

# 坡耕地侵蚀过程与土壤理化特性演变

黄少燕, 查轩

(福建师范大学地理研究所, 福建 福州 350007)

**摘 要:** 坡耕地水土流失问题是制约生态农业建设与可持续发展的重要因素, 探讨坡耕地土壤侵蚀过程和土壤退化机制是解决问题的关键。基于这些问题, 本文应用人工模拟降雨试验方法, 研究了坡耕地土壤侵蚀发生发展过程, 以及侵蚀过程中土壤物理化学特性的演变规律, 明确了不同雨强下坡面单位时间产沙三个过程特征; 揭示了泥沙中不同粒级颗粒组成、团聚体和营养元素迁移规律及导致土壤退化加剧的原因; 提出了防止坡耕地土壤侵蚀的方法。

**关键词:** 坡耕地; 侵蚀过程; 土壤特性演变

**中图分类号:** S157; S158.1

**文献标识码:** A

据统计<sup>[1]</sup>, 全国  $1.07 \times 10^8 \text{ hm}^2$  耕地中, 有坡耕地  $3\,330 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占耕地面积的 31%。在黄土高原坡耕地面积占 48%~65%, 其侵蚀模数可高达  $10\,000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}^{-1} \sim 30\,000 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ , 在丘陵沟壑区坡耕地水土流失量约占总流失量的 50%~70%。坡耕地的土壤侵蚀不仅造成河流、水库淤积, 更严重的是每年丧失大量表土, 导致土壤结构变差, 质地变粗, 肥力退化和农业减产。因此, 研究坡耕地土壤侵蚀发生发展过程与土壤特性演变规律, 为坡地土壤侵蚀预测预报、防止水土流失与土壤退化提供科学依据, 将对于改善山区生态环境、实现农业可持续发展具有重要意义。

关于坡耕地土壤侵蚀过程的研究, 以前, 众多学者侧重于坡面产沙量与输沙量的研究, 近年来, 国外一些科学家的兴趣已集中在坡面侵蚀产沙过程中土壤物理化学特性(土壤质量)演变问题上, 即侵蚀过程中土壤颗粒大小特性、团聚体的移动及化学性质方面的变化<sup>[2,3]</sup>。由于泥沙的这些特征反映着降雨过程中侵蚀力与抗蚀力的作用结果, 它对于揭示坡耕地土壤侵蚀机理、侵蚀过程、土壤分散性和坡面动力特征, 以及养分流失与土壤退化过程等均具有重要科学价值。为此, 我们采用室内人工降雨试验方

法, 开展这方面的研究。

## 1 研究方法

### 1.1 试验设计与材料

试验设 6 组处理(表 1), 降雨量控制在 63mm 左右, 每次试验前将土壤翻耕深度 25cm, 保持坡面平整, 表层(0cm~5cm)土壤水分控制在 6%~10%。

试验在室内人工模拟降雨大厅进行, 降雨装置采用侧喷式降雨器对喷, 降雨支架高 6.5m, 雨滴上喷高度 1.5m, 雨滴降落高度 8.0m, 其雨滴动能基本满足天然降雨<sup>[4,5]</sup>。

试验槽长 6.5m, 宽 2.0m, 深 0.5m, 坡度可自动调节( $0^\circ \sim 30^\circ$ ), 供试土样为武功黄土母质, 过 10mm 筛, 然后装槽, 容重约  $1.1 \text{ g/cm}^3$  左右。

### 1.2 观测项目及方法

每次降雨前后测定土壤容重、孔隙度并采取土样及侵蚀过程中泥沙样。试验过程中观测记录产流、产沙过程, 每隔 1min~3min 定时采集径流泥沙样。测定水稳性团聚体与颗粒组成、有机质、全氮、有效磷等。有机质用丘林法, 全氮用凯氏法, 有效磷用 Olsen 法测定。

收稿日期: 2001-11-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40171064)和福建省自然科学基金项目(D9910013)资助。

作者简介: 黄少燕(1960—), 女(汉族), 福建人, 工程师, 主要从事资源与环境方面的研究。参加了国家自然科学基金、省自然科学基金及省教委科研项目等 6 项。联系电话(0591)3441543; E-mail: xuancha@pub5.fz.fj.cn

查轩(1961—), 男(汉族), 陕西乾县人, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、生态建设、资源与环境等方面的研究。主持和参加了国家科技攻关、国家自然科学基金等 10 项, 发表论文 30 余篇, 获科技成果及奖励 5 项, 获国家专利 2 项。联系电话: (0591)3441543; E-mail: xuancha@pub5.fz.fj.cn

表 1 试验处理  
Table 1 Treatment

处理	雨强 (mm/min)	坡度 (°)	土地
1	1.610	15	裸露坡耕地
2	1.610	25	裸露坡耕地
3	2.617	10	裸露坡耕地
4	2.617	15	裸露坡耕地
5	2.617	25	裸露坡耕地
6	2.617	25	裸露坡耕地+纱网覆盖

2 试验结果分析

2.1 不同因素影响下坡面土壤侵蚀特征

随着雨强和坡度的增大, 侵蚀量增加(表 2)。

表 2 不同处理的坡面土壤侵蚀特征

Table 2 Soil erosion characteristics in different treatment plots

处理号	利用	坡度	雨强 (mm/min)	径流量 (mm)	径流位能 (J/m <sup>2</sup> )	侵蚀量		细沟侵蚀量 (kg/m <sup>2</sup> )	细沟占总侵蚀量(%)
						(kg/m <sup>2</sup> )	(%)		
1	裸露耕地	15°	1.610	21.78	2.86	0.60	100	—	—
2	裸露耕地	25°	1.610	27.05	5.72	1.27	211	—	—
3	裸露耕地	10°	2.617	24.89	2.19	1.06	176	0.69	65.1
4	裸露耕地	15°	2.617	36.18	4.75	3.99	665	3.09	77.4
5	裸露耕地	25°	2.617	52.25	11.20	7.92	1320	4.58	57.8
6	裸露耕地+纱网覆盖	25°	2.617	26.31	5.64	3.42	570	2.73	79.8

根据试验过程中的观测和单位时间产沙过程的分析, 不同雨强其单位时间产沙过程具有明显的时段性特性。以 25° 裸耕地为例(图 1), 当雨强为 2.617mm/min时, 坡面侵蚀产沙有明显的三个过程:

1. 第一个产沙峰值的侵蚀产沙方式为雨滴溅蚀影响的主要阶段。在雨滴的击溅作用下表层土壤被分散分离, 产流后的初始薄层水流先将这些松散物质搬运走, 形成产沙量增加的第一个峰值;

2. 此后, 由于降雨过程中雨滴夯击和水分下渗, 土壤颗粒填充空隙, 使土壤表层形成较密实的结皮层, 结皮层较之原来的表土抗冲蚀力较强, 此时坡面仍以薄层水流为主, 水流的冲蚀能力较弱, 坡面上溅蚀分散的物质已被连续搬运, 因此, 坡面产沙有下降趋势, 此阶段为表土结皮影响的主要阶段;

3. 随着降雨历时的继续增加, 土壤表层水分饱和, 在结皮影响下, 水分入渗能力进一步减弱, 径流深增加, 径流冲刷力加强, 土壤结皮层开始遭到破坏, 局部径流集中, 进入细沟发育阶段, 此时产沙量剧增。而小雨强时(1.610mm/min)其产沙过程曲线的第一产沙阶段与大雨强有相同的规律。但进入第

在雨强 2.617mm/min 时其坡度由 15°到 25°侵蚀量增加了 0.86 倍。根据计算, 在同雨强时坡面径流位能增加 1 倍侵蚀量可增加 0.64~2.30 倍。

不同雨强其单位时间内作用于坡面的能量和对土壤的剥离和搬运能力各不相同。在 25°裸耕地上, 雨强 2.617mm/min 比 1.610mm/min 的侵蚀量增加 5.2 倍。从产生细沟侵蚀情况看, 雨强 1.610mm/min 时没有细沟发生, 而雨强在 2.617mm/min 时其细沟侵蚀量约占总量的 58%~77%。据试验观测, 其坡面细沟中水的流速为 13cm/min, 是细沟间流速的 130%, 由于细沟中的流速较大, 径流的冲刷力增强, 因而细沟侵蚀量占据了主要地位, 使总侵蚀量增加。

二阶段(结皮影响阶段)后, 由于雨强小, 土壤结构与入渗性能未遭到强力破坏, 坡面径流仍以薄层水流为主, 冲蚀能力弱, 土壤表层结皮主要依靠雨滴的溅蚀和水流紊动作用逐渐被剥离分散和搬运, 土壤表层不易被冲破, 产沙量呈微下降趋势, 侵蚀量也较小。

地面覆盖削弱了雨滴对土壤打击作用, 从而减弱了对土壤结构的破坏, 增强了土壤入渗, 使坡面径流量与侵蚀量减少。在雨强 2.617mm/min、坡度 25°时, 给土壤表面上部加纱网覆盖后(纱网距表土 10cm、网孔 20mm), 其坡面径流量和侵蚀量比同等条件下裸露耕地分别减少 49%和 57%。所以, 如能增加地面覆盖, 防止和延缓细沟的产生, 坡面产沙量会显著减少。

2.2 坡面侵蚀与土壤表层物理特性演变

坡面侵蚀过程中, 由于雨滴打击作用, 表层土壤团聚体破坏, 土体分散, 土壤水分在下渗过程中携带的颗粒填充了孔隙, 使土壤表层物理特性发生一系列变化(表 3), 降雨后土壤容重平均比雨前增加 8%左右, 表层土壤大孔隙(非毛管孔隙)比降雨前约降

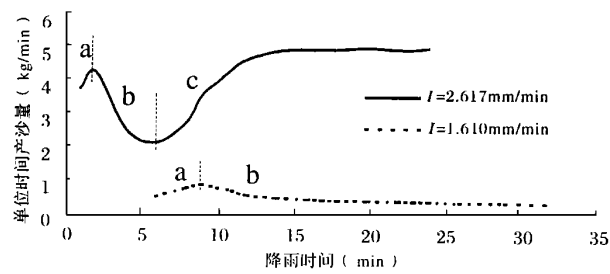


图 1 坡度 25°不同雨强度侵蚀产沙过程曲线

Fig. 1 The curve of process of erosion and sediment in different rainfall intensity on 25°

表 3 不同处理的土壤物理性质变化

Table 3 Change of properties of physical and chemistry of soil in different treatment

处理	利用	坡度	雨强 (mm/min)	深度 (cm)	容重(g/cm <sup>3</sup> )		非毛管孔隙度(%)		非毛管孔隙度减少(%)	硬度(kg/cm <sup>3</sup> )	
					雨前	雨后	雨前	雨后		雨前	雨后
1	裸露耕地	15°	1.610	0~5	0.98	1.07	16.17	9.13	43.54	0.12	2.27
2	裸露耕地	25°	1.610	0~5	1.00	1.12	15.58	8.73	43.97	0.16	1.95
3	裸露耕地	10°	2.617	0~5	1.08	1.14	12.98	6.58	49.31	0.17	3.05
4	裸露耕地	15°	2.617	0~5	1.03	1.12	14.59	6.73	53.87	0.12	2.65
5	裸露耕地	25°	2.617	0~5	1.03	1.11	14.53	6.15	57.64	0.16	1.92
6	裸露耕地+ 纱网覆盖	25°	2.617	0~5	1.02	1.11	17.62	14.33	19.73	0.16	1.61

低43.5%~58.9%，大孔隙是水分下渗的主要通道，它的减少导致了土壤渗透能力降低，从而使径流增加，加剧了土壤侵蚀，但在裸露耕地上覆盖纱网后，非毛管孔隙度雨后较雨前仅降低3.3%。同时从表3可以看出，雨后土壤硬度明显变大，雨后硬度是雨前的11倍之多；试验后发现土壤表层龟裂严重，这样使仅入渗的一点水分将会很快被蒸发，土壤表层板结。

不同雨强和坡度对土壤表层物理特性影响不同，因而开始产沙时间及入渗、径流等特性有着较大差异(表4，图2)。由表4可以看出：产流时间、产流前的入渗量及深度随着降雨强度和坡度的增大而减小。

在裸耕地坡度为25°时，雨强2.617mm/min仅降雨1.75min就产生径流，而雨强1.610mm/min时降雨6.0min后才出现径流，产流前的入渗量后者是前者的2.6倍。在相同雨强2.617mm/min、坡度10°产流前的入渗量是25°的2倍。

从产流前后的入渗特征看，产流前的降雨历时较短，但其入渗量及深度在入渗总量中占的比例较大。在25°时雨强2.617mm/min产流前的时间占总降雨时间的7.3%，而入渗量和入渗深度占到总量

的35.9%和36.6%；同坡度(25°)雨强为1.610mm/min产流前入渗时间占15.3%，而入渗量及入渗深度占到总量的26.6%和45.5%。

裸耕地加纱网覆盖后，减弱了雨滴对土壤表面的破坏，使其入渗能力大大增强(图2)。在25°雨强2.617mm/min时裸耕地加纱网覆盖比裸耕地产流时间推迟2.25min，稳渗速率提高4.5倍，入渗深度增加5.8cm。因而使径流量和侵蚀量较裸耕地减少了一半以上。

2.3 侵蚀过程与泥沙中颗粒组成及水稳性团聚体变化关系

用萨维诺夫法，分别测试了土壤与泥沙中水稳性团聚体<sup>[6-7]</sup>。不同雨强下侵蚀过程中泥沙的各级团聚体含量呈现不同的变化规律(图3)。>0.25mm的团聚体在大雨强(指2.617mm/min，下同)时随着径流时间的增加呈增长趋势，直至接近原土壤。小雨强(指1.610mm/min，下同)时则呈现不同规律，随着径流时间的推移呈微下降趋势。从>5.0mm的团聚体看，小雨强中没有出现，而大雨强在径流发生6min后出现，并随之增加，此时正是细沟的发育阶段。因小雨强时地面打击分散力较弱，当产生径流后首先将表层因溅蚀分散的松散物搬走，所以水稳

表 4 不同处理降雨、径流、入渗关系  
Table 4 Relationship between rainfall, runoff and permeating at different treatment

处理	利用	坡度	雨强 (mm/min)	雨量 (mm)	径流量 (mm)	入渗量		产流时间 (min)	产流前入 渗深度 (cm)	总入渗 深度 (cm)	稳渗 速率 (mm/min)
						总量(mm)	产流前(mm)				
1	裸露耕地	15°	1.610	62.79	21.78	41.01	13.68	8.5	9~12	17.5	0.83
2	裸露耕地	25°	1.610	63.59	27.05	36.54	9.66	6.0	6~9	16.5	0.76
3	裸露耕地	10°	2.617	62.81	24.89	37.92	7.33	2.8	3~6	11.0	1.26
4	裸露耕地	15°	2.617	62.81	36.18	26.62	6.54	2.5	3~6	10.5	0.79
5	裸露耕地	25°	2.617	62.81	52.25	10.56	4.58	1.75	3	8.2	0.20
6	裸露耕地+ 纱网覆盖	25°	2.617	62.81	26.31	36.50	10.47	4.0	6~9	14.0	1.24

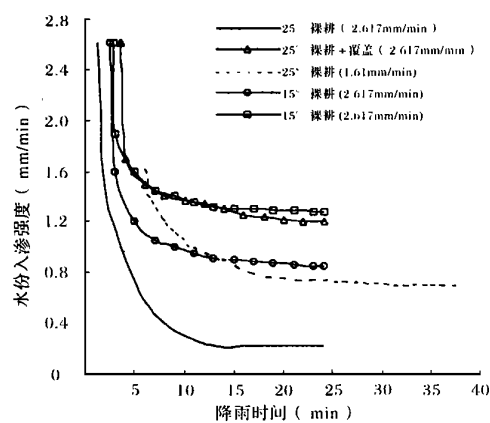


图 2 不同处理土壤入渗强度过程曲线  
Fig. 2 The curve of permeating process of soil moisture in different treatment

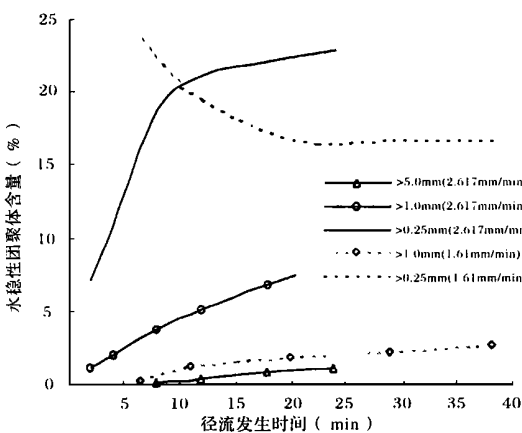


图 3 25°不同雨强泥沙中水稳性团聚体变化曲线  
Fig. 3 The curve of change of aggregate of sediment in different rainfall intensity on the 25°

性团粒含量较高,随着降雨进行,结皮形成,细沟也没有产生,泥沙主要以靠径流携带雨滴分离表层的部分物质,其量越来越少,因而团粒也就较少。大雨强因其雨滴打击力大,表土分散破坏严重,径流初期团粒含量低,当径流增大并产生细沟后,细沟的冲刷量越来越大,逐渐占主要地位,细沟中的水流把表土成块冲刷,并很快冲出坡面,使许多团粒还未破坏就被带走,因而泥沙中含有 $> 5.0\text{mm}$ 团聚体,并逐渐增加; $> 0.25\text{mm}$ 团粒也呈增加规律。不同雨强下流失的团聚体( $> 0.25\text{mm}$ )总量随径流量和侵蚀量的增加而增加,25°时大雨强流失水稳性团聚体数量是小雨强的6倍多。

坡面土壤侵蚀过程中各时段泥沙颗粒组成呈现不同变化规律(图4)。无论大小雨强在径流初期,其 $< 0.005\text{mm}$ 的颗粒含量最高,约比原土壤高17%。随着径流的发展和冲刷力增加, $< 0.005\text{mm}$ 的细颗粒含量呈下降规律,并趋于原土壤含量。不同雨强下降后的稳定值不同,小雨强(处理2)的稳定含量高于大雨

强(处理5),但泥沙中细颗粒( $< 0.005\text{mm}$ )的流失量大。大雨强是小雨强的5.9倍。从图中 $> 0.05\text{mm}$ 的砂粒变化看,其含量与 $< 0.005\text{mm}$ 颗粒含量呈相反变化趋势。据分析,泥沙中的有机质、N、P含量与粘粒含量呈极显著正相关关系(图5)。由于侵蚀过程中泥沙以细颗粒相对富集为特征,将导致坡耕地表层土壤结构变差,质地变粗,肥力下降而退化。

2.4 坡面侵蚀与养分流失过程

不同坡度和雨强因素影响下坡面侵蚀过程中土壤养分流失量与侵蚀量的变化规律相一致,经回归统计分析,土壤侵蚀量与养分流失量呈正相关关系,其回归方程为

与有机质流失量  $x(\text{g}/\text{m}^2)$  的关系

$$y = -26.35 + 219.09x \quad r = 0.99^{**}$$

与全氮流失量  $x(\text{g}/\text{m}^2)$  的关系

$$y = -32.97 + 4.01x \quad r = 0.99^{**}$$

与有效磷流失量  $x(\text{g}/\text{m}^2)$  的关系

$$y = 105.09 + 62.02x \quad r = 0.85^{**}$$

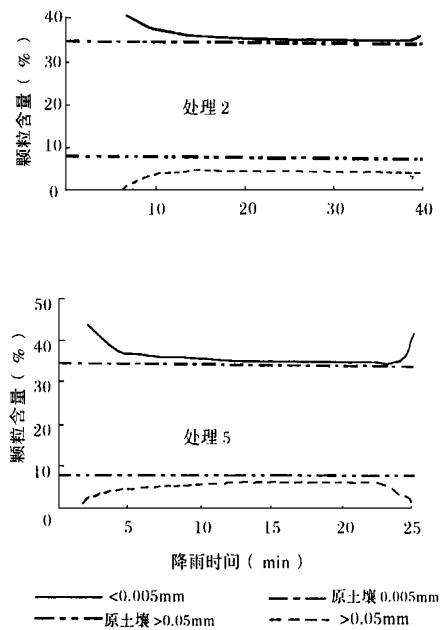


图 4 不同处理径流过程中泥沙颗粒含量变化曲线

Fig. 4 The curve of content of particle size of sediment in rainfall process

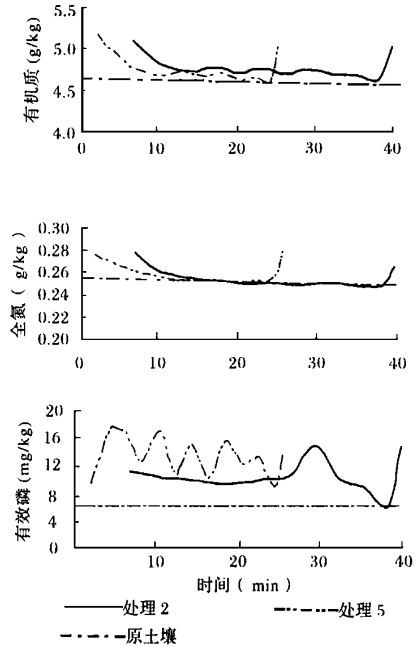


图 5 泥沙中有机质、全氮、有效磷含量变化

Fig. 5 Change of content of organic matter, total N and available P in sediment

从图 5 可以看出,在整个降雨侵蚀过程中,泥沙样中的有机质、全氮、有效磷的含量基本上都高于侵蚀坡面耕层土壤中的含量,既泥沙对养分的吸附能力增加,流失泥沙中的养分以相对富集为特征。以磷为例,其泥沙中富集比高达 1.84。说明坡耕地的土壤侵蚀,不仅是土壤质地变粗,结构变差产生大量泥沙,而且随同吸附和携带走大量的营养元素,导致土壤退化。

3 结语

不同雨强下坡面单位时间产沙过程具有明显的时段特征。侵蚀过程中不同粒级团聚体含量变化规律为揭示坡面侵蚀产沙过程和土壤侵蚀预测预报提供了新的理论依据。

坡面侵蚀过程中,由于雨滴打击作用,表层土壤团聚体破坏,土体分散,土壤水分在下渗过程中携带的颗粒填充了孔隙,使土壤表层物理特性发生一系列变化,降雨后土壤容重增加 8%,土壤非毛管孔隙

降低 8.38%,土壤硬度增加 11 倍,土壤表层板结。

坡耕地侵蚀过程中泥沙细颗粒及营养元素相对富集,是导致土壤沙化和土壤退化加剧的主要原因。增加地面覆盖是防止坡耕地土壤侵蚀的有效方法。

参考文献:

[ 1 ] 郭廷辅. 水土保持的发展与展望[ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 58~ 59.  
[ 2 ] 唐克丽, 等. 黄土高原水土流失与土壤退化研究[ J ]. 水土保持通报, 1987, 7(6).  
[ 3 ] 查轩, 等. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程影响[ J ]. 山地学报, 2001, 19(2).  
[ 4 ] 周佩华, 等. 降雨能量的试验研究初报[ J ]. 水土保持通报, 1981, 1(1).  
[ 5 ] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工降雨装置[ J ]. 水土保持通报, 1984, 4(5).  
[ 6 ] Bissonnair, Y. L.; D. Acrouays. Aggregate stability and assessment of soil crustability as erodibility[ J ]. *European Journal of Soil Science*.  
[ 7 ] Gilley, J. E.; J. W. Doran. Runoff, erosion, and soil quality characteristics of a former conservation reserve program site[ J ]. *Journal of Soil and Water*. 1997, 52. (3)6

# Study on Soil Erosion Process and Evolution of Soil Physicochemistry Characteristics on Sloping Farmland

HUANG Shao-yan and ZHA Xuan

(*Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350007 China*)

**Abstract:** The problem of soil and water loss in the sloping farmland is a principal factor is to restrict eco—agriculture construction and sustainable development. The key of solved problem is to study and discuss that soil erosion process of sloping farmland and soil degradation mechanism. In this paper, the soil process of sloping farmland and the evolution law of soil phsicochemistry properties in soil erosion process has been studied, using simulated rainfall experiment. It also has been analysed the three process characteristics of erosion and sediment in different rainfall intensity. And the transport law of nutrient elements, aggregate and particle size distribution in sediment. The effective way to reduce soil erosion from sloping farmland has been put forward.

**Key words:** sloping farmland; erosion process; evolution of soil characteristics