

不同堆沤方式下秸秆还田对滇中烤烟农田 生态系统氮素平衡的影响

裴益乐¹, 李太兴², 王克勤¹, 宋娅丽¹, 代立¹, 温昌焘³, 杨锦泽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:以滇中二龙潭小流域烤烟农田生态系统为研究对象,设置对照(CK)及 8 种不同玉米秸秆堆沤方式进行秸秆还田,各处理包括 2 种秸秆还田重量(0.75 或 1.5 kg/m²),2 种秸秆粒度(1 或 5 cm),2 种秸秆堆沤方式(水或水与尿素堆沤),研究烤烟农田生态系统中不同堆沤方式下秸秆还田对径流泥沙氮素流失、土壤氮素残留量、烤烟氮素吸收量以及农田烤烟生态系统氮素平衡的影响。结果表明:(1)径流和泥沙全氮流失量分别随着降雨量和降雨强度的增加而增加;(2)施用 5 cm 粗秸秆较 1 cm 细秸秆、1.5 kg/m² 还田量较 0.75 kg/m² 还田量可分别减少径流氮素流失量 0.32%~35.05%和 54.52%~77.23%;(3)秸秆还田显著增加了土壤全氮、硝态氮含量,各处理分别较 CK 高出 2.60%~20.33%和 0.35%~90.57%;(4)烤烟各器官全氮含量分布特征为叶>茎>根,各处理下叶、茎、根全氮含量较 CK 分别增加了 67.69%,25.33%和 42.27%,水与尿素堆沤较水堆沤可显著提高烤烟氮素含量 6.60%~38.03%;(5)在氮素平衡中径流和泥沙氮素流失量分别占氮素输入量的 8.27%~23.85%和 4.37%~12.72%,氮素流失主要以径流为主,泥沙为辅;土壤残留量占氮素输入量的 4.97%~36.79%;烤烟吸收量占 41.10%~71.64%,烤烟吸收的氮素占输入的主体部分。采用水与尿素堆沤,还田量 1.5 kg/m²,秸秆粒度 5 cm 的合理配置,可有效维系烤烟农田生态系统氮素平衡,增加烤烟产量,降低氮素流失量,并提高该流域农田生态系统经济和生态效益。

关键词:秸秆还田;堆沤方式;氮素平衡;农田生态系统;烤烟

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0065-09

Effects of Returned Straw Composted Under Different Stockpile Methods on Nitrogen Balance of Flue-Cured Tobacco Farmland Ecosystem in Central Yunnan Province

PEI Yile¹, LI Taixing², WANG Keqin¹, SONG Yali, DAI Li¹, WEN Changtao³, YANG Jinze¹

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

Kunming 650224, China; 2.Soil and Water Conservation Workstation, Yuxi, Yunnan 653100,

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

Abstract:In this study, the farmland ecosystem of flue-cured tobacco in the Erlongtan small watershed in central Yunnan Province was used as the research object. The control (CK) and eight treatments (straw returning of corn) under different stockpile methods were set up. Different treatments included two kinds of straw returning amount (0.75 or 1.5 kg/m²), two kinds of straw particle size (1 or 5 cm) and two kinds of stockpile methods (water or mix water with urea). The effects of returned straw composted under different stockpile methods on nitrogen loss from runoff and sediment, soil nitrogen residues, nitrogen absorption in flue-cured tobacco, and nitrogen balance in flue-cured tobacco farmland were studied. The results show that: (1) TN loss from runoff and sediment increased with amount of rainfall and rainfall intensity, respectively; (2) application of 5 cm thick straw (compared with 1 cm thin straw), and 1.5 kg/m² returning amount (compared with 0.75 kg/m²) could effectively reduce the nitrogen loss from runoff by 0.32%~35.05% and 54.52%~77.23%, respectively; (3) straw returning significantly increased the contents of soil total nitrogen

收稿日期:2020-06-15

修回日期:2020-07-31

资助项目:云南省科技计划重点研发项目(2018BB018);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111);云南省大学生创新训练项目(20191067706);云南省科技厅“三区”人才支持计划

第一作者:裴益乐(1997—),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事生态恢复研究。E-mail:huanlehuangle@126.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

and nitrate nitrogen, and the contents of total nitrogen and nitrate nitrogen were 2.60%~20.33% and 0.35%~90.57% higher than CK, respectively; (4) the distribution characteristics of total nitrogen content in each organ of flue-cured tobacco were showed as the sequence: leaves>stems> roots, the total nitrogen content in the leaves, stems and roots increased by 67.69%, 25.33% and 42.27%, respectively, compared with CK; compared with water stockpile, mix water and urea significantly increased the nitrogen content of flue-cured tobacco by 6.60%~38.03%; (5) in the nitrogen balance, the nitrogen loss from runoff and sediment accounted for 14.36%~24.33% and 2.32%~14.32% of nitrogen input, respectively; the nitrogen loss was mainly caused by runoff nitrogen loss, followed by sediment loss; soil residues of nitrogen accounted for 4.97%~36.79% of nitrogen input; the absorption nitrogen amount of flue-cured tobacco accounted for 41.10%~71.64%, and the nitrogen absorbed by flue-cured tobacco accounted for the main part of nitrogen input. By using the reasonable configuration of mix water and urea, straw returning amount 1.5 kg/m and straw particle size of 5 cm can effectively maintain nitrogen balance in flue-cured tobacco farmland ecosystem, increase flue-cured tobacco yield, reduce nitrogen loss, and improve the economic and ecological benefits of the farmland ecosystem in this basin.

Keywords: straw returning; stockpile methods; nitrogen balance; farmland ecosystem; flue-cured tobacco

中国作为全球第一秸秆大国,据测算,2020 年中国秸秆资源化利用总量将达 1.2 亿 t^[1]。国内秸秆资源丰富,但焚烧、抛弃等现象严重,导致总体利用率较低,且对生态环境带来一系列的影响。现阶段秸秆利用是将秸秆肥料化、饲料化、原料化、燃烧化或基料化^[2],其中秸秆还田可有效改善土壤理化性质,增加土壤养分含量,提高作物产量及品质^[3-4]。但由于秸秆的种类、还田方式、耕作方式、区域生态环境不同产生的生态效益各不相同,对当地土壤有机质^[4]、微生物^[5]、酶活性等^[6]多项指标影响也存在不确定性。

研究表明,增加秸秆还田量可有效减少土壤水分蒸发,增加土壤有机质的含量、酶的活性及数量和作物产量^[7-8];但也有研究表明土壤氮素等养分随着秸秆还田量的增加呈增加再减小的趋势,并非还田量越多效果越好^[9]。秸秆粉碎还田处理能有效减少稻田氮素等养分径流流失量^[10],有助于土壤形成良好的结构,有效调节植物对水热气肥的需求进而提高作物产量^[11]。但秸秆直接还田同样存在弊端,在还田初期会与作物争夺土壤中的养分,也可能含有致病微生物等无法杀死,影响作物生长及作物品质^[12]。而秸秆堆沤还田可改善土壤微生物群落结构^[13],促进作物生长^[14],改善土壤结构,避免因化肥施用过量造成土壤退化和环境污染^[15]。然而综合分析堆沤前期具体的秸秆粉碎程度和后期秸秆还田量以及是否与化肥配合施用、施用比例等对农田生态系统养分平衡影响的研究较少。

农田养分平衡作为理解养分在农业系统循环周期的有效手段,对农业可持续发展和绿色发展起到积极作用^[16-17],而目前研究多关注于传统施肥方式对氮素平衡带来的影响,而忽略了不同堆沤方式下秸秆还

田对氮素平衡的影响。滇中红塔区降雨量集中,易产生水土流失,土地肥力退化严重,当地以坡耕地为主,烤烟、玉米为主要农作物,氮素流失严重将影响土壤肥力以及作物品质。因此,本试验以滇中红塔区二龙潭小流域烤烟农田生态系统为研究对象,研究自然降雨条件下不同秸秆还田重量(0.75 或 1.5 kg/m²)、秸秆粒度(1 或 5 cm)、秸秆堆沤方式(水或水与尿素堆沤)下秸秆还田对田面径流泥沙氮素流失、烤烟氮素吸收量以及土壤氮素残留量之间平衡关系的影响,试图回答以下科学问题:(1) 不同堆沤方式下秸秆还田是否会降低农田生态系统氮素流失?(2) 不同堆沤方式下秸秆还田是否影响滇中烤烟农田生态系统氮素平衡各个过程? 通过以上研究,以期为该地区秸秆还田在农业生产中的应用以及农业生态平衡、农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验地位于滇中红塔区二龙潭小流域,地处玉溪市东南方向高仓街道龙树居委会旁,位于东经 102°34'5.7',北纬 24°17'15.3',平均海拔 1 625 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,年降水量 909 mm,年径流输沙量 0.48 万 m³,年输沙量 0.005 万 t。暴雨多发于雨季。土壤属山地红壤,有少量紫色土。流域内植被覆盖率为 63.71%,树种以云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)分布最广,农作物以种植烤烟和玉米为主。

1.2 试验设计

本试验地选取 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 株/hm²。在试验地布设 9 组秸秆堆沤还田样方(1 m×1 m),各样方处理方式见表 1。每样方 3 组重复,均单独设置径流集水设施。

9 组样方分别为 CK 及 8 种处理,各处理包括 2 种秸秆还田重量(0.75 或 1.5 kg/m²),2 种秸秆粒度(1 或 5 cm),2 种秸秆堆沤方式(水或水与尿素堆沤)。2018 年 12 月完成秸秆不同粒度的粉碎,2019 年 2 月开始每月进行一次翻堆,在种植烤烟时进行还

田。2019 年 5 月 7 日栽植烤烟,氮肥施用量 105~135 kg/hm²,施肥比例 N:P₂O₅:K₂O 为 1:0.5:2.5~3,肥料均在移栽后 25 d 内全部施完,分别于 5 月 7 日、5 月 14 日、5 月 25 日施底肥、提苗肥和追肥。本试验设置化肥施用量与当地施肥习惯同步。各样方处理方式见表 1。施肥前土壤基本理化性质分别为:含水率 20.66%,全氮 686 mg/kg,硝态氮 2.84 mg/kg,全磷 449 mg/kg,有效磷 8.99 mg/kg。

表 1 各样方处理方式

处理	秸秆粉碎程度/cm	基肥		提苗肥		追肥		秸秆		堆沤方式	
		施用量/(g·m ⁻²)	折合氮/(g·m ⁻²)	施用量/(g·m ⁻²)	折合氮/(g·m ⁻²)	施用量/(g·m ⁻²)	折合氮/(g·m ⁻²)	施用量/(g·m ⁻²)	折合氮/(g·m ⁻²)	施用量/(g·m ⁻²)	折合氮/(g·m ⁻²)
CK	0	70	8.39	13	3.64	214	25.68	0	0	水(37.5)	0
T ₁	5	70	8.39	13	3.64	214	25.68	0.75	6.75	水(37.5)	0
T ₂	5	70	8.39	13	3.64	214	25.68	0.75	6.75	水+尿素(各 37.5)	17.5
T ₃	1	70	8.39	13	3.64	214	25.68	0.75	6.75	水(37.5)	0
T ₄	1	70	8.39	13	3.64	214	25.68	0.75	6.75	水+尿素(各 37.5)	17.5
T ₅	5	70	8.39	13	3.64	214	25.68	1.50	13.5	水(37.5)	0
T ₆	5	70	8.39	13	3.64	214	25.68	1.50	13.5	水+尿素(各 37.5)	17.5
T ₇	1	70	8.39	13	3.64	214	25.68	1.50	13.5	水(37.5)	0
T ₈	1	70	8.39	13	3.64	214	25.68	1.50	13.5	水+尿素(各 37.5)	17.5

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 样品采集 在试验初期,取各样方上坡、中坡、下坡位置不同土层 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 的土样,测定土壤全氮、硝态氮作为土壤背景值。使用自计雨量计记录降雨期间的降雨量及降雨强度。2019 年 6 月至 9 月期间,在较大降雨后,采集各样方集流装置中的径流样。取样前将样进行搅拌,在不同的深度测定其泥沙含量,将径流样带回实验室,4℃下保存,过滤后得到水样及泥沙样,在 24 h 内分别测定水样中的总氮、硝态氮、铵态氮(径流样转入干净的矿泉水瓶中,取 500 ml);对泥沙样进行避光条件下的自行风干,称重并测定其的全氮、硝态氮。在烤烟收获期 9 月底,采集烤烟的根、茎、叶,烘干后测定植物样本的全氮含量。在烤烟收获后,使用“对角线法”采集各样方不同土层(0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm)的土样,测定其全氮、硝态氮。

1.3.2 样品测定 水样总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-1989)测定;硝态氮采用酚二磺酸分光光度法(GB7480-1987)测定;铵态氮采用纳氏试剂比色法(GB7479-1987)。泥沙和土壤样全氮采用自动定氮仪法(NY/T1121.24-2012)、硝态氮采用紫外分光光度法(GB/T32737-2016)测定。植物样全氮采用自动定氮仪法(NY/T2419-2013)测定。

1.3.3 径流和泥沙中氮素流失量的计算 本试验各样方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,换算得到每个样方的平均径流量。

各场降雨中径流和泥沙中氮素流失量以及烤烟植株氮素吸收量及土壤氮素残留量由以下计算公式得到:

$$W_r=Q_{rk} \cdot c_r$$
 (1)

$$W_s=Q_{sk} \cdot c_s$$
 (2)

$$D=B \cdot c_f$$
 (3)

$$W_a=W-W_{ck}=s \cdot h \cdot c \cdot \gamma-s \cdot h \cdot c_{ck} \cdot \gamma$$
 (4)

式中:W_r 为径流中氮素流失量(mg/m²);Q_{rk} 为次降雨产流量(L/m²);c_r 为径流平均氮素浓度(mg/L);W_s 为泥沙中氮素流失量(mg/m²);Q_{sk} 为次降雨产沙量(g/m²);c_s 为泥沙平均氮素浓度(g/kg);D 为烤烟植株氮素吸收量(g/m²);B 为烤烟植株生物量(kg/m²);c_f 为植株平均氮素含量(g/kg);W_a 为土壤氮素残留量(g/m²);W 为土壤氮素现存量(g/m²);W_{ck} 为土壤氮素背景值(g/m²);s 为土壤面积(m²);h 为土壤厚度(0.2 m);c 为土壤现存氮素含量(g/kg);γ 为土壤容重(当地平均值 1 290 kg/m³);c_{ck} 为土壤背景氮素含量(g/kg)。

1.4 数据处理

本文采用 Excel 2010 进行试验数据处理和图表绘制,并采用 SPSS 25.0 软件的最小显著性差异(LSD)法对不同处理的降雨产流产沙特征、径流泥沙全氮流失量、土壤养分含量特征进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 径流、泥沙中氮素流失特征分析

2.1.1 不同降雨下各样方产流产沙特征 试验期间出现了 4 次较大的降雨,分别在 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, 12.4, 17.2 mm,最大雨强分别为 2.6, 23.6, 3.1, 21 mm/h。各处理样方的产流量均小于 CK,不同堆沤方式下的秸秆还田对各样方产流量影响不同(表 2):施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方(T₅, T₆, T₇, T₈)较施用 0.75 kg/m² 秸秆的样方(T₁, T₂, T₃, T₄)产流量减少 19.90%~22.87%;施用秸秆粒度 5 cm 的样方(T₁, T₂, T₅, T₆)较施用秸秆粒度 1 cm 的样方(T₃, T₄, T₇, T₈)产流量减少 19.90%~22.87%,说明秸秆还田量为 1.5 kg/m², 秸秆粒度为 5 cm 可有效减少径流流失量。就 4 次降雨来看,各样方产流量均表现为 8 月 7 日>9 月 8 日>8 月 15 日>7 月 28 日,表明降雨量与产流量呈正相关关系。

不同堆沤方式下的秸秆还田对坡耕地产沙量的影响表现为:4 次降雨中 8 月 7 日和 9 月 8 日降雨强度较大,8 月 15 日次之,7 月 28 日最小,各样方产沙量均表现为 8 月 7 日>9 月 8 日>8 月 15 日>7 月 28 日,表明降雨强度与产沙量呈正相关。8 月 7 日各处理土壤侵蚀量均值为 5.51 g/m²,为其他降雨日期的 1.22~2.00 倍。就不同处理来看:除 T₈外,各处理产沙量均低于 CK,其中施用 0.75 kg/m² 秸秆的样方(T₁, T₂, T₃, T₄)较施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方(T₅, T₆, T₇, T₈)产沙量减少 6.56%~32.59%;施用秸秆粒度 5 cm 的样方(T₁, T₂, T₅, T₆)较施用秸秆粒度 1 cm 的样方(T₃, T₄, T₇, T₈)产沙量减少 1.77%~13.15%。

2.1.2 径流和泥沙中全氮流失浓度及流失量特征 从图 1 可以看出,各处理方式全氮流失浓度均高于 CK, T₈样方全氮流失浓度在径流泥沙中均最大。不同处理的径流泥沙全氮流失浓度存在显著性差异($p<0.05$),径流中的全氮流失浓度变化幅度高于泥沙。

径流中的全氮流失浓度变化呈梯度变化,施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方(T₅, T₆, T₇, T₈)径流全氮流失浓度较施用 0.75 kg/m² 秸秆的样方(T₁, T₂, T₃, T₄)高出 2.40%~18.43%;施用 1 cm 细秸秆样方(T₃, T₄, T₇, T₈)径流全氮流失浓度较施用 5 cm 粗秸秆的样方(T₁, T₂, T₅, T₆)高出 46.80%~53.50%;添加尿素堆沤的样方(T₂, T₄, T₆, T₈)全氮浓度较未添加尿素堆沤秸秆还田的样方(T₁, T₃, T₅, T₇)高 25.56%~32.66%。

泥沙中施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方(T₅, T₆, T₇, T₈)泥沙全氮流失浓度比施用 0.75 kg/m² 秸秆的样

方(T₁, T₂, T₃, T₄)高 73.00%~142.06%;施用 1 cm 细秸秆样方(T₃, T₄, T₇, T₈)泥沙全氮流失浓度比施用 5 cm 粗秸秆的样方(T₁, T₂, T₅, T₆)高出 44.39%~72.72%;添加尿素堆沤的样方(T₂, T₄, T₆, T₈)全氮流失浓度比未添加尿素堆沤的样方(T₁, T₃, T₅, T₇)高出 54.38%~87.62%。

表 2 试验地 4 场降雨及产沙特征

测定指标		降雨日期			
		2019-07-28	2019-08-07	2019-08-15	2019-09-08
降雨量/mm		6.2	22	12.4	17.2
降雨强度/ (mm·h ⁻¹)		2.6	23.6	3.1	21
径流量/ (L·m ⁻²)	CK	4.13±0.17a	7.22±0.33a	5.04±0.18a	5.19±0.33b
	T ₁	3.13±0.33b	5.33±0.31a	3.55±0.28c	4.77±0.7c
	T ₂	2.77±0.31b	5.65±0.46a	4.11±0.14c	4.48±0.67c
	T ₃	3.93±0.29b	5.95±0.25a	4.43±1.07b	5.09±0.61b
	T ₄	3.3±0.49b	5.61±0.26a	4.74±0.37c	5.28±0.22a
	T ₅	2.23±0.12c	4.44±0.35b	2.98±0.18c	3.6±0.47d
	T ₆	2.3±0.08b	4.61±0.27b	3.00±0.09c	3.48±0.23 f
	T ₇	2.78±0.48b	5.41±0.42a	3.77±0.25c	4.39±0.05c
产沙量/ (g·m ⁻²)	T ₈	3.09±0.49b	5.69±0.33a	3.3±0.85c	4.84±0.02c
	CK	3.43±0.04a	5.45±0.03c	4.23±0b	5.76±0.77a
	T ₁	2.33±0.001c	5.50±0.04c	3.42±0.05b	4.45±0.73b
	T ₂	2.47±0.001b	4.94±0.02d	3.95±0.02b	3.89±0.76c
	T ₃	2.59±0.004b	5.29±0.05c	3.44±0.07b	3.88±0.79c
	T ₄	2.93±0.01b	5.58±0.08c	4.35±0.01a	3.93±0.64b
	T ₅	2.54±0.04b	5.65±0.91b	3.66±0.01b	4.46±0.76b
	T ₆	2.63±0.02b	5.32±0.02c	3.77±0.002b	4.8±0.78b
	T ₇	2.38±0.06c	5.19±0.05c	3.08±0.01b	4.9±0.78a
	T ₈	3.49±0.03a	6.61±0.03a	3.87±0.002b	4.7±0.74b

注:各处理数值均为平均值±标准差,表中不同小写字母表示同一时间不同堆沤方式下秸秆还田与径流量或产沙量之间差异性显著($p<0.05$),下同。

4 次降雨中,7 月 28 日、8 月 7 日、8 月 15 日和 9 月 8 日各处理中径流全氮流失量分别为 1.25~2.37, 2.08~4.59, 1.47~3.34, 1.76~3.82 g/m²;泥沙全氮流失量分别为 0.23~2.74, 0.95~5.88, 0.43~2.48, 0.71~3.22 mg/m²。方差分析表明,不同处理方式下径流与泥沙全氮流失量差异性显著($p<0.05$),氮素流失以径流流失为主,泥沙流失为辅。

在不同降雨条件下,径流全氮流失量存在规律性变化:8 月 7 日降雨量达到 22 mm 时,各处理的全氮流失量均最大,9 月 8 日次之,7 月 28 日、8 月 15 日最小。

在不同处理方式下:施用 1.5 kg/m² 秸秆样方(T₅, T₆, T₇, T₈)比施用 0.75 kg/m²样方(T₁, T₂, T₃, T₄)径流全氮含量降低 0.32%~35.05%;施用 5 cm 粗秸秆样方(T₁, T₂, T₅, T₆)比施用 1 cm 细秸秆样

方(T₃,T₄,T₇,T₈)的径流全氮含量降低 54.52%~77.23%;添加尿素堆沤的样方(T₂,T₄,T₆,T₈)比未添加尿素堆沤的样方(T₁,T₃,T₅,T₇)的径流全氮含

量高出 28.40%~49.00%。说明 1.5 kg/m² 秸秆还田量较 0.75 kg/m²,5 cm 粗秸秆还田较 1 cm 细秸秆还田均可有效减少径流氮素流失量。

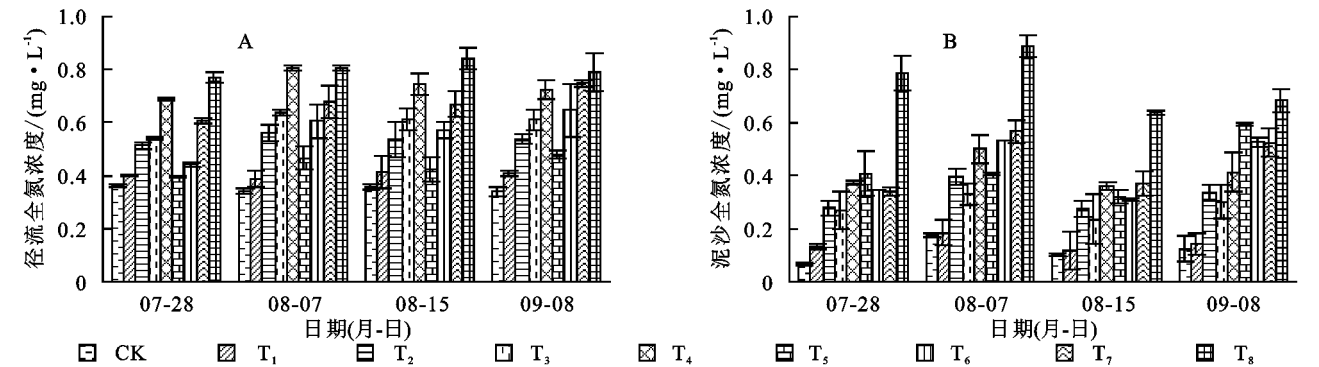


图 1 不同堆沤方式下径流全氮和泥沙全氮流失浓度特征

在不同降雨条件下,泥沙全氮流失量在 8 月 7 日达到峰值(2.50 g/m²),是其他降雨条件的 1.37~2.50 倍。在不同处理方式下,T₈样方泥沙全氮流失量远高于其他处理样方,为其他处理的 1.92~6.17 倍。施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方(T₅,T₆,T₇,T₈)比施用 0.75 kg/m² 的样方(T₁,T₂,T₃,T₄)泥沙全氮流失量

高出 94.82%~208.37%;施用秸秆粒度 5 cm 的样方(T₁,T₂,T₅,T₆)比施用秸秆粒度 1 cm 的样方(T₃,T₄,T₇,T₈)泥沙全氮含量降低了 29.01%~97.41%;添加尿素堆沤的样方(T₂,T₄,T₆,T₈)比未添加尿素堆沤的样方(T₁,T₃,T₅,T₇)泥沙全氮流失量高出 87.01%~197.62%(表 3)。

表 3 不同处理方式下径流和泥沙中氮素流失量特征

测定指标	样方	降雨日期			
		2019-07-28	2019-08-07	2019-08-15	2019-09-08
径流全氮流失量/ (mg·m ⁻²)	CK	1.50±0.01b	2.47±0.01b	1.79±0.01b	1.76±0.02b
	T ₁	1.25±0.002b	2.08±0.06b	1.47±0.04b	1.95±0.01b
	T ₂	1.42±0.01b	3.17±0.07b	2.2±0.09b	2.41±0.02b
	T ₃	2.13±0.04b	3.79±0.05b	2.7±0.07a	3.11±0.03b
	T ₄	2.27±0.009b	4.53±0.04b	3.53±0.07a	3.82±0.04a
	T ₅	0.89±0.001b	2.07±0.05c	1.26±0.01b	1.73±0.02b
	T ₆	1.02±0.01b	2.79±0.02b	1.71±0.04b	2.25±0.1b
	T ₇	1.68±0.01b	3.66±0.05b	2.52±0.07b	3.28±0.01b
	T ₈	2.37±0.02a	4.59±0.04a	3.34±0.01a	3.82±0.07a
泥沙全氮流失量/ (mg·m ⁻²)	CK	0.23±0.04c	0.95±0.03d	0.43±0.01b	0.71±0.08c
	T ₁	0.31±0.01c	1.02±0.04d	0.4±0.05b	0.63±0.73c
	T ₂	0.68±0.03b	1.96±0.02c	1.08±0.02b	1.30±0.76b
	T ₃	0.70±0.02b	1.76±0.05c	0.8±0.07b	1.17±0.79b
	T ₄	1.29±0.01b	2.80±0.08c	1.57±0.01b	1.62±0.64b
	T ₅	1.03±0.02b	2.30±0.91c	1.17±0.01b	2.66±0.76b
	T ₆	0.91±0.02b	2.05±0.02c	1.16±0.003b	2.53±0.78b
	T ₇	0.81±0.06b	2.94±0.05b	1.14±0.01b	2.57±0.78b
	T ₈	2.74±0.03a	5.88±0.03a	2.48±0.02a	3.22±0.74a

2.2 土壤中氮素储存特征

在烤烟收获后,各处理样方土壤全氮、硝态氮含量分别是 CK 的 1.02~1.20 倍、1.19~1.48 倍,表明不同秸秆还田方式均会增加土壤全氮和硝态氮含量。秸秆还田后不同土层全氮含量存在差异,在施用 0.75 kg/m² 的秸秆的样方(T₁,T₂,T₃,T₄)土壤全氮含量总体随着土层深度增加而减小;施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方(T₅,T₆,T₇,T₈)呈现为:5—10 cm 土层土壤全氮含量最大,其次

为 0—5 cm 土层,10—20 cm 土层最小。
不同处理方式秸秆还田在不同土层中对土壤全氮量影响不同。施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方(T₅,T₆,T₇,T₈)较施用 0.75 kg/m² 秸秆的样方(T₁,T₂,T₃,T₄)在 0—5,5—10,10—20 cm 土层中分别高出 3.21%,7.57%和 7.73%,且对 5—10,10—20 cm 土层土壤全氮量增加效果显著;施用 1 cm 细秸秆的样方(T₃,T₄,T₇,T₈)较施用 5 cm 粗秸秆的样方(T₁,

T_2, T_5, T_6) 在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层中分别高出 6.60%, 5.84% 和 5.49%, 但对土壤全氮量增加效果无明显差异; 添加尿素堆沤的样方 (T_2, T_4, T_6, T_8) 全氮含量较未添加尿素堆沤的样方 (T_1, T_3, T_5, T_7) 在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层中分别高出 5.45%, 3.86%, 3.25%, 且增加效果显著。

秸秆还田后, 土壤硝态氮含量随着土层深度增加而降低, 不同处理之间, 硝态氮含量存在显著性差异 ($p < 0.05$)。不同堆沤方式秸秆还田在不同土层中对土壤硝态氮影响不同。施用 1.5 kg/m² 秸秆的样方 (T_5, T_6, T_7, T_8) 较施用 0.75 kg/m² 秸秆的样方 (T_1, T_2, T_3, T_4) 在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层中分别高出 24.86%, 47.30% 和 83.22%, 且对 10—20 cm 土层土壤硝态氮含量增加效果显著; 施用秸秆粒度 1 cm 的样方 (T_3, T_4, T_7, T_8) 较施用秸秆粒度 5 cm 的样方 (T_1, T_2, T_5, T_6) 在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层中分别高出 46.27%, 34.76% 和 20.79%, 且对 0—5 cm 土层土壤硝态氮含量增加效果最好; 添加尿素堆沤的样方 (T_2, T_4, T_6, T_8) 较未添加尿素堆沤的样方 (T_1, T_3, T_5, T_7) 在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层中分别高出 19.57%, 23.19% 和 30.72%, 说明添加尿素堆沤对 10—20 cm 土层土壤硝态氮含量影响最大 (表 4)。

表 4 不同处理方式下不同土层土壤中氮素含量特征

测定指标	样方	土层深度/cm		
		0—5	5—10	10—20
土壤全氮含量/ (mg · kg ⁻¹)	CK	232.00±3.02b	230.06±5.16b	230.32±7.43b
	T ₁	240.23±7.04b	236.28±5.32a	233.49±5.36a
	T ₂	265.33±4.32b	253.01±1.12a	246.04±3.11a
	T ₃	261.15±4.01b	253.01±3.33a	248.13±9.05a
	T ₄	283.46±1.02a	267.65±9.26a	259.98±2.04a
	T ₅	262.54±5.14b	262.07±9.12a	253.71±3.02a
	T ₆	263.93±1.15b	267.65±1.05a	266.26±3.32a
	T ₇	274.39±7.21a	278.11±4.24a	276.02±6.40a
	T ₈	280.67±9.05a	280.20±4.05a	271.84±9.04a
土壤硝态氮含量/ (mg · kg ⁻¹)	CK	5.08±0.64b	6.13±0.35a	2.93±0.04b
	T ₁	5.87±0.27b	4.82±0.38a	3.37±0.30b
	T ₂	8.11±0.05a	7.17±0.08a	6.12±0.37b
	T ₃	5.79±0.76b	4.22±0.91b	3.38±0.59b
	T ₄	7.38±0.15a	5.63±0.39a	5.16±0.09b
	T ₅	7.50±0.15a	6.62±0.24a	8.44±0.32a
	T ₆	7.61±0.82a	6.62±0.95a	6.58±3.33a
	T ₇	8.59±1.10a	8.29±1.96a	7.33±2.95a
	T ₈	9.56±0.17a	9.18±0.45a	8.15±1.91a

2.3 植物体内氮素吸收量

在烤烟收获期, 不同处理中烤烟各器官全氮含量总体表现为叶>茎>根, 秸秆还田较 CK 分别增加了 67.69%, 25.33% 和 42.27%, 不同处理对叶、根氮含

量影响较大, 对茎的影响较小。不同堆沤方式下, 植物全氮含量呈现规律性变化: 秸秆还田量 1.5 kg/m² 的样方 (T_5, T_6, T_7, T_8) 烤烟植物体含氮量较秸秆还田量 0.75 kg/m² 的样方 (T_1, T_2, T_3, T_4) 高出 1.46%~34.55%; 秸秆还田粒度 1 cm 的样方 (T_3, T_4, T_7, T_8) 烤烟植物体全氮含量较秸秆还田粒度 5 cm 的样方 (T_1, T_2, T_5, T_6) 高出 2.54%~35.77%; 同时添加尿素堆沤的样方 (T_2, T_4, T_6, T_8) 烤烟植物体全氮含量较未添加尿素堆沤的样方 (T_1, T_3, T_5, T_7) 高出 6.60%~38.03%。综上, 在进行秸秆的堆沤还田时, 秸秆还田粒度为 1 cm, 还田秸秆量为 1.5 kg/m², 添加尿素均可有效增加植物各器官全氮含量 (图 2)。

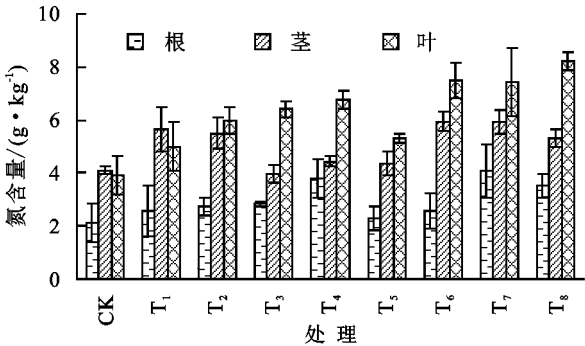


图 2 不同处理方式下烤烟各器官氮素含量

2.4 烤烟坡耕地氮平衡关系

根据宋娅丽^[18]对农田生态系统氮素平衡的计算公式, 化肥及有机肥氮素输入量=径流与泥沙氮流失量+土壤残留氮量+烤烟吸收量。径流氮素流失量占氮素输入量的 8.27%~23.85%, 泥沙氮素流失量占氮素输入量的 4.37%~12.72%, 土壤氮素残留量占氮素输入量的 4.97%~36.79%, 烤烟吸收量占氮素输入量的 41.10%~71.64%。数据表明烤烟吸收的氮素占氮素输入的的主体部分。氮素流失主要以径流为主, 泥沙为辅, 两者的流失量之和占氮素输入量的 16.89%~31.21%。就径流氮素流失量来看, 秸秆还田处理的样方氮素流失量与氮素输入量的比值均低于 CK, 说明秸秆还田可以有效减少径流氮素流失。

施用 1.5 kg/m² 秸秆样方 (T_5, T_6, T_7, T_8) 氮素平均流失量占氮素输入量的 19.69%, 施用 0.75 kg/m² 秸秆的样方 (T_1, T_2, T_3, T_4) 氮素平均流失量占氮素输入量的 20.33%, 表明施用 1.5 kg/m² 秸秆较施用 0.75 kg/m² 秸秆可有效减少氮素流失; 秸秆粒度为 5 cm 的样方 (T_1, T_2, T_5, T_6) 总体氮流失量占氮素输入量的 16.70%~19.92%, 秸秆粒度为 1 cm 的样方 (T_3, T_4, T_7, T_8) 总体氮流失量占氮素输入量的 18.61%~25.27%, 表明秸秆粒度为 5 cm 较秸秆粒度 1 cm 同样可有效减少氮素流失; 添加尿素堆沤的样方 (T_2, T_4, T_6, T_8) 平均氮素流失

量占氮素输入量的 21.18%，未添加尿素堆沤样方(T₁, T₃, T₅, T₇)的平均氮素流失量占氮素输入量的 18.84%，表明尿素的添加会增加氮流失。

就植物吸收来看, 2 号样方植物氮素吸收量与氮

素输入量的比值最高达到 71.64%，T₈样方的比值最小为 41.10%。在氮的输入量达到 71.98 g/m²时, 烤烟吸收氮素量与氮素输入量的比值下降, 土壤氮素残留量与氮素输入量的比值上升(表 5)。

表 5 不同处理方式下滇中烤烟农田生态系统中氮素平衡关系记者

处理	径流氮素 流失量/ (g·m ⁻²)	径流氮素 流失比/%	泥沙氮素 流失量/ (g·m ⁻²)	泥沙氮素 流失比/%	土壤残留 氮素量/ (g·m ⁻²)	土壤氮素 残留比/%	烤烟吸收 氮素量/ (g·m ⁻²)	植物氮素 吸收比/%
CK	7.52	23.85	2.32	7.36	1.57	4.97	20.12	63.82
T ₁	6.75	12.51	2.36	4.37	6.19	11.47	38.65	71.64
T ₂	9.20	12.89	5.02	7.03	20.22	28.33	36.93	51.74
T ₃	11.73	15.74	4.43	5.95	19.68	26.41	38.68	51.90
T ₄	14.15	15.07	7.28	7.75	32.27	34.38	40.18	42.80
T ₅	5.95	8.27	7.16	9.95	23.82	33.09	35.05	48.70
T ₆	7.77	9.00	6.65	7.70	28.86	33.42	43.08	49.88
T ₇	11.14	11.15	7.46	7.46	36.77	36.79	44.57	44.60
T ₈	14.12	12.55	14.32	12.72	37.85	33.63	46.26	41.10

3 讨论

3.1 不同堆沤方式下秸秆还田对氮素流失的影响

农田生态系统随着氮素的过量投入导致大量氮素以径流、淋溶等方式进入水体, 土壤中氮素同样会以流失的形式进入环境^[19]。本研究中, 氮的主要流失方式包括径流和泥沙流失两种, 由于秸秆本身含有丰富的氮元素, 采用不同的秸秆还田量及堆沤方式分别增加了径流中氮素浓度(2.40%~18.43%和25.56%~32.66%)。而朱利群等^[10]和杨坤宇等^[20]研究表明, 秸秆还田可减少稻田径流氮流失浓度(15.34%~19.76%), 原因可能是秸秆直接还田在还田后吸附氮, 腐解时微生物吸收环境中的氮, 从而降低稻田径流氮素浓度^[10]; 而本试验还田方式为秸秆堆沤还田, 在堆沤过程中秸秆完成腐熟, 堆肥成肥增加了氮磷钾含量^[21], 还田后可供给氮, 不再吸收氮致使径流泥沙氮素浓度上升。

本研究中, 堆沤秸秆还田量及秸秆粒度均对径流全氮流失量影响显著, 1.5 kg/m²还田量较 0.75 kg/m²使径流全氮流失量降低 0.32%~35.05%; 5 cm 粗秸秆还田较 1 cm 细秸秆使径流全氮流失量降低 54.52%~77.23%。这可能是由于堆沤秸秆还田量为 1.5 kg/m², 秸秆粒度为 5 cm 时秸秆分解能产生更多的胶结物质增加土壤团聚结构, 有效地减少地表径流, 从而使径流氮流失量随之减少。本研究中随着降雨量的增加, 径流全氮流失量也随之增加(17.33%~117.86%), 这是由于降雨量增大产流量随之上升, 导致全氮流失量增加。同时, 降雨强度的增加导致泥沙全氮流失量增加 26.96%~154.18%, 这可能是由于

雨滴击溅破坏土壤结构降低了水分入渗能力, 造成土壤侵蚀加大^[22]。T₈处理泥沙全氮流失量为其他处理的 1.92~6.17 倍, 该处理采用秸秆粒度为 1 cm 细秸秆, 还田量为 1.5 kg/m²并添加尿素堆沤, 易于堆腐并且能释放大量氮素, 能较快较好的对土壤氮素进行补给, 致使其在降雨的冲刷下产生较多的氮素流失。

3.2 不同堆沤方式下秸秆还田对土壤中氮含量的影响

本研究中, 秸秆还田量为 1.5 kg/m²较 0.75 kg/m²使土壤全氮含量增加 3.21%~7.73%, 秸秆还田量增加土壤全氮含量, 这与徐蒋来等^[9]研究结果一致, 原因可能是秸秆还田量大, 覆盖表土全面、均匀, 可以更有效的减少降雨冲刷造成的氮流失; 施用 1 cm 细秸秆样方比施用 5 cm 粗秸秆的土壤全氮含量高出 5.49%~6.60%, 这可能由于秸秆粒度小在堆沤时可以增加与微生物及菌群的接触面积加快腐熟, 同时还田后更利于土壤的固定; 添加尿素堆沤的样方比未添加尿素堆沤的样方土壤全氮含量高出(3.25%~5.45%), 与刘祁峰等^[23]研究结果相同, 尿素的添加会增加土壤氮含量。

研究表明土壤中的氮素随着土层深度的增加而降低^[24], 而本研究则表明在不同堆沤方式下不同土层的全氮含量存在差异: 0.75 kg/m²秸秆还田时 0—5 cm 全氮量最高; 1.5 kg/m²秸秆还田时 5—10 cm 全氮含量最高。秸秆还田量为 1.5 kg/m²对 5—10 cm 土层全氮增加效果明显, 这可能是由于秸秆还田量大产生更多的氮素, 0—5 cm 土层土壤氮素向下沉降或者氮素向植物根部聚集的结果。对土壤硝态氮研究发现, 秸秆堆沤还田较秸秆不还田土壤硝态氮含量增加了 1.19~1.48 倍, 这与李亚鑫等^[25]研究结果一致, 而赵鹏等^[26]研究结果则为秸秆还田会减少土壤硝态氮含量。

3.3 不同堆沤方式下秸秆还田对植物体内氮素吸收量的影响

本研究中烤烟全氮含量分布特征为叶>茎>根,与普匡等^[27]研究结果相同,而杨梅等^[28]研究结果则为烤烟全氮分布叶>根>茎。烤烟植株体的氮素主要存在于烟碱、叶绿素和蛋白质中,植物营养含量及其在根、茎、叶中的分布与其生长时期,土壤养分含量和生活环境有较大的关系^[29]。秸秆还田量、粉碎程度和添加尿素堆沤会增加烤烟氮含量,其中添加尿素堆沤可以显著增加烤烟氮含量(6.60%~38.03%)。堆沤方式下的秸秆还田可以快速供给土壤氮素含量,促进蛋白质转化为糖类物质为烤烟生长提供养分^[30],间接影响烤烟产量和品质。这与方平等^[31]的研究结果一致,秸秆还田量与耕作方式均会对作物产量产生一定的影响^[32]。

3.4 不同堆沤方式下秸秆还田对氮素平衡的影响

在烤烟农田生态系统中,秸秆还田增加了氮素输入量。本研究中土壤氮素残留量占氮素输入量的4.97%~36.79%,过多的氮素残留为氮素流失提供了养分基础。氮素流失量占氮素输入量的比值达16.89%~31.21%,其中泥沙占4.37%~12.72%,径流占8.27%~23.85%。说明在此生态系统中氮的流失形式主要以径流流失为主,泥沙流失为辅,在防治氮素流失时应对径流进行重点防控。就氮素流失来看,本试验研究发现1.5 kg/m²还田量,秸秆粒度5 cm均可有效减少氮素流失,而添加尿素堆沤可增加烤烟氮含量。从氮素吸收来看,在氮素输入量增加到71.98 g/m²时,烤烟吸收量与氮素输入量比值下降,土壤氮素残留量与氮素输入量的比值上升,说明烤烟对氮素的需求可能有峰值存在。

综上所述,采用水与尿素堆沤、还田量1.5 kg/m²,秸秆粒度5 cm的处理可提高烤烟氮素吸收量,减少径流泥沙氮素流失,并产生较少的土壤残余,能够实现烤烟农田生态系统的氮素平衡,达到生态效益、经济效益和社会效益的最大化。

4 结论

(1) 秸秆堆沤还田较秸秆不还田径流泥沙氮素浓度均增加。径流全氮含量在秸秆还田量1.5 kg/m²较0.75 kg/m²降低0.32%~35.05%;秸秆还田粒度5 cm较1 cm降低54.52%~77.23%。径流全氮流失量随着降雨量的增加而增大;泥沙全氮流失量随着降雨强度的增加而增大。

(2) 秸秆还田均增加了土壤全氮、硝态氮含量(分别为CK的1.02~1.20,1.19~1.48倍)。秸秆还田后不同土层全氮含量存在差异,在施用0.75 kg/

m²的土壤全氮含量总体随着土层深度增加而减小;施用1.5 kg/m²秸秆还田的土壤全氮含量表现为:5—10 cm>0—5 cm>10—20 cm。

(3) 烤烟各器官全氮含量分布特征为叶>茎>根。烤烟各器官含氮量为秸秆还田量1.5 kg/m²较0.75 kg/m²高出1.46%~34.55%;施用1 cm细秸秆较5 cm粗秸秆高出2.54%~35.77%;添加尿素堆沤较未添加尿素高出6.60%~38.03%。

(4) 径流氮素流失量、泥沙氮素流失量、土壤残留量和烤烟吸收量分别占氮素总输入量的8.27%~23.85%,4.37%~12.72%,4.97%~36.79%和41.10%~71.64%。水与尿素堆沤,还田量1.5 kg/m²,秸秆粒度5 cm的秸秆还田方式可有效降低氮素流失量、增加烤烟产量,为本研究的最佳秸秆还田方式。

参考文献:

- [1] 霍丽丽,赵立欣,孟海波,等.中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J].农业工程学报,2019,35(13):218-224.
- [2] 靳贞来,靳宇恒.国外秸秆利用经验借鉴与中国发展路径选择[J].世界农业,2015(5):129-132.
- [3] 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.
- [4] 李敬王.不同耕作方式下秸秆还田对砂姜黑土有机质等养分及物理性质的影响[D].重庆:西南大学,2019.
- [5] 王芳.秸秆腐解的微生物群落演替过程研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [6] 刘玮斌,田文博,陈龙,等.不同秸秆还田方式对土壤酶活性和玉米产量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(5):25-29.
- [7] 李春阳.不同秸秆还田量对土壤性状及玉米产量的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [8] 王维钰.秸秆周年投入与施肥对小麦—玉米轮作温室气体排放效应及农田生产力的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [9] 徐蒋来,胡乃娟,朱利群.周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J].麦类作物学报,2016,36(2):215-222.
- [10] 朱利群,夏小江,胡清宇,等.不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):6-10.
- [11] 王月宁,冯朋博,李荣,等.不同秸秆还田方式对宁夏扬黄灌区土壤性质及玉米生长的影响[J].西南农业学报,2019,32(11):2607-2614.
- [12] 陈喜靖,喻曼,王强,等.浙江省稻田系统秸秆还田问题及对策[J].浙江农业学报,2018,30(10):1765-1774.
- [13] 聂文翰,戚志萍,冯海玮,等.复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响[J].环境科学,2017,38(2):783-791.
- [14] 徐坚,岳鹏,顾艳红.秸秆堆肥在水稻上的应用效果[J].浙江农业科学,2019,60(11):2015-2016,2019.
- [15] 匡石滋,田世尧,李春雨,等.香蕉间作模式和香蕉茎秆堆沤还田对土壤酶活性的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(3):617-621.

[16] 邱学礼,李军营,李向阳,等.云南曲靖烤烟坡耕地不同农作处理的水土流失特征[J].中国水土保持科学,2012,10(6):98-103.

[17] 韩雪丰,范茂攀,刘润梅,等.云南省种植马铃薯农户氮磷钾养分投入及其土壤养分平衡状况分析[J].云南农业大学学报,自然科学版,2019,34(3):538-543

[18] 宋娅丽,王克勤.滇中坡耕地农田生态系统中氮素平衡特征[J].水土保持学报,2010,24(1):150-154.

[19] 张亦涛,刘宏斌,王洪媛,等.农田施氮对水质和氮素流失的影响[J].生态学报,2016,36(20):6664-6676.

[20] 杨坤宇,王美慧,王毅,等.不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1723-1734.

[21] 竹江良,刘晓琳,李少明,等.两种微生物菌剂对烟草废弃物高温堆肥腐熟进程的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(1):194-199.

[22] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21.

[23] 刘祁峰,毛应诚,晏斌.山丹县油菜秸秆腐熟剂筛选试验总结[J].农业科技与信息,2019(18):27-28.

[24] 薛晓辉,赵常万,张嵩.黔西北不同土地利用类型下土壤全氮及硝态氮的分布与残留[J].草地学报,2016,24(4):819-824.

[25] 李亚鑫,张娟霞,刘伟刚,等.玉米秸秆还田配施氮肥对冬小麦产量和土壤硝态氮的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(7):38-44.

[26] 赵鹏,陈阜.秸秆还田配施氮肥对夏玉米氮利用及土壤硝态氮的影响[J].河南农业大学学报,2019,43(1):14-18.

[27] 普匡,高家合,田旺海,等.烤烟营养器官对氮肥的吸收利用效率[J].西南农业学报,2014,27(5):2035-2039.

[28] 杨梅,王昌全,袁大刚,等.不同生长期烤烟各器官 C, N, P 生态化学计量学特征[J].中国生态农业学报,2015,23(6):686-693.

[29] 王冬梅,杨惠敏.4 种牧草不同生长期 C, N 生态化学计量特征[J].草业科学,2011,28(6):921-925.

[30] 叶丽丽,王翠红,彭新华,等.秸秆还田对土壤质量影响研究进展[J].湖南农业科学,2010(19):52-55.

[31] 方平,彭友,阳显斌,等.有机无机肥配施对烤烟氮吸收的影响[J].江西农业学报,2019,31(11):47-51.

[32] 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.



(上接第 64 页)

[9] 李发林,谢南松,郑域茹,等.生草栽培方式对坡地果园氮磷流失的控制效果[J].福建农林大学学报:自然科学版,2014,43(3):304-311.

[10] 张佳崎,马悦,张瑞芳,等.不同种植模式和坡度对片麻岩山坡地氮素流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):8-13.

[11] 刘俏,张丽萍,胡响明,等.红壤丘陵区经济林地坡地氮磷流失特征[J].水土保持学报,2014,28(3):185-190.

[12] 霍洪江,汪涛,魏世强,等.三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响[J].西南大学学报:自然科学版,2013,35(11):112-117.

[13] 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.

[14] 袁久芹,梁音,曹龙熹,等.红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J].土壤,2015,47(2):400-407.

[15] 刘光崧,蒋能慧,张连第,等.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996,137-183.

[16] 程琴娟,蔡强国,廖义善.土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2007,21(2):9-11,15.

[17] 曹梓豪,赵清贺,丁圣彦,等.坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响[J].自然资源学报,2017,32(11):1892-1904.

[18] 朱楠,张会兰,马超,等.北京延庆县雨型和坡面措施对水沙及污染物的影响[J].生态学杂志,2015,34(12):3509-3517.

[19] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.

[20] 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.

[21] 王华玲,赵建伟,程东升,等.不同植被缓冲带对坡耕地地表径流中氮磷的拦截效果[J].农业环境科学学报,2010,29(9):1730-1736.

[22] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.牧草覆盖对坡面土壤矿质氮素流失的影响[J].应用生态学报,2006,17(12):2297-2301.

[23] 李秋艳,蔡强国,方海燕,等.长江上游紫色土地区不同坡度坡耕地水土保持措施的适宜性分析[J].资源科学,2009,31(12):2157-2163.

[24] 杨洪晓,周美华,李俊良,等.温带果园护土生草鼠茅草的腐解和养分释放[J].草业学报,2015,24(4):208-213.

[25] 曹铨,沈禹颖,王自奎,等.生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J].草业学报,2016,25(8):180-188.

[26] 王艳廷,冀晓昊,吴玉森,等.我国果园生草的研究进展[J].应用生态学报,2015,26(6):1892-1900.

[27] 庞群虎,宋丽华,王竞,等.生草当年对枣园土壤性状及红枣品质的影响[J].西北林学院学报,2019,34(1):124-129.