

不同尺度条件下的土壤侵蚀实验监测及模型研究

唐政洪¹, 蔡强国¹, 许 峰², 朱远达¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053)

摘要: 土壤侵蚀的实验和监测是获取水土流失资料的重要手段, 土壤侵蚀模型研究是水土保持规划、管理的重要内容。本文对点、小区、田间和坡面、流域及区域尺度条件下的土壤侵蚀的实验和监测研究进行了综述, 分析了当前国际上实验研究和监测研究的侧重点及其不足; 并对当前国际上土壤侵蚀模型的总体发展趋势进行了评述, 特别分析了这些模型在全球气候变化背景下的作用; 最后对当前土壤侵蚀、试验及检测研究作出展望。

关键词: 尺度; 土壤侵蚀; 全球气候变化

中图分类号: S 157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2002)06-781-07

土壤侵蚀的实验研究和监测研究是获取水土流失资料的重要手段, 而且模型研究则是水土保持规划、管理的重要内容。在当前全球气候变化的背景下, 土壤侵蚀的实验、监测和模型研究具有重要意义。

关于全球气候变化与土壤侵蚀的关系有多种不同的说法^[1], 当前有许多假说阐述当前全球尺度的气候变化与生态环境的关系。土地利用变化与全球气候变化的关系; 年均温度增加情况下土壤侵蚀将受到的影响; 年均气温增加所导致的平均植被覆盖的减少和表面土壤中有机质减少导致水蚀和风蚀增加的可能性以及年均降雨的增加导致耕地水蚀的增加了的可能性。为了证实这些假说, 从土壤侵蚀的实验和监测中获取相应的数据显得非常必要。

绝大多数的实验研究在相对小的时间和空间尺度上开展, 而监测研究所涉及的时间和空间尺度相对较大。监测一般指的是对超过 2a 时间周期以及大于 10 km² 的区域进行观测, 包括细沟、沟道以及洪积过程^[2]。从田间尺度得到的平均土壤侵蚀率要远远低于通过点尺度得到的研究结果, 表明不同尺度的监测对于估测侵蚀量是极其重要的^[4]。绝大多数侵蚀发生在极端条件下, Burt(1994)指出在无法准确地预测变化过程的时候, 对于自然环境的长期监测是至关重要的。而这些现象的监测需要足够长的时间才能把握这些现象, 比如在 South Downs 地区 10a 的监测表明, 71% 的侵蚀发生在一年之内^[3]。事实上, 并不是由于所有的假说都可以通过实验进行评价, 因此对于土地利用的改变以及气候变化过程可以通过数学模型进行模拟, 同时高质量的监测和实验数据有助于模型的开发和验证^[4]。从实验和监测中获取数据是模型验证的重要组成

收稿日期: 2001-10-25; 修订日期: 2001-12-30

基金项目: 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程项目 (CXJ0GA00-05-02); 国家自然科学基金资助项目 (49871053); 中国科学院西部行动项目 (KZCX1-10-04)

作者简介: 唐政洪(1974-), 男, 湖南东安人, 中国科学院地理科学与资源研究所博士研究生, 主要从事流域侵蚀产沙、流域管理信息系统方面的研究。

部分,从而使模型的结果能反映研究区域的时空变化规律,因此在土壤侵蚀研究中采用模型的方法模拟土地利用、经济状况等对全球气候变化的影响是至关重要的^[5]。

IGBP GCTE (Internal Geosphere-Biosphere Programme-Global Change and Terrestrial Ecosystem) 项目的一个重要工作是决定采用模型的方法来模拟全球气候变化下的土壤侵蚀^[6]。为了这个目的,在 GCTE 会议上,对当前一系列主要的侵蚀模型进行了评述^[7]。当前一些模型预计如果全球温度上升 2 ~ 3 ,则会引起土地覆被的变化,从而在一些地方引发严重的水土流失问题^[8];气候变化会影响泥沙输移过程、入渗及地表径流,从而对水文过程产生影响,影响到土壤的有效蒸腾作用、土壤湿度和地下水的蓄存以及地表径流^[9]。Eybergen 和 Imeson (1989) 研究了对于气候状况敏感的关键过程,认为侵蚀过程受到了气候变化的影响,包括水、CaCO₃、有机质的输入和输出的影响^[10]。C. Boix-Fayos 分析了微观的气候条件如何影响土壤侵蚀过程,包括径流、土壤温度、土壤团聚体的稳定性以及入渗、汇流等过程,并考虑到了不同月份、季度的时间尺度和点、坡面、流域的时间尺度^[11]。土壤侵蚀与全球气候变化的关系已成为当前土壤侵蚀实验、监测和模型研究的重要内容。

1 不同尺度条件下的土壤侵蚀实验研究

侵蚀产沙是一个多因素、多层次、多尺度的地学问题。对于物理过程的土壤侵蚀实验研究可以在控制条件下进行实验,为侵蚀模型提供详细的数据。这些实验可以为模型的使用者提供不同时空尺度的实验参数,同时也为模型的检验和校准提供数据。越来越多的地表径流和侵蚀过程的模拟依赖于尺度的变换。这些数据可以通过不同尺度的实验来获取。

1.1 点尺度

在极小的点尺度上,土壤颗粒形态成为研究的重要内容;为此,以土壤团聚体为例,阐述其与侵蚀过程的关系。土壤团聚体受到土壤含水量、有机质含量等影响,它们都有可能随着气候变化而变化。Le Bissonais (1988) 对于盐土的研究表明,随着土壤湿度的减少,土壤稳定团聚体的百分比也相应下降^[12]。Kemper 和 Koch (1966) 的研究表明,有机质含量对于加拿大大面积的区域以及美国西部区域的土壤中稳定性团聚体有积极的影响,年均降水通过有机质含量影响团聚体稳定性^[13]。Lavee 和 Pariente (1995) 通过对中东地区土壤团聚体的研究得到了类似结果^[14]。土壤有机质对于沙土中的团聚体的影响要比粘土的影响明显。因此,由于全球变暖所导致的有机质分解的增加有助于在半干旱区形成地表结皮^[15]。在此尺度上,所获取的侵蚀过程参数通常只具有点尺度特征,往往不能直接用于大尺度,即使能用,也只有在有限的程度上应用。

1.2 小区尺度

在此微观尺度上,主要研究小区尺度的侵蚀过程及其动力学特征,主要采用实验模拟进行研究,此尺度水平上的研究有助于认识单一因素与侵蚀过程及其它因素的规律及相互关系。有关土壤侵蚀过程和机理的大量室内和室外实验都在这个尺度上开展的,特别是人工模拟降雨试验,是在可控制条件下快速收集数据的重要方法。在这个尺度的侵蚀过程中,细沟和细沟间侵蚀是研究的重要内容,同时关注土壤表面侵蚀动力学的研究,如地表糙度、地表蓄水量、入渗、径流产生、植被覆盖、动物洞穴以及地表结皮等的影响^[16]。目前在此尺度上,已取得大量的实验数据,如何将这些数据在大尺度上应用已经成为当前土壤侵蚀研究的重要内容。

1.3 田间和坡面尺度

长期以来,侵蚀产沙的机理及过程研究大都集中在田间和坡面尺度上。在此尺度上进行了大量重要的实验工作,并得到大量的侵蚀模型:USLE(Universal Soil Loss Equation)^[17]、RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)^[18]、WEPP(Water Erosion Prediction Project)^[19]。近年来在不同环境条件下的实验表明:耕作对侵蚀的发生有重要影响,特别是对田间尺度上的表层土壤有重要影响(Lobb, 1995)^[20]。根系作物的收割会导致相当大的土壤侵蚀,在法国北部,因此而引起的侵蚀达 $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[21]。目前越来越多的实验旨在阐明在不同的气候和土地利用变化条件下,以上过程与水蚀的交互作用。

1.4 流域尺度

在这个尺度上,侵蚀过程的交互作用很重要,包括沟道侵蚀、重力侵蚀和沉积过程变得相当重要。而实验和监测的界限变得模糊。在流域尺度上,许多其它的过程与水蚀过程同时发生,并导致土壤侵蚀。流域土壤侵蚀过程自成一个完整系统,降雨开始时首先产生雨滴击溅侵蚀,产流后发生片蚀,随后产生细沟和浅沟侵蚀,并在可能的情况下产生重力侵蚀和潜蚀,当产生暴雨后发生沟道侵蚀。流域尺度内存在的多种侵蚀类型的组合,存在侵蚀、输移和产沙的复杂关系。

1.5 区域尺度

区域尺度的研究通过区域内部的自然条件的相似性而与相邻区域区分开来。来自土地利用的空间元素、作物管理等区域性自然条件对侵蚀过程产生主导影响。大尺度之间的侵蚀产沙规律具有明显差异,大尺度的侵蚀产沙通常涉及到气候带、侵蚀类型的差异。

土壤侵蚀预测是与一系列时空尺度紧密相联的,为了更好地理解侵蚀产沙过程,需要较高的时间精度数据,而通常也需要更详细的空间尺度数据的支持。比如在从点尺度到坡面尺度中,径流的时间过程和径流量是至关重要的,它将决定细沟及细沟间区域的空间分配。在小区尺度上,地形、土壤、植被模式变得至关重要,它需要不同类型的降雨事件;如果上升到更加宏观的国家和全球尺度,气候、岩石变得至关重要,时间尺度也从几年到几百甚至上千年。

2 区域尺度上的土壤侵蚀监测研究

目前区域尺度上的土壤侵蚀研究,主要集中在对土壤侵蚀的动态监测。长期以来,国内外关于水土流失的研究主要集中在小区、坡面和小流域的尺度上,对于大区域的土壤侵蚀研究还很薄弱^[23]。为了解决大尺度的土壤侵蚀监测问题,近年来土壤侵蚀研究的一个最突出进展反映在两个方面^[23]:一是利用新技术,如地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)以及与地球化学示踪联系在一起的环境示踪,获取更多的信息源,它们包括空间资料的观测、改进资料的质量及点面资料的转化;二是建立可描述可模拟流域空间和时间尺度的变异性的模型,如数字高程模型(DEM)资料作为GIS的一个基本来源,数字地形资料可提供流域地貌参数;此外,RS资料也是另一个重要的信息源,可获取大面积的地形地貌、土壤植被和水文气象观测信息,利用反映云顶温度和厚度的可见光和红外线的RS信息,结合地形地貌可估算大面积空间变异的降水量,利用遥感微波技术可估算土壤含水量等。1993年10月,在德国召开的国际实验及网络资料水流情势第二届学术大会中,突出了不同时空尺度水信息变化的相似性和变异性问题^[24]。

大尺度的土壤侵蚀是一个复杂的自然过程,受到土壤、地质、植被、人类活动等多种因素的影响,虽然对于单因子的认识已取得大量研究成果,但是对于这些因子在一个较大的地理系统内的组合变化关系认识仍不清楚。在不同区域,影响土壤侵蚀的因子不同,它们的组合以及组合力度也不同,因此建立大尺度区域的单个模型预测的准确性受到限制^[25]。大尺度上进行土壤侵蚀监测与预报,实现区域水土流失研究的重要途径是尺度转换的理论与技术研究^[26]。进行大区域的土壤侵蚀监测对于加强土壤侵蚀的治理具有重要的现实意义,并且可以避免坡面、小流域研究因研究尺度的局限带来的局限,同时也有利于检验和利用微观研究的成果,更好地反映全球气候变化下的土壤侵蚀变化状况。

3 土壤侵蚀模型研究

土壤侵蚀模型是土壤侵蚀规律研究的重要途径。当前国际上主要的侵蚀产沙模型有:RU-SLE模型(Revised Universal Soil Loss Equation)^[27]、WEPP模型(Water Erosion Prediction Project)^[28]、LISEM模型(The Lingurg Soil Erosion Model)^[29]、EPIC模型(Erosion Productivity Impact Calculator)^[30]、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型^[31]、EUROSEM模型(European Soil Erosion Model)^[32]、AGNPS模型(Agricultural Nonpoint Source)^[33]、ANSWERS模型(Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)^[32]、GREAM模型(Chemicals Runoff, and Erosion from Agricultural Management System)^[35]、MMF模型(Morgan-Morgan-Finney)^[36]、SEMMED模型(Soil Erosion Model for Mediterranean areas)^[37]、SHE型(System Hydrologique European)^[38]及KINEROS模型(Kinematic erosion simulation model)^[39]。概括起来讲,基于物理过程的、基于GIS和RS的及分布式的土壤侵蚀成为当前土壤侵蚀模型发展的方向;模型的校准、检验、应用和完善成为当前土壤侵蚀模型研究的重要内容。

侵蚀产沙的空间尺度是当今土壤侵蚀研究的前沿,研究范围广泛,小到土壤颗粒,大到全球气候变化与碳循环模拟。侵蚀产沙的物理方法,主要应用在小区尺度和坡面尺度。随着向流域和全球的中观和宏观尺度扩展,原来的“理论”模型需均化和再参数化,并产生新的机理。导致相邻尺度间的侵蚀产沙过程联系太复杂,关系很不清楚。近年来,随着流域过程和形态资料的积累和丰富,人们认识到只有宏观研究不断取得进展,微观研究的继续深化才有可能,不同尺度流域之间侵蚀产沙和输移究竟有怎样的内在联系,小流域所获得的研究成果是否能应用到大中流域,成为迫切需要解决的重要问题。有关流域侵蚀产沙与输移过程随流域尺度复杂变化的研究,国际上刚刚开始,已有的研究工作都缺乏深度和广度;国内有关流域尺度研究仅限于水文学的一些研究,关于流域侵蚀产沙与输移过程随流域尺度变化的研究很少。如何利用观测的已知信息识别未知的参数即模型参数识别和如何利用小尺度均匀的侵蚀产沙模拟推广到大尺度的非均匀系统,即侵蚀产沙的空间尺度问题,仍然是两个需要探讨的问题。

4 结 论

在研究土壤侵蚀、全球气候变化及土地利用变化时,需要在监测研究、实验研究和模型研究方面加强合作,相互促进。

在土壤侵蚀的实验研究方面，将进一步注重理论研究，包括侵蚀过程的细分，土壤、降雨、植被等侵蚀因子及其交互作用对侵蚀过程的影响研究、泥沙在复杂坡面以及不同尺度流域间的分散、输移和沉积作用，实验研究将为土壤侵蚀的监测和模型提供更坚实的理论基础。

在土壤侵蚀的监测研究方面，将注重采用先进的 RS、GIS 技术对大区域的水土流失进行监测，快速、准确、大容量地提取区域土壤侵蚀信息，为侵蚀模型的研究提供更广泛的数据源；也有利于土壤侵蚀实验及模型研究成果的检验。

在土壤侵蚀模型方面，将从以侵蚀因子为基础的侵蚀预报转向侵蚀过程的量化研究和理论完善^[40]。此外，尺度转换将是土壤侵蚀产沙模型研究的重要方面。对于侵蚀过程的分析研究涉及到模型结构和参数问题，以后的土壤侵蚀模型将是基于 GIS、RS 技术，具有一定物理意义的，对模型参数具有较好弹性的模型，同时模型应具有较强的灵活性和较好的区域适应能力。

参考文献：

- [1] Poesen J W, Boardman J, Wilcox, Valentin C. Water erosion monitoring and experimentation for global change studies [J]. *Journal of soil and water conservation*, 1996, 51(5) : 386 - 390.
- [2] Boardman J. Soil erosion monitoring programmes[A]. Paper presented at IGBP GCTE-SEN Workshop "Soil erosion under global change"[C] 29-31 March 1994, Paris, France.
- [3] Bulter T P. Long-term study of the natural environment-perceptive science or mindless monitoring[J]. *Progress in physical Geography*, 1994, 18(4) :475 - 496.
- [4] Boardman J. Damage to property by runoff from agricultural land, South Downs, southern England, 1976 - 1993[J]. *Geographical Journal* 1995, 161(2) :177 - 191.
- [5] Boardman J. 1988, Severe erosion on agricultural land in East Sussex, U. K[J]. *Soil technology* 1987:1(10) :333 - 348.
- [6] Ingram J S I, Lee J J, Valentin C. The GCTE soil erosion network: a multi-participatory research program[J]. *Journal of soil and water conservation*, 1996, 51(5) : 377 - 380.
- [7] Favis-Mortlock D T, Quinton J N, Dickinson W T. The GCTE validation of soil erosion models for global change studies [J]. *Journal of soil and water conservation*, 1996, 51(5) : 397 - 403.
- [8] Kirkby M J. A model to estimate the impact of climatic change on hillslope and regolith form[J]. *Catena* 1989, 16: 321 - 341.
- [9] Lavee H, Imeson A C, Pariente S, *et al.* The response of soils to simulated rainfall along a climatological gradient in an arid and semi-arid region[J]. *Catena*, 1991, 19: 19 - 37.
- [10] Eybergen F A, Imeson A C. Geomorphological processes and climate change[J]. *Catena* 1989, 16: 306 - 319.
- [11] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, *et al.* Spatial and short-term temporal variation in runoff soil aggregation and other soil properties along a Mediterranean climatological gradient[J]. *Catena*, 1998, 25:123 - 138.
- [12] Bissonais Le. Comportement d'agreges terreux soumis l'eau: analyse des mecanismes de desagregation[J]. *Agronomie*, 1988, 8:915 - 924.
- [13] Kemper W, Koch K. Aggregate stability of soils from Western United States and Canada[M]. USDA. Tech. Bull. 1355, USDA, Washington 1996.
- [14] Lavee H, Pariente S. Spatial variability of soil properties along a climatic gradient. In H.Lavee (ed) [M]. *Guide to Judean Desert Climatological Gradient Excursion*. Israel, May 13 - 22, Barhan University, Israel, 1955. 16 - 30.
- [15] Pieri C. Fertile des terres de savane. Bilan detrente ans de recherche et de developpement agricoles au sud du Sahara[M]. *Ministre de la cooperation/CIRAD*, Paris, France, 1989. 444.

- [16] Butler D R. Zoogeomorphology. Animals as Geomorphic AGENTS[M]. Cambridge University Press, USA. 231.
- [17] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning[M]. Science and Education Administration, USDA. , 1978, 40 - 62.
- [18] Renard K G, Foster G R, *et al.* RUSLE-revised universal soil loss equation[J]. Journal of Soil Water Conservation, 1991, 46(1) :30 - 33.
- [19] Savabi M R. Application of WEPP and GIS-GRASS to a small watershed in Indian[J]. Journal of Soil and Water conservation, 1995, 50(5) :477 - 483.
- [20] Lobb, Kachanoski D A R G, Miller M H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ^{137}Cs as a tracer[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75 :211 - 218.
- [21] Duval Y. Pour reduire la tare, connaitre et observer les sols[J]. Le Betteravier Francais, 1988, 531 :27 - 29.
- [22] Trimble S W. Erosional effects of cattle on streambanks in Tennessee. U. S. A Earth surface processes and landforms, 1994, 19 :451 - 464.
- [23] 胡良军, 李 锐, 杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2) :167 - 175.
- [24] 夏 军. 水文尺度问题[J]. 水利学报, 1993, (5) :32 - 37.
- [25] 杨胜天, 朱启疆. 人机交互式解译在大尺度土壤侵蚀遥感调查中的作用[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3) :88 - 91.
- [26] 胡良军, 邵明安. 区域水土流失研究综述[J]. 山地学报, 2001, 19(1) :69 - 74.
- [27] Renard K G. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Agriculture Handbook 537, 1997.
- [28] Foster G R, Lane L J. User requirements USD A-water erosion prediction project (WEPP) [R]. NSEAL Report No. 1. West Lafayette 1987.
- [29] De Roo, A P J, *et al.* LISEM: a single event physical-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins : Theory, input and output[J]. Processes, 1996, 10(8) , 1107 - 1117.
- [30] Williams J R, Renard. EPIC-A new method for assessing erosion 's effect on soil productivity[J]. Journal of Soil and water Conservation, 1983, 38(5) :381 - 383.
- [31] Srinivasan R, Arnold J G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS[J]. Water Resources Bulletin, 1994, 30(3) : 453 - 462.
- [32] Morgan R P C, *et al.* The European Soil Erosion Model (EUROSEM) : a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchment[M]. Earth surface processes and landform. 1998, 23 : 527 - 544.
- [33] Young R A. AGNPS:A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2) :168 - 173.
- [34] Beasley D B, Huggins L F. ANSWERS User 's Manual, West Layette[M]. Dept If Agric, Eng, Purdue University, 1982.
- [35] Cooper A B. Prodcting Runoff of water, sediment, and nutrients from a New Zealand Grazed pasture using CREAMS [J]. Transations of the ASAE, 1992, 35(1) :104 - 112.
- [36] Morgan R P C. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan-Morgan-Finney model[J]. Catena, 2001, (44) : 305 - 322.
- [37] De Jong S M, *et al.* Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data [J]. Catena, 1999, 37(3 - 4) : 291 - 308.
- [38] Wicks, Bathurst. SHESED :a physical based, distribute erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modeling system[J]. Journal of Hydrology, 1996, 175 : 213 - 238.
- [39] Smith R E, Godrich D C, Unkrich C L. Simulation of selected events on the Catsop catchment by KINEROS2, A report

for GCTE conference on catchment scale erosion models[J]. Catena, 1999, 37:457 - 575.

[40] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 3 - 225.

Study on soil erosion experiment , monitoring and modeling of various scale conditions

TANG Zheng-hong¹ , CAI Qiang-guo¹ , XU Feng² , ZHU Yuan-da¹

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100101 , China ;

2. Monitor Center of Water and Soil Conservation of Ministry of Water Resources , Beijing 100053 , China)

Abstract : It is the important methods for obtaining the data of soil erosion through soil erosion experiment and monitoring. The soil erosion models are the important contents for soil and water conservation planning , management. This paper summarizes the results of soil erosion experiments and monitoring studies , introduces the key points of experiment and monitoring , and reviews and evaluates the current major soil erosion models of overseas , especially in analyzing the effects of these models on the condition of global climate change.

Key words : scales ; soil erosion ; global climate change

欢迎对本刊论文进行讨论 , 讨论稿请寄本刊编辑部。