

祁连山西段草地表层土壤养分和酶活性对海拔的响应特征

李强¹,张英¹,李晓晴^{1*},柳小妮²,张德罡²

(1. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室,农牧学院,青海 西宁 810016;

2. 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】研究不同海拔下草地表层土壤养分和酶活性的变化特征。【方法】以祁连山西段的天然草地为研究对象,分析了不同海拔(2 995、3 170、3 403、3 620、3 817、4 068 m)表层土壤养分含量、生态化学计量比和酶活性的变化特征。【结果】海拔对草地表层土壤养分和酶活性具有显著影响;随着海拔的升高,土壤pH值、Cu含量呈上升趋势,土壤有机碳、全氮、全磷、N/P比、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、Zn含量、Mg含量呈先升高后降低,土壤C/N比、C/P比、Fe含量呈先下降后上升,但各指标最小值和最大值出现的海拔梯度各异;不同海拔N/P比处于3.58~5.86,均小于10;基于冗余分析(RDA)发现土壤有机碳和全磷是影响土壤酶活性的关键养分因子。【结论】草地表层土壤养分和酶活性随不同海拔高度呈规律性分布,且生产力主要受氮素的限制。建议依据海拔差异制定合理的管理措施,促进草地生态的健康发展。

关键词:祁连山中段;土壤养分;酶活性;海拔

中图分类号:S812.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)04-0026-08

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2024.04.004



海拔是地形因素在山地生态系统中的直接表现形式,也是水热条件综合的具体表现形式,其通过调控水热条件,导致水热条件的差异性分布,进一步影响土壤养分和酶活性^[1-4]。山地生态系统因其独特的环境和地质特征而具有重要的生态功能^[5-6]。因此,了解不同海拔下草地表层土壤养分、生态化学计量和土壤酶活性,不仅有利于理解草地垂直地带的养分特征,还可以为草地可持续管理提供数据支撑^[7]。

祁连山位于我国西北地区甘肃省与青海省的交界地带,属于青藏高原的东部边缘地带,与黄土高原和内蒙古高原相互连接,是典型的生态脆弱过渡区^[8-10];既是我国西北地区重要的生态安全屏障,也是全球气候变化最敏感的地区之一^[11]。研究发现,祁连山沿着东南向西北方向延伸的过程中降水量依次减少,尤其在中西部地区,气候整体呈暖干化^[12],因此,全球气候变化下,祁连山中西部的植被、土壤响应暖干化的特征和机制对整体祁连山生态安全具有重要的科学意义。

草地作为祁连山最大的植被类型之一,水源涵养、水土保持和维持物种多样性方面发挥着特别重要的作用^[13-14],尤其在祁连山中西部地区。近些年来,大量学者对祁连山草地生态系统开展了大量的研究^[13,15-16],但是绝大部分研究主要集中于典型草地类型的高寒草甸和高寒草原,且对中部地区草地的研究相对较少,尤其是垂直地带的研究。打破因草地类型

收稿日期:2023-04-12;**修回日期:**2023-05-31

基金资助:青海大学省部共建国家重点实验室自主项目(2023-ZZ-05);国家重点研发计划项目(2021YFC3201604)

作者简介:李强(1990-),甘肃陇西人,博士,讲师,主要从事草地资源与生态研究。

E-mail:1245524440@qq.com

*通信作者。E-mail::vickylexp@163.com

不同的思维限制,探究草地垂直地带的分布特征对于以“空间替代时间法”理解气候变化引发的草地生态系统的适应机制具有重要的生态学意义。因此,本研究以祁连山西段草地为研究对象,选择了6个海拔梯度(2 995、3 170、3 403、3 620、3 817、4 068 m),分析了表层土壤(0~20 cm)的土壤养分、生态化学计量比和土壤酶活性的分布特征,以期为区域草地管理和生态保护提供数据参考和支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市肃南县祁丰藏族乡(98°20′56.27″ E,39°39′8.83″ N),祁丰乡地势东南高,西北低,海拔4 000 m左右,祁连山雪峰将全乡分为前山地区和后山地区。该区域属于温带干旱气候和温带湿润气候,年降水量200~250 mm,大部分集中在6—9月;年均气温为8.1℃,年均相对湿度为50%~70%,年平均无霜期为85 d。土壤主要有山地灰钙土、山地灰褐土、亚高山草甸土等几个类型。植被在水平分布上自东南向西北逐渐变差,大致分为森林、灌丛、草原及荒漠四个植被带;植被垂直带谱极其分明,从低海拔到高海拔依次为草原带、森林带和高山草甸草原带。

1.2 样地设置和样品采集

2019年8月10—11日,在祁连山中西部苏南裕族自治县祁丰藏族乡大泉口黑大阪沿着S215线选取6个不同海拔梯度的高寒草地作为研究对象,海拔梯度依次为2 995、3 170、3 403、3 620、3 817、4 068 m(每200 m设置一个海拔梯度,因选择相同坡向和坡度的采样区域,导致海拔梯度非整数),不同海拔采样区域的坡向和坡度基本一致。每个海拔随机选择3个10 m×10 m样带,每个样带按照S型设置5个50 cm×50 cm的样方。测定每个样方的植被盖度、平均草层高度和地上生物量。地上部分刈割后,采用直径5 cm土钻在每个样方内按照对角线采集3钻0~20 cm土样,将每个样带的15钻土壤样品混匀,用四分法分装50~100 g土样。带回实验室风干,测定土壤土壤养分含量和微量元素及其土壤酶活性。

1.3 样品测定

土壤pH的测定:取部分风干土,过2 mm筛子,称取10 g,加入50 mL去离子水,在全自动摇床上

150 r/min振荡1 h,静置10 min,采用酸度计测定土壤pH。

全效养分测定:取部分风干土壤样品,过80目筛,然后进行研磨,使粒径小于0.15 mm,待测。土壤有机碳(SOC)测定采用全自动碳分析仪(Multi N/C 2100S/1, Analytik Jena AG, Germany)^[17],土壤测定全氮采用凯氏定氮法^[17],全磷测定采用钼锑抗比色法^[17]。

土壤酶的测定:土壤脲酶采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定,碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定。

土壤微量元素的测定:采用原子火焰分光光度法和石墨炉分光光度法测定了土壤微量元素铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、镁(Mg)、钙(Ca)、锌(Zn)、钴(Co)、硒(Se)含量^[9]。

1.4 数据处理

采用Excel 2007进行数据整理和绘图。在SPSS 19.0中用单因素方差分析,不同海拔指标的显著性方差分析均为0.05水平。利用Canoco 5.0对土壤养分和土壤酶活性进行RDA分析。所有数据均为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同海拔下草地表层土壤pH和碳氮磷特征

海拔对草地表层土壤pH、有机碳、全氮和全磷具有显著影响($P<0.05$) (图1)。随着海拔梯度是升高,土壤pH值呈上升趋势(图1-A);除海拔3 817 m的土壤pH值与海拔4 068 m差异不显著外,其他海拔的土壤pH值均差异显著($P<0.05$)。随着海拔梯度是升高,土壤有机碳呈先升高后降低,在3 403 m处达最大值(图1-B);海拔3 170、3 403、3 620和3 817 m的土壤有机碳含量显著高于海拔4 068 m,其他处理之间差异不显著。随着海拔梯度升高,土壤全氮呈先升高后降低,在3 620 m处达最大值(图1-C);海拔3 620 m的土壤全氮显著高于海拔3 403和3 817 m,海拔3 403和3 817 m的土壤全氮显著高于海拔3 170 m,海拔3 170 m的土壤全氮显著高于海拔2 995和4 068 m,其他海拔之间差异不显著。土壤全磷变化趋势(图1-D)与土壤全氮变化基本类似。

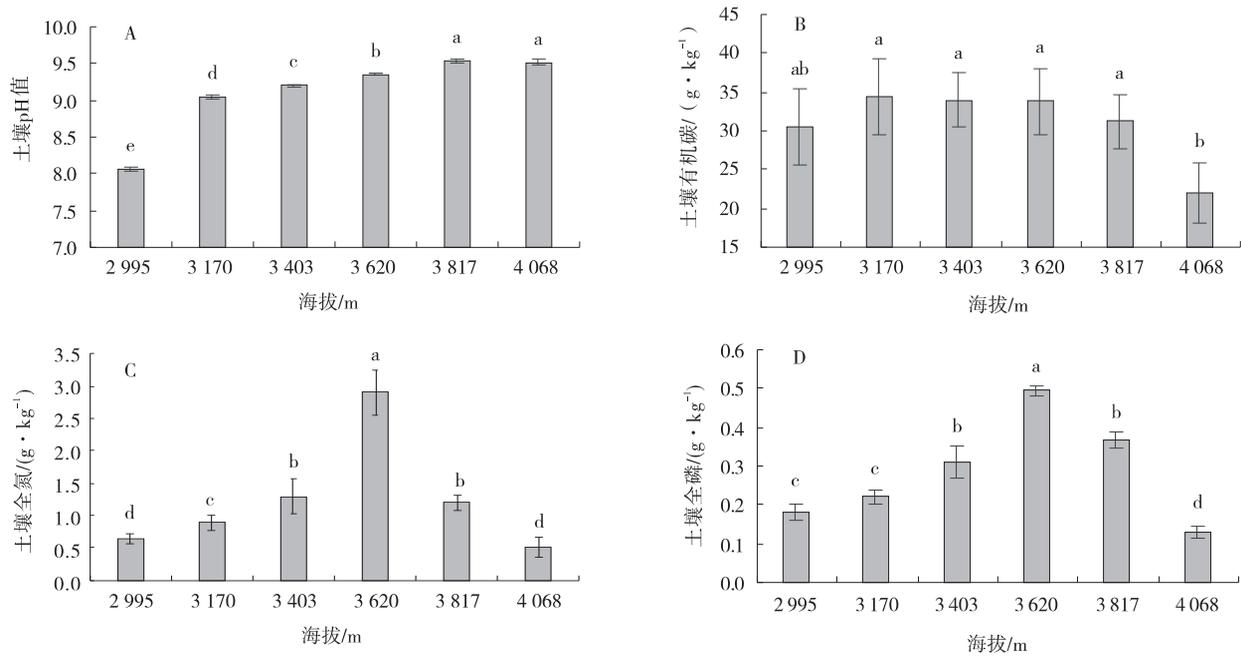


图1 不同海拔下草地表层土壤pH和碳氮磷特征

Fig. 1 pH, C, N and P characteristics of grassland topsoil at different elevations

2.2 不同海拔下草地表层土壤微量元素特征

海拔对草地表层土壤微量元素具有显著影响($P < 0.05$) (图2)。随着海拔的升高,土壤Zn含量的变化趋势呈先升高后降低,在海拔3170 m处达最大值(图2-A);海拔3170 m和2995 m的土壤Zn含量显著高于海拔3403 m,海拔3403 m的土壤Zn含量显著高于海拔3620、3817和4068 m,其他海拔的土壤Zn含量均差异不显著。随着海拔的升高,土壤Se含量呈先升后降再升再降的变化趋势(图2-B),且各海拔之间差异不显著。随着海拔的升高,土壤Mo含量呈先升后降再升的变化趋势(图2-C),在海拔3170 m处达最大值,除海拔3170 m和4068 m的土壤Mo含量显著高于海拔2995 m外,其他各海拔之间差异不显著。随着海拔的升高,土壤Cu含量呈升高的变化趋势(图2-D),在海拔4068 m处达最大值,除海拔4068 m的土壤Cu含量显著高于海拔2995 m外,其他各海拔之间差异不显著。随着海拔的升高,土壤Ca含量呈先降后升再降的变化趋势(图2-E),在海拔2995 m处达最大值;海拔2995 m的土壤Ca含量显著高于海拔3403和3170 m,海拔3403 m和3170 m的土壤Ca含量显著高于海拔4068 m,其他各海拔之间差异不显著。随着海拔的升高,土壤Mn含量基本呈降低趋势(图2-F),除海拔2995 m的土壤Mn含量显著高于海拔3817 m外,其他各海拔之间差异不显著。土壤Mg含量

随海拔的变化趋势与土壤Zn相反(图2-G)。随着海拔的升高,土壤Fe含量呈先降低后升高(图2-H),但是各海拔之间差异不显著。

2.3 不同海拔下草地表层土壤生态化学计量比

海拔对草地表层土壤生态化学计量特征比具有显著影响($P < 0.05$) (图3)。随着海拔梯度是升高,土壤C/N比呈先下降后上升,在海拔3620 m处达最小值(图3-A);海拔2995、3170和4068 m的土壤C/N比显著高于海拔3403和3817 m,海拔3403和3817 m的土壤C/N比显著高于海拔3620 m,其他海拔的土壤C/N比均差异不显著。不同海拔下土壤C/P比变化趋势与C/N比类似(图3-B),而不同海拔下土壤N/P比变化趋势与C/N比相反(图3-C)。

2.4 不同海拔下草地表层土壤酶活性

海拔对草地表层土壤酶活性具有显著影响($P < 0.05$) (表1)。随着海拔的升高,土壤脲酶呈先升高后降低,在海拔3620 m处达最大值;海拔3620 m的土壤脲酶活性显著高于海拔3170 m,海拔3170 m的土壤脲酶活性显著高于海拔4068 m,其他海拔的土壤脲酶活性均差异不显著。碱性磷酸酶活性和过氧化氢酶活性随海拔的变化趋势与脲酶类似。随着海拔的升高,除海拔3817 m处理外,蔗糖酶活性呈升高的变化趋势;海拔4068和3620 m的土壤蔗糖酶活性显著高于海拔3403 m,海拔3403 m的土壤蔗糖酶活性显

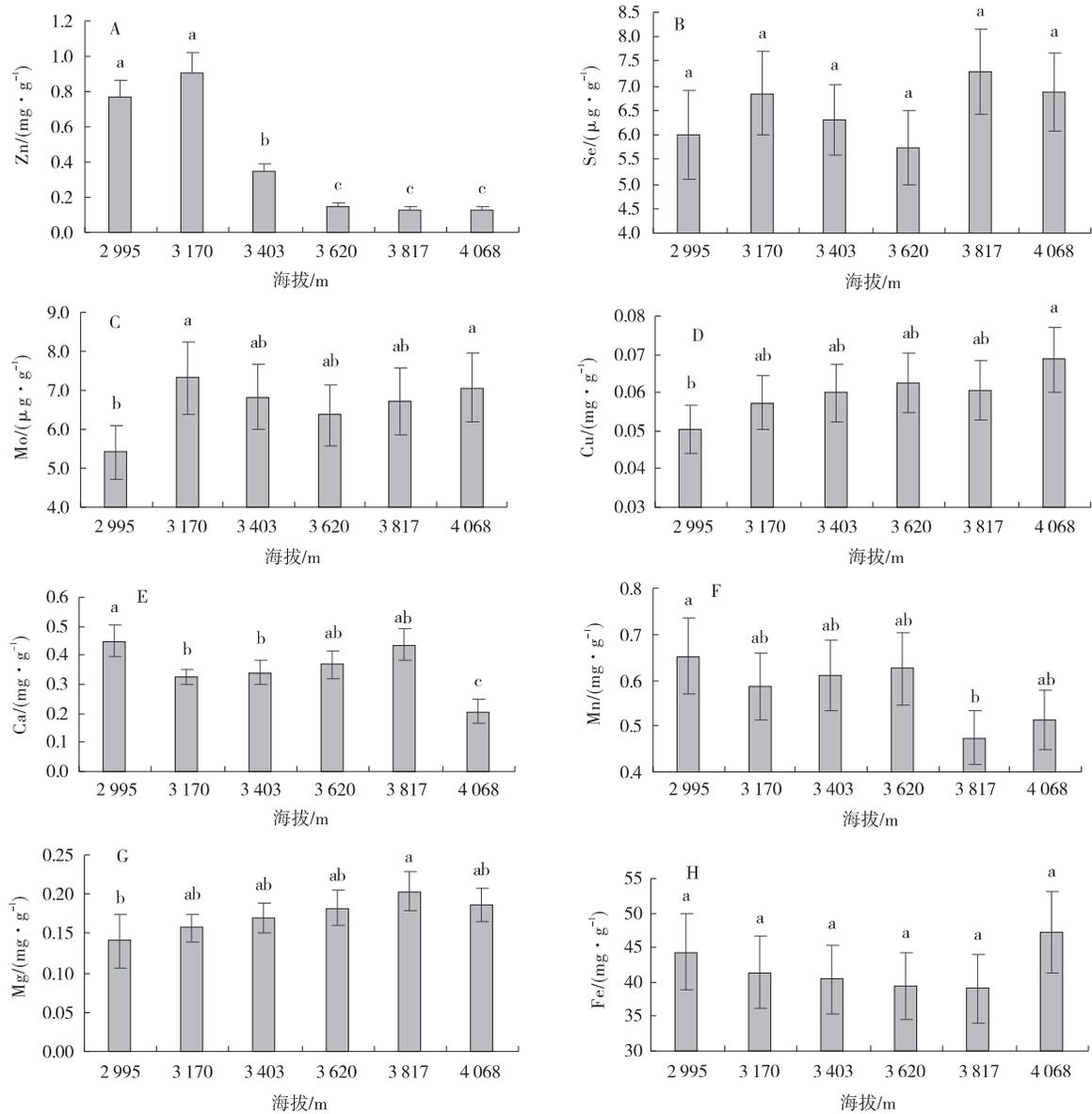


图 2 不同海拔下草地表层土壤微量元素特征

Fig. 2 Trace element characteristics of grassland surface soils at different elevations

著高于海拔 2 995 m,其他海拔的土壤蔗糖酶活性均差异不显著。

2.5 影响土壤酶活性的关键养分子

将土壤养分和土壤酶活性是数据首先进行标准

化,然后用 Canoco 5.0 进行冗余分析(RDA)(图 4),第一轴和第二轴贡献率分别为 76.96% 和 19.13%,总贡献率为 96.09%,由于总贡献率大于 85%,能够反映土壤养分对土壤酶活性影响的全部信息,具有生物学

表 1 不同海拔下草地表层土壤酶活性

Table 1 Soil enzyme activities in the surface layer of grassland at different elevations

海拔/m	脲酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	碱性磷酸酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	过氧化氢酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)
2 995	0.24±0.08 ^{bc}	35.6±3.10 ^{bc}	5.36±0.61 ^c	22.57±4.01 ^{bc}
3 170	0.30±0.11 ^b	39.94±5.03 ^b	6.32±0.59 ^{bc}	38.14±3.47 ^a
3 403	0.42±0.04 ^{ab}	42.80±3.60 ^b	7.13±0.47 ^b	38.56±2.05 ^a
3 620	0.56±0.12 ^a	51.88±4.50 ^a	9.91±0.84 ^a	41.09±4.52 ^a
3 817	0.27±0.04 ^{bc}	30.75±3.49 ^c	8.41±0.74 ^{ab}	27.24±5.06 ^b
4 068	0.17±0.07 ^c	21.74±3.72 ^d	9.46±0.59 ^a	18.75±3.00 ^c

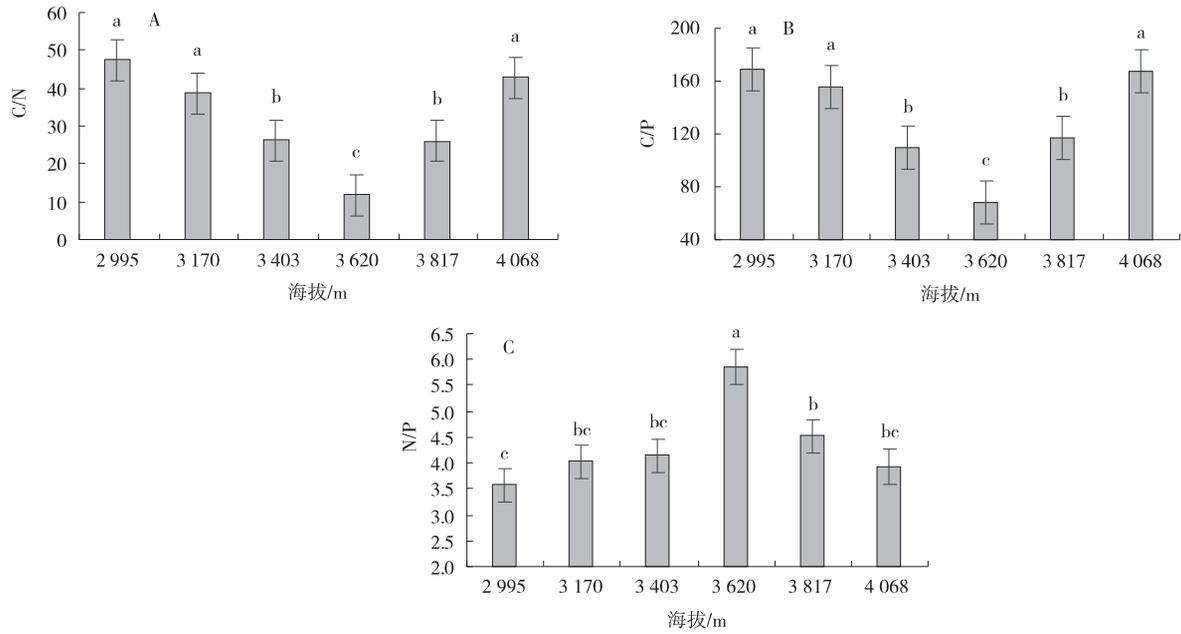


图3 不同海拔下草地表层土壤生态化学计量比

Fig. 3 Ecological stoichiometric ratios of topsoil of grassland at different elevations

统计意义。即前两轴可以比较完全地反映高寒草甸土壤养分与土壤酶活性的信息,主要以第一轴为主。由表2可知,全磷>有机碳>Ca>Mo>Fe,其中,全磷和有机碳对土壤酶活性的解释量分别为67.60%和20.90%,且呈差异显著水平($P<0.05$);即土壤有机碳和土壤全磷是影响土壤酶活性的主要土壤养分因子。

表2 土壤养分对土壤酶活性的蒙特卡洛检验

Table 2 Monte Carlo test of soil nutrients on soil enzyme activity

指标	解释率/%	贡献率/%	F值	P值
全磷	67.6	67.6	8.3	0.01
有机碳	20.9	20.9	5.5	0.026
Ca	6.4	6.4	2.5	0.102
Mo	4.8	4.8	14.9	0.104
Fe	0.3	0.3	<0.1	1

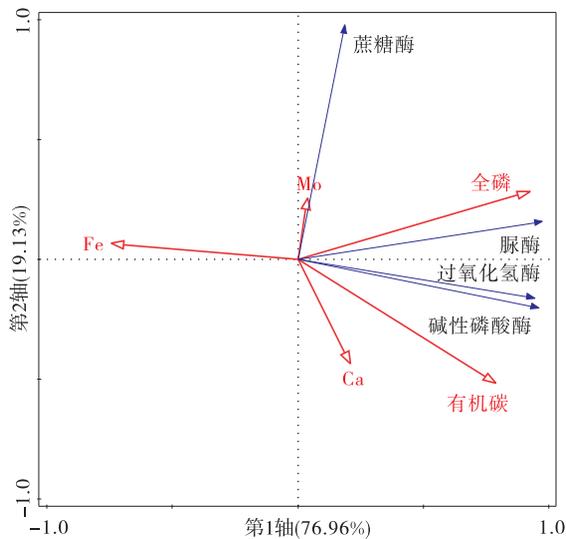


图4 土壤养分与土壤酶活性的RDA分析

Fig. 4 RDA analysis of soil nutrients and soil enzyme activity

3 讨论

3.1 草地表层土壤养分对海拔的响应特征

海拔作为山地生态系统垂直地带分布的典型因

子,太阳辐射的差异导致土壤水分蒸散的差异,形成水热资源的异质性导致植物群落组成的不同,植物群落组成的变化诱导土壤子生态系统使之改变^[1-2]。土壤作为草地生态系统的重要组成部分,是植物生长发育的基质,且直接影响植物的生长特征^[18]。如,在同一类型草地,土壤pH不仅影响着土壤养分循环和酶活性^[19],还影响众多土壤生化反应过程^[20];土壤有机碳是土壤肥力的直接体现^[21];且土壤氮和磷也是植被生长发育过程中特别重要养分元素^[22]。金章利等^[23]研究发现,随着海拔的升高,高寒草甸土壤碳、氮、磷含量均先升高后降低;李强等^[11]研究发现,随着海拔的升高,东祁连山高寒草甸的土壤有机碳、全氮和全磷均先升高后降低,而pH值呈先降低后升高。本研究发现,随着海拔的升高,草地表层土壤pH值呈上升趋势,土壤有机碳、全氮、全磷呈先升高后降低;即土壤碳氮磷的变化趋势与李强^[11]和金章利等^[28]等研究

结果类似;但是土壤pH变化存在差异性,可能是由于高寒草甸分布区域的特殊性,随着海拔升高,气温降低导致植物凋落物和土壤有机质增加,诱发提高了土壤微生物呼吸和对养分的利用率,但是随着海拔的持续升高,温度抑制土壤微生物活动,这是导致土壤碳氮磷养分随海拔呈规律性分布的主要原因^[24]。土壤微量元素含量对植物生长也是至关重要的,但是受地形、土壤类型、气候及植被类型等因素的共同影响^[25],其空间分布异质性较高。如,彭徐剑等^[26]发现,森林草原交错区沟塘草甸土壤有效Fe, Mn, Cu, Zn含量在不同的坡向上存在显著差异。本研究发现,随着海拔的升高,土壤Cu含量呈上升趋势,土壤Zn含量和Mg含量呈先升高后降低,土壤Fe含量呈先下降后上升,但各指标最小值和最大值出现的海拔梯度各异。由于土壤中的微量元素含量受植被组成和水热条件的影响,如,降水会淋溶、运移土壤微量元素,不同海拔梯度上的降水和蒸发是导致土壤微量元素在海拔梯度上含量差异的可能原因^[27]。

3.2 草地表层土壤生态化学计量比和酶活性对海拔的响应特征

土壤生态化学计量比对陆地生态系统的固碳过程具有很强的调控作用,具有重要的生态指示作用,也可以反映土壤养分循环状况^[28-29]。李强等^[11]研究发现,土壤C/N、C/P和N/P随海拔呈规律性变化,且高海拔和低海拔区域草地生产力受氮素限制严重。本研究发现,随着海拔梯度是升高,土壤C/N和C/P呈先下降后上升,而N/P呈先升高后降低,且不同海拔下的C/N、C/P和N/P依次为11.64~47.36、68.25~169.34和3.58~5.86。当N/P<10时,植被生产力受氮素限制,当N/P>20时,植被生产力受磷素限制^[30]。本研究中,土壤N/P比随着海拔升高呈先升高后降低趋势,且均小于10,即研究区不同海拔下的草地生产力均受氮素限制,且在高海拔和低海拔区域更加明显,这与姜哲浩^[31]等研究结果类似。土壤酶是评价土壤质量和微生物活性的重要指标^[32]。在不同生境中,产酶生物对土壤酶合成中的资源分配调整,增加对生境限制土壤养分元素的分配,以平衡和优化养分利用^[33]。本研究发现,随着海拔的升高,土壤蔗糖酶活性依次升高,土壤脲酶活性、碱性磷酸酶活性和过氧化氢酶活性呈先升高后降低,这与李聪

等^[34]研究结果类似。由于土壤活性主要来源于产酶生物(微生物),由于随着海拔升高,可能植物凋落物导致土壤有机质增加,提高了土壤微生物活性增强,但是海拔的持续升高,温度可能在一定的条件抑制土壤微生物活动,这可能是导致土壤酶随海拔呈规律性分布的原因^[24]。

3.3 影响土壤酶活性的关键养分因子

在草地土壤生态系统中,土壤养分是土壤生态系统的重要组成部分,而土壤酶活性是衔接土壤微生物群落与土壤养分的关键纽带,三者呈相互影响相互制约^[35]。本研究中,基于RDA分析发现,土壤有机碳和全磷是影响土壤酶活性的关键养分因子。这与李海云^[30]在祁连山草地土壤酶活性和土壤养分之间关系的研究结果类似。海拔作为最主要的地形因子的变化,显著改变草地表层土壤养分含量、生态化学计量比和土壤酶活性,这是山地生态系统水热资源异质性分布的主要原因所在。但是本文虽然以海拔梯度为研究对象,尚未获得不同海拔下的气象数据(积温、降水量),导致本研究未考虑气象水热因子对土壤养分和酶活性的影响机制,这是本研究的不足之处。基于本研究结果,建议依据海拔差异制定合理的管理措施,促进草地生态的健康可持续发展。

4 结论

海拔对草地表层土壤养分和酶活性具有显著影响。随着海拔的升高,土壤pH值、蔗糖酶活性、Cu含量呈上升趋势,土壤有机碳、全氮、全磷、N/P比、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、Zn含量、Mg含量呈先升高后降低,土壤C/N比、C/P比、Fe含量呈先下降后上升,但各指标最小值和最大值出现的海拔梯度各异。且不同海拔N/P比处于3.58~5.86,均小于10,即草地生产力均受氮素限制,土壤有机碳和全磷是影响土壤酶活性的关键养分因子。综上所述,草地表层土壤养分和酶活性随海拔呈规律性分布,且生产力主要受氮素的限制。建议依据海拔差异制定合理的管理措施,促进草地生态的健康发展。

参考文献:

- [1] 李强,张德罡,柳小妮,等. 不同海拔高寒草甸土壤微量元素含量及其与植被的关系[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1731-1737.

- [2] 李强,何国兴,柳小妮,等. 东祁连山高寒草甸土壤理化性质对海拔和坡向的响应及其与植被特征的关系[J]. 干旱区地理,2022,45(5):1559—1569.
- [3] 李强,何国兴,柳小妮,等. 东祁连山高寒草甸土壤“固—液—气”三相组成对海拔和坡向的响应[J]. 水土保持学报,2022,36(3):195—200+206.
- [4] 刘玉祯,刘文亭,董全民,等. 坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响[J]. 草地学报,2021,29(6):1166—1173
- [5] Busch V, Klaus V H, Penone C, *et al.* Nutrient stoichiometry and land use rather than species richness determine plant functional diversity[J]. *Ecology and evolution*, 2018, 8(1):601—616.
- [6] Chick M P, Nitschke C R, Cohn J S, *et al.* Factors influencing above-ground and soil seed bank vegetation diversity at different scales in a quasi-Mediterranean ecosystem [J]. *Journal of vegetation science*, 2018, 29(4):684—694.
- [7] Margesin R, Jud M, Tschierko D, *et al.* Microbial communities and activities in alpine and subalpine soils [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 67(2): 208—218
- [8] Wang G X, Cheng G D. Characteristics of grassland and ecological changes of vegetations in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(2): 11—20.
- [9] 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.
- [10] Li Q, Yang J Y, Liu X N, *et al.* Soil fertility evaluation and spatial distribution of grasslands in Qilian Mountains Nature Reserve of eastern Qinghai—Tibetan Plateau [J]. *PeerJ*, 2021, 9: e10986, doi 10. 7717/peerj. 10986.
- [11] 李强,何国兴,柳小妮,等. 东祁连山高寒草甸土壤酶活性及其化学计量特征对海拔和坡向的响应[J]. 水土保持学报,2022,36(4):357—364.
- [12] 秦景秀,郝兴明,张颖,等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理,2020,43(1): 117—125.
- [13] 李文. 围封对祁连山东段高寒灌草交错系统碳交换的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2020.
- [14] 李强,何国兴,柳小妮,等. 东祁连山高寒草甸植被特征和生物多样性对生境的响应[J]. 草地学报,2022,30(1):169—177.
- [15] 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.
- [16] 马剑. 祁连山北麓中段典型灌丛群落生态化学计量特征研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2021.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 陈涵兮,海龙,黄利民,等. 坡向对毛竹林土壤养分及其生态化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(9): 2915—2922.
- [19] Simard R R, Lapierre C, Tran T S. Effects of tillage, lime, and phosphorus on soil pH and Mehlich-3 extractable nutrients [J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1994. 25(9/10): 1801—1815.
- [20] Mastro R E, Ansari M A, George J, *et al.* Co-application of biochar and lignite fly ash on soil nutrients and biological parameters at different crop growth stages of *Zea mays* [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58:314—322.
- [21] Sollins P, Gregg J W. Soil organic matter accumulation in relation to changing soil volume, mass, and structure: Concepts and calculations [J]. *Geoderma*, 2017, 301: 60—71.
- [22] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecol Appl*, 2010, 20: 5—15.
- [23] 金章利,刘高鹏,周明涛,等. 喀斯特山地草地群落多样性海拔特征及土壤理化性质特征[J]. 生态环境学报,2019,28(4): 661—668.
- [24] Zhang W, Gao D X, Chen Z X, *et al.* Substrate quality and soil environmental conditions predict litter decomposition and drive soil nutrient dynamics following afforestation on the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2018, 325: 152—161.
- [25] LI J L, WEI Y, ZHAO L, *et al.* Investigating the phytoavailability of trace elements in contaminated agricultural soils and health risks via consumption of water spinach grown under field conditions in Zhuzhou, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(5):223—229.
- [26] 彭徐剑,陈鹏飞,王柏杰,等. 森林草原交错区沟塘草甸土壤微量元素分析[J]. 林业资源管理,2021(1): 140—146
- [27] 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

- [28] Zhang H D, Ru H L, Jiao F, *et al.* C, N, P, K stoichiometric characteristic of leaves, root and soil in different abandoned years in Loess Plateau [J]. *HuanjingKexue*, 2016, 37(3): 1128–1138.
- [29] Fan H, Wu J, Liu W, *et al.* Linkages of plant and soil C: N: P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. *Plant and Soil*, 2016, 392(1/2): 127–138.
- [30] 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.
- [31] 姜哲浩, 周泽, 张德罡, 等. 三江源区不同海拔高寒草原土壤养分及化学计量特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 1029–1036.
- [32] Steffens M, Kolbl A, Kogel-Knabner I. Alteration of soil organic matter pools and aggregation in semi-arid steppe topsoils as driven by organic matter input [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 60: 198–212.
- [33] 万红云, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔土壤酶活性及其化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3045–3052.
- [34] 李聪, 吕晶花, 陆梅, 等. 滇东南典型常绿阔叶林土壤酶活性的海拔梯度特征[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(6): 170–179.
- [35] 王军, 张骁, 高岩. 青藏高原植被动态与环境因子相互关系的研究现状与展望[J]. *地学前缘*, 2021, 28(4): 70–82.

Response of soil nutrients and enzyme activities to altitude in the grassland in the central Qilian Mountains

LI Qiang¹, ZHANG Ying¹, LI Xiao-qing^{1*}, LIU Xiao-ni², ZHANG De-gang²

(1. State Key Laboratory of Ecology of Sanjiangyuan and Plateau Agriculture and Animal Husbandry, College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. College of Grassland, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: [Objective] The aim of the study is to investigate the characteristics changes of soil nutrients and enzyme activities in surface layer soil of grassland at different altitudes. [Method] In this research, the natural grassland in the middle of Qilian Mountains was used as the research object, and characteristics changes of soil nutrient content, ecological stoichiometry ratio and enzyme activity at different altitudes (2 995 m, 3 170 m, 3 403 m, 3 620 m, 3 817 m and 4 068 m) were analyzed. [Result] The research showed that altitude had significant effects on the nutrient and enzyme activities of the grassland surface soil. With the increase of altitude, soil pH and Cu content showed an increasing trend, while soil organic carbon, total N, total P, N/P ratio, urease activity, alkaline phosphatase activity, peroxidase activity, Zn content and Mg content first increased and then decreased. Soil C/N ratio, C/P ratio and Fe content decreased first and then increased. However, the minimum and maximum values of each index occurred in different altitude gradients. Meanwhile, the N/P ratios in different altitude were 3.58~5.86, and were all less than 10, which meant that grassland productivity was limited by nitrogen. Based on RDA analysis it could be found that soil organic carbon and total phosphorus were the key nutrient factors affecting soil enzyme activity. [Conclusion] The soil nutrients and enzyme activities in the surface layer of grassland showed regular distribution with altitude, and the productivity was mainly limited by nitrogen. It is suggested that reasonable management measures should be formulated according to altitude differences to promote the healthy development of grassland ecology.

Key words: Qilian Mountains; enzyme activity; soil nutrients; altitude

(责任编辑 刘建荣)