研究方法归类加以概述。

1. 地学综合统计法

地学综合统计法 (Geostatistic) 主要是通过地理综合的办法对区域进行分区或网格化,然后分析全部单元区或单元格的专题信息的区域统计规律,建立区域宏观统计模型,作为评价和获取区域宏观信息的依据。

周佩华等 (1988) 较早地应用区域宏观分区的方法,按自然和社会经济条件,将中国划分为东北漫岗丘陵区、黄土高原区、北方山地丘陵区、江南丘陵区、云贵高原及四川盆地、华南丘陵区 and 青藏高原等 7 个区,结合区域内有代表性的测站及其所控制流域内的相关资料,确定各类型区内主要的水土流失影响因子,分别建立河流年输沙量与各主要影响因子的统计模型,完成了各区域的水土流失趋势预测。模型的基本形式为

$$Y = a_1 M^{a_2} Q^{a_3} P^{a_4}$$

式中 Y ——河流年输沙量;

M ——一日最大洪水量;

Q ——年径流量;

P ——水土保持面积占流失面积百分数;

a_1, a_2, a_3, a_4 ——地区系数。

中国科学院水利部水土保持研究所自 1997 年来,着眼于国家水土保持宏观决策对于区域性水土流失数据的连续需求,对区域水土流失定量评价进行了系统研究。研究表明:区域范围内水土流失的宏观评价因子可用径流、地貌、植被、土壤、水土保持措施等 5 个因子表达。

胡良军 (2004) 将黄土高原划分为 3380 个基本评价单元,选择沟壑密度、汛期降雨量、大于 0.25mm 土壤水稳性团粒含量、植被覆盖度、坡耕地面积比等 5 项指标,集成 GIS 技术提取指标信息,通过回归分析获得了适合黄土高原水土流失评价的宏观定量数学模型,并完成了黄土高原土壤侵蚀的定量评价,评价模型为

$$L = 3.521P^{0.7887}S^{-0.09616}G^{1.9945}M^{0.01898}e^{-0.00144C}$$

式中 L ——侵蚀模数;

P ——汛期降雨量;

S ——大于 0.25mm 风干土水稳性团粒含量;

G ——沟壑密度;

M ——坡耕地面积比;

C ——植被覆盖度。

2. USLE 模型估算法

随着以 GIS 和 RS 技术为代表的现代空间信息技术的发展,USLE 的应用从坡面尺度扩展到流域尺度,甚至是区域尺度。USLE 在区域尺度土壤侵蚀定量研究中应用的实质是以 GIS 为支撑,将区域划分成规则的栅格单元,每个栅格单元对应于 USLE 的标准小区,



通过 USLE 对各栅格单元的土壤侵蚀进行定量计算,通过统计汇总实现区域土壤侵蚀状况的定量评价。

卜兆宏等(2003)根据 USLE 的基本形式,开发了水土流失遥感定量快速检测方法,该方法应用遥感数据提取 C 因子和 P 因子,并基于 GIS 技术以遥感图像像元计算单元建立了统计模型。在福建、江西、山东、太湖流域苏皖区等地推广应用。

杨艳生(1991)利用 USLE 的建模思想,将 USLE 中的坡面尺度指标引申为区域宏观指标,应用我国南方花岗岩侵蚀红壤区的径流小区资料和野外调查资料,确定各项基本流失因子,推导出花岗岩母质的赣南侵蚀红壤区和长江三峡区的土壤流失预测方程。

赣南山丘区 $A = 4YKLS$

$$Y = 5.459 - 0.472x_1 + 0.128x_2 + 1.715x_3 - 14.041x_4$$

长江三峡区 $A = 0.8351RKLSC^{-2.3}$

$$LS = 0.0023 \times 1.1h(1 - \cos\alpha)/\sin\alpha$$

式中 Y ——观测样区的坡面流失量;

x_1, x_2, x_3, x_4 ——降雨量、降雨强度、径流深度和径流系数;

A ——区域坡面流失量 $[t/(km^2 \cdot a)]$;

R ——降雨因子;

K ——土壤可蚀性因子;

LS ——地形因子;

C ——植被覆盖度;

α ——地面坡度;

h ——相对高差。

傅伯杰(2005)将 RUSLE 与 GIS 集成,完成了中等流域(延河)的土壤侵蚀定量评价。

近年来,考虑降水和径流过程时空变化,以 DEM 为基础,与 GIS 紧密结合的分布式水文模型得到迅速发展,并在黄河流域探索将坡面、小流域、区域、流域层次模型整合成一个完整的流域整体模型。将在第六章详细介绍。

3. 遥感定量调查法

遥感定量调查法是近年来随着遥感、GIS 技术的迅速发展而出现的土壤侵蚀定量调查方法,多是以坡面、小流域等微观尺度的土壤侵蚀定量估算模型(如 USLE 及其修正版的 RUSLE、MUSLE 的经验模型和物理模型)为基础,以遥感为基础信息源,以 GIS 技术为基本技术手段,获取区域尺度上的地形、土壤、植被、土地利用等土壤侵蚀影响因子等模型参数,逐像元进行土壤侵蚀的定量估算,从而实现小尺度模型在大区域内的应用。

刘宝元等(2001)利用抽样调查方法,取得抽样单元,用 GIS 技术获得每一单元影响水土流失因子值,计算出流失量(详见第六章)。

考虑全球环境变化,基于土壤侵蚀过程和遥感,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。通过对区域尺度土壤侵蚀的主要环境,包括降雨、地表径流产生、侵蚀产沙和沉积、径流泥沙汇集和运移等的定量描述,考虑并合理处理计算单元的不均性,即可开发区域水土流失模型。



(四) 水土流失监测发展趋势

三次全国水土流失遥感监测基本形成科学、实用的技术方法,积累了丰富经验,通过全面的卫星遥感手段,以地面监测为补充,形成智能化、准自动化水土流失监测技术体系,继而推进省、市、县各级水土流失快速监测,是我国未来的发展趋势。纵观国内外发展,水土保持监测应是一项集自动化、信息传输、网络通信、RS、GPS、GIS、管理信息系统等于一体的综合应用技术。我国由于条件限制,很难像发达国家那样在全国布置大量的地面观测站点,也难以直接应用微观监测数据来对宏观的水土流失态势进行评价和分析,因为宏观尺度上土壤侵蚀和水土流失的规律或特点的表现将可能与微观尺度存在明显区别。这就需要对地面监测成果与遥感快速监测成果耦合起来。值得庆幸的是,2008年多源多尺度遥感水土流失监测与数据中心建设项目方案已获国家发展和改革委员会批准,该项目的核心任务是联合国内外相关专家和基层单位,将遥感监测和地面监测的成果相互补充和耦合,按不同侵蚀类型区建立天地一体化水土流失监测模型,建立遥感监测时空数据库并持续更新,并开发水土流失自动化分析软件,实现水土流失监测信息全面共享,其成果将推动水土保持动态监测预报成为日常工作。

1. 监测上趋于自动数字化采集

(1) 自动监测逐步推广应用。自动监测在20世纪90年代多利用监测设备自动存储模块记录数据,人工定期将存储的数据下载到计算机中,利用配套软件进行存储和处理;进入21世纪,随着网络技术和移动通信技术的发展,多采用有线或无线传输的方式直接将设备数据传输到事先设计好的数据库中保存。自动监测的优点是数据获取速度快,节省人力,在发达地区或重点监测地区逐步成为主流。

(2) 高精度激光扫描法在快速定量监测中逐步应用。高精度激光扫描法,对同一区域按不同时段进行扫描获得地形相对高程点云数据(DEM),利用DEM体积计算原理分别计算不同时段地形的体积,利用体积差计算土壤侵蚀量;也可以通过数字地形模型(DTM)方法,提取坡面细毛沟,对不同时段细沟侵蚀进行分析。由于扫描范围较小,这种方法对开发建设项目水土流失监测比较有效,但无法对风蚀量、水蚀量进行分离。由于设备成本高尚未普及应用,随着激光测量技术快速发展,将会逐步得到推广。

(3) 近地摄影测量法在快速定量监测中逐步应用。近地摄影测量法,利用普通相机通过控制焦距,近距离垂直拍摄地面相对高程,利用数字摄影测量原理提取DEM,通过DEM分析坡面侵蚀沟。该方法对开发建设项目水土流失、沙丘位移、滑坡体、崩塌体监测比较有效。该方法目前处于试验阶段,由于设备成本低,与高精度激光扫描相比,不能监测短期内土壤侵蚀量;由于人工摄影范围有限,不宜用于大范围的土壤侵蚀监测。

2. 遥感与GIS集成监测法成为快速监测的核心手段

该方法集成了遥感和GIS(地理信息系统)的各自功能。利用遥感快速获得区域土壤侵蚀中的土地利用、植被覆盖度、工程措施三个因子。其中,植被覆盖度大多采用高光谱方式植被指数(NDVI),再通过植被指数与植被覆盖度关系曲线对植被覆盖度定标,利用不同遥感影像的定标值自动生成植被覆盖度图及其属性;工程措施一般通过高分辨率遥感进行解译得到工程措施的分布、数量,或者通过中等分辨率遥感解译的土地利用图间接获得工程措施因子;利用GIS的DTM模型在DEM计算坡度、坡长因子,利用气象站点