

高寒草地退化对土壤碳氮磷及酶活性的影响

李亚娟¹, 刘艳君¹, 徐长林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, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省林业科技推广站, 甘肃 兰州 730046)

摘要:【目的】土壤碳氮磷元素是支撑高寒草地生态系统的关键, 高寒草甸退化会改变土壤养分含量及分布规律, 明确高寒草甸退化对土壤关键养分碳氮磷含量及其与酶活性之间相关性的影响可为退化高寒草甸的恢复提供理论依据。【方法】以东祁连山围封草地(FG)为对照, 对轻度(LD)、中度(MD)和重度(SD)退化高寒草甸土壤有机碳、全氮、有效氮、全磷、有效磷含量, 以及土壤碳氮磷转化相关的过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶活性进行研究。【结果】相比FG, 退化基本导致高寒草甸土壤的有机碳含量升高, SD 0~10 cm 土层有机碳含量最高, 为 82.1 g/kg; 退化导致过氧化氢酶活性表现出下降的趋势, 围封草地 20~30 cm 土层的过氧化氢酶活性最高, 为 23.35 mg/g, LD 10~20 cm 土层的过氧化氢酶活性最低, 为 20.90 mg/g。退化导致土壤全氮含量降低, 有效氮含量和脲酶活性显著升高, SD 草地有效氮含量和脲酶活性均最高, 分别为 649 mg/k 和 3.47 mg/g, 脲酶活性在 FG 和 SD 随土层加深而升高, 但在 MD 和 SD 随土层加深而降低。4 种类型草地全磷的变化范围为 0.18~0.22 g/kg, 退化对 0~10 cm 土层的全磷含量没有显著影响, 而使 0~10 cm 土层, LD 和 MD 的有效磷含量分别增加了 152% 和 60%, 而 SD 降低了 32%, 0~30 cm 土层碱性磷酸酶活性升高, 变化范围为 0.52~0.62 mg/g。相关性分析表明, 围封草地土壤有机碳与过氧化氢酶活性呈显著负相关, 而轻度和重度退化未表现出有相关性; 围封草地土壤全氮、有效氮含量与脲酶活性均没有相关性, 而轻度和中度退化高寒草甸的脲酶活性与土壤有效氮含量存在显著正相关性; 围封草地的土壤全磷、有效磷含量与碱性磷酸酶活性均成呈显著正相关, 而退化草地未表现出明显的相关性。【结论】高寒草甸退化后改变了其关键养分与其相关酶活性之间的相关性, 重度退化高寒草甸恢复中应考虑土壤磷素的投入。

关键词: 草地退化; 高寒草甸; 土壤碳; 土壤氮; 土壤磷; 土壤酶活性

中图分类号: S512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)03-0010-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2024.03.002



高寒草地生态系统由于所处地理位置较为特殊, 对外界的干扰较为敏感^[1]。近年来由于气候和人类活动的影响, 高寒草地发生了退化, 造成植被减少、土壤肥力下降、水土流失和毒杂草增加^[2]。高寒草地生态

系统脆弱, 抗干扰能力差, 植被一旦遭受破坏, 靠其自然恢复不仅周期长, 而且极为困难^[3-5]。祁连山是我国西部重要的生态安全屏障, 是冰川与水源涵养国家重点生态功能区, 具有维护青藏高原生态平衡, 维持河西走廊绿洲稳定, 以及保障黄河和内陆河径流补给的重要功能。近年来由于自然和人为的原因, 祁连山区高寒草地出现了不同程度的退化^[6-7]。因此, 当前祁连山区高寒草地保护和退化草地恢复引起人们的广泛关注^[8]。

土壤碳氮磷元素是支撑草地生态系统的关键, 草地植被的变化随之会使土壤碳氮磷的含量发生响应

收稿日期: 2022-04-25; **修回日期:** 2022-07-12

基金资助: 甘肃省高等学校创新能力提升项目(2019B-071); 甘肃省草原生态修复治理科技支撑项目(2021)

作者简介: 李亚娟(1981-), 女, 甘肃庆阳人, 副教授, 研究方向为草地土壤化学。

E-mail: liyj@gsau.edu.cn

性的变化,而变化的土壤营养物质含量又会反过来影响植被^[9]。土壤酶活性能够反映土壤的营养物质储量和生物化学反应的方向、强度^[10]。土壤过氧化氢酶可以加快过氧化氢分解为水和氧气的速率,它可以表示土壤氧化过程的强度,所以过氧化氢酶活性与土壤有机质转化速度密切相关^[11],脲酶酶促反应产物氨是植物的氮源之一,其活性反映土壤有机态氮向有效态氮的转化能力和土壤无机氮的供应能力^[12],土壤磷酸酶是催化土壤中磷酸单酯和磷酸二酯水解的酶,它能将有机磷酸酯水解为可供植物吸收无机磷酸^[13]。因此,一般情况下,人们认为过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性与草地生态系统的碳氮磷水平密切相关。有研究表明,随着草地退化的加剧,土壤碳氮磷等养分含量降低^[14-15],有研究也表明退化草地土壤植物协同作用降低,土壤微生物少,酶活性低^[16],但也有研究表明,高寒草地退化导致土壤有效氮含量升高,退化对土壤养分的影响与退化阶段和程度有关^[17]。由此可见,退化对高寒草地养分的影响较为复杂,退化高寒草地土壤养分空间分布的异质性较大^[18],也与放牧管理措施有着很大的联系^[19],在高寒草地退化的情况下,土壤关键养分与其相关酶活性的关系是否还与未

退化的情况一致值得关注。因此,本研究以多年围封高寒草甸为对照,对不同退化程度高寒草甸土壤碳、氮、磷含量以及与土壤碳氮磷含量相关的过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性进行分析,旨在明确不同退化程度高寒草地土壤中主要养分含量及酶活性变化规律,揭示高寒草地退化对土壤主要养分与酶活性相关性的效应,为高寒草地土壤生产力评价及草地退化管理制度策略制定等方面提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于在东祁连山甘肃农业大学高山草原试验站附近封育和退化高寒草甸,地理位置37°40' N, 102°32' E,该地区年降水量424.5 mm,年均温0.8℃,1月和7月平均气温分别为-10.8℃和12.4℃。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,pH值7.8左右。2019年7月选择典型的围封草地(FG)、轻度退化草地(LD)、中度退化草地(MD)和重度退化草地(SD)4种类型天然草地,不同退化程度高寒草甸参考国家标准(GB19377-2003)^[20]进行划分。每个样地面积约5 hm²,样地基本情况见表1。

表1 试验样地概况

Table 1 General situation of different grassland types

草地类型	地理位置	海拔高度/m	坡度/°	草地植被状况
围封草地 (FG)	37°11.949' N, 102°46.677' E	2 909		2016年开始未放牧,植被以扁蓿豆(<i>Melissilus ruthenicus</i>)、珠芽蓼(<i>Polygonum viviparum</i>)、披碱草(<i>Elymus nutans</i>)、唐松草(<i>Thalictrum aquilegi folium</i>)、苔草(<i>Carex</i> spp.)、早熟禾(<i>Poa pratensis</i>)、银莲花(<i>Anemone cathayensis</i>)为主,盖度100%,草高30 cm。
	37°11.929' N, 102°46.645' E	2 908	0	
	37°11.904' N, 102°46.657' E	2 909		
轻度退化草地 (LD)	37°11.773' N, 102°46.894' E	2 909		唐松草、银莲花,盖度70%。
	37°11.780' N, 102°46.881' E	2 906	0	
	37°11.800' N, 102°46.845' E	2 906		
中度退化草地 (MD)	37°12.089' N, 102°46.632' E	2 914		唐松草、麻花苳(<i>Gentiana straminea</i>)、球花蒿(<i>Artemisia smithii</i>)、披碱草、棘豆(<i>Oxytropis ochrocephala</i>)、银莲花和毛茛(<i>Ranunculus japonicus</i>),盖度50%。
	37°12.066' N, 102°46.609' E	2 916	10	
	37°11.998' N, 102°46.669' E	2 916		
重度退化草地 (SD)	37°12.061' N, 102°46.735' E	2 914		银莲花、唐松草、球花蒿、毛茛、麻花苳、披碱草、棘豆,盖度30%。
	37°12.102' N, 102°46.656' E	2 917	5	
	37°12.035' N, 102°46.767' E	2 907		

1.2 土壤样品采集与处理

于2019年7月10日牧草生长季在不同类型高寒草地样地用土钻、采用S采样法分3个土层(0~10、10~20、20~30 cm)采集土壤样品,每个样地按地块形状分为3个采样区,样区面积100 m²左右,间距100 m左右,为3个重复,每个采样区采用S曲线法采集5个样点,同一采样区相同土层的土壤样品混合在一起,5个样点采集结束后用四分法分取1 kg左右的土壤样品,带回实验室。对所采样品进行风干,过1 mm和0.25 mm筛,分类整理,编号备用。

1.3 测定方法

土壤有机质含量采用重铬酸钾容量-外加热法;土壤全氮含量采用浓硫酸加催化剂消煮,凯氏定氮法测定,土壤有效氮含量采用碱解扩散法测定;土壤全磷含量采用HClO₄-H₂SO₄消煮,钼锑抗比色法测定,土壤有效磷含量采用NaHCO₃提取,钼锑抗比色法测定^[21]。

采用过1 mm筛的风干样进行酶活性的测定。土壤过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定,土壤脲酶采用苯酚一次氯酸钠比色法测定,土壤碱性磷酸酶采用0.5%磷酸苯二钠比色法^[22]。土壤酶活性实验室分析测试每个样品均重复6次。

1.4 数据处理

数据采用Excel 2007整理,采用SPSS 25.0软件进行相同土层不同草地类型和同一草地类型不同土层之间进行单因素方差分析(One-way ANOVA),差异显著性($P=0.05$)用Duncan法进行多重比较,采用Pearson法对主要碳氮磷含量与其对应酶活性之间进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸退化对土壤有机碳含量及过氧化氢酶活性的影响

除LD 10~20 cm和MD 0~10 cm土层外,退化均导致土壤有机碳含量升高,FG 0~10 cm土层的有机碳含量为46.8 g/kg,而SD为82.1 g/kg。退化导致3个土层土壤过氧化氢酶活性总体表现出下降的趋势,但是表层差异不显著,表层和下层土壤的差异也很小,最高值为FG 20~30 cm土层的23.35 mL/g,最低为LD 10~20 cm土层的20.90 mL/g(表2)。

在4种类型高寒草地中,FG有机碳表现出随土层深度增加逐渐降低,但过氧化氢酶活性则表现出增加的规律。3种退化草地的有机碳也表现出随土层深度增加逐渐降低,但LD和SD的过氧化氢酶活性则表现出10~20 cm降低,20~30 cm土层又升高。表明退化

表2 不同类型高寒草甸土壤有机碳含量和过氧化氢酶活性

Table 2 Soil organic C content and catalase activity of different soil depth under different grassland types

草地类型	土层/cm	有机碳/(g·kg ⁻¹)	过氧化氢酶活性/(ml·g ⁻¹)
FG	0~10	46.8±2.2 ^{cA}	22.93±0.08 ^{aB}
	10~20	39.5±3.1 ^{cB}	23.22±0.07 ^{aA}
	20~30	26.2±3.2 ^{dC}	23.35±0.14 ^{aA}
LD	0~10	48.3±4.4 ^{bA}	21.69±0.11 ^{aA}
	10~20	39.3±2.4 ^{cB}	20.90±0.37 ^{cB}
	20~30	35.2±3.4 ^{cC}	21.71±0.01 ^{cA}
MD	0~10	46.5±1.6 ^{cA}	21.46±0.05 ^{aB}
	10~20	40.1±3.2 ^{bb}	21.52±0.12 ^{bb}
	20~30	36.5±2.5 ^{bc}	21.76±0.05 ^{cA}
SD	0~10	82.1±5.6 ^{aA}	22.53±0.10 ^{aA}
	10~20	42.9±3.2 ^{aB}	21.04±0.34 ^{bb}
	20~30	37.8±2.7 ^{aC}	22.85±0.10 ^{aA}

注:FG 围封草地,LD 轻度退化草地,MD 中度退化草地,SD 重度退化草地。大写字母表示同一草地类型不同土层的差异显著性;小写字母表示不同草地类型同一土层的差异显著性,下同。

改变了过氧化氢酶活性在土壤剖面中的表现状态。

对4种不同类型高寒草地表层土壤有机碳与土壤过氧化氢酶活性的相关性分析表明,围封草地表层土壤有机碳与过氧化氢酶活性之间具有很强的负相关性,相关系数为 $-0.986(P<0.01)$,中度退化草地表层土壤的相关系数为 $-0.854(P<0.05)$,而LD和SD的土壤有机碳含量与过氧化氢酶活性均未表现出相关性,尤其是SD,相关系数仅为 -0.264 (表3)。

2.2 高寒草甸退化对土壤氮素含量和脲酶活性的影响

退化导致3个土层全氮含量均降低(表4),0~10 cm土层,LD、MD、SD的土壤全氮含量分别比FG降低了28%、9%和55%,10~20 cm土层分别降低了25%、35%和49%,20~30 cm土层分别降低了29%、43%和54%。而退化导致0~10 cm和10~20 cm土

层高寒草地有效氮含量显著升高($P<0.05$),0~10 cm土层,LD、MD、SD的土壤有效氮含量比FG分别增加了15.8%、10.1%和33.3%。除LD 0~10 cm土层,退化导致土壤脲酶活性均逐渐升高,差异显著($P<0.05$),FG的0~10 cm土层为 $1.26 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$,SD为 $3.47 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$,FG的10~20 cm土层为 $1.51 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$,SD为 $2.60 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 。

同一草地类型,10~20 cm土层中全氮含量最高,而有效氮含量0~10 cm土层最高,并随着土层加深逐渐降低。FG和LD的土壤脲酶活性表现出随土层加深逐渐升高,而MD和SD则表现出随土层加深逐渐降低的规律。表明退化未改变土壤全氮和有效氮的剖面分布规律,但对脲酶活性的剖面分布规律具有一定的影响。

表3 不同类型高寒草甸土壤有机碳和过氧化氢酶活性的相关性

Table 3 The correlation coefficients between soil organic C content and catalase activity

变量	土壤有机碳				
	FG	LD	MD	SD	
过氧化氢酶活性	FG	-0.986^{**}	0.725	-0.845	-0.744^*
	LD	-0.231	-0.640	0.479	-0.715
	MD	0.286	-0.939^{**}	0.854 [*]	-0.269
	SD	0.291	-0.940^{**}	0.857	-0.264

注:**表示在0.01水平相关性极显著,*表示在0.05水平相关性显著,下同。

表4 不同类型高寒草甸土壤氮素含量和脲酶活性

Table 4 Soil nitrogen content and urease activity of different soil depth under different grassland types

草地类型	土层/cm	土壤全氮/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	土壤有效氮/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	土壤脲酶活性/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$
FG	0~10	2.2 ± 0.1^{ab}	487 ± 2^{dA}	1.26 ± 0.05^{cC}
	10~20	2.9 ± 0.2^{aA}	426 ± 0^{dB}	1.51 ± 0.17^{bB}
	20~30	2.8 ± 0.1^{aA}	412 ± 1^{cC}	1.79 ± 0.05^{bA}
LD	0~10	1.6 ± 0.3^{cC}	564 ± 1^{bA}	1.05 ± 0.05^{dB}
	10~20	2.2 ± 0.2^{bA}	480 ± 1^{bB}	1.58 ± 0.17^{bA}
	20~30	2.0 ± 0.2^{bB}	326 ± 2^{dC}	1.62 ± 0.16^{bA}
MD	0~10	2.0 ± 0.1^{bA}	536 ± 1^{cA}	2.78 ± 0.03^{bA}
	10~20	1.9 ± 0.3^{aA}	471 ± 1^{cB}	2.37 ± 0.13^{aB}
	20~30	1.6 ± 0.2^{bB}	439 ± 0^{cC}	1.93 ± 0.25^{aC}
SD	0~10	1.0 ± 0.1^{dC}	649 ± 1^{aA}	3.47 ± 0.11^{aA}
	10~20	1.5 ± 0.1^{dA}	492 ± 2^{aB}	2.60 ± 0.25^{bB}
	20~30	1.3 ± 0.2^{dB}	423 ± 1^{bC}	1.88 ± 0.05^{aC}

相关性分析表明(表5),LD和MD的脲酶活性与土壤有效氮含量存在显著正相关性,相关系数分别为 $0.682(P<0.05)$ 和 $0.898(P<0.01)$,SD的脲酶活性

与土壤全氮含量存在显著正相关性,相关系数为 $0.897(P<0.01)$,而FG的脲酶活性与土壤全氮、有效氮含量均不存在显著的相关性。

表5 不同类型高寒草甸土壤氮素和脲酶活性的相关性

Table 5 The correlation coefficients between soil nitrogen content and urease activity

变量	土壤全氮				土壤有效氮				
	FG	LD	MD	SD	FG	LD	MD	SD	
脲酶活性	FG	0.505	0.183	0.195	0.901**	0.495	0.678	0.895**	-0.495
	LD	-0.500	-0.189	-0.189	-0.899**	-0.500	0.682*	-0.893**	0.500
	MD	0.510	0.177	0.201	0.904**	0.490	0.673	0.898**	-0.490
	SD	0.498	0.192	0.186	0.897**	0.502	0.684	0.891**	-0.502

2.3 高寒草甸退化对土壤磷素含量和碱性磷酸酶活性的影响

退化对表层土壤的全磷含量没有显著影响(表6),4种类型草地全磷含量的变异范围为0.18~0.22 g/kg。土壤有效磷含量表现出在LD和MD升高,SD降低,相比FG,0~10 cm土层,LD和MD的有效磷含量分别增加了152%和60%,而SD的有效磷含量降低了32%;10~20 cm土层LD和MD分别增加了42%和71%,SD降低了25%;20~30 cm土层LD和MD分

别增加了20%和4%,而SD降低了28%。退化导致3个土层碱性磷酸酶活性升高,变化范围为0.52~0.62 mg/(g·d)。

FG的土壤全磷和有效磷含量在3个土层之间差异不显著,而退化草地全磷和有效磷含量随着土层深度的增加而降低,但SD的有效磷含量在3个土层之间差异不显著,除MD表现出随土层深度的增加土壤碱性磷酸酶活性降低,其它3种草地类型均表现出随土层深度的增加而升高的规律。

表6 不同类型高寒草甸土壤磷素和碱性磷酸酶活性

Table 6 Soil phosphorus content and urease activity of different soil depth under different grassland types

草地类型	土层/cm	土壤全磷/(g·kg ⁻¹)	土壤有效磷/(mg·kg ⁻¹)	土壤碱性磷酸酶活性/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
FG	0~10	0.18±0.00 ^{aA}	25±1 ^{cA}	0.52±0.01 ^{bB}
	10~20	0.20±0.02 ^{aA}	24±0 ^{bA}	0.50±0.01 ^{cB}
	20~30	0.19±0.01 ^{bA}	25±1 ^{abA}	0.54±0.01 ^{cA}
LD	0~10	0.20±0.01 ^{aA}	63±4 ^{aA}	0.53±0.02 ^{bB}
	10~20	0.15±0.02 ^{bB}	34±1 ^{aB}	0.54±0.00 ^{b^{AB}}
	20~30	0.10±0.01 ^{cB}	30±1 ^{aB}	0.56±0.01 ^{b^{cA}}
MD	0~10	0.21±0.00 ^{aA}	40±1 ^{bA}	0.58±0.01 ^{aA}
	10~20	0.10±0.01 ^{bB}	41±2 ^{aA}	0.50±0.00 ^{cC}
	20~30	0.12±0.01 ^{aB}	26±4 ^{abB}	0.57±0.01 ^{b^B}
SD	0~10	0.22±0.01 ^{aA}	17±0 ^{dA}	0.59±0.02 ^{aC}
	10~20	0.09±0.01 ^{bB}	18±3 ^{bA}	0.61±0.01 ^{a^{BC}}
	20~30	0.07±0.00 ^{cC}	18±2 ^{bA}	0.62±0.01 ^{aA}

表层土壤FG的碱性磷酸酶活性与全磷、有效磷含量成显著正相关,相关系数分别达0.957($P<0.05$)和0.999($P<0.01$),3种退化草地种只有MD的碱性磷酸酶活性与全磷和有效磷含量均呈显著负相关($P<0.05$),LD和SD的磷素和碱性磷酸酶活性之间没有明显的相关性(表7)。与FG相比,退化也改变了土壤磷素含量与碱性磷酸酶活性之间的相关性。

3 讨论

3.1 高寒草甸退化对土壤碳氮磷含量的影响

土壤有机碳是衡量土壤肥力、草地生态系统物质循环的关键指标^[23]。本研究表明,4种类型高寒草甸土壤有机碳含量均较高,整体上,退化导致土壤有机碳含量升高,重度退化草地的有机碳含量最高,这可

表7 不同类型高寒草甸土壤磷素和碱性磷酸酶活性的相关系数

Table 7 The correlation coefficients between soil phosphorus content and alkaline phosphatase activity

变量	土壤全磷				土壤有效磷				
	FG	LD	MD	SD	FG	LD	MD	SD	
土壤碱性磷酸酶活性	FG	0.957*	-0.408	-0.999*	-0.730	0.999**	0.394	-0.789	-0.587
	LD	-0.975	0.342	1.000*	0.680	1.000*	-0.327	0.744	0.643
	MD	0.971	-0.359	-1.000**	-0.693	-1.000**	0.345	-0.756*	-0.629
	SD	0.992	-0.250	-0.993	-0.606	-0.993	0.235	-0.676	-0.714

能是由于退化后地上凋落物和死亡的草甸植物根系等进入土壤形成腐殖质,短时间输入了大量的碳^[24]。陈涛等^[25]在退化羊草草甸上的研究表明退化会导致土壤有机碳含量下降,而王小燕等^[26]的研究认为8月和10月份,退化程度对土壤有机碳含量没有明显影响。因此,退化对土壤有机碳的效应可能与草地类型、气候以及土壤酸碱性等因素有关,而随着退化时间的延长,土壤有机碳的变化也值得进一步观测。退化导致3个土层全氮含量均降低,这与已有的研究结果一致^[27-28],但退化后土壤有效氮含量显著升高,与已有研究结果相似^[29],主要是由于退化后土壤孔隙增大,加速了有机氮的矿化^[30],而部分矿化氮的损失也可能是全氮含量降低的原因之一。本研究表明退化对表层土壤的全磷含量没有显著影响,这与已有在青藏高原的研究结果一致^[31],但也有研究表明,退化导致土壤的全磷含量下降^[4],轻度和重度退化草地的全磷含量差异不显著^[32]。因此,退化对土壤全磷含量的影响较为复杂。与围封草地相比,轻度和中度退化后土壤有效磷含量升高,而重度退化则降低,说明到重度退化程度,植物可利用的磷素显著降低,草地恢复中应适当进行土壤磷素的添加。已有在祁连山区的研究也表明,随着退化程度的加剧土壤有效磷含量降低^[33]。

3.2 高寒草甸退化对土壤主要酶活性的影响

本研究表明退化导致过氧化氢酶活性降低,这与卢虎^[34]在该区域的研究结果基本一致,可能是由于退化后由于地上覆盖的减少,土壤持水性能降低,土壤微生物数量减少所致。随着草地退化程度的加剧,土壤脲酶活性总体呈现增加的趋势,王玉琴^[35]等的研究也表明,在0~10 cm土层随着退化程度的加剧,脲酶活性有增加的趋势。本研究表明轻度退化草地土壤碱性磷酸酶活性与围封草地差异不大,但是重度退化

草地土壤碱性磷酸酶活性显著高于围封草地,这可能是因为一方面退化过程中高寒草甸土壤元素生化反应速率比未退化快,另一方面结合前面重度退化草地土壤的有机碳和有效氮含量较高,可为土壤酶提供营养岛的作用^[36]。

3.3 高寒草甸退化对土壤关键养分与对应酶活性相关性的影响

围封草地表层土壤有机碳与过氧化氢酶活性之间具有极显著负相关性,而轻度和重度退化土壤有机碳含量与过氧化氢酶活性均未表现出相关性,中度退化则表现出显著正相关,因此,不能以退化高寒草地过氧化氢酶活性评价土壤的有机碳水平。退化草地基本表现出下层土壤过氧化氢酶活性最高,而围封草地表层土壤的过氧化氢酶活性最高,这也说明退化改变了生长季过氧化氢酶活性在土壤剖面的中状态。这可能是因为围封草地良好的植被覆盖以及大量的凋落物培育了较高的表层土壤微生物活性,退化草地由于植被盖度的剧烈减低,表层极易干旱缺水而导致土壤微生物数量及活性降低^[9],使酶活性也迅速降低。退化后脲酶活性与土壤全氮含量没有相关性,而封育草地、轻度和中度退化的土壤脲酶活性与土壤有效氮含量存在正相关性,重度退化条件下,土壤脲酶活性与土壤氮素含量没有相关性。一般认为脲酶活性能更好地反映土壤氮素的变化状况,天然林地、草地的研究均表明土壤脲酶活性与土壤的无机氮或有机氮含量呈显著正相关^[37],从本研究看,高寒草甸重度退化改变了土壤脲酶活性与土壤氮素含量的相关性。围封草地的碱性磷酸酶活性与全磷含量呈显著正相关,与有效磷含量呈显著负相关,而中度退化草地的土壤碱性磷酸酶活性与全磷和有效磷含量均呈显著负相关,轻度和重度退化均没有明显相关性。由此可见,一般认为土壤碱性磷酸酶活性可以反映土壤有效

磷含量^[38],但在草地退化的条件下,他们之间的相关性并不高。

由于土壤酶活性可能受土壤pH、容重、颗粒组成等理化性质的影响^[39],因此关于高寒草甸退化条件下酶活性与元素含量的相关关系还需要进一步研究。

4 结论

高寒草甸退化导致0~30 cm土层的有机碳含量升高,土壤全氮含量降低、有效氮含量和脲酶活性显著升高,表层土壤的全磷含量没有显著影响,而使下层土壤的全磷含量降低,有效磷含量在轻度和中度退化升高,重度退化下降。退化导致高寒草甸过氧化氢酶活性总体表现出下降的趋势,退化导致退化对退化导致0~30 cm土层碱性磷酸酶活性升高。高寒草甸退化改变了土壤主要养分与相关酶活性的关系,封育高寒草甸的土壤有机碳含量与过氧化氢酶活性呈极显著负相关,土壤氮素含量与脲酶活性之间未表现出相关性,土壤全磷和有效磷含量与碱性磷酸酶活性均呈显著正相关;而仅中度退化的土壤有机碳含量与过氧化氢酶活性呈显著正相关、退化草地氮素含量与脲酶活性具有显著正相关、退化草地土壤全磷和有效磷含量与碱性磷酸酶活性均呈显著负相关。因此,高寒草甸退化后改变了其主要养分与相关酶活性之间的相关性,重度退化高寒草甸恢复中应考虑土壤磷素的投入。

参考文献:

- [1] 杨元武,李希来,周华坤. 高寒草甸退化草地土壤特性分析[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):87-90.
- [2] 张自和,郭正刚,吴素琴. 西部高寒地区草业面临的问题与可持续发展[J]. 草业学报,2002,11(3):29-33.
- [3] 马玉寿,郎百宁,李青云,等. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J]. 草业科学,2002,19(9):1-5.
- [4] 赵云,陈伟,李春鸣,等. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤有机质含量及其与主要养分的关系[J]. 草业科学,2009,26(5):20-25.
- [5] 赵贯锋,余成群,武俊喜,等. 青藏高原退化高寒草地的恢复与治理研究进展[J]. 贵州农业科学,2013,41(5):125-129.
- [6] 刘洪来,鲁为华,陈超. 草地退化演替过程及诊断研究进展[J]. 草地学报,2011,19(5):865-871
- [7] 张佳宁. 祁连山北坡高寒草地退化现状及应对策略[J]. 草业科学,2014,31(4):776-781.
- [8] 马乾坤. 高寒草原类草地退化原因及其分析[J]. 青海草业,2013,22(2):23-25.
- [9] 李海云. 祁连山高寒草地退化过程中“植被-土壤-微生物”互作关系[D]. 兰州:甘肃农业大学,2019.
- [10] 张咏梅,周国逸,吴宁. 土壤酶学的研究进展[J]. 热带亚热带植物学报,2004,12(1):83-90.
- [11] 龙章富,刘世贵. 川西北退化草地土壤微生物生化活性的初步研究[J]. 土壤学报,1995,32(2):221-227.
- [12] 孙慧,张建锋,胡颖,等. 土壤过氧化氢酶对不同林分覆盖的响应[J]. 土壤通报,2016,47(3):605-610.
- [13] 任天志. 持续农业中的土壤生物指标研究[J]. 中国农业科学,2000,33(1):68-75.
- [14] 李成阳,张文娟,赖焯敏,等. 黄河源区不同退化程度高寒草原群落生产力、物种多样性和土壤特性及其关系研究[J]. 生态学报,2021,41(11):4541-4551.
- [15] 李邵宇,孙建,王毅,等. 青藏高原不同退化梯度草地土壤酶活性特征[J]. 草业科学,2020,37(12):2389-2402.
- [16] 王采娥. 三江源区山坡退化高寒草甸和灌丛植被、土壤养分空间格局及土壤侵蚀研究[D]. 兰州:兰州大学,2021.
- [17] 李亚娟,刘静,徐长林,等. 不同退化程度对高寒草甸土壤无机氮及脲酶活性的影响[J]. 草业学报,2018,27(10):45-53.
- [18] 张骞,马丽,张中华,等. 青藏高寒区退化草地生态恢复:退化现状、恢复措施、效应与展望[J]. 生态学报,2019,39(20):7441-7451.
- [19] 温军,周华坤,姚步青,等. 三江源区不同退化程度高寒草原土壤呼吸特征. 植物生态学报,2014,38(2):209-218.
- [20] 中华人民共和国农业部. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标:GB19377-2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [23] Mcsherry M E, Ritchie M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: A global review[J]. Global Change Biology,2016,19(5):1347-1357.
- [24] 刘育红,魏卫东,温小成,等. 三江源退化高寒草原土壤有机碳组分分布研究[J]. 土壤通报,2014,45(6):

- 1370—1376.
- [25] 陈涛. 呼伦贝尔退化羊草草甸物种多样性及土壤理化性质的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2008.
- [26] 王小燕,姚宝辉,张彩军,等. 甘南“黑土滩”型退化草甸土壤理化特性及酶活性季节变化[J]. 草地学报,2021,29(2):220—227.
- [27] 任命新,李亚娟. 不同草地类型对三江源区草地土壤养分的影响[J]. 中国野生植物资源,2015,34(2):13—16.
- [28] 林璐,乌云娜,田村宪司,等. 呼伦贝尔典型退化草原土壤理化与微生物性状[J]. 应用生态学报,2013,24(12):3407—3414.
- [29] 靳发兰,锡文林,安沙舟,等. 高草草甸不同利用方式下草地土壤养分变化[J]. 新疆农业科学,2010,47(10):2059—2062.
- [30] 张生楹,张德罡,柳小妮,等. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤养分特征研究[J]. 草业科学,2012,29(7):1028—1032.
- [31] 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[J]. 草地学报,2012,20(6):1039—1050.
- [32] 邓燕,李钊,姚树冉,等. 不同程度退化草地的植被土壤特征及其相互间的关系[J]. 草业科学,2021,38(7):1260—1269.
- [33] 李海云,姚拓,张建贵,等. 东祁连山不同干扰生境草地土壤养分时空变化特征[J]. 水土保持学报,2018,32(3):249—257.
- [34] 卢虎. 祁连山不同退化草地土壤微生物特性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2015.
- [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.
- [36] 李邵宇,孙建,王毅,等. 青藏高原不同退化梯度草地土壤酶活性特征[J]. 草业科学,2020,37(12):2389—2402.
- [37] 邢肖毅,黄懿梅,黄海波,等. 黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征[J]. 生态学报,2012,32(5):1403—1411.
- [38] 刘淑英. 有机无机肥配施对灌耕灰钙土碱性磷酸酶和土壤磷素的影响[J]. 土壤通报,2011,42(3):670—675.
- [39] 孔维波. 黄土高原侵蚀环境土壤氮素原位矿化特征[D]. 北京:中国科学院大学,2019.

Effects of alpine meadow degradation on soil carbon, nitrogen, phosphorus and correlative enzyme activity

LI Ya-juan¹, LIU Yan-jun¹, XU Chang-lin¹, YU Xiao-jun¹, SHI Zhi-he², XU Jing-jing²

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Forestry Science and Technology Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730046, China)

Abstract: [Objective] Soil carbon, nitrogen and phosphorus are of key importance to alpine grassland ecosystem, and alpine meadow degradation can change soil nutrients content and their distribution. Clarifying the effects of alpine meadow degradation on soil key nutrients carbon, nitrogen and phosphorus content and their correlation with enzyme activity can provide a theoretical basis for the restoration of degraded alpine meadows. [Method] Four types alpine meadows, including Fenced (FG) as a control, light degraded (LD), moderate degraded (MD) and serious degraded (SD) alpine meadow, were selected to study the effects of alpine meadow degradation on soil key nutrients content, correlative enzymes activities as well as correlation of soil key nutrients to enzymes in growing season in the eastern Qilian Mountain area. Soil organic carbon, soil total and available nitrogen, soil total and available phosphorus, soil catalase activity, soil catalase, urease, and alkaline phosphatase activity were analyzed. [Result] Soil carbon con-

tents increased after degradation compared with CK except for 10~20 cm depth in LD and 0~10 cm depth in MD, and soil carbon content of 0~10cm in SD was the highest, which was 82.1 g/kg. But soil catalase activity was declined after degraded, and it showed the highest in 20~30 cm in FG, the lowest value was in 10~20 cm in LD, the value was 23.35 mg/g and 20.90 mg/g respectively. The degradation resulted in the decrease of soil total nitrogen content, and the increase of available nitrogen content and urease activity. The highest available nitrogen content and urease activity were 649 mg/kg and 3.47 mg/g in SD grassland, respectively. Urease activity increased in FG and SD, but decreased in MD and SD with the soil depth. The value of urease activity varied from 0.18 g/kg to 0.22 g/kg. Alpine meadow degradation had no significant effect on soil total phosphorus of 0~10cm depth. Soil available phosphorus of LD and MD increased, but SD decreased compared with FG. Soil available phosphorus of LD, MD and SD increased 152%、60% and -32% respectively in 0~10 cm dept. Soil alkaline phosphatase activity increased under degradation, ranging from 0.52 mg/g to 0.62 mg/g. The correlation analysis showed that soil the correlation between organic carbon content and catalase activity was significant in FG, but there was no significant correlation in LD and SD. There was no significant correlation between soil nitrogen content and urease activity in FG, but was significant in MD and MD. There was significant correlation between soil phosphorus content and alkaline phosphatase activity in FG, but was no significant correlation in degraded meadows. 【Conclusion】The correlation between soil key nutrients content and enzyme activity was changed after degradation in alpine meadows, and phosphorus addition may be needed in the restoration of serious degraded alpine meadow.

Key words: grassland degradation; alpine meadow; soil organic carbon; soil nitrogen; soil phosphorus; soil enzyme activity

(责任编辑 刘建荣)