

# 土壤侵蚀监测点布局的空间尺度分析

曾红娟<sup>1</sup>, 杨胜天<sup>1</sup>, 马力刚<sup>2</sup>, 王玉娟<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院 遥感科学国家重点实验室

环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 湖北省水土保持监测中心, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 土壤侵蚀是一个多尺度的时空过程, 不同尺度的土壤侵蚀具有不同的主制过程及主导因素, 监测点的布局应考虑土壤侵蚀的空间尺度效应。提出三级控制的分层抽样监测点布局方案, 即采用土壤侵蚀类型分区作为区域尺度上的一级控制因素; 采用降雨量、沟壑密度、植被类型、土壤类型、土地利用结构作为小流域尺度上的二级控制因素, 筛选典型小流域; 采用坡度、植被盖度、土壤类型、土地利用作为坡面尺度上的三级控制因素, 筛选典型坡面地块单元。逐层筛选监测点位置, 在典型小流域出口处布设控制站, 在典型坡面地块内布设径流小区。基于空间尺度效应的分层抽样监测点布局方法以 GIS 为主要技术手段, 以 RS 为主要数据源, 充分结合水土保持工作现状, 能提高监测点布局的合理性和高效性。

**关键词:** 土壤侵蚀; 监测点布局; 空间尺度; 分层抽样

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)02-0024-04

中图分类号: X830.1, S157

## Spatial Scale Consideration of Soil Erosion Monitoring Sites Arrangement

ZENG Hong-uan<sup>1</sup>, YANG Sheng-tian<sup>1</sup>, MA Li-gang<sup>2</sup>, WANG Yu-juan<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Remote Sensing Science, State Key Laboratory of Remote Sensing Science,

Beijing Key Laboratory of Environmental Remote Sensing and Digital City, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 2. Hubei Soil and Water Conservation Monitoring Center, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Soil erosion is a multi-scale spatio-temporal process which has different control process and domination factors at different scale. Therefore, overall arrangement of soil erosion monitoring sites should take the spatial scale effect into consideration. We put forward a scheme for soil erosion monitoring points arrangement based on stratified sampling method with 3-levels' control. The first control level took soil erosion type sub-region as control factor at regional scale; the second level took rainfall, gully density, vegetation type, soil type and land-use structure as control factors at smallwatershed scale, and filtrates typical small watershed; the third level took slope gradient, vegetation fraction, soil type and land-use type as control factors at plot scale, and filtrates typical plot unit. Through this stratified selection of the monitoring location, the placement of control stations is arranged in the outlet of the typical small watershed and runoff plots in typical plot unit. The soil erosion monitoring point arrangement under the spatial scale effect based on stratified sampling method took GIS (geographical information system) as main technology and RS (remote sensing) as main data sources, integrated the current situation of soil and water conservation work, which can improve the rationality and efficiency of soil erosion monitoring points arrangement.

**Keywords:** soil erosion; monitoring point arrangement; spatial scale; stratified sampling method

土壤侵蚀监测点是全国水土保持监测网络的神经末梢及数据采集终端, 承担着定期收集、整(汇)编和提供水土流失及其防治监测资料的任务。它是按照一定的原则在监测区域内选择具有典型代表性的地段布设相关监测设施设备, 监测土壤侵蚀状况, 是

一种坡面尺度的微观观测, 同时, 也是区域土壤侵蚀调查的主要方法之一。如 USDA 基于统计学原理, 在美国布设 80 万个监测点组成的监测系统, 对土壤侵蚀进行长期定位监测, 利用 USLE 计算土壤侵蚀量, 每 5 a 汇总统计并公告一次; 英国先后 4 次开展

收稿日期: 2008-08-30

修回日期: 2008-12-10

资助项目: 国家科技支撑计划项目“黄河生态系统保护目标及生态需水研究”(2006BAB06B07); 国家自然科学基金项目(40671123)

作者简介: 曾红娟(1982—), 女(汉族), 贵州省德江县, 博士研究生, 研究方向为生态水文遥感。E-mail: zhj\_eve@mail.bnu.edu.cn.

通信作者: 杨胜天(1965—), 男(彝族), 贵州省贵阳市人, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感和 GIS 应用研究。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn.

土壤侵蚀监测计划,均采用抽样布点进行实地调查和定点观测的方式来掌握全国耕地的土壤侵蚀情况<sup>[1]</sup>。微观尺度的监测点观测是宏观尺度上土壤侵蚀监测的一项重要内容。监测点布局的合理性将直接决定监测数据的代表性和实用性,进而影响到土壤侵蚀预测、评价、治理的科学性和合理性。目前,由于缺乏监测点布局的相关标准和规范,在进行监测点布局时困难重重,考虑的因素不同,侧重点不同,所遵循的原则也存在差异,使得由不同设计者规划布局的监测点并不能形成一个紧密有序的监测体系。其结果是,采集的监测数据可用性低,在数据汇总统计和土壤侵蚀评价、预测及相关研究中也不能得到充分利用。随着全国水土保持监测网络二期工程的启动,构建科学、合理的监测点布局标准与规范已经非常迫切。从土壤侵蚀空间尺度效应的角度出发,提出了基于RS和GIS技术的尺度效应下土壤侵蚀监测点的布局方法。

## 1 土壤侵蚀的空间尺度效应

土壤侵蚀是土壤及其母质在外营力作用下发生的侵蚀、搬运、沉积的整个过程,是多因子综合影响下的一个复杂的时空过程,属于地学范畴,尺度依赖是地学现象的固有特性<sup>[2]</sup>。通过影响因子的组合和各子系统的协调,区域系统可随层次的提高形成低层次系统所不具备的新质,产生功能上的叠加和互补,即空间尺度效应<sup>[3]</sup>,它是地理分异规律和地理综合规律在空间上的表现。土壤侵蚀研究的尺度从小到大可以划分为地块、小区、坡面、小流域、流域、区域和全球尺度等<sup>[4]</sup>,也可以归纳为坡面、流域/小流域、区域3个尺度<sup>[5]</sup>。不同尺度的侵蚀产沙机理不同,具有不同的主导因子和主导过程<sup>[6]</sup>,尺度越大,空间范围越广,显示差异的主导因素也更概括,当研究尺度变小,主导因素往往从地带性因子变为地区性或地方性因子。如对较大的流域和区域,一般用地形起伏、地带性植被等大尺度特征来表达,而相邻坡面一般用坡度、作物等小尺度特征表达。不同的主导因子也只在一定尺度范围内起作用,存在尺度的“关键阈值”,阈值之下保持线性变化,跨越阈值产生非线性变化,只有当评价指标与尺度相匹配时,精度和敏感性才能提高<sup>[7]</sup>。正确认识和理解土壤侵蚀的空间尺度效应对于土壤侵蚀监测工作的开展具有至关重要的作用。

## 2 尺度效应下土壤侵蚀监测点的总体布局

由于土壤侵蚀是多因素共同影响下的一个分布在广域地理范围内的复杂过程,比较有效的监测方法

典型监测,即是抽样调查,通过抽取样本点(即监测点)进行微观尺度上的观测和实验,然后通过统计学的方法将点上的数据离散化,扩展至监测范围。监测点布局主要指在整个监测范围内科学分散布置和安排监测点,使每个监测点及其整个监测点总体能够反映所在区域(或其一部分)及整个监测范围的土壤侵蚀特征及规律。

水土保持工作中常用的抽样方法包括随机抽样、系统抽样、分层抽样、成数抽样。本文在遵循地理分异规律和地理综合规律的基础上,采用分层抽样的方法,进行样本点的抽取。分层抽样,又称分类抽样或类型抽样,是在个体特征值的大小明显地呈现层次时,按照该特征值将总体划分为相互独立的若干层(或子总体),然后在层内按随机抽样或系统抽样方法选取个体,进而实现在总体中抽样的抽样方法。该方法适用于总体由分界明确,差异显著的若干层组成的对象。

兼顾土壤侵蚀监测数据在不同尺度之间的代表性,分层抽样的“层”从土壤侵蚀的空间尺度上考虑,由宏观到微观,由区域到坡面,各层上选择最具代表性的指标作为依据,逐层筛选,最后确定监测点的空间位置。具体步骤是:区域尺度上以土壤侵蚀类型分区加以控制;流域/小流域尺度上通过土地利用结构与格局分析确定典型小流域;坡面尺度上则结合土地利用类型、坡度、植被、土壤等土壤侵蚀因子进行典型地块的抽取;最后结合已有监测点及地块的地理位置等确定监测点的空间位置。土壤侵蚀监测点布局的分层抽样步骤如图1所示。

## 3 土壤侵蚀监测点布局方法

### 3.1 区域尺度布局控制

3.1.1 控制因素选取 区域尺度上的控制因素应具有宏观性,采用统计特征值得指标,包括气候、地貌、土壤的地带性分异规律。我国地形起伏较大,由西向东横跨三大地貌阶梯,为土壤侵蚀提供了巨大的侵蚀动能;东部和东南部深受太平洋暖季风影响,降雨集中,且多暴雨;北部和西北地区受干旱、半干旱气候控制,荒漠风沙面积大;西南部新构造运动强烈,断裂褶皱形成的破碎岩层多;黄河中游黄土覆盖面积广,土层深厚疏松;南部地区气候暖热,雨量充沛,风化作用强烈<sup>[8]</sup>。

土壤侵蚀类型分区,又称水土流失类型分区,充分考虑了以上因素,根据土壤侵蚀外营力以及影响侵蚀发育的主导因素(包括地形地貌、土壤类型)的相似性和差异性,对区划单元进行分区,可以作为监测点布局在区域尺度上的控制因素。

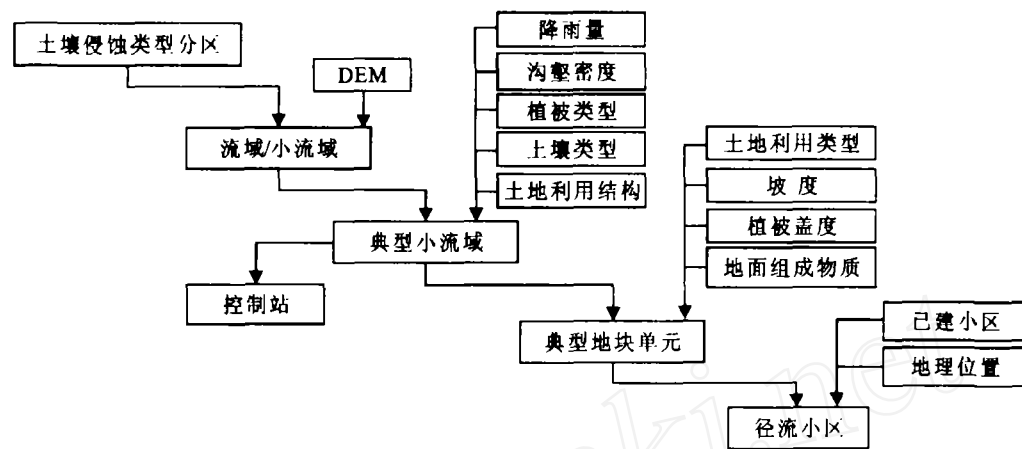


图 1 土壤侵蚀监测点布局步骤示意图

3.1.2 土壤侵蚀类型分区方法 土壤侵蚀类型分区可以直接采用我国已有的研究成果。1982年,辛树帜、蒋德麒<sup>[9]</sup>根据我国的地貌特点和自然界某一外营力(如水力、风力等)在较大区域起主导作用的原则,最早提出了我国土壤侵蚀类型区的划分,将我国划分为水力侵蚀区、风力侵蚀区和冻融侵蚀区3大类型区,其中以水力侵蚀为主的一级类型区又被划分为西北黄土高原,东北低山丘陵和漫岗丘陵,北方山地丘陵,南方山地丘陵,四川盆地及周围山地丘陵和云贵高原及其山地等6个二级类型区。1997年,水利部发布施行的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-96)<sup>[10]</sup>中,全国土壤侵蚀类型区划在原规定的基础上进行了调整,按土壤侵蚀的外营力不同种类将全国土壤侵蚀区划分为3个一级区,即水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀3大侵蚀类型区。根据地质、地貌、土壤等形态又在一级区划的基础上分为9个二级区,区划的类型区为:(1)水力侵蚀为主的类型区。包括5个二级区:西北黄土高原区、东北黑土区、北方土石山区、南方红壤丘陵区、西南土石山区;(2)风力侵蚀为主的类型区。包括两个二级区:三北戈壁沙漠及沙地风沙区和沿河环湖滨海平原风沙区;(3)冻融侵蚀为主的类型区。包括两个二级区:北方冻融土侵蚀区和青藏高原冰川侵蚀区。与此同时,土壤侵蚀类型分区还应该考虑水利部于2006年4月划定的42个国家级水土流失重点防治区,包括重点预防保护区(16个)、重点监督区(7个)、重点治理区(19个)。

### 3.2 小流域尺度布局控制

3.2.1 控制因素选取 流域是指地表水及地下水的分水线所包围的集水区域,或汇水区域因地下水分水线不易确定,习惯指地面径流分水线所包围的集水区域,我国水土流失综合治理即是以小流域为单元。小流域尺度上,土壤侵蚀是侵蚀动力因子(降雨、径流)和下垫面因子(土地利用、地形、土壤、植被)等综合作用的结果,土壤侵蚀评价应综合考虑这些因子的时空

变异特性。本文选择降雨量、沟壑密度、土壤类型、植被类型、土地利用结构等作为小流域尺度上监测点布局的控制因素。

### 3.2.2 典型小流域筛选方法

(1) 小流域划分。目前,我国已经绘制了全国一级、二级、三级流域界线图,在此基础上,进一步划分多级小流域。水土保持工作中的小流域是指面积小于50 km<sup>2</sup>的流域。根据实际工作的需要,可以有所调整。如北京市山区小流域定义为面积为10~30 km<sup>2</sup>的流域。传统的小流域划分方法是以地形图为基础,结合野外实地考察划定分水岭,分水岭闭合即形成小流域。目前,基于GIS的水文分析,利用DEM进行流域地形分析、水文要素提取得到了广泛应用。周玉喜<sup>[11]</sup>等基于1:1万的电子地形图,将北京市山区划分成547条小流域单元;陈加兵<sup>[12]</sup>等以1:10万的数字线划图为工作底图,内插生成福建省DEM,并自动提取了1435个小流域,结果表明,在山区的流域界线基本满足要求。

(2) 典型小流域筛选。区域、流域尺度可以采用多年平均降雨量作为侵蚀动力评价指标;沟壑密度可基于DEM,采用GIS水文分析功能提取沟道长度与流域面积之比计算得到;土壤类型、植被类型通过相关专题图和文字资料进行定性评价;采用统计分析即可获得每一类土地利用类型的面积及其比例。

对区域尺度类型区的降雨量、沟壑密度、土壤类型、植被类型、土地利用结构等控制因素与小流域内的结果进行对比分析,选择与区域尺度类型区的自然背景条件、社会经济条件具有最大相似性的小流域作为典型小流域,在典型小流域出口处布设控制站,安装流速仪、泥沙测定仪等观测装置,观测小流域的径流量、产沙量。

### 3.3 坡面尺度布局控制

3.3.1 控制因素选取 长期以来,土壤侵蚀机理研究大多集中在坡面尺度上,而多数土壤侵蚀模型的构

建都是基于地块单元的长期实验观测。地块单元,也称景观单元,可以定义为具有相同或相似地理环境特征的区域,它是小流域生态环境建设与管理的基本空间单元,地块单元在空间上组合起来,即构成了小流域的总体形态和地貌格局<sup>[6]</sup>。在一个地块单元内,所有地学特性如高程、坡度、坡向、土壤、温湿、热量及人为措施等都是—致或相近的,其地学参数相同或相近。地块单元一方面具有与实际土地利用单元的对应关系,同时还与地块所处的空间位置、地形、土壤、植被覆盖等因素有关。本文选择土地利用类型、坡度、地面组成物质、植被盖度作为土壤侵蚀监测点布局在坡面尺度上的控制因素。

### 3.3.2 典型地块单元筛选方法

(1) 地块单元划分。地块单元的划分要综合考虑多种因素,利用 GIS 的空间分析技术,采用小流域土地利用、坡度分级、地面组成物质、植被盖度分级等几个图层,经过空间叠加,分类归组,碎小地块归并,地块编码,属性赋值等,形成小流域地块单元图层,地块的大小取决于各因子图层的精度及下垫面条件的复杂情况。各因子图的提取是地块单元划分的重点, GIS 和 RS 技术提供了良好的数据源和技术手段,高分辨率的遥感影像能用于提取土地利用图和植被盖度图, GIS 与 DEM 的结合能提取坡度分级图。

(2) 典型地块单元筛选。将同一流域内具有相同土地利用、坡度、土壤类型、植被盖度属性的地块单元视为一个地块单元集合,各土壤侵蚀因子的分类组合即形成不同的地块单元集合。集合的数量在理论上等于各种因子分类后类别数的乘积。但是,对每一种集合进行监测会导致工作量大,因此可以从各因子组合条件下土壤抗侵蚀力大小出发,评价各集合的抗侵蚀能力,将具有相同抗侵蚀能力的集合,即“异构同功”的集合进行归类处理。利用 GIS 技术可以实现每一个地块单元所在集合的编码、归类,并统计集合中所含的地块数、面积、所占比例,从而确定小流域内主要土壤侵蚀因子集合类别。每一类地块集合内进行典型地块的抽样选取,并布设坡面径流小区、径流场等观测设施。

## 4 结论

土壤侵蚀的尺度效应给区域土壤侵蚀监测工作的开展带来了难度,作为全国水土保持监测网络的基点及基础数据源,监测点布局的重要性不言而喻。从土壤侵蚀的尺度效应着手,提出土壤侵蚀监测点的布局要从不同尺度上加以控制,采用分层抽样的方法,由宏观到微观,由区域到坡面,层层筛选。区域尺度

上以土壤侵蚀类型分区为控制因素,利用我国已有研究成果进行分区确定;小流域尺度以降雨量、沟壑密度、植被类型、土壤类型、土地利用结构为控制因素,筛选典型小流域;坡面尺度上选择坡面地块单元的土地利用、坡度、土壤、植被盖度为控制因素,通过影响因子的分析,筛选典型地块单元,并结合考虑已有监测点及地块单元的地理位置,确定监测点位置。

但是,不同尺度下的观测和研究结果在比较时往往也会出现分歧,即使最精确的小区数据,也可能产生很大的误差,这将严重限制监测点观测数据的使用,虽然尺度转换能有效解决这些问题,但是目前有关土壤侵蚀尺度转换的研究还处于探索阶段,尚没有全面而实用的尺度转换方法,这将是土壤侵蚀定量评价的研究热点问题,监测点布局的空间尺度效应考虑正是为将来的尺度转换方法研究提供基础。

### [参 考 文 献]

- [1] Robert Evans. Monitoring water erosion in lowland England and Wales: A personal view of its history and outcome[J]. *Catena*, 2005, 64: 142-161.
- [2] 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*, 2006, 18(2): 20-23, 31.
- [3] Cammeraat E L. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 317-332.
- [4] 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): 167-180.
- [5] 杨勤科,李锐. 中国水土流失和水土保持定量评价研究进展[J]. *水土保持通报*, 1998, 18(5): 13-18.
- [6] 李锐,杨勤科. 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.
- [7] 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): 2061-2067.
- [8] 史德明,史学正,梁音,等. 我国不同空间尺度土壤侵蚀的动态变化[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(5): 85-89.
- [9] 辛树帜,蒋德麟. 中国水土保持概论[M]. 北京:农业出版社, 1982.
- [10] 水利部水土保持司. 土壤侵蚀分类分级标准(SL190-96)[S]. 1997.
- [11] 周玉喜,段淑怀. “北京市水土保持生态环境管理信息系统”管理单元:北京山区小流域划分[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(6): 45-46.
- [12] 陈加兵,励惠国,郑达贤,等. 基于 DEM 的福建省小流域划分研究[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(2): 74-77.
- [13] 刘高焕,刘俊卫,朱会义. 基于 GIS 的小流域地块单元划分与汇流网络计算[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 139-145.