

异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异

邱 扬¹, 傅伯杰²

(1. 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875; 2. 中国科学院生态环境研究中心系统生态开放实验室, 北京 100085)

摘要:综述了景观格局与水土流失过程的空间变异与尺度变异的理论和方法研究进展, 提出了水土流失空间变异与尺度变异的研究方向。景观格局与生态过程的尺度变异一般处于单一尺度变异和多重尺度变异的连续体之中。尺度转换即尺度外推包括尺度上推和尺度下推, 其可行性决定于尺度变异特征。

水土流失不仅是多因子综合影响的一个复杂的时空变异过程, 而且也是一个典型的多重尺度变异过程。传统的水土流失研究一般集中在坡面径流小区和小流域两个单一尺度上, 这在很大程度上限制了水土流失的空间尺度外推和过程分析。近年来, 尽管国内外很多学者开始关注水土流失的尺度变异及其影响因子, 但只是对水土流失在不同大小的样地尺度以及小集水区尺度上的差异及其影响因子进行了初步的比较研究, 尤其缺乏水土流失及其相关环境因子的连续尺度变异特征的机制分析。

空间变异和尺度变异研究方法包括统计模型模拟法、物理模型与物理过程模拟法以及综合分析 with 综合预报法三大类。每种方法都有其优缺点和其特定的适宜性, 最佳方法组合的选取因研究对象、研究地区和研究时间的不同而异。土壤侵蚀预报模型包括经验统计模型和物理过程模型, 就解决水土流失的跨尺度关系而言, 基于物理过程的空间分布式的土壤侵蚀预报模型显著优于经验模型。这些模型在关键参数的空间变异性描述和水土流失的尺度变异性分析方面非常薄弱, 尤其缺乏模型分辨率和研究范围对输出结果的影响研究。

完善水土流失的“尺度-格局-过程”理论, 加强多重尺度上水土流失及其相关环境因子的空间变异格局和尺度变异性的实地观测与数学分析, 改进土壤侵蚀预报模型这 3 个方面是将来的研究重点。

关键词:景观格局; 水土流失; 空间变异; 尺度变异; 尺度转换; 土壤侵蚀模型

Spatial variation and scale variation in soil and water loss in heterogeneous landscape: A review

QIU Yang¹, FU Bo-Jie² (1. Department of Resources and Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Department of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 330~337.

Abstract: This paper reviewed the studies on the theory and methods for the spatial variation and scale variation in landscape pattern and soil and water loss, and discussed the advance in scale and scaling of soil and water loss. Actually, the continuum between simple scaling and multiscaling is more common in nature. Whether both scaling-up and scaling-down are possible or not is related to the scale variation property. In general, it is probable for scaling up or scaling down with simple scaling, while it is not with multiscaling.

For the soil and water loss, a complicated process with spatiotemporal variation, it shows a significant multiscaling characteristic. However, traditional studies on soil and water loss were conducted at plot scale or catchment scale solely, so these studies could not explore the scaling up or scaling down and the processes analysis on soil and water loss. In recent

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(40201003); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90102018); 中国科学院系统生态重点实验室基金资助项目(200301)

收稿日期: 2003-05-25; 修订日期: 2003-10-04

作者简介: 邱扬(1969~)男, 四川仁寿人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态与土地质量、干扰生态与植物生态、土壤侵蚀与水土保持研究。

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40201003 and No. 90102018); Foundation of Key Lab. for Systems Ecology, CAS (No. 200301)

Received date: 2003-05-25; **Accepted date:** 2003-10-04

Biography: QIU Yang, Ph. D., Associate professor, study on landscape ecology and land quality, disturbance ecology and plant ecology, soil erosion & soil and water conservation. E-mail: qiu yang69@263. net qiu yang69@sohu. com

decades, only a little attention was paid on the comparing analysis of soil and water loss between plots with different size and the first-order catchment. However, it is scare though necessary to study the continuous scaling characteristics of soil and water loss and their relation to the environmental factors. In China, much attention was given to the study on soil erosion at plot scale and the simulation of soil and water loss at catchment scale and their relation to the environmental factors, while little was done with scaling variation in landscape pattern or soil and water loss.

There are three types of methods for study on spatial variation and scaling variation: statistical model and empirical modeling, physically based model and processes modeling, and integrative model and synthetically modeling. No model can ever be expected to out-perform all other models on all reasonable data sets examined. Thus we insist that the best combination of several methods is different for the different purpose, objects, space and time studied. For the soil erosion models, the physically based model with spatial distribution can give more satisfactory results for the simulation of cross-scaling relationships in soil erosion than the empirical model can do. It is urgent to study the spatial variation of key parameters of model (i. e. rainfall, topography, soil, plant and land use) and to explore the scaling property of soil and water loss. In addition, it is also necessary to study the influencing of resolution and extent of model upon the output.

Obviously, recent studies provide much information in theory and methods to study the scaling in landscape pattern and loss of soil and water and their relation to the influencing factors. In the future, we should pay much attention to explore both the spatial variation and the scaling variation in the loss of soil and water and related environmental factors based on "scale-pattern-processes", and to improve the soil erosion models based on these studies on the spatial and scale variation. All these studies will let us to know much about both the spatial variation of soil and water loss and its influencing factors and the scaling variation of soil and water loss and its mechanisms, and therefore will be helpful to determine the appropriate scale for study and management on soil and water loss.

Key words: landscape pattern; soil and water loss; spatial variation; scale variation; scaling; soil erosion model

文章编号:1000-0933(2004)02-0330-08 中图分类号:Q149 文献标识码:A

尺度(Scale)是自然界所固有的本质特征,早已引起了广泛关注。在景观生态学和生态水文学中,尺度(Scale)指对某一研究对象或现象在空间或时间上的量度,分别称为空间尺度和时间尺度。尺度往往以粒度(Grain)和幅度(Extent)来表达。幅度指研究对象在空间或时间上的持续范围。空间粒度指景观中最小可辨识单元所代表的特征长度、面积或体积;时间粒度指某一事件或对象发生的频率或时间间隔。在实际观测和研究中,粒度又分解为取样间隔(Spacing)和样地大小(Support)两个因子。尺度研究的根本目的在于通过适宜的时空尺度去反映复杂的生态学规律,进而揭示自然界所固有的本质尺度性。

等级尺度理论认为,空间尺度和时间尺度是复杂生态系统中各种生物和非生物因子复杂的线性作用导致的必然结果。相互作用的各要素的动态特征千差万别,其中具有相似动态特征的要素组合形成了区别于其他动态特征组合的特定尺度或层次。显然,景观格局的空间变异性和尺度变异性可以反映生态过程(如水土流失)的自然等级尺度性^[1~74]。

1 尺度变异与尺度转换理论

1.1 尺度变异

景观格局和生态过程的尺度变异特征可以分为两大类,即单一尺度变异(Simple scaling)和多重尺度变异(Multiscaling)(图1)。单一尺度变异,即同质分形(Homogeneous fractal),指景观格局和生态过程在不同尺度上表现出相似的线性变异特征,这是由各种影响因子累积作用(Additive contribution)所形成的。相反,多重尺度变异,即异质分形(Heterogeneous fractal),指景观格局和生态过程在多重尺度上表现出复杂的非线性变异特征,是由各种随机变化的影响因子倍增作用(Multiplicative contribution)所导致的^[9]。实际上,自然环境中绝大多数尺度变异现象都是处于单一尺度变异和多重尺度变异的连续体之中^[10]。

1.2 尺度转换与方数据

在异质景观中,景观格局和生态过程都随着时空尺度的改变而变化^[11~13]。不同尺度上的生态系统之间存在物种、物质、能

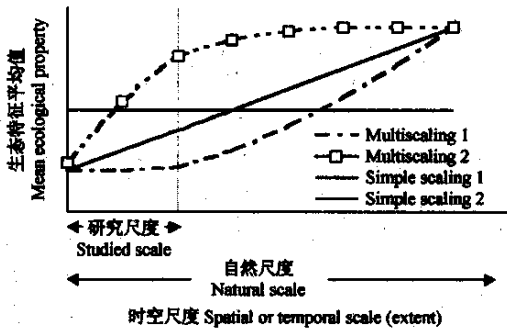


图1 尺度变异特征与尺度外推

Fig.1 Hypothetical scaling trajectories from study to nature

量和信息交流,从而构成了尺度之间的相互关系。因此,可以从某一尺度上所获得的信息或知识来推测其他尺度上的特征,即所谓尺度转换或尺度外推(Scaling),包括尺度上推(Scaling-up)和尺度下推(Scaling-down)^[14]。

但是,每一尺度的约束体系(Constraint envelope)和临界值都不尽相同,其景观格局和生态过程也千差万别,尺度转换必然超越这些约束体系和临界值^[6]。显然,尺度转换存在可行性和困难性的双重特征^[15]。一般说来,如果景观格局与生态过程表现为线性的单一尺度变异,可以把研究结果外推到其他尺度;如果为多重尺度变异,则很难把研究结果外推到其他尺度(图1)。近年来,景观格局和生态过程的尺度变异与尺度转换研究已经成为景观生态学的研究热点和难点领域之一^[16,17]。

1.3 水土流失的尺度变异

水土流失是世界范围尤其是我国黄土高原的环境问题之一^[18]。水土流失不仅是多因子综合影响的一个复杂的时空变异过程^[19,20],而且也是一个典型的多重尺度变异过程^[3,21]。

2 景观格局和水土流失的空间变异与尺度变异

2.1 景观格局的尺度变异

2.1.1 尺度关注 20世纪20年代,植物生态学家就开始关注多重时空尺度上植被空间格局和生态过程的相互关系^[22]。20世纪80年代发展的等级理论(Hierarchy theory)综合概括了生态尺度理论^[6]。同期,尺度效应成为基础研究主题开始出现在生态学^[23]、水文学^[24]和土壤学^[25]文献中(图2)^[74]。20世纪末和本世纪初,越来越多的生态学家、水文学家和土壤学家开始关注和发展景观格局和水土流失的空间变异性和尺度变异的理论和方法^[3,17,26~28]。

2.1.2 景观格局的尺度变异 很多研究发现,土壤水分、入渗率和饱和含水量等土壤特征均随着取样间隔的增大而呈现出幂函数递减趋势,即表现为单一尺度变异特征^[29~32]。然而,Seyfried研究发现,因为土壤类型的随机变异和气候因子的海拔梯度的双重影响,随着空间尺度(幅度)从12m²增大到2.3×10⁸m²,土壤水分空间变异性表现出非线性的多重尺度变异特征,即随着尺度增大空间变异呈跳跃式增长^[33,34]。Qi和Wu对生物量和地貌格局的研究表明,其空间自相关性的尺度变异特征介于单一尺度变异和多重尺度变异之间^[35]。

尽管这些景观格局的尺度变异研究没有和相应的生态过程相结合、缺乏机制性分析,但是有力地促进了水土流失等生态过程的尺度变异及其影响因子研究。

2.2 水土流失的空间变异与尺度变异

2.2.1 水土流失的空间变异 早期的水文学研究以全流域景观特征的整体平均值为基础,忽视了景观要素的空间变异性^[36]。研究表明,土壤侵蚀本身的空间异质性很高,甚至可以完全削弱实验处理的影响^[37]。显然,多重尺度上降雨、地貌、土壤和土地利用等景观特征的空间异质性,更进一步加强了不同尺度上水文响应的空间变异性^[38],使得水土流失过程表现出复杂的多尺度变异现象^[2,39]。

2.2.2 水土流失的尺度变异 传统的水土流失研究一般集中在坡面径流小区和小流域两个单一尺度上,这在很大程度上限制了水土流失的空间尺度外推和过程分析^[40]。因为坡面径流小区的观测样地比较小,很难代表整个小流域的景观要素变异和水文过程^[41]。Trimble研究指出,美国农业部以小区试验数据为基础所预测的大尺度水土流失不可信,并引发了水土流失观测的激烈争论^[42,43]。可见,利用径流小区实验数据外推到大尺度上很难反映出景观的空间变异性和水土流失的尺度变异性^[44]。另外,从径流小区到小流域出口,还存在多重尺度的沟道体系^[28]。如果只是把整个小流域做为黑箱处理,这就很难对小流域内多重尺度上水土流失机制进行观测和研究^[40]。

20世纪末,水土流失的尺度变异及其影响因子研究逐渐受到越来越多的水文学家的关注^[3]。1997年11月,国际土壤研究和管理委员会(International Board of Soil Research and Management, IBSRAM)在印度尼西亚举行了一次土壤侵蚀国际研讨会,开始关注不同尺度上土壤侵蚀研究结果的差异,一致认为径流小区观测结果很难扩展到较大尺度上^[39]。但是,只有少数学者对水土流失在不同大小的样地尺度以及小集水区尺度上的差异进行了初步的比较研究,并分析了各级尺度上的主要影响因素。

我国学者研究更多地侧重于坡面径流侵蚀、小流域水土流失模拟研究,探讨不同景观因子对水土流失形成过程的影响。对小流域内景观格局和水土流失的尺度变异性研究相对较少,只有少数涉及到坡长和上坡来水来沙的影响^[45,46]。

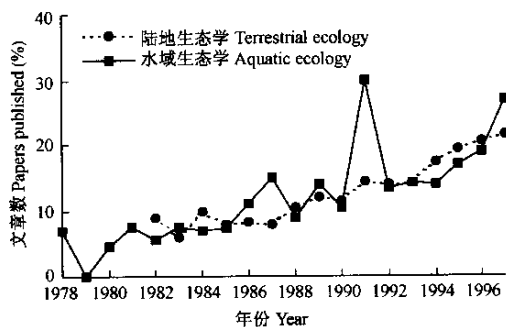


图2 1978~1997年尺度有关的生态学研究文章^[74]

Fig. 2 Recent trends in scale-related studies in ecology
统计期刊 Journals: Ecology, Oikos, Oecologia, Limnology and Oceanography, Marine Ecology

2.2.3 坡面样地尺度与小集水区尺度

不同样地大小的比较研究有助于确定最小取样大小和样地的代表性^[47]。因为微地貌对入渗的影响,随着样地面积的增大,微地貌多样性增大,高入流率地块可能增多或者不变,造成水土流失尺度变异的多样性^[48]。显然,水土流失随着样地面积改变所表现出来的尺度变异特征因地而异。有些研究表明小样地上的水土流失观测结果经过校正后,可代表较大样地尺度上的水土流失^[47];有些学者的研究结果正好相反^[49]。

大样地,即水文响应单元(Hydrological response unit)为相对同质的空间单元;而集水区是由不同性质的水文响应单元所组成的异质地域^[50]。因此,大样地和集水区的转换,才是真正意义上的尺度转换。Bergkamp 对荷兰半干旱区不同空间尺度上灌木地的水土流失比较研究发现,因为梯田($<1\text{m}$)边缘和小丘($10\sim 20\text{m}^2$)的入渗率很高,在梯田和小丘等小尺度上产生的地表径流尚未到达坡面(1hm^2)底部和小集水区(50hm^2)出口就全部入渗,所以在坡面和小集水区等较大尺度上观测不到产流现象^[51]。Bissonnais 等比较研究了法国巴黎盆地西北部 Blosseville 小流域里样点(1m^2)、小样地(20m^2)、大样地(500m^2)和小集水区(70hm^2)4个空间尺度(幅度)上的水土流失状况发现,水土流失的尺度变异比较复杂,与地表状况的空间变异密切相关。在样地尺度上产生的地表径流大部分都能流出小集水区出口,因此样地尺度的径流观测值可用于预测小集水区出口径流。就泥沙输出来讲,因为地形和地表覆盖所导致的沉积作用,样地产沙总是很难全部输运到小集水区出口,所以样地尺度上的泥沙观测值很难上推到小集水区尺度^[49]。

Puigdefabregas 等研究了西班牙东南部干旱区斑块与坡面两个尺度上水与泥沙的空间重分布(re-distribution)过程发现,在斑块尺度上,因为裸地斑块上形成的水分与泥沙在坡面流动过程中被相邻的植丛(plant clumps)斑块截留,所以水与泥沙的空间重分布过程主要受控于植被的空间镶嵌格局;在一定的条件下(如降雨、坡度、坡长、植被特征),植丛斑块与裸地斑块可以达到和谐的镶嵌格局,导致水分与泥沙在空间上的重分布路径最短,从而最大程度地防止水土流失。在坡面尺度上,径流与泥沙在坡面上的运移过程主要受控于次降雨强度的时间分布特征,该区大部分次降雨事件都很难导致土壤表层饱和并产生径流,所以随着坡位的降低土壤含水量并没有表现出增加的趋势^[52]。

上述研究把传统研究的坡面小区尺度和集水区尺度相结合,反映了水土流失的尺度变异特征和尺度转换规律的复杂性和多样性,揭示了水土流失过程尺度转换的困难性和可行性。不仅有助于水土流失观测取样设计和坡面侵蚀过程分析,而且对于充分利用传统研究资料、进一步开展多尺度变异研究起到了承上启下的连接作用。

2.2.4 集水区尺度与小流域尺度 从本质上说,上述研究仍然局限在坡面样地尺度和小集水区尺度。所以存在两方面的不足:一方面研究尺度比较小,只是局限在小集水区内;另一方面,研究涉及的尺度没有连续性,很难揭示水土流失随着尺度的连续变化所表现出来的变异规律及其形成机制。

Lawrence 比较分析发现,当集水区面积只有 0.512km^2 时,其径流过程与降雨过程的吻合度相当高,但是随着集水区面积的逐渐增大,径流过程对降雨过程的响应显著降低^[53,54]。Nikora 等采用分维分析法(Fractal analyses)研究发现,美国新泽西州一个小流域的土壤侵蚀和相关环境因子(生态水文、植被和地形)的景观格局均表现出自相似性(Self-similarity)现象,即线性的单一尺度变异特征,某些大斑块有时也呈现出复杂的非线性变异特征^[56]。

这些研究仍然缺乏对水土流失从坡面小区经过多重沟道体系最终到达小流域出口的尺度变异及其影响因子的机制分析,但是开始探讨土壤侵蚀及其相关环境因子的连续尺度变异特征。另外,近年来其他学者已经开始对河沟体系、地貌、土壤和降雨等环境因子的连续尺度变异特征及其对水土流失的影响进行了初步探索^[4,28,57~59]。

3 空间变异和尺度变异的研究方法

3.1 空间变异和尺度变异分析方法

由于生态过程的复杂性,空间变异和尺度变异研究需要科学而适宜的取样设计、统计分析和模型模拟方法^[60]。

空间变异和尺度变异研究方法可以分为三大类型,第1类为统计模型模拟法,包括方差分析与平均值制图法^[61]、变异函数分析与空间内插和空间拟合法^[62]、相关分析与回归预测法^[63]、多变量分析与复合变量预测法^[64];第2类为物理模型与物理过程模拟法^[65];第3类为综合分析 with 综合预报法^[66]。另外,全球定位系统(GPS)、遥感(RS)、数字高程模型(DEM)和地理信息系统(GIS)技术是空间变异和尺度变异的基本技术手段^[15]。半变异函数(Semivariogram)和相关分析法常用于检测分析简单的单一尺度变异特征^[13,67,68];而分维分析常用于分析复杂的多重尺度变异特征^[10]。

实际上,每种方法都有其优缺点和其特定的适宜性,所以一般采用多种数学方法相结合来研究尺度变异特征和尺度转换规律^[34]。但是,存在最佳方法组合,最佳方法组合的选取也是因研究对象、研究地区和研究时间的不同而异,原则上以能全面深入反映景观格局和生态过程的尺度变异规律达到满意的尺度转换要求为目标,尽量选取直观而简单的方法^[63]。

3.2 土壤侵蚀预报模型

土壤侵蚀预报模型是研究水土流失的尺度变异特征及其形成机制的有效技术工具。传统土壤侵蚀预报模型多为经验模型,

20 世纪 80 年代开始研制和发展基于土壤侵蚀过程的物理模型^[65,69]。

从本质上来说,这些模型都是在小尺度(如坡面径流小区尺度)观测和研究资料基础上发展起来的,并且主要用于模拟和预报大尺度(如小流域)的水土流失,显然,这是一个典型的尺度转换问题^[2]。一般认为,就解决这种跨尺度关系而言,基于物理过程的空间分布式的土壤侵蚀预报模型显著优于经验模型^[70,71]。波兰黄土的研究表明,土壤侵蚀的实际观测值比经验模型 USLE 预测值低 6~10 倍^[72]。美国的研究也证实,土壤侵蚀模数远远低于美国农业部根据 USLE 所预测的 $13000\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[73]。

Jetten 等根据模型构建尺度,把土壤水蚀模型分成两大类,即立地尺度(land-scale)模型如通用土壤流失方程 USLE、水蚀预报计划 WEPP 等,以及小流域尺度(catchment-scale)模型如欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM、Limburg 土壤侵蚀模型 LISEM 等,并指出应根据不同研究尺度选择不同类型的模型^[55]。

3.2.1 土壤侵蚀预报模型的空间变异性研究 土壤侵蚀物理模型多强调水土流失的物理过程,往往忽视了空间变异和尺度变异。实际上,模型输入参数的空间变异性,会显著增大模型输出的不确定性,从而影响模型的精度。尤其对需要大量输入参数的物理过程模型而言,不仅参数确定和模型校正造成工作量剧增,而且很多研究表明其模拟和预报效果未必优于相应的经验模型^[75,76]。所以,许多水文学家质疑物理模型的实用价值,尤其当应用于模型构建区之外时^[77]。实际上,物理模型的很多问题,在很大程度上归因于关键输入参数的时空变异和尺度变异性。如果不考虑景观要素的空间变异性,土壤侵蚀的尺度变异性,所有土壤侵蚀模型,都存在高估小事件和低估大事件的致命弱点^[78]。因此,加强降雨、地貌、土壤和土地利用等关键参数的空间变异性描述和水土流失的尺度变异性分析成为物理模型改进的重要途径之一^[71]。

3.2.2 土壤侵蚀预报模型的尺度效应研究 空间分辨率(即空间粒度)对模型的影响首先引起了部分学者的关注,并提出了代表性基本单元概念(Representative elementary area, REA)^[24]和水文响应单元(Hydrological response unit, HRU)概念^[50]。

很多研究证实,模型结构相同分辨率不同的模型输出结果存在显著差异^[55,79]。可见,模型分辨率和观测样地需要与相应的水土流失尺度保持一致。

模型预报区大小(即空间幅度)对模型的影响也得到了关注。对大小不同的 5 个集水区研究表明,美国 Reynolds Creek 小流域内各级尺度都有其特定的主要影响因子,随着集水区面积(空间幅度)的增大,大尺度空间变异因子的影响逐渐增大^[38]。因此,土壤侵蚀模型需要考虑与其预测范围相适宜尺度的空间变异因子,尤其要考虑较大尺度变异因子的影响。

4 小结与讨论

4.1 尺度变异与尺度转换

景观格局和生态过程的尺度变异特征可以分为两大类,即单一尺度变异和多重尺度变异。自然环境中绝大多数尺度变异现象都是处于单一尺度变异和多重尺度变异的连续体之中。尺度转换或尺度外推包括尺度上推和尺度下推。尺度转换的可行性决定于尺度变异类型:如果景观格局与生态过程表现为线性的单一尺度变异,可以把研究结果外推到其他尺度;如果为多重尺度变异,则很难把研究结果外推到其他尺度。

水土流失不仅是多因子综合影响的一个复杂的时空变异过程,而且也是一个典型的多重尺度变异过程。

4.2 景观格局与水土流失的空间变异与尺度变异

很多研究表明,降雨、地貌、土壤和土地利用等景观特征不同,其景观格局的尺度变异也千差万别。多重尺度上这些不同景观特征的空间异质性,进一步加强了不同尺度上水文响应的空间变异性,使得水土流失过程表现出复杂的多尺度变异现象。

传统的水土流失研究一般集中在坡面径流小区和小流域两个单一尺度上,这在很大程度上限制了水土流失的空间尺度外推和过程分析。20 世纪末,水土流失的尺度变异及其影响因子研究逐渐受到越来越多的水文学家的关注。少数学者对水土流失在不同大小的样地尺度以及小集水区尺度上的差异进行了初步的比较研究,并分析了各级尺度上水土流失的主要影响因子。21 世纪初,只有极少数的研究开始探讨土壤侵蚀及其相关环境因子的连续尺度变异特征,但是仍然缺乏对水土流失从坡面小区经过多重沟道体系最终到达小流域出口的尺度变异及其影响因子的机制分析。

我国学者的研究,更多地侧重于坡面径流侵蚀、小流域水土流失模拟研究,探讨不同景观因子对水土流失形成过程的影响,对小流域内景观格局和水土流失的尺度变异性研究相对较少。

4.3 空间变异和尺度变异的研究方法

空间变异和尺度变异研究方法可以分为三大类型,即统计模型模拟法、物理模型与物理过程模拟法以及综合分析 with 综合预报法。每种方法都有其优缺点和特定的适宜性,最佳方法组合的选取因研究对象、研究地区和研究时间的不同而异,原则上以能全面深入反映景观格局和生态过程的尺度变异规律达到满意的尺度转换要求为目标,尽量选取直观而简单的方法。

土壤侵蚀预报模型包括经验统计模型和物理过程模型。很多研究证明,就解决水土流失的跨尺度关系而言,基于物理过程的空间分布式的土壤侵蚀预报模型显著优于经验模型。土壤侵蚀物理模型多强调水土流失的物理过程,而往往忽视了空间变异和尺度变异。当前,一方面需要加强降雨、地貌、土壤和土地利用等关键参数的空间变异性描述和水土流失的尺度变异性分析,

另一方面需要加强研究模型分辨率和研究范围对输出结果的影响。

4.4 研究展望

基于上述分析,将来的研究重点将集中在下述 3 个方面:①借鉴其他学科(如系统科学、信息科学、物理学和数学等)的思想与理论,进一步完善并奠定水土流失的“尺度-格局-过程”理论;②加强多重尺度上水土流失及其相关环境因子(如地形、土壤、土地利用、降雨等)的空间变异格局和尺度变异性的实地观测与数学分析,以揭示水土流失的空间变异和尺度变异规律、影响因子和形成机制;③改进土壤侵蚀预报模型,以加强模型对水土流失及其相关环境因子的空间变异与尺度变异的描述和预报能力。

References:

- [1] Wiens J A, Milne B T. Scaling of “landscape” in landscape ecology, or landscape ecology from a beetle’s perspective. *Lands. Ecol.*, 1989, **3**: 87~96.
- [2] Blochl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrol. Proc.*, 1995, **9** (3~4): 251~290.
- [3] Blochl G. *Scale and scaling in Hydrology*. Vienna, Austria: Technical Univ. of Vienna, 1996.
- [4] Western AW, Blochl G. On the Spatial scaling of soil moisture. *Journal of Hydrology*, 1999, **217**: 203~224.
- [5] O’Neill RV. Hierarchy theory and global change. In: Rosswall T, Woodmansee R G, Risser P G, eds. *Scales and Global Change*. NY: John & Wiley, 1988. 29~45.
- [6] O’Neill R V, DeAngelis DL, Waide J B, et al. *A Hierarchical Concept of Ecosystems*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1986.
- [7] O’Neill R V, Johnson A R, King A W. A hierarchical framework for the analysis of scale. *Landscape Ecology*, 1989, **3**: 193~205.
- [8] O’Neill R V. Perspectives in hierarchy and scale. In: Roughgarden J, May R M, Levin S, eds. *Perspectives in Ecological Theory*. Princeton NJ: Princeton University Press, 1989. 140~156.
- [9] Gupta V K, Waymire E. Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95** (D3): 1999~2009.
- [10] Gimenez D, Rawls W J, Lauren J G. Scaling properties of saturated hydraulic conductivity in soil. *Geoderma*, 1999, **88**: 205~220.
- [11] Qiu Y, Zhang J T, Zheng F Y. The kernel of landscape ecology: spatial and temporal heterogeneity in ecological systems. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, **19**(2): 42~49.
- [12] Wang Y L. The process of studies on agro-landscape pattern and processes. *Advances in Environmental Science*, 1998, **6**(2): 29~34.
- [13] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Sci.*, 1983, **34**: 577~597.
- [14] King A W. Translating models across scales in the landscape. In: Turner M G, Gardner R H eds. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. NY: Springer-Verlag, 1991. 479~518.
- [15] Lu Y H, Fu B J. Scale and scaling in ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2096~2105.
- [16] Xiao D L, Brencang, Li X Z. Spatial ecology and landscape heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(5): 453~461.
- [17] Turner M G, Dale V H, Gardner R H. Predicting across scales: theory development and testing. *Landsc. Ecol.*, 1989, **3**: 245~252.
- [18] Li X B. A review of the international researches on land use/land cover change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**(6): 553~557.
- [19] Qiu Y, Fu B J, Wang Y. Spatiotemporal variation in soil Erosion and its relation to the environmental factors. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(1): 108~111.
- [20] Wang G X, Qian J, Cheng G D. Current situation and prospect of the ecological hydrology. *Advance in Earth Sciences*, 2001, **16**(3): 314~323.
- [21] Lovejoy S, Schertzer D. Multifractals and rain. In: Kundzewice A W ed. *New Uncertainty Concepts in Hydrology and Hydrological Modelling*. Cambridge, UK: Cambridge Press, 1995. 61~103.
- [22] Watt A S. On the ecology of British beechwoods with special reference to their regeneration. *J. Ecol.*, 1925, **13**: 27~73.
- [23] Morris D W. Ecological scale and habitat use. *Ecology*, 1987, **68**: 362~369.
- [24] Wood E F, Sivapalan M, Beven K, Band L. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling. *J. Hydrol.*, 1988, **102**: 29~47.
- [25] Hillel D. Research in soil physics: A review. *Soil Sci.*, 1991, **151**: 30~34.
- [26] Wood E F, Sivapalan M, Beven K. Similarity and scale in catchment storm response. *Rev. Geophys.*, 1990, **28**: 1~18.
- [27] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 1992, **73**: 1943~1967.
- [28] Fekete B M, Vorosmarty C J, Lammers R B. Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: Development, analysis, and control of error. *Water Resour. Res.*, 2001, **37** (7): 1955~1967.
- [29] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 741~747.
- [30] Murphy C P, Banfield C F. Pore space variability in a sub-surface horizon of two soils. *J. Soil Sci.*, 1978, **29**: 156~166.
- [31] Sisson J B, Wierenga P J. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **46**: 699~704.
- [32] Rodriguez-Iturbe I, Vogel G K, Rigon R, et al. On the spatial organization of soil moisture fields. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**: 2757~2760.

~2760.

- [33] Seyfried M. Spatial variability constraints to modeling soil water at different scales. *Geoderma*, 1998, **85**: 231~254.
- [34] O'Neill R V, Turner S J, Cullinan V I, *et al.* Multiple landscape scales: an intersite comparison. *Landscape Ecology*, 1991, **5**: 137~144.
- [35] Qi Y, Wu J. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. *Landscape Ecology*, 1996, **11**(1): 39~49.
- [36] McKerchar A I. Regional flood frequency analysis for small New Zealand basis. 1. Mean annual flood estimation. *Journal of Hydrology (NZ)*, 1991, **30** (2): 65~76.
- [37] Ruttimann M, Schaub D, Prasuhn V, *et al.* Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland—some critical considerations. *Catena*, 1995, **25** (1-4): 127~139.
- [38] Seyfried M S, Wilcox B P. Scale and the nature of spatial variability: field examples having implications for hydrologic modeling. *Water Resour. Res.*, 1995, **31**(1): 173~184.
- [39] de Vries F W T P, Kerr F A J. *Soil Erosion at Multiple Scales: Principles and Methods for Assessing Causes and Impacts*. Wallingford, Oxon, UK: CABI Publishing, 1998.
- [40] De B C. Spatial scale dependence of sediment dynamics in a semi-arid badland drainage basin. *Catena*, 1989, **16**: 277~290.
- [41] Govers G. A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation. *Catena*, 1991, **18**: 91~111.
- [42] Trimble S W. Response to Science. *Science*, 1999, **286**: 1187~1189.
- [43] Glanz J. Sharp drop seen in soil erosion rates. *Science*, 1999, **285**: 1187~1189.
- [44] Meng Q H, Fu B J. Landscape pattern and soil nutrient flux. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **14**(3): 116~121.
- [45] Chen H. The synthetic effect of rainfall characteristics and runoff from upper slope on sediment generation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, **6**(2): 17~23.
- [46] Kong Y P, Zhang K L, Tang K L. Impacts of slope length on soil erosion process under simulated rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(2): 17~20.
- [47] Mathier L, Roy A G. A study of the effect of spatial scale on the parameters of a sediment transport equation for sheet-wash. *Catena*, 1996, **26**: 161~169.
- [48] Dunne T, Zhang W, Aubry B F. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resour. Res.*, 1991, **27**: 2271~2285.
- [49] Bissonnais Y L, Benkhadra H, Chaplot V, *et al.* Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil & Tillage Research*, 1998, **46**: 69~80.
- [50] Flugel W A. Delineating hydrological response units by geographical information system analysis for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Brol, Germany. *Hydrological Processes*, 1995, **9**: 423~436.
- [51] Bergkamp G. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena*, 1998, **33** (3-4): 201~220.
- [52] Puigdefabregas J, Sole A, Gutierrez L, *et al.* Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews*, 1999, **48**: 39~70.
- [53] 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.
- [54] Lawrence D S. *Physical hydrology*. Prentice Hall, 1993.
- [55] Jetten V, de Roo A, Favis-Mortlock D Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. *Catena*, 1999, **37**: 521~541.
- [56] Nikora V I, Pearson C P, Shankar U. Scaling properties in landscape patterns: New Zealand experience. *Landscape Ecology*, 1999, **14**: 17~33.
- [57] Veitzer S A, Gupta V K. Random self-similar river networks and derivations of generalized Horton laws in terms of statistical simple scaling. *Water Resour. Res.*, 2000, **36**(4): 1033~1048.
- [58] Deidda R. Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework. *Water Resour. Res.*, 2000, **36**(7): 1779~1794.
- [59] Veneziano D, Niemann J D. Self-similarity and multifractality of fluvial erosion topography: 2. Scaling properties. *Water Resour. Res.*, 2000, **36**(7): 1937~1951.
- [60] Jeffers J N R. Statistical and mathematical approaches to issues of scale in ecology. In: Rosswall T, Woodmansee R G, Risser P G, eds. *Scales and Global Change*. NY: John & Wiley, 1988. 47~56.
- [61] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2001, **49**: 723~750.
- [62] Carlile D W, Skalski J R, Batker J E, *et al.* Determination of ecological scale. *Landscape Ecology*, 1989, **2**: 203~213.
- [63] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatiotemporal prediction of soil moisture content for an event-based hydrology model in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, **54**(1-2): 173~196.
- [64] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Soil moisture variation in relation to topography and land use in hillslope catchment of the loess plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2001, **240**(3-4): 243~263.
- [65] Liu B Y, Xie Y, Zhang K L. *Soil Erosion Model*. Beijing: Chinese Scientific & Technological Press, 2001.
- [66] Legates W C, McCabe Jr G J. Evaluating the use of "goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.*, 1999, **35**: 233~241.

- [67] Burrough P A. Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, 1993, **56**: 529~562.
- [68] Saldaa A, Stein A, Zinck J A. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River (Spain). *Catena*, 1998, **33**(3-4): 139~153.
- [69] Fu S H, Liu B Y. Evolution of the soil erosion model. *Advance in Earth Sciences*, 2002, **17**(1): 78~84.
- [70] Beven K. Distributed models. In: Anderson M G, Burt T P eds. *Hydrological Forecasting*. NY: John Wiley, 1985. 405~435.
- [71] Bathurst J C, O'Connell P E. Future of distributed modelling——The system-hydrologique-Europeen. *Hydrological Processes*, 1992, **6**(3): 265~277.
- [72] Rejman J, Rurski R, Paluszek J. Spatial and temporal variations in erodibility of loess soil. *Soil & Tillage Research*, 1998, **46**: 61~68.
- [73] Trimble S W. Decreased rate of alluvial sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975-93. *Science*, 1999, **285**: 1187~1189.
- [74] Kemp W M, Petersen JE, Gardner RH. Scale-dependence and the problem of extrapolation: Implications for experimental and natural coastal ecosystems. In: Gardner R H, Kemp W M, Kennedy V S, et al. *Scaling Relations in Experimental Ecology*. New York: Columbia University Press, 2001. 3~57.
- [75] Wilcox B P, Rawls W J, Brakensiek D L, et al. Predicting runoff from rangeland catchments: A comparison of two models. *Water Resour. Res.*, 1990, **26**(10): 2401~2410.
- [76] Grayson R B, Moore I D, McMahon T A. Physically based hydrologic modeling 2. Is the concept realistic? *Water Resour. Res.*, 1992, **28**: 2659~2666.
- [77] Beven K. Changing ideas in hydrology——the case of physically-based models. *J. Hydrol.*, 1989, **105**: 157~172.
- [78] Nearing M A. Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. *Catena*, 1998, **32**(1): 15~22.
- [79] van Loon, Keesman, K J. Identifying scale-dependent models: The case of overland flow at the hillslope scale. *Water Resour. Research*, 2000, **36**: 243~254.

参考文献:

- [11] 邱扬, 张金屯, 郑凤英. 景观生态学的核心: 生态学系统的时空异质性. *生态学杂志*, 2000, **19**(2): 42~49.
- [12] 王仰麟. 农业景观格局与过程研究进展. *环境科学进展*, 1998, **6**(2): 29~34.
- [15] 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): 2096~2105.
- [16] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, **17**(5): 453~461.
- [18] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域. *地理学报*, 1996, **51**(5): 553~557.
- [19] 邱扬, 傅伯杰, 王勇. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系. *水土保持学报*, 2002, **16**(1): 108~111.
- [20] 王根绪, 钱鞠, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望. *地球科学进展*, 2001, **16**(3): 314~323.
- [29] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析. *生态学报*, 2000, **20**(5): 741~747.
- [44] 孟庆华, 傅伯杰. 景观格局与养分流动. *水土保持学报*, 2000, **14**(3): 116~121.
- [45] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响. *水土保持学报*, 1992, **6**(2): 17~23.
- [46] 孔亚平, 张科利, 唐克丽. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究. *水土保持学报*, 2001, **15**(2): 17~20.
- [53] 傅国斌, 李丽娟, 刘昌明. 遥感水文应用中的尺度问题. *地理科学进展*, 2001, **16**(6): 755~760.
- [65] 刘宝元, 谢云, 张科利, 等. 土壤侵蚀预报模型. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [69] 符素华, 刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展. *地球科学进展*, 2002, **17**(1): 78~84.