

# 区域土壤侵蚀过程的地形因子效应\*

高华端<sup>1,2,3</sup> 李锐<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100

<sup>2</sup>中国科学院研究生院 北京 100049; <sup>3</sup>贵州大学林学院 贵阳 550025)

**摘要** 大尺度、宏观的区域土壤侵蚀研究对于地区性的土壤侵蚀现状评价及土壤侵蚀趋势分析有重要意义。本研究以乌江流域为对象,分析了区域土壤侵蚀过程中地形因子的作用,对地形因子进行了筛选。结果表明,平均坡度、大于 15°的面积百分比、大于 25°的面积百分比,平均起伏度、起伏度 100m 以上的面积百分比、起伏度 200m 以上的面积百分比等地形参数对区域土壤侵蚀影响明显且规律性强,可作为区域土壤侵蚀过程模拟、评价以及水土保持规划的主要地形参数。

**关键词** 区域土壤侵蚀;地形因子;乌江流域

[中图分类号]S157, P9 [文献标识码]A [文章编号]1002-2651(2006)02-0006-04

## Topographic Effects on Regional Soil Erosion Process

GAO Huaduan<sup>1,2,3</sup> LI Rui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling, Shanxi, 712100;

<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049;

<sup>3</sup>Forestry College of Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025

**Abstract:** It is significant for regional and current soil erosion evaluation and trend analysis to carry out the large scale and macroscopical region soil erosion research. Based on the background of Wujiang River Watershed, the research analyzes the function of landform factors during the regional soil erosion process and selects landform factors at the same time. The results indicate that the landform parameters such as average slope degree, area percentage of landform more than 15 degree, area percentage of landform more than 25 degree, average relief, area percentage of landform relief more than 100m and area percentage of landform relief more than 200m have good relationship to region soil erosion, which can be used as the main landform parameters for the process simulation and evaluation of regional soil erosion and soil & water conservation planning.

**Key Words:** Regional soil erosion; Landform factor; Wujiang river watershed

区域土壤侵蚀研究对于掌握大尺度、宏观的区域土壤侵蚀特征,对地区性的水土流失现状评价及水土流失趋势分析有重要意义。大尺度的土壤侵蚀是一

个复杂的自然过程,受到地质、地形地貌、土壤、植被、降水和人类活动等多种因素的影响,其研究方法和手段也不同于小尺度的流域或坡面。区域尺度上的土

\* 资助项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国水土流失现状、趋势与对策研究”;中国科学院、工程院、水利部科考项目——“中国水土流失与生态安全综合科学考察”。

收稿日期:2006-5-15

作者简介:高华端(1965-),男,贵州织金人,副教授,博士,主要从事区域水土流失研究。

壤侵蚀研究, 当前主要集中在对土壤侵蚀的动态监测方面。长期以来, 国内外关于土壤侵蚀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<sup>[1]</sup>。对小区、田间、坡面的侵蚀产沙机理、过程及其动力学特征研究较为深入, 而对宏观的、用于区域水土流失评价与预测中的地形因子, 还没有较完整的地形指标体系。

我国水蚀区区域自然地理条件分异明显, 不论是东北漫岗、北方丘陵、黄土高原, 还是南方丘陵、云贵高原、青藏高原、四川盆地, 各有其独特的自然地理特点, 如何筛选适合于大尺度的土壤侵蚀评价及趋势预测地形指标, 是目前土壤侵蚀研究的热点和难点。

雷孝章<sup>[2]</sup>研究了长江上游不同地貌类型区的土壤侵蚀空间分布格局, 以及各影响因子与土壤侵蚀间的关系。在其土壤侵蚀模拟模型中, 小流域地形采用了流域平均坡度, 相关性较好。

刘新华等对不同尺度上(1: 1 万、1: 5 万和 1: 100 万比例尺) 影响水土流失的地形因子指标进行了分析提取, 认为坡度是微观尺度(如 1: 1 万, 1: 5 万) 的最佳应用指标, 而在宏观尺度上(如 1: 100 万) 则可选择地形起伏度、河网密度、地形粗糙度和高程变异系数等作为分析指标<sup>[3]</sup>。

赵帮元等<sup>[4]</sup>利用不同比例尺的 DEM(1: 1 万, 1: 5 万和 1: 25 万) 提取土壤侵蚀的地形信息, 在提取坡度时, 比例尺小则误差大, 特别是陡坡面积大大减少。1: 1 万的 DEM 可以用于小流域层面, 1: 5 万的 DEM 可以用于重点流域, 1: 25 万的 DEM 只能用于更大区域尺度。

然而, 由于地形因子在区域土壤侵蚀过程中的复杂效应, 推求单因子的响应及多因子的交合作用过程都是困难的, 特别是当我们将因子分级过细时, 更难准确反映客观规律, 不论用什么手段做出的结论, 其实用性将会降低。

为此, 通过“中国水土流失与生态安全综合科学考察”, 利用所收集的信息, 结合对研究区本底的分析, 认为, 对宏观的区域土壤侵蚀研究, 采用的地形因子应该是宏观和区域性的可操作因子。

## 1 研究区概况

乌江流域位于  $E104^{\circ}10' \sim 109^{\circ}12'$ ,  $N25^{\circ}56' \sim 30^{\circ}22'$ , 总面积为  $87\ 920\text{km}^2$ , 除下游一部分位于四川盆地边缘山地外, 其余均分布在云贵高原东北部。西以乌蒙山与金沙江支流横江——牛栏江为分水岭; 南以苗岭与珠江流域西江上游红水河、北盘江为分水岭; 东

以武陵山与沅江为分水岭; 西北以大娄山与赤水河、綦江为分水岭。分水岭高程在  $700 \sim 2\ 900\text{m}$  之间。流域内地形地貌复杂多样, 水土流失区域分异明显。

## 2 研究方法

参加中国科学院、工程院、水利部主持的“中国水土流失与生态安全综合科学考察”, 以实地野外调查、与地方政府及相关部门座谈和群众访问等为主要形式, 对长江上游及西南诸河进行综合科学考察, 收集各历史时期水土流失及水土保持方面的相关资料。本研究针对乌江流域, 收集了“七五”期间、长治工程实施以来流域内社会、经济、土地利用、森林植被、土壤侵蚀、气候条件等方面的资料。

同时, 以 1/200 000 地形图为底图, 利用 ARC/INFO 地理信息系统软件, 生成流域坡度图、地形起伏度图, 提取流域地形参数。结合土壤侵蚀资料, 以县级行政区划为单元, 研究地形因子对区域土壤侵蚀的效应。

## 3 结论

### 3.1 区域土壤侵蚀地形因子研究现状

影响区域土壤侵蚀的因子很多, 主要体现为地质、地形地貌、土壤、植被、降水和人为因素的作用。在诸多因子中, 地形因子相对稳定, 在人活动时期基本上不会有太大变化, 因而对其在区域土壤侵蚀过程中效应的认识, 具有重要的意义。在大尺度、区域层面上, 这方面的研究工作已经起步, 然而, 由于缺乏足够的区域监测资料, 研究的类型不多、系统性不强。

地形对土壤侵蚀的影响一直受到重视, 在径流小区、坡面尺度上, 进行了大量重要的试验模拟工作, 并得到许多侵蚀模型: 如, USLE(Universal Soil Loss Equation)<sup>[5]</sup>、RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)<sup>[6]</sup>、WEPP(Water Erosion Prediction Project)<sup>[7]</sup>等。

国内在土壤流失预报中, 许多情况是对 LS(坡度和坡长) 因子的公式修正。如江忠善等在黄土高原<sup>[8,9]</sup>, 杨子生在滇东北山区<sup>[10]</sup>, 杨艳生在长江三峡等地<sup>[11]</sup>, 求取了适宜于当地的坡度和坡长因子的经验关系式。在黄土高原 1: 50 万土壤侵蚀遥感调查与制图研究<sup>[12]</sup>及基于 GIS 的区域水土流失评价研究<sup>[13]</sup>中, 根据黄土高原特有的沟壑负地形与梁峁正地形的分异特征, 选取了沟壑密度作为反映黄土高原地形破碎程度的宏观综合指标。

刘前进等<sup>[14]</sup>认为: 土壤侵蚀模型在空间尺度上可以划分为坡面、小流域和区域 3 个不同层次。在坡面尺度上, 主要考虑坡面侵蚀的垂直分带性及其相互影响; 小流域尺度上, 不但考虑坡面侵蚀的特点, 还要

考虑坡面来水来沙对沟道侵蚀产沙的影响、重力侵蚀及泥沙输移情况;在区域尺度上则主要考虑小流域各自的侵蚀产沙特点及其相互影响。因侵蚀的空间尺度不同,在建立土壤侵蚀模型时,要考虑由于空间变化所引起的侵蚀因子对侵蚀产沙效应的不同。

总的看来,对于大尺度、宏观的土壤侵蚀地形因子研究还缺乏深度,没有形成系统实用的指标体系,对于全国的、大流域的区域土壤侵蚀预测预报模型也还有待进一步深入。

### 3.2 区域土壤侵蚀地形因子的筛选

在水蚀地区,我国的地形地貌按其成因可以分为构造运动形成的构造地貌,地表流水形成的侵蚀地貌以及可溶岩地区形成的岩溶地貌(喀斯特地貌)。构造地貌大至山地、高原、平原、盆地的形成,小至局部的背斜山、向斜谷、断层谷、断块山等,其规模大小不一;流水地貌主要体现为不同级别流域形式,流域内的分水岭、河间地块、水系网络、坡面、浅沟、切沟、冲沟以及各类堆积地形是其主要构成要素;岩溶地貌则以溶沟、溶槽、石芽、漏斗、落水洞、坡立谷、峰林、峰丛、孤峰、残丘、地下暗河、溶洞等形式出现。因而,在区域层面上,地形地貌条件复杂多样,很难用坡面或小流域尺度上的地形参数描述其特征。

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<sup>[15]</sup>,不论用何种方法进行,都不能不考虑其成因上的联系。对于区域土壤侵蚀地形因子的研究,水蚀地区合适的方法是以流域为研究对象,以流域级别为尺度,流域地貌特征为地形特征,分析不同级别流域地貌特征与土壤侵蚀的关系,寻求某一种尺度上能正确反映土壤侵蚀的地形指标。然而,这一技术路线的难点在于不同流域级别层面上土壤侵蚀监测资料的缺乏。

基于本次“中国水土流失与生态安全综合科学考察”所收集的资料,乌江流域地形因子资料主要有水道系统、水道比降、水道长度、河网密度、河网频度、坡度、地势起伏度等,其中水系资料由于受地质条件影响大,如岩溶(喀斯特地貌)地区的特殊性,不能很好地反映区域共性,因而主要集中对坡度和地势起伏度的分析。经分析研究,发现平均坡度、15°以上地形面积百分比、25°以上地形面积百分比、平均起伏度、地形起伏 100m 以上面积百分比、地形起伏 200m 以上面积百分比等参数能很好反映土壤侵蚀规律及发展趋势。在乌江流域,对于县级单元或 1 000~5 000km<sup>2</sup>的区域土壤侵蚀评价具有指导意义。

### 3.3 地形坡度对区域土壤侵蚀的影响

坡度是土壤侵蚀过程中的重要影响因子之一,坡度的大小直接影响水动力条件,从而影响土壤侵蚀。土壤侵蚀过程中坡度的效应,在各类侵蚀模型中都有体现<sup>[2,5-7]</sup>。

津格<sup>[16]</sup>采用径流小区的模拟降雨和野外条件表明坡度增加 1 倍,土壤流失量增加 2.61~2.80 倍,其关系式为: $A = CS^m L^{n-1}$

式中,A 为单宽坡面单位面积上的土壤侵蚀量;C 为变量常数;S 为坡度;L 为坡面水平长度;m, n 分别为坡度指数和山坡水平长度指数,分别采用 1.4 和 1.6。

刘善建提出坡度与冲刷指数的关系,并求得农地上冲刷深度 d(mm) 与坡度 S(%) 的关系为<sup>[17]</sup>:

$$d = 0.012S^{1.4} + 0.56$$

同时,一些研究认为,侵蚀量随坡度的增大而增大并不是绝对正相关。当坡度达到一定值时,侵蚀量反而呈减少趋势,即存在一个临界坡度。

陈永宗利用径流小区试验资料分析提出,25°或 28°是一个侵蚀临界坡度<sup>[18]</sup>。

由于尺度的不同,研究系统的层次也就不一样,其各种因子的功能及相互协同作用会在更高层面上体现,共性在增加,异性在淡化。坡度在区域尺度上对土壤侵蚀的影响也一样,过细的分级及过小范围的资料反而不能体现其特征,同时也影响实用性。根据乌江流域平均侵蚀模数与坡度的调查资料(略),用县级尺度的数据反映全流域土壤侵蚀的空间分异特征,有较好的效果。主要体现在下列几方面。

3.3.1 平均坡度与土壤侵蚀模数的关系。从调查资料(略)可以看出,乌江流域的平均坡度有一个相对集中的范围,主要在 15~23°之间。同时,平均坡度与平均侵蚀模数之间相关性较好,呈现线性相关关系。相关方程为:

$$Y = 229.65X - 868.79$$

$$R^2 = 0.6884$$

式中,X:平均坡度(°);Y:平均土壤侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>·a);R:相关系数。

可以看出,在不考虑其他因素的情况下,平均坡度和土壤侵蚀模数之间存在较高的相关性,这不仅体现了土壤侵蚀过程的内在机理,也反映了在多因素影响中坡度因子的贡献程度。

3.3.2 土壤侵蚀过程中的坡度累积效应。由于自然界地形坡度的变化大都是渐变的,任何关于坡度级别

的分类系统都会有一定的不足。如果将坡度的效应按累积的方式分析, 不仅在理论上符合土壤侵蚀原理, 在实践上对于区域土壤侵蚀评价和模拟也具有可操作性。

通过对收集数据的处理, 发现坡度的累积效应比较明显。其中, 大于  $15^\circ$  的地形所占的面积百分比对土壤侵蚀模数有很大的影响, 其相关关系为:

$$Y = 35.693X + 1045.9$$

$$R^2 = 0.599$$

式中, X:  $15^\circ$  以上地形面积百分比(%); Y: 平均土壤侵蚀模数( $t/km^2 \cdot a$ ); R: 相关系数。

大于  $25^\circ$  的地形所占的面积百分比和土壤侵蚀模数也存在较好的相关性, 其相关关系为:

$$Y = 65.48X + 2133.6$$

$$R^2 = 0.6908$$

式中, X:  $25^\circ$  以上地形面积百分比(%); Y: 平均土壤侵蚀模数( $t/km^2 \cdot a$ ); R: 相关系数。

可以看出,  $25^\circ$  以上地形面积百分比对土壤侵蚀的效应比  $15^\circ$  以上地形面积百分比的效应好(有更高的相关系数), 这体现出  $25^\circ$  这一坡度界线的重要性, 它是一个区域土壤侵蚀过程中的坡度拐点, 只不过在区域尺度上, 这一拐点以上不是侵蚀减弱而是侵蚀加剧了。

### 3.4 地形起伏度对区域土壤侵蚀的影响

根据乌江流域资料, 流域内平均起伏度最小的县有中游的安顺和平坝, 最大县有下游的武隆和石柱。通过分析, 流域内平均起伏度与土壤侵蚀的关系比较明显, 呈现线性相关性。相关方程如下:

$$Y = 10.939X + 659.4$$

$$R^2 = 0.599$$

式中, X: 平均起伏度(m); Y: 平均土壤侵蚀模数( $t/km^2 \cdot a$ ); R: 相关系数。

地形起伏度与土壤侵蚀在成因上有必然的联系, 它决定了一个地区地表流水的势能, 也体现了未来土壤侵蚀的趋势, 是区域土壤侵蚀研究不可忽视的地形因子。

同样地, 起形起伏度对土壤侵蚀的影响也存在累积效应, 即一定范围的起伏度所占面积百分比对土壤侵蚀程度有明显影响。

具体地, 地形起伏 100m 以上面积百分比与平均土壤侵蚀模数的存在下列关系:

$$Y = 786.63e^{0.0154X}$$

$$R^2 = 0.5675$$

式中, X: 地形起伏 100m 以上面积百分比(%); Y: 平均土壤侵蚀模数( $t/km^2 \cdot a$ ); R: 相关系数。

地形起伏 200m 以上面积百分比与平均土壤侵蚀模数的关系如下:

$$Y = 29.057X + 1563$$

$$R^2 = 0.6268$$

式中, X: 地形起伏 200m 以上面积百分比(%); Y: 平均土壤侵蚀模数( $t/km^2 \cdot a$ ); R: 相关系数。

由上面关系式对比可知, 高起伏度(200m 以上)所占面积百分比与土壤侵蚀相关性更好( $R^2 = 0.6268$ ), 同时由于 100m 以上起伏度面积百分比与土壤侵蚀模数关系为指数关系, 当各百分比达到一定程度时(75%左右), 随着其值的增加, 土壤侵蚀模数将急剧增大。

## 4 结果与讨论

研究区域土壤侵蚀的地形因子, 一方面要考虑地形因子选择的合理性, 避免因尺度变化而造成的部分地形属性的抹杀, 另一方面还要注意地形因子的可识别性、可操作性和实用性。通过上述分析认为, 评价单元内平均地形坡度、 $15^\circ$  以上面积百分比、 $25^\circ$  以上面积百分比、平均起伏度、100m 以上起伏面积百分比和 200m 以上面积百分比等地形参数参予区域土壤侵蚀分析研究、过程模拟和预测预报是有意义的, 可以在不同的一级水蚀类型分区选择使用。同时由于资料来源的限制, 还应关注如下一些问题:

4.1 以县为分析单元, 不能充分体现土壤侵蚀的过程机理, 如果有足够的各级别流域土壤侵蚀监测数据或泥沙资料, 将会在更深层次上体现地形与土壤侵蚀的关系。

4.2 土壤侵蚀是多因子的协同作用过程, 单因子的地形分析只能在一定程度上反映地形与土壤侵蚀的关系。但如果全流域内降水和植被的空间变异性不很大, 研究结论是准确的。

4.3 大尺度的土壤侵蚀评价和预测研究, 地形因子的选择和分级不宜过细、空间分异不宜过碎, 以便提高其实用性和可操作性。

4.4 大区域的特征是区域土壤侵蚀关键背景, 各区域自然地理条件差异较大, 寻求放之四海而皆准的统一侵蚀模型不太现实。

4.5 区域土壤侵蚀监测应得到进一步加强。这点单纯靠科研力量是不够的, 需要各级各地区相关部门的关注和大力投入。

(下转第 14 页)

种阔叶树林分土壤相差不大。

#### 4 结语

采用木兰科几种阔叶树与马尾松混交改善林分水源涵养的功能,主要表现在混交后提高了土壤的贮水功能。

枯落物的数量和质量以及植物根系的多寡和在土壤中分布的状况对林地水源涵养功能具有重要的作用。

地上部分持水量以马尾松纯林最大,其次是混交林,最小为阔叶树纯林;活地被物枯落物部分持水量以阔叶树纯林最大,其次为混交林,最小为马尾松纯林;土壤渗透能力以混交林最大,其次为阔叶林,最小为马尾松林。

#### 参考文献

(上接第 9 页)

4.6 区域土壤侵蚀研究应与国家大政方针、区域规划相结合。

随着区域土壤侵蚀降水、植被、土壤、社会经济等因子研究的深入,监测数据的增加,区域土壤侵蚀研究将会得到进一步的发展,更好地为相关部门提供科学实用的决策支持。

#### 参考文献

- 1 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
- 2 雷孝章.长江上游部分地区土壤侵蚀规律的研究[J].林业科学,1995(1):35~43
- 3 刘新华,张晓萍,杨勤科,等.不同尺度下影响水土流失地形因子指标的分析 and 提取[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004(6):107~110
- 4 赵帮元,喻权刚,马红斌,等.不同比例尺数字高程模型在水土保持信息提取中的应用分析.中国水土保持[J],2004(2):33~34
- 5 Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning[M]. Science and Education Administration, USDA. , 1978, 40~62
- 6 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
- 7 Savabi M R. Application of WEPP and GIS- GRASS to a small watershed in Indian[J]. Journal of Soil and Water conservation, 1995,

- 1 李荫森,张鼎华.闽江流域主要森林类型水源涵养功能的研究(I).福建水土保持,1989(1):8~13
- 2 李荫森,张鼎华.闽江流域主要森林类型水源涵养功能的研究(II).福建水土保持,1989(2):1~5
- 3 陈存及,陈伙发主编.阔叶树种栽培.北京:中国林业出版社,2000
- 4 于志民,王礼先主编.水源涵养林效益研究.北京:中国林业出版社,1999
- 5 张万儒,许本彤编著.森林土壤定位研究法.北京:中国林业出版社,1986
- 6 [苏]波诺马廖娃 BB,帕洛特尼柯娃 TA(魏开湄译).腐殖质与土壤形成.北京:农业出版社,1987

50(5):477~483

- 8 江中善,刘志,贾志伟.地形因素与坡地水土流失关系的研究[J].中国科学院、水利部水土保持研究所集刊,1990(12):1~8
  - 9 江中善,李秀英.黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J].中国科学院、水利部水土保持研究所集刊,1998(7):40~45
  - 10 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤侵蚀的地形因子[J].山地学报,1999,17(增刊):16~18
  - 11 杨艳生.论土壤侵蚀区域性地形因子值的求取[J].水土保持学报,1988,2(2):89~96
  - 12 王乃斌,沈洪泉,赵存兴,等.黄土高原地区资源与环境调查和系列制图研究[M].北京:地震出版社,1991.71~113
  - 13 胡良军.基于 GIS 的区域水土流失评价研究——以黄土高原为例[D].陕西杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所,1999
  - 14 刘前进,蔡强国,刘纪根.不同空间尺度上侵蚀产沙模型研究.水土保持研究,2004(6):69~72
  - 15 唐政洪,蔡强国,许峰,等.不同尺度条件下的土壤侵蚀实验监测及模型研究.水科学进展,2002(11):787~787
  - 16 Zingg A W. Degree and length of land slope as it affect soil loss in runoff. Agri Eng, 1940, 21(2):59~64
  - 17 刘善建.天水水土流失测验与分析.科学通报,1953(12):59~65
  - 18 陈永宗,景可,蔡国强,等.黄土高原现代侵蚀与治理.北京:科学出版社,1988
- 注:本文由南方水土保持研究会推荐