



区域土壤侵蚀调查方法

段兴武 陶余铨 白致威 丁剑宏 等 著



科学出版社

区域土壤侵蚀调查方法

段兴武 陶余铨 白致威 丁剑宏 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细介绍了中国土壤水蚀模型在区域土壤侵蚀调查中的应用,包括影响土壤侵蚀的降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡长、坡度、生物措施、工程措施和耕作措施等7个因子的具体调查和计算方法,同时说明计算所需资料的收集整理和计算成果的质量分析与控制要求。全书共8章,第1章介绍了区域土壤侵蚀调查的目的、意义及国内外相关进展;第2章介绍了本次土壤侵蚀调查的技术路线和案例区概况;第3~7章分别介绍了降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长坡度因子的调查与计算,以及水土保持生物措施因子、水土保持工程措施因子和耕作措施因子的调查与计算;第8章在以上因子计算分析的基础上,利用中国土壤流失方程(CSLE)计算分析了研究区的土壤侵蚀模数及强度。

本书可供地理、生态、农林及水利等专业的高等院校师生与研究人员参考和使用,也可供相关管理部门的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

区域土壤侵蚀调查方法/段兴武等著. —北京:科学出版社,2019.5
ISBN 978-7-03-060755-3

I. ①区… II. ①段… III. ①土壤侵蚀—调查方法 IV. ①S157

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第043121号

责任编辑:王海光 / 责任校对:李影
责任印制:吴兆东 / 封面设计:刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年5月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:258 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

土壤侵蚀可导致水土资源破坏、生态环境恶化，引发自然灾害，威胁生态安全、防洪安全、饮水安全和粮食安全，是经济社会可持续发展的主要制约性因素之一。我国是世界上水土流失最为严重的国家之一，掌握重要区域的水土流失和治理现状及其发生发展规律，可为加强水土保持工作提供科学决策依据，具有十分重要的意义。因此，开展区域土壤侵蚀调查，查清土壤侵蚀现状，既是对过去水土流失防治成效的总结评价，又是科学规划当前和今后一个时期水土保持工作的重要基础。

美国是世界上最早开展区域土壤侵蚀调查的国家，我国从 1985 年开始第一次开展土壤侵蚀遥感调查，至今已先后开展了 4 次土壤侵蚀调查。归纳以往调查方法，总体可概括为抽样调查、网格估算和模型计算三大类型。每一种方法都有其优缺点，抽样调查精度最高，但调查成果难以覆盖全区；网格估算考虑因子较少，精度相对较低；模型计算不仅需要选择合适模型、修订模型参数，还需要大量高精度数据的支持。为此，基于“云南省 2015 年土壤侵蚀调查”工作，本书提出了基于高精度水土保持工程措施数据和 CSLE 模型的区域土壤侵蚀全面调查技术，以期为我国大尺度区域土壤侵蚀调查提供参考方法。

本书基于云南省水利厅、云南省水利水电科学研究院、云南大学、北京师范大学及云南省地图院等共同开展的“云南省 2015 年土壤侵蚀调查”项目的成果撰写而成，详细介绍了中国土壤水蚀模型在区域土壤侵蚀调查中的应用，包括影响土壤侵蚀的降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡长、坡度、生物措施、工程措施和耕作措施等 7 个主要因子的具体调查和计算方法，同时说明计算所需资料的收集整理和计算成果的质量分析与控制要求，为区域土壤侵蚀调查工作提供参考。全书共 8 章，第 1 章为绪论，简要介绍区域土壤侵蚀调查的目的、意义及国内外土壤侵蚀调查的进展；第 2 章介绍本次土壤侵蚀调查的技术路线和案例区概况；第 3 章为降雨侵蚀力因子的调查与计算，重点讲述降雨资料的收集整理、降雨侵蚀力因子的计算等；第 4 章探讨土壤可蚀性因子的调查与计算，阐述土壤资料的收集、整理及土壤可蚀性因子的计算、订正等内容；第 5 章为坡长坡度因子的调查与计算，主要介绍区域高精度数字高程模型（DEM）数据的拼接、处理，以及坡长坡度因子的计算分析等；第 6 章探讨水土保持生物措施因子的调查、计算与分析；第 7 章介绍水土保持工程措施因子及耕作措施因子的解译、计算与分析，其中区

域工程措施因子的解译与建库是重点；第 8 章在以上因子计算分析的基础上，利用中国土壤流失方程（CSLE）计算分析研究区的土壤侵蚀强度。

各章撰写人员分工为：第 1 章由段兴武和白致威撰写，第 2 章由段兴武和陶余铨撰写，第 3 章由段兴武、白致威和吴昊撰写，第 4 章由段兴武、白致威和李季孝撰写，第 5 章由陶余铨、丁剑宏、肖提荣、张凤、李加顺、李季孝和王伟撰写，第 6 章由陶余铨、季旋、王伟、李加顺和李季孝撰写，第 7 章由陶余铨、丁剑宏、段兴武、李加顺、李季孝、王伟和吴昊撰写，第 8 章由丁剑宏和陶余铨撰写，全书由段兴武和陶余铨统稿。

本书主要在云南省水利厅“云南省 2015 年土壤侵蚀调查”项目的资助下完成，同时得到了国家自然科学基金项目“高原山地坡式梯田生态系统服务权衡机制研究”（41867029）、“元江干热河谷区侵蚀对土壤生产力影响的定量研究”（41101267）、“元江干热河谷区景观演变的侵蚀产沙机制研究”（41561063）及云南省中青年学术和技术带头人培养计划（2015HB011）和云南大学青年英才培养计划等多个项目成果和数据的支撑。

限于著者水平，书中难免存在不足，恳请读者批评指正，也敬请各位专家、学者多提宝贵意见。

著者

2019年3月

目 录

| | | |
|-------|--------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论 | 1 |
| 1.1 | 区域土壤侵蚀调查的目的与意义 | 1 |
| 1.2 | 国外区域土壤侵蚀调查进展 | 2 |
| 1.3 | 我国土壤侵蚀调查进展 | 3 |
| 第 2 章 | 区域土壤侵蚀调查技术路线及案例区概况 | 5 |
| 2.1 | 调查技术路线 | 5 |
| 2.1.1 | 案例区以往调查方法简介 | 5 |
| 2.1.2 | 2015 年调查技术路线 | 5 |
| 2.2 | 案例区概况 | 7 |
| 2.2.1 | 自然条件 | 7 |
| 2.2.2 | 社会经济状况 | 9 |
| 第 3 章 | 降雨侵蚀力因子调查与计算 | 11 |
| 3.1 | 资料收集与整理 | 12 |
| 3.1.1 | 资料收集 | 12 |
| 3.1.2 | 资料整理 | 12 |
| 3.2 | 降雨侵蚀力因子计算方法 | 13 |
| 3.2.1 | 降雨侵蚀力计算方法 | 13 |
| 3.2.2 | 降雨侵蚀力空间插值及栅格化处理 | 14 |
| 3.2.3 | 计算成果质量检查和分析 | 15 |
| 3.3 | 降雨侵蚀力因子计算结果 | 17 |
| 3.3.1 | 全省统计情况 | 17 |
| 3.3.2 | 州(市)统计情况 | 18 |
| 第 4 章 | 土壤可蚀性因子调查与计算 | 21 |
| 4.1 | 资料收集、整理及野外调查 | 21 |
| 4.1.1 | 资料收集 | 21 |

| | | |
|------------|------------------------|-----------|
| 4.1.2 | 资料整理与野外调查 | 22 |
| 4.2 | 土壤可蚀性因子计算与订正 | 25 |
| 4.2.1 | 土壤可蚀性因子计算方法 | 25 |
| 4.2.2 | 土壤可蚀性因子计算过程 | 27 |
| 4.2.3 | 计算成果质量检查和分析 | 30 |
| 4.3 | 土壤可蚀性因子计算结果 | 32 |
| 4.3.1 | 全省统计情况 | 32 |
| 4.3.2 | 州(市)统计情况 | 34 |
| 第5章 | 坡长坡度因子调查与计算 | 36 |
| 5.1 | DEM数据收集与处理 | 37 |
| 5.1.1 | 资料收集 | 37 |
| 5.1.2 | 资料分析整理 | 38 |
| 5.1.3 | DEM数据预处理 | 43 |
| 5.2 | 坡长坡度因子计算方法 | 47 |
| 5.2.1 | 子流域提取 | 47 |
| 5.2.2 | 坡长坡度因子计算过程 | 52 |
| 5.2.3 | 计算成果质量检查和分析 | 57 |
| 5.3 | 坡长坡度因子计算结果 | 64 |
| 5.3.1 | 坡长与坡长因子 | 64 |
| 5.3.2 | 坡度与坡度因子 | 68 |
| 第6章 | 水土保持生物措施因子调查与计算 | 72 |
| 6.1 | 数据收集与预处理 | 73 |
| 6.1.1 | 遥感影像数据与土地利用数据收集 | 73 |
| 6.1.2 | 遥感影像数据预处理 | 76 |
| 6.2 | 生物措施因子计算方法 | 84 |
| 6.2.1 | NDVI计算 | 84 |
| 6.2.2 | 植被盖度计算 | 89 |
| 6.2.3 | 生物措施因子计算 | 92 |
| 6.2.4 | 数据质量控制 | 96 |
| 6.3 | 生物措施因子计算结果 | 98 |

| | | |
|------------|-------------------------------|------------|
| 6.3.1 | 全省统计情况 | 98 |
| 6.3.2 | 州(市)统计情况 | 99 |
| 第7章 | 水土保持工程措施因子和耕作措施因子调查与计算 | 101 |
| 7.1 | 数据收集与预处理 | 101 |
| 7.1.1 | 土地利用数据 | 101 |
| 7.1.2 | 遥感影像数据 | 102 |
| 7.1.3 | 普查资料 | 102 |
| 7.1.4 | 其他资料 | 102 |
| 7.2 | 土地利用数据的解译修正 | 103 |
| 7.2.1 | 技术路线 | 103 |
| 7.2.2 | 解译依据及标准 | 103 |
| 7.2.3 | 解译方法与流程 | 107 |
| 7.2.4 | 质量控制 | 125 |
| 7.2.5 | 土地利用解译修正成果 | 126 |
| 7.3 | 工程措施因子解译与赋值 | 127 |
| 7.3.1 | 工程措施因子解译 | 128 |
| 7.3.2 | 工程措施因子赋值 | 133 |
| 7.3.3 | 质量控制 | 134 |
| 7.3.4 | 工程措施因子调查解译结果 | 135 |
| 7.4 | 耕作措施因子调查与计算方法 | 138 |
| 7.4.1 | 耕作措施因子调查 | 138 |
| 7.4.2 | 耕作措施因子赋值 | 138 |
| 7.4.3 | 质量控制 | 140 |
| 7.4.4 | 耕作措施因子调查结果 | 140 |
| 第8章 | 土壤侵蚀调查成果与分析评价 | 142 |
| 8.1 | 土壤侵蚀调查成果 | 142 |
| 8.1.1 | 全省土壤侵蚀总体情况 | 142 |
| 8.1.2 | 六大流域土壤侵蚀现状 | 143 |
| 8.1.3 | 州(市)土壤侵蚀现状 | 144 |
| 8.1.4 | 不同土地利用类型土壤侵蚀情况 | 148 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 8.2 调查方法和成果的分析评价 | 149 |
| 8.2.1 调查方法评价 | 149 |
| 8.2.2 调查成果分析 | 149 |
| 参考文献 | 152 |
| 附录 1 云南省土样调查点分布信息表 | 153 |
| 附录 2 土地利用解译标志表 | 163 |
| 附录 3 工程措施解译标志表 | 172 |
| 附录 4 云南省土地利用类型实景图及遥感影像典型解译样例 | 185 |

第1章 绪 论

1.1 区域土壤侵蚀调查的目的与意义

土壤侵蚀可导致水土资源破坏、生态环境恶化,引发自然灾害,威胁生态安全、防洪安全、饮水安全和粮食安全,是经济社会可持续发展的主要制约性因素之一。据统计,全球约有 $1.6 \times 10^7 \text{ km}^2$ 的土地遭受着不同程度的侵蚀危害,侵蚀面积约占地表总面积的 11% (Oldeman, 1994)。此外,每年全球范围内的主要河流输送约 $2 \times 10^{10} \text{ t}$ 的泥沙进入海洋 (Milliman and Syvitski, 1992),给河流和海洋生态系统健康带来了严重威胁 (Owens and Collins, 2006)。我国是世界上水土流失最为严重的国家之一,根据第一次全国水利普查结果,我国土壤侵蚀总面积为 294.91 万 km^2 ,占普查范围总面积的 31.12% (刘震, 2013),每年因土壤侵蚀造成的经济损失在 100 亿元以上 (陈雷, 2002)。为了遏制土壤侵蚀、治理退化生态、确保土地资源可持续利用及维持河流生态健康,我国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基础工程,将水土保持的相关研究提高到经济社会可持续发展和国家生态安全的战略高度 (冷疏影等, 2004)。

要控制土壤侵蚀,首先必须调查清楚不同时空尺度下的土壤侵蚀现状及其发展趋势。在此背景下,基于坡面或者小流域尺度上的土壤侵蚀监测结果,世界各地研发了大量土壤侵蚀预报模型,其中比较有代表性的是通用土壤流失方程 (Universal Soil Loss Equation, USLE)、修正的通用土壤流失方程 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 及水蚀预报项目 (Water Erosion Prediction Program, WEPP) 等。然而这些侵蚀模型的研究主要集中在小区、坡面、小流域尺度上,关注机制与过程分析,研究模型参数的选择与率定,而在大尺度上,受限于区域变异性和数据的可获得性,土壤侵蚀模拟模型和土壤侵蚀调查评价方法仍有待加强。

区域尺度土壤侵蚀调查一般指在较长时间和较大空间尺度 (全球、洲际、国家或地区) 上开展的土壤侵蚀调查,研究方法更加依赖于土壤侵蚀模型、大尺度基础数据支撑与 GIS 技术方法的集成 (杨勤科等, 2006)。区域尺度上的土壤侵蚀调查是土壤侵蚀监测的重要内容,是生态环境监测中具有独特内容、不可替代的重要分支。土壤侵蚀本身是区域土壤资源利用变化的重要驱动力,与区域土地利用规划和管理密切相关 (周为峰和吴炳方, 2006)。区域土壤侵蚀调查成果能更

直接地为水土保持宏观决策提供支持，也可为加强水土保持工作提供科学决策依据，具有十分重要的意义。因此，开展区域土壤侵蚀调查，查清土壤侵蚀现状，既是对过去水土流失防治成效的总结评价，又是科学谋划当前和今后一个时期水土保持工作的重要基础。

1.2 国外区域土壤侵蚀调查进展

国外的土壤侵蚀调查始于美国 19 世纪 40 年代，在全球尺度上，自 20 世纪 90 年代以来，有关国际研究计划和组织开展了一系列全球和区域尺度上的土壤侵蚀调查和评价研究，如地中海荒漠化和土地利用 (Mediterranean Desertification and Land Use, MEDALUS) 研究，全球变化与陆地生态系统 (Global Change and Terrestrial Ecosystem, GCTE) 研究，有关组织如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 (杨勤科等, 2006)。比较有代表性的是 20 世纪 70 年代末期，在联合国环境规划署 (UNEP) 的资助下，国际土壤标本和土壤信息中心组织实施了全球土地退化制图研究，基于 1:1000 万地形底图，在考虑气候、土壤、植被和土地利用的基础上，利用“人为导致土壤退化评估导则” (Guidelines for General Assessment of the Status of Human Induced Soil Degradation) 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，编制了全球人为导致土地退化图 (world map of the status of human induced soil degradation) (Oldeman, 1994)。随着通用土壤流失方程 (USLE) 的推广和应用，有学者先后基于 1.5° 网格的土壤、地形、降水等数据，利用 USLE (或 RUSLE) 对全球尺度土壤侵蚀进行定量分析 (Batjes, 1996)。但是这些调查中，受限于数据的精度和可获得性，都未考虑水土保持工程措施。

在洲际尺度上，比较有代表性的是，Lu 等 (2001) 在收集 0.05° 网格日降水数据、小区土壤可蚀性数据、0.08° 网格归一化植被指数 (NDVI) 数据及 250m 分辨率 DEM 数据的基础上，利用 USLE 模型估算了大洋洲坡面土壤的侵蚀状况，在这次评估中，受限于数据的可获得性，没有考虑水土保持工程措施。此外，Bosco 等 (2015) 在收集 1950~2012 年欧洲日降水数据、1:100 万土壤数据、1:10 万土地利用数据和 90m 分辨率 DEM 数据等的基础上，利用 RUSLE 模型评估了欧洲土壤的侵蚀状况，这次调查也没有考虑水土保持工程措施。

在国家或地区尺度上，美国是最早开展区域土壤侵蚀调查的国家。谢云等 (2013) 详细介绍了美国土壤侵蚀调查的历史与现状，大致可以分为以下几个阶段：1934 年美国内政部组织专家在全国范围内开展土壤侵蚀实地调查并发布评估报

告；1956年美国农业部牵头采用抽样调查的方法在全国范围内开展土壤侵蚀调查，抽样密度为1%~8%，调查单元面积为0.16~2.59km²，又在1965年利用该方法开展了第二次抽样调查，1977年在抽样调查的基础上开始使用USLE模型计算抽样单元的侵蚀模数；此后每5年都利用抽样调查的方法开展全美土壤侵蚀评估，只是调查单元数有所变动；进入21世纪后每年开展一次调查评估。美国始终使用抽样调查的方法，其结果仅用来评估调查单元的土壤侵蚀情况，受限于土地利用情况、水土保持措施等的空间变异性，美国没有将抽样调查结果通过地统计学等插值手段变成覆盖全美的土壤侵蚀状况图。

1.3 我国土壤侵蚀调查进展

我国早期的土壤侵蚀研究可追溯到20世纪20年代，当时的金陵大学（1952年与南京大学合并）森林系部分教师在西北地区开展了水土流失的调查和监测，并先后在水、西安、平凉和东江等地建立了水土保持实验站。新中国成立后，我国土壤侵蚀调查与评价进一步得到加强和发展，郭索彦等（2014）将之分为以传统监测为主和以遥感调查为主两个阶段。20世纪50~70年代，我国的土壤侵蚀调查以传统监测手段为主，其间先后完成了黄河流域水土保持分区和全国水力侵蚀面积初步估查等工作，并在全国建立了160余处水土保持实验站或推广站，在1963年召开的全国农业科学技术工作会议上制定了山地利用与水土保持的七年技术规划。自20世纪70年代末起，随着遥感和GIS技术的发展，包括大尺度遥感影像数据可获得性难度的降低，我国先后开展了3次土壤侵蚀遥感调查。第1次是1985年前后，水利部利用多光谱扫描仪（MSS）遥感影像通过人工目视解译对全国的水土流失状况进行了调查，编制了全国分省1:50万及全国1:250万水土流失现状图。第2次是1999年，主要利用TM遥感影像作为土地利用和盖度的解译的基础数据，辅以分辨率较低的DEM图人机交互判读不同土地利用/不同盖度和不同坡度条件下的土壤侵蚀强度，利用遥感技术，基本查清了我国水土流失的主要类型及分布，对不同地区乃至全国水土流失状况有了更为全面、准确的把握。第3次是2000年，此次是在1999年调查的基础上进行的，技术方法手段基本相同，调查划分出水蚀风蚀交错区，明确了重点治理地区，从宏观上掌握了水土流失的动态情况。

这3次土壤侵蚀调查都是基于遥感影像数据和GIS技术的，以一定空间分辨率遥感影像为基础（TM影像一般的空间分辨率为30m），利用目视解译或全数字作业的人机交互判读，辅以地形、土地利用、植被覆盖等因子的分析，参照水利部标准（中华人民共和国水利部，2007）确定土壤侵蚀强度，但缺乏土壤侵蚀量的定量评估。然而，对降雨、坡长、水土保持工程措施等重要土壤侵蚀强度影响

因素都没有考虑。2010~2012年，开展了第一次全国水利普查水土保持情况的调查，这次调查采用了抽样调查的方法，在平原区抽样单元是边长为1km的网格、在丘陵区 and 山区则为 $0.2\sim 3.0\text{km}^2$ 的小流域，全国实际布设水力侵蚀野外调查单元32364个。在每个调查单元中，全面调查坡度、坡长、土壤、降水、土地利用、植被盖度及水土保持工程措施等土壤侵蚀影响因子，利用Liu等（2002）构建的CSLE模型评价水力侵蚀强度，获得水力侵蚀的分布、面积与强度。

综上所述，我们发现国内外区域土壤侵蚀调查或评估多用USLE及其修正模型（CSLE/RUSLE等），而在调查方法上则可分为全覆盖调查和抽样调查两类。全覆盖调查多以遥感影像、土地利用数据、降水数据和DEM数据为基础，利用人机交互解译的方式辅以USLE模型等评估区域土壤侵蚀的类型、强度和分布等，典型代表是欧洲、大洋洲和中国的区域土壤侵蚀调查，这种调查方法的优点是无缝全覆盖调查，有利于水土保持宏观决策管理，缺点主要是没有考虑水土保持工程措施（如水平梯田、坡式梯田、水平阶等），这主要是因为当前国内外土地利用分类中没有考虑水土保持工程措施，以农地为例，一般只区分水田和旱地，对坡式梯田、水平阶等措施类型则没有进一步区分，而这些措施的解译不仅需要高精度的遥感影像数据（一般应高于10m分辨率），而且费时费力，这就使得大部分全覆盖调查的是潜在土壤侵蚀强度，与实际土壤侵蚀强度相比往往偏高。抽样调查的优点是考虑因子全面，估算精确，然而受限于土地利用类型、水土保持工程措施、土壤可蚀性等的空间变异性极大，难以利用简单的地统计学方法将抽样点的调查结果推广到全区域，而受限于调查成本，全面调查难以实现，这就极大地限制了抽样调查结果在全区域尺度上的应用。在此背景下，如何在全区域尺度上考虑水土保持措施，更准确地计算和评估土壤侵蚀状况显得尤为关键。随着高精度遥感影像，尤其是区域尺度各类高于5m分辨率遥感影像可获得性的难度大幅降低，在区域尺度上全面解译水土保持工程措施成为可能。

第 2 章 区域土壤侵蚀调查技术路线及案例区概况

2.1 调查技术路线

2.1.1 案例区以往调查方法简介

区域土壤侵蚀调查通常采用遥感调查的技术路线，案例区云南省在 1987 年、1999 年和 2004 年进行过 3 次全省范围的土壤侵蚀调查工作，均采用了遥感调查方法，即利用 1:25 万比例的地形图、30m 分辨率的 TM 影像，结合野外调查和相关资料，通过人机交互勾绘，获得土地利用、坡度和植被覆盖的信息，以此来判断土壤侵蚀类型和侵蚀强度分级情况，然后通过图形编辑和数据集成，最终得到全省的土壤侵蚀分布和侵蚀强度分级数据。它的优点是方便简单、工作量小，侵蚀与非侵蚀判断相对准确，但缺点是使用的数据精度不高，考虑的土壤侵蚀因子不全，不是定量计算，人工判别存在个体差异，难以准确判别侵蚀强度，尤其体现不出各类水土保持工程措施的水土保持效应。

2010 年，第一次全国水利普查中的水土保持专项普查，采用抽样调查的方法获取野外调查单元的土地利用、工程措施、生物措施、坡长、坡度等因子，利用 CSLE 模型（也称水蚀模型）来估算土壤侵蚀量，根据这些调查单元的强度分级状况插值生成全省土壤侵蚀成果数据。该模型综合考虑了影响土壤侵蚀的降雨、土壤、地形、植被及水土保持工程措施等因素，优点是全面考虑土壤侵蚀的因子，野外实地调查准确，侵蚀强度判别相对较准。不足的是野外抽样调查人力物力财力均耗费过大，以点代面抽样的代表性不够充足，云南省布设了 2811 个水力侵蚀野外调查单元，是全国调查单元布设最多的省份，但这些调查单元的总面积仅为 966.51km²，而云南全省土地面积 38.32 万 km²，抽样率不到 0.3%，对于云南这样地形地貌极为复杂、土地利用多变的山区省份是远远不够的，并且最终不能给出区域内土壤侵蚀情况的空间分布结果。

2.1.2 2015 年调查技术路线

2015 年，按照《中华人民共和国水土保持法》定期进行水土流失调查的要求，云南省水利厅组织开展了全省的土壤侵蚀调查，将调查任务下达给云南省水利水电科学研究院。鉴于云南省属于以水力侵蚀为主的土石山区，风力侵蚀和冻融侵

蚀虽然有分布，但面积很小，因此调查指标以水力侵蚀指标为主。为了建立基于土壤水力侵蚀模型的区域土壤侵蚀调查技术，调查单位在总结分析对比以往土壤侵蚀调查方法优缺点的基础上，反复斟酌相关资料的可获得性，组织北京师范大学、云南大学和云南省地图院等在土壤侵蚀调查方面具有丰富经验的单位与专家学者进行研讨，最终决定采用与水利普查一致的模型来评估土壤侵蚀状况，即基于中国土壤流失方程（CSLE）（式 2-1）模型计算土壤侵蚀模数并评价土壤侵蚀强度。但是在资料收集和获取上，充分结合高精度遥感影像（0.5m）解译、大比例地形图（1：1 万）数据全区域拼接等，构建覆盖全省的降水、土壤、地形、植被、水土保持工程措施等土壤侵蚀影响因子的数据库，叠加分析计算土壤侵蚀模数，最终得到全省的土壤侵蚀强度、面积和空间分布成果。它与普查方法最大的不同为，普查是采用抽样调查的方法获取调查单元的土地利用、工程措施、生物措施、坡长坡度等因子，而这次是通过覆盖全省的资料来计算、解译获得的，有效解决了抽样不足的问题。技术路线见图 2-1。

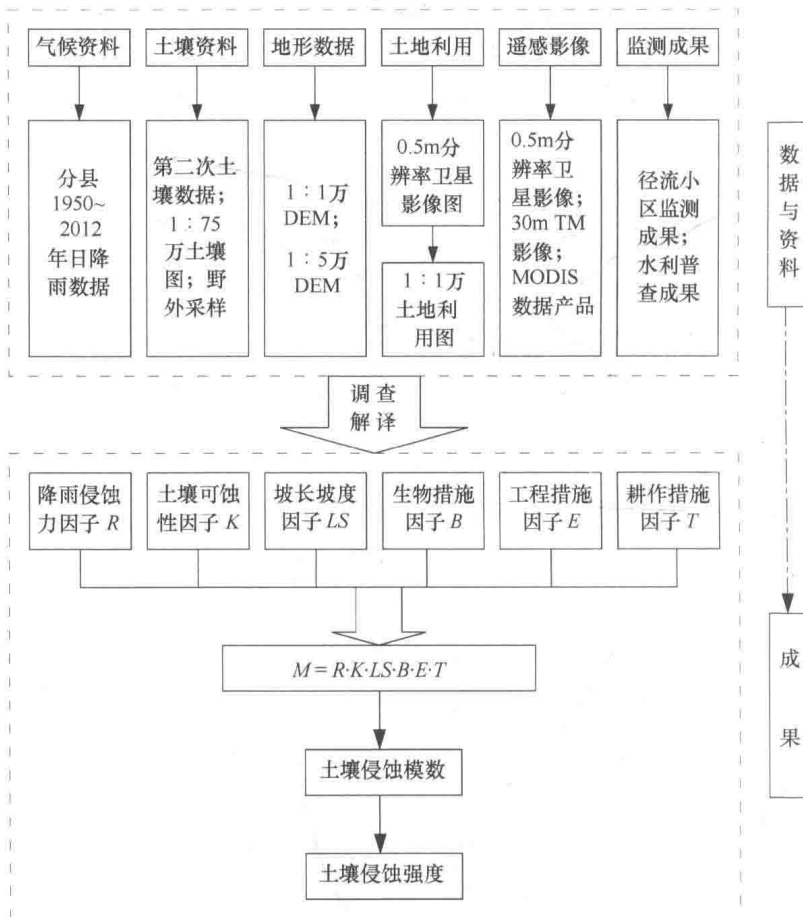


图 2-1 2015 年土壤侵蚀调查技术路线图

$$M = R \cdot K \cdot LS \cdot B \cdot E \cdot T \quad (2-1)$$

式中, M 为土壤侵蚀模数, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; LS 为坡长坡度因子, 无量纲; B 为生物措施因子, 无量纲; E 为工程措施因子, 无量纲; T 为耕作措施因子, 无量纲。

2.2 案例区概况

从自然地理因素来说, 山区指的是“起伏相对高度大于 200m 的地段”, 凡是由山脉或者山系组成的空间区域都可以称为山区, 包括山地、丘陵和崎岖的高原, 它有着独特的自然环境, 以一定的高度和坡度为基础, 气候条件恶劣, 生态环境脆弱, 同时往往有着封闭性、边缘性、民族类型多样化和发展的滞后性等特征。山区中的高原则指海拔一般在 1000m 以上, 面积广大、地形开阔、周边以明显的陡坡为界、比较完整的大面积隆起地区, 它是在长期连续的大面积的地壳抬升运动中形成的, 以较大的高度区别于平原, 又以较大的平缓地面和较小的起伏区别于山地, 素有“大地的舞台”之称。我国的高原主要有青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和云贵高原等四大高原, 案例区云南省位于其中的青藏高原南延部分和云贵高原西部, 山区面积占土地总面积的 90% 以上, 是典型的高原山区。

2.2.1 自然条件

2.2.1.1 地形地貌

云南省位于我国西南边陲, 地处长江、珠江、元江、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江等六大水系的上游或源头地区, 位于北纬 $21^{\circ}08'32'' \sim 29^{\circ}15'08''$ 、东经 $97^{\circ}31'39'' \sim 106^{\circ}11'47''$, 跨越 9 个纬度带和 10 个经度带, 地形以元江谷地和云岭山脉南段的宽谷为界, 分为东西两大地形区, 东部为滇东、滇中高原, 称云南高原, 是云贵高原的组成部分, 平均海拔 2000m 左右, 地形表现为波状起伏和缓的低山及浑圆丘陵, 发育着各种类型的岩溶地形, 西部为横断山脉纵谷区, 高山深谷相间, 相对高差较大, 地势险峻, 高黎贡山、怒山、云岭山脉等南北纵列, 金沙江、澜沧江、怒江、元江等江河呈帚状分布。全省整体地势从西北向东南呈不均匀阶梯状逐级降低, 海拔相差较大, 最高点为滇藏交界的德钦县怒山山脉梅里雪山主峰卡瓦格博峰, 海拔 6740m, 最低点在与越南交界的河口县南溪河与元江汇合处, 即元江出境处, 海拔仅 76.4m, 最高、最低两地直线距离约 900km, 高差达 6663.6m; 其余如西部的太子雪山和梅里雪山与其东侧的澜沧江峡谷, 平面

距离 12.8km, 相对高差在 3000m 以上; 东部药山至巧家县城, 平面距离 17.3km, 相对高差 3300m; 拱王山至小江河谷, 平面距离 11km, 相对高差 2900m 以上。

2.2.1.2 地质构造

云南的地质构造十分复杂, 是一个多方面构造交织复合的地区, 有南北向、东西向、北东向、北西向等多种方向构造交织复合, 还有弧形构造, 近期构造运动比较强烈。由于构造运动的作用, 形成了哀牢山深断裂带、小江深断裂带和澜沧江深断裂带三条深大断裂带控制下的富宁大断裂、文麻大断裂、弥勒-师宗大断裂、南盘江大断裂、嵩明大断裂(小江深断裂西支)、普渡河大断裂、元谋-绿汁江大断裂、程海-宾川大断裂、红河大断裂、安定大断裂、阿墨江大断裂、柯街-南汀河大断裂、怒江大断裂、翁水河-小金河大断裂等 14 条大断裂。沿着这些大断裂带常发生强震, 地震降低了山体稳定性和岩石强度, 增加了固体物质的来源, 特别是 6 级以上的强震, 不仅使岩石节理扩张, 山体产生巨大裂隙, 而且会加剧滑坡、坍塌等重力侵蚀的发生。

云南具有前古生代到新生代的各种地层, 各时代地层齐全, 地层岩块破碎, 岩石种类繁多, 表现出两大特点: 一是地层经过各个地质历史阶段, 经受了多次不同规模的构造运动, 在地应力作用下产生大的变形和破坏, 到处留下褶皱、断裂和裂隙, 岩石经受多次挤压、剪扭、拉裂等作用, 破坏了岩层的完整性和连续性, 使地层岩块破碎; 二是岩石受风化作用强烈, 由于各种岩石矿物硬度不同, 抗风化能力不一, 风化物有粗有细, 风化层有深有浅, 产生非均一性。一般常见的有花岗岩、玄武岩、砂岩、页岩、泥岩、石灰岩、片麻岩、片岩和板岩等, 大部分岩类易风化, 风化层深厚, 抗冲刷力弱, 一旦地表植被遭受破坏或在外营力扰动下, 极易发生土壤侵蚀, 且不易治理, 其中尤以深变质花岗岩地区为甚。

2.2.1.3 水文气候

受地形地貌的影响, 云南的气候主要属于低纬山原季风气候, 立体气候特点显著, 气候类型丰富多样, 有北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、南温带、中温带和高原气候区共 7 个气候类型, 最突出的特点是年温差小, 日温差大, 干湿季节分明。全省多年平均降水量在 1100mm 左右, 受冬夏两季不同大气环流的控制和影响, 降水量的时空分配极为不均: 时间上, 6~8 月雨季降水量占全年降水量的 60%左右, 11 月至次年 4 月的冬春旱季降水量只占全年降水量的 10%~20%; 空间上, 西南及南部的热带和亚热带大部地区多年平均降水量在 1300mm 以上, 而北部和中部的温带大部地区则在 900mm 以内。降雨的一个特点是降雨日数多、强度大, 且集中、多单点暴雨, 往往第一场雨以暴雨为多, 雨滴直接击溅