

DOI: 10.5846/stxb202204040859

李雪萍, 许世洋, 李敏权, 王建喜, 郭致杰, 漆永红, 荆卓琼, 李建军, 谢志军. 甘南州不同退化程度高寒草甸植被及土壤特性的演化规律. 生态学报, 2022, 42(18): 7541-7552.

Li X P, Xu S Y, Li M Q, Wang J X, Guo Z J, Qi Y H, Jing Z Q, Li J J, Xie Z J. Evolution regularity of degraded alpine meadow vegetation and soil characteristics at different degrees in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7541-7552.

甘南州不同退化程度高寒草甸植被及土壤特性的演化规律

李雪萍¹, 许世洋², 李敏权¹, 王建喜², 郭致杰¹, 漆永红¹, 荆卓琼¹, 李建军¹, 谢志军^{3,*}

1 甘肃省农业科学院植物保护研究所, 兰州 730070

2 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070

3 甘肃省农业科学院畜牧与绿色农业研究所, 兰州 730070

摘要:为明确甘南州退化高寒草甸植被及土壤特性的演化规律,本研究以甘南藏族自治州碌曲县、夏河县和合作市不同退化程度高寒草甸为研究对象,调查其植被特征并采集土壤样品,测定土壤理化性质、酶活性及微生物数量。结果表明,随退化程度加深,莎草科、蔷薇科和毛茛科等科属杂草逐渐代替禾本科优质牧草优势位,植被高度、盖度、草产量、多样性指数降低,重度退化草地较轻度退化草地草产量降低了约 2000 kg/hm²;土壤理化性质全氮、全磷、全钾、孔隙度、粉粒含量下降,pH 值、全盐、容重及黏粒含量升高,由轻度至重度退化草地土壤全磷含量下降了 0.67 g/kg,土壤全钾含量下降 0.62 g/kg;土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性降低,蔗糖酶活性由轻度至重度退化草地降幅最大,可达 0.45 mg/g/24h;土壤细菌和放线菌数量降低,真菌数量增加,重度退化草地较轻度而言细菌数量降低约 5×10⁶ cfu/g,放线菌降低约 5×10⁵ cfu/g,真菌增加约 2×10³ cfu/g;相关性分析发现各因子与退化程度的相关性性强,相关系数在 0.92 以上,多为 0.99 甚至 1。因此,甘南州高寒草甸随退化程度加深,总体呈现出草地优势种消失,植被高度、盖度、草产量、多样性下降,土壤养分及活性降低,并呈现向盐碱化、荒漠化演替的趋势。本研究为甘南州高寒草甸生态系统退化预测、管理、恢复等方案的制定提供理论依据。

关键词:高寒草甸;草地退化;土壤理化性质;土壤酶活性;土壤微生物

Evolution regularity of degraded alpine meadow vegetation and soil characteristics at different degrees in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture

LI Xueping¹, XU Shiyang², LI Minquan¹, WANG Jianxi², GUO Zhijie¹, QI Yonghong¹, JING Zhuoqiong¹, LI Jianjun¹, XIE Zhijun^{3,*}

1 Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China

2 College of Prataculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

3 Institute of Pasture and Green Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China

Abstract: The alpine meadow on Qinghai Tibet Plateau is an important component of alpine meadow ecosystem and grassland agroecosystem in the world, in which Gannan Prefecture alpine meadow plays a critical role in biodiversity conservation, ecosystems sustainable development, regulating the global climate and the carbon cycle process. But the degradation trend of it now is becoming severer and severer, 18.08% of its total grassland acreage is in danger and

基金项目:甘肃省林业和草原局甘肃省草原监测评价科技支撑项目(GSZYTC-ZCTC-21009);甘肃省重点研发计划(20YF3NA021);兰州市科技计划项目(2021-1-174)

收稿日期:2022-04-04; 采用日期:2022-06-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 109760028@qq.com

continuous deteriorate. As a result, retrograde succession occurs and brings about a serious threat to the world ecological security, while there are few studies about the evolution process, especially in the synthesis of multi-ecological factors, and few refer to the managing role of microbiome. Furthermore, amount researches showed the complexes of vegetation, soil and microorganism is critical to study the evolution regular of the degraded alpine meadow. Therefore, there were 3 aspects for the investigation and analysis according to the principle, and all samples were collected from the alpine meadow with different degradation degrees, light, moderate and severe degrees, in Luqu County, Xiahe County and Hezuo City respectively. The vegetation characteristics were analyzed, and the soil samples were collected for determining soil physiochemical properties, enzyme activity and microbial quantity. The result showed that with the deepening of degradation, the vegetation height, coverage, grass yield, and diversity indexes decreased, while the poisonous weeds such as Cyperaceae, Rosaceae and Ranunculaceae gradually replaced the dominant position of high-quality forages of Gramineae, and the grass yield of severely degraded grassland decreased almost 2000 kg/hm² by comparing with the lightly degraded grassland, which signify the alpine meadow weakening feasibility for grazing. The physicochemical properties of soil changed greatly, the dominant components of soil nutrients and soil enzymes served for the circulation of matter and flow of energy in the system, as well as the particles related to the sub-composition of soil structure changed in different ways. The soil total phosphorus, total potassium, porosity and silt generally decreased, while soil pH value, total salt, bulk density and clay showed an opposite direction. The soil total phosphorus and total potassium content decreased by 0.67 g/kg, 0.62 g/kg, respectively, when the degradation degree from light to severe. For the soil enzyme activities, soil urease activity, sucrase activity, alkaline phosphatase activity dropped, the decrease of sucrase activity from light to severe degradation degree was the largest, up to 0.45 mg/g/24h. The changing ways of soil physiochemical properties, enzyme activity could be concluded that the soil degradation was becoming more and more serious. Soil microorganisms were the most diverse community in the biosphere and the transition of their existence state was an indispensable driving force of biogeochemical cycle. The number of bacteria in soil microbial composition was the largest but its amount dropped significantly. The actinomycetes were also with the same trend along the degradation process, however, the number of fungi increased continuously. The number of bacteria, actinomycetes and fungi decreased by 5×10^6 cfu/g, 5×10^5 cfu/g and 2×10^3 cfu/g, respectively, with the degradation trend from light to severe degree. Correlation analysis showed that each factor had a strong correlation with the degradation degree, and the correlation coefficient was above 0.92, most of which were 0.99 or even 1. Generally, with the deepening of degradation, the dominant grassland species disappeared, vegetation height, coverage, grass yield and diversity decreased, soil nutrients and activity decreased, and showed a trend of salinization and desertification. This study provides a theoretical support for the formulation of the prediction, management and restoration schemes of the alpine meadow ecosystem degradation in Gannan.

Key Words: alpine meadow; grassland degradation; soil physicochemical characteristics; soil enzyme activity; soil microorganism

青藏高原高寒草甸是世界高寒草甸和草地生态系统的重要有机组成,在生物多样性保护、生态系统可持续发展、全球气候调节和碳循环等过程中功不可没,仅东南部高寒草甸面积占全球 48% 以上^[1-2]。地处青藏高原东部地区的甘南州高寒草甸物种资源种类及数量多、生产潜力大,是我国重要的畜牧业生产基地^[3-4]。然而,随社会经济发展、人类活动和全球气候变暖等因素影响,草地发生逆行演替,草地“三化”、生物基因库锐减、水土流失、生产力下降等问题相继涌现,“生态屏障”、“生态服务”等功能衰退严重,甘南州 18.08% 草地仍呈持续性的恶化趋势^[5-7]。

草地生态系统功能依赖于地上和地下生物群落之间的相互关系,在高寒草甸长期自然演替、地质及生物活动进程中,“植被-土壤-微生物”这一自然历史复合体是贯穿高寒草甸生态系统的一条主线,三者间不断地

相互作用和反馈机制是研究草地退化规律的重要依据^[8-10]。高寒草甸植被状况直接反映了其演替方向和进程,是表征气候、土壤肥力等生态因子波动重要指标^[11-12]。研究发现,高寒草甸退化过程中草毡层逐渐剥离形成斑块^[13],草地覆盖度、生物量、多样性下降,杂草类植被增多^[14],优势种呈现出由禾草向杂草演化的趋势^[15]。同时,对土壤生物多样性及功能产生负面影响^[16],包括土壤结构、理化性质、土壤养分、土壤酶活性和土壤微生物数量等均发生显著改变^[17-19]。针对甘南不同退化程度高寒草甸植被及土壤特性的演化规律,王小燕等^[20]从季节尺度上对甘南州“黑土滩”型退化草甸研究发现,草地退化引起土壤脲酶活性降低,土壤速效磷、速效钾含量和碱性磷酸酶活性增加。姚宝辉等^[21]对甘南州碌曲县高寒草甸进行研究发现,随退化程度加剧,土壤 pH 值增大,全氮和全磷含量降低。以及本课题组^[22]对甘南州碌曲县高寒草地研究发现,随草地退化程度加深,植物种类减少,优势种发生变化,植被高度、盖度、鲜草产量下降,土壤细菌、放线菌含量减少,真菌含量增多等。

不同区域草地空间具有异质性,加之甘南州高寒草甸区位环境特殊、生态脆弱、气候敏感^[23-24],致使草地植被及土壤特性因草地类型、退化程度等不同而存在差异。目前,甘南州不同区域退化高寒草甸植被及土壤特性差异不明,以及甘南州退化高寒草甸的植被及土壤特性整体演化规律研究不够深入。因此,本研究通过在甘南州退化高寒草甸 3 个主分布区(碌曲县、夏河县、合作市)多点采样,并分析不同区域、不同退化程度的植被及土壤特性的演化规律,以期为甘南州高寒草甸退化机理、生态修复的研究提供理论支撑。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省甘南藏族自治州,是中国东亚季风区、西北干旱区和青藏高原高寒区三大自然区交汇处,其地势西北高、东南低,多数区域海拔在 3000 m 以上,年均气温 4 ℃,年降雨量约 600—810 mm,年平均日照时长 2200—2400 h,属高原大陆季风性气候。研究区碌曲县、夏河县、合作市是甘南州高寒草甸主分布区,其植被包含草类植物种类繁多,达 30—40 种/m²,无明显优势种群,但由于近年放牧压力大、鼠害严重和气候变化等,其退化严重,并导致优质牧草丰富度、产量下降严重,毒杂草滋生,土壤退化明显^[23-24]。如表 1 所示,根据《高寒草甸退化、沙化、盐渍化的分级指标》(GB19377—2003),将研究区退化高寒草甸分为轻度退化、中度退化和重度退化 3 种类型^[25]。

表 1 样地概况
Table 1 Profile of the sample plots

采样地 Sampling site	地点 Site	特点 Features
碌曲县	轻度退化	碌曲县尕海镇尕秀村
	中度退化	碌曲县尕海镇秀哇村郭莽滩
	重度退化	碌曲县拉仁关乡麦龙滩
夏河县 XH	轻度退化	夏河县桑科乡刚察村
	中度退化	夏河县牙厉集乡阿纳村
	重度退化	夏河县桑科乡日芒村
合作市 HZ	轻度退化	合作市佐盖曼玛乡俄和尔村
	中度退化	合作市佐盖曼玛乡稀泥滩
	重度退化	合作市佐盖曼玛乡稀泥滩

2 研究方法

2.1 草地调查与样品采集

于 2019 年 8 月底,赴甘南藏族自治州碌曲县、夏河县、合作市对不同退化程度高寒草甸的植被进行调查

并采集土壤样品。每个退化程度草地调查面积约 5000 m², 随机选取 5 个样方, 样方大小为 0.5 m×0.5 m。植被高度采用直尺测量, 每样方随机测量 10 次, 取平均值; 植被的盖度采用针刺法测量^[26]; 同时记录植被种类和数量, 刈割样方内植物地上部分, 估算草产量。土样采集深度为 20 cm, 每样方内用 5 点法取样, 低温运输至实验室。

针对植物的种类及数量, 计算 Simpson 多样性指数 (D)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、均匀度 (Evenness)、Brillouin 指数 (H) 和 McIntosh 指数 (D_{Mc})。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2 \quad (1)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^s p_{ib} \ln(p_i) \quad (2)$$

$$\text{Evenness} = H'/H'_{\max} \quad (3)$$

式中: s 为物种总数, p_i 为第 i 种物种个体数占群落总个体数的比例; H' 为 Shannon-Wiener 信息指数, $H'_{\max}$ 为 H' 的最大值。

$$H = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{N!}{n_1! n_2! n_3! \dots} \right) \quad (4)$$

$$D_{Mc} = (N - \sqrt{n_i}) / (N - \sqrt{N}) \quad (5)$$

式中: n_1 为抽样中第 1 个物种的个体数量, n_2 为抽样中第 2 个物种的个体数量, n_3 为抽样中第 3 个物种的个体数量, 如此类推; n_i 为抽样中第 i 个物种个体数量; N 为抽样中所有物种的个体总和, s 为物种数。

2.2 土壤理化性质测定

测定内容包括全氮含量、全磷含量、全钾含量、pH 值、全盐含量、容重、孔隙度和土壤颗粒组成。采用半微量凯氏定氮法测定全氮含量, 钼锑抗比色法测定全磷含量, 火焰光度法测定全钾含量, pH 值用 PHS-3C 型测定计测定, 重量法测定全盐含量, 环刀法测定容重和孔隙度^[27], 采用 Malvern 公司生产 Mastersizer2000 激光粒度仪测定颗粒组成并依照美国农业部 (USDA) 制订标准进行划分: 粒径 <0.002 mm (黏粒)、0.002—0.05 mm (粉粒)、0.05—2 mm (砂粒)^[28]。

2.3 土壤酶活性测定

采用靛酚比色法测定脲酶活性、3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性、磷酸苯二钠比色法测定磷酸酶活性、容量法测定过氧化氢酶活性^[29]。

2.4 土壤微生物数量测定

采用平板计数法测算微生物数量: 细菌采用牛肉膏蛋白胨平板, 在 30 ℃ 培养 24 h 计数; 真菌采用马丁-孟加拉红平板, 在 25 ℃ 培养 72 h 计数; 放线菌采用改良得高氏一号平板, 在 28 ℃ 培养 96 h 计数^[30]。

2.5 数据分析

采用 Excel 2007、DPS v15.10 进行整理数据、绘图及分析, 采用中的 Duncan 新复极差法进行二因素统计分析及差异显著性分析, 不同样地处理分别用 LQ (碌曲县)、XH (夏河县)、HZ (合作市) 表示, 不同退化程度处理分别用 L (轻度退化)、M (中度退化)、S (重度退化) 表示, 样地与退化程度二因素互作分别为 LQL、LQM、LQS、XHL、XHM、XHS、HZL、HZM、HZS 等 9 个处理; 采用 Pearson 多变量相关进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 植被特性

如表 2 所示, 草地高度受样地及退化程度的影响均较大, 碌曲 (LQ) 草地平均高度最高, 为 16.58 cm, 夏河 (XH) 草地平均高度最低, 为 12.70 cm; 轻度退化草地 (L) 平均高度为 21.06 cm, 大于中度退化草地 (M) 平均高度 (14.51 cm) 及重度退化草地 (S) 高度 (9.28 cm), 差异显著 ($P < 0.05$); 在不同样地及不同退化程度双重因素的影响下, 各处理草地高度差异均显著 ($P < 0.05$), 碌曲重度退化草地 (LQS) 高度较轻度退化草地 (LQL) 高

度高出约 10 倍。不同样地的草地盖度和草产量部分差异显著 ($P<0.05$), 碌曲 (LQ) 草地盖度与其他两地差异均显著 ($P<0.05$), 为 85.83%, 夏河 (XH) 草地与合作草地盖度差异不显著 ($P<0.05$), 仅相差 2%; 碌曲 (LQ) 草产量与合作 (HZ) 草产量差异不显著 ($P<0.05$), 在 2700 kg/hm² 之上, 夏河 (XH) 平均草产量最低, 为 2541.67 kg/hm², 与其他两地草产量差异显著 ($P<0.05$)。不同退化程度的草地盖度及草产量差异均显著 ($P<0.05$), 轻度退化草地 (L) 盖度为 94.33%, 重度退化草地 (S) 的平均盖度仅为 61.67%; 轻度退化草地 (L) 的草产量为 3708.33 kg/hm², 重度退化草地 (S) 的草产量仅为 1883.33 kg/hm², 较轻度退化草地草产量降低了约 2000 kg/hm²。在样地和退化程度的双因素影响下, 各处理草地盖度及草产量差异均显著 ($P<0.05$), 草地盖度最高为碌曲轻度退化草地 (LQL), 达 98%, 最低为夏河重度退化草地 (XHS), 仅 56%; 草产量最高为碌曲轻度退化草地 (LQL), 为 3825 kg/hm², 最低为夏河重度退化草地 (XHS), 仅 1725 kg/hm²。

表 2 不同样地不同程度退化程度高寒草甸植被特征

Table 2 Alpine meadow vegetation characteristics in different regions with different degradation degrees

项目 Item	编号 No.	高度 Height/cm	盖度 Coverage/%	草产量 Grass yield/(kg/hm ²)
不同样地 Different sample plot	LQ	16.58±13.51a	85.83±16.54a	2841.67±902.89a
	XH	12.70±4.86c	78.00±19.58b	2541.67±895.94b
	HZ	15.58±2.36b	80.00±16.98b	2733.33±979.26a
不同退化程度 Different degrees of degradation	L	21.06±8.38a	94.33±3.33a	3708.33±180.85a
	M	14.51±1.44b	88.33±4.01b	2525.00±125.00b
	S	9.28±6.85c	61.17±5.53c	1883.33±162.66c
样地×退化程度 Sample plot×Degradation degree	LQL	30.71±2.67a	98.00±1.20a	3825.00±66a
	LQM	15.22±1.22f	92.50±2.05c	2650.00±35d
	LQS	3.8±0.65i	67.00±2.10g	2050.00±42g
	XHL	15.56±2.32d	93.50±2.14b	3500.00±53c
	XHM	15.46±3.02e	84.50±1.82f	2400.00±28f
	XHS	7.09±1.44h	56.00±1.50i	1725.00±25i
	HZL	16.92±2.58c	91.50±2.34d	3800.00±19b
	HZM	12.86±2.66g	88.00±3.00e	2525.00±33e
	HZS	16.96±5.42b	60.50±2.23h	1875.00±21h

同组数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平上差异显著; 表中所述项目及对应的编号以下各表相同

不同样地不同退化程度草地植被优势种差异较大, 无明显规律性, 碌曲县轻度退化草地 (LQL) 优势种为紫羊茅 (*Festuca rubra*)、甘青蒿 (*Artemisia tangutica*)、四川嵩草 (*Kobresia setschwanensis*)、早熟禾 (*Poa annua*), 中度退化草地 (LQM) 优势种为细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia*)、矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、兰石草 (*Lancea tibetica*)、火绒草 (*Leontopodium leontopodioides*), 重度退化草地 (LQS) 优势种为鹅绒委陵菜 (*Potentilla bifurca*)、火绒草 (*Leontopodium leontopodioides*)、蚤缀 (*Arenaria serpyllifolia*)、早熟禾 (*Poa annua*); 夏河县轻度退化草地 (XHL) 优势种为矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、早熟禾 (*Poa annua*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*), 中度退化草地 (XHM) 优势种为莓叶萎陵菜 (*Potentilla fragarioides*)、乳浆大蓟 (*Euphorbia esula*)、雀麦 (*Bromus japonicas*), 重度退化草地 (XHS) 的优势种为矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、唐松草 (*Thalictrum aquilegiifolium*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*); 合作市轻度退化草地 (HZL) 优势种为鹅观草 (*Roegneria kamoji*)、蔗草 (*Scirpus cernuus*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、洽草 (*Koeleria macrantha*)、丝叶毛茛 (*Ranunculus tanguticus*), 中度退化草地 (HZM) 的优势种为细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia*)、蚤缀 (*Arenaria serpyllifolia*)、火绒草 (*Leontopodium leontopodioides*)、老鹳草 (*Geranium wilfordii*)、甘青蒿 (*Artemisia tangutica*), 重度退化草地 (HZS) 的优势种为早熟禾 (*Poa annua*)、甘青蒿 (*Artemisia tangutica*)、细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia*)、白花地丁 (*Viola patrinii*)、鹅绒萎陵菜 (*Potentilla bifurca*)。基于植被种类及各物种数量进行多样性分析发现 (表 3), 合作草地 (HZ) 的各指数均高于其他样地, Simpson 指数为 0.92, 与夏河草地 (XH) 植被 Simpson 指数差异显著 ($P<0.05$), Shannon-Wiener 指数为

3.14, 均匀度指数为 0.82, Brillouin 指数为 4.37, McIntosh 指数为 0.76, 与碌曲草地 (LQ) 和夏河草地 (XH) 的差异均显著 ($P<0.05$); 其中, 夏河草地 (XH) 与碌曲草地 (LQ) Brillouin 指数和 McIntosh 指数差异不显著 ($P<0.05$), 合作草地 (HZ) 与碌曲草地 (LQ) 的 Simpson 指数差异不显著 ($P<0.05$), 由此可见, 各样地间物种多样性无明显规律性。但不同退化程度的草地植被多样性指数规律性明显, Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、均匀度、Brillouin 指数及 McIntosh 指数均随退化程度的加重而降低, 且不同退化程度间各指数差异显著 ($P<0.05$), 如轻度退化草地 (L) 均匀度指数为 0.89, 重度退化草地 (S) 的均匀度指数降低至 0.69, 轻度退化草地 (L) 的 McIntosh 指数为 0.81, 重度退化草地 (S) 的 McIntosh 指数仅为 0.64。在样地和不同退化程度的双重因素的影响下各指数均表现为合作轻度退化草地 (HZL) 的最高, 无其他明显规律性。

表 3 不同样地不同程度退化程度高寒草甸植被物种多样性指数

Table 3 Alpine meadow vegetation species diversity index in different regions with different degradation degrees

编号 No.	Simpson 指数 Simpson index	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	均匀度 Evenness	Brillouin 指数 Brillouin index	McIntosh 指数 McIntosh index
LQ	0.91±0.04a	2.79±0.19c	0.80±0.06b	3.98±0.26b	0.73±0.04b
XH	0.89±0.05b	2.83±0.42b	0.77±0.11c	3.96±0.55b	0.72±0.09b
HZ	0.92±0.04a	3.14±0.33a	0.82±0.09a	4.37±0.44a	0.76±0.07a
L	0.95±0.01a	3.22±0.23a	0.89±0.02a	4.51±0.26a	0.81±0.03a
M	0.93±0.01b	3.02±0.16b	0.82±0.02b	4.22±0.22b	0.75±0.02b
S	0.86±0.02c	2.52±0.18c	0.69±0.04c	3.57±0.23c	0.64±0.03c
LQL	0.95 ±0.01ab	2.93±0.03c	0.86±0.01c	4.19±0.01d	0.77±0.02c
LQM	0.93±0.005bc	2.90±0.01c	0.83±0.01c	4.12±0.01e	0.74±0.01d
LQS	0.87±0.01d	2.53±0.02e	0.72±0.02e	3.63±0.03h	0.67±0.006e
XHL	0.95±0.005ab	3.27±0.03b	0.88±0.005b	4.55±0.01b	0.82±0.02b
XHM	0.91±0.01c	2.91±0.01c	0.80±0.01d	4.03±0.03f	0.75±0.01d
XHS	0.83±0.00e	2.30±0.01f	0.64±0.01f	3.28±0.01i	0.60±0.01f
HZL	0.96±0.005a	3.47±0.02a	0.92±0.01a	4.79±0.02a	0.85±0.02a
HZM	0.94±0.02abc	3.23±0.02b	0.84±0.01c	4.50±0.05c	0.77±0.01c
HZS	0.88±0.005d	2.72±0.03d	0.70±0.01e	3.80±0.04g	0.67±0.01e

3.2 土壤理化性质

如表 4 所示, 不同样地 (LQ、XH、HZ) 草地全氮、全磷、全钾、土壤 pH 值、全盐、容重、孔隙度、颗粒组成均有所差异, 且多数处理间差异显著 ($P<0.05$), 无明显规律性。不同退化程度 (L、M、S) 的各土壤理化性质指标变化规律性明显, 随着退化程度的加重, 除土壤砂粒变化不明显外, 土壤全氮、全磷、全钾、孔隙度及粉粒呈降低趋势, 土壤 pH 值、全盐、容重、黏粒呈升高趋势, 且各退化程度间差异显著 ($P<0.05$)。在不同样地和不同退化程度的双重因素影响下, 合作市轻度退化草地 (HZL) 土壤全氮含量最高, 为 1.84 g/kg, 且与中度 (HZM) 和重度退化草地 (HZS) 的含氮量差异显著 ($P<0.05$)。土壤全磷含量则是夏河县轻度退化草地最高 (XHL), 为 1.67 g/kg, 且随退化程度加深下降程度最为明显, 由轻度至重度降幅为 0.67 g/kg, 差异显著 ($P<0.05$)。土壤全钾含量则是合作市轻度退化草地 (HZL) 最高, 可达 1.98 g/kg, 且与其重度退化草地 (HZS) 全钾含量差异显著 ($P<0.05$), 由轻度至重度退化草地土壤全钾含量降幅达 0.62 g/kg。土壤 pH 值除碌曲轻度退化草地 (LQL)、合作轻度 (HZL) 及中度退化草地 (HZM) 呈弱酸性外, 各样地其余不同退化程度草地土壤均呈碱性。此外, 各处理草地全盐含量均较高, 最高达 2.27 ms/cm; 土壤颗粒组成呈现出粉粒>砂粒>黏粒的特点, 大部分退化草地土壤砂粒在 30% 以上。

3.3 土壤酶活性

如表 5 所示, 碌曲草地 (LQ) 除过氧化氢酶活性与夏河草地 (XH) 相同之外, 其他土壤酶活性均高于夏河草地 (XH) 和合作草地 (HZ), 且差异显著 ($P<0.05$), 夏河草地 (XH) 和合作草地 (HZ) 间酶活性的变化无显著

规律性。但随着退化程度加重,脲酶活性和蔗糖酶活性显著降低($P<0.05$),过氧化氢酶则呈现出先升高再降低的趋势,碱性磷酸酶活性亦呈现出随退化程度的加重而降低的趋势,但中度退化草地(M)与轻度退化草地(L)差异不显著($P<0.05$)。在样地与退化的双重因素影响下,合作市重度退化草地(HZS)较其轻度退化草地(HZL)而言蔗糖酶活性降幅最大,达0.45 mg/g/24h。碌曲轻、中度退化草地(LQL、LQM)及夏河(XHL、XHM)土壤碱性磷酸酶活性差异不显著,重度退化草地(LQS、XHS)土壤碱性磷酸酶活性较其显著降低($P<0.05$)。

表 4 不同样地不同退化程度高寒草甸土壤理化性质

Table 4 Alpine meadow soil physiochemical characteristics in different regions with different degradation degrees

编号 No.	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全钾 Total potassium/ (g/kg)	pH	全盐 Total salt/ (mg/cm)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	孔隙度 Porosity/%	颗粒组成 Soil particle composition		
								黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
LQ	1.25±0.02c	1.34±0.04a	1.83±0.05a	7.05±0.17b	2.03±0.26a	1.26±0.15b	46.36±1.44a	13.75±1.49a	60.64±3.81a	29.50±2.01c
XH	1.48±0.29b	1.31±0.29a	1.14±0.09c	7.29±0.11a	1.99±0.10a	1.57±0.18a	38.35±2.90b	13.72±1.02a	59.59±1.98b	30.37±2.35b
HZ	1.59±0.23a	1.22±0.16b	1.73±0.28b	6.90±0.18c	1.79±0.36b	1.16±1.14b	35.89±2.29c	12.01±0.32b	57.79±0.49c	33.10±0.20a
L	1.65±0.27a	1.47±0.15a	1.70±0.34a	6.92±0.18c	1.70±0.31b	1.25±0.15b	41.97±4.71a	12.35±0.52c	60.11±3.38a	30.99±2.85a
M	1.43±0.18b	1.25±0.05b	1.61±0.37b	7.05±0.21b	2.01±0.12a	1.30±0.30ab	41.09±4.52b	12.83±0.90b	59.55±1.66a	31.07±1.80a
S	1.24±0.06c	1.15±0.17c	1.39±0.31c	7.27±0.12a	2.11±1.17a	1.44±0.21a	37.53±5.30c	14.29±1.49a	58.36±2.71b	30.91±2.48a
LQL	1.28±0.01cd	1.34±0.01bc	1.87±0.00b	6.87±0.01f	1.77±0.24c	1.20±0.01cd	47.50±0.09a	12.59±0.12de	64.60±0.11a	27.25±0.00e
LQM	1.24±0.00d	1.28±0.01cd	1.86±0.02b	7.00±0.01e	2.06±0.05ab	1.24±0.28bcd	47.10±0.51a	13.01±0.18cd	61.20±1.20b	29.64±0.87d
LQS	1.24±0.01d	1.38±0.00b	1.76±0.01c	7.27±0.02c	2.27±0.14a	1.33±0.06bcd	44.50±0.20b	15.67±0.75a	56.13±1.45e	31.63±0.97bc
XHL	1.83±0.03a	1.67±0.02a	1.25±0.08e	7.16±0.01d	1.96±0.07bc	1.47±0.03abc	41.78±0.31c	12.74±0.47d	57.72±0.68cd	32.60±0.87ab
XHM	1.43±0.14c	1.26±0.03de	1.11±0.00f	7.33±0.03b	2.07±0.15ab	1.53±0.28ab	38.16±0.26d	13.63±0.90c	59.27±1.64c	30.69±1.99cd
XHS	1.18±0.02d	1.00±0.02f	1.05±0.04f	7.40±0.03a	1.94±0.01bc	1.72±0.02a	35.11±0.32f	14.78±0.12b	61.79±0.06b	27.81±0.10e
HZL	1.84±0.05a	1.40±0.06b	1.98±0.01a	6.75±0.02g	1.36±0.23d	1.09±0.24d	36.63±0.16e	11.74±0.07f	58.02±0.17cd	33.13±0.10ab
HZM	1.62±0.01b	1.19±0.06e	1.84±0.04bc	6.83±0.01f	1.90±0.09bc	1.14±0.03d	38.04±0.81d	11.86±0.07ef	58.20±0.06cd	32.90±0.09ab
HZS	1.32±0.01cd	1.07±0.06f	1.36±0.09d	7.13±0.03d	2.11±0.09ab	1.26±0.02bcd	33.00±0.45g	12.44±0.07def	57.17±0.19de	33.28±0.18a

表 5 不同样地不同退化程度高寒草甸土壤酶活性

Table 5 Alpine meadow soil enzyme activity in different regions with different degradation degrees

编号 No.	脲酶活性 Urease activity/ (mg/g/24h)	蔗糖酶活性 Sucrase activity/ (mg/g/24h)	过氧化氢酶活性 Catalase activity/ (mL/g/20min)	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity/(mg/g/24h)
LQ	0.275±0.007a	0.819±0.031a	0.654±0.026a	0.650±0.021a
XH	0.242±0.009c	0.778±0.122b	0.654±0.105a	0.621±0.021b
HZ	0.264±0.009b	0.533±0.199c	0.571±0.034b	0.617±0.016b
L	0.270±0.015a	0.845±0.081a	0.629±0.080b	0.637±0.025a
M	0.261±0.013b	0.705±0.122b	0.646±0.071a	0.634±0.025a
S	0.251±0.017c	0.579±0.220c	0.605±0.075c	0.616±0.019b
LQL	0.283±0.003a	0.853±0.007b	0.632±0.010c	0.665±0.006a
LQM	0.273±0.001b	0.819±0.003bc	0.644±0.005c	0.662±0.006a
LQS	0.269±0.004bc	0.786±0.023cd	0.688±0.007b	0.624±0.009bcd
XHL	0.251±0.005d	0.932±0.021a	0.720±0.013a	0.639±0.003b
XHM	0.243±0.003e	0.749±0.002d	0.728±0.021a	0.629±0.006bc
XHS	0.230±0.001f	0.654±0.007e	0.815±0.011g	0.594±0.012e
HZL	0.275±0.003b	0.751±0.034d	0.535±0.005f	0.609±0.009de
HZM	0.266±0.002c	0.548±0.026f	0.566±0.008e	0.612±0.022cde
HZS	0.253±0.001d	0.298±0.048g	0.612±0.008d	0.631±0.009bc

3.4 土壤微生物数量

如表 6 所示,土壤微生物数量因样地不同均有所差异,夏河草地(XH)土壤细菌数量最高,达 5.98×10^6 cfu/g,合作草地(HZ)细菌数量最低,为 2.56×10^6 cfu/g,同时,合作草地(HZ)真菌数量及放线菌数量均最高,真菌数量为 4.947×10^3 cfu/g,放线菌数量为 7.561×10^5 cfu/g,与夏河草地(XH)和碌曲草地(LQ)的差异显著($P < 0.05$)。土壤微生物数量随着退化程度加重表现出明显的规律性,土壤细菌和放线菌数量均随草地退化程度加重而减少,轻度退化草地(L)土壤细菌数量为 4.77×10^6 cfu/g,重度退化草地(S)土壤细菌数量仅为 1.33×10^6 cfu/g,轻度退化草地(L)放线菌数量为 8.391×10^5 cfu/g,中度退化草地(M)放线菌数量为 5.784×10^5 cfu/g,重度退化草地(S)放线菌数量为 3.063×10^5 cfu/g;土壤真菌的数量则表现出相反的变化趋势,即随退化程度的加重土壤真菌数量增加,轻度退化草地(L)数量为 3.304×10^3 cfu/g,中度退化草地(M)数量为 4.354×10^3 cfu/g,重度退化草地(S)数量为 5.758×10^3 cfu/g,不同退化程度草地间各微生物数量差异均显著($P < 0.05$)。在样地和退化双重因素影响下,碌曲轻度退化草地(LQL)细菌数量及放线菌数量均最高,细菌数量达 8.69×10^6 cfu/g,放线菌数量为 1.25×10^6 cfu/g,合作重度退化草地(HZS)细菌数量最低,为 1.04×10^6 cfu/g。土壤真菌数量则为合作重度退化草地(HZS)最高,达 7.343×10^3 cfu/g。多个处理间土壤放线菌数量差异不显著($P < 0.05$)。

表 6 不同样地不同退化程度高寒草甸土壤微生物数量

Table 6 Alpine meadow soil microbial quantity in different regions with different degradation degrees

编号 No.	细菌 Bacteria/ ($\times 10^7$ cfu/g)	真菌 Fungus/ ($\times 10^3$ cfu/g)	放线菌 Actinomycetes/ ($\times 10^5$ cfu/g)	编号 No.	细菌 Bacteria/ ($\times 10^7$ cfu/g)	真菌 Fungus/ ($\times 10^3$ cfu/g)	放线菌 Actinomycetes/ ($\times 10^5$ cfu/g)
LQ	0.477 $\pm$ 0.327b	4.154 $\pm$ 0.682b	3.738 $\pm$ 0.344c	LQS	0.115 $\pm$ 0.003e	4.943 $\pm$ 0.107b	3.657 $\pm$ 0.622c
XH	0.598 $\pm$ 0.317a	4.315 $\pm$ 1.072b	5.940 $\pm$ 2.902b	XHL	0.840 $\pm$ 0.051a	2.967 $\pm$ 0.391e	8.971 $\pm$ 0.86b
HZ	0.256 $\pm$ 0.164c	4.947 $\pm$ 1.851a	7.561 $\pm$ 4.575a	XHM	0.774 $\pm$ 0.022a	4.993 $\pm$ 0.563b	6.43 $\pm$ 0.296b
L	0.697 $\pm$ 0.260a	3.304 $\pm$ 0.397c	8.391 $\pm$ 4.199a	XHS	0.179 $\pm$ 0.054de	4.987 $\pm$ 0.170b	2.411 $\pm$ 0.193c
M	0.501 $\pm$ 0.218b	4.354 $\pm$ 0.623b	5.784 $\pm$ 1.543b	HZL	0.383 $\pm$ 0.212bc	3.393 $\pm$ 0.408de	12.463 $\pm$ 3.433a
S	0.133 $\pm$ 0.045c	5.758 $\pm$ 1.217a	3.063 $\pm$ 1.335c	HZM	0.282 $\pm$ 0.052cd	4.103 $\pm$ 0.137c	7.098 $\pm$ 0.603b
LQL	0.869 $\pm$ 0.014a	3.553 $\pm$ 0.183cde	3.731 $\pm$ 0.126c	HZS	0.104 $\pm$ 0.010e	7.343 $\pm$ 0.473a	3.113 $\pm$ 2.352c
LQM	0.448 $\pm$ 0.006b	3.967 $\pm$ 0.534cd	3.818 $\pm$ 0.229c				

3.5 各因子间的相关性

通过对各因子的相关性分析发现(表 7),各因子除砂粒和过氧化氢酶外,其他因子均与草地退化程度相关系数均大于 0.92,且多在 0.95 之上,说明草地退化与植被及土壤特性的变化息息相关,其规律与前文分析结果一致。植被特性各因子间(高度、盖度、草产量及多样性指数)、除砂粒和过氧化氢酶外各土壤特性各因子间、土壤微生物各因子间,以及植被特性各因子与土壤特性(砂粒和过氧化氢酶除外)、土壤微生物各因子间相关性均较大,相关系数最低为 0.82,多数因子间的相关指数均在 0.90 之上,0.99 或 0.98 占比较大。植被特性各因子与土壤全氮、全磷、全钾、孔隙度、粉粒、脲酶活性、蔗糖酶活性及碱性磷酸酶活性均呈正相关关系,与土壤 pH、全盐、容重及黏粒呈负相关关系,与土壤微生物细菌和放线菌数量呈正相关关系,与真菌数量呈负相关,相关系数在 0.95 以上,甚至达到 1,即百分百完全相关的程度。土壤全氮、全磷、全钾、孔隙度、粉粒、脲酶活性、蔗糖酶活性及碱性磷酸酶活性与土壤细菌及放线菌数量亦呈正相关,与真菌数量呈负相关,土壤 pH、全盐、容重及黏粒则与细菌和放线菌数量呈负相关,与真菌数量呈正相关,且相关系数最低为 0.92,多为 0.99 甚至 1。

4 讨论与结论

高寒草甸植被群落物种生长特征、优势种组成和结构等是揭示草地生态系统退化及演替规律的重要依

表 7 甘南州高寒草甸植被及土壤特性各因子间的相关性

Table 7 Correlation among different factors attributed to vegetation and soil characteristics of alpine meadow in Gannan Prefecture

相关系数 Correlation coefficient	退化 程度	高度	盖度	草产量	Simpson 指数	Shannon- Wiener 指数	均匀 度	Brillouin 指数	McIntosh 指数	全氮	全磷	全钾	pH	全盐	容重	孔隙度	黏粒	粉粒	砂粒	脲酶 活性	蔗糖 酶活性	过氧化 氢酶 活性	碱性磷 活性	细菌	真菌	放线菌
退化程度 Degradation degree	1.00	-0.99	-0.93	-0.98	-0.95	-0.97	-0.98	-0.97	-0.98	-0.99	-0.97	-0.97	0.98	0.96	0.96	-0.94	0.96	-0.97	-0.50	-0.99	-0.99	-0.58	-0.92	-0.98	0.99	-0.99
高度 Height		1.00	0.91	0.99	0.93	0.95	0.97	0.96	0.97	0.99	0.98	0.95	-0.97	-0.97	-0.94	0.92	-0.93	0.96	0.44	0.99	0.99	0.52	0.89	0.97	-0.98	0.99
盖度 Coverage			1.00	0.86	0.99	0.99	0.98	0.99	0.98	0.92	0.84	0.99	-0.98	-0.80	-0.99	0.99	-0.99	0.98	0.76	0.94	0.93	0.82	0.99	0.98	-0.96	0.94
草产量 Grass yield				1.00	0.88	0.91	0.94	0.92	0.94	0.99	0.99	0.92	-0.95	-0.99	-0.90	0.87	-0.89	0.93	0.34	0.98	0.99	0.43	0.84	0.94	-0.96	0.98
Simpson index					1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.93	0.86	0.99	-0.98	-0.82	-0.99	0.99	-0.99	0.99	0.74	0.96	0.94	0.80	0.99	0.99	-0.97	0.95
Shannon-Wiener index						1.00	0.99	0.99	0.99	0.96	0.89	1.00	-0.99	-0.86	-0.99	0.99	-0.99	0.99	0.69	0.97	0.96	0.76	0.99	0.99	-0.99	0.97
均匀度 Evenness							1.00	0.99	1.00	0.97	0.92	0.99	-0.99	-0.89	-0.99	0.98	-0.99	0.99	0.64	0.99	0.97	0.71	0.97	1.00	-0.99	0.98
Brillouin index								1.00	0.99	0.96	0.90	0.99	-0.99	-0.87	-0.99	0.99	-0.99	0.99	0.67	0.98	0.96	0.74	0.98	0.99	-0.99	0.97
McIntosh index									1.00	0.97	0.92	0.99	-0.99	-0.89	-0.99	0.98	-0.99	0.99	0.63	0.99	0.98	0.71	0.97	1.00	-0.99	0.98
全氮 Total nitrogen										1.00	0.98	0.96	-0.98	-0.97	-0.95	0.92	-0.94	0.96	0.46	0.99	0.99	0.54	0.90	0.97	-0.99	0.99
全磷 Total phosphorus											1.00	0.90	-0.93	-0.99	-0.88	0.85	-0.87	0.91	0.30	0.97	0.98	0.39	0.82	0.92	-0.95	0.97
全钾 Total potassium												1.00	-0.99	-0.86	-0.99	0.99	-0.99	0.99	0.68	0.97	0.96	0.75	0.98	0.99	-0.98	0.97
pH Value													1.00	0.90	0.99	-0.98	0.99	-0.99	-0.62	-0.99	-0.98	-0.69	-0.97	-0.99	0.99	-0.99
全盐 Total salt														1.00	0.85	-0.81	0.84	-0.88	-0.23	-0.94	-0.96	-0.32	-0.77	-0.89	0.93	-0.95
容重 Bulk density															1.00	-0.99	0.99	-0.99	-0.71	-0.97	-0.95	-0.77	-0.99	-0.99	0.98	-0.96
孔隙度 Porosity																1.00	-0.99	0.99	0.75	0.95	0.93	0.81	0.99	0.98	-0.96	0.94
黏粒 Clay																	1.00	-0.99	-0.72	-0.96	-0.95	-0.78	-0.99	-0.99	0.97	-0.96
粉粒 Silt																		1.00	0.66	0.98	0.97	0.73	0.98	0.99	-0.99	0.98
砂粒 Sand																			1.00	0.52	0.47	0.99	0.79	0.64	-0.57	0.51
脲酶活性 Urease activity																				1.00	0.99	0.60	0.93	0.98	-0.99	0.99
蔗糖酶活性 Sucrase activity																					1.00	0.55	0.91	0.97	-0.99	0.99
过氧化氢酶活性 Catalase activity																						1.00	0.84	0.71	-0.64	0.59
碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity																							1.00	0.97	-0.95	0.93
细菌 Bacteria																								1.00	-0.99	0.98
真菌 Fungus																									1.00	-0.99
放线菌 Actinomycetes																										1.00

据^[13-15, 31], 本研究中不同地区高寒草甸高度、盖度、草产量以及植被多样性指数均随退化程度加深显著降低, 且呈现出牧草类植物的优势地位逐渐被毒杂草类代替的可能, 这与李媛媛等^[32]、邓燕等^[33]研究结果一致; 在该过程中, 当退化由中度转为重度, 降幅最大, 与前人研究一致^[34-35]。不同地区不同退化程度优势种组成差异较大, 分析其原因可能一是不同地区不同退化程度高寒草甸气候、土壤、降水等生态因子不同所致, 如土壤营养物质淋溶、挥发及青藏高原高寒草甸气候整体干热化变化趋势等影响, 部分科属植株一旦死亡便很难再生^[36]; 二是随着草地退化加剧, 部分植被吸收利用营养物质的能力严重衰减, 致使在较深退化程度下早熟禾、披碱草等禾本科优质牧草与嵩草属、委陵菜属杂草类植物同时占据优势地位; 三是由于过度放牧, 植被根部被啃食严重, 部分植被生长受抑或死亡。

草地生态系统中, 土壤理化性质能反映高寒草甸的退化状态和趋势^[37]。本研究发现, 随退化程度加深, 土壤全氮、全磷、全钾、孔隙度及粉粒含量降低, 土壤 pH 值、全盐、容重、黏粒含量升高, 说明随着草地退化加剧, 土壤肥力衰退、逐渐盐碱化、向荒漠化次生演替, 与魏茂宏等^[38]、杨馥铖等^[39]研究结果一致。土壤酶则是植物根际微生态调节、运转的重要活性驱动因子, 对土壤养分活化、迁移和供应等具有催化作用, 土壤脲酶可催化尿素酰氨碳氮键水解并生成氨, 蔗糖酶可将土壤中的多糖水解为小分子葡萄糖或果糖为植物及微生物提供营养, 磷酸酶则对磷的转化起促进作用^[40-42]。本研究发现, 随高寒草甸退化加重, 脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性显著降低, 表明在高寒草甸逆行演替进程中含氮、含碳、含磷营养物质转化受到严重抑制^[43]。土壤微生物是土壤微生态系统的重要组成部分, 是高寒草甸生态系统变化的敏感指标, 其数量、组成波动直接反映了土壤健康状况, 并间接反映了高寒草甸植被和土壤的演替方向^[9, 14]。本研究发现, 随着草地退化加剧, 土壤细菌和放线菌数量显著降低, 真菌数量增多, 与 Sokol 等^[44]、王永宏等^[45]研究结果一致。

综上, 通过对甘南州不同退化程度高寒草甸植被及土壤特性的演化规律的研究发现, 甘南州高寒草甸随着退化程度加重, 植被高度、盖度、草产量、多样性指数降低, 土壤全氮含量、全磷含量、全钾含量、孔隙度含量、粉粒占比、脲酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、细菌数量、放线菌数量降低, 土壤 pH 值、全盐含量、容重、黏粒占比及真菌数量升高, 土壤砂粒差异不显著 ($P < 0.05$), 过氧化氢酶则先升高再降低。而“植被-土壤-微生物”这一整体演化动态是掌握高寒草甸演化规律及其退化修复的关键, 本研究通过对植被、土壤及微生物各因子进行相关性分析发现, 除个别因子外, 各因子之间及各因子与草地退化程度之间相关性均较强, 说明草地在退化过程中, “植被-土壤-微生物”三者之间相互依存、密不可分、协同演化。土壤作为联系植被与微生物的纽带, 随着草地退化, 其理化性质的演化趋势朝着不利于植被、微生物生存的方向进行, 土壤中 N、P、K 等养分含量及有关能量转化、物质循环的酶活性逐渐降低, 土壤向盐碱化、荒漠化演替。土壤微生物作为退化土地修复的变局者, 其活性在生物地球化学循环中发挥着重要作用, 是有机物形成、分解的重要介质及全球碳平衡的直接管控者^[46], 其群落结构失调, 则反作用于植被及土壤理化性质及酶活性, 致使退化进一步加剧。

参考文献 (References):

- [1] 刘旻霞, 张娅娅, 李全弟, 李博文, 孙瑞弟, 宋佳颖. 甘南高寒草甸植物群落物种多度分布特征. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1405-1414.
- [2] Lin L, Li Y K, Xu X L, Zhang F W, Du Y G, Liu S L, Guo X W, Cao G M. Predicting parameters of degradation succession processes of Tibetan Kobresia grasslands. Solid Earth, 2015, 6(4): 1237-1246.
- [3] Gao Q Z, Zhu W Q, Schwartz M W, Ganjurjav H, Wan Y F, Qin X B, Ma X, Williamson M A, Li Y. Climatic change controls productivity variation in global grasslands. Scientific Reports, 2016, 6(1): 26958.
- [4] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 高金龙, 殷建鹏, 侯蒙京, 冯琦胜, 梁天刚. 基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究. 草业学报, 2019, 28(6): 19-32.
- [5] You Q G, Xue X, Peng F, Xu M H, Duan H C, Dong S Y. Comparison of ecosystem characteristics between degraded and intact alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Ecological Engineering, 2014, 71: 133-143.
- [6] 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. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2109-2118.
- [7] 陆荫, 杨淑霞, 李晓红. 甘南州高寒天然草地生长状况遥感监测. 草业科学, 2021, 38(1): 32-43.

- [8] 樊丹丹, 刘艳娇, 曹慧丽, 陈昊, 孔维栋, 李香真. 围栏工程对退化草地土壤理化性质和微生物群落的影响. 科技导报, 2022, 40(3): 41-51.
- [9] 张骞, 马丽, 张中华, 徐文华, 周秉荣, 宋明华, 乔安海, 王芳, 余延娣, 杨晓渊, 郭婧, 周华坤. 青藏高原高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望. 生态学报, 2019, 39(20): 7441-7451.
- [10] Zhang Y, Wang G X, Wang Y B. Response of biomass spatial pattern of alpine vegetation to climate change in permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau, China. Journal of Mountain Science, 2010, 7(4): 301-314.
- [11] 梁大林, 唐海萍. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析. 生态学报, 2022, 42(1): 287-300.
- [12] Duan H C, Xue X, Wang T, Kang W P, Liao J, Liu S L. Spatial and temporal differences in alpine meadow, alpine steppe and all vegetation of the Qinghai-Tibetan Plateau and their responses to climate change. Remote Sensing, 2021, 13(4): 669.
- [13] Che R X, Wang Y F, Li K X, Xu Z H, Hu J M, Wang F, Rui Y C, Li L F, Pang Z, Cui X Y. Degraded patch formation significantly changed microbial community composition in alpine meadow soils. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104426.
- [14] 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. The Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 2109-2118.
- [15] 邢学刚, 颜长珍, 逯军峰, 翟晓慧, 贾浩巍, 谢家丽. 青海高寒草甸退化演替中的植被指数. 中国沙漠, 2021, 41(3): 203-213.
- [16] Wu Y, Chen D M, Saleem M, Wang B, Hu S J, Delgado-Baquerizo M, Bai Y F. Rare soil microbial taxa regulate the negative effects of land degradation drivers on soil organic matter decomposition. Journal of Applied Ecology, 2021, 58(8): 1658-1669.
- [17] Bai Y F, Ma L N, Degen A A, Rafiq M K, Kuzyakov Y, Zhao J X, Zhang R, Zhang T, Wang W Y, Li X G, Long R J, Shang Z H. Long-term active restoration of extremely degraded alpine grassland accelerated turnover and increased stability of soil carbon. Global Change Biology, 2020, 26(12): 7217-7228.
- [18] Kang Y M. Influence of grassland degradation on soil and vegetation characteristics in Inner Mongolia, China. Pedologist, 2019, 55(3): 332-342.
- [19] 吴赞, 彭云峰, 杨贵彪, 李秦鲁, 刘洋, 马黎华, 杨元合, 蒋先军. 青藏高原高寒草地退化对土壤及微生物化学计量特征的影响. 植物生态学报, 2022, 1-12. (2022-03-25). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=ZWSB20220525001>.
- [20] 王小燕, 姚宝辉, 张彩军, 王缠, 孙小妹, 苏军虎. 甘南“黑土滩”型退化草甸土壤理化特性及酶活性季节变化. 草地学报, 2021, 29(2): 220-227.
- [21] 姚宝辉, 王缠, 张倩, 孙小妹, 杨晶, 蔡志远, 郭怀亮, 苏军虎. 甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化. 水土保持学报, 2019, 33(3): 138-145.
- [22] 李雪萍, 李建宏, 刘永刚, 范雨轩, 赵树栋, 李敏权. 甘南草原不同退化草地植被和土壤微生物特性. 草地学报, 2020, 28(5): 1252-1259.
- [23] Yang Z P, Ouyang H, Zhang X Z, Xu X L, Zhou C P, Yang W B. Spatial variability of soil moisture at typical alpine meadow and steppe sites in the Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(3): 477-488.
- [24] 刘飞, 刘峰贵, 周强, 陈琼, 汪生珍, 郭蓉, 马伟东. 青藏高原生态风险及区域分异. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3232-3246.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 19377—2003 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标. 北京: 中国标准出版社, 2004: 3-3.
- [26] Kemp D R, Dowling P M. Towards sustainable temperate perennial pastures. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2000, 40(2): 125-132.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] 刘幼萍, 童娟, 李小妮. 应用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪分析河流泥沙颗粒. 水利科技与经济, 2005, 11(6): 329-331.
- [29] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [30] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986.
- [31] Tang L, Dong S K, Sherman R, Liu S L, Liu Q R, Wang X X, Su X K, Zhang Y, Li Y Y, Wu Y, Zhao H D, Zhao C, Wu X Y. Changes in vegetation composition and plant diversity with rangeland degradation in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau. Rangeland Journal, 2015, 37(1): 107-115.
- [32] 李媛媛, 董世魁, 朱磊, 温璐, 李小艳, 王学霞. 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策. 生态学报, 2013, 33(15): 4683-4691.
- [33] 邓燕, 李钊, 姚树冉, 孙颖, 解淑斌, 李海玲, 楚启鹏, 马娟, 魏茂宏, 冉金枝, 田斌, 邓建明. 不同程度退化草地的植被土壤特征及其相互间的关系. 草业科学, 2021, 38(7): 1260-1269.
- [34] 曹旭娟, 干珠扎布, 梁艳, 高清竹, 张勇, 李玉娥, 万运帆, 旦久罗布. 基于 NDVI 的藏北地区草地退化时空分布特征分析. 草业学报, 2016, 25(3): 1-8.

- [35] 詹天宇, 孙建, 张振超, 刘某承. 基于 meta 分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1847-1858.
- [36] 贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 孙书存, 吕植, 胡小文, 曹广民, 吴新卫, 李黎, 卜海燕, 朱剑霄. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术. 科技导报, 2020, 38(17): 66-80.
- [37] 邵建翔, 刘育红, 马辉, 魏卫东. 退化高寒草地浅层土壤理化性质 Meta 分析. 草地学报, 2022, 1-15. (2022-03-29). https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=CDXU20220328005&uniplatform=NZKPT&v=xve8KgKxj-HXhJS1Yn0AJsOw_7Xr3FGghMJEPL-4980XYIJYLQnXqek4LsPOQY10.
- [38] 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. 应用生态学报, 2014, 25(3): 679-686.
- [39] 杨馥铖, 刘昌义, 胡夏嵩, 李希来, 付江涛, 卢海静, 申紫雁, 许桐, 闫聪, 何伟鹏. 黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究. 干旱区研究, 2022, 39(2): 560-571.
- [40] Jin K, Sleutel S, Buchan D, De Neve S, Cai D X, Gabriels D, Jin J Y. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 115-120.
- [41] 李莹飞, 耿玉清, 周红娟, 杨英. 基于不同方法测定土壤酸性磷酸酶活性的比较. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 98-104.
- [42] Bhaskara G B, Wong M M, Verslues P E. The flip side of phospho-signalling: regulation of protein dephosphorylation and the protein phosphatase 2Cs. Plant, Cell & Environment, 2019, 42(10): 2913-2930.
- [43] 马琪, 刘康, 涂纯, 贺成民, 袁家根. 2000-2010 年陕西北部不同类型草地面积及其覆盖度变化. 植物科学学报, 2018, 36(1): 54-64.
- [44] Sokol N W, Slessarev E, Marschmann G L, Nicolas A, Blazewicz S J, Brodie E L, Firestone M K, Foley M M, Hestrin R, Hungate B A, Koch B J, Stone B W, Sullivan M B, Zablocki O, Consortium L S M, Pett-Ridge J. Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. Nature Reviews Microbiology, 2022, 20(7): 415-430, doi: 10.1038/s41579-022-00695-z.
- [45] 王永宏, 田黎明, 艾鹭, 陈仕勇, 泽让东科. 短期牦牛放牧强度对川西北高原高寒草甸土壤细菌群落的影响. 生态学报, 2022, 42(4): 1549-1559.
- [46] Coban O, De Deyn G B, Van Der Ploeg M. Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands. Science, 2022, 375(6584): abe0725.