

## 不同植被对土壤侵蚀及铜元素流失的影响

罗文林<sup>1</sup>, 张兴昌<sup>1,2,\*</sup>, 尹勤瑞<sup>1</sup>, 孟杰<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 通过野外天然降雨产流及人工模拟降雨试验, 研究不同植被对坡面土壤侵蚀及土壤铜元素流失的影响及降雨过程中铜元素的流失规律。结果表明: (1) 紫花苜蓿、绿豆、荒草 3 种植被覆盖小区的年径流量为 5 183.8, 5 366.2, 3 867.3 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, 比裸地减少 33%, 30.8% 和 50.1%; 侵蚀模数为 379.18, 482.3, 15.78 t/km<sup>2</sup>, 比裸地减少 34.7%, 16.4% 和 97.2%; 全年全铜流失量为 12.9, 25.5, 0.46 kg/km<sup>2</sup>, 有效铜流失量为 6.22, 11.01, 0.15 kg/km<sup>2</sup>, 分别比裸地减少 67.3%, 35.3%, 98.8% 和 54.6%, 19.6%, 98.9%; (2) 在模拟降雨过程中, 农地小区的产流产沙强度过程呈现波动上升趋势, 产沙过程波动较产流过程剧烈。铜元素流失强度过程与产流产沙强度过程相似, 但其峰值多于产流产沙过程, 且最高峰出现时间不同。有效铜流失强度变化率略高于全铜。

**关键词:** 植被类型; 土壤侵蚀; 铜元素流失; 模拟降雨

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2008)03-0010-04

## Research on Soil Erosion and Copper Loss under Different Vegetation Cover

LUO Wen-lin<sup>1</sup>, ZHANG Xing-chang<sup>1,2,\*</sup>, YIN Qin-rui<sup>1</sup>, MENG Jie<sup>1</sup>

(1. College of Resource & Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** The soil erosion and copper loss by erosion as affected by different vegetation was conducted in field runoff and simulated rainfall conditions. The results showed that the mean runoff amounts of alfalfa, mung bean, wilderness meadow were of 5 183.8, 5 366.2, 3 867.3 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> · a respectively, which were 33%, 30.8% and 50.1% lower than bare land. Their erosion modules were 379.18, 482.3, 15.78 t/km<sup>2</sup> · a, which were 34.7%, 16.4% and 97.2% lower respectively than the bare land respectively. Their mean loss amounts of total copper by sediment were 12.9, 25.5, 0.46 kg/km<sup>2</sup> · a. Their mean loss amounts of availability copper by sediment were 6.22, 11.01, 0.15 kg/km<sup>2</sup> · a, which were 67.3%, 35.3%, 98.8% and 54.6%, 19.3%, 98.9% lower than bare land. Under simulated rainfall conditions, the runoff and sediment yield processes showed fluctuated trend and the fluctuation of sediment is stronger than runoff. Process curves of losses of copper intensity was conform to process curves of runoff and sediment intensity, but the peak value of process curves of losses of copper intensity is more than process curves of runoff and sediment intensity.

**Key words:** vegetation type; soil erosion; copper loss; simulated rainfall

坡地水土流失是黄土高原土壤侵蚀的主要原因之一<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀是土壤元素流失的主体, 植被通过减少侵蚀而对土壤元素流失产生影响。植被减蚀作用表现为 3 个方面: 植被茎叶对降雨雨滴动能的消减作用<sup>[2]</sup>, 植物茎及枯枝落叶对径流流速的减缓作用<sup>[3]</sup>, 植物根系对提高土壤抗冲抗蚀的作用<sup>[4]</sup>。目前, 许多学者多侧重于植被对土壤中营养元素流失的影响, 而对于植被对各种微量元素流失的影响研究还比较少。近年来, 随着研究区各种矿业资源的开发利用, 大量的微量元素(Cu, Zn, Cd 等)被排入当地环境中。因此, 研究这些微量元素在当地环境中的迁移分布规律已成为一项重要课题。本研究以野外小区试验为基础, 通过分析 3 种植被对径流、侵蚀、泥沙铜元素流失的影响, 旨在揭示铜在不同植被条件下的坡面流失规律。

### 1 试验设计与方法

#### 1.1 研究区概况

试验在陕西省神木县六道沟流域内进行, 六道沟小流域位于神木县城以西 14 km 处, 东经 110°20'—110°

收稿日期: 2007-02-01 \* 通讯作者

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAD09); 教育部创新团队研究计划(IRT0749)

作者简介: 罗文林(1982-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士生, 主要从事环境化学方面的研究工作。E-mail: luo3225@126.com

23', 北纬 38°49', 海拔 1 081~1 274 m, 北依长城, 地处毛乌素沙漠的边缘, 是水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心。流域总面积 6.89 km<sup>2</sup>, 主沟道南北走向, 长 4.21 km, 属于窖野河二级支流。小流域的气候属中温带半干旱草原季风气候, 冬春季干旱少雨, 多风沙, 夏秋多雨, 且多为暴雨。多年平均降水量为 437.4 mm, 年内年际变化大。7~8 月份降水量最多, 约占全年降水的 50% 以上。该流域地带性土壤为黑垆土, 但是由于长期的强烈侵蚀作用, 黑垆土已侵蚀殆尽, 仅剩少处以残墩状呈零星分布, 地面组成物质以第四纪黄土沉积物为主<sup>[5]</sup>。主要土壤类型为绵沙土、新黄土、风沙土等, 主要土地利用类型有耕地、草地、林地、灌木地、非生产用地等。

## 1.2 试验设计

1.2.1 小区布设 在研究区选择典型坡面修建 4 个试验小区, 小区面积 60 m<sup>2</sup>, 宽 4 m, 长 15 m, 坡向北偏东, 坡度约 15°。小区四周用水泥板围埂, 每小区下方连接两个径流桶, 桶高 68.7 cm, 桶径 62 cm, 收集和测定径流泥水样。土壤为沙黄土。供试植物有紫花苜蓿、绿豆和荒草, 并设立裸地对照, 共 4 个处理。2006 年 9 月小区建成, 2007 年 5 月种植紫花苜蓿, 行距 50 cm, 2007 年 7 月和 8 月进行 2 次割草, 其余时间自然生长; 6 月种植绿豆, 株行距 70 cm×70 cm, 自然生长, 定期清除杂草; 荒草地为 2007 年 5 月开始自然恢复的杂草, 荒草自然生长; 裸地定期清除杂草, 并于 2007 年 5 月及 8 月进行两次翻耕, 使之与无作物覆盖农田情况基本一致。试验于植物播种后开始, 2007 年 10 月雨季结束后停止。

1.2.2 模拟降雨试验 人工模拟降雨试验在绿豆小区进行, 模拟降雨采用中国科学院水利部水土保持研究所神木试验站侧喷式模拟降雨装置。降雨喷头由喷头体、碎流挡板、出流孔板等部分组成。更换不同直径的孔板, 调整压力表读数, 可获得不同的降雨强度<sup>[6]</sup>。喷头安装在由三角架固定的降雨支架上, 支架高约 4 m, 降雨高度可达 30 m 左右, 使绝大多数雨滴能够接近终点速度。受试验场地及小区间距离限制, 降雨采用单侧进行, 在小区外侧布设 4 个降雨器, 上下 2 个降雨器距坡顶和坡底为 1.5 m, 降雨器间距 4 m。为了防止风对降雨的影响, 试验于早晨 5:00—6:00 时无风时进行。试验开始前测定土壤含水量并采样做机械分析。具体实验时, 先率定降雨强度, 然后打开阀门, 调节压力表读数到规定值, 再开始计时。小区产流后, 记录产流时间, 然后视产流情况每隔 2 min 或 1 min 接取一次径流样, 接取全部径流样并用称重法计算径流量及侵蚀量。当产流基本稳定后, 结束试验, 记录降雨结束时间及径流结束时间。降雨历时约 38 min, 平均雨强为 0.98 mm/min。

## 1.3 取样与分析

试验开始前, 采取各小区表层 20 cm 土样测定土壤中铜背景值及其颗粒组成。降雨产流后及人工降雨过程中, 收集径流泥水样, 测定其径流量及侵蚀量。将水样过滤, 冷藏保存, 泥沙样风干, 带回室内分析。样品颗粒组成采用激光粒度仪测定, 全铜及有效铜均采用火焰原子吸收法测定。

## 2 结果与分析

表 1 不同植被对径流量的影响

### 2.1 植被对土壤径流的影响

试验区地处黄土高原丘陵沟壑区, 年产流主要由几次大暴雨引起, 集中在 7—9 月份, 各种植被生长旺盛, 对径流的拦蓄作用较强(表 1)。与裸地相比, 对降雨径流的减缓作用在 30.8%~50.1% 之间。3 种植物的径流量大小依次为绿豆 > 紫花苜蓿 > 荒草地, 其中, 荒草地的径流量最少, 仅为裸地的 49.9%。分析其原因, 植被覆盖度差异是影响小区径流量的主要原因。3 种植物的平均覆盖度分别为绿豆 33.2% < 苜蓿地 38.5% < 荒草地 65.8%, 可以看出, 径流量与植被覆盖度之间存在明显的负相关关系。此外, 作物生长发育状况不同, 减缓径流作用亦有差异。

### 2.2 植被对土壤侵蚀的影响

植被减少土壤侵蚀作用的报道不少, 取得共性的结论认为, 植被可增强土壤的抗冲蚀能力。表 2 表明, 荒草地的减沙效益最显著, 年侵蚀量仅为 15.78 t/km<sup>2</sup>, 远小于裸地的 576.9 t/km<sup>2</sup>, 比裸地减少侵蚀达 97.2%; 紫花苜蓿与绿豆地的年侵蚀量分别为 379.18, 482.3 t/km<sup>2</sup>, 比裸地减少 34.7% 和 16.4%。究其原因, 荒草地自小区建好以后未有人工干扰, 而苜蓿地、绿豆地和裸地均有翻地行为, 因此苜蓿地、绿豆地和裸地的表层土壤较为疏松, 从而容易被冲刷而形成侵蚀。苜蓿地和绿豆地由于有植被覆盖, 其侵蚀量比裸地有一定的减少。

降雨日期	降雨量 (mm)	紫花苜蓿 (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	绿豆 (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	荒草地 (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	裸地 (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )
2007-7-30	5.5	283.5	291.7	150.8	251.7
2007-8-3	12.3	832.1	854.9	452.6	1181.9
2007-8-26	26.4	746.5	754.4	251.5	1106.4
2007-8-28	32.92	463.2	2564.9	2016.3	3807.2
2007-9-1	19.7	102.3	115.7	75.4	301.7
2007-10-6	32	756.2	784.6	120.7	1106.4
全年合计	128.8	5183.8	5366.2	3867.3	7755.2
比裸地减少(%)		33%	30.8%	50.1%	

由表2可看出,不同植被覆盖坡地的侵蚀量与降雨量关系不大,而与雨强有直接关系。如2007年8月28日降雨量为32.9 mm,基本等同于10月6日的32 mm,但8月28日最大雨强为41.4 mm/h,其侵蚀量比10月6日最大雨强为11.7 mm/h时大得多;8月3日的降雨量仅为12.3 mm,但其最大雨强达到42.9 mm/h,土壤侵蚀量也较大,9月1日降雨量为19.7 mm,最大雨强为16.3 mm/h,其土壤侵蚀量就很小。

### 2.3 植被对泥沙铜元素富集及流失的影响

土壤侵蚀往往趋于泥沙粘粒所吸附化学元素的富集<sup>[7]</sup>。不同植被下(表3),泥沙全铜富集率均在2.0以上,其中苜蓿地泥沙全铜富集率年平均为2.88,绿豆地为4.35,荒草地为2.35,裸地对泥沙全铜的富集率最大,为10.01。泥沙有效铜的富集率更高,均在45以上,其中苜蓿地泥沙有效铜年平均为57.71,绿豆地为64.46,荒草地为49.61,裸地最高,达125.55。不难看出,裸地对泥沙全铜及有效铜富集影响最大,荒草地影响最小,植被覆盖均能减少泥沙全铜及有效铜的富集。不同植被对泥沙全铜及有效铜富集率的减少顺序均为:荒草地>苜蓿地>绿豆地。

表3 不同植被对铜元素在泥沙中富集及流失量的影响

植被	原地土 Cu 含量(mg/kg)		泥沙 Cu 含量(年均值)(mg/kg)		Cu 富集率(年均值)		Cu 流失量(kg/km <sup>2</sup> )	
	全 Cu	有效 Cu	全 Cu	有效 Cu	全 Cu	有效 Cu	全 Cu	有效 Cu
紫花苜蓿	10.7	0.2	31.28	11.54	2.88	57.71	12.9	6.22
绿豆	12.3	0.3	53.93	19.35	4.35	64.46	25.5	11.01
荒草	10.6	0.12	25.27	5.95	2.35	49.61	0.46	0.15
裸地	8.2	0.14	82.45	17.58	10.01	125.55	39.46	13.7

土壤侵蚀和泥沙铜元素富集共同决定土壤铜元素的流失。由表3可看出,苜蓿地泥沙全铜及有效铜年流失量分别为12.90,6.22 kg/km<sup>2</sup>,比裸地全铜及有效铜流失分别减少67%和54%;绿豆地泥沙全铜及有效铜年流失量分别为22.5,11.01 kg/km<sup>2</sup>,比裸地分别减少35%和19%;荒草地泥沙全铜及有效铜年流失量分别为0.463,0.155 kg/km<sup>2</sup>,比裸地减少均为98%。不同植被对泥沙全铜及有效铜流失量的减少顺序均为:荒草地>苜蓿地>绿豆地,与富集率大小顺序一致。

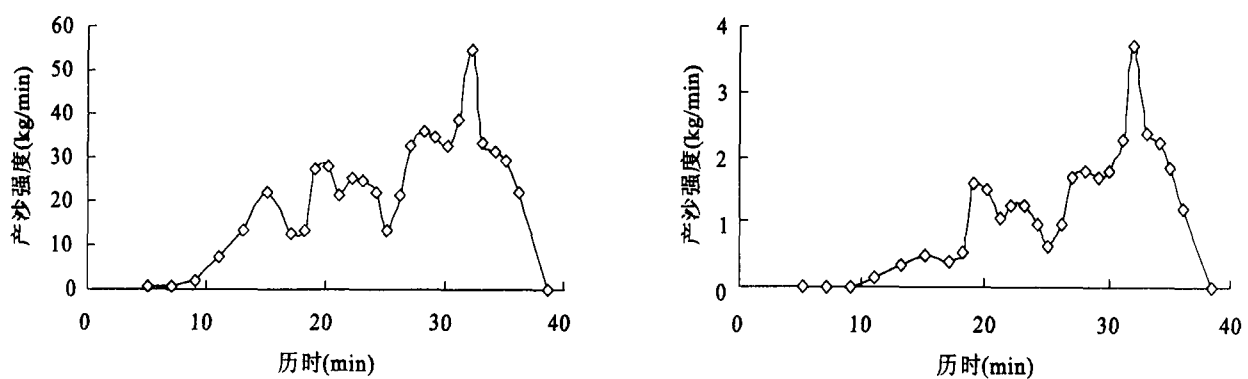


图1 模拟降雨径流强度和产沙强度过程线

### 2.4 人工模拟降雨下土壤铜元素的流失规律

模拟降雨试验在绿豆小区进行,降雨强度为0.98 mm/min,对该小区产流产沙强度和累计产流产沙动态过程,以及铜元素随径流流失强度和累计流失量动态过程进行研究分析。从径流和泥沙过程线(图1)可以看出,径流强度和产沙强度从初始产流开始均呈现波动上升趋势,两者趋势基本一致,不过产流强度过程线波动相对较缓。径流强度和产沙强度峰值均出现在产流过程的中后期,且呈现多峰多谷的特点,产流强度峰值对产沙强度峰值的时滞效应不明显,这与瑶彤军等的研究结果一致<sup>[9]</sup>。分析其原因,绿豆地属于农地范畴,其土壤的结构特性导致入渗率的显著降低,产流强度明显加强,具有较大的波动性。农地小区土壤入渗率下降的主要原因在于农地小区进行了翻耕,使其结构稳定性较差,在雨滴的冲击下极易封实土壤毛细孔管,从而阻碍了水

分的正常入渗<sup>[8]</sup>。而产沙过程的波动上升趋势,主要是因为农地小区表面细沟迅速形成,随细沟的溯源发育,向三维方向不断扩展,细沟周边土块塌落(沟岸塌落),每一次塌落使产沙量增大,从而导致径流产沙强度的迅速增大,农地土壤抗蚀性差,这种梯式递增过程最为明显<sup>[9]</sup>。初始产沙过程略滞后于产流过程,这主要是因为产流初始阶段水流很小,不足以冲刷携带土壤颗粒,导致径流中泥沙含量极低造成的。分析产流产沙累计过程发现,在相同时间段内,产沙累积速率平均是产流累积速率的1.07倍,这说明产沙过程较产流过程变化更为复杂,波动程度更为剧烈。这是因为小区在降雨产流过程中形成细沟,细沟发育具有明显的沟岸塌落形式,每当细沟内有塌落土块时,产沙强度就急剧增加,从而导致产沙过程波动剧烈。在整个模拟降雨过程中,累计产流量为10.02 t/km<sup>2</sup>,累计产沙量为2.14 t/km<sup>2</sup>。

分析模拟降雨铜元素流失过程,从铜元素流失强度过程线(图2)可以看出,泥沙中全铜和有效铜含量从初始产流开始均呈现波动下降趋势,且呈现多峰多谷特点,二者趋势基本一致。经相关性分析,发现泥沙中全铜和有效铜含量与泥沙中粘粒的含量呈一定的正相关关系,但愈往降雨后期,这种关系愈不明显。而泥沙中有效铜与全铜的比值与泥沙中粘粒的含量具有极为显著的正相关关系。这是因为土壤中粘粒的吸附能力强,有效铜多数吸附于粘粒表面,因此,泥沙中粘粒含量越高,其有效铜含量就越大。将相同时间段内有效铜与全铜的变化率进行比较,发现有效铜的变化率比全铜较高,这说明产流过程中,有效铜的波动较大,但并不明显。

从图2还可以看出,全铜和有效铜的流失强度过程线从产流开始均呈现波动上升趋势,且呈现多峰多谷特点,这种趋势与产流产沙强度趋势线很相似,但是也有不同。参照图1可知,在产流产沙强度线的峰值位置,全铜和有效铜的流失强度线也出现了峰值,不过,除此以外,全铜和有效铜的流失强度线还多出几处峰值,产流产沙强度线的最高峰出现在降雨32 min左右,而全铜和有效铜的流失强度线的最高峰出现在降雨27 min左右。这是因为全铜和有效铜的流失强度是由侵蚀强度与泥沙中铜元素的富集率共同决定的,产流产沙的峰值与泥沙中全铜和有效铜含量峰值并不一致,从而导致以上结果。另外,从产流开始到降雨20 min这段时间内,全铜和有效铜的流失强度急剧增加,而产流产沙强度线在这一阶段则比较平缓。这是因为,在产流初始阶段,泥沙中全铜和有效铜含量比中后期高得多,导致降雨前期全铜和有效铜的流失强度相对产流产沙强度较大。

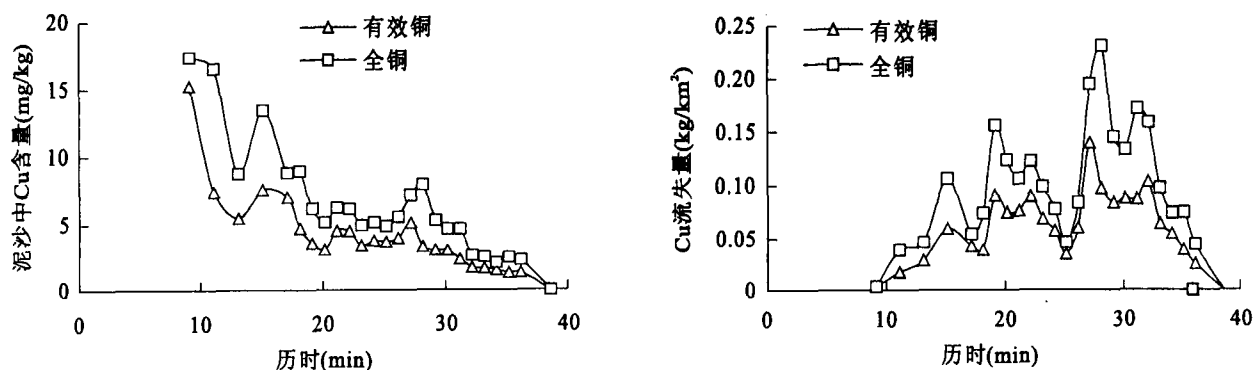


图2 模拟降雨铜流失强度过程线

分析有效铜与全铜累计流失过程发现,有效铜和全铜的累积速率变化不大,在相同时间段内,有效铜的平均累积速率为全铜的1.02倍。这也间接说明在产流产沙过程中,有效铜流失的波动性大一些。在整个降雨过程中,全铜的流失量为0.061 t/km<sup>2</sup>,有效铜的流失量为0.025 t/km<sup>2</sup>。

### 3 结论

通过对不同植被覆盖小区产流产沙量的分析表明,与裸地相比,植被对坡面产流产沙均有一定的减缓作用,不同植被对产流产沙的减缓效应顺序均为荒草地>苜蓿地>绿豆地。通过对不同植被覆盖小区全铜及有效铜流失量的分析表明,与裸地相比,植被对坡面铜元素流失量也有一定的减缓作用,不同植被对铜元素流失量的减缓效应顺序均为荒草地>苜蓿地>绿豆地,与减流减沙效应顺序相同。产流过程导致了泥沙对土壤铜元素的富集,不同植被对泥沙中铜元素的富集也产生影响,4个小区全铜及有效铜的富集率顺序均为裸地>绿豆地>苜蓿地>荒草地。通过人工降雨试验可以看出,绿豆小区的产流产沙强度过程呈现波动上升趋势。其产流过程中,泥沙中有效铜及全铜的含量呈现波动下降趋势,有效铜及全铜流失强度过程与产流产沙强度过程相似,呈现波动上升趋势,但其峰值多于产流产沙过程,且最高峰出现时间不同。

下转第23页

度的增加而减小。

(2)7个不同剖面下土壤可蚀性因子 $K$ 值的计算发现,除天然林外,其余6个坡面均表现出随土层深度增加而含量增大,其中尿坑地土层的平均可蚀因子 $K$ 值最小,而草甸土土壤可蚀性 $K$ 值平均逐层递增率最大。

(3)对农地剖面分析发现,土壤可蚀性因子 $K$ 值与WEPP模型中的细沟侵蚀因子 $K_r$ 及细沟间侵蚀因子 $K_i$ 均呈正相关,其中与细沟侵蚀因子 $K_r$ 相关性通过极显著检验,与临界剪切力因子 $T_c$ 呈显著的负相关。

#### 参考文献:

- [1] 何丙辉, 缪驰远, 吴咏, 等. 遂宁组紫色土坡耕地土壤侵蚀规律研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 9-12.
- [2] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 66-68.
- [3] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 345-350.
- [4] 范昊明, 蔡强国, 崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 8-13.
- [5] 高德武. 黑龙江土壤流失方程中土壤可蚀性因子( $K$ )的研究[J]. 国土与自然资源研究, 1993(3): 40-44
- [6] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 土壤可蚀性动态变化规律研究[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 673-681.
- [7] 张先奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1993, 12(4): 1-18.
- [8] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion / productivity impact calculator: model documentation[C]//Technical Bulletin No. 1768. Washington D C: US Department of Agriculture, 1990: 235.
- [9] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) hillslope profile and watershed model documentation[R]// NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, USA, 1995: 298.
- [10] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [11] 缪驰远, 何丙辉, 陈晓燕. 水蚀模型USLE与WEPP在紫色土水蚀预测中的应用对比研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 13-16.
- [12] 雷廷武, 张晴雯, 姚春梅, 等. WEPP模型中细沟可蚀性参数估计方法误差的理论分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 9-12.

#### 上接第9页

- [7] 代全厚, 张力, 刘艳军, 等. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(6): 8-11.
- [8] 国家林业局. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 48-53.
- [9] 张金池, 臧廷亮, 曾锋. 岩质海岸防护林树木根系对土壤抗冲性的强化效应[J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(1): 9-12.
- [10] 唐金生, 张如良. 林分根系分布及其对土壤抗冲性的影响[J]. 浙江林业科技, 2005, 25(4): 29-31.
- [11] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96.
- [12] 张金池, 康立新, 卢义山. 苏北海堤林带树木根系固土功能研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 43-55.
- [13] 卢义山, 张金池, 宋万平, 等. 海堤林带树木根系对堤防安全影响探讨[J]. 南京林业大学学报, 1994, 18(1): 31-36.
- [14] 史敏华. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994(1): 17-19.
- [15] 陈小君, 卢幻真, 韦旭生. 加权综合指数法在整体护理质量评价中的应用[J]. 山西护理杂志, 2000, 14(1): 20-22.

#### 上接第13页

#### 参考文献:

- [1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 16-18.
- [2] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1996: 1-90.
- [3] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及有关因素[J]. 水土保持通报, 1981, 1(3): 1-9.
- [4] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报, 1999, 13(5): 21-29
- [5] 张平仓, 王斌科, 唐克丽, 等. 神木试区环境特征[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993(18): 16-22.
- [6] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 5-8.
- [7] 张兴昌, 邵明安, 黄占斌, 等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2000, 11(6): 1038-1043.
- [8] 郭廷辅, 段巧甫. 水土保持径流调控理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 5-7.
- [9] 琚彤军, 刘普灵, 徐学选, 等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. 泥沙研究, 2007, 8(4): 65-71.