

DOI: 10.5846/stxb201904090690

付倩, 郑荣波, 方昕, 郭雪莲. 增温和牦牛排泄物输入对沼泽土壤酶活性的影响. 生态学报, 2020, 40(14): 5055-5062.

Fu Q, Zheng R B, Fang X, Guo X L. Effects of warming and yak excreta addition on enzyme activity of marsh soil. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5055-5062.

增温和牦牛排泄物输入对沼泽土壤酶活性的影响

付倩^{1,2}, 郑荣波³, 方昕^{1,2}, 郭雪莲^{1,2,*}

1 西南林业大学湿地学院, 昆明 650224

2 国家高原湿地研究中心, 昆明 650224

3 西南林业大学化学工程学院, 昆明 650224

摘要: 选取滇西北高原纳帕海沼泽土壤为研究对象, 采用室内模拟实验, 研究增温 (13°C、19°C、25°C) 和牦牛排泄物 (粪便、尿液) 输入对沼泽土壤理化性质和酶活性的影响。结果表明: (1) 增温会显著降低土壤 pH ($P < 0.05$), 19°C 时显著降低无机氮含量 ($P < 0.05$), 对其他土壤理化性质无显著影响 ($P > 0.05$); 增温对不同排泄物处理下的土壤酶活性影响存在差异。(2) 排泄物输入显著影响沼泽土壤理化性质。牦牛粪便输入显著提高土壤含水率、pH、总有机碳 (Total organic carbon, TOC) 和有效磷含量 ($P < 0.05$), 显著降低土壤硝态氮含量 ($P < 0.05$); 牦牛尿液显著提高土壤含水率和土壤无机态氮含量 ($P < 0.05$)。牦牛粪便输入显著提高蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性 ($P < 0.05$); 牦牛尿液显著提高脲酶活性 ($P < 0.05$)。(3) 增温和排泄物输入交互作用对 TOC ($P < 0.05$)、pH 和无机态氮 ($P < 0.01$) 影响显著, 对蔗糖酶 ($P < 0.05$)、脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性 ($P < 0.01$) 均影响显著。本研究阐明了增温、牦牛排泄物输入及二者交互作用对沼泽土壤理化性质和酶活性的影响, 为气候变暖背景下湿地放牧干扰研究提供理论基础。

关键词: 增温; 牦牛排泄物; 土壤酶活性; 土壤理化性质

Effects of warming and yak excreta addition on enzyme activity of marsh soil

FU Qian^{1,2}, ZHENG Rongbo³, FANG Xin^{1,2}, GUO Xuelian^{1,2}

1 College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 National Plateau Wetlands Research Center, Kunming 650224, China

3 College of Chemical Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: In this study, the effects of warming (13°C, 19°C and 25°C) and yak excreta (feces, urine) addition on soil properties and enzyme activity of marsh soil were studied by laboratory incubation experiment. The results showed that: (1) Warming induced an overall reduction in pH of marsh soil ($P < 0.05$). The inorganic nitrogen content of marsh soil was decreased at 19°C ($P < 0.05$), but there was no significant difference among temperature treatments of other soil properties ($P > 0.05$). The effects of warming on soil enzyme activity with different excreta treatments were various significantly. (2) The effects of excreta addition on the physicochemical properties of marsh soil were different significantly ($P < 0.05$). Yak feces addition significantly increased water content, pH, TOC and available phosphorus content ($P < 0.05$), but decreased nitrate nitrogen content of marsh soil ($P < 0.05$). Yak urine significantly increased water content and inorganic nitrogen content of marsh soil ($P < 0.05$). Yak feces addition significantly promoted the activities of sucrase, urease and catalase ($P < 0.05$). In contrast, Yak urine significantly promoted urease activity ($P < 0.05$), but had no significant effect on other enzyme activities ($P > 0.05$). (3) The interaction of warming and excreta addition had significant effects on TOC ($P <$

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41563008); 云南省高原湿地科学创新团队 (2012HC007)

收稿日期: 2019-04-09; **网络出版日期:** 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoxuelian2009@hotmail.com

0.05), pH, inorganic nitrogen content ($P<0.01$), sucrase ($P<0.05$), urease, acid phosphatase and catalase ($P<0.01$) activities. This study illuminated the effects of warming, yak excreta addition and interaction on the physicochemical characteristic and enzyme activity of marsh soil, which provided theoretical basis for study of the effect of grazing disturbance on wetland ecosystem with the climate warming.

Key Words: warming; yak excreta; soil enzyme activity; soil physiochemical properties

土壤酶是驱动土壤物质循环过程的重要因素^[1],是土壤中生物化学过程的主要参与者,是生态系统物质循环和能量流动过程中最活跃的生物活性物质之一^[2]。土壤酶调控湿地土壤碳、氮、磷循环过程,不仅影响湿地初级生产力,还影响湿地温室气体排放,关系到全球气候变化。土壤酶是一种活性的蛋白质,其活性很容易受到环境中物理、化学及生物因素影响,对自然和人为因素引起的变化非常敏感。

滇西北地处少数民族聚集的农牧交错带,是云南高原湿地的集中分布区,当地对于湿地资源利用的主要途径是放牧。位于滇西北核心的纳帕海湿地是我国低纬度高海拔的独特类型,是滇西北地区受放牧干扰最为典型和严重的区域,当地主要放牧类型为牦牛放牧。牦牛放牧会对湿地土壤产生重要影响^[3]。同时,纳帕海湿地还受到气候变暖的影响,在过去的 60 年里,香格里拉年均温以每 10 年 0.37℃ 的速度增长^[4],且与低海拔地区相比,高海拔地区对气候变化更敏感^[5]。根据 IPCC 的气候模式预测,到 2100 年,全球温度将上升 1.4—5.8℃^[6]。放牧和气候变暖将改变土壤温度,影响土壤微生物群落结构与活性、植物群落和土壤动物活动,从而改变土壤酶的质和量,最终影响土壤酶活性^[7-8]。近年来,已有学者开展了一些关于增温对森林、草地、湿地土壤理化性质和酶活性^[6, 9-11]、放牧中牲畜活动对土壤理化性质、土壤微生物群落及土壤酶活性的影响^[2, 12-15]研究,但对放牧过程中排泄物输入对土壤酶活性的影响关注较少,且仅限于草地生态系统。关于气候变暖和牦牛排泄物输入对湿地土壤酶活性的影响尚不清楚。本研究选取滇西北高原纳帕海典型沼泽土壤为研究对象,采用室内模拟实验,研究增温和牦牛排泄物输入对沼泽土壤理化性质和酶活性的影响,为气候变化和放牧对湿地生态系统影响研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在滇西北高原的纳帕海国际重要湿地(99°37'10.6"—99°40'20.0"E,27°48'55.6"—27°54'28.0"N)内,行政上隶属云南省迪庆藏族自治州香格里拉市,距市区 8 km,平均海拔 3260 m。纳帕海湿地地处青藏高原与亚热带季风气候区和中南半岛热带季风区的结合部,具有高寒、年均温低、霜期长、气温年较差和日较差大、干湿季节分明等特点。年均温为 5.4℃,年降水量为 619.9 mm,主要集中在 6—8 月^[3]。土壤采样区位于纳帕海哈木谷村附近,土壤类型为沼泽土,植物包括早熟禾(*Poa annua*)、小苔草(*Carex parva*)、云雾苔草(*Carex nubigena*)、木里苔草(*Carex muliensis*)等^[16]。

1.2 实验设计

1.2.1 样品采集

于 2018 年 4 月中旬,依据典型性和代表性原则,在纳帕海哈木谷村附近选择典型沼泽湿地为研究区,研究区内设置 3 块 10 m×10 m 的样地,每个样地内根据五点取样法进行取样。取样时去除地表覆盖物后用铲进行土壤取样,采集 0—10 cm 土层土壤样品并充分混合,鲜土放恒温箱内带回。于实验室内对取回的土壤样品预处理,手工剔除土壤中的植物根系等杂质。

随机选取 6 头研究区域附近牧民放养的牦牛进行标记,在放牧结束后圈禁被标记的牦牛,于第二天早上在牧民的帮助下收集新鲜牦牛粪便和尿液,收集的牦牛粪便和尿液盛于事先灭菌的塑料桶,带回实验室于 -20℃ 储存备用。

1.2.2 室内模拟实验

实验设定 3 个温度处理:13℃(香格里拉 7 月平均温)、19℃(香格里拉 7 月最高温)^[4]、25℃;每个温度处理下设置对照(CK)、牦牛粪便输入(F)、牦牛尿液输入(U)处理,每组 3 个重复。根据 Lovell R D 的方法^[17],按照野外实际调查统计设置粪便添加量;根据 van Groenigen 等^[18]的报道设置尿液添加量。本实验每个粪便处理(F)加入 114.23 g 新鲜牦牛粪便,每个尿液处理(U)加入 15.56 mL 尿液。将预处理后的土壤于室温下风干,过 2 mm 筛,称取 100 g 风干土于 500 mL 的具塞玻璃三角瓶中,调节土壤含水率至田间持水量的 60%左右,置于恒温培养箱(25℃)避光孵化一周后添加排泄物,完成排泄物添加后分别置于 13℃、19℃、25℃条件下避光培养,在培养第 31 天取样进行土壤理化性质和土壤酶活性的测定。

表 1 牦牛排泄物和沼泽土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of yak excreta and marsh soil

	含水率 Water content/%	pH	总有机碳 Total organic carbon/ (g/kg)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg/kg)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg/kg)	总氮 Total nitrogen/ (g/kg)	总磷 Total phosphorus/ (mg/kg)
牦牛粪便 Yak feces	80.53±0.16	7.99±0.01	483.6±5.15	86.10±2.07	5.06±0.45	24.1±2.07	3.93±0.23
牦牛尿液 Yak urine	—	8.67 ± 0.31	170.2± 4.65	59.76± 1.84	48.94± 10.19	8.7±1.30	3.00±0.13
沼泽土壤 Marsh soil	—	5.13±0.15	103.1±1.25	—	—	6.62±1.27	0.80±0.14

表中数值为平均值±标准误差(n=3)

1.3 实验方法

土壤含水率采用重量法测定,土壤 pH 值用玻璃电极(STARTER 300, 上海)测定(土水比 1:5, W/V),土壤铵态氮及硝态氮采用 1 mol/L KCL 浸提法(土水比 1:10, W/V),浸提液使用连续流动分析仪(SKALAR SAN++, 荷兰)测定,土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定,土壤全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法,消煮液采用流动分析仪测定,土壤总有机碳(Total organic carbon, TOC)采用总有机碳分析仪(Vario, 德国元素)测定。蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,脲酶采用靛酚比色法测定,酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法测定^[19-20]。

2 数据处理

数据采用 Excel 及 SPSS 20.0 进行处理,对土壤理化性质及酶活性数据进行双因素方差分析,酶活性数据用 Sigmaplot 10.0 作图。用 Canoco 4.5 对土壤理化性质和土壤酶活性进行冗余分析。

3 结果与分析

3.1 增温和排泄物输入对沼泽土壤理化性质的影响

如表 2 所示,增温对 CK 土壤含水率影响显著($P<0.05$),表现为含水率随温度的升高而降低;增温对排泄物输入处理的含水率影响不显著($P>0.05$)。增温对 CK 和排泄物处理土壤 pH 的影响表现为 13℃>25℃>19℃。增温对 CK 和排泄物处理土壤有机碳、全氮、有效磷含量影响不显著($P>0.05$),但对排泄物处理土壤铵态氮和硝态氮含量影响显著($P<0.05$)。

13℃和 25℃处理下,排泄物输入对土壤含水率有显著影响($P<0.05$)。不同温度处理下,排泄物输入均对土壤 pH 影响显著($P<0.05$)。不同温度处理下土壤总有机碳含量均表现为 F>CK>U,且 F 显著高于 CK 和 U 处理($P<0.05$)。排泄物输入处理对土壤总氮含量无显著影响($P>0.05$)。不同温度处理下土壤有效磷含量均表现为 F 处理显著高于 CK 和 U($P<0.05$)。U 处理显著增加土壤铵态氮含量,13℃和 19℃处理下,土壤铵态氮含量表现为 U>F>CK,但 F 和 CK 无显著差异;25℃处理下,土壤铵态氮含量表现为 U>CK>F,而 F 和 CK 差异不显著,表明排泄物输入与增温对土壤产生交互作用。排泄物输入对土壤硝态氮含量影响显著($P<0.05$),不同温度处理下均表现为 U>CK>F。

表 2 增温和排泄物输入处理对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of warming and yak excreta addition on soil physicochemical properties

温度/℃ Temperature	处理 Treatment	含水率 Soil Water content /%	pH	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg/kg)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	总有机碳 Total organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)
13	CK	39.58(0.16) Ac	5.70(0.14) Ab	45.18(9.29) Bb	212.39(16.37) Ab	4.99(0.13) Ab	94.98(3.83) Ab	7.36(0.41) Aab
	F	60.38(0.14) Aa	6.55(0.05) Aa	117.15(53.90) Ab	34.16(1.90) Ac	22.64(0.77) Aa	112.68(1.50) Aa	7.88(0.31) Aa
	U	44.68(0.05) Ab	5.99(0.16) Ab	1302.10(11.34) Aa	254.02(9.28) Ca	3.53(0.29) Bb	91.87(2.20) Ab	6.47(0.29) Ab
19	CK	38.61(0.27) Ba	5.22(0.01) Bb	17.52(1.48) Bb	245.88(3.97) Ab	5.26(0.91) Ab	97.47(2.98) Ab	7.68(1.74) Aa
	F	53.00(7.28) Aa	6.28(0.03) Ba	19.86(0.71) Ab	21.96(0.61) Bc	23.66(3.29) Aa	117.09(4.02) Aa	6.98(0.83) Aa
	U	47.20(2.93) Aa	4.87(0.04) Cc	336.51(16.02) Ca	313.40(2.03) Aa	5.12(1.16) ABb	94.90(2.01) Ab	7.10(0.15) Aa
25	CK	37.66(0.30) Cc	5.34(0.01) Bb	120.97(14.46) Ab	211.41(14.55) Ab	4.55(0.44) Ab	90.32(1.41) Ab	6.61(0.70) Aa
	F	61.82(1.74) Aa	6.44(0.06) Aa	43.78(8.53) Ab	30.49(1.66) Ac	20.96(2.53) Aa	117.53(1.44) Aa	7.59(0.82) Aa
	U	43.48(0.10) Ab	5.31(0.13) Bb	704.66(111.90) Ba	290.84(2.32) Ba	8.25(1.35) Ab	88.80(0.71) Ab	6.75(0.35) Aa

同一列中,大写字母表示在 95%置信水平下不同温度处理的差异显著性,小写字母表示不同排泄物处理的差异显著性;CK,对照处理 Control; F,粪便处理 Feces treatment; U,尿液输入处理 Urine treatment

通过双因素方差分析可知,增温对土壤 pH、铵态氮、硝态氮含量影响极为显著($P < 0.01$),排泄物输入对土壤含水率、pH、硝态氮、有效磷和总有机碳含量影响极为显著($P < 0.01$)。增温和排泄物输入的交互作用对土壤 TOC 影响显著($P < 0.05$),对土壤 pH、铵态氮含量和硝态氮含量影响极为显著($P < 0.01$) (表 3)。

表 3 增温和排泄物输入对土壤理化性质的双因素方差分析(P 值)

Table 3 Two-way ANOVA (P-values) of effects of warming and yak excreta addition on soil physicochemical properties

	含水率 Soil water content	pH	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	有效磷 Available phosphorus	总有机碳 Total organic carbon	全氮 Total nitrogen
温度 Temperature	0.666	<0.001 **	0.001 **	0.003 **	0.714	0.823	0.890
排泄物 Excrement	<0.001 **	<0.001 **	<0.001 **	<0.001 **	<0.001 **	<0.001 **	0.535
温度×排泄物 Temperature×Excrement	0.203	0.002 **	<0.001 **	0.003 **	0.271	0.026 *	0.766

* 表示差异显著, ** 表示差异极显著

3.2 增温和排泄物输入对沼泽土壤酶活性的影响

3.2.1 增温对土壤酶活性的影响

增温对 CK 的蔗糖酶和酸性磷酸酶活性影响显著($P < 0.05$),蔗糖酶活性表现为 $25^{\circ}\text{C} > 13^{\circ}\text{C} > 19^{\circ}\text{C}$,酸性磷酸酶活性表现为随温度升高而增强;增温对 F 处理的脲酶和过氧化氢酶活性影响显著($P < 0.05$),脲酶活性和过氧化氢酶活性表现为 $13^{\circ}\text{C} > 25^{\circ}\text{C} > 19^{\circ}\text{C}$;增温对 U 处理的酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性影响显著($P < 0.05$),酸性磷酸酶活性随温度的升高而降低,过氧化氢酶活性表现为 $13^{\circ}\text{C} > 25^{\circ}\text{C} > 19^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.2 排泄物输入对土壤酶活性的影响

F 处理显著提高了土壤脲酶、蔗糖酶与过氧化氢酶的活性($P < 0.05$)。与 CK 相比,F 处理在 13°C 、 19°C 、 25°C 下蔗糖酶活性分别提高了 1.06 倍、2.53 倍、0.56 倍,脲酶活性分别提高了 7.48 倍、4.69 倍、5.36 倍,过氧化氢酶分别提高了 3.61 倍、1.67 倍、2.10 倍。 13°C 处理下,F 处理显著提高酸性磷酸酶活性($P < 0.05$),而 25°C 下 F 处理显著降低酸性磷酸酶的活性($P < 0.05$)。

U 处理对土壤酶活性的影响小于 F 处理。与 CK 相比,U 处理对土壤蔗糖酶影响不显著($P > 0.05$);U 处理显著提高土壤脲酶活性($P < 0.05$),在 13°C 、 19°C 、 25°C 下分别提高 2.54 倍、2.93 倍、1.86 倍;U 处理对土壤酸性磷酸酶活性的影响因温度不同而不同,在 13°C 处理下显著提高酸性磷酸酶活性($P < 0.05$), 25°C 处理下显著降低酸性磷酸酶活性($P < 0.05$), 19°C 处理下对土壤酸性磷酸酶活性影响不显著($P > 0.05$); 13°C 处理下

U 处理显著提高过氧化氢酶活性 ($P < 0.05$), 19°C 和 25°C 处理下 U 处理对过氧化氢酶活性影响不显著 ($P > 0.05$)。

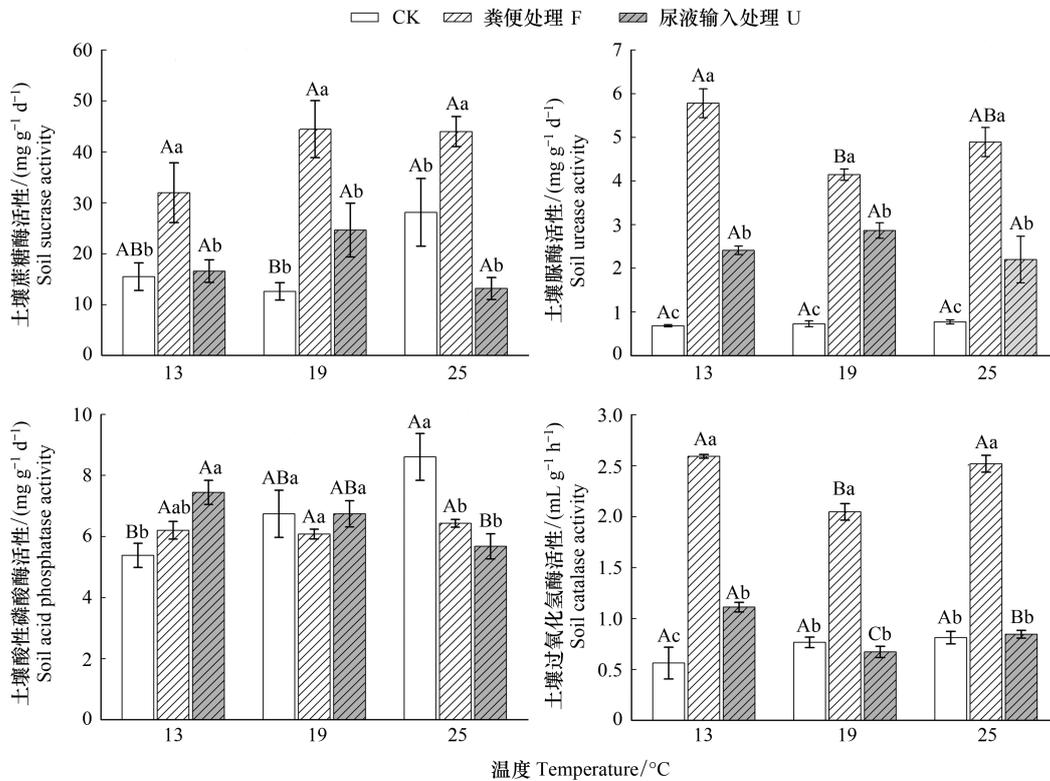


图 1 增温和牦牛排泄物输入对土壤酶活性的影响

Fig.1 The effects of warming and yak excreta addition on soil enzyme activities

大写字母表示在 95% 置信水平下不同温度处理的差异显著性,小写字母表示不同排泄物处理间的差异显著性

通过双因素方差分析可知,增温对过氧化氢酶活性影响极为显著 ($P < 0.01$),排泄物输入对蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性影响极为显著 ($P < 0.01$),增温和排泄物输入交互作用显著影响蔗糖酶活性 ($P < 0.05$),对脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性均影响极为显著 ($P < 0.01$) (表 4)。

表 4 增温和牦牛排泄物输入对土壤酶活性影响的双因素方差分析 (P 值)

Table 4 Two-way ANOVA (P -values) of effects of warming and yak excreta addition on soil enzyme activities

	蔗糖酶 Sucrase	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
温度 Temperature	0.126	0.157	0.346	0.001 **
排泄物 Excrement	<0.001 **	<0.001 **	0.239	<0.001 **
温度×排泄物 Temperature×Excrement	0.048 *	0.006 **	0.001 **	0.001 **

* 表示差异显著, ** 表示差异极显著

3.3 增温和排泄物输入影响下土壤理化性质与土壤酶活性的关系

如图 2,根据冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 分析可知,轴一解释度为 98.2%,表明第一轴环境变量是影响土壤酶活性的主要因素。土壤脲酶、过氧化氢酶活性与土壤含水率、pH、土壤有效磷以及土壤有机碳、总氮含量呈正相关关系,与土壤铵态氮含量呈负相关关系;蔗糖酶与土壤含水率、pH、土壤有效磷含量以及土壤有机碳含量正相关,与铵态氮和硝态氮负相关;土壤酸性磷酸酶与土壤理化性质无显著相关关系。

4 讨论

4.1 增温和排泄物输入对土壤理化性质的影响

增温对土壤铵态氮、硝态氮含量的影响显著,因为增温会加速土壤有机氮的矿化过程,使得土壤铵态氮和硝态氮含量发生改变^[21]。增温对土壤 pH 影响显著,其原因主要是温度升高后,土壤盐溶液的浓度和可交换阳离子会发生改变,进而影响土壤的 pH^[22-23]。

排泄物输入对土壤含水率、pH、硝态氮、有效磷和总有机碳含量影响极为显著。本研究排除了牦牛取食、活动等因素的影响,牦牛排泄物可视作有机肥输入,有机肥输入可改善土壤理化性状,如提高土壤含水率、pH、土壤有效磷、有机碳含量^[24-25]。牦牛排泄物提高土壤含水率主要是因为牦牛尿液处理为液体输入,使得土壤含水率高,而新鲜牦牛粪便含水率高,混入土壤后使得土壤含水率升高。牦牛粪便处理显著提高了土壤的 pH,原因有三个方面:一是因为牦牛粪便有机质分解过程中,有机质中活性有机 N 的氨化和脱羧过程导致 H⁺ 的消耗,从而使土壤 pH 升高;二是土壤 pH 会受到水分

条件的影响,牦牛粪便输入使得土壤含水率升高,土壤中的电解质被稀释,更多的阳离子进入到土壤中,导致土壤 pH 升高^[26];三是牦牛粪便本身 pH 较高(7.99),可中和土壤原始的较低 pH(5.13)^[27],因为牲畜尿液输入会导致土壤酸化,所以牦牛尿液处理未使土壤 pH 升高^[27]。牦牛粪便处理降低了土壤无机氮含量,是由于土壤氮矿化速率和硝化速率与土壤 pH 呈显著正相关关系^[16],较高的 pH 促进土壤氮的矿化和硝化,导致土壤中铵态氮和硝态氮的含量减少,且牦牛粪便输入使土壤 pH 升高到 6.5 左右,有研究表明,土壤 pH 为 6.5 左右时,氨氧化速率最高^[28]。而尿液处理组 pH 较低,使得铵态氮大量累积。

4.2 增温和排泄物输入对土壤酶活性的影响

土壤地球化学循环过程中,碳、氮、磷的循环过程是其重要的组成部分。蔗糖酶可促进土壤中的糖类水解,加速土壤氮素循环;脲酶参与土壤含氮有机物的转化,其活性常用来表征土壤氮素供应强度,与氮素供应呈正相关关系;磷酸酶可促进有机磷化合物的分解,增加土壤磷素及易溶性营养物质;过氧化氢酶可表征土壤腐殖化强度和有机质积累程度^[29-30]。

随着温度的升高,土壤蔗糖酶及土壤酸性磷酸酶活性逐渐增大,由于在增温过程中,其温度更接近于酶的最适温度,酶活性增强,加速土壤碳素循环,促进有机磷化合物的分解^[2, 31]。而土壤脲酶及过氧化氢酶活性则表现为 13℃ > 25℃ > 19℃,表明增温将降低脲酶和过氧化氢酶的活性,抑制土壤含氮有机化合物的转化,导致土壤腐殖化强度和有机质积累程度降低^[2]。除过氧化氢酶外,温度对土壤酶活性的影响不显著,可能存在两点原因:一是增温培养时间不足,土壤酶主要来自于土壤微生物的分泌,虽然土壤微生物对环境变化敏感,但土壤微生物合成酶需要一定过程,所以土壤酶对环境条件变化的响应存在延迟。二是土壤酶的温度敏感性不高,秦纪洪^[32]及 Razavi B S^[33]研究表明土壤酶活性在低温下温度敏感性高,在较高温度下温度敏感性较低,本实验中设置培养温度处于土壤酶活性温度敏感性较低的区间,所以培养温度的变化对其影响较小。而土壤酸性磷酸酶主要来源于真菌群落,而真菌群落在低温环境下活性较高^[32],酸性磷酸酶受到真菌群落活性的限制,故增温处理对酸性磷酸酶活性影响较小。

排泄物输入对蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性影响极为显著,主要因为牦牛粪便输入显著影响了土壤中

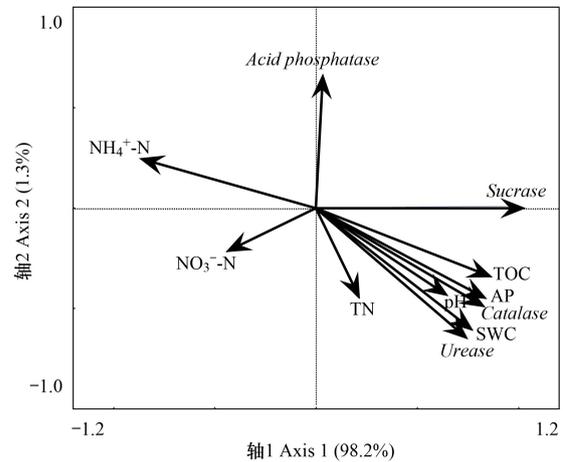


图2 土壤理化性质与酶活性的冗余分析

Fig.2 Redundancy analysis between soil physicochemical properties and enzyme activities

SWC:土壤含水率 Soil water content; pH: 酸碱度; NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; AP:有效磷 Available phosphorus; TOC:总有机碳 Total organic carbon; TN: 总氮 Total nitrogen

有机质的含量,有机质为土壤微生物的分解底物,在一定条件下,分解底物含量越丰富,会促进土壤微生物的生长和土壤酶的分泌^[25],且牦牛排泄物输入均显著提高了土壤含水率,土壤水分有利于养分和底物的扩散,使得酶活性增强。

4.3 增温和排泄物输入处理下土壤理化性质与酶活性的关系分析

增温和排泄物交互作用对土壤理化性质和酶活性影响显著,主要由于两者交互作用改变土壤的水气热条件,使得土壤生物化学循环过程发生改变,进而改变土壤理化性质和酶活性。本研究发现土壤含水率、pH、有效磷、总有机碳与土壤脲酶、过氧化氢酶及蔗糖酶活性大小呈显著正相关关系。土壤水分含量能够限制土壤养分和分解底物的扩散,而底物的扩散会影响土壤酶活性^[34],土壤总有机碳是土壤酶的利用底物,所以与酶活性密切相关。土壤酶都有其适宜的 pH 范围(一般为 4.0—8.0)^[7]和适宜温度区间,在适宜区间内活性会随 pH 的增大而增大。

5 结论

(1)增温影响湿地土壤理化性质和酶活性,主要表现为土壤 pH 随温度升高而呈降低趋势,较低幅度增温(19℃)显著降低土壤的铵态氮、硝态氮含量和过氧化氢酶活性,而较高增温幅度(25℃)对土壤理化性质和酶活性影响不显著。

(2)牦牛粪便显著提高土壤水分含量、pH、TOC、有效磷含量,显著降低硝态氮含量,显著促进蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性;牦牛尿液输入显著提高土壤含水率和硝态氮含量,并提高脲酶活性。牦牛排泄物输入短期内可增加土壤有效养分。

(3)增温和排泄物交互作用削弱了增温或排泄物单独作用对土壤理化性质的影响,削弱了排泄物单独作用对土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性的影响,增强了对土壤酸性磷酸酶活性的影响。

参考文献(References):

- [1] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(2): 223-235.
- [2] 王启兰, 曹广民, 王长庭. 放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 856-864.
- [3] 张昆, 田昆, 吕宪国, 佟守正. 纳帕海湖滨草甸湿地土壤氮动态对水文周期变化的响应. *环境科学*, 2009, 30(8): 2216-2220.
- [4] Panthi S, Bräuning A, Zhou Z K, Fan Z X. Growth response of *Abies georgei* to climate increases with elevation in the central Hengduan Mountains, southwestern China. *Dendrochronologia*, 2018, 47: 1-9.
- [5] Feng X P, Zhao C, D'Andrea W J, Liang J, Zhou A F, Shen J. Temperature fluctuations during the Common Era in subtropical southwestern China inferred from brGDGTs in a remote alpine lake. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 510: 26-36.
- [6] Luo C Y, Xu G P, Wang Y F, Wang S P, Lin X W, Hu Y G, Zhang Z H, Chang X F, Duan J C, Su A L, Zhao X Q. Effects of grazing and experimental warming on DOC concentrations in the soil solution on the Qinghai-Tibet plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2493-2500.
- [7] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, Sinsabaugh R L, Stromberger M E, Wallenstein M D, Weintraub M N, Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216-234.
- [8] Sistla S A, Schimel J P. Seasonal patterns of microbial extracellular enzyme activities in an arctic tundra soil: Identifying direct and indirect effects of long-term summer warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 66: 119-129.
- [9] 刘琳, 朱霞, 孙庚, 罗鹏, 王蓓. 模拟增温与施肥对高寒草甸土壤酶活性的影响. *草业科学*, 2011, 28(8): 1405-1410.
- [10] 贝昭贤, 张秋芳, 郑蔚, 杨柳明, 陈岳民, 杨玉盛. 模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响. *生态学报*, 2018, 38(3): 1106-1113.
- [11] 江森华, 倪梦颖, 周嘉聪, 陈岳民, 杨玉盛. 增温和降雨减少对杉木幼林土壤酶活性的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3210-3219.
- [12] 刘玉, 常小峰, 田福平, 刘振恒, 党志强, 武高林. 放牧对草地群落与土壤特征的影响. *西北植物学报*, 2016, 36(12): 2524-2532.
- [13] 牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 刘丽, 杜国祯, 花立民. 放牧强度对高寒草甸土壤理化性状和植物功能群的影响. *生态学报*, 2018, 38(14): 5006-5016.
- [14] 姚鸿云, 李小雁, 郭娜, 王莹, 朱国栋, 王晓楠, 魏俊奇, 王成杰. 多年放牧对不同类型草原植被及土壤碳同位素的影响. *应用生态学报*,

- 2019, 30(2): 553-562.
- [15] Li Y M, Lin Q Y, Wang S P, Li X Z, Liu W, Luo C Y, Zhang Z H, Zhu X X, Jiang L L, Li X E. Soil bacterial community responses to warming and grazing in a Tibetan alpine meadow. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, 92(1): fiv152.
- [16] 王雪, 郭雪莲, 郑荣波, 王山峰, 刘双圆, 田伟. 放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响. *生态学报*, 2018, 38(7): 2308-2314.
- [17] Lovell R D, Jarvis S C. Effect of cattle dung on soil microbial biomass C and N in a permanent pasture soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(3): 291-299.
- [18] van Groenigen J W, Kuikman P J, de Groot W J M, Velthof G L. Nitrous oxide emission from urine-treated soil as influenced by urine composition and soil physical conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 463-473.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [20] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987.
- [21] 刘志江, 林伟盛, 杨舟然, 林廷武, 刘小飞, 陈岳民, 杨玉盛. 模拟增温和氮沉降对中亚热带杉木幼林土壤有效氮的影响. *生态学报*, 2017, 37(1): 44-53.
- [22] Sun D D, Li Y J, Zhao W Q, Zhang Z L, Li D D, Zhao C Z, Liu Q. Effects of experimental warming on soil microbial communities in two contrasting subalpine forest ecosystems, eastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(8): 1442-1452.
- [23] Li D D, Li Y J, Liang J, Zhao C Z, Yin H J, Yin C Y, Cheng X Y, Liu Q. Responses of soil micronutrient availability to experimental warming in two contrasting forest ecosystems in the Eastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(6): 1050-1060.
- [24] 陈婷, 韩士群, 周庆. 巢湖藻-草-泥堆制有机肥对土壤性质的影响. *土壤*, 2018, 50(5): 910-916.
- [25] Li W T, Wu M, Liu M, Jiang C Y, Chen X F, Kuzyakov Y, Rinklebe J, Li Z P. Responses of soil enzyme activities and microbial community composition to moisture regimes in paddy soils under long-term fertilization practices. *Pedosphere*, 2018, 28(2): 323-331.
- [26] 李欢, 杨玉盛, 司友涛, 林伟盛, 熊德成, 刘小飞. 模拟增温及隔离降雨对中亚热带杉木人工林土壤可溶性有机质的数量及其结构的影响. *生态学报*, 2018, 38(8): 2884-2895.
- [27] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, Zhang H M, He X H, Zhang L, Gao S D. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260-270.
- [28] 陈方敏, 金润, 袁砚, 李祥, 黄勇, 顾澄伟. 温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响. *环境科学*, 2018, 39(9): 4289-4293.
- [29] Liu G M, Zhang X C, Wang X P, Shao H B, Yang J S, Wang X P. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 237: 274-279.
- [30] 曲成闯, 陈效民, 张志龙, 王诺, 闫婧妍, 张俊, 黄春燕. 施用生物有机肥对黄瓜连作土壤有机碳库和酶活性的持续影响. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3145-3154.
- [31] Liu Q Y, Xu X L, Wang H M, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Dominant extracellular enzymes in priming of SOM decomposition depend on temperature. *Geoderma*, 2019, 343: 187-195.
- [32] 秦纪洪, 张文宣, 王琴, 孙辉. 亚高山森林土壤酶活性的温度敏感性特征. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1241-1245.
- [33] Razavi B S, Liu S B, Kuzyakov Y. Hot experience for cold-adapted microorganisms: temperature sensitivity of soil enzymes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 236-243.
- [34] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, Xu Z H, Han H Y, Li L H, Wan S Q. Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 552-558.