

自然降雨下玉米秸秆堆沤还田对滇中小流域 坡耕地氮素流失的影响

代立¹, 李太兴², 王克勤¹, 宋娅丽¹, 裴益乐¹, 李凯³, 张倩¹

(1.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224; 2.云南省玉溪市水土保持工作站,
云南 玉溪 653100; 3.云南省玉溪市红塔区水土保持工作站,云南 玉溪 653100)

摘要:为探究自然降雨下不同堆沤方式秸秆还田对小流域坡耕地径流泥沙及氮素流失的影响,以滇中二龙潭流域坡耕地为研究对象,设置 9 种不同玉米秸秆堆沤方式,分别为 CK 及 8 种处理,各处理包括 2 种秸秆还田量(0.75, 1.5 kg/m²)、2 种秸秆粒度(1, 5 cm)、2 种秸秆堆沤方式(水或水与尿素堆沤),研究烤烟坡耕地产流产沙及氮素流失特征。结果表明:(1)在 4 场具有典型产流的降雨中,施用较高秸秆还田量(1.5 kg/m²)和粗颗粒秸秆(5 cm),均可有效减少坡耕地产流产沙量(10.06%~38.60%和 10.07%~38.60%);(2)施用较低秸秆还田量(0.75 kg/m²)、粗颗粒秸秆(5 cm)及未添加尿素堆沤的秸秆径流 TN、NO₃⁻-N 浓度低于施用高秸秆还田量(1.5 kg/m²)、细颗粒秸秆(1 cm)及添加尿素堆沤的处理(1.96%~32.79%和 3.97%~40.89%);(3)各处理下 NO₃⁻-N/TN、NH₄⁺-N/TN、PN/TN 分别为 63.64%~86.18%、5.31%~13.86%和 5.33%~25.80%,表明坡耕地地表径流氮素主要流失形式为 NO₃⁻-N,溶解态氮是径流中的主要氮素污染物;(4)施用较低秸秆还田量(0.75 kg/m²)、粗颗粒(5 cm)秸秆、未加尿素堆沤的秸秆,泥沙 TN 流失浓度降低(16.87%~48.15%);(5)施用较高秸秆还田量、粗颗粒秸秆及未添加尿素堆沤可有效降低滇中坡耕地氮素的流失风险(0.32%~35.05%和 54.52%~77.23%)。TN 径流和泥沙流失中,以径流输出为主,占 TN 流失量的 50.09%~71.67%。为了减少该流域氮素流失量,可选择施用较高秸秆还田量(1.5 kg/m²)和粗颗粒(5 cm)秸秆,并依据烤烟不同生长期的吸收情况和土壤养分情况等选择少量或不添加尿素堆沤进行秸秆还田。

关键词: 秸秆还田; 堆沤方式; 氮素流失; 滇中二龙潭流域

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2021)01-0001-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2021.01.001

Effect of Compost of Corn Straws Returning Under Natural Rainfall on Nitrogen Runoff Losses in a Slope Farmland of Small Watershed in Central Yunnan Province

DAI Li¹, LI Taixing², WANG Keqin¹, SONG Yali¹, PEI Yile¹, LI Kai³, ZHANG Qian¹

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224;

2. Soil and Water Conservation Workstation, Yuxi, Yunnan 653100;

3. Soil and Water Conservation Workstation, Hongta District, Yuxi, Yunnan 653100)

Abstract: To explore different compost methods of straw returning on runoff, sediment and nitrogen losses in small watershed, a slope farmland in Erlongtan watershed in central Yunnan Province was chose as research object. Nine different compost methods of corn straw returning were set up: CK and 8 treatments. Each treatment included two straw return amounts to the field (0.75, 1.5 kg/m²), two straw particle sizes (1, 5 cm), two straw heap retting methods with urea reactor (water or water and urea stacking). In this study, the characteristics of runoff, sediment and nitrogen losses in a flue-cured tobacco slope farmland were studied. The results showed that: (1) In the 4 rainfalls with typical runoff, the application of higher straw return amount (1.5 kg/m²) and coarse grain straw (5 cm) could effectively reduce runoff and sediment losses in the slope farmland (10.06% ~ 38.60% and 10.07% ~ 38.60%). (2) The concentrations of total nitrogen

收稿日期:2020-06-22

资助项目:云南省科技计划重点研发项目(2018BB018);云南省大学生创新训练项目(20191067706);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111);国家林草局林业科技创新平台运行项目(2019132161)

第一作者:代立(1997—),男,贵州印江人,硕士,主要从事生态恢复研究。E-mail:nisa_myiuuuu180x@163.com

通信作者:宋娅丽(1985—),女,山西长治人,博士,主要从事生态系统功能研究。E-mail:songyali19851205@sina.com

(TN) and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in runoff under the application of lower straw return amount (0.75 kg/m^2), coarse grain straw (5 cm), and compost with no urea were lower than those with higher straw amount, fine grain straw, and compost with urea ($1.96\% \sim 32.79\%$ and $3.97\% \sim 40.89\%$). (3) The proportions of $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ and PN/TN were $63.64\% \sim 86.18\%$, $5.31\% \sim 13.86\%$ and $5.33\% \sim 25.80\%$, respectively, and the main form of nitrogen loss in runoff on slope farmland was $\text{NO}_3^- - \text{N}$, dissolved nitrogen was the main nitrogen pollutant in runoff. (4) TN losses concentration of sediment with the application of lower straw return amount (0.75 kg/m^2), coarse grain straw (5 cm), and compost with no urea decreased ($16.87\% \sim 48.15\%$). (5) TN losses of runoff and sediment with the application of higher straw return amount, coarse grain straw and compost with no urea could effectively reduce the risk of nitrogen loss in the slope farmland in central Yunnan province ($0.32\% \sim 35.05\%$ and $54.52\% \sim 77.23\%$). Among TN runoff and sediment loss, runoff output was the main factor, accounting for $50.09\% \sim 71.67\%$ of TN runoff. In order to reduce the nitrogen losses in this watershed, higher straw returning amount (1.5 kg/m^2) and coarse grain straw (5 cm) was recommended. Small or compost with no urea also could be applied according to different growth periods of flue-cured tobacco absorption and soil nutrient conditions.

Keywords: straw returning; compost methods; nitrogen losses; Erlongtan watershed in central Yunnan Province

坡耕地是我国重要的农业土地资源,也是水土流失最严重的耕地^[1]。云南省地处我国西南边陲,山地和高原面积约占全省总面积的 94% ^[2],其中坡耕地 ($69.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$) 占全省耕地的比例较高 (19.83%),且坡耕地水土流失程度以强烈为主^[3-5]。该区雨季期间雨量充沛,导致土壤耕层越冲越薄,坡耕地水土流失面积比例达 47.53% ^[2];同时,降雨使坡耕地土壤养分流失严重,造成土壤肥力下降,氮磷随径流泥沙进入水体,导致水体富营养化^[6-9],进而引起一系列生态问题。因此,深入研究滇中小流域坡耕地产流产沙与氮素流失特征对当地农业生产及环境保护具有重要的现实意义。

秸秆中含有大量的氮、磷、钾元素,是一种重要的有机肥料资源,对坡耕地具有良好的生态效应^[10-12]。秸秆还田能改善土壤理化性状,并对作物产量造成影响,避免了资源的过度浪费和焚烧秸秆带来的环境问题^[13-16]。韩瑞芸等^[17]研究发现,秸秆还田能有效减少氮素流失,改善农田生产环境;许立广^[18]研究认为,通过秸秆还田处理,可以增加土壤孔隙度,减少土壤容重,增强土壤保水保墒性能;张久明等^[19]研究认为,将秸秆还田处理,土壤紧实度下降了 $32\% \sim 46\%$;王开峰^[20]研究表明,施用秸秆等有机物料使稻田土壤有机质增加 $50\% \sim 120\%$;王庆杰等^[21]提出保持 $30\% \sim 60\%$ 的玉米秸秆覆盖能有效减少产流产沙量。以上研究主要集中于秸秆粉碎还田对土壤理化性质及产流产沙的影响、秸秆覆盖—不同耕作结合对作物产量的影响等方面,而对不同堆沤方式下秸秆还田对流域坡耕地径流各形态氮素流失的影响研究较少。

因此,本研究以滇中二龙潭流域坡耕地为研究对

象,为明确自然条件下土壤表面径流泥沙和氮素养分流失特征,利用长期野外定量观测,研究在自然降雨条件下秸秆还田量 ($0.75, 1.5 \text{ kg/m}^2$)、不同秸秆粒度 ($1, 5 \text{ cm}$)、不同秸秆堆沤方式 (水或水与尿素堆沤) 对土壤表面径流泥沙和氮素流失的影响,旨在寻求不同堆沤方式和秸秆密度结合下较为有效的减排农艺措施,进而为改善该流域坡耕地土壤侵蚀状况提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验地位于滇中二龙潭流域,地处玉溪市东南方向高仓街道龙树居委会旁,位于东经 $102^\circ 34' 5.7''$,北纬 $24^\circ 17' 15.3''$,平均海拔 $1\ 625 \text{ m}$ 。属中亚热带半湿润冷冬高原季风气候,雨季为 5 月下旬至 10 月下旬,年均降水量为 909 mm ,年均径流输沙量为 $0.48 \times 10^4 \text{ m}^3$,年均输沙量为 $0.005 \times 10^4 \text{ t}$ 。土壤属山地红壤,有少量紫色土。流域内山高坡陡,岩石风化严重,地形破碎,沟谷深切,土层较薄,原始坡度大,且雨季多发暴雨,加之当地不合理利用土地的影响,导致水土流失严重。流域内植被覆盖率为 63.71% ,树种以云南松 (*Pinus yunnanensis*) 分布最广。当地主要农作物为烤烟和玉米,烤烟每年 4 月下旬至 5 月中旬移栽。

1.2 试验设计

本试验地选取为 15° 的坡耕地,试验材料为烤烟,由玉溪市烟草公司统一调入,于 2019 年 5 月 7 日进行移栽,种植密度为 $16\ 500 \text{ 株/hm}^2$ 。在试验地布设 27 个坡度、坡向等自然条件基本一致的样方 ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$),每个处理 3 次重复。样方四侧用塑料薄膜包裹,以减少串流、侧渗。每个样方外设置 1 个径流收集装置。在试验区中心设有雨量观测站,安装自动雨

量计用以记录试验期间的降雨量与降雨强度。

本试验各处理包括 CK 和 2 种秸秆还田量(0.75, 1.5 kg/m²)、2 种秸秆粒度(1, 5 cm)、2 种秸秆堆沤方式(水或水与尿素堆沤)8 种处理。2019 年 1—5 月每月翻堆 1 次秸秆,在种植烤烟时进行还田。2019 年 5 月 7 日种植烤烟并施基肥(复合肥+猪粪),氮肥施用量 105~135 kg/hm², N : P₂O₅ : K₂O 比例

为 1 : 0.5 : 2.5~3;于 5 月 14 日施提苗肥(磷酸铵+复合肥),氮肥施用量 45 kg/hm²;于 5 月 25 日秸秆还田并施追肥(硫酸钾肥+过磷酸钙+复合肥),氮肥施用量 772.5 kg/hm²。所有肥料在移栽后 25 天内全部施完。本试验采用当地耕种方式,田间管理措施与当地烤烟高产田一致。设置化肥施用量与当地施肥习惯同步。各样方施肥量见表 1。

表 1 各样方处理方式

处理	施肥量/(g·m ⁻²)				秸秆还田量/ (g·m ⁻²)		秆粉碎 程度/cm	秸秆堆沤添加尿素量/ (g·m ⁻²)	
	基肥	提苗肥	追肥	折合氮	还田量	折合氮		施用量	折合氮
1(CK)	70	13	214	37.71	0	0	0	0	0
2	70	13	214	37.71	750	12.75	5	0	0
3	70	13	214	37.71	750	12.75	5	3.75	1.75
4	70	13	214	37.71	750	12.75	1	0	0
5	70	13	214	37.71	750	12.75	1	3.75	1.75
6	70	13	214	37.71	1500	25.50	5	0	0
7	70	13	214	37.71	1500	25.50	5	3.75	1.75
8	70	13	214	37.71	1500	25.50	1	0	0
9	70	13	214	37.71	1500	25.50	1	3.75	1.75

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品的采集 在烤烟移栽前期使用“对角线法”采集各样方表层(0—20 cm)土壤用于调查土壤养分背景值。取样方上坡、中坡、下坡位置 0~5, 5~10, 10~20 cm 土层的土样,土壤背景值为:土壤含水率 20.66%,全氮含量 304 mg/kg,铵态氮含量 11.84 mg/kg。2019 年 6—9 月,在降雨过程结束后,采集具有典型产流的径流样。取样前将样品进行搅拌,在不同的深度测定其泥沙含量。将样品放于 4℃冰箱下保存,并在 24 h 内过滤,测定径流水样中的总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)含量。径流水样采集后,将径流静置、收集泥沙,在避光条件下自然风干,测定泥沙全氮(TN)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量。

1.3.2 样品的测定 降雨量采用自计雨量计进行观测,径流量用体积法测定,泥沙含量利用 711 型便携式悬浮物/界面分析仪测定。径流水样的 TN 采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定,NO₃⁻-N 采用酚二磺酸分光光度法测定,NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法测定;泥沙 TN 采用自动定氮仪法,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法^[22-23]测定。以上测定各个指标均做 3 组平行试验,取平均值。

本试验各小区产沙量采用烘干法测定,径流量通过称量径流收集装置中的水样质量,换算得到每个小区的平均径流量。各场降雨中径流和泥沙中氮素流失量计算公式为:

径流中氮素流失量(mg/m²)=次降雨产流量(kg/m²)×径流平均氮素流失浓度(m/L)

泥沙中氮素流失量(mg/m²)=次降雨产沙量(g/m²)×泥沙平均氮素浓度(g/kg)

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件分别进行数据处理和图表绘制与最小显著性差异(LSD)法的差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同堆沤方式下秸秆还田对坡耕地产流与产沙特征的影响

在 2019 年 6—9 月记录的降雨事件中选取了 4 场具有典型产流的降雨(7 月 28 日、8 月 7 日、8 月 15 日和 9 月 8 日),降雨量分别为 6.2, 22.0, 12.4, 17.2 mm,最大雨强分别为 2.6, 23.6, 3.1, 21.0 mm/h。不同的降雨过程引发的产流量存在显著性差异(表 2),其中 7 月 28 日与 8 月 7 日的径流量分别为最小值和最大值,分析表明降雨量与径流量之间相关性显著($P < 0.05$)。从图 1 中可以看出,相同降雨条件下,施用 0.75 kg/m² 秸秆样方(处理 2, 3, 4, 5)与施用 1.5 kg/m² 秸秆样方(处理 6, 7, 8, 9)产流量较 CK 分别减少了 10.06%~22.20% 和 18.59%~38.60%;施用 5 cm 粗颗粒秸秆样方(处理 2, 3, 6, 7)与施用 1 cm 细秸秆样方(处理 4, 5, 8, 9)产流量较 CK 减少了 21.16%~38.60% 和 10.07%~24.29%,说明施用较高秸秆还田量与粗颗粒秸秆时可有效地减少坡耕地产流量。降雨径流和侵蚀产沙是养分流失的前提条件^[24]。当 8 月 7 日降雨强度达 23.6 mm/h 时,各处理土壤侵蚀量均值为 5.51 g/m²,为 7 月 28 日的 2.00

倍,表明随着降雨强度的增大,坡面产沙随之增加,可见降雨强度与坡耕地产沙量之间相关性显著。在相同降雨条件下,施用 0.75 kg/m² 秸秆样方(处理 2,3,4,5)与施用 1.5 kg/m² 秸秆样方(处理 6,7,8,9)产沙量较 CK 分别减少了 22.16%~29.60%和 13.45%~20.90%;施用 5 cm 粗颗粒秸秆样方(处理 2,3,6,7)与施用 1 cm 细秸秆样方(处理 4,5,8,9)较 CK 产沙

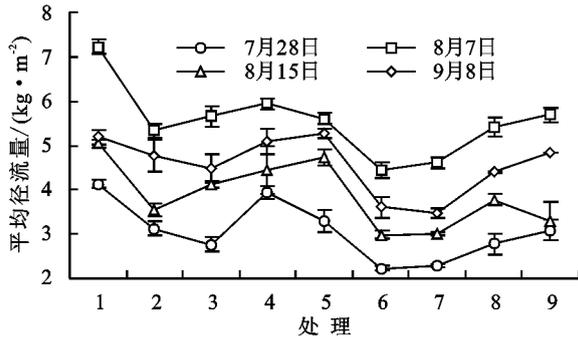


图 1 试验地各小区 4 场降雨特征下产流产沙特征

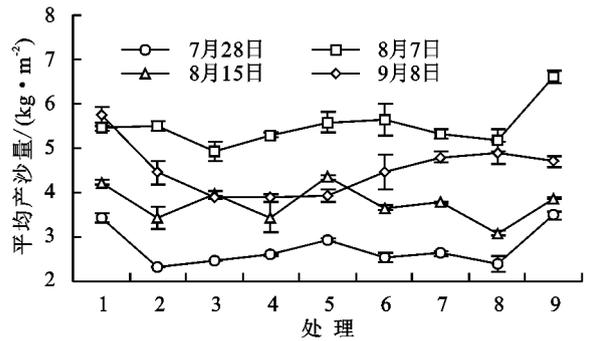
2.2 不同堆沤方式下秸秆还田对坡耕地地表径流中氮素质量浓度的影响

从表 3 可以看出,4 场降雨中,各取样时期的氮素浓度变化较大,在 8 月 7 日径流 TN 流失浓度达到峰值,而后随着时间的推移呈现逐渐下降趋势;9 月 8 日较 8 月 7 日,TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 流失浓度分别降低了 28.82%,54.63%,24.17%。相同降雨条件下,各处理径流 TN 流失浓度呈现出:施用 0.75 kg/m² 样方(处理 2,3,4,5)较 1.5 kg/m² 秸秆(处理 6,7,8,9)减少了 1.96%~22.54%;施用 5 cm 粗颗粒秸秆样方(处理 2,3,6,7)较 1 cm 细颗粒秸秆(处理 4,5,8,9)减少了 12.40%~32.88%;未添加尿素堆沤样方(处理 2,4,6,8)较添加尿素堆沤(处理 3,5,7,9)减少了 24.8%~32.79%。说明径

量减少了 23.46%~29.20%,13.45%~29.90%,同样说明施用较高秸秆还田量与粗颗粒秸秆时可有效地减少坡耕地产沙量。

表 2 试验地各小区 4 场降雨特征

降雨特征	7月28日	8月7日	8月15日	9月8日
降雨量/mm	6.2	22.0	12.4	17.2
降雨强度/(mm·h ⁻¹)	2.6	23.6	3.1	21.0



流 TN 流失浓度随秸秆的还田量降低、粉碎颗粒度从细颗粒变为粗颗粒及未添加尿素堆沤,整体规律性下降,差异性显著($P < 0.05$)。NO₃⁻-N 浓度变化表现出:施用 0.75 kg/m² 样方(处理 2,3,4,5)较 1.5 kg/m² 秸秆(处理 6,7,8,9)减少了 3.97%~12.15%;施用 5 cm 粗颗粒秸秆样方(处理 2,3,6,7)较 1 cm 细颗粒秸秆(处理 4,5,8,9)减少了 20.77%~50.00%;未添加尿素堆沤样方(处理 2,4,6,8)较添加尿素堆沤(处理 3,5,7,9)减少了 25.82%~40.89%。说明各处理径流 NO₃⁻-N 流失浓度随秸秆的还田量降低、粉碎颗粒度从细颗粒变为粗颗粒与未添加尿素堆沤,与 TN 流失浓度变化基本一致;NH₄⁺-N 浓度整体波动变化,各处理差异不明显。

表 3 不同处理对径流中各形态氮素流失浓度变化的影响

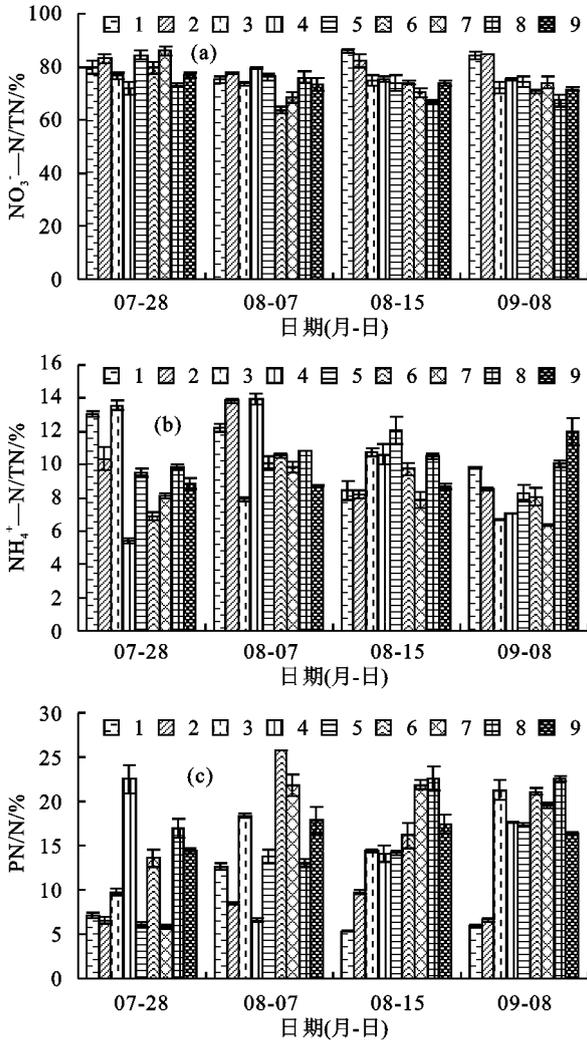
单位:mg/L

测定指标	日期(月-日)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TN	07-28	0.049±0.01c	0.064±0.01c	0.111±0.01c	0.122±0.04c	0.183±0.01b	0.063±0.02c	0.081±0.01c	0.149±0.01c	0.216±0.02a
	08-07	0.050±0.01b	0.087±0.03b	0.195±0.03b	0.175±0.03b	0.216±0.01a	0.111±0.04b	0.195±0.06b	0.228±0.06b	0.287±0.01a
	08-15	0.045±0.01b	0.064±0.06b	0.134±0.07b	0.165±0.05b	0.235±0.04a	0.095±0.05b	0.137±0.03b	0.182±0.05b	0.235±0.04a
	09-08	0.044±0.02c	0.062±0.01b	0.125±0.02b	0.115±0.03b	0.201±0.04a	0.102±0.02b	0.101±0.10b	0.181±0.01b	0.208±0.07a
NO ₃ ⁻ -N	07-28	0.036±0.003c	0.060±0.005c	0.074±0.003c	0.088±0.005c	0.154±0.007b	0.050±0.003c	0.078±0.005c	0.094±0.003c	0.188±0.005a
	08-07	0.035±0.01b	0.052±0.007b	0.090±0.008b	0.109±0.003b	0.143±0.003a	0.046±0.003b	0.067±0.005b	0.100±0.007b	0.175±0.003a
	08-15	0.039±0.01b	0.053±0.005b	0.100±0.01b	0.108±0.003b	0.126±0.01a	0.065±0.005b	0.069±0.005b	0.104±0.005b	0.165±0.007a
	09-08	0.037±0.009c	0.061±0.005b	0.090±0.007b	0.086±0.01b	0.110±0.007b	0.069±0.01b	0.108±0.005b	0.100±0.01b	0.118±0.002a
NH ₄ ⁺ -N	07-28	0.009±0.003c	0.013±0.005c	0.015±0.003b	0.019±0.005b	0.028±0.007a	0.015±0.003b	0.019±0.005b	0.021±0.003b	0.032±0.005a
	08-07	0.015±0.01b	0.021±0.007b	0.030±0.008b	0.032±0.003a	0.038±0.003b	0.023±0.003b	0.026±0.005b	0.026±0.007b	0.040±0.003a
	08-15	0.015±0.01c	0.025±0.005b	0.026±0.01a	0.034±0.003a	0.028±0.01c	0.019±0.005b	0.025±0.005b	0.025±0.005b	0.032±0.007a
	09-08	0.013±0.009c	0.013±0.005c	0.028±0.007b	0.026±0.01c	0.021±0.007c	0.023±0.01c	0.023±0.005c	0.026±0.001a	0.027±0.002c

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示同一时间不同处理下各氮素浓度之间差异性显著($P < 0.05$);表中 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 分别表示径流中总氮浓度、硝态氮浓度和铵态氮浓度。下同。

地表径流中氮素的主要存在形式包括溶解态氮和颗粒态氮,由于亚硝态氮在溶解态氮中所占比例很

小,故用 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之和计算溶解态氮, TN 减溶解态氮得到颗粒态氮(PN)^[9,24]。从图 2a 可以看出,不同堆沤方式下秸秆还田处理, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占 TN 浓度的 63.64%~86.18%,对径流中氮素浓度有直接影响。4 次降雨中, $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 均值在 7 月 28 日最高,其次是降雨量最大的 8 月 7 日。相同降雨条件下, $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 随施用较低秸秆还田量(0.75 kg/m²)变为较高秸秆还田量(1.5 kg/m²)以及施用粗颗粒秸秆(5 cm)变为细颗粒秸秆(1 cm),总体呈缓慢降低的趋势。



注:图中 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 和 PN/TN 分别表示径流中硝态氮与总氮比值、铵态氮与总氮比值以及颗粒态氮与总氮比值。

图 2 不同处理对径流 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 及 PN/TN 的影响

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 仅占 TN 浓度的 5.31%~13.86%,各处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{TN}$ 为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 的 6.87~9.28 倍(图 2b)。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为氮素转化与流失潜力相对水平的重要指标。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 随施用较低秸秆还田量(0.75 kg/m²)变为较高秸秆还田量(1.5 kg/m²)以及施用粗颗粒秸秆(5 cm)变为细颗粒秸秆(1 cm),呈缓慢降低的趋势,但下降幅度并不高。9 月 8 日较 7 月 28 日仅下降了 8.63%~16.17%,说明在施肥后期仍有其他形态的氮转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,此时流失风险仍较高。 PN/TN 随着时间推移呈上升的趋势,说明本试验区施肥后期颗粒态氮素将增加氮素流失风险。

PN/TN 变化幅度为 5.33%~25.80%(图 2c),为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 的 1.08~1.89 倍,且总体随着时间的推移逐渐增加,到 9 月 8 日时均值为 7 月 28 日的 1.48 倍。不同堆沤方式下秸秆还田,径流中氮素主要为溶解态,说明坡耕地土壤中仅有少量颗粒态氮随地表径流输出,溶解态氮是径流水体中氮素污染的主要污染物。

2.3 不同堆沤方式下秸秆还田对坡耕地泥沙中氮素含量的影响

由表 4 可知,不同堆沤方式下秸秆还田对坡耕地泥沙 TN 流失浓度影响较大。在 4 场降雨中,每场降雨径流的产生均伴随着土壤侵蚀。不同时间各处理泥沙中 TN 流失浓度均值表现为施用 0.75 kg/m² 秸秆样方(处理 2,3,4,5)较 1.5 kg/m² (处理 6,7,8,9) 减少了 33.59%~48.15%;施用 5 cm 粗颗粒秸秆样方(处理 2,3,6,7)较 1 cm 细颗粒秸秆(处理 4,5,8,9)减少了 16.87%~39.93%;未添加尿素堆沤样方(处理 2,4,6,8)较添加尿素堆沤(处理 3,5,7,9)减少了 20.12%~30.57%。说明泥沙 TN 流失浓度随着秸秆还田量的降低与秸秆细颗粒变为粗颗粒以及未添加尿素堆沤,总体规律性下降,差异性显著($P < 0.05$)。这与径流 TN 流失浓度变化基本一致。在 8 月 7 日降雨强度达到 23.6 mm/h 时,各处理泥沙 TN 浓度达到最高值(0.174~0.889 g/kg),泥沙 TN 流失浓度与降雨强度相关性较高。8 月 15 日与 9 月 8 日泥沙 TN 流失浓度分别为 8 月 7 日的 29.03%和 4.95%。说明随着时间推移,不同堆沤方式下秸秆还田各处理泥沙 TN 流失浓度逐渐降低。

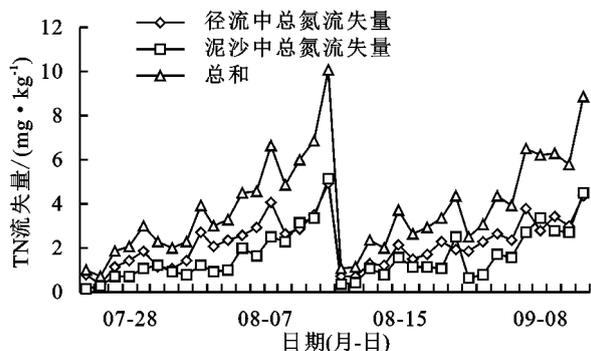
表 4 不同处理对泥沙中总氮流失浓度变化的影响

单位:g/kg

日期(月-日)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
07-28	0.067±0.01b	0.132±0.01b	0.277±0.01b	0.269±0.09c	0.441±0.05c	0.407±0.08b	0.346±0.02a	0.340±0.01b	0.786±0.05b
08-07	0.174±0.01b	0.185±0.05a	0.397±0.02b	0.332±0.08a	0.502±0.04b	0.406±0.02a	0.386±0.11b	0.566±0.04b	0.889±0.03b
08-15	0.102±0.01a	0.116±0.07b	0.274±0.02b	0.234±0.09c	0.360±0.01b	0.319±0.03b	0.309±0.01b	0.370±0.05a	0.639±0.01a
09-08	0.124±0.05b	0.142±0.04b	0.335±0.04b	0.302±0.06b	0.413±0.07b	0.595±0.01d	0.527±0.02c	0.525±0.05c	0.684±0.04c

2.4 不同堆沤方式下秸秆还田对坡耕地氮素流失量的影响

图 3 为不同堆沤方式下秸秆还田各处理径流和泥沙 TN 流失量特征。选取的 4 场降雨中,7 月 28 日、8 月 7 日、8 月 15 日和 9 月 8 日各处理下径流 TN 流失量分别为 1.25~2.37, 2.08~4.59, 1.47~3.34, 1.76~3.82 mg/m²; 泥沙 TN 流失量分别为 0.23~2.74, 0.95~5.88, 0.43~2.48, 0.71~3.22 mg/m²。各处理的径流和泥沙 TN 流失量均为 8 月 7 日最大, 7 月 28 日最小。TN 流失量随降雨量的增大而增加, 变化规律显著 ($P < 0.05$)。8 月 15 日与 9 月 8 日较 8 月 7 日分别降低了 51.47% 和 5.77%, 整体随着时间推移呈现出逐渐下降的趋势, 不同堆沤方式下秸秆还田降低了坡耕地氮素的流失风险。在相同降雨条件下, 各处理径流和泥沙 TN 流失量表现为施用 1.5 kg/m² 秸秆样方 (处理 6, 7, 8, 9) 较 0.75 kg/m² (处理 2, 3, 4, 5) 分别降低了 10.57%~23.78% 和 33.01%~49.93%; 施用 5 cm 粗颗粒秸秆样方 (处理 2, 3, 6, 7) 较 1 cm 细颗粒秸秆 (处理 4, 5, 8, 9) 分别降低了 31.00%~49.19% 和 19.53%~49.20%; 未添加尿素堆沤样方 (处理 2, 4, 6, 8) 较添加尿素堆沤 (处理 3, 5, 7, 9) 分别降低了 18.56%~35.68% 和 24.11%~44.66%。说明径流和泥沙 TN 流失量随秸秆还田量增加与细颗粒变为粗颗粒以及未添加尿素堆沤, 呈规律性降低, 各处理差异性极显著 ($P < 0.01$)。2 号样方的径流和泥沙 TN 流失量均较小, 较其他处理分别降低了 24.11%~58.34% 和 47.56%~81.49%。在 4 场降雨中, 坡耕地 TN 流失以径流输出为主, 占样方 TN 流失量的 50.09%~71.67%, 说明降雨产生径流引起的氮素流失是造成农业面源污染的重要途径。



注: 图下方每个日期上面的 9 个横坐标刻度, 从左至右分别代表处理 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9。

图 3 不同处理对坡耕地氮素流失量的影响

3 讨论

3.1 坡耕地氮素流失形态的变化特征

影响坡耕地径流总氮流失浓度的因素包括施肥量、降雨条件、植被覆盖度、坡度和土壤类型等, 其中

降雨特征是引起氮素流失的重要因素^[25-27]。在本研究中, 径流量与降雨量之间相关性显著, 产流量随降雨量的增大而增加; 泥沙量与降雨强度之间同样具有显著的相关性, 降雨强度增大造成土壤侵蚀加剧。这是由于降雨量、降雨强度直接影响土壤与径流的相互作用, 在降雨量较大时, 雨滴溅射很高, 极易产生径流, 促使较多土壤颗粒向径流迁移, 坡耕地水土流失较为严重, 因此径流中携带的氮素含量较高^[28-31]。本研究中, 不同秸秆还田量 (0.75, 1.5 kg/m²) 与秸秆粒度 (1, 5 cm) 均可以减少坡耕地产流产沙量。这是由于施用秸秆可减少雨滴直接击打地表, 拦蓄坡面径流泥沙, 且秸秆具有较强吸持水分的能力, 可增加降水的入渗量^[12, 17], 从而减少坡耕地的产流产沙量。各处理中施用较高秸秆还田量、粗颗粒秸秆与较低秸秆还田量、细颗粒秸秆相比降低了坡耕地产流产沙量。

本研究中, 径流各形态的氮素流失浓度在前 2 次降雨中较高, 这是由于当地农民在施氮后短时间内会进行大量的灌溉, 以及耕作、除草和收割等农事习惯。这些农事会增加氮素流失率和对土壤结构产生破坏^[32], 导致此时氮素流失严重。由于前期施的氮肥进入土壤后, 在产流量较大时分解释放速度较快, 促使径流中携带的氮素含量较高, 导致土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 极易随地表径流流失, 8 月 7 日降雨强度最大时的地表径流各形态氮素流失浓度仅次于 7 月 28 日。秸秆进入土壤后, 在土壤酶和微生物的作用下, 矿化分解为 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N, 能有效提高土壤中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度^[33]。此后, 径流中氮素流失浓度逐渐降低, 到 9 月 8 日时, 径流中 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 流失浓度较 8 月 7 日降低 24.17%~54.63%。这是由于秸秆腐解时, 因纤维素和木质素降解的难易程度不同, 导致秸秆呈“疏松多孔”结构, 极易吸附降雨后坡耕地径流中部分营养元素, 为土壤微生物提供丰富的碳源和氮源, 从而创造一个营养充裕的土壤微生态环境^[13]。随着微生物数量的持续增加, 促进土壤团粒有机质结构形成, 改善了土壤的结构。施入或堆沤的氮肥在微生物的作用下, 更容易被土壤团粒结构固持或转化为可溶性有机氮, 提高土壤对氮素养分的吸附能力^[34-38], 降低坡耕地地表径流的氮素流失浓度。

本研究中, NO₃⁻-N 是自然降雨下坡耕地农田生态系统径流流失氮素的主要形态, 占 TN 浓度的 63.64%~86.18%; 而 NH₄⁺-N 的浓度较小, 仅占 TN 浓度的 5.31%~13.86%。这与王允青等^[38]在巢湖地区 NO₃⁻-N/TN 比例为 63.2%~88.8% 的结论一致。这主要是由于秸秆还田具有良好的生态效

应,能改善坡耕地土壤的理化性状,使得施入的氮肥很快硝化分解,产物多为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,而较少以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在;同时,土壤黏土矿物颗粒可以固定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,而土壤胶体难以吸附 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 相较于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 更容易流失^[36-39]。PN 所占 TN 浓度的比例为 5.33%~25.80%,为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 的 1.08~1.89 倍。4 场降雨中,随着时间的推移, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度处于缓慢下降且相对稳定的状态。PN/TN 在烤烟生长后期呈现出升高趋势,表明与侵蚀泥沙结合的颗粒态氮在坡耕地烤烟的收获期已逐渐成为地表径流氮素流失的主要形态。

3.2 坡耕地氮素流失量的变化特征

农田径流带入地表水的氮素占人类活动排入水体氮素的 51% 左右^[10],本研究中,滇中二龙潭流域坡耕地氮素流失的主要途径是径流流失(50.09%~71.67%),径流总氮流失量为 1.41~3.10 mg/m^2 ,远低于南方典型黄壤双季稻田秸秆还田后径流氮素流失量 99.49~99.90 mg/m^2 ^[40]。这可能是与该试验区降雨量、降雨强度、植被类型及覆盖度、植物生长情况和人为因素有关。

王全九等^[41]与王甜等^[42]研究认为,地表径流泥沙流失量与养分浓度会直接影响径流和泥沙中氮素养分流失量,氮素流失量主要取决于施肥量及植物生长过程。本试验中,相同降雨条件下,施用 1.5 kg/m^2 秸秆还田量、5 cm 秸秆粒度以及未添加尿素堆沤均可较好地减少径流和泥沙 TN 流失量。各处理中,2 号样方较其他处理可以显著降低径流和泥沙 TN 流失量(24.11%~81.49%),这是由于还田后粗颗粒秸秆较细颗粒秸秆降解缓慢,降雨时能在一定程度上固定较多土壤颗粒和拦蓄更多径流,阻止径流在地表的横向流动^[29],减少坡耕地产流产沙量,从而降低氮素流失风险;而细颗粒秸秆在还田后腐解较快,尿素堆沤会增加土壤氮含量,加大土壤氮素流失率,从而导致氮素流失风险增加。4 场降雨中,8 月 7 日的径流泥沙 TN 流失量均高于其他 3 场降雨,这是由于在降雨量较大时,水土流失严重,氮素极易随径流流失,导致径流中氮素流失量较高。8 月 7 日后,径流和泥沙 TN 流失量随着时间推移呈现出逐渐下降的趋势,降低了坡耕地氮素的流失风险。这与张华渝等^[32]研究结果一致。

综上,在滇中二龙潭流域烤烟农田生态系统中采用较高秸秆还田量(1.5 kg/m^2)、粗颗粒秸秆(5 cm)以及未添加尿素堆沤处理均可有效减缓坡耕地径流泥沙及氮素流失。在进行农耕地作业时应注意 2 点:一

是雨季时尽量减少或避免在施氮后的短时间内进行大量灌溉和农事,这可以有效减少地表径流氮素流失,并且提高基肥、追肥和秸秆的利用效率;二是要依据烤烟不同生长期的吸收情况和土壤养分情况等选择少量或不添加尿素堆沤进行秸秆还田,避免因氮素投入过高导致氮素流失的风险。

4 结论

(1)4 场降雨中,施用较高秸秆还田量(1.5 kg/m^2)、粗颗粒秸秆(5 cm)均可有效地减少坡耕地产流产沙量(10.06%~38.60%和 10.07%~38.60%)。施用较低秸秆还田量(0.75 kg/m^2)较施用较高秸秆还田量(1.5 kg/m^2)、粗颗粒秸秆(5 cm)较细颗粒秸秆(1 cm)及未添加尿素堆沤较添加尿素堆沤的处理,径流 TN 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降低(1.96%~32.79%和 3.97%~40.89%),各处理下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度差异不明显。

(2)径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 PN 分别占 TN 浓度的 63.64%~86.18%,5.31%~13.86%,5.33%~25.80%,地表径流主要流失形式是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,溶解态氮是径流水中主要的氮素污染物,坡耕地土壤中仅有少量颗粒态氮随地表径流输出。

(3)4 场降雨中,与径流 TN 流失浓度变化一致,泥沙 TN 流失浓度随着秸秆还田量的降低与秸秆细颗粒变为粗颗粒以及未添加尿素堆沤,总体规律性下降(16.87%~48.15%);随着时间推移,不同堆沤方式下秸秆还田各处理泥沙 TN 流失浓度逐渐降低。

(4)4 场降雨中,施用较高秸秆还田量(1.5 kg/m^2)、粗颗粒秸秆(5 cm)及未添加尿素堆沤可有效降低滇中坡耕地氮素的流失风险(0.32%~35.05%和 54.52%~77.23%);TN 流失以径流输出为主,占 TN 流失量的 50.09%~71.67%,说明降雨产生径流引起的氮素流失是该流域造成农业面源污染的重要途径。

参考文献:

- [1] 王满莹.坡耕地水土流失治理方案设计[J].农业灾害研究,2015,5(6):45-47.
- [2] 杨子生,贺一梅.中国西南边疆山区耕地水土流失研究:以云南省为例[J].水土保持研究,2009,16(1):1-7.
- [3] 赵成,顾小华,姜宏雷,等.云南省坡耕地现状及水土流失综合治理探索[J].中国水土保持,2015(4):11-12.
- [4] 吕玉娟,彭新华,高磊,等.红壤丘陵岗地区坡地产流产沙特征及影响因素研究[J].水土保持学报,2014,28(6):19-23.
- [5] 王伟,贺莉莎.云南省坡耕地现状调查及分析[J].中国水土保持,2019(4):20-23.
- [6] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,

- 2018,34(17):143-150.
- [7] 雷秀美,王飞,周碧青,等.长期施肥对稻田土壤可溶性有机氮和游离氨基酸剖面分异的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(7):1550-1559.
- [8] 姚金玲,张克强,郭海刚,等.不同施肥方式下洱海流域水稻一大蒜轮作体系氮磷径流损失研究[J].农业环境科学学报,2017,36(11):2287-2296.
- [9] 杨娟,王昌全,白根川,等.秸秆还田下“麦—稻”轮作生产生命周期能耗及温室气体排放[J].农业环境科学学报,2015,34(1):196-204.
- [10] 张永强,张晓飞,周宁,等.我国化肥投入的区域优化配置研究:基于农业增产与环境保护视角[J].资源开发与市场,2017,33(2):169-173.
- [11] 郑海睿,骆静梅,刘笑彤,等.秸秆还田量对植物寄生线虫群落的影响[J].生态学杂志,2019,38(6):1725-1731.
- [12] 郭梨锦,曹凑贵,张枝盛,等.耕作方式和秸秆还田对稻田表层土壤微生物群落的短期影响[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1577-1584.
- [13] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):60-67.
- [14] 胡明芳,赵振勇,张科.周年秸秆还田量对南方双季稻生长及产量的影响[J].中国农学通报,2020,36(4):1-6.
- [15] 刘亚杰,胡振华,郑涨平,等.秸秆还田对滨海盐碱地稻田土壤养分及酶活性的影响[J].宁波农业科技,2019,6(17):24-27.
- [16] 龚静静,胡宏祥,朱昌雄,等.秸秆还田对农田生态环境的影响综述[J].江苏农业科学,2018,46(23):36-40.
- [17] 韩瑞芸,陈哲,杨世琦.秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J].中国农学通报,2016,32(9):148-154.
- [18] 许立广.农作物秸秆还田对土壤养分和作物产量的影响研究初报[J].安徽农学通报,2016,22(2):63-64.
- [19] 张久明,迟凤琴,宿庆瑞,等.不同有机物料还田对土壤结构与玉米光合速率的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(1):56-61.
- [20] 王开峰.亚热带稻田土壤质量对长期施肥的响应研究[D].长沙:中国科学院亚热带农业生态研究所,2007:41-44.
- [21] 王庆杰,王宪良,李洪文,等.华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J].农业机械学报,2017,48(8):192-198.
- [22] 陈颖,赵磊,杨勇,等.海河流域水稻田氮磷地表径流流失特征初探[J].农业环境科学学报,2011,30(2):328-333.
- [23] 焦平金,许迪,王少丽,等.自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J].农业环境科学学报,2010,29(3):534-540.
- [24] 宋娅丽,王克勤,董莉,等.滇中烤烟坡耕地地表径流氮素的动态变化特征[J].水土保持学报,2010,24(4):7-11.
- [25] 刘宗岸,杨京平,杨正超,等.苕溪流域茶园不同种植模
- 式下地表径流氮磷流失特征[J].水土保持学报,2012,26(2):29-32,44.
- [26] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等.红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J].水土保持学报,2014,28(6):41-45,70.
- [27] 马琳琳,安娟,刘前进.横坡垄作壤中流条件下垄高对径流态氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):56-60.
- [28] 邬燕虹,张丽萍,邓龙洲,等.坡面氮素流失的坡度和雨强效应模拟研究[J].水土保持学报,2018,32(2):27-33.
- [29] 张子璐,刘峰,侯庭钰.我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J].应用生态学报,2019,30(10):3292-3302.
- [30] 潘忠成,袁溪,李敏.降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):9-13.
- [31] 鲁耀,胡万里,雷宝坤,等.云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J].农业环境科学学报,2012,31(8):1544-1553.
- [32] 张华渝,王克勤,宋娅丽,等.滇中尖山河小流域不同土地利用类型土壤活性有机碳分布特征[J].水土保持研究,2019,26(3):16-21.
- [33] 俞巧钢,叶静,马军伟,等.不同施氮水平下油菜地土壤氮素径流流失特征研究[J].水土保持学报,2011,25(3):22-25,30.
- [34] 陈冬林,易镇邪,周文新,等.不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J].环境科学学报,2010,30(8):1722-1728.
- [35] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J].农业工程学报,2014,30(19):155-165.
- [36] 丛日环,张丽,鲁艳红,等.添加不同外源氮对长期秸秆还田土壤中氮素转化的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(7):1107-1114.
- [37] 余坤,冯浩,王增丽,等.氮化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J].农业工程学报,2014,30(15):165-173.
- [38] 王允青,王静,郭熙盛,等.不同水分条件下连续多年秸秆还田对水稻、油菜产量的影响[J].安徽农业科学,2009,37(24):11464-11465.
- [39] 夏颖,汪荣勇,高立,等.湖北省油菜—棉花轮作系统地表径流氮磷流失特征[J].湖北农业科学,2014,53(23):5751-5754.
- [40] 王静,郭熙盛,王允青,等.巢湖流域不同耕作和施肥方式下农田养分径流流失特征[J].水土保持学报,2012,26(1):6-11.
- [41] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产生产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.
- [42] 王甜,黄志霖,曾立雄,等.三峡库区退耕还林土壤侵蚀及养分流失控制:以兰陵溪小流域为例[J].水土保持研究,2018,25(5):83-88.