

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2025.04.010

引用格式:安海涛,孙彩彩,董全民,等.青藏高原高寒草甸不同放牧方式下土壤粒径分形特征[J].草地学报,2025,33(4):1106—1113

AN Hai-tao, SUN Cai-cai, DONG Quan-min, et al. Characteristics of Soil Particle Size Fractals under Different Grazing Regimes in Alpine Meadows of the Tibetan Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4):1106—1113

## 青藏高原高寒草甸不同放牧方式下土壤粒径分形特征

安海涛<sup>1,2</sup>, 孙彩彩<sup>1,2</sup>, 董全民<sup>1,2</sup>, 杨晓霞<sup>1,2</sup>, 刘文亭<sup>1,2</sup>, 王晓丽<sup>1,2</sup>, 赵新全<sup>1,2\*</sup>

(1. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016;

2. 青海大学畜牧兽医学院青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为研究放牧方式对青藏高原高寒草甸土壤粒径的影响,本研究基于分形理论,选取青藏高原高寒草甸区4种放牧方式(牦牛单独放牧、藏羊单独放牧、牦牛和藏羊混牧、无放牧)为研究对象,利用激光粒度仪测定了土壤粒径体积分数,研究了土壤颗粒组成和分形特征对不同放牧方式的响应,揭示了不同放牧方式下土壤颗粒尺寸的空间分布规律。结果表明:各样地土壤颗粒组成均以粉粒、细砂粒和极细砂粒为主,且砂粒体积分数最高(49.3%~67.2%),其次为粉粒(26.1%~40.8%),黏粒体积分数最低(5.0%~10.0%)。牦牛藏羊混牧样地表层土壤细颗粒含量和单重分形维数均高于牦牛和藏羊单独放牧,而土壤容重却显著低于其他处理。相关性和主成分分析表明,单重分形维数与黏粒、粉粒和有机碳显著正相关,与砂粒极显著负相关。综上,在中度放牧强度下,青藏高原高寒草甸牦牛和藏羊混牧方式可以促进土壤颗粒的均匀分布,维持稳定的土壤结构,改良土壤质地。

**关键词:**青藏高原;放牧方式;土壤颗粒组成;单重分形维数

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2025)04-1106-08

## Characteristics of Soil Particle Size Fractals under Different Grazing Regimes in Alpine Meadows of the Tibetan Plateau

AN Hai-tao<sup>1,2</sup>, SUN Cai-cai<sup>1,2</sup>, DONG Quan-min<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-xia<sup>1,2</sup>, LIU Wen-ting<sup>1,2</sup>,  
WANG Xiao-li<sup>1,2</sup>, ZHAO Xin-quan<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture in the Three River Head Waters Region, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810018, China; 2. Animal Science and Veterinary Medicine of Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

**Abstract:** To evaluate the impact of grazing practices on soil particle size distribution in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau based on fractal theory, four grazing practices were carried out: yak grazing, Tibetan sheep grazing, mixed yak and Tibetan sheep grazing, and no grazing. Soil particle size distribution was measured using a laser particle size analyzer, and the responses of soil particle composition and fractal characteristics to various grazing practices were analyzed to reveal spatial distribution patterns of soil particle sizes under different grazing regimes. The results showed that soil particle composition in all sample plots was primarily composed of silt, fine sand, and very fine sand, with sand particles accounting for the highest volume fraction (49.3%–67.2%), followed by silt (26.1%–40.8%), and clay representing the lowest fraction (5.0%–10.0%). Surface soils in mixed grazing plots of yak and Tibetan sheep displayed higher fine particle content and single fractal dimension but significantly lower bulk density compared to other treatments. Correlation and principal component analysis revealed that the single fractal dimension was significantly positively correlated

收稿日期:2024-06-24;修回日期:2024-09-01

基金项目:青海省“帅才科学家负责制”项目(2024-SF-102);国家自然基金联合基金项目(U20A2007)资助

作者简介:安海涛(1995-),男,裕固族,甘肃肃南人,博士研究生,主要从事草地生态研究,E-mail: 528900242@qq.com; \*通信作者 Author for correspondence, E-mail: xqzhao@nwipb.cas.cn

with clay, silt, and organic carbon, while exhibiting a significant negative correlation with sand. In conclusion, at moderate grazing intensity, mixed yak and Tibetan sheep grazing in alpine meadows of the Qinghai-Xizang Plateau can promote uniform soil particle distribution, maintain stable soil structure, and improve soil texture.

**Key words:** Qinghai-Tibetan Plateau; Livestock assembly; Soil particle composition; Single fractal

青藏高原是世界上最高的高原,也是我国主要的生态屏障,总面积为 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,其中高寒草甸占35%以上。作为高原畜牧业生产的主体<sup>[1]</sup>,青藏高原高寒草甸植被状况的优劣,对当地畜牧业生产,黄河和长江流域水文生态特征以及风、旱、涝、沙尘暴、水土流失等自然灾害的发生及危害程度均具有重大影响<sup>[2]</sup>。放牧是人类对高寒草甸作用时间最长,作用效果最深的一种干扰方式<sup>[3]</sup>。近几十年来,气候变化和人为活动(即过度放牧)导致该生态区植被群落结构、土壤理化性质、生态系统的结构和功能、景观格局等均有所改变,荒漠化问题异常严重<sup>[4]</sup>。诸多研究表明,放牧强度和放牧时间会对青藏高原植物群落和土壤产生一定影响。例如,Wang等人<sup>[5]</sup>对青藏高原高寒草甸植物多样性的研究发现,中度放牧有利于维持青藏高原高寒草甸物种多样性和群落稳定性,而暖季放牧则可以维持或增加植物高度、盖度、生物量和多样性。Zhang等人<sup>[6]</sup>研究发现,延长放牧时间会通过减少种间互补性和促进性来减少多样性,从而破坏植物群落在环境变化条件下的功能和稳定性。然而,牦牛和藏羊作为青藏高原最主要的放牧家畜,其单独放牧和混合放牧对退化草地的影响却鲜有报道。

土壤粒径分布是代表土壤质地的一种物理属性,能够影响土壤孔隙结构、土壤养分以及植被生产力<sup>[7]</sup>,其变化程度能够为土壤形成过程和环境变化提供了重要依据<sup>[8]</sup>。土壤质地是指土壤颗粒排列的形态以及由这种形态产生的体积特性<sup>[9]</sup>,由土壤颗粒的大小、类型和空间分布特征共同表征,且土壤中的许多过程对土壤质地高度敏感<sup>[10]</sup>。分形理论是非线性科学的一个重要领域,它可以用米研究物体统计意义上的自相似性<sup>[11]</sup>。近年来,分形理论模型被广泛应用于反映土壤结构特征、计算土壤颗粒组成和孔隙结构的分形维数,以此来表征土壤颗粒大小组成、土壤质地的均匀性、排列性和组合性;基于分形理论,土壤的自相似性可用于揭示看似随机体积特性背后的精细结构,从而表征土壤粒径和土壤空隙的分布;此外,它还可用于探索土壤其他理化性质的内在机制及其对地质环境演变的影响<sup>[12]</sup>。目前,许多研究利用分形理论来探讨土壤粒

径的分布特征,如Wei等<sup>[13]</sup>通过土壤分形理论分析发现黄土高原深层土壤粒径分布的范围由南向北逐步变宽;姜海鑫等<sup>[14]</sup>研究发现禁牧导致0~10 cm土层分形维数降低,且延迟家畜进入牧场的时间可以改善土壤颗粒组成及分形维数;还有研究发现,不同植被类型土壤粒径分形特征差异明显,分形维数主要受土壤粒径影响<sup>[15]</sup>。综上,尽管许多研究都调查了土壤分形维数,但鲜有研究阐述青藏高原家畜组合方式对土壤分形特征的影响机制。

基于此,本研究应用分形理论对青藏高原高寒草甸不同放牧方式下的土壤样品进行了分形维度评估,探究不同放牧方式对土壤粒径分布的影响,揭示土壤粒径分布与土壤理化性质的关系,以期为青藏高原高寒草甸退化草地的恢复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省海北藏族自治州海晏县西海镇( $36^{\circ}44'N, 100^{\circ}23'E$ ),海拔3100 m以上。隶属于青海湖流域,气候为高原大陆性气候,无明显的四季之分,只有冷暖季之分,冷季漫长而寒冷干燥,暖季短暂而凉爽湿润,年内无绝对无霜期,年日照时数为2665 h,年均降水量为400 mm,年均温 $1.5^{\circ}\text{C}$ ,草地类型为高寒草原化草甸。土壤类型为高山草甸土,土壤质地为砂壤土(图1)。样地植物主要物种有矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、干生薹草(*Carex aridula*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)等<sup>[16]</sup>。

### 1.2 实验设计

本研究于2014年6月选取基况一致的高寒草甸建立放牧样地,分别设置了牦牛单独放牧(Yak grazing, YG)、藏羊单独放牧(Tibetan sheep grazing, SG)、牦牛和藏羊混牧(Yak-Tibetan sheep mixed grazing, MG)以及对照无放牧(No grazing, NG),每个处理均设有3个重复,共12个放牧小区,小区面积及放牧家畜比例详见表1。自样地设立起,于每年6至10月进行放牧活动,每月放牧10天,放牧小

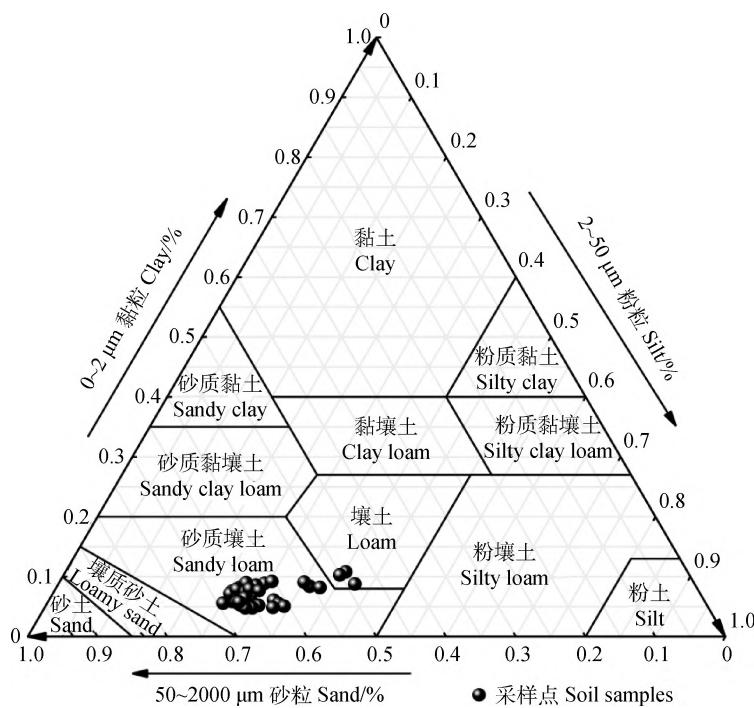


图1 样地土壤质地

Fig. 1 Soil texture of sample plots

区载畜率均控制在中等放牧强度( $3.86 \text{ 羊单位} \cdot \text{ha}^{-1}$ )，牧草利用率为 $50\% \sim 55\%$ ，期间不进行补饲，饮用水每隔2天添加一次。选择1.5岁雄性牦牛( $100 \pm 5 \text{ kg}$ )与1岁雄性藏羊( $30 \pm 2 \text{ kg}$ )进行试验，每只藏羊为1个羊单位，每头牦牛为3个羊单位，放牧小区面积依据羊单位进行换算，以保证所有放牧处理下的放牧强度一致<sup>[17]</sup>。

**表1 放牧试验设计**  
Table 1 Grazing experiment design

处理 Treatment	牦牛数量 Number of yaks	藏羊数量 Number of Tibetan sheep	小区面积 Area of plot/ $\text{hm}^2$	小区数 Number of plots
MG	1	2	0.43	3
SG	0	2	0.17	3
YG	1	0	0.26	3
NG	0	0	0.05	3

### 1.3 样品采集及处理分析

样品采集工作于2023年8月开展，在每个处理的小区内随机设置5个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方，每个样方间最少相距5 m，用土钻在样方内按照“S”型采集0~10 cm, 10~20 cm和20~30 cm土壤样品，分层混合后风干过2 mm筛。并用环刀(容积 $100 \text{ cm}^3$ )采集0~10 cm, 10~20 cm和20~30 cm土壤，用于测定容重。土壤各组分粒径通过安东帕激光粒度仪

(PSD1190LD型号)测定，土壤有机碳、全氮、全磷、容重和pH值均参考《土壤农化分析》进行测定<sup>[18]</sup>。

### 1.4 单重分形维数

采用土壤粒径分形模型，计算了不同放牧方式下土壤粒径分布的土壤单重分形维数，公式如下：

$$3-D = \frac{\lg(\frac{V_{(r < d_i)} i}{V_0})}{\lg(\frac{d_i}{d_{\max}})}$$

式中， $d_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为土壤颗粒直径， $d_{\max}$ 为土壤颗粒直径最大值(本研究中 $d_{\max}=2$ )， $D$ 为土壤单重分形维数， $r$ 为土壤粒径变量， $V_{(r < d_i)}$ 为小于 $d_i$ 的颗粒累积体积， $V_0$ 为土壤样品体积<sup>[19]</sup>。

### 1.5 统计分析

本研究以美国土壤质地分类系统为标准，对不同土壤粒径进行分类，分别为黏粒： $< 0.002 \text{ mm}$ ，粉粒： $0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$ ，极细砂粒： $0.05 \text{ mm} \sim 0.1 \text{ mm}$ ，细砂粒： $0.1 \text{ mm} \sim 0.25 \text{ mm}$ ，中砂粒： $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ ，粗砂粒： $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 和极粗砂粒： $1 \sim 2 \text{ mm}$ <sup>[13]</sup>。所有的统计分析在R 4.2.3中运行。利用单因素方差分析(ANOVA)和Duncan's多重检验分析了不同放牧方式下土壤理化性质和土壤颗粒大小的差异，并通过主成分分析(PCA)和Pearson

相关性分析评价土壤分形维数及土壤质地与理化性质的关系。图形绘制在Origin 2024中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤粒径分布特征

如图2所示,三个土层中各处理土壤颗粒组成均以粉粒、细砂粒和极细砂粒为主,且变化趋势相一致。其中,砂粒体积分数均最高,分别为49.3%~66.2%,55.1%~66.6%和63.7%~67.2%;其次为粉粒,体积分数依次为26.4%~40.8%,26.1%~36.4%和26.2%~30.6%,黏粒体积分数最低,分别

为6.1%~10.0%,5.2%~8.6%,5.0%~6.6%。不同放牧方式下土壤粒径体积分数存在显著差异。黏粒体积分数在0~10 cm土层中表现为NG显著高于YG和SG,且MG显著高于SG( $P<0.05$ );在10~20 cm土层中表现为NG>YG>MG>SG,但在20~30 cm土层中表现为MG和YG显著高于SG( $P<0.05$ )。粉粒体积分数在0~10 cm土层中表现为NG和MG中显著高于YG;10~20 cm土层中,粉粒体积分数从高到低依次为NG>SG>YG>MG;20~30 cm土层中,粉粒体积分数在NG显著高于YG和MG。此外,极细砂粒含量在0~10 cm和10~20 cm土层中均表现为NG最高,MG最低。

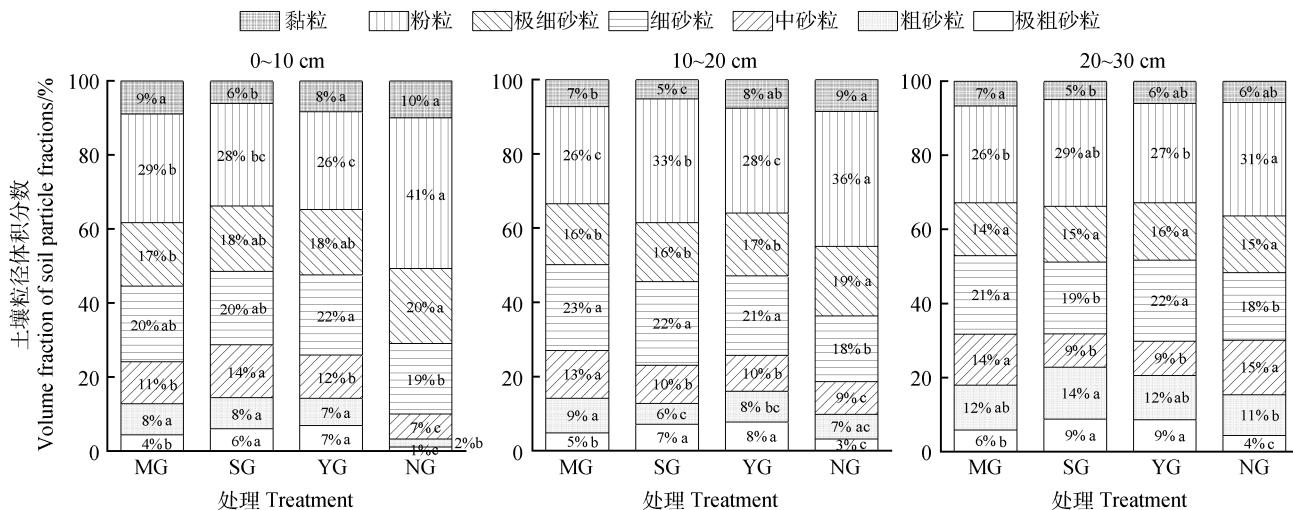


图2 不同放牧方式下土壤粒径组成

Fig. 2 Soil particle size composition under different grazing treatments

注:图中不同小写字母表示不同放牧方式间差异显著。下同

Note: Different lowercase letters in the graphs indicate significant differences between grazing practices. The same as below.

土壤质地也可以通过土壤粒径分布频率曲线来判别,土壤颗粒的异质程度随曲线变化幅度的增大而减小。不同放牧方式下各土层土壤的粒径分布频率曲线变化幅度均不一致(图3),在0~10 cm土层中,MG变化幅度最小,粗颗粒和细颗粒分布较为均匀,颗粒分布异质性较大;YG变化幅度最大,颗粒分布异质性较小。在10~20 cm土层中,SG变化幅度最小,YG变化幅度最大,颗粒集中在10~50  $\mu\text{m}$ 范围。20~30 cm土层各处理变化幅度较为一致。

### 2.2 土壤单重分形维数变化特征

在不同放牧方式处理下,土壤单重分形维数(表2)在0~10 cm和10~20 cm土层中具有显著差异( $P<0.05$ )。0~20 cm土层中NG土壤单重分形

维数最高(2.85),0~10 cm土层中SG土壤单重分形维数最低(2.51),10~20 cm土层中MG土壤单重分形维数最低(2.54),土壤质地较为粗糙。

### 2.3 土壤碳氮磷含量、容重及pH值变化特征

土壤有机碳在0~10 cm土层中,NG显著高于MG(图4);在10~20 cm土层中,YG和SG均显著高于MG( $P<0.05$ )。土壤全氮在0~10 cm和10~20 cm土层中表现为SG显著高于MG,其他处理间差异不显著。土壤全磷在表层土壤中差异不显著,深层土壤中均为YG显著高于MG。此外,土壤容重在0~10 cm土层中差异显著,具体表现为NG,YG和SG均显著高于MG( $P<0.05$ )。土壤pH值在0~10 cm和20~30 cm土层中差异不显著,10~20 cm土层中表现为MG显著高于YG。

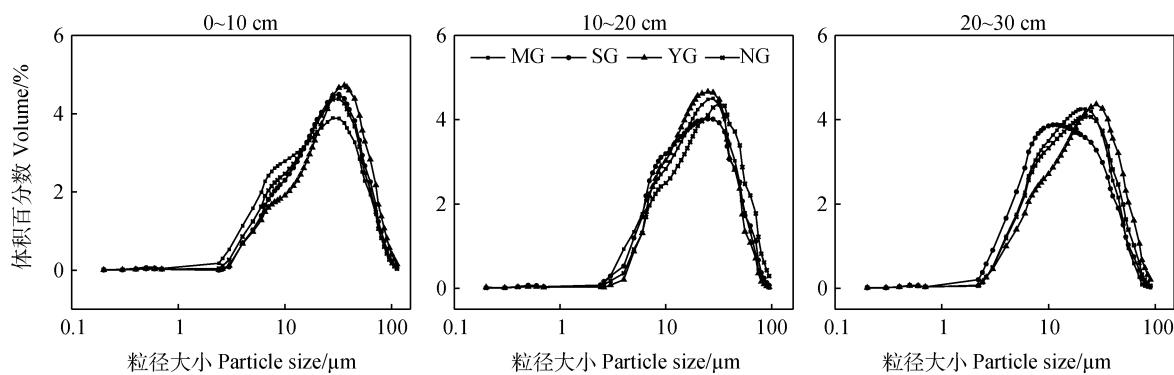


图3 不同放牧方式下土壤粒径分布频率曲线

Fig. 3 Soil particle size distribution frequency curves under different grazing treatments

表2 不同放牧方式土壤颗粒分形维数

Table 2 Fractal dimensions of soil particles under different grazing treatments

土层深度 Soil depth	土壤颗粒单重分形维数 Fractal dimensions of soil particles				$R^2$	P
	MG	SG	YG	NG		
0~10 cm	2.60±0.02 <sup>b</sup>	2.52±0.02 <sup>c</sup>	2.57±0.01 <sup>b</sup>	2.85±0.01 <sup>a</sup>	0.66	<0.001
10~20 cm	2.55±0.01 <sup>c</sup>	2.62±0.01 <sup>b</sup>	2.57±0.01 <sup>c</sup>	2.70±0.01 <sup>a</sup>	0.014	<0.001
20~30 cm	2.45±0.01 <sup>a</sup>	2.45±0.02 <sup>a</sup>	2.49±0.01 <sup>a</sup>	2.49±0.02 <sup>a</sup>	0.001	0.255

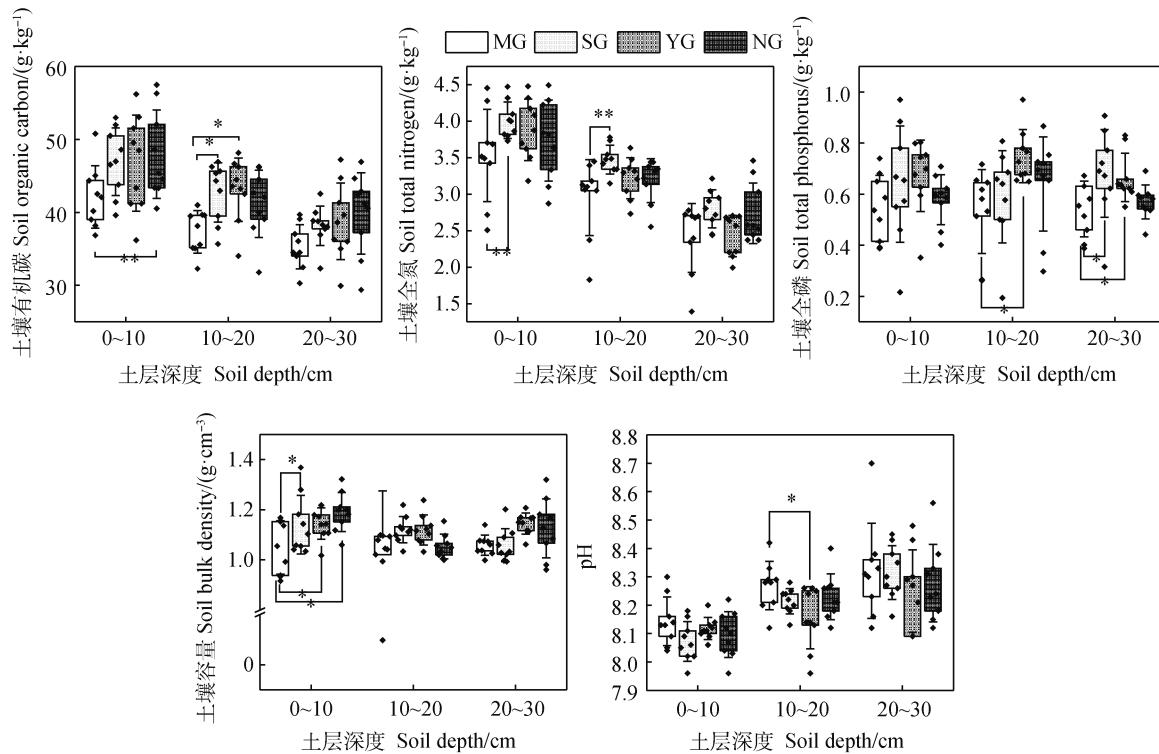


图4 不同放牧方式对土壤理化特征的影响

Fig. 4 Effects of different grazing treatments on soil physicochemical characteristics

注: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ 

Note: \* represents significant impacts, \*\* represents highly significant impacts

不同放牧方式下土壤分形维数、土壤质地与理化性质的相关性如表3所示,单重分形维数与黏粒、粉粒和有机碳显著正相关,与砂粒极显著负相关( $P < 0.05$ )。此外,砂粒与土壤容重显著正相关( $P < 0.05$ ),相关性系数0.33。而黏粒和粉粒与土壤理

化性质相关性关系不显著。

主成分分析进一步证实了单重分形维数与土壤组成的关系(图5,表4)。PC1和PC2解释了62.5%的土壤粒径组成变异,单重分形维数、粉粒和黏粒含量累计解释率达到74.89%(特征值大于

表3 土壤分形维数及土壤质地与理化性质的Pearson相关性

Table 3 Correlation between soil fractal dimension and soil texture with physicochemical properties

	FD	Clay	Silt	Sand	TN	SOC	TP	pH	BD
FD	1	0.71**	0.85**	-0.93**	0.06	0.34*	0.20	-0.11	-0.24
Clay		1	0.40*	-0.64**	0.20	0.41*	0.14	0.13	-0.23
Silt			1	-0.96**	0.06	0.30	0.07	-0.21	-0.31
Sand				1	-0.11	-0.38*	-0.10	0.14	0.33*
TN					1	0.08	0.15	-0.32	-0.27*
SOC						1	-0.04	-0.05	0.51
TP							1	-0.03	-0.01
pH								1	0.22
BD									1

注:FD表示土壤分形维数、Clay表示黏粒、Silt表示粉粒、Sand表示砂粒、SOC表示土壤有机碳、TN表示土壤全氮、TP表示土壤全磷、BD表示土壤容重;\*代表  $P < 0.05$ , \*\*代表  $P < 0.01$

Note: FD represents soil fractal dimension, SOC represents soil organic carbon, TN represents soil total nitrogen, TP represents soil total phosphorus, BD represents Soil bulk density; \* represents  $P < 0.05$ , \*\* represents  $P < 0.01$

1)。此外,PC1与单重分形维数、粉粒和黏粒含量相关性较高,相关性依次为0.51,0.48,0.38;PC2与土壤全氮和有机碳相似性较高,相关性分别为0.64和0.58。

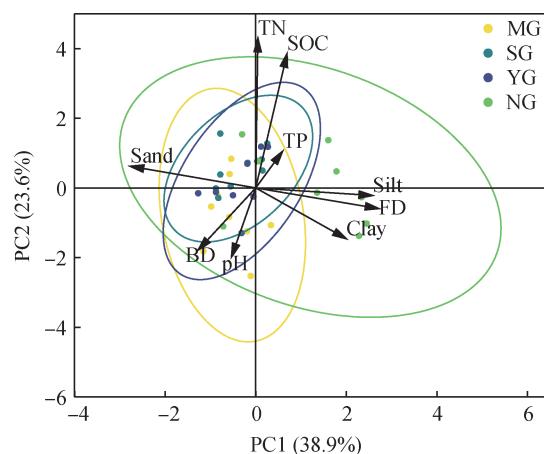


图5 土壤质地与理化性质的PCA分析

Fig. 5 PCA analysis of soil texture and physicochemical properties

### 3 讨论

#### 3.1 不同放牧方式对土壤粒径分布特征的影响

土壤粒径分布包括砂土、粉土和黏土的含量,是影响土壤物理和化学性质的基本物理特征<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,放牧样地各土层土壤颗粒体积分数均为砂粒最高,这与大部分研究结果一致,原因是青藏高原恶劣的自然条件阻碍了植被的生长,导致土壤成土作用弱,且高寒草甸气候较为干燥,风化作用导致土壤逐渐粗粒化<sup>[23]</sup>。有研究指出,家畜放牧过程中的践踏作用会破坏表层土壤结构和土壤团聚体<sup>[21]</sup>,且放牧导致的沉积物量是不放牧地区的3.2倍<sup>[22]</sup>,表明家畜放牧会对土壤结构产生重要影响。本研究也发现放牧对土壤粒径具有一定影响,在0~20 cm土层中,NG相比其他处理细颗粒含量较多,粗颗粒含量较少,表明不放牧可以有效避免土壤粗粒化,原因可能是未受干扰的草地植被生产力较高,植被盖度大,风蚀作用小,细颗粒得以留

表4 PCA变量的载荷和解释方差统计

Table 4 Loadings and explained variance statistics for PCA variables

	PC1	PC2	特征值 Eigenvalue	差异百分比 Percentage of variance/%	累计百分比 Cumulative/%
单重分形维数 FD	0.51	-0.09	3.50	38.87	38.87
黏粒 Clay	0.38	-0.22	2.13	23.64	62.51
粉粒 Silt	0.48	-0.03	1.11	12.37	74.89
砂粒 Sand	-0.52	0.09	0.89	9.87	84.76
全氮 TN	0.01	0.64	0.71	7.89	92.65
有机碳 SOC	0.13	0.58	0.49	5.43	98.07
全磷 TP	0.11	0.16	0.12	1.31	99.38
pH	-0.10	-0.30	0.06	0.62	100.00
土壤容重 BD	-0.24	-0.27	0.00	0.00	100.00

存<sup>[24]</sup>。从土壤粒径分布频率曲线来看,表层土壤中MG变化幅度最小,粗颗粒和细颗粒分布较为均匀,而宛倩等<sup>[25]</sup>在西藏邦杰塘草原站的研究发现,未干扰样地土壤粒径分布频率相比牦牛单独放牧样地变化幅度更小,这可能是由于牦牛和藏羊混牧时,通过采食偏向不同的耦合方式,提高物种丰富度和多样性指数,从而增大了植被截留降尘的作用,有利于细颗粒的形成和固定<sup>[26]</sup>。

### 3.2 不同放牧方式对土壤颗粒分形维数的影响

分形维数不仅表征了土壤颗粒分布对土壤结构的影响,反映了土壤质量和生态环境,也是表征土壤演化过程的重要指标<sup>[27]</sup>。本研究结果发现,在0~20 cm土层中,相比NG样地,粒径分布和单重分形维数也存在显著差异,表明不同放牧方式会对土壤质地产生重要影响,这与孙世贤等<sup>[28]</sup>的研究相似。本研究还发现,0~10 cm层土中,NG样地单重分形维数显著高于其他处理。放牧能够显著降低半干旱区典型草原和荒漠草原围栏封育样地的土壤粒径分形维数<sup>[29]</sup>,与青藏高原高寒草甸土壤粒径变化趋势相一致。然而,姜海鑫等人对于荒漠草原的研究发现,分形维数在延迟轮牧中显著高于封育处理,这与本研究结果不一致。原因可能是长时间封育虽然能够修复深层土壤质地,但土壤表层被凋落物完全覆盖,植被更新周期延长,导致表层土壤质地改良效果较低<sup>[14]</sup>。放牧在一定程度上对草地生态系统具有加性效应,且延迟放牧时间能够有效减低草地放牧压力,能够保证植物生产力的稳定维持,从而改善土壤结构<sup>[31]</sup>。此外,本研究发现,家畜混牧时表土层单重分形维数高于藏羊单独放牧,这是因为牦牛和藏羊体型不同,采食偏好存在差异,且混合放牧过程中家畜的采食频率相较藏羊单独放牧时明显降低,而植被生产力和采食量均增加,同时对草地的干扰程度也较低<sup>[17]</sup>,从而导致混合放牧样地趋向细粒化。

### 3.3 土壤碳氮磷含量和土壤质地的关系

土壤理化性质可以综合评价土壤质量,且与分形维数之间存在密切关系<sup>[32]</sup>。本研究发现,不同放牧方式下的单重分形维数与黏粒和粉粒极显著正相关,与砂粒显著负相关,这与大部分研究结果一致,表明土壤粒径分布影响土壤分形维数,能够反映土壤粒径组成和变化情况,且土壤颗粒越细,分

形维数越高<sup>[33]</sup>。土壤粒径分布差异是改变土壤中有机碳含量变化的关键因素<sup>[34]</sup>。Niu等<sup>[35]</sup>研究发现分形维数与土壤有机碳呈显著正相关关系,本研究结果与之相符,而Wang等人研究表明土壤有机碳、土壤全氮和土壤水分含量随粗粒化程度的增加而增加<sup>[36]</sup>。这可能是由于土壤分形维数在指示土壤养分方面可能具有较强的空间特异性,由于区域差异、植被差异以及许多人为因素的影响,土壤分形参数与土壤理化性质相关性的研究结果不尽相同<sup>[37]</sup>。但可以认为,不同放牧方式下土壤颗粒组成的分形维数具有较大的研究价值和潜力,可以作为定量描述土壤质地、土壤密度和土壤孔隙结构的综合指标。

## 4 结论

不同放牧方式下青藏高原高寒草甸土壤组成均以粉粒、细砂粒和极细砂粒为主。除不放牧外,牦牛和藏羊混牧时,表土层细颗粒含量和单重分形维数最高。表明中度放牧条件下,牦牛和藏羊混合放牧有利于促进粗细颗粒的均匀分布,提高土壤颗粒分布异质性,改善土壤质地和结构。此外,单重分形维数与黏粒、粉粒、有机碳和砂粒含量具有显著相关关系,较好地体现了不同放牧方式对土壤结构和性质的影响,可以表征土壤的养分状况。

## 参考文献

- [1] ZHAO X Q, XU T W, ELLIS J, et al. Rewilding the wildlife in Sanjiangyuan National Park, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1):1-3
- [2] 赵新全,徐世晓,赵亮,等.三江源国家公园生物多样性保护创新及实践[J].中国科学院院刊,2023,38(12):1833-1844
- [3] 徐田伟,赵新全,张晓玲,等.青藏高原高寒地区生态草牧业可持续发展:原理、技术与实践[J].生态学报,2020,40(18):6324-6337
- [4] 贺金生,卜海燕,胡小文,等.退化高寒草地的近自然恢复:理论基础与技术途径[J].科学通报,2020,65(34):3898-3908
- [5] WANG X F, WANG Z W, MIAO H T, et al. Appropriate livestock grazing alleviates the loss of plant diversity and maintains community resistance in alpine meadows [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351:119850
- [6] ZHANG M N, DELGADO-BAQUERIZO M, LI G Y, et al. Experimental impacts of grazing on grassland biodiversity and function are explained by aridity [J]. Nature Communications, 2023, 14(1):5040
- [7] ZONG N, SHI P. Soil properties rather than plant production strongly impact soil bacterial community diversity along a

- desertification gradient on the Tibetan Plateau [J]. *Grassland Science*, 2020, 66(4): 197-206
- [8] ZHENG M M, SONG J, RU J Y, et al. Effects of grazing, wind erosion, and dust deposition on plant community composition and structure in a temperate steppe [J]. *Ecosystems*, 2021, 24(2): 403-420
- [9] DAI L C, YUAN Y M, GUO X W, et al. Soil water retention in alpine meadows under different degradation stages on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125397
- [10] FROUZ J. Effects of soil macro-and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization [J]. *Geoderma*, 2018, 332(15): 161-172
- [11] BALDWIN D, NAITHANI K J, LIN H. Combined soil-terrain stratification for characterizing catchment-scale soil moisture variation [J]. *Geoderma*, 2017, 285(1): 260-269
- [12] YANG T, SIDDIQUE K H M, LIU K. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01118
- [13] WEI X, LI X G, WEI N. Fractal features of soil particle size distribution in layered sediments behind two check dams: implications for the Loess Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2016, 266(1): 133-145
- [14] 姜海鑫,周瑶,胡科,等. 不同放牧时间对荒漠草原土壤颗粒组成及分形维数的影响[J]. 草业学报,2024,33(6):17-28
- [15] 刁二龙,曹广超,刘英,等. 黑河源区不同植被类型土壤粒径分形特征研究[J]. 草地学报,2024,32(5):1459-1470
- [16] 孙彩彩,董全民,杨晓霞,等. 牦牛和藏羊放牧对青藏高原高寒草甸土壤节肢动物群落的影响[J]. 应用生态学报,2023,34(11): 3127-3134
- [17] 刘玉祯,孙彩彩,刘文亭,等. 高寒草地植物群落关键种对不同放牧家畜组合放牧的响应[J]. 生态学报,2022,42(18): 7529-7540
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2001, 32-78
- [19] JARRAH M, MAYEL S, TATARCO J, et al. A review of wind erosion models: data requirements, processes, and validity [J]. *Catena*, 2020, 187: 104388
- [20] 程杰,王欢元,解建仓,等. 不同配比下复配土的土壤颗粒组成、分形维数与质地变化特征[J]. 水土保持研究,2020, 27(2):30-34
- [21] LIU D D, JU W L, JIN X L, et al. Associated soil aggregate nutrients and controlling factors on aggregate stability in semi-arid grassland under different grazing prohibition timeframes [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777(10): 146104
- [22] NAUMAN T W, DUNIWAY M C, WEBB N P, et al. Elevated aeolian sediment transport on the Colorado Plateau, USA: the role of grazing, vehicle disturbance, and increasing aridity [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(14):2897-2914
- [23] 贺俊. 毛乌素沙地樟子松人工林恢复过程中土壤粒径演变特征 [J]. 水土保持研究,2023,30(4):110-114,129
- [24] 哈里·阿力腾别克,崔雨萱,刘慧霞,等. 短期封育对伊犁绢蒿荒漠草地土壤氮及其粒径组成的影响 [J]. 草地学报,2022,30(1):134-143
- [25] 宛倩,王杰,王向涛,等. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响 [J]. 生态学报,2022,42(5):1716-1726
- [26] 刘玉祯,刘文亭,杨晓霞,等. 放牧家畜组合对高寒草地植物群落特征及生产力的影响 [J]. 生态学杂志,2024, 43(1): 57-65
- [27] CHEN T L, SHI Z L, WEN A B, et al. Multifractal characteristics and spatial variability of soil particle-size distribution in different land use patterns in a small catchment of the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(12):111-125
- [28] 孙世贤,丁勇,李夏子,等. 放牧强度季节调控对荒漠草原土壤风蚀的影响 [J]. 草业学报,2020,29(7):23-29
- [29] 张翼,李建平,井乐. 封育对天然草地深层土壤粒径分形特征的影响 [J]. 水土保持研究,2018,25(5):131-135
- [30] 赵盼盼,李国旗,邵文山,等. 封育对荒漠草原苦豆子群落土壤粒径分形特征的影响 [J]. 西北植物学报,2017, 37(6): 1234-1241
- [31] 王维奇,刘欣,刘晨晖,等. 放牧压力对中国北方农牧交错带生态系统健康的影响研究 [J]. 生态学报,2024,44(14):1-14
- [32] QI F, ZHANG R H, LIU X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 45-51
- [33] YAN Y C, WANG X, GUO Z J, et al. Influence of wind erosion on dry aggregate size distribution and nutrients in three steppe soils in northern China [J]. *Catena*, 2018, 170: 159-168
- [34] ZHAO W J, CUI Z, MA H. Fractal features of soil particle-size distributions and their relationships with soil properties in gravel-mulched fields [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(6):211
- [35] NIU X, GAO P, WANG B, et al. Fractal characteristics of soil retention curve and particle size distribution with different vegetation types in mountain areas of Northern China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(12):15379-15389
- [36] WANG X M, LANG L L, HUA T, et al. Effects of aeolian processes on soil nutrient loss in the Gonghe Basin, Qinghai-Tibet Plateau: an experimental study [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(19):229-238
- [37] CHEN T, CHANG Q R, LIU J, et al. Spatiotemporal variability of farmland soil organic matter and total nitrogen in the southern Loess Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(19):28

(责任编辑 付宸)