

沼液不同氮素水平对狼尾草产量、质量 氮素利用率和土壤剖面硝态氮分布的影响

黄秀声^{1,2,3}, 黄勤楼^{3,4}, 翁伯琦^{1,2,3}, 冯德庆^{1,2}, 陈钟佃^{1,2}, 钟珍梅^{1,3}

(1.福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013; 2.福建省草业工程技术研究中心, 福州 350013; 3.福建省丘陵地区循环农业工程技术研究中心, 福州 350013; 4.福建省农业科学院畜牧兽医研究所, 福州 350013)

摘要:采用田间试验,研究了不同氮素水平的沼液(设 N0~N6 共 7 个氮素水平,即每次浇灌折纯氮 0、5、10、20、40、80、160 kg·hm⁻²,每 45 d 刈割周期浇灌 3 次)对“闽牧 6 号”狼尾草产量、质量、氮素利用效率和土壤剖面全氮及硝态氮含量的影响。结果表明,“闽牧 6 号”狼尾草 3 个刈割期和全年干草产量均随着沼液氮素浓度的增加而增加,其中 N6 处理全年干草总产量达 27.51 t·hm⁻²,显著高于 N0~N5 处理($P<0.05$)。植株硝酸盐含量、全氮含量和牧草粗蛋白产量也随着沼液氮素水平的提高呈上升的趋势,牧草刈割期的硝酸盐含量为 355.1~572.5 mg·kg⁻¹,均低于牧草畜牧利用的有毒限量指标 0.25%,牧草粗蛋白产量最高达 2459 kg·hm⁻²(N6 处理)。对全年牧草生产的氮素利用率、氮素生理利用率、粗蛋白生产效率、氮素农学生产效率、氮素偏生产力等 5 个氮素利用效率指标分析可知,随着沼液中氮素水平的提高,氮素利用效率逐渐降低。牧草地全氮含量和硝态氮含量随着沼液氮素水平的增加而增加,不同土层间(0~60 cm)随着土层深度的增加而降低。土壤硝态氮含量的增加,表明高氮量的沼液可能增加土壤硝态氮淋失的风险。

关键词:沼液;狼尾草;氮素水平;氮利用率;硝态氮

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)08-1652-07 doi:10.11654/jaes.2014.08.026

Yield, Quality and N Utilization Efficiency of *Pennisetum* and Nitrate-N Distribution in Soil Profile as Influenced by Different N Levels of Biogas Slurry

HUANG Xiu-sheng^{1,2,3}, HUANG Qin-lou^{3,4}, WENG Bo-qi^{1,2,3}, FENG De-qing^{1,2}, CHEN Zhong-dian^{1,2}, ZHONG Zhen-mei^{1,3}

(1. Agricultural Ecology Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2. Fujian Engineering and Technology Research Center for Hilly Prataculture, Fuzhou 350013, China; 3. Fujian Engineering and Technology Research Center for Recycling agriculture in Hilly Areas, Fuzhou 350013, China; 4. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: A field trial was conducted to study the effects of different N levels of biogas slurry on yield, quality, and N utilization efficiency of *P. americanum* × *P. purpureum* CV. Minmu 6, and the distributions of total-N and nitrate-N in soil profile. Biogas slurry was applied at 0, 5, 10, 20, 40, 80 kg N·hm⁻² and 160 kg N·hm⁻² of nitrogen equivalent for three times during each cutting period (45 days). *Pennisetum* hay yields increased with increasing N levels. The annual hay yield was the highest in the treatment with 160 kg N·hm⁻² or 27.51 t·hm⁻² biogas slurry, significantly higher than that in the other treatments ($P<0.05$). Plant nitrate contents, total N contents and forage protein yields also increased with increasing amount of nitrogen applied. The concentrations of plant nitrate were 355.1~572.5 mg·kg⁻¹ during three forage harvesting, lower than the toxic nitrate limit of 0.25%. The maximum crude protein yield was 2459 kg·hm⁻² at the highest biogas slurry rate. Nitrogen utilization efficiency decreased with increased rates of biogas slurry nitrogen. Soil total-N and nitrate-N increased as biogas slurry nitrogen rates increased, but decreased with soil depth in 0 cm to 60 cm soil profile. Elevated nitrate-N in soil implies that applying biogas slurry of high nitrogen content may increase the risk of nitrate leaching.

Keywords: biogas slurry; *Pennisetum*; nitrogen level; N utilization rate; nitrate-N

收稿日期:2013-11-21

基金项目:福建省科技计划项目(2013J01105);国家科技支撑项目(2012BAD14B15, 2011BAD17B02);福建省发改委五新项目(闽发改投资[2012]931)

作者简介:黄秀声(1972—),男,福建闽清人,副研究员,主要从事循环农业和草地生态研究。E-mail:hxs706@163.com

东南地区是我国农业高度集约化的重要区域之一,其最大特点是高投入、高产出、高消耗,在取得显著经济效益的同时,也面临着生产资源紧缺、环境污染加剧的巨大压力,尤其是日益发展的规模化养殖业。2012年我国生猪存栏数达 4.759×10^8 头,牛存栏数达 1.034×10^8 头^[1],生猪和牛养殖年产生粪便约 2.5×10^9 t^[2]。虽然一些规模化养殖场基本按环保要求配套了沼气池等污染物处理系统,但处理后的沼液废水中COD、N、P等含量依然较高,未能达到有关排放标准。大中型沼气工程产生的沼液若不及时充分利用,会给周边环境造成二次污染,其处置和利用问题已引起普遍关注^[3-5]。狼尾草属牧草(*Pennisetum*)是热带、亚热带地区广泛应用的多年生禾本科牧草,具有抗逆性强、生物量大、适口性好等特点,是高质高效的畜禽青饲料。近年来,一些养殖场引进种植狼尾草属牧草,利用它来消纳养殖场沼液^[6],构建“畜-沼-草-畜”的循环利用途径^[7-9],取得了良好的经济效益和生态效益,但仍缺少沼液养分水平对狼尾草产量和牧草地生态承载力等方面的研究。为此,本研究通过田间小区试验,研究沼液不同氮素水平对狼尾草产量、质量、硝酸盐和粗蛋白含量以及土壤剖面硝态氮分布等影响,并评价草地吸纳沼液的氮素利用率,为今后狼尾草属牧草消纳沼液及循环利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况

试验于2012年在福建省农业科学院农业生态研究所福州泉头牧草基地进行,该基地位于东经 $119^{\circ}20'$,北纬 $26^{\circ}07'$ 。试验地为休耕3年的旱地,土壤类型为红壤,土壤基本理化性质为:pH 6.55,有机质 $26.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $70.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $182.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $237.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.1.2 供试牧草品种

牧草品种为“闽牧6号”狼尾草(*P.americanum* × *P.purpureum* CV.Minmu 6),由福建省农业科学院农业生态研究所牧草品种资源中心提供。采用种茎扦插育苗后移栽至大田。

1.2 试验设计

设7个沼液不同氮素水平,即每次浇灌折纯氮0、5、10、20、40、80、160 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别用N0(CK)、N1、N2、N3、N4、N5、N6表示。每个处理3次重复,共21个小区,随机区组排列。小区面积 10 m^2 ($2 \text{ m} \times 5$

m),每小区间隔1.5 m。

试验地4月28日整畦,5月7日狼尾草草苗移栽,移栽成活后,5月20日浇灌沼液。沼液取自福州市闽侯县某一大型养殖场,每次浇施前测定沼液全N含量,每个处理按试验设计(折纯氮)称取不同量的沼液,浇灌时用自来水稀释至相同体积,采用喷壶浇灌,不施沼液处理浇灌等量自来水,每隔15 d浇灌1次。牧草刈割间隔为45 d^[10],每个刈割期浇灌沼液3次。

1.3 样品采集与测定

试验期间每45 d刈割1次,牧草留茬高度为10 cm,牧草刈割时间为7月4日、8月18日、10月2日,分别用T1、T2、T3表示。每次刈割测定小区牧草干草产量、全氮和粗蛋白含量,以及地上部硝酸盐含量。在试验结束时,分别取0~20、20~40、40~60 cm土层的土样,测定土壤剖面全氮和硝态氮含量。植株硝酸盐、全氮、粗蛋白含量,以及土壤全氮、硝态氮含量均采用常规方法测定^[11-12]。

氮素生产效率评价指标参考江丽华等的方法^[13-15],评价指标氮素利用率(Recovery rate, REN)=(UN-U0)/FN×100;氮素农学利用率(Agronomic efficiency, AEN)=(YN-Y0)/FN;氮素偏生产力(Partial factor productivity, PFPN)=YN/FN;氮素生理利用率(Physiological efficiency, PEN)=(YN-Y0)/(UN-U0)。Y0、U0代表不施沼液的对照牧草产量和氮素吸收;YN、UN代表施沼液处理的牧草产量和氮素吸收;FN代表施沼液处理氮素用量。粗蛋白质生产效率(Crude protein production efficiency, CPPE)为每个小区的粗蛋白质产量与施氮量之比,其中粗蛋白产量=粗蛋白含量×干草产量^[8]。

试验数据用SPSS 11.0统计软件进行分析。

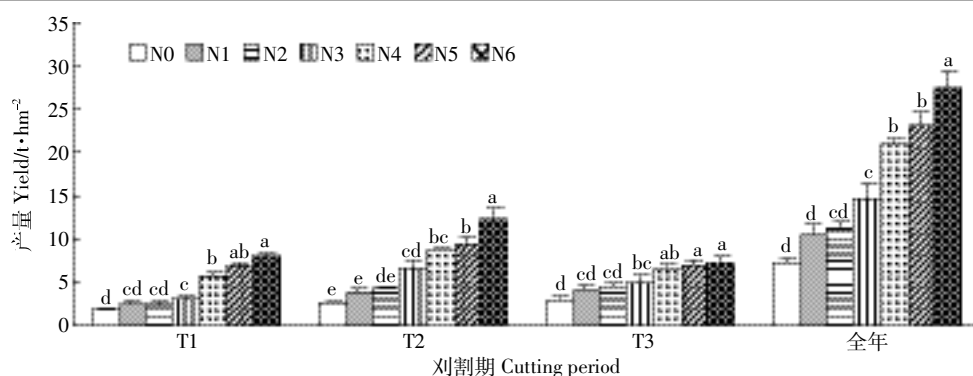
2 结果与分析

2.1 对狼尾草产量的影响

图1表明,T1、T2、T3刈割期和全年牧草干草产量均随着沼液氮素水平的增加而增加。在3个刈割期中,相同处理间均以T2刈割期产量最高。与不施沼液相比,不同刈割期均表现为N1和N2增产不显著($P>0.05$),N3~N6增产显著($P<0.05$)。全年牧草产量以N6为最高,达 $27.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于N0~N5($P<0.05$)。与对照相比,施用沼液全年牧草产量增加了42.88%~276.8%,其中N3~N6增产显著($P<0.05$)。

2.2 对狼尾草植株硝酸盐累积的影响

牧草硝酸盐累积量是衡量牧草品质的重要指标



不同英文字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。下同

Different letters mean significant difference at 0.05 level. The same below

图1 沼液氮素水平对狼尾草干草产量的影响

Figure 1 Effects of different N levels of biogas slurry on yields of *Pennisetum* hay

之一。由图2可见,3个刈割期牧草地上部硝酸盐含量虽均随着沼液氮素水平的提高呈递增趋势,但均低于牧草畜牧利用的硝酸盐限量指标0.25%^[8,16]。不同刈割期相同处理均以T1刈割期硝酸盐含量最高。与N0(CK)相比,浇施沼液后T1、T2和T3刈割期牧草硝酸盐含量分别增加了13.47%~27.36%,0.13%~25.07%和10.66%~41.78%。T1和T3期N1~N6处理牧草地上部硝酸盐含量均显著高于对照N0 ($P<0.05$),T2期N1~N3处理与对照差异不显著 ($P>0.05$),N4~N6处理与对照差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 对狼尾草植株全氮含量及粗蛋白产量的影响

植株氮素含量是影响牧草品质的重要因素之一,从表1看出,3个刈割期相同处理间均以T3期牧草全氮含量最高,相同刈割期不同处理间均以N6处理为最高,分别为1.10%、1.15%和1.88%。在T1刈割期,N6处理显著高于N0~N5处理 ($P<0.05$),而N0~N5处理间差异均不显著 ($P>0.05$)。在T2刈割期,N0~N6各处理间的植株全氮含量差异均不显著 ($P>0.05$)。

在T3刈割期,N6处理显著高于N0~N4处理 ($P<0.05$),而N0、N1、N3和N4间差异尚不显著 ($P>0.05$)。

由图3可知,随着沼液氮素水平的提高,T1、T2、T3刈割期和全年牧草粗蛋白产量均上升。与CK相比,T1、T2、T3刈割期粗蛋白产量分别比对照增加了

表1 各刈割期狼尾草植株全氮含量(%)

Table 1 Total nitrogen contents of forage in different cutting periods(%)

处理 Treatment	T1	T2	T3
N0	0.71±0.03bc	1.01±0.06a	1.26±0.01d
N1	0.63±0.01c	1.10±0.05a	1.42±0.01bcd
N2	0.75±0.02b	1.09±0.04a	1.51±0.08bc
N3	0.71±0.04bc	1.09±0.06a	1.33±0.09cd
N4	0.71±0.04bc	1.06±0.06a	1.46±0.07bcd
N5	0.73±0.04bc	1.15±0.05a	1.66±0.11ab
N6	1.10±0.07a	1.15±0.01a	1.88±0.07a

注:同一列不同英文字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column mean significance at 0.05 level. The same below.

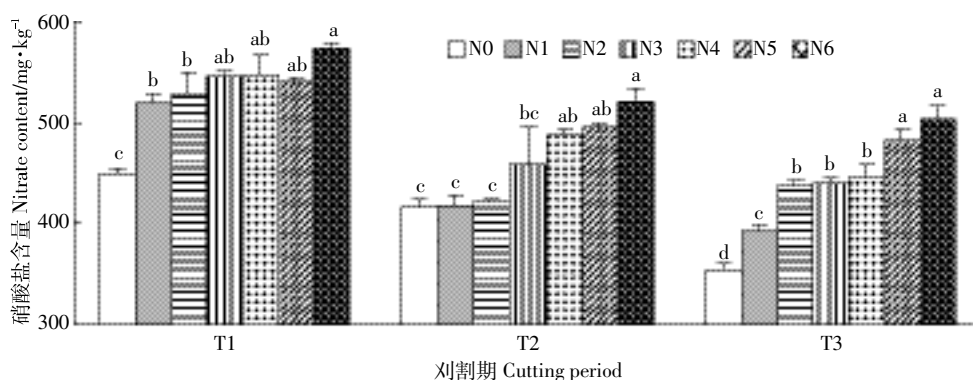


图2 沼液氮素水平对狼尾草植株硝酸盐含量的影响

Figure 2 Effects of different N levels of biogas slurry on nitrate contents of *Pennisetum*

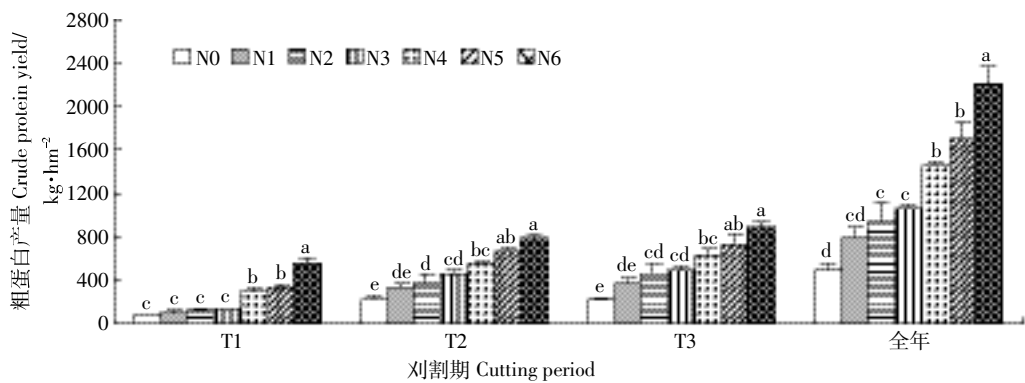


图 3 各刈割期牧草粗蛋白产量
Figure 3 Crude protein yields of forage in different cutting periods

18.31%~610.4%、57.18%~272.7%和 75.49%~315.0%。其中 T1 期的 N4~N6 处理,T2 和 T3 期的 N2~N6 处理与对照差异显著($P<0.05$)。从全年收获的植株粗蛋白产量比较看出,N1~N5 处理全年粗蛋白产量比对照 N0 增加了 58.82%~343.3%,N6 处理显著高于其他处理($P<0.05$),结合硝酸盐和全氮含量可推知,狼尾草有较强的吸收和转化氮的能力。

2.4 对狼尾草氮素利用效率的影响

氮素利用率、粗蛋白生产效率、氮素生理利用率、氮素农学生产效率和氮素偏生产力等 5 个指标分析结果表明(表 2),除氮素生理利用率以 N4 处理为最高外,其余 4 个指标均随着沼液氮素水平的增加而呈降低的趋势。氮素利用率、粗蛋白生产效率、氮素生产效率和氮素偏生产力分别从 N1 处理的 45.34%、17.84%、59.45% 和 255.01% 降低到 N6 处理的 20.08%、1.72%、14.15% 和 20.26%。这表明随着沼液氮素水平的增加,狼尾草植株全氮含量增加(表 1),但并不能提高牧草植株的氮素利用效率。沼液中的氮素利用效率越低,牧草地氮素残留和损失率将越高。

2.5 对土壤剖面全氮和硝态氮含量的影响

如表 3 所示,0~20、20~40、40~60 cm 土层氮素含量总体随着沼液氮素水平的增加而增加,随着土壤剖

表 3 土壤不同土层全氮含量(%)			
Table 3 Total N contents in different soil layers(%)			
处理	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
N0	0.142 4±0.010 2c	0.045 7±0.007 8c	0.035 5±0.016 8b
N1	0.144 3±0.011 0c	0.044 7±0.011 2c	0.040 3±0.004 9b
N2	0.138 4± 0.009 4c	0.060 5±0.015 7c	0.033 5±0.002 7b
N3	0.149 5± 0.004 5c	0.044 8±0.012 4c	0.049 5±0.008 9b
N4	0.159 4±0.051 3bc	0.118 4±0.015 4b	0.097 2±0.038 0a
N5	0.195 5±0.021 0ab	0.119 5±0.008 3b	0.106 1±0.004 6a
N6	0.221 1±0.011 5a	0.145 0±0.010 2a	0.121 4±0.001 5a

面深度的增加而降低。0~20 cm 土层 N5~N6 处理,20~40 cm 和 40~60 cm 土层 N4~N6 处理显著高于对照($P<0.05$),表明浇施沼液可提高土壤氮素残留量,且较高的沼液氮素水平(N5~N6)可显著提高土壤氮素残留量。
从土壤剖面硝态氮分布来看(表 4),土壤硝态氮含量随着剖面深度的加深而降低。不同处理间,土层硝态氮含量随着沼液氮素水平的增加而增加。与对照 N0 相比,0~20 cm 和 20~40 cm 的 N3~N6 处理,以及 40~60 cm 的 N5~N6 处理的硝态氮含量显著升高($P<0.05$),表明随着沼液中氮素水平的提高,也将加大牧草地硝态氮淋失的风险^[17-18]。

表 2 沼液氮素水平对狼尾草氮素利用率的影响(%)					
Table 2 Effects of different N levels of biogas slurry on nitrogen utilization rates of <i>Pennisetum</i> (%)					
处理	氮素利用率	粗蛋白生产效率	氮素生理利用率	氮素生产效率	氮素偏生产力
N0	—	—	—	—	—
N1	45.34±5.10ab	17.84±3.63a	90.20±20.38ab	59.45±8.83a	255.01±75.89a
N2	48.37±8.14a	10.40±3.38b	65.15±12.46c	42.30±12.22ab	140.08±40.35b
N3	39.04±0.80bc	5.55±1.05c	83.48±17.32abc	32.05±8.78ab	80.94±18.49bc
N4	34.14±0.31cd	3.36±1.12c	94.76±3.24a	26.57±0.95b	51.01±26.21c
N5	26.57±0.92de	2.35±0.40c	80.17±4.05abc	19.69±4.22b	31.92±4.22c
N6	20.08±4.98e	1.72±0.31c	67.60±2.38bc	14.15±3.77b	20.26±3.77c

表4 土壤剖面硝态氮含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 4 Nitrate contents in soil profile($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
N0	0.61±0.16d	0.56±0.05e	0.47±0.01c
N1	0.63±0.06d	0.59±0.06de	0.46±0.06c
N2	0.68±0.11d	0.62±0.08de	0.54±0.05c
N3	1.27±0.24c	0.92±0.08d	0.57±0.04c
N4	3.14±0.06b	2.61±0.25c	0.68±0.07bc
N5	5.97±0.29a	5.00±0.01b	0.80±0.06b
N6	6.35±0.20a	6.53±0.08a	2.35±0.16a

2.6 沼液氮素水平与狼尾草产量、植株硝酸盐含量等指标的相关性分析

沼液氮素水平与狼尾草全年产量、粗蛋白产量、土壤剖面硝态氮含量、植株硝酸盐含量的相关分析表明(表5),沼液氮素水平与4个指标均可拟合二次曲线方程。相关性分析表明(表6),沼液氮素水平、牧草全年总产量、植株硝酸盐含量、土壤剖面硝态氮含量、粗蛋白产量之间都呈极显著正相关($P<0.01$),说明沼液氮素水平的增加,虽可增加牧草干草和粗蛋白产量,但也必将增大牧草硝酸盐吸收和土层硝态氮累积的风险。因此,牧草地浇施沼液,其氮素水平应控制在牧草硝酸盐限量指标和土壤硝态氮累积风险阈值内。

3 讨论

利用沼气发酵系统处理规模畜禽养殖场废水是综合治理畜牧业污染的主要途径之一,其产生沼液的农田循环利用是处理沼液最直接、最有效的途径。目前沼液再利用研究主要集中在沼液作为肥料对作物产量和品质的影响。王卫平等^[19]研究沼液替代化肥浇灌柑桔园表明,300 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 沼液浇灌可使柑桔产量增加8.59%,并改善了柑桔的部分品质指标;唐微等^[20]研究认为,沼液用量在11.25~18.75 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,稻谷产量比化肥处理增加了6.78%~9.93%,并提高了稻米中蛋白质等营养成分含量。本研究表明,3个刈割期和全年狼尾草干草产量和粗蛋白产量均随着沼液氮素水平的提高而上升,全年干草产量和粗蛋白产量分别比不施沼液处理增加了42.88%~276.85%和58.82%~343.3%,其中N6处理全年生产期施氮总量达1440 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,全年干草总产量达27.51 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。全年牧草生产的氮素利用率、氮素生理利用率、粗蛋白生产效率、氮素农学生产效率、氮素偏生产力等指标分析表明,利用牧草地消纳的沼液量越大,狼尾草氮素利用效率就越低,氮素的残留率和损失率就越大。氮素是影响禾本科牧草产量和质量的重要因子,但氮肥过量施用

表5 狼尾草产量、植株硝酸盐含量、土壤剖面硝态氮含量、粗蛋白产量和施氮量的二次回归模型
Table 5 Quadratic regression models for *Pennisetum* annual yield, plant nitrate content, soil nitrate content, and crude protein yield and nitrogen application rate

项目 Item	模型 Model	R^2
牧草总产量 Annual yield	$y=1.139\ 7x+0.929\ 4$	0.968 6*
粗蛋白产量 Crude protein yield	$y=8.457\ 3x^2+21.572x+157.64$	0.987 3**
土壤剖面硝态氮含量 Nitrate content in the soil profile	$y=0.577\ 4x^2-2.279x+3.479\ 5$	0.985 3**
植株硝酸盐含量 Nitrate content	$y=-1.159\ 3x^2+28.329x+385.1$	0.983 7**

注:*为差异显著($P<0.05$);**为差异极显著($P<0.01$)。下同。

Note: *;Significant difference($P<0.05$);**;Super significant difference($P<0.01$). The some below.

表6 狼尾草产量、植株硝酸盐含量、土壤剖面硝态氮含量、粗蛋白总量和施氮量相关性分析
Table 6 Correlationship between *Pennisetum* annual yield, nitrate plant content, soil nitrate content, crude protein yield and nitrogen application rate

项目 Item	施氮总量 Total nitrogen	牧草总产量 Annual yield	植株硝酸盐含量 Nitrate content	土壤剖面硝态氮含量 Nitrate content in the soil profile	粗蛋白产量 Crude protein yield
施氮总量 Total nitrogen	1.00				
牧草总产量 Annual yield	0.91**	1.00			
植株硝酸盐含量 Nitrate content	0.85**	0.96**	1.00		
土壤剖面硝态氮含量 Nitrate content in the soil profile	0.97**	0.95**	0.85**	1.00	
粗蛋白产量 Crude protein yield	0.95**	0.99**	0.96**	0.96**	1.00

也将降低牧草氮素利用率^[8,21-22],且对土壤及水体造成污染^[23-25]。部分研究认为,氮肥分次施用有利于提高作物氮素利用率^[15,26]。因此,应进一步优化沼液施肥方式,以促进氮素在狼尾草中的吸收转化,提高沼液养分利用率。

硝态氮是大多数植物从土壤中吸收氮素的主要形态,美国国家畜牧标准规定,饲料作物干物质中硝酸盐含量 0~0.25% 安全,0.25%~0.5% 警戒,0.5%~1.5% 危险,超过 1.5% 有毒。由于牧草硝酸盐含量超过 0.25% 时,对家畜均会造成不同程度的毒害,因此国内外把牧草硝酸盐含量超过 0.25% 作为有毒限量指标^[8,16]。本研究利用沼液浇灌狼尾草后,牧草地上部植株硝酸盐含量虽随着沼液氮素水平的提高呈上升的趋势,但牧草硝酸盐含量为 355.1~572.5 mg·kg⁻¹,均低于牧草硝酸盐有毒限量标准。说明在本研究沼液浇灌水平范围内(全年施 N 0~1440 kg·hm⁻²),利用狼尾草草地吸纳养殖场沼液,牧草硝酸盐含量不会影响牧草青饲料的饲用安全。目前,对于牧草硝酸盐积累研究主要集中在无机氮肥及畜禽粪便等利用方面^[8,16,22],沼液对牧草硝酸盐吸收的研究则鲜见报道,对于沼液中的氮素形态对狼尾草属牧草植株硝酸盐累积的影响过程尚需深入研究。

本研究表明,沼液氮素水平高可引起土壤硝态氮淋失的风险,如 N6 处理在 40~60 cm 土壤剖面硝态氮含量显著高于其他处理。因此利用草地系统吸纳养殖场沼液,也应考虑草地的生态承载力。沼液还田还林利用是实现农牧废弃物资源高效循环利用的有效途径之一,姜丽娜等^[3,27]认为,水稻生长季和休闲季沼液稻田消解的安全容量分别可达 540 kg N·hm⁻²·a⁻¹ 和 1500 kg N·hm⁻²·a⁻¹。目前有关草地系统消纳沼液的生态承载力方面的研究报道较少,应建立草地消纳沼液的定位站,长期监测草地浇灌沼液的安全容量。本试验也仅对沼液草地生态承载力进行了初步研究,有关研究尚需深入。

4 结论

利用沼液不同氮素水平浇灌“闽牧 6 号”狼尾草,植株硝酸盐含量、全氮含量和牧草粗蛋白产量均随着沼液氮素水平的提高而上升,全年干草产量和粗蛋白产量分别比不施沼液处理增加了 42.88%~276.9% 和 58.82%~343.3%,其中 N6 处理全年生产期施氮总量达 1440 kg·hm⁻²,全年干草和粗蛋白产量最高,分别达到 27.51 t·hm⁻² 和 2459 kg·hm⁻²。各处理牧草刈割

期的硝酸盐含量为 355.1~572.5 mg·kg⁻¹,均低于牧草畜牧利用的有毒限量指标 0.25%。随着沼液中氮素水平的提高,氮素利用效率逐渐降低;牧草地全氮含量和硝态氮含量则随着沼液氮素水平的增加而增加,不同土层间(0~60 cm)随着土层深度的增加而降低。土壤硝态氮含量的增加,表明高氮量的沼液可能将增加土壤硝态氮淋失的风险。因此,今后在狼尾草草地沼液最大施用量及长期灌溉对生态环境的影响等方面还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 2013[M].北京:中国统计出版社,2013.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2013.
- [2] 李艳春,黄毅斌.1990—2008 年福建省农业废弃物产生量估算[J].福建农业学报,2011,26(4):652—655.
LI Yan-chun, HUANG Yi-bin. Quantity of agricultural wastes in Fujian from 1990 to 2008[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(4):652—655.
- [3] 姜丽娜,王强,李艾芬,等.休闲稻田消解沼液生态效应及其对水稻安全生产影响研究[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2483—2490.
JIANG Li-na, WANG Qiang, LI Ai-fen, et al. The ecological effects of fallow paddy field disposal biogas slurry and its impact on the following rice safety production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2483—2490.
- [4] 李丙智,王桂芳,秦晓飞,等.沼液配施钾肥对果园土壤理化特性和微生物及果实品质影响[J].中国农业科学,2010,43(22):4671—4677.
LI Bing-zhi, WANG Gui-fang, QIN Xiao-fei, et al. Effect of application of biogas slurry with potassium on orchard soil properties and soil microorganism and fruit quality[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(22):4671—4677.
- [5] 靳红梅,常志州.追施沼液对不同 pH 土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1648—1655.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou. Effect of soil pH on CH₄ and N₂O emissions after topdressing digested pig slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1648—1655.
- [6] 黄勤楼,黄秀声,冯德庆,等.规模化猪场污染及废弃物循环利用研究[J].中国农学通报,2007,23(10):175—178.
HUANG Qin-lou, HUANG Xiu-sheng, FENG De-qing, et al. Research on the pollution situation of scale pig farms and waste circular utilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(10):175—178.
- [7] 黄秀声,黄水珍,陈钟佃,等.不同施肥处理的杂交狼尾草打浆后饲喂育肥猪效果研究[J].家畜生态学报,2008,29(5):69—73.
HUANG Xiu-sheng, HUANG Shui-zhen, CHEN Zhong-dian, et al. Studies on effect of hybrid pennisetum with different fertilization treatments pulped and fed to fattening pigs[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2008, 29(5):69—73.

- [8] 黄勤楼, 钟珍梅, 黄秀声, 等. 施氮对禾本科牧草硝酸盐积累和氮素回收率的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(3): 47-52.
HUANG Qin-lou, ZHONG Zhen-mei, HUANG Xiu-sheng, et al. Effect of N application on nitrate accumulation and nitrogen recovery ratio in grass forage[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(3): 47-52.
- [9] 黄秀声, 陈钟佃, 黄勤楼, 等. 杂交狼尾草打浆后饲喂早中期妊娠怀孕母猪效果研究[J]. 草业科学, 2011, 28(11): 2037-2041.
HUANG Xiu-sheng, CHEN Zhong-dian, HUANG Qin-lou, et al. Effects of feeding pulped hybrid pennisetum on early and mid-gestation sows[J]. *Prataculturae Science*, 2011, 28(11): 2037-2041.
- [10] 林永辉, 唐龙飞, 黄秀声, 等. 刈割频率对杂交狼尾草生长和产量的影响[J]. 福建农业学报, 2006, 21(4): 389-392.
LIN Yong-hui, TANG Long-fei, HUANG Xiu-sheng, et al. Effect of defoliation frequency on the growing characteristics and yield of *Pennisetum americanum* × *P. purpureum*[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 21(4): 389-392.
- [11] 李合生, 孙 群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 123-124.
LI He-sheng, SUN Qun, ZHAO Shi-jie, et al. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 123-124.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 42-49.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 42-49.
- [13] 江丽华, 刘兆辉, 张文君, 等. 氮素对大葱产量影响和氮素供应目标值的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 890-896.
JIANG Li-hua, LIU Zhao-hui, ZHANG Wen-jun, et al. Study on the effect of nitrogen on green Chinese onion yield and N supplying target value[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 890-896.
- [14] Hall M H, Bowersox D B, Stout R C. Optimum nitrogen fertilization of cool-season grass in the Northeast USA[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(4): 1023-1027.
- [15] 马迎辉, 王玲敏, 黄玉芳, 等. 氮肥运筹对冬小麦干物质累积、产量及氮素吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(1): 187-192.
MA Ying-hui, WANG Ling-min, HUANG Yu-fang, et al. Effect of nitrogen application on dry matter accumulation, yield and nitrogen utilization efficiency of winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(1): 187-192.
- [16] 钟小仙, 江海东, 顾洪如, 等. 施肥对杂交狼尾草植株硝酸盐含量的影响[J]. 草业科学, 2004, 21(10): 29-32.
ZHONG Xiao-xian, JIANG Hai-dong, GU Hong-ru, et al. The influence of fertilizer on nitrate content in hybrid *Pennisetum*[J]. *Prataculturae Science*, 2004, 21(10): 29-32.
- [17] 郝小雨, 高 伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 538-547.
HAO Xiao-yu, GAO Wei, WANG Yu-jun, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of tomato and soil nitrate leaching loss under greenhouse condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 538-547.
- [18] 张翠翠, 闫凌云, 赵 鹏, 等. 施氮对夏玉米氮素利用及土壤硝态氮积累的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(18): 57-61.
ZHANG Cui-cui, YAN Ling-yun, ZHAO Peng, et al. The effect of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency by summer corn and on the accumulation of soil nitrate nitrogen[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(18): 57-61.
- [19] 王卫平, 陆新苗, 魏章焕, 等. 施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2300-2305.
WANG Wei-ping, LU Xin-miao, WEI Zhang-huan, et al. Influence of applying biogas slurry on yield and quality of citrus and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2300-2305.
- [20] 唐 微, 伍 钧, 孙百晔, 等. 沼液不同施用量对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2268-2273.
TANG Wei, WU Jun, SUN Bai-ye, et al. Effects of application amounts of biogas slurry on yield and quality of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2268-2273.
- [21] 王永军, 王空军, 董树亭, 等. 施氮对墨西哥玉米植株硝态氮累积及产量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 345-350.
WANG Yong-jun, WANG Kong-jun, DONG Shu-ting, et al. Effects of nitrogen application on nitrate accumulation and yield of *euchlaena Mexicana*[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 345-350.
- [22] 黄勤楼, 钟珍梅, 陈 恩, 等. 施氮水平与方式对黑麦草生物学特性和硝酸盐含量的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(1): 103-112.
HUANG Qin-lou, ZHONG Zhen-mei, CHEN En, et al. Effects of different N application methods and levels on the biological characteristics and nitrate content of ryegrass[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(1): 103-112.
- [23] 周 琴, 赵超鹏, 曹春信, 等. 不同氮肥基追比对多花黑麦草碳氮转运和种子产量的影响[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 47-53.
ZHOU Qin, ZHAO Chao-peng, CAO Chun-xin, et al. Effects of N dressing ratio on carbon and nitrogen transport and on grain yield of *Lolium multiflorum*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(4): 47-53.
- [24] 施建军, 马玉寿, 董全民, 等. “黑土型”退化草地人工植被施肥试验研究[J]. 草业学报, 2007, 16(2): 25-31.
SHI Jian-jun, MA Yu-shou, DONG Quan-min, et al. Studies of fertilizer application on the artificially vegetated “Black soil type” degenerated grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(2): 25-31.
- [25] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies: I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in Early 21 Century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [26] 郭天才, 宋 晓, 冯 伟, 等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 886-892.
GUO Tian-cai, SONG Xiao, FENG Wei, et al. Utilization and balance of nitrogen and proper application amount of nitrogen fertilizer in winter wheat in high-yielding regions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 886-892.
- [27] 姜丽娜, 王 强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1328-1336.
JIANG Li-na, WANG Qiang, CHEN Ding-jiang, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1328-1336.