

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.011

引用格式:杨卓丽,柳小妮,张德罡,等.甘南不同退化程度高寒草甸土壤持水能力与化学计量特征研究[J].草地学报,2026,34(1):107-117

YANG Zhuo-li, LIU Xiao-ni, ZHANG De-gang, et al. Water-holding Capacity and Stoichiometric Characterization of Alpine Meadow Soils with Different Degradation Levels in Gannan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):107-117

甘南不同退化程度高寒草甸土壤持水能力与 化学计量特征研究

杨卓丽,柳小妮*,张德罡,漆昊,纪童,何国兴,李娅丽,汪云君,
马成龙,李佳缙,于耀鑫

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室,甘肃兰州730070)

摘要:为探究土壤持水能力与化学计量特征之间的关系及影响因素,本研究以甘南高寒草甸为对象,分析不同退化程度高寒草甸土壤持水能力、土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、氮(Nitrogen, N)、磷(Phosphorus, P)、土壤有机碳储量(Soil organic carbon storage, SOCS)、全氮储量(Total nitrogen storage, TNS)、全磷储量(Total phosphorus storage, TPS)和化学计量比的变化特征及关系。结果表明:土壤持水能力随退化程度加剧而降低,且表层变化最显著;SOC、N、P、SOCS、TNS、碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)随退化程度的加剧而降低;土壤持水能力与植被盖度、生物量、高度、毛细孔隙、总孔隙、SOC、N、P、C:P、N:P、SOCS、TNS极显著正相关,与土壤容重极显著负相关, Monte-Carlo 检验表明土壤容重对持水能力解释度最高(81.8%),且植被盖度、土壤孔隙、SOC、C:P、TN、TP均为显著影响因子。因此,在高寒草甸生态修复和管理中,应协同优化植被与土壤改良措施,以同步提升持水性能和生态功能。

关键词:高寒草甸;退化;土壤持水能力;CNP化学计量特征

中图分类号:S155.4+7

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0107-11

Water-holding Capacity and Stoichiometric Characterization of Alpine Meadow Soils with Different Degradation Levels in Gannan

YANG Zhuo-li, LIU Xiao-ni*, ZHANG De-gang, QI Hao, JI Tong, HE Guo-xing,
LI Ya-li, WANG Yun-jun, MA Cheng-long, LI Jia-jin, YU Yao-xin

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education,
Lanzhou, Gausu Province 730070, China)

Abstract: To investigate the relationship between soil water-holding capacity and chemical characteristics, as well as the influencing factors, this study took the high-altitude cold meadows of Gannan as the research object, and analyzed the soil water-holding capacity, soil organic carbon (SOC), nitrogen (N), phosphorus (P), soil organic carbon storage (SOCS), total nitrogen storage (TNS), total phosphorus storage (TPS), and stoichiometric ratios. The results indicated that soil water-holding capacity decreased with increasing degradation severity, with the most significant changes in the surface layer; SOC, N, P, SOCS, TNS, carbon-phosphorus ratio (C:P), and nitrogen-phosphorus ratio (N:P) decreased with increasing degradation severity; Soil water-holding capacity was extremely significantly positively correlated with vegetation cover, biomass, height, capillary porosity, total porosity, SOC, N, P, C:P, N:P, SOCS, and TNS, and extremely significantly nega-

收稿日期:2024-12-20;修回日期:2025-05-21

基金项目:甘肃农业大学草地生态系统教育部重点实验室揭榜挂帅项目(KLGE-2024-01);甘肃省草原监测评价(GSZYTC-ZCJC-21010);2021年自列省级林业和草原科技项目(2021kj071);甘肃省新一轮草原补奖效益评估及草原生态评价研究(XZ20191225);2023年提前批中央财政林业改革发展资金草原科技支撑项目“河西走廊脆弱生态区草原生态健康评估”(2023211)项目资助

作者简介:杨卓丽(2000-),女,汉族,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事草地资源与生态研究,E-mail:1922858757@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: liuxn@gsau.edu.cn

tively correlated with soil bulk density. Monte Carlo tests indicated that soil bulk density had the highest explanatory power for water-holding capacity (81.8%), and vegetation cover, soil porosity, SOC, C:P, TN, and TP were significant influencing factors. Therefore, in the ecological restoration and management of alpine meadows, vegetation and soil improvement measures should be optimised in a coordinated manner to simultaneously enhance water retention capacity and ecological functions.

Key words: Alpine meadows; Degradation; Soil water-holding capacity; CNP stoichiometric characterization

土壤持水能力作为土壤基本物理性质之一,是评估水分调节功能和土壤水源涵养功能的重要参数,对生态群落的恢复和重建有重要影响^[1]。土壤饱和持水量、毛管持水量及田间持水量都是衡量土壤持水能力的重要参数,能够表示土壤贮水能力的强弱^[2]。土壤持水能力受土壤性质、地形和土地利用方式等多种因素影响的同时也影响着其它土壤养分^[3]。研究表明草地退化会影响到土壤的持水性能,并进一步影响土壤养分平衡^[4]。另外,土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)是草地土壤养分的重要组分^[5],He等^[6]指出,增加土壤有机碳可以促进土壤结构的优化,提升土壤的透气性和保水性,进而增强土壤持水能力。土壤生态化学计量特征能反映生态过程中C、N、P元素间的耦合关系、土壤养分贮存和供应能力,还可作为土壤有机质的分解速率、养分限制情况,以及C、N、P饱和状态的评估依据^[7]。高C:N表征土壤氮供给不足,抑制微生物对有机质的分解,导致木质素和纤维素的残体持续累积^[8];该累积过程降低水分流失并促进腐殖质形成,从而提升土壤持水能力^[6]。这意味着土壤化学计量比不仅影响土壤的养分供应能力,还间接影响土壤的持水能力。

目前,对退化高寒草地土壤理化性质及化学计量特征变化开展了一系列研究,如孙玉等^[9-10]在三江源高寒草甸的研究中发现,土壤持水能力、SOC和N含量随退化程度加剧而降低;Pan等^[11]研究发现不同退化草地之间土壤持水特性差异显著;其曼古丽·帕拉提等^[12]研究表明青藏高原草地退化直接影响土壤理化性质,进而影响SOC、N、P含量及其生态化学计量比;Wang等^[13]研究指出草地退化显著降低了土壤中C、N的浓度以及C:P和N:P的值,预计N限制会随着草地退化而更加明显;马源等^[14]对祁连山退化高寒草甸的研究表明SOC、N、P含量随退化程度的加剧而降低,此外,土壤中的碳、氮、磷比例(C:N:P)也发生了显著变化,特别是C:N出现了严重的失衡,这种失衡表明,随着草地退化程度加剧,土壤对N的限制作用变得更严重。

甘南草原位于我国青藏高原东北边缘地带,现有天然草地面积272.27万 hm^2 ^[15],是我国重要的生态屏障,其在水源涵养、生物多样性保护、调节径流量等方面具有不可替代的生态作用^[16],但由于不合理放牧、气候变化、鼠虫害等的影响,甘南草原出现不同程度退化^[15]。土壤持水能力是与草地退化密切相关的物理性质,草地退化会降低土壤持水能力,而土壤持水能力的提高又是草地恢复和生态改善的关键因素。因此,研究不同退化程度高寒草甸土壤持水能力及其影响因素对高寒地区生态保护和修复具有重要意义。本研究以甘南不同退化高寒草甸为对象,分析了甘南高寒草甸退化过程中植被特征、土壤持水能力、土壤孔隙、SOC、N、P含量与储量及其生态化学计量比的变化特征,并探讨之间的关系以及土壤持水能力的影响因素,以期为甘南退化高寒草甸的生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘南藏族自治州合作市佐盖多玛乡(103°9'47"E, 34°57'48"N),地处青藏高原东部边缘,平均海拔3420 m,冷季长,年平均气温-0.5℃~3.5℃,极端最高气温28℃,极端最低气温-24℃,属高寒半湿润型气候,年平均降水量545 mm,54.4%集中于7—9月,平均无霜期48 d,年均蒸发量1222 mm。土壤主要类型为高山草甸土、亚高山草甸土,草地类型以高寒草甸类为主体^[17]。

1.2 样地设置与样品采集

2022年8月采用空间退化代替时间退化演替序列的方法^[18],在研究区选择3个采样区域,根据不同放牧干扰强度、植被盖度等,在每个区域设置了位于阳坡,且坡度相近(波动<5°)的4个退化梯度的样地,即未退化(Non-degraded, ND)、轻度退化(Lightly degraded, LD)、中度退化(Moderately degraded, MD)、重度退化(Severely degraded, SD)(图1)。样地基本信息见表1。

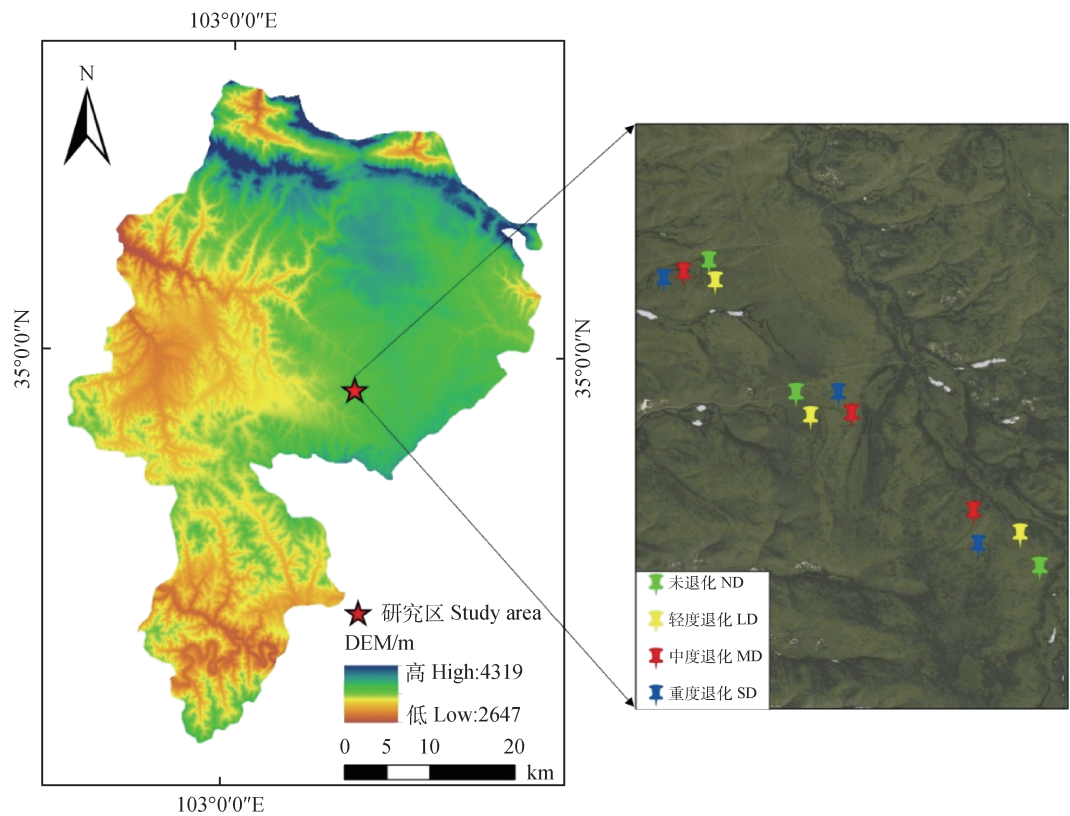


图 1 研究区及采样区域

Fig. 1 Location of the study area and investigated sites

每个样地选取 3 个 0.5 m×0.5 m 的样方,采集土样。环刀样品用于测定土壤容重、孔隙度及持水能力,扰动土壤供 SOC,N,P 测定。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample plots

退化程度 Degradation degree	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	放牧率 Grazed rate/ (sheep unit·d ⁻¹ ·hm ⁻²)	优势物种 Dominant species
未退化 (ND)	103°10'00"E	34°57'36"N	3423	0.90	嵩草 (<i>Kobresia myosuroides</i>)、垂穗披碱草 (<i>Elymus nutans</i>)
	103°10'25"E	34°56'57"N	3469		
	103°11'35"E	34°56'08"N	3489		
轻度退化 (LD)	103°10'02"E	34°57'30"N	3428	3.28	鹅观草 (<i>Elymus kamoji</i> S. L. Chen)、矮生嵩草 (<i>Carex alataensis</i>)
	103°10'29"E	34°56'51"N	3463		
	103°11'29"E	34°56'18"N	3487		
中度退化 (MD)	103°09'52"E	34°57'33"N	3431	6.12	苔草 (<i>Carex tristachya</i> Thunb.)、藨草 (<i>Scirpus cernuus</i>)、委陵菜 (<i>Potentilla chinensis</i> Ser.)
	103°10'41"E	34°56'52"N	3459		
	103°11'16"E	34°56'24"N	3496		
重度退化 (SD)	103°09'47"E	34°57'30"N	3433	10.76	委陵菜 (<i>Potentilla chinensis</i> Ser.)、老鹳草 (<i>Geranium wilfordii</i> Maxim.)、凤毛菊 (<i>Saussurea</i> spp.)
	103°10'37"E	34°56'58"N	3465		
	103°11'17"E	34°56'14"N	3493		

注:研究样地为冷季放牧(放牧率计算时段为每年 10 月至次年 5 月)

Note: The study sample plots were grazed during the cool season (grazing rates were calculated from October through next May of each year)

1.3 土壤理化性质测定与碳氮磷储量的计算

参照《土壤物理性质测定方法》^[19],将采集的环刀土于 105℃ 烘干至恒重,称重(干土+环刀)为 M₁,将干土去掉称环刀重为 M₂;将环刀样放置在铁

盘中缓慢加入蒸馏水至环刀上沿,浸泡 12 h,称重 M₃;然后,将环刀转移至平铺的干砂盘上,放置 2 h,称重 M₄;继续放置 24 h,称重 M₅;最后,将环刀转移至烘箱,105℃ 烘至恒重,称重 M₆;将干土去掉

环刀称重 $M_7^{[20]}$ 。计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{土壤容重}(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}) &= (M_1 - M_2)/100 \\ \text{饱和持水量}(\%) &= (M_3 - M_6)/(M_6 - M_7) \times 100\% \\ \text{毛管持水量}(\%) &= (M_4 - M_7)/(M_6 - M_7) \times 100\% \\ \text{田间持水量}(\%) &= (M_5 - M_7)/(M_6 - M_7) \times 100\% \end{aligned}$$

根据测定的土壤容重、饱和持水量、毛管持水量计算孔隙度。计算公式如下:

$$\text{非毛管孔隙度} =$$

$$(\text{饱和持水量} - \text{毛管持水量}) \times \text{土壤容重}$$

$$\text{毛管孔隙度} = \text{毛管持水量} \times \text{土壤容重}$$

$$\text{总孔隙度} = \text{非毛管孔隙度} + \text{毛管孔隙度}$$

扰动土壤样品经自然风干后,挑去枯枝落叶、根系和砾石,再将其磨碎,分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛。SOC 含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,N 采用凯氏定氮法测定,P 采用钼锑抗比色法测定^[21]。

利用有机碳与全氮(C:N)、有机碳与全磷(C:P)以及全氮与全磷之间的比值(N:P)表示土壤的化学计量特征;土壤有机碳储量(SOCS)、全氮储量(TNS)和全磷储量(TPS)根据下列公式计算^[22]:

$$\text{SOCS} = \text{SOC}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times 0.1$$

$$\text{TNS} = \text{TN}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times 0.1$$

$$\text{TPS} = \text{TP}_i \times \text{BD}_i \times D_i \times 0.1$$

式中:SOCS、TNS 和 TPS 分别为第 i 层土壤有机碳、全氮和全磷储量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), SOC_i 、 TN_i 和 TP_i 分别为第 i 层土壤有机碳、全氮和全磷含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), BD_i 为第 i 层土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), D_i 为第 i 层土层厚度(cm),0.1 为单位转换系数。

1.4 数据处理

采用 Excel 进行数据的整理与处理,运用 SPSS 26.0 对不同退化样地土壤孔隙、持水能力、SOC、N、P 及化学计量比进行单因素方差分析(One-way, ANOVA),运用多重比较法(LSD 法, $P=0.05$)对各指标的差异进行显著性检验。使用 R 语言进行皮尔逊相关性分析(Pearson correlation analysis)作图,使用 Canoco5 进行 Monte-Carlo 检验。

2 结果与分析

2.1 植被特征

随退化程度加剧,植被盖度、高度和生物量均呈下降趋势,且不同退化程度之间差异显著($P<0.05$)。

表 2 不同退化高寒草甸植被特征

Table 2 Vegetation characteristics of different degraded alpine meadows

退化程度 Degradation degree	盖度 Coverage/%	平均高度 Average height/cm	地上生物量 Aboveground biomass/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
未退化(ND)	95.00±1.94 ^a	13.51±1.46 ^a	542.53±33.14 ^a
轻度退化(LD)	83.67±2.78 ^b	7.47±0.30 ^b	453.18±48.33 ^b
中度退化(MD)	65.22±2.17 ^c	4.63±0.36 ^c	316.61±21.05 ^c
重度退化(SD)	43.22±1.71 ^d	2.93±0.69 ^d	189.91±10.88 ^d

注:表中数据均为平均值±标准差。不同小写字母表示不同退化程度之间差异显著($P<0.05$),下同

Note: Data in the table are mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences between different degrees of degradation ($P<0.05$), the same as below

2.2 土壤物理性质

不同土层土壤容重随着退化程度加剧均呈上升趋势(表 3),除 0~10, 20~30 cm 土层 LD 和 MD 样地外,其余样地土壤容重均随退化加剧而显著增加($P<0.05$);与 ND 样地相比,0~10, 10~20 和 20~30 cm 土层 SD 样地土壤容重分别增高了 54.79%, 44.44%, 35.05% ($P<0.05$)。非毛管孔隙度在 0~30 cm 土层随退化程度加剧呈先升高后降低的趋势,0~10 cm 土层 MD 最高,10~30 cm 土层 LD 样地显著高于 ND 和 SD 样地;0~10 cm 土层毛管孔隙度和总孔隙随退化程度加剧呈下降趋势,相较于 ND 样地,MD 和 SD 样地毛管孔隙度分别显著降低了 13.22% 和 17.1% ($P<0.05$),SD 样地总

孔隙显著降低了 15.77% ($P<0.05$);10~20 cm 土层毛管孔隙度与总孔隙度均在 LD 达到最高值并显著高于 ND 和 SD 样地($P<0.05$),而在 20~30 cm 土层变化均不显著。

土壤饱和持水量随土层的加深和退化程度的加剧均呈下降趋势(图 2A),且在 0~30 cm 土层均表现为 SD 样地显著低于 ND 样地($P<0.05$)。在 0~10, 20~30 cm 土层,与 ND 样地相比,LD, MD, SD 样地饱和持水量显著降低($P<0.05$),在 10~20 cm 土层中,MD、SD 样地显著降低($P<0.05$),而 LD 变化不显著。毛管持水量在 0~20 cm 土层随退化程度的加剧呈下降趋势(图 2B),在 20~30 cm 土层随退化程度的加剧呈先降低后升高的趋势,但总

体表现为 SD 样地显著低于 ND 样地($P<0.05$),田间持水量随土层的加深和退化程度的加剧均呈下降趋势(图 2C),0~10 cm 土层不同退化草地田间持水量均存在显著差异($P<0.05$)。

表 3 不同退化高寒草甸土壤容重和土壤孔隙

Table 3 Soil bulk weight and soil porosity in different degraded alpine meadows

土层深度 Soil depth/cm	退化程度 Degradation degree	土壤容重 Soil bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤孔隙度 Soil porosity/%		
			非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	总孔隙度 Total porosity
0~10	未退化(ND)	0.73 ± 0.07^c	4.80 ± 0.60^b	57.18 ± 6.53^a	61.97 ± 6.51^a
	轻度退化(LD)	0.87 ± 0.06^b	5.69 ± 0.66^{ab}	52.14 ± 5.83^{ab}	57.83 ± 6.16^{ab}
	中度退化(MD)	0.89 ± 0.07^b	6.49 ± 1.60^a	49.62 ± 6.06^b	56.11 ± 5.92^{ab}
	重度退化(SD)	1.13 ± 0.05^a	4.80 ± 0.64^b	47.40 ± 7.84^b	52.20 ± 8.32^b
10~20	未退化(ND)	0.90 ± 0.06^d	4.49 ± 0.32^b	48.78 ± 6.51^b	53.28 ± 6.50^b
	轻度退化(LD)	1.08 ± 0.06^c	5.53 ± 0.58^a	55.42 ± 6.52^a	60.96 ± 6.88^a
	中度退化(MD)	1.22 ± 0.07^b	5.00 ± 1.58^{ab}	50.37 ± 5.63^{ab}	55.37 ± 6.16^{ab}
	重度退化(SD)	1.30 ± 0.09^a	4.31 ± 1.08^b	45.88 ± 2.15^b	50.19 ± 3.21^b
20~30	未退化(ND)	0.97 ± 0.05^c	3.84 ± 0.19^{bc}	47.28 ± 4.34^a	51.12 ± 4.36^a
	轻度退化(LD)	1.19 ± 0.05^b	5.88 ± 0.96^a	47.37 ± 4.74^a	53.24 ± 4.46^a
	中度退化(MD)	1.24 ± 0.03^b	$5.12\pm2.0a^b$	47.81 ± 3.00^a	52.93 ± 4.46^a
	重度退化(SD)	1.31 ± 0.10^a	3.62 ± 1.64^c	51.89 ± 6.88^a	55.51 ± 6.84^a

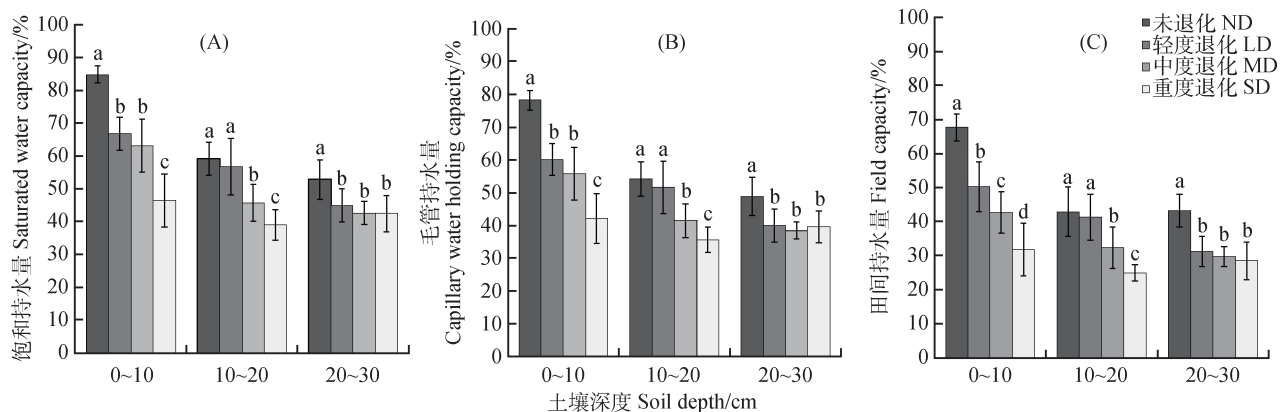


图 2 不同退化高寒草甸土壤持水能力

Fig. 2 Soil water holding capacity of different degraded alpine meadows

注:不同小写字母表示不同退化程度之间差异显著 ($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters represent significant difference between degradation degrees

2.3 土壤 SOC、N、P 及化学计量比

SOC、N、P 均随土层的加深和退化程度的加剧呈下降趋势(表 4)。0~30 cm 与 ND 样地相比 LD, MD, SD 样地土壤 SOC 分别下降了 14.5%, 40.28%, 50.45%; 土壤 N 分别下降了 10.21%, 33.27%, 42.16%; P 分别降低了 0.69%, 13.77%, 18.21%, 可以看出 SOC 对退化程度的响应最大。C:N 随退化程度加剧在 0~10 cm 土层 LD 达到最大值 17.6%, 且显著高于 MD 和 SD ($P<0.05$), 在 10~20 cm 土层随退化程度加剧呈下降趋势, 变化不显著; C:P 在 0~30 cm 土层随退化程度加剧而降低, 其中在 0~10 cm 变化显著 ($P<0.05$), 与未 ND 样地相比分别显著降低了 17.87%, 48.82%,

83.9% ($P<0.05$); N:P 在 0~10 cm 土层随退化程度加剧而降低, ND 显著高于其它退化样地 ($P<0.05$), 在 10~30 cm 呈先升高后降低趋势, 在 LD 达到最高值。

由表 5 可知, SOCS、TNS 在不同退化程度均随土层加深而降低, 同时在表层土壤表现出随退化程度加剧呈下降趋势, 在 10~30 cm 先升高后降低, 在轻度退化达到最大值且与中度和重度退化差异显著 ($P<0.05$), 总储量最大值分别为 134.36 和 $9.09\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; TPS 在不同土层变化趋势不一致, 在 0~10 和 20~30 cm 土层随退化程度加剧呈“N”字型变化, 而在 10~20 cm 土层呈上升趋势且变化不显著。

表 4 不同退化高寒草甸 SOC、N、P 含量及其化学计量比

Table 4 SOC, N and P contents and their stoichiometric ratios in different degraded alpine meadows

土层深度 Soil depth/cm	退化程度 Degradation degree	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	C:N	C:P	N:P
0~10	未退化(ND)	72.15±5.62 ^a	4.31±0.74 ^a	0.85±0.13 ^a	17.02±1.94 ^a	85.69±11.24 ^a	5.08±0.75 ^a
	轻度退(LD)	60.24±1.47 ^b	3.56±0.44 ^b	0.84±0.10 ^a	17.16±2.11 ^a	72.26±8.87 ^b	4.25±0.59 ^b
	中度退化(MD)	43.59±2.48 ^c	2.79±0.75 ^c	0.77±0.10 ^{ab}	16.34±3.18 ^{ab}	57.66±7.14 ^c	3.63±0.68 ^{bc}
	重度退化(SD)	32.17±2.70 ^d	2.35±0.40 ^c	0.70±0.08 ^b	14.20±3.48 ^b	46.63±6.78 ^d	3.39±0.61 ^c
10~20	未退化(ND)	46.07±5.13 ^a	3.05±0.47 ^a	0.85±0.15 ^a	15.41±2.94 ^a	55.50±11.50 ^a	3.65±0.64 ^a
	轻度退(LD)	39.11±8.62 ^b	2.95±0.25 ^a	0.75±0.13 ^{ab}	13.34±3.17 ^a	53.78±15.18 ^a	4.10±0.96 ^a
	中度退化(MD)	26.64±1.80 ^c	2.09±0.48 ^b	0.71±0.14 ^b	13.28±2.89 ^a	38.28±6.21 ^b	2.92±0.31 ^b
	重度退化(SD)	24.52±3.83 ^c	1.89±0.24 ^b	0.68±0.07 ^b	13.06±2.15 ^a	36.32±6.56 ^b	2.80±0.37 ^b
20~30	未退化(ND)	36.79±5.43 ^a	2.53±0.48 ^a	0.77±0.10 ^a	14.87±2.90 ^a	48.11±9.01 ^a	3.27±0.41 ^a
	轻度退(LD)	33.22±5.97 ^a	2.37±0.35 ^a	0.71±0.09 ^{ab}	14.26±3.23 ^a	46.71±8.13 ^a	3.37±0.62 ^a
	中度退化(MD)	22.36±3.47 ^b	1.72±0.16 ^b	0.65±0.08 ^b	13.16±2.63 ^a	34.74±7.44 ^b	2.67±0.46 ^b
	重度退化(SD)	20.08±3.20 ^b	1.48±0.28 ^b	0.63±0.06 ^c	13.74±1.63 ^a	32.12±5.22 ^b	2.37±0.44 ^b

表 5 不同退化高寒草甸 SOC、N、P 储量

Table 5 Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks in different degraded alpine meadows

指标 Indicator	土层深度 Soil depth/cm	退化程度 Degradation degree			
		未退化(ND)	轻度退化(LD)	中度退化(MD)	重度退化(SD)
有机碳储量 Organic carbon Storage/(t·hm ⁻²)	0~10	52.87±8.09 ^a	52.16±4.16 ^a	38.84±2.50 ^b	36.28±3.76 ^b
	10~20	41.35±4.77 ^a	42.60±10.77 ^a	32.41±3.34 ^b	31.69±4.91 ^b
	20~30	35.79±6.03 ^a	39.60±7.84 ^a	27.82±4.57 ^b	26.35±4.74 ^b
	0~30	130.01±17.02 ^a	134.36±21.57 ^a	99.07±6.29 ^b	94.32±12.72 ^b
全氮储量 Total nitrogen storage/(t·hm ⁻²)	0~10	3.15±0.63 ^a	3.07±0.41 ^a	2.47±0.57 ^b	2.64±0.42 ^{ab}
	10~20	2.75±0.48 ^b	3.19±0.33 ^a	2.52±0.53 ^b	2.43±0.14 ^b
	20~30	2.46±0.48 ^b	2.83±0.46 ^a	2.13±0.17 ^{bc}	1.93±0.35 ^c
	0~30	8.35±1.17 ^a	9.09±0.88 ^a	7.13±1.11 ^b	7.00±0.41 ^b
全磷储量 Total phosphorus storage/(t·hm ⁻²)	0~10	0.63±0.13 ^c	0.73±0.10 ^{ab}	0.68±0.07 ^{bc}	0.78±0.08 ^a
	10~20	0.77±0.14 ^a	0.81±0.17 ^a	0.86±0.14 ^a	0.88±0.10 ^a
	20~30	0.75±0.11 ^a	0.85±0.10 ^a	0.81±0.11 ^a	0.82±0.10 ^a
	0~30	2.14±0.37 ^b	2.39±0.35 ^{ab}	2.36±0.26 ^{ab}	2.49±0.26 ^a

2.4 土壤持水能力与植被和土壤化学计量特征之间的关系

相关分析表明(图 3),土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量之间呈极显著正相关关系,其相关系数大于 0.95,且均与植被盖度、生物量、高度、毛管孔隙度、总孔隙、SOC、N、P、C:P、N:P、SOC:S、TNS 呈极显著正相关关系($P<0.01$);与土壤容重呈极显著负相关关系($P<0.01$),与 TPS 显著负相关($P<0.05$),而非毛管孔隙和 C:N 相关关系不显著。

Monte-Carlo 检验表明(表 6),不同指标对土壤持水能力重要性不同,土壤容重对持水能力解释度最高(81.8%);且土壤毛管孔隙、总孔隙、SOC、TP 对土壤持水能力影响达到极显著($P<0.01$),植被盖度、C:P 和 TN 对土壤持水能力影响达到显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 退化对植被特征、土壤物理性质及持水量的影响

草地植被特征可以全面反映草地生态系统的健康状况、生产力和稳定性^[23],草甸退化对植被盖度、高度和生物量具有显著影响。土壤容重和土壤孔隙度是反映土壤物理性状的重要指标,土壤容重越小,土壤孔隙度越大;反之,土壤容重越大,土壤孔隙度越小^[3]。本研究也发现,随着退化程度加剧,深层土壤容重升高而毛管孔隙度和总孔隙降低。这主要是因为过度放牧家畜的踩踏以及退化后高寒草甸地下根系减少,使土壤紧实度增加,孔隙度降低,进而使土壤通透性变差土壤容重增加^[24]。

本研究结果也表明土壤饱和持水量、田间持水

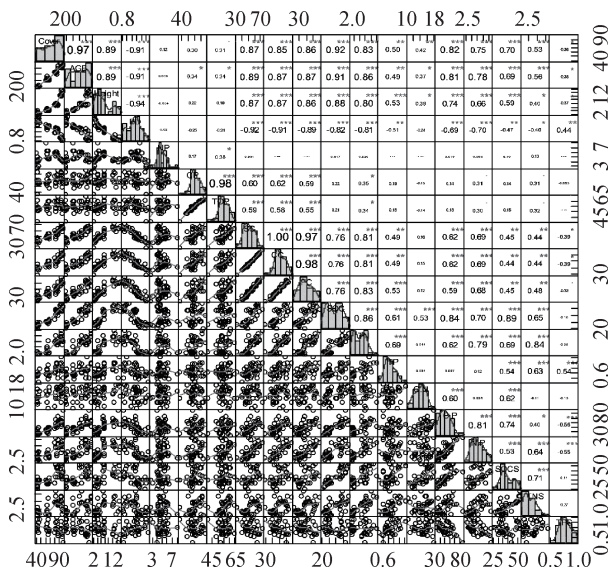


图 3 土壤持水能力及化学计量特征相关分析

Fig. 3 Correlation analysis of soil water holding capacity and stoichiometric characteristics

注: Cover, 盖度; AGB, 地上生物量; Height, 高度; BD, 土壤容重; NP, 非毛管孔隙度; SC, 饱和持水量; CP, 毛管孔隙度; CC, 毛管持水量; TOP, 总孔隙度; FC, 田间持水量; SOC, 土壤有机碳; TN, 全氮; TP, 全磷; C:N、C:P、N:P 分别表示碳氮比、碳磷比和氮磷比; SOCS、TNS 和 TPS 分别为土壤有机碳、全氮和全磷储量; *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

Note: Cover, Coverage; AGB, Above-ground biomass; Height; BD, Soil bulk density; NP, Non-capillary porosity; SC, Saturated water holding capacity; CP, Capillary porosity; CC, Capillary Water holding capacity; TOP, Total porosity; FC, Field holding capacity; SOC, Soil organic carbon; TN, Total nitrogen; TP, Total phosphorus; C:N, C:P, and N:P denote the carbon to nitrogen, carbon to phosphorus, and nitrogen to phosphorus ratios, respectively; SOCS, TNS, and TPS are soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus stocks, respectively; *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

量、毛管持水量均随土层加深和退化程度的加剧而降低且在表层变化最显著,与王紫薇等^[25-26]的研究结果类似。随着退化程度的加剧,高寒草甸植被盖度、草地生物量逐步降低,土壤中有有机质及腐殖质等含量逐渐减少造成土壤贫瘠^[27],在这些因素共同作用下,土壤紧实度增加,土壤中可供水分保持的空间减少,从而使得土壤的持水能力下降;另外,高寒草甸植物根系主要集中在表层^[28],所以草地退化对表层土壤持水能力影响更大。

3.2 草地退化对 SOC, N, P 及其化学计量比的影响

本研究中, SOC, N, P 含量均随土层的加深和退化程度的加剧呈下降趋势,这与余延娣等^[29-30]的

表 6 植被特征、土壤理化性质对土壤持水能力的蒙特卡罗检验

Table 6 Monte Carlo test of vegetation characteristics and soil physical and chemical properties on soil water holding capacity

指标 Indicator	解释量 Explains/%	贡献度 Contribution/%	F 值 F value	P 值 P value
BD	81.8	82.2	153	0.002
CP	15.3	15.4	175	0.002
TOP	0.6	0.6	9	0.002
SOC	0.4	0.4	9.2	0.004
TP	0.2	0.2	7.4	0.006
Coverage	0.3	0.3	4.5	0.034
C:P	0.2	0.2	3.6	0.046
TN	0.1	0.1	3.4	0.046
TPS	<0.1	<0.1	2.6	0.092
TNS	<0.1	<0.1	2.4	0.106
C:N	0.1	0.1	1.9	0.154
Height	<0.1	<0.1	1.7	0.214
SOCS	<0.1	<0.1	1.5	0.23
AGB	<0.1	<0.1	0.8	0.448
N:P	<0.1	<0.1	0.3	0.72

研究结果一致。土壤养分主要来源于植物凋落物和根系的分解,而草地退化后,草地生物量降低导致植被枯落物相应减少,同时家畜的过度啃食将植物根系拔出土壤^[31],使得地上地下土壤养分的输入来源不断下降,进而土壤养分降低;此外,较高的土壤温度增强了土壤的呼吸作用,促进了土壤微生物分解土壤全量养分,进而加快了土壤养分的损失^[32]。本研究还发现 N 含量对退化程度的响应大于 P 含量,这与杨军等^[33-34]研究结果一致,可能是土壤中有 95% 的 N 含量来源于 SOC,而草地退化后 SOC 含量的下降进一步减少了土壤 N 含量的来源^[35]。

C:N 是土壤 N 矿化能力的重要指标,也反映微生物分解有机质的速率,一般来说, C:N 小于 25 时土壤微生物活力增强,土壤有机质的分解矿化速度加快^[5]。本研究 C:N 随退化程度加剧在表层土壤先上升后下降,在 10~20 cm 呈下降趋势,变化不显著且均小于 25。表明草地退化加快了有机质的分解、增强了氮的矿化。C:N 在表层土壤先上升可能是初期有机质分解速率高于氮矿化速率导致碳相对富集,后期则因碳流失加快促使 C:N 下降^[36]。相关研究表明,较低的 C:P 则意味着较低的 P 有效性^[37],本研究发现 C:P 在 0~30 cm 土层均随退化程度加剧而降低,表明草地退化后 P 的有效性降低,这也可能导致严重退化阶段植物倾向于受 P 限制。

土壤N:P是评估N限制作用的重要指标,并用于确定养分限制的阈值^[5]。Güsewell等^[8]指出,当土壤N:P小于10时,植物的生长发育受到N限制。本研究样地N:P均小于10,说明甘南高寒草甸退化后植物生长受N限制。同时10~30 cm土层轻度退化样地N:P高于其它样地,表明轻度退化有利于土壤N含量的积累。本研究还发现C:N、N:P和C:P均随土层加深而降低,这是因为P主要来源于矿物风化,不同深度土层P含量接近,而C、N含量由于地表枯落物的分解和沉降主要集中在表层土壤^[38],因此0~10 cm表层土壤C:N、C:P和N:P高于20~30 cm土层。

土壤C、N、P储量主要受C、N、P含量和土壤容重的影响,还与土壤结构、质地等物理性质密切相关^[39]。本研究表明草地退化后表层土壤C、N储量降低,这是由于草地退化后,土壤孔隙度降低、容重增加且土壤C、N含量下降,从而使土壤碳氮储量降低。同时,土壤碳氮储量在垂直方向上呈现下降趋势,与任玉连等^[40]研究结果一致。因为表层土壤能直接接收植物残体、凋落物和根系生长代谢输入的有机碳与氮,而随着土壤深度的增加,植物根系减少、根生物量降低,土壤养分来源降低^[39],因此表层土壤C、N储量高于深层土壤。土壤TPS在不同退化程度草地变化趋势不一致且不显著,这可能与P主要来自岩石的风化作用而不是有机物分解有关^[41]。

3.3 土壤持水能力与植被和化学计量特征之间的关系

Pearson相关分析表明土壤饱和含水量、田间持水量、毛管持水量与植被盖度、生物量、毛管孔隙度和总孔隙均极显著正相关,且Monte-Carlo检验指出土壤孔隙和植被盖度对土壤持水能力具有显著影响。因为高植被盖度能够有效减少地表径流和土壤水分蒸发^[42],且生物量越高通常意味着植被根系更为发达,有助于增加地下孔隙,提高土壤透气性;此外毛管孔隙主要储存可利用水,能够提供稳定的水分供应,且土壤总孔隙度越高,有利于水分的渗透与滞留,能够减少水分流失^[43]。而相关分析表明土壤饱和含水量、田间持水量、毛管持水量与土壤容重呈极显著负相关关系,且Monte-Carlo检验表明土壤容重对持水能力解释度最高,这与孙玉等^[9]研究结果一致。因为土壤容重的增加通常意味着土壤结构更加紧实,孔隙度减小,从而减

少了土壤对水分的吸附和保持能力;而土壤容重较小时,土壤相对比较疏松,具有较大的毛管孔隙度,土壤持水能力较强^[44]。

同时,相关分析表明土壤饱和含水量、田间持水量、毛管持水量与土壤SOC、N、P、N:P、C:P、SOCS、TNS呈极显著正相关关系($P<0.01$),与TPS呈显著负相关关系($P<0.05$),由此可见,土壤持水能力与土壤SOC、N、P及化学计量特征关系密切。Monte-Carlo检验表明SOC、TN、TP、C:P显著影响土壤持水能力,主要在于土壤有机碳是一种胶结物质,可以吸收并保持大量的水分,同时有机碳通过与矿物质颗粒结合促进土壤团聚体的形成,能够改善土壤的结构和根系生长环境,增强土壤的缓冲性能及水分的吸附能力^[45],进而提高土壤持水能力;N含量也能够促进土壤团聚体的形成,缓解土壤有机质分解^[46],提高水分保持能力;P有助于植物根系发育,发达的根系能够改善土壤结构,增加土壤孔隙度,从而提高持水能力^[47]。C:P对土壤持水能力影响显著主要是土壤有机碳及磷的双重作用,如高C:P比则意味着磷元素相对匮乏,这会抑制微生物活性,进一步减缓有机质的分解过程,从而促进有机质在土壤中的积累^[48];N:P虽然对土壤持水能力影响不显著,但其之间也存在极显著相关关系。本研究P本身对土壤持水能力有一定积极作用,但TPS却与持水能力呈显著负相关关系,可能是由于P在土壤中的存在形式及其对土壤结构的影响;以磷酸盐的形式存在的P可能会与土壤中的其他矿物质结合,导致土壤结构变得紧实^[47],从而降低持水能力。

4 结论

土壤持水能力与植被盖度、生物量、高度、毛管孔隙度、总孔隙、SOC、N、P、C:P、N:P、SOCS、TNS极显著正相关,与土壤容重极显著负相关。Monte-Carlo检验进一步表明土壤容重、毛管孔隙、总孔隙、盖度、C:P和TN、SOC和TP均显著影响土壤持水能力。可见,草地退化过程中,土壤持水能力与植被特征、土壤养分及化学计量特征之间联系紧密。因此,在高寒草甸生态修复和管理中,需统筹植被特征、土壤养分与持水能力的相互作用,采用合理的植被管理和土壤改良措施,促进退化草甸的生态恢复。

参考文献

- [1] 张宇恒,张莉,张秀娟,等. 退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(2): 235-246
ZHANG Y H, ZHANG L, ZHANG X J, et al. Effects of degradation degree on plant communities and soil water holding capacity of Maqin alpine meadow[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(2): 235-246
- [2] 李令,贺慧丹,未亚西,等. 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳持水能力对退耕还草措施的响应[J]. 草业科学, 2017, 34(10): 1999-2008
LI L, HE H D, WEI Y X, et al. Response of vegetation community structure, soil carbon sequestration, and water-holding capacity in returning farmland to grassland plots, in the agro-pastoral transitional zone in the Three Rivers Source Region[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 1999-2008
- [3] ZENG C, ZHANG F, WANG Q J, et al. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2013, 478: 148-156
- [4] PAN T, HOU S, LIU Y J, et al. Influence of degradation on soil water availability in an alpine swamp meadow on the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. Science of The Total Environment, 2020, 722: 137677
- [5] 阿的哈则,常涛,秦瑞敏,等. 人工草地土壤碳氮磷含量变化及化学计量特征研究[J]. 草地学报, 2024, 32(3): 827-837
A D, CHANG T, QIN R M, et al. Changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus content and stoichiometric characteristics of artificial grassland soils[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(3): 827-837
- [6] HE H D, LI H Q, ZHU J B, et al. The asymptotic response of soil water holding capacity along restoration duration of artificial grasslands from degraded alpine meadows in the Three River Sources, Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Ecological Research, 2018, 33(5): 1001-1010
- [7] 聂志刚,吴江琪,马维伟,等. 甘南杂海湿地不同退化程度植物碳、氮、磷的化学计量特征及动态变化[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 386-392
NIE Z G, WU J Q, MA W W, et al. Stoichiometric characteristics and dynamics of plant carbon, nitrogen and phosphorus in differently degraded Gannan Hai wetland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 386-392
- [8] GÜSEWELL S, KOERSELMAN W, VERHOEVEN J T A. Biomass n: p ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands[J]. Ecological Applications, 2003, 13(2): 372-384
- [9] 孙玉,杨永胜,何琦,等. 三江源高寒草甸水源涵养功能及土壤理化性质对退化程度的响应[J]. 草业学报, 2023, 32(6): 16-29
SUN Y, YANG Y S, HE Q, et al. Responses of soil water conservation function and soil physicochemical properties to a range of degradation conditions in alpine meadows of the Three River Headwater Region[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2023, 32(6): 16-29
- [10] 杨永胜,张莉,未亚西,等. 退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响[J]. 中国草地学报, 2017, 39(5): 54-61
YANG Y S, ZHANG L, WEI Y X, et al. Effects of degradation degree on soil physicochemical properties and soil water-holding capacity in Zeku alpine meadow in the headwater region of three rivers in China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(5): 54-61
- [11] PAN T, HOU S, WU S H, et al. Variation of soil hydraulic properties with alpine grassland degradation in the eastern Tibetan Plateau[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(4): 2249-2261
- [12] 其曼古丽·帕拉提,刘丹,毛军,等. 不同退化程度高寒草地土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2024, 43(6): 1612-1620
QIMANGULI·PALATI, LIU D, MAO J, et al. Contents and eco-stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in alpine grasslands with different degradation degrees[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(6): 1612-1620
- [13] WANG Y, REN Z, MA P P, et al. Effects of grassland degradation on ecological stoichiometry of soil ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137910
- [14] 马源,李林芝,张德罡,等. 高寒草甸根际土壤化学计量特征对草地退化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3039-3048
MA Y, LI L Z, ZHANG D G, et al. Responses of stoichiometric characteristics of rhizosphere soil to the degradation of alpine meadow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 3039-3048
- [15] 马琳雅,崔霞,冯琦胜,等. 2001—2011年甘南草地植被覆盖度动态变化分析[J]. 草业学报, 2014, 23(4): 1-9
MA L Y, CUI X, FENG Q S, et al. Dynamic changes of grassland vegetation coverage from 2001 to 2011 in Gannan Prefecture[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2014, 23(4): 1-9
- [16] 张晓宁,李晓丹,年丽丽,等. 基于文献计量的草地生态系统水源涵养功能研究现状[J]. 草业学报, 2022, 31(6): 35-49
ZHANG X N, LI X D, NIAN L L, et al. A bibliometric evaluation of the status of the water conservation function of grassland ecosystems[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2022, 31(6): 35-49
- [17] 张起鹏,王建,吕飞. 合作市高寒草甸空间分布规律研究[J]. 中国草地学报, 2021, 43(5): 90-96, 114
ZHANG Q P, WANG J, LV F. Study of spatial distribution of alpine meadow in Hezuo City[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(5): 90-96, 114
- [18] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京:中国农业出版社, 1998: 122-136

- [19] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978:380-511
Soil Physics Laboratory, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Methods for Determining Soil Physical Properties [M]. Beijing: Science Press, 1978: 380-511
- [20] 李强,何国兴,刘志刚,等. 东祁连山高寒草甸土壤“固-液-气”三相组成对海拔和坡向的响应[J]. 水土保持学报,2022,36(3):195-200,206
LI Q, HE G X, LIU Z G, et al. Response of three-phase composition of soil “solid-liquid-gas” to altitude and slope aspects in alpine meadow of the eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 195-200, 206
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000:25-106
BAO S D. Soil Agricultural Analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-106
- [22] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4):345-360
- [23] TILMAN D, WEDIN D, KNOPS J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. Nature, 1996, 379(6567):718-720
- [24] 王明慧,黄来明,陈翠柏. 西藏高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力差异及其影响因素[J]. 应用生态学报,2022,33(12):3287-3293
WANG M H, HUANG L M, CHEN C B. Difference in soil water holding capacity and the influencing factors under different land use types in the alpine region of Tibet, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3287-3293
- [25] 王紫薇,黄来明,邵明安,等. 青海高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力及影响因素[J]. 干旱区研究,2021,38(6):1722-1730
WANG Z W, HUANG L M, SHAO M A, et al. Soil water holding capacity under different land use patterns in the Qinghai alpine region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1722-1730
- [26] 徐翠,张林波,杜加强,等. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[J]. 生态学报,2013,33(8):2388-2399
XU C, ZHANG L B, DU J Q, et al. Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2388-2399
- [27] 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
- [28] 房昊天,翁白莎,常文娟,等. 高寒草甸根系分布特征及与土壤温湿度关系的研究[J]. 草地学报,2022,30(3):612-621
FANG H T, WENG B S, CHANG W J, et al. Characteristics of root distribution in alpine meadows and the relationship with soil temperature and moisture[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3):612-621
- [29] 余延娣,杨晓渊,马丽,等. 退化高寒草甸植物群落和土壤特征及其相互关系研究[J]. 草地学报,2021,29(S1):62-71
SHE Y D, YANG X Y, MA L, et al. Study on relationship between plant community degradation and soil environment in an alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(S1): 62-71
- [30] 李晴婉,古晋锴,李庆琳,等. 西藏退化草地植被和土壤特征及其关系[J]. 环境科学,2024,45(9):5341-5350
LI Q W, GU J K, LI Q L, et al. Characteristics of vegetation and soil of degraded grasslands and their relationships in Xizang [J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5341-5350
- [31] 周丽,张德罡,负旭江,等. 退化高寒草甸植被与土壤特征[J]. 草业科学,2016,33(11):2196-2201
ZHOU L, ZHANG D G, YUN X J, et al. The vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadow[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(11): 2196-2201
- [32] LIU S B, ZAMANIAN K, SCHLEUSS P M, et al. Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 252:93-104
- [33] 杨军,刘秋蓉,王向涛. 青藏高原高山嵩草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分[J]. 应用生态学报,2020,31(12):4067-4072
YANG J, LIU Q R, WANG X T. Plant community and soil nutrient of alpine meadow in different degradation stages on the Tibetan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4067-4072
- [34] 彭艳,孙晶远,马素洁,等. 藏北不同退化阶段高寒草甸植物群落特征与土壤养分特性[J]. 草业学报,2022,31(8):49-60
PENG Y, SUN J Y, MA S J, et al. Plant community composition and soil nutrient status of degraded alpine meadow sites in Northern Tibet[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2022, 31(8): 49-60
- [35] 王玉琴,尹亚丽,李世雄. 不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析[J]. 生态环境学报,2019,28(6):1108-1116
WANG Y Q, YIN Y L, LI S X. Physicochemical properties and enzymatic activities of alpine meadow at different degradation degrees[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(6): 1108-1116
- [36] YANG S, LIU W X, GUO L L, et al. The changes in plant and soil C pools and their C: N stoichiometry control grassland N retention under elevated N inputs[J]. Ecological Applications, 2022, 32(2):e2517
- [37] ZHANG W J, XUE X, PENG F, et al. Meta-analysis of the effects of grassland degradation on plant and soil properties in the alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 20:e00774
- [38] 赵雯,黄来明. 高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素[J]. 生态学报,2022,42(11):4415-4427
ZHAO W, HUANG L M. Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4415-4427

- [39] 何高迅,王越,彭淑娟,等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. 生态学报,2020,40(13):4425-4435
- HE G X, WANG Y, PENG S X, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13):4425-4435
- [40] 任玉连,陆梅,曹乾斌,等. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征[J]. 北京林业大学学报,2019,41(11):104-115
- REN Y L, LU M, CAO Q B, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen stocks across the different typical vegetation types in Nangunhe National Nature Reserve, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11):104-115
- [41] G, ZHANG Z, SHI L L, et al. Effects of different grazing intensities on soil C, N, and P in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11):2584
- [42] 王一博,王根绪,吴青柏,等. 植被退化对高寒土壤水文特征的影响[J]. 冰川冻土,2010,32(5):989-998
- WANG Y B, WANG G X, WU Q B, et al. The impact of vegetation degeneration on hydrology features of alpine soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5):989-998
- [43] LUO S M, ZHOU B C, LIKOS W J, et al. Determining capillary pore - size distribution of soil from soil-water retention curve[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(2):04023138
- [44] 黄倩,丁明军,陈利文,等. 三江源区不同退化程度高寒草甸表土层的土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报,2022,36(1):189-195
- HUANG Q, DING M J, CHEN L W, et al. Variations of moisture in surface soil of alpine meadow with different degradation degrees in the three-river source region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1):189-195
- [45] BATISTA E M C C, SHULTZ J, MATOS T T S, et al. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome [J]. Scientific Reports, 2018, 8:10677
- [46] RIGGS C E, HOBIE S E, BACH E M, et al. Nitrogen addition changes grassland soil organic matter decomposition [J]. Biogeochemistry, 2015, 125(2):203-219
- [47] 冶康康,俄胜哲,陈政宇,等. 土壤中磷的存在形态及分级方法研究进展[J]. 中国农学通报,2023,39(1):96-102
- YE G K, E S Z, CHEN Z Y, et al. The forms and classification methods of phosphorus in soil: research progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(1):96-102
- [48] YANG Y, LIU H, YANG X, et al. Plant and soil elemental C : N : P ratios are linked to soil microbial diversity during grassland restoration on the Loess Plateau, China [J]. Science of The Total Environment, 2022, 806:150557

(责任编辑 彭露茜)