

DOI: 10.5846/stxb201806211368

杜子银, 蔡延江, 王小丹, 张斌, 杜忠. 放牧牲畜粪便降解及其对草地土壤养分动态的影响研究进展. 生态学报, 2019, 39(13): - .
Du Z Y, Cai Y J, Wang X D, Zhang B, Du Z. Research progress on grazing livestock dung decomposition and its influence on the dynamics of grassland soil nutrients. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): - .

放牧牲畜粪便降解及其对草地土壤养分动态的影响研究进展

杜子银^{1,3,*}, 蔡延江², 王小丹³, 张斌¹, 杜忠¹

1 西华师范大学国土资源学院, 南充 637009

2 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300

3 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

摘要:放牧牲畜粪便沉积是影响草地土壤养分动态的重要途径之一, 粪便降解过程调控着其养分返还效率, 从而可能对草地土壤养分平衡和植被生长的养分供应等产生重要影响。针对放牧牲畜排粪行为特性、牲畜粪便的物质组成及其降解过程、以及粪便养分归还对土壤养分动态的影响等进行了系统论述, 阐明了牲畜粪便降解与其养分迁移转化的关系, 以及粪便养分输入对放牧草地生态系统养分生物地球化学循环的影响效应和可能的作用机制, 以为加深对牲畜粪便降解的养分动态变化过程的认知和厘清粪便—植物—土壤体系养分迁移和转化的影响机制积累理论基础, 进而为优化牲畜粪便管理模式、维持土壤养分平衡和促进草地生态系统的健康协调和可持续发展提供科学依据。

关键词:粪便降解; 碳氮变化; 养分迁移转化; 土壤养分; 草地生态系统

Research progress on grazing livestock dung decomposition and its influence on the dynamics of grassland soil nutrients

DU Ziyin^{1,3,*}, CAI Yanjiang², WANG Xiaodan³, ZHANG Bin¹, DU Zhong¹

1 School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China

2 School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China

3 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China

Abstract: Grazing livestock dung deposition is one of the important ways to affect the dynamics of grassland soil nutrients, and dung decomposition can directly control nutrient release and therefore may generate significant effects on the soil nutrients balance and available nutrient supply for vegetation growth in grassland ecosystems. In this study, we systematically analyzed the characteristics of livestock defecation behavior, the material composition and degradation process of livestock feces, and emphasized the effects of dung nutrient inputs on the dynamics of soil nutrient contents. These explorations clearly elucidated the relationship between mobility and transfer of livestock dung nutrients and dung pat decomposition, and examined the influential effects and functional mechanisms of dung nutrient inputs on the nutrient biogeochemical cycles in grazing grassland ecosystems. Thus, it strengthens our understanding of the temporal and spatial dynamics of dung nutrients and pat decomposition processes and improves our understanding of the theoretical basis of the mechanism of nutrient migration and transformation in the fecal-plant-soil system. The conclusions of this paper could provide a series of positive scientific evidence for optimizing livestock waste management models, maintaining soil nutrient

基金项目:国家自然科学基金项目(41807109); 西华师范大学博士科研启动基金项目(17E042); 国家自然科学基金项目(41573070); 西华师范大学国家级一般培育项目(18B016)

收稿日期: 2018-06-21; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duzy@cwnu.edu.cn

balance, and promoting the healthy, coordinated, and sustainable development of natural grassland ecosystems.

Key Words: dung decomposition; carbon and nitrogen variation; nutrient migration and transformation; soil nutrients; grassland ecosystem

牲畜放牧是对草地生态系统的一种外来干扰^[1],一方面可以改变草地的形态特征,另一方面还会通过改变草地植物群落结构和生产力等影响物质和养分循环,从而影响草地生态系统的健康状况。作为牲畜主要的排泄行为类型之一,粪便排泄被认为是对放牧草地的一种天然的施肥措施,也是草地养分归还的一种重要途径,对于维持土壤肥力和植被生产力具有十分重要的生态学意义^[2-4]。而且,对于养分匮乏的脆弱天然草地生态系统而言,牲畜粪便养分返还显得尤为重要^[5]。

在放牧草地生态系统中,牲畜取食植物养分的 60%—99%会以排泄物的形式返还到草地土壤中,并使得排泄物斑块成为碳氮转化的重要场所^[6]。而且,牲畜排泄物输入会促使草地植物养分的再分布,从而对草地土壤养分循环产生重要影响^[7-8]。研究表明,牲畜粪便排泄能直接增加土壤营养元素含量^[9],增强粪便斑块下土壤微生物活性而加快养分循环速率,在较小尺度范围内显著改变草地土壤理化和生物学性质^[10-11]。近年来,随着畜牧业的迅速发展与牲畜养殖规模不断扩大,大量牲畜粪便归还改变了生态系统的物质和能量循环,并引发了显著的生态系统效应^[4]。而且,以氮素为主要养分形式^[6]的牲畜粪便在影响放牧草地土壤氮素迁移转化、温室气体排放和生态系统生产力等方面将表现更为突出。预计到 2050 年,全球草地牲畜排泄物氮输入量将达到 5200 万 t,较 1900 年增加约 3 倍,所导致的氨挥发、氧化亚氮排放、氮素淋溶和径流损失等将分别增加约 9 倍、3 倍和 10 倍^[12]。由此可见,探究放牧草地牲畜粪便降解及其养分释放对于合理评估粪便养分返还效率和减少草地土壤养分淋失等势在必行。目前,针对牲畜粪便降解及其生态系统效应方面虽然开展了一些研究^[3,5,9],但总体研究水平尚处于起步阶段,牲畜粪便养分迁移转化过程及其对土壤关键养分动态的作用机制如何尚不清楚,且关于不同气候环境和草地类型下牲畜粪便返还对土壤养分影响差异性的认知还有待增强。本文通过对不同类型牲畜粪便降解的理化和微生物过程及其可能的影响因素加以解析和论述,有助于为阐明粪便养分迁移转化过程及其对草地土壤养分动态的影响效应、厘清牲畜粪便返还在草地生态系统养分生物地球化学循环中的贡献和优化牲畜粪便管理模式等提供有益参考。

1 牲畜排粪行为及其影响因素

牲畜粪便排泄是其日常行为之一,是除尿液排泄外牲畜与草地间发生相互作用的另一主要途径,也是草地养分来源的另一重要组成部分。研究表明,牲畜排粪频次和排泄量等行为特性通常受到畜种类型、采食量、牧草消化率、气候环境以及牲畜自身生理状态等因素的重要影响^[13-14]。Haynes 和 Williams^[6]发现,普通放牧牛平均每天排粪约 10—16 次,而放牧羊排粪频率相对较高,平均每天可达 19—26 次。青藏高原高寒环境特有的放牧牦牛每天排粪约 9—11 次^[15],蒙古牛平均每天排粪约 10 次^[16],二者日均排粪频次相当且与普通牛种排粪频次差异不大。而蒙古羊平均每天排粪约 6 次,且白天排粪次数最多,夜晚最少,日均排粪量约为 0.73—0.95 kg,与鱼小军^[17]报道的放牧绵羊 0.45—0.52 kg 的日均排粪量具有一定的差异。这可能与不同的畜种类型具有不同的采食量和牧草消化率等因素有关。此外,在不同放牧时间、放牧季节和强度、草场状况等因素影响下,牲畜排粪行为表现具有一定的差异。Oudshoorn 等^[18]在丹麦草场的研究发现,在不同的放牧活动时间下,奶牛平均每天排粪 10.5 次,限制放牧时间对每头奶牛每小时的排粪频次无显著影响。Hirata 等^[14]在日本的研究显示,基于独立个体测量的放牧牛排粪频次为 6—24 次/d,与 Haynes 和 Williams^[6]的报道差异较大,而按照放牧季节和区域分组测定的放牧牛日均排粪 14.4 次,白天排粪频次较夜晚高,而单次排粪量则表现为相反的趋势。放牧牛种群类型、性别和年龄等的差异可能是导致个体排粪频次差异较大的原因。例如,鱼小军^[17]指出,牦牛粪便排泄与其年龄差异有关,1、2、3 周和 4 周岁牦牛平均每天排粪 5.8、6.3、7.3 次和

9.8 次,每日排粪量以其干重计分别为 0.46、1.14、1.57 kg 和 2.24 kg,总体表现为每日排粪次数和排粪量均随年龄增大呈直线增加趋势。此外,Orr 等^[19]在英国半干旱天然草地的研究发现,放牧肉牛在 5 月和 9 月的日均排粪次数相当,且适度和轻度放牧强度下牛的日均排粪次数约为 9.3—10 次,二者无显著差异。在两种不同放牧强度下,放牧牛 5 月的日均新鲜牛粪排泄量为 9.5—10.8 kg,而 9 月高于 5 月,达到 15.3—17.4 kg,呈现一定的季节性差异,与丁路明等^[20]和乌日娜等^[21]报道的牦牛和蒙古牛在夏秋季节的排粪频次较高的研究结果较为类似,而与程晓涛等^[22]研究认为的牧草主营养成分随季节变化导致牦牛排粪量表现为冷季高暖季低的现象具有一定的差异。

除此之外,牲畜排粪行为还可能因放牧率、饲草种类、饲养方式、活动路径等的差异而表现各不相同。汪诗平和李永宏^[23]研究发现,相同放牧时期内,放牧率增加导致绵羊鲜粪排泄量减少,粪便颜色由深到浅,形状由粘连到松散,粪粒由大到小;而相同放牧率在不同放牧时期下表现为 8 月份粪便干物质量最低,粪便颜色呈深—浅—深,粪粒大小呈小—大—小的变化趋势。而且,绵羊白天排粪量为夜间的 2 倍,但粪中干物质量无显著差异。从饲草种类来看,食用青草的牛比食用干草的牛排粪次数多,产奶牛比干奶牛排粪次数多。采用密集饲养的产奶牛多通过舍饲的方式进行喂养,其在畜棚内的排泄行为与自由放牧状态下相比具有较大的差异。另外,日常放牧牲畜多具有随意排泄的特征,不同放牧模式和牲畜类型使得排泄行为和排泄物分布容易呈现较大的空间异质性。李香真和陈佐忠^[24]发现,牲畜排泄产生的粪便除了分布于其主要摄食的草场外,作为其栖息地的畜棚以及途经的村镇场地和道路等也均可能是发生排泄行为的场所。而且,鱼小军^[17]通过估算指出,放牧牦牛在草地上的排粪量可占全天排粪总量的 35.7%,归牧路径和出牧路径排粪量分别占 6.82% 和 1.98%,畜圈排粪量占 55.5%。此外,水源地周围,阴凉处以及栅栏等处也是放牧牲畜粪便较为集中的地方^[25]。而且,暖季放牧时,由于牲畜频繁饮水,会使得其排泄物较多集中于饮水槽附近^[26]。由此可见,不同牲畜类型、季节更替及放牧模式等均可能是影响牲畜排泄行为及粪便分布的重要因素,进而可能加剧土壤养分分布的空间异质性。

2 牲畜粪便降解及其养分动态变化

2.1 牲畜粪便的物质组成

牲畜粪便通常由水、未消化的牧草、动物新陈代谢产物、大量的微生物及其代谢产物等组成。不同哺乳动物的粪便在外形、大小和成分含量上有较大的差别^[27]。对于反刍动物而言,其食物消化率较低,粪便纤维素、半纤维素和木质素等含量通常较高^[6]。尚斌^[28]通过对牛粪和羊粪的测定发现,它们的木质素、纤维素和半纤维素物质总量分别达到 68.0% 和 56.9%。牛粪木质素和纤维素较高,而半纤维素与其他粪便类型相当。春季牧草繁茂,含水量高且结构性碳水化合物含量低会使得牧草易于被牲畜消化吸收,从而导致排泄的粪便含水量较高,与 Doring^[29]等的研究结果一致。阿仁高娃和刘新民^[30]在内蒙古典型草原的研究发现,不同降解程度的牛粪其物理形态和物质组成等具有一定的差异。其中,未腐解牛粪含水量较高,外表颜色深且和内部颜色基本一致,表面无硬皮,含未消化的植物纤维较多;半腐解牛粪含水量有所降低,无表面硬皮,外部近白色,内部颜色发黄,含未消化的植物纤维较多;腐熟牛粪含水量较低,表面灰褐色且内部颜色较外部深,未消化的植物纤维含量降低。此外,除了水分和大量有机质外,粪便排泄还会伴随着大量的氮、磷、钾、钙、硫和镁等养分元素在斑块区域沉积。

氮是排泄物的重要养分元素之一,约占牲畜摄入氮素的 75%—95%^[31-32]。粪便中的氮主要包括总氮、有机氮、铵态氮和硝态氮几种形态^[33]。其中,有机氮约占 90%^[34],主要包括氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解铵态氮和非酸解态氮等组分^[35]。李书田等^[36]通过测定发现,牛粪和羊粪平均氮含量分别约为 1.56% 和 1.31%,磷含量分别为 1.49% 和 1.03%,牛粪氮磷含量总体高于羊粪。而羊粪钾含量较牛粪高,分别为 2.40% 和 1.96%,与鱼小军^[17]在青藏高原高寒草地研究发现的牦牛粪全氮、全磷和全钾含量均高于绵羊粪便的结果部分一致。畜种类型、饲草种类和气候环境等因素的不同可能是导致粪便组分产生较大差异的主要原因。另外,牲畜粪

便施加通常会增加 2.5—5.0 cm 表层土壤钙和镁含量^[29],表明二者也是粪便的重要组成元素,从而可能对土壤肥力和植被生产力等产生潜在的影响。

2.2 牲畜粪便降解过程中的养分动态

牲畜粪便降解主要包括物理降解和生物降解两个过程。其中,物理降解主要是指由于降雨的机械打击和牲畜践踏等导致的斑块破碎,而生物降解主要是指由细菌、真菌、甲虫和蚯蚓等导致的粪便结构破坏和养分元素转化^[6]。粪便降解往往伴随着其养分物质的动态变化,例如粪便自身碳氮以气态形式释放,或随降水淋溶以液态形式损失。相比之下,粪便排泄初期的养分释放状况主要取决于能够导致其发生物理破碎的因素影响^[37]。微生物分解则通常发生在粪便降解、斑块被分散或者被降水淋洗的过程中,对于粪便有机氮和硫释放具有重要的影响^[6]。

马丽红等^[38]认为,牲畜粪便中易降解有机质和总有机碳等随降解时间的增长而逐渐降低,而与之对应的腐殖质含量则逐渐升高。而且,粪便中难分解的木质素和纤维素等与腐殖质的形成密切相关,木质素和纤维素降解量越大使得腐殖质产生量越大^[39-40]。秦莉等^[41]研究发现,粪便堆置过程中高温阶段是有机碳降解和碳素损失的关键时期,这与于子旋^[42]和单德鑫^[43]报道的堆体高温发酵期导致牛粪有机碳和水溶性有机碳含量等显著降低的研究结果一致。而在高寒环境下,杜子银等^[5]通过开展模拟牦牛和藏绵羊粪便返还试验研究发现,经过 93 d 自然降解后,牛粪和羊粪全碳含量显著降低,降解初期的集中降水对粪斑的淋溶和冲刷可能是加速斑块破碎并促进有机质降解和碳损失的重要原因。此外,鱼小军^[17]还发现,不同月份间牦牛粪有机碳含量均值为 39.4%,且 10 月份最高,5 月份最低;而绵羊粪有机碳含量均值为 41.1%,且 12 月份最高,5 月份最低,稍高于牦牛粪。这种牛粪和羊粪降解过程中有机碳含量的差异可能源于粪便自身物质组成、气候环境及其降解程度等因素的共同影响。

另一方面,牲畜粪便中有机氮约占 90%^[34],无机氮仅占 10%左右,粪便降解过程中氮素转化以有机氮矿化为主。对于自然降解过程而言,微生物通过氨化作用分解有机氮产生氨气,氨气溶于粪堆中形成铵态氮,进而使得铵态氮在堆体温度、通气性、pH、以及微生物活性等因素影响下,一方面被氧化为硝态氮,另一方面作为细胞生长的氮源供微生物同化^[44],也可以发生反硝化作用脱氮或者以氨挥发形式发生氮素损失^[45-46]。总体而言,粪便降解过程既包括高温和高 pH 导致的氨挥发损失,又有厌氧条件下硝态氮的反硝化作用脱氮及渗滤液或雨水导致的氮素淋溶损失^[47]。牛粪斑块面积大,粪斑破碎化和分解速度缓慢,营养物质被束缚在牛粪中,导致氮素损失和营养物质周转率较低。但相比之下,刘新民等^[48]在内蒙古典型草原的研究发现,牛粪的降解速率显著高于羊粪,两种粪便类型中氮素以有机态为主,矿化速率均较为缓慢,磷素以无机态为主,释放速度较快,春季的冻融循环会显著促进两种粪便氮和磷矿化速率增加。单德鑫^[43]研究指出,牛粪在整个降解过程中氨挥发量较低,且大量氨挥发集中在发酵初期。而且, Parkinson 等^[49]认为,不同月份气温的差异强烈影响着牛粪氨挥发。在平均气温为 16 °C 的 6—9 月氨挥发率较高,而平均气温为 9.2 °C 的 10—12 月氨挥发率较低,二者所导致的氨挥发损失的氮量分别占初始全氮量的 18% 和 2%,表明气温越高牛粪氨挥发量越大,而适当降低温度会减少氨挥发且有助于堆体保氮。此外,于子旋^[42]通过室内模拟试验发现,70 d 堆肥过程中牛粪铵态氮含量降低 87.8%,而硝态氮含量增加至堆肥前的 56.8 倍,与单德鑫^[43]的研究结果类似,即发酵初期牛粪铵态氮含量急剧降低,而硝态氮含量变化与之相反,速效氮含量则表现出下降-上升-下降的变化趋势。粪便降解过程中硝化作用的持续进行可能是铵态氮含量持续降低的主要原因之一。随着降解时间的增长,牛粪全磷含量逐渐增加,总腐殖酸,游离腐殖酸和水溶性腐殖酸含量在发酵初期明显降低,但至腐熟期,其含量又逐渐升高。

除此之外,不同类型牲畜在不同放牧季节,其粪便降解过程中的养分变化特征表现也各不相同。姜圆圆^[50]研究发现,夏季是绵羊粪养分降解的重要时期,粪中干物质、有机质、碳氮含量、粗脂肪、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量均随降解时间的增长显著降低,而磷和钙含量变化不显著。李博等^[51]在高寒草甸的研究发现,牦牛粪便在夏季和秋季的养分分解趋势相似,但在夏季经过 85 d 分解后基本达到完全分解状态,主要

养分降为初始的 0.48%—6.98%,而秋季养分分解速率较为缓慢,主要养分仅降为初始的 13.4%—40.1%。由此可见,季节更替导致的气候环境变化对于不同类型牲畜粪便降解过程的养分变化具有不容忽视的重要影响,而其作用程度的大小则可能因粪便自身特性和降解程度等的差异而不同。

2.3 牲畜粪便降解的影响因素

牲畜粪便降解主要受生物和非生物两方面因素的重要影响(图 1)。其中,生物因子主要是指粪食性昆虫取食、无脊椎动物和微生物的活动^[3]。粪食性昆虫及其周围其他生物在取食和搬运粪便过程中会使得粪便结构破碎和穿孔,从而有助于促进斑块内部的通气性并加速其降解速率^[52]。粪食性无脊椎动物、甲虫、双翅型幼虫和蚯蚓等通过促进通气条件和微生物活性等发挥重要作用^[53]。另外,牲畜粪便有机物分解和养分转化等各种生化过程都是在微生物参与下完成的,而粪便化学组成的变化也可能影响分解者微生物和酶的活性^[30]。研究表明,约 50%的牛粪斑块的降解是由蚯蚓主导的,而甲虫的贡献约占 14%—20%,且不同气候环境下的牛粪分解者功能群差异较大^[54]。例如,在气候温和区,蚯蚓是主要的牛粪分解者;在干旱或季节性干旱区,白蚁对牛粪分解作用最突出;而在地中海气候和青藏高原高寒环境下^[55],粪食性甲虫是牛粪主要的分解者。在微生物作用方面,降雨可以保持适宜于微生物活性的粪便含水量,对于粪便生物降解过程具有重要的影响。当粪便表面硬壳形成后,会通过抑制斑块湿润来阻碍其物理降解和微生物降解。温度和湿度会通过影响粪便微生物种群活性,从而影响粪便微生物降解过程^[6]。牛粪作为一种无孔基质,是一些大型粪食性节肢动物的取食场所,其中粪甲虫对牛粪快速破碎化,营养物质转移和控制有害蝇类繁殖具有关键作用^[9]。另外,由于牛粪初始含水量约为干物质量的 4—7 倍,在粪斑中心通常会呈现缺氧的状态,从而限制菌丝扩散到斑块中心部位^[6]。Underhay 和 Dickinson^[56] 研究发现,即使牛粪微生物群落丰富,在经过 2 个月的降解后,牛粪有机质仅减少了 15%,而热值减少了 18%。这种缓慢的降解主要是由于粪斑表面真菌活性受到一定程度的抑制所导致的。

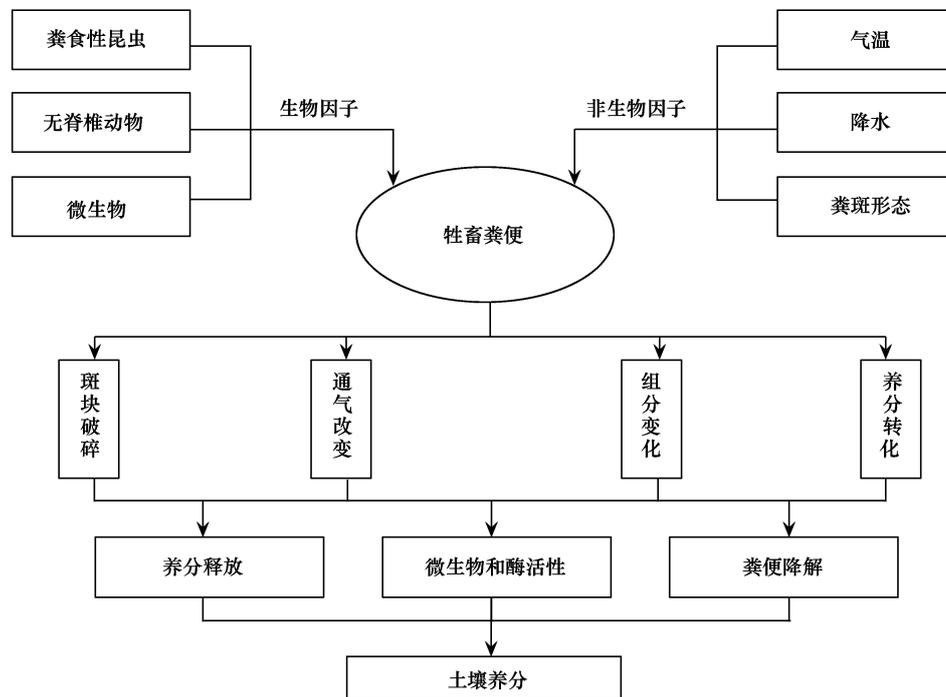


图 1 牲畜粪便降解过程及其对土壤养分的影响

Fig.1 Process of livestock dung degradation and its effects on soil nutrients

非生物因子对粪便降解的影响主要以天气和季节变化表现最为突出^[56]。这可能是由于温度升高有助于促进粪便发酵过程,从而加快有机质降解及粪便腐熟。Rowarth 等^[37]认为,在温带气候条件下,新鲜羊粪呈指

数式快速分解,并且在冬季 17 d 内能够完全降解,而在夏季则完全降解时间会超过 100 d。相比之下,在干旱条件下,风干的粪便样品降解缓慢,并且呈现一定的线性变化规律。另外,粪便的粘稠度状况也是影响其降解速率的重要因素,含水量高的湿润粪便较干燥粪便降解更为迅速,而粪斑在干旱条件下形成的表面硬壳将削弱其初始的粘稠度对粪便降解的影响。Haynes 和 Williams^[6]指出,春季和夏季产生的粪便初始粘稠度对其降解没有影响,而秋季和冬季液体状的粪便将会更快地分解。除此之外,粪便自身物理形态也是影响其降解速率的另一重要因素。羊粪通常呈较为坚硬的颗粒状,在单位重量内具有较单个面积大且结构完整的粪斑更大的总表面积,使得其更容易遭受雨水打击而发生物理破碎,从而导致其降解速率较快^[37]。牛粪是不同于羊粪的一种典型的排泄物类型,其斑块面积大,含水量高,微生物含量丰富,在自然降解过程中往往受到诸多复杂因素的共同影响。研究发现,降水是影响牛粪分解最重要的非生物因子之一。一方面是由于雨水的机械打击能够加速粪斑的破碎,另一方面是因为牛粪中发生的生物学过程与水分含量密切相关^[57]。温度和水分等也能通过改变牛粪的生物群落结构和活性等从而间接加速粪便的降解^[57]。而由于牲畜践踏、冻融和干湿交替、以及人为干扰等导致的粪斑物理结构破碎也可能是加速粪便降解过程的外部因素,但目前关于这种物理结构破碎所导致的粪便降解及其养分迁移转化方面的认识还较为有限。

3 牲畜粪便降解对土壤养分动态的影响

在放牧草地生态系统中,牲畜粪便中的养分可通过固有矿质养分淋溶和有机质分解与养分释放的途径返还到土壤系统中^[2,4,58-59],从而增加土壤 pH、电导率、微生物量和酶活性^[2,60-61],并通过增加土壤磷和无机氮输入等提高粪斑以下及其周围土壤的肥力^[62-65]。一般而言,牲畜粪便通过增加土壤养分和微生物活性等对土壤肥力的影响程度与土壤和粪便类型关系密切^[58,60]。研究表明,牲畜粪便有机质含量丰富,粪便施加会显著增加土壤有机碳和总氮含量^[29]。Schuman 等^[66]认为,放牧牲畜粪便沉积对草地土壤养分循环具有显著影响,粪便施加是增加草地土壤碳储量的重要途径之一,与 Tully 等^[67]在非洲肯尼亚草地和 Williams 和 Haynes^[60]在新西兰多年生草地研究发现的牛粪施加增加土壤有机碳和微生物量碳的结果部分一致。此外,在粪便自然降解过程中,大气降水导致的粪便可溶性有机碳的淋溶被认为是草地土壤有机碳的重要来源^[68-69],对于增加土壤肥力和微生物活性等作用显著。在我国,颜才玉等^[70]发现,不同放牧率会通过影响藏羊粪的分解速率从而调控羊粪碳含量释放,且随着放牧率增加,羊粪碳的归还量增加,从而增加土壤碳含量。此外,鱼小军^[17]和 Yu 等^[71]在青藏高原天祝高寒草地的研究表明,放牧牦牛粪便堆积会显著降低土壤容重、增加土壤含水量和土壤有机质含量,与 Xu 等^[72]在藏北高原退化高寒草甸的研究结果类似,即牦牛粪便施加增加了土壤有机质含量,但各处理间差异不显著。而与之不同的是,Ma 等^[73]利用¹³C 自然丰度法针对内蒙古两种草地土壤的研究发现,羊粪施加所伴随的活性基质的输入以及土壤微生物活性的改变会在短期内促进土壤碳的分解,从而导致净的土壤碳损失和加速草地土壤退化过程,但粪便施加对于土壤有机碳分解激发效应的作用过程和影响机制还有待进一步研究加以揭示。

另一方面,氮素作为粪便养分的重要组成部分,在草地土壤氮素生物地球化学循环中发挥着至关重要的作用。戎郁萍等^[74]和孙翼飞等^[75]认为,放牧牲畜粪便输入是增加土壤氮含量的重要途径,且粪便氮素返还在增加土壤矿化氮含量方面表现较为迅速和突出。Tully 等^[67]在非洲肯尼亚草地的研究发现,牛粪施加增加了土壤矿化氮含量,并导致土壤氧化亚氮排放增加,与 Cardenas 等^[76]在英国多年生草地、van Groenigen 等^[77]在荷兰草地、Williams 和 Haynes^[60]在新西兰多年生草地、Mazzetto 等^[78]和 Lessa 等^[79]在巴西草地、以及 Cai 等^[80]和鱼小军^[17]在我国青藏高原高寒草地的研究结果类似。表明对于不同气候环境和草地类型的放牧生态系统而言,牲畜粪便返还在增加土壤矿化氮含量方面的作用效果一致。而且,Verma 等^[81]在印度季节性干热天然草地的研究还指出,牛粪沉积较对照显著增加了土壤铵态氮、硝态氮、全氮、有机氮和矿质氮含量,且其导致的土壤碳/氮比值较对照高 2 倍。Dai^[82]也证实,施加牛粪导致草地斑块区域全氮含量增加,约为非斑块区域的 3 倍,且牛粪降解过程中破碎的粪斑对于增加土壤总氮含量有显著影响,与 Sordi 等^[83]在亚热带巴西

牧场的研究结果类似,即牛粪施加增加土壤铵态氮和硝态氮含量,而且大小不同的斑块对于增加土壤矿化氮含量表现也各不相同。这可能与斑块大小不同改变了粪斑总表面积,从而影响粪便氮素淋溶和迁移转化过程有关。除此之外,鱼小军^[17]发现,牦牛粪便堆积增加了牛粪覆盖地和距粪堆 10 cm 处 0—10 cm 土层的土壤全氮、速效氮、全磷、速效磷、速效钾含量,且粪堆覆盖地的土壤速效氮、全氮、有机质、全磷、速效磷、速效钾含量显著高于距粪堆 50 cm 处的土壤,与何奕忻等^[84]在川西北高寒草甸的研究结果一致,表明粪斑覆盖对土壤养分的影响会随距离粪堆的远近而表现各不相同。这主要是由于粪便降解过程中形成的表面硬壳会降低牛粪养分释放效率,从而表现为距离粪斑越远其影响效应越弱。此外,闵星星等^[85]发现,腐熟羊粪对土壤氮磷的影响明显大于生羊粪,大量腐熟羊粪施加可显著增加土壤全氮、全磷、速效氮和速效磷含量,而生羊粪和少量腐熟羊粪施加对土壤速效磷无影响,与郭彦军等^[86]在人工草地和王兴等^[87]在荒漠草原的试验研究结果部分一致,表明牲畜粪便施加量及其自身腐熟状况也是影响其养分返还效应的不容忽视的重要因素。另一方面,孙红等^[88]针对贵州高原黑麦草+白三叶草地的研究表明,畜粪沉积对草地土壤养分的影响还与牲畜类型和矿质种类密切相关。塔山牛粪和灼圃羊粪沉积对 0—10 cm 土壤有机质、磷和铁,以及 10—20 cm 土壤氮、钾和锌含量具有显著影响。粪便沉积会增加土壤磷、钾、镁、钠、铜、锰和锌等元素含量,与 Aarons 等^[63]、刘新民等^[48]、以及姜世成和周道玮^[9]的研究结果类似。畜粪沉积主要影响钾、钠、铜、锰和锌含量在土壤—草地系统间的转化,消除钠和锰在土壤—草地间的正相关性,降低钾在土壤—草地间的正相关性,并促进铜和锌在土壤—草地间显著正相关关系的形成。而且,针对不同的牲畜类型,Williams 和 Haynes^[60]还指出,羊粪和鹿粪施加对土壤养分的影响较为有限和短暂,而牛粪的影响是更为显著和长期的,甚至可长达 3 年之久^[60,89]。总体而言,牲畜粪便返还较为显著的增加土壤活性养分含量和改善土壤质量,但土壤不同种类养分元素对牲畜粪便养分返还的响应特性则可能因畜种类型、粪便特性、气候环境和草场状况等因素的不同而表现各异。

除此之外,在自由放牧草地生态系统中,牲畜粪便沉积的下垫面状况可能通过调控粪便降解速率和养分释放过程,从而对草地土壤养分动态产生潜在的重要影响。研究表明,地表凋落物分解是由作为非生物因子的土壤理化性质和凋落物质量,以及生物因子的土壤生物活性等因素共同主导的过程^[90-92],凋落物养分输入是土壤养分的另一重要来源。牲畜粪便沉积可能通过改变地表微气候和土壤特性等调控凋落物分解过程,从而间接影响粪便对土壤养分的供应。Qiao 等^[93]认为,活性碳氮施加对有机质分解具有激发效应,粪便养分向凋落物的迁移可为微生物生长和新陈代谢提供丰富的养分和活性碳基质,从而有助于加速凋落物的分解。而且,Yoshitake 等^[65]在日本寒温带草地的研究指出,一个放牧时期内牛粪摄入的碳含量仅有 4.0%—9.8%会以粪便形式返还到草地土壤中,而超过 70%的碳会通过矿化分解和呼吸排放二氧化碳的过程损失,高于草地凋落物约 50%的质量损失率,表明与典型的凋落物分解效应相比,牛粪输入会加速草地土壤碳循环过程。与之类似的,Liang 等^[94]在青藏高原东缘高寒草甸的研究发现,放牧牦牛粪便沉积会增加其覆盖的凋落物纤维素和半纤维素的分解,进而加速碳和养分的转换。同时会减小氮素固持,增加氮和磷的释放,从而可能对调控草地土壤碳氮磷含量及其空间分布等产生重要的影响。随着降解时间的增长,牲畜粪便逐渐趋于干燥,易降解活性养分的减少和微生物活性的降低等的影响可能导致其对凋落物分解的激发效应逐渐减弱,从而削弱凋落物影响下土壤主要养分的变化。然而,关于不同气候环境、粪便类型、下垫面特性和土壤状况的草地生态系统粪便—植被/凋落物—土壤体系中粪便养分的迁移转化过程和微生物作用机制及其对草地土壤养分动态的影响效应等还有待深入研究加以揭示。

4 结论与展望

放牧牲畜粪便返还是维持天然草地土壤养分平衡和植被生产力的重要途径之一,粪便降解是一系列生物和非生物因子共同作用的过程。粪便降解过程中易降解有机物和活性养分的分解和淋溶等有助于增加土壤活性碳氮养分供应,但粪便养分输入对于不同类型土壤养分元素的影响效应存在一定的时空差异。未来研究需要重点关注:(1)牲畜粪便理化性质改变对其自身降解过程及其养分释放的作用机制;(2)气候变化背景下

放牧草地牲畜粪便—植物—土壤体系中粪便养分的迁移转化规律和可能的影响因素;(3)牲畜粪便返还对养分匮乏的脆弱和敏感的天然草地生态系统植被生产力和主要养分生物地球化学循环的影响效应,以期为优化粪便管理模式、深入解析和合理评估区域乃至全球尺度放牧草地生态系统牲畜粪便返还的生态环境效应提供有益参考。

参考文献 (References):

- [1] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义. 生态学报, 2000, 20(4): 581-586.
- [2] Aarons S R, O'Connor C R, Hosseini H M, Gourley C J P. Dung pads increase pasture production, soil nutrients and microbial biomass carbon in grazed dairy systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84(1): 81-92.
- [3] 何奕忻, 孙庚, 罗鹏, 吴宁. 牲畜粪便对草地生态系统影响的研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(2): 322-328.
- [4] Moe S R, Wegge P. Effects of deposition of deer dung on nutrient redistribution and on soil and plant nutrients on intensively grazed grasslands in lowland Nepal. *Ecological Research*, 2008, 23(1): 227-234.
- [5] 杜子银, 蔡延江, 王小丹, 鲁旭阳, 鄢燕, 马星星. 牦牛和藏绵羊粪便降解过程中的养分动态变化. 山地学报, 2014, 32(4): 423-430.
- [6] Haynes R J, Williams P H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy*, 1993, 49: 119-199.
- [7] Whitehead D C. *Nutrient Elements in Grassland: Soil-Plant-Animal Relationships*. Wallingford: CABI Publishing, 2000.
- [8] Stiehl-Braun P A, Hartmann A A, Kandeler E, Buchmann N, Niklaus P A. Interactive effects of drought and N fertilization on the spatial distribution of methane assimilation in grassland soils. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2629-2639.
- [9] 姜世成, 周道玮. 牛粪堆积对草地影响的研究. 草业学报, 2006, 15(4): 30-35.
- [10] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2184-2188.
- [11] Willott S J, Miller A J, Incoll L D, Compton S G. The contribution of rabbits (*Oryctolagus cuniculus* L.) to soil fertility in semi-arid Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(5): 379-384.
- [12] Bouwman L, Goldewijk K K, Van Der Hoek K W, Beusen A H W, Van Vuuren D P, Willems J, Rufino M C, Stehfest E. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52): 20882-20887.
- [13] Aland A, Lidfors L, Ekesbo I. Diurnal distribution of dairy cow defecation and urination. *Applied Animal Behaviour Science*, 2002, 78(1): 43-54.
- [14] Hirata M, Higashiyama M, Hasegawa N. Diurnal pattern of excretion in grazing cattle. *Livestock Science*, 2011, 142(1/3): 23-32.
- [15] 刘振魁. 牦牛主要行为的观察. 四川畜牧兽医, 1996, (4): 14-15.
- [16] 赵钢, 许志信, 岳东贵, 李福生, 赵明旭, 杜秀武. 蒙古牛牧食行为的观察研究. 内蒙古农牧学院学报, 1999, 20(1): 29-35.
- [17] 鱼小军. 牦牛粪维系青藏高原高寒草地健康的作用机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [18] Oudshoorn F W, Kristensen T, Nadimi E S. Dairy cow defecation and urination frequency and spatial distribution in relation to time-limited grazing. *Livestock Science*, 2008, 113(1): 62-73.
- [19] Orr R J, Griffith B A, Champion R A, Cook J E. Defaecation and urination behaviour in beef cattle grazing semi-natural grassland. *Applied Animal Behaviour Science*, 2012, 139(1/2): 18-25.
- [20] 丁路明, 龙瑞军, 郭旭生, 尚占环. 放牧生态系统家畜牧食行为研究进展. 家畜生态学报, 2009, 30(5): 4-9.
- [21] 乌日娜, 卫智军, 王成杰. 放牧家畜牧食行为研究进展. 草业与畜牧, 2009, (12): 6-9.
- [22] 程晓涛, 崔占鸿, 张晓卫, 赵月萍, 柴沙陀, 刘书杰. 放牧牦牛不同季节排粪量与牧草营养价值的关系. 畜牧与兽医, 2015, 47(3): 69-72.
- [23] 汪诗平, 李永宏. 放牧率和放牧时期对绵羊排粪量、采食量和干物质消化率关系的影响. 动物营养学报, 1997, 9(1): 47-54.
- [24] 李香真, 陈佐忠. 放牧草地生态系统中氮素的损失和管理. 气候与环境研究, 1997, 2(3): 44-53.
- [25] Hirata M, Higashiyama M. Spatial distribution of urination by cattle in a daytime grazing system. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*, 1997, 10(5): 484-490.
- [26] White S L, Sheffield R E, Washburn S P, King L D, Green J T Jr. Spatial and time distribution of dairy cattle excreta in an intensive pasture system. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 2180-2187.
- [27] Errouissi F, Haloti S, Jay-Robert P, Janati-Idrissi A, Lumaret J P. Effects of the attractiveness for dung beetles of dung pat origin and size along a climatic gradient. *Environmental Entomology*, 2004, 33(1): 45-53.
- [28] 尚斌. 畜禽粪便热解特性试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [29] During C, Weeda W C, Dorofaeff F D. Some effects of cattle dung on soil properties, pasture production, and nutrient uptake: II. Influence of dung

- and fertilisers on sulphate sorption, pH, cation-exchange capacity, and the potassium, magnesium, calcium, and nitrogen economy. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1973, 16(3): 431-438.
- [30] 阿仁高娃, 刘新民. 内蒙古典型草原不同分解状态牛粪中的微生物和酶活性特征. *内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版*, 2011, 40(1): 82-86.
- [31] Saggiar S, Jha N, Deslippe J, Bolan N S, Luo J, Giltrap D L, Kim D G, Zaman M, Tillman R W. Denitrification and N_2O : N_2 production in temperate grasslands: Processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 173-195.
- [32] Eckard R J, Grainger C, De Klein C A M. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: a review. *Livestock Science*, 2010, 130(1/3): 47-56.
- [33] Tiquia S M, Tam N F Y. Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environmental Pollution*, 2000, 110(3): 535-541.
- [34] Fukumoto Y, Osada T, Hanajima D, Haga K. Patterns and quantities of NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale. *Bioresource Technology*, 2003, 89(2): 109-114.
- [35] 魏自民, 王世平, 魏丹, 许景钢. 生活垃圾堆肥过程中有机态氮形态的动态变化. *植物营养与肥科学报*, 2005, 11(2): 194-198.
- [36] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 179-184.
- [37] Rowarth J S, Gillingham A G, Tillman R W, Syers J K. Release of phosphorus from sheep faeces on grazed, hill country pastures. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1985, 28(4): 497-504.
- [38] 马丽红, 黄懿梅, 李学章, 祁金花, 赵振振, 李萍. 牛粪堆肥中氮素形态与微生物生理群的动态变化和耦合关系. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2674-2679.
- [39] 郑嘉熹, 魏源送, 吴晓凤, 曾小岚, 韩圣慧, 方云. 猪粪堆肥过程保氮固磷及温室气体(N_2O)减排研究. *环境科学*, 2011, 32(7): 2047-2055.
- [40] 熊雄, 李艳霞, 韩杰, 林春野, 索超, 张增强. 堆肥腐殖质的形成和变化及其对重金属有效性的影响. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2137-2142.
- [41] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 胡菊. 不同 C/N 比堆肥碳素物质变化规律研究. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1388-1393.
- [42] 于子旋, 杨静静, 王语嫣, 章力干, 常江, 郜红建, 孙叶笛. 畜禽粪便堆肥的理化腐熟指标及其红外光谱. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 2015-2023.
- [43] 单德鑫. 牛粪发酵过程中碳、氮、磷转化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006.
- [44] Cegarra J, Alburquerque J A, Gonzalez J, Tortosa G, Chaw D. Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") managed by mechanical turning. *Waste Management*, 2006, 26(12): 1377-1383.
- [45] Meunchang S, Panichsakpatana S, Weaver R W. Co-composting of filter cake and bagasse; By-products from a sugar mill. *Bioresource Technology*, 2005, 96(4): 437-442.
- [46] Pagans E, Barrena R, Font X, Sánchez A. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere*, 2006, 62(9): 1534-1542.
- [47] 任丽梅, 贺琪, 李国学, 路鹏, 李春萍. 氢氧化镁和磷酸混合添加剂在模拟堆肥中的保氮效果研究及其经济效益分析. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 225-228.
- [48] 刘新民, 陈海燕, 峥嵘, 乌云, 阿仁高娃, 王润润. 内蒙古典型草原羊粪和牛粪的分解特征. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(6): 791-796.
- [49] Parkinson R, Gibbs P, Burchett S, Misselbrook T. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure. *Bioresource Technology*, 2004, 91(2): 171-178.
- [50] 姜圆圆. 放牧绵羊排泄物养分降解及其对温室气体排放的贡献[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [51] 李博, 何奕忻, 王志远, 罗鹏, 李洪泉. 青藏高原东部高寒草甸牦牛粪便的分解过程和科学管理. *草业科学*, 2012, 29(8): 1302-1306.
- [52] Holter P. Effect of dung-beetles (*Aphodius* spp.) and earthworms on the disappearance of cattle dung. *Oikos*, 1979, 32(3): 393-402.
- [53] Curry J P. Invertebrate fauna of grassland and its influence on productivity. II. Factors affecting the abundance and composition of the fauna. *Grass and Forage Science*, 1987, 42(3): 197-212.
- [54] Holter P. Resource utilization and local coexistence in a guild of scarabaeid dung beetles (*Aphodius* spp.). *Oikos*, 1982, 39(2): 213-227.
- [55] Wu X W, Sun S C. The roles of beetles and flies in yak dung removal in an alpine meadow of eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecoscience*, 2010, 17(2): 146-155.
- [56] Underhay V H S, Dickinson C H. Water, mineral and energy fluctuations in decomposing cattle dung pats. *Grass and Forage Science*, 1978, 33(3): 189-196.
- [57] Dickinson C H, Craig G. Effects of water on the decomposition and release of nutrients from cow pats. *New Phytologist*, 1990, 115(1): 139-147.

- [58] Lovell R D, Jarvis S C. Effect of cattle dung on soil microbial biomass C and N in a permanent pasture soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(3): 291-299.
- [59] Wachendorf C, Lampe C, Taube F, Dittert K. Nitrous oxide emissions and dynamics of soil nitrogen under ¹⁵N-labeled cow urine and dung patches on a sandy grassland soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(2): 171-180.
- [60] Williams P H, Haynes R J. Effect of sheep, deer and cattle dung on herbage production and soil nutrient content. *Grass and Forage Science*, 1995, 50(3): 263-271.
- [61] Hatch D J, Lovell R D, Antil R S, Jarvis S C, Owen P M. Nitrogen mineralization and microbial activity in permanent pastures amended with nitrogen fertilizer or dung. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(4): 288-293.
- [62] Aarons S R, Hosseini H M, Dorling L, Gourley C J P. Dung decomposition in temperate dairy pastures. II. Contribution to plant-available soil phosphorus. *Australian Journal of Soil Research*, 2004, 42(1): 115-123.
- [63] Aarons S R, O'Connor C R, Gourley C J P. Dung decomposition in temperate dairy pastures. I. Changes in soil chemical properties. *Australian Journal of Soil Research*, 2004, 42(3): 107-114.
- [64] Saarijarvi K, Virkajarvi P. Nitrogen dynamics of cattle dung and urine patches on intensively managed boreal pasture. *Journal of Agricultural Science*, 2009, 147(4): 479-491.
- [65] Yoshitake S, Soutome H, Koizumi H. Deposition and decomposition of cattle dung and its impact on soil properties and plant growth in a cool-temperate pasture. *Ecological Research*, 2014, 29(4): 673-684.
- [66] Schuman G E, Janzen H H, Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 391-396.
- [67] Tully K L, Abwanda S, Thiong'o M, Mutuo P M, Rosenstock T S. Nitrous oxide and methane fluxes from urine and dung deposited on Kenyan pastures. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(4): 921-929.
- [68] Shepherd M, Menneer J, Ledgard S, Sarathchandra U. Application of carbon additives to reduce nitrogen leaching from cattle urine patches on pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2010, 53(3): 263-280.
- [69] Wachendorf C, Taube F, Wachendorf M. Nitrogen leaching from ¹⁵N labelled cow urine and dung applied to grassland on a sandy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 73(1): 89-100.
- [70] 颜才玉, 孙义, 刘阳, 王召峰, 常生华, 侯扶江. 两个放牧率下藏羊粪在高寒草甸的分解特征. *生态学报*, 2018, 38(20): 1-8.
- [71] Yu X J, Xu C L, Muhammad I, Long R J. Effects of yak dung patch dropped in cold season on soil and pasture on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 241-244.
- [72] Xu Z R, Lu C X, Cheng S K, Bijaya G C D. Effect of pasture enclosure and dung droppings on soil nutrients and aboveground biomass in alpine grassland in the northern Tibetan Plateau. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 2016, 26(5): 1361-1367.
- [73] Ma X Z, Ambus P, Wang S P, Wang Y F, Wang C J. Priming of soil carbon decomposition in two Inner Mongolia grassland soils following sheep dung addition: a study using ¹³C natural abundance approach. *PLoS One*, 2013, 8(11): e78578.
- [74] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 毛培胜. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响. *中国草地*, 2001, 23(4): 41-47.
- [75] 孙翼飞, 沈菊培, 张翠景, 韩国栋, 红梅, 赵巴音那木拉, 贺纪正. 不同放牧强度下土壤氨氧化和反硝化微生物的变化特征. *生态学报*, 2018, 38(8): 2874-2883.
- [76] Cardenas L M, Misselbrook T M, Hodgson C, Donovan N, Gilhespy S, Smith K A, Dhanoa M S, Chadwick D. Effect of the application of cattle urine with or without the nitrification inhibitor DCD, and dung on greenhouse gas emissions from a UK grassland soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 235: 229-241.
- [77] van Groenigen J W, Kuikman P J, De Groot W J M, Velthof G L. Nitrous oxide emission from urine-treated soil as influenced by urine composition and soil physical conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 463-473.
- [78] Mazzetto A M, Barneze A S, Feigl B J, Van Groenigen J W, Oenema O, De Klein C A M, Cerri C C. Use of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) does not mitigate N₂O emission from bovine urine patches under Oxisol in Northwest Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 83-92.
- [79] Lessa A C R, Madari B E, Paredes D S, Boddey R M, Urquiaga S, Jantalia C P, Alves B J R. Bovine urine and dung deposited on Brazilian savannah pastures contribute differently to direct and indirect soil nitrous oxide emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 190: 104-111.
- [80] Cai Y J, Wang X D, Tian L L, Zhao H, Lu X Y, Yan Y. The impact of excretal returns from yak and Tibetan sheep dung on nitrous oxide emissions in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 90-99.
- [81] Verma P, Sagar R, Giri N, Patel R, Verma H, Singh D K, Kumar K. Variations in soil properties, species composition, diversity and biomass of herbaceous species due to ruminant dung residue in a seasonally dry tropical environment of India. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 2015, 3

- (2): 112-128.
- [82] Dai X B. Impact of cattle dung deposition on the distribution pattern of plant species in an alvar limestone grassland. *Journal of Vegetation Science*, 2000, 11(5): 715-724.
- [83] Sordi A, Dieckow J, Bayer C, Albuquerque M A, Piva J T, Zanatta J A, Tomazi M, Da Rosa C M, De Moraes A. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 190: 94-103.
- [84] 何奕忻, 孙庚, 刘琳, 罗鹏, 吴宁, 罗光荣. 牦牛粪便对川西北高寒草甸土壤养分的影响. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(5): 666-671.
- [85] 闵星星, 马玉寿, 李世雄, 王彦龙. 羊粪对青海草地早熟禾草地生产力和土壤养分的影响. *草业科学*, 2014, 31(6): 1039-1044.
- [86] 郭彦军, 田茂春, 宋代军, 杨游, 张家骅, 沃丽娜, 张彦, 周祚平, 刘伯云, 任良彬, 谢云洪, 胡斯元. 施用羊粪条件下人工草地土壤硝态氮淋失量研究. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 53-56.
- [87] 王兴, 宋乃平, 杨新国, 肖绪培, 杨明秀. 羊粪归还对荒漠草原表层土壤碳氮的影响. *水土保持通报*, 2013, 33(5): 6-10.
- [88] 孙红, 于应文, 马向丽, 牟晓明, 张红梅, 廖加法, 侯扶江. 畜粪沉积对贵州高原黑麦草+白三叶草地养分和植被构成的影响. *草业科学*, 2014, 31(3): 488-498.
- [89] Weeda W C. Effect of cattle dung patches on soil tests and botanical and chemical composition of herbage. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1977, 20(4): 471-478.
- [90] Adair E C, Parton W J, Del Grosso S J, Silver W L, Harmon M E, Hall S A, Burke I C, Hart S C. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 2636-2660.
- [91] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, Six J. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 657-666.
- [92] Makkonen M, Berg M P, Handa I T, Hättenschwiler S, Van Ruijven J, Van Bodegom P M, Aerts R. Highly consistent effects of plant litter identity and functional traits on decomposition across a latitudinal gradient. *Ecology Letters*, 2012, 15(9): 1033-1041.
- [93] Qiao N, Xu X L, Hu Y H, Blagodatskaya E, Liu Y W, Schaefer D, Kuzyakov Y. Carbon and nitrogen additions induce distinct priming effects along an organic-matter decay continuum. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19865.
- [94] Liang D F, Niu K C, Zhang S T. Interacting effects of yak dung deposition and litter quality on litter mass loss and nitrogen dynamics in Tibetan alpine grassland. *Grass and Forage Science*, 2018, 73(1): 123-131.