

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.030

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.030

孙佳星,徐国荣,成鑫栋,等.增温和放牧对河西盐渍化草地土壤理化性质及酶活性的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):309-317,347.

SUN Jiaxing, XU Guorong, CHENG Xindong, et al. Effects of warming and grazing on soil physicochemical properties and enzyme activities in salinized grassland in Hexi corridor[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 309-317, 347.

增温和放牧对河西盐渍化草地土壤 理化性质及酶活性的影响

孙佳星, 徐国荣, 成鑫栋, 王雨媛, 吴江琪

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: [目的] 为探究全球变暖背景下,放牧遗留效应对冻结期盐渍化草地土壤酶活性的影响。[方法] 以河西走廊盐渍化草地为研究对象,设置对照(CK)、放牧(FCK)、增温(W)和增温+放牧(FW)4种处理方式,探究不同处理下土壤酶活性变化规律及空间分布特征。[结果] 与CK相比,FCK处理显著提高土壤水分体积分数和全氮质量分数,降低土壤有机碳质量分数;W处理降低土壤水分体积分数,提高土壤有机碳和全氮的97.61%和16.89%;而FW处理均显著提高土壤水分体积分数、有机碳和全氮质量分数,全磷质量分数显著低于对照40.81%。FCK处理显著提高 β -葡萄糖苷酶、淀粉酶、脲酶和磷酸酶活性,W处理显著提高淀粉酶、脲酶、亚硝酸还原酶活性,而FW处理提高 β -葡萄糖苷酶、淀粉酶、脲酶和硝酸还原酶活性。W和FW处理相较于其他处理土壤酶化学计量比显著增加。通过矢量分析发现,研究区受氮限制较为显著。[结论] 增温和放牧处理通过土壤理化性质直接或间接影响土壤酶活性,其中SOC是影响河西盐渍化草地土壤酶活性的关键因子之一。

关键词: 增温; 放牧; 酶活性; 化学计量比

中图分类号: S812.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0309-09

Effects of Warming and Grazing on Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities in Salinized Grassland in Hexi Corridor

SUN Jiaxing, XU Guorong, CHENG Xindong, WANG Yuyuan, WU Jiangqi

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of grazing on soil enzyme activities in salinized grasslands during the freezing period under the background of global warming. [Methods] Taking salinized grasslands in the Hexi Corridor as the research objects, four treatments were set up, including control (CK), grazing (FCK), warming (W), and warming + grazing (FW), in order to explore the variation law and spatial distribution characteristics of soil enzyme activities under different treatments. [Results] Compared with CK, the FCK treatment significantly increased soil water content and total nitrogen content, and decreased soil organic carbon content. The W treatment reduced soil water content and increased soil organic carbon content and total nitrogen content by 97.61% and 16.89%, respectively. The FW treatment significantly increased soil water content, organic carbon content and total nitrogen content, while total phosphorus content of the FW treatment was significantly (40.81%) lower than that of CK. The FCK treatment significantly increased the activities of β -glucosidase, amylase, urease and phosphatase; the W treatment significantly increased the activities of amylase, urease and nitrite reductase, while the FW treatment increased the activities of β -glucosidase, amylase, urease and nitrate reductase. Compared with other treatments, the stoichiometric ratios of soil enzymes in W and FW treatments

收稿日期: 2024-10-14

修回日期: 2024-11-19

录用日期: 2024-11-28

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-02-24

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42307348); 甘肃省拔尖领军人才培养项目(GSBJLJ-2023-09); 甘肃农业大学伏羲青年人才项目(Gaufx-05Y05); 草业生态系统教育部重点实验室开放项目(KLGE-2022-19); 甘肃农业大学科研启动项目(GAU-KYQD-2021-15)

第一作者: 孙佳星(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事盐渍化草地研究。E-mail: sunjiaxing19970823@163.com

通信作者: 吴江琪(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事草地碳氮循环研究。E-mail: wujq@gsau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

were significantly increased. Through vector analysis, it was found that the study area was significantly limited by nitrogen. [Conclusion] Warming and grazing treatments directly or indirectly affect soil enzyme activities through soil physicochemical properties, of which SOC is one of the key factors affecting soil enzyme activities in salinized grasslands in Hexi Corridor.

Keywords: warming; grazing; enzyme activity; stoichiometric ratio

Received: 2024-10-14

Revised: 2024-11-19

Accepted: 2024-11-28

Online(www.cnki.net): 2025-02-24

中国的盐渍化土地总面积约为 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[1], 其中盐土为 1 600 万 hm^2 , 碱土为 87 万 hm^2 , 其他各类盐碱化土壤的面积也高达 1 800 万 hm^2 , 盐渍化草地面积更是达到惊人的 1 044 万 hm^2 ^[2]。近年来, 受人为因素和全球气候变化影响, 盐渍化草地面积扩大化已严重影响草地生态系统的可持续发展。气候变暖引起世界各国的广泛关注, 对人类的生存和发展产生不可估量的影响。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布《气候变化 2022: 影响、适应和脆弱性》^[3] 报告中指出, 化石燃料燃烧及不可持续的能源和土地利用导致全球变暖, 当前全球平均气温已经比工业化之前高出 1.1°C , 并预测在 2040 年升高 1.5°C ^[4]。有研究^[5]表明, 温度是驱动草地生态系统生产力提高的重要因素之一, 温度改变草地土壤微生物代谢, 加速土壤有机质矿化。同时温度增加还改变草地生态系统养分循环和能量流动, 从而改变草地微生物元素供给和生存策略。但是, 目前关于盐渍化草地生态系统冻结期土壤酶活性对增温的响应是否敏感尚不清楚。

放牧是人类利用草地生态系统的一种重要方式, 是保证作物稳产、增产、增效的关键, 能有效抑制毒害草、控制病虫害、保持土壤水分、促进作物分蘖、削弱他感抑制等, 是维护草地和家畜健康的重要管理方式^[6]。在放牧过程中, 家畜通过采食践踏等行为清除杂草和加剧土壤板结, 并通过尿液和粪便输入改变土壤养分, 从而对草地生态系统产生影响^[7]。然而, 关于放牧对草地生态系统影响的研究仍存在较大争议, 胡永春等^[8]研究表明, 放牧能直接或间接改变土壤孔隙度、增加土壤密度, 提高土壤净氮矿化和氮硝化速率, 使土壤养分有效性显著提升; 张正义等^[9]研究表明, 放牧导致地上生物量锐减, 群落高度及物种多样性下降, 物种结构趋于简单化, 降低土壤养分及“碳供应”潜力, 严重威胁畜牧业和草地生态系统功能的稳定。冻结期禁牧后仍存在放牧遗留效应, 该效应是指去除环境干扰后, 其对生态系统各组成要素及要素间的关系、系统动态特征等的影响依然长期存在的现象^[10]。目

前, 关于放牧遗留效应影响下草地土壤冻结期酶活性变化的研究仍较少。因此, 了解放牧的遗留效应对冻结期土壤酶活性的影响, 对于评估盐渍化草地土壤质量状况具有重要意义。

土壤酶是土壤中植物、动物和微生物活动的产物, 通过参与凋落物和土壤有机质的分解过程, 在一定程度上可以反映土壤环境变化。土壤酶活性的提高可以加快土壤中有机和无机营养物质的转化和降解速率, 从而增加土壤中营养元素的有效成分^[11]。根系分泌物能改善土壤的理化性质, 提高土壤中酶的活性, 而土壤酶活性提高的同时, 又反作用于土壤, 增加土壤中营养元素的有效成分, 体现土壤养分能力的强弱。增温对不同生态系统土壤酶活性的影响存在较大差异, 姜雨虹^[12]在湖南湿地的研究表明, 增温显著提高酸性磷酸酶的活性; 而王新园^[13]在大青山的研究表明, 增温显著降低脲酶活性。与此同时, 放牧对土壤酶活性影响的空间特征显示, 均存在伴随土层深度降低酶活性减弱的状况。然而, 管颖^[14]研究表明, 放牧有助于土壤蛋白酶和脲酶的提高, 而许延琴等^[15]研究认为, 放牧对脲酶影响并不显著, 可能跟放牧强度和时间有较大关系。因此, 在增温和放牧条件下, 土壤酶活性对不同生态环境的响应也各不相同。综上可知, 针对土壤酶活性的研究主要集中于增温或放牧单一条件下, 而在全球变化背景下, 耦合放牧对草地生态系统的影响研究仍存在一定空白。因此, 本研究通过增温、放牧处理与增温和放牧的交互作用测定草地土壤酶活性, 以探讨未来气候变暖和放牧对河西走廊盐渍化草地土壤酶活性及化学计量比的影响, 有助于阐明增温、放牧处理下河西走廊盐渍化草地土壤酶活性特征及养分限制规律, 为河西走廊天然盐渍化草地合理利用和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于甘肃省张掖市临泽县兰州大学草地农业试验站($39^\circ 15' \text{N}$, $100^\circ 02' \text{E}$), 地处甘肃省河西走廊中部, 属黑河水系冲积形成的走廊平原区, 海

拔1390 m。该地区属典型干旱半干旱大陆性季风气候^[16],四季分明,春季升温较快,秋季降温较慢,夏季炎热而短暂,冬季寒冷且漫长。年平均气温7.16℃,年均无霜期约176 d。年积温3540℃,年日照时间达3047.5 h。年平均降水量121.5 mm,多集中在夏秋季节,年潜在蒸发量约为2337.6 mm。该地区的土壤类型为盐渍化草甸土^[17],碱解氮30.2 mg/kg,有效磷21.5 mg/kg,速效钾126.6 mg/kg,土壤盐分3.6 g/100 g干土^[18]。植被类型为典型的盐渍化草地,植被群落中优势种主要为盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、早熟禾(*Poa annua*)、芦苇(*Phragmites australis*)和赖草(*Leymus secalinus*)等^[19]。

1.2 试验设计

于2021年7月,以河西走廊临泽县典型盐渍化草地为研究对象,采用野外控制试验的方法,以自然生长小区(CK)为对照设置3种处理:增温处理(W)、放牧处理(FCK)和放牧+增温(FW)处理。每个处理3个重复,共计12个试验小区。每个小区面积为5 m×5 m,样地之间设5 m的缓冲过渡带。增温设备依据International Tundra Experiment所采用的开顶箱(Open-top chamber, OTC)增温方式^[20],进行全年模拟增温。放牧以平均体重为(200±5)kg公牛8头为试验对象作适度放牧处理,在每年6月中旬开始,9月中旬结束,共计90 d。在当地多年最优放牧区(200 m×300 m)内,以每10 d轮牧1次的方式放牧。

1.3 土壤样品采集

于2024年1月,使用5 cm土钻按“五点”采样法在每个小区内采集0~40 cm(0~10、10~20、20~40 cm)土层样品,采集到的土壤按相同样地、相同土层均匀混合成2份,放置在装有冰袋的保温箱中带回实验室^[21]。用2 mm筛网将土壤过筛后,其中1份鲜

土贮藏在4℃冰箱内,用于测定鲜土指标;其余部分放置于阴凉通风处自然风干,用于测定干土指标。

1.4 土壤理化性质的测定

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定^[22];全氮(TN)采用凯氏定氮法^[23]测定;全磷(TP)采用钼锑抗比色法^[24]测定;土壤水分体积分数(SWC)采用干燥法^[25]测定;土壤体积质量(BD)采用环刀法进行^[26]测定。

1.5 土壤酶活性及化学计量比的测定方法

土壤β-葡萄糖苷酶(β-GC)活性采用硝基酚比色法^[27]测定;淀粉酶(AMY)活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[28]测定;脲酶(URE)活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法^[28]测定;硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NIR)活性采用磺胺比色法^[29]测定;碱性磷酸酶(ALP)活性采用磷酸苯二钠比色法^[30]测定。酶化学计量比参照苏效兰等^[31]的研究,计算公式为:

$$\text{土壤酶碳氮比: } EEA_{C/N} = \ln(GC + AMY) / \ln(URE + NR + NIR) \quad (1)$$

$$\text{土壤酶碳磷比: } EEA_{C/P} = \ln(GC + AMY) / \ln(ALP) \quad (2)$$

$$\text{土壤酶氮磷比: } EEA_{N/P} = \ln(URE + NR + NIR) / \ln(ALP) \quad (3)$$

式中:GC为β-葡萄糖苷酶,μg/(g·h);AMY为淀粉酶,μg/(g·24 h);URE为脲酶,μg/(g·24 h);NR为硝酸还原酶,μg/(g·24 h);NIR为亚硝酸还原酶,μg/(g·24 h);ALP为碱性磷酸酶,μg/(g·24 h)。

通过酶活性矢量分析,计算矢量长度(vector length, VL)和矢量角度(vector angle, VA)以此来检验微生物限制因素。其中,VL越长,表示微生物受碳限制较大,而VA角度<45°表示微生物受氮限制,>45°表示微生物受磷的限制。矢量长度和矢量角度计算公式为^[32]:

$$VL = \sqrt{\left[\frac{\ln(GC + AMY)}{\ln(URE + NR + NIR)} \right]^2 + \left[\frac{\ln(GC + AMY)}{\ln(ALP)} \right]^2} \quad (4)$$

$$VA = \text{Degrees} \left\{ \text{ATAN2} \left[\frac{\ln(GC + AMY)}{\ln(ALP)}, \left[\frac{\ln(GC + AMY)}{\ln(URE + NR + NIR)} \right] \right\} \right\} \quad (5)$$

1.6 数据处理

数据采用Microsoft Excel 2019软件进行统计,在SPSS 22.0统计软件进行方差分析(ANOVA)和显著性检验,运用单因素方差分析不同处理间土壤酶活性和土壤理化性质(SWC、TP、TN、SOC)之间的差异(Duncan, $p=0.05$)。使用Canoco5软件进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),探讨土壤因子和酶活性及化学计量比之间的关系。采用Origin Pro2022软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 增温、放牧处理对土壤理化性质的影响

与CK相比,0~40 cm土层下FCK和FW处理SWC分别提高0.04%和0.14%(表1),W处理降低SWC 0.02%;FCK处理SOC和C/N分别下降23.35%和76.07%;W、FW处理SOC分别增加6.76、4.78 g/kg,W处理C/N相较于CK增加25.38%,而FW处理则下降22.34%。各处理下TN、C/P和N/P均大于CK处理,TP均显著小于CK处理($p<0.05$)。

W、FCK、FW 和土层深度的交互作用对土壤 SOC、TN、C/N、N/P 的影响有显著差异 ($p<0.05$, 表 2)。研究显示,放牧处理提高土壤水分体积分数,而增温提高土壤有机碳质量分数。

表 1 增温和放牧对河西盐渍化草地土壤理化性质的影响

Fig. 1 The effects of warming and grazing on soil physicochemical properties of saline alkali grassland in Hexi

处理	SWC/%	BD/(g·cm ⁻³)	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	C:N	C:P	N:P
CK	0.52±0.01c	1.31±0.04a	6.92±0.69c	0.68±0.10b	0.94±0.36a	13.61±3.67ab	9.39±3.90b	0.78±0.20b
FCK	0.56±0.02b	1.17±0.05a	5.91±1.57c	1.09±0.42ab	0.29±0.11b	7.73±7.26b	35.91±5.29a	6.16±2.28a
W	0.50±0.01c	1.26±0.09a	13.68±0.74a	0.79±0.06b	0.48±0.19ab	18.24±2.85a	27.83±11.74a	2.46±1.31b
FW	0.66±0.03a	1.27±0.11a	11.70±0.81b	1.29±0.29a	0.50±0.12ab	10.57±3.09ab	21.87±3.26ab	2.98±1.21b

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示不同处理间显著差异($p<0.05$)。

表 2 处理和土层深度对土壤理化性质的双因素方差分析

Table 2 Two factor analysis of variance on the effects of soil treatment and soil depth on soil physicochemical properties

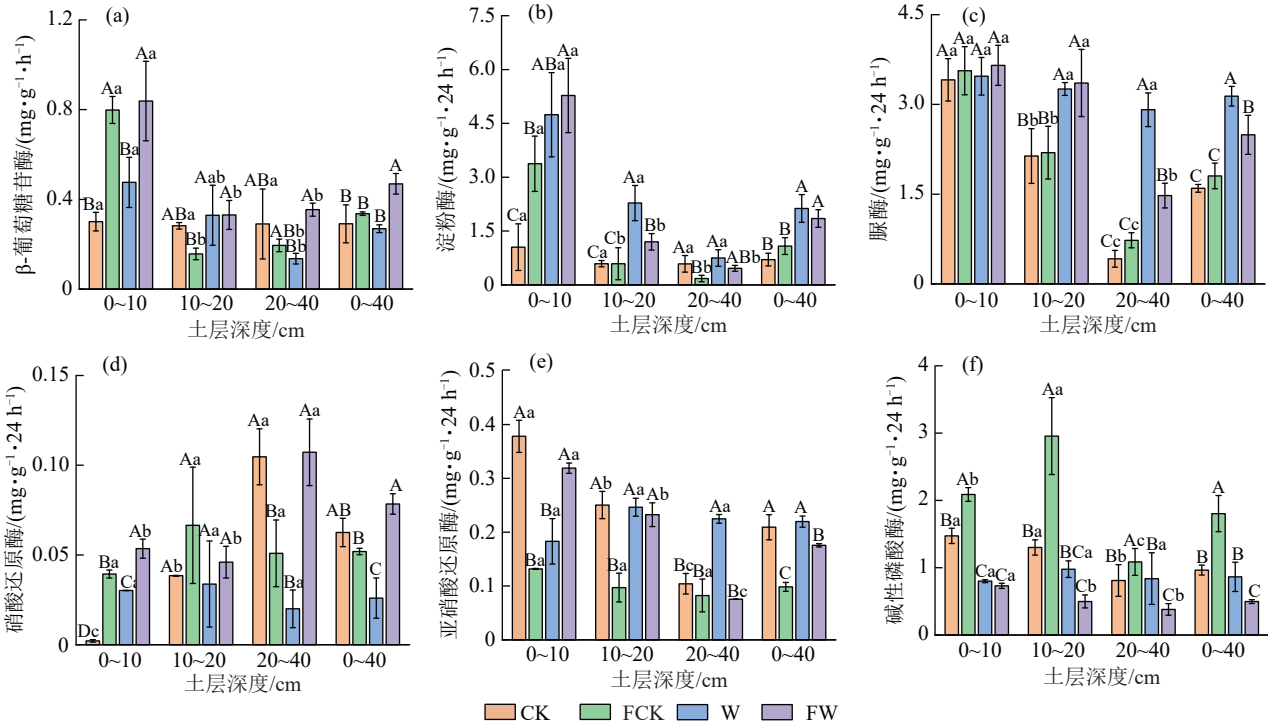
项目	SWC	BD	SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
处理	0.687	3.453*	38.080***	489.495***	7.955***	6.410**	5.048**	17.044***
土层	1.603	0.091	105.454***	330.914***	0.846	11.252***	7.214**	4.521*
处理×土层	1.108	0.635	3.352*	368.899***	0.435	3.238*	2.229	2.666*

注:*表示 $p<0.05$;**表示 $p<0.01$;***表示 $p<0.001$ 。下同。

2.2 增温、放牧处理对土壤酶活性的影响

增温、放牧处理对 0~40 cm 土层土壤酶活性有显著影响($p<0.05$)(图 1)。CK 处理下 β -GC 和 AMY 随土层变化差异不显著($p>0.05$),而 NIR、ALP 和 URE 则相反,表现出酶活性随着土层影响而显著下降,NR 则是明显上升。其他处理 β -GC、AMY 和 URE 均呈表层活性较高,并伴随土层下降含量总体降低的趋势。本研究中,FW 处理下 NR 活性在 20~40 cm 土层

最强,土层对其他处理影响差异并不显著。FW 处理下 NIR 活性随土层下降显著降低,而其他处理间差异并不显著。ALP 总体呈逐渐升高随后降低的趋势,FCK 在 10~20 cm 土层活性最强。除此之外,无论是土层、处理还是处理和土层的交互作用均对其他土壤酶活性有显著影响(表 3)。整体来说,FW 处理显著提高 β -GC 和 NR 活性,W 处理显著提高 AMY、URE、NIR 活性,而 FCK 处理只提高 ALP 活性。



注:图柱上方不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 增温、放牧处理对不同土层深度土壤酶活性的影响

Fig. 1 The effects of warming and grazing treatments on soil enzyme activity at different soil depths, chemometric carrier characteristics of soil enzymes

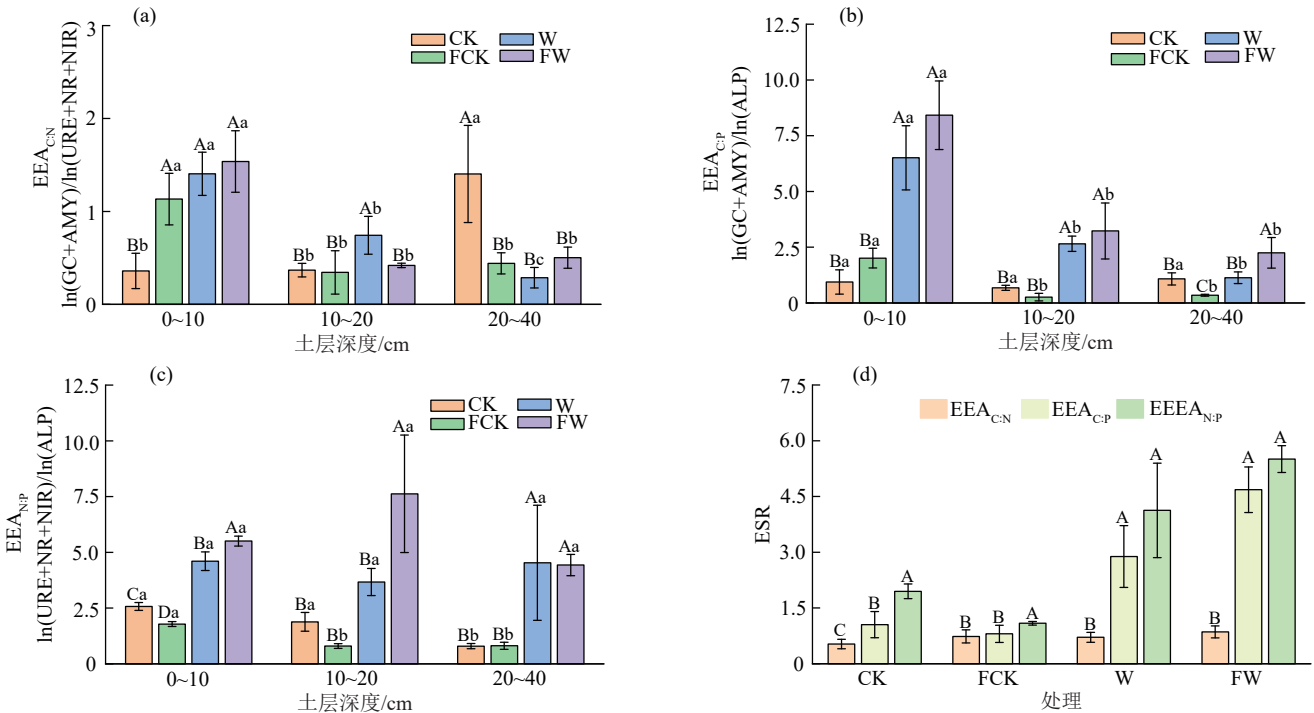
表 3 处理和土层深度对土壤酶活性的双因素方差分析

项目	β -GC	AMY	URE	NR	NIR	ALP
处理	10.408***	19.159***	25.619***	10.984***	66.230***	70.716***
土层	57.952***	95.007***	122.121***	20.589***	102.325***	26.321***
处理 $\times$ 土层	9.992***	9.147***	9.090***	10.699***	34.581***	10.692***

2.3 增温、放牧处理对土壤酶化学计量比的影响

不同处理土层深度对土壤酶化学计量比影响较为显著(图 2)。不同处理 0~40 cm 土层深度的土壤酶 N:P 均显著大于 C:N、C:P(图 2d)。通过酶化学计量学的矢量分析发现,增温、放牧处理下相对矢量长度为 0.49~0.54,大小表现为 FW>W>CK>FCK(图 3c);各处理土壤酶的相对矢量角度均<45°(图 3b)。与 CK 相比,各处理均存在显著差异。其中,偏移最大的 FW

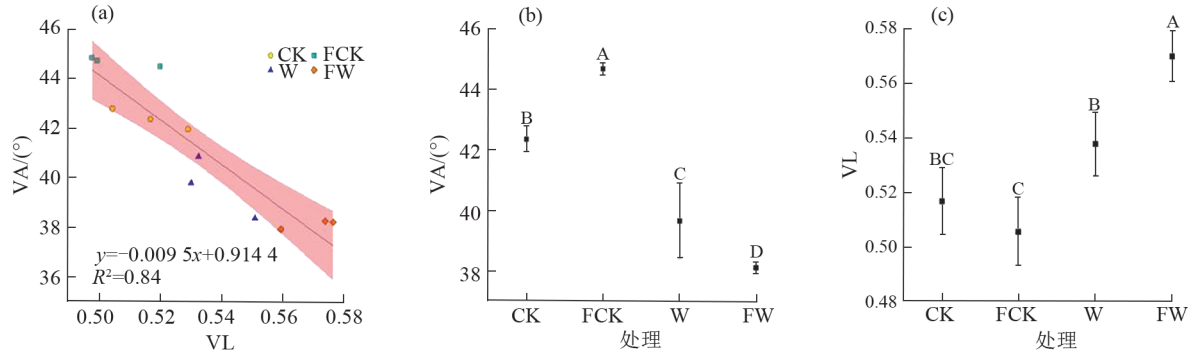
处理矢量角度达到 37.68°。受微生物碳限制(VL)和微生物氮(VA)限制存在显著的线性关系,即土壤微生物群落受到的碳限制与氮限制之间显著相关($p<0.05$,图 3a)。增温、放牧处理和土层深度对酶化学计量比的双因素方差分析见表 4。处理对酶化学计量学载体特征均有显著影响。总体来看,FW 和 W 处理下 $EEA_{C:N}$ 、 $EEA_{C:P}$ 、 $EEA_{N:P}$ 均显著大于其他处理,并且 FW 和 W 处理受碳限制较大的同时,也存在明显的氮限制。



注: $EEA_{C:N}$ 为碳获取酶/氮获取酶; $EEA_{C:P}$ 为碳获取酶/磷获取酶; $EEA_{N:P}$ 为氮获取酶/磷获取酶; ESR为0~40 cm 土层酶化学计量比。

图 2 增温、放牧处理对不同土层深度酶化学计量比的影响

Fig. 2 The effect of warming and grazing treatments on enzyme stoichiometry at different soil depths



注: VA 为 Vector angle 矢量角度; VL 为 Vector length 矢量长度。

图 3 土壤酶的化学计量学载体特征

Fig. 3 Chemometric carrier characteristics of soil enzymes
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

表 4 处理和土层深度对酶化学计量比及化学计量学载体特征的双因素方差分析

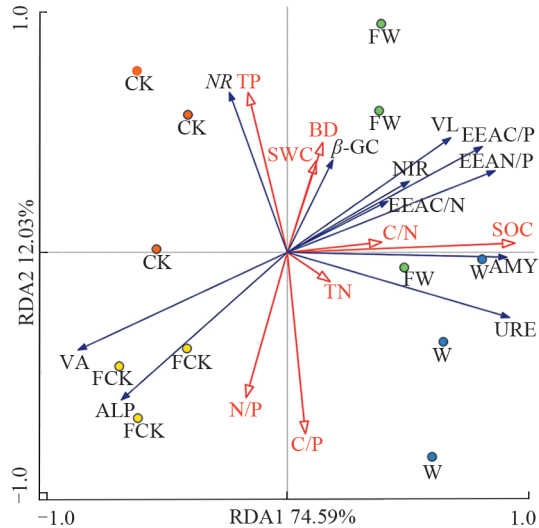
Table 4 Two factor ANOVA of enzyme stoichiometric ratio and chemometric carrier characteristics with treatment and soil depth

项目	EEA _{C:N}	EEA _{C:P}	EEA _{N:P}	VL	VA
处理	1.167	52.543***	35.650***	30.630***	102.993***
土层	22.552***	61.307***	2.765	10.979***	13.715***
处理×土层	14.201***	12.057***	2.373	10.135***	5.944***

注:EEA_{C:P}为土壤酶活性碳磷比;EEA_{N:P}为土壤酶活性氮磷比;
EEA_{C:N}为土壤酶活性碳氮比;VA为 Vector angle 矢量角度;
VL为 Vector length 矢量长度。

2.4 土壤酶活性与土壤理化性质的关系

冗余分析(图 4)表明,β-GC 与 SWC 和 TN 呈显著正相关;AMY 和 URE 与 SOC 显著正相关;NR 与 SWC 显著正相关;NIR 与 C:N 呈显著正相关,但与 N:P 呈显著负相关。ALP 和 VA 与 SOC 呈显著负相关。VL、EEA_{C:P}、EEA_{N:P} 均与 SOC 呈显著正相关。RDA 前 2 轴共同解释土壤酶活性和土壤理化性质变量之间 86.62% 的变异关系,第 1 轴和第 2 轴分别解释变量的 74.59% 和 12.03%,其中 SOC、N:P 和 C:P 是酶活性变化的主要影响因子,解释率分别为 66.60%、8.00% 和 7.80%。其余环境因子对土壤酶活性的影响不显著(表 5)。



注:蓝色箭头为响应变量,红色箭头为解释变量;β-GC 为 β-葡萄糖苷酶;AMY 为淀粉酶;URE 为脲酶;NR 为硝酸还原酶;NIR 为亚硝酸还原酶;ALP 为碱性磷酸酶;VA 为 Vector angle 矢量角度;VL 为 Vector length 矢量长度;EEA_{C:P} 为土壤酶活性碳磷比;EEA_{N:P} 为土壤酶活性氮磷比;EEA_{C:N} 为土壤酶活性碳氮比;SWC 为土壤水分体积分数;BD 为土壤体积质量;SOC 为土壤有机碳;TN 为土壤全氮;TP 为土壤全磷;C:N 为土壤碳氮比;C:P 为土壤碳磷比;N:P 为土壤氮磷比。

图 4 土壤理化性质与土壤酶活性及化学计量比的冗余分析
Fig. 4 Redundancy analysis of soil physicochemical properties, soil enzyme activity, and stoichiometric ratio

表 5 基于冗余分析的环境因子对土壤酶活性及化学计量比的解释比例

Table 5 Explanation ratio of environmental factors on soil enzyme activity and stoichiometry based on redundancy analysis

项目	解释度/%	贡献/%	F	p
SOC	66.6	73.3	19.9	0.002
N:P	8.0	8.8	2.8	0.034
C:P	7.8	8.6	3.6	0.010
SWC	2.9	3.2	1.4	0.266
TN	2.4	2.7	1.2	0.332
C:N	1.4	1.5	0.6	0.556
TP	0.8	0.9	0.3	0.742
BD	0.8	0.9	0.3	0.776

3 讨论

3.1 增温和放牧对土壤理化性质的影响

放牧是草地生态系统的主要利用方式之一^[8],而增温对草地生态系统的影响更为明显^[12]。本研究中,相较于对照,SWC 在增温处理下有明显的下降趋势,而其他处理均呈上升趋势。主要是因为温度升高除引起土壤水分蒸发外,还加强植物蒸腾作用,加剧 SWC 的流失^[13]。放牧增加 SWC,可能是因为牲畜的踩踏行为增强土壤压实作用,减小表层土壤孔隙度,降低土壤水分扩散率和地表的蒸腾作用,使得 SWC 增加^[14]。在增温和放牧交互处理下 SWC 增加,由于该时期天然草地正处冻结期,一方面,冻结土壤融化,水分下渗增加土壤 SWC,与姜雨虹^[12]的研究结果一致。同时温度升高增加生长季地上生物量高度,凋落物的增加使水分不易挥发,提高 SWC;另一方面,牲畜的啃食行为增加生物结皮的破碎程度,促进土壤入渗速率,从而提高 SWC^[8]。本研究中,各处理均对土壤体积质量无显著影响,主要是因为土壤体积质量对放牧的响应存在一定的滞后效应,需要长时间的放牧才能引起土壤体积质量的显著变化^[33]。土壤 SOC 是土壤质量评价的关键指标之一^[1],放牧处理明显降低 SOC 质量分数,可能是因为放牧改变植物地上生物量和土壤微生物的变化,使其质量分数下降^[10],而增温和放牧增温的交互作用促进植物生长,增加根系分泌物的同时,牲畜觅食促进凋落物的形成,为 SOC 升高奠定基础^[14]。模拟增温装置阻隔牲畜的采食,在一定程度上增加植被生物量。本研究发现,增温和放牧处理下, TN 质量分数升高,造成该现象的原因除牲畜踩踏、排泄以外,还包括牲畜对植物的机械擦伤,促进凋落物的形成,加之增温促进有机质的分解,增加土壤

中矿化氮,导致土壤TN均显著高于CK处理^[9]。所有处理TP均显著下降,主要是因为放牧导致植被覆盖度降低,加剧有效磷的淋溶流失,而增温促进植物生长发育,加快土壤磷的消耗^[24],因而降低TP质量分数。

土壤C、N、P养分化学计量比是表征土壤养分的重要指标。C:N反映微生物分解土壤有机质的速率,C:P反映土壤微生物对土壤有效磷的代谢趋势,N:P是预测限制土壤N、P养分的指标^[34]。本研究中,各处理土壤C:N为7.73~18.24,均未超过全球土壤C:N(25)平均值^[34],说明增温和放牧的遗留效应均能增加本研究区微生物分解能力,加速有机质矿化速率,不利于有机碳的积累。本研究发现,土壤C:P和N:P分别为9.39~35.51、0.78~6.16,远低于全国土壤C:P(200)和N:P(10)平均值^[34],较低的C:P和N:P可能是由于研究区土壤有机质利于磷的矿化,土壤磷有效性较高,植物生长受磷的限制作用较小。

3.2 增温和放牧对土壤酶活性及酶化学计量比的影响

土壤酶作为生态系统中最为活跃的生物活性物质,是衡量土壤肥力的重要指标之一。其对环境因素的敏感性比土壤理化性质更高^[11]。而土壤环境因素直接或间接影响土壤酶的催化作用,进而影响土壤养分的迁移和循环^[12]。其中, β -葡萄糖苷酶能够水解不稳定的碳水化合物为土壤微生物提供糖分,促进植物生长^[28];淀粉酶可以水解土壤中的淀粉使之降解成还原糖,再经相应的还原糖酶水解成植物和微生物能够利用的营养物质来供给植物生长^[29];脲酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶能够促进土壤中 NH_3 、氨的形成,是植物氮素形成和循环的必要条件^[30];土壤碱性磷酸酶活性在一定范围内反映土壤磷元素的丰缺度,促进土壤磷元素的循环并提高土壤磷元素有效性,增加可以被植物利用的磷^[31]。本研究表明,相比于CK处理,0~40 cm土层FCK处理显著提高 β -GC、URE、AMY和ALP活性,降低NR、NIR活性。主要是由于FCK处理中牲畜排泄增加大量活的微生物,供微生物可利用的营养物质增多,并伴随着牲畜的践踏改良土壤环境^[11]。本研究中,W处理降低 β -GC、ALP、NR活性,但提高AMY、URE、NIR的活性。可能是因为增温处理加快有机质矿化,减少酶的反应底物,同时温度升高抑制酶的合成与分泌,导致酶活性的降低^[11]。随着气温的升高,雪被的融化和土壤淋溶作用为矿质土层输入大量有效资源,所以AMY、URE、NIR的活性显著升高;许延琴等^[15]研究发现,放牧和增温通过水分、温度和通气

等条件提升大部分酶活性,但本研究发现,FW处理下NIR和ALP活性呈下降趋势,可能是因为放牧引起凋落物的减少,降低根际分泌物输入,土壤微生物生存环境恶化^[24]。同时,增温使植物生长季土壤水分体积分数降低,植物净初级生产力下降,伴随增温处理的遗留效应,植物根系也随之降低,其根系的减少对土壤酶活性产生一定影响^[7]。放牧使得反硝化作用产生异化,亚硝酸盐变为羟胺再分解^[8],造成NIR和ALP活性下降。结合冗余分析表明,SWC与 β -GC和NR呈显著正相关,主要是因为土壤微生物活性极易受到SWC的影响,当SWC越高,活性越强^[7]。同时,TN也对 β -葡萄糖苷酶有显著影响,这主要是因为除牲畜排泄之外,牲畜对植物的机械擦伤,加快凋落物的形成^[24]。黄琳曦等^[35]研究表明,SOC是土壤酶活性及化学计量比变化的驱动因子之一,与本研究结果相一致。本研究中,SOC与AMY、URE、VL、 $\text{EEA}_{\text{C:N}}$ 、 $\text{EEA}_{\text{C:P}}$ 、 $\text{EEA}_{\text{N:P}}$ 呈显著正相关。主要是因为土壤有机碳是微生物中碳的主要来源,同时也是微生物合成酶的重要底物^[31]。有机碳的分解可能受到植物凋落物来源不稳定碳的影响。因此,土壤有机碳质量分数越高,AMY、URE活性越高,对土壤酶化学计量比影响越大^[21]。而SOC与ALP、VA呈显著负相关,可能是因为当微生物处于P限制时,需要耗费更多的C和N来合成代谢与P循环相关的酶^[13]。

土壤酶活性对土壤C、N、P养分有显著影响^[34]。本研究中,不同处理C、N、P土壤酶化学计量比分别为0.52:1.00:0.30、0.75:1.00:0.95、0.73:1.00:0.26、0.86:1.00:0.18,远远偏离全球生态系统C:N:P酶化学计量比1:1:1,同时各处理下矢量角度(VA)都 $<45^\circ$,表明该研究区各处理微生物生长均受氮限制较大。酶C:N、C:P表征微生物对C和N、P的相对需求,通常认为酶C:N、酶C:P越高,则土壤微生物受C的限制相对于N、P限制更为严重^[21]。本研究显示,对于0~40 cm土层FW处理下酶C:N、C:P、N:P均高于其他处理(图3d),且矢量长度呈FW>W>CK>FCK,说明在FW处理下微生物受C限制,可能是由于放牧条件下,降低植被地上生物量,减少凋落物的返还。同时长期的增温增加微生物对C的需求,加剧C限制^[12]。但是从矢量角度分析,FCK处理矢量角度达到 44.68° ,接近 45° ,表明该处理相对于其他处理由于牲畜采食践踏、排泄增加土壤氮素输入^[8],促进土壤养分循环,使该处理下P限制大于N限制。

4 结 论

1)相较于CK处理,3种处理均显著提升0~40 cm 土壤TN质量分数,降低土壤TP质量分数。FCK处理降低SOC质量分数,W处理降低土壤SWC,而FCK和FW处理均显著降低土壤C:N。

2)除NR外,其他酶活性均伴随土层呈下降趋势。在0~40 cm土层中,放牧显著提高 β -GC、AMY、URE活性,增温显著提高AMY和URE活性,放牧+增温显著提高土壤酶化学计量比。

3)酶化学计量比结果表明,氮素是河西走廊盐渍化草地的主要限制因子;冗余分析结果表明,土壤SOC是影响河西盐渍化草地土壤酶活性的主要因素。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10-27.
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J].Acta Pedologica Sinica,2022,59(1):10-27.
- [2] 吴秀泉,乌兰图雅,张萨日郎,等.中国干旱区草地土壤盐渍化研究可视化分析[J].内蒙古师范大学学报(自然科学版),2024(2):120-128.
WU X Q, WU L T Y, ZHANG S R L, et al. Visualization analysis on grassland soil salinization in arid regions of China[J].Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition),2024(2):120-128.
- [3] 姜彤,翟建青,罗勇,等.气候变化影响适应和脆弱性评估报告进展:IPCC AR5到AR6的新认知[J].大气科学学报,2022,45(4):502-511.
JIANG T, ZHAI J Q, LUO Y, et al. Understandings of assessment reports on climate change impacts, adaptation and vulnerability: Progress from IPCC AR5 to AR6[J].Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45 (4) : 502-511.
- [4] SCHENUIT F. Staging science: Dramaturgical politics of the IPCC's special report on 1.5 °C[J].Environmental Science and Policy,2023,139:166-176.
- [5] LIU L, ZHENG J H, GUAN J Y, et al. Grassland cover dynamics and their relationship with climatic factors in China from 1982 to 2021[J].Science of the Total Environment,2023,905:e167067.
- [6] KINUGASA T, YOSHIHARA Y, AOKI R, et al. Warming suppresses grassland recovery in biomass but not in community composition after grazing exclusion in a Mongolian grassland[J].Oecologia,2024,206(1/2):127-139.
- [7] WU S K, HAO J, DIAO H J, et al. Short-term grazing diminished ecosystem multifunctionality of grassland in northern China [J]. Plant and Soil, 2024, 505 (1) : 829-844.
- [8] 胡永春,王丽博,朱逸晓,等.森林放牧对东北虎豹国家公园土壤理化性质和微生物群落组成的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(4):661-673.
HU Y C, WANG L B, ZHU Y X, et al. Effects of forest grazing on soil properties and microbial community in the Northeast China Tiger and Leopard National Park [J].Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2023,59(4):661-673.
- [9] 张正义,胡逸,张振豪,等.高寒草甸功能群组成及营养品质对不同放牧强度的响应[J].草业科学,2024,41(1):151-162.
ZHANG Z Y, HU Y, ZHANG Z H, et al. Responses of alpine meadow functional group composition and nutrient quality to grazing intensity [J]. Pratacultural Science, 2024,41(1):151-162.
- [10] REN H Y, XIE J Y, KE Y G, et al. Moderate grazing weakens legacy effects of grazing history on primary productivity and biodiversity in a meadow grassland[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2024,362:e108825.
- [11] HUANG B B, XING Y J, LUO W, et al. Effects of long-term nitrogen addition and throughfall reduction on extracellular enzyme activity and coenzymatic stoichiometry in a temperate forest[J].Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2024,24(1):1534-1546.
- [12] 姜雨虹.增温背景下苔草扩张对洞庭湖湿地土壤酶化学计量的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2024.
JIANG Y H. Effect of Carex expansion on soil enzyme stoichiometry in Dongting Lake wetland under warming background [D].Changsha: Central South University of Forestry and Technology,2024.
- [13] 王新园.模拟增温对大青山油松林土壤理化性质及土壤酶活性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
WANG X Y. Effects of simulated warming on soil physical and chemical properties and soil enzyme activities of *Pinus tabulaeformis* forest in Daqing Mountain [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023.
- [14] 管颖.不同放牧强度对辽西沙地生物结皮理化性质及土壤酶活性变化的影响[J].防护林科技,2021(1):31-32.
GUAN Y. Effects of different grazing intensities on the physical and chemical properties of biological crusts and changes of soil enzyme activities in sandy land of western Liaoning Province [J]. Protection Forest Science and Technology,2021(1):31-32.
- [15] 许延琴,周冰倩,刘隋赞昊,等.模拟氮沉降对土壤酶活性和微生物组成的影响[J].生态学报,2023,43(20):8417-8429.
XU Y Q, ZHOU B Q, LIU S Y H, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activity, microbial

- community composition and stoichiometric characteristics of short-term enclosed grassland around Urumqi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20): 8417-8429.
- [16] 王佳, 李阳, 贾倩民, 等. 种植密度与施氮对河西灌区青贮玉米产量与品质及水分利用效率的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(1): 60-73.
- WANG J, LI Y, JIA Q M, et al. Effects of planting density and nitrogen application on yield, quality and water use efficiency of silage maize in Hexi irrigation region[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(1): 60-73.
- [17] 马琦, SHAHZAD Ali, 贾倩民, 等. 滴灌与施肥对河西灌区紫花苜蓿光合生理特性和干物质量的影响[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(4): 72-82.
- MA Q, ALI S, JIA Q M, et al. Effects of drip irrigation and fertilization on photo-synthetic physiological characteristics and the amount of dry matter of alfalfa in Hexi irrigation area[J]. *Grassland and Turf*, 2022, 42(4): 72-82.
- [18] 王茂鉴, 石薇, 常生华, 等. 灌溉模式对河西灌区禾-豆间作系统饲草产量、品质 and 水分利用的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(3): 13-29.
- WANG M J, SHI W, CHANG S H, et al. Effects of irrigation modes on forage yield, quality and water use of corn-legume intercropping systems in the Hexi irrigation area[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 13-29.
- [19] 韩博, 李广, 卓玛草, 等. 燕麦碳氮磷含量及化学计量比对盐胁迫的响应[J]. *草业科学*, 2020, 37(12): 2497-2506.
- HAN B, LI G, ZHUO M C, et al. Changes in C, N, P content and stoichiometric ratios in response to salt stress in *Avena sativa* plants[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(12): 2497-2506.
- [20] 尹鹏松. 青藏高原高寒沼泽草甸土壤酶活性与有机碳分布特征对增温与施氮的响应[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- YIN P S. Response of soil enzyme activity and organic carbon distribution characteristics to warming and nitrogen application in alpine swamp meadow of Qinghai-Xizang Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [21] 关伟涛, 郑志荣, 刁兆岩, 等. 不同干扰方式下温性草甸草原土壤碳氮磷化学计量特征及其储量研究[J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 2959-2966.
- GUAN W T, ZHENG Z R, DIAO Z Y, et al. Stoichiometric characteristics and their storage of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the temperate meadow steppe under different disturbances[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 2959-2966.
- [22] WANG H Y, WU J Q, LI G, et al. Effects of extreme rainfall frequency on soil organic carbon fractions and carbon pool in a wet meadow on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: e109853.
- [23] LIU S N, WU J Q, LI G, et al. Seasonal freeze-thaw characteristics of soil carbon pools under different vegetation restoration types on the Longzhong Loess Plateau[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: e1019627.
- [24] FENG L X, CAO B, WANG X J. Response of soil extracellular enzyme activity and stoichiometry to short-term warming and phosphorus addition in desert steppe[J]. *Peer J*, 2023, 11: e16227.
- [25] DÉFOSSEZ P, VEYLLON G, YANG M, et al. Impact of soil water content on the overturning resistance of young *Pinus Pinaster* in sandy soil[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 480: e118614.
- [26] XIANG T, QIANG F F, LIU G Q, et al. Soil quality evaluation of typical vegetation and their response to precipitation in loess hilly and gully areas[J]. *Forests*, 2023, 14(9): e1909.
- [27] MAO L, HE X X, YE S M, et al. Soil aggregate-associated carbon-cycle and nitrogen-cycle enzyme activities as affected by stand age in Chinese fir plantations[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(3): 4361-4372.
- [28] MA Z L, XU W J, CHEN Y M, et al. A study of the influence of the type of land use on the enzymatic activity of soils in southwestern China[J]. *Forests*, 2024, 15(4): e581.
- [29] WU J Q, WANG H Y, LI G, et al. Effects of nitrogen forms on soil enzyme activities in a saline-alkaline grassland[J]. *Ecology and Evolution*, 2024, 14(10): e70501.
- [30] WU Q Q, ZHANG J, LIU X N, et al. Effects of biochar and vermicompost on microorganisms and enzymatic activities in greenhouse soil[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10: e1060277.
- [31] 苏效兰, 朱太富, 李欣, 等. 不同海拔对野生猕猴桃土壤酶活性和养分的影响[J]. *中国野生植物资源*, 2024, 43(4): 53-58.
- SU X L, ZHU T F, LI X, et al. Effects of different altitudes on soil enzyme activity and nutrients of wild kiwifruit[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2024, 43(4): 53-58.
- [32] 刘泉位, 张天国, 杜娟, 等. 四川米仓山水青冈原生林与杉木人工林土壤酶化学计量特征[J]. *西华师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(2): 111-118.
- LIU Q W, ZHANG T G, DU J, et al. Soil enzyme stoichiometry characteristics of *Cyclobalanopsis glauca* primary forest and Chinese fir plantation in Micang Mountain, Sichuan Province[J]. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 46(2): 111-118.

- tural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 423-438.
- [18] 段虎荣, 康明哲, 吴绍宇, 等. 利用GRACE时变重力场反演青藏高原的隆升速率[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(12): 4345-4360.
- DUAN H R, KANG M Z, WU S Y, et al. Uplift rate of the Tibetan Plateau constrained by GRACE time-variable gravity field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(12): 4345-4360.
- [19] BOUKHENNAF A, MEZOUAR K. Long and short-term evolution of the Algerian coastline using remote sensing and GIS technology [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2023, 61: e102893.
- [20] GONZALEZ R C. *Digital image processing* [M]. India: Pearson Education India, 2009.
- [21] LI Z B, SHI W Z, LU P, et al. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 76-90.
- [22] 张明华. 西藏墨脱公路地质灾害遥感勘察[J]. *公路*, 2004, 49(5): 91-96.
- ZHANG M H. A remote sensing survey of geological disasters of Motuo County highway in Tibet [J]. *Highway*, 2004, 49(5): 91-96.
- [23] KEYPORT R N, OOMMEN T, MARTHA T R, et al. A comparative analysis of pixel- and object-based detection of landslides from very high-resolution images [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 1-11.
- [24] SIMONETT D S. Landslide distribution and earthquakes in the Bawani and Torricelli mountains, New Guinea [M]. *Landform Studies from Australia and New Guinea*, 1967: 64-84.
- [25] LARSEN I J, MONTGOMERY D R, KORUP O. Landslide erosion controlled by hillslope material [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(4): 247-251.
- [26] BHATTACHARJEE S, BOOKHAGEN B, SINHA R. Sediment-transport rates from decadal to millennial timescales across the Indo-Gangetic Plain: Impacts of tectonics, climatic processes, and vegetation cover [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 233: e104165.
- [27] KING G E, HERMAN F, GURALNIK B. Northward migration of the eastern Himalayan syntaxis revealed by OSL thermochronometry [J]. *Science*, 2016, 353(6301): 800-804.
- [28] LUPKER M, LAVÉ J, FRANCE-LANORD C, et al. Be systematics in the Tsangpo-Brahmaputra catchment: The cosmogenic nuclide legacy of the eastern Himalayan syntaxis [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2017, 5(3): 429-449.
- [29] STRUCK M, ANDERMANN C, HOVIUS N, et al. Monsoonal hillslope processes determine grain size-specific suspended sediment fluxes in a trans-Himalayan river [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(7): 2302-2308.
- [30] ROBACK K, CLARK M K, WEST A J, et al. The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 Mw7.8 Gorkha earthquake, Nepal [J]. *Geomorphology*, 2018, 301: 121-138.
- [31] ZHAO B, LI W L, WANG Y S, et al. Landslides triggered by the Ms 6.9 Nyingchi earthquake, China (18 November 2017): Analysis of the spatial distribution and occurrence factors [J]. *Landslides*, 2019, 16(4): 765-776.
- [32] GRATCHEV I. *Mechanisms of earthquake-induced landslides: Insights in field and laboratory investigations* [M]// *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 428-436.
- (上接第317页)
- [33] 任强, 艾鹭, 胡健, 等. 不同强度牦牛放牧对青藏高原高寒草地土壤和植物生物量的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6862-6870.
- REN Q, AI Y, HU J, et al. Effects of different yak grazing intensities on soil and plant biomass in an alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 6862-6870.
- [34] CHEN Z X, XU X, WEN Y L, et al. The critical role of soil ecological stoichiometric ratios: How does reforestation improve soil nitrogen and phosphorus availability? [J]. *Plants*, 2024, 13(16): e2320.
- [35] 黄琳曦, 陈倩, 张先言, 等. 两种乔木凋落叶浸提液处理对地毯草土壤酶活性及其化学计量比的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(4): 35-46.
- HUANG L X, CHEN Q, ZHANG X Y, et al. Effect of two kinds of tree litter leaf extracts on soil enzyme activities and eco-enzymatic stoichiometry of *Axonopus compressus* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 35-46.