

Dynamic monitoring and data processing
of soil and water loss in runoff plots
and small catchments



径流小区和小流域 水土流失动态监测及 数据处理实务

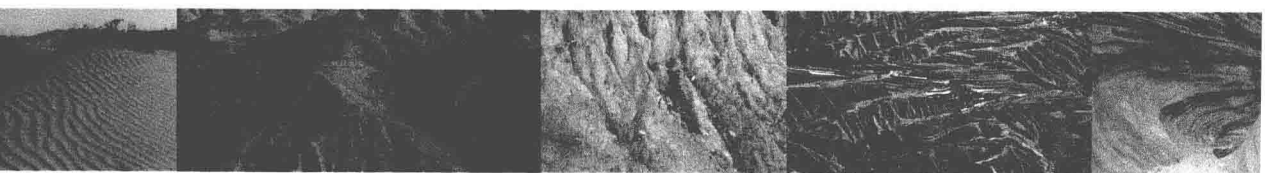
郭俊军 黄金权 李忠武 编著

湖南大学出版社

Dynamic monitoring and data processing
of soil and water loss in runoff plots
and small catchments

径流小区和小流域 水土流失动态监测及 数据处理实务

郭俊军 黄金权 李忠武 编著



湖南大学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了径流小区和小流域控制站从选址到监测的全过程,且对数据监测的日常工作、季度工作以及年度工作等作了详细说明;同时结合湖南省近年来水土流失监测的实际状况,在《径流小区和小流域控制站监测手册》表格的基础上,对监测数据的表格进一步简化,在此基础上介绍了 Excel 电子表格处理公式在水土保持监测数据计算方面的应用。

本书适用于水土保持监测站点工作人员日常使用,也适合作为水土保持部门对径流小区和小流域水土流失监测参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

径流小区和小流域水土流失动态监测及数据处理实务/郭俊军,黄金权,李忠武编著. —长沙:湖南大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-5667-1251-6

I. ①径… II. ①郭… ②黄… ③李… III. ①小流域—水土流失—监测—中国 IV. ①S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 326933 号

径流小区和小流域水土流失动态监测及数据处理实务

JINGLIU XIAOQU HE XIAOLIUYU SHUITU LIUSHI DONGTAI
JIANCE JI SHUJU CHULI SHIWU

作 者:郭俊军 黄金权 李忠武 编著

策划编辑:卢 宇

责任编辑:黄 旺 责任校对:全 健

印 装:虎彩印艺股份有限公司

开 本:787×1092 16 开 印张:9.5 字数:249 千

版 次:2017 年 1 月第 1 版 印次:2017 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5667-1251-6

定 价:35.00 元

出 版 人:雷 鸣

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山 邮 编:410082

电 话:0731-88822559(发行部),88821315(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

网 址:<http://www.hnupress.com>

电子邮箱:pressluy@hnu.edu.cn

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

前 言

本书在总结水利部水土保持监测中心 2014 年 10 月出版的《径流小区和小流域控制站监测手册》(以下简称《手册》)的基础上,增加了径流场和小流域控制站的选址、设计、施工及设备选型安装等内容,针对湖南省水土流失动态监测工作实际,简化监测数据表格,给出了 EXCEL 电子表格处理公式,以期为一线监测人员进行数据处理提供一整套操作性较强的、较全面的水土流失动态监测工作指南。

本书包括四个方面的内容,共十一章和一个附录,其中第一章和第二章为全书的总论,主要介绍水土流失动态监测的意义和目的、专业术语以及水土流失动态监测的基本情况;第三章至第六章为径流小区定位监测,主要介绍径流场建设、管护、监测内容与方法、数据处理与资料整编;第七章至第十章为小流域控制站定位监测,主要介绍小流域控制站建设、管护、监测内容与方法、数据处理与资料整编;第十一章为监测数据处理,主要介绍了 WPS 表格及表格公式与函数;附录部分列出了主要的监测数据处理表格。

在本书的编写过程中,引用了国内外相关文献及我国水力侵蚀区水土流失监测的部分研究成果,在此谨向文献作者和各级监测机构的管理与技术人员致以诚挚的谢意。

由于水土流失动态监测工作是不断完善和发展的,在理论与实践方面还需进一步研究探索,限于编者知识水平和实践经验,书中疏漏和不足之处在所难免,敬请各位专家、读者批评指正,以便在今后的工作中进一步完善。

编 者
2015 年 11 月

目次

第一章 绪论

1.1 水土流失动态监测的意义和目的	1
1.2 水土流失动态监测基本概念	2

第二章 水土流失动态监测概述

2.1 水土流失动态监测技术简介	6
2.2 坡面水土保持监测	6
2.3 小流域水土保持监测	8
2.4 区域水土保持监测	9

第三章 径流小区设计与施工

3.1 选址	12
3.2 径流场设计	13
3.3 径流小区设施施工	18

第四章 径流小区设备选型、安装与日常维护

4.1 降雨设备	21
4.2 全自动气象站	25
4.3 土壤水分测定仪	26
4.4 自动监测设备	26
4.5 全剖面采样器	27

第五章 径流小区日常观测和数据记录

5.1 主要工作	28
5.2 日常维护	32
5.3 植被覆盖和土壤水分监测	33
5.4 降雨观测与记录	35
5.5 径流泥沙观测记录	38
5.6 作物测产	40

第六章 径流小区数据处理与整编

6.1 整编目的	42
6.2 整编规则	42
6.3 整编时间与方式	42
6.4 整编内容	43

第七章 小流域控制站设计与施工

7.1 小流域监测及控制站选址..... 53

7.2 小流域控制站设计..... 55

第八章 小流域控制站设备选型、安装与日常维护

8.1 降雨观测设备..... 58

8.2 流量观测设备..... 58

8.3 泥沙观测设备..... 61

第九章 小流域控制站日常观测和数据记录

9.1 主要工作..... 63

9.2 日常维护..... 66

9.3 小流域野外调查..... 66

9.4 土壤水分..... 69

9.5 降雨观测与记录..... 70

9.6 径流泥沙观测..... 70

第十章 小流域控制站数据处理与整编

10.1 综合说明 80

10.2 小流域控制站监测整编表 80

第十一章 监测数据处理

11.1 WPS 表格简介 90

11.2 公式和函数 92

11.3 表格处理主要函数简介 95

附录 数据整编大纲

附表一 径流小区监测记录表..... 110

附表二 径流小区监测数据整编表..... 121

附表三 小流域控制站监测记录表..... 127

附表四 小流域控制站监测整编表..... 136

参考文献..... 143

第一章 绪 论

1.1 水土流失动态监测的意义和目的

1.1.1 水土流失动态监测意义

水土流失动态监测是指对水土流失发生、发展、危害及水土保持效益进行长期的调查、观测和分析,摸清其类型、程度、强度与分布特征、危害及其影响情况、发生发展规律、动态变化趋势,其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。

2011年3月1日,修订后的《中华人民共和国水土保持法》(以下简称《水土保持法》)正式颁布施行,这是我国水利法制建设的重要里程碑,对进一步依法保持水土资源、加快水土流失防治进程、改善生态环境、保障经济社会可持续发展,必将产生巨大的推动作用和深远的历史影响。《水土保持法》在全面总结多年来水土保持监测工作所取得的成绩,深入分析当前和今后监测工作所面临的形势和任务的基础上,明确提出了“县级以上人民政府水行政主管部门应当加强水土保持监测工作,发挥水土保持监测工作在政府决策、经济社会发展和社会公众服务中的作用”的新要求,为水土保持监测工作的全面、深入和可持续发展指明了方向。

扎实开展水土保持监测,及时、准确掌握水土流失动态变化及治理成效,定量分析和评价水土流失与资源、环境和经济社会发展的关系,水土流失与粮食安全、生态安全、国土安全、防洪安全、饮水安全的关系,水土流失与“三农”问题和新农村建设的关系,水土流失与贫困的关系,有利于各级政府科学制定各项经济社会战略发展规划,协调推进经济社会健康可持续发展,是贯彻十八大提出的“经济、政治、文化、社会 and 生态”五位一体的总布局的具体体现;有利于深入实施水土保持生态环境建设政府目标责任制,全面加强政府绩效管理与考核;有利于全面提高水土流失防灾减灾等国家应急管理能力,切实保障人民群众生命财产安全。

《水土保持法》第四十一条规定“对可能造成严重水土流失的大中型生产建设项目,生产建设单位应当自行或者委托具备水土保持监测资质的机构,对生产建设活动造成的水土流失进行监测,并将监测情况定期上报当地水行政主管部门”,通过开展水土保持监测,可以及时发现重大水土流失隐患和事件,确保应急措施及时到位,避免引起严重后果,造成重大的人民生命财产灾害和损失;同时通过实施对水土保持措施的成效监测,还可以调整和优化水土流失防治措施,促进人类与自然和谐。

水土保持监测是开展水土保持工作的重要基础和手段。通过开展水土保持监测,科学测算绿色 GDP,科学分析评估各项经济社会建设对水土流失及水土保持生态环境建设的影响,必将有助于处理好经济增长与生态环境保护之间的关系,促进经济结构调整和增长方式转

变，增加经济增长方式本身的可持续性，推动资源节约型、环境友好型社会建设，实现人与自然的和谐发展。同时通过开展水土保持监测，研发和生产监测设施设备，推广监测咨询与服务，必将有助于带动相关产业发展，培育新的经济增长点，增加人员就业，促进经济与社会和谐发展。

水土保持监测作为一项政府公益事业，为社会公众了解、参与水土保持环境建设提供了一条重要途径。通过水土保持监测，定期获取国家、省、市、县等不同层次的水土流失动态变化及其治理情况信息，建立信息发布服务体系，并予以定期公告，可以极大满足社会公众对水土保持生态环境发展状况的知情权，有效增强社会公众的生态环境保护意识；可以极大地强化社会公众对水土保持生态环境建设的参与权，有效加强水土保持工作和发展机制的创新；可以极大地提高社会公众对水土保持预防保护和综合治理的监督权，不断健全水土保持监督机制，有效推动水土保持事业健康、可持续发展。

1.1.2 水土流失动态监测目的

《水土保持法》第四十条规定“国务院水行政主管部门应当完善全国水土保持监测网络，对全国水土流失进行动态监测”。水土保持动态监测主要目的包括以下几个方面。

(1) 为政府科学决策提供及时、准确、有效的基础数据。《水土保持法》第四条第二款“国家在水土流失重点预防区和重点治理区，实行地方各级人民政府水土保持目标责任制和考核奖惩制度”。落实好责任制和奖惩制度，需要水土保持监测提供定量的、指标化的各项基础数据。

(2) 掌握区域水土流失动态。通过长期定点开展水土流失动态监测，及时掌握水土流失动态变化情况，从而提出加强水土流失的预防、保护、监督及管理的对策，为有效减少和遏制水土流失的发生和发展提供决策支持。

(3) 认识区域水土流失规律。通过水土流失动态监测，可以认识水土流失发生和发展规律及其对生态环境的影响效果，并为建立土壤侵蚀模型和准确预报区域土壤流失量提供数据基础。因此，长期、持续地定点监测并形成序列的监测整编成果是实现上述目标的基础。

(4) 评估区域水土流失防治成效。随着时代的进步及人民生活水平的提高，政府不断加大对水土保持的投入，人民群众对水土保持工作更加关注，越来越多的水土保持工程、生产建设项目、水土保持专项得到落实，取得了显著的社会、经济和生态效益。因此，通过水土流失动态监测可以对水土保持工程实施过程与结果给予准确评价，可以增强投入者和参与者的信心，为出台更加有效的相关政策提供动力，进一步推进水土流失防治工作更加科学化、规范化与高效化。

1.2 水土流失动态监测的基本概念

1.2.1 一般概念

径流小区 (runoff plot)：为定量监测水土流失量，在坡地上围起来的矩形小块地。一般由边埂、汇流槽、小区保护带、导流管和排水系统等组成，面积一般为 100 m²，用于作物管理措施、植被覆盖措施、轮作措施、动土措施及其他一些措施影响下的水土流失定位监测。

标准小区 (unit plot)：垂直投影长 20 m，宽 5 m，坡度 5°或 15°，坡面经中耕耙平后，纵横向平整，至少撂荒 1 年，无植被覆盖。标准小区建设以不破坏原始土壤剖面为首要原

则。为准确计算土壤可蚀性，给出以下用于计算的标准小区的定义，供分析计算时参考：垂直投影坡长 22.13 m，坡度 9%（约 5.14° ）；保持连续裸露休闲状态，耕作清除植物至少 2 年，或待作物残茬腐烂以后；春秋按传统方法耕作，即翻耕深度 15~20 cm，保持苗床状态；全年没有明显植物生长或结皮形成。因此，需要常年中耕锄草，植被盖度不大于 5%。该定义是为计算土壤可蚀性，对不同规格小区规定的计算标准，并非建设标准。

小流域 (small watershed)：面积不超过 50 km^2 的集水单元。

土壤侵蚀调查 (soil erosion survey)：也称水土流失调查，是指实地或借助地形图和遥感图像，查明土壤侵蚀类型、强度和分布规律的工作。

1.2.2 侵蚀

土壤侵蚀 (soil erosion)：在水力、风力、冻融、重力等自然营力和人类活动作用下，土壤或其他地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程。

土壤侵蚀量 (soil erosion amount)：土壤及其母质在侵蚀营力作用下，被分离和移动的总量，通常以 t 表示。

土壤流失量 (soil loss)：土壤被移出一个特定坡面或田块的数量，用 t 表示总量。径流小区观测的就是土壤流失量。

产沙量 (sediment yield)：被输送到一个特定点或断面的泥沙数量。用 t 表示总产沙量，用 t/km^2 表示产沙模数，常用于流域尺度。

泥沙输移比 (sediment delivery ratio)：在某一时段内，通过沟道或河流某一断面的泥沙总量（总产沙量）与该断面以上流域总侵蚀量的比值。

土壤侵蚀强度 (soil erosion intensity)：以单位面积和单位时段内产生的土壤流失量为指标划分的土壤侵蚀强弱等级，一般用侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 表示。

容许土壤流失量 (soil loss tolerance)：为保持土壤资源永续利用或维持可持续土地生产能力确定的土壤流失量上限，最小值往往是成土速率，或根据经济目的、环境目的确定的值。

含沙量 (sediment concentration)：单位体积水体所含泥沙的量，通常以 kg/m^3 表示。

输沙量 (sediment discharge)：一定时段内，通过河流某一断面的泥沙量。用 t 表示输沙总量，用 t/km^2 表示输沙模数。

土壤侵蚀预报模型 (soil erosion prediction model)：用于计算自然条件、土地利用和水土保持措施条件下土壤流失量的数学公式，或一系列公式组成的计算机模型。一般分为经验模型和物理模型。经验模型是基于大量试验观测数据，利用统计方法建立的模型。物理模型是基于土壤侵蚀理论，利用物质和能量守恒原理建立的模型。

1.2.3 降雨

降雨量 (rainfall amount)：某一时段内未经蒸发、渗透、流失的液态降水，在水平面上积累的厚度，单位为毫米 (mm)，一般保留一位小数。

降雨强度 (rainfall intensity)：单位时间内的降雨量，单位为 mm/h 或 mm/min 。不同部门划分的降雨强度标准不同。气象部门划分的标准：小雨：12 小时内雨量小于 5 mm，或 24 小时内雨量小于 10 mm；中雨：12 小时内雨量为 5~14.9 mm，或 24 小时内雨量为 10~24.9 mm；大雨：12 小时内雨量为 15~29.9 mm，或 24 小时内雨量为 25~49.9 mm；暴雨：12 小时内雨量为 30~69.9 mm，或 24 小时内雨量 50~99.9 mm；大暴雨：12 小时内雨量为 70~139.9 mm，或 24 小时内雨量为 100~249.9 mm；特大暴雨：12 小时内雨量等于或大于 140 mm，或 24 小时内雨量等于或大于 250 mm。水文部门多采用上述 24 小时雨量

标准。

降雨历时 (rainfall duration): 从降雨开始至降雨结束所经历的时间, 一般以 min, h 或 d 计。

次降雨 (rainfall event): 连续不断的一个降雨事件。由于降雨时断时续, 一天会发生多次降雨, 一般可将停歇间隔时间短的两次或多次降雨合为一次降雨。为了统计和计算方便, 如果降雨过程中停歇时间超过 6 小时, 则将停歇前后的降雨视为两个不同的降雨事件; 如果停歇时间小于或等于 6 小时, 则将停歇前后的降雨合并为一个降雨事件。

降雨动能 (rainfall energy): 一次降雨所有雨滴具有的总动能, 单位 MJ/hm^2 。

最大 30 min 雨强 (maximum 30 min rainfall intensity): 一次降雨的最大 30 min 时段雨强, 以记录时间间隔为滑动步长, 依次计算每个连续 30 min 的总雨量, 然后乘以 2 即为每个连续 30 min 的时段雨强, 其中的最大一个值即为该次降雨的最大 30 min 雨强 (I_{30}), 单位 mm/h 。

产流降水量 (rainfall amount induced runoff): 能够产生径流的一次降水的总量。

降雨侵蚀力 (rainfall erosivity): 降雨引起土壤侵蚀的潜在能力, 主要由雨滴降落速度、雨滴大小分布、降雨量、降雨强度和降雨动能等决定。目前多用一次降雨总动能 (E) 与该次降雨最大 30 min 雨强 (I_{30}) 的乘积 EI_{30} 表示, 单位 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

1.2.4 土壤

土壤类型 (soil classification): 根据土壤的属性、成土过程和成土因素之间的相似性特点, 对土壤进行系统的分类。

土壤剖面 (soil profile): 从地表垂直向下到母质的土壤断面。不同类型的土壤, 具有不同形态的土壤剖面。

土壤可蚀性 (soil erodibility), 土壤对侵蚀的敏感性。在不同的土壤侵蚀模型中用不同的指标表示。土壤侵蚀经验模型通用土壤流失方程中, 采用多年平均标准小区的单位降雨侵蚀力形成的土壤流失量表示。

土壤机械组成 (soil texture): 土壤是由大小不同的土粒按不同的比例组合而成, 各种粒级在土壤中所占的相对比例或者质量百分数, 称为土壤机械组成或土壤质地。

土壤有机质 (soil organic matter): 存在于土壤中所有含碳的有机质, 包括土壤中各种动、植物残体, 微生物体及其分解和合成的各种有机物质。

土壤结构 (soil structure): 土壤颗粒黏结和聚集成大小不一、形状各异、稳定性不同的团块, 轻轻敲打和挤压下破碎后形成不同的形状。常分为团粒、块状、棱柱状、柱状、片状及散粒状等。

土壤入渗能力 (soil permeability): 降水或者灌溉水由土壤表面进入土壤中的性能。主要指标有初始入渗率、累积入渗量、稳定入渗率和饱和导水率等。

土壤含水量 (soil water content): 土壤所含水分的数量, 以百分比表示。分为质量含水量和体积含水量, 质量含水量是水分质量占烘干土质量的百分比, 体积含水量是自然状态下单位容积土壤内所含水分体积的百分比。

土壤容重 (soil bulk density): 指单位体积原状土壤的质量, 常用 ρ_b 表示, 单位为 g/cm^3 。

土粒密度 (soil density): 指单位容积土壤固相颗粒的质量, 常用 ρ_s 表示, 单位为 g/cm^3 , 在数值上非常接近土壤比重。

土壤比重 (soil specific gravity)：是指单位体积土壤固相颗粒的风干土质量与同体积 4℃的纯水的质量之比，属于无量纲的指标。

1.2.5 地形

地貌 (landform)：地球表面各种形态的总称。地貌与地形有一定区别，前者强调整体形态特征，后者强调地表面高低起伏状态。一般按绝对高程将地貌类型划分为极高山、高山、中山、低山、丘陵和平原等六种（表 1-1）。

表 1-1 地貌形态类型划分表

地貌类型	极高山	高山	中山	低山	丘陵	平原
绝对高程/m	≥5 000	3 500~5 000	1 000~3 500	500~1 000	<500	<200

坡度 (slope steepness)：表示地表单元陡缓的程度，用地表单元所在斜面与水平面的夹角表示，单位符号为 “°”，或用垂直高度与水平距离的比值（坡比）表示，单位符号为 “%”（表 1-2）。

表 1-2 坡度分级表

7 级坡度	坡名	平坡	缓坡	中等坡	斜坡	陡坡	急坡	急陡坡
	坡度 (°)	<3	3~5	5~8	8~15	15~25	25~35	>35
6 级坡度	坡名		平缓坡	中等坡	斜坡	陡坡	急坡	急陡坡
	坡度 (°)		<5	5~8	8~15	15~25	25~35	>35

坡长 (slope length)：土壤侵蚀研究中，采用地表径流起点沿水流方向，到稳定渠道（如浅沟）或有明显沉积点的水平投影距离（表 1-3）。

表 1-3 坡长分级表

坡名	短坡	中长坡	长坡	超长坡
坡长/m	<20	20~50	50~100	>100

坡形 (slope shape)：按坡度是否变化划分为直形坡、凸形坡、凹形坡和复合形坡。沿水流方向从上到下坡度不变呈直线的是直形坡，坡度先陡后缓、中部向地心方向凹陷的是凹形坡；坡度先缓后陡、中部向天空方向凸起的是凸形坡；由它们组合形成 S 形坡等复合形坡。

坡向 (slope direction)：坡面的倾斜方向，即坡面法线在水平面的投影方向，或垂直于等高线，坡面由高指向低的方向，多用 8 个方位表示。

1.2.6 土地利用

土地利用类型 (land use classification)：人类使用土地的方式，如耕地、园地、林地、草地和居民点等。

郁闭度 (tree canopy cover)：乔木树枝垂直投影面积与林地面积的比值。

覆盖度 (grass/shrub/crop canopy cover)：一定面积内草、灌木、作物等地上部分垂直投影面积与该面积的比值。

地面盖度 (surface cover)：一定面积内枯枝落叶、苔藓、残茬、砾石等的覆盖面积与该面积的比值。

第二章 水土流失动态监测概述

2.1 水土流失动态监测技术简介

《中华人民共和国水土保持法》(2011)第二条规定“本法所称水土保持,是指对自然因素和人为活动造成水土流失所采取的预防和治理措施。”第四十二条规定“国务院水行政主管部门和省、自治区、直辖市人民政府水行政主管部门应当根据水土保持监测情况,定期对下列事项进行公告:(一)水土流失类型、面积、强度、分布状况和变化趋势;(二)水土流失造成的危害;(三)水土流失预防和治理情况。”

由此可知,水土流失动态监测就是运用多种手段和方法,对坡面、流域或区域的水土流失成因、数量、强度、影响范围、危害及其防治成效进行动态监测和评估,为水土保持预防监督、综合治理、生态修复和科学研究提供基础信息,为国家生态建设决策提供科学依据。监测方法是实现水土保持监测的有效手段,监测方法的合理选择是保证监测结果准确、可靠的前提。

根据水土流失动态监测的空间尺度,可以将监测方法划分为坡面水土保持监测方法、流域水土保持监测方法和区域水土保持监测方法三大类。

2.2 坡面水土保持监测

坡面(特别是坡耕地)是侵蚀泥沙的主要来源,对坡面水土流失的准确监测,是认识水土流失规律、建立坡面土壤侵蚀预报模型、坡面水土保持措施优化配置、坡面水土保持措施效益分析的基础。坡面水土保持监测方法主要有径流小区、核素示踪技术、插钎法、全球定位系统(GPS)、三维激光扫描法。目前全国水土流失动态监测与公告项目主要的坡面水土保持监测方法是径流小区法。

2.2.1 径流小区

坡面径流小区是坡面水土保持监测的传统方法,也是奠定土壤侵蚀作为独立学科的基础。早在1882—1883年间,被誉为“水土保持研究先驱”的德国土壤学家沃伦(Ewald-Wollny)首次建立了微型坡面径流小区,主要研究土壤物理特性、坡度、坡向和植被覆盖对土壤侵蚀的定量影响,同时也分析了上述因素对土壤入渗、土壤蒸发的潜在影响。20世纪上半叶,为了系统研究土壤侵蚀规律、防治日趋严重的水土流失,美国建立了大量的径流小区,并进行了多年的连续监测,监测结果为美国通用土壤流失预报方程(Universal Soil Loss Equation)的建立奠定了数据基础。20世纪四五十年代以后,径流小区已成为坡面水土流失发生、发展规律,土壤侵蚀机理及过程,土壤侵蚀预报模型等诸多科学研究及水土保持效益定量评价的主要技术手段,在全球范围内得到了广泛的应用。

1922—1927年,我国首次在山西沁源、宁武,山东青岛林场建立了径流小区,观测不同森林植被和植被破坏对水土流失的影响,开创了我国径流小区观测和水土流失定量化研究之先河。新中国成立后,国家对水土保持工作十分重视,分别于1951年和1952年建立了黄河水利委员会西峰和绥德水土保持科学实验站,与早期建站的天水站一起组成闻名全国的水土保持科学研究“三大支柱站”。各站先后建立了大量的坡面径流小区,开展坡面水土保持监测工作。1980年以来,湖南在衡阳县、湘乡市、邵东县、石门县、慈利县、永顺县、宁乡县等地相继建立了34个水土保持工作站和试验站,截至2015年6月,湖南省建成了标准径流小区144个,近5年连续开展监测的有91个,为湖南省水土保持公报及水土流失研究提供了大量的基础数据。

径流小区监测的项目可以分为基本监测项目和选择性监测项目两大类。径流小区基本监测项目包括降雨量、降雨强度、降雨历时、径流量、侵蚀量、降雨前后土壤水分状况。监测结果应按次降雨、日降雨、汛期及全年进行小区产流、产沙量的汇总和分析。同时应定期监测下垫面土壤性质及土地利用状况的变化,包括土壤入渗性能、抗冲性、作物或林草植被覆盖度、冠层截留量及根系的固土效益等。随着人们对环境质量重视程度的日益增长,水土流失引起的面源污染也应成为水土流失监测的重要内容。因此,在有条件的地区应定期监测径流和侵蚀泥沙中的N, P, K及有机质的含量,收集侵蚀泥沙样品,以供其他相关物理和化学测定;同时应对降雨后细沟和浅沟的侵蚀量进行测量和推算。

2.2.2 插钎法

插钎法是坡面水土保持监测的传统方法,具有悠久的历史。它的基本原理是在选定的具有代表性的监测坡面上,按照一定的间距将直径为5 mm的不锈钢钎子布设在整个坡面上,钎子上刻有刻度,一般以0为中心上下标出5 cm的刻度,最小刻度为1 mm。监测时将测钎垂直插入地表,保持0刻度与地面齐平,在监测期内监测测钎的读数,将本次读数与上次读数相减,差值为负则表明在监测期内发生了侵蚀,侵蚀强度可以用平均差值计算得到。当差值为正值时,说明监测坡面发生了泥沙沉积,沉积量的大小也可以通过平均差异计算得到。

虽然插钎法在很多水土保持监测中应用很广泛,但受其监测原理的限制,插钎法测定的误差很大,因为在很多地区由每次降雨或一段时间内的降雨侵蚀导致坡面高低的变化幅度比较小,所以很难用插钎法精确测定地面高低的变化过程,进而计算得到精确的侵蚀量。但由于该方法简单易行、操作方便,因此在生产实践中应用较为广泛,特别是在侵蚀比较强烈的工程建设项目的快速监测中应用更广。

2.2.3 核素示踪技术

核素示踪技术是通过比较没有发生侵蚀地块土壤中核素含量与侵蚀地块土壤核素含量的差异,进而利用核素流失量与侵蚀量间的定量关系,推求坡面水土流失量的技术方法。根据核素来源,可以将常用示踪核素分为人为放射性核素、天然放射性核素和宇宙射线产生的放射性核素三种。稳定性稀土元素经中子活化后也可以产生放射性,其中经中子活化分析后稳定稀土元素(REE),具有与土壤结合紧密、对动植物无害、与水迁移能力弱及背景值低等示踪元素的基本特征,是十分理想的示踪元素。REE示踪技术于20世纪90年代初期在我国黄土高原开始使用,采用断面法、条带法和点状法在黄土高原100 m长的坡面上布设了7种不同的稀土元素,系统监测了黄土坡面土壤侵蚀垂直分带特征及侵蚀泥沙的来源。经过十多年的发展,REE示踪技术已经日渐成熟,可以用于坡面及小流域侵蚀规律、侵蚀泥沙来

源的监测。

2.2.4 全球定位系统 (GPS)

全球定位系统 (GPS) 可以用于坡面水土保持的监测,特别是对坡面切沟的长期定位监测。利用高精度 GPS 在坡面上进行水土保持监测,其作业速度快、精度高,测量不受恶劣天气的影响。目前使用比较多的是 Trimble 4700 双频差分 GPS,它的动态水平测量精度为 10 mm (误差百万分之一),垂直精度为 20 mm (误差百万分之一),主要设备包括基准站、移动站、基准站电台和手簿及 2 台双频 GPS 接收机 (1 台安装在基准站,1 台则安装在流动站)。

在实际监测中通常采用实时差分技术来监测坡面切沟的变化过程,对测量数据在 GIS (地理信息系统) 中进行相关处理,从而生成监测切沟的规则格网 DEM。通过对比分析不同时期切沟的 DEM,即可判断一定时期内切沟的变化动态,以此分析确定侵蚀情况。

2.2.5 三维激光扫描仪

三维激光扫描仪法是日前国际上先进的地面空间数据测量技术,它将传统的点测量扩展到面测量,可对复杂的地面特征进行扫描,形成地表的三维坐标数据,而每一个数据 (点) 都带有相应的 X, Y, Z 坐标数值,这些数据 (点) 集合起来形成的点云,就能构成物体表面的特征,经后续的计算机处理,可以进行多种分析和计算。

激光扫描仪产品大致可分为三代。第一代的主要功能是可以进行点测量,每次测量只能获得测量点的表面特征,其优点是精度高,缺点是速度慢。第二代产品的主要特点是可以进行线测量,通过一段 (一般为几厘米,激光线过长会发散) 有效的激光线照射物体表面,再通过传感器得到物体表面数据信息。尽管其测量速度比第一代产品有了很大提高,但测量速度仍然较慢,测量面积不大。第三代产品的主要特点是可以进行面扫描,其最具代表性的产品即为三维扫描仪,该设备可通过一组 (一面光) 光栅的位移,再同时经过传感器而采集到物体表面的数据信息,具有测量速度快、测量面积大等优点。

与 GPS 监测坡面水土保持类似,用三维激光扫描仪监测坡面水土流失,也需要监测不同时期的坡面三维图像,通过比较不同时期坡面三维图像的差异,获得监测时间段内水土流失的平均状况。由于扫描空间尺度相对较小,因此目前多用于坡面径流小区尺度的监测。可用于次降雨的水土保持监测,也可用于水土保持季节变化及年际变化的动态监测。

2.3 小流域水土保持监测

小流域水土保持监测是水土保持监测的重要组成部分,可以弥补坡面监测无法反映土地利用变化对水土流失影响的缺陷,是小流域水土保持工程规划、生态环境建设的基础。目前,对于小流域水土保持的监测,主要有控制站监测和小流域侵蚀量调查两种方法。

2.3.1 小流域控制站

小流域由于面积小、汇流迅速,其径流泥沙变化幅度比较大,一般通过对建设在流域出口处控制站内次降雨的水位监测,获得小流域次降雨径流资料,在径流测量的同时采集水沙样,进一步分析得到含沙量,获得小流域次降雨泥沙资料。在次降雨径流泥沙资料的基础上,经过资料汇总分析,得到该流域逐月、逐年的径流泥沙资料。

小流域泥沙的测定可以分为采样法和自动监测法两类。根据取样的自动化程度不同,采样法也可以分为人工采样和自动采样两种方法。人工采样是在测定水位的同时,采集径流泥

沙样品，然后带回实验站，分析泥沙含量。具体步骤包括样品转移、泥沙沉淀、烘干、称重、含沙量计算等。

小流域泥沙的自动监测，目前应用比较多的是各种不同型号的浊度仪。浊度仪发出光线，使之穿过一段样品，并从与入射光呈 90°的方向上检测有多少光被水中的颗粒物所散射，这种散射光测量方法称作散射法。任何真正的浊度都必须按这种方式测量。浊度仪可以进行全天候的连续监测。受其测定原理的制约，浊度仪测定泥沙有一定的上限值，该值与仪器型号有关。当径流的含沙量不是很大时，可以优先考虑使用浊度仪测定泥沙。当含沙水流流过浊度仪时，泥沙可能会影响到浊度仪光线的发射，所以尽量选取自动清洗光线发射口的浊度仪。当选定浊度仪后可以和自记水位计仪器配合使用。

控制站是小流域径流泥沙监测的主要设施，需要一定的维护。径流里携带的泥沙可能会在流量堰前沉积，引起径流测定误差，因此在洪水过后应及时清理沉积的泥沙。径流中携带的树枝、枯枝落叶等杂物，可能会缠绕在流量堰前水位计的支撑架上，随着受力面积的增加，可能会冲毁水位计支撑架。当洪水较大时，洪水对流量堰护底工程的冲击力很大，可能会冲毁流量堰护底工程，从而对流量堰的安全构成威胁。因此，在大洪水过后，应仔细检查流量的护底工程，如果出现问题应及时处理，排除安全隐患。

2.3.2 小流域侵蚀量调查

小流域土壤侵蚀调查与径流泥沙监测，可以相互补充和验证，特别是对于没有径流泥沙监测的流域，调查成果对于小流域水土流失评价、水土保持措施的优化配置，具有重要的意义。在我国很多地区都修建有大大小小的水库和小塘坝，这些水库和塘坝的修建，为小流域土壤侵蚀调查提供了有利条件。

2.4 区域水土保持监测

区域水土保持监测是分析区域水土流失规律、评价区域水土保持效益、制定区域水土保持战略的基础，在水土保持监测体系中占有重要的地位。目前，国内外对于区域水土保持的监测，主要有遥感调查和抽样调查两种方法。

2.4.1 遥感调查

借用现代航天航空遥感技术，按照统一的方法和规范，在国家或区域水平上，对影响水土流失的主要因子、水土流失和水土保持及其效益进行的连续或定期监测，并对所取得的数据进行综合分析，以掌握国家或地区的水土流失及其防治动态和发展趋势，为国家和区域防治水土流失，保护、改良和合理利用水土资源，优化产业结构，改善生态环境条件，实现可持续发展提供决策依据。

国外特别是澳大利亚和欧洲，区域水土流失监测主要依靠遥感手段。澳大利亚从 1997 年开始进行国家土地与水资源清查。土壤侵蚀清查主要包括面蚀、细沟侵蚀、切沟侵蚀、河岸侵蚀等，坡面侵蚀的清查主要基于美国 RUSLE 模型，调查时首先将区域划分为 1 km² 的网格，对于每个网格，利用气候资料、土壤资料、DEM、遥感植被指数，分别计算降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡长坡度、植被覆盖。由于资料不足，所以没有考虑水土保持对网格水土流失的影响。将上述各因子相乘即可得到该网格的土壤侵蚀量，再利用 GIS 技术生成全国土壤侵蚀图。为了进行国家水土流失风险评价，欧洲多个国家也采用类似的方法，对各国水土流失做了清查。

新中国成立以来,我国先后于1984年、1999年和2001年进行过3次土壤侵蚀遥感调查。1984年全国开展了第一次土壤侵蚀遥感调查,调查应用了MSS和TM影像,参考彩红外航片,建立模糊判断模型,生成了全国1:500 000土壤侵蚀图及相关数据库。1999年水利部应用1995年、1996年陆地卫星TM影像,在GIS技术支持下,通过人机交互判读及专家思想的综合评判,生成了不同侵蚀强度的数据集。以同样的方法,水利部于2001年开始了第三次全国土壤侵蚀遥感调查。

我国土壤侵蚀遥感调查是在利用遥感影像判读土地利用的基础上,基于GIS生成的坡度图和遥感影像生成的植被覆盖度图,根据面蚀强度分级指标及水蚀和风蚀强度分级指标,确定出不同强度侵蚀的分布面积,再利用其平均侵蚀模数,计算得到侵蚀量。尽管遥感调查方法可以快速地获取地形地貌、植被等信息,但目前的调查主要基于坡度和植被覆盖两个因子,调查成果是建立在定性或半定量判读的基础之上,尚无法对区域土壤侵蚀进行定量评价。但随着相关资料的积累及区域土壤侵蚀模型研究的不断进步,土壤侵蚀遥感调查势必会成为区域土壤侵蚀调查的主导方法。

2.4.2 抽样调查

区域水土流失抽样调查方法主要在美国使用。1977年美国开始了第一次国家层面的水土流失抽样调查。在全国范围内采集了70 000个单元的相关数据,利用通用土壤流失方程和风蚀预报方程计算了每个单元的侵蚀量,并进行了区域汇总。1982年美国将调查单元扩大到了321 000个,1987年又将调查单元调整到108 000个,1992年的调查单元为300 000个,1997年也沿用了这些调查单元,基本包括了美国3 300个县,共844 000个调查点,每个单元面积为 $0.16\sim 2.59\text{ km}^2$,从2000年开始,调查周期由原来的5年一次变成每年一次。美国水土流失抽样调查采用分层采样的思路,调查时将县区作为标准的正方形,边长为24英里(1英里=1.609公里),进一步将县区划分为16个边长为6英里的正方形镇区,每个镇区再继续划分为36个边长为1英里的调查单元,每个单元中随机地选择3个监测样点进行相关调查。在国家“十一五”科技支撑计划的支持下,北京师范大学在区域水土流失抽样调查方面做了大量的探索,在借助美国相关经验的基础上,逐步建立了适合于我国具体情况的抽样调查法。区域水土流失分层抽样调查按照四级来进行。第一级为县级抽样区,是空间分辨率最低的网格系统。根据我国县域面积的主体特征,将该级区的网格大小确定为 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 。第二级为乡级抽样区,是将县级抽样区进一步划分为25个 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 的网格。它基本反映了我国乡域面积的主体特征。第三级为抽样控制区,是将乡级抽样区进一步划分为4个 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 的网格。所谓控制区是指在每一个 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 的网格内都要保证有一个调查点,从而能对水土流失基本状况进行空间上的控制。第四级为抽样单元,是将抽样控制区进一步划分为25个 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的网格。基本抽样单元就是这25个网格的中心网格,也就是要进行野外调查的对象。

调查大体上包括了室内准备阶段、野外调查阶段和室内数据处理分析三个阶段。室内准备阶段主要包括根据抽样单元中心点的公里网坐标和地理坐标勾绘抽样单元边界、扫描1:10 000地形图进行抽样单元等值线及边界数字化、打印底图、制作调查信息表等过程,同时准备野外调查需要的相关设备(如GPS、数码相机等)。野外调查以抽样单元内的地块为单位,调查土地利用、覆盖度、水土保持措施等信息,同时进行景观拍照和土壤样品采集。室内数据处理分析包括输入照片、输入GPS数据、输入信息表、制作地块文件。

在上述调查的基础上,结合气象资料和流域DEM,分别计算小流域的降雨侵蚀力、土

壤可蚀性、坡长坡度、植被覆盖、水土保持农业措施、水土保持工程措施和水土保持生物措施，以 CSLE 土壤侵蚀模型为基础，计算小流域土壤侵蚀量。以小流域土壤侵蚀量的计算结果为基础，根据小流域的空间分布状况，分别计算乡级、县级及区域水土流失量。与区域水土流失遥感调查方法相比，抽样调查法野外调查工作量大，费时费力，但它可以提供比较详细的区域水土流失计算的基础资料，有些资料只要收集一次，后续监测中就不需要继续更新，同时计算精度优于遥感调查方法。