

DOI: 10.5846/stxb201709221710

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): - .

Yan C Y, Sun Y, Liu Y, Wang Z F, Chang S H, Hou F J. Decomposition characteristics of Tibetan sheep feces from two stocking rates in alpine meadows. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

两个放牧率下藏羊粪在高寒草甸的分解特征

颜才玉, 孙 义, 刘 阳, 王召峰, 常生华, 侯扶江*

兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学农业部草牧业创新重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 730020

摘要: 青藏高原拥有全球独特的放牧系统, 国内外较少通过定量控制的放牧试验研究放牧率对畜粪分解的作用。用双层盆叠放法比较高寒草甸两个放牧率下藏羊粪的分解规律。8 羊/hm²放牧率下的分解速率大于 16 羊/hm²。随着放牧率增加, 羊粪 C、N、P 的归还量、草地残留和淋溶量及其所占比例上升, C、N 的大气排放量增加。粪中 P 的分解与 C/N 比负相关, C 的分解速率与 N/P 比正相关。用 Olson 的指数模型拟合, 羊粪分解 50% 和 95% 所需时间, 除了木质素, 粪干物质、C、N、P、纤维素、半纤维素的分解时间 16 羊/hm²放牧率下均长于 8 羊/hm²放牧率。单位重量粪的分解速率, 16 羊/hm²放牧率下较快; 单位面积草地上, 畜粪的分解在 16 羊/hm²放牧率下较快。研究结果对于全球变暖背景下, 调整高寒草甸放牧策略有指导作用。

关键词: 轮牧; 元素循环; 分解周期; 淋溶; 大气排放; 温室气体

Decomposition characteristics of Tibetan sheep feces from two stocking rates in alpine meadows

YAN Caiyu, SUN Yi, LIU Yang, WANG Zhaofeng, CHANG Shenghua, HOU Fujiang*

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: The grazing system on the Qinghai-Tibetan Plateau is unique from that elsewhere in the world. Effects of quantitative stocking rates on decomposition of livestock feces is rare. In this study, we compared sheep feces decomposition patterns under two specific stocking rates by the method of piled-up two pots pile in an alpine meadow. The results showed that decomposition rates of sheep feces with 8 sheep/hm² were higher than that with 16 sheep/hm². The return of C, N, and P as well as the residue and leaching of C and N in sheep feces increased with increasing stock rates, while the emission of C and N also increased. A negative relationship was found between C/N ratios and the decomposition rate of P in sheep feces, while a positive relationship was found between N/P ratios and the decomposition rate of C. Based on the exponential model of Olson, the decomposition periods of 50% and 95% for dry matter, C, N, P, cellulose, and hemicellulose (except lignin) in sheep feces were longer with 16 than 8 sheep/hm². Decomposition rates per unit dry weight and per unit area of feces were quicker with 16 than 8 sheep/hm². In the context of global warming, these results are useful in guiding studies on grazing strategies in alpine meadows.

Key Words: rotational grazing; element cycle; decomposition cycle; leach; atmospheric emissions; greenhouse gases

家畜与草地互作是放牧生态系统物质循环的关键驱动力之一, 放牧家畜通过土—草—畜物质循环对草地

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31672472); 草地农业系统耦合与管理教育部创新团队(IRT_17R50)

收稿日期: 2017-09-22; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cyhoufj@lzu.edu.cn

施加影响^[1-3]。排泄物是放牧家畜作用于草地的重要途径之一^[4],家畜采食的牧草只转化很少一部分,60%—90%的养分又以粪尿的形式归还草地^[5],促进了生态系统的物质循环和能量流动^[6-8],成为草畜互作的关键环节之一^[9-10]。而且,过度放牧导致草地的物质输出长期高于输入,是草地退化的原因之一^[2,6]。

放牧草地一般有 20% 和 5% 的面积分别被家畜的尿和粪覆盖^[11]。家畜尿和粪的作用之一是调节草地元素的平衡^[2],但是管理不当则容易导致草地元素流失,不仅破坏了生态系统的物质平衡,而且通过淋溶和挥发污染环境^[12-14]。因此,放牧家畜排泄物的管理日益受到关注。目前研究主要集中于两方面:一是家畜排泄物分解的时效以及对土壤和植物的影响等^[15-17];一般,粪斑在排泄后 1—2 月内,养分释放量最大,其后的释放过程渐趋于平缓 and 微弱^[2,18];季节是制约粪便分解的关键因素^[19-20];草地上,家畜排泄物的分布是导致草地土壤营养异质性和植被异质性的原因之一^[21]。二是家畜排泄物对放牧生态系统温室气体排放的贡献^[22],家畜排泄物几乎是牧场所有类型温室气体排放的主要来源^[23-24];相对于家畜的肠道发酵,排泄物对牧场 N_2O 的排放影响更大^[25];家畜排泄物的 CH_4 排放相对于瘤胃的排放量则可以忽略不计^[26-27]。

放牧率是家畜影响放牧系统结构与功能的重要因素之一^[28]。家畜的选择性采食、食谱构成与放牧率密切相关,并对排泄物构成及其分解有显著影响^[29]。但是,国际上鲜有放牧率和放牧时期对家畜排泄物分解影响的报道,我国草原虽然占国土面积 41.7%,而且以放牧利用为主,此类研究报道也很少。为此,本文在青藏高原这一全球独特的生态区域,通过在高寒草甸开展定量控制的藏系绵羊轮牧试验^[30-31],重点研究放牧率对羊粪分解的作用,尤其是羊粪分解过程中的 C、N、P 等物质循环,以期揭示青藏高原放牧家畜排泄物的分解规律,阐明其对生态系统物质平衡的作用,进而为高寒牧场可持续的放牧管理提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于甘肃省玛曲县阿孜畜牧科技示范园区,地理位置 $35^{\circ}58'N$ 、 $101^{\circ}53'E$,平均海拔 3650 m,年均气温 $1.2^{\circ}C$,年日照时数约 2580 h,年平均降霜日大于 270 d,无绝对无霜期,四季不明显,仅有冷暖季之分。多年平均降水量约 620 mm,主要集中在 5—9 月。根据草原的综合顺序分类法,草地类型是典型的高寒草甸,主要植物有禾叶嵩草(*Kobresia graminifolia*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等,杂类草以毛茛科的钝裂银莲花(*Anemone obtusiloba*)等为主^[30]。

1.2 试验方法

1.2.1 放牧试验与畜粪收集

在地势较为平缓、植被典型地段建立放牧试验样地。设置 0 (不放牧)、8 和 16 羊/ hm^2 3 个放牧率梯度,4 次重复。每个小区放牧 8 只体重较为一致的藏系公绵羊,内设 3 个面积相同的轮牧亚区,每放牧小区轮牧周期 30 天,放牧期 10 d。暖季 7—9 月放牧,冷季 10—12 月放牧^[30-31]。

放牧区家畜粪量的调查与羊粪收集。每个放牧小区沿对角线设置 10 个 $1 m \times 1 m$ 样方,每次轮牧结束后调查样方内粪颗粒数,并收集样方中羊粪,一部分用于称干物质重。

1.2.2 羊粪分解试验

采用双层盆叠放法 (method of piled-up two pots pile) 研究羊粪的分解 (图 1) (ZL201410338981.0)。暖季轮牧第 1 轮结束后,在每个放牧小区分别收集新鲜羊粪样品,分成两部分,一部分带回实验室用于成分分析,另一部分置于上层的盆内,每盆 100 g—130 g,用于分解试验。上层盆高 10.0 cm,口径 12.5 cm,盆底直径 8.5 cm;盆底部有直径 1 cm 圆孔 5 个,以利于物质下渗;盆底铺 3 层 40 mm 的尼龙纱布,羊粪放在纱布上。将盛

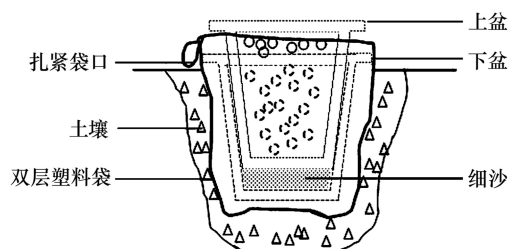


图 1 双层盆叠放法示意图

Fig.1 Sketch of piled-up two pots

有羊粪的花盆置于下层的盆之上。下层盆高 12.0 cm,口径 14.0 cm,盆体密封无洞;盆内放置 8—10 cm 厚已知重量的干燥细砂,以收集上盆中下渗的液体。下层花盆外套 2 层塑料袋,以防止其他物质进入盆内以及盆内的物质流失。每组盆完全随机区组排列,下层盆埋于土中,土表至盆沿,上层盆的盆沿高出地面 4—5 cm,能接收降水和降尘,同时防止外界其他物质流入。以细砂土替代羊粪做空白对照,物质沉降量为对照盆中物质的增加量。三次取样,四次重复。

装载羊粪的盆于当年 7 月下旬埋入样地。分别于埋样当日、2 个月后(9 月 26 日)和翌年春季(3 月 11 日)3 次取样。不定期收集塑料袋中的水样,以防样品逸出、损失。样品包括上层盆的粪样和下层盆的细砂,以及对照样品。测定样品总量后,将样品分为两份,一份 105℃ 烘干至恒重测定干物质,另一份自然风干、粉碎后用于成分测定。

凯氏定氮法测定全氮,硫酸—重铬酸钾法测定有机碳含量,FLAstar 5000 流动注射分析测定全磷含量。

1.3 羊粪的分解速率

$$DR_F = (1 - \frac{FS_{t_2}}{FS_{t_1}}) \times 100\% \quad (1)$$

式中, $DR_F(\%)$ 为羊粪的分解率(decomposition rate of feces), FS_{t_1} 和 FS_{t_2} 分别为 t_1 和 t_2 时刻粪样的干重(dry matter of feces sample, FS, g),本研究中分别为试验开始时和结束时的干重。试验结束时,供试羊粪的干物质分解量达到了 50%以上。

$$RR_N = (1 - \frac{FS_{t_2} - CN_{t_2}}{FS_{t_1} - CN_{t_1}}) \times 100\% \quad (2)$$

式中, $RR_N(\%)$ 为粪氮的释放速率(release rate of feces nitrogen), CN_{t_1} 和 CN_{t_2} 分别为 t_1 和 t_2 时刻粪氮的含量(content of feces nitrogen, $CN, \%$)。

$$RR_P = (1 - \frac{FS_{t_2} - CP_{t_2}}{FS_{t_1} - CP_{t_1}}) \times 100\% \quad (3)$$

式中, $RR_P(\%)$ 为粪磷的释放速率(release rate of feces phosphorus),式中 CP_{t_1} 和 CP_{t_2} 分别为 t_1 和 t_2 时刻粪磷的含量(content of feces phosphorus, $CP, \%$)。

$$RR_C = (1 - \frac{FS_{t_2} - CC_{t_2}}{FS_{t_1} - CC_{t_1}}) \times 100\% \quad (4)$$

式中, $RR_C(\%)$ 为粪碳的释放速率(release rate of feces carbon), CC_{t_1} 和 CC_{t_2} 分别为 t_1 和 t_2 时刻粪碳的含量(content of feces carbon, $CC, \%$)。

$$DDR_F = \frac{DR_F}{\Delta t_{t_1, t_2}} \quad (5)$$

式中, $DDR_F(\%/d)$ 为羊粪日均分解速率(daily decomposition rate of feces)。粪中碳、氮、磷的日均释放速率同理计算。这个指标一定程度上可以指示不同季节样品分解的快慢。

1.4 羊粪中物质的归还

$$DD_F = \frac{DDR_F \times FM}{100} \quad (6)$$

式中, $DD_F(g/m^2 \cdot d)$ 为单位面积放牧地羊粪的日均分解量(daily decomposition of feces), FM 为 t_1 时单位面积草地上羊粪的干物质质量(feces mass, $FM, g/m^2$)。单位面积放牧地粪碳、氮、磷的日释放量同理计算。

$$D_F = \frac{DR_F \times FM}{100} \quad (7)$$

式中, $D_F(g/m^2)$ 为单位面积放牧地羊粪的分解量(decomposition of feces)。

$$R_F = FM - D_F = FM \times (1 - \frac{DR_F}{100}) \times 100\% \quad (8)$$

式中, R_F (g/m^2) 为单位面积放牧地羊粪中以有机残渣形式残留于草地的量, 即残留草地的量 (residue of feces)。

$$D_N = \frac{CN_{il} \times FM}{100} \times \frac{RR_N}{100} \quad (9)$$

式中, D_N (g/m^2) 为粪氮的分解量 (decomposition of feces nitrogen)。粪碳和粪磷的释放量 (D_C 和 D_P) 同理计算。

$$R_N = \frac{CN_{il} \times FM}{100} - D_N = \frac{CN_{il} \times FM}{100} \times \left(1 - \frac{RR_N}{100}\right) \quad (10)$$

式中, R_N (g/m^2) 单位面积放牧地粪氮的残留量 (residue of feces nitrogen)。粪碳和粪磷的残留量 (R_C 和 R_P) 同理计算。

羊粪碳、氮、磷的平衡是归还、排放、沉降、淋溶、残留等过程综合作用的结果 (图 2)。

羊粪随降水归还于草地的量为淋溶的量 (leaching of feces, LF , g/m^2)。以 N 为例, LF = 试验容器中氮素的增加量 - 对照容器中氮素的增加量。碳和磷的淋溶量同理计算。

物质的沉降量以 N 为例计算 (deposition of N, SN , g/m^2)。 SN = 对照盆中氮素的增加量 / 上盆盆口面积。碳和磷的沉降量同理计算。

N 排放量 = N 归还量 + N 沉降量 - N 残留草地的量 - N 淋溶量。碳的排放量同理计算。

物质沉降分布于整个放牧区, 而不仅仅局限于羊粪。这里计算羊粪的沉降量, 原因有二: 沉降客观发生, 是生态系统物质循环的一个环节; 粪沉降量占草地归还量的比例不足 0.5%, 在羊粪物质循环中计算, 既不影响准确性, 又反映出沉降的客观事实。

用 Olson 的指数衰减模型^[32], 构建排泄物分解残留率随时间变化的指数回归方程。 $y = ae^{-kt}$, y 为重量残留率 (%), a 为拟合参数, k 为分解系数, t 为分解时间。利用该模型估测排泄物分解 50% 时和分解 95% 时所需时间。

1.5 C 和 N 排放

用静态箱法测定^[33]。

1.6 数据统计分析

数据处理用 SPSS 19.0 进行相关性分析和差异显著性 (LSD) 分析, 用 Excel 2007 作图。

2 结果与分析

2.1 羊粪的分解

两个放牧率之间, 单位面积的高寒草甸上羊粪及其各成分的分解量、元素的归还量, 仅半纤维素没有差异, 其余指标 (干物质、C、N、P、纤维素、木质素) 16 羊/ hm^2 的放牧区显著高于 8 羊/ hm^2 的放牧区 (图 3)。原因可能是 16 羊/ hm^2 的高寒草甸羊粪量平均 $77.76 \text{ g}/\text{m}^2$, 高于 8 羊/ hm^2 的放牧区 53.5% ($P < 0.01$)。

2.2 粪中物质的转移

2.2.1 碳

试验期大气 C 沉降量为 $296.9 \text{ g}/\text{hm}^2$ (图 4)。8 羊/ hm^2 放牧率下, 草地羊粪 C 的归还量为 $225.449 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 归还到草地的总碳量中, 50.62% 排放到大气中, 1.29% 随降水淋溶, 48.08% 留存于草地。16 羊/ hm^2 放牧率下, 羊粪 C 的总归还量为 $348.598 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 比 8 羊/ hm^2 放牧率下高 54.62% ($P < 0.05$); 归还草地的 C 中, 呼吸排放、淋溶和残留草地的 C 分别占 51.75%、1.59% 和 46.81%, 分别比低放牧率下高 57.34%、88.89% 和

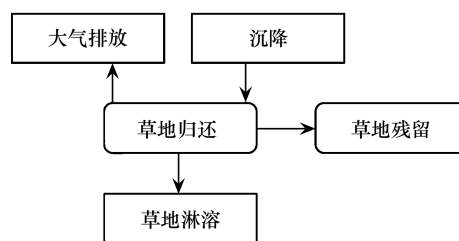


图2 放牧系统畜粪元素的转移模式

Fig.2 Element flow of feces in the grazed rangeland

49.37%。随着放牧率增加,粪 C 的归还量、排放和淋溶量及其所占比例上升;残留量也增加,但所占比例略有下降。

2.2.2 氮

研究期间大气 N 沉降量为 $7.9\text{g}/\text{hm}^2$ (图 4)。8 羊/ hm^2 放牧率的放牧地,羊粪与降尘归还 N 的 36.47%通过微生物呼吸排放到大气中,3.50%随淋溶,60.03%残存于草地。16 羊/ hm^2 放牧率下,羊粪的 N 归还量高出 8 羊/ hm^2 放牧率 57.30% ($P < 0.05$);排放到大气中和淋溶的 N 分别占 33.73%和 4.02%,草地残留占 62.25%。低放牧率下,排放、淋溶和残留的 N 分别只有高放牧率的 68.91%、55.40%和 61.47%。放牧增加粪 N 的归还量、排放量、淋溶量和残留量,但排放 N 的占比略有减少。

2.2.3 磷

羊粪分解期间大气 P 沉降量为 $38.9\text{g}/\text{hm}^2$,是 N 沉降量的 4.92 倍 (图 4)。粪 P 的归还量在 8 羊/ hm^2 放牧率下为 $253.3\text{g}/\text{hm}^2$;归还的总 P 中,41.34%淋溶,58.66%残留于草地。16 羊/ hm^2 放牧率下,粪 P 的归还量高出低放牧率 73.27% ($P < 0.05$);所归还的 P,淋溶量占 47.13%,残留量占 52.87%。高放牧率下 P 的淋溶量和残留量比 8 羊/ hm^2 分别高 86.42%和 47.37%。放牧促进粪 P 的归还和淋溶。

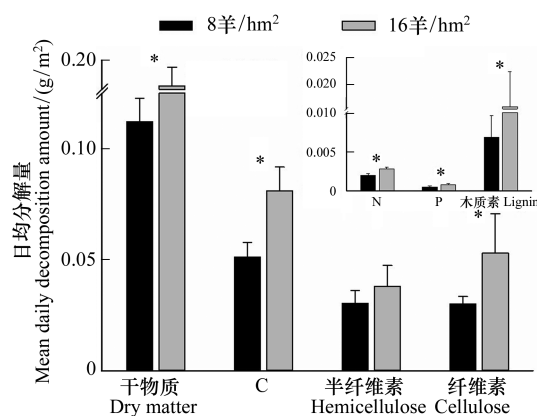


图 3 不同放牧率下羊粪干物质及主要组分日均分解量

Fig.3 Mean daily decomposition amount of dry matter and major components of sheep feces (mean±SD)

* means significant different between stocking rates at 0.05 level

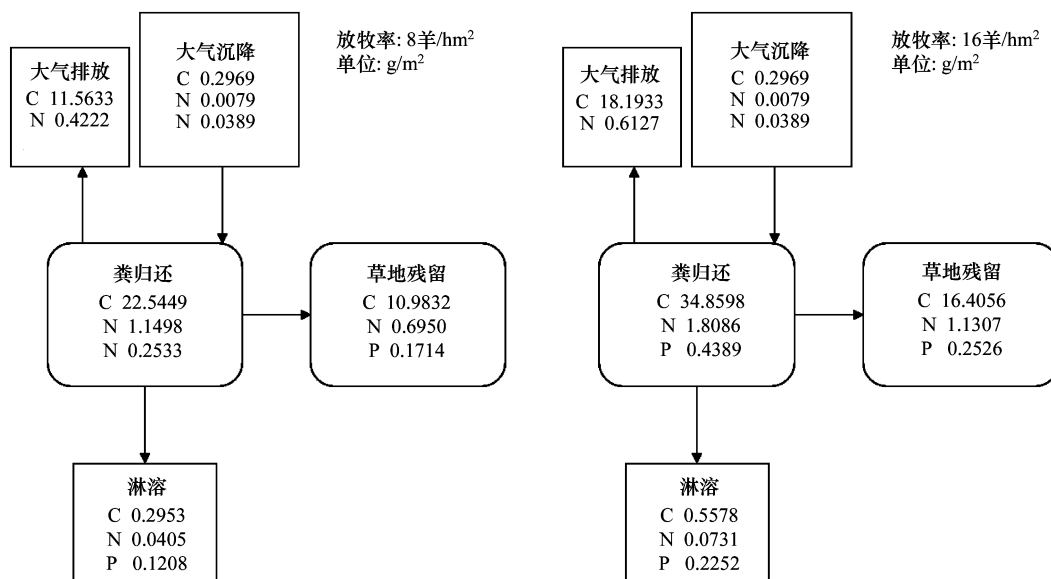


图 4 高寒草甸粪 C、N、P 元素的转移

Fig.4 Transfer of C, N and P of feces in alpine meadow

2.3 粪中元素比值与物质分解的关系

粪中 C、N、P 的分解速率相互之间正相关极显著 (图 5)。粪 P 的分解与 C/N 比负相关,粪 C 的分解随 N/P 比增大而增加 (图 5)。

2.4 粪的分解模型

高寒草甸放牧系统,藏羊粪分解 50% 所需时间,除了纤维素和木质素为 87—152d,其他均在 179—231 d

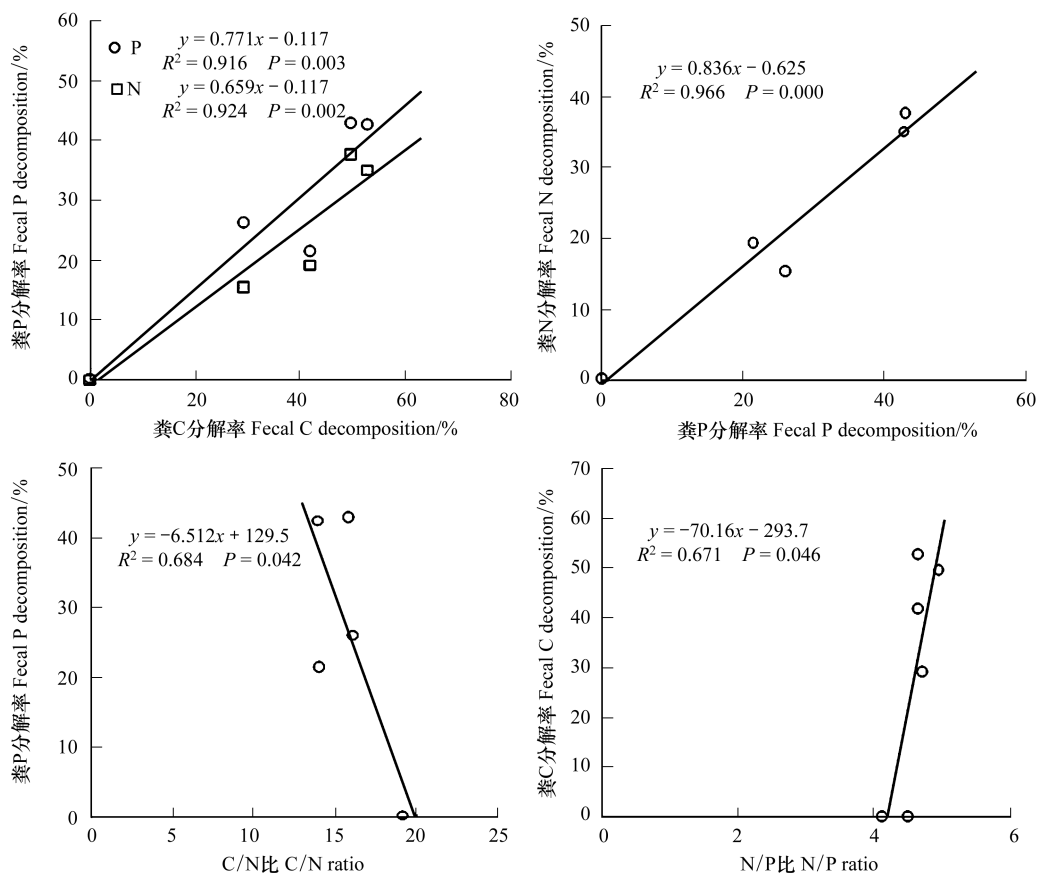


图5 粪中物质分解的相互关系

Fig.5 The relationships among C, N, P during decomposition process of Tibetan sheep fecal

(表1)。95%物质分解所需的时间一般在 900—1000 d 之间,只有纤维素和半纤维素的分解时间不到 700 d。16 羊/hm²放牧率下,各物质分解 50%和 95%的时间均较 8 羊/hm²长(表1)。

表 1 排泄物分解残留率(%) 随时间的指数回归方程

Table 1 Regression equations of feces decomposition remains

放牧率 Stocking rate/ (羊/hm ²)	成分 Component	回归方程 Regression equation	决定系数 Correlation efficiency (R ²)	半分解时间 Half decomposition time/d	分解 95%所需时间 95% decomposition time /d
8	干物质	y = 89.705e ^{-0.003 t}	0.8117	195	962
	C	y = 85.502e ^{-0.003 t}	0.7174	1791	946
	N	y = 96.145e ^{-0.002 t}	0.9161	218	985
	P	y = 95.205e ^{-0.002 t}	0.8579	215	982
	半纤维素	y = 89.038e ^{-0.003 t}	0.483	192	960
	纤维素	y = 80.878e ^{-0.004 t}	0.6994	120	696
	木质素	y = 106.8e ^{-0.005 t}	0.806	152	612
16	干物质	y = 92.6044e ^{-0.003 t}	0.8789	205	973
	C	y = 93.634e ^{-0.003 t}	0.9195	209	977
	N	y = 97.774e ^{-0.002 t}	0.9546	224	991
	P	y = 96.765e ^{-0.002 t}	0.8997	220	988
	半纤维素	y = 99.97e ^{-0.003 t}	0.9005	231	998
	纤维素	y = 82.968e ^{-0.004 t}	0.6892	127	702
	木质素	y = 109.04e ^{-0.009 t}	0.7599	87	342

3 讨论

用双层盆叠法研究畜粪的分解避免了现存量估算法的理论计算和 ^{15}N 和 ^{14}C 等同位素法对技术和设备的要求^[34-39];与分解袋法相比,可以将畜粪分解区分为草地残留、淋溶以及大气排放等^[40-41],从而较为系统地模拟畜粪分解的物质循环过程。放牧生态系统中,除了排放,物质输出的另一个重要途径是畜产品,物质输入较为固定的途径之一是大气沉降^[42]。试验期间,高寒草甸藏绵羊放牧系统的畜产品生产量在8羊/hm²和16羊/hm²的放牧率下分别为99.12 kg/hm²和172.48 kg/hm²。如果以欧拉型藏羊活体的蛋白质含量为20.95%、身体含水量70%计测^[43],低放牧率和高放牧率下畜产品输出N量分别约为1.16 kg/hm²和2.02 kg/hm²,均低于大气排放的N和留存草地的N,但显著多于淋溶的N和大气沉降的N;P素平衡有类似规律。因此,在小流域尺度上,放牧系统的N元素等平衡分析需要综合考虑共生菌和土壤微生物、地表径流等的综合作用。

影响畜粪分解的主要因子具有时空变化特征,放牧强度导致较小的畜粪组成异质性,只有温度较高等较适宜的分解环境中才得以表现^[44];同时,畜粪分解对温度可能更加敏感^[45]。高放牧率下,仅木质素的分解速率高于低放牧率,而其他所有指标(干物质、C、N、P、半纤维素及纤维素)均小于低放牧率,原因可能是高放牧率降低了家畜的选择性采食,并迫使家畜采食木质素较多的牧草,进而导致粪中木质素含量较高^[30]。通常有机物分解包括初期糖、淀粉、蛋白质等易分解物质快速分解和中后期木质素、纤维素、脂肪等难分解物质的缓慢分解过程^[46]。当畜粪内木质素含量较高时导致易分解物质快速分解完并开始分解木质素等,最终导致木质素在高放牧率时分解速率高于低放牧率,而其他指标(干物质、C、N、P、半纤维素及纤维素)则小于低放牧率。

高放牧率增加羊粪及各种物质向高寒草甸的返还量(图4),但是Olson的指数衰减模型拟合的结果显示,高放牧率延长羊粪在高寒草甸的分解时间(表1)。因此,在未来全球升温的背景下,我国在包括高寒草甸在内的所有草原区实施“退牧还草”、“生态补奖”等一系列控制放牧的政策,对家畜排泄物的营养循环将产生更为复杂的影响,它在流域、区域或国家等尺度上对草原的结构与功能有哪些作用,面向物质平衡需要调整哪些适放牧的管理措施,是值得深入研究的方面。

参考文献(References):

- [1] 汪诗平,李永宏.不同放牧率和放牧时期绵羊粪便中各化学成分变化及与所食牧草各成分间的关系.动物营养学报,1997,9(2):49-56.
- [2] 侯扶江,杨中艺.放牧对草地的作用.生态学报,2006,26(1):244-264.
- [3] Morton J D, Baird B D. Spatial distribution of dung patches under sheep grazing. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1990, 33(2): 285-294.
- [4] 侯扶江,常生华,于应文,林慧龙.放牧家畜的践踏作用研究评述.生态学报,2004,24(4):784-789.
- [5] Barrow N J. Return of nutrients by animals // Snaydon R W eds. Managed Grasslands. England: Oxford, 1987: 181-186.
- [6] Chen X J, Hou F J, Matthew C, He X Z. Stocking rate effects on metabolizable energy intake and grazing behaviour of Tan sheep in steppe grassland on the Loess Plateau of Northwest China. The Journal of Agricultural Science, 2010, 148(6): 709-721.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 高英志,韩兴国,汪诗平.放牧对草原土壤的影响.生态学报,2004,24(4):790-797.
- [10] 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.
- [11] 任继周.草地农业生态学.北京:中国农业出版社,1995:51-84.
- [12] Hallberg G R. Nitrate in Ground Water in the United States. Amsterdam: Elsevier Press, 1989: 35-74.
- [13] Hou F J. Adaptation of mixed crop-livestock systems in Asia // Fuhrer J, Gregory P J. eds. Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems. London: CABI, 2014: 153-166.
- [14] Whitehead D C, Lockyer D R, Raistrick N. Volatilization of ammonia from urea applied to soil: influence of hippuric acid and other constituents of livestock urine. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(6): 803-808.
- [15] Weeda W C. The effect of cattle dung patches on pasture growth, botanical composition, and pasture utilisation. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1967, 10(1): 150-159.

- [16] Dickinson C H, Underhay V S H, Ross V. Effect of season, soil fauna and water content on the decomposition of cattle dung pats. *New Phytologist*, 1981, 88(1): 129-141.
- [17] 姜世成, 周道玮. 草原牛粪对牲畜取食影响的研究. *中国草地*, 2002, 24(1): 42-45, 54-54.
- [18] 刘阳, 孙义, 颜才玉, 张涛, 袁航, 侯扶江. 轮牧高寒草甸温室气体排放的季节动态与羊粪的作用. *草业科学*, 2012, 29(8): 1212-1216.
- [19] MacDiarmid B N, Watkin B R. The cattle dung patch; 1. Effect of dung patches on yield and botanical composition of surrounding and underlying pasture. *Grass and Forage Science*, 1971, 26(4): 239-246.
- [20] Floate M J S. Decomposition of organic materials from hill soils and pastures; II. comparative studies on the mineralization of carbon, nitrogen and phosphorus from plant materials and sheep faeces. *Soil Biology and Biochemistry*, 1970, 2(3): 173-185.
- [21] Shiyomi M, Okada M, Takahashi S, Tang Y H. Spatial pattern changes in aboveground plant biomass in a grazing pasture. *Ecological Research*, 1998, 13(3): 313-322.
- [22] 林巧燕, 布仁巴音, 汪诗平. 反刍家畜及其排泄物对 N_2O 和 CH_4 排放的贡献. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2604-2612.
- [23] Liu Y, Yan C Y, Matthew C, Wood B, Hou F J. Key sources and seasonal dynamics of greenhouse gas fluxes from yak grazing systems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40857.
- [24] Amon B, Amon T, Boxberger J, Alt C. Emissions of NH_3 , N_2O and CH_4 from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 60(1/3): 103-113.
- [25] 杨哈蕾, 陈先江, 侯扶江. 陇东黄土高原草地与畜粪夏季的温室气体排放. *草业科学*, 2016, 33(8): 1454-1459.
- [26] McCaughey W P, Wittenberg K, Corrigan D. Impact of pasture type on methane production by lactating beef cows. *Canadian Journal of Animal Science*, 1999, 79(2): 221-226.
- [27] Murray P J, Gill E, Baldson S L, Jarvis S C. A comparison of methane emissions from sheep grazing pastures with differing management intensities. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 60(1/3): 93-97.
- [28] O'Reagain P, Bushell J, Holmes B. Managing for rainfall variability: long-term profitability of different grazing strategies in a northern Australian tropical savanna. *Animal Production Science*, 2011, 51(3): 210-224.
- [29] Vaieretti M V, Cingolani A M, Pérez Harguindeguy N, Cabido M. Effects of differential grazing on decomposition rate and nitrogen availability in a productive mountain grassland. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 675-691.
- [30] Sun Y, Angerer J P, Hou F J. Effects of grazing systems on herbage mass and liveweight gain of Tibetan sheep in Eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(2): 181-190.
- [31] Du W C, Yan T, Chang S H, Wang Z F, Hou F J. Seasonal hogget grazing as a potential alternative grazing system for the Qinghai-Tibetan plateau: weight gain and animal behaviour under continuous or rotational grazing at high or low stocking rates. *The Rangeland Journal*, 2017, 39(4): 329-339.
- [32] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [33] Liu Y, Yan C Y, Matthew C, Wood B, Hou F J. Key sources and seasonal dynamics of greenhouse gas fluxes from yak grazing systems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40857.
- [34] Koukoura Z, Mamolos A P, Kalburtji K L. Decomposition of dominant plant species litter in a semi-arid grassland. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(1): 13-23.
- [35] Zhang D Q, Ye W H, Yu Q F, Kong G H, Zhang Y C. The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 938-944.
- [36] 刘增文. 森林生态系统中枯落物分解速率研究方法. *生态学报*, 2002, 22(6): 954-956.
- [37] Gijsman A J, Alarcón H F, Thomas R J. Root decomposition in tropical grasses and legumes, as affected by soil texture and season. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(9/10): 1443-1450.
- [38] 聂道平. 森林生态系统营养元素的生物循环. *林业科学研究*, 1991, 4(4): 435-440.
- [39] Mougin E, Seena D L, Rambal S, Gaston A, Hiernaux P. A regional Sahelian grassland model to be coupled with multispectral satellite data. I: model description and validation. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(3): 181-193.
- [40] 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(1): 107-114.
- [41] Ma X Z, Wang S P, Jiang G M, Haneklaus S, Schnug E, Nyren P. Short-term effect of targeted placements of sheep excrement on grassland in Inner Mongolia on soil and plant parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(11/12): 1589-1604.
- [42] Griffin D W, Kellogg C A, Shinn E A. Dust in the wind: long range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health. *Global Change and Human Health*, 2001, 2(1): 20-33.
- [43] 阎明毅. 欧拉型藏羊种质特征与利用现状. *青海畜牧兽医杂志*, 2008, 38(3): 45-45.
- [44] Xu G P, Chao Z G, Wang S P, Hu Y G, Zhang Z H, Duan J C, Chang X F, Su A L, Luo C Y, Li Y N, Du M Y. Temperature sensitivity of nutrient release from dung along elevation gradient on the Qinghai-Tibetan plateau. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(1): 49-57.
- [45] Luo C Y, Xu G P, Chao Z G, Wang S P, Lin X W, Hu Y G, Zhang Z H, Duan J C, Chang X F, Su A L, Li Y N, Zhao X Q, Du M Y, Tang Y H, Kimball B. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the tibetan plateau. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1606-1617.
- [46] Wider R K, Lang G E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology*, 1982, 63(6): 1636-1642.