
试验研究

秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响

杨青森¹, 郑粉莉^{1,2}, 温磊磊¹, 耿晓东^{2,3}, 安娟^{2,3}, 王彬¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所
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; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用野外原位模拟降雨试验, 研究了秸秆覆盖对东北黑土区坡面土壤侵蚀和养分流失的影响。试验处理包括 1 个施肥水平(纯 N 为 150 kg/hm²; 纯 P 为 75 kg/hm²), 3 个秸秆覆盖度(翻耕裸露, 低覆盖 2 kg/m², 高覆盖 4 kg/m²), 1 个降雨强度(90 mm/h, 降雨历时 60 min)和 1 个坡度(5°), 试验小区长 10 m, 宽 1 m。研究结果表明, 低秸秆覆盖与翻耕裸露处理相比, 坡面的径流量和侵蚀产沙量分别减少了 87% 和 99.86%; 在高秸秆覆盖条件下, 坡面不产生径流。低秸秆覆盖条件下, 径流中的 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度分别是翻耕裸露处理的 5.52 倍和 4.25 倍, 但 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的流失量与翻耕裸露处理基本相同。同样, 低秆覆盖条件下侵蚀泥沙中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的含量分别是翻耕裸露处理的 4.38 倍和 2.93 倍, 但 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的流失量与翻耕裸露处理相比分别减少了 99.3% 和 99.6%。因此, 在东北黑土区选取适宜的秸秆覆盖量对保护耕地质量具有重要意义。

关键词: 东北黑土区; 秸秆覆盖; 土壤侵蚀; 养分流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0001-05

中图分类号: 157.1

Effects of Mulch Cover on Hillslope Soil Erosion and Nutrient Loss in Black Soil Region of Northeast China

YANG Qing-sen¹, ZHENG Fen-li^{1,2}, WEN Lei-lei¹, GENG Xiao-dong^{2,3}, AN Juan^{2,3}, WANG Bin¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and

Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Graduate University Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A field simulated rainfall experiment was designed to quantify effects of mulch cover on hillslope soil erosion and nutrient loss in the black soil region of the Northeast China. The experiment treatments included one fertilizer input(150 N and 75 P kg/hm²) and three mulch cover levels(bare land, 2 and 4 kg/m² corn mulch cover). Simulated rainfalls were applied at a rate of 90 mm/h for 60 minutes on slopes of 5°. The plot size was 10 m long and 1 m wide. The results show that when corn mulch cover was 2 kg/m², runoff decreased by 87% and the soil loss reduced by 99.86%, respectively, comparing to the bare land. For 4 kg/m² of corn mulch cover, no runoff occurred. Under the 2 kg/m² mulch cover treatment, NO₃⁻-N and PO₄³⁻-P concentrations in runoff were 5.52 and 4.25 times higher than them from the bare land, but the total losses of NO₃⁻-N and PO₄³⁻-P in runoff were similar. NO₃⁻-N and PO₄³⁻-P in eroded sediment from the lowly covered plot were 4.38 and 2.93 times respectively greater than them from the bare land; but the total losses of NO₃⁻-N and PO₄³⁻-P in eroded sediment from mulch cover treatment reduced by 99.3% and 99.6%, respectively. Therefore, the proper corn mulch cover is important for protecting soil quality and reducing agricultural non-point pollution.

Keywords: black soil region; mulch cover; soil erosion; nutrient loss

收稿日期: 2010-09-02

修回日期: 2010-11-18

资助项目: 国家基础研究发展计划项目课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 西北农林科技大学创新团队建设计划项目“土壤侵蚀及其治理环境效应评价”(01140202)

作者简介: 杨青森(1985—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀环境效应评价。E-mail: yqshll@163.com。

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省蓝田县, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn。

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,对保障我国粮食安全具有重要的战略地位^[1],但是由于近几十年来人口数量的急剧增加,土地垦殖率的不断上升,植被遭到严重破坏,现已成为全国严重的水土流失区之一^[2]。降雨和径流是土壤养分离失的主要动力。在降雨过程中,土壤养分的迁移主要有两种:(1)土壤养分随地表径流和泥沙的迁移;(2)土壤养分等随下渗的水分进行深层迁移。农田土壤氮和磷等养分随地表径流和侵蚀泥沙向水体迁移是氮磷等养分损失的主要途径,也是造成非点源污染的主要原因^[3-4]。据报道,美国因土壤侵蚀而引起的非点源污染造成的经济损失达 22~70 亿美元^[5]。

作为水土保持耕作措施之一的秸秆覆盖,具有显著的减水减沙作用。目前,国内外对作物秸秆的研究主要在秸秆还田后的节水效应对土壤肥力的影响^[6-7],以及秸秆覆盖防蚀作用^[8-11]。大量的研究表明,秸秆覆盖能有效减少农田土壤流失和改善土壤质量。关于国外秸秆覆盖对地表径流氮磷养分离失的大多研究结果表明^[12-14],与无秸秆覆盖相比,秸秆覆盖增加地表径流氮磷养分的浓度,而减少氮磷养分离失的总量。但关于秸秆覆盖减少农田土壤侵蚀和养分离失的研究在东北黑土区却鲜见报道,且在国内关于秸秆覆盖对养分离失的影响尚未得出一致结论。王静等^[15]认为,秸秆覆盖小区与传统耕作小区相比,地表径流的氮、磷流失总量分别降低 27.42% 和 32.29%。张兴昌等^[16-17]研究发现,植被覆盖虽然能减少土壤侵蚀和全氮的流失,但增加了土壤矿质氮的流失。郗瑞卿^[18]等认为,在黑土区植被覆盖并不能减少土壤矿质氮的流失。为此,本研究基于野外原位人工模拟降雨试验,研究秸秆覆盖对黑土区坡耕地土壤侵蚀与氮和磷养分离失的影响,以期为黑土区土壤侵蚀防治和耕地质量保护提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与材料

野外原位模拟降雨试验是在黑龙江省水土保持科学研究所科技园内进行。试验所采用的降雨机是黑龙江省水土保持科学研究所自发研制的下喷式人工降雨机,降雨高度为 6 m,降雨强度变化范围 20~150 mm/h。模拟降雨试验小区规格为 10 m×1 m。

试验土壤为黑土,土壤质地为粉壤土质,其基本性质为土壤容重 1.1 g/cm³,有机质含量 28.8 g/kg, pH 值 6.65,硝态氮含量 2.44 mg/kg 和水溶性磷含量 1.41 mg/kg。秸秆覆盖选用收割后自然风干的玉米秸秆,将秸秆按约 5 cm 长切割成段,并均匀覆盖在

土壤表面。通过走访农户并结合野外实际调查,选取不同坡面不同地貌部位 5 个样方(10 m×10 m)对地表秸秆覆盖量进行调查,结果表明实际秸秆覆盖量变化于 1.7~3.4 kg/m²。因此,选取秸秆覆盖量 2.0 kg/m² 为低覆盖水平,4.0 kg/m² 作为高覆盖水平。

1.2 试验设计

试验设计包括一个降雨强度(90 mm/h,降雨历时为 60 min);一个坡度(5°);一个施肥水平(当地农田施肥量);不同秸秆覆盖处理(翻耕裸露、低覆盖和高覆盖)。每个处理设计两个重复(表 1)。

表 1 试验设计

小区 编号	处 理	秸秆覆盖量/ (kg·m ⁻²)	施肥量/(kg·hm ⁻²)	
			纯 N	纯 P
1	翻耕裸露	0	150	75
2	低覆盖	2	150	75
3	高覆盖	4	150	75

1.3 试验步骤

(1) 施肥。根据设计的施肥水平(N:150 kg/hm²和 P:75 kg/hm²)和试验小区面积(10 m×1 m),计算所需的化肥量。分别称取 176.27 g 尿素和 319.36 g 磷酸二铵,与 627 kg 表层土充分搅拌均匀,然后均匀撒在试验小区的表面。

(2) 覆盖秸秆。秸秆覆盖材料为玉米秸秆。首先将玉米秸秆切割成 5 cm 长,然后根据设计的低秸秆覆盖(2 kg/m²)或高秸秆覆盖(4 kg/m²),称取所需的玉米秸秆,并将这些玉米秸秆均匀地覆盖在试验小区。

(3) 土壤样品采集。模拟降雨前后,分别在试验小区的坡上、坡中、坡下位置,按 0—2 cm,2—5 cm,5—10 cm 和 10—20 cm 土层间隔分别采集土壤样品,并将同一采样深度的土样混合,以备试验分析。

(4) 模拟降雨。设计 90 mm/h 降雨强度进行模拟降雨试验,待坡面产流后每隔 3 min 采集径流泥沙样,取样时间为 30 s。同时,在降雨过程中收集 100 ml 雨水作为空白样品,以备实验分析。降雨历时为 60 min。

(5) 样品处理。模拟降雨试验完成后,将盛放径流样的塑料桶称重并取径流上清液 100 ml,然后对上清液进行过滤,以供测试径流中养分含量;泥沙样品则放置于铝盒中在 55 °C 下烘干称重,烘干用于坡面土壤流失量的计算和泥沙养分含量的测定。

(6) 样品分析。用流动分析仪测定径流中 NO₃⁻-N 的浓度。泥沙样和土壤样品研磨后过 1 mm 筛,称取 5 g,以蒸馏水为浸提液,按水土(质量

比)10:1混合,恒温振荡 30 min 后,用高速离心机离心 10 min (8 000 r/min),过滤,取上清液测定 NO_3^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度。用蒸馏水作为浸提液,一是保证所测定土壤和侵蚀泥沙中养分与径流中测定的养分均是自然条件下的迁移,二是为了分析降雨前土壤中特定养分量(N或P)与降雨后土壤、侵蚀泥沙和径流中 3 者特定养分量之和的差值是否在误差允许范围内,以保证养分测定数据的可靠性。 NO_3^--N 用流动分析仪进行测定, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 用钼蓝比色法测定。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对坡面土壤侵蚀的影响

2.1.1 秸秆覆盖对产流时间的影响 地面秸秆覆盖可以延缓产流时间。首先,秸秆覆盖避免了雨滴直接打击地面,减小了雨滴动能;其次,秸秆覆盖增大了地

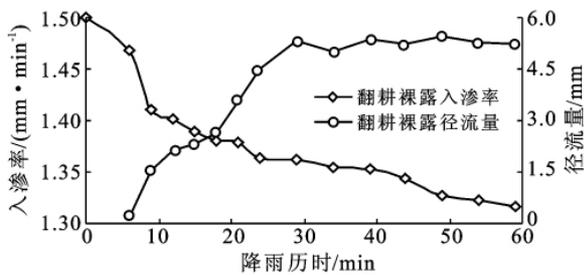


图 1 翻耕裸露处理坡面入渗和产流过程

翻耕裸露试验小区由于降雨初始入渗率较大,所以产流量很小,随着入渗率的减小,坡面产流量缓慢增大,降雨后期小区的入渗率变化很小,因此坡面产流量趋于稳定。低秸秆覆盖试验小区因为秸秆覆盖作用而增加了降水的入渗能力,因此产流时间相对翻耕裸露小区滞后。在降雨历 35 min 后,由于入渗率达到稳定,所以坡面径流量呈现稳定态势。

2.1.3 秸秆覆盖对坡面径流量和侵蚀量的影响 由表 2 可以看出,坡面径流量和侵蚀量随着秸秆覆盖量的增加而减少,说明秸秆覆盖可有效地减少径流量和侵蚀量。在低覆盖条件下,与翻耕裸露处理相比,秸秆覆盖分别减少了 87% 的径流量和 99.86% 的侵蚀量。Rajant 等^[9]的研究结果表明,0.6 kg/m² 的秸秆覆盖同裸地处理相比径流量和产沙量分别减少 62% 和 87%。Edwards 等^[11]研究表明,0.4 kg/m² 的秸秆覆盖可减少 49% 的产沙量。从这里可以看出,尽管研究区不同,使用秸秆的覆盖量也不同,但不同学者的研究结果皆表明,秸秆覆盖能显著减少农田土壤流失。因此,如果在我国东北黑土区推行合理的秸秆覆盖措施,耕地质量就可以有效地得到保护。

表的粗糙度,增强了地表的入渗能力。在降雨强度 90 mm/h 和坡度为 5° 的试验条件下,翻耕裸露小区在 5 min 后开始产流,低覆盖小区的产流时间为 21.33 min,相对翻耕裸露处理滞后 16.33 min,而高覆盖小区在降雨过程中无产流。因此在相同降雨强度和坡度条件下,秸秆覆盖量越大,延缓产流时间越长。

2.1.2 秸秆覆盖对入渗、产流过程的影响 由图 1—2 可以看出,在降雨强度、土壤初始含水量和地面坡度相同条件下,翻耕裸露试验小区的入渗率随降雨历时的增加呈明显的下降趋势,60 min 降雨历时,入渗率尚未到达稳定入渗速率,其值为 1.31 mm/min。低秸秆覆盖率试验小区的入渗率随降雨历时的增加呈缓慢下降趋势,降雨历时 35 min 后,坡面入渗率变化呈现稳定趋势。高秸秆覆盖试验小区的降雨全部入渗或被秸秆吸收;说明秸秆覆盖与森下枯落物层相似,具有较强的保水功能。

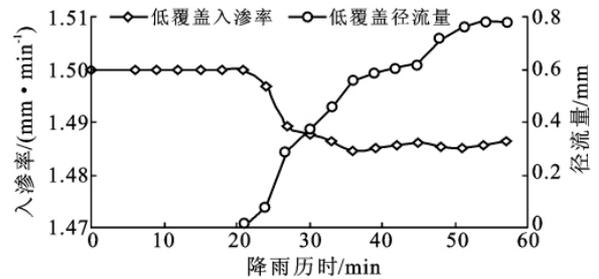


图 2 低覆盖条件下坡面入渗和产流过程

表 2 不同覆盖率下坡面径流量和侵蚀量

处理	总径流量/ mm	减少比 例/%	总侵蚀量/ (g·m ⁻²)	减少比 例/%
翻耕裸露	51.49(0.13)	0	676.16(0.03)	0
低覆盖	6.67(0.77)	87	0.91(0.68)	99.86
高覆盖	0	100	0	100

注:括号内数值为标准方差(SD)。下同。

从图 3 可以看出,翻耕裸露小区的坡面侵蚀产沙过程大概可分为 3 个阶段:第一阶段从产流开始到降雨 15 min,此阶段,坡面侵蚀产沙呈现缓慢增加趋势,侵蚀量由零逐渐增加到 1.4 g/m²,这主要因为在产流初期,坡面径流流速小,径流对土壤分离能力和搬运能力较弱;此时地表径流含沙浓度很小,径流搬运的泥沙主要来自雨滴击溅分散的土壤颗粒。第二阶段发生在降雨历时从 16 min 到 25 min 之间,此时坡面侵蚀产沙量呈快速增加的趋势,侵蚀量由 1.4 g/m² 迅速增长到 7.6 g/m²;这主要是因为随着降雨历时的延长,坡面径流速率增大,使地表径流对土壤的分离能力和搬运能力增强;含沙浓度增大所致。第

三阶段发生在降雨历时 26 min 至降雨结束。此时坡面侵蚀产沙呈相对稳定变化,变化范围为 7.4~8.3 g/m²。该阶段的侵蚀量主要是径流侵蚀,由于此段时间内径流量变化稳定,而且含沙浓度呈稳定趋势,因此坡面侵蚀产沙变化稳定。

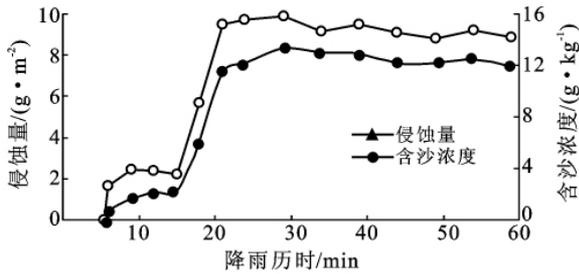


图 3 翻耕裸露条件下的侵蚀量、含沙浓度动态

2.2 径流中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度和流失量

坡面径流和侵蚀泥沙携带的养分流失是坡地养分流失的两个主要途径。从表 3 可知,低秸秆覆盖条件下径流中的 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度分别是翻耕裸露处理的 5.52 倍和 4.25 倍,但 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的流失量与翻耕裸露处理基本相同。说明

图 4 表明,低秸秆覆盖率试验小区产流后地表径流含沙浓度很低,其值变化于 0~1.85 g/kg;而且坡面侵蚀产沙量较小,其值变化于 0~0.84 g/m²。坡面侵蚀量逐渐增加的原因是随着径流量的缓慢增大,径流的搬运能力和对土壤的分离能力增强所致。

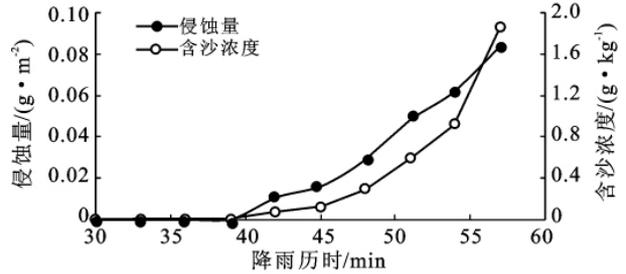


图 4 低秸秆覆盖条件下的侵蚀量、含沙浓度动态

在此试验条件下,秸秆覆盖虽然增大了径流中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度,但不增加径流中养分流失的总量。这主要是因为秸秆覆盖延缓了产流时间,增加了表层土壤矿质氮素与地表径流的作用强度,使溶解和解吸于单位径流中的矿质氮素含量增加^[8],因此秸秆覆盖中径流养分浓度增大。

表 3 地表径流中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度和流失量

处理	NO ₃ ⁻ -N				PO ₄ ³⁻ -P			
	浓度/ (mg·L ⁻¹)	倍数	流失量/ (mg·m ⁻²)	减少比例/ %	浓度/ (mg·L ⁻¹)	倍数	流失量/ (mg·m ⁻²)	减少比例/ %
翻耕裸露	0.67(0.11)	—	25.15(0.24)	—	0.12(0.10)	—	4.03(0.28)	—
低覆盖	3.70(0.21)	5.52	23.98(0.91)	5	0.51(0.36)	4.25	3.9(0.48)	4

注:雨水中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度分别是 0.31 和 0.02 mg/L。

2.3 泥沙中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的含量及流失量

从表 4 可见,低秸秆覆盖条件下泥沙中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的含量分别是翻耕裸露处理的 4.38 倍和 2.93 倍,这主要是因为秸秆覆盖对坡面径流具有阻碍作用,并且有效地增加了水分和养分的入渗,因此增大了氮磷在表层土壤的含量,而土壤表层细颗粒易被径流溶液输移,所以泥沙中养分含量大于翻耕裸露处理的养分含量。即使低覆盖小区泥沙中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的含量较高,但是由于侵蚀量非常小,

所以侵蚀泥沙中氮和磷养分流失量分别较翻耕裸露处理减少 99.3% 和 99.6%,表明秸秆覆盖可以有效的减少泥沙中养分的流失。

Babalola 等^[12] 同样研究发现,覆盖条件下侵蚀泥沙中氮和磷的含量是对照处理的 1.2~1.5 倍,但因为与对照处理相比减少侵蚀泥沙量 52.6%,所以养分在泥沙中的流失显著减少。因此,秸秆覆盖虽然增大了侵蚀泥沙中氮和磷含量,但同翻耕裸露处理相比,减少了养分随泥沙的流失量。

表 4 侵蚀泥沙中 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度和流失量

处理	NO ₃ ⁻ -N				PO ₄ ³⁻ -P			
	浓度/ (mg·kg ⁻¹)	倍数	流失量/ (mg·m ⁻²)	减少比例/%	浓度/ (mg·kg ⁻¹)	倍数	流失量/ (mg·m ⁻²)	减少比例/%
翻耕裸露	9.63(0.20)	—	5.47(0.08)	—	7.17(0.03)	—	4.79(0.07)	—
低覆盖	42.18(0.15)	4.38	0.03(0.02)	99.3	21.02(0.26)	2.93	0.01(0.01)	99.6

3 结论

(1) 适量的秸秆覆盖可有效地减少坡面土壤侵蚀的发生。当秸秆覆盖量为 2 kg/m^2 时, 坡面产流时间较翻耕裸露处理滞后 16.33 min , 其坡面径流量和侵蚀量分别减少了 87% 的和 99.86% ; 当秸秆覆盖量为 4 kg/m^2 时, 坡面无产流发生。

(2) 低秸秆覆盖增大了坡面径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度, 但 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 流失总量与翻耕裸露处理基本相同。低秸秆覆盖条件下, 径流中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度分别是翻耕裸露处理的 5.52 和 4.25 倍。

(3) 同径流中养分流失类似, 低秸秆覆盖增加了泥沙中养分的含量, 但减少了养分随泥沙的流失量, 泥沙中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 流失量较翻耕裸露处理分别减少了 99.3% 和 99.6% 。

(4) 在东北黑土区选取适宜的秸秆覆盖量对于减少土壤侵蚀和保护耕地质量具有重要意义。

致谢: 感谢黑龙江省水土保持科学研究所王玉玺、解运杰、樊华等老师在试验过程中给予的支持和帮助!

[参 考 文 献]

- [1] 于磊, 张柏. 中国黑土退化现状与防治对策[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 99-103.
- [2] 王玉玺, 解运杰, 王萍. 东北黑土区水土流失成因分析[J]. 水土保持科技情报, 2002(3): 27-29.
- [3] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff[J]. Environ Qual., 2004, 33(6): 2174-2182.
- [4] 张玉斌, 郑粉莉, 武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 123-132.
- [5] Corwin D L, Loague K, Ellsworth T R. GIS-based modeling of nonpoint source pollutants in the vadose zone[J]. Soil and Water Cons., 1998, 53(1): 34-38.
- [6] Zheng F L, Merriall S D, Huang C H. Runoff, Soil erosion and erodibility of conservation reserve program land under crop and hay production[J]. Soil Science Society of America, 2004, 68: 1332-1341.
- [7] Hadrian F, Gerardo B, Howard C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 91: 227-235.
- [8] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 85-88.
- [9] Rajan B, Khera K L. Effect of tillage and mode of straw mulch application on soil erosion in the submontaneous tract of Punjab, India[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 88: 107-115.
- [10] Antonio Jordán, Lorena Z M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. Catena, 2010, 81: 77-85.
- [11] Edwards L, Burney J R, Richter G. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 81: 217-222.
- [12] Babalola O, Shunsanya S O, Are K. Effects of vetiver grass (*Vetiveria nigritana*) strips, vetiver grass mulch and an organomineral fertilizer on soil, water and nutrient losses and maize (*Zea mays* L) yields[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 96: 6-18.
- [13] Hoang Fagerstrm M H, Nilsson S I, Noordwijk M. Does *Tephrosia candida* as fallow species, hedgerow or mulch improve nutrient cycling and prevent nutrient losses by erosion on slopes in northern Viet Nam[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 90: 291-304.
- [14] Bayala J, Mando A, Teklehaimanot Z. Nutrient release from decomposing leaf mulches of karite (*Vitellaria paradoxa*) and nere (*Parkia biglobosa*) under semi-arid conditions in Burkina Faso, West Africa[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 533-539.
- [15] 王静, 郭熙盛, 王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 492-495.
- [16] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 16-19.
- [17] 张兴昌, 邵明安. 黄土丘陵区小流域土壤氮素流失规律[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 617-624.
- [18] 鄯瑞卿, 孙彦君, 王继红. 自然降雨对黑土地表氮素养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 69-72.