

不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响

张兴昌,邵明安,黄占斌,卢宗凡

(黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨陵 712100)

摘要:利用 5~6a 野外径流小区试验资料,研究 17 种植被覆盖对土壤侵蚀和氮素流失的影响,结果表明:①9 种作物、4 种草地和 4 种草灌间作小区年平均径流量为 27773、18028 和 13149 m³/km²·a,比相应裸地减少 27.5%、51.1%和 64.3%;侵蚀模数为 1716、1021 和 812t/km²·a,减少 73.0%、92.8%和 94.3%;全氮富集率为 1.65、2.48 和 2.59,比裸地增加 13.8%~114%;年平均土壤氮素流失量为 1458、1252、3829 和 966 kg/km²·a。②植被通过调节径流流速来间接影响泥沙全氮富集,土壤侵蚀模数愈大,泥沙全氮富集率愈小。③土壤氮素流失方程 $SN = (55.56 - 4.87 \ln SL) \cdot SL \cdot TN$,可定量预测土壤氮素的流失。

关键词:植被类型;土壤侵蚀;氮素流失

An experimental research on soil erosion and nitrogen loss under different vegetation cover

ZHANG Xing-Chang, SHAO Ming-An, HUANG Zhan-Bin, LU Zong-Fan (State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryfarming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The soil erosion and N loss by erosion as affected by vegetation was conducted in field runoff plots for 5~6 years. The results showed that the mean runoff amounts of 9 crops, 4 grasses, 4 grass-shrubs fields were of 27773, 18028 and 13149 m³/km²·a respectively, which were 27.5%, 51.1% and 64.3% lower than bare land. Their erosion modules were 1716, 1021 and 812t/km²·a, which were 73.0%, 92.8% and 94.3% lower respectively than the bare land respectively. Their mean loss amounts of nitrogen by sediment were 1458, 1252 and 966 kg/km²·a. Vegetation affected indirectly the nitrogen enrichment in sediment by way of regulating runoff velocity on the slope surface. A model of soil N loss, was developed to predict the soil nitrogen loss by sediment.

Key words: vegetation type; soil erosion; nitrogen loss

文章编号:1000-0933(2000)06-1038-07 中图分类号:S143.1;S157.1 文献标识码:A

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^[1],植物茎及枯枝落叶对径流流速的减缓作用^[2~5],植物根系对提高土壤抗冲抗蚀的作用^[6,7]。土壤侵蚀是土壤氮素流失的主体,植被通过减少侵蚀而对氮素流失产生影响。目前,许多学者多侧重于草地带对泥沙养分过滤作用的研究^[8~10],植被与土壤侵蚀、氮素富集及流失关系如何,迄今为止,尚未见报道。本项研究以长期径流观测定位试验为基础,通过分析 17 种植被对径流、侵蚀、泥沙氮素富集及流失的影响,旨在建立泥沙氮素富集和流失模型,揭示植被过滤径流泥沙氮素的效应。

1 试验设计与方法

1.1 试验设计

试验研究由 3 部分内容组成。

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-411)、“973”项目(G1999011709)和国家自然科学基金资助项目(49871049)

收稿日期:1999-10-28,修订日期:2000-06-15

作者简介:张兴昌(1965~),山西省武功县人,博士,副研究员。主要从事土壤矿质营养研究。

1.1.1 作物对土壤氮素流失的影响 试验布设在安塞县纸坊沟流域内,小区面积 100m²,宽 5m,坡向北偏东 15°,坡度 23°,分上下两层水平排列,每排 5 个小区。小区四周用水泥板围埂,每小区下方连接两个 1 级分流桶,收集和测定径流泥水样。土壤为黄绵土。供试作物有谷子(Millet)、糜子(Broom corn)、春播荞麦(Spring buckwheat)、夏播荞麦(Summer buckwheat)、黄豆(Soybean)、黑豆(Black soybean)、黄豆+黄芥(Mustard)、洋芋(Potato)、小麦(Wheat),并设立裸地对照(Bare land),共 10 个处理。1985 年小区建成,1986 年匀地种谷子。试验于 1987 年开始,1991 年结束,共进行 5a 观测。每年于播种前施尿素 225kg/hm²、过磷酸钙 450 kg/ hm²,圈粪 7.5t/ hm²。作物在 5a 内进行必要的轮作,试验管理同一般大田。

1.1.2 不同牧草对土壤氮素流失的影响 试验布设在安塞县沿河湾镇茶坊村后山坡地上,小区面积 169.6m²,宽 5m,坡向北偏东 11°,坡度 32°,种植沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、草木樨(*Melilotus albus* Desr.)和红豆草(*Onobrychis vicifolia* Scop.) 4 种牧草,并设立 1 个裸地对照小区。每小区下修建蓄水池一个,收集径流和泥沙,体积为 2m×2m×1.5m,水池用铁皮覆盖遮雨。土壤为黄绵土。1982 年建成小区,当年播种牧草。试验于 1983 年开始,1988 年结束,不施肥,共进行 6a 观测。

1.1.3 草灌间作对土壤氮素流失的影响 试验地点“1.1.2”。小区面积 169.6m²,宽 5m,坡向北偏东 11°,坡度 32°。处理为:柠条(*Campylotropis macrocarpa* Rehd.)+沙打旺、柠条+紫花苜蓿、柠条+草木樨和柠条+红豆草,并设立裸地对照。

1.2 取样与分析

降雨产流后,自记雨量器记录整个降雨过程,测定径流泥水量。测定作物播前、牧草返青期土壤养分含量。土壤和泥沙全氮分析采用半微量开氏法。

2 结果与分析

2.1 植被对土壤径流的影响

2.1.1 不同作物对径流的影响 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,正值农作物生长旺盛季节,作物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 1.5%~56.5%之间。作物生长发育状况不同,减缓径流作用亦有差异。冬小麦生长期一般为 10 月份至翌年 6 月份,休闲期正逢暴雨期,径流量几乎与裸地相同。在雨季,洋芋块茎发育膨大对土壤的扰动作用加剧了产流,与裸地相比,径流量仅减少 16.0%。覆盖度差异也会直接影响作物地的径流。据 1989 年 9 月测定,夏播和春播荞麦覆盖度分别为 23%和 17%,5a 平均径流量相差 19.2%。作物中以黑豆地的径流量最少,仅为裸地的 43.6%。

表 1 不同作物对径流量的影响

Table 1 The effects of crops on runoff on slope land

作物 Crops	谷子 ¹⁾	糜子 ²⁾	春播荞 麦 ³⁾	夏播荞 麦 ⁴⁾	黄豆 ⁵⁾	黑豆 ⁶⁾	黄豆+黄芥 ⁷⁾	洋芋 ⁸⁾	小麦 ⁹⁾	裸地对 照 ¹⁰⁾
平均 Aver. (m ³ /km ² . a)	26802	29815	24158	29886	31397	16669	21339	32171	37718	38283
比裸地减少 Reducing(%)	30.0	22.1	36.9	21.9	17.8	56.5	44.3	16.0	1.5	—

1) Millet, 2) Bloom corn, 3) Spring buckwheat, 4) Summer buckwheat, 5) Soybean, 6) Black soybean, 7) Soybean + mustard, 8) Potato, 9) Wheat, 10) Bare land.

2.1.2 牧草对径流的影响 牧草一般为多年生植物,在 6a 的生育期内,很少进行耕作,径流量相对较少(表 2),与裸地相比,径流减少量均超过 45%。沙打旺草地可拦截径流 53.9%,拦截径流作用最明显,这与前人的研究结果一致^[11]。

2.1.3 草灌间作对径流的影响 已有研究^[12]表明,在黄土丘陵沟壑区,土壤干层限制了灌木的生长,人们设法寻求一种乔灌木配置模式,改善灌木土壤水分条件,防止降雨径流流失,提高灌木的生产力。卢宗凡^[13,14]提出在>30°坡地推行草灌间作种植模式。表 3 表明,草灌间作减少径流作用显著,可达到 60%左

右。而作物和草地小区平均能减少 27.4%和 51.1%。由于土壤紧实,水分入渗能力下降,草粮间作径流平均仅能减少 11.6%。尽管试验布设在不同地方,降雨和土壤条件亦存在差异,裸地径流量随坡度的增大而增加(表 1~表 3)。

表 2 不同草地对径流量的影响
Table 2 The effects of grasslands on runoff in slope land

牧草 Grass land	沙打旺 ¹⁾	紫花苜蓿 ²⁾	草木樨 ³⁾	红豆草 ⁴⁾	裸地 ⁵⁾
6a 平均 Average (m ³ /km ² . a)	16970	17763	19428	17949	36833
比裸地减少 Reducing(%)	53.9	51.8	47.3	51.3	—

1) *Astragalus adsurgens* Pall (AST), 2) *Medicago sativa* L. (MED), 3) *Melilotus albus* Desr. (MEL), 4) *Onobrychis vicifolia* Scop. (ONO), 5) Bare land.

表 3 草灌间作对径流量的影响
Table 3 The impact of interplanting grass with shrub on runoff on slope land

草灌间作 ¹⁾	柠条+沙打旺 ²⁾	柠条+紫花苜蓿 ³⁾	柠条+草木樨 ⁴⁾	柠条+红豆草 ⁵⁾	裸地 ⁶⁾
6a 平均 Average (m ³ /km ² . a)	11082	11544	14312	15657	36833
比裸地减少 Reducing %	69.9	68.7	61.1	57.5	—

1)The interplanting shrub with grass, 2)CAM+AST, 3)CAM+MED, 4)CAM+MEL, 5)CAM+ONO, 6)Bare land.

2.2 植被对土壤侵蚀的影响

植被减蚀作用报道不少^[12,15,16],取得共性的结论认为,植被可提高土壤的抗冲蚀能力。在黄土高原地区,研究者^[1,6,11]先后对不同作物、林草植被减蚀作用进行了研究,但尚未对作物、牧草和灌木减蚀进行综合分析;所建立的土壤侵蚀模型比较单一,未将植被因素列入其中。本研究拟从这两个方面进行研究,以期揭示植被对土壤流失的影响。

2.2.1 作物对土壤侵蚀的影响 表 4 表明,黑豆地减沙效益最显著,平均侵蚀量仅为 619t/km². a,减少侵蚀 90.2%;春播荞麦侵蚀量为 1230 t/km² · a,比夏播荞麦减少侵蚀 30%;黄豆与黄芥间作侵蚀量为 1361 t/km² · a,比黄豆单作减少侵蚀 44%;谷子侵蚀量为 1859 t/km² · a,比糜子减少侵蚀 16%;小麦休闲期,土壤尚未耕作,加上茬根径流泥沙的过滤作用,土壤侵蚀量为 1983 t/km² · a,与裸地相比,减少土壤侵蚀 68.7%。

表 4 不同作物对侵蚀量的影响
Table 4 The effects of crops on sediment loss in slope land

作物 Crops	谷子 ¹⁾	糜子 ²⁾	春播荞麦 ³⁾	夏播荞麦 ⁴⁾	黄豆 ⁵⁾	黑豆 ⁶⁾	黄豆+黄芥 ⁷⁾	洋芋 ⁸⁾	小麦 ⁹⁾	裸地对照 ¹⁰⁾
5a 平均 Aver. (t/km ² . a)	1859	2219	1230	1768	2431	619	1361	1978	1983	6344
比裸地减少 Reducing(%)	70.7	65.0	80.6	72.1	62.0	90.2	78.5	68.8	68.7	—

1) Millet, 2) Bloom corn, 3) Spring buckwheat, 4) Summer buckwheat, 5) Soybean, 6) Black soybean, 7) Soybean + mustard, 8) Potato, 9) Wheat, 10) Bare land.

在试验年度内,1989 年 7 月 16 日发生了一次 50a 一遇的特大暴雨,历时 15.4h,日降雨量高达 135mm,平均雨强 4.5mm/h,30min 最大降雨量 45mm,谷子、糜子、春播荞麦、黄豆、黑豆、黄豆+黄芥、洋芋、小麦和裸地土壤侵蚀量分别为 4090、2637、1089、4464、1048、2129、1867、2287 和 6502 t/km²,这次

降雨侵蚀量大小顺序与 5a 平均基本一致。

2.2.2 牧草对土壤侵蚀的影响 与作物地相比,人工草地减蚀作用较强(表 5),减少土壤侵蚀 90%以上。利用 1983a 至 1988a 不同人工草地 22 次测定土壤侵蚀资料,采用幂函数进行统计得下列模式:

$$SL=AP^{b_1}I^{b_2}C^{b_3}$$

(1)

式中, SL 为次暴雨侵蚀量(t/km^2), P 为产流降雨量(mm), I 为产流降雨强度(mm/h), C 为人工草地覆盖度($\%$), A,b_1,b_2,b_3 为模型参数。

经相关分析,不同人工草地土壤侵蚀方程待求参数见表 6。可看出 5 个方程的决定系数 R^2 在 37.5%~49.1%之间,平均 43.8%。因此,选用降雨量、降雨强度和植被覆盖度 3 个因子可以给出土壤侵蚀量较满意的解释。根据参数取值来看,很难判断不同草地对土壤侵蚀的影响。若将(1)模型参数 A 与植被覆盖度 b_3 乘积作为一个固定参数 A' ,不难看出,不同草地 A' 值可反映土壤侵蚀特征(表 7)。

表 5 不同草地对侵蚀量的影响

Table 5 The effects of grasslands on sediment loss in slope land

牧草 Grass land	沙打旺 ASD	紫花苜蓿 MED	草木樨 MEL	红豆草 ONO	裸地 Bare land
6a 平均 Average ($t/km^2 \cdot a$) 比裸地减少 Reducing($\%$)	869 93.9	876 93.8	1412 90.1	927 93.5	14205 —

表 6 不同人工草地土壤侵蚀方程待求系数*

Table 6 The model coefficient of different artificial grass land

人工草地 Grass land	A	b_1	b_2	B_3	F	R
沙打旺 AST	34.67	1.3605	1.7531	—1.7718	5.78	0.7006
紫花苜蓿 MED	0.1522	1.5036	1.6222	—0.6751	5.64	0.6961
草木樨 MEL	0.3249	1.2755	1.5777	0.6831	3.50	0.6123
红豆草 ONO	0.0468	1.6193	1.3686	—0.0563	5.28	0.6831
裸地 Bare land	0.4255	1.3549	1.3339	0	5.74	0.6127

* $F_{0.01}=4.31,R_{0.01}=0.5368$

表 7 不同草地植被 A' 值*

Table 7 The value A' of different artificial grass land

植被 Vegetation	草木樨 MEL	苜蓿 MED	沙打旺 AST	红豆草 ONO	裸地 Bare land
平均被覆度($\%$) Aver. of coverage	36.86	21.82	70.95	27.18	0
平均侵蚀量 Aver. of erosive module	1412	876	869	927	14205
A' 值* Value A'	0.0532	0.0190	0.0189	0.0389	0.4255

* $A'=AC^{b_3}$

2.2.3 草灌间作对土壤侵蚀的影响 在试验所涉及的所有植被中,草灌间作的减沙效益最高,达到 90%以上(表 8)。不同牧草与柠条间作减沙效益的大小顺序与牧草单作(表 5)相同,反映了不同植被减沙效益的内在本质。万寿菊、草木樨,与牧草相比,地上和地下生物产量较高,可有效减少雨滴动能和增加土壤容重。草灌间作与牧草单作相比,柠条带 0~20cm 土壤容重达到 1.55g/cm³,比牧草平均增加 14.8%,侵蚀模

数平均减少 20.2%。

表 8 草灌间作对侵蚀量的影响

Table 8 The impact of interplanting grass with shrub on soil loss on slope land

草灌间作 ¹⁾	柠条+沙打旺 ²⁾	柠条+紫花苜蓿 ³⁾	柠条+草木樨 ⁴⁾	柠条+红豆草 ⁵⁾	裸地 ⁶⁾
6a 平均 Average of six years(t/km ² ·a)	501	802	1079	867	14205
比裸地减少 Reducing (%)	96.5	94.4	92.4	93.9	

1)The interplanting shrub with grass, 2)CAM+AST, 3)CAM+MED, 4)CAM+MEL, 5)CAM+ONO, 6)Bare land.

2.3 植被对泥沙氮素富集和流失的影响

土壤侵蚀往往趋于泥沙粘粒所吸附化学元素的富集^[8,9,17]。不同植被下(表 9),泥沙全氮富集率均在 1.5 以上,其中作物 9 个处理泥沙全氮富集率平均为 1.65,比裸地泥沙富集率 1.45 提高了 13.8%;草地 4 个处理全氮富集率平均为 2.48,是裸地泥沙全氮的 2 倍;草灌间作 4 个小区泥沙全氮平均富集率高达 2.59,是裸地的 2.1 倍。植被覆盖(作物、牧草、草灌)小区的泥沙全氮富集率平均为 2.07±0.19,比裸地富集率 1.33 提高了 55.6%。

表 9 植被对泥沙氮素富集及流失的影响

Table 9 The enrichments and losses of nitrogen in sediment as affected by different vegetation cover in slope land

处理 Treatmentmt	植被 Vegetation	坡度 Slope gradient (°)	泥沙 N 素富集和流失				
			土壤侵蚀 Erosive module (t/km ² ·a)	原地土全 N TN in soil (g/kg)	泥沙全 N TN in sediment (g/kg)	全 N 流失 Loss of TN (kg/km ² ·a)	
					泥沙全 N ER		
不同作物 Crops	谷子 Millet	23°	1859	0.53	0.89	1.67	1655
	糜子 Broom corn		2219	0.49	0.76	1.56	1686
	春播荞麦 Spring buckwheat		1230	0.55	0.99	1.79	1218
	夏播荞麦 Summer buckwheat		1768	0.54	0.91	1.68	1609
	黄豆 Soybean		2431	0.59	0.90	1.52	2188
	黑豆 Black soybean		619	0.63	1.18	1.87	730
	黄豆+黄芥 Soybean+mustard		1361	0.58	0.96	1.65	1307
	洋芋 Potato		1978	0.43	0.67	1.55	1325
	小麦 Wheat		1983	0.45	0.71	1.58	1408
	裸地 Bare land		6344	0.44	0.64	1.45	4060
人工草地 Grass Land	沙打旺 AST	32°	869	0.44	1.08	2.45	939
	紫花苜蓿 MED		876	0.51	1.30	2.54	1139
	草木樨 MEL		1412	0.48	1.13	2.36	1596
	红豆草 ONO		927	0.56	1.44	2.58	1335
草灌间作 Shrub+ Grass	裸地 Bare land	32°	14205	0.41	0.50	1.21	7103
	柠条+沙打旺 CAM+AST		501	0.47	1.24	2.64	621
	柠条+紫花苜蓿 CAM+MED		802	0.48	1.26	2.62	1011
	柠条+草木樨 CAM+MEL		1079	0.45	1.16	2.58	1252
	柠条+红豆草 CAM+ONO		867	0.50	1.27	2.53	1101
	裸地 Bare land		14205	0.41	0.50	1.21	7103

不难看出,草灌间作小区对泥沙全氮富集率影响最大,作物地影响最小,植被覆盖均能增加泥沙全氮的富集。每万³方堆数据理,侵蚀量愈大,泥沙全氮富集率愈小,作物、牧草和草灌间作土壤侵蚀量与泥沙全氮富集率的相关系数分别达到-0.7464**、-0.9928**和-0.9986**,均达到极显著水准。泥沙全氮富集

与侵蚀量的负相关关系原因在于:在相同降雨下,植被的减蚀作用愈强,坡面径流流速愈小,与表土颗粒作用时间相对延长,导致径流悬浮泥沙中粗颗粒的沉积,径流与表土颗粒相互作用更加充分。一方面增加泥沙细颗粒含量,另一方面加速了吸附于表土颗粒氮素向径流中释放,共同作用的结果造成泥沙土壤氮素富集率增加,方程(2)对此作了定量描述。

用 19 个小区泥沙全氮富集率(ER)与土壤侵蚀量(SL)建立关系如下:

$$ER = 5.556 - 0.487\ln(SL) \quad R = 0.7658 \quad (n = 19, R_{0.01} = 0.5751) \tag{2}$$

式中, ER (Enrichment ratio)为泥沙全氮富集率, SL (Soil loss amount)为泥沙量(t/km^2)。

土壤侵蚀与泥沙全氮富集决定土壤全氮的流失,作物 9 个处理泥沙全氮流失平均 $1458 t/km^2 \cdot a$,比裸地全氮流失 $4060 t/km^2 \cdot a$ 减少了 64%;草地 4 个处理全氮平均流失 $1252 t/km^2 \cdot a$,不及裸地 $7103 t/km^2 \cdot a$ 的 1/6;草灌间作 4 个小区全氮流失平均仅为 $966 t/km^2 \cdot a$,仅占裸地的 14%。

基于(2)式,土壤氮素流失与土壤侵蚀的关系方程就变为:

$$SN = (55.56 - 4.87\ln SL) \cdot SL \cdot TN \tag{3}$$

式中, SN 为土壤氮素流失量($kg/km^2 \cdot a$), SL 为土壤侵蚀量($t/km^2 \cdot a$), TN 为产流前土壤全氮含量(%)。

则土壤氮素流失随土壤侵蚀变化率的偏微分方程为:

$$\partial SN / \partial SL = 50.73 - 4.87\ln SL$$

偏微分方程表明,土壤氮素流失速率随侵蚀量增大而减小,当土壤侵蚀量达到 $33417 t/km^2 \cdot a$ 时,土壤氮素流失随土壤侵蚀变化的速率为 0。一般情况下,黄土高原土壤侵蚀模数不可能超过 $30000 t/km^2 \cdot a$,土壤氮素流失速率也不可能达到极限。

3 结果与讨论

5~6a 的研究资料表明,不同植被覆盖下,泥沙氮素富集率存在明显差异,总的来看,作物<牧草<草灌间作,而侵蚀量大小顺序与此基本一致,相关分析又表明侵蚀量与氮素富集呈负相关关系,由此推断泥沙氮素富集与侵蚀量有关,并建立了泥沙氮素富集模型。尽管此模型能很好地反映泥沙氮素富集规律,但不能揭示不同植被类型下泥沙氮素富集本质。通过研究发现,不同植被类型植被覆盖度不一,作物、牧草和草灌年平均覆盖度分别为 22.3%、39.2%和 52.4%,其覆盖度的大小顺序与泥沙氮素富集率顺序完全一致,也不受土壤质地不均一的干扰。据此推断,泥沙氮素富集与植被覆盖度有关,为了判断其结论是否可靠,尚需从土壤氮素与径流相互作用机理方面进行探讨。土壤氮素特别是有機态氮流失实际上是坡面径流与土壤氮素相互作用结果,当植被覆盖度增大时,土壤颗粒与坡面水流充分作用,并使水流速度减慢,其结果有助于径流携带粗颗粒沉淀,相反,泥沙中细颗粒含量增加。已有研究^[10,18,19]表明,与细颗粒结合的有机态氮占土壤全氮绝大部分。因此,植被覆盖度的增加有利于径流泥沙中细颗粒的富集,从而使泥沙中全氮含量增加。不同植被类型对泥沙全氮富集的影响,实际上是通过调节径流的流速而间接影响泥沙全氮的富集。

参考文献

[1] 刘秉正,吴发启.见:刘秉正主编.土壤侵蚀.西安:陕西人民出版社,1996.1~90.
[2] Dabney S M, Meyer L D, Harmon C V, *et al.* Depositional patterns of sediment trapped by grass hedges. *Trans. Soc. of Agr. Engineers*,1996,**38**(6):1719~1729.
[3] Flanagan D C, Foster G R, Neibling W H, *et al.* Simplified equations for filter strip design. *Trans. of the ASAE*, 1989,**32**(6):2001~2007.
[4] Edwards D R, Daniel T C, Moore P A, *et al.* Soilds transport and erodibility of poultry litter surface-applied to fescue. *Trans. of ASAE*, 1994,**37**:(3):771~776.
[5] Kemper W, Dabney S M, Dominick D, *et al.* Hedging against erosion. *J. Soil and Water Conservation*, 1992,47(4):284~288.

[6] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及有关因素. 水土保持学报, 1981, **1**(3): 1~9.

[7] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, **10**(5): 21~29.

[8] Burwell R E, Timmons D R and Holt R F. Nutrient transport in surface runoff as effected by soil cover and seasonal periods. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1975, **37**(4): 523~538.

[9] Alberts E E, Wendt R C and Piest R F. Physical and chemical properties of erosion. *Adv. Agron.*, 1983, **15**(3): 303~316.

[10] Anderson D W, Saggar S, Bettany J R, *et al.* Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen, and sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**: 767~772.

[11] 侯喜禄, 曹清玉. 陕北丘陵沟壑区植被减沙效益研究. 水土保持学报, 1990, **10**(2): 27~36.

[12] Teamah J A. Effectiveness of temporary sediment control fences. *Land and Water*, 1983, **37**(3): 27~29.

[13] 卢宗凡, 赵更生, 郑剑英. 黄土高原丘陵沟壑区水土保持增产体系研究. 见: 卢宗凡主编. 黄土丘陵沟壑区水土保持型生态农业研究. 杨陵: 天则出版社, 1990. 100~108.

[14] 杨文治, 杨新民, 马玉玺. 黄土丘陵区(II)土壤水分资源及其利用研究. 见: 卢宗凡主编. 黄土丘陵沟壑区水土保持型生态农业研究. 杨陵: 天则出版社, 1990. 56~75.

[15] Magette W L, Brinsfield R B, Palmer R E, *et al.* Nutrient and sediment removal by vegetation filter strips. *Trans. of the ASAE*, 1989, **32**(2): 663~667.

[16] Strvastava P. Validating a vegetative filter strip performance model. *Trans. of ASAE*, 1998, **41**(1): 89~95.

[17] Gregory F. Nitrogen and phosphorus in eroded sediment from corn and soybean tillage system. *J. Enviorn. Qual.*, 1991, **20**(4): 663~670.

[18] Catroux G and Schnitzer M. Chemical, spectroscopic and biological characteristics of the organic matter in particle size fractions separated from an Aquoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, **51**: 1200~1207.

[19] Chichester F W. Nitrogen in organ-mineral sediment fractions. *Soil Sci.*, 1969, **107**: 356~363.