网络出版时间:2025-12-05 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.06.009

藏北高寒草甸退化梯度下土壤理化性质演变特征

赖国芝,陈一帆,母程薇,彭艳,魏学红
(西藏农牧大学 林草学院,西藏 林芝 860000)

[摘 要] 【目的】分析高寒草甸退化梯度下土壤理化性质的变化,探究影响高寒草甸退化的关键土壤因子,旨在为西藏退化高寒草甸恢复与重建提供理论支撑。【方法】以藏北那曲地区的轻度、中度、重度退化高寒草甸为研究对象,测定其土壤理化性质,并采用相关性分析和主成分分析研究了影响高寒草甸退化的关键土壤因子。【结果】随着高寒草甸退化程度的加剧,土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾含量和含水率、总孔隙度、砂粒含量均下降,土壤体积质量、pH值及土壤砾石、黏粒、粉粒含量升高,土壤粒径分形维数增大,土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GWD)均呈下降趋势。土壤团聚体的破坏率以中度退化高寒草甸最大,其次为轻度退化草甸,重度退化草甸最小。相关性分析结果表明,土壤总孔隙度与速效钾、有机质、速效氮含量呈显著或极显著正相关,砂粒与速效钾、有机质、全氮、速效磷、速效氮含量呈显著或极显著正相关,土壤黏粒含量与pH值呈显著正相关关系,土壤水稳性团聚体几何平均直径与速效氮含量呈显著正相关。主成分分析结果表明,土壤有机质、速效磷、速效氮和速效钾含量和质地是影响高寒草甸退化的关键因子。【结论】不同退化阶段高寒草甸土壤理化性质有明显差异,中度退化阶段是藏北高寒草甸退化的转折期,此时应进行人为干预以促进退化高寒草甸的恢复。

[关键词] 高寒退化草甸;土壤理化性质;主成分分析;藏北
[中图分类号] S152.4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)06-0084-09

Evolution characteristics of soil physical and chemical properties under the degradation gradient of alpine meadow in Northern Xizang

LAI Guozhi, CHEN Yifan, MU Chengwei, PENG Yan, WEI Xuehong
(*School of Forestry and Grassland Science, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi, Xizang* 860000, *China*)

Abstract: 【Objective】 The changes of soil physical and chemical properties under the degradation gradient of alpine meadow were analyzed, and the key soil factors affecting the degradation of alpine meadow were explored, in order to provide theoretical support for the restoration and reconstruction of degraded alpine meadow in Xizang. 【Method】 The mildly, moderately and severely degraded alpine meadow in Nagqu area of northern Xizang was taken as the research object, and the soil physical and chemical properties were determined. The key soil factors affecting the degradation of alpine meadow were determined by correlation analysis and principal component analysis. 【Result】 As the alpine meadow degradation intensified, the contents of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, available potassium,

[收稿日期] 2025-04-11 [修回日期] 2025-07-05
[基金项目] 国家重点研发计划项目"青藏高原典型自然保护地生态系统保护恢复及多功能提升技术与示范"(2023YFF1304300);西藏农牧学院林学博士点(一期)项目(533325001)
[作者简介] 赖国芝(1998—),女,重庆荣昌人,在读硕士,主要从事高寒草地保护与培育研究。E-mail:17783177540@163.com
[通信作者] 魏学红(1968—),男,甘肃民勤人,教授,主要从事高寒草地保护与培育、高寒草地生态研究。E-mail:weixuehong@21cn.com
彭艳(1993—),女,云南个旧人,研究生,主要从事高寒草地保护与培育、高寒草地生态研究。E-mail:1046992898@qq.com

water, total porosity and sand all decreased, the soil volume mass, pH value, soil gravel, clay and silt content increased, the fractal dimension of soil particle size increased, and the average mass diameter (MWD) and geometric mean diameter (GWD) of soil aggregates generally decreased. The highest destruction rate of soil aggregates was found in moderately degraded alpine meadow, followed by the mildly degraded meadow, and the lowest in the severely degraded meadow. The results of correlation analysis showed that the total porosity of soil was significantly or extremely significantly positively correlated with the contents of available potassium, organic matter and available nitrogen. Sand content was significantly or extremely significantly positively correlated with the contents of available potassium, organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available nitrogen. Soil clay content was significantly positively correlated with pH value, and the geometric mean diameter of soil water-stable aggregates was significantly positively correlated with available nitrogen. The results of principal component analysis showed that the contents of soil organic matter, available phosphorus, available nitrogen and available potassium nutrient and texture were the key factors affecting the degradation of alpine meadow.【Conclusion】The physical and chemical properties of alpine meadow soil in different degradation stages are significantly different. The moderate degradation stage is the turning point of alpine meadow degradation in northern Xizang, and human intervention should be carried out at this stage to promote the restoration of degraded alpine meadow.

Key words: degraded alpine meadows; physiochemical properties; principal components analysis; Northern Xizang

藏北高寒草甸位于青藏高原腹地，平均海拔在 4 500 m 以上，因独特的地理环境以及生态构造，使其在气候调节、水源涵养、水土保持、生物多样性保护等生态系统服务的维持有着重要影响[1-2]。近年来，由于人类活动频繁和全球气候变化的共同影响，藏北优良高寒草甸发生了不同程度的退化，退化面积逐年增大，逐步退化为“黑土滩”或裸地，严重威胁到当地的可持续发展[3-4]。

高寒草甸的退化主要表现为植被退化和土壤退化，其中土壤退化最明显的标志是土壤养分含量降低，而这一现象又直接导致了高寒草甸植被的退化。植被退化也影响着土壤结构和养分含量，退化程度越高，土壤养分流失越明显[5]。土壤是植物演替的重要驱动力，研究退化草甸土壤理化性质的演变过程，能准确了解高寒草甸生态系统受损的实质[6]。已有研究表明，全氮和全磷含量随高寒草甸退化程度加重呈下降趋势，表明氮、磷已成为高寒草甸的主要养分限制因子[7-8]。同时，随着高寒草甸退化程度的加剧，土壤结构也急剧劣化，如土壤体积质量增加，土壤孔隙度以及含水量、养分有效性降低，微生物功能受到抑制等[9-12]，而土壤理化性质的变化导致植被盖度极速下降以及毒草入侵程度扩大，这进一步引发了退化高寒草甸的贫瘠化。尽管国内外学者对高寒草甸退化机理进行了大量研究，但现有研究多聚焦单一退化阶段或孤立指标[13-14]，对退化梯度下土壤理化性质的系统性演变规律仍缺乏深入解析。

本试验以藏北退化高寒草甸土壤为研究对象，研究不同退化阶段高寒草甸土壤理化性质，对土壤化学性质与物理性质关系进行初步分析，探讨高寒草甸退化过程中土壤理化性质影响因素，以期为西藏退化高寒草甸恢复与重建提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究区位于西藏那曲市色尼区那玛切乡（29°54′41″－30°44′49″ N，90°58′32″－92°22′23″ E），海拔高度在 4 570 m 左右。该地区主要以高寒草甸为主，总面积达到 139.1 万 hm²，可利用的高寒草甸面积为 134.62 万 hm²；高寒草甸退化面积共计 49.08 万 hm²，占草地总面积的 35.11%。其中，轻度退化的草地面积为 39.46 万 hm²，占总面积的 28.37%；中度退化的草地面积为 7.41 万 hm²，占总面积的 5.33%；而重度退化的草地面积为 1.97 万 hm²，占总面积的 1.41%。地区气候类型为高原亚寒带半干旱季风性气候，白天气温较高，夜间温度低，温差大。全年四季不分明，主要为冷暖季。大风天气多，风力 10～12 级。年平均气温－9.2～11.30 ℃，年平均降水量在 300.80～592.10 mm，其中 6－9 月的降水量占全年总降水量的 80% 以上。土壤类型从表层至深层依次为砂质壤土和砂土，其中表层（0～30 cm）土壤呈灰黑色，属于土壤-植物根

系层,为砂质壤土;而30 cm土层以下的土壤主要为粗砂土以及少量碎石。

1.2 样地设置与试验方法

1.2.1 样地设置 综合考虑研究区的植被情况,根据草地退化程度的相关划分评价标准[15],在研究区内选取均位于东西坡向下坡位的3种不同退化阶段的高寒草甸,分别为轻度退化(lightly degraded,LD)、中度退化(moderately degraded,MD)和重度退化(severely degraded,SD)高寒草甸,计为3个处理,其特征见表1。

表1 样地的基本特征

Table 1 Basic characteristics of the plots

处理 Treatment	优势种 Dominant species	物种数 Total number of specie	总盖度/% Total coverage	地上生物量/(g·m^{-2}) Above ground biomass	物种丰富指数 Margalef Index	均匀度指数 Pielou Index	海拔/m Altitud	坡度/(°) Slope
LD	高山嵩草 *Kobresia pygmaea*	22	63.00±4.92 Aa	102.53±6.52 a	2.68±0.03 Aa	0.90±0.09 Aa	4 470	8
MD	弱小火绒草 *Leontopodium pusillum*	16	45.67±4.20 Bb	93.28±8.35 b	1.99±0.09 Aa	0.73±0.25 Aa	4 290	9
SD	二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*	6	30.67±3.16 Bb	58.02±6.75 c	0.80±0.12 Bb	0.72±0.22 Aa	4 570	7

注:LD. 轻度退化;MD. 中度退化;SD. 重度退化。同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)。下同。

Note: LD. Mild degeneration; MD. Moderate degeneration; SD. Severe degeneration. The same lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$), and the same uppercase letters indicate extremely significant differences ($P<0.01$). The same below.

1.2.2 试验方法 分别在轻度退化、中度退化、高度退化高寒草甸内,各设置1个大样方(100 m×100 m);采用对角线取样法,在每个大样方内设置3个0.5 m×0.5 m的小样方。采集土壤前先去除小样方内土壤表层的枯枝落叶,用直径5 cm环刀取0~30 cm土层的原状土壤,重复3次,带回实验室进行土壤体积质量和团聚体、砾石含量的测定。用直径4 cm的土钻在小样方框内随机采集0~30 cm土层土壤样品,重复3次,放入自封袋中及时带回实验室,共计18份土壤样品。随后将18份土壤样品分别分成两部分,一部分新鲜土样于4 ℃保存,用于土壤含水率测定;其余土样风干后,用于测定土壤理化性质。

1.3 土壤理化性质测定

参考《土壤农化分析》[16]的方法进行土壤化学性质测定,其中有机质含量用K_2CrO_7容量法-外加热法测定,速效氮含量用碱解扩散法测定,速效磷含量测定采用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸取-钼锑抗比色法测定,速效钾含量用乙酸铵提取法测定,全氮含量用凯氏定氮法测定,全磷含量用H_2SO_4-$HClO_4$联合消解钼锑抗比色法测定,全钾含量用氢氧化钠溶融法测定,pH值采用电位计法测定。参考《土壤理化分析》[17]的方法进行土壤物理性质测定,其中土壤含水率采用烘干法测定;土壤体积质量通过环刀法测定。土壤总孔隙度(P_t)的计算公式为:$P_t=93.947-32.995\times b$,其中$b$为土壤体积质量。

将环刀内的土壤过2 mm土壤筛,采用排水法测定砾石含量。使用Mastersizer 2000激光粒度仪测定土壤黏粒(粒径<2 μm)、粉粒(2~<20 μm)、砂粒(200~<2 000 μm)含量,计算土壤粒径分形维数(D)。用振荡式机械筛分仪(干筛法)测定不同粒径(<0.25,0.25~<0.5,0.5~<1,1~<2,2~<3,3~<5,5~<7,7~<10,≥10 mm)机械稳定性团聚体含量,根据机械稳定性团聚体组成,计算土壤机械稳定性团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GWD)及>0.25 mm团聚体比重($R_{0.25}$);用团粒分析仪(湿筛法)测定不同粒径(<0.25,0.25~<0.5,0.5~<1,1~<2,2~<5,≥5 mm)水稳性团聚体含量,根据水稳性团聚体组成,计算土壤水稳性团聚体MWD、GWD和$R_{0.25}$以及团聚体破坏率(PDA)。D、$R_{0.25}$、MWD、GWD和PDA的计算参考文献[18]进行。

1.4 数据处理

不同退化高寒草甸土壤特征数据采用Excel 2023分析整理,利用SPSS 23.0软件进行单因素方差分析、Pearson相关性分析和主成分分析。用Origin 2018软件绘图。

2　结果与分析

2.1　不同退化阶段高寒草甸的土壤理化性质

表 2 显示，不同退化阶段高寒草甸的土壤养分含量整体表现为 LD＞MD＞SD，其中 LD 有机质含量显著高于 MD 和 SD，速效磷、速效氮和速效钾含量均极显著高于 MD、SD。不同退化阶段高寒草甸土壤 pH 值呈现出 SD＞MD＞LD，土壤含水率和总孔隙度均表现为 LD＞MD＞SD，其中总孔隙度在 LD 与 SD 和 MD 之间存在显著差异（$P<0.05$）；而土壤体积质量和砾石含量则表现为 SD＞MD＞LD，SD 和 MD 的砾石含量以及土壤体积质量与 LD 有极显著差异（$P<0.01$）。

表 2　藏北不同退化阶段高寒草甸的土壤理化性质

Table 2　Soil physical and chemical properties of differently degraded meadows in Northern Xizang

处理 Treatment	全氮/(g·kg^{-1}) Total nitrogen	全磷/(g·kg^{-1}) Total phosphorus	全钾/(g·kg^{-1}) Total potassium	速效氮/(mg·kg^{-1}) Available nitrogen	速效磷/(mg·kg^{-1}) Available phospho	速效钾/(mg·kg^{-1}) Available kalium
LD	0.92±0.02 a	0.11±0.02 a	1.06±0.06 a	597.03±33.56 A	3.85±0.33 A	330.09±18.71 A
MD	0.86±0.53 a	0.07±0.02 a	0.88±0.19 a	310.69±96.20 B	3.26±0.14 B	266.23±11.25 B
SD	0.75±0.02 a	0.08±0.02 a	0.87±0.10 a	265.21±12.93 B	2.37±0.47 B	237.46±12.63 BC

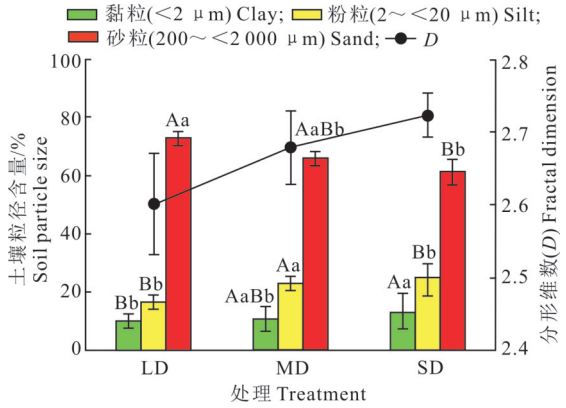
处理 Treatment	有机质/(g·kg^{-1}) Organic matter	pH	土壤含水率/% Soil moisture content	总孔隙度/% Total porosity	土壤体积质量/(g·cm^{-3}) Volume weight of soil	砾石含量/(g·cm^{-3}) Gravel concentration
LD	27.29±1.72 a	8.45±0.27 a	10.22±0.17 a	52.37±0.66 b	1.26±0.02 B	18.32±1.71 B
MD	23.74±0.79 b	8.59±0.43 a	9.73±1.24 a	50.06±0.87 a	1.33±0.03 A	27.98±0.04 A
SD	21.53±0.37 c	8.86±0.19 a	9.45±0.28 a	48.74±2.62 a	1.37±0.08 A	29.68±2.84 A

注：同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$），不同大写字母表示不同处理间差异极显著（$P<0.01$）。下表同。

Note：In the same column，the same lowercase letters affter the data indicate significant differences（$P<0.05$），and the same uppercase letters indicate extremely significant differences（$P<0.01$）. The same below.

2.2　不同退化阶段高寒草甸土壤粒径和团聚体分布特征

2.2.1　土壤粒径分布特征　土壤粒径分形维数（D）反映了土壤质地的均匀程度，其值越低，土壤结构稳定性越高[19]。藏北不同退化高寒草甸土壤粒径分布与分形维数特征见图 1。



LD. 轻度退化；MD. 中度退化；SD. 重度退化。图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$），不同大写字母表示不同处理间差异极显著（$P<0.01$）。下图同。

LD. Mild degeneration；MD. Moderate degeneration；SD. Severe degeneration. On the column，the same lowercase letters indicate significant differences（$P<0.05$），and the same uppercase letters indicate extremely significant differences（$P<0.01$）. The same below.

图 1　藏北不同退化阶段高寒草甸的土壤粒径分布与分形维数

Fig. 1　Soil particle size and fractal dimension of differently degraded meadows in Northern Xizang

图 1 显示，在不同退化阶段的高寒草甸中，土壤粒径分形维数表现为 SD＞MD＞LD，可知 LD 的结构稳定性最高。在高寒草甸的不同退化阶段，土壤黏粒含量为 9.95%～14.09%，均低于 15%，表现为 SD＞MD＞LD；粉粒含量在 17.21%～26.11%，表现为 SD＞MD＞LD；而砂粒含量则为 59.95%～72.93%，表现为 LD＞MD＞SD。

2.2.2　土壤机械稳定性团聚体分布特征　由图 2 可见，在高寒草甸退化过程中，LD 土壤机械稳定性团聚体以＜0.25 mm 为主，其含量为 27.98%；0.25～＜0.5 mm（14.94%）和 0.5～＜1 mm 团聚体（12.91%）次之，≥10 mm 团聚体最少（5.03%）。MD 土壤机械稳定性团聚体以＜0.25 mm 为主，其含量为 26.82%；0.25～＜0.5 mm（16.79%）和 0.5～＜1 mm 团聚体（14.83%）次之；5～＜7 mm 团聚体最少（4.98%）。SD 土壤机械稳定性团聚体以＜0.25 mm 为主，其含量为 34.94%；0.25～＜0.5 mm（14.97%）和 0.5～＜1 mm 团聚体（12.96%）次之；2～＜3 mm 团聚体最少（1.29%）。退化高寒草甸的土壤机械稳定性团聚体 $R_{0.25}$ 表现为 MD（73.18%）＞LD（72.02%）＞SD（65.06%），当高寒草甸由轻度退化到中度退化转变时，$R_{0.25}$ 增加了 1.16%；由中度退化到重度退化转变时，$R_{0.25}$ 减少

8.12%,可见由中度退化到重度退化是高寒草甸土壤机械稳定性大团聚体向微团聚体转变的主要阶段。

2.2.3 土壤水稳性团聚体分布特征 不同退化阶段高寒草甸各级粒径水稳性团聚体含量的分布特征见图3。

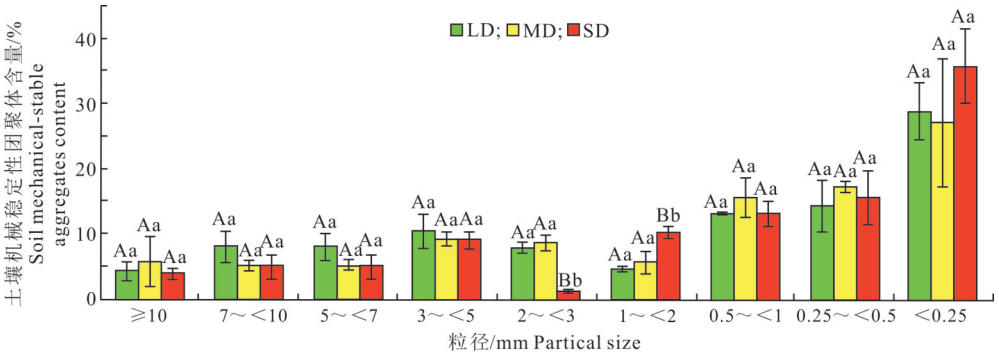


图2 藏北不同退化阶段高寒草甸各级粒径土壤机械稳性团聚体的含量

Fig. 2 Mechnical-stable soil aggregates content of differently degraded meadows in Northern Xizang

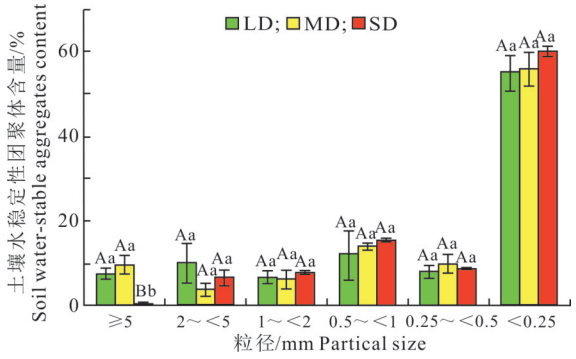


图3 藏北不同退化阶段高寒草甸各级粒径土壤水稳性团聚体含量

Fig. 3 Water-stable soil aggregates content at different degraded meadows in Northern Xizang

图3显示,高寒草甸退化过程中,LD土壤水稳性团聚体以<0.25 mm为主,其含量为56.28%;0.5～<1 mm(13.26%)和2～<5 mm团聚体(11.17%)次之;1～<2 mm团聚体最少(6.88%)。MD土壤水稳性团聚体以<0.25 mm为主,其含量为57.12%;0.5～<1 mm(15.27%)和0.25～<0.5 mm团聚体(8.98%)次之;2～<5 mm团聚体最少(4.46%)。SD土壤水稳性团聚体以<0.25 mm为主,其含量为59.86%;0.5～<1 mm(14.75%)和0.25～<0.5 mm团聚体(9.03%)次之;≥5 mm团聚体最少(0.59%)。退化高寒草甸土壤水稳性团聚体比重($R_{0.25}$)表现为LD(43.72%)>MD(42.88%)>SD(40.14%),可知高寒草甸由轻度退化到中度退化转变时,$R_{0.25}$减少的幅度较小(0.84%);由中度退化到重度退化转变时,$R_{0.25}$减少的幅度较大(2.74%),可知由中度退化到重度退化是高寒草甸土壤水稳性大团聚体向微团聚体转变的主要阶段。

2.2.4 土壤团聚体平均质量直径和几何平均直径 土壤团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GWD)是衡量土壤团聚体大小分布的关键指标,其值越高,表明土壤团聚体的稳定性越强[20]。由表3可见,不同退化阶段高寒草甸土壤机械稳定性团聚体的MWD为1.86～2.25 mm,从LD到MD以及MD到SD,MWD分别下降了5.78%和12.26%;GWD为1.36～1.49 mm,从LD到MD以及MD到SD,GWD分别下降了1.34%和7.48%。水稳定性团聚体MWD为1.02～1.36 mm,从LD到MD以及MD到SD,MWD分别下降了1.47%和23.88%;GWD为0.67～0.76 mm,从LD到MD以及MD到SD,GWD分别下降了2.63%和9.46%。可知随着高寒草甸退化程度的加剧,土壤机械稳定性团聚体的MWD和GWD均高于水稳定性团聚体,且在不同退化阶段中,土壤机械稳定性表现为LD>MD>SD。

表3 藏北不同退化阶段高寒草甸团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GWD)

Table 3 Average mass diameter (MWD) and geometric mean diameter (GWD) of aggregates of differently degraded alpine meadows in Northern Xizang mm

处理 Treatment	机械稳定性团聚体 Mechnical-stable aggregate		水稳定性团聚体 Water-stable aggregate	
	MWD	GWD	MWD	GWD
LD	2.25±0.21 a	1.49±0.22 a	1.36±0.17 a	0.76±0.02 a
MD	2.12±0.22 a	1.47±0.25 a	1.34±0.14 a	0.74±0.05 a
SD	1.86±0.19 a	1.36±0.15 a	1.02±0.01 a	0.67±0.02 a

2.2.5　团聚体破坏率　不同退化阶段高寒草甸土壤团聚体的破坏率表现为MD（38.02%）>LD（44.14%）>SD（41.21%），由此可知随着高寒草甸退化程度的加剧，团聚体的破坏率总体增大，土壤团聚体稳定性下降，其中MD样地团聚体破坏率最大，表明高寒草甸演替到中度退化阶段时，土壤团聚体稳定性最差。

2.3　不同退化高寒草甸土壤理化性质的相关性分析

不同退化阶段高寒草甸土壤理化性质的相关性分析结果（表4）表明，土壤总孔隙度与速效钾含量呈极显著正相关（$P<0.01$），与土壤有机质、速效氮含量呈显著正相关（$P<0.05$）；砂粒与速效钾、有机质含量呈极显著正相关（$P<0.01$），与全氮、速效磷、速效氮含量呈显著正相关（$P<0.05$）；土壤黏粒含量与pH值呈显著正相关（$P<0.05$）；水稳性团聚体几何平均直径与速效氮含量呈显著正相关（$P<0.05$）。

表 4　藏北退化高寒草甸土壤理化性质的相关关系分析

Table 4　Correlation analysis of soil physical-chemical properties in Northern Xizang

指标 Index	OM	AN	AP	TN	TP	TK	AK	pH
SWC	0.361	0.434	0.395	−0.093	0.301	−0.057	0.263	−0.163
BD	−0.698*	−0.680*	−0.640	−0.371	−0.522	−0.542	−0.818**	0.482
STP	0.710*	0.686*	0.626	0.378	0.500	0.557	0.821**	−0.483
GC	−0.833**	−0.877**	−0.701*	−0.418	−0.670*	−0.551	−0.955**	0.318
CC	−0.672*	−0.337	−0.618	−0.896**	−0.301	−0.331	−0.660	0.785*
PC	−0.918**	−0.812**	−0.719*	−0.671*	−0.609	−0.522	−0.949**	0.565
SC	0.891**	0.702*	0.733*	0.784*	0.542	0.487	0.903**	−0.679*
D	−0.909**	−0.751*	−0.729*	−0.751*	−0.563	−0.507	−0.922**	0.636
$MWD_{(M)}$	0.330	0.587	0.598	−0.023	0.535	0.605	0.624	0.081
$GWD_{(M)}$	0.219	0.431	0.529	−0.126	0.371	0.519	0.452	0.083
$R_{0.25(M)}$	0.156	0.282	0.419	−0.179	0.173	0.514	0.335	0.003
$MWD_{(W)}$	0.664	0.663	0.540	0.394	0.189	0.280	0.481	−0.185
$GWD_{(W)}$	0.636	0.671*	0.406	0.265	0.078	0.232	0.385	−0.061
$R_{0.25(W)}$	0.585	0.659	0.332	0.196	0.038	0.192	0.335	0.043
PDA	−0.578	−0.629	−0.002	0.038	0.118	−0.172	−0.223	−0.044

注：OM. 有机质；AN. 速效氮；AP. 速效磷；TN. 全氮；TP. 全磷；TK. 全钾；AK. 速效钾；SWC. 土壤含水率；BD. 体积质量；STP. 土壤总孔隙度；GC. 砾石含量；CC. 黏粒含量；PC. 粉粒含量；SC. 砂粒含量；D. 粒径分形维数；$MWD_{(M)}$. 机械稳定性团聚体平均质量直径；$GWD_{(M)}$. 机械稳定性团聚体几何平均直径；$R_{0.25(M)}$. 机械稳定性团聚体中>0.25 mm大团聚体比重；$MWD_{(W)}$. 水稳性团聚体平均质量直径；$GWD_{(W)}$. 水稳性团聚体几何平均直径；$R_{0.25(W)}$. 水稳性团聚体中>0.25 mm大团聚体比重；PDA. 团聚体破坏率。*表示在$P<0.05$水平显著相关，**表示在$P<0.01$水平极显著相关。下同。

Note: OM. Organic matter; AN. Available nitrogen; AP. Available phosphorus; TN. Total nitrogen; TP. Total Phosphorus; TK. Total potassium; AK. Available potassium; SWC. Soil water content; BD. Bulk density; STP. Soil total porosity; GC. Gravel content; CC. Clay content; PC. Particle content; SC. Sand content; D. Fractal dimension; $MWD_{(M)}$. Mechanical-stable aggregates mean weight diameter; $GWD_{(M)}$. Mechanical-stable aggregates geometric weight diameter; $R_{0.25(M)}$. Soil mechanically-stable macroaggregates with particle size>0.25 mm; $MWD_{(W)}$. Water-stable aggregates mean weight diameter; $GWD_{(W)}$. Soil water-stable aggregates geometric weight diameter; $R_{0.25(W)}$. Soil water-stable macroaggregates with particle size >0.25 mm; PDA. Percentage of aggregate destruction. * shows significant correlation at the $P<0.05$ level, and ** shows significant correlation at the $P<0.01$ level. The same below.

2.4　不同退化高寒草甸土壤理化性质的主成分分析

根据3个不同高寒草甸退化梯度进行分组，再基于土壤理化性质共19个指标进行主成分分析，结果见图4，其中正负箭头方向反映了变量与主成分的正负相关性，线段长度代表变量对主成分的贡献度，而箭头夹角则表明了变量之间的相关性。

图4显示，PC1与PC2的累计贡献率为78.8%，能很好地代表原始数据的大部分信息。在PC1中，速效氮、速效磷、速效钾、有机质等指标载荷分别为0.261，0.252，0.267和0.258，较其他指标高且为正值，可知土壤速效养分对PC1的贡献较大。在PC2中，全钾、黏粒、土壤含水率等的载荷分别为0.389，0.375和0.302，明显高于其他指标，可知土壤全量养分和质地对PC2的贡献较大。PC1贡献率（58.1%）高于PC2（20.7%），说明PC1对原始数据的解释能力更强，因此土壤速效养分含量对退化高寒草甸的影响大。根据LD、MD、SD分布可以看出，LD在第一和第四象限，MD在第一和第三象限，SD在第二和第三象限，可知不同退化阶段高寒草甸样本各项指标存在较大差异。

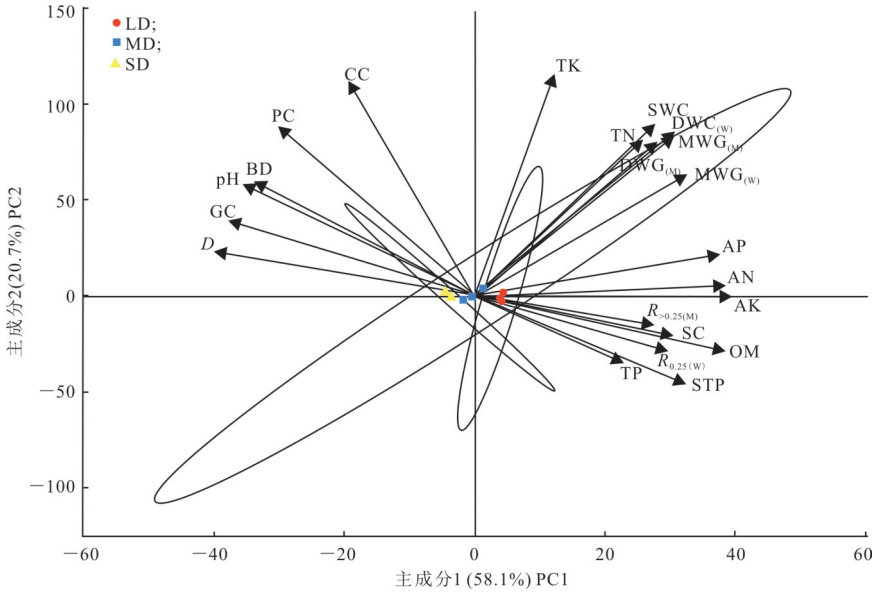


图 4 藏北 3 种退化高寒草甸土壤理化性质的主成分分析

Fig. 4 PCA analysis of soil physical and chemical properties in three degraded alpine meadows in Northern Xizang

3 讨 论

退化高寒草甸通过改变植被-土壤反馈机制,导致土壤碳氮流失、pH 值升高及土壤元素失衡,形成了恶性循环[21]。本研究中,随着高寒草甸退化程度的加剧,土壤养分含量也随之降低,这与杨元武等[22]的研究结果一致,其原因为高寒草甸的退化可能加速了植物残体的分解过程,导致有机养分向无机养分转化,进而引发了土壤养分的流失;此外,由于高寒草甸的退化,地上植被数量锐减,使得地表裸露面积增加,淋溶作用导致土壤养分大量流失。罗亚勇等[23]发现,在青藏高原东缘的玛曲县,随着高寒草甸退化程度的加剧,土壤速效养分含量呈先增加后降低趋势,这与本研究结果不一致,可能是由于该地区中度退化草甸地下生物量迅速减少,牧草对土壤养分的吸收量也逐渐减少,进而导致了高寒草甸速效养分的增加。

土壤 pH 值是土壤退化演替的主要标志[24]。本研究中,随着高寒草甸退化程度的加剧,土壤 pH 值逐渐增加,可能由于高寒草甸退化导致地表凋落物减少,使地表保水能力减弱,从而使土壤 pH 升高;此外,藏北地区强烈的阳光辐射,使土壤中的盐分随着水分大量蒸发并向上运输,从而使土壤 pH 升高,这与孙磊等[14]的研究结果一致。说明藏北退化高寒草甸有向土壤盐碱化发展的趋势。

土壤物理性质影响着土壤结构、养分有效性以及保水能力,其对维持土壤稳定起着非常重要作用[25]。本研究中,随着高寒草甸退化程度的加剧,土壤体积质量和砾石含量增加,总孔隙度下降,这与字洪标等[9]的研究结果一致,其原因为高寒草甸的退化演替导致草地地上生产力降低,而地下根系数量的减少影响了土壤对水分的吸收和利用,使得土壤含水率下降,导致土壤更加紧实,孔隙度降低,体积质量显著增加;另一方面,随着植被覆盖率的减少,土壤蒸发和风蚀、水蚀作用加剧,土壤蓄水能力和通透性也随之下降。

土壤粒径组成决定了土壤养分和水分的转运,高寒草甸退化成为了影响土壤粒径变化的主要因素[19]。本研究中,高寒草甸土壤退化过程中,土壤黏粒、粉粒含量升高,砂粒含量下降,这与柳妍妍等[26]研究结果一致。其原因为退化高寒草甸植被盖度降低后,土壤裸露导致其温度升高,土壤呼吸加剧,微生物对有机质的分解加速,土壤有机碳大量流失,团聚体稳定性下降,导致土壤结构被破坏[27]。此外,土壤粒径分形维数随着高寒草甸退化程度增加而逐渐增大,与宫阿都等[28]的研究结果一致。高寒草甸植被退化后,土壤裸露在地表,风蚀、水蚀作用加剧,导致土壤结构被破坏,土壤粒径分布不均匀,土壤也随之发生退化,说明高寒草甸土壤退化滞后于草地退化。

土壤团聚体的稳定性是评价土壤结构是否良好的重要指标。本研究中,随着高寒草甸退化程度的加剧,土壤机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均呈下降趋势,且退化草地

＜0.25、0.25～＜2 mm团聚体含量始终高于2～＜5和≥5 mm团聚体，这与陈帅等[29]的研究结果一致。可能是因为随着高寒草甸退化程度的加剧，土壤有机质含量逐渐下降，降低了土壤团聚作用，使得大团聚体形成作用减弱，大团聚体不断向小团聚体转化，导致土壤团聚体稳定性逐渐下降。本研究中，土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体均以＜0.25 mm为主，与陈秋捷等[21]的研究结果并不一致，这可能与高寒草甸的地形、土壤质地及气候环境影响有关。本研究中，退化高寒草甸土壤机械稳定性团聚体的MWD和GWD均大于土壤水稳性团聚，这与江仁涛等[30]的研究结果一致，说明水蚀作用使大团聚体破碎，平均粒径减小。本研究中，中度退化高寒草甸的土壤团聚体破坏率最大，这与江仁涛等[30]的研究结果不一致，可能与研究地区退化草地土壤质地存在差异有关。

本研究结果表明，退化高寒草甸土壤总孔隙度与速效钾、有机质、速效氮含量呈显著或极显著正相关，砂粒与速效钾、有机质、全氮、速效磷、速效氮含量呈显著或极显著正相关，土壤黏粒含量与pH值呈显著正相关关系，土壤水稳性团聚体几何平均直径与速效氮呈显著正相关。说明土壤理化性质之间存在复杂的相关性。本研究的主成分分析结果表明，高寒草甸退化主要是由土壤养分和质地共同作用下的协同过程，这与罗亚勇等[23]的研究结果一致。由本研究结果可知，高寒草甸退化过程中，土壤养分含量急剧下降，同时土壤结构变差，水土保持能力也开始下降，通过人为方式改变土壤养分含量，可以改善退化高寒草甸土壤结构，提高土壤养分，促进高寒草甸草本植物生长，从而改变群落结构和功能[31]。

4　结　论

随着藏北地区高寒草甸退化程度的加剧，土壤养分含量、土壤含水率、总孔隙度、砂粒含量均有所下降，土壤体积质量、pH值及土壤砾石、黏粒、粉粒含量升高，土壤粒径分形维数增大，土壤团聚体MWD和GMD均呈下降趋势，其中中度退化高寒草甸土壤团聚体的PAD最大，因此中度退化阶段是藏北高寒草甸退化的转折期，同时土壤有机质、速效磷、速效氮和速效钾含量和质地是高寒草甸退化的关键影响因子。

[参考文献]

[1] 高清竹，江村旺扎，李玉娥，等. 藏北地区草地退化遥感监测与生态功能区划[M]. 北京：气象出版社，2006：101-105.
GAO Q Z，JIANGCUN W Z，LI Y E，et al. Remote sensing monitoring of grassland degradation and eco-functional regionalization in Northern Tibet[M]. Beijing：China Meteorological Press，2006：101-105.

[2] 孙鸿烈，郑度，姚檀栋，等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报，2012，67(1)：3-12.
SUN H L，ZHENG D，YAO T D，et al. Protection and construction of the national ecological securityshelter security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica，2012，67(1)：3-12.

[3] SU X K，WU Y，DONG S K，et al. Effects of grassland degradation and re-vegetation on carbon and nitrogen storage in the soils of the Headwater Area Nature Reserve on the Qinghai-Tibetan Plateau，China[J]. Journal of Mountain Science，2015，12(3)：582-591.

[4] 益西措姆，许岳飞，付娟娟，等. 放牧强度对西藏高寒草甸植被群落和土壤理化性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2014，42(6)：27-33.
YIXI C M，XU Y F，FU J J，et. Effects of grazing intensity on vegetation community and soil physical and chemical properties of alpine meadow in Tibet[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2014，42(6)：27-33.

[5] CHE R X，WANG F，WANG W J，et al. Increase in ammonia-oxidizing microbe abundance during degradation of alpine meadows may lead to greater soil nitrogen loss[J]. Biogeochemistry，2017，136(3)：341-352.

[6] LI Y M，WANG S P，JIANG L L，et al. Changes of soil microbial community under different degraded gradients of alpine meadow[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2016，222：213-222.

[7] 李林芝，张德罡，马源，等. 不同退化程度高寒草甸土壤团聚体养分及生态化学计量特征研究[J]. 草业学报，2023，32(8)：48-60.
LI L Z，ZHANG D G，MA Y，et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil aggregates in alpine meadows with differing degrees of degradation[J]. Acta Prataculturae Sinica，2023，32(8)：48-60.

[8] 慕军鹏，付荣华，谭露. 不同退化演替阶段高寒草甸土壤理化性质对功能群植物地上生物量的影响[J]. 草学，2018(2)：41-47.
MU J P，FU R H，TAN L. Effects of soil physical and chemical properties on above-ground biomass of functional groups at different degradation successional stages of alpine meadows[J]. Journal of Grassland and Forage Science，2018(2)：41-47.

[9] 字洪标，胡雷，阿的鲁骥，等. 不同退化演替阶段高寒草甸群落根土比和土壤理化特征分布格局[J]. 草地学报，2015，23(6)：1151-1160.
ZI H B，HU L，ADE L J，et al. Distribution patterns of ratio of root to soil and soil physical chemical characteristics at the diffe-

rent degraded successional stages in an alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica,2015,23(6):1151-1160.

[10] 张煜坤,王洪斌,张大才. 川西高原高寒草甸两种生境土壤理化性质差异的分析[J]. 草地学报,2020,28(1):207-213.
ZHANG Y K, WANG H B, ZHANG D C. Analysis on the differences of soil physicochemical properties between two habitats in alpine meadow, western Sichuan Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica,2020,28(1):207-213.

[11] 李军豪,杨国靖,王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. 应用生态学报,2020,31(6):2109-2118.
LI J H, YANG G J, WANG S P. Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(6):2109-2118.

[12] DONG S K, WEN L, LI Y Y, et al. Soil-quality effects of grassland degradation and restoration on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(6):2256-2264.

[13] 周启龙. 西藏藏北地区不同草原类型区土壤理化性质特征研究[J]. 安徽农业科学,2016,44(20):124-125,142.
ZHOU Q L. The soil physical and chemical properties of different steppe types in northern Tibet[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2016,44(20):124-125,142.

[14] 孙磊,刘玉,武高林,等. 藏北退化草地群落生物量与土壤养分的关系[J]. 草业科学,2016,33(6):1062-1069.
SUN L, LIU Y, WU G L, et al. The relationships between community biomass and soil nutrients in the northern Tibet degradation grassland[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(6): 1062-1069.

[15] 周琼. 三江源区山坡退化草地生态恢复技术应用效果及区域适应性评价[D]. 兰州:兰州大学,2020.
ZHOU Q. Application effect and regional adaptability evaluation of ecological restoration technology for degraded grassland on hillside in the source region of Three Rivers[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2020.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社,1980:25-93.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: Agriculture Press,1980:25-93.

[17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978:466-518.
Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis of soil[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers,1978:466-518.

[18] 刘超,付强,侯仁杰,等. 施加生物炭对东北黑土区土壤结构及融雪水入渗的影响[J/OL]. 东北农业大学学报,2025:1-13[2025-06-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1391.S.20250611.1336.002.html.
LIU C, FU Q, HOU R J, et al. Effects of applying biochar on soil structure and snowmelt infiltration in the black soil area of Northeast China. [J/OL]. Journal of Northeast Agricultural University, 2025: 1-13 [2025-06-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1391.S.20250611.1336.002.html.

[19] 魏茂宏,林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J]. 应用生态学报,2014,25(3):679-686.
WEI M H, LIN H L. Soil particle size distribution and its fractal dimension among degradation sequences of the alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow River, Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(3):679-686.

[20] 曹丽花,刘合满,赵世伟. 当雄草原不同退化草甸土壤含水量及容重分布特征[J]. 草地学报,2011,19(5):746-751.
CAO L H, LIU H M, ZHAO S W. The distribution of soil water contents and bulk density on degraded grassland at Dangxiong[J]. Acta Agrestia Sinica,2011,19(5):746-751.

[21] 陈秋捷,张楠楠,仲波,等. 若尔盖高寒草地退化沙化过程中土壤养分与团聚体结构的变化特征[J]. 生态科学,2019,38(4):13-20.
CHEN Q J, ZHANG L L, ZHONG B, et al. Change of soil nutrient and aggregate structure during the desertification process of grassland in Zoige[J]. Ecological Science, 2019, 38(4): 13-20.

[22] 杨元武,李希来,周旭辉,等. 高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J]. 草地学报,2016,24(6):1211-1217.
YANG Y W, LI X L, ZHOU X H, et al. Study on the relationship between plant community degradation and soil environmental characteristics in alpine meadows[J]. Grassland Science,2016,24(6):1211-1217.

[23] 罗亚勇,孟庆涛,张静辉,等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 冰川冻土,2014,36(5):1298-1305.
LUO Y Y, MENG Q T, ZHANG J H, et al. Species diversity and biomass in relation to soil properties of alpine meadows in the eastern Tibetan Plateau in different degradation stages[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1298-1305.

[24] 陈奇乐,谢梦姣,李智,等. 坝上高原区不同退化草地土壤特征分析[J]. 中国草地学报,2020,42(5):103-109.
CHEN Q L, XIE M J, LI Z, et al. Analysis of soil characteristics of different degraded grasslands in Bashang Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland,2020,42(5):103-109.

[25] 黄蓉,王辉,马维伟,等. 尕海洪泛湿地退化过程中土壤理化性质的变化特征[J]. 水土保持学报,2014,28(5):221-227.
HUANG R, WANG H, MA W W, et al. Soil physicochemical properties characteristics during degradation process of the flooding wetland in Gahai[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(5):221-227.

[26] 柳妍妍,胡玉昆,公延明. 高寒草原不同退化阶段土壤颗粒分形特征[J]. 水土保持通报,2013,33(5):138-142,184.
LIU Y Y, HU Y K, GONG Y M. Fractal dimensions of soil particles in different degenerate stages of alpine steppe[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 138-142,184.

(下转第104页)