

# 天然降雨条件下裸坡产沙量的逐步回归分析

王 瑄, 徐 璐, 陈雯静, 辛 艳

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

**摘 要:**坡面土壤侵蚀的发生是植被、土壤、降水、地形等各因素共同及相互作用的综合结果。该文旨在用逐步回归分析法从众多影响因子中选出对沈阳地区水土流失影响最大的因子,为沈阳地区人民生产及实践提供指导性意见。当自变量很多时,其中有的因素可能对因变量的影响不是很大,而且各因子之间可能是不完全独立的,会有种种相互作用关系。在这种情况下可以采用逐步回归分析方法,进行影响因子的筛选,建立“最优”回归方程,这样建立的回归模型预测效果会更好。为了确定本地区天然降雨裸坡侵蚀的影响因子,利用 10°,15°两个坡度进行降雨试验,对坡度、降雨量、降雨强度、最大瞬时雨强、降雨历时 5 个影响因子对产沙量进行逐步回归分析,结果表明:最大瞬时雨强、坡度及降雨量 3 个因子对产沙量影响显著。产沙量与各因子呈线性关系。

**关键词:**产沙量;逐步回归分析;影响因子;最大瞬时降雨强度

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)01-0117-04

## Stepwise Regression Analysis for Sediment Yield on Bare Slope under Natural Rainfall Condition

WANG Xuan, XU Lu, CHEN Wen-jing, XIN Yan

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** Occurrence of slope soil erosion is the result of a combination and interaction of vegetation, soil, precipitation, topography and other factors. Stepwise regression analysis method used in this article is intended to select the critical factor which impacts on soil erosion of Shenyang area, in order to provide guidance about production and practice for the people in Shenyang area. When there are a lot of independent variables, someone of them influence may be not evident and the variables may be not completely mutual independent, probably have a variety of interaction relationship. In this case we can use stepwise regression analysis method to screen out the impact factor and establish the optimal regression equation, the predicting result of such regression models will be more better than regular one. In order to determine impact factor of bare slope erosion under natural rainfall in this area, two slope gradients of 10° and 15° were used for test, five parameters including slope gradient, rainfall, rainfall intensity, the biggest instantaneous rainfall intensity and rainfall duration were adapted in stepwise regression analysis for sediment yield. The results indicated that the biggest instantaneous rainfall intensity, gradient and rainfall had appreciable impact on sediment yield. Sediment yield is linear with these variables.

**Key words:** sediment yield; stepwise regression analysis; impact factor; the biggest instantaneous rainfall intensity

土壤侵蚀是当前最严重的生态问题,它不仅制约着农业生产的发展,而且威胁着人类赖以生存的自然环境,使人类的生存面临巨大的挑战。坡面侵蚀是我国水土流失的主要形式之一,在辽宁省山区更以坡面侵蚀为主,控制与预防坡面水土流失是我国水土保持

工作的重点项目<sup>[1]</sup>。

影响坡面产沙的因素很多,由于地域范围和研究方法的不同研究成果有很大的差异,可分为人为因子和自然因子。人为因子是由于人类对土地的过度利用和开发活动造成的水土侵蚀流失,如森林草原等绿

收稿日期:2011-07-16

修回日期:2011-08-05

资助项目:辽宁省自然科学基金(20062110);辽宁省教育厅项目(L2010496)

作者简介:王瑄(1965—),女,辽宁昌图人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀和农业节水的教学研究。E-mail:xuanw11@163.com

地的过度采伐、过度放牧,毁林开荒和对城市及乡村建设造成的水土流失的防护治理不得当。经济的快速发展也造成了环境的加速破坏。自然因子主要包括土壤因素,地形因子和降雨因子。其中土壤因素是指土壤本身的质地,包括土壤可蚀性,土壤抗冲性及土壤渗透性。一般来说易风化的岩石如花岗岩紫色砂岩等常遭受强烈风化侵蚀。土壤可蚀性指标  $K$  是反映土壤抗蚀性的一个重要指标。著名的 USLE 方程及 WEPP 模型皆将其作为一个重要因子进行研究。

在所有气象因子中降水是与水土流失关系最为密切的因子,因为降水是地表径流和入渗水分的来源,即形成水土流失过程中水蚀破坏力的物质基础。影响坡面侵蚀的降雨因素包括降雨量、降雨历时、降雨强度、雨滴动能、雨型及前期降雨情况等因子。目前,各国对降雨因子对坡面土壤侵蚀的影响研究已经比较深入。国际上 Ekern<sup>[2]</sup> 在 1953 年就提出坡面侵蚀量与雨强之间的关系公式为  $Q \propto I^{1.1}$  ( $Q$  为坡面径流量,  $I$  为降雨强度)。Smith 和 Wischmeier 发现,在所研究的降雨因子中,降雨动能与野外径流小区上测量到的土壤流失关系较密切<sup>[3]</sup>,也是这两名学者最早提出将 30 min 最大雨强用以表达侵蚀与雨强的关系<sup>[4]</sup>。其他科学家对各种降雨特性指标进行了相关研究,但发现每一种指标都不能大范围应用<sup>[5]</sup>。国内的科学家研究认为,我国不同地区最优的表达降雨侵蚀力的雨强形式存在一定差别:如西北黄土高原地区取 10 min 最大雨强为最优表达式<sup>[6-7]</sup>;三峡库区紫色土区采用 30 min 最大雨强<sup>[8]</sup>;南方红壤区则为 60 min 最大雨强<sup>[9]</sup>。此外,不同地区影响坡面土壤侵蚀的主导因子存在差异。有统计表明,降雨强度对土壤流失量的影响程度北方明显高于南方<sup>[10]</sup>,尤以西北黄土地区最为显著;然而降雨量对土壤流失的影响程度南方却明显高于北方<sup>[11-12]</sup>。王万忠<sup>[10]</sup>指出主要是由于超渗产流与蓄满产流这两种不同的降雨入渗特征所决定的。王万忠等在对我国各地区降雨单因子与土壤流失关系的统计分析中得出:与土壤流失量关系最为密切的降雨特性因子为最大时段降雨强度 ( $U$ ),其次为降雨动能 ( $E$ ),再次为降雨量 ( $P$ )<sup>[13]</sup>。坡面侵蚀的主要形式是雨滴溅蚀<sup>[14]</sup>。雨滴溅蚀的原动力则是降落雨滴对地表的打击力,显然雨滴溅蚀作用与雨滴的物理性质有极为显著的关系。天然降雨雨滴大小与雨强有密切关系<sup>[15]</sup>。因此,本文选择降雨强度、最大瞬时雨强、坡度、降雨历时、降雨量 5 个影响因素来分析影响坡面侵蚀产沙的主要因子。

## 1 试验与方法

### 1.1 实验小区概况

试验在沈阳农业大学水利学院综合试验基地的水土保持室外径流小区进行。地点位于辽宁省沈阳市东陵区,北纬  $41^{\circ}44'$ ,东经  $123^{\circ}27'$ ,海拔 44.7 m。由于受季风影响属于半湿润温带大陆性气候,四季分明,降水集中,日照充足。年平均气温  $8^{\circ}\text{C}$ ,7 月份最热,平均气温  $24.6^{\circ}\text{C}$ ,1 月份最冷,平均气温零下  $11.8^{\circ}\text{C}$ 。无霜期 150 d,年平均降水量 722 mm,7 月降雨量最大,平均降水量为 183 mm,1 月最小,平均 7 mm。

### 1.2 试验方法

室外径流小区水平投影长 8 m,宽 1 m,共有 8 个小区,编号依次为 1—8,四周边埂采用砖砌,并用水泥砂浆抹面。径流小区底端设置簸箕型集水槽,并用接样桶采集坡面径流。径流小区坡面坡度采用  $10^{\circ}$  和  $15^{\circ}$  两种,每个坡度布设裸坡,每个裸坡做一次重复。小区布置完毕之后,尽量避免人为扰动。试验小区坡面布置如图 1 所示。

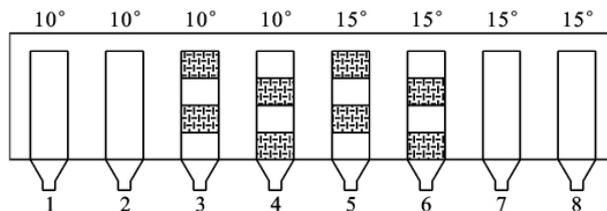


图 1 试验小区坡面布置图

图中阴影部分表示植被被种植植被部分,所种植物为大豆,播种密度为  $178 \text{ 株}/\text{m}^2$ 。本文主要采用 1, 2, 7, 8 号四个裸坡的数据进行回归分析。

由于东北地区降雨多集中在 6 月、7 月、8 月,这几个月坡面冲刷与水土流失也最为严重。2009 年 6 月、7 月、8 月 8 次降雨,将产流产沙情况进行记录,降雨量及降雨历时数据来自实验场内自记雨量计,自动计量降雨量每增加一毫米时所经过的时间间隔,从而可以通过计算得出该时刻的瞬时雨强。坡面开始产生径流时,用秒表记录产流时间,并用集流桶接取水沙样,直至降雨结束。降雨结束以后,把集流桶中的泥沙样封盖静置 24 h,让泥沙沉淀并防止水分蒸发。24 h 后把集流桶内澄清的水倒进容器,然后用量筒测出水的体积并做好记录;把集流桶下部沉淀下来的泥沙挖出,放入铝盒内称重并记录,然后放入烘箱烘干。

## 2 结果与分析

将产沙量 (kg) 做为因变量  $Y$ ,降雨强度  $X_1$  (mm/min),最大瞬时降雨强度 (mm/min),降雨历时 (min),降雨量 (mm) 及坡度 ( $^{\circ}$ ) 做为自变量影响因子。

将所有数据输入 SPSS 软件进行逐步回归分析。

结果得出最优回归方程  $Y = -5.610 + 2.990X_2 + 0.376X_5 + 0.039X_4$   $R^2 = 0.861, F = 64.854$ 。

由此图可以看出  $F$  值为 64.854,  $p$  值小于 0.05。表示回归显著。

在此逐步回归分析中,SPSS 软件做出了 3 个回归模型,最优回归模型即取  $F$  值最大的第三种模型,剔除了对因变量产沙量  $Y$  影响不显著的因子  $X_1$  平均雨强,  $X_3$  降雨历时。而对产沙量  $Y$  影响最大的是最大瞬时降雨强度,其次为坡度,再次为降雨量。用 SPSS 软件中的未标准化残差分析和标准化残差分析功能绘出以下两张  $Q-Q$  图(图 2—3)。

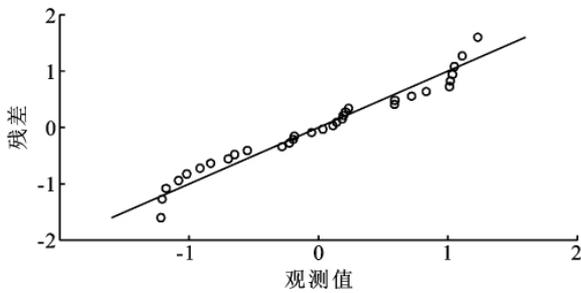


图 2 未标准化的残差  $Q-Q$  图

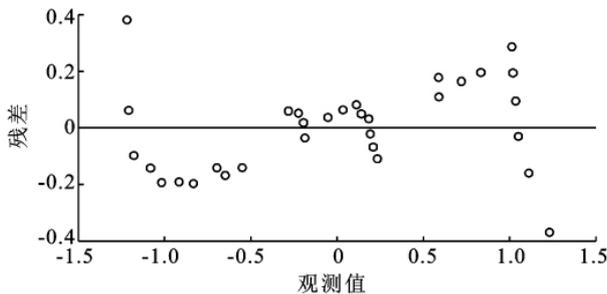


图 3 标准化的残差  $Q-Q$  图

未标准化残差图中显示各点分布趋于一条直线,说明回归方程有效。图 3 标准化残差图中各点是随机分布的没有出现趋势性,也可以说明回方程有效。由表 1 可以看出 4 个实验小区 8 次降雨的 32 个数据对比,估计值与实测值相差不大,方程拟合度较好。

由最优回归方程得出结论,最大瞬时雨强对产沙量影响最为显著,下面就瞬时雨强进行分析。选取 2009 年 7 月 22 日降雨为例,此图表示当日不同坡度裸坡降雨产沙率和瞬时雨强的关系变化如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,瞬时雨强对当时刻产沙率的影响,随着瞬时雨强的增加,产沙率也显著增加,20:35 至 20:36 时间段的瞬时雨强变小,但是由于产沙没有停止,产流率继续增加,随后的瞬时雨强减小幅度很大,产沙率也随之减小。总体来看  $15^\circ$  与  $10^\circ$  坡雨强对产沙率趋势趋于一致,产沙率都随着瞬时雨强的变大而增加,  $15^\circ$  坡面产沙率总体高于  $10^\circ$  裸坡。

此图给出的变化曲线也说明本文的回归分析是有效的。最大瞬时雨强对坡面产沙量影响显著。

表 1 实测值与回归方程估计值对比

编号	实测值 $y$	编号	实测值 $y$	编号	估计值 $\hat{y}$	编号	估计值 $\hat{y}$
1	0.4295	17	0.8837	1	0.68127	17	0.70024
2	0.3693	18	0.9092	2	0.68127	18	0.70024
3	1.3399	19	1.8842	3	1.19979	19	2.58130
4	1.3917	20	1.9327	4	1.19979	20	2.58130
5	1.5068	21	5.1427	5	1.78904	21	5.10896
6	1.5645	22	5.6991	6	1.78904	22	5.10896
7	2.8367	23	8.2209	7	3.67010	23	6.99003
8	3.1200	24	8.0246	8	3.67010	24	6.99003
9	1.8974	25	1.8090	9	3.10584	25	2.82677
10	1.9276	26	1.9107	10	3.10584	26	2.82677
11	4.9335	27	5.4278	11	4.98690	27	4.70784
12	5.8196	28	5.2955	12	4.98690	28	4.70784
13	1.0138	29	0.6396	13	0.00535	29	0.83463
14	1.0071	30	0.6477	14	0.00535	30	0.83463
15	1.9876	31	1.6340	15	1.87571	31	1.71569
16	2.1085	32	1.4975	16	1.87571	32	1.71569

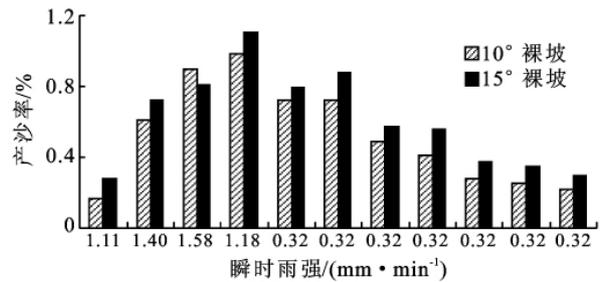


图 4  $10^\circ$  与  $15^\circ$  坡瞬时雨强与产沙率时时对比图

### 3 结论

(1) 5 个影响因子中最大瞬时降雨强度对产沙量的影响最大,两个坡度下的产沙率不同但趋势大致相同,都与最大瞬时降雨强度呈正相关关系,其次是坡度、降雨量。通过回归方程得出最大瞬时雨强每变动一个单位,产沙量变动 2.990 个单位。

(2) 产沙量与最大瞬时雨强、坡度、降雨历时、降雨量之间呈线性关系。

(3) 表 1 中实测值与方程模拟值拟合度较好,但仍需加强实验精度,注意相关实验细节。本文旨在研究天然降雨条件下各因子对土壤侵蚀的影响,分析土壤侵蚀机理,但未对各因子之间交互效应进行分析,其中复杂关系仍需进一步研究,期望对沈阳地区的农业生产及水土保持尽到微薄力量。

#### 参考文献:

[1] 刘阳,孙良凤. 坡面土壤侵蚀养分流失的计算机数值模拟[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(3): 183-186.

平均水平较低;(2)在相同土壤深度下,年代越久的城区绿地土壤碱性越弱,其与土壤有机碳含量之间存在明显负相关;(3)土壤碳密度和碳储量在 0—60 cm 土层等间隔的含量随着土壤深度的增加呈现出梯度递减的趋势变化;(4)土壤有机碳的含量随着土壤深度的增加也呈现出逐渐递减的趋势变化。

徐州城区绿地中行道树土壤普遍存在土壤压实大,土壤有机质和氮、磷含量低的问题,这必然会影响到树木的正常生长发育。所以,有必要采取一些改善措施,如增施有机肥料,这样不仅可以提供养分供应,而且可以改善土壤的结构,有助于减轻进而消除土壤压实的影响并且可以调节土壤的酸碱度。城市行道树下土壤有机质和氮、磷等含量偏低,与凋落物的归还受阻有关,若行道树能用树带的形式种植,尽可能保留较大的裸露土壤,并使枯枝落叶保留于其中而不是清扫走,这样将提高道路绿地下土壤有机质和养分含量。土壤碳储量的增加主要依赖于绿地面积的扩大和碳密度水平的提高,而后者受土壤有机碳和容重的影响。城市绿地是一个地上(植被)和地下(紧密)连续的统一体,将土壤的基本数据与其上植被群落的特征参数如叶面积指数、群落的盖度、树木的胸径等加以整合,进而研究植被与土壤的动态响应和反馈机制,以此来预测未来城市绿地的走势和发展将是一个全新的研究视角。

#### 参考文献:

- [1] 车生泉. 上海城市绿地景观异质性分析[J]. 上海环境科学, 2001, 20(11): 511-514.
- [2] 戴民汉, 翟惟东, 鲁中明, 等. 中国区域碳循环研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 120-130.
- [3] 卢瑛, 甘海华, 史正军, 等. 深圳城市绿地土壤肥力质量评价及管理对策[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 153-156.
- [4] 吴新民, 潘根兴, 姜海洋, 等. 南京城市土壤的特性与重金属污染的研究[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 29-33.
- [5] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 31(1): 72-80.
- [6] 刘为华, 张桂莲, 徐飞, 等. 上海城市森林土壤理化性质[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(2): 155-163.
- [7] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [8] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2002: 47-56.
- [9] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 693-700.
- [10] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤的特性及其管理[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 206-209.
- [11] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [12] 刘纪远, 于贵瑞, 王绍强, 等. 陆地生态系统碳循环及其机理研究的地球信息科学方法初探[J]. 地理研究, 2003, 22(4): 397-405.
- [13] 邓小文. 氮沉降对森林生态系统土壤碳库的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1622-1627.
- [14] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环与碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [15] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(4): 415-423.
- [16] 乔云发, 苗淑杰, 韩晓增. 长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 545-548.
- [1] 车生泉. 上海城市绿地景观异质性分析[J]. 上海环境科学, 2001, 20(11): 511-514.
- [2] Ekern P C. Problems of raindrop impact erosion[J]. Agricultural Engineering, 1953, 34: 23-25.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. USDA, Washington D C, Agricultural Handbook 537: 1978.
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1958, 39: 285-291.
- [5] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility[J]. Soil Science Society of American Proceedings, 1969, 33: 131-137.
- [6] 金雁海, 柴建华, 朱智红. 内蒙古黄土丘陵区次降雨条件下坡面土壤侵蚀影响因子研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 192-194.
- [7] 王万忠. 黄土地区降雨侵蚀力 R 指标的研究[J]. 中国水土保持, 1987(12): 34-37.
- [8] 吴从林, 张平仓. 三峡库区王家桥小流域土壤侵蚀因子初步研究[J]. 江流域资源与环境, 2002, 11(2): 165-170.
- [9] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力指标的研究[J]. 中国水土保持, 1992(2): 32-33.
- [10] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-9.
- [11] 谢小立, 王凯荣. 红壤坡地雨水地表径流及其侵蚀[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 839-845.
- [12] 杨一松, 王兆骞, 陈欣. 南方红壤坡地不同利用模式的水土保持及生态效益研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 84-87.
- [13] 王万忠. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5-16.
- [14] 吴长文, 陈法扬. 坡面土壤侵蚀及其模型研究综述[J]. 南昌水专学报, 1994, 13(2): 1-11.
- [15] Laws J O. Recent studies in raindrops and erosion[J]. Agricultural Eng., 1940, 21: 431-433.

(上接第 119 页)