

高寒草地土壤酶活性和微量元素含量对植被特征的影响

杨冬阳,柳小妮*,李强,何国兴,乔欢欢,关文昊,刘志刚,杨军银,纪童,文铜
(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)

摘要:【目的】探寻祁连山不同高寒草地土壤酶活性和微量元素与植被特征之间的相互关系,并找出影响植被特征的主要因素,为祁连山生态系统的保护提供科学依据。【方法】分析高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠的植被特征,及其土壤酶活性和微量元素的变化规律,探讨酶活性和微量元素与植被特征的关系,运用冗余分析和蒙特卡洛检验,确定影响植被特征的主要因素。【结果】1)不同类型高寒草地的植被总盖度,草层高度依次为高寒草甸>高寒草原>高寒荒漠,地上生物量、香农威纳指数和丰富度依次为高寒草原>高寒草甸>高寒荒漠,均匀度依次为高寒荒漠>高寒草甸>高寒草原,优势度依次为高寒荒漠>高寒草原>高寒草甸;不同类型高寒草地脲酶活性依次为高寒草原>高寒草甸>高寒荒漠。过氧化氢酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性依次为高寒荒漠>高寒草原>高寒草甸。Mg、Mn、Zn含量依次为高寒荒漠>高寒草甸>高寒草原,Fe、Cu含量依次为高寒荒漠>高寒草原>高寒草甸,Mo含量为高寒草甸>高寒荒漠>高寒草原。2)随土层深度的增加,除高寒草原脲酶、蔗糖酶和高寒荒漠碱性磷酸酶活性呈先升后降的趋势外,其他草地类型脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性呈下降趋势,不同类型高寒草地过氧化氢酶活性随土层深度的增加均呈上升趋势,且增幅不大。Mg、Mn、Fe、Cu的含量随着土层深度的增加在不同高寒草地无较大变幅,Mo与Zn的含量在高寒草甸中随土层深度的增加而降低,高寒荒漠Mo含量的变化趋势与之相反,在高寒草原中,Mo含量随土层增加而降低,Zn含量则呈先升后降的趋势。3)碱性磷酸酶、蔗糖酶活性、Cu、Fe含量与植被特征有着密切关联,影响草地植被特征的重要性排序依次为Cu含量>蔗糖酶活性>Fe含量>碱性磷酸酶活性。【结论】高寒草地不同类型土壤酶活性和微量元素含量因草地类型而异,且植被特征一定程度上受某些微量元素和土壤酶活性的影响,应结合二者演变规律合理利用祁连山高寒草地。

关键词:高寒草地;植被特征;土壤;酶活性;微量元素;冗余分析

中图分类号:S812.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)04-0001-10

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.04.001



土壤酶作为土壤组分中最活跃的一种有机成分,主要来源于动植物的分泌,它直接参与土壤中物质能

量的循环,被公认为最敏感、最具有潜力的土壤质量生物学指标^[1-2],研究表明高寒草地的退化与土壤酶活性变化有密切的联系^[3]。同时,表征土壤环境质量的重要因子——土壤微量元素的含量反映了土壤对植物矿物质营养的供给水平^[4],不同类型高寒草地土壤微量元素的变化与植被生长、土壤肥力和健康状况密切相关^[5]。只有了解土壤酶活性和微量元素含量与植被群落的联系,才能更好地保护祁连山高寒牧场,防止高寒草地的退化^[6-7]。但土壤酶活性、微量

收稿日期:2022-02-07;修回日期:2022-02-28

基金项目:甘肃省新一轮草原补奖效益评估及草原生态评价研究(XZ20191225);超低空微遥感技术在草原监测中的应用研究及推广示范(201647)

作者简介:杨冬阳(1998-),男,陕西汉中,硕士研究生。

E-mail:1257199207@qq.com

*通信作者。E-mail:liuxn@gsau.edu.cn

元素含量和植被特征之间到底有何关联?目前,许多学者已对高寒草地植被特征做了大量的研究,主要集中于群落物种组成^[8]、生物多样性^[9]、生物量^[10]等方面,土壤理化性质(容重、孔隙度、各类元素含量等)^[11-12]的相关研究也较多,但高寒草地土壤酶活性以及微量元素含量与植被群落的相互关系的研究鲜有报道。

高寒草地是祁连山高寒牧区植被的主体^[13],不仅孕育着众多的土著生物和抗逆种质资源,而且是牧民从事草地畜牧业生产的物质基础^[14];更是我国西北内陆河流黑河、石羊河等河流的发源地和河西绿洲的水源地^[15]。高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠3类草地占据着祁连山高寒牧区的大部分区域,草地类型的变化可以引起许多自然因素和生态过程的变化,从而导致土壤养分、植被特征的不同^[16]。因此,本研究以祁连山东北缘这3类高寒草地为研究对象,研究不同高寒草地类型土壤酶活性与微量元素含量对植被群落的

影响,以期为祁连山生态系统的保护,植被恢复及生态评价提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

样地位于甘肃省祁连山东北缘的金强河流域, E 94°10'~103°04', N 35°50'~39°19'。海拔2 000~4 500 m,相对高差1 000~2 000 m。该区域属高寒半干旱气候,温差较大,年平均气温在4℃左右,年平均降水量为66~600 mm,广泛分布着高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠。土壤类型有山地棕钙土、山地栗钙土、山地草原土、山地灰褐土、山地草甸土,局部有高山荒漠石质土和高山冰沼土。

1.2 样地设置及植被特征调查

为确保结果不受放牧的影响,选择禁牧的高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠为样地(表1),于2019年7月20日至8月10日进行植被特征调查和土壤样品采集。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information table of sample plots

草地类型	海拔/m	经纬度	物种	利用方式
高寒草甸	2977	N 37°10'48.66" E 102°47'13.83"	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i> . ,线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i> . ,花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i> . ,黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> . ,风毛菊 <i>Saussurea japonica</i> .	禁牧
高寒草原	3735	N 39°16'32.99" E 97°42'52.57"	紫花针茅 <i>Stipa purpurea</i> . ,线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i> . ,早熟禾 <i>Poa annua</i> 蕨麻 <i>Potentilla anserina</i> . ,点地梅 <i>Androsace umbellata</i> .	禁牧
高寒荒漠	4290	N 39°15'34.39" E 97°45'6.70"	红景天 <i>Rhodiola rosea</i> ,风毛菊 <i>Saussurea japonica</i> . ,线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i> .	禁牧

在每类草地样地的中心区设置3个10 m×10 m的大样方,样方间隔200 m,按照S形采样法,每个大样方设置5个1 m×1 m的小样方,调查植物组成、草层高度、盖度、频度。并采用收割法收集植物地上部分,带回实验室烘干后称重,取干重为地上生物量。植物群落高度、生物量、盖度、频度等测定方法参考《草地调查规划学》^[17]。

1.3 土壤样品采集及测定

调查完成后,采集每个小样方分0~10、10~20、20~30 cm土层采集土壤样品;将15个小样方内的土壤过孔径为0.18 mm的筛后混合,阴干后用于测定土

壤微量元素含量和土壤酶活性。

土壤酶活性测定:蔗糖酶活性采用改良3,5-二硝基水杨酸比色法测定;脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;过氧化氢酶活性采用改良滴定法测定^[18]。

土壤微量元素全量测定:Mg、Mn、Fe、Cu、Mo和Zn采用氢氟酸-浓盐酸-浓硝酸(1:1:3)在微波消解仪消解后,应用原子火焰分光光度仪和横向石墨炉进行测定^[5]。

草地生物多样性指数计算公式如下^[19]:

物种丰富度: $R = (S - 1) / \ln N$

物种优势度: $D=1-\sum P_i^2$

物种香农-威纳指数: $H'=-\sum P_i \ln_i$

物种均匀度: $E=H'/\ln S$

式中: S 表示样方中物种总数, N 表示样方中各物种重要值之和; P_i 表示物种 i 的相对重要值, R 表示丰富度, E 表示物种均匀度, D 表示优势度, H' 表示物种香农-威纳指数。

1.4 数据分析与处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 21.0 以及 Canoco 5.0 软件进行数据整理分析。利用 SPSS 21.0 对植被特征、物种多样性指数、不同土层深度下高寒草地土壤酶活性和微量元素含量变化特征进行方差分析;采用

SPSS 21.0 对高寒草地植被特征与土壤酶活性和微量元素之间进行相关性分析。利用 Canoco 5.0 对植被特征因子与土壤酶活性及微量元素进行冗余分析及蒙特卡洛检验。所有数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同类型高寒草地植被特征

高寒草甸和高寒草原的植被总盖度显著 ($P<0.05$) 高于高寒荒漠, 但高寒草甸和高寒草原的植被总盖度之间差异不显著; 高寒草原的草层高度和地上生物量 > 高寒草甸 > 高寒荒漠, 且差异显著 ($P<0.05$) (表 2)。

表 2 不同类草地植被特征

Table 2 Vegetation characteristics of different type grasslands

草地类	总盖度/ %	草层高度/cm	地上生物量/(g·m ⁻²)
高寒草甸	85.00 ± 5.00 ^a	8.28 ± 0.17 ^b	368 ± 13 ^b
高寒草原	80.00 ± 2.00 ^a	16.17 ± 3.86 ^a	441 ± 43 ^a
高寒荒漠	28.33 ± 2.88 ^b	5.63 ± 1.33 ^c	136 ± 6.4 ^c

注: 数据表示为平均值±SD; 同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。AM, 高寒草甸; AS, 高地草原; AD, 高寒荒漠, 下同

2.2 物种多样性

高寒草甸和高寒草原的香农-威纳指数显著高于高寒荒漠 ($P<0.05$); 而高寒荒漠的均匀度和优势度显著高于高寒草甸和高寒草原 ($P<0.05$), 且高寒

草甸和高寒草原之间差异不显著; 高寒草原的丰富度显著大于高寒草甸和高寒荒漠, 且高寒草甸和高寒荒漠差异显著 ($P<0.05$) (表 3)。

表 3 不同类草地物种多样性

Table 3 Biodiversity characteristics of different grassland types

草地类型	香农-威纳指数	均匀度	优势度	丰富度
高寒草甸	2.59 ± 0.25 ^a	0.96 ± 0.01 ^{ab}	0.08 ± 0.03 ^b	7.02 ± 0.53 ^b
高寒草原	2.60 ± 0.38 ^a	0.94 ± 0.01 ^b	0.09 ± 0.04 ^b	8.27 ± 0.45 ^a
高寒荒漠	1.77 ± 0.11 ^b	0.99 ± 0.02 ^a	0.17 ± 0.03 ^a	4.01 ± 0.36 ^c

2.3 土壤酶活性

不同类高寒草地土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性均存在显著差异 ($P<0.05$) (图 1)。

从平均值来看, 高寒草原的脲酶和碱性磷酸酶都显著高于高寒草甸和高寒荒漠 ($P<0.05$), 高寒草原的脲酶与碱性磷酸酶活性分别为 0.58 和 66.86 mg/(g·24h)。高寒草原和高寒草甸的过氧化氢酶与蔗糖酶都显著高于高寒荒漠 ($P<0.05$), 高寒草甸和高寒草原的土壤过氧化氢酶活性分别为 32.68

和 32.66 mg/(g·24h), 高寒草甸与高寒草原蔗糖酶活性分别为 4.96 和 5.06 mg/(g·24h)。

随着土层深度的增加, 高寒草甸和高寒荒漠土壤脲酶活性呈下降趋势, 高寒草原呈先升后降趋势; 碱性磷酸酶活性在高寒草甸和高寒草原中呈下降趋势, 在高寒荒漠中呈先升后降趋势; 3类高寒草地过氧化氢酶活性均呈上升趋势, 而蔗糖酶与之相反, 呈下降趋势。

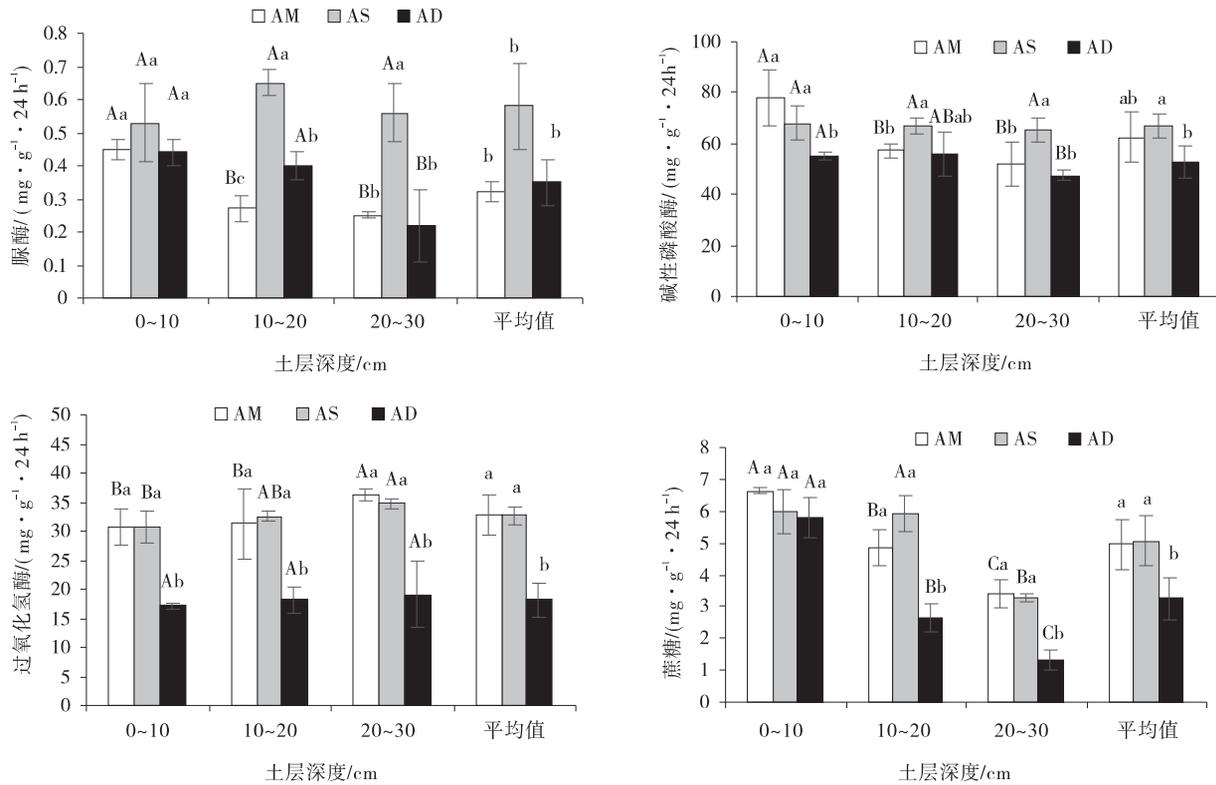


图1 不同土层深度土壤酶活性变化

Fig. 1 Soil enzyme activity in different soil depths

注:不同大写字母表示同一土层深度下不同类草地间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示同一类草地不同土层深度下差异显著($P < 0.05$)。下同

2.4 微量元素

不同土层深度下,3类高寒草地土壤6种微量元素Mg、Mn、Fe、Cu、Mo和Zn含量均存在显著差异($P < 0.05$)(图2)。

就平均值而言,高寒草甸和高寒荒漠Mg含量显著高于高寒草原($P < 0.05$),Mg在高寒草甸和高寒荒漠中的含量分别为24.71和27.30 mg/kg。高寒荒漠Mn含量显著高于高寒草甸和高寒草原($P < 0.05$),高寒荒漠Mn含量为1.56 mg/kg。高寒荒漠的Fe与Cu的含量显著高于高寒草甸和高寒草原($P < 0.05$),高寒荒漠的Fe与Cu的含量分别为35.44和103.25 mg/kg。高寒草甸和高寒荒漠Mo与Zn含量显著高于高寒草原($P < 0.05$),高寒草甸和高寒荒漠的Zn含量分别为116.45和126.59 mg/kg。高寒草甸和高寒荒漠Mo的含量分别为0.86与0.80 mg/kg。

随着土层的深入,高寒草甸和高寒草原土壤Mg与Mn的含量呈现先上升再下降的趋势,高寒荒漠Mg含量呈下降趋势,Mn含量则呈增长的趋势;高寒草甸和高寒草原土壤中Fe与Cu的含量随土层深度的增加

呈下降趋势,高寒荒漠与之相反,持续上升;Mo含量的变化趋势与Fe和Cu含量一致;高寒草甸土壤中Zn的含量随土层深度的增加呈下降趋势,而高寒草原中呈先增后减的趋势,高寒荒漠与高寒草甸相反,随土层深度增加上升。

2.5 植被特征与土壤酶活性和微量元素的相关性

脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性和草层高度之间均呈显著正相关($P < 0.05$);碱性磷酸酶、蔗糖酶活性和地上生物量、香农威纳指数以及丰富度均呈极显著正相关($P < 0.01$);蔗糖酶活性和优势度,碱性磷酸酶、蔗糖酶活性和均匀度均呈显著($P < 0.05$)负相关;Mg、Fe含量和均匀度,Mn含量和优势度之间均呈显著正相关($P < 0.05$);Mn、Cu、Zn含量和均匀度均呈极显著正相关($P < 0.01$);Mn含量和总盖度、草层高度,Cu、Mo含量和草层盖度,Mg、Zn含量和地上生物量、丰富度均呈显著负相关($P < 0.05$);Fe、Cu含量和总盖度,Mg、Zn含量和草层盖度,Mn、Fe、Cu含量和地上生物量、丰富度,Fe、Cu含量和香农威纳指数均呈极显著负相关($P < 0.01$)(表4)。

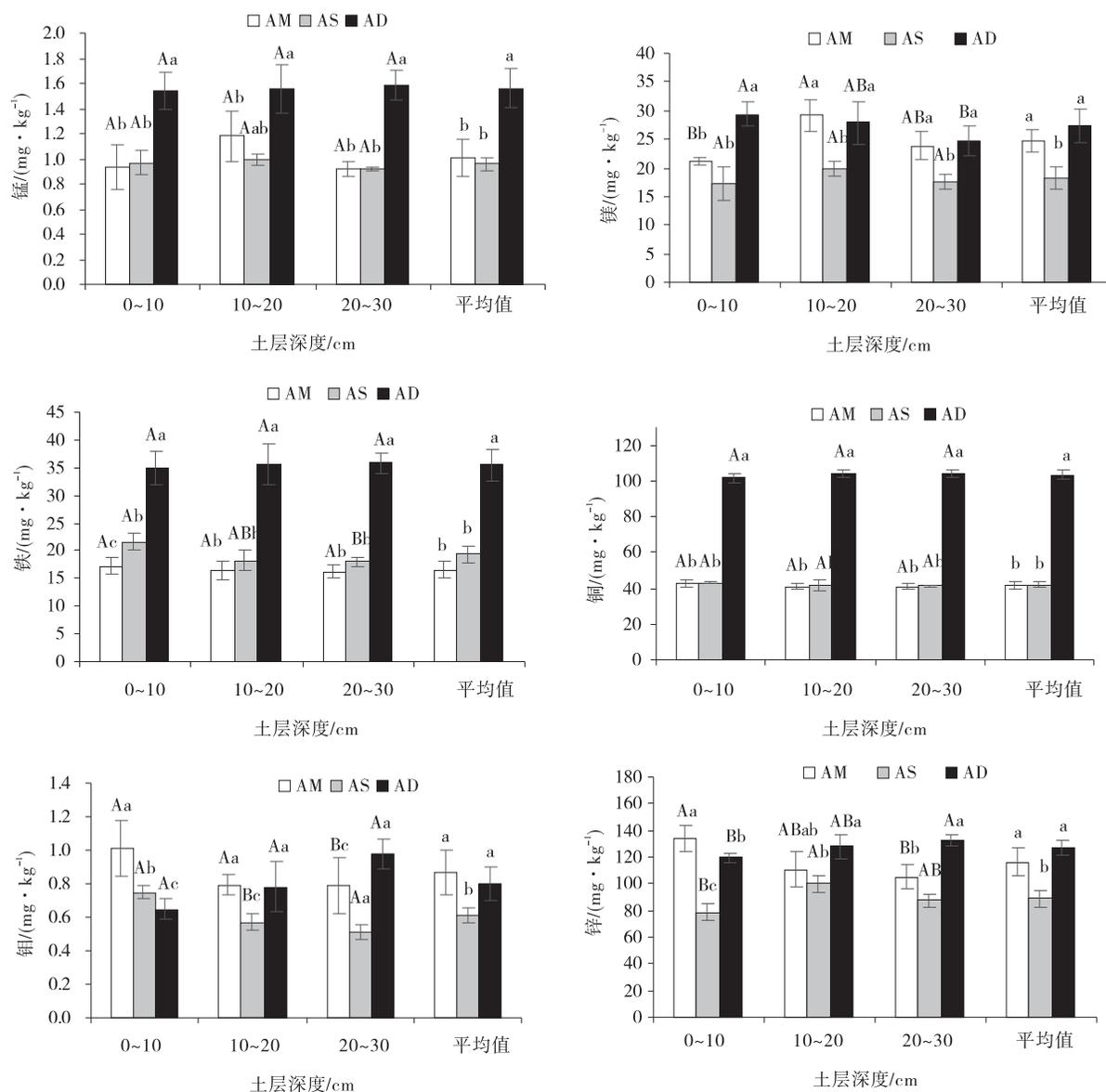


图 2 不同土层深度微量元素的特征

Fig. 2 Characteristics of trace elements in different soil depths

表 4 不同类高寒草地植被特征与酶活性和微量元素之间的相关性

Fig.4 Correlation between environmental factors, enzyme activity and trace elements in different types of alpine grassland

指标	Mg	Mn	Fe	Cu	Mo	Zn	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	蔗糖酶
总盖度	-0.532	-0.708*	-0.986**	-0.983**	-0.125	-0.581	0.318	0.806**	0.323	0.943**
草层高度	-0.822**	-0.789*	-0.533	-0.689*	-0.708*	-0.854**	0.767*	0.741*	0.2020	0.720*
地上生物量	-0.725*	-0.852**	-0.916**	-0.976**	-0.393	-0.765*	0.537	0.897**	0.293	0.948**
香农-威纳指数	-0.533	-0.637	-0.855**	-0.877**	-0.226	-0.514	0.284	0.802**	0.293	0.831**
均匀度	0.683*	0.940**	0.759*	0.815**	0.428	0.817**	-0.553	-0.786*	-0.08	-0.773*
优势度	0.399	0.693*	0.830**	0.802**	0.025	0.569	-0.257	-0.642	-0.157	-0.748*
丰富度	-0.777*	-0.840**	-0.886**	-0.960**	-0.458	-0.738*	0.6	0.891**	0.33	0.938**

注:*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著

2.6 不同高寒草地土壤酶活性和微量元素对植被群落特征影响的冗余分析

植被特征因子与土壤酶活性及微量元素的冗余分析(RDA)结果(表5)表明,第I轴、第II轴的解释量分别为99.96%和0.04%,即前两轴累计解释土壤微量元素特征的100%;且对植被特征因子与土壤酶活性和微量元素关系的累计解释量达到100%,表明前两轴能够反映植被特征与土壤酶活性和微量元素关系的90%以上信息,且主要是由第I轴决定。

表5 土壤酶活性和微量元素解释变量的冗余分析

Table 5 Redundant Analysis of Explanatory Variables of Soil Enzyme Activity and Trace Elements

排序轴	第1轴	第2轴
特征值/%	99.96	0.04
解释变异/%	99.96	100
伪相关系数	1	0.9993
解释拟合变异	99.96	100

Cu含量、蔗糖酶活性、Fe含量、碱性磷酸酶活性的连线最长(图3),表明可以更好的解释植被特征的差异。

Cu含量、蔗糖酶活性、Fe含量、碱性磷酸酶活性

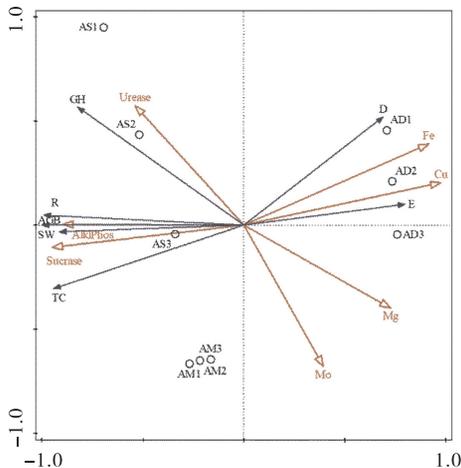


图3 不同高寒草地土壤酶活性和微量元素对植被群落特征影响的冗余分析(RDA)

Fig. 3 Redundant analysis of the effects of soil enzyme activities and trace elements on vegetation community characteristics in different alpine grasslands

注:AM1—AM3表示高寒草甸3个样点;AS1—AS3表示高寒草原3个样点;AD1—AD3表示高寒荒漠3个样点。TC总盖度,GH草层高度,AGB地上生物量,SW 香农—威纳指数,E均匀度,R丰富度,脲酶 Urease,碱性磷酸酶 AlkPhos,过氧化氢酶 Catalase,蔗糖酶 Sucrase,下同

对植被特征的影响均达显著水平($P < 0.01$),其重要值对应的解释率(贡献率)排序依次为Cu(95.3%)、蔗糖酶活性(89.8%)、Fe含量(83.8%)、碱性磷酸酶活性(80.4%)(表6)。

表6 植物特征解释土壤酶活性和微量元素的重要性排序和显著性检验结果

Table 6 Plant characteristics explain the importance of soil enzyme activity and trace elements, ranking and significance test results

影响因子	解释量/%	贡献率/%	F	P	重要值
Cu	95.3	95.3	141	0.002	1
Sucrase	89.8	89.8	62	0.004	2
Fe	83.8	83.8	36.2	0.008	3
AlkPhos	80.4	80.4	28.7	0.002	4

3 讨论

3.1 植被特征

植物群落特征是草地生产与生态稳定性调控研究的基础^[20],了解草地的群落组成、结构和功能,才能更高效地管理和利用草地,使草地生产力与生态功能得以全面发挥。姚喜喜^[16]的研究表明,祁连山高寒牧区植被特征随着草地类型的变化而变化,且各草地类型之间植被特征差异显著($P < 0.05$);杨磊^[21]研究表明高寒草甸的植被总盖度较高,为78.3%~87.5%。本研究中,3种高寒草地总盖度依次为高寒草甸(85%)>高寒草原(80%)>高寒荒漠(28.33%),生物量及草层高度依次为高寒草原>高寒草甸>高寒荒漠。高寒草地水热条件、地质母质以及土壤养分的不同,导致不同类高寒草地植被群落结构及草地生产力差异较大。因此,应对不同高寒草地因地制宜合理利用,防止祁连山高寒草地的进一步退化。

3.2 土壤酶活性

土壤酶活性在生态系统中发挥着重要作用,常被作为生化过程的敏感指标,对土壤肥力有直接影响^[22]。王理德^[23]等研究表明,土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶及磷酸酶活性均表现出随土壤深度的增加而逐渐减少的趋势。本研究中,就平均值而言,高寒草原的脲酶和碱性磷酸酶活性都显著高于高寒草甸和高寒荒漠($P < 0.05$),高寒草原和高寒草甸的过氧化氢酶与蔗糖酶活性都显著高于高寒荒漠($P < 0.05$)。

高寒荒漠盖度低、植物种类稀缺,促使植物凋落物及根际分泌物少,从而抑制了微生物生长和繁殖^[24],而土壤酶来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶^[23],这使得高寒荒漠的土壤酶活性要低于高寒草甸和高寒草原。

随着土层深度的增加,除高寒草原脲酶,蔗糖酶和高寒荒漠碱性磷酸酶活性呈先升后降的趋势外,其它类草地脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均呈下降趋势;过氧化氢酶活性均呈上升趋势,但增幅不大。土壤上层大量枯枝落叶堆积,有机质等养分富集,随着土层深度的增加,有机质等营养元素减少,导致高寒草地土壤酶活性随着土层深度的增加而减少^[16],但不同高寒草地地形及母质等因素不同,其植被特征、土壤养分组成与含量有较大差异,导致土壤酶活性在不同土层深度的变幅也较大,因此本研究中,不同类高寒草地的土壤酶,如脲酶,蔗糖酶和碱性磷酸酶等随土层深度的增加呈现出不同的变化趋势。另外,过氧化氢酶属氧化还原酶类,其活性除与凋落物组成及根系分泌物有关外,土壤环境也是影响其分布的重要因素,覆盖在土壤表层的凋落物较多,增加了土壤有机质的含量,并起到对降雨的截流作用^[23],而土壤含水量和有机质含量越高,土壤环境就越易处于还原状态^[25],从而抑制表层过氧化氢酶活性,深层土壤受含水量和有机质含量的影响较小,使过氧化氢酶活性随土层的增加呈略微增长的趋势。

杨秉珣^[26]研究表明生物多样性对酶活性反应较为敏感。由相关性分析可知,碱性磷酸酶、蔗糖酶活性和地上生物量、香农威纳指数以及丰富度极显著正相关,表明碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与地上生物量、香农一威纳指数以及丰富度相互影响,冗余分析(图 3)结果也表明蔗糖酶和碱性磷酸酶活性是影响植被特征的重要指标。随着植被盖度及生物量的增加,所产生的枯枝落叶和根系腐解物在土壤中积累、矿化,植物残体腐解过程中所产生酸类物质又促进土壤中难溶性物质向有效方向转化,供植物吸收利用,使土壤中土壤酶活性都有不同程度的增加,从而又促进植物的生长^[27-28],影响某些植被特征。

3.3 土壤微量元素含量

土壤中微量元素的含量受局部地形和生物地球化学循环的深刻影响^[29],且在不同草地类型中的含量

存在很大的差异^[30]。李强等^[5]研究表明,土壤微量元素含量与草地植被关系密切,在一定程度上影响着草地植被状况,不同类型草地植被特征和微量元素分布因草地类型而异。本研究中,从均值来看,高寒草甸和高寒荒漠 Mg、Mo、Zn 含量显著高于高寒草原($P < 0.05$),高寒荒漠 Mn、Fe、Cu 含量显著高于高寒草甸和高寒草原($P < 0.05$)。由于高寒荒漠植被稀疏,植被稀少削弱了土壤矿物质的吸收和利用,促使土壤微量元素含量较高^[5],且不同高寒草地水热条件以及土壤母质不同^[29],可能导致高寒草甸 Mg、Mo、Zn 含量高于高寒草原。

本研究中,Mg、Mn、Fe、Cu 这 4 种微量元素含量在不同高寒草地随土层深度的增加变幅不大;Mo 与 Zn 含量含量在高寒草甸中随土层深度的增加而降低,高寒荒漠 Mo 含量的变化趋势与之相反;在高寒草原中,Mo 含量随土层增加而降低,Zn 含量则呈先升后降的趋势。单一化学元素在土壤中的运移由元素分子量、溶解性等自身特性决定^[31],这导致不同微量元素之间的差异,使不同元素含量出现较大变幅。在高寒草甸和高寒草原中,植被盖度高,降水多,表层土壤微量元素一部分随径流流失,一部分随降雨向底层淋溶迁移,且高寒草甸和高寒草原土壤孔隙度小,仅有少量元素进入土壤深层,微量元素含量随土层深度增加而减少;而高寒荒漠中植被稀疏,土壤孔隙度大,微量元素随降水轻易下渗到土层深处,使微量元素含量随土层深度增加^[32]。

本研究表明,Mn、Cu、Zn 含量和均匀度呈极显著正相关关系($P < 0.01$);Fe、Cu 含量和总盖度,Mg、Zn 含量和草层盖度,Mn、Fe、Cu 含量和地上生物量、丰富度,Fe、Cu 含量和香农威纳指数呈极显著负相关($P < 0.01$),其中 Cu 含量与 Fe 含量是影响植被群落的关键因素。不同草地类型微量元素含量受母质的影响而呈现不同的变化趋势,微量元素的缺失或过量势必会影响植物的生长发育,与植被群落息息相关^[33]。因此,在进行草地管理和利用过程中,应注意微量元素含量的变化,特别是 Fe 和 Cu 的含量。

4 结论

1) 随土层深度的增加,除高寒草原脲酶、蔗糖酶和高寒荒漠碱性磷酸酶活性呈先升后降外,其他草地

类型脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性呈下降趋势;不同类高寒草地过氧化氢酶活性随土层深度的增加均呈上升趋势,但增幅不大。

2) Mg、Mn、Fe、Cu的含量随着土层深度的增加在不同高寒草地无较大变幅;Mo与Zn的含量在高寒草甸中随土层深度的增加而降低,高寒荒漠Mo含量的变化趋势与之相反,在高寒草原中,Mo含量随土层增加而降低,Zn则呈先升后降的趋势。

3)结合相关性分析和冗余分析可知,碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与地上生物量、香农威纳指数以及丰富度存在密切关联;Cu和Fe含量与植被特征的相关性最高;影响草地植被特征的重要性排序依次为Cu含量、蔗糖酶活性、Fe含量、碱性磷酸酶活性。

综上所述,不同高寒草地土壤酶活性和微量元素含量变化特征因草地类型而异,草地植被特征一定程度上受某些土壤酶活性和微量元素含量的影响,应结合二者变化规律合理利用和保护祁连山高寒草地。

参考文献:

- [1] 高雅宁,廖李容,王杰,等.禁牧对黄土高原半干旱草地土壤粒径多重分形特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):310—318+326.
- [2] 董发勤,刘明学,郝瑞霞,等.矿物光电子—微生物体系重金属离子价态调控及其环境效应研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(1):28—38+158.
- [3] 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.
- [4] 刘永红,倪中应,谢国雄,等.浙西北丘陵区农田土壤微量元素空间变异特征及影响因子[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1710—1718.
- [5] 李强,柳小妮,张德罡,等.祁连山自然保护区不同草地类型地上生物量和土壤微量元素特征分析[J].草原与草坪,2021,41(3):48—56.
- [6] 王佳,田青,王理德,等.青土湖不同年限退耕地植物物种多样性及土壤酶活性研究[J].西北植物学报,2021,41(11):1900—1911.
- [7] 周会程,姚玉娇,梁婷,等.天祝不同退化梯度高寒草甸土壤重金属污染及风险评价[J].生态环境学报,2020,29(10):2102—2109.
- [8] 赵鹏,屈建军,徐先英,等.长江源区沙化高寒草地植被群落特征及其与地形因子的关系[J].生态学报,2019,39(3):1030—1040.
- [9] 张中华,周华坤,赵新全,等.青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J].生物多样性,2018,26(2):111—129.
- [10] 泽让东科,文勇立,艾鹭,等.放牧对青藏高原高寒草地土壤和生物量的影响[J].草业科学,2016,33(10):1975—1980.
- [11] 齐洋,姜群鸥,郭建斌,等.季节性放牧对甘南高寒草地植被和土壤理化性质的影响[J].草地学报,2019,27(2):306—314.
- [12] 刁二龙,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同土地利用方式下土壤理化性质及空间变异性分析[J].西南农业学报,2019,32(8):1864—1871.
- [13] 李海英,彭红春,王启基.高寒矮嵩草草甸不同退化演替阶段植物群落地上生物量分析[J].草业学报,2004,13(5):26—32.
- [14] 张法伟,李跃清,李英年,等.高寒草甸不同功能群植被盖度对模拟气候变化的短期响应[J].草业学报,2010,19(6):72—78.
- [15] 张锐,刘普幸,张克新,等.祁连山区日照时数的空间差异、突变与多尺度分析[J].资源科学,2010,32(12):2413—2418.
- [16] 姚喜喜,宫旭胤,白滨,等.祁连山高寒牧区不同类型草地植被特征与土壤养分及其相关性研究[J].草地学报,2018,26(2):371—379.
- [17] 许鹏.草地调查规划学[M].北京:中国农业出版社,1999:99—106.
- [18] 许光辉.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986:102—287.
- [19] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅱ丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].生态学报,1995,15(3):268—277.
- [20] 王彦龙,马玉寿,施建军,等.黄河源区高寒草甸不同植被生物量及土壤养分状况研究[J].草地学报,2011,19(1):1—6.
- [21] 杨磊,熊黑刚.阿勒泰地区不同草地类型植被特征[J].水土保持研究,2018,25(6):152—159.
- [22] 宗宁,石培礼.模拟增温对西藏高原高寒草甸土壤供氮潜力的影响[J].生态学报,2019,39(12):4356—4365.
- [23] 王理德,王方琳,郭春秀,等.土壤酶学研究进展[J].土壤,2016,48(1):12—21.
- [24] 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[J].植物生态学报,2014,38(02):

- 209—218.
- [25] 李林海,邱莉萍,梦梦. 黄土高原沟壑区土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 应用生态学报,2012,23(12):3355—3360.
- [26] 杨秉珣,刘泉,王彬. 嘉陵江流域不同类型植被多样性与土壤养分和酶活性的关系[J]. 水土保持研究,2016,23(06):45—51+58.
- [27] PauliH, GottfriedM, DullingerS, *et al.* Recent plant diversity changes on Europe's montain summits[J]. Science, 2012,336 (6079): 353—355.
- [28] BagchiR, GalleryRE, Grippenbergs, *et al.* Parthogens and insetherbivoresdriverainforest planet diversity and compost. time[J] Nature,2014,506 (7486): 85—88.
- [29] 袁子茹,任灵,张德罡,等. 青藏高原东缘高寒草甸草原牧草 4 种微量元素含量季节动态[J]. 草地学报,2016,24(4):868—873.
- [30] 塔娜,那日苏,王海,等. 内蒙古苏尼特右旗草原土壤营养元素有效态含量分析[J]. 草业学报,2013,22(5):37—43.
- [31] 谢佰承,张春霞,薛绪掌. 土壤中微量元素的环境化学特性[J]. 农业环境科学学报,2007,26(S1):132—135.
- [32] 张晓霞,李占斌,李鹏,等. 黄土高原林地土壤微量元素分布和迁移特征[J]. 应用基础与工程科学学报,2011,19(S1):161—169.
- [33] 于锐. 不同施肥对黑土团聚体、有机碳及微量元素含量影响研究[D]. 北京:中国科学院,2013:3—4.

Effects of soil enzyme activities and trace elements on vegetation characteristics in different alpine grasslands

YANG Dong-yang, LIU Xiao-ni*, LI Qiang, HE Guo-xing, QIAO Huan-huan, GUAN Wen-hao, LIU Zhig-ang, YANG Jun-yin, JI Tong, WEN Tong

(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)

Abstract: [Objective] The study is performed to explore the interrelationship between soil enzyme activity and trace elements and vegetation characteristics in different alpine meadows in Qilian Mountains, and to find out the main factors affecting vegetation characteristics, so as to provide some scientific basis for the conservation of Qilian Mountain ecosystem. [Method] In this paper, we analyzed the vegetation characteristics of alpine meadows, alpine grasslands and alpine deserts, and the change patterns of their soil enzyme activities and trace elements, explored the relationship between enzyme activities and trace elements and vegetation characteristics, and used redundancy analysis and Monte Carlo test to determine the main factors affecting vegetation characteristics. [Result] The results of the study showed that: 1) The total vegetation cover of different types of alpine grassland, the grass layer height was in the order of alpine meadow > alpine grassland > alpine desert. Aboveground biomass, Shannon—Weiner index and richness were in the order of alpine grassland > alpine meadow > alpine desert. The order of uniformity was alpine desert > alpine meadow > alpine grassland, and the order of dominance was alpine desert > alpine grassland > alpine meadow. In terms of mean values, urease activity was in the order of alpine grassland > alpine meadow > alpine desert. Peroxidase, alkaline phosphatase and sucrase activities were in the order of alpine desert > alpine grassland > alpine meadow. Mg, Mn and Zn contents were in the order of alpine desert > alpine meadow > alpine grassland, Fe and Cu contents were in the order of alpine desert > alpine grassland > alpine meadow. Mo contents were

in the order of alpine meadow > alpine desert > alpine grassland. 2) With the increase of soil depth, the activities of urease, alkaline phosphatase and alkaline phosphatase in alpine grassland increased first and then decreased, while in other meadow types the activities of urease, alkaline phosphatase and sucrase showed a decreasing trend. In different types of alpine meadow, peroxidase activities showed an increasing trend with the increase of soil depth, but the increase was small. The contents of Mg, Mn, Fe and Cu in different alpine grasslands did not change greatly with the increase of soil depth. The content of Mo and Zn decreased with the increase of soil depth in alpine meadows, and the trend of Mo content in alpine deserts was the opposite. In the alpine grassland, Mo content decreased with the increase of soil layer, while Zn content increased first and then decreased. 3) Alkaline phosphatase, sucrase, Cu and Fe content were closely related to vegetation characteristics. The order of importance affecting vegetation characteristics of grassland was Cu content > sucrase activity > Fe content > alkaline phosphatase activity. **【Conclusion】** In conclusion, soil enzyme activities and trace element contents of different types of alpine grasslands varied according to grassland types, and vegetation characteristics were influenced by some trace elements and soil enzyme activities to some extent, so the alpine grasslands in Qilian Mountains should be used reasonably in combination with the evolution of the two.

Key words: alpine grassland; vegetation characteristics; soil; enzyme activity; trace elements; redundancy analysis