

土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应

倪九派, 魏朝富, 谢德体

(西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要:土壤侵蚀的空间尺度效应使得小尺度上观测到的大量数据无法得到有效的利用,给多空间尺度土壤侵蚀定量评价带来了困难和问题。对土壤侵蚀定量评价研究中的空间尺度效应及其机理和空间尺度转换方法进行了综述。分离、搬运和堆积子系统之间的协同效应与大尺度土壤侵蚀背景条件之间的协同效应是土壤侵蚀空间尺度效应产生的根本原因。在土壤侵蚀定量评价中,基本侵蚀单元地表参数的定量描述是建立土壤侵蚀空间尺度转换模型的基础。

关键词:土壤侵蚀定量评价;空间尺度效应;空间尺度转换;基本侵蚀单元

文章编号:1000-0933(2005)08-2061-07 中图分类号:S157.1 文献标识码:A

Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion

NI Jiu-Pai, WEI Chao-Fu, XIE De-Ti (College of Resources and Environment, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2061~2067.

Abstract: It has been a problem in multi-spatial-scale quantitative estimation of soil erosion that the substantive observational data based on small spatial scale could not be effectively utilized in analysis of larger spatial scale because of the scale effects. The effects of spatial scale and multi-spatial-scale quantitative estimation, as one of the key problems in soil erosion researches, is not only significant to the programming of soil and water conservation and the reasonable utilization of land in region, but also valuable to the application of “3S” to the study of soil erosion. The quantitative estimation of soil erosion, the effects of spatial scale and its influence on mechanism of soil erosion, and the method of space scaling in quantitative estimation of soil erosion are discussed in this paper.

The effects of spatial scale of soil erosion results from the joint effects of soil particle abruption subsystem, soil particle transportation subsystem and soil particle accumulation subsystem, and the integrating effect of background conditions of soil erosion in large spatial scale. When doing scaling up and analysis in an area, the monolithic characteristics becomes more and more legible, the average quantity of soil loss per area unit is decreasing with the increase of catchments area, the number and interrelation of the influencing factors are changed, and the essentiality of the influencing factors is transformed.

Presently, space scaling in quantitative estimation of soil erosion could be carried out in the surveillance network of soil and water conservation in USA, and in the quantitative estimation model of soil erosion based on GIS, in which the region is divided into many basic erosion units based on correlative factors of soil erosion, and the typical distributed parameter system is divided into many-concentrated parameter systems. The surface parameters of basic erosion unit is the basis of space scaling in quantitative estimation of soil erosion.

Key words: basic erosion unit; effects of spatial scale; quantitative estimation of soil erosion; space scaling

土壤侵蚀是当今人类面临的一种最普遍、持续性最强的地质灾害,被称为“蠕动的灾难”。每年因土壤侵蚀造成的经济损失较诸如滑坡、泥石流、地震等地质灾害更大,土壤侵蚀已成为我国乃至全球的重大环境问题之一^[1,2]。土壤侵蚀的空间尺度效应

基金项目:教育部重点科学技术资助项目(03111);重庆市科委孵化基金资助项目(017079)

收稿日期:2004-03-11;修订日期:2004-06-28

作者简介:倪九派(1976~),博士生,湖北孝感人,主要从事地理信息系统及土地资源管理与利用研究。E-mail:nijiupai@163.net

Foundation item: the Key Program of Ministry of Education in China(No. 03111)and the Hatch Program of Technological Council for Basic Research in Chongqing(No. 017079)

Received date: 2004-03-11; **Accepted date:** 2004-06-28

Biography: NI Jiu-Pai, Ph. D. candidate, mainly engaged in GIS and sustainable utilization of land resource. E-mail:nijiupai@163.net

和不同空间尺度土壤侵蚀定量评价的分析与研究作为目前土壤侵蚀研究中的热点问题之一,不仅对于区域性的水土保持规划和土地资源的合理利用有着重要意义,而且对于与空间尺度效应相联系的“3S”技术在土壤侵蚀研究中的应用有重要的理论与实用价值^[3]。一方面土壤侵蚀的空间尺度效应给不同空间尺度土壤侵蚀定量评价造成了困难和问题,限制土壤侵蚀观测数据的使用;另一方面又为不同空间尺度土壤侵蚀定量评价的研究增添了新的亮点。对土壤侵蚀的空间尺度效应进行系统的分析与评述,可以进一步认识土壤侵蚀定量评价方法与模型的适用条件和范围,有助于在实践中更好的运用这些方法与模型。作为生态环境建设主体工程的水土流失治理,已进入了大面积集中连片治理阶段^[4],需要多空间尺度上水土流失及其治理数据为政府对水土保持和生态环境建设等方面的宏观决策提供科学依据^[5],通过建立不同空间尺度间土壤侵蚀定量评价转换方法和模型,利用小尺度上实用的土壤侵蚀评价模型和观测数据,对区域水土流失进行定量预测与评价具有重要的理论与实践意义。

1 土壤侵蚀定量评价与空间尺度效应

土壤侵蚀是指地球表面土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力及人类不合理的生产活动等外力作用下所发生的各种破坏、分离(分散)、搬运(移动)和沉积的现象。目前,土壤侵蚀的定量研究主要是基于小区试验资料归纳得出^[6,7],实质上仅适用于侵蚀背景条件一定、尺度规模有限的试验区或田块土壤流失量的估算,是一种基于集中参数系统土壤侵蚀的定量研究。为了回避泥沙输移的非连续泥沙动力学难题以及土壤侵蚀量、暂时堆积量不易直接观测的困难,在具体评价时,往往来用简化处理的办法,将小区土壤的分离、搬运视为均衡发展过程,有多少土壤被扰动破坏,就有多少土壤流失离开小区,由于两者数量相等,就可以把反映土壤侵蚀的背景条件近似替代复杂多变的土壤流失条件。对于面积很小的试验地块而言,这种静态的平衡模式不会造成较大的偏差,但当地块面积增大,坡长随之增长,组成地块的众多小区彼此不再隔离时,土壤扰动破坏量实际并不等于土壤流失量的问题就会明显地暴露出来。一次降水过程或许可将相当多的土壤搬运到坡脚或地块的边界之外,但仍存在一定数量的土壤在中途堆积,也可因降水历时较短,大部分被扰动破坏的侵蚀产物滞留、堆积在途中,这种现象不仅在地块整体上可以出现,即使在田块内部也存在。各小区除本身产生土壤侵蚀量外,还接受上方相邻小区流失而至的土壤输入量和向下转移的输出量,由于输入与输出的不平衡,暂时堆积不可避免。正因如此,地块总体的土壤侵蚀模式不是分离—搬运(流失),而是分离—搬运—堆积一再分离一再搬运的递续性连锁形式。

对于区域,情况更为复杂,由于地形条件、植被类型及土壤结构、成分等空间变化的随机性及不同条件组合的随机性,决定了它是一种典型的、非线性的分布参数系统。随区域空间尺度的加大,这种分布参数特征愈强^[8]。因而,即使不考虑时间变化因素,区域内不同位置土壤流失量的定量评价也是一个不易解决的难题。整个区域土壤流失的总量,可以在系统的输出终端(如河流出口)通过测定水中泥沙量(即产沙量)予以确定。但仅根据产沙量大小无法确定泥沙来源于区域内部何处。因此,这种集中参数系统处理结果并不能真实地刻画以典型分布参数为特征的区域内部土壤侵蚀的强度和空间分布。国内外许多研究者一直在寻找合适的方法来解决基于分布参数系统为特征的区域土壤流失量的预报问题^[6]。然而由于区域所具有的非线性、分布参数特征以及侵蚀、搬运、堆积过程中泥沙输移的非连续性,要建立一个基于清楚的物理机制,适合区域的土壤流失量计算、预报的确定性方程几乎是不可能的。

土壤侵蚀的空间尺度问题源于其野外观测与数值模型应用之间的差距,在土壤侵蚀定量评价中,由于土壤侵蚀的空间尺度效应,使得小尺度上观测到的大量数据无法得到有效的利用^[9,10],使得卓有成效的前期工作难以再上新台阶,而解决这些问题的关键就是要建立不同空间尺度间的土壤侵蚀定量评价的转换方法与模型。

2 土壤侵蚀定量评价中空间尺度效应的机理

地球系统的空间异质性限制了从一个空间尺度到另一个空间尺度的信息转换,是空间尺度效应产生的根本原因^[11]。空间尺度转换要求标识现象随尺度变化的非线性过程,即找到关键阈值,阈值之下保持线性变化,跨越阈值产生非线性变化。寻求不同空间尺度下适宜的土壤侵蚀理论和规律,不仅是水土保持科学自身发展的需要,而且关系到人类的生存环境,是带有挑战性的水土保持科学前沿领域。土壤侵蚀机制的研究结果表明^[12],土壤侵蚀是分离、搬运和堆积3种相互联系、相互作用的地质营力共同作用的结果。虽然分离、搬运和堆积的表现形式、发生发展的物理机制不同,但它们是相伴而生与互为因果的。所以广义的土壤侵蚀可以理解分离、搬运和堆积过程,虽然在具体问题上分析的角度和侧重点可以不同,但将分离、搬运和堆积三者孤立或忽视某一方面则不可取。正是因为分离、搬运和堆积的共同作用,才有现今所见岩、土物质分布的格局和地表的外观形态。在区域性的土壤侵蚀过程中,分离、搬运和堆积具有一定的结构性,这种结构性一方面决定了分离、搬运和堆积产物的时空分布特征,体现出区域系统的组织状况;另一方面通过多种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。因此,分析分离、搬运和堆积的层次结构特征和空间尺度变化产生的效应是区域性土壤侵蚀定量评价、防治对策研究中不可回避的两个重要问题。

2.1 分离、搬运和堆积子系统之间的协同效应

与一般具有连续性物理场的系统不同,区域分离、搬运和堆积的空间结构具有嵌套性,即大级别的分离、搬运和堆积系统中

嵌套小级别分离、搬运和堆积子系统的结构特点是区域系统所共有的,且具有明显的方向性和分支特征^[13]。在同一分支中,分离、搬运和堆积的作用沿着地面径流的流动方向由小到大嵌套起来,高层次的分离、搬运和堆积系统嵌套着低层次的分离、搬运和堆积子系统,低层次的子系统各自又包含着更低级别的分离、搬运和堆积作用和产物。在一个分离、搬运和堆积子系统中,分离、搬运和堆积作用顺次发展形成不可逆过程,不同层次的分离、搬运和堆积子系统以地表分水岭、坡面的分水脊线等作为边界,所以在垂直径流方向上,不同分支的子系统之间没有水量和土壤输移量的交换。正是这种结构的方向性和分支特点,才使分离、搬运和堆积作用在空间上分布不均匀,局部分离、搬运和堆积子系统的相对独立性可以明显地显示出来,土壤侵蚀严重区中存在侵蚀轻微的局部地段;侵蚀轻微区中也夹杂严重侵蚀地段。类似现象在野外随处可见,森林与边缘裸地荒山的鲜明对照,保留原生土壤的界面与母岩裸露的沟谷共存。然而,随研究范围的扩大,分离、搬运和堆积系统层次的提高,土壤侵蚀的宏观特征及分离、搬运和堆积的整体行为将会以不同于低层次子系统的全新性质表现出来。

区域分离、搬运和堆积结构实质是区域系统内部自组织过程的具体体现。区域系统与外界环境的密切联系,以及土壤侵蚀与各影响要素的非线性时变的关系是发生自组织过程的基本前提。在这个前提下,土壤、植被、坡形等背景条件与降水作用的协同不仅制约着共同作用过程中诸因素的关系以及作用大小的排列顺序,而且最终决定着分离、搬运和堆积作用强度和移动土壤的时空分布格局^[14]。正因如此,多个低层次的分离、搬运和堆积子系统组成较高层次分离、搬运和堆积系统时,低层次子系统的相互作用发生协同,可使高层次系统呈现出不同于构成它的子系统的性质和特征,这正是土壤侵蚀研究中空间尺度效应产生的原因之一。

2.2 大尺度土壤侵蚀背景条件的协同效应

土壤侵蚀的空间尺度效应除与分离、搬运和堆积系统结构有关外,大尺度土壤侵蚀背景条件的协同效应也是其重要原因。不同影响因素有不同的空间变异特性及局限性,某种因素的明显变化只发生在一定大小的空间尺度内,在特定的空间尺度内面积的缩小或放大,变异度不持续增大,而是维持某一特定水平^[15]。如坡形因子,受高差和水平长度的制约,变异最明显的是中、小空间尺度。当空间尺度较小时,高度的变化与水平长度的比值可以很大,坡度可以很陡,当空间范围扩大到数百乃至数千平方公里时,水平长度的增长速率远超过高差增长的速率,两者的比值就会变得很小,以致显示不出地形起伏的明显差异。所以,在中、小空间尺度范围内,土壤侵蚀的宏观状态与地形的变化关系密切、而在大空间尺度中,地形的作用就显得不十分突出了。与此相反,降水的变异往往表现在大的空间尺度上,降水分布的宏观规律往往与气候分带有关,当土壤侵蚀研究尺度跨越不同的气候分带时,降水宏观特征的变化较明显,而在中、小区域内,除局部小气候的改变和降水细节的差异外,宏观规律变异不明显。当研究尺度在中、小范围内变化,降水的变异速率不会很大,降水因素往往在相当大的空间尺度才表现为主导因子地位。

由各种影响因素协同实现的区域系统分离、搬运和堆积自组织过程具有这样一种特性,即某一因素单独作用与多因素综合作用有质的区别,一种因素发生变化可以使其它因素作用增强或弱化^[16]。在标准试验小区的条件下所获得的统计结果,归纳的关系不一定能代表条件改变后诸因子的关系,这是因为在多因素综合作用的非线性时变系统中,试图通过线性统计分析方法分离某一要素的单独贡献往往是行不通的。同时有限的对比试验不可能包容以不同速率变化的多因素全部组合形式和随空间大小的改变而导致的结果。所以,将标准小区的研究方法和各变量的关系不加思考地拓宽到区域性研究时就可能严重失真。

3 土壤侵蚀定量评价中空间尺度效应的表现

尺度问题是地理学和生态学研究的基本问题之一,其基本的假定是:描述物理现象的数学关系式依赖于尺度,即不同尺度下的数学表达式是有区别的^[17]。空间尺度是研究对象或现象在空间上的量度,它标志着对所研究对象细节的了解水平。微观尺度上的土壤侵蚀问题与物理学研究的对象几乎一致,基于连续介质的力学原理。但是随着空间尺度的扩展,原来的理论模型就需要大量的简化和再参数化,以适应新的情况,而且空间尺度扩大到一定程度时,原来的“机理”就模糊到一种几乎无法辨认的程度。随着研究区范围的扩大,土壤侵蚀的空间尺度效应主要表现在 4 个方面:(1)土壤侵蚀的宏观特征更为明显;(2)单位面积的径流产生量减少,同时径流含沙量下降,从而表现出单位面积平均土壤流失量随流域集水面积的增大而表现出递次减小的规律;(3)影响土壤侵蚀或流失的主要因素数目和相互关系发生改变;(4)影响因素的主次排序发生易位。

3.1 区域化现象

大量土壤侵蚀研究的成果说明,随着研究范围大小的变化,土壤侵蚀的整体特征会出现质的差异。当研究的面积较小时,虽然可以观察到具体的分离、搬运和堆积现象,但很难划分“侵蚀区”和“堆积区”,即使划分出来,也难以确定影响因素的主次排序。在不同地段,主要影响因素可以完全不同,或以坡形变化为主或以植被条件为主,也可突出地表现为土壤或母质抗蚀能力的差异。当研究面积不断扩大到一定程度时,宏观的侵蚀区、堆积区的轮廓就会清晰地显现出来,与此同时,地貌特征、河流形态、植物群落乃至气候都相应地表现出与分离、搬运和堆积相契合的分区规律^[18]。

3.2 单位面积平均土壤流失量非线性减少

随着研究空间尺度的放大,研究区单位面积平均土壤流失量随流域集水面积的增大表现出递次减小的规律。产生这种现象

的原因可能来自两个方面:一是随研究区域的扩大,流量过程对降雨过程的响应随着流域面积增大而减弱^[19],小尺度上的降水与地表通量可以认为是相互独立的,降雨径流系统也相对简单,在大的流域尺度,降水与地表通量有密切的联系,而且降水径流系统会变得高度非线性;二是随研究区域的扩大,径流含沙量下降。娄水流域水文观测资料显示,在其五级竹耳湾流域,水中含沙量的平均值为 $1.94\text{kg}/\text{m}^3$,在其三级支流的红岩溪流域,水中含沙量的平均值为 $1.39\text{kg}/\text{m}^3$,当范围扩展为一级支流的娄水流域,水中含沙量的平均值明显下降,仅为 $0.51\text{kg}/\text{m}^3$ 。对这种空间尺度效应,美国土壤保持局也进行过详细的研究,结果也证实了随集水面积增大,总的输沙率呈下降的趋势^[20],两者具有非线性的反比关系。

3.3 主要影响因素的数目和相互关系发生改变

随着空间尺度的加大,区域整体土壤侵蚀趋向明朗化的同时,各种背景条件的关系随之改变。局部条件的变化可加速原有的侵蚀过程或原有的堆积过程,一种因素变化速率的增长可使其它因素的作用受到抑制或强化,土壤侵蚀量或土壤流失量与某种因素的定量关系也随之变化^[21]。一般认为,坡度是控制侵蚀强度的重要因素,坡度增大侵蚀强度也相应增大,但利拉德、尼尔等人的野外研究却否定了这一点,他们指出,不是所有的研究都表明侵蚀量一定随坡度的增加而增加。同样,坡长增加侵蚀强度也随之增大的认识也被威斯奇迈尔、莱尔等人的研究所动摇。产生这些问题的原因可能来自两个方面,首先,土壤侵蚀是多因素综合作用的过程,当某一因素量的变化处于一个特定的变化域内,可与土壤侵蚀量保持近似线性或非线性的统计关系,一旦该因素量的改变突破其阈值时,原有的统计关系也随之变异^[22];另外,各因素与土壤侵蚀量之间的统计关系不同,可能产生变异的阈值也不同。当坡度或坡长的改变超过相应的阈值时,而其它因素的量仍处于各自阈值区内,坡度、坡长与其它因素的组合关系就会形成新的协同形式,并最终表现为某些因素异军突起,掩盖或破坏了坡度或坡长与土壤侵蚀量的原先统计规律。

3.4 影响因素的主次排序易位

研究尺度的扩大除了使土壤侵蚀的宏观特征随系统层次的提高而发生改变外,还使各种影响因素在土壤侵蚀条件中的主次地位排序改变。利用模糊综合评判方法和地理信息系统处理手段确定的研究区土壤侵蚀单元内主因子排序反映出这样的规律:单个土壤侵蚀单元(一般小于 5km^2)有的以坡形为主要影响因素,有的则以土壤性质或植被条件为主^[23]。然而,当研究尺度放大到 800km^2 时,区域土壤侵蚀要素的宏观排序变为岩土性质>植被条件>地形坡度>降雨特征>人口密度(表征人为活动的强弱)。国外一些学者对这种现象也做过类似的研究,虽然他们发现在不同的地区主导因素不同,但影响因素排序随空间尺度变化而易位的现象却是普遍存在的^[24]。

4 土壤侵蚀定量评价中的空间尺度与其转换方法

传统上,绝大多数土壤侵蚀实验和理论研究都是在小的空间尺度上进行的,而对于大空间尺度土壤侵蚀的实验操作与可控制研究十分有限,这使得在广阔空间尺度上对土壤侵蚀格局与过程的理解受到了极大限制^[25]。因此,发展如何将小空间尺度下获得的数据转换和外推到大空间尺度的原理与技术就显得格外重要。空间尺度转换就是跨越不同空间尺度的辨识、推演和预测,通过数据适宜尺度的影响因子分析与数据尺度效应分析,将不同空间尺度上的研究数据有机的结合起来,实现多尺度异构数据的互操作^[26]。由于空间尺度转换问题的复杂性,空间尺度转换往往采用数学模型和计算机模拟作为其重要工具,通过控制模型的粒度和幅度来实现。

4.1 土壤侵蚀定量评价研究中空间尺度的划分

目前,土壤侵蚀定量评价研究已在各个空间尺度上展开,空间尺度从小到大基本是分为:小区—地块—坡面尺度—小流域尺度—流域尺度—区域尺度—国家尺度—全球尺度^[27]。尽管对土壤侵蚀的空间尺度已经有所划分,但实际上,由于不同研究者研究目的和方法的不同,人们对土壤侵蚀的认识和研究尺度的选择存在明显的差异^[28]。土壤物理、土壤肥力等研究者主要关心土地农业生产相关问题,如土壤养分流失、土壤水分亏缺、土地荒漠化等,研究尺度较小,侧重于地块和坡面研究;环境保护与水源保护研究者侧重于土壤侵蚀产生的面源污染,以中小尺度为主;而流域水文和灾害防治研究者侧重于产流产沙过程、径流过程、水调节能力等研究,多在中尺度上进行。

4.2 土壤侵蚀定量评价研究中空间尺度转换方法

土壤侵蚀定量评价的空间尺度转换就是在各种技术的支撑下,将小空间尺度上的观测数据和模型合理地应用于大的空间尺度,实现大空间尺度的土壤侵蚀定量评价。目前土壤侵蚀定量评价中的空间尺度转换方法主要有两种:一是美国的水土保持监测网络^[29];二是在地理信息系统(GIS)的支持下,将大空间尺度上的典型分布参数系统剖分成若干个集中参数子系统^[30~33],以坡面土壤侵蚀定量预测评价模型为基础进行。

4.2.1 土壤侵蚀监测预报网络系统

为进行区域水土流失的定量预测与评价,美国农业部建立了一个全国性的土壤侵蚀监测预报网络系统,在全国布设了 80 万个监测点,有 10 000 余名专职人员对土壤侵蚀状况进行预报和长期监测。在庞大的监测数据的支持下,能对各空间尺度上的土壤侵蚀做出较为合理的定量评价。但目前除美国外,还没有其它国家建立如此完善的决策系统,土壤侵蚀定量评价研究中空间尺度转换大多是在 GIS 的支撑下进行的。

4.2.2 GIS 支持下的土壤侵蚀定量评价

(1)基本侵蚀单元的划分与归类 标准的试小区有边界与外部地块隔离,构成一个完整的分离、搬运和堆积系统。小区内部土壤分离、搬运和堆积过程并未受到相邻地块分离、搬运和堆积过程的干扰影响。而由众多地块耦合而成的区域内,绝大部分地点土壤侵蚀的分离、搬运和堆积过程与上游或相邻地块的分离、搬运和堆积过程相耦合^[34,35]。所以应用小区试验资料归纳得出土壤侵蚀模型对区域土壤流失估算的结果并不能代表各单元实际产生的流失量,只能说是计算对象在相应侵蚀背景条件下可能产生的土壤流失量。若从量化侵蚀背景条件这一角度来分析,利用小尺度土壤侵蚀模型模拟侵蚀背景条件的优势是明显的,它可以让们从多因子、多变量的角度模拟空间上不同因子、不同组合状态下土壤侵蚀的相对差异程度,确定不同影响因子与不同侵蚀强度的互相联系。运用小尺度土壤侵蚀模型来量化模拟区域的侵蚀背景条件,首先要求将区域按某种原则划分成若干个集中参数的基本单元。在这个基本单元内,其土壤类型、坡度和植被类型以及覆盖程度可被视为均一,并以相对稳定的形式组合,这种单元称之为基本侵蚀单元。

对一个结构稍为复杂具有一定规模的区域,当几种主要影响因子在空间上表现较强的随机变化时,其空间上的随机组合可产生许多类型的基本侵蚀单元,组合类型的数量在理论上等于各种因子分类后的乘积。显然,要分别确定不同种类单元各因子的影响值无论从资料、时间等方面都不现实。必须对侵蚀单元的分类结果进行更高层次的归类处理,这种归类处理的可行性基于下述考虑:空间上不同位置土壤侵蚀的严重程度取决于降水和径流侵蚀力大小与由土壤、植被和地形条件组合一起的抗蚀能力大小^[36]。当研究空间并未跨越不同气候带时,降水特征空间上变化并不显著,土壤侵蚀程度的严重与否更多取决于抗蚀影响因子组合条件类型。不同基本单元类型中,一方面因组合方式不同而具有不同的抗蚀能力;另一方面,尽管组合方式不同,但单元总体的抗蚀能力可能相近,这是系统功能的“异构同功”,表现在研究过程中,模糊聚类可将“异构同功”的侵蚀单元进行更高层次的归类处理。

土壤侵蚀定量评价中基本侵蚀单元的划分与归类应采用以尺度空间理论为基础的多尺度空间单元区域划分方法^[37~39]。通常的空间单元区域划分方法是以其属性信息为主要划分依据,而对单元空间分布及其相互之间的依赖关系等空间要素考虑不全。作为地理区域划分的重要方法之一,聚类分析就是按照一定标准来鉴别地理区域或实体、现象之间的接近程度,并将相接近的归为一类的数学统计方法,这种方法的关键是选择刻画对象间接近程度的指标体系和具体标定函数。多尺度空间单元区域划分方法以空间单元的多尺度融合和聚类分析为基础,实质是进行聚类分析时要考虑单元之间的空间关系,以相邻关系作为空间单元之间的相互关系来说明一定尺度下空间单元的聚类过程。当空间尺度参数充分小时,每一空间单元是一个类别;而当尺度逐渐变大时,小的空间单元类逐渐融合而形成大的空间单元类;直到尺度充分大时,所有空间单元类融合形成为一个大类。

(2)土壤侵蚀的估算 不同的空间尺度对土壤侵蚀估算结果的精度要求不一样,同时,不同空间尺度下,基本侵蚀单元划分的原则和依据也各不相同^[40],土壤侵蚀量的估算是分为两个层次进行的:一是基本侵蚀单元土壤侵蚀量的估算,基本侵蚀单元本身是一个集中参数子系统,其土壤侵蚀量可由小空间尺度上已建立的模型直接估算。估算出了每一基本侵蚀单元的土壤侵蚀量,就可以清楚的知道研究区域土壤侵蚀的空间分布与侵蚀强度,为区域内具体水土保持措施步设提供依据。二是研究区域土壤侵蚀量的估算,在研究区域数字高程模型(DEM)的支撑下,分析研究区域基本侵蚀单元之间的拓扑关系,识别区域土壤侵蚀中的“源—汇”生态过程,得到研究区域土壤侵蚀量的估算量,为宏观水土流失治理决策服务。

从目前土壤侵蚀定量评价研究中空间尺度转换方法可知,空间尺度的转换是通过近似替代的方法来进行的,而对土壤侵蚀空间尺度转换的核心“不同空间尺度之间土壤侵蚀非线性关系的识别”还没有取得创造性的成果,更谈不上建立实用的数值模型。今后土壤侵蚀定量评价空间尺度转换的研究重点应是借鉴生态学中尺度和尺度转换研究的理论与方法,以期建立完备的土壤侵蚀定量评价空间尺度转换的方法和模型。

5 结语与讨论

(1)土壤侵蚀的空间尺度效应使得在小尺度建立的土壤侵蚀模型无法在大的空间尺度上得到有效的运用,给多空间尺度土壤侵蚀的定量评价带来了一系列的问题和困难。就目前的土壤侵蚀研究而言,大空间尺度的研究可能会提出一些问题,但答案的寻求仍会在小尺度上完成。因此,进行土壤侵蚀空间尺度效应和空间尺度转换的研究是必须和迫切的。与生态学中尺度和尺度转换的研究相比,土壤侵蚀的尺度与尺度转换的研究才刚刚起步。今后土壤侵蚀的尺度与尺度转换的研究的重点应是借鉴生态学中尺度和尺度转换研究的理论与方法,以期建立完备的土壤侵蚀的尺度与尺度转换的方法和模型。

(2)造成土壤侵蚀空间尺度效应的分离、搬运和堆积子系统之间的协同效应与大尺度土壤侵蚀背景条件的协同效应一方面给多尺度土壤侵蚀定量评价造成困难,另一方面又给土壤侵蚀的防治提供了新的思路。产生土壤侵蚀的条件中,有些是可以人为控制和改造的,如坡形、植被等;有些在目前科学发展水平下还不能加以控制,如降水、岩土的分布等。据协同学关于“快速衰减组态被迫跟随于缓慢增长的组态”以及“通过子系统间的相互作用,整个系统将形成整体效应的自组织”的原理,可以通过人为改变植被、坡形等可控条件,使阻滞因素强化、不可控因素跟随其后,以抑制或减缓土壤侵蚀的发生速率^[41]。

(3)由土壤侵蚀的分离、搬运和堆积系统嵌套结构形式所决定,隔离机制的运用是实现水土保持的有效方法。同时由于土壤侵蚀的分离、搬运和堆积系统嵌套结构具有分支特点,所以水土流失治理应首先从低层次的分离、搬运和堆积子系统着手,以保证不受相邻子系统的干扰。另外,改善坡度、设置植被屏障等具体工程应以分水岭或坡地的分水脊线附近的地块为重点^[42],逐步向下方推进。

(4)地理信息系统作为一种特别适用描述、量化分布参数系统的工具,它可充分地利用已有的各种资料、数据和遥感信息来量化土壤侵蚀背景条件,模拟潜在的和现实的土壤侵蚀强度,土壤侵蚀定量评价空间尺度转换方法和模型的实现必然要以地理信息系统作为技术支撑,“3S”技术在多空间尺度土壤侵蚀定量评价中的应用研究将显得越来越重要。

References:

- [1] Fu T, Ni J P, Wei C F, *et al.* Recent development of sloping field erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(3): 123~128.
- [2] Luis P. Helping states slow sediment movement. *Agricultural Research*, 2003, **51**(12): 12~14.
- [3] Poesen J W, Boardman J, and Wilcox B, *et al.* Water erosion monitoring and experimentation for global change studies. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, **51**(5): 386~390.
- [4] Zhang X P. Technique and procedure of establishing environmental context database of Chinese soil erosion based on GIS. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, **20**(1): 48~50.
- [5] Hu L J, Li R, Yang Q K. Region-scaled water erosion assessment based on GIS. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, **38**(1): 36~43.
- [6] Ni J P, Fu T, Li R X, *et al.* Supplying Geographical Information System ARC/INFO to predict soil erosion of watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(4): 29~32.
- [7] Benik S R, Wilson B N, Biesboer D D, *et al.* Evaluation of erosion control products using natural rainfall events. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **58**(2): 98~105.
- [8] Xu H L, Chen Z H, Gao Y F, *et al.* A methodology of soil erosion evaluation on slope system. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1997, **22**(6): 652~655.
- [9] Bob E. Soil erosion at multiple scales: Principles and methods for assessing causes and impacts. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(6): 2047~2048.
- [10] Ni J P, Fu T, He B H, *et al.* Assessment on danger of soil erosion in Sanhe ecological orchard based on GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(1): 62~66.
- [11] Zhang R H, Sun X M, Su H B, *et al.* Remote sensing and scale transferring of levity parameters on earth surface. *Remote Sensing for Land and Resource*, 1999, **3**: 51~58.
- [12] Mamedov A I, Shainbery I, Levy G J. Rainfall energy effects on runoff and interrill erosion in effluent irrigated soils. *Soil Science*, 2000, **165**(7): 535~544.
- [13] Ingram J, Lee J, Valentin C. The GCTE Soil Erosion Network: A multi-participatory research program. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, **51**(5): 377~380.
- [14] Kirkby M J, Imeson A C, Bergkamp G, *et al.* Scaling up processes and models from the field plot to the watershed and regional areas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, **51**(5): 391~396.
- [15] Qin Y S, Yu X X, Chen L H, *et al.* Spatial scale effects of runoff on the water resource conservation forest watershed within the Miyun reservoir basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(6): 913~918.
- [16] Lowrance R, Hubbard R K, Woodland R. Effects of a Managed Three Zone Riparian Buffer System on Shallow Groundwater Quality in the Southeastern Coastal Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **55**(2): 212~220.
- [17] Lü Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2096~2015.
- [18] Ni J R, Li Y K. Dynamic assessment for soil erosion based on Land-use structure change. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(5): 611~621.
- [19] Fu G B, Li L J, Liu C M. Scale issues on the applications of remote sensing to hydrology. *Advance in Earth Sciences*, 2001, **16**(6): 755~760.
- [20] Cocbrane T A, Flanagan D C. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, **51**(4): 678~685.
- [21] Keller A, Abbaspour K C, Schulin R. Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(1): 175~187.
- [22] Benik S B, Wilson N, Biesboer D D, *et al.* Evaluation of erosion control products using natural rainfall events. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **58**(2): 98~105.
- [23] Vrieling A, Sterk G, Beaulieu N. Erosion risk mapping: A methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **57**(3): 158~163.
- [24] YU B. A unified framework for water erosion and deposition equation. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(1): 251~257.
- [25] Napier T L, Bridges T. Adoption of conservation production systems in two Ohio watersheds: A comparative study. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **57**(2): 229~235.
- [26] Su L H, Li X W, Huang Y H. An review on scale in remote sensing. *Advance in Earth Sciences*, 2001, **16**(4): 544~548.
- [27] Wang J Q, Lu Z H. Study on impact of land use changes on the hydrological system. *Advance in Earth Sciences*, 2003, **18**(2): 292~298.

[28] Scott N M,William G K,Megan H M,*et al.* Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association*,2002,**38**(2):915~929.

[29] James E E,Norman S L,Sheila J R,*et al.* Assessment using GIS and sediment routing of the proposed removal of Ballville Dam, Sandusky River, Ohio. *Journal of the American Water Resources Association*,2002,**38**(6):1549~1565.

[30] Niu Z G,Li B G,Zhang F R,*et al.* Modeling of soil water replenishment in catchments based on GIS. *Shuili Xuebao*,2003,**2**:73~77.

[31] Michael W V L,Jurgen G. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*,2002,**38**(2):413~426.

[32] Chen R S,Kang E S,Yang J P,*et al.* A distributed daily runoff model of inland river mountainous basin. *Advance in Earth Sciences*, 2003,**18**(2):198~205.

[33] Mary L C,Steward T A P,Kathleen C W,*et al.* An interdisciplinary and synthetic approach to ecological boundaries. *Bioscience*,2003,**53** (8):717~722.

[34] Fu T,Ni J P,Wei C F,*et al.* Research on nutrient loss from terra gialla soil in Three Gorges Region under different rainfall intensity. *Journal of Soil and Water Conservation*,2002,**16**(2):33~35.

[35] Fu T,Ni J P,Wei C F,*et al.* Research on nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2003,**9**(1):71~74.

[36] Sohngen B,Nakao M. The Effect of Site Quality on the Costs of Reducing Soil Erosion with Riparian Buffer. *Journal of Soil and Water Conservation*,2000,**55**(2):231~237.

[37] Luo J C,Zhou C H,Liang Y,*et al.* Scale-space theory based regionalization for spatial cells. *Acta Geographica Sinica*,2002,**57**(2):167~173.

[38] Yi H W,Tang G A,Liu Y M,*et al.* Stream runoff nodes and their derivation based on DEM. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003,**17**(30):108~111.

[39] Zuo W,Zhang G L,Wan B W,*et al.* Study of determining the GIS raster size in mid-scale ecological assessment research. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2003,**32**(3):268~271.

[40] Chris J J,Gary W P,Paul G C,*et al.* Remote sensing changing natural resource management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003,**58**(2):42~45.

[41] Ni J P,Fu T,He B H,*et al.* Model of sustainable utilization of land resource of small watershed in Three Gorges area. *Transactions of the CSAE*,2002,**18**(6):182~185.

[42] Ni J P,Fu T,Lu Y D,*et al.* Study on pollution control of agricultural nonpoint source by mean of buffer strips. *Environmental Pollution and Control*,2002,**4**:229~231.

参考文献:

[1] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 坡耕地土壤侵蚀研究进展. *水土保持学报*,2001,**15**(3):123~128.

[4] 张晓萍. 基于GIS实现的中国土壤侵蚀背景数据库若干技术问题. *水土保持通报*,2000,**20**(1):48~50

[5] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于GIS的区域水土流失评价研究. *土壤学报*,2001,**38**(1):36~43

[6] 倪九派,傅涛,李瑞雪,等. 应用ARC/INFO预测芋子沟小流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持学报*,2001,**15**(4):29~32.

[8] 徐恒力,陈植华,高云福,等. 坡地系统土壤侵蚀定量评价方法. *地球科学——中国地质大学学报*,1997,**22**(6):652~655.

[10] 倪九派,傅涛,何丙辉,等. 基于GIS的丰都三合水土保持生态园区土壤侵蚀危险性评价. *水土保持学报*,2002,**16**(1):62~66.

[11] 张仁华,孙晓敏,苏红波,等. 遥感及其地球表面时空多要素的区域尺度转换. *国土资源遥感*,1999,**3**:51~58.

[15] 秦永胜,余新晓,陈丽华,等. 北京密云水库流域水源保护林区径流空间尺度效应的研究. *生态学报*,2001,**21**(6):913~918.

[17] 吕一河,傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*,2001,**21**(12):2096~2015.

[18] 倪晋仁,李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估. *地理学报*,2001,**56**(5):611~621.

[19] 傅国斌,李丽娟,刘昌明. 遥感水文应用中的尺度问题. *地球科学进展*,2001,**16**(6):755~760.

[26] 苏理宏,李小文,黄裕霞. 遥感尺度问题研究进展. *地球科学进展*,2001,**16**(4):544~548.

[27] 王建群,卢志华. 土地利用变化对水文系统的影响研究. *地球科学进展*,2003,**18**(2):292~298.

[30] 牛振国,李保国,张凤荣. 基于GIS的流域土壤水分补给量的模拟研究. *水利学报*,2003,**2**:73~77.

[32] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 内陆河流域分布式日出山径流模型. *地球科学进展*,2003,**18**(2):198~205.

[34] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响. *水土保持学报*,2002,**16**(2):33~35.

[35] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究. *植物营养与肥料科学*,2003,**9**(1):71~74.

[37] 骆剑承,周成虎,梁怡,等. 多尺度空间单元区域划分方法. *地理学报*,2002,**57**(2):167~173.

[38] 易红伟,汤国安,刘咏梅,等. 河网径流节点及其基于DEM的自动提取. *水土保持学报*,2003,**17**(30):108~111.

[39] 左伟,张桂兰,万必文,等. 中尺度生态评价研究中格网空间尺度的选择与确定. *测绘学报*,2003,**32**(3):268~271.

[41] 倪九派,傅涛,何丙辉,等. 三峡库区小流域土地利用优化模式的研究. *农业工程学报*,2002,**18**(6):182~185.

[42] 倪九派,傅涛,卢玉东,等. 缓冲带在农业非点源污染防治中的应用. *环境污染与防治*,2002,**4**:229~231.