

DOI: 10.5846/stxb202109062518

刘爽, 范峰华, 张昆, 郑荣波, 郭雪莲. 围栏禁牧对滇西北高寒湿地土壤活性有机碳的影响. 生态学报, 2023, 43(4): 1506-1514.

Liu S, Fan F H, Zhang K, Zheng R B, Guo X L. Effect of fenced grazing on soil active organic carbon in Napahai Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1506-1514.

围栏禁牧对滇西北高寒湿地土壤活性有机碳的影响

刘 爽^{1,2,3}, 范峰华^{1,2,3}, 张 昆^{1,2,3}, 郑荣波³, 郭雪莲^{1,2,3,*}

1 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 昆明 650224

2 国家高原湿地研究中心, 昆明 650224

3 西南林业大学, 昆明 650224

摘要: 过度放牧导致滇西北高寒湿地碳汇功能逐渐丧失, 围栏禁牧作为一种有效的湿地恢复方式, 其对滇西北高寒湿地土壤碳库的影响尚缺乏研究。为探明围栏禁牧对滇西北高寒湿地土壤活性有机碳的影响, 以纳帕海湿地不同禁牧年限(未禁牧、禁牧 3 年、禁牧 8 年、禁牧 10 年)的草甸和沼泽化草甸作为研究对象, 对比分析不同禁牧年限草甸和沼泽化草甸土壤总有机碳(TOC)、颗粒有机碳(POC)、溶解性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)和微生物生物量碳(MBC)含量特征。研究结果表明, 随着禁牧年限的增加(<10 a), 草甸和沼泽化草甸土壤 TOC、DOC、EOC、MBC 含量显著增加($P < 0.05$); 随着土壤深度的增加, 草甸和沼泽化草甸土壤 TOC、EOC 和 MBC 含量逐渐下降, 而 POC 和 DOC 含量逐渐增加。土壤理化性质显著影响土壤活性有机碳各组分含量, 其中总氮(TN)是影响草甸和沼泽化草甸土壤活性有机碳各组分含量的主导因素。围栏禁牧有利于滇西北高寒湿地土壤质量和固碳能力的恢复, 且随着禁牧年限的增加, 恢复效果越明显。相同恢复年限, 纳帕海沼泽化草甸土壤恢复效果比草甸土壤显著。研究可以为放牧湿地恢复研究提供理论基础。

关键词: 湿地恢复; 禁牧年限; 活性有机碳

Effect of fenced grazing on soil active organic carbon in Napahai Wetland

LIU Shuang^{1,2,3}, FAN Fenghua^{1,2,3}, ZHANG Kun^{1,2,3}, ZHENG Rongbo³, GUO Xuelian^{1,2,3,*}

1 Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Kunming 650224, China

2 National Plateau Wetlands Research Center, Kunming 650224, China

3 Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: Overgrazing has led to the gradual loss of the carbon sink function of the alpine wetland in Northwest Yunnan. As an effective wetland restoration method, the fenced grazing prohibition has not been studied on its impact on the soil carbon pool in the alpine wetland in Northwest Yunnan. In order to explore the impact of the fenced grazing prohibition on soil active organic carbon in the alpine wetland in Northwest Yunnan, the different grazing prohibition periods (no grazing, grazing prohibition for 3 years, grazing prohibition for 8 years, and grazing prohibition for 10 years) meadows and swampy meadows were used in the Napahai Wetland. Meadows and swamps are used as the research objects to compare and analyze the content characteristics of the total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC), dissolved organic carbon (DOC), easily oxidizable carbon (EOC), and total organic carbon (TOC), and microbial biomass carbon (MBC). The results of the study showed that with the increase of the grazing prohibition period (<10 a), the soil TOC, DOC, EOC, and MBC contents of meadows and swampy meadows increased significantly ($P < 0.05$); with the increase of soil depth, the contents of TOC, EOC and MBC in meadows and swampy meadows soil gradually decreased, while the contents of POC and

基金项目: 国家自然科学基金项目(41563008); 云南省重点基金项目((202001AS070041); 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室开放基金(202105AG070002)

收稿日期: 2021-09-06; **网络出版日期:** 2022-10-13

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

DOC gradually increased. The physical and chemical properties of soil significantly affected the content of each component of soil active organic carbon, and TN was the dominant factor affecting the content of each component of soil active organic carbon in meadows and swamp meadows. The fenced grazing prohibition is beneficial to the restoration of soil quality and carbon sequestration capacity in the alpine wetland in northwest Yunnan, and the restoration effect is more obvious with the increase of grazing prohibition years. The restoration effect of Napa Sea swampy meadow soil was more significant than that of meadow soil in the same restoration period. This study can provide a theoretical basis for grazing wetland restoration research.

Key Words: wetland restoration; grazing prohibition period; active organic carbon

湿地占地球陆地表面的 5%—8%^[1],却储存着陆地土壤碳库 20%—30% 的碳,是陆地生态系统中单位面积土壤碳储量最高的生态系统,在维持全球碳平衡与控制温室气体排放方面具有重要作用^[2]。有机碳是土壤碳库的重要组成部分,它不仅是度量土壤肥力的关键因子,更是表征生态系统服务功能大小的综合指标之一^[3]。活性有机碳是土壤有机碳的活性部分,被认为是土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应有最直接作用的有机碳^[4],虽然占总碳比例很小,但对土壤环境变化的响应比总有机碳敏感^[5],能够在土壤全碳发生变化之前反应出土壤环境引起的微小变化。

滇西北是云南高寒湿地的集中分布区,受高海拔、寒冷气候影响,泥炭和泥炭沼泽发育,土壤碳储量丰富,具有重要的碳汇功能,在维持全球碳平衡与控制温室气体排放方面具有重要作用,同时又是少数民族集聚地区,受放牧干扰影响严重。其中,纳帕海湿地是受放牧干扰最严重和典型的区域^[6],纳帕海湿地的实际载畜量已达到理论载畜量的 132.5%^[7]。过度放牧导致高寒湿地生态系统结构改变和功能退化^[7]。放牧过程中动物践踏、翻拱不同程度地影响湿地土壤理化性质、微生物群落^[8]和酶活性^[9],改变湿地土壤碳库的迁移转化过程,威胁滇西北高寒湿地生态系统碳汇功能。

近年来,随着国家生态效益补偿项目的实施,纳帕海湿地采用了围封禁牧方式进行放牧湿地的恢复。湿地恢复过程中,土壤碳汇功能的恢复是湿地生态功能恢复的重要内容^[10]。目前,纳帕海湿地土壤有机碳的研究主要为不同土地利用方式对土壤有机碳分布的影响^[11]、不同放牧方式下土壤碳的对比研究^[12]以及禁牧对高寒退化草甸土壤理化性质的影响^[13]。然而,关于围栏禁牧对高寒湿地土壤活性有机碳库的影响研究尚未见报道。因此,本研究选取滇西北高原纳帕海沼泽湿地为研究区,对比研究不同围栏禁牧年限湿地土壤总有机碳(TOC)、颗粒有机碳(POC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)和微生物生物量碳(MBC)含量的变化特征,阐明围栏禁牧对滇西北高寒湿地土壤活性有机碳库的影响,为放牧湿地恢复研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉市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),平均海拔 3260 m。本区气候属寒温带高原季风气候区西部型季风气候,由于海拔较高且地理位置偏北,气候特点表现为春秋短促,干湿季分明,且气温年差较小。年均降雨量 620 mm 左右,其中 6—9 月降雨量占全年降雨量的 80%—90%。气温年差较小,日差较大,年均温度 5.4℃左右。纳帕海湿地由沼泽、沼泽化草甸、草甸及耕地组成。其中,草甸与沼泽化草甸面积为 2174.85 hm²,占整个湿地总面积的 70.1%,为该地区的主要放牧区域,是纳帕海湿地生态系统发挥碳汇功能的重要区域^[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

2020 年 8 月在纳帕海湿地分别选取禁牧 3 年(GE3)、禁牧 8 年(GE8)、禁牧 10 年(GE10)和未禁牧区(GE0)作为实验区;禁牧区和未禁牧区均位于纳帕海湿地西侧湖滨带,围栏内外土壤类型和植被特征基本相

同。每个实验区内分别设置 20 m×20 m 的草甸和沼泽化草甸样地各 3 个。每个样地按对角线设置 3 个 1 m×1 m 的样方,清理地表覆盖生物后,挖掘土壤剖面,按照 0—10、10—20、20—30、30—40 cm 分层采集土壤样品,装入恒温箱内带回实验室,挑出小石子、根等其他杂物,放置于 4 ℃ 冷藏保存。

1.2.2 土壤指标及测定方法

测定土壤含水率、容重、总氮(TN)、总磷(TP)、TOC、POC、DOC、EOC 和 MBC 含量。含水率和容重采用环刀法测定。TN 和 TP 含量采用连续流动分析仪测定,采用消煮炉(SPH620G 红外消解仪)进行消煮,之后用连续流动分析仪测定含量。TOC 含量采用重铬酸钾外加热法测定^[15]。

POC 含量:采用六偏磷酸钠浸提法测定。POC 含量=土壤颗粒组分碳含量×土壤颗粒组分比例^[16]。DOC 含量:采用硫酸钾浸提法测定,用总有机碳分析仪测定含量^[17]。EOC 含量:采用 333 mmol/L KMnO₄ 氧化—比色法测定。在波长 565 nm 的分光光度计进行比色,测定吸光度,计算空白样与待测样的吸光率之差,得出 KMnO₄ 的浓度消耗量,再计算 EOC 含量^[18]。MBC 含量采用氯仿熏蒸法测定。MBC = EC/0.45,式中 EC 为熏蒸与未熏蒸土壤浸提液测定的有机碳差值,0.45 为 MBC 氯仿熏蒸后提取的生物量碳比例系数^[19]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理,采用 SPSS 20 对数据进行单因素方差分析、双因素方差分析和显著性检验,采用 Canoco 5 软件进行冗余分析(RDA)、采用 Origin 2018 制图。

2 结果与分析

2.1 围栏禁牧对土壤理化性质的影响

围栏禁牧对土壤理化性质产生影响(表 1)。草甸土壤中,含水率、TN、TOC 含量均随着禁牧年限的增加而增加($P<0.05$),容重随着禁牧年限的增加而降低($P<0.05$),禁牧提高了土壤 TP 含量($P<0.05$)。沼泽化草甸土壤中,容重随着禁牧年限的增加而降低($P<0.05$),土壤含水率、TN、TP、TOC 含量均随禁牧年限的增加而增加($P<0.05$)。在 GEO 中,沼泽化草甸土壤的 TP 含量低于草甸,沼泽化草甸土壤的含水率、容重、TN 和 TOC 含量均高于草甸;在禁牧期间,沼泽化草甸土壤的容重低于草甸,沼泽化草甸土壤的含水率、TN、TP 和 TOC 含量均高于草甸。沼泽化草甸土壤的含水率、禁牧年限对沼泽化草甸土壤含水率、TN、TP、TOC 存在着极显著影响($P<0.01$),土壤深度对含水率、容重、TN、TP、TOC 存在着极显著的影响($P<0.01$)(表 2)。

2.2 围栏禁牧对土壤活性有机碳含量的影响

围栏禁牧对土壤活性有机碳含量的影响如图 1 所示。草甸土壤中,DOC 和 EOC 含量均随着禁牧年限的增加而增加($P<0.05$),表层 POC 含量随着禁牧年限的增加而降低($P<0.05$),禁牧提高了土壤 MBC 含量。沼泽化草甸土壤中,POC、DOC、EOC 和 MBC 含量均随着禁牧年限的增加而增加($P<0.05$)。不同禁牧年限的草甸土壤 POC 含量高于沼泽化草甸,沼泽化草甸土壤的 DOC、EOC 和 MBC 含量高于草甸。

禁牧年限对沼泽化草甸土壤 POC、DOC、EOC、MBC 含量存在极显著的影响($P<0.01$),土壤深度对土壤活性有机碳组分 DOC、EOC、MBC 含量存在极显著的影响($P<0.01$)(表 2)。

2.3 不同禁牧年限土壤活性有机碳与理化性质的关系

由表 3 可知,草甸土壤中,POC 与 TP 呈显著正相关关系($P<0.05$);EOC 与含水率、TOC、TN、TP 均呈极显著正相关关系($P<0.01$),与容重呈极显著负相关关系($P<0.01$);MBC 与 TN 呈显著正相关关系($P<0.05$),和 TP 呈极显著正相关关系($P<0.01$),与容重呈显著负相关关系($P<0.05$)。沼泽化草甸土壤中,POC 与 TOC ($P<0.01$)和含水率($P<0.05$)均呈显著正相关关系;DOC 与 TP 呈显著负相关关系($P<0.05$);EOC、MBC 与 TOC、含水率、TN、TP 均呈极显著正相关关系($P<0.01$),与容重呈极显著负相关关系($P<0.01$)。

土壤理化因子和土壤活性有机碳组分冗余分析结果表明,草甸土壤和沼泽化草甸土壤的第一排序轴特征值分别为 0.910 和 0.753,由此可知第一排序轴能够很好地反映土壤理化因子与土壤活性有机碳组分的关系,而且 TN 贡献率分别达到了 98.7%和 97.5%,说明 TN 是影响草甸和沼泽化草甸土壤活性有机碳含量的主要因素(图 2)。

表 1 不同禁牧年限土壤理化性质变化特征

Table 1 Change characteristics of soil physical and chemical properties in different years of grazing prohibition

土壤类型 Soil type	禁牧年限 Grazing prohibition period/a	土壤深度 Soil depth/cm	含水率 Moisture content/%	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	总氮 TN/ (g/kg)	总磷 TP/ (g/kg)	总有机碳 TOC/ (g/kg)
草甸 Meadow	0	0—10	35.17Ab	1.95Ba	5.85Ab	0.95Ab	53.10Ab
		10—20	22.26Aa	2.00Ba	2.76Aa	0.73Aab	20.49Aa
		20—30	22.33Aa	2.24Ca	1.95Aa	0.65Aa	14.82Aa
		30—40	19.14Aa	2.12Aa	1.53Aa	0.55Aa	13.11Aa
沼泽化草甸 Swampy meadow	0	0—10	52.23Ab	2.14Ba	8.38Ac	0.94Ac	67.56Abc
		10—20	52.18Ab	2.45Ba	7.27Abc	0.70Ab	79.13Ac
		20—30	46.38Aab	2.30Aa	5.62Aab	0.55Aab	50.03Aab
		30—40	38.65Aa	2.37Ba	5.58Aa	0.48Aa	37.83Aa
草甸 Meadow	3	0—10	46.83Bc	1.80Ba	6.245Ac	1.12Aa	54.20Ab
		10—20	29.44Bb	1.89Bab	3.34Ab	1.08Ba	22.72Aa
		20—30	25.66Aab	2.16BCab	2.17Aa	1.10Ba	17.64Aa
		30—40	25.07Aa	2.21Ab	1.74Aa	0.92Ba	14.80Aa
沼泽化草甸 Swampy meadow	3	0—10	80.50Bc	1.55ABa	16.58Bb	1.09ABc	308.41Bb
		10—20	71.10Bbc	1.58Aa	16.48Bb	0.88ABbc	271.59Bb
		20—30	64.79Ab	1.82Aa	9.75ABa	0.71ABab	128.89Aa
		30—40	50.96ABa	1.92ABa	4.67Aa	0.52Aa	60.11Aa
草甸 Meadow	8	0—10	79.09Cb	1.77Bab	14.83Bb	0.995Ab	259.04Bc
		10—20	74.65Cb	1.51ABa	15.29Bb	0.76Aa	223.36Bc
		20—30	72.69Cb	1.87ABab	12.32Cb	0.76Aa	157.43Cb
		30—40	62.52Ca	2.03Ab	7.22Ba	0.55Aa	76.54Ba
沼泽化草甸 Swampy meadow	8	0—10	83.91Bb	1.48ABa	21.95Cc	1.31Bc	297.01Bb
		10—20	78.93Bab	1.56Aa	18.48Bb	0.87ABb	244.75Bb
		20—30	83.09Aab	1.80Aa	8.24Aa	0.68ABa	86.52Aa
		30—40	53.35ABa	1.83ABa	5.38Aa	0.64Ba	49.31Aa
草甸 Meadow	10	0—10	72.44Cb	0.95Aa	20.81Cb	1.59Bc	353.33Cc
		10—20	69.49Cb	1.13Aa	17.48Bb	1.10Bb	264.29Bb
		20—30	49.28Ba	1.75Ab	9.81Ba	0.70Aa	94.70Ba
		30—40	43.05Ba	1.84Ab	7.56Ba	0.70ABa	73.26Ba
沼泽化草甸 Swampy meadow	10	0—10	79.98Bb	0.96Aa	19.36BCbc	1.25ABc	314.19Bb
		10—20	77.23Bab	1.27Aa	20.18Aa	1.03Bbc	264.02Bb
		20—30	71.58Aab	1.62Aa	15.18Aa	0.77Bab	143.85Aa
		30—40	66.30Ba	1.66Aa	12.98Aa	0.64Ba	126.25Ba

TN:总氮 Total nitrogen;TP:总磷 Total phosphorus;TOC:总有机碳 Total Organic Carbon;不同大写字母表示同一土壤深度不同禁牧年限的差异显著 ($P<0.05$);不同小写字母表示同一禁牧年限不同土壤深度的差异显著 ($P<0.05$)

表 2 禁牧年限和土壤深度与活性有机碳含量的关系分析

Table 2 Analysis of the relationship between grazing prohibition period, soil depth and active organic carbon content

土壤类型 Soil type	因变量 Dependent variable	含水率 Moisture content	容重 Bulk density	TN	TP	TOC	POC	DOC	EOC	MBC
草甸	土壤深度	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
Meadow	禁牧年限	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
沼泽化草甸	土壤深度	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.59	0.00	0.00	0.00
Swampy meadow	禁牧年限	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

POC:颗粒有机碳 Particulate organic carbon;DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon;EOC:易氧化有机碳 Easily oxidizable organic carbon;MBC:微生物生物量碳 Microbial biomass carbon

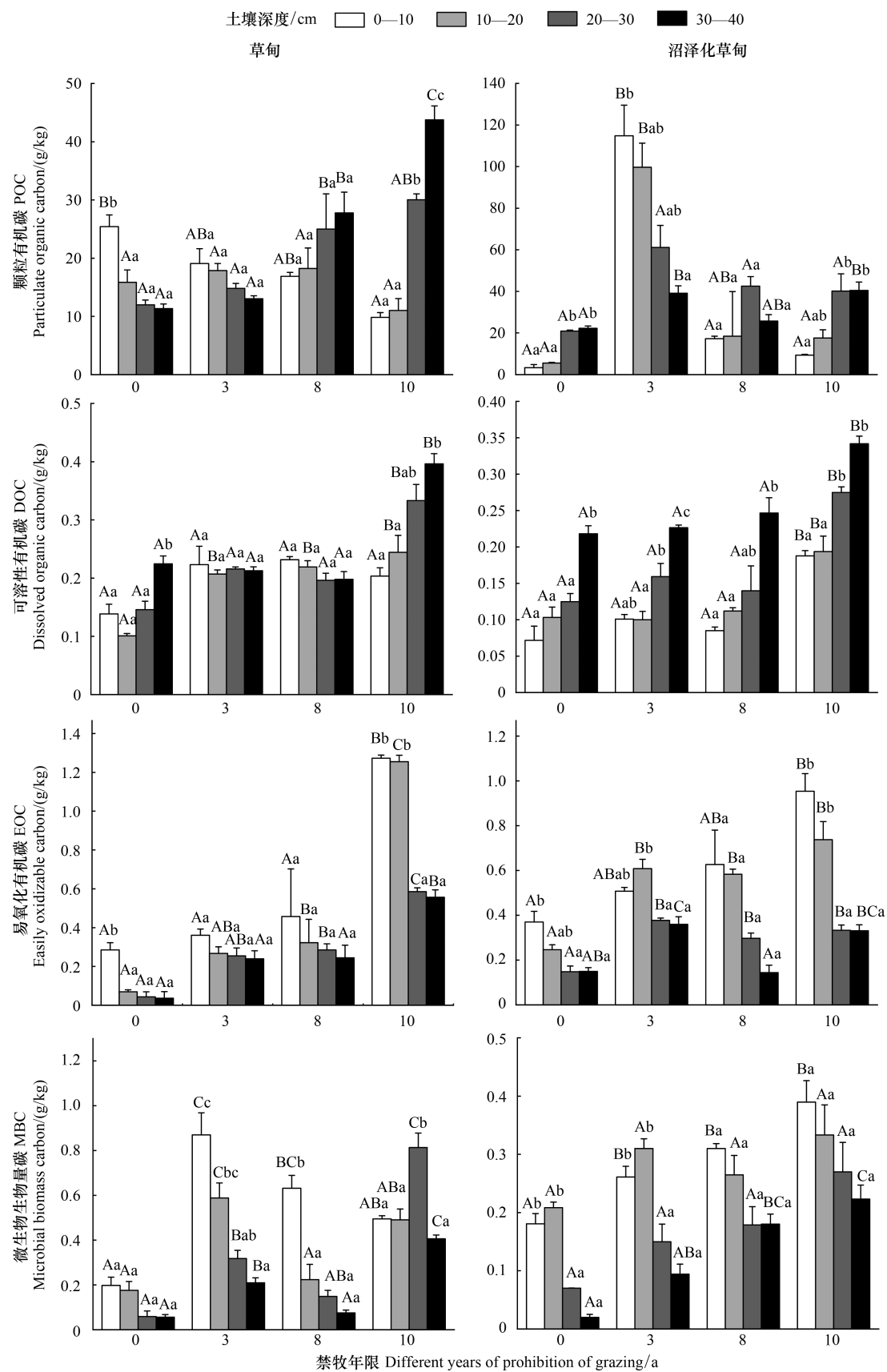


图1 不同禁牧年限土壤活性有机碳含量变化特征

Fig.1 Variation characteristics of soil active organic carbon content in different years of prohibition of grazing

不同大写字母表示同一土壤深度不同禁牧年限的差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示同一禁牧年限不同土壤深度的差异显著 ($P<0.05$)

表 3 围栏禁牧下土壤活性有机碳和土壤理化性质的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil active organic carbon and soil physical and chemical properties under fenced grazing prohibition

	POC	DOC	EOC	MBC	TOC	含水率 Moisture content	容重 Bulk density	TN	TP
POC		-0.119	0.065	0.085	0.38	0.309	-0.094	0.223	0.094
DOC	0.414		-0.111	-0.155	-0.261	-0.231	-0.031	-0.184	-0.361
EOC	-0.099	0.307		0.607	0.747	0.58	-0.522	0.695	0.604
MBC	0.061	0.297	0.325		0.721	0.57	-0.435	0.724	0.653
TOC	-0.067	0.11	0.728	0.245		0.796	-0.65	0.909	0.799
含水率	0.137	0.196	0.589	0.251	0.859		-0.761	0.842	0.699
容重	0.126	-0.147	-0.748	-0.342	-0.809	-0.66		-0.688	-0.591
TN	0.011	0.173	0.732	0.304	0.948	0.896	-0.818		0.838
TP	-0.319	-0.117	0.546	0.465	0.475	0.23	-0.483	0.44	

表中数据分区: 左下为草甸土壤, 右上为沼泽化草甸土壤

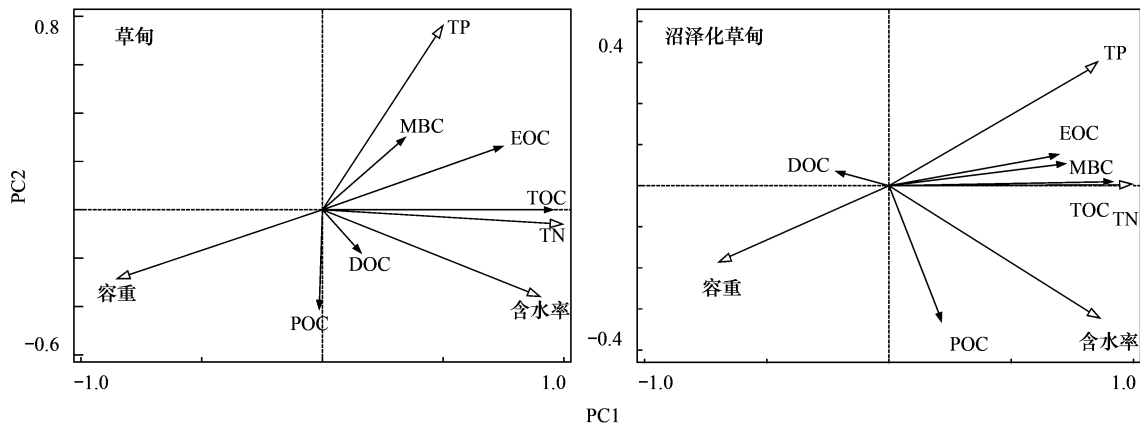


图 2 围栏禁牧下土壤活性碳组分和土壤理化性质的冗余分析

Fig.2 Redundant analysis of soil activated carbon components and soil physical and chemical properties under fenced grazing Prohibition

TN:总氮 Total nitrogen; TP:总磷 Total phosphorus; TOC:总有机碳 Total organic carbon

3 讨论

3.1 围栏禁牧对土壤理化性质的影响分析

土壤有机碳是指示土壤健康的关键因子^[20]。本研究发现,草甸和沼泽化草甸土壤 TOC 含量随土层深度的增加而减少,随着禁牧年限的增加而增加。地上生物量和地下根系是土壤 TOC 的主要来源,有机质主要在表层土壤累积,并随深度增加而逐渐减少,因此,土壤表层有机碳含量显著高于低层^[21]。本研究表明草甸和沼泽化草甸土壤 TOC 在 0—20 cm 土层含量很高,因为植被根系集中,大量植被枯落物和死根的腐解归还,为表层土壤提供了丰富的碳源,在表层土壤形成 TOC 的大量累积。在 30—40 cm 土层,植物根系因难深入而分布较少,致使土壤中 TOC 含量明显降低^[22]。围栏禁牧条件下,草甸和沼泽化草甸土壤环境的改善,提供给植被充足的养分和适宜的生长条件,加速了植被的正向演替,提高植物生产力,植物死亡后残体进入土壤,促进土壤碳累积^[23]。本研究发现沼泽化草甸土壤 TOC 含量高于草甸土壤,因为沼泽化草甸的淹水状态导致植物残体的分解过程受到强烈限制,有机生物残体分解速率低于好氧土壤的分解速率,厌氧状态下的土壤腐殖化过程致使土壤 TOC 大量积累^[22]。

本研究发现,随着禁牧年限的增加,草甸和沼泽化草甸土壤含水率逐渐增加,而土壤容重逐渐减小。一方

面,由于禁牧促进了植被恢复,增加植被盖度,减少了强太阳辐射对地表水分的蒸散作用^[24];另一方面,禁牧条件下土壤不被牲畜践踏和采食,且促进土壤有机质含量增加,提高土壤的入渗率和持水能力^[25],提高土壤含水量。禁牧条件下,植被根系发育,并向土层深度插入,穿插作用明显,导致土壤容重降低^[26]。此外,本研究中土壤容重与 TOC 呈显著负相关关系,也表明禁牧后土壤有机质的增加也是导致土壤容重减少的重要原因^[27]。

本研究发现,草甸和沼泽化草甸土壤中 TN 和 TOC 含量变化规律相似,均随禁牧年限的增加而增加,这与刘俊廷^[28]研究结果一致。禁牧期间,生态系统中没有物质和能量流向牲畜,植物通过根系和凋落物增加了土壤有机质的输入,促进了土壤 TOC 和 TN 的积累^[29-30]。此外,因禁牧后植物修复而增长的土壤微生物量导致微生物量碳的增加,直接促进了土壤 TOC 和 TN 含量的增加^[31]。

3.2 围栏禁牧对土壤活性有机碳的影响分析

POC 是新鲜动植物残体与腐殖化有机物间过渡的有机碳库^[32]。本研究发现,随着禁牧年限的增加,土壤表层 POC 含量下降。放牧容易引起植物根系的浅层化,导致表层土壤回归的残量增加,同时动物的践踏和采食也会加速地上生物量的分解与归还,导致土壤表层 POC 含量维持较高状态。围栏禁牧虽然会增加地上植被的生物量,但是也会增加通过植被呼吸作用损失的碳含量^[33],所以 POC 含量下降。杨静等^[34]研究发现封育 9 年土壤 POC 含量才逐渐出现平衡,开始慢慢积累。

DOC 和 EOC 均为土壤活性有机碳,可作为土壤肥力和土壤质量及其持续性评价的有效参数,是土壤潜在生产力和土壤管理措施变化引起土壤有机质变化的早期预警指标^[35]。本研究发现,随着禁牧年限的增加,土壤 DOC 和 EOC 含量均逐渐增加。这主要是因为土壤活性有机碳在很大程度上取决于土壤总有机碳含量,围栏禁牧改善了土壤环境,促进了植被的生长,养分归还量增加有机碳含量增加,活性变大^[36]。植物的根系分泌物是土壤 DOC 的主要来源^[37],随着土层的加深,植物根系生物量降低,DOC 含量随之降低。然而,本研究发现沼泽化草甸土壤 DOC 含量随着土壤深度的增加而增加。首先,湿地处于淹水状态,具有很大的垂直水分运动速率,DOC 随着渗漏水的垂直下渗而迁移至深层土壤^[38]。其次,深层土壤富含具有强烈吸附作用的粘土矿物,DOC 土壤深层被大量吸附并形成积累^[38]。本研究还表明,EOC 含量随土层的增加而降低。植被枯枝落叶覆盖土壤表层,使表层土壤具有较高的养分浓度,从而为植物细根向表土层聚集提供了良好的条件^[39],而凋落物和根系分泌物经微生物的分解,成为土壤活性有机碳的重要来源。

MBC 含量虽然只占土壤有机碳总量的 0.3%—7% 左右,但其养分有效性高,周转速率很快,常被用于评价土壤质量和土壤生态系统功能变化的敏感指标^[40]。本研究发现,MBC 含量随着禁牧年限的增加而增加,由于禁牧后植被地上盖度、密度及生物量的增加,土壤水、热条件得到改善,同时返还土中的植物残体量及土表层凋落物逐年增加,促进微生物的繁殖及其活性的提高所致^[34]。土壤 MBC 含量随土层深度的增加逐渐降低,由于表层根系和凋落物分布较多,能够为微生物提供更多的碳源,有利于微生物生长和繁殖。随着土层的加深,微生物可利用碳源减少,MBC 含量明显降低^[41]。

本研究还发现,沼泽化草甸土壤 DOC、EOC 和 MBC 含量高于草甸土壤,因为草甸是纳帕海湿地生态系统中最脆弱和敏感的演替阶段,生态恢复相对较慢^[42]。沼泽化草甸长期积累大量土壤有机质储存和较高的生物量,沼泽化生态系统土壤含水量较高,温度升高使微生物活性增强^[43],MBC 含量增高,而 EOC、DOC 与 MBC 呈显著正相关关系,因此 DOC 和 EOC 含量也增高。

4 结论

随着禁牧年限的增加(<10 a),沼泽化草甸和草甸土壤各土层土壤含水率、TN、TP、TOC 含量均增加,土壤容重均下降。不同禁牧年限沼泽化草甸土壤的容重均低于草甸,沼泽化草甸土壤的含水率、TN、TP 和 TOC 含量均高于草甸。不同禁牧年限沼泽化草甸和草甸土壤含水率、TN、TP、TOC 含量均随土壤深度的增加而下降,土壤容重则随土壤深度的增加而增加。

随着禁牧年限的增加(<10 a),沼泽化草甸和草甸土壤各土层 POC、DOC、EOC、MBC 含量均增加;随着土壤深度的增加,不同禁牧年限沼泽化草甸和草甸土壤 TOC、EOC、MBC 含量均逐渐下降,POC、DOC 含量逐渐增加。不同禁牧年限草甸土壤 POC 含量高于沼泽化草甸,沼泽化草甸土壤的 DOC、EOC 和 MBC 含量高于草甸。

围栏禁牧有利于纳帕海沼泽化草甸和草甸土壤肥力、通气状况和固碳能力的恢复,且随着禁牧年限的增加,恢复效果越明显。相同恢复年限,纳帕海沼泽化草甸土壤恢复效果比草甸土壤显著。

参考文献(References):

- [1] 吴绍洪,赵艳,汤秋鸿,郑景云,高江波,梁涛,葛全胜. 面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究. 地理科学进展, 2015, 34(1): 10-17.
- [2] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [3] 周国逸,熊鑫. 土壤有机碳形成机制的探索历程. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 481-490.
- [4] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 393-406.
- [5] 罗原骏,蒲玉琳,龙高飞,叶春,朱波. 施肥方式对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响. 浙江农业学报, 2018, 30(8): 1389-1397.
- [6] 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.
- [7] 陈广磊,田昆,王行,张贇,孙梅,刘振亚,张晓宁,肖德荣. 高原湿地纳帕海土壤持水力对不同放牧的响应. 水土保持学报, 2016, 30(4): 123-141.
- [8] 陈梨,郑荣波,郭雪莲,侯亚文. 不同放牧对滇西北高原泥炭沼泽土壤氨氧化微生物群落的影响. 生态学报, 2020, 40(7): 2321-2332.
- [9] 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.
- [10] Wang Q, Li Y, Zhang M. Soil recovery across a chronosequence of restored wetlands in the Florida Everglades. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17630.
- [11] 李璇,马旭晨. 纳帕海不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征. 安徽农业科学, 2017, 45(7): 100-103, 149.
- [12] 展鹏飞,刘振亚,郭玉静,田昆,肖德荣,王行. 不同放牧方式下高寒草甸土壤碳组分的对比研究. 土壤, 2018, 50(3): 543-551.
- [13] 赖建东,田昆,赵一鹤,陆梅,岳海涛. 禁牧对高原湿地纳帕海退化草甸土壤理化性质的影响. 西部林业科学, 2013, 42(2): 43-48.
- [14] 范桥发,肖德荣,田昆,姚茜,安素帮,余红忠. 不同放牧对滇西北高原典型湿地土壤碳、氮空间分布的差异影响. 土壤通报, 2014, 45(5): 1151-1156.
- [15] 王霖娇,盛茂银,杜家颖,温培才. 西南喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(4): 1358-1365.
- [16] 蒲玉琳,叶春,张世熔,龙高飞,杨丽蓉,贾永霞,徐小逊,李云. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化. 生态学报, 2017, 37(2): 367-377.
- [17] 李昌珍. 黄土丘陵区人工林土壤氮素积累、转化对土壤碳库的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [18] 孙小花,牛俊义,赵刚. 不同前茬与施氮量对半干旱黄土高原夏玉米产量和土壤有机碳库的影响. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 19-27.
- [19] 周义贵,郝凯婕,李贤伟,范川,陈栎霖,刘运科,王谢. 林窗对米亚罗林区云杉低效林土壤有机碳和微生物生物量碳季节动态的影响. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2469-2476.
- [20] 蒲宁宁. 放牧强度对昭苏草甸草原土壤有机碳组分及其碳、氮特征的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2013.
- [21] 董扬红,曾全超,安韶山,张宏. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 143-148.
- [22] 于秀丽. 松嫩平原莫莫格湿地土壤不同形态碳转化过程及其与土壤铁耦合关系研究[D]. 长春:东北师范大学, 2016.
- [23] 王国会. 不同封育年限荒漠草原土壤有机碳矿化特征[D]. 银川:宁夏大学, 2017.
- [24] Wang C T, Long R J, Wang Q L, Jing Z C, Shi J J. Changes in plant diversity, biomass and soil C, in alpine meadows at different degradation stages in the headwater region of three rivers, China. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(2): 187-198.
- [25] Wu G L, Li W, Li X P, Shi Z H. Grazing as a mediator for maintenance of offspring diversity: sexual and clonal recruitment in alpine grassland communities. *Flora*, 2011, 206(3): 241-245.
- [26] 刘艳丽,李成亮,高明秀,张民,赵庚星. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响. 生态学报, 2015, 35(15): 5183-5190.
- [27] Yuan J Y, Ouyang Z Y, Zheng H, Xu W H. Effects of different grassland restoration approaches on soil properties in the southeastern Horqin sandy land, Northern China. *Applied Soil Ecology*, 2012, 61: 34-39.

- [28] 刘俊廷. 晋西黄土区恢复年限对林下植被多样性及土壤理化性质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [29] Lozano Y M, Hortal S, Armas C, Pugnaire F I. Interactions among soil, plants, and microorganisms drive secondary succession in a dry environment. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 298-306.
- [30] Zeng Q C, An S S, Liu Y. Soil bacterial community response to vegetation succession after fencing in the grassland of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 2-10.
- [31] Zhang C, Liu G B, Xue S, Wang G L. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 97: 40-49.
- [32] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 928-934.
- [33] 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.
- [34] 杨静, 孙宗玖, 杨合龙, 董乙强. 封育年限对蒿类荒漠土壤有机碳组分及其碳、氮特征的影响. *草业科学*, 2016, 33(4): 564-572.
- [35] Benni D K, Brar K, Toor A S, Sharma S. Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system. *Pedosphere*, 2015, 25(4): 534-545.
- [36] 管光玉, 范燕敏, 武红旗, 桂芳, 李康宁, 李飞. 封育对山地草甸草原土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响. *草业科学*, 2014, 31(9): 1618-1622.
- [37] Rasmann S, Turlings T C. Root signals that mediate mutualistic interactions in the rhizosphere. *Current Opinion in Plant Biology*, 2016, 32: 62-68.
- [38] 盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠. 亚热带不同稻田土壤溶解性有机碳的剖面分布特征. *生态学杂志*, 2013, 32(7): 1698-1702.
- [39] 李龙波, 涂成龙, 赵志琦, 崔丽峰, 刘文景. 黄土高原不同植被覆盖下土壤有机碳的分布特征及其同位素组成研究. *地球与环境*, 2011, 39(4): 441-449.
- [40] Zhang L M, Xu M L, Lou Y L, Wang X L, Qin S, Jiang T M, Li Z F. Changes in Yellow Paddy Soil Organic Carbon Fractions Under Long-Term Fertilization[J]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2014, 000(019): 3817-3825.
- [41] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 马维伟, 王海燕. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响. *生态学报*, 2019, 39(15): 5546-5554.
- [42] 范方喜, 陆梅, 彭淑娟. 高原湿地纳帕海不同演替阶段下土壤养分和酶活性干湿季节变化. *广东农业科学*, 2016, 43(8): 74-79.
- [43] 旦增塔庆, 旭日, 魏学红, 魏达, 刘永稳, 王迎红. 西藏纳木错高寒草原、高寒草甸和沼泽化草甸主要温室气体通量对比研究. *草地学报*, 2014, 22(3): 493-501.