南方不同类型土壤侵蚀量与降雨各因子的关系研究

张黎明[1,2]，林金石[1,2]，于东升[2]，史学正[2]
(1. 福建农林大学 资源与环境学院，福建 福州 350002；
2. 中国科学院 南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室，江苏 南京 210008)

摘　要：根据江西省鹰潭市红壤生态实验站自建气象站 1997—2003 年度观测资料和该站装填我国南方主要类型土壤的侵蚀小区土壤流失量实测数据，对降雨各因子与南方不同类型土壤侵蚀量的关系进行了分析。结果表明，在径流和雨强因子下，各土壤因子关系可用乘冥函数进行拟合；而在侵蚀性降雨量因子下，各土壤因子关系可用三次函数进行拟合。但由于土壤类型和同一土壤的原始利用方式不同，各土壤侵蚀量与不同降雨因子的回归方程式差异很大。

关键词：土壤侵蚀量；径流量；降雨量；雨强
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2011)02-0010-05　　**中图分类号**：S157.1

Relationship Between Sediment Yield and Rainfall Factors on Various Soils of Southern China

ZHANG Li-ming[1,2], LIN Jin-shi[1,2], YU Dong-sheng[2], SHI Xue-zheng[2]
(1. *College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian* 350002, *China*; 2. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu* 210008, *China*)

Abstract: Based on the observations of rainfall events and recorded soil erosion data on the plots-which was established particularly for typical soils of southern China, in the Ecological Experiment Station of Red Soil (EESRS), Yingtan City, Jiangxi Province, the relationship between sediment yield and rainfall factors was explored for the time period from 1997 to 2003. The results show that under the relationship between sediment yield and surface runoff could be described by a power function, while the relationship between sediment yield and rainfall volume could be described by a polynomial function. Owing to the distinct soil and land use types applied among the plots, the equations describing sediment yield and rainfall factors varied significantly.

Keywords: amounts of soil erosion; rainfall; runoff; rain intensity

土壤侵蚀是土地退化的根本原因，也是导致生态环境恶化最重要的因素。影响土壤侵蚀的因素复杂众多，有自然因素，如气候、地形、地质、土壤、植被等，还有社会和经济因素。在自然因素中，降雨是土壤侵蚀的主要动力。自从人类意识到降雨造成土壤侵蚀的严重性以后，降雨各因子和土壤侵蚀量的关系问题也一直是水土保持研究的热点。一般对于特定地区，降雨量、雨强和径流量是常用来描述产生土壤侵蚀的 3 个降雨因子[1]。目前，关于降雨量与土壤侵蚀量的关系，国内已有一些研究成果。如吴发启等人[2]对黄土高原南部缓坡耕地降雨量与土壤侵蚀量的回归分析结果表明，次降雨量与土壤侵蚀量呈乘冥函数关系。万廷朝[3]对黄丘Ⅴ副区的研究结果表明，降雨量与土壤侵蚀量的关系遵守线性变化规律。姚治君等人[4]在云南玉龙山东南坡研究结果也表明了同样的规律。林昌虎[5]在贵州砂页岩山地上研究降雨量与土壤侵蚀量的关系时发现，在地面覆盖度较低的情况下，降雨量与土壤侵蚀量也呈线性函数关系。相对于降雨量与土壤侵蚀量的研究，国内在雨强、径流与土壤侵蚀量关系方面的研究相对较少，但也做了一些工作。如傅涛等人[6]通过研究不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律，发现了泥沙中养分含量与雨强无关，但随坡度增加而降低的规律。康玲玲等人[7]通过研究不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律，得出相同雨强条件下土

收稿日期：2010-07-16　　修回日期：2010-08-30
资助项目：国家自然科学基金项目“水田土壤有机碳演变模拟的尺度效应研究”(41001126)；福建省自然科学基金(2010J05090)；教育部博士点基金(20103515120014)
作者简介：张黎明(1979—)，男(汉族)，甘肃省临夏市人，博士，讲师，研究方向为土壤资源与 GIS 应用。E-mail：fjaulmzhang@163.com。
通信作者：林金石(1980—)，男(汉族)，福建省武夷山市人，博士，讲师，研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail：linjs18@163.com。

壤流失量与养分流失量呈显著的正相关关系。陈浩[8]根据降雨径流对大理河流域系统泥沙输移比的影响,发现利用次降雨径流深度增幅比和洪峰增幅比不仅可以表征单位面积水流与沟道系统洪峰能量变化时对泥沙输移比的影响,并且具有极高的预报精度。

尽管国内外水土保持工作者在降雨因子与土壤侵蚀量关系方面做了不少工作。但是影响土壤侵蚀量的因素是多方面的,尤其土壤的本质属性对土壤侵蚀量的大小也起着举足轻重的作用[9-11]。由于土壤母质和土壤类型的复杂性和多样性,不同土壤类型的土壤可蚀性差异很大,即使是同类土壤,土壤母质的不同也使得土壤的可蚀性有所不同,从而导致在同一个地区不同类型土壤的侵蚀量与降雨各因子关系也可能不同[12-13]。因此,按土壤不同类型和母质进行系统的研究降雨各因子与土壤侵蚀量的关系是非常必要的;尤其在我国土壤类型复杂,水土流失很严重的南方地区,更有必要开展这方面的工作。为此,利用江西省鹰潭市中国科学院红壤生态试验站自建气象台站 1997—2003 年的自然降雨观测资料和该站获取的我国南方主要土壤类型侵蚀小区土壤流失量的实测数据,研究和分析降雨各因子与南方典型土壤侵蚀量的关系,以便为进一步提高我国整个南方地区不同土壤流失量预报精度提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区所在的鹰潭地区地处赣东北山区向鄱阳湖平原区的过渡带,属中亚热带北缘湿润季风气候区。这里地势较平坦,以低丘岗地为主,海拔均在 100 m 以下,年均气温为 17.7 ℃,最高温在 7 月份,平均温为 29.5 ℃,最低温在 1 月份,均温 5.1 ℃,≥10 ℃的积温为 5 628 ℃,年均日照时数为 1 852 h,年平均降水量 1 752 mm。而且年度雨量分布极为不均,干湿期非常明显,雨季为 3—6 月,降水量占全年总降水量的 60%,而旱季 9 月至翌年 1 月,降水量只占全年的 20%,这种现象极有利于土壤侵蚀的发生和发展[12]。

中国科学院南京土壤研究所鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站(简称红壤站),是中国科学院在南方红壤地区设置的一个长期、综合的试验研究基地。该站位于江西省鹰潭市余江县,东经 116°5′30″,北纬 28°15′20″,距南昌市 135 km,离鹰潭市 13 km。该站建有土壤侵蚀试验小区 22 个,小区的水平投影长 8 m,宽 1.5 m。其中 9—22 号小区分别装填我国南方主要类型的土壤,各试验小区土壤的一些基本情况见表 1。各小区用水泥板与外界分隔。在小区下方安装集水桶,用以收集径流和泥沙。在小区径流出口处,套上自制的 60 目网袋,以便收集粗颗粒的泥沙。所有小区均无任何植被覆盖,在每年的 3 月底翻耕一次。各小区在每次自然降雨前都将土层表面耙平,以破坏前一次降雨形成的表面结壳。

1.2　数据来源

自然降雨资料主要来源于 1997—2003 年度中国科学院红壤生态试验站自建气象台站实际观测数据。根据各年的原始降雨记录,确定各年度降雨的场次、时间,然后对各场次的降雨过程进行分析,最后在自记降雨纸上读出每次侵蚀性降雨的雨量和 30 min 最大雨强。土壤流失量和径流数据来自于红壤生态试验站 9—22 号侵蚀小区各年的实测资料。

1.3　研究方法

次侵蚀性降雨过后,立即分别测量各个小区的径流量(R_i),采集径流样品,收集网袋中所有的泥沙样品,待泥沙样风干后测定其重量(G_i)。在室内用烘干法测定每次侵蚀性降雨后收集的径流中的泥沙含量(C_s)和泥沙样中的土壤含水量(C_w)。则每次土壤流失量(S_i)为:$S_i = R_i \times C_s + G_i/(1+C_w)$;全年的径流量为$\sum R_i$,年土壤流失量为$\sum S_i$。

2　结果与分析

2.1　不同土壤侵蚀量与径流因子的关系

根据江西省鹰潭市红壤生态实验站 1997—2003 年度的气象观测资料和实测土壤流失量数据,应用地统计学分析软件 SPSS,在置信区间 99%下,对不同小区次侵蚀性降雨的土壤侵蚀量与径流量进行曲线拟合,并选用相关系数最高的回归模型来表达两者的关系(表 2)。

从表 2 可以看出,径流与土壤侵蚀量的关系是比较复杂的。对于各土壤来说,它们共同的规律是次径流量与土壤侵蚀量之间都存在着极显著的回归关系,且大部分土壤的回归系数都在 0.8 以上,说明南方不同土壤的径流量与侵蚀量有着很好的相关关系。但二者的回归方程表达式,却因土壤类型的不同而存在差异,如第四纪红色黏土发育的红色湿润新成土(9 号小区)、第四纪红色黏土发育的黏淀湿润富铁土(10 和 11 号小区)、红砂岩发育的铝质湿润淋溶土(12 号小区)和紫红色砂页岩发育的紫色湿润雏形土(22 号小区)的径流量与土壤侵蚀量呈三次函数关系:

$$M_s = a + bX + cX^2 + dX^3$$

式中:M_s——侵蚀量;X——径流量;a, b, c, d——常数。

而其它小区的径流量与土壤侵蚀量呈：$M_s=aX^b$ b——常数，且 $a>0$，$b>1$），说明随着径流量的增大，的乘冥曲线关系（M_s——侵蚀量；X——径流量；a，土壤的侵蚀量是增加的。

表 1 试验小区基本情况

小区	成土母质	土壤名称	土壤基本情况
9	第四纪红色黏土	红色湿润新成土	土壤原来的 A 和 B 层已全部被侵蚀，仅存红黄相间杂色的网纹层，地貌上形成状如沙丘的“红色沙漠”，已全为裸露地，无植被覆盖。
10	第四纪红色黏土	黏淀湿润富铁土	约 40 a 前曾是原始林地，后开垦为农地，土层深厚，种植油菜和花生，是当地第四纪红色黏土区分布很广的旱耕地土壤类型。
11	第四纪红色黏土	黏淀湿润富铁土	约 40 a 前曾是原始林地，林木砍伐后成为稀疏马尾松草本植物混杂的荒地，土层深厚，土壤原来的 A 层已被侵蚀，是第四纪红色黏土区最典型的荒地土壤类型。
12	红砂岩	铝质湿润淋溶土	林木砍伐后，是以稀疏草本植物为主的荒地，土壤原来的 A 层和部分 B 层已被侵蚀，是红砂岩地区有代表性的荒地土壤类型。
13	红砂岩	铝质湿润淋溶土	约 40 a 前由原始林地开垦成的耕地，主要种植油菜和花生。
14	紫红色砂页岩	紫色湿润雏形土	水土流失严重，土壤原来的 A 和 B 层都已被侵蚀，地表仅有少量植被，是紫红色砂页岩风化而来的幼年土壤。
15	花岗岩	铝质湿润淋溶土	林木砍伐之后，仅生长草本植物和灌木，但植被覆盖度高。
16	花岗片麻岩	简育湿润富铁土	30 a 以前几乎是荒山一片，后经开垦而成，土壤土层深厚，厚度可达 2 m 以上。种植花生、红薯、西瓜等，种植年限已有 15～20 a。
17	云母片岩	黏淀湿润富铁土	荒地土壤，土层深厚，厚度可达 3 m 以上，有机质层较薄，0—30 cm 土层紧实。荒地上除有少量的薪炭林木外，几乎是荒草地。
18	第四纪红色黏土	黏淀湿润富铁土	土壤为原地原状土，详情同 11 号小区。试验区处理与 11 号小区不同。
19	千枚岩	铝质湿润淋溶土	荒地土壤，土壤土层深厚，厚度可达 3 m 以上，荒地上有少量的薪炭林木。采土部位在坡的上部。坡度约为 7°，40 a 前该地也曾是原始林地，后经砍伐撂荒而成。
20	千枚岩	铝质湿润淋溶土	旱耕地土壤，土壤土层深厚，厚度可达 3 m 以上。耕地上种植花生、油菜、红薯等，种植年限已有约 20 a。该旱地土壤处在坡的下部，坡度约为 7°，与 19 号小区土壤处在同一坡向上。
21	第四纪红色黏土	简育湿润富铁土	荒地土壤，详情同 11 号小区。与 18 号小区相比，该小区的土壤砾石较多，且砾径较粗。原为荒地土壤，后经开垦种植果树，树龄已有 3 a。
22	紫红色砂页岩	紫色湿润雏形土	土壤为旱地土壤，土壤土层深厚，耕地上种植花生、油菜、红薯等，种植年限至少已有 70～80 a。该旱地土壤处在坡的中部，坡度约为 7°，但在坡顶上母质层出露，局部发育成初骨土。

表 2 南方典型土壤侵蚀量与径流因子的关系

小区编号	样本数	回归方程	相关系数 r
9	202	$Y=-16.57+1.52\times10^{-5}X-2.03\times10^{-13}X^2+58.90\times10^{-22}X^3$	0.725**
10	206	$Y=-39.140+2.07\times10^{-5}X-2.90\times10^{-13}X^2+1.36\times10^{-21}X^3$	0.746**
11	197	$Y=-15.72+1.76\times10^{-5}X-2.30\times10^{-13}X^2+1.17\times10^{-21}X^3$	0.791**
12	212	$Y=-19.62+1.51\times10^{-5}X-1.98\times10^{-13}X^2+1.05\times10^{-21}X^3$	0.793**
13	220	$Y=2.09\times10^{-9}X^{1.42}$	0.824**
14	231	$Y=7.46\times10^{-9}X^{1.38}$	0.819**
15	246	$Y=2.30\times10^{-8}X^{1.32}$	0.789**
16	230	$Y=2.33\times10^{-9}X^{1.46}$	0.865**
17	237	$Y=1.07\times10^{-8}X^{1.37}$	0.866**
18	220	$Y=2.20\times10^{-9}X^{1.39}$	0.803**
19	223	$Y=9.37\times10^{-9}X^{1.40}$	0.860**
20	221	$Y=1.35\times10^{-8}X^{1.31}$	0.838**
21	215	$Y=1.72\times10^{-9}X^{1.45}$	0.845**
22	228	$Y=-24.04+1.05\times10^{-5}X-7.94\times10^{-14}X^2+4.83\times10^{-22}X^3$	0.893**

注：** 表示在 0.01 水平显著；Y 为流失量（t/km²），X 为径流量（L）。

从表 2 中还可以看出,不同土壤由于原始的利用方式的不同,径流量与土壤侵蚀量的关系也存在差异。如 10 和 11 号小区都是第四纪红色黏土发育的黏淀湿润富铁土,而它们的回归方程表达式形式却不一样。这是因为 10 号小区是第四纪红色黏土区分布很广的旱耕地土壤类型,而 11 号小区是第四纪红色黏土区最典型的荒地土壤类型,由于原始耕作制度和利用方式的影响,导致同一土壤的某些属性发生变化,最终影响了其抗蚀能力,从而引起土壤侵蚀量的变化。这种现象也出现在紫红色砂页岩发育的紫色湿润雏形土上,由紫红色砂页岩风化而来的幼年紫色湿润雏形土(14 号小区)的径流量与土壤侵蚀量存在:$M_s=aX^b$ 的乘冥曲线关系,而紫红色砂页岩区分布很广的旱地紫色湿润雏形土(22 号小区)径流量却与土壤侵蚀量存在:$M_s=a+bX+cX^2+dX^3$ 三次函数关系。

2.2　不同土壤侵蚀量与雨量因子的关系

应用地统计学分析软件 SPSS,在置信区间 99% 下,对不同小区的土壤侵蚀量与次侵蚀性降雨量进行曲线拟合。表 3 为南方不同类型土壤侵蚀量与次侵蚀性雨量的拟合关系。

表 3　南方不同类型土壤侵蚀量与次侵蚀性雨量的关系

小区编号	样本数	回归方程	相关系数 r
9	202	$Y=14.22-2.31X-0.005\ 24X^2+9.09\times10^{-6}X^3$	0.488**
10	206	$Y=22.62+3.41X-0.176\ 00X^2+3.67\times10^{-5}X^3$	0.528**
11	197	$Y=13.19+3.68X-0.020\ 20X^2+4.15\times10^{-5}X^3$	0.616**
12	212	$Y=25.17+1.66X+0.002\ 35X^2+3.36\times10^{-6}X^3$	0.649**
13	220	$Y=18.03+1.70X+0.004\ 93X^2-9.29\times10^{-6}X^3$	0.378**
14	231	$Y=22.90+2.91X+3.83\times10^{-5}X^2+4.55\times10^{-7}X^3$	0.533**
15	246	$Y=41.66+3.77X+0.002\ 56X^2-4.03\times10^{-6}X^3$	0.544**
16	230	$Y=16.62+4.54X-0.008\ 26X^2+1.49\times10^{-5}X^3$	0.521**
17	237	$Y=-7.12+5.67X-0.019\ 80X^2+4.27\times10^{-5}X^3$	0.683**
18	220	$Y=36.49-3.64X+0.012\ 50X^2-2.43\times10^{-5}X$	0.281**
19	223	$Y=4.46+4.39X-0.007\ 63X^2+8.84\times10^{-6}X^3$	0.683**
20	221	$Y=0.313X^{1.05}$	0.372**
21	215	$Y=-5.97+3.64X-0.015\ 80X^2+2.76\times10^{-5}X^3$	0.529**
22	228	$Y=39.09+2.31X+0.002\ 89X^2+4.84\times10^{-6}X^3$	0.764**

注:**表示在 0.01 水平显著;Y 为流失量(t/km^2),X 为次侵蚀性降雨量(mm)。

从表 3 次侵蚀性降雨量与南方不同土壤的侵蚀量关系来看,除千枚岩发育的铝质湿润淋溶土(20 号小区)的侵蚀量与次侵蚀性降雨量的回归方程呈:$M_s=aX^b$ 的乘冥曲线关系(M_s——侵蚀量;X——次侵蚀性降雨量;a,b——常数,且回归方程中 $a>0$,$b>1$)以外。其它土壤的侵蚀量与次侵蚀性降雨量均存在:$M_s=a+bX+cX^2+dX^3$ 三次函数关系(M_s——侵蚀量;X——次侵蚀性降雨量;a,b,c,d——常数)。而且次侵蚀性降雨与不同土壤侵蚀量也存在因为原始的利用方式不同而使相同土壤回归方程表达式出现不同的现象,最典型的是千枚岩发育的铝质湿润淋溶土的荒地土壤(19 号小区)和旱耕地土壤(20 号小区),铝质湿润淋溶土的荒地土壤侵蚀量与次侵蚀性降雨量呈现三次函数关系,而旱耕地土壤侵蚀量与次侵蚀性降雨量呈现三次函数关系。类似的由于土地利用方式的不同而使同一土壤回归表达式不同的情况还出现在第四纪红色黏土发育的黏淀湿润富铁土(10,11,18 号小区)、红砂岩发育的铝质湿润淋溶土(12 和 13 号小区)和红砂岩发育的铝质湿润淋溶土上(14 和 22 号小区)。虽然各类土壤的侵蚀量与次侵蚀性降雨量都在 $p=0.01$ 水平下呈显著正相关关系,但由于土壤类型不同,各侵蚀量与次侵蚀性降雨量相关性的差异也很大。降雨量和侵蚀量相关性最显著的是紫红色砂页岩发育的紫色湿润雏形土的旱地土壤(22 号小区),其相关系数为 0.764,而相关性最差的是鹰潭地区分布最广的第四纪红色黏土发育的黏淀湿润富铁土(18 号小区),其相关系数只有 0.281。其它土壤的相关性也是差别很大,如 11,12,17,19 号小区的相关系数都在 0.6 以上,而 13 和 20 号小区的相关系数却都在 0.4 以下。从整体相关系数来看,次侵蚀性降雨量与各土壤侵蚀量的相关系数都相对较小,这一方面可能是由于观测小区的面积较小(12 m^2),观测误差会造成离散偏大;另一方面本研究中的 14 个试验小区一般在 3 月底翻耕,该地区已进入雨季,在一定程度上人为影响了土壤侵蚀;因此,在今后的小区管理中可以适当进行年底旱季翻耕。

2.3 不同土壤流失量与雨强因子的关系

同样，应用地统计学分析软件 SPSS，在置信区间 99%下，对不同小区次侵蚀性降雨的土壤侵蚀量与 30 min 最大雨强进行曲线拟合。可以得出，除第四纪红色黏土发育的红色湿润新成土(9 号小区)和第四纪红色黏土发育的黏淀湿润富铁土(11 号小区)的侵蚀量与次降雨 I_{30} 的回归方程呈：$M_s=a+bX+cX^2+dX^3$ 的三次函数关系(M_s——侵蚀量；X——次侵蚀性降雨 30 min 最大雨强；a，b，c，d——常数)以外；其它不同土壤的次 I_{30} 与侵蚀量都存在：$M_s=aX^b$ 的乘冥曲线关系(M_s——侵蚀量；X——次侵蚀性降雨 30 min 最大雨强；a，b——常数)；且回归方程中的 $a>0$，$b>1$。而且从各土壤侵蚀量与次 I_{30} 回归方程的表达式来看，由于土壤类型的不同相应的常数项和次冥也不相同。但常数项和次冥的分布关系也比较复杂，规律性不强。雨强与侵蚀量的关系也存在由于土地利用方式的不同而使同一土壤回归表达式不同的现象，其分布规律基本与次侵蚀性降雨量的相一致。也是出现在第四纪红色黏土发育的黏淀湿润富铁土(10，11，18 号小区)、红砂岩发育的铝质湿润淋溶土(12 和 13 号小区)和紫红色砂页岩发育的紫色湿润雏形土上(14 和 22 号小区)。从相关系数分布来看，各土壤的侵蚀量与次侵蚀性降雨量都在 $p=0.01$ 水平下呈显著正相关关系，而且不同类型土壤的侵蚀量与次 30 min 最大雨强的相关系数相差不大。除第四纪红色黏土发育的红色湿润新成土(9 号小区)和红色湿润新成土(11 号小区)次 I_{30} 与土壤侵蚀量的相关系数在 0.4 以下以外，其它类型土壤的侵蚀量与次 I_{30} 的相关系数都在 0.5 左右。从相关系数整体大小来看，I_{30} 与各土壤侵蚀量的相关性明显弱于径流量、次侵蚀性降雨量与各土壤侵蚀量的相关性，其主要的原因也可能与小区观测面积较小，雨季翻耕，以及该地区不同次侵蚀性降雨的动能差异很大有关。

3 结 论

从以上分析可以看出，各降雨因子与南方不同土壤侵蚀量在 $p=0.01$ 水平下都呈极显著的回归关系，从相关性来看，径流量与各土壤侵蚀量的相关性最好，次 I_{30} 雨强最差，而降雨量介于二者之间。从降雨各因子与南方不同土壤侵蚀量的回归方程来看，在径流和雨强因子下，各土壤主要呈：$M_s=aX^b$ 的乘冥曲线关系(M_s——侵蚀量；X——径流量；a，b——常数)；而在侵蚀性降雨量因子下，各土壤主要呈：$M_s=a+bX+cX^2+dX^3$ 三次函数关系(M_s——侵蚀量；X——次侵蚀性降雨量；a，b，c，d——常数)。但由于土壤类型和相同土壤的原始利用方式不同，各土壤侵蚀量与不同降雨因子的回归方程式差异很大。

[参 考 文 献]

[1] 陈逸欣. 土壤侵蚀量与降雨因子间的灰关联分析[J]. 人民珠江，2002(5)：51-52.

[2] 吴发启，范文波. 土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J]. 水土保持学报，2001，15(3)：1-3.

[3] 万延朝. 黄丘五副区降雨和地形因素与坡面水土流失关系研究[J]. 中国水土保持，1996(12)：26-29.

[4] 姚治君. 云南玉龙山东南坡降雨因子与土壤流失关系的研究[J]. 自然资源学报，1991，6(1)：45-53.

[5] 林昌虎，朱安国. 贵州喀斯特山区土壤侵蚀与环境变异的研究[J]. 水土保持学报，2002，16(1)：9-12.

[6] 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[J]. 植物营养与肥料学报，2003，9(1)：71-74.

[7] 康玲玲，朱小勇，王云璋，等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报，1999，36(4)：536-543.

[8] 陈浩. 降雨径流对大理河流域系统泥沙输移比的影响[J]. 水土保持学报，2000，14(5)：19-27.

[9] 史学正，于东升，邢廷炎. 用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性 K 值[J]. 土壤学报，1997，34(4)：399-405.

[10] 李毅，邵明安. 雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响[J]. 应用生态学报，2006，17(12)：2271-2276.

[11] 朱晓梅，张丽萍，方继青，等. 红壤坡地土壤水蚀过程的产流产沙动态模拟试验研究[J]. 科技通报，2009，25(5)：680-683.

[12] 于东升，史学正. 红壤生态试验站的降雨侵蚀力及其特征[M]//红壤生态系统研究：第五集. 北京：中国农业出版社，1998：57-62.

[13] 史学正，于东升，吕喜玺. 用人工模拟降雨仪研究我国亚热带土壤的可蚀性[J]. 水土保持学报，1995，9(3)：38-42.