

退化高寒草地土壤养分、酶活性及生态化学计量特征

李海云, 张建贵, 姚拓, 杨晓玫, 高亚敏, 李昌宁, 李琦, 冯影

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

摘要: 为探究不同退化高寒草地土壤特性的变化规律。对祁连山康乐、皇城和天祝试验点退化高寒草地(轻度退化草地、中度退化草地和重度退化草地)土壤养分含量及其生态化学计量学特征进行测定分析。结果表明:(1)各试验点土壤 pH、电导率、含水量和有机质含量均随着土层深度的增加而降低,在 0—20 cm 土层中,土壤 pH 呈现出升高趋势,电导率呈现出先升高后降低趋势;在 20—40 cm 土层中,土壤 pH 呈现出先升高后降低趋势,电导率呈现出先降低后升高趋势,土壤含水量和有机质含量在 0—20、20—40 cm 土层中均随着退化程度的加剧而逐渐降低。(2)不同草地土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量均随退化程度的加剧和土层深度的增加而逐渐降低,且各样地间差异显著($p < 0.05$)。(3)在不同退化草地土壤不同土层中,C/N 变化范围为 19.10~40.48、C/P 变化范围为 87.85~121.97 和 N/P 变化范围为 4.10~6.76。(4)随草地退化程度加剧,土壤纤维素酶活性呈先上升后降低趋势,脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶和氧化还原酶呈降低趋势。(5)通过土壤理化、酶活性及生态化学计量比间相关性和主成分分析表明,土壤理化、酶活性和土壤生态化学计量比指标可以敏感地反映出不同退化草地土壤质量状况。综上,祁连山不同程度退化高寒草地土壤已逐步恶化,应加强对该地区草地合理利用和科学管理。

关键词: 祁连山; 草地退化; 土壤养分; 生态化学计量比; 土壤酶活性

中图分类号: S154.36

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0287-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.045

Soil Nutrients, Enzyme Activities and Ecological Stoichiometric Characteristics in Degraded Alpine Grasslands

LI Haiyun, ZHANG Jianguai, YAO Tuo, YANG Xiaomei,

GAO Yamin, LI Changning, LI Qi, FENG Ying

(Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education,

Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: In order to explore the changing law of soil properties in different degraded alpine meadows, we measured and analyzed the soil nutrient content and ecological stoichiometric characteristics of different degraded alpine meadows (mild degraded grassland, moderate degraded grassland and severe degraded grassland) located in Kangle, Huangcheng and Tianzhu experimental plots in the Qilian Mountains. The results showed that: (1) The soil pH, electrical conductivity, water content and organic matter content decreased with the increasing of soil depth. In the 0—20 cm soil layer, the soil pH showed an upward trend, and the electrical conductivity increased first and then decreased. In the 20—40 cm soil layer, the soil pH increased first and then decreased, while the electrical conductivity showed the opposite trend. Soil waters and organic matters in 0—20 and 20—40 cm soil layers decreased gradually as the degree of degradation intensifying. (2) The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in different grassland soil decreased gradually with the increasing of degradation degree and soil depth, and the differences among plots were significant ($p < 0.05$). (3) In different soil layers of different degraded grasslands, the variation range of C/N was 19.10 to 40.48, the change range of C/P was from 87.85 to 121.97 and the range of N/P changed from 4.10 to 6.76. (4) As the intensifying of grassland degradation degree, the soil cellulase activi-

收稿日期: 2018-04-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(31660688)

第一作者: 李海云(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事草地微生物多样性研究。E-mail: lihayun0923@163.com

通信作者: 姚拓(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事草地土壤微生物和草地保护研究。E-mail: yaotuo@gsau.edu.cn

ty increased first and then decreased, urease and neutral phosphorus acid enzyme, dehydrogenase, invertase and oxidoreductase showed a decreasing trend. (5) The results of correlation analysis between soil physicochemical, enzyme activity and ecological stoichiometric ratio and principal component analysis showed that the soil physicochemical index, enzyme activity and ecological stoichiometric ratio could reflect the soil quality of different degraded grasslands. In conclusion, the soil of degraded alpine grassland had deteriorated gradually in Qilian Mountains. The rational utilization and scientific management of grassland in this area should be strengthened.

Keywords: Qilian Mountains; grassland degradation; soil nutrient; ecological stoichiometric ratio; soil enzyme activity

草地是陆地生态系统的重要组成部分,对陆地生态系统的稳定与平衡、人类社会可持续发展具有重要意义^[1]。我国的草地资源比较丰富,占地面积近 4 亿 hm^2 , 约占国土面积的 41.7%。近年来由于人类活动日益频繁、草地粗放经营、草畜不平衡、煤矿资源开采等原因,高寒草原已遭到不同程度的干扰和破坏,已呈现出退化趋势。如何调控土壤退化、改良两个过程就是要使土壤向土壤恢复方向发展,长期保持或改善土壤质量或健康状况,这将决定畜牧业生产的可持续发展^[2-3]。草地退化的核心问题是土壤退化,而土壤微生物是土壤中具有生命力的主要组成部分,在土壤形成和演化过程中起着主导作用。土壤是动物、植物和微生物共同生活的载体,其理化性质在空间和时间异致性上决定了草地植被分布格局^[4]。土壤有机物经微生物分解转化成 C、N、P 等供植物可利用形态,而土壤 C、N、P 间的比值可反映出关键养分的限制。土壤酶是土壤物质循环和能量流动的重要参与者,其活性能反映土壤中多种生物化学过程的相对强度,相比土壤特性其活性大小既反映着土壤营养物质的储量,也体现着土壤中生物化学反应的方向和强度^[5]。祁连山高寒地区的生态系统的脆弱性和不稳定性、人为干扰破坏、草地鼠害频繁性迫使草地遭受不同程度的退化^[6],为探究祁连山不同退化草地土壤变化,前人^[7-9]从不同侧面对退化草地土壤养分、酶活性、微生物群落结构及草地植被等进行了相关研究。但由于退化草地的土壤是一个极其复杂的体系,只有较为准确掌握这种变化规律,才能对退化草地实施有效恢复措施。因此,本研究为揭示祁连山不同退化草地土壤养分、酶活性及其生态计量学特征变化及关系,进一步探讨祁连山不同退化草地土壤养分变化规律,以期对科学全面地评价祁连山高寒草地土壤生态系统健康状况提供重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省祁连山东段,南北宽 5~15 km,东西长约 30 km,地理坐标 $94^{\circ}10' - 103^{\circ}04'E$, $35^{\circ}50' - 39^{\circ}19'N$,海拔 2 900~4 300 m。年均气

温 $-0.1 \sim 0.6^{\circ}\text{C}$,全年 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的有效积温为 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 左右,年均降水量 416 mm,年均蒸发量 1 483~1 614 mm。土壤以亚高山草甸土、亚高山黑钙土等为主。植被以嵩草 (*Kobresia bellardii*)、苔草 (*Carex* spp.)、针茅 (*Stipa capillata*)、莎草 (*Cyperus* spp.)、珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、金露梅 (*Potentilla fruticosa*)、棘豆 (*Oxytropis* spp.)、狼毒 (*Stellera chamaejasme*)、委陵菜 (*Potentilla chinensis*)、杜鹃 (*Rhododendron* spp.) 等为主。

1.2 样地设置及土样采集

在 2017 年 8 月通过对本课题组前期建立的康乐、皇城和天祝试验点为基础,综合考虑植被和土壤各指标,根据草地退化程度的相关划分评价标准^[10],选取轻度退化草地、中度退化草地和重度退化草地(表 1)。每个样地设置 3 个大样方(25 m \times 25 m),在每个大样方各设置 3 个小样方(50 cm \times 50 cm)。测定植物种类、盖度、频度、密度和地上生物量,用土钻在各小样方内分别采集 0—20,20—40 cm 土层的土壤样品。将采集土样装入已标记的塑料袋中带回实验室。一份土样采用烘干法测定土壤含水量,另一份风干过筛后供土壤养分含量测定。

1.3 测定指标

1.3.1 土壤理化指标测定 土壤理化指标测定均采用常规分析方法^[11]。其中,土壤理化指标包括土壤 pH、含水量、电导率、有机碳、有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效钾和速效磷。

1.3.2 土壤酶活性测定 土壤脲酶活性测定采用苯酚钠一次氯酸钠比色法^[12];土壤中性磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法^[12];土壤脱氢酶活性测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)分光光度法^[13];氧化还原酶测定采用邻苯三酚—乙醚比色法^[13];纤维素酶和蔗糖酶测定采用 3,5—二硝基水杨酸比色法^[13]。

1.4 数据分析

土壤碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)和氮磷比(N/P)均采用质量比。采用 SPSS 21.0 软件对数据进行 One-Way ANOVA 统计分析和 Duncan 氏新复极差

法进行差异显著性检验,并用 Pearson 法分析土壤各指标间的相关性。采用 Canoco 4.5 软件对各样地间

土壤理化、酶活性及生态化学计量比指标进行主成分分析(Principle Component Analysis,PCA)。

表 1 样地基本概况

试验点	样地	经纬度	海拔/ m	植被 盖度	地上生物量/ ($g \cdot m^{-2}$)	植被 高度/cm	植被密度/ ($n \cdot m^{-2}$)	植被 频度
肃南县 康乐镇	LDG1	99°52'20" E,38°48'16" N	2940	0.78±0.01	564.45±23.14	29.94±0.30	67.67±20.05	0.58±0.07
	MDG1	99°52'18" E,38°47'44" N	3013	0.66±0.23	220.17±19.20	21.62±1.10	106.57±15.63	0.58±0.07
	SDG1	99°52'15" E,38°47'54" N	2955	0.38±0.15	181.40±5.50	12.39±0.88	65.21±0.35	0.63±0.04
肃南县 皇城镇	LDG2	101°32'01" E,37°53'60" N	2960	0.77±0.01	492.09±32.70	53.92±1.40	148.99±0.70	0.58±0.56
	MDG2	101°32'03" E,37°53'35" N	3100	0.60±0.15	247.96±14.80	16.27±0.22	87.89±4.22	0.76±0.27
	SDG2	101°48'45" E,37°54'47" N	2963	0.36±0.01	218.05±45.31	12.93±0.19	83.19±11.89	0.57±0.03
天祝县 抓喜秀龙乡	LDG3	102°47'05" E,37°11'51" N	2900	0.76±0.01	470.63±29.52	18.63±1.92	340.78±41.01	0.82±0.06
	MDG3	102°47'05" E,37°11'51" N	2900	0.52±0.27	253.41±29.52	18.10±0.21	309.90±78.30	0.95±0.05
	SDG3	102°47'05" E,37°11'51" N	2900	0.32±0.20	133.79±8.87	3.87±0.08	120.67±14.02	0.63±0.04

2 结果与分析

2.1 土壤 pH、含水量、电导率和有机质变化特征

在不同退化高寒草地土壤中,土壤 pH、电导率、含水量和有机质含量均随着土层深度的增加而降低(表 2)。其中,随着退化程度加剧,在康乐试验点各样地 0—20,20—40 cm 土壤中,土壤 pH 均表现为 SDG1 > MDG1 > LDG1,土壤电导率分别表现为 MDG1 > SDG1 > LDG1 和 LDG1 > MDG1 > SDG1,土壤含水量和有机质含量均表现为 LDG1 > MDG1 > SDG1;在皇城试验点各样地 0—20,20—40 cm 土壤中,土壤 pH 分别表现为

MDG2 > SDG2 > LDG2 和 SDG2 > MDG2 > LDG2,土壤电导率均表现为 SDG2 > MDG2 > LDG2,土壤含水量和有机质均表现为 LDG2 > MDG2 > SDG2;天祝试验点各样地土壤 pH 和电导率表现为 MDG3 > SDG3 > LDG3,土壤含水量和有机质均表现为 LDG3 > MDG3 > SDG3。从总体上来看,随着草地退化程度的加剧,在 0—40 cm 土层中,土壤含水量和有机质含量均逐渐降低;在 0—20 cm 土层中,土壤 pH 呈现出升高趋势,电导率呈现出先升高后降低趋势;在 20—40 cm 土层中,土壤 pH 呈现出先升高后降低趋势,电导率呈现出先降低后升高趋势。

表 2 不同退化草地土壤 pH、含水量、电导率和有机质变化特征

样地	pH		电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)		含水量/%		有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
LDG1	8.18±0.12ab	7.97±0.08ab	238.67±2.52bcd	182.00±2.00ab	32.81±1.01bc	26.44±0.67a	125.57±9.26a	87.19±4.59abcd
MDG1	8.22±0.14ab	8.12±0.02a	702.33±28.38a	155.67±6.66abcd	27.20±1.09de	23.95±1.55ab	43.89±2.31b	26.55±0.71e
SDG1	8.57±0.41a	8.17±0.04a	370.00±16.82b	145.00±6.08cd	20.19±1.19f	15.45±0.24cd	31.70±0.89b	24.82±2.00e
LDG2	7.20±0.06c	6.88±0.09c	136.67±3.79d	108.67±7.51e	33.68±1.32b	22.32±0.38ab	126.32±10.64a	73.48±4.43bcd
MDG2	8.28±0.04ab	8.03±0.14a	156.33±17.39cd	134.67±7.37de	29.93±0.43cd	16.42±0.42c	44.58±3.27b	29.61±2.69e
SDG2	8.13±0.02ab	8.08±0.08a	307.33±17.01bcd	136.00±2.65de	17.10±0.40f	8.17±0.69e	33.86±1.19b	19.19±0.90e
LDG3	8.06±0.07b	7.86±0.76ab	187.67±8.62bcd	176.00±4.36abc	37.74±0.85a	20.27±0.74bc	140.38±4.62a	116.67±2.78a
MDG3	8.17±0.07ab	7.92±0.12ab	216.67±5.03bcd	162.33±1.15abcd	24.08±0.44e	10.86±0.43de	123.48±5.69a	108.44±3.70ab
SDG3	8.13±0.01ab	7.82±0.05ab	203.33±8.39bcd	186.33±4.04a	13.00±0.28g	10.22±0.62e	115.20±5.58a	94.32±8.18abc
LDG	7.81±0.47b	7.57±0.53b	187.67±44.44bcd	155.56±35.54abcd	34.74±2.46ab	23.01±2.77ab	130.76±10.36a	92.45±19.43abc
MDG	8.22±0.09ab	8.03±0.13a	358.44±259.78bc	150.89±13.47bcd	27.07±2.61de	17.08±5.75c	70.65±39.78b	54.87±40.27cde
SDG	8.28±0.30ab	8.02±0.16a	293.56±74.00bcd	155.78±23.57abcd	16.76±3.19f	11.28±3.29de	60.26±41.32b	46.48±38.00de

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2 土壤全量养分变化特征

由表 3 可知,在不同退化程度草地土壤中,土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量均随着土层深度的增加而减少,且各样地间差异显著($p < 0.05$)。在 0—20,20—40 cm 土层中,土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量均随着退化程度的加剧而逐渐降低。在康乐试验点 0—20 cm 土层中,MDG1 和 SDG1 样地的土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量相较于 LDG1 样地,分别降低 286%,182%,144%,128% 和 396%,253%,203%,

129%,在 20—40 cm 土层中,分别降低 328%,187%,164%,125% 和 351%,307%,277%,118%;在皇城试验点 0—20 cm 土层中,MDG2 和 SDG2 样地的土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量相较于 LDG2 样地,分别降低 283%,239%,328%,126% 和 373%,379%,423%,155%,在 20—40 cm 土层中,分别降低 248%,216%,12%,102% 和 383%,291%,138%,126%;在天祝试验点 0—20 cm 土层中,

MDG3 和 SDG3 样地的土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量相较于 LDG3 样地,分别降低 114%,163%,210%,041%和122%,315%,261%,132%,在 20—40 cm 土层中,分别降低 108%,169%,138%,109%和 124%,502%,181%,130%。总体来看,随着退化程度的加剧,各样地土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含

量均表现为 LDG>MDG>SDG;在 0—20 cm 土层中,MDG 和 SDG 样地的土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量相较于 LDG 样地,分别降低 185%,189%,224%,122%和 217%,305%,294%,139%;在 20—40 cm 土层中,分别降低 168%,184%,138%,112%和 200%,356%,182%,124%。

表 3 不同退化草地土壤有机碳和全量养分变化特征

单位:g/kg

样地	有机碳		全氮		全磷		全钾	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
LDG1	72.84±5.37a	50.57±2.66abcd	4.12±0.35a	3.04±0.06a	0.65±0.04c	0.36±0.03bc	5.38±0.11b	2.71±0.11a
MDG1	25.46±1.34b	15.40±0.41e	2.26±0.10b	1.63±0.05b	0.45±0.04cd	0.22±0.02f	4.21±0.17ef	2.16±0.21cdef
SDG1	18.39±0.52b	14.40±1.16e	1.63±0.10c	0.99±0.13cd	0.32±0.01d	0.13±0.02g	4.17±0.32ef	2.30±0.12bcd
LDG2	73.27±6.17a	42.62±2.57bcd	3.75±0.16a	1.92±0.08b	1.31±0.16a	0.36±0.20bc	6.08±0.10a	2.43±0.29abc
MDG2	25.86±1.89b	17.18±1.56e	1.57±0.02c	0.89±0.08d	0.40±0.02d	0.30±0.02cde	4.81±0.31cd	2.39±0.24abc
SDG2	19.64±0.69b	11.13±0.52e	0.99±0.03d	0.66±0.02d	0.31±0.02d	0.26±0.02ef	3.92±0.29f	1.93±0.15ef
LDG3	81.43±2.68a	67.67±1.61a	4.09±0.26a	3.06±0.07a	0.86±0.04b	0.47±0.03a	5.17±0.15bc	2.42±0.09abc
MDG3	71.62±3.30a	62.90±2.15ab	2.51±0.10b	1.81±0.30b	0.41±0.03d	0.34±0.03bcd	4.63±0.12de	2.23±0.08bcde
SDG3	66.82±3.24a	54.71±4.75abc	1.30±0.03cd	0.61±0.07d	0.33±0.02d	0.26±0.01def	3.92±0.40f	1.86±0.03f
LDG	75.84±6.01a	53.62±11.27abc	3.99±0.29a	2.67±0.57a	0.94±0.31d	0.40±0.06ab	5.55±0.43b	2.52±0.22ab
MDG	40.98±23.07b	31.83±23.36cde	2.11±0.43b	1.45±0.45bc	0.42±0.03d	0.29±0.06cdef	4.55±0.32de	2.26±0.19bcd
SDG	34.95±23.97b	26.75±21.16de	1.31±0.28cd	0.75±0.19d	0.32±0.02d	0.22±0.07f	4.00±0.32f	2.03±0.23def

2.3 土壤速效养分变化特征

由表 4 可知,在不同退化程度草地土壤中,土壤速效养分均随着土层深度的增加而减少,且各样地间差异显著($p<0.05$)。在 0—20,20—40 cm 土层中,土壤速效养分含量均随着退化程度的加剧而逐渐降低。在康乐试验点 0—20 cm 土层中,MDG1 和 SDG1 样地的土壤速效氮、速效磷和速效钾含量相较于 LDG1 样地,分别降低 233%,182%,148%和 383%,183%,168%,在 20—40 cm 土层中,分别降低 216%,184%,151%和 522%,183%,155%;在皇城试验点 0—20 cm 土层中,MDG2 和 SDG2 样地的土壤速效氮、速效磷和速效钾含量相较于 LDG2 样地,分别降低 294%,142%,110%和 364%,330%,

126%,在 20—40 cm 土层中,分别降低 300%,173%,107%和 430%,176%,112%;在天祝试验点 0—20 cm 土层中,MDG3 和 SDG3 样地的土壤速效氮、速效磷和速效钾含量相较于 LDG3 样地,分别降低 109%,182%,101%和 125%,243%,109%,在 20—40 cm 土层中,分别降低 115%,173%,150%和 136%,212%,188%。从总体来看,康乐、皇城和天祝试验点各样地土壤速效养分含量均表现为 LDG>MDG>SDG,在 0—20 cm 土层中,MDG 和 SDG 样地的土壤速效氮、速效磷和速效钾含量相较于 LDG 样地,分别降低 174%,164%,120%和 220%,245%,134%,在 20—40 cm 土层中,分别降低 173%,176%,141%和 246%,193%,154%。

表 4 不同退化草地土壤速效养分变化特征

单位:mg/kg

样地	速效氮		速效磷		速效钾	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
LDG1	212.06±12.50a	162.32±2.25a	27.96±1.33bc	12.45±0.61bc	531.29±10.42a	378.22±2.96a
MDG1	91.10±2.80cd	75.26±3.75cd	15.35±1.11de	6.76±0.66e	359.17±8.68bc	250.67±4.97bcd
SDG1	55.42±3.87cd	31.09±3.08d	15.28±0.38de	6.79±1.29e	317.10±2.47cd	243.38±2.47bcd
LDG2	187.11±6.49a	144.94±8.67ab	37.05±2.89a	12.57±1.94bc	354.02±11.97bc	140.99±6.01e
MDG2	63.57±1.92cd	48.24±2.34cd	26.01±1.62c	7.26±0.46e	321.68±4.65cd	132.15±5.11e
SDG2	51.37±1.77d	33.72±0.58cd	11.22±0.52e	7.16±0.14e	281.06±14.09d	126.29±1.94e
LDG3	216.63±5.75a	184.89±6.48a	29.39±1.05bc	19.84±1.01a	365.75±7.26bc	292.59±4.97b
MDG3	199.11±6.63a	160.21±3.15a	16.15±1.00de	11.50±0.63bcd	363.02±9.85bc	194.92±6.58cde
SDG3	173.72±10.23ab	135.65±3.30ab	12.10±0.56e	9.34±1.07cde	336.15±4.98cd	156.04±4.20de
LDG	205.27±15.73a	164.05±18.20a	31.47±4.55b	14.95±3.84b	417.02±86.30b	270.60±104.12bc
MDG	117.93±62.16bc	94.57±50.68bc	19.17±5.26d	8.51±2.31de	347.96±20.97bcd	192.58±51.58cde
SDG	93.50±60.44cd	66.82±51.69cd	12.86±1.90e	7.76±1.46e	311.43±25.39cd	175.24±52.77de

2.4 土壤碳、氮、磷化学计量比特征

由表 5 可知,在不同退化程度草地土壤中,各试验点 0—20 cm 土层中,土壤 C/N、C/P 和 N/P 均低于 20—40 cm 土层,说明土壤生态化学计量比随土层深度的增加而增加,且各样地间差异显著 ($p < 0.05$)。在 0—20 cm 土层中,康乐和皇城试验点土壤 C/N (11.25~19.83) 均随退化程度的加剧而呈现出先降低后升高趋势;天祝试验点土壤 C/N (19.94~51.57) 均随着退化程度的加剧而逐渐升高;康乐土壤 C/P (57.69~112.91) 随着退化程度的加剧呈现出先降低后升高趋势,皇城和天祝土壤 C/P (56.06~204.41) 均随着退化程度的加剧呈现出先升高后降低

趋势;康乐试验点土壤 N/P (5.12~6.42) 随着退化程度的加剧而逐渐升高,皇城和天祝土壤 N/P (2.90~6.15) 均随着退化程度的加剧呈现出先升高再降低趋势。在 20—40 cm 土层中,康乐试验点土壤 C/N (9.42~16.64)、C/P (71.20~139.45) 和 N/P (7.56~8.38) 均随着退化程度的加剧呈现出先降低后升高趋势;皇城试验点土壤 C/N (16.98~22.16)、C/P (43.30~118.76) 和 N/P (2.55~5.35) 均随退化程度的加剧而逐渐降低;天祝试验点土壤 C/N (22.11~89.88) 和 C/P (144.66~207.50) 均随着退化程度的加剧而逐渐升高,N/P (2.32~6.54) 随退化程度的加剧而逐渐降低。

表 5 不同退化草地土壤生态化学计量比变化特征

样地	C/N		C/P		N/P	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
LDG1	17.75±1.98bc	16.64±0.55bc	112.91±10.46bc	139.45±11.89abc	6.42±0.96a	8.38±0.68a
MDG1	11.25±0.19c	9.42±0.10c	57.69±7.93c	71.20±7.56cde	5.12±0.65abc	7.56±0.79ab
SDG1	11.27±0.64c	14.58±1.38bc	58.15±2.80c	115.11±25.17bcde	5.16±0.23abc	7.86±1.28ab
LDG2	19.61±2.41bc	22.16±1.16bc	56.06±3.51c	118.76±11.85bcd	2.90±0.51e	5.35±0.28bcd
MDG2	16.44±1.39bc	19.53±3.21bc	63.98±3.03c	57.39±8.09de	3.90±0.20cde	2.96±0.32de
SDG2	19.83±0.89bc	16.98±0.44bc	62.85±5.52c	43.30±2.71e	3.17±0.26de	2.55±0.20de
LDG3	19.94±0.85bc	22.11±0.30bc	94.58±7.01c	144.66±13.05abc	4.76±0.52abcd	6.54±0.54abc
MDG3	28.60±1.90b	35.30±7.21bc	175.24±5.84ab	184.28±21.56ab	6.15±0.57ab	5.33±1.23bcd
SDG3	51.57±1.31a	89.88±11.61a	204.41±23.50a	207.50±22.67a	3.96±0.38cde	2.32±0.31e
LDG	19.10±1.91bc	20.30±2.83bc	87.85±25.96c	134.29±15.93bc	4.69±1.64bcd	6.76±1.40abc
MDG	18.76±7.80bc	21.42±11.75bc	98.97±57.50c	104.29±61.50cde	5.06±1.07abc	5.28±2.13bcd
SDG	27.56±18.41b	40.48±37.52b	108.47±73.00bc	121.97±73.28bcd	4.10±0.91cde	4.25±2.79cde

2.5 土壤酶活性

由表 6 可知,不同退化高寒草地土壤酶活性均呈现出 0—20 cm 高于 20—40 cm 土层,并且各样地土壤酶活性差异显著 ($p < 0.05$)。在 0—20 cm 土层中,随草地退化程度加剧,康乐试验点土壤纤维素酶活性呈先升高后降低趋势,脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶和氧化还原酶活性呈逐渐降低趋势;皇城试验点土壤脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶和氧化还原酶活性呈现出先升高后降低趋势,纤维素酶活性呈现出先降低后升高趋势;天祝试验点土壤脲酶、脱氢酶和氧化还原酶活性呈降低趋势,中性磷酸酶活性呈升高趋势,蔗糖酶活性呈现出先升高后降低趋势,纤维素酶活性呈现出先降低后升高趋势。在 20—40 cm 土层中,随高寒草地退化程度加剧,康乐试验点土壤脲酶活性呈现出先降低后升高趋势,中性磷酸酶活性呈升高趋势,脱氢酶、蔗糖酶和氧化还原酶活性呈降低趋势,纤维素酶活性呈现出先升高后降低趋势;皇城试验点土壤脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶、纤维素酶和氧化还原酶活性均呈现出先升高后降低

趋势;天祝试验点土壤脲酶和中性磷酸酶活性呈现出先升高后降低趋势,脱氢酶、蔗糖酶、纤维素酶和氧化还原酶活性均呈现出先降低后升高趋势。

2.6 土壤理化、酶活性与生态化学计量比的 PCA 分析

对祁连山不同退化高寒草地土壤理化、酶活性及生态化学计量比间进行 PCA 分析,并结合 Pearson 相关系数分析土壤环境因子间的相互关系。由表 7 可知,在 0—20 cm 土层中,第 1,2 主成分轴分别贡献了 59.1% 和 15.8% 的信息量,累计贡献率达到 74.9%,可以反映出土壤环境的基本信息。其中,呈极显著正相关 ($p < 0.01$) 的有含水量与全 N、全 P、全 K、速效 P、速效 K、脲酶、脱氢酶和蔗糖酶;全 N 与全 P、全 K、速效 N、速效 P、速效 K、有机质、有机碳、脲酶、脱氢酶;全 P 与全 K、速效 N、速效 P、有机质、有机碳、脲酶、脱氢酶和蔗糖酶;全 K 与速效 N、速效 P、速效 K、有机质、有机碳、脲酶、脱氢酶;速效 N 与速效 K、有机质、有机碳、C/P、脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶和氧化还原酶;速效 P 与有机质、有机碳、脲酶、脱氢酶和蔗糖酶;速效 K 与有机质、有机碳、N/P、中性磷酸酶、蔗

糖酶;有机质与有机碳、C/P、脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶和氧化还原酶;有机碳与 C/P、脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶和氧化还原酶;C/N 与 C/P;C/P 与中性磷酸酶、氧化还原酶;脲酶与脱氢酶、氧化还原酶。呈极显著负相关($p < 0.01$)的有 pH 与全 P、全 K、脱氢酶;电导率与有机质、有机碳、脱氢酶;含水量与 C/N;全 K 与纤维素酶。呈显著正相关($p < 0.05$)的有:pH 与 N/P;含水量与速效 N、有机质、有机碳;全 N 与中性磷酸酶、蔗糖酶;全 K 与中性磷酸酶;速效 N 与速效 P、C/N;速效 P 与速效 K、中性磷酸酶;速效 K 与脲酶;有机质、有机碳与 C/N;C/N 与中性磷酸酶、氧化还原酶;脱氢酶与蔗糖酶、氧化还原酶。呈显著负相关($p < 0.05$)的有:pH 与全 N、速效 N、有机质、有机碳、蔗糖酶;电导率与全 K、速效 N、速效 P、C/N、脲酶、氧化还原酶;纤维素酶与全 P、速效 N、速效 P、速效 K、有机质、有机碳、N/P;蔗糖酶与 C/N、C/P;N/P 与脱氢酶。由图 1、表 8 可知,在 20—40 cm 土层中,第 1,2 主成分轴分别贡献了 64.9%和 19.9%的信息量,累计贡献率为 84.8%,可以反映出土壤环境基本信息。其中,呈极显著正相关($p < 0.01$)的有:电导率与速效 K、有机质、有机碳、C/P;含水量与全

N、全 K、速效 K、N/P、蔗糖酶;全 N 与全 P、全 K、速效 N、速效 P、速效 K、有机质、有机碳、N/P;全 P 与速效 N、速效 P、有机质、有机碳、脱氢酶、氧化还原酶;全 K 与速效 K、N/P;速效 N 与速效 P、有机质、有机碳、C/P、氧化还原酶;速效 P 与有机质、有机碳、氧化还原酶;速效 K 与 N/P;有机质与有机碳、C/P、氧化还原酶;有机碳与 C/P、氧化还原酶;全 N 与 C/P、脱氢酶;C/P 与脲酶、中性磷酸酶、氧化还原酶;N/P 与中性磷酸酶;脲酶与中性磷酸酶;脱氢酶与氧化还原酶;纤维素酶与蔗糖酶。呈极显著负相关($p < 0.01$)的有 pH 与脱氢酶、蔗糖酶;纤维素酶与电导率、速效 N、速效 P、有机质、有机碳、C/P、氧化还原酶。呈显著正相关($p < 0.05$)的有 pH 与电导率;电导率与速效 N、氧化还原酶;氧化还原酶与全 N、C/N;速效 K 与速效 N、速效 P;速效 P 与 C/P;有机质、有机碳与脱氢酶、C/N。呈显著负相关($p < 0.05$)的有 pH 与全 P、速效 N;中性磷酸酶与脱氢酶;纤维素酶与全 N、全 P、速效 K。综上分析,大部分土壤环境因子变量在前 2 个主成分轴上具有较高的因子载荷,因此选择的土壤理化、酶活性和土壤生态化学计量比指标可以敏感的反映出不同退化草地土壤质量状况。

表 6 不同退化草地土壤酶活性变化特征

土层深度/cm	样地	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	中性磷酸酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	脱氢酶/ ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)	蔗糖酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	纤维素酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	氧化还原酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
0—20	LDG1	0.20±0.01b	0.90±0.01ab	13.50±0.53defg	4.22±0.17ab	4.53±0.20cde	2.63±0.08cde
	MDG1	0.14±0.01d	0.74±0.01bc	5.76±0.18fg	3.44±0.09abc	6.93±0.58bcde	2.07±0.07de
	SDG1	0.15±0.01d	0.73±0.02c	3.30±0.21g	1.70±0.15e	3.38±0.23de	3.30±0.31cde
	LDG2	0.15±0.01b	0.80±0.03abc	24.59±0.76a	3.67±0.18a	9.60±0.48e	4.21±0.34cde
	MDG2	0.21±0.01d	0.85±0.08abc	45.14±1.06bcd	4.44±0.22ab	2.74±0.34b	4.27±0.27cde
	SDG2	0.14±0.01d	0.51±0.04d	9.89±0.88efg	2.28±0.03de	14.43±0.12a	1.89±0.21e
	LDG3	0.27±0.16a	0.83±0.06abc	27.45±2.60bc	1.75±0.02e	7.68±0.08bcd	11.63±0.47a
	MDG3	0.19±0.01bc	0.84±0.07abc	21.42±0.41bcde	2.50±0.13cde	2.46±0.29e	8.94±0.23ab
	SDG3	0.13±0.39d	0.95±0.03a	14.94±0.91cdefg	1.48±0.08e	8.53±0.11bc	6.42±0.40bc
	LDG	0.23±0.03b	0.86±0.06abc	28.70±13.81b	3.47±1.30abc	4.98±2.17cde	6.18±4.16bcd
20—40	MDG	0.16±0.03cd	0.79±0.06abc	17.25±8.74bcdef	3.20±0.55bcd	6.33±3.15bcde	5.07±3.05bcde
	SDG	0.14±0.02d	0.73±0.19c	9.38±5.10efg	1.82±0.37e	8.78±4.79bc	3.87±2.03cde
	LDG1	0.14±0.01ab	0.57±0.01a	2.39±0.24cde	1.19±0.12ab	3.10±0.13cde	2.55±0.11cde
	MDG1	0.13±0.01bc	0.62±0.02a	1.72±0.17de	1.03±0.09abc	6.68±0.28a	1.89±0.06de
	SDG1	0.14±0.01abc	0.70±0.04a	1.15±0.09e	0.12±0.01e	3.58±0.63bcde	1.47±0.06e
	LDG2	0.09±0.01ab	0.25±0.01a	5.77±0.06ab	0.64±0.05a	4.11±0.22ab	2.77±0.31bcd
	MDG2	0.15±0.01cd	0.60±0.02b	6.10±0.32ab	1.37±0.15cd	5.70±0.21bcd	3.91±0.03cde
	SDG2	0.07±0.03d	0.15±0.02b	4.87±0.09abc	0.94±0.05abc	6.56±0.45a	1.08±0.13e
	LDG3	0.08±0.01d	0.47±0.06a	6.05±0.41ab	0.61±0.02cd	2.40±0.24de	7.10±0.29a
	MDG3	0.18±0.01a	0.64±0.03a	4.35±0.37abc	0.24±0.02de	1.80±0.09e	4.08±0.06bcd
	SDG3	0.15±0.01ab	0.599±0.03a	6.74±0.23a	0.76±0.02bc	4.11±0.05bcd	4.93±0.02b
	LDG	0.12±0.03bcd	0.55±0.07a	4.85±1.86abc	1.06±0.36abc	3.74±1.51bcde	4.52±2.03bc
	MDG	0.13±0.04abc	0.50±0.19a	3.95±1.79bcd	0.64±0.34cd	4.20±2.12bcd	2.91±0.97bcde
	SDG	0.12±0.04bcd	0.48±0.26a	4.25±2.47abcd	0.61±0.37cd	4.75±1.43abc	2.49±1.84cde

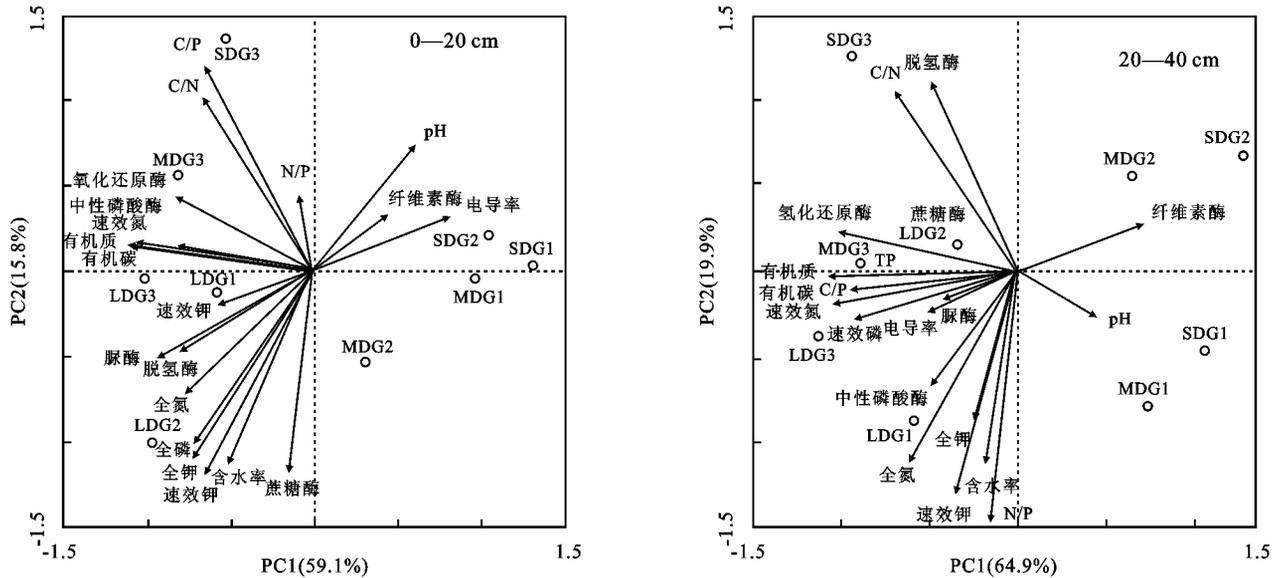


图 1 不同退化草地土壤环境因子间的主成分分析

3 讨论与结论

草地土壤是草地生态系统的重要基础环境,在自然与人为干扰下,土壤养分的分解与积累不尽相同,此外,还受到气候、植被类型和土壤养分状况等外界环境因子的共同影响。本研究发现,随着退化程度的加剧,土壤含水量、有机质、有机碳、全量和速效养分均呈下降趋势,pH 呈现出升高趋势,究其原因:一是草地退化后,地上植被覆盖率降低,植物根系减少,从而也减弱了土壤中全量养分和速效养分含量的富集作用;二是植物根系主要分布在地表,植物根系和残体对草地土壤养分的贡献主要集中在地表;三是祁连山地区降水较少,加之蒸发量较大,盐分聚表,导致土壤 pH 和电导率逐渐升高,张生楹等^[14]、赵云等^[15]对东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤养分变化特征研究表明,植物的生长对土壤养分起到了关键性作用,直接决定生态系统的结构、功能,而土壤中速效养分主要与土壤的矿化作用、植物的吸收量、牲畜排泄物量有关,其中速效磷和速效氮能够被植物直接吸收利用,土壤养分含量及其动态平衡反映土壤质量和草地健康情况,直接影响着草地生产力。

土壤生态化学计量比(C/N、C/P、N/P)是衡量土壤质量的敏感指标^[16],反映了土壤释放氮、磷矿化养分的能力。C/N 可以反映出有机质在分解过程中是发生矿化还是微生物固持,较低的 C/N 有利于氮的矿化养分释放,通常认为土壤 C/N 在 25~30 以下会出现净矿化^[17]。本研究发现,轻度、中度和重度退化草地土壤的 C/N 范围分别为 16.64~22.16, 9.42~35.30, 11.27~89.88,说明轻度退化草地土壤有机碳含量处于丰富水平,较高的土壤有机碳含量降

低了全氮含量使草地发生了净矿化。土壤 C/P 被认为是指示土壤 P 素矿化能力的重要指标,可以衡量土壤有机质矿化释放 P 或吸收固持 P 的潜力,较高的 C/P 不利于微生物在有机质分解过程中的养分释放,使土壤中有效磷的含量减少^[18],高山草地 C/P 平均值为 24.45,变化范围为 1.05~177.69^[19]。本研究发现,轻度、中度和重度退化土壤 C/P 范围为 56.06~144.96, 57.39~184.28, 43.30~207.50,这是因为微生物在有机质分解过程中的养分释放受到影响,抑制土壤中有效磷的增加,使得该过程存在 P 受限^[20]。N/P 作为判断限制生产力的养分因子指标,将 $N/P < 10$ 和 $N/P > 20$ 作为评价植被生产力受 N 或者 P 限制的指标^[21]。本研究中轻度、中度和重度退化土壤 N/P 的范围为 2.90~6.54, 2.96~7.56, 2.32~7.86,由此可知,在不同退化草地中,植物的生产力主要受 N 素的影响,在植物体内的氮、磷含量主要来源于土壤,而土壤中氮素和磷素含量的变化将直接影响植物体内的氮磷比^[19]。

土壤酶活性是综合评价土壤质量变化、检测土壤中微生物群落变化的重要指标^[20]。土壤蔗糖酶直接参与土壤有机质的代谢过程,一般情况下,土壤有机质含量越高,蔗糖酶活性越强,其活性可以作为评价土壤熟化程度和土壤肥力水平^[22,23],蔗糖酶活性受到多种土壤因子的影响,如土壤有机质和土壤呼吸强度,人为干扰强度土壤微生物生物量碳、氮等也存在着相关性^[24]。本研究表明,随草地退化程度加剧,蔗糖酶、脲酶、中性磷酸酶、脱氢酶、和氧化还原酶活性呈降低趋势,而土壤纤维素酶活性呈先升高后降低趋势。在皇城和天祝试验点中蔗糖酶活性表现为 $MDG > LDG > SDG$,主要是因为 SDG 样地土壤中有

机质的积累较少,故蔗糖酶活性相对较低^[25];MDG、LDG草地土壤表层累积了较多的枯枝落叶和腐殖质,有机质含量高,使土壤蔗糖酶活性较高。本研究中土壤纤维素酶活性变化规律与其他相关研究结论略有差异^[26-27],这是因为轻度退化草地土壤表层凋落物较集中,透气性差,光照较弱,不利于土壤中大量需氧微生物生长繁殖及区系构建,从而影响到土壤微生物分泌的土壤酶活性。本研究发现,有机质、含水量、氮素、磷素、钾素它们不仅两两之间均有极显著正相关性,还与脲酶、脱氢酶间均有极显著正相关性($p < 0.01$),而pH和电导率与脱氢酶均有极显著负相关性($p < 0.01$)。这是因为土壤矿化和有机质的分解提高土壤酶活性,也有可能牲畜采食减少了凋落物对土壤表面的覆盖度,接受太阳辐射增加,提高土壤温度,土壤气体交换加快,微生物数量增加及其代谢物提高土壤酶活性^[29]。综上,草地退化直接影响了地表植物的分布,也影响了土壤理化性质的改变,并加剧了这一过程。因此,在祁连山高寒草地生态系统的管理及开发利用中,不但要注重草地植被,同时更要关注土壤环境的变化,提高土壤质量和健康状况,对于发展畜牧业经济和保护环境具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Merbold L, Eugster W, Stieger J, et al. Greenhouse gas budget (CO₂, CH₄ and N₂O) of intensively managed grassland following restoration [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 1913-1928.
- [2] Gould I J, Quinton J N, Weigelt A, et al. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands [J]. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1140-1149.
- [3] Yan Y, Lu X. Is grazing exclusion effective in restoring vegetation in degraded alpine grasslands in Tibet, China? [J]. *Peer J*, 2015, 3: e1020.
- [4] 杨成德,龙瑞军,陈秀蓉,等.东祁连山高寒草甸土壤微生物量及其与土壤物理因子相关性特征[J].*草业学报*, 2007, 16(4): 62-68.
- [5] Luis M D, Raventós J, González-Hidalgo J C. Post-fire vegetation succession in Mediterranean gorse shrublands [J]. *Acta Oecologica*, 2006, 30(1): 54-61.
- [6] 冯瑞章,周万海,龙瑞军,等.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[J].*土壤通报*, 2010, 41(2): 263-269.
- [7] 张玉霞,姚拓,王国基,等.高寒生态脆弱区不同扰动生境草地植被及土壤无机氮变化特征[J].*草业学报*, 2014, 23(4): 245-252.
- [8] 卢虎,姚拓,李建宏,等.高寒地区不同退化草地植被和土壤微生物特性及其相关性研究[J].*草业学报*, 2015, 24(5): 34-43.
- [9] Gos P, Loucougaray G, Colace M P, et al. Relative contribution of soil, management and traits to co-variations of multiple ecosystem properties in grasslands [J]. *Oecologia*, 2016, 180(4): 1001-1013.
- [10] 张金屯.应用生态学[M].北京:科学出版社,2003.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 林先贵.土壤微生物研究原理与方法[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Fan H B, Wu J P. Linkages of plant and soil C : N : P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(2): 127-138.
- [17] 薛立,邝立刚,陈红跃,等.不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J].*土壤学报*, 2003, 40(2): 280-285.
- [18] 张萍,章广琦,赵一娉,等.黄土丘陵区不同森林类型叶片一凋落物一土壤生态化学计量特征[J].*生态学报*, 2018, 38(14): 1-11.
- [19] 陈思宇,于惠,冯琦胜,等.甘南高原土壤氮磷比空间异质性研究[J].*草地学报*, 2013, 21(1): 30-36.
- [20] 谈嫣蓉,杜国祯,陈懂懂,等.放牧对青藏高原东缘高寒草甸土壤酶活性及土壤养分的影响[J].*兰州大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(1): 86-91.
- [21] Gusewell S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, 164: 243-266.
- [22] 蒋永梅,师尚礼,田永亮,等.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[J].*水土保持学报*, 2017, 31(3): 244-249.
- [23] 尹亚丽,王玉琴,鲍根生,等.退化高寒草甸土壤微生物及酶活性特征[J].*应用生态学报*, 2017, 28(12): 3881-3890.
- [24] 张旭辉,潘根兴,李恋卿,等.连续多年栽培叶用银杏下土壤养分及酶活性变化[J].*土壤通报*, 2004, 35(1): 21-25.
- [25] 牛得草,江世高,秦燕,等.围封与放牧对土壤微生物和酶活性的影响[J].*草业科学*, 2013, 30(4): 528-534.
- [26] 沈菊培,陈振华,陈利军.草甸棕壤水稻田磷酸酶活性及对施肥措施的响应[J].*应用生态学报*, 2005, 16(3): 583-585.
- [27] 薛立,邝立刚,陈红跃,等.不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J].*土壤学报*, 2003, 40(2): 280-285.
- [28] 杨万勤,王开运.土壤酶研究动态与展望[J].*应用与环境生物学报*, 2002, 8(5): 564-570.
- [29] 叶存旺,翟巧绒,郭梓娟,等.沙棘一侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J].*西北林学院学报*, 2007, 22(5): 1-6.