

不同饲养方式下的羊产排污系数对比研究

李丹阳, 王娟, 袁京, 亓传仁, 张燕卿, 丁京涛, 王惠惠, 沈玉君, 李国学

引用本文:

李丹阳, 王娟, 袁京, 亓传仁, 张燕卿, 丁京涛, 王惠惠, 沈玉君, 李国学. 不同饲养方式下的羊产排污系数对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 672-681.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0546>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

袁凯, 熊苏雅, 梁静, 李彦明, 乔玉辉, 李花粉, 陈清

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1837-1842 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0142>

土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探

管伟豆, 肖然, 李荣华, 刘翔宇, 潘君廷, 黄永春, 张增强, 郭堤

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 969-977 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1151>

A/O与SBR工艺处理猪场废水厌氧消化液对比研究

蔡英英, 韩志刚, 邓良伟, 王文国

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 648-657 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0895>

长三角地区典型季节规模化奶牛场氨排放特征研究

倪远之, 徐昶, 沈根祥

农业环境科学学报. 2022, 41(5): 1141-1154 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1014>

不同化学生态型紫苏的镉耐性及镉富集能力研究

韩博伦, 肖清铁, 谢惠玲, 游武, 郑新宇, 林瑞余

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2106-2113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0161>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李丹阳, 王娟, 袁京, 等. 不同饲养方式下的羊产排污系数对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 672–681.

LI D Y, WANG J, YUAN J, et al. Comparative study of pollutant production and the discharge coefficient of sheep under different feeding methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 672–681.

不同饲养方式下的羊产排污系数对比研究

李丹阳^{1,2,3}, 王娟^{1,3}, 袁京², 亓传仁², 张燕卿^{1,3}, 丁京涛^{1,3}, 王惠惠^{1,3}, 沈玉君^{1,3*}, 李国学^{2*}

(1. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125; 2. 中国农业大学资源与环境学院农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193; 3. 农业农村部种养结合重点实验室, 北京 100125)

摘要: 为了对比研究不同饲养方式下的羊产排污系数, 在我国云贵高原牧区选择一家以半放牧半舍饲为饲养方式的规模化羊场, 在长江中下游丘陵地区选择一家全舍饲的规模化羊场作为试验地点, 对不同饲养阶段的贵州半细毛羊和湖羊的产污系数和排污系数进行了测定。结果表明: 产污系数方面, 贵州半细毛羊的平均粪便量、尿液量、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、铜(Cu)和锌(Zn)产污系数分别为 $0.97 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $0.53 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $318.01 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $7.12 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $2.03 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $2.89 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $41.00 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $14.77 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$; 湖羊的数值分别为 $0.99 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $0.56 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $384.76 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $8.98 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $1.56 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $1.46 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $41.34 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、 $41.84 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 。粪便量与饲料量、尿液量与饮水量之间均呈显著正相关。排污系数方面, 排污系数除受产污系数影响外, 还与粪便量、粪尿中污染物浓度、饲养方式等有关。排污系数与产污系数的比值(排产比)与羊饲养方式和清粪方式有关, 以全舍饲为饲养方式的羊场各污染物排产比均低于半放牧半舍饲羊场。因此, 在不考虑成本和养殖规模的前提下, 为了控制羊养殖业对环境造成的污染, 应首选全舍饲的饲养方式。

关键词: 羊; 饲养方式; 产污系数; 排污系数

中图分类号: X713; X502 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)03-0672-10 doi:10.11654/jaes.2022-0546

Comparative study of pollutant production and the discharge coefficient of sheep under different feeding methods

LI Danyang^{1,2,3}, WANG Juan^{1,3}, YUAN Jing², QI Chuanren², ZHANG Yanqing^{1,3}, DING Jingtao^{1,3}, WANG Huihui^{1,3}, SHEN Yujun^{1,3*}, LI Guoxue^{2*}

(1. Institute of Energy and Environmental Protection, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 2. Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Key Laboratory of Plant and Breeding Combination, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: To compare pollutant production and the discharge coefficient of sheep under different feeding methods, a large-scale sheep farm with half pasturing and half pen feeding in the pastoral areas of the Yunnan-Guizhou Plateau, and another sheep farm with full pen feeding in the hilly areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River in China were selected as experimental sites. Pollutant

收稿日期: 2022-05-30 录用日期: 2022-09-13

作者简介: 李丹阳(1994—), 女, 山西朔州人, 博士, 从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail: lidanyang@cau.edu.cn

*通信作者: 沈玉君 E-mail: shenyj09b@163.com; 李国学 E-mail: ligx@cau.edu.cn

基金项目: 农业农村部种养结合重点实验室开放课题(ZY2020-4); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-39-19)

Project supported: The Key Laboratory of Integrated Planting and Breeding of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China (ZY2020-4); Special Project for Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-39-19)

production and the discharge coefficient of Guizhou semi-fine wool sheep and Hu sheep were measured at different feeding stages. The results showed that the pollutant production coefficient of manure, urine, chemical oxygen demand, total nitrogen, total phosphorus, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, copper, and zinc were $0.97 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.53 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, $318.01 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $7.12 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $2.03 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $2.89 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $41.00 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.76 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, and $14.77 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, for every Guizhou semi-fine wool sheep and $0.99 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.56 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, $384.76 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $8.98 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $1.56 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $1.46 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $41.34 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.38 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, and $41.84 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, for every Hu sheep. There were significant positive relationships between feces weight and feed weight and between urine volume and water volume. The pollutant discharge coefficient was affected by the pollutant production coefficient, and was related to feces weight, the concentration of pollutants in feces and urine, and the feeding method. The ratio of the pollutant discharge coefficient to the production coefficient was related to the sheep feeding method and the excrement cleaning method. This ratio was lower for sheep farms with full pen feeding than those with half pasturing and half pen feeding. Therefore, if the cost and breeding scale are not considered, to control the environmental pollution caused by the sheep breeding industry in China, the full pen feeding method is recommended.

Keywords: sheep; feeding method; pollutant production coefficient; pollutant discharge coefficient

随着人们生活水平的不断提高,膳食结构发生变化,对肉食品的需求持续增加。羊肉具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇、营养丰富、绿色健康等特点,备受人们青睐。目前,我国的羊饲养方式包括放牧、舍饲及半放牧半舍饲三种^[1]。其中,放牧式主要在我国草原地带应用较广,如云贵高原牧区、青藏高原牧区、北方牧区或半农半牧区等;舍饲式适用于地势较平坦的丘陵地区,如长江中下游地区。不同地区的地理环境、气候条件、经济发展水平等差异较大,经过长期的自然及人为选择,部分羊品种表现出明显的窄生态适应性,如贵州半细毛羊和湖羊分别是云贵高原牧区和长江中下游地区的代表性羊品种,只能在特定地区、地理环境及饲养方式下发挥其生长优势和生产性能^[2]。

近年来,为了满足急剧增加的羊产品市场需求,我国羊养殖业规模逐渐扩大,羊粪污产生及排放量相应增加。截至2020年底,羊年底存栏量为30 654.8万只^[3],按照每只羊每日产粪污量 2.6 kg 计算^[4],每年羊粪污产生量达到了2.91亿t,占2021年全国畜禽粪污年产量(30.5亿t)的9.5%。如果羊粪污未经过合理处理处置而随意排放,会给周围环境及人体健康带来极大的威胁^[5]。对羊粪进行合理处理及利用的前提是明确在一定时间范围内污染物的产生量,及经过处理后向环境中排放的污染物质,畜禽养殖产排污系数法是各国广泛使用的一种量化养殖业污染状况的方法^[6]。国内外已有部分学者对羊粪中污染物含量及产排污系数进行了研究。美国农业工程师协会编制了动物粪便产生和特性参数标准,列出了山羊及绵羊的粪尿产生量及粪尿中的污染物含量^[7]。邹德强等^[8]对不同年龄、性别的四川简阳大耳山羊的粪尿污染物含量进行了分析,研究表明幼年山羊粪中有机质、总氮(TN)、总钾(TK)含量高于成年组,公山羊粪便中

TN、TK含量显著高于母山羊,母山羊尿液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、总磷(TP)和TK含量显著高于公山羊。杨硕等^[9]对不同季节下内蒙古某规模化肉羊场的杜泊羊和小尾寒羊粪便中污染物含量进行了测定,结果表明季节对污染物含量影响较大,两个品种羊粪中有机质、TN、TP、Cu含量无显著差异,而小尾寒羊粪便中的Zn含量比杜泊羊高17.7%。

衡量羊养殖业对环境造成的实际影响与排污系数密切相关,除产污系数的影响外,排污系数还与清粪方式、污水处理方式和粪污利用方式有关。清粪方式分为干清粪、水冲粪和垫草垫料;污水处理方式分为厌氧处理、厌氧处理+好氧处理、厌氧处理+好氧处理+深度处理等;粪污利用方式包括直接农业利用、生产有机肥、生产沼气方式,废水主要是直接农业利用^[10]。庄犁等^[11]的研究发现西南地区生猪养殖小区采用干清粪的清粪方式、厌氧+好氧的污水处理方式,所得排污系数远低于同地区其他养殖规模的排污系数。王国利等^[12]分析了广西某规模化肉牛场的产排污系数,研究表明采用干清粪将收集的粪污贮存堆沤,然后用于种植业肥料或食用菌基料,粪尿利用率较高,所得的肉牛产排污系数低于国家发布的中南地区肉牛产排污系数。刘瀚扬等^[13]对不同季节和生长阶段成都麻羊的产排污系数进行了测定,结果表明羊有机质、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、Cu、Zn和Cd排出量随季节变化而不同,排污系数呈现显著的季节性,表现为夏季高,冬季低。

目前对羊产排污系数的研究多集中于对不同地区、品种及饲养阶段进行测定分析,对排污系数的研究较少,且对不同饲养方式下的羊产排污系数缺乏对比研究。因此,本研究选择地理环境、气候条件、饲养方式、羊品种差异较大的两个羊场进行羊产排污系数对比研究,

这对于掌握我国羊养殖业污染物的产生及排放规律,制订羊养殖的环境污染控制策略具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验羊场

遵循代表性、科学性和可操作性的原则,分别在西南云贵高原牧区和东南长江中下游丘陵地区各选择一家规模化羊养殖场。两个羊场均为“国家现代农业产业技术体系”综合试验站所属的定点养殖场,具备一定的科学试验条件,可代表区域规模化羊场的实际养殖水平。试验时间为2019年10—11月。

西南地区夏季高温多雨,冬季温和少雨,牧草资源丰富,其中毕节市具有高海拔、高寒、高湿的气候特点。所选西南羊场(a)位于贵州省毕节市赫章县威奢乡大寨村(27°5'6"N, 104°45'26"E),是一家以保种繁育为目的的羊场,属于贵州半细毛羊综合试验站。海拔1 610 m,属亚热带季风性湿润气候。全场总占地面积约66 667 m²,建有标准羊舍7栋60圈,羊舍占地面积6 500 m²。年存栏300只贵州半细毛羊,其抗病力强、耐粗放、毛肉两用、适合放牧养殖、且对牧草选择不严^[14]。该场饲养方式为半放牧半舍饲,地面类型为漏缝地板,清粪方式采用机械刮粪板。

东南地区夏季高温多雨,冬季低温少雨,地形比较平坦,以平原丘陵为主。所选东南羊场(b)位于浙江省杭州市余杭区径山镇(30°21'41"N, 119°51'18"E),是一家以保种繁育和肉羊出售为目的的羊场,属于杭州综合试验站。海拔30 m,属亚热带季风性气

候。全场总占地面积约28 000 m²,建有标准羊舍20栋165圈,羊舍占地面积5 430 m²。年存栏1 680只湖羊,具有繁殖性能高、生长发育快、耐高温高湿、泌乳、肉用和羔皮用性能优良等特点^[15]。该场饲养方式为全舍饲,地面类型为漏缝地板,清粪方式采用人工干清粪。

1.2 试验羊

在两个试验羊场根据不同饲养阶段和性别选择最具代表性的四组试验羊,分别为育肥母羊、育肥公羊、空怀母羊和成熟公羊,每组随机选择5只。由于羊品种及养殖目的不同,两个羊场在同一饲养阶段羊只的月龄不尽相同,试验羊基本特征见表1。

1.3 饲养管理

a场放牧草地资源包括黑麦草、鸭茅、三叶草等,补喂精粗混合饲料。精饲料与粗饲料质量配比为1:10。精饲料为豆粕、麦麸、玉米,粗饲料为全株青贮玉米。b场饲料为精粗混合料,精饲料与粗饲料质量配比为1:8。精饲料包括玉米粉、预混料、碳酸氢钙、盐,粗饲料包括花生秧、玉米秸秆、豆腐渣。根据养殖场正常的饲喂量进行定时定量喂食,饲料理化特性见表2。

1.4 试验设计及测定指标

1.4.1 产污系数试验

采取单只定位栏的方式,准确称重每只羊每日的进食量、饮水量、粪便量及尿液量,连续5 d。采用四分法分取3份粪便样品,每份0.5 kg,其中1份用于测定含水率,另外2份加4.5 mol·L⁻¹硫酸200 mL进行预

表1 试验羊基本特征

Table 1 Basic characteristics of experimental sheep

饲养阶段 Feeding stage	性别 Gender	西南羊场 Southwest sheep farm		东南羊场 Southeast sheep farm	
		月龄/月	平均质量	月龄/月	平均质量
		Age	Average weight/(kg·只 ⁻¹)	Age	Average weight/(kg·只 ⁻¹)
育肥期 Fattening period(F1)	母 Ewe	12	33.86±2.55	6	23.08±2.43
育肥期 Fattening period(F2)	公 Ram	12	40.13±5.08	6	43.71±4.04
空怀期 Nonpregnant period(F3)	母 Ewe	24	54.46±2.64	12	50.68±5.55
成熟期 Maturation period(F4)	公 Ram	24	52.63±4.96	12	61.19±6.39

表2 饲料理化特性

Table 2 Physicochemical properties of feed

羊场 Sheep farm	含水率 Moisture content/%	有机质 Organic matter/%	粗蛋白 Crude protein/(mg·g ⁻¹)	TN/ (mg·g ⁻¹)	TP/ (mg·g ⁻¹)	Cu/ (μg·g ⁻¹)	Zn/ (μg·g ⁻¹)
西南羊场 Southwest sheep farm	78.03±0.84	92.36±0.42	126.10±4.48	16.76±0.68	2.59±0.16	0.41±0.02	1.90±0.14
东南羊场 Southeast sheep farm	54.41±4.69	89.21±1.92	109.33±5.71	15.50±0.88	2.54±0.11	0.25±0.01	2.83±0.12

注:含水率以湿基计算,其他指标均以干基计算,下同。

Note: Moisture content is calculated on a wet basis, while the other indexes are calculated on a dry basis, the same below.

处理,于-20℃保存。TN含量采用有机肥料测定方法(NY/T 525—2021)测定;COD采用重铬酸盐法(GB 11914—1989)测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量采用肥料的测定方法;TP、Cu和Zn含量均采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。

将尿液充分混匀后现场测定pH值,取出1.2 L按每100 mL加入4.5 mol·L⁻¹硫酸2 mL和4滴甲苯进行预处理,分装到2个试剂瓶中,于4℃保存。用便携式电导率仪测定EC值;COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别采用重铬酸盐法(GB 11914—1989)、蒸馏-中和滴定法(HJ 537—2009)、紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)测定;TN含量采用凯氏定氮法(GB 11891—1989)测定;TP、Cu和Zn含量均采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。

1.4.2 排污系数试验

由于羊场饲养方式及清粪方式不同,根据实际情况对监测点进行布置改造。在两个羊场均分别按育肥母羊(F1)、育肥公羊(F2)、空怀母羊(F3)和成熟公羊(F4)4个饲养阶段,随机选择与产污系数试验羊体质量相近的排污系数试验羊,每组5只。为了模拟西南地区的放牧方式,在a场周围的草场利用铁丝网圈定4个模拟放牧区,每个放牧区面积为900 m²(30 m×30 m),在8:00—18:00将排污系数试验羊养殖在相应的放牧区域,粪污直接排放到草地上,不进行收集。18:00至次日8:00将试验羊圈养在4个圈舍中,8:00待羊出舍后利用机械刮粪板清除圈舍粪污。b场采用全舍饲饲养方式,将4组排污系数试验羊圈养在4个不同的圈舍中,于每日8:00人工清粪,准确记录每个羊场每日各试验圈舍中的实际清粪量。试验连续进行5 d。

1.5 产排污系数计算方法

参考董红敏等^[6]对畜禽养殖产排污系数的计算方法,结合羊养殖中干清粪方式不产生污水的特性,对公式进行优化。试验数据在Excel中整理后,采用SPSS 25.0进行单因素方差分析。

1.5.1 产污系数计算公式

产污系数是指在正常的饲养和管理条件下,每只羊每日所产生的原始污染量,计算公式为:

$$FP_{i,j,k} = QF_{i,j} \times CF_{i,j,k} + QU_{i,j} \times CU_{i,j,k} \quad (1)$$

式中:FP代表每只羊产污系数,mg·d⁻¹;QF为产粪量,kg·d⁻¹;CF为粪便中污染物浓度,mg·kg⁻¹;QU为尿流量,L·d⁻¹;CU为尿液中污染物浓度,mg·kg⁻¹。i、j、k分别代表动物种类、生长阶段、污染物种类。下同。

1.5.2 排污系数计算公式

排污系数是指在正常的饲养和管理条件下,每只羊每日所产生的前述污染物排放到外部环境的量,计算公式为:

$$FD_{i,j,k} = QF_{i,j} \times CF_{i,j,k} \times (1 - \eta_f) + QF_{i,j} \times CF_{i,j,k} \times \eta_f \times (1 - \eta_u) + QU_{i,j} \times CU_{i,j,k} \times (1 - \eta_l) \quad (2)$$

式中:FD代表每只羊排污系数,mg·d⁻¹;η_f为粪便收集率,%;η_u为粪便利用率;η_l为尿液利用率。

1.5.3 排产比

排产比是指排污系数与产污系数的百分比,计算公式为:

$$r_{i,j,k} = \frac{FD_{i,j,k}}{FP_{i,j,k}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:r_{i,j,k}为排污系数和产污系数比值,%。

2 结果与讨论

2.1 产污系数

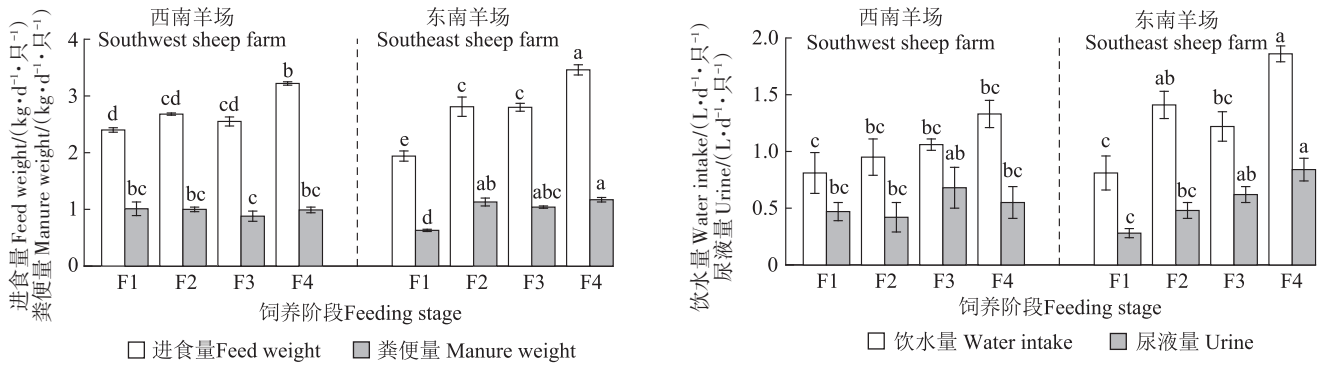
2.1.1 进食饮水量及粪尿量

羊每日进食饮水量及粪尿量见图1。贵州半细毛羊的进食量、饮水量分别为2.71 kg·d⁻¹·只⁻¹和1.04 L·d⁻¹·只⁻¹,湖羊分别为2.75 kg·d⁻¹·只⁻¹和1.33 L·d⁻¹·只⁻¹。同一月龄下,公羊的进食量和饮水量比母羊的大;同一性别下,月龄越大,进食量和饮水量越大。进食量、饮水量与羊只体质量均具有显著正相关性(r=0.867和0.791,P<0.05)。

贵州半细毛羊的粪便量、尿液量分别为0.97 kg·d⁻¹·只⁻¹和0.53 L·d⁻¹·只⁻¹,湖羊分别为0.99 kg·d⁻¹·只⁻¹和0.56 L·d⁻¹·只⁻¹,低于其他学者^[17]所得出的羊粪日排泄量1.9 kg·d⁻¹·只⁻¹,羊尿0.6 L·d⁻¹·只⁻¹,这是由于不同学者所采用的试验羊及粪尿收集方法不同。本研究采用的粪尿收集方式可有效避免撒漏及水分蒸发,且定位到单只个体,样本具有一定的代表性和准确性。湖羊的平均进食饮水量及粪尿量均高于贵州半细毛羊的。两个羊品种的粪便量/饲料量范围为30.75%~42.08%,尿液量/饮水量范围为34.04%~64.15%。粪便量与饲料量、尿液量与饮水量之间均呈显著正相关(r=0.804和0.769,P<0.05)。

2.1.2 粪便样本各项指标测定值

不同饲养阶段试验羊的粪便样本各项指标值见图2,同一羊场不同饲养阶段试验羊之间差异较小。a、b羊场的试验羊粪便平均含水率分别为73.46%和64.68%,与贾伟等^[18]所得羊粪含水率74.7%接近。a场羊粪的平均TN含量和TP含量分别为19.01 mg·g⁻¹



同一指标不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicated significant difference in same index at $P < 0.05$. The same below

图1 不同饲养阶段试验羊每只每日进食量饮水量及粪尿量

Figure 1 Daily amounts of feed, water, manure and urine of per experimental sheep at different feeding stages

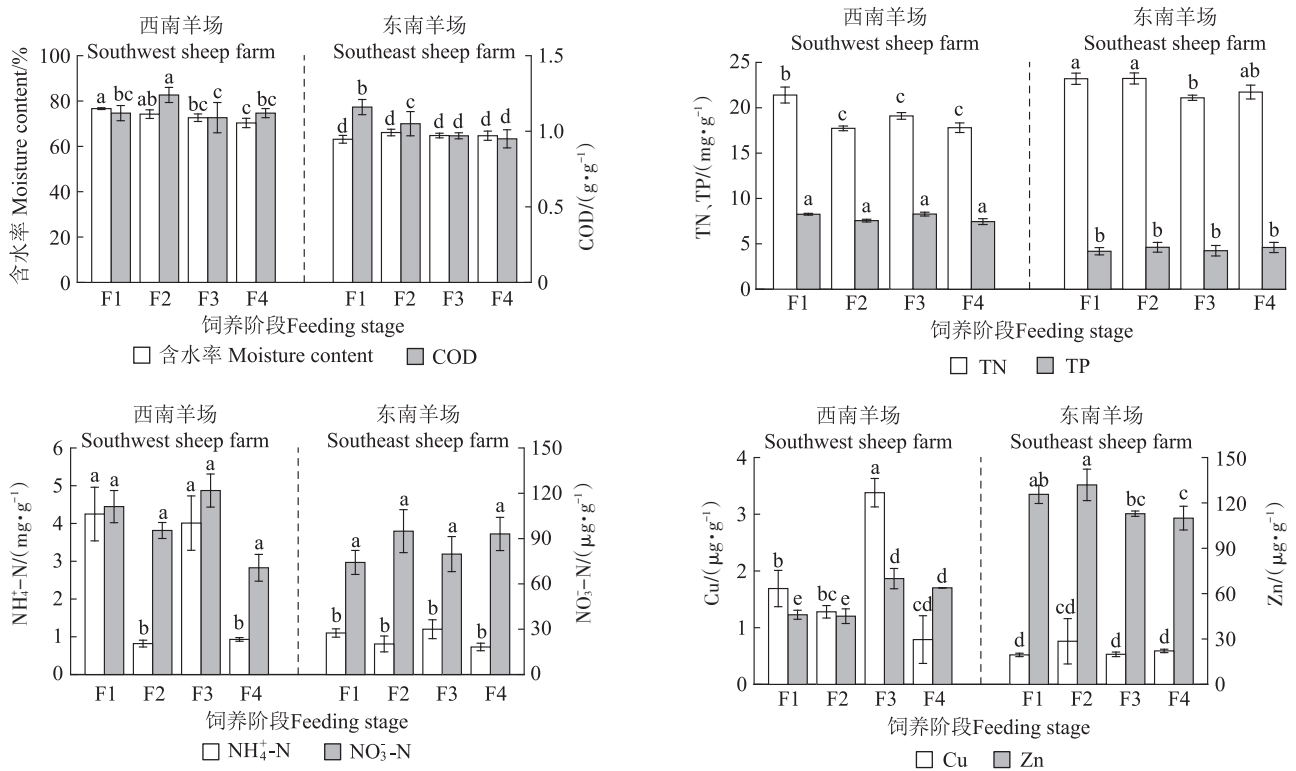


图2 粪便样本各项指标值

Figure 2 Values of each indicator of manure sample

和 $7.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, b 场分别为 $22.32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $4.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与部分学者所得 TN 含量为 $19.5 \sim 23.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [13]、TP 含量为 $5.60 \sim 7.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [13]、TN 含量为 $15.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [19] 接近, 而与其他学者得出的羊粪 TN、TP 含量分别为 $10.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 相比数值较高 [20]。a、b 羊场粪便平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量分别为 2.50 、 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 与其他学者测得的 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [21]、 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [22] 接近。在同一品种、相同月龄条件下, 母羊粪便的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量均高于公羊。a、b 羊场羊粪平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量分别为 99.76 、

$85.49 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。a、b 羊场的羊粪平均 Cu 含量分别为 1.79 、 $0.60 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, Zn 含量分别为 56.23 、 $120.08 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 这与其他学者所得 Cu 含量 $21.20 \sim 49.32 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, Zn 含量 $132.7 \sim 203.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ [9] 相比明显较低, 而和另一研究 Cu 含量为 $3.45 \sim 7.25 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, Zn 含量为 $14.85 \sim 50.20 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ [13] 接近。

不同学者所测的粪便样品各项指标有所差异, 这是因为研究对象、采样地点、饲养及管理条件、试验方法等差异较大。除了 TN 含量和 Zn 含量外, a 场羊粪的各

项指标测定值均高于b场。统计分析结果表明,除TN外,粪便与饲料的各指标均呈显著正相关($0.65 < r < 0.99, P < 0.05$),说明饲料特性直接决定了粪便特性。

2.1.3 尿液样本各项指标测定值

不同饲养阶段试验羊的尿液样本各项指标值见图3。尿液呈碱性,pH在9左右;a、b场的羊尿平均EC值分别为46.93、59.16 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,pH与EC呈极显著负相关($r = -0.881, P < 0.01$)。a场的羊尿平均COD、TN含量和 NH_4^+-N 含量分别为24.18、2.18 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和2.16 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,b场分别为57.00、2.22 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和2.01 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。a场的羊尿平均TP含量和 NO_3^--N 含量分别为12.76 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和13.39 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,b场分别为15.82 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和17.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。a场的羊尿平均Cu、Zn含量分别为300.24、259.11 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,b场分别为306.02、420.44 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。除了pH和 NH_4^+-N 含量外,b场羊尿的各项指标测定值均高于a场,说明不同品种试验羊的尿液差异较大。在同一羊场中,不同性别及月龄之间的羊尿特性规律不明显。在同一月龄的试验羊中,公羊的羊尿 NO_3^--N 含量均高于母羊。

2.1.4 产污系数

两个羊场不同饲养阶段试验羊的产污系数见图4。贵州半细毛羊的平均COD、TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、Cu和Zn产污系数分别为318.01 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、7.12 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、

$\text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、2.03 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、2.89 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、41.00 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、0.76 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 和14.77 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$;湖羊的产污系数分别为384.76 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、8.98 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、1.56 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、1.46 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、41.34 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、0.38 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 和41.84 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 。部分学者对羊产污系数进行了测算,李丹阳等^[23]的研究发现辽宁绒山羊、杜泊湖羊杂交一代羊、滩羊的COD、TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、Cu和Zn产污系数范围分别为221.65~484.79 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、7.15~8.94 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、1.47~2.01 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、1.14~3.08 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、35.43~40.78 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、0.40~3.07 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 和14.44~40.89 $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 。除了 NO_3^--N 产污系数外,贵州半细毛羊和湖羊的其他产污系数均在这一范围。耿维等^[24]得出我国6大地理分区羊的COD、TN和TP产污系数分别为0.46、2.15 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 和0.46 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$,与本研究数据相比均较低,但与王方浩等^[25]所得TN 24.00 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 、TP 5.15 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$ 相比,本研究数据较高。造成这些差异的原因是试验羊的品种、饲养阶段、体质量、饲料及管理条件等不同,所以应测算不同情况下的羊产排污系数。

由图4可知,在同一羊场中,育肥母羊的各产污系数在4个饲养阶段中基本最低,成熟公羊的产污系数最高,这是由于COD、TN和 NO_3^--N 产污系数与粪尿排泄量显著相关($0.724 < r < 0.900, P < 0.05$),而粪便量与饲

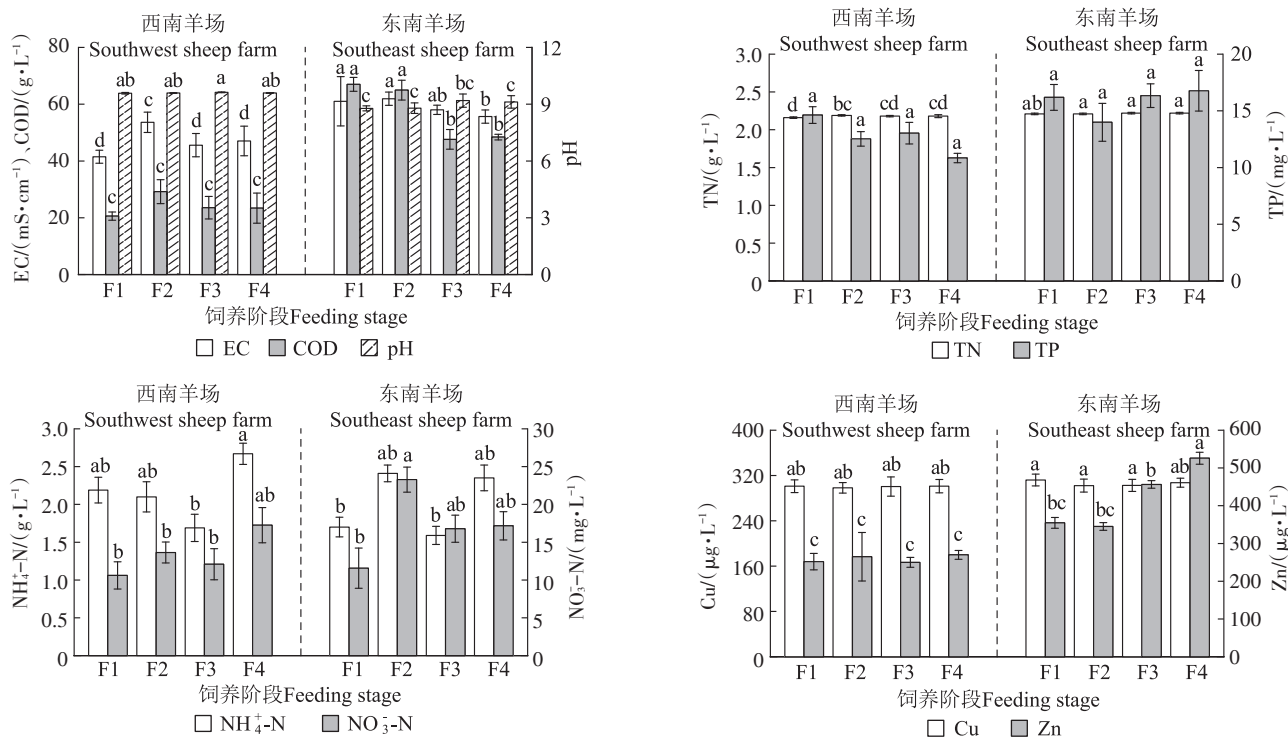


图3 尿液样本各项指标值

Figure 3 Values of each indicator of urine sample

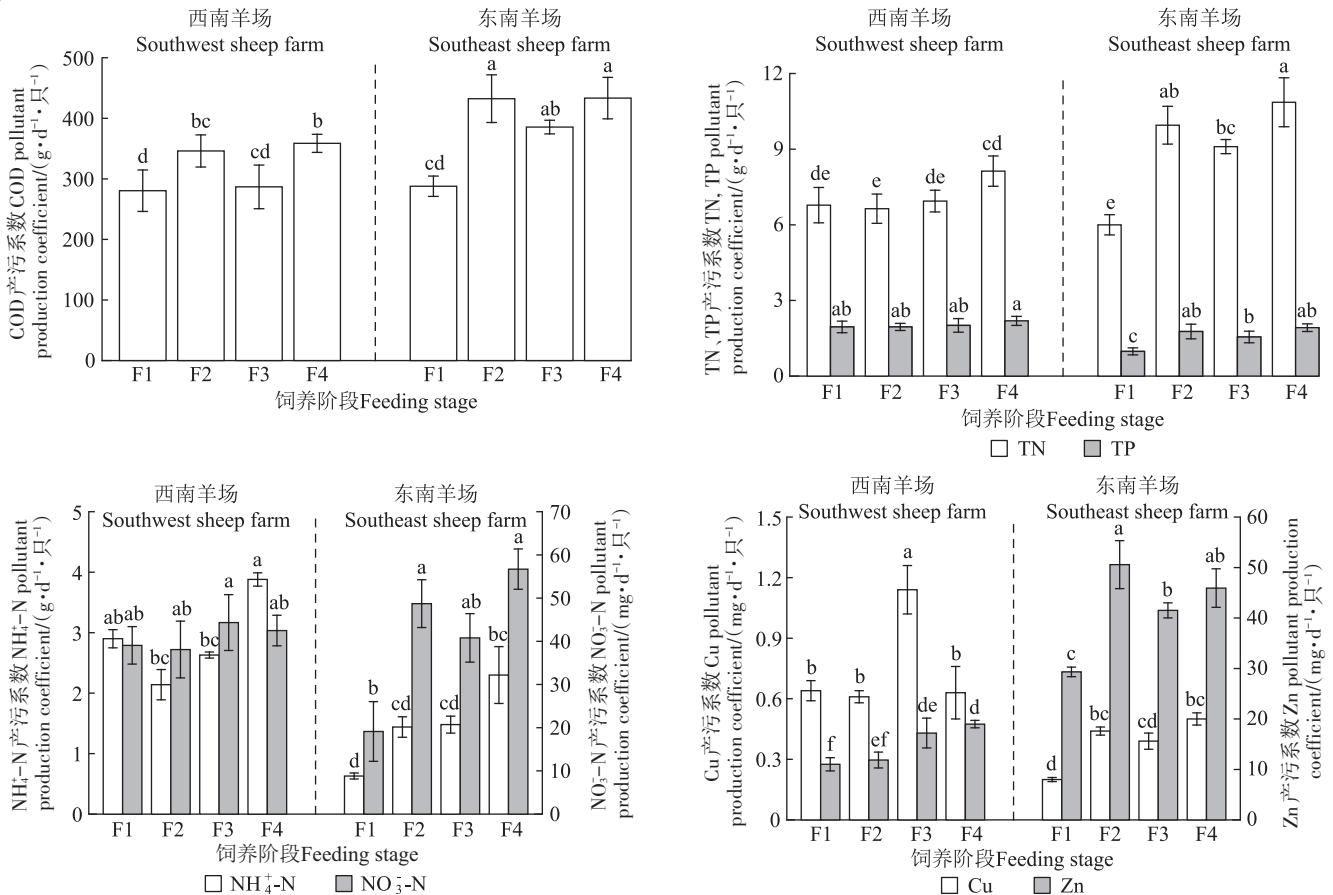


图4 不同饲养阶段试验羊的产污系数

Figure 4 Pollutant production coefficient of experimental sheep at different feeding stages

料量、尿液量与饮水量间均显著正相关($P<0.05$)。结合图1可知,两个羊场的育肥母羊的进食饮水量均最小,消化代谢能力较弱,导致产污系数较低;而成熟公羊进食饮水量较大,生长代谢快,故产污系数较高。在同一羊场和性别条件下,高龄羊的产污系数基本大于低龄羊。统计分析结果表明,COD和TN产污系数均与羊每日粪便量显著正相关($r=0.763$ 和 0.798 , $P<0.05$), NO_3^- -N产污系数与尿液量极显著正相关($r=0.841$, $P<0.01$)。Cu、Zn产污系数均分别与粪便中Cu、Zn含量极显著正相关($r=0.924$ 和 0.903 , $P<0.01$),而粪便中Cu、Zn含量均与饲料中这两种元素含量显著正相关($r=0.650$ 和 0.954 , $P<0.05$),说明饲料中的Cu、Zn含量通过影响粪便中的污染物含量,进而影响产污系数,这与其他学者研究结果一致^[16]。

2.2 排污系数

不同羊场排污系数计算参数见表3。按照羊场正常的饲养和管理方式,a场排污系数试验羊于每日8:00—18:00在指定草地放牧,粪尿直接排放到环境中,仅收集18:00至次日8:00排泄在圈舍中的粪尿,

表3 排污系数计算参数(%)

Table 3 Calculation parameters of pollutant discharge coefficient(%)

羊场 Sheep farm	粪便收集率(η_r) Manure collection rate	粪肥利用率(η_u) Manure utilization rate	尿液利用率(η_l) Urine utilization rate
西南羊场 Southwest sheep farm	72.50±9.87b	90.25±13.53a	87.43±7.91a
东南羊场 Southeast sheep farm	82.97±7.82a	95.18±16.12a	90.83±6.59a

因此粪便收集率较低。两个羊场收集的粪尿在集中贮存堆沤后用作农作物肥料,通过查询羊场每年的粪污处理利用及出售台账,得出粪肥利用率。本研究规定,如果羊粪污利用方式符合《畜禽粪便安全使用准则》(NY/T 1334—2007)和《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010),可认为粪污全部还田利用,污染物没有外排^[26]。本试验中粪肥利用率约为90%~95%,是因为粪污在利用及运输过程中产生部分损失。另外通过试验计算可知,羊尿约90%被粪肥吸收,之后随粪肥一并被处理利用,10%通过渗透、挥发或流入下水道等方式损失^[27]。

两个羊场不同饲养阶段试验羊的排污系数见图5。贵州半细毛羊的平均COD、TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Cu和Zn排污系数分别为 $104.52 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $1.97 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.70 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.50 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $11.01 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 和 $5.04 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$;湖羊的排污系数分别为 $77.40 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $1.74 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.33 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.18 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $7.46 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 和 $8.77 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 。本研究测算的各排污系数均比刘瀚扬等^[13]的研究所得的成都麻羊COD、TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Cu和Zn排污系数范围值高。在同一羊场中,与产污系数相似,各排污系数最大值多出现于成熟公羊中,最小值集中于育肥母羊中。比较不同羊场,除Zn外,a场各排污系数均比b场高,表明羊饲养方式决定了粪便收集率,进而影响排污系数,半放牧半舍饲的饲养方式羊排污系数比全舍饲高。统计分析结果表明,TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Cu和Zn的排污系数分别与各产污系数极显著正相关($0.853 < r < 0.981, P < 0.01$),TN排污系数与粪便量显著正相关($r = 0.818, P < 0.05$)。另外,除TN和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 外,排污系数还受粪便、尿液中污染物浓度的影响,这与董红敏等^[16]的研究结果一致。

2.3 排污系数与产污系数比值

排污系数与产污系数的百分比值(简称排产比)可以反映羊场对污染物排放的控制能力,排产比越低,说明羊场对环境污染越小,两个羊场各饲养阶段的污染物排产比如图6所示。由图6可知,同一羊场不同饲养阶段试验羊的各污染物排产比相近。a、b场的污染物平均排产比范围分别为17.55%~34.16%和11.84%~21.01%,羊饲养方式和清粪方式直接影响粪污的收集和利用率,进而影响排产比。a场由于采用半放牧半舍饲的饲养方式,部分粪污直接排放到环境中,粪污收集和利用率低,故排产比高于b场。综上表明,在不考虑成本和养殖规模的前提下,为了减小羊养殖对环境的影响,应尽量选择全舍饲的饲养方式。

3 结论

(1)贵州半细毛羊的进食量、饮水量、粪便量、尿液量分别为 $2.71 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $1.04 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.97 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 和 $0.53 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$;湖羊的分别为 $2.75 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $1.33 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 、 $0.99 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 和 $0.56 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$ 。两个羊品种的粪便量/饲料量范围为30.75%~

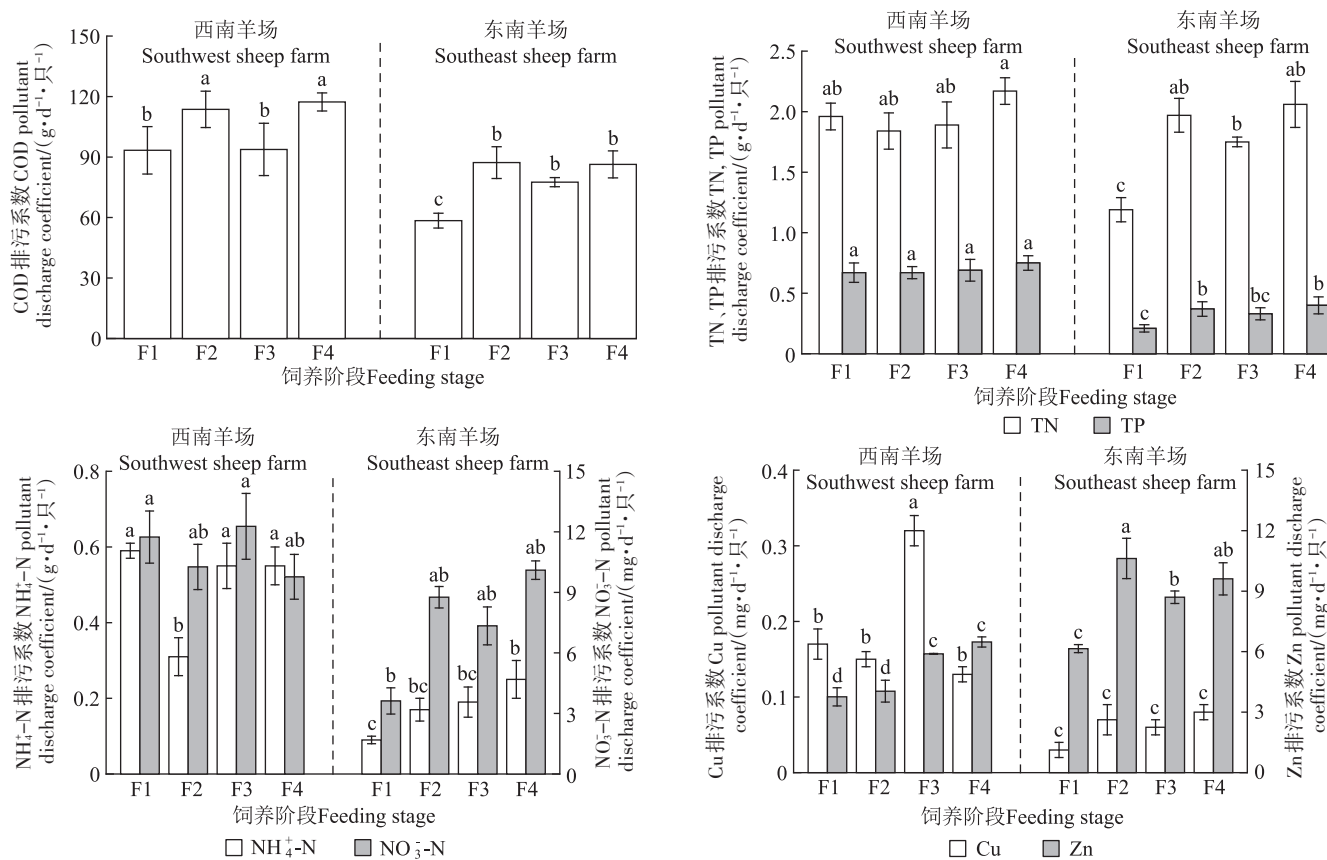


图5 不同饲养阶段试验羊的排污系数

Figure 5 Pollutant discharge coefficient of experimental sheep at different feeding stages

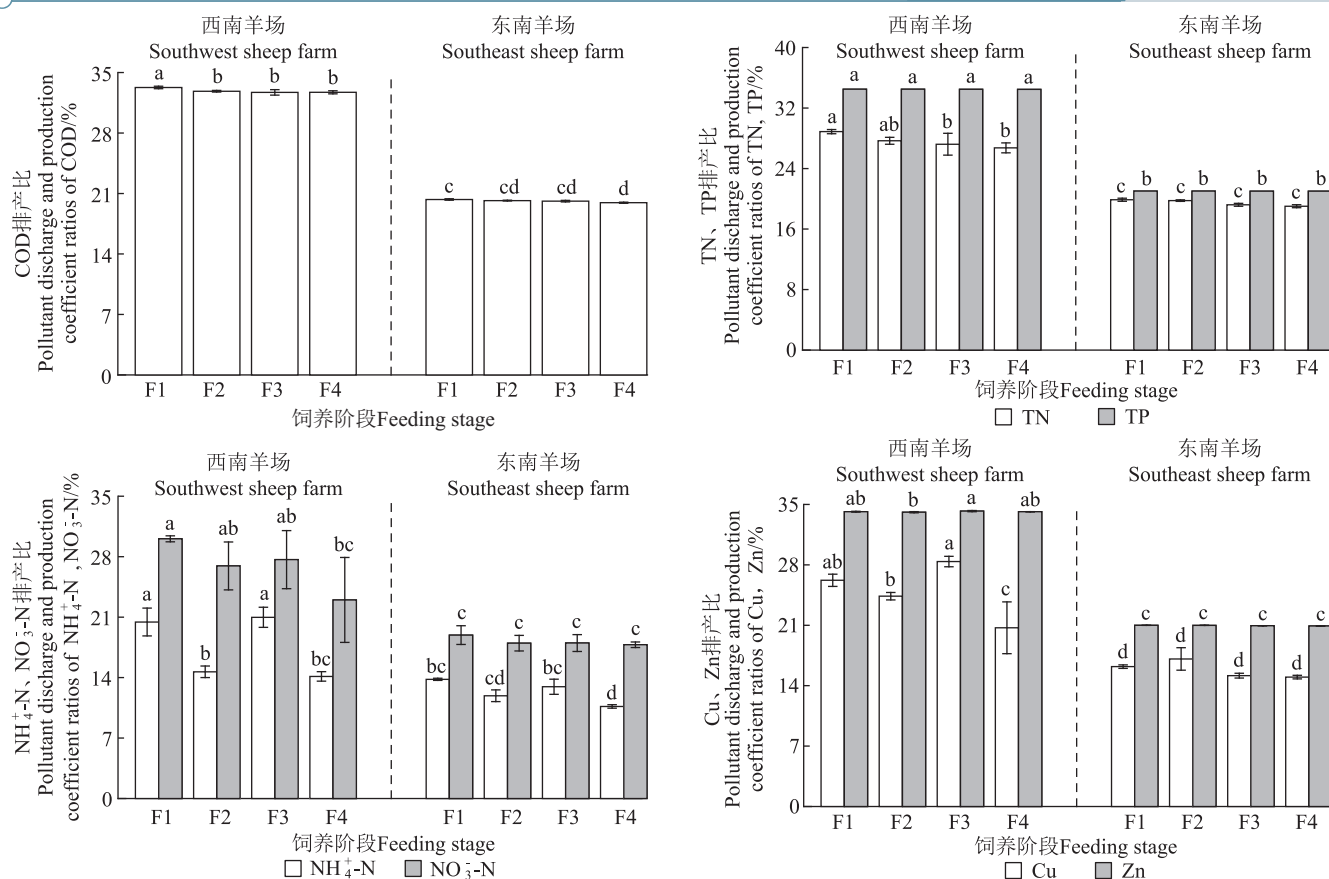


图6 不同饲养阶段试验羊的污染物排产比

Figure 6 Pollutant discharge and production coefficient ratios of experimental sheep at different feeding stages

42.08%, 尿量/饮水量范围为34.04%~64.15%。粪便量与饲料量、尿量与饮水量间均显著正相关。

(2) 贵州半细毛羊的平均COD、TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、Cu和Zn产污系数分别为318.01 g·d⁻¹·只⁻¹、7.12 g·d⁻¹·只⁻¹、2.03 g·d⁻¹·只⁻¹、2.89 g·d⁻¹·只⁻¹、41.00 mg·d⁻¹·只⁻¹、0.76 mg·d⁻¹·只⁻¹和14.77 mg·d⁻¹·只⁻¹；排污系数分别为104.52 g·d⁻¹·只⁻¹、1.97 g·d⁻¹·只⁻¹、0.70 g·d⁻¹·只⁻¹、0.50 g·d⁻¹·只⁻¹、11.01 mg·d⁻¹·只⁻¹、0.19 mg·d⁻¹·只⁻¹和5.04 mg·d⁻¹·只⁻¹；湖羊的产污系数分别为384.76 g·d⁻¹·只⁻¹、8.98 g·d⁻¹·只⁻¹、1.56 g·d⁻¹·只⁻¹、1.46 g·d⁻¹·只⁻¹、41.34 mg·d⁻¹·只⁻¹、0.38 mg·d⁻¹·只⁻¹和41.84 mg·d⁻¹·只⁻¹；排污系数分别为77.40 g·d⁻¹·只⁻¹、1.74 g·d⁻¹·只⁻¹、0.33 g·d⁻¹·只⁻¹、0.18 g·d⁻¹·只⁻¹、7.46 mg·d⁻¹·只⁻¹、0.06 mg·d⁻¹·只⁻¹和8.77 mg·d⁻¹·只⁻¹。

(3) 所选两个试验羊场的各污染物排产比均低于35%。污染物排产比与羊饲养方式和清粪方式有关，以全舍饲为饲养方式的羊场各污染物排产比均低于半放牧半舍饲羊场，对环境造成的污染较小，因此在不考虑成本和养殖规模的前提下，全舍饲应作为羊养殖业的首选饲养方式。

参考文献:

- [1] 吕洪山. 肉羊放牧与舍饲管理的综合措施[J]. 现代畜牧科技, 2012, 9: 11. LÜ H S. Comprehensive measures for grazing and house feeding management of mutton sheep[J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2012, 9: 11.
- [2] 王志敬, 何国戈, 谭伟军, 等. 我国羊品种资源现状及发展建议[J]. 现代农业科技, 2018, 21: 228, 238. WANG Z J, HE G G, TAN W J, et al. Current situation and development suggestions of sheep varieties resources in China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018, 21: 228, 238.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics, PRC. China statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [4] 黄凤霞, 田红, 邓也. 成都市畜禽粪便年排放量估算及耕地负荷量分析[J]. 现代农业科技, 2016, 24: 183-184. HUANG F X, TIAN H, DENG Y. Analysis on total amount of domestic animal excrement and farmland load capacity in Chengdu city[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016, 24: 183-184.
- [5] 陶秀萍, 董红敏. 畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 43-48. TAO X P, DONG H M. Research progress on animal waste treatment and recycling technology[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1): 43-48.
- [6] 段宁, 郭庭政, 孙启宏, 等. 国内外产排污系数开发现状及其启示

- [J]. 环境科学研究, 2009, 22(5): 622-626. DUAN N, GUO T Z, SUN Q H, et al. Development and enlightenment of pollutant generation and discharge coefficients at home and abroad[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(5): 622-626.
- [7] American Society of Agricultural Engineers. Manure production and characteristics[M]. 51th Edition. St. Joseph, Mich.: ASABE, 2004: 666-669.
- [8] 邹德强, 文勇立, 李璐, 等. 简阳大耳山羊粪尿养分测定[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2013, 39(1): 8-11. ZOU D Q, WEN Y L, LI L, et al. Nutrient measurement of the droppings and urine of Jianyang big-eared goats[J]. *Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition)*, 2013, 39(1): 8-11.
- [9] 杨硕, 丁莹, 娜仁花, 等. 季节对规模化羊场粪便污染特性的影响[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(5): 60-63. YANG S, DING Y, NA R H, et al. Effect of seasons on feces discharge in large-scale sheep farms[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2017, 38(5): 60-63.
- [10] 王俊能, 许振成, 吴根义, 等. 畜禽养殖业产排污系数核算体系构建[J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 143-147. WANG J N, XU Z C, WU G Y, et al. Construction of pollutants producing and discharging coefficient accounting system for livestock and poultry breeding industry[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(2): 143-147.
- [11] 庄犁, 周慧平, 张龙江. 我国畜禽养殖业产排污系数研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 633-639. ZHUANG L, ZHOU H P, ZHANG L J. Advancement in research on pollutants producing and discharging coefficients of livestock and poultry breeding industry in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5): 633-639.
- [12] 王国利, 苏家联, 阮燕春, 等. 广西地区肉牛产排污系数测定的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2014, 50(11): 76-80. WANG G L, SU J L, RUAN Y C, et al. Study on measurement of production-discharge coefficient of beef cattle in Guangxi[J]. *Animal Production*, 2014, 50(11): 76-80.
- [13] 刘瀚扬, 陈亚迎, 朱佳文, 等. 成都麻羊产排污系数的测定研究[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(9): 47-52. LIU H Y, CHEN Y Y, ZHU J W, et al. Determination of pollutant coefficient of Chengdu grey goat[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2020, 41(9): 47-52.
- [14] 李丽娟, 申小云. 贵州半细毛羊的培育历程与养殖现状[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(11): 182-184. LI L J, SHEN X Y. Development progress and breeding status of Guizhou semi-fine wool sheep[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2010, 38(11): 182-184.
- [15] 杨克勤. 浙江湖羊遗传资源保护与开发利用的调查与研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018: 6-8. YANG K Q. The investigation and research of genetic resources conservation and utilization of Hu sheep in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018: 6-8.
- [16] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303-308. DONG H M, ZHU Z P, HUANG H K, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 303-308.
- [17] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1131-1148. SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of animal manure and its utilization potential in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1131-1148.
- [18] 贾伟, 李宇虹, 陈清, 等. 京郊畜禽粪肥资源现状及其替代化肥潜力分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 156-167. JIA W, LI Y H, CHEN Q, et al. Analysis of nutrient resources in livestock manure excretion and its potential of fertilizers substitution in Beijing suburbs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8): 156-167.
- [19] 卢秉林, 王文丽, 李娟, 等. 小麦秸秆添加量对羊粪高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(2): 30-34. LU B L, WANG W L, LI J, et al. Effect of wheat straw on the maturity processing of sheep manure under high temperature condition[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(2): 30-34.
- [20] 韩枫, 朱立志. 牛羊粪便资源化利用研究: 基于全国和临夏县两个层面的分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6): 167-173. HAN F, ZHU L Z. Potential utilization of sheep and cattle manure: From the perspectives of nationwide and Linxian region[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(6): 167-173.
- [21] 张燕. 长治地区畜禽粪便资源化利用的初探[J]. 山西能源与节能, 2010, 4: 59-60. ZHANG Y. A study on energy-oriented use of animal manure in Changzhi region[J]. *Shanxi Energy and Conservation*, 2010, 4: 59-60.
- [22] 李林海. 畜禽粪便中的主要养分和重金属含量分析[J]. 南方农业, 2018, 12(23): 126-128. LI L H. Determination of main nutrients and heavy metals in animal manure[J]. *South China Agriculture*, 2018, 12(23): 126-128.
- [23] 李丹阳, 亓传仁, 卫亚楠, 等. 中国北方地区羊养殖业产污系数测算[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 220-227. LI D Y, QI C R, WEI Y N, et al. Measurement of pollution production coefficient of sheep breeding industry in Northern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(6): 220-227.
- [24] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 171-179. GENG W, HU L, CUI J Y, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 171-179.
- [25] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617. WANG F H, MA W Q, DOU Z X, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.
- [26] 苏文幸. 生猪养殖业主要污染源产排污量核算体系研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012: 39. SU W X. Study on accounting system of the amount of pollutants producing and pollutants discharge in the main pollution sources of live pig farming industry[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2012: 39.
- [27] 栾冬梅, 马春宇, 冯春燕, 等. 规模化肉牛场育肥牛粪尿收集率的测定[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2011, 5: 55-56. LUAN D M, MA C Y, FENG C Y, et al. Determination of collection rate of manure and urine from fattening cattle in scale beef cattle farm[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2011, 5: 55-56.

(责任编辑:叶飞)