

DOI: 10.20103/j.stxb.202210122900

李亚娟, 瞿丹, 高亚君, 达朝玲, 鱼小军, 史志嵩, 徐晶晶. 东祁连山高寒草甸不同退化阶段植被/土壤磷素特征及其与生物量的关系. 生态学报, 2023, 43(18): 7381-7389.

Li Y J, Qu D, Gao Y J, Da Z L, Yu X J, Shi Z H, Xu J J. Vegetation and soil phosphorus characteristics and their relationships with the biomass of degraded alpine meadow phases in eastern Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7381-7389.

东祁连山高寒草甸不同退化阶段植被/土壤磷素特征及其与生物量的关系

李亚娟^{1,*}, 瞿丹², 高亚君¹, 达朝玲¹, 鱼小军¹, 史志嵩², 徐晶晶²

1 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/中美草地畜牧业可持续发展研究中心/甘肃省草业工程实验室, 兰州 730070

2 甘肃省林业科技推广站, 兰州 730046

摘要: 磷素是高寒草地生态系统的重要支持元素, 高寒草甸退化导致较为严重的生态和生产问题, 同时也引起了生态系统物质循环的变化。为揭示高寒草甸退化中土壤磷素特征及其对植被特征的效应, 以东祁连山轻度(LD)、中度(MD)、重度退化(SD)高寒草甸退化阶段为研究对象, 以多年围封高寒草甸(FG)为对照, 在春季和夏季分别对不同高寒草甸阶段样地不同土层深度土壤全磷、有效磷、微生物量磷含量及碱性磷酸酶活性等磷素特征进行了研究, 并对夏季植被地上生物量和磷素含量等植被特征进行了调查。结果表明: 东祁连山高寒草甸退化导致植被地上生物量和磷含量急剧下降, 重度退化高寒草甸地上生物量干重仅是围封草地的 35.93%, 退化高寒草甸地上部磷含量仅为围封草地的 60%, 且不同退化阶段地上部磷含量没有明显差异。退化导致高寒草甸表层土壤的全磷、有效磷含量升高, 相比 FG, 土壤有效磷含量春季 LD、MD 和 SD 分别升高了 16.67%、36.67% 和 3.33%, 夏季分别升高了 4.35%、26.09% 和 4.35%, 且有效磷含量具有夏季低于春季的季节差异性。退化导致土壤微生物量磷含量明显降低, 而对碱性磷酸酶活性影响没有明显的规律性, 但围封草地夏季碱性磷酸酶活性高于春季。牧草干重与土壤全磷含量呈极显著正相关, 与土壤碱性磷酸酶活性呈显著负相关, 但牧草磷含量与土壤磷素特征指标未表现出显著相关性, 表明土壤磷素特征并不是退化高寒草甸植被磷含量降低的原因。

关键词: 高寒草甸; 退化; 植被磷; 土壤磷; 植物生物量; 东祁连山

Vegetation and soil phosphorus characteristics and their relationships with the biomass of degraded alpine meadow phases in eastern Qilian Mountains

LI Yajuan^{1,*}, QU Dan², GAO Yajun¹, DA Zhaoling¹, YU Xiaojun¹, SHI Zhihe², XU Jingjing²

1 College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education; Sino-U.S. Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

2 Forestry Science and Technology Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730046, China

Abstract: Phosphorus is the key support element in alpine grassland ecosystem. Alpine meadow degradation has caused many important ecological and production problems in pasturing area, and also produced the changes of nutrients recycling in ecosystems. The effects of degradation on phosphorus in alpine meadow ecosystem is complex because of the special climax and utilization strategies. Thus phosphorus recycling and its effects on productivity in degraded alpine meadow ecosystem was overlooked in the past years. Three typical phases of degraded alpine meadow, lightly degraded (LD), middle degraded (MD), and seriously degraded (SD) alpine meadow phases were chosen to study the effects of alpine

基金项目: 甘肃省草原生态修复治理科技支撑项目(2021); 甘肃省自然科学基金(20JR5RA036)

收稿日期: 2022-10-12; 网络出版日期: 2023-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyj@gsau.edu.cn

meadow degradation on soil and vegetation phosphorus characteristics and their relationships with the vegetation biomass in eastern Qilian Mountain, and the control experiment treatment was the fenced restoration alpine meadow (FG). Soil phosphorus characteristics, such as soil total phosphorus, available phosphorus, microbial phosphorus content, and alkaline phosphatase activity of different alpine meadow phases in spring and summer, and the corresponding vegetation above-ground plant biomass and phosphorus content in growth season were studied, respectively. The results showed that the above-ground plant biomass decreased seriously after degradation in the alpine meadows of eastern Qilian Mountain. The above-ground plant dry weight of SD was only 35.93% of FG. The above-ground phosphorus content also decreased significantly after degradation, but there were no significant differences among different degradation degrees. The above-ground phosphorus content of the degraded alpine meadow was only 60% of the FG. Soil total and available phosphorus content in surface soil depth increased after degradation in the alpine meadows. Soil available phosphorus content of LD, MD and SD increased by 16.67%, 36.67%, 3.33% in spring, and 4.35%, 26.09%, 4.35% in summer, respectively. Meanwhile, soil available phosphorus content showed the seasonal difference which was higher in spring than summer. Degradation induced soil microbial phosphorus content to decrease, but it had no obvious rule on soil alkaline phosphatase activity. But soil alkaline phosphatase activity of FG in summer was higher than spring. Pearson correlation analyses showed that above-ground plant dry weight was positively correlated with soil total phosphorus content, and negatively correlated with soil alkaline phosphatase activity, while there was no significantly correlated relationship between the above-ground plant phosphorus and soil phosphorus characteristics, which reflected that soil phosphorus characteristics was not the reason for the reduction of above-ground plant phosphorus content. This study revealed phosphorus characteristics and their relationships in soil-plant system, which could provide basis for the management and restoration of degraded grassland in alpine area.

Key Words: alpine meadow; degradation; vegetation phosphorus; soil phosphorus; plant biomass; eastern Qilian Mountains

磷是植物必需的营养元素之一,在维持草地生态系统平衡,保证牧草高产优质等方面有着重要作用^[1]。土壤磷素含量和组成与母质、土地利用方式有密切关系^[2],植物根系和微生物通过分泌有机酸和酶活化土壤难溶性无机磷,促进土壤活性有机磷水解以补充溶解态磷^[3]。土壤中存在多种化学形态的磷,不同形态磷的生物有效性不同,其循环过程也存在差异,并在系统磷素供应中起不同作用。土壤酶是土壤生态系统物质循环和能量流动的重要参与者,也是草地生态系统代谢的重要动力之一,其活性大小对土壤养分储量和生化反应过程有明显指示作用^[4],土壤磷酸酶直接影响有机磷的矿化作用和植物磷素营养状况^[5-6]。

东祁连山是我国西北地区重要的生态区,高寒草地对该地区生态、文化和经济具有极其重要的作用^[7]。然而,由于长期过度放牧、气候演变等原因,该区可利用高寒草地面积持续减小,土壤肥力下降,牧草质量和产量降低,土壤退化严重。草地利用方式等措施可以改变土壤养分的积累和植物对养分的吸收过程^[8],从而改变土壤中磷的存在形态和组分^[9],土地利用变化也会通过增加磷的损失或磷向固定库的转移而对植物磷吸收产生重大影响,导致磷分布和有效性的变化^[10-11]。充足的磷素能延缓草地退化、显著提高草地生产力和牧草品质^[12],而草地退化对包括磷素的土壤养分及草地植被等均有较大影响^[13]。研究表明轻度退化草地表层全磷含量升高,而重度退化草地“黑土滩”磷含量降低^[14];也有研究表明草地退化导致土壤全磷随退化程度加剧显著降低,草地生产力明显降低^[15]。马源等^[16]的研究发现土壤中全磷和速效磷含量、土壤微生物含量均随退化程度加剧降低,在青藏高原的研究表明,退化对土壤磷素的影响与植被类型有关,有的植被类型会下降,有的则会升高^[17]。由此可见,土壤磷素特征与气候、母质等因素有关,并且磷在土壤中移动和贮存较为复杂^[18-19]。高寒草甸由于特殊的气候条件和利用策略,草地退化对土壤磷素的影响更为复杂,并且,以往人们对于土壤-植物系统物质循环更多关注碳和氮,对于磷素状态与生产力关系的研究比较少,这限制了人们对高

寒草甸退化机理的理解以及恢复策略的制定。

因此,本研究以区域典型不同退化阶段高寒草甸为研究对象,对土壤、植物磷素特征进行系统研究分析,并进一步对不同阶段高寒草甸生产力进行研究,以明确高寒草甸退化对高寒草甸土壤-植物系统磷素特征的影响及其与生物量的关系,揭示磷素对于高寒地区土壤-植物系统的重要作用,为我国高寒地区草地土壤生态恢复与治理提供必要的参考依据。

1 研究区概况

试验地位于祁连山东缘甘肃农业大学天祝高山草原试验站,地理位置 N 37°40', E 102°32'。平均海拔 2960 m,年均降水量 416 mm,多为地形雨,且集中在 7—9 月,水热同期,年均气温为 0.8℃,1 月和 7 月平均气温分别为 -10.8℃ 和 12.4℃。区域昼夜温差大,太阳辐射强,年日照时间为 2600 h,无绝对无霜期,仅分冷热两季。土壤类型为山地黑钙土,质地为中壤质。原生高寒草甸优势种有线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*)、矮生嵩草 (*Kobresia humilis*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans* Griseb.), 伴生种有扁蓿豆 (*Medicago ruthenica*)、高山唐嵩草 (*Thalictrum alpinu*)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*) 等。

2 材料与方法

2.1 供试样地

考察选取研究区地势基本一致的围封高寒草甸 (FG)、轻度 (LD)、中度 (MD) 和重度退化 (SD) 高寒草甸作为研究对象,样地均为冷季牧场,每年放牧利用时间为 11 月底到第二年 5 月初,4 个不同阶段高寒草甸样地划分参考 GB19377—2003^[20] 进行。2021 年 8 月进行植被调查,主要调查了植被盖度、草高、群落物种组成及生物量,样地基本概况如表 1 所示。

表 1 试验高寒草甸样地概况

Table 1 General situation of the different alpine meadow types

高寒草甸退化阶段 Degraded alpine meadow phases	样区地理位置 Geographic coordinates	海拔高度 Altitude/m	植被状况 Vegetation situation
围封高寒草甸 Fenced grassland (FG)	N 37°11'51" E 102°47'06"	2900	盖度 100%, 草高 30 cm。三年未放牧, 植被以扁蓿豆 (<i>Melissilus ruthenicus</i>)、披碱草 (<i>Elymus nutans</i>)、球花蒿 (<i>Artemisia smithii</i>)、矮生嵩草 (<i>Kobresia humilis</i>)、赖草 (<i>Leymus secalinus</i>)、针茅 (<i>Stipa capillata</i>) 为主。
	N 37°11'52" E 102°47'08"	2900	
	N 37°11'52" E 102°47'08"	2900	
轻度退化高寒草甸 Lightly degraded alpine meadow (LD)	N 37°11'57" E 102°46'43"	2907	盖度 70%, 草高 22 cm。唐松草 (<i>Thalictrumaquilegi folium</i>)、银莲花 (<i>Anemone cathayensis</i> Kitag)、球花蒿 (<i>Artemisia smithii</i>)、蓝花韭 (<i>Allium beesianum</i>)、披碱草 (<i>Elymus nutans</i>)、矮生嵩草 (<i>Kobresia humilis</i>)、小米草 (<i>Euphrasia pectinata</i> Ten)。
	N 37°11'58" E 102°46'40"	2907	
	N 37°12'00" E 102°46'39"	2907	
中度退化高寒草甸 Middle degraded alpine meadow (MD)	N 37°11'59" E 102°46'37"	2906	盖度 50%, 草高 16cm。唐松草 (<i>Thalictrumaquilegi folium</i>)、麻花苳 (<i>Gentiana straminea</i>)、球花蒿 (<i>Artemisia smithii</i>)、披碱草 (<i>Elymus nutans</i>)、黄花棘豆 (<i>Oxytropis ochrocephala</i>)、矮生嵩草 (<i>Kobresia humilis</i>) 和针茅 (<i>Stipa capillata</i>)。
	N 37°12'01" E 102°46'33"	2910	
	N 37°12'03" E 102°46'35"	2900	
重度退化高寒草甸 Seriously degraded alpine meadow (SD)	N 37°12'05" E 102°46'15"	2921	盖度 30%, 草高 15cm。马先蒿 (<i>Pedicularis kansuensis</i>)、唐松草 (<i>Thalictrumaquilegi folium</i>)、矮生嵩草 (<i>Kobresia humilis</i>)、球花蒿 (<i>Artemisia smithii</i>)、麻花苳 (<i>Gentiana straminea</i>)、披碱草 (<i>Elymus nutans</i> Griseb.)、黄花棘豆 (<i>Oxytropis ochrocephala</i>)、紫花针茅 (<i>Stipa purpurea</i>)。
	N 37°12'03" E 102°46'12"	2921	
	N 37°12'03" E 102°46'07"	2921	

FG: 围封草地 Fenced grassland; LD: 轻度退化高寒草甸 Lightly degraded alpine meadow; MD: 中度退化高寒草甸 Middle degraded alpine meadow; SD: 重度退化高寒草甸 Seriously degraded alpine meadow

2.2 土壤样品采集与处理

分别于 2021 年春季(4 月)和夏季(8 月)用土钻于 FG、LD、MD 和 SD 4 个不同退化阶段高寒草甸取土壤样品。每种退化阶段的大样地面积约为 5 hm², 在每个样地里随机选取 3 个样区, 作为 3 次重复。每个样区取 5 个样点, 每个样点按 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 3 个土层深度取样带回实验室, 不同季节样地间采用 GPS 定位。一部分新鲜土样进行风干, 分别过 1 mm 和 0.15 mm 筛, 分类整理, 编号备用, 用于测定部分土壤磷素特征指标; 另一部分新鲜土样于 4℃ 冷藏, 尽快用于土壤微生物量磷含量的测定。

2.3 测定指标与方法

2.3.1 样地植被调查

用卷尺测量样方中每个植被种类的自然高度, 取其平均值为草高; 盖度测量目测估计得出分盖度和总盖度, 以百分数记录; 每个样地的 3 个样区采用 0.5 m × 0.5 m 样方框进行地上生物量测量, 每个样区三次重复, 将样方中的鲜草齐地剪下, 剔除杂物后, 称鲜重。分别带回实验室, 于烘箱中 65℃ 烘干至恒重并分别记录干重, 后粉碎并过 0.5 mm 筛备用。

2.3.2 土壤及牧草磷素指标测定

土壤全磷采用过 0.15 mm 筛风干土样测定, 方法为 H₂SO₄-HClO₄ 消煮、钼蓝比色法; 土壤微生物量磷采用新鲜土壤样品测定, 方法为氯仿熏蒸法, 熏蒸和未熏蒸样品之间的差计算^[21]; 土壤有效磷采用过 1 mm 筛风干土样测定, 方法为 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提、高锰酸钾氧化脱色、钼锑抗比色法^[22]; 土壤碱性磷酸酶采用过 1 mm 筛风干土样测定, 方法为 0.5% 磷酸苯二钠比色法^[23]。植物磷含量测定采用过 0.5 mm 筛的地上部烘干样品进行, 方法为 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮、钒钼黄比色法^[24]。

2.4 数据处理及分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 计算整理, 采用 SPSS 26.0 进行统计分析。运用单因素方差分析(One-way ANOVA) 检验不同退化阶段高寒草甸之间磷素特征指标的显著性, 采用 Duncan's 检验法得到不同处理间平均值的显著性差异($P < 0.05$)。采用 Pearson 相关分析法进行相关性分析, 相关系数 r 表示 2 个随机变量间线性相关性的强弱, 取值 -1—1 之间。-1 代表显著负相关; 1 代表显著正相关; 0 代表两变量无关, 表示两变量间线性关系很弱, 或不是线性关系。

3 结果与分析

3.1 高寒草甸不同退化阶段植被地上部生物量与磷素含量

不同退化阶段高寒草甸植被地上部生物量与磷素含量如表 2 所示。可以看出, 与 FG 相比, 退化高寒草甸牧草干重依次降低, 主要是盖度和高度的下降造成, 因此, 随着退化程度的加剧, 高寒草地生产力急剧下降。FG 牧草含磷量最高, 与 3 种退化高寒草甸差异显著($P < 0.05$), 而 3 种退化高寒草甸牧草含磷量处于较低水平, 相比 FG, LD、MD 和 SD 牧草磷含量分别降低了 39.0%、36.5% 和 39.0%, 三者之间差异不显著($P > 0.05$)。因此, 退化导致高寒草甸牧草的含磷量明显降低, 但不同退化阶段牧草含磷量没有明显差异。

表 2 东祁连山 2021 年高寒草甸不同退化阶段植被地上生物量与磷素含量

Table 2 Above-ground dry weight and phosphorus content of different alpine meadow degradation phases in eastern Qilian Mountains in 2021

高寒草甸退化阶段 Degraded alpine meadow phases	地上部生物量干重/(g/m ²) Above-ground dry weight	地上部磷含量/% Above-ground grass P content
FG	426.68±25.30a	0.41±0.03a
LD	300.00±18.04b	0.25±0.05b
MD	213.32±16.34c	0.26±0.02b
SD	153.32±15.21d	0.25±0.01b

同列数据后不同小写字母间表示不同高寒草甸阶段之间的显著性($P < 0.05$)

3.2 高寒草甸不同退化阶段土壤磷素特征

3.2.1 全磷

不同退化阶段高寒草甸春季和夏季土壤全磷含量见表 3。与 FG 相比,春季和夏季退化均导致 0—10 cm 土层全磷含量升高,相比 FG,春季 LD、MD、SD 分别升高了 12.67%、4.07%、9.95%,夏季分别升高了 11.55%、1.20%、5.98%。而春季 10—20 cm 表现出 SD>FG>MD>LD,FG 与 SD 差异不显著,但与 MD、LD 差异显著 ($P<0.05$),夏季 10—20 cm 全磷含量变化不明显。与春季相比,夏季土壤全磷含量整体呈上升趋势,LD、MD 和 HD 0—10 cm 土层土壤全磷含量依次升高了 12.45%、49.41%、9.47%。春季土壤的全磷基本表现出 10—20 cm 土层最高,而夏季 FG 和 MD 表现出 20—30 cm 土层最高,LD 和 SD 表现出 0—10 cm 土层最高。

表 3 东祁连山 2021 年高寒草甸不同退化阶段土壤全磷含量/(g/kg)

Table 3 Soil total phosphorus content of different alpine meadow phases in eastern Qilian Mountains in 2021

高寒草甸退化阶段 Degraded alpine meadow phases	土层 Soil depth/cm	春季 Spring	夏季 Summer	高寒草甸退化阶段 Degraded alpine meadow phases	土层 Soil depth/cm	春季 Spring	夏季 Summer
FG	0—10	2.21±0.04Bb	2.51±0.02Bc	MD	0—10	2.30±0.08Cb	2.54±0.01Bb
	10—20	2.88±0.04Aa	2.56±0.01Ab		10—20	2.42±0.16Cb	2.55±0.01Ab
	20—30	2.13±0.00Bb	2.97±0.00Aa		20—30	2.25±0.07Aba	2.64±0.01Ba
LD	0—10	2.49±0.03Aa	2.80±0.08Ab	SD	0—10	2.43±0.02Ab	2.66±0.03ABa
	10—20	2.40±0.04Ba	2.60±0.07Aa		10—20	2.92±0.03Aa	2.54±0.02Aa
	20—30	2.39±0.01ACa	2.63±0.02Bb		20—30	2.53±0.08Ab	2.63±0.05Ba

同列数据后不同大写字母间表示同一季节相同土层不同高寒草甸阶段之间的显著性 ($P<0.05$);不同小写字母间表示同一高寒草甸阶段同一季节不同土层之间的差异性 ($P<0.05$)

3.2.2 土壤有效磷

土壤有效磷指可被植物直接吸收的磷素,主要包括水溶性磷、弱酸溶性磷及少量小分子有机磷。由表 4 可以看出,退化均导致春季和夏季 0—10 cm 土层有效磷含量升高,相比 FG,土壤有效磷含量春季 LD、MD、SD 分别升高了 16.67%、36.67%、3.33%,夏季分别升高了 4.35%、26.09%、4.35%,但夏季 FG、LD、SD 三个阶段差异不显著 ($P>0.05$)。夏季 10—20 cm 土层则表现出 LD 和 MD 显著降低,SD 与 FG 差异不显著 ($P>0.05$),20—30 cm 土壤 4 个阶段高寒草甸差异不显著 ($P>0.05$)。相比春季,夏季土壤有效磷含量整体呈下降趋势,FG、LD、MD 和 SD 0—10 cm 土层有效磷含量依次下降 23.3%、29.6%、29.8%、22.3%。春季和夏季均表现出随土层深度增加,4 个阶段高寒草甸土壤有效磷含量逐渐降低。

表 4 东祁连山 2021 年高寒草甸不同退化阶段土壤有效磷含量/(mg/kg)

Table 4 Soil available phosphorus content of different alpine meadow phases in eastern Qilian Mountains in 2021

高寒草甸退化阶段 Degraded alpine meadow phases	土层 Soil depth/cm	春季 Spring	夏季 Summer	高寒草甸退化阶段 Degraded alpine meadow phases	土层 Soil depth/cm	春季 Spring	夏季 Summer
FG	0—10	30±0Cab	23±0Ba	MD	0—10	41±0Aa	29±0Aa
	10—20	29±0Cab	21±0Ab		10—20	38±0Ab	17±0Bc
	20—30	27±0Bb	18±0Bc		20—30	31±0Ac	19±0ABb
LD	0—10	35±0Ba	24±0Ba	SD	0—10	31±0Ca	24±0Ba
	10—20	36±0Ba	18±0Bb		10—20	27±0Cb	21±0Ab
	20—30	34±1Aa	18±0Bb		20—30	27±1Bb	19±0Ac

3.2.3 土壤微生物量磷和碱性磷酸酶活性

由图 1 可以看出,退化导致春季 3 个土层微生物量磷含量均明显降低(图 1),SD 的土壤微生物量磷含量极低,表层不足 10 mg/kg。夏季 4 个阶段高寒草甸表层土壤微生物量磷差异不显著 ($P>0.05$),但退化导致下

层土壤微生物量含量明显降低(图2)。春季和夏季4个阶段高寒草甸土壤微生物量磷均表现出随土壤深度增加而降低的规律。

退化导致土壤碱性磷酸酶活性整体呈上升趋势,随退化程度加剧,春季0—10 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性变化规律为 MD>FG>LD>SD(图3),LD 与 FG 差异不显著($P>0.05$)。夏季0—10 cm 土层 SD 的土壤碱性磷酸酶活性最高,其它3个高寒草甸阶段之间差异不显著($P>0.05$),夏季基本表现出下层土壤的碱性磷酸酶活性高于表层(图4)。

3.3 高寒草甸不同退化阶段植物/土壤磷素与植被地上生物量关系

土壤磷素特征与高寒草甸植被特征的相关分析表明,土壤有效磷与土壤全磷含量呈极显著负相关,相关系数达-0.909,而地上部生物量干重与土壤全磷含量呈极显著正相关,与土壤碱性磷酸酶活性呈显著负相关,土壤微生物量磷与土壤碱性磷酸酶活性呈显著负相关。植被地上部磷含量与土壤各磷素特征指标之间未表现出相关性(表5)。

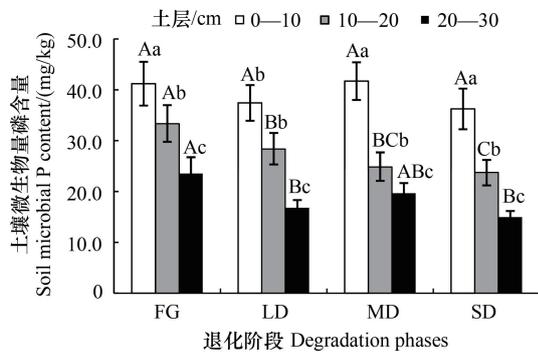


图2 东祁连山2021年夏季高寒草甸不同退化阶段土壤微生物量磷含量

Fig.2 Soil microbial phosphorus content of different alpine meadow degradation phases in summer in eastern Qilian Mountains in 2021

4 讨论与结论

4.1 退化对高寒草甸植被特征的影响

植被特征研究表明,随着退化程度加剧,高寒草甸生产力明显降低,这与已有的研究结果一致^[25-26],重度退化高寒草甸地上植物生物量仅为35.93%。与FG相比,三个不同退化阶段高寒草甸地上部磷全磷含量显著降低,磷是对放牧家畜较为重要的生命支持元素,退化后高寒草甸植物磷含量降低到0.25%左右,仅为为封草地的60%,处于较低水平,表明高寒草甸退化后草地放牧利用价值降低。草本植物随退化程度加剧正常生长发育受到抑制,物质平衡受到破坏,草群组成结构改变^[27],低矮稀疏,盖度减少,产草量下降,优良牧草量和物

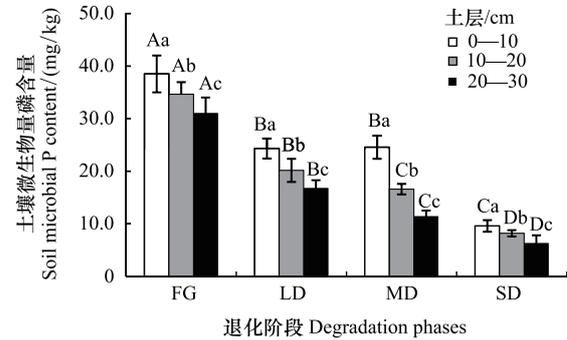


图1 东祁连山2021年春季高寒草甸不同退化阶段土壤微生物量磷含量

Fig.1 Soil microbial phosphorus content of different alpine meadow degradation phases in spring in eastern Qilian Mountains in 2021

FG: 围封草地; LD: 轻度退化高寒草甸; MD: 中度退化高寒草甸; SD: 重度退化高寒草甸; 图中柱子上不同大写字母表示同一土层不同高寒草甸阶段之间的显著性($P<0.05$),小写字母表示同一高寒草甸不同土层之间的显著性($P<0.05$)

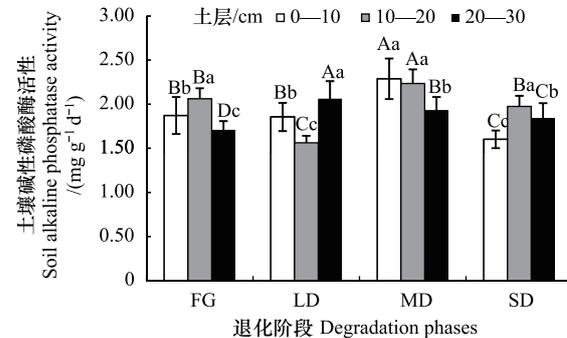


图3 东祁连山2021年春季高寒草甸不同退化阶段土壤碱性磷酸酶活性

Fig.3 Soil alkaline phosphatase activity of different alpine meadow degradation phases in spring in eastern Qilian Mountains in 2021

种数以及草的养分含量下降明显^[28]。有研究也表明,放牧降低了植物的群落的磷含量^[29],而不放牧有利于磷在草地生态系统内的周转^[30],从本研究来看,围封对于高寒草甸植物磷素的恢复和提升具有重要作用,另一方面,在退化高寒草甸的恢复过程中土壤磷素的投入较为必要。

4.2 退化对高寒草甸土壤磷素特征的影响

磷是植物生长所必需的营养元素,土壤是植物磷营养的主要来源,一般认为高寒草地植被与土壤退化二者互为因果^[31]。本研究中土壤磷素特征的研究表明,高寒草甸退化总体导致表层土壤的全磷、有效磷含量升高,轻度退化表现尤为明显。王小燕等^[32]在甘南高寒草甸的研究也表明土壤有效磷含量随退化程度的加剧而增加,这可能是由于退化后草地植被盖度降低,植物对有效磷的吸收减少所致^[33],而本研究中夏季土壤的有效磷含量低于春季,也正是由于夏季相对植物旺盛生长,退化高寒草甸杂草较多,对土壤磷的吸收利用所致。

也有在青藏高原退化高寒草甸草原的研究表明退化对土壤全磷和有效磷影响不大^[34],因此,高寒气候特征下,退化对土壤磷素的影响可能与草地类型以及植被群落结构有关。退化导致春季土壤微生物量磷含量明显降低,而夏季4个阶段高寒草甸表层土壤微生物量磷差异不显著,但下层土壤微生物磷含量明显降低。土壤微生物量磷是土壤磷素养分的活性部分^[35],随着草地退化程度加剧,由于植被覆盖减少,风蚀等过程造成表层土壤粘粒损失,不利于土壤微生物的生长^[36],但夏季由于气温升高,有可能造成表层土壤微生物数量短暂性的增加^[37],此外,草地退化后土壤酸碱性的改变有利于提高微生物碳利用效率,从而提高微生物的数量^[38]。本研究中退化对土壤碱性磷酸酶的影响不明显,但在中度和重度退化程度有上升的趋势。土壤碱性磷酸酶是植物与土壤磷素之间相互联系的关键纽带,但其活性受外界环境因素影响较大^[39],有研究也表明高寒草甸土壤碱性磷酸酶活性与土壤 pH 呈正相关^[40],因此,高寒草甸退化对碱性磷酸酶的作用机理还有待于对土壤酸碱性等环境因子的进一步研究。

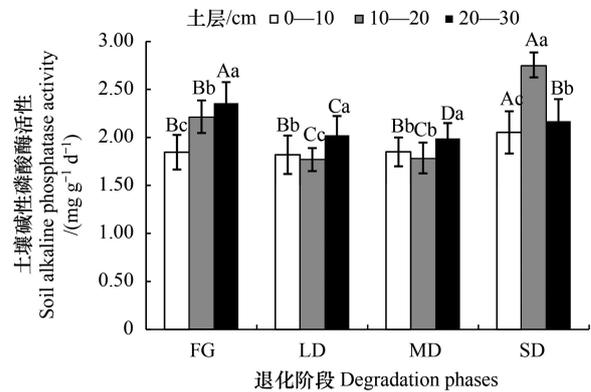


图4 东祁连山2021年夏季高寒草甸不同退化阶段土壤碱性磷酸酶活性

Fig.4 Soil alkaline phosphatase activity of different alpine meadow degradation phases in summer in eastern Qilian Mountains in 2021

表5 高寒草甸土壤磷素特征与植被特征的相关系数

Table 5 Correlated coefficient between soil phosphorus and vegetation characteristics

指标 Items	土壤全磷 Soil total P	土壤有效磷 Soil available P	土壤碱性 磷酸酶活性 Soil alkaline phosphatase activity	土壤微 生物量磷 Soil microbial P	地上部 磷含量/% Above-ground P content	地上部生物 量干重/(g/m ²) Above-ground dry weight
土壤全磷 Soil total P	1					
土壤有效磷 Soil available P	-0.909 **	1				
土壤碱性磷酸酶活性 Soil alkaline phosphatase activity	-0.369	0.160	1			
土壤微生物量磷 Soil microbial P	-0.126	0.259	-0.743 *	1		
地上部磷含量 Above-ground P content	-0.117	0.479	-0.075	0.179	1	
地上部生物量干重 Above-ground dry weight	0.813 **	-0.620	-0.760 *	0.225	-0.026	1

** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关 (n=36)

4.3 退化高寒草甸植物土壤磷素与植被地上生物量关系

本研究中,植被地上部干重与土壤全磷含量呈极显著正相关,与土壤碱性磷酸酶活性呈显著负相关,土壤

全磷是土壤磷素的库容,是植物生态系统生物量积累的基础,退化后土壤碱性磷酸酶的升高趋势可能是植被地上部干重降低的原因。土壤微生物量磷含量与碱性磷酸酶活性呈显著负相关,这可能是由于退化而引起的植被物种组成变化以根系分泌物等方式改变了土壤 pH,从而影响土壤酶活性^[41]。植被地上部磷含量与土壤磷素特征指标以及植被地上部干重之间无显著相关性,表明土壤磷素含量不是植物地上部磷素含量降低的原因,植被地上部磷含量也不是高寒草甸退化后植被地上部干重降低的原因。根据本研究植被调查的情况,植被地上部磷含量的降低可能与植物组成的变化有关,退化后杂草增多,杂草普遍具有较强的土壤养分适应性,吸收较少的养分就能正常生长^[42],造成草地植被磷素含量整体降低,草地的放牧利用价值降低,其规律和机制还有待进一步研究。

综上所述,东祁连山高寒草甸退化导致植被地上生物和磷含量急剧下降,重度退化草地牧草干重仅是围封草地的 35.93%,退化高寒草甸地上部磷含量仅为围封草地的 60%。退化导致高寒草甸表层土壤的全磷、有效磷含量升高,相比 FG,土壤有效磷含量春季 LD、MD 和 SD 分别升高了 16.67%、36.67% 和 3.33%,夏季分别升高了 4.35%、26.09% 和 4.35%,且有效磷含量具有夏季低于春季的季节差异性。退化导致土壤微生物量磷含量明显降低,而对碱性磷酸酶活性影响没有明显的规律性,但围封草地夏季碱性磷酸酶活性高于春季。牧草干重与土壤全磷含量呈极显著正相关,与土壤碱性磷酸酶活性呈显著负相关,但牧草磷含量与土壤磷素特征指标未表现出显著相关性。

参考文献(References):

- [1] 曹广民, 张金霞, 鲍新奎, 周党卫. 高寒草甸生态系统磷素循环. 生态学报, 1999, 19(4): 514-518.
- [2] Stutter M I, Shand C A, George T S, Blackwell M S A, Dixon L, Bol R, MacKay R L, Richardson A E, Condon L M, Haygarth P M. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma*, 2015, 257/258: 29-39.
- [3] Malik M A, Marschner P, Khan K S. Addition of organic and inorganic P sources to soil - Effects on P pools and microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49: 106-113.
- [4] 吴雯, 郑子成, 李廷轩. 退耕植茶地土壤团聚体中有机磷组分分布特征. 山地学报, 2017, 35(4): 459-468.
- [5] 余卫, 张莉, 王启兰. 青藏高原金露梅灌丛草甸土壤质量的微生物学特征. 草地学报, 2016, 24(6): 1248-1253.
- [6] 张震. 草地植物与土壤磷库对施肥和围封的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [7] 张建贵, 王理德, 姚拓, 李海云, 高亚敏, 胡彦婷, 兰晓君, 周彤. 东祁连山不同退化草地植物群落特征与土壤养分特性. 水土保持学报, 2019, 33(1): 227-233.
- [8] 高雪峰, 韩国栋. 利用强度对草原土壤酶活性和养分影响的动态研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(4): 166-170.
- [9] Lu X Y, Yan Y, Sun J, Zhang X K, Chen Y C, Wang X D, Cheng G W. Carbon, nitrogen, and phosphorus storage in alpine grassland ecosystems of Tibet: effects of grazing exclusion. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(19): 4492-4504.
- [10] 罗为检, 王克林, 刘明. 土地利用及其格局变化的环境生态效应研究进展. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 150-152.
- [11] Maharjan M, Marangui D, Kuzyakov Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 87: 17-24.
- [12] 赵京东, 宋彦涛, 徐鑫磊, 乌云娜. 水肥添加对辽西北农牧交错带羊草人工草地牧草品质的影响. 中国草地学报, 2022, 44(4): 85-94.
- [13] 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.
- [14] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 马玉寿. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究. 土壤通报, 2010, 41(2): 263-269.
- [15] 王婷, 花蕊, 楚彬, 周睿, 叶国辉, 牛钰杰, 唐庄生, 花立民. 高寒草原退化对植物群落及土壤理化性质的影响. 草原与草坪, 2019, 39(4): 65-71.
- [16] 马源, 张德罡, 周恒, 周会程, 陈建纲. 高寒草甸退化对优势物种根际土壤微生物量及酶活性的影响. 草原与草坪, 2019, 39(4): 44-52.
- [17] 李亚娟, 曹广民, 龙瑞军. 青海省海北州不同草地利用方式土壤基本理化性状研究. 草地学报, 2012, 20(6): 1039-1043, 1050.
- [18] 李建宏, 李雪萍, 卢虎, 姚拓, 王理德, 郭春秀, 师尚礼. 高寒地区不同退化草地植被特性和土壤固氮菌群特性及其相关性. 生态学报, 2017, 37(11): 3647-3654.
- [19] Gos P, Loucougaray G, Colace M P, Arnoldi C, Gaucherand S, Dumazel D, Girard L, Delorme S, Lavorel S. Relative contribution of soil, management and traits to co-variations of multiple ecosystem properties in grasslands. *Oecologia*, 2016, 180(4): 1001-1013.

- [20] 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.
- [21] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1984, 16(2): 169-175.
- [22] 张德罡, 马玉秀. 草原土壤速效磷测定方法的比较. *草业科学*, 1995, 12(3): 70-72.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 65-73.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 杨文才, 吴新宏, 石红霄, 李鹏, 丁勇. 基于 TWINSPAN 分类的三江源区称多县高寒草甸退化研究. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(6): 139-143.
- [26] 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.
- [27] 柳小妮, 孙九林, 张德罡, 蒲小鹏, 徐广平. 东祁连山不同退化阶段高寒草甸群落结构与植物多样性特征研究. *草业学报*, 2008, 17(4): 1-11.
- [28] 贺凤鹏, 曾文静, 王墨迪, 曾辉, 王妮. 温带草原退化对土壤剖面微生物学特征的影响. *微生物学通报*, 2016, 43(3): 702-711.
- [29] Niu K C, He J S, Zhang S T, Lechowicz M J. Tradeoffs between forage quality and soil fertility: lessons from Himalayan rangelands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 234: 31-39.
- [30] 李红琴, 毛绍娟, 祝景彬, 杨永胜, 贺慧丹, 李英年. 放牧强度对高寒草甸群落碳氮磷化学计量特征的影响. *草业科学*, 2017, 34(3): 449-455.
- [31] 蒋永梅, 师尚礼, 田永亮, 卢虎, 李海云, 李建宏, 兰晓君, 姚拓. 高寒草地不同退化程度下土壤微生物及土壤酶活性变化特征. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 244-249.
- [32] 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.
- [33] 唐春梅, 程胜高, 谢作明. 土壤藻改良退化草地对土壤酶活性的影响. *环境科学与技术*, 2018, 41(2): 20-25.
- [34] 李亚娟, 曹广民, 龙瑞军, 姚拓. 三江源区土地利用方式对草地植物生物量及土壤特性的影响. *草地学报*, 2016, 24(3): 524-529.
- [35] Xu X F, Thornton P, Post W. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22: 737-749.
- [36] 詹天宇, 侯阁, 刘苗, 孙建, 付顺. 青藏高原不同退化梯度高寒草地植被与土壤属性分异特征. *草业科学*, 2019, 36(4): 1010-1021.
- [37] Chersich S, Rejšek K, Vranová V, Bordoni M, Meisina C. Climate change impacts on the alpine ecosystem; an overview with focus on the soil. *Journal of Forest Science*, 2016, 61(No. 11): 496-514.
- [38] Sinsabaugh R, Turner B L, Talbot J M, Waring B, Powers J, Kuske C, Moorhead D, Shah J. Stoichiometry of microbial carbon use efficiency in soils. *Ecological Monographs*, 2016, 86: 172-189.
- [39] Fan Z Z, Wang X, Wang C, Bai E. Effect of nitrogen and phosphorus addition on soil enzyme activities: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1266-1272.
- [40] 李邵宇, 孙建, 王毅, 秦小静, 叶冲冲. 青藏高原不同退化梯度草地土壤酶活性特征. *草业科学*, 2020, 37(12): 2389-2402.
- [41] 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.
- [42] 李静. 大豆和反枝苋生物量及养分积累对季节性干旱的响应[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.