

DOI: 10.5846/stxb201806051262

展鹏飞, 闫鹏飞, 刘振亚, 王行, 张贇, 张勇, 崔海军, 肖德荣. 藏香猪放牧对滇西北高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响. 生态学报, 2019, 39(9): - .  
Zhan P F, Yan P F, Liu Z Y, Wang H, Zhang Y, Zhang Y, Cui H J, Xiao D R. Effects of Tibetan pig herding on soil CO<sub>2</sub> fluxes in a plateau wetland of northwestern Yunnan, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

## 藏香猪放牧对滇西北高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

展鹏飞, 闫鹏飞, 刘振亚, 王行, 张贇, 张勇, 崔海军, 肖德荣\*

西南林业大学国家高原湿地研究中心/湿地学院, 昆明 650224

**摘要:**高原湿地是生态系统中重要的碳汇。土壤 CO<sub>2</sub> 通量作为高原湿地生态系统碳收支的重要组成部分, 碳的释放对区域碳平衡发挥着重要的作用。藏香猪放牧是我国高海拔藏区一种特有的放牧方式, 是导致高原湿地土壤退化的重要干扰因素之一, 并影响着土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化。采用土壤 CO<sub>2</sub> 通量自动测量系统 (LI-8100A, LI-COR, USA), 分别在不同季节对滇西北布伦、哈木谷、伊拉草原上藏香猪干扰和对照 (非干扰土壤) CO<sub>2</sub> 通量变化进行监测, 研究发现, 藏香猪干扰型放牧降低了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量, 且表现出明显的日波动变化特征。相比旱季, 雨季不同放牧方式影响下的土壤 CO<sub>2</sub> 通量差异性更为明显, 其中布伦、哈木谷、伊拉草原较对照分别降低了 70.4%、87.5%、60.7%。CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤理化性状及植物生物量的回归分析表明, 对照样地的土壤容重、孔隙度、pH、总活性碳、植物生物量与土壤 CO<sub>2</sub> 通量具有显著的相关性 ( $P < 0.01$ )。通过植物-土壤指数 (plant-soil index, PSI) 分析了藏香猪干扰型放牧对高原湿地的影响, 总体来看, 对照样地中土壤 CO<sub>2</sub> 通量与 PSI 之间具有较好的线性关系, 可以用来很好的预测未来高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化。该研究结果不仅有效估算了强干扰放牧影响下的高原湿地土壤碳排放量, 而且为加强藏香猪放牧的科学管理, 高原湿地生态系统的保护、恢复及重建提供了理论支持。

**关键词:**滇西北; 高原湿地; 藏香猪放牧; CO<sub>2</sub> 通量; 植物-土壤指数

## Effects of Tibetan pig herding on soil CO<sub>2</sub> fluxes in a plateau wetland of northwestern Yunnan, China

ZHAN Pengfei, YAN Pengfei, LIU Zhenya, WANG Hang, ZHANG Yun, ZHANG Yong, CUI Haijun, XIAO Derong\*

National Plateau Wetlands Research Center/College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

**Abstract:** Plateau wetlands are important carbon sinks in ecosystems. As an important part of the carbon budget of the plateau wetland ecosystem, soil CO<sub>2</sub> fluxes play an important role in the regional carbon balance. Tibetan pig herding is a unique grazing method in high-altitude Tibetan areas of China. It is an important disturbance factor that causes soil degradation in plateau wetlands and affects the change of soil CO<sub>2</sub> fluxes. A soil CO<sub>2</sub> fluxes automatic measurement system (LI-8100A, LI-COR, USA) was used to detect CO<sub>2</sub> fluxes from the disturbance of Tibetan pig herding and the control (without Tibetan pig herding) in the Bulun, Hamugu, and Yila grasslands in northwestern Yunnan during different seasons. We found that Tibetan pig herding reduced the CO<sub>2</sub> fluxes of the soil and there were clear daily fluctuations. Compared with the dry season, the effects of different grazing methods on CO<sub>2</sub> fluxes were more obvious during the rainy season, with values of 70.4%, 87.5%, and 60.7% for the Bulun, Hamugu, and Yila grasslands, respectively. The correlation of CO<sub>2</sub> fluxes with the physical and chemical properties of the soil and plant biomass indicated that there was a significant correlation between soil bulk density, porosity, pH, total labile carbon, plant biomass, and soil CO<sub>2</sub> fluxes during the control plots.

**基金项目:**国家自然科学基金项目 (31370497, 31500409); 云南省应用基础研究计划项目 (2015FD026); 云南省高原湿地科学省创新团队项目 (2012HC007)

收稿日期: 2018-06-05; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoderong1@163.com

The impact of grazing on the plateau wetland was analyzed by a plant-soil index (PSI). Overall, there was a good linear relationship between soil CO<sub>2</sub> fluxes and PSI in the control plots. This index could be used to predict future changes in soil CO<sub>2</sub> fluxes in plateau wetlands. The results of this study not only effectively estimate soil carbon emissions of a plateau wetland under the influence of a strong grazing disturbance, but also provide theoretical support for strengthening the scientific management of Tibetan pig herding and the protection, restoration, and reconstruction of plateau wetland ecosystems.

**Key Words:** northwestern Yunnan; plateau wetland; Tibetan pig herding; CO<sub>2</sub> fluxes; plant-soil index

青藏高原湿地碳“汇”功能巨大,其中,沼泽化草甸土壤的碳储量约占全国土壤碳储量的 23.44%,占全球土壤碳储量的 2.5%,在全球碳循环与碳平衡中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。过度放牧是导致高原生态系统结构与功能退化的主要驱动因子。据统计,自 20 世纪 80 年代以来,青藏高原就有 37% 的高寒草甸湿地因过度放牧而严重退化<sup>[2-3]</sup>,从而威胁了高原湿地生态系统的碳循环及碳汇功能<sup>[4]</sup>。土壤 CO<sub>2</sub> 通量作为生态系统碳循环重要体现,研究放牧作用下的土壤 CO<sub>2</sub> 通量,可为科学掌握放牧对高原湿地碳循环与碳汇功能的影响及其作用机制奠定基础,并已受到国内外的广泛关注<sup>[5]</sup>。

通常认为,放牧通过改变土壤的水热条件、以及植被组成特征,从而对土壤 CO<sub>2</sub> 通量造成影响<sup>[6-7]</sup>。放牧强度的增加,导致地上生物量逐渐减少,从而减缓了地上部分的碳进入土壤再循环的速率,影响了碳在整个生态系统中的分布格局<sup>[8]</sup>。研究表明,放牧活动促进了牲畜排泄物的归还,增加了生态系统中易于降解的有机碳源,导致土壤 CO<sub>2</sub> 通量与放牧强度呈显著的正相关关系<sup>[9-10]</sup>。也有研究表明,放牧降低了青藏高原东北部高寒草甸土壤的 CO<sub>2</sub> 通量,其中,在旱季、重度放牧区域较轻度放牧区,放牧活动减少了地下的生物量,进而导致微生物易分解的碳源也随之减少,土壤 CO<sub>2</sub> 通量降低了近 1 倍<sup>[11-12]</sup>。另外,还有研究发现,不同放牧强度下高寒草甸由于观测时间不足和实验区域的空间异质性问题,从而导致其 CO<sub>2</sub> 通量并无显著差异<sup>[13-14]</sup>。由此可见,目前放牧对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响及其作用机制的研究结果还存在较大争议。因此,开展放牧活动下高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的野外观测及研究具有重要的现实意义。

滇西北高原湿地位于我国青藏高原东南缘、属我国封闭与半封闭的独特湿地类型<sup>[15]</sup>。因地处高寒区域、常年冷湿环境使得湿地生态系统积累了大量的有机物质,成为滇西北自然生态系统最为重要的碳库之一,对区域碳循环以及大气温室气体的平衡有着重要的功能作用<sup>[16]</sup>。藏香猪是分布于青藏高原特有猪种,对寒冷与缺氧的自然环境具有较强的适应性<sup>[17]</sup>。自 2009 年以来随着市场对藏香猪需求增加,藏香猪的放牧数量和放牧区域不断扩大,其中,纳帕海湿地藏香猪的载畜量平衡在 115 头/km<sup>2</sup>,超出当地实际承载力(40 头/km<sup>2</sup>),放牧面积约占整个纳帕海面积的 5% 左右,已经超出了当地的生态阈值。与传统的牛羊放牧对湿地土壤践踏干扰不同,藏香猪放牧通过对土壤的翻拱作用,使土壤与植被受到严重破坏<sup>[18]</sup>。据初步统计,由于藏香猪放牧,该区域有近 1/4 的湿地面积受到不同程度的破坏,并有不断扩大的趋势。虽然,藏香猪放牧对滇西北高原湿地的影响现已逐渐受到关注,但是,针对藏香猪这一高原湿地强干扰放牧类型,开展藏香猪放牧对高原湿地生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 通量影响及作用规律的研究至今还鲜见报道。

本研究以滇西北高原典型湿地纳帕海作为研究对象,选择藏香猪放牧的 3 个典型区域(布伦、哈木谷、伊拉),并以未受藏香猪破坏的相邻区域为对照,开展土壤 CO<sub>2</sub> 通量研究。主要内容包括:土壤 CO<sub>2</sub> 通量的(1)日变化,(2)季节变化对藏香猪放牧的响应,以及(3)土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤理化指标、藏香猪放牧强度之间的关系。通过研究,拟掌握藏香猪放牧对高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响规律与作用机制,为加强放牧管理、增强高原湿地的保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

高原湿地纳帕海位于青藏高原东南缘、横断山脉中段的香格里拉市境内(27°49′—27°55′N,99°37′—99°

41'E),最低海拔 3260 m,面积 3100 hm<sup>2</sup>,是我国低纬度高海拔湿地的独特类型。该区域气候属高原寒温性湿润气候,受南北向排列的山地和大气环流的影响,全年盛行南风 and 南偏西风,年均温仅为 5.4 °C,旱雨季分明,6—10 月为雨季,11 月至次年 5 月份为旱季。由于旱雨季所带来湿地水位变化、以及海拔高程的差异,纳帕海在空间上分为水体、沼泽、沼泽化草甸、草甸等土地利用类型。其中,沼泽化草甸与草甸面积 2174.85 hm<sup>2</sup>,占整个湿地总面积的 70.1%,为该地区的主要放牧区域<sup>[19]</sup>。

纳帕海具有丰富的生物多样性,分布有黑颈鹤(*Grus nigricollis*)、黑鹳(*Ciconia nigra*)等国家 I 级保护鸟类,极具生物多样性和特有性保护价值。另外,该地还是许多植物物种的交汇区,植物多样性极其丰富,分布有杉叶藻(*Hippuris vulgaris*)、水葱(*Schoenoplectus tabernaemontani*)、茭草(*Zizania latifolia*)等一些水生植物。1984 年,经云南省政府批准建立纳帕海省级自然保护区,2005 年,被指定为国际重要湿地,成为国内外关注生物多样性保护的热点地区<sup>[20]</sup>。纳帕海湿地积累了大量有机物质,有些地区甚至堆积了极其深厚的泥炭层,成为湿地生态系统碳汇的基础,对该区域碳循环和大气温室气体的平衡起着重要的调节作用<sup>[21]</sup>。

## 1.2 样地设置

藏香猪放牧快速增长于 2009 年,但由于藏香猪对土壤的反复翻拱,现已无法准确判断其具体的干扰时长。因此,选择布伦、哈木谷和伊拉 3 处藏香猪放牧的典型的区域,其中,布伦草原属于沼泽化草甸,土壤类型为泥炭土,季节性淹水。哈木谷和伊拉草原属于陆生草甸,土壤类型为草甸土,常年无淹水。布伦区域的土壤母质为高度发育的泥炭层,哈木谷和伊拉区域的土壤母质为河流冲积物,草根层直接发育在潜育层上,潜育层常年积水,土体下部常呈浅绿色。采样点分别设置藏香猪干扰区(Disturb area)和对照区(Control area)。结合现场调查、高分卫星遥感影像数据判读以及草根层发育状况分析,确保所选取的对照样方在历史上没有被藏香猪干扰过,能够反映该区域的长期放牧效应。同时,在 3 个草原分别设置藏香猪干扰和对照的平行研究样带,不同放牧方式下植物生物量指标如表 1 所示。各研究样带上每隔 5 m 设置 1 个 1 m×1 m 的研究样方,每条样带共设置研究样方 6 个,3 个研究区域共计 36 个研究样方。各研究样带与研究样方四角用木桩标记并用 GPS 定位(图 1)。

表 1 不同放牧方式下植物生物量指标

Table 1 Biomass index of plants under different herding conditions

样地 Sample		旱季 Dry season		雨季 Rainy season	
		地上生物量 Above-ground biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	总生物量 Total biomass/ (g/m <sup>2</sup> )	地上生物量 Above-ground biomass/(g/m <sup>2</sup> )	总生物量 Total biomass/ (g/m <sup>2</sup> )
布伦 Bulun	对照 Control	23.56±23.23	149.06±45.39	113.78±37.21	1040.75±364.03
	干扰 Disturb	0.01±0.01	1.08±0.80	11.26±23.03	540.03±115.51
	P	<0.05	<0.01	<0.01	<0.05
哈木谷 Hamugu	对照 Control	35.13±15.55	428.89±42.55	310.95±45.83	2872.44±442.41
	干扰 Disturb	2.45±2.43	5.21±1.57	15.05±5.83	225.65±58.92
	P	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
伊拉 Yila	对照 Control	38.97±29.24	616.67±114.73	294.78±52.43	1566.26±317.95
	干扰 Disturb	1.43±1.76	5.67±1.43	16.88±22.24	218.73±45.39
	P	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01

## 1.3 野外监测与室内分析

### 1.3.1 土壤 CO<sub>2</sub> 通量测定

土壤 CO<sub>2</sub> 通量采用便携式土壤呼吸仪(LI-8100A,LI-COR,USA)现场测定 CO<sub>2</sub> 排放通量。分别在 2016 年雨季(7 月)和 2017 年旱季(1 月)选择有代表性的时间、天气状况对布伦、哈木谷和伊拉草原上藏香猪翻拱和对照样方土壤 CO<sub>2</sub> 通量进行测定。野外采样时,将测定系统的气室与基座密切相连,连接电池后,测定前对机器进行开机预热 20 min,设置网络,将测定系统与配套笔记本电脑(用于存储数据)连接,调整好参数。每次

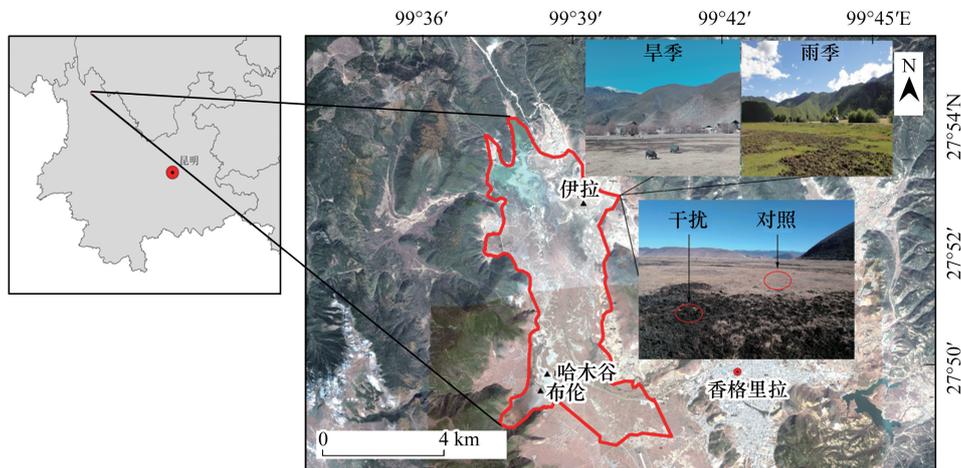


图1 纳帕海位置图和研究地点示意图

Fig.1 Location of Napahai and sampling sites

测量时,首先,将预先制好的 PVC 环垫 (ID=20 cm, H=12 cm) 打入每块样地内的待测点,打入土壤中的深度大约 1—2 cm,并砸实外圈土壤以防漏气,并在整个测定过程中保持 PVC 环静止不动。在避免破坏土壤表层结构的前提下将 PVC 环垫内的活体植物的地上部分剪掉并移出,以消除测定时植物自养呼吸对土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量产生的影响,并尽量避免对土壤表层结构的破坏。安排的测定时间为每天的 8:00—17:00,连续 3 天对 3 个采样点进行分别测定。每个样方设置测量时间长度为 10 min,测定结束后迅速移动至下一个样方,每条样带 6 个样方共计 1 h,然后对干扰和对照样带上的样方进行循环测定,且保证干扰和对照样带同时进行。

### 1.3.2 植物生物量与土壤理化性质测定

在布伦、哈木谷、伊拉草原样每个待测样点周围选择一个样方 (大小为 50 cm×50 cm),采用五点混合法在每块样方使用直径 5 cm 环刀,取样深度为 20 cm,每条样带 6 个重复。将环刀装好的土样置于标记好的自封袋中,带回实验室,风干、过筛后分离根系和土壤,在 65 °C 烘箱中烘干,称重,计算植物地上和地下生物量指标。参考《土壤农化分析》对土壤基本土壤理化指标进行测定 (见表 2)<sup>[22]</sup>。其中,土壤有机质采用重铬酸钾容量法;pH 值采用酸度计法;总活性碳库利用 KMnO<sub>4</sub> 氧化法。利用环刀法一次性连续测量土壤容重、总孔隙度、土壤含水率,根土比等基本理化指标。

### 1.4 藏香猪放牧强度的确定方法

放牧干扰通常直接作用于湿地植被、土壤等,而湿地植被、土壤本底特征可较好体现放牧的强度。因此,对采样区植物、土壤环境本底的相关参数进行同步监测与研究,通过植物-土壤指数 (plant-soil index, PSI) 进而分析藏香猪干扰型放牧对高原湿地的影响<sup>[23]</sup>,即:

$$PSI = \sqrt{P^2 + S^2} \quad (0 < PSI \leq \sqrt{2})$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \times W_{pi} \quad (0 < P \leq 1), \quad S = \sum_{j=1}^m S_j \times W_{sj} \quad (0 < S \leq 1)$$

式中, $P$  为植物群落状态, $S$  为土壤状态。其中,植物群落状态 ( $P$ ) 的评估指标包括植物地上生物量和地下生物量, $P_i$  为植物群落指标  $i$ , $W_{pi}$  为该指标的权重。土壤状态 ( $S$ ) 的评估指标包括土壤的物理指标 (容重,含水率,根土比,孔隙度) 和化学性质 ( $Ph$ , 有机质,总活性碳)。 $S_j$  为土壤指标  $j$ , $W_{sj}$  为该指标的权重。采用熵权法,按标准化计算熵值和确权,以确定植物群落状态 ( $P$ ) 和土壤状态 ( $S$ ) 各指标的权重<sup>[24]</sup>。PSI 值越大表明植物-土壤系统状态越好,其受藏香猪放牧的影响越小,PSI 越小表明植物-土壤系统受藏香猪放牧的影响越大,放牧强度较大。进而通过 PSI 确定藏香猪放牧对高原湿地的影响。

表 2 土壤基本理化指标

Table 2 Basic physico-chemical indicators of soils

样地 Sample		旱季 Dry season						有机质 Organic matter/ (g/kg)	总活性碳 Total labile carbon/ (mg/g)
		容重 Bulk/ (g/cm <sup>3</sup> )	pH	含水率 Moisture content	根土比 Root/soil	孔隙度 Porosity/%			
布伦 Bulun	对照 Control	0.84±0.22	7.06±0.61	0.68±0.06	0.14±0.03	51.51±5.31	447.43±85.74	14.64±3.85	
	干扰 Disturb	0.90±0.24	7.21±0.24	0.60±0.11	0.01±0.01	65.00±6.01	368.58±23.26	12.27±4.04	
	<i>P</i>	0.065	0.580	0.119	<0.01	<0.05	0.075	0.324	
哈木谷 Hamugu	对照 Control	1.06±1.04	6.19±0.44	0.25±0.02	0.07±0.02	36.72±8.80	80.33±23.56	4.83±0.80	
	干扰 Disturb	1.28±0.24	7.15±0.58	0.20±0.06	0.01±0.01	83.18±15.78	54.33±13.90	5.05±1.14	
	<i>P</i>	0.076	<0.05	0.146	<0.01	<0.01	<0.05	0.706	
伊拉 Yila	对照 Control	1.23±0.19	6.30±0.36	0.25±0.05	0.05±0.02	52.85±8.06	100.67±11.74	11.46±7.56	
	干扰 Disturb	1.39±0.25	7.34±0.44	0.17±0.03	0.01±0.01	98.55±12.94	66.87±17.07	9.92±6.01	
	<i>P</i>	0.024	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05	0.703	
样地 Sample		雨季 Rainy season						有机质 Organic matter/ (g/kg)	总活性碳 Total labile carbon/ (mg/g)
		容重 Bulk/ (g/cm <sup>3</sup> )	pH	含水率 Moisture content	根土比 Root/soil	孔隙度 Porosity/%			
布伦 Bulun	对照 Control	0.64±0.03	7.61±0.07	0.73±0.08	0.05±0.03	63.93±6.48	472.16±41.26	21.01±2.60	
	干扰 Disturb	0.64±0.12	7.57±0.04	0.74±0.01	0.05±0.04	92.52±10.23	376.6±41.13	19.52±1.99	
	<i>P</i>	0.923	0.238	0.156	0.861	<0.01	<0.01	0.292	
哈木谷 Hamugu	对照 Control	0.74±0.06	7.32±0.10	0.30±0.02	0.07±0.04	76.20±15.30	70.7±10.25	15.49±2.73	
	干扰 Disturb	0.98±0.14	7.87±0.11	0.26±0.03	0.01±0.01	100.52±19.42	47.78±18.24	9.45±1.57	
	<i>P</i>	<0.05	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	
伊拉 Yila	对照 Control	0.82±0.01	7.83±0.13	0.44±0.78	0.05±0.04	68.11±7.67	180.99±50.34	15.68±4.85	
	干扰 Disturb	0.89±0.15	8.01±0.03	0.29±0.02	0.01±0.01	98.91±11.55	85.79±25.23	11.29±1.42	
	<i>P</i>	0.339	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05	0.059	

## 1.5 统计分析

采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 分析了不同放牧方式下土壤物理、化学性质及生物量之间的差异性。利用多因素方差分析法 (Multiple-way ANOVA), 分析了季节、放牧方式、采样点对土壤 CO<sub>2</sub> 通量及植物-土壤指数的交互影响。最后, 分别利用每个采样点土壤理化指标、生物量指标、植物-土壤指数与土壤 CO<sub>2</sub> 通量的统计学差异, 构建与 CO<sub>2</sub> 通量的线性回归方程。上述分析均采用 SPSS 16.0 进行统计分析, 其中  $P < 0.05$  为显著,  $P < 0.01$  为极显著, 作图采用 Sigmaplot 10.0。

## 2 结果

### 2.1 土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化特征

从季节上整体来看(图 2), 雨季影响下的土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的平均值较旱季明显升高, 且藏香猪干扰型放牧严重削弱了土壤 CO<sub>2</sub> 的排放速率, 其中布伦、哈木谷、伊拉草原较对照分别降低了 70.4%、87.5%、60.7%。从采样点来看, 不同季节影响下的布伦草原对照下的土壤 CO<sub>2</sub> 通量均大于干扰样地, 其中旱季布伦草原藏香猪干扰较对照 CO<sub>2</sub> 排放通量降低了 30.2%, 而雨季降低了 70.4%。相比布伦草原, 藏香猪干扰影响下的哈木谷和伊拉草原在旱季时则出现了土壤 CO<sub>2</sub> 通量大于对照的现象, 其中哈木谷草原藏香猪干扰下的土壤 CO<sub>2</sub> 通量与对照相比差异十分显著 ( $P < 0.01$ )。

由图 3 可知, 不同季节影响下的布伦、哈木谷、伊拉草原藏香猪干扰与对照影响下的土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日变

化曲线存在差异,具有明显的日波动变化特征。旱季时,布伦草原无论是对照还是干扰样地,土壤  $\text{CO}_2$  通量的最高值均出现在 10:00—11:00 之间,其数值分别为  $1.05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  和  $0.94 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 相比布伦草原,哈木谷和伊拉对照影响下的土壤  $\text{CO}_2$  通量在一天之内呈不断上升的趋势,且在傍晚时分超过了对照样地且达到全天最大值。雨季时,各采样点里藏香猪干扰影响下的土壤  $\text{CO}_2$  通量均小于对照土壤,各采样点土壤  $\text{CO}_2$  通量的全天最高值均出现在午后,数值分别为  $3.06 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $7.49 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  和  $5.01 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。同时,无论是对照还是藏香猪干扰,其  $\text{CO}_2$  通量日变化波动曲线与旱季相比更为平稳。

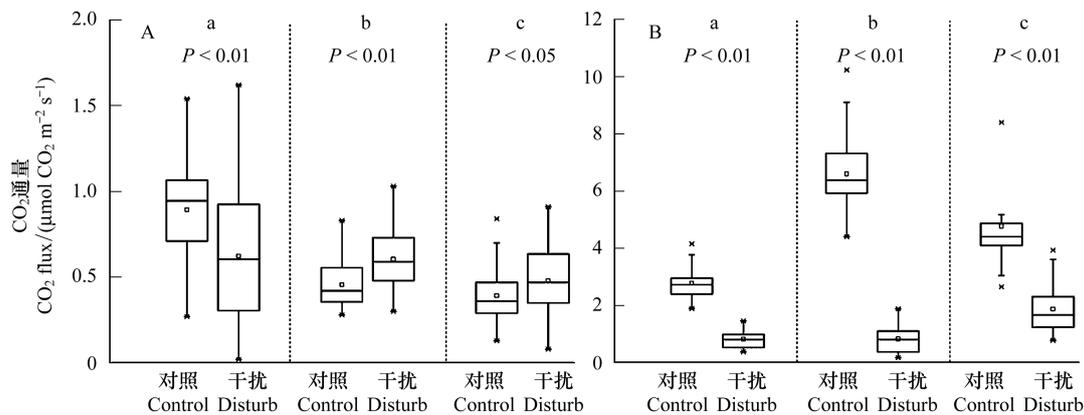


图 2 不同采样点土壤  $\text{CO}_2$  通量的变化特征

Fig.2 Characteristics of soil  $\text{CO}_2$  fluxes in different sampling site

A:旱季; B:雨季; a:布伦, b:哈木谷, c:伊拉

## 2.2 土壤 $\text{CO}_2$ 通量与土壤理化性状的相关性

由图 4 可知,对照样地下土壤容重与  $\text{CO}_2$  通量存在显著的负相关关系 ( $P < 0.01$ ),且土壤  $\text{CO}_2$  排放通量随着土壤容重的增加呈下降趋势。同时,无论是对照还是藏香猪干扰,不同采样点里的土壤含水率、根土比与  $\text{CO}_2$  通量之间均不存在相关性关系 ( $P > 0.05$ )。然而,通过对比分析藏香猪干扰和对照下的土壤孔隙度与  $\text{CO}_2$  通量的关系表明,对照和藏香猪干扰下的土壤  $\text{CO}_2$  通量与孔隙度都拥有显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ ),且土壤  $\text{CO}_2$  通量随着土壤孔隙度的增加呈线性增长模式,其中  $R^2$  值平方分别为 0.3642 和 0.147。

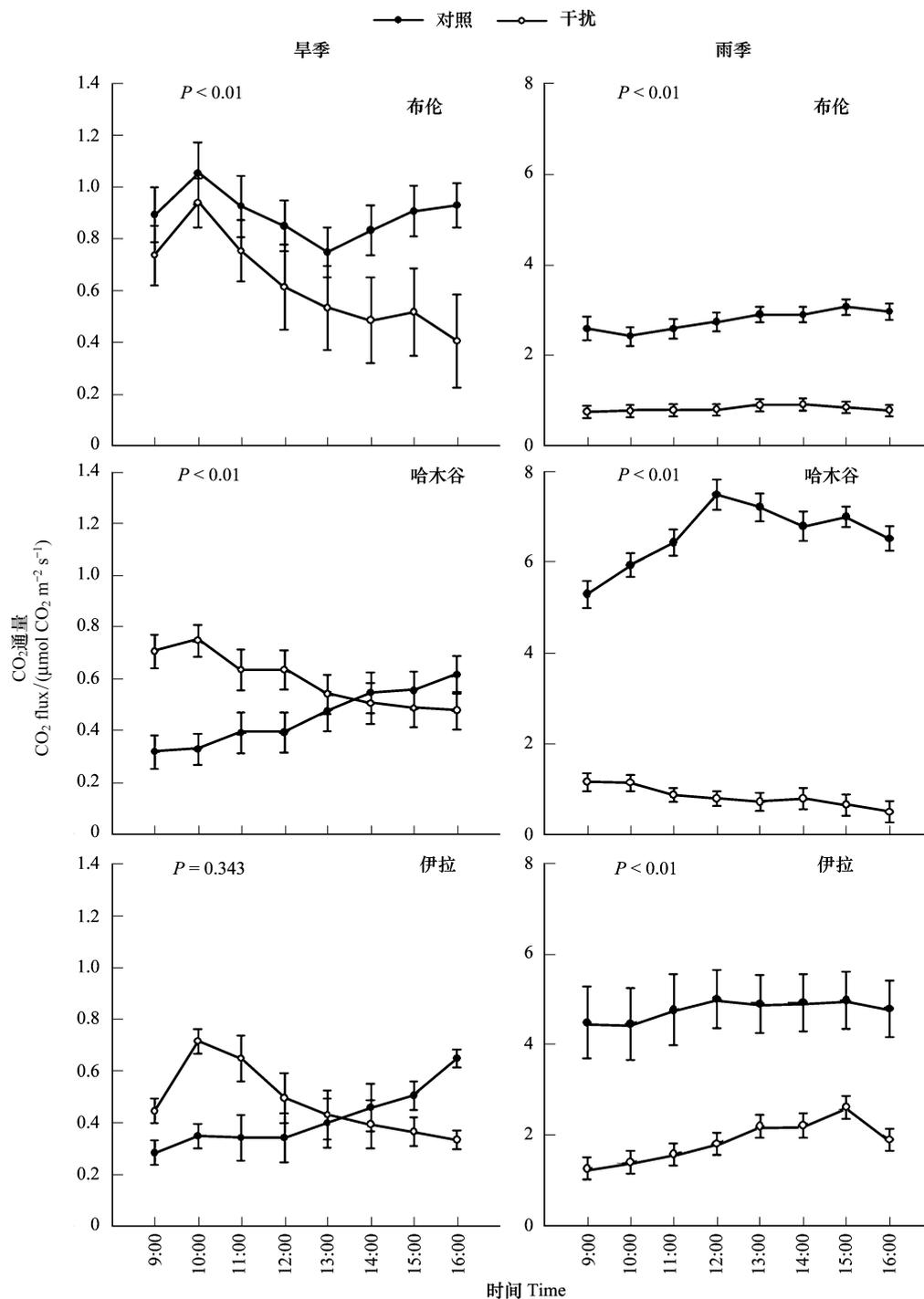
通过对土壤化学指标与  $\text{CO}_2$  通量进行线性拟合分析(图 5),研究发现,无论是对照还是藏香猪干扰下的土壤 pH 都与  $\text{CO}_2$  通量呈明显的正相关性 ( $P < 0.05$ )。而土壤有机质在藏香猪干扰和对照影响下均与  $\text{CO}_2$  通量无任何相关性关系 ( $P > 0.05$ )。同时,通过对比分析藏香猪与对照下的土壤  $\text{CO}_2$  通量与总活性碳的关系,结果表明,对照较藏香猪干扰放牧土壤  $\text{CO}_2$  通量与总活性碳拥有更加显著的相关性。

## 2.3 土壤 $\text{CO}_2$ 通量与植物生物量的相关性

通过对采样点植物生物量与土壤  $\text{CO}_2$  通量数值进行拟合分析,如图 6 可知,采样点中对照样地下的植物生物量与  $\text{CO}_2$  通量呈显著的正相关关系,土壤  $\text{CO}_2$  排放通量随着植物生物量的增加呈现出显著的增加趋势 ( $P < 0.01$ )。另外,我们也发现藏香猪干扰影响下的生物量与  $\text{CO}_2$  通量的变化无相关性 ( $P > 0.05$ )。由此表明,生物量是影响土壤  $\text{CO}_2$  排放通量的关键要素,藏香猪干扰型放牧,破坏了湿地植被,进而引起土壤  $\text{CO}_2$  排放通量发生了无规律的波动变化。

## 2.4 土壤 $\text{CO}_2$ 通量与 PSI 的关系

采用线性回归方程对不同样带下高原湿地土壤  $\text{CO}_2$  通量日平均值与植物-土壤指数进行拟合分析,得到了对照及藏香猪干扰下的高原湿地土壤  $\text{CO}_2$  通量与植物-土壤指数之间的关系(图 7)。如图所示,对照样地中土壤  $\text{CO}_2$  通量与 PSI 达到了极显著相关的关系 ( $P < 0.001$ ),  $R^2$  为 0.6606。由此说明该线性模型能很好的模拟土壤  $\text{CO}_2$  通量与植物-土壤指数之间的关系。总体来看,PSI 对非干扰条件下  $\text{CO}_2$  排放通量预测效果更好,

图3 不同采样点土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日动态变化特征Fig.3 The daily dynamic characteristics of CO<sub>2</sub> fluxes at different sampling site

而放牧增加了 CO<sub>2</sub> 排放通量的不确定性, 减弱了 PSI 的预测能力。

通过植物-土壤指数与 CO<sub>2</sub> 通量日平均值的多因素方差分析(表 3)表明, 不同季节, 放牧方式, 采样点对土壤 CO<sub>2</sub> 通量均产生了显著影响 ( $P < 0.01$ ), 其中, 不同季节与放牧方式对植物与土壤状态的影响十分显著 ( $P < 0.01$ ), 而采样地点的不同对植物-土壤指数无显著影响 ( $P > 0.05$ )。季节、采样点与放牧方式之间存在明显的交互作用, 其中, 植物-土壤指数受到不同放牧方式的影响, 其影响程度与季节和采样地点均相关 ( $P < 0.05$ ), 而土壤 CO<sub>2</sub> 通量只有在不同季节与不同放牧方式的交互影响下才更为显著 ( $P < 0.01$ )。

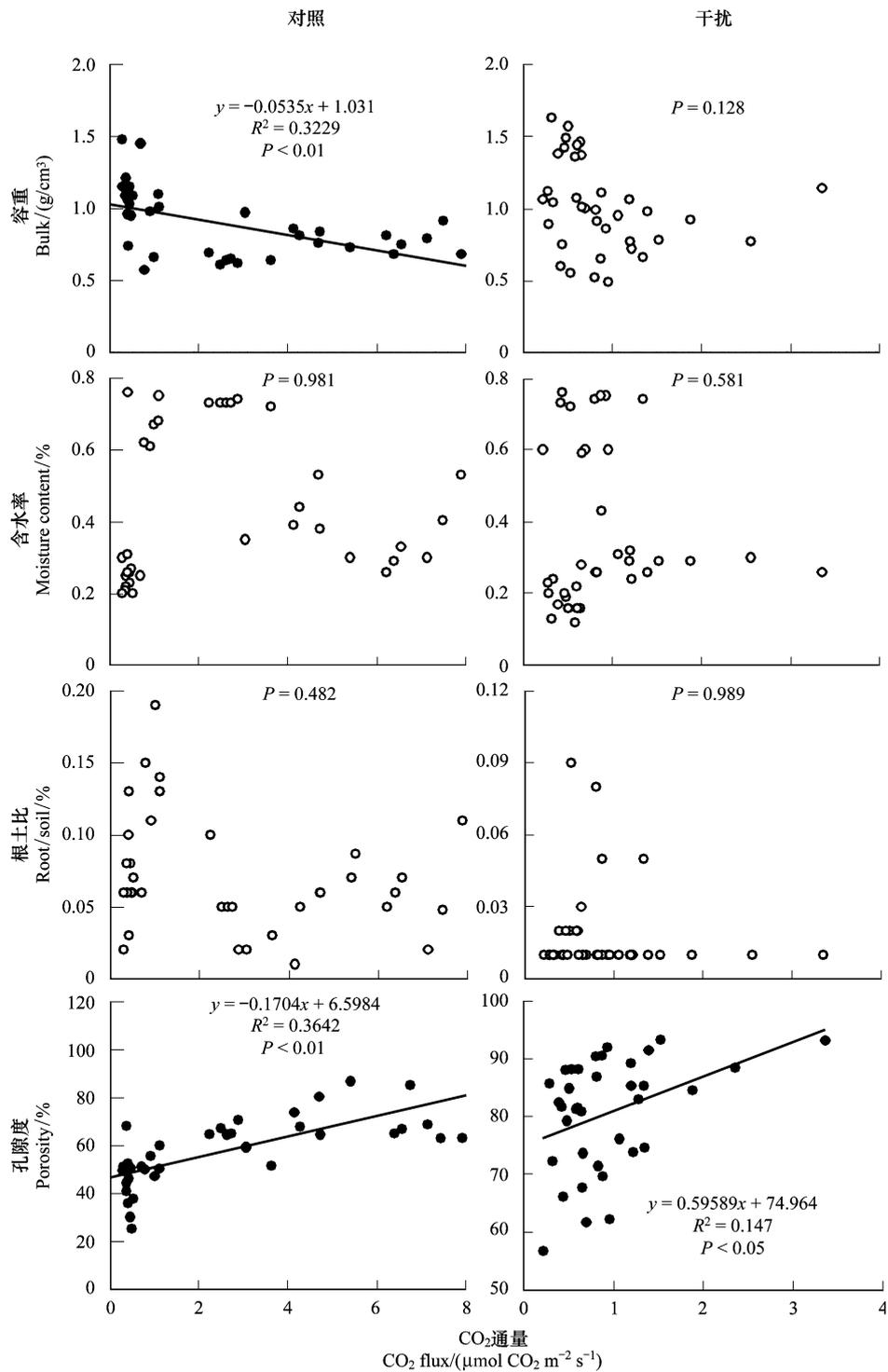


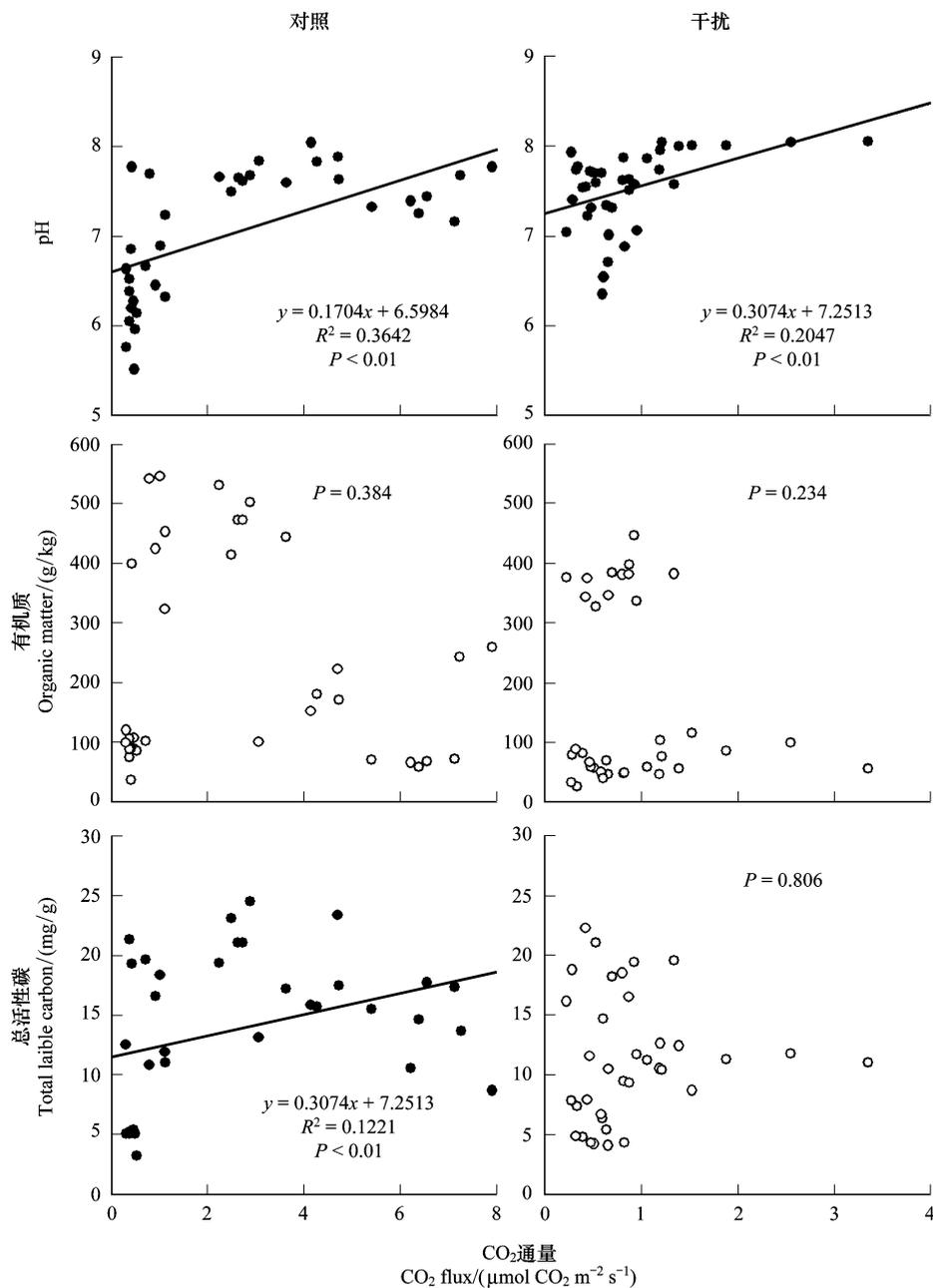
图4 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤物理性状的线性回归关系

Fig.4 Linear regression relationship between soil CO<sub>2</sub> fluxes and soil physical properties

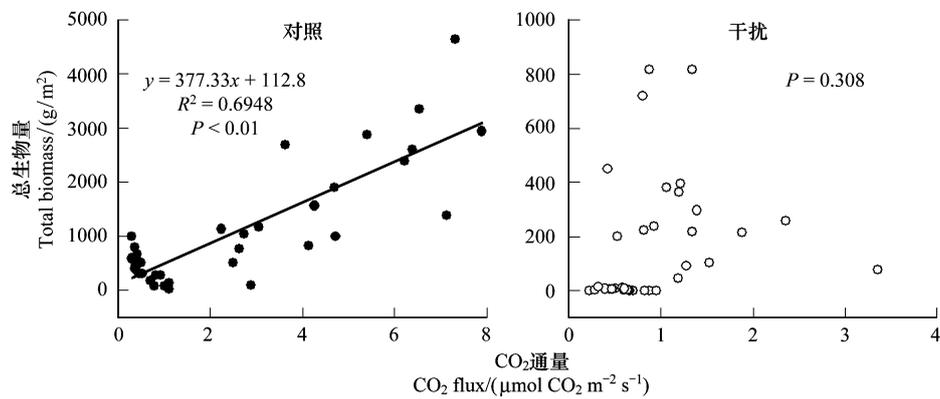
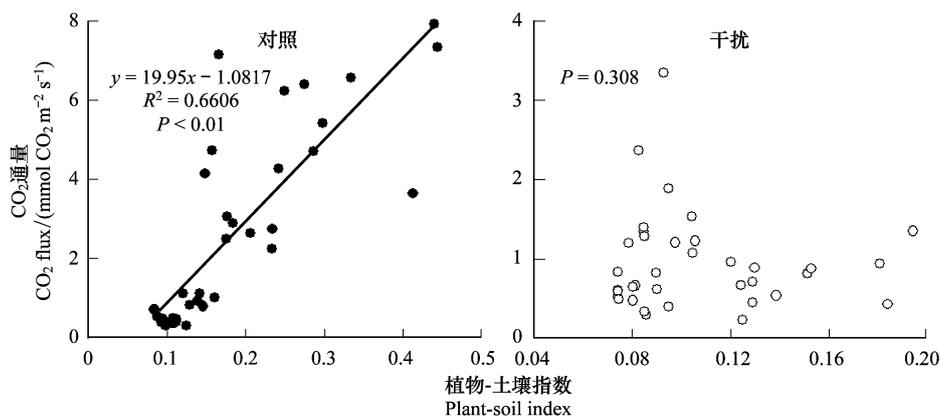
### 3 讨论

#### 3.1 放牧干扰对高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量是一个受众多因素影响的生物学和非生物学的过程<sup>[25]</sup>。放牧作为草地最主要的利用

图5 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤化学性状的线性回归关系Fig.5 Linear regression relationship between soil CO<sub>2</sub> fluxes and soil chemical properties

形式,同时也是影响高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的主要人为干扰因素<sup>[26]</sup>。放牧过程通过牲畜采食植物、践踏土壤以及排泄物归还等多种途径直接或是间接影响了草地 CO<sub>2</sub> 的排放通量<sup>[27]</sup>。研究发现,放牧往往会促使生物因子和非生物因子发生改变,导致高原湿地不断退化,土壤肥力、微生物数量与种类降低,土壤生化活性减少,从而影响了土壤 CO<sub>2</sub> 的排放通量<sup>[28]</sup>。适度放牧使草地生物量、根系和凋落物数量、土壤动物和微生物的多样性提高,从而促进土壤 CO<sub>2</sub> 通量的排放<sup>[29]</sup>。过度放牧则导致草地退化、盖度降低、草地地上和地下生物量下降,草地碳汇功能减弱,微生物易分解的碳源及微生物自身的数量也随之减少,从而降低土壤 CO<sub>2</sub> 通量<sup>[30]</sup>。藏香猪翻拱型放牧作为强干扰放牧的典型代表,研究发现,雨季藏香猪干扰下的 CO<sub>2</sub> 通量要明显低于对照土壤,分析原因,首先,雨季气温高降水多,植被生长茂盛,而在藏香猪干扰放牧条件下,地表植被和地下根部被

图 6 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与植物生物量的线性回归关系Fig.6 Linear regression relationship between soil CO<sub>2</sub> fluxes and plant biomass图 7 植物-土壤指数与 CO<sub>2</sub> 通量的线性回归关系Fig.7 Linear regression relationship between plant-soil index and CO<sub>2</sub> fluxes

大量啃食,导致了地表植物生物量急剧减少,CO<sub>2</sub>通量明显降低。藏香猪干扰型放牧改变了植物冠层结构以及植物根系分泌物的量,降低了植物的自养呼吸,从而缓解地上部分中的碳进入土壤再循环的速率,影响了碳在整个生态系统中的分布格局<sup>[31-32]</sup>。除此之外,土壤微生物与 CO<sub>2</sub> 排放速率也具有十分密切的关系。受强放牧干扰的影响,土壤微生物的数量、结构、组成、功能都会发生显著的变化,微生物多样性显著降低<sup>[33]</sup>。外界干扰改变了土壤理化性质进而影响了土壤微生物群落结构,随着放牧强度增加,微生物数量增加,土壤呼吸作用减弱<sup>[34]</sup>。由此表明,藏香猪干扰放牧破坏了土壤原有的结构,改变了微生物的分布与组成,进而抑制了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量。

表 3 植物-土壤指数与 CO<sub>2</sub> 通量的多因素方差分析表Table 3 Multiple-way ANOVA table for the plant-soil index and CO<sub>2</sub> fluxes

		季节 Season	采样点 Sample	处理 Treatment	季节×处理 Season×Treatment	采样点×处理 Sample×Treatment
植物-土壤指数 Plant-soil index	<i>F</i>	67.910	1.974	53.230	30.462	9.089
	<i>P</i>	<0.01	0.148	<0.01	<0.01	<0.01
CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> fluxes	<i>F</i>	398.910	34.170	52.059	44.155	1.2892
	<i>P</i>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.160

还有研究表明,在众多土壤理化因子中,容重对土壤 CO<sub>2</sub> 的排放通量影响最大,这是因为土壤是一个多孔的系统,根系和土壤微生物呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 首先聚集在这些空隙中,然后遵循物理学扩散原理逐渐释放到大气<sup>[35]</sup>。我们研究发现,对照中土壤容重、孔隙度、pH、总活性碳与土壤 CO<sub>2</sub> 通量均呈现出显著的相关性关系,而藏香猪干扰影响下的土壤除了与 pH 和孔隙度表现出较为明显的正相关性外,与其他土壤物理化学性质均无相关性。分析原因,藏香猪强干扰型放牧较对照更容易造成土壤紧实度的增加,进而导致土壤孔隙度与水稳性团聚体减少,引起透水性、透气性下降,阻碍了气体的顺畅排放。尽管如此,我们还是发现无论是藏香猪干扰还是对照,土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤 pH 均呈现出较好的相关性,这很可能与长期放牧影响下土壤环境下微生物活性有关<sup>[36]</sup>。另外猪拱强干扰放牧破坏了土壤原有的结构,导致土壤有机质降低,植被覆盖减少,使土壤物理与化学性质呈现出无规律的变化特征。

然而,还有研究者通过对若尔盖高原泥炭地和内蒙古天然草原 CO<sub>2</sub> 通量的动态监测发现,放牧干扰对若尔盖高原泥炭地和内蒙古天然草原 CO<sub>2</sub> 通量并没有显著影响<sup>[37-38]</sup>。这与我们研究发现的旱季高原湿地不同采样点 CO<sub>2</sub> 通量的差异性不显著的结果基本一致。同时,我们还发现旱季,在区域日动态变化上藏香猪干扰影响下出现了土壤 CO<sub>2</sub> 通量大于对照的现象。探究其原因,一方面,哈木谷和伊拉草原原本属于陆生草甸,采样地多为草甸土,旱季时,本身失去了地表植被保护的高原湿地土壤,受藏香猪干扰破坏的程度明显加深,另外,藏香猪放牧导致土壤剧烈翻滚,促使表层营养物质持续更新,提高了土壤营养物质的循环速率,增强了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量<sup>[39]</sup>。另一方面,藏香猪翻拱取食行为,将导致植被盖度降低,促使土壤表层容易接受到更多的阳光,藏香猪不断地取食与践踏使得地表土壤温度迅速提升,而这些均有利于表层土壤有机质的分解,使生物活性得以改善,提高了 CO<sub>2</sub> 的排放通量<sup>[40]</sup>。此外,我们还发现,旱季对照下的布伦草原 CO<sub>2</sub> 通量的日平均值显著大于干扰土壤,由此可以预测出冬日里的泥炭地可能是主要的土壤 CO<sub>2</sub> 释放源。虽然如此,但是关于旱季藏香猪干扰放牧较对照增强了土壤 CO<sub>2</sub> 通量的主要原因,还有待我们后期进一步探索。

### 3.2 植物-土壤指数对高原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

高原湿地生态系统的地上、地下部分是相互联系的。地表植被种类以及生长状况的不同,会相应的改变所在地下土壤微环境,从而影响了土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化<sup>[41]</sup>。植物与土壤作为高原湿地生态系统中的重要组成部分,它们之间的相互作用是高原湿地生态系统地上、地下结合的重要纽带<sup>[42]</sup>。雨季时,植物生物量的多寡较好的指示了土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化,较多的地上生物量增加了土壤有机碳来源,提升了土壤微生物可分解底物的浓度,同时地下生物量根系呼吸作用强,从而增加土壤 CO<sub>2</sub> 速率<sup>[43-44]</sup>。旱季时,土壤失去了植物覆盖,影响 CO<sub>2</sub> 通量的主要因素将由地上植物转变为枯落物及土壤本身,在同样受到藏香猪干扰影响的高原湿地上,枯落物及土壤本身较地表植物对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响相对较小。因此,这也就很好地解释了在季节尺度上,同样受到藏香猪干扰放牧的影响下旱季的土壤 CO<sub>2</sub> 通量比雨季更低的原因。

部分学者根据生态学中经典的“中度干扰理论”,结合“植物-动物间互作的补偿性”观点,提出放牧优化假设,认为植被生物量与放牧强度之间的关系是非线性的,即随着放牧强度的增加,草地的生物量先增加,后下降的趋势特征<sup>[45]</sup>。为此,我们结合实际情况对采样区植物、土壤环境本底的相关参数进行同步监测与研究,通过构建植物-土壤指数,用于指示放牧活动对土壤状态的影响。在整个研究阶段,藏香猪干扰放牧破坏了土壤原有的结构,形成大量次生裸地,对高原湿地牧草生产力造成了极大破坏,植物-土壤指数明显低于对照土壤,且相应的土壤 CO<sub>2</sub> 通量也较低。总体来看,PSI 在对照样地里对土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量预测效果更好,而藏香猪放牧增加了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的不确定性,减弱了 PSI 的预测能力。

### 3.3 藏香猪放牧影响下的高原湿地碳循环机制

陆地生态系统碳循环以大气-陆生植物-土壤-大气的形式循环,在全球碳循环中起着特别重要的作用<sup>[46]</sup>。而高原湿地生态系统碳循环的主要过程是在土壤中,在这种意义上,高原湿地生态系统近似于土壤-大气系统<sup>[47]</sup>,高原湿地的地上生物量中的碳贮量和土壤中贮存的碳含量相比是较少的,而且碳素由植被部分进入土壤的循环途径相对单一,通常在植物雨季结束后即可完成。在这种近似土壤-大气系统碳循环的过程中,土壤

有机质(含凋落物)的分解速度以及植物向土壤的输入速度是支配整个系统碳循环功能最关键的变量。藏香猪干扰型放牧破坏了土壤结构,导致地表植被单一,土壤有机碳含量降低,进而影响了 CO<sub>2</sub> 的排放通量,破坏了高原湿地碳循环的正常进程。自然状态下,高原湿地生态系统的碳收支基本保持平衡,而高原湿地退化将会造成植被生产力的降低,植物凋落物减少,从而导致土壤碳库入不敷出,高原湿地生态系统碳由“汇”向“源”转变<sup>[48]</sup>。高原湿地作为生态系统中重要的碳源,我们研究发现,藏香猪干扰影响下的 CO<sub>2</sub> 的排放通量与对照相比明显降低。由此表明,散养型藏香猪在寻觅食物的过程中对土壤进行剧烈翻拱,一方面破坏地表植物造成亚表层土壤裸露,另一方面破坏地下草根层造成土壤结构发生改变。土壤有机质矿化、养分流失,从而使湿地生态系统功能退化,严重影响生态系统的碳“汇”与“源”的功能。

#### 4 结论

藏香猪干扰型放牧削弱了高原湿地土壤的 CO<sub>2</sub> 的排放通量,具有明显的日波动和季节变化特征。同时,藏香猪放牧对高原湿地土壤和植被拥有较强干扰与破坏能力,进而导致土壤理化性状、植物生物量与 CO<sub>2</sub> 通量基本呈现出无规则的变化。通过植物-土壤指数与土壤 CO<sub>2</sub> 通量进一步拟合分析可知,藏香猪干扰下的植物-土壤指数显著低于对照土壤,且相对应的土壤 CO<sub>2</sub> 通量也较低,构建植物-土壤指数可以有效的估算纳帕海高原湿地与大气之间的碳交换量。总之,我们需要加强对藏香猪放牧的科学管理及其生态阈值研究,并对其破坏力进行客观评价,分析藏香猪放牧的环境容量,并找出能够维持土壤生产力较为合理的藏香猪放牧强度,进而为滇西北高原生态环境的保护、恢复及重建提供理论支持。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Wang G X, Qian J, Cheng G D, Lai Y M. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication. *Science of the Total Environment*, 2002, 291(1/3): 207-217.
- [ 2 ] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 赵学勇, 秦彧. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1298-1305.
- [ 3 ] 王合云, 郭建英, 董智, 李红丽, 李锦荣, 陈新闻. 不同放牧退化程度的大针茅典型草原有机碳储量特征. *中国草地学报*, 2016, 38(2): 65-71.
- [ 4 ] Liu Y S, Fan J W, Harris W, Shao Q Q, Zhou Y C, Wang N, Li Y Z. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on net ecosystem carbon exchange of grassland in the Three Rivers Headwaters region, Qinghai-Tibet, China. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 491-504.
- [ 5 ] 邹婧汝, 赵新全. 围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响. *草业科学*, 2015, 32(11): 1748-1756.
- [ 6 ] 阳小成, 阿舍小虎, 苗原, 刘银占. 川西北高寒草甸不同放牧模式对土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2016, 36(17): 5371-5378.
- [ 7 ] Ford H, Garbutt A, Jones L, Jones D L. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from a temperate salt marsh: grazing management does not alter Global Warming Potential. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 113: 182-191.
- [ 8 ] 赵亮, 徐世晓, 李英年, 唐艳鸿, 赵新全, 古松, 杜明远, 于贵瑞. 青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO<sub>2</sub> 通量变化与环境因子的关系. *西北植物学报*, 2006, 26(1): 133-142.
- [ 9 ] 王跃思, 纪宝明, 黄耀, 胡玉琼, 王艳芬. 农垦与放牧对内蒙古草原 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 排放和 CH<sub>4</sub> 吸收的影响. *环境科学*, 2001, 22(6): 7-13.
- [ 10 ] Wang J, Sha L Q, Li J Z, Feng Z L. CO<sub>2</sub> efflux under different grazing managements on subalpine meadows of Shangri-La, Northwest Yunnan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3574-3583.
- [ 11 ] 尤业明, 王娟, 黄雪蔓, 孙筱璐, 唐佐芯. 暖温带森林土壤微生物量、群落结构和活性对植物地下碳源的响应. *广西植物*, 2016, 36(7): 837-847.
- [ 12 ] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, Wang Y S, Li Y N, Zhao X Q. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2): 237-243.
- [ 13 ] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, Wang Y H, Weng E S. Effects of grazing on soil respiration of *Leymus chinensis* steppe. *Climatic Change*, 2007, 82(1/2): 211-223.
- [ 14 ] 朱二雄. 不同放牧强度对高寒草甸 CO<sub>2</sub> 排放通量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [ 15 ] 肖德荣, 田昆, 张利权. 滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系. *生态学报*, 2008, 28(7): 3116-3124.
- [ 16 ] 李宁云, 袁华, 田昆, 彭涛. 滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响. *生态学报*, 2011, 31(24): 7388-7396.
- [ 17 ] Cuevas M F, Mastrantonio L, Ojeda R A, Jaksic F M. Effects of wild boar disturbance on vegetation and soil properties in the Monte Desert, Argentina. *Mammalian Biology-Zeitschrift für Säugetierkunde*, 2012, 77(4): 299-306.
- [ 18 ] Wang H, Zhang Y, Chen G L, Hettenhausen C, Liu Z Y, Tian K, Xiao D R. Domestic pig uprooting emerges as an undesirable disturbance on

- vegetation and soil properties in a plateau wetland ecosystem. *Wetlands Ecology and Management*, 2018, 26(4): 509-523.
- [19] 肖德荣, 田昆, 袁华, 李宁云, 徐守国. 滇西北高原典型退化湿地纳帕海植物群落景观多样性. *生态学杂志*, 2007, 26(8): 1171-1176.
- [20] 张晓宁, 刘振亚, 李丽萍, 王行, 张赞, 孙梅, 肖德荣. 大气增温对滇西北高原典型湿地湖滨带优势植物凋落物质量衰减的影响. *生态学报*, 2017, 37(23): 7811-7820.
- [21] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 常天军, 李鹏, 沈振西, 钟志明. 高寒草原生态系统表层土壤活性有机碳分布特征及其影响因素——以贡嘎南山-拉纳岗日山为例. *生态学报*, 2009, 29(7): 3501-3508.
- [22] 鲍士旦. *土壤农化分析* (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Li Y Y, Dong S K, Wen L, Wang X X, Wu Y. Assessing the soil quality of alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau using a modified soil quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(10): 8011-8022.
- [24] 李政毅. 指标权重确定方法之熵权法. (2013-10-12). [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_710e9b550101aqnv.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_710e9b550101aqnv.html).
- [25] 张国明, 郭李萍, 史培军, 林而达, 王静爱, 缪驰远. 农田土壤生态系统冬小麦夏玉米轮作 CO<sub>2</sub> 排放特征研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(4): 457-460.
- [26] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 谈嫣蓉, 孙大帅, 杜国祯. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究. *草地学报*, 2010, 18(4): 510-516.
- [27] 崔树娟, 朱小雪, 汪诗平, 王常顺, 孟凡栋, 王奇. 增温和放牧对草地土壤和生态系统呼吸的影响. *广西植物*, 2015, 35(1): 126-132.
- [28] 阿木日吉日嘎拉, 红梅, 韩国栋, 高福光, 赵巴音那木拉, 刘超川. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. *土壤通报*, 2013, 44(2): 321-327.
- [29] 徐海红, 侯向阳, 那日苏. 不同放牧制度下短花针茅荒漠草原土壤呼吸动态研究. *草业学报*, 2011, 20(2): 219-226.
- [30] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(27): 10316-10321.
- [31] 杨阳, 韩国栋, 李元恒, 陈志芳, 王成杰. 内蒙古不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应. *草业学报*, 2012, 21(6): 8-14.
- [32] 余磊朝, 郭雪莲, 王山峰, 刘双圆, 王雪. 牦牛放牧对青藏高原东南缘泥炭沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 排放的影响. *草业科学*, 2016, 33(12): 2418-2424.
- [33] 谭红妍, 闫瑞瑞, 闫玉春, 陈宝瑞, 辛晓平. 不同放牧强度下温性草甸草原土壤微生物群落结构 PLFAs 分析. *草业学报*, 2015, 24(3): 115-121.
- [34] 陈海军, 王明玖, 韩国栋, 吴志毅. 不同强度放牧对贝加尔针茅草原土壤微生物和土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(4): 165-169.
- [35] 徐洪灵, 张宏, 张伟. 川西北高寒草甸土壤理化性质对土壤呼吸速率影响研究. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 35(6): 835-841.
- [36] Conant R T, Paustian K, Elliott E T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 343-355.
- [37] 宗宁, 石培礼, 蒋婧, 熊定鹏, 孟丰收, 宋明华, 张宪洲, 沈振西. 短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 6191-6201.
- [38] 周文昌, 索郎夺尔基, 崔丽娟, 王义飞, 李伟. 围栏禁牧与放牧对若尔盖高原泥炭地 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响. *生态环境学报*, 2015, 24(2): 183-189.
- [39] 苟燕妮, 南志标. 放牧对草地土壤微生物的影响. *草业学报*, 2015, 24(10): 194-205.
- [40] LeCain D R, Morgan J A, Schuman G E, Reeder J D, Hart R H. Carbon exchange rates in grazed and ungrazed pastures of Wyoming. *Journal of Range Management*, 2000, 53(2): 199-206.
- [41] Hone J. Feral pigs in namadgi national park, Australia: dynamics, impacts and management. *Biological Conservation*, 2002, 105(2): 231-242.
- [42] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 979-988.
- [43] 温军, 周华坤, 姚步青, 李以康, 赵新全, 陈哲, 连利叶, 郭凯先. 三江源区不同退化程度高寒草原土壤呼吸特征. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 209-218.
- [44] 李文, 曹文侠, 刘皓栋, 李小龙, 徐长林, 师尚礼, 冯今, 周传猛. 不同放牧管理模式对高寒草甸草原土壤呼吸特征的影响. *草业学报*, 2015, 24(10): 22-32.
- [45] 陶冶, 张元明. 3 种荒漠植物群落物种组成与丰富度的季节变化及地上生物量特征. *草业学报*, 2011, 20(6): 1-11.
- [46] 曹宏杰, 倪红伟. 大气 CO<sub>2</sub> 升高对土壤碳循环影响的研究进展. *生态环境学报*, 2013, 22(11): 1846-1852.
- [47] 耿元波, 董公社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述. *地理科学进展*, 2004, 23(3): 74-81.
- [48] 阙雨晨, 黄欣颖, 王宇通, 蒲小朋, 邵新庆. 干扰对草地碳循环影响的研究与展望. *草业科学*, 2012, 29(12): 1855-1861.