

缓释肥等氮替代尿素对坡耕地径流氮素流失和 青贮玉米生长的影响

陈佳钰, 李永梅, 廖学圆, 范茂攀, 王自林, 赵吉霞

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 为比较单施尿素与尿素和缓释肥配施对云南坡耕地径流氮流失、土壤养分及青贮饲用玉米生长的影响作用。通过自然降雨下的径流槽试验, 在等氮条件下按云南常规施肥量设置单施尿素(CK)、添加硝化抑制剂速溶诺泰克®21 等氮替代 40% 的尿素+60% 普通尿素(处理 I)和聚谷氨酸增效 3 代等氮替代 40% 的尿素+60% 普通尿素(处理 II)3 个处理。结果表明: 生育期内尿素配施缓释肥的处理 I 和处理 II 与单施尿素 CK 处理相比, 总氮、铵态氮和硝态氮流失浓度削减量最高分别为 2.59, 1.60, 1.42 mg/L 和 1.61, 1.38, 1.25 mg/L; 累计流失量与 CK 相比, 处理 I、处理 II 的总氮、铵态氮和硝态氮累计流失量分别削减 18.56%, 16.19%, 24.31% 和 10.75%, 8.73%, 17.08%。在青贮玉米生育期内, 配施缓释肥处理土壤较 CK 处理铵态氮含量分别显著提高 13.94%~45.04% 和 9.63%~22.39%, 硝态氮含量分别显著降低 3.70%~29.91%, 8.61%~12.55%, 土壤微生物生物量氮含量分别显著提高 22.13%~31.76%, 11.80%~22.81%。尿素配施缓释肥也可以显著提高青贮玉米产量和植株氮吸收量, 并通过显著提高植株粗蛋白和粗脂肪含量, 降低粗灰分和洗涤纤维含量来提高其品质性状。相关性分析可知, 径流氮流失与土壤氮含量、青贮玉米产量和植株吸氮量呈负相关关系, 土壤氮素与产量和植株氮吸收均呈正相关关系, 产量与植株氮吸收呈极显著正相关关系。综上所述, 与单施尿素相比, 尿素配施缓释氮肥能够减缓土壤氮素的硝化过程, 显著增强土壤的固氮能力, 维持土壤高氮素水平, 进而提高青贮饲用玉米的产量和品质, 为红壤坡耕地青贮玉米种植的施肥提供科学理论依据。

关键词: 缓释肥; 径流氮流失; 土壤氮素; 青贮玉米

中图分类号: S513; S143.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0038-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.006

Effect of Slow-release Fertilizer with Equal Nitrogen Substitution for Urea on Runoff Nitrogen Loss and Silage Maize Growth on Sloping Land

CHEN Jiayu, LI Yongmei, LIAO Xueyuan, FAN Maopan, WANG Zilin, ZHAO Jixia

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract: To compare the effects of single urea and urea combined with slow-release fertilizer application on runoff nitrogen loss, soil nutrients and growth of silage forage maize in slope arable land of Yunnan Province. In the runoff trough experiment under natural rainfall, three treatments of single urea (CK), urea supplemented with the nitrification inhibitor Instant Nortech®21 with 40% N replacement + 60% common urea (Treatment I) and polyglutamate Plus 3 with 40% N replacement + 60% common urea (Treatment II) were set up under iso-nitrogen conditions according to conventional fertilizer application rates in Yunnan. The results showed that the highest reductions of total N, ammonium N and nitrate N loss concentrations were 2.59, 1.60, 1.42 mg/L and 1.61, 1.38, 1.25 mg/L for treatments I and II, respectively, when compared with CK treatment during the fertility period. Compared to CK, the cumulative losses of total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen were reduced by 18.56%, 16.19%, 24.31% and 10.75%, 8.73% and 17.08% for treatments I and II, respectively. During the growth period of silage maize, the combined application of slow release fertilizer treatment significantly increased the ammonium N content by 13.94%~45.04% and 9.63%~22.39%,

收稿日期: 2022-11-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41661063, 42007002); 云南省科技重大专项(2019ZG00902-08)

第一作者: 陈佳钰(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail: 969032210@qq.com

通信作者: 赵吉霞(1989—), 女, 讲师, 博士, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: zhaojixia@163.com

significantly reduced the nitrate N content by 3.70% ~ 29.91% and 8.61% ~ 12.55%, and significantly increased the soil microbial biomass N content by 22.13% ~ 31.76% and 11.80% ~ 22.81%. Urea combined with slow-release fertilizer could also significantly increase the silage yield and plant N uptake, and improve the quality traits of silage maize by significantly increasing the crude protein and crude fat contents and reducing the crude ash and detergent fibre contents of the plant. Correlation analysis showed that runoff N loss was negatively correlated with soil N content, silage maize yield and plant N uptake, soil N was positively correlated with both yield and plant N uptake, and yield was significantly positively correlated with plant N uptake. In conclusion, compared with single urea, urea combined with slow-release nitrogen fertilizer could slow down the nitrification process of soil nitrogen, significantly enhance the nitrogen fixing ability of soil, maintain the high nitrogen level of soil, and thus improve the yield and quality of silage maize, providing a scientific and theoretical basis for the fertilization of silage maize in red soil slope arable land.

Keywords: slow-release fertilizer; runoff nitrogen loss; soil nitrogen; corn silage

云南地处西南边陲,是典型的红壤分布区,水热资源丰富,其中坡耕地占云南省总耕地面积的 69.79%^[1],是经济作物和粮食作物重要的生产区域^[2]。由于长期不合理耕作管理和开发利用,浅薄的土层在降雨冲刷下更易造成养分的流失^[3],面临着坡耕地地力衰减及水土流失严重等问题,环境恶化的同时还使得坡耕地农业生产能力不断下降^[4],红壤山区的农业生产效率难以提高,并逐步失去可持续发展的能力^[5]。为了实现高产目标对于肥料的依赖程度日益增加,尤其是在粮食作物上氮素的施用远高于国际平均用量,而近半数氮素则通过氨挥发、硝化—反硝化作用、淋失和径流等多途径损失^[6],不仅会形成温室效应、破坏臭氧层,而且会导致水质恶化、水体富营养化。因此,科学利用肥料资源是云南省防治农业面源污染的关键。

青贮饲用玉米的需求随着云南省“粮改饲”的发展势必还将进一步增加,其栽培过程中化肥投入相对一般粮食作物较少且经济效益高,具有极大的发展潜力。在云南山区坡耕地种植饲用玉米,除了如何提质增效,也存在后期追肥困难、费力费工等诸多问题。合理施肥作为关键管理措施在坡耕地农业生产实践中则尤为重要^[7],氮肥作为作物生长发育必需的主要养分元素更是起着支撑作用^[6],缓释氮肥有效规避了常规氮肥水溶性高、溶解迅速,使得养分转化快、挥发、淋失和化学固定多等缺点^[8],减轻氮肥过量引起的环境污染,而且可以通过改变肥料水溶性来有效控制氮素释放规律^[9],提高土壤的供氮能力,使养分在数量、时间和空间上与作物需求规律基本吻合。生物合成缓释肥通过添加硝化抑制剂或脲酶抑制剂来抑制土壤硝化过程,聚谷氨酸通过肥料增效来促进作物的养分吸收能力,随着肥料生产技术的改进和成熟,缓释肥以其环境友好的优势被广泛推广^[10]。已有研究^[11]发现,单施缓释氮肥可以简化施肥技术,提供植物生长中后期吸收利用的无机氮肥,但会增加成本,且其前期释

放缓慢可导致前期供氮不足而后期作物晚熟^[12]。尿素配施缓释肥则可以通过促进玉米生长、提高生育后期的土壤矿质氮含量达到增产的效果^[13]。

目前,施入添加 DMPP 缓释肥对促进玉米的生长研究取得一定进展^[14],聚谷氨酸缓释肥在玉米、大豆和水稻等经济粮食作物的增产优质上也有显著成果^[15]。尿素配施缓释肥多用于提高籽粒玉米产量和氮素利用,对于坡耕地饲用玉米种植鲜见报道^[16]。因此,本研究根据饲用玉米的需肥特性,通过普通尿素分别配施 2 种缓释肥,探究在等氮条件下缓释氮肥一次性做基肥施入,对坡耕地青贮玉米生长中径流氮流失及土壤肥力的影响,为滇中红壤坡耕地绿色饲用玉米的种植及土地资源有效利用提供理论依据和支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年 5—9 月在云南农业大学后山放置于试验基地的模拟径流槽中进行。试验地点中心地理坐标为 25°08′19″N, 102°45′58″E, 海拔 1 950 m, 坡向为北偏西 55°, 年平均气温 14.65 °C, 无霜期 249 ~ 365 天, 年平均降水量 830 mm, 属低纬度亚热带高原季风气候, 干冷同期, 雨热同季。试验土壤为旱地山原红壤, 2021 年 5 月按照“S”形在每个径流槽内选取 4~5 个点, 采集 0—20 cm 耕层土壤, 去除土样中的杂草、石块等杂物后混匀, 用无菌袋密封, 经过风干后过筛, 测定土壤基础养分值: pH 为 6.22, 有机质含量 18.13 g/kg, 全氮含量 0.57 g/kg, 碱解氮含量 66.50 mg/kg, 速效磷含量 13.90 mg/kg, 速效钾含量 45.22 mg/kg。

1.2 试验材料

供试青贮玉米品种为“桥单 6 号”; 供试肥料为尿素 (含 N ≥ 46.0%)、速溶诺泰克® 21 (含 N ≥ 20.5%) 以及聚谷氨酸增效 3 代 (含 N ≥ 46.0%), 过磷酸钙 (含 P₂O₅ ≥ 12.0%), 农业用硫酸钾 (含 K₂O ≥ 50.0%), 其中 2 种缓释肥中均不含 P、K 元素。

1.3 试验设计

1.3.1 径流槽设计 试验装置由厚度为 2 mm 的铁板制成,长 160 cm,宽 80 cm,土层深度为 50 cm 的径流模拟槽,上管口用于采集地表径流,于出口位置下端摆放 1 个容量为 22 L 的水桶用于收集径流及泥沙,用塑料薄膜将径流收集桶覆盖,防止降雨期间雨水进入(图 1)。

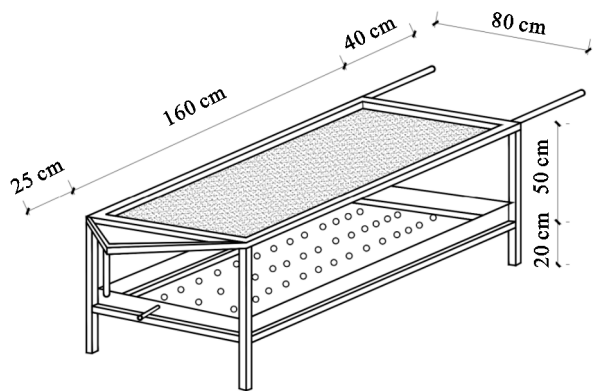


图 1 试验装置示意

1.3.2 缓释肥试验设计 在施氮水平相同的情况下,设置 3 个处理:CK,单施普通尿素;处理 I,添加硝化抑制剂速溶诺泰克® 21 等氮替代 40% 的尿素 + 60% 普通尿素;处理 II,包膜缓释氮肥聚谷氨酸增效 3 代等氮替代 40% 的尿素 + 60% 普通尿素。每个处理重复 3 次,共 9 个槽,径流槽随机排列。播种玉米采用种子穴播方式,施入模拟径流槽的表层土壤(0—10 cm),种植密度为 9 000 株/667 m²,每塘播种 3 粒,间苗后每塘 1 株,行距为 30.0 cm,株距为 20.0 cm,即每槽 12 株。

1.3.3 施肥与田间管理 于 2021 年 5 月 27 日播种,2021 年 9 月 30 日收获。按照当地常规施肥量分别为纯氮 270 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²,氮肥的基追比为 6:4,追肥在大喇叭口期进行,其中缓释氮肥、磷肥、钾肥均作为基肥一次性施入,肥料在播种时穴施于 0—20 cm 的耕层土中,玉米生育期内,根据试验基地内径流模拟槽的具体情况进行田间管理工作。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 样品采集 径流样品:玉米生育期内,每次降雨产流结束 12 h 内收集径流水样,将收集桶内的径流和泥沙充分搅拌,并分上、中、下层共取水样 600 mL,取样后将其清洗排空。收集到的水样带回实验室过滤,低温保存或即时测定。土壤样品:在青贮玉米的苗期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期和成熟期 5 个生育期内分别进行土样采集,测定土壤理化性质;每个槽内按“S”形选取 4~5 个点采样,分别采集 0—20 cm 土层的土壤,均匀混合保留部分鲜样,部分经自然风干保存,测定不同施肥处理的土壤养分含量。植株

样品:在玉米乳熟末期采集植株样品,每个径流槽选 3 株长势居中的玉米,齐地面处刈割后称重测产,然后在 105 ℃ 杀青 30 min,降至 80 ℃ 烘干至恒重,称重后用粉碎机将烘干样品粉碎过筛,放入自封袋中保存测定品质。

1.4.2 测定项目与方法 水样测定:记录径流收集桶内的水深后,用容积法测定径流桶中水体积,计算径流量;参照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》^[17]:采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮含量,使用 Auto Analyzer 3 High Resolution 连续流动分析仪(德国 SEAL 公司,SEAL XY-2 SAMPLER)测定铵态氮、硝态氮含量;地表径流养分流失量等于整个监测周期中(整个玉米生育期)各次径流水样中养分浓度与收集水体积乘积之和。

测定土壤样品:土壤铵态氮、硝态氮含量用 1 mol/L 的 KCl 浸提后,同水样测定方法一致;土壤微生物生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸法^[18]测定。

植株产量的测定:对玉米实收测产,单位面积鲜重,每个径流槽收获 3 株,收获后立即称重,得到小区生物鲜重,折合成单位面积生物产量(t/hm²),换算单位面积干重产量。植株品质的测定:粗蛋白采用 H₂SO₄—H₂O₂ 消化—奈氏比色法测定,粗脂肪测定采用索氏乙醚提取法,粗灰分采用高温直接法,中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维采用范式洗涤纤维测定法。收获玉米分别测定茎、叶、穗测定鲜干重,粉碎过筛后采用 H₂SO₄—H₂O₂ 法煮煮,凯氏定氮法测定植株全氮含量,植株氮吸收量(kg/hm²)=氮含量×干重产量。

1.5 数据处理

本试验中采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据处理分析和作图,用 IBM SPSS 进行单因素方差分析,邓肯多重比较检验显著性差异及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对径流及其氮素流失的影响

2.1.1 不同施肥处理下降雨—径流分析 表 1 和表 2 为 2021 年 5 月 27 日至 2021 年 9 月 30 日玉米生育期内降雨—径流情况,累计降雨量达 704.6 mm,集中在 6—8 月的苗期至吐丝期,期间降雨次数和降雨量分别占整个生育期的 91.38% 和 85.49%,3 个处理总产流均为 17 次。可以看出,径流量与降雨量显著相关,产流量随生育期的推进呈减少趋势,整个生育期内总产流量大小为 CK>处理 II>处理 I,较 CK 相比,处理 I、II 径流累计量分别减少 3.25% 和 2.06%,处理 I 的削减率更高,苗期和拔节期各处理间径流量无显著性差异,其余生育期各处理间均达到显著水平。

表 1 玉米生育期内降雨特征						
降雨日期 (年-月)	降雨 次数	产流次数			降雨量/ mm	百分比/ %
		CK	处理 I	处理 II		
2021-05	1	0	0	0	6.8	0.96
2021-06	13	5	5	5	325.8	46.24
2021-07	20	5	5	5	157.4	22.34
2021-08	20	6	6	6	189.6	26.91
2021-09	4	1	1	1	25.0	3.55
合计	58	17	17	17	704.6	100.00

2.1.2 不同施肥处理对径流氮素流失的影响 由图 2 可知,随生育期推进,不同施肥处理氮素流失浓度均呈下降—上升—下降的趋势,氮素流失量均在苗期达到峰值后呈现下降的变化趋势。尿素配施缓释肥处理较单施尿素处理相比可以显著减少氮素流失浓度和流失量,生育期内处理 I 和处理 II 的总氮、铵态氮和硝态氮流失浓度较 CK 处理相比,削减量最高分

别为 2.59,1.60,1.42 mg/L 和 1.61,1.38,1.25 mg/L。氮素流失量在生育期内大小为 CK>处理 II>处理 I,较 CK 相比,处理 I、处理 II 的总氮、铵态氮和硝态氮累计流失量分别削减 18.56%,16.19%,24.31%和 10.75%,8.73%,17.08%。

表 2 不同施肥处理下各生育期内产流量				
生育期	降雨量/ mm	径流量/(m ³ ·hm ⁻²)		
		CK	处理 I	处理 II
苗期	185.4	370.99±5.50a	366.91±5.41a	367.72±4.86a
拔节期	209.4	353.82±5.71a	345.09±4.66a	351.60±4.08a
大喇叭口期	125.6	188.60±2.61a	178.81±2.29b	179.24±4.39b
吐丝期	159.2	168.47±4.59a	159.70±2.49b	164.05±3.72ab
成熟期	25.0	14.73±1.70a	10.50±0.80b	11.36±2.02b
合计	704.6	1096.61	1061.01	1073.97

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

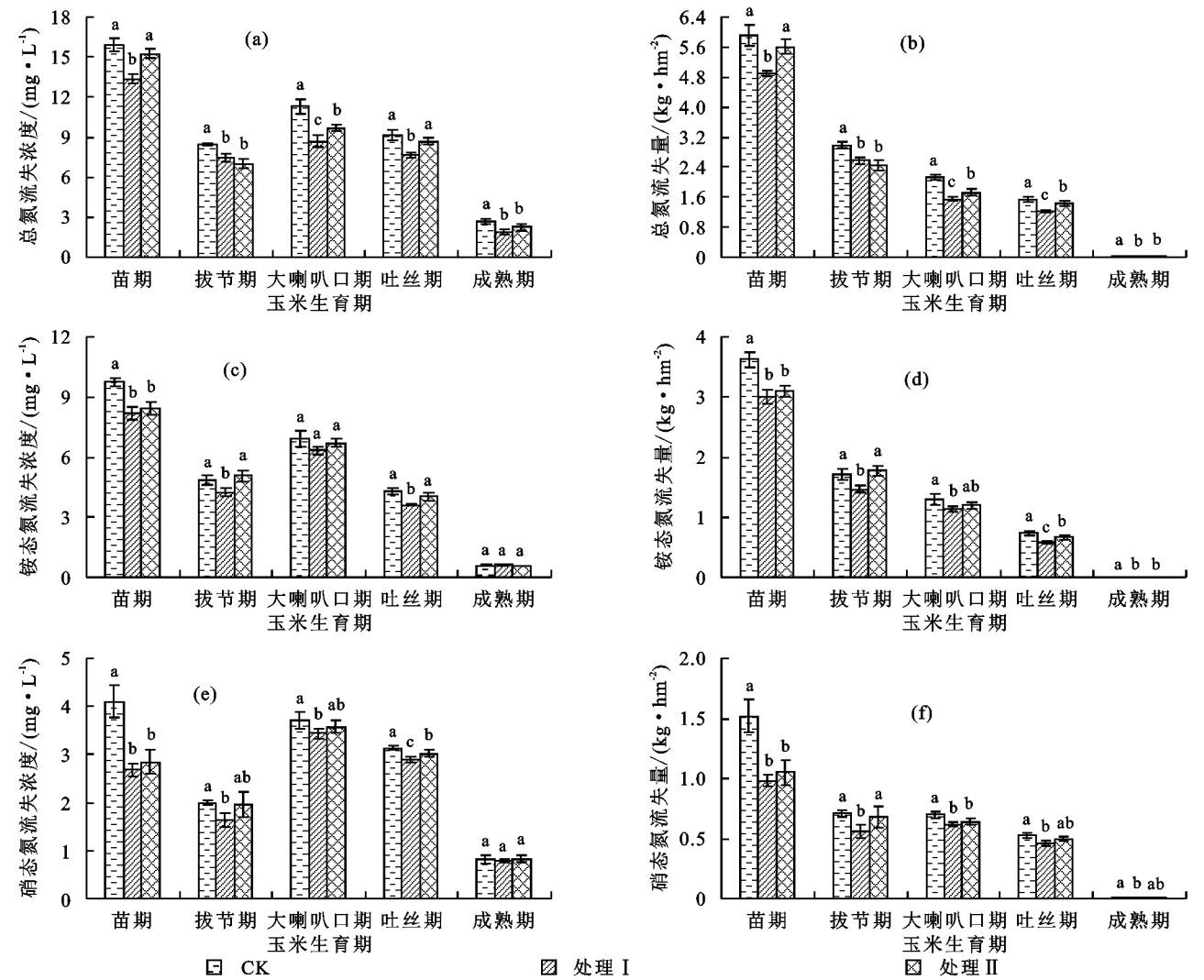
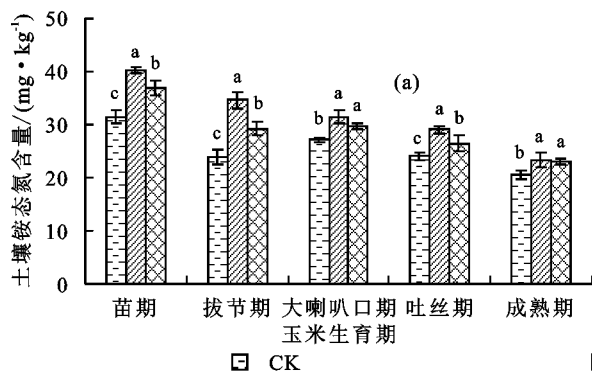


图 2 不同施肥处理下径流氮素流失的变化

2.2 不同施肥处理下土壤铵态氮和硝态氮含量变化 由图 3a 可知,各施肥处理下土壤铵态氮含量在苗期达到峰值后,随着生育期推进发展,处理 I、II 的土壤铵态氮含量总体呈逐渐降低的趋势,CK 处理则下降至大

喇叭口期有少量增加又呈逐渐下降趋势。较 CK 相比,处理 I 和处理 II 的土壤铵态氮含量均有显著提高,分别增加 13.94%~45.04%和 9.63%~22.39%,说明配施缓释肥可持续稳定地提供铵态氮以满足生育中后期的需求。

不同施肥处理下土壤硝态氮含量随生育期的发展呈下降—上升—下降的变化趋势(图 3b),除成熟期 CK 处理的土壤硝态氮含量略低于处理 I 和处理 II,各处理间无显著性差异,其余各生育期处理 I、II



土壤硝态氮含量较 CK 处理均有显著降低,分别降低 3.70%~29.91% 和 8.61%~12.55%,且硝态氮含量表现为 CK>处理 II>处理 I,说明缓释氮肥施用可以显著降低土壤中硝态氮含量。

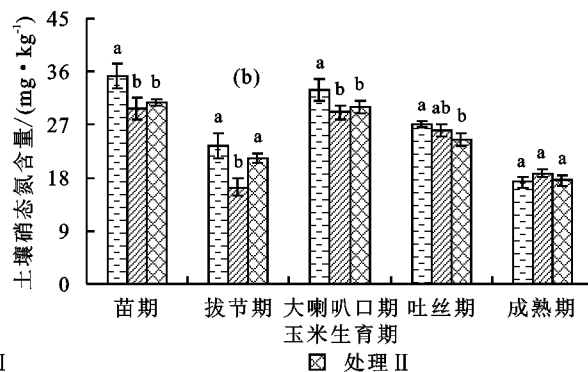


图 3 不同施肥处理下土壤铵态氮和硝态氮含量的变化

2.3 不同施肥处理对土壤微生物生物量氮的影响

各施肥处理的土壤微生物生物量氮(MBN)含量从苗期开始呈下降趋势至大喇叭口期含量有少量上升后又开始逐渐下降(图 4),整个生育期内处理 I、处理 II 的 MBN 含量较 CK 处理分别显著提高 22.13%~31.76% 和 11.80%~22.81%,且各处理的含量大小均表现为处理 I>处理 II>CK,缓释肥配施尿素能够有效增加土壤 MBN 含量。

2.4 不同施肥处理下青贮玉米生物产量及植株吸氮量

由图 5a 可知,与 CK 处理相比,处理 I、处理 II 的青贮玉米生物产量均有显著提高,分别增加 12.37% 和 8.67%,处理 I 和处理 II 之间无显著性差异,说明缓释氮肥配施尿素可以显著提高青贮玉米的生物产量,处理 I 的增产效果优于处理 II;缓释氮肥配施尿

素可以改善青贮玉米植株对氮素的吸收(图 5b),处理 I、II 的植株吸氮量均显著高于 CK,分别增加 70.46% 和 57.04%,其中处理 I 的植株吸氮量最高,为 278.30 kg/hm²,较处理 II 也有显著增加。

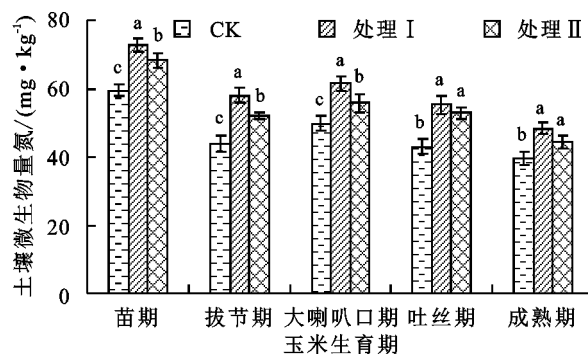


图 4 不同施肥处理对土壤微生物量氮的影响

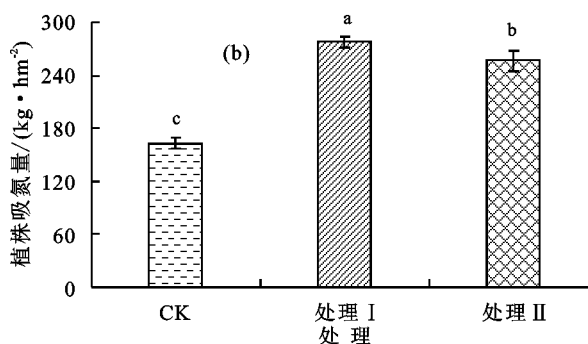
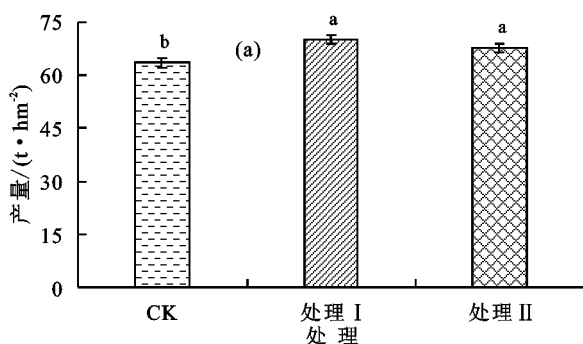


图 5 不同施肥处理下青贮玉米的生物产量及植株吸氮量

2.5 不同施肥处理对青贮玉米品质性状的影响

粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维是评价青贮饲料营养品质的重要指标,由表 3 可知,不同施肥处理下青贮玉米的品质指标均存在显著差异。处理 I 和处理 II 较 CK 处理相比显著提高植株的粗蛋白含量,分别提高 22.16% 和 9.13%,且处理 I、II 间也达到显著水平;与 CK 处理相比,处理 I、II 的粗脂肪含量分别显著增加 25.42% 和 16.38%,3 个处理间均呈现显著性差异,且含量呈处理 I>处

理 II>CK 的关系;处理 I 和处理 II 的玉米粗灰分含量较 CK 处理相比均有显著降低,分别减少 32.98% 和 16.49%,且处理 I、II 之间也有显著差异;较 CK 处理相比,缓释肥配施尿素处理在一定程度上降低植株 2 种洗涤纤维含量,处理 I、II 的中性洗涤纤维含量分别降低 13.15% 和 6.48%,酸性洗涤纤维含量分别降低 10.12% 和 3.59%。综合来看,配施缓释氮肥速溶诺泰克的处理 I 全株青贮饲料玉米的品质最好。

表 3 不同施肥处理对青贮玉米营养品质的影响

单位: %

处理	粗蛋白	粗脂肪	粗灰分	中性洗涤纤维	酸性洗涤纤维
CK	8.98±0.03c	1.77±0.05c	4.67±0.31a	31.17±0.15a	22.54±0.54a
处理 I	10.97±0.12a	2.22±0.07a	3.13±0.25c	27.07±0.41c	20.26±0.63b
处理 II	9.80±0.09b	2.06±0.06b	3.90±0.17b	29.15±0.36b	21.73±0.19a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

2.6 不同生育时期径流氮流失量、土壤养分和青贮玉米产量及吸氮量之间相关性分析

由表 4 可知,在玉米各生育时期,径流氮素流失量均与土壤铵态氮和微生物量氮含量呈显著负相关($p<0.05$)或极显著负相关关系($p<0.01$),苗期至吐丝期 4 个时期与硝态氮呈正相关关系,在拔节期和大喇叭口期差异达到极显著正相关($p<0.01$),成熟期时,径流氮流失与土壤硝态氮则呈负相关关系。除吐丝期的土壤碱解氮外,其余各生育时期土壤碱解氮、铵态氮和微生物量氮均与青贮玉米产量和植株吸氮量呈正相关关系,其中土壤铵态氮和微生物量氮与产量和吸氮量差异均呈极显著正相关关系($p<0.01$),除成熟期外,土壤硝态氮与产量和吸氮量为负相关关系,且在苗期和拔节期相关性达到极显著($p<0.01$)。且在全生育期内产量与植株氮吸收呈极显著正相关关系($p<0.01$),说明植株吸氮量的增加可以有助于玉米生长。

3 讨论

降雨和施肥均为影响径流氮流失浓度和流失量的主要因素^[19],本研究表明,尿素配施缓释肥处理较单施尿素处理相比,氮素流失浓度和流失量均有显著削减,这与丁志磊等^[20]的研究结果一致,其中径流流失与降雨量的增加呈正比,说明产流量与降雨显著相关。试验中,70%的氮素流失在生育前期,除了前期降雨量大外,尿素的氮素释放大于青贮玉米的吸收利用,导致土壤中氮素过剩,加大流失风险,缓释肥前期养分释放不致过多的特点则可以显著降低氮素的流失,并且前期玉米覆盖度较低,更易发生径流。随着生育期推进,降雨量有所减少,同时玉米对氮素吸收增加,生长中后期覆盖度增加,可以截留部分雨水,增加土壤表层粗糙度和紧实度,从而减缓径流流速,减少地表径流氮输出。

合理施肥可以提升耕地生产力含量并改善土壤环境^[21],与单施尿素相比,配施缓释肥可以在保证作物生长所需养分的同时减少养分的流失,提高肥料的利用效率。试验中单施尿素处理的土壤碱解氮和铵态氮含量显著低于尿素配施缓释肥处理,而硝态氮含量总体上显著增加,除在酸性土壤中自养硝化作用本身受到抑制外^[22],配施添加 DMPP 缓释肥的处理 I 通过有效抑制胺氧化酶等酶活性,明显阻断硝化作用,配施聚谷氨酸缓释氮肥的处理 II 则通过阻控尿素

的溶解,有效减缓铵态氮的生成和氧化,或者通过阴离子氨基酸聚合体吸附铵态氮,降低土壤硝态氮含量。说明尿素配施缓释肥可以有效调节氮素的释放转化过程,使得土壤在较长时间内保持高铵态氮含量水平^[23],一定程度上降低氮素损失,延长肥效期^[24],在空间和时间上使氮素供应更加平缓,且与玉米需氮水平基本吻合,进而能提高作物对氮的吸收利用^[25]。土壤微生物生物量在调控土壤物质养分循环与利用中起着重要的作用^[26],驱动着作物养分转化,同时也是衡量土壤健康状态的一个重要指标,可以精确反映土壤品质的改善和退化情况^[27],微生物生物量氮量也是氮素的储备库。试验中,单施尿素处理微生物生物量氮含量最低,尿素配施缓释肥处理的含量则有显著增加,一方面因为 pH 的降低抑制土壤微生物活性^[28];另一方面,缓释肥可以长期保持土壤中的可利用氮素,有利于微生物对氮的固定,所以处理 I、II 的微生物量氮含量较高。

青贮玉米是一种喜肥作物且对氮肥敏感^[29],有效施用氮肥有利于改善玉米农艺性状从而提高产量^[30],缓释肥可以在有效提高青贮玉米产量、改善玉米氮素吸收中起到积极作用^[31],地上生物量越高氮素的吸收则越高^[32];同时氮肥也是影响饲用玉米品质的主要因素之一,施用氮肥可以在增加植株粗蛋白和粗脂肪含量,积累热能的同时,降低其 2 种洗涤纤维含量^[33],从而促进动物的咀嚼及唾液的产生帮助动物吸收营养。本研究中尿素配施缓释肥处理的产量、氮吸收量、粗蛋白、粗脂肪含量较单施尿素处理均有显著提高,粗灰分、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的含量则显著降低,达到饲料玉米优质高产的标准。青贮玉米生育期内对养分需求吸收规律表现为“慢—快—慢”,单施尿素在施入土壤后因为其速效性,生育前期的土壤氮素水平远超玉米吸收水平,导致大量氮挥发、淋失等途径损失;而尿素配施缓释肥处理在拔节期前有尿素提供充足的氮素,缓释肥通过影响土壤生化环境,抑制酶活性或氨氧化古菌群落结构和丰度^[34],在玉米生长中后期保证了氮素持续释放,维持土壤供氮水平,满足全生育期的氮素需求,减少单施尿素造成的脱靶现象,聚谷氨酸还可以通过提高植物根际的养分吸收率,提升作物营养品质^[35]。缓释肥的施入还影响土壤的 pH,pH 的提高对于氮素的转

化和促进氮素吸收起到积极作用^[36],有利于青贮玉米的生长,达到提高产量、改善品质的目标。

表 4 不同生育时期径流氮流失、土壤养分与青贮玉米产量和吸氮量之间的相关性

生育 时期	项目	径流 总氮	径流 铵态氮	径流 硝态氮	碱解氮	铵态氮	硝态氮	微生物 物量氮	产量	植株 吸氮量
苗期	径流总氮	1.000	0.763 *	0.792 *	-0.398	-0.864 **	0.595	-0.807 **	-0.859 **	-0.801 **
	径流铵态氮		1.000	0.941 **	-0.106	-0.885 **	0.744	-0.900 **	-0.931 **	-0.942 **
	径流硝态氮			1.000	-0.183	-0.917 **	0.738 *	-0.843 **	-0.857 **	-0.963 **
	碱解氮				1.000	0.126	0.037	0.097	0.276	0.172
	铵态氮					1.000	-0.843 **	0.866 **	0.858 **	0.953 **
	硝态氮						1.000	-0.827 **	-0.702 *	-0.846 **
	微生物量氮							1.000	0.938 **	0.922 **
	产量								1.000	0.915 **
	植株吸氮量									1.000
拔节期	径流总氮	1.000	0.135	0.350	-0.340	-0.715 *	0.458	-0.751 *	-0.771 *	-0.844 **
	径流铵态氮		1.000	0.505	-0.707 *	-0.686 *	0.800 **	-0.615	-0.565	-0.418
	径流硝态氮			1.000	-0.539	-0.722 *	0.579	-0.760 *	-0.537	-0.639
	碱解氮				1.000	0.746 *	-0.901 **	0.774 *	0.782 *	0.755 *
	铵态氮					1.000	-0.820 **	0.920 **	0.887 **	0.885 **
	硝态氮						1.000	-0.798 **	-0.784 *	-0.751 *
	微生物量氮							1.000	0.927 **	0.946 **
	产量								1.000	0.915 **
	植株吸氮量									1.000
大喇叭口期	径流总氮	1.000	0.729 *	0.784 *	-0.845 **	-0.917 **	0.774 *	-0.909 **	-0.887 *	-0.960 **
	径流铵态氮		1.000	0.909 **	-0.616	-0.722 *	0.545	-0.856 **	-0.777 *	-0.763 *
	径流硝态氮			1.000	-0.552	-0.770 *	0.817 **	-0.798 **	-0.754 *	-0.791 *
	碱解氮				1.000	0.844 **	-0.524	0.897 **	0.920 **	0.800 **
	铵态氮					1.000	-0.749 *	0.894 **	0.907 **	0.918 **
	硝态氮						1.000	-0.595	-0.665	-0.751 *
	微生物量氮							1.000	0.933 **	0.882 **
	产量								1.000	0.915 **
	植株吸氮量									1.000
吐丝期	径流总氮	1.000	0.841 **	0.895 **	0.699 *	-0.779 *	0.152	-0.798 **	-0.761 *	-0.836 **
	径流铵态氮		1.000	0.867 **	0.508	-0.927 **	0.124	-0.855 **	-0.932 **	-0.840 **
	径流硝态氮			1.000	0.631	-0.681 *	0.161	-0.795 *	-0.775 *	-0.828 **
	碱解氮				1.000	-0.360	-0.175	-0.560	-0.394	-0.424
	铵态氮					1.000	-0.221	0.788 *	0.920 **	0.824 **
	硝态氮						1.000	-0.453	-0.405	-0.597
	微生物量氮							1.000	0.894 **	0.928 **
	产量								1.000	0.915 **
	植株吸氮量									1.000
成熟期	径流总氮	1.000	0.857 **	0.926 **	-0.536	-0.779 *	-0.620	-0.932 **	-0.886 **	-0.937 **
	径流铵态氮		1.000	0.781 *	-0.667 *	-0.700 *	-0.534	-0.800 **	-0.642	-0.733 *
	径流硝态氮			1.000	-0.565	-0.746 *	0.540	-0.855 **	-0.803 **	-0.793 *
	碱解氮				1.000	0.741 *	0.325	0.635	0.269	0.373
	铵态氮					1.000	0.448	0.889 **	0.658	0.791 *
	硝态氮						1.000	0.611	0.391	0.538
	微生物量氮							1.000	0.856 **	0.924 **
	产量								1.000	0.915 **
	植株吸氮量									1.000

注：* 表示在 $p<0.05$ 水平显著相关；** 表示在 $p<0.01$ 水平极显著相关。

本研究发现,与单施尿素相比,尿素配施缓释肥条件下青贮玉米的产量及植株吸氮量均表现较好,径流氮素流失量与土壤微生物量氮含量、产量及植株氮吸收量呈极显著负相关关系,土壤铵态氮和微生物量氮的含量与产量和植株吸氮量呈极显著正相关,产量与植株氮吸收呈极显著正相关关系,说明尿素配施缓释肥可以延长氮素释放,并且被土壤固持的氮素多于单施尿素^[37],氮以有机氮形式保存,提高氮在土壤的残留,增加玉米氮吸收,促进生长,减少径流氮损失。

4 结论

(1)尿素配施缓释肥可以显著减少径流氮素流失浓度,较单施尿素相比,处理 I、II 的总氮、铵态氮和硝态氮流失浓度削减量最高分别可达 2.59,1.60,1.42 mg/L 和 1.61,1.38,1.25 mg/L;总氮、铵态氮和硝态氮累计流失量削减率分别为 18.56%,16.19%,24.31% 和 10.75%,8.73%,17.08%。

(2)与单施尿素处理相比,尿素配施缓释肥可以显著增加土壤氮素利用,处理 I 和处理 II 土壤铵态氮含量较 CK 相比分别显著增加 13.94%~45.04% 和 9.63%~22.39%,土壤微生物量氮的含量分别显著增加 22.13%~31.76% 和 11.80%~22.81%,降低土壤硝化速率,加强土壤对氮素的固持作用,提高土壤的供氮能力。

(3)尿素配施缓释肥可以显著提高青贮饲用玉米的产量,较单施尿素相比,处理 I 和处理 II 分别显著增加 12.37% 和 8.67%,并且促进植株氮素的吸收,植株吸氮量较 CK 处理相比,处理 I、II 分别显著提高 70.46% 和 57.04%;同时可以通过有效保存玉米的粗蛋白和粗脂肪含量,降低粗灰分酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量进而改善青贮饲用玉米品质,达到高种植水平的预期目的,为云南推广应用高产、优质青贮玉米提供理论依据。

参考文献:

- [1] 陈正发,史东梅,何伟,等.1980—2015 年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析[J].农业工程学报,2019,35(15):256-265.
- [2] 金慧芳,史东梅,钟义军,等.红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2019,35(20):84-93.
- [3] 张丽,张乃明,张仕颖,等.AMF 和间作对作物产量和坡耕地土壤径流氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2019,35(22):216-224.
- [4] 赵小敏,邵华,石庆华,等.近 30 年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征[J].土壤学报,2015,52(4):298-305.
- [5] 李晓红,韩勇,郑阳华.三峡库区坡耕地土壤侵蚀治理效益分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2007,30(1):134-138.
- [6] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [7] 赵桂茹,安瞳昕,欧阳铖人,等.青贮玉米氮投入对坡耕地土壤侵蚀及水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):72-79.
- [8] 衣文平,孙哲,武良,等.包膜控释尿素与普通尿素配施对冬小麦生长发育及土壤硝态氮的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):687-693.
- [9] Trinh T H, Kushaari K, Shuib A S, et al. Modeling the release of nitrogen from controlled release fertilizer: Constant and decay release[J].Biosystems Engineering, 2015,130:34-42.
- [10] Qiu Y M, Wang Q, Zhu C J, et al. Deciphering metabolic responses of biosurfactant lichenysin on biosynthesis of poly- γ -glutamic acid[J].Applied Microbiology and Biotechnology,2019,103(5):4003-4015.
- [11] 郑沛,宋付朋,马富亮.硫膜与树脂膜控释尿素对小麦不同生育时期土壤氮素的调控及其产量效应[J].水土保持学报,2014,28(4):122-127.
- [12] 李玉浩,何杰,王昌全,等.控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J].土壤,2018,50(3):469-475.
- [13] 张宁宁,赵德强,韩云良,等.尿素与缓释肥同一氮素水平下配施对黄土台塬区春玉米生长的影响[J].西北农业学报,2020,29(11):1642-1650.
- [14] 王雪薇,刘涛,褚贵新.3 种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):54-61.
- [15] 刁倩,王斌,曹辉,等. γ -聚谷氨酸对水稻、玉米、大豆生长及产量的影响[J].南方农业,2020,14(28):48-52.
- [16] 王思阳,李广浩,陆卫平,等.缓释肥施用时期对春播鲜食糯玉米产量和籽粒品质的影响[J].核农学报,2021,35(9):2136-2144.
- [17] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4 版.中国环境科学出版社,2002:254-258.
- [18] Haynes R. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J].Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2):211-219.
- [19] 晏军,吴启侠,朱建强,等.适雨灌溉下不同施肥模式对机插稻田水环境及产量的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(2):56-63.
- [20] 丁志磊,祖艳群,陈建军,等.施用不同比例缓释肥对农林复合系统地表径流氮磷流失过程的影响[J].云南农业大学学报,2016,31(2):335-340.
- [21] 王爱斌,宋慧芳,张流洋,等.生物肥和菌肥对蓝莓苗生长及土壤养分的影响[J].南京林业大学学报,2020,44(6):63-70.
- [22] 吴晓荣,张蓓蓓,余云飞,等.硝化抑制剂对典型茶园土壤尿素硝化过程的影响[J].农业环境科学学报,2017,

- 36(10):2063-2070.
- [23] 周旋, 吴良欢, 董春华, 等. 氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(5):1804-1814.
- [24] 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在黑土和褐土中对尿素氮转化的调控效果[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4):1352-1360.
- [25] 宁建凤, 崔理华, 艾绍英, 等. 2 种硝化抑制剂对土壤氮转化的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):144-151.
- [26] 丁济娜, 李东坡, 武志杰, 等. 土壤理化性质与生物活性对持续施用缓/控释尿素肥料的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7):1769-1778.
- [27] Gupta R, Swaim S, Rai A P. Impact of integrated application of vermicompost, farmyard manure and chemical fertilizers on okra (*Abelmoschus esculentus* L.) performance and soil biochemical properties[J]. International Journal of Chemical Studies, 2019, 7(2):1714-1718.
- [28] 覃潇敏, 郑毅, 汤利, 等. 玉米与马铃薯间作对根际微生物群落结构和多样性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(6):919-928.
- [29] 刘颖慧, 郭明, 贾树利, 等. 影响青贮玉米品质因素研究进展[J]. 作物杂志, 2018(2):6-10.
- [30] 王晓维, 杨文亨, 缪建群, 等. 玉米一大豆间作和施氮对玉米产量及农艺性状的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5275-5282.
- [31] 王忠美, 赵敏, 朱玲玲, 等. 氮缓释复合肥对坝上地区青贮玉米产量及氮素利用率的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(5):888-893.
- [32] Afreh D, Zhang J, Guan D H, et al. Long-term fertilization on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in a double maize cropping system in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180:259-267.
- [33] 王佳, 李阳, 贾倩民, 等. 种植密度与施氮对河西灌区青贮玉米产量与品质及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(1):60-73.
- [34] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 等. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2077-2083.
- [35] 唐海洋, 冯涛, 同琳静, 等. 聚谷氨酸硫基复合肥在甜高粱和多花黑麦草上的肥效[J]. 草业科学, 2017, 34(10):2117-2123.
- [36] Wang L F, Du H C, Han Z Q, et al. Nitrous oxide emissions from black soils with different pH[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(6):1071-1076.
- [37] 刘诗璇, 陈松岭, 蒋一飞, 等. 控释氮肥与普通氮肥配施对东北春玉米氮素利用及土壤养分有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5):939-947.
- (上接第 37 页)
- [21] 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(5):617-624.
- [22] De Lima J L M P, Carvalho S C P, De Lima M I P. Rainfall simulator experiments on the importance of when rainfall burst occurs during storm events on runoff and soil loss[J]. Zeitschrift fur Geomorphologie, 2013, 57(1):91-109.
- [23] 王月月, 吴元芝, 范雯华, 等. 不同降雨条件下沂蒙山区耕层土壤团聚体特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1):92-99.
- [24] Bu C F, Wu S F, Yang K B. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils[J]. International Journal of Sediment Research, 2014, 29(4):491-500.
- [25] Chamizo S, Canton Y, Rodriguez-Caballero E, et al. Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2012, 452:130-138.
- [26] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Effects of erosion degree and rainfall intensity on erosion processes for Ultisols derived from quaternary red clay[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 249:226-236.
- [27] 冯志倩, 娄永才, 齐星圆, 等. 汇流强度、坡度及侵蚀泥沙颗粒分形对工程堆积体坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):127-134.
- [28] 谭贞学, 王占礼, 王莎, 等. 黄土坡面细沟侵蚀过程[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6):1-5.
- [29] 任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 等. 基于水蚀预报模型的黄土高原水平阶减流阻蚀效应模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(14):5067-5077.
- [30] Kateb H E, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. Catena, 2013, 105:1-10.
- [31] 马金龙, 许欢欢, 王兵, 等. 黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1):45-49.
- [32] Zhang F B, Wang Z L, Yang M Y. Validating and improving interrill erosion equations[J]. PLoS One, 2014, 9(2):e88275.
- [33] Kinnell P I A. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596/597:32-34.