

文章编号:1000-8551(2019)03-0565-09

高寒区栽培措施对燕麦人工草地系统碳氮储量及分配机制的影响

刘文辉 秦燕* 梁国玲 贾志锋

(青海大学畜牧兽医科学院/青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室,青海 西宁 810016)

摘要:为系统评价不同栽培措施下燕麦人工草地系统固碳、固氮潜力,在青藏高原高寒地区采用燕麦品种、施肥水平和箭筈豌豆混播水平的三因素四水平正交试验设计[$L_{16}(4^5)$],开展不同措施对乳熟期燕麦人工草地土壤层次碳氮储量的影响研究,并讨论不同措施下的燕麦人工草地系统碳、氮储量分配机制。结果表明,品种、施肥和混播均显著影响了土壤C、N储量分配,施肥和混播对C、N储量分配影响较大。尿素+磷酸二铵+有机肥处理下,系统总C、N储量最大,分别达 $184.45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $12.51 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;箭筈豌豆混播 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下,系统总C、N储量最大,分别达 $182.76 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $11.90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。燕麦乳熟期各土层C、N储量分配模式均依次表现为 $0\sim 10 \text{ cm}>10\sim 20 \text{ cm}>20\sim 30 \text{ cm}>30\sim 40 \text{ cm}>40\sim 50 \text{ cm}$;其中,各土层C储量分配为27.35%、24.50%、21.39%、14.38%和11.08%,土壤N储量分配为28.62%、24.43%、17.95%、15.47%和12.49%。 $0\sim 50 \text{ cm}$ 土层C、N储量分别占整个系统的98.69%和98.96%,而植物仅占1.31%和1.04%;植物茎、叶、穗和根生物C储量仅占系统的0.58%、0.30%、0.28%和0.15%,N储量仅占系统的0.28%、0.42%、0.29%和0.06%。本研究结果为高寒地区燕麦人工草地系统固碳、固氮方面的研究提供了理论基础。

关键词:高寒区;燕麦人工草地;碳氮储量;碳氮储量分配机制

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.03.0565

农田生态系统碳库是陆地生态系统碳库中最活跃的重要组成部分。农作物在陆地生态系统碳循环中既是碳源又是碳汇,发挥着十分重要的作用。一方面,作物的呼吸作用可以增加碳的排放,表现为碳源;另一方面,农作物通过光合作用可以吸收并固定碳,表现为碳汇^[1]。农作物对 CO_2 的吸收被认为是最经济实惠和安全有效的固碳过程。一年生作物具有固碳周期短、蓄积量大的特点^[2],可通过光合作用吸收大气中的 CO_2 ,将其以生物量的形式贮存于植物体内和土壤中,同时以籽实为生产目的的农作物收获后剩余的秸秆可通过合理利用增强农田生态系统碳蓄积能力^[3]。氮(N)是农田生态系统的重要营养元素之一,在农田生态系统结构、组成和功能的调节等方面具有重要作

用^[4-6]。农田生态系统中的氮素大多以有机质的形式储存在土壤中,对人类活动、肥料施用、土地利用变化和气候变化尤其敏感^[7-9]。土壤的供氮能力通过土壤氮储量来反映,土壤氮储量的变化能够反映出土壤中的氮是氮汇还是氮源^[10]。然而,由于农田生态系统存在明显的区域差异,同时受外部环境因素的影响,各种农田生态系统碳、氮储量及其动态变化也存在差异^[11]。

研究发现土壤碳、氮储量的含量取决于外界碳、氮输入量和内部碳、氮的释放量^[12]。植物通过光合作用固定其中的碳,一部分贮存在植物体内,一部分以有机质的形成贮存在土壤中;植物通过根系吸收土壤中的氮素固定在植物各器官中,不同的耕作管理制度可为

收稿日期:2018-06-11 接受日期:2018-10-04

基金项目:青海省科技厅重点实验室发展专项“青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室”(2017-ZJ-Y12),“现代农业产业技术体系建设专项资金”(CARS-34),农业部“牧草种质资源保护项目”(2130135),青海省饲草产业科技创新平台

作者简介:刘文辉,男,副研究员,主要从事青藏高原抗逆牧草育种方面研究。E-mail:qhliuwenhui@163.com

* **通讯作者:**秦燕,女,副研究员,主要从事青藏高原牧草栽培育种方面研究。E-mail:mule119@163.com

土壤输入氮素,并固定在土壤中。国内外学者针对不同区域农田生态系统碳、氮储量方面已经开展了大量研究。但关于青藏高原生态系统碳氮储量的研究主要集中在天然草地^[13-14],而对农田系统方面的研究尚鲜见报道。燕麦(*Avena sativa* L.)是青藏高原地区种植的主要优良牧草之一,目前,已有很多学者从施肥^[15-16]、耕作措施^[16-17]、作物种类^[18-19]等方面开展了相关研究,但关于其土壤固碳、固氮方面的研究尚鲜见报道。因此,本研究以青藏高原燕麦人工草地建植过程中选用的4个燕麦品种为试验对象,采用不同的施肥措施和箭筈豌豆(*Vicia sativa*)混播比例,建立燕麦与箭筈豌豆混播人工草地,系统评价不同措施下土壤和燕麦人工草地系统固碳、固氮潜力,了解燕麦人工草地系统碳、氮分配规律,以期为高寒地区燕麦人工草地碳、氮储量方面的研究提供理论依据。

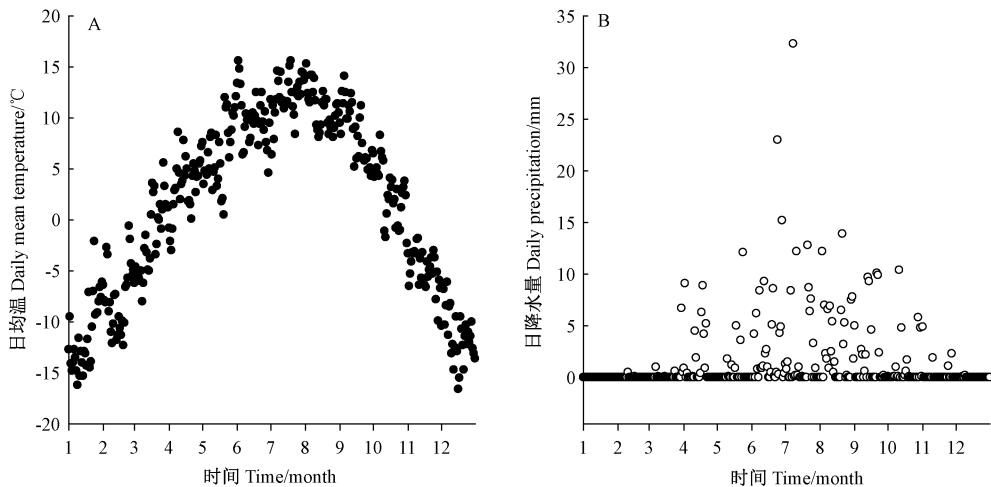


图1 试验地日均温(A)和降水量(B)

Fig.1 Daily mean temperature(A) and precipitation(B) in the experimental field

1.2 试验材料及设计

试验设燕麦品种(A因素)、施肥配比(B因素)、燕麦与箭筈豌豆混播比例(C因素)三因素四水平正交设计 $[L_{16}(4^5)]$,共16个处理,3次重复。小区随机区组排列,共48个试验小区。小区面积为 20 m^2 ($4\text{ m} \times 5\text{ m}$),小区间隔 0.5 m 。2014年5月14日撒播,播深 $3\sim 4\text{ cm}$ 。肥料混合后在播前一次性施入。出苗后,人工除杂一次。

燕麦品种:高寒区主导品种早熟的青燕1号(Qingyan No. 1,记作A1)、中熟的青海444(Qinghai 444,记作A2)、中晚熟的青海甜燕麦(Qinghai,记作A3)和晚熟的林纳(Lena,记作A4)。其中,林纳为产籽型品种,其他为草籽兼用型品种;箭筈豌豆品种:西牧324(Ximu 324)。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于青海省海北州西海镇($36^{\circ}59.36'N$, $100^{\circ}52.848'E$),海拔 $3\ 156\text{ m}$,气候寒冷潮湿,无绝对无霜期,年均气温 0.5°C ,年降水量 369.1 mm ,且集中在7-9月,年蒸发量为 $1\ 400\text{ mm}$,全年日照时数为 $2\ 980\text{ h}$,无霜期约为 93 d 。土壤为栗钙土,基本理化性质为pH值 8.43 、全氮(N) $1.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷(P_2O_5) $1.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾(K_2O) $22.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $88.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $2.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $168.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机质 $32.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验区2014年日均温和日降水量如图1所示。

施肥配比为:不施肥(记作B1,CK)、尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +磷酸二铵 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($61.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{N}+69\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{P}_2\text{O}_5$,记作B2)、有机肥 $1\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (记作B3)、尿素 $37.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +磷酸二铵 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($30.75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{N}+34.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{P}_2\text{O}_5$ +有机肥,记作B4)。其中,尿素含N 46% ,磷酸二铵含N 18% ,含 P_2O_5 46% ;有机肥为商品生物有机肥(青海海晏县民盛农牧生产资料有限公司),其有机质含量 $>40\%$ 、 $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$ 含量 25% 、有效活菌数含量 $0.2\text{ 亿}\cdot\text{g}^{-1}$ 。禾豆混播配比:在燕麦播种量 $600\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 保苗数的前提下,箭筈豌豆配比分别为 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (记作C1)、 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (记作C2)、 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (记作C3)和 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (记作C4)。燕麦具体播种量确定,依据燕麦千粒重、发芽率、纯净度,分别计算出青燕1号、林

纳、青海 444 和青海甜燕麦的实际播量分别为 154.3、150.0、183.0 和 216.0 kg·hm⁻²。所有播种的燕麦和箭筈豌豆种子均为上年收获的种子。

1.3 测定指标与方法

分别于燕麦拔节期 (jointing stage, JS)、抽穗期 (heading stage, HS)、开花期 (flowering stage, FS)、乳熟期 (milk stage, MS) 和收获后期 (harvest time, HT) 在各小区选取 1 m×1 m 样方, 连同地下根系一起挖出, 3 次重复。将燕麦和箭筈豌豆按根、茎、叶、穗 (燕麦) 分开, 再将植物根系冲洗干净后, 65℃ 烘干至恒重, 称得燕麦和箭筈豌豆的各器官生物量, 并计算出各处理每种植物的地上、地下及地上+地下生物量。将称量干重后的各植物器官样品粉碎备用, 用于养分分析。植物有机 C 含量采用 Elab-TOC/DT 总有机碳分析仪 (苏州埃兰分析仪器有限公司) 测定; 全 N 含量采用凯氏定氮法^[20-21]测定; 按照公式计算各器官碳氮储量:

$$\text{植物器官 C、N 储量} = \text{器官 C、N 含量} \times \text{器官生物量} \quad (1);$$

在地上取样的同时, 分别对地下 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm 土层采用环刀法测定土壤容重, 并采集带回实验室用植物样品分析的方法测定各土层土壤碳、氮含量。按照公式计算各土层 C、N 储量:

$$\text{土壤 C、N 储量} = \text{土壤容重} \times \text{土层厚度} \times \text{土壤 C、N 含量} \quad (2)。$$

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理; SPSS 11.5 进行正交方差分析得出 *F* 值, 比较不同时期下燕麦品种、施肥和箭筈豌豆混播比例对土壤 C、N 储量影响, 并用 Duncan 法进行 0.05 水平上的多重比较; 利用 Sigmaplot 12.5 绘图, 分别比较不同燕麦品种、施肥配比、燕麦与箭筈豌豆混播比例各水平间的差异; 采用 Microsoft Excel 2016 对土壤和系统 C、N 储量分配绘图。

2 结果与分析

2.1 各土层 C、N 储量分配对品种、施肥和混播的响应

由表 1 可知, 除品种对拔节期、抽穗期、开花期和收获后期 0~10、10~20 cm 土层, 品种、施肥、混播对乳熟期 20~30 cm 土层, 混播在抽穗期 20~30 cm 土层以及品种对抽穗期 30~40 cm 土层 C 储量分配的影响未

达显著水平外, 各时期品种、施肥和混播对不同土层 C 储量分配的影响均达到显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 水平。其中, 拔节期、抽穗期、开花期和乳熟期 (除 20~30 cm 土层外) 3 个因素对各土层的影响均依次表现为施肥>混播>品种, 而收获后期对 0~10、10~20 和 40~50 cm 土层 C 储量分配影响表现为混播>施肥>品种, 20~30 cm 土层表现为施肥>品种>混播, 30~40 cm 土层表现为施肥>混播>品种。燕麦在整个生育期土壤 C 储量均以施肥影响最大, 而在收获后期土壤表层 (0~20 cm) 和深层 (40~50 cm) 土层以混播影响最大, 中层土壤 (20~40 cm) 以施肥影响最大。

品种、施肥和混播对各土层 N 储量分配影响的差异性分析表明, 除品种对收获后期 0~10 cm 土层、各时期 10~20 cm 土层, 拔节期和抽穗期 30~40 cm 土层、拔节期和乳熟期 40~50 cm 土层, 施肥对乳熟期 10~20 cm 土层, 混播对乳熟期 10~20、20~30 cm 土层 N 储量分配的影响未达到显著水平外, 各时期品种、施肥和混播对不同土层 N 储量分配的影响均达到显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 水平。其中拔节期、抽穗期、开花期和乳熟期 3 个因素对 0~10 和 10~20 cm 土层的影响依次表现为施肥>混播>品种, 收获后期表现为混播>施肥>品种; 对 20~30 cm 土层土壤 N 储量分配在抽穗期依次表现为混播>施肥>品种, 而拔节期、收获后期依次表现为施肥>混播>品种, 开花期、乳熟期依次表现为施肥>品种>混播; 对 30~40 cm 土层土壤 N 储量分配在开花期依次表现为混播>品种>施肥, 而其余时期表现为施肥>混播>品种; 对 40~50 cm 土层土壤 N 储量分配在各时期均依次表现为施肥>混播>品种。

2.2 不同措施对各土层土壤 C、N 储量分配策略

2.2.1 C 储量分配策略 由图 2 可知, 品种、施肥和混播影响下, 乳熟期 0~10 和 10~20 cm 土层土壤 C 储量分配均以 A2、B1 和 C1 下为最高, 分别为 28.32% 和 25.61%、31.05% 和 26.10%、30.59 和 25.88%, 分别较 CK (休闲地) 低 24.19% 和 5.76%、13.29% 和 3.78%、14.98% 和 4.65%; 20~30 cm 土层土壤 C 储量分配以 A2、B3 和 C4 最高, 分别为 22.13%、21.81% 和 22.31%, 分别较 CK (休闲地) 高 4.23%、2.71% 和 5.05%; 30~40 cm 土层土壤 C 储量分配以 A1、B4 和 C4 最高, 分别为 15.74%、17.00% 和 16.89%, 分别较 CK (休闲地) 高 63.43%、76.55% 和 76.37%; 40~50 cm 土层土壤 C 储量分配以 A4、B4 和 C4 最高, 分别为 11.68%、13.62% 和 12.32%, 分别较 CK (休闲地) 高 69.88%、98.01% 和 79.21%。从不同土层 C 储量分配

表 1 品种、施肥和混播对燕麦草地各土层土壤 C、N 储量分配影响的正交方差分析 (F 值)Table 1 Orthogonal analysis of variance on the different soil layer BCSAs and BNSAs under the varieties, the rates of fertilizations and the mixed seeding rates (F value)

土层深度 Soil depth /cm	因素 Factors	C 储量分配 BCSAs					N 储量分配 BNSAs				
		拔节期 JS	抽穗期 HS	开花期 FS	乳熟期 MS	收获后期 HT	拔节期 JS	抽穗期 HS	开花期 FS	乳熟期 MS	收获后期 HT
0~10	品种	1.064	0.993	2.168	8.943**	2.530	3.910*	9.337**	3.406*	8.244**	0.617
	施肥	175.694**	192.537**	183.718**	278.550**	84.899**	74.920**	171.252**	170.812**	198.645**	76.015**
	混播	48.621**	74.722**	94.075**	276.581**	225.256**	12.240**	38.898**	71.608**	196.691**	117.185**
10~20	品种	0.983	2.798	1.228	3.998*	2.723	1.561	2.515	2.144	0.746	1.419
	施肥	50.397**	238.903**	136.628**	13.223**	55.345**	96.881**	55.893**	181.009**	1.737	71.199**
	混播	34.986**	59.743**	85.900**	4.875**	60.782**	8.967**	12.435**	78.053**	0.734	106.491**
20~30	品种	3.119*	4.926**	10.164**	2.779	16.586**	34.316**	7.470**	5.694**	3.173*	4.464**
	施肥	156.425**	138.470**	31.852**	2.614	32.412**	61.707**	16.261**	15.234**	5.298**	39.546**
	混播	34.137**	0.458	13.860**	2.599	3.108*	45.654**	86.931**	5.165**	1.159	5.466**
30~40	品种	4.950**	1.074	5.813**	16.493**	4.119*	2.592	1.177	17.485**	26.277**	4.795**
	施肥	15.896**	53.702**	46.075**	53.316**	76.364**	104.097**	68.659**	13.909**	198.066**	124.596**
	混播	9.790**	22.688**	34.493**	40.878**	67.820**	25.635**	22.469**	22.353**	74.337**	29.117**
40~50	品种	3.466*	3.128*	5.063**	10.572**	11.249**	2.506	3.054*	16.244**	2.189	12.293**
	施肥	46.505**	46.618**	222.347**	252.474**	53.520**	148.942**	89.341**	123.437**	69.706**	71.942**
	混播	26.780**	24.709**	178.107**	101.045**	63.374**	24.539**	25.096**	29.371**	17.158**	21.823**

注: **, * 分别表示差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$); BCSAs: 生物碳储量分配; BNSAs: 生物氮储量分配。

Note: ** and * indicate extremely significant and significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively. BCSAs: Biomass carbon stock allocation. BNSAs: Biomass nitrogen stock allocation.

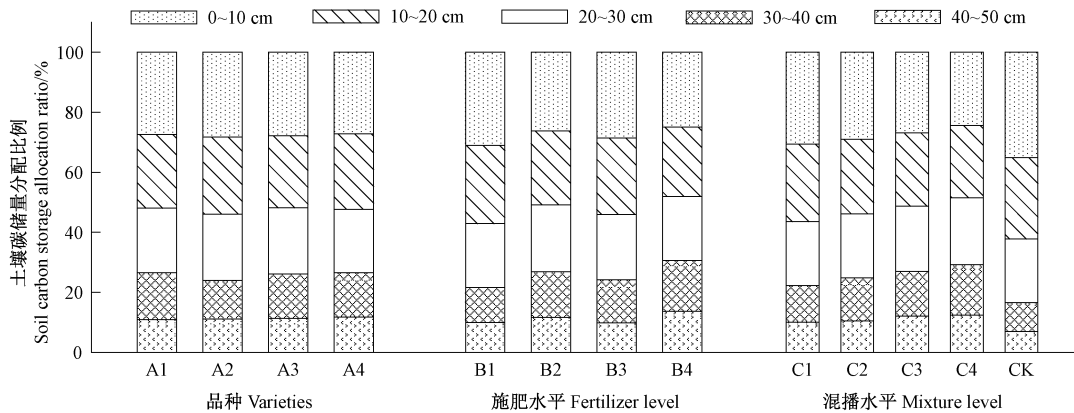


图 2 品种、施肥和混播处理不同水平对燕麦草地系统总 C 储量分配的影响

Fig.2 Effect of the varieties, the rates of fertilization and the mixed seeding rates on total BCSAs in the oat sown-pasture

格局来看,在 3 个因素影响下,乳熟期土壤 C 储量分配表现为 $0 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 30 \text{ cm} > 30 \sim 40 \text{ cm} > 40 \sim 50 \text{ cm}$,各土层分别表现为 $24.41\% \sim 31.05\%$ 、 $23.11\% \sim 26.10\%$ 、 $21.08\% \sim 22.31\%$ 、 $11.72\% \sim 17.00\%$ 和 $9.82 \sim 13.62\%$ 。

2.2.2 N 储量分配策略 由图 3 可知, $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层土壤 N 储量分配均以 A1、B1 和 C1 为

最高,分别为 28.41% 、 25.14% 和 17.74% , 32.73% 、 24.27% 和 18.68% , 32.43% 、 25.02% 和 17.79% ,其中 $0 \sim 10$ 和 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层土壤 N 储量分配分别较 CK (休闲地) 低 26.00% 和 2.86% , 14.73% 和 6.23% , 15.51% 和 3.33% , $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层土壤 N 储量分配较 CK (休闲地) 高 14.78% 、 20.97% 和 16.37% 。 $30 \sim 40$ 和 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 土层均以 A3、B4 和 C4 处理下最高,分别为

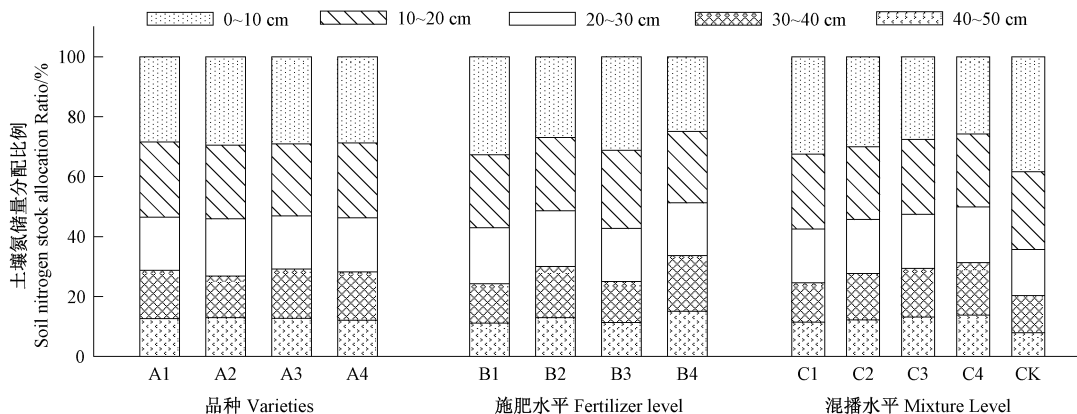


图3 品种、施肥和混播处理不同水平对燕麦草地系统总 N 储量分配的影响

Fig.3 Effect of the varieties, the rates of fertilization and the mixed seeding rates on total BNSAs in the oat sown-pasture

16.41% 和 12.75%, 18.59% 和 15.04%, 17.60% 和 13.76%, 分别较 CK (休闲地) 高 32.81% 和 60.67%, 50.47% 和 89.42%, 42.17% 和 73.29%。

从不同土层 N 储量分配格局来看 (图 3), 在 3 个因素影响下, 乳熟期土壤 N 储量分配均表现为 0~10 cm > 10~20 cm > 20~30 cm > 30~40 cm > 40~50 cm, 各土层土壤 N 储量分配分别表现为 24.89%~32.73%、23.87%~26.11%、17.62%~19.04%、13.15%~18.59% 和 11.10%~15.04%。

2.2.3 不同措施下的土壤 C、N 储量分配格局 由表 2 可知, 各时期 3 种措施影响下的土壤 C、N 储量分配与休闲地表现不同。从不同土层比较来看, 在 3 种因素影响下 0~10 和 10~20 cm 土层土壤 C、N 储量分配低于休闲地, 拔节期、抽穗期、开花期、乳熟期和收获后期 0~10 cm 土层 C 储量分配分别低 5.40%、4.90%、

5.91%、7.45% 和 4.20%, N 储量分配分别低 5.29%、5.45%、7.00%、9.46% 和 5.22%; 10~20 cm 土层 C 储量分配分别低 7.29%、6.81%、4.70%、2.26% 和 2.91%; N 储量分配分别低 5.19%、5.35%、6.42%、1.19% 和 3.58%。而 20~30、30~40 和 40~50 cm 土层 C、N 分配则高于休闲地。20~30 cm 土层 C 储量分配分别高 5.00%、5.22%、1.64%、0.43% 和 1.87%, N 储量分配分别高 3.51%、4.06%、5.16%、2.70% 和 1.07%; 30~40 cm 土层 C 储量分配分别高 4.49%、3.73%、4.22%、4.94% 和 3.74%, N 储量分配分别高 3.47%、3.84%、3.77%、3.28% 和 4.95%; 40~50 cm 土层 C 储量分配分别高 3.21%、2.73%、4.76%、4.34% 和 5.25%, N 储量分配分别高 3.51%、2.91%、4.49%、4.68% 和 4.92%。

从各时期不同土层土壤 C、N 储量分配来看, 0

表 2 不同时期处理和对照间土壤层 C、N 储量分配比较

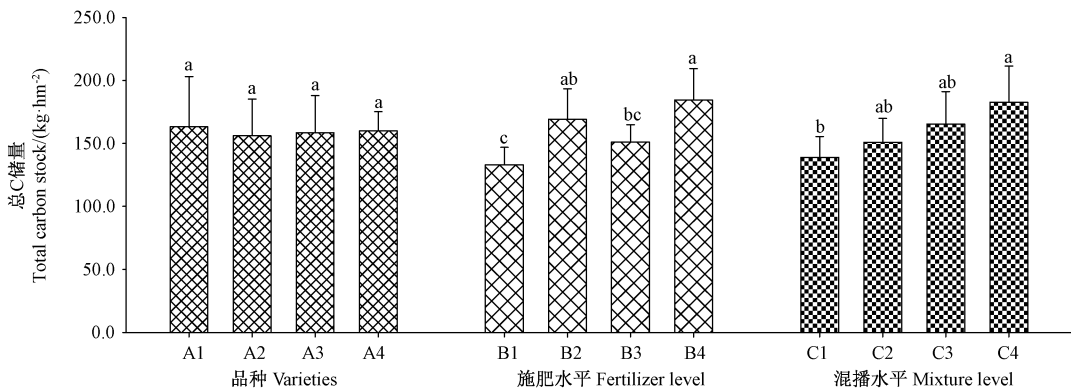
Table 2 Compare the BCSAs and BNSAs of the treatment and CK at the different growth stage /%

土层深度 Soil depth/cm	因素 Factors	C 储量分配 BCSAs					N 储量分配 BNSAs				
		拔节期 JS	抽穗期 HS	开花期 FS	乳熟期 MS	收获后期 HT	拔节期 JS	抽穗期 HS	开花期 FS	乳熟期 MS	收获后期 HT
0~10	处理	29.28	27.75	28.71	27.72	25.82	29.38	27.20	26.55	28.92	24.82
	对照	34.68	32.65	34.62	35.17	30.02	34.68	32.65	33.55	38.38	30.04
10~20	处理	29.45	27.55	29.10	24.82	24.61	28.19	27.30	26.35	24.69	24.59
	对照	36.74	34.36	33.80	27.09	27.52	33.38	32.65	32.77	25.88	28.17
20~30	处理	19.32	22.25	17.76	21.67	24.05	18.62	21.07	22.20	18.14	22.82
	对照	14.32	17.03	16.12	21.23	22.18	15.11	17.01	17.04	15.44	21.75
30~40	处理	12.54	13.18	13.51	14.57	14.68	12.82	13.71	13.65	15.63	16.47
	对照	8.05	9.45	9.29	9.63	10.94	9.35	9.87	9.88	12.35	11.52
40~50	处理	9.42	9.27	10.92	11.22	12.71	10.99	10.72	11.25	12.62	12.37
	对照	6.21	6.54	6.16	6.88	7.46	7.48	7.81	6.76	7.94	7.45

~10 cm 土层土壤 C、N 储量均以拔节期最高(分别为 29.28% 和 29.38%),以收获后期最低(25.82% 和 24.82%);10~20 cm 土层均以拔节期最高(29.45% 和 28.19%),以收获期最低(24.61% 和 24.59%);20~30 cm 土层分别以收获后期和开花期最高(22.20% 和 22.18%),以开花期和乳熟期最低(17.75% 和 18.14%);30~40 cm 土层均以收获后期最高(14.68% 和 16.47%),以拔节期最低(12.54% 和 12.82%);40~50cm 土层分别以收获后期和乳熟期最高(12.71% 和 12.62%),以抽穗期最低(9.27% 和 10.72%)。

2.3 系统 C、N 储量分配格局

2.3.1 系统总 C、N 储量 由图 4、图 5 可知,系统总 C、N 储量在品种间无显著差异($P>0.05$),而在施肥和混播处理下各水平间存在显著差异($P<0.05$),3 个因素影响下,系统总 C、N 储量潜力为 159.4 和 10.4 $t\cdot hm^{-2}$ 。其中,施肥 B4 处理的系统总 C、N 储量最高,分别为 184.45 $t\cdot hm^{-2}$ 和 12.51 $kg\cdot hm^{-2}$,分别较 B3、B2 和 B1 高 22.03%、9.09%、38.59% 和 32.27%、12.31%、48.25%。混播处理下以 C4 的 C、N 储量最高,分别达 182.76 $t\cdot hm^{-2}$ 和 11.90 $kg\cdot hm^{-2}$,分别较 C3、C2 和 C1 高 10.53%、21.20%、31.63% 和 9.56%、20.06%、34.28%。



注:不同小写字母表示各品种(或施肥水平或混播水平)间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among varieties (or fertilizer level or mixture level) at 0.05 level. The same as following.

图 4 品种、施肥和混播处理不同水平对燕麦草地系统总 C 储量的影响

Fig.4 Effect of the varieties, the rates of fertilization and the mixed seeding rates on biomass carbon stock in the oat sown-pasture

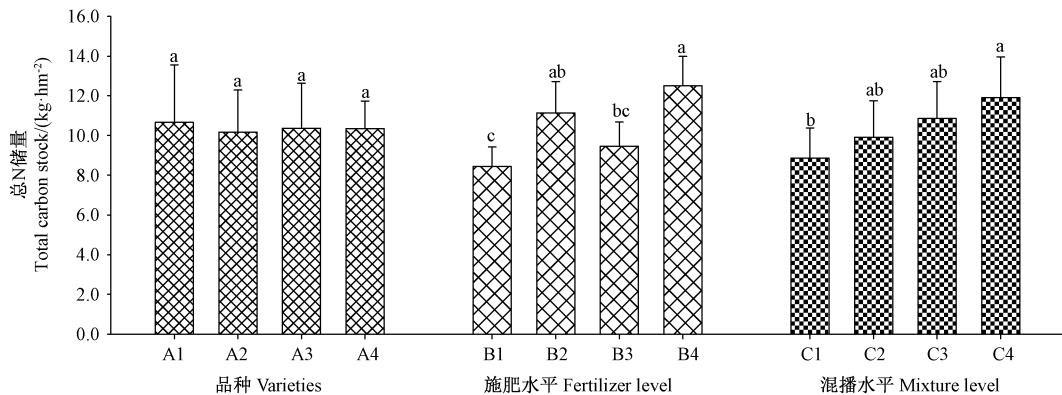


图 5 品种、施肥和混播处理不同水平对燕麦草地系统总 N 储量的影响

Fig.5 Effect of the varieties, the rates of fertilization and the mixed seeding rates on biomass nitrogen stock in the oat sown-pasture

2.3.2 不同器官及不同土层间的 C、N 储量分配格局
由表 3 可知,在品种、施肥和混播处理下,乳熟期植物茎、叶、穗和根生物 C、N 储量分配变幅小,平均分别为 0.58%、0.30%、0.28%、0.15% 和 0.28%、0.42%、0.29%、0.06%,而 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm 土层的平均土壤 C、N 储量分配比例分别为 27.35%、24.50%、21.39%、14.38%、11.08% 和 28.62%、24.43%、17.95%、15.47%、12.49%。

表 3 品种、施肥和混播处理下不同水平对植物器官和土层 C、N 储量分配模式的影响

Table 3 Effect of the varieties, rates of fertilization and mixed seeding rates on the patterns of BCASs and BNSAs in different plant organs and the soil depths /%

项目 Items	土壤层 Soil layer/cm					合计 Total	植物层 Plant layer				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	根 Root	合计 Total
C 储量分配 BCASs	27.35	24.50	21.39	14.38	11.08	98.69	0.58	0.30	0.28	0.15	1.31
N 储量分配 BNSAs	28.62	24.43	17.95	15.47	12.49	98.96	0.28	0.42	0.29	0.06	1.04

表 4 品种、施肥和混播处理不同水平对植物和土壤 C、N 储量分配模式的影响

Table 4 Effect of the varieties, rates of fertilization and mixed seeding rates on the patterns of BCASs and BNSAs in plants and soil /%

项目 Items	土壤层 Soil layer	植物层 Plant layer		
		燕麦 Oat	箭筈豌豆 Common vetch	合计 Total
C 储量分配 BCASs	98.69	1.08	0.23	1.31
N 储量分配 BNSAs	98.96	0.70	0.34	1.04

3 讨论

3.1 品种、施肥和混播对土壤 C、N 储量分配的影响

合理的生态系统管理措施和土地利用方式可显著提高土壤 C、N 储量分配^[22-24],是实现生态系统 C、N 增汇最经济有效的途径之一^[25-26],其中施肥、播种豆科植物等措施均具有明显效果^[20-21,27]。这与本研究结果相同。本研究发现品种、施肥和混播均显著影响了土壤 C、N 储量分配,但各因素对其的影响存在差异。这是由于不同牧草品种自身生物学特性不同,导致在植株高度、田间长势等方面存在差异,造成不同牧草品种从土壤中获取养分的能力不同^[28];同时不同品种各自的呼吸作用不同,从土壤 C、N 库中获取养分和呼吸作用所带走土壤 C、N 各不相同,导致人工草地中各品种土壤 C、N 储量的不同^[29]。本研究中,4 个燕麦

2.3.3 植物及土层间的 C、N 储量分配格局
由表 4 可知,品种、施肥和混播处理下,乳熟期土壤、燕麦和箭筈豌豆生物 C、N 储量分配比例小,其土层、燕麦和箭筈豌豆的平均 C、N 储量分配比例分别为 98.69%、1.08%、0.23% 和 98.96%、0.70%、0.34%。C、N 储量在土壤层中占有绝对优势。从燕麦和箭筈豌豆 C、N 储量分配比较来看,燕麦较箭筈豌豆占绝对优势。

品种中土壤 C 储量分配 0~30 cm 土层以 A2 处理较高;土壤 N 储量分配 0~30 cm 土层以 A1 处理较高。

孔毅明^[30]研究发现长期不同施肥措施对稻田土壤碳氮的影响不仅局限在耕作层,由于土壤碳氮积累的差异,施肥措施对其影响的深度亦不同,各施肥处理影响 C、N 含量主要在 0~30 cm 土层,甚至达到 0~40 cm 土层。这与本研究结果基本一致。本研究中,不同施肥处理下,土壤 C 储量分配 0~20 cm 土层以 B1 处理较高,20~30 cm 土层以 B3 处理较高,30~50 cm 土层以 B4 处理较高;土壤 N 储量分配 0~30 cm 土层以 B1 处理较高,30~40 cm 土层以 B4 处理较高。土壤耕作层以不施肥处理下土壤 C、N 储量分配较高,而在深层土壤中则以 B4 处理最高,这可能与土壤 C、N 沉降有关。

研究表明,在一定的生长空间内,禾豆混播牧草的竞争优势主要表现为根系对土壤养分和空间的竞争^[31]。陈露^[32]通过种植混播牧草发现,0~5 cm 土层土壤颗粒有机碳含量较冬麦田增加了 40%~136%,5~10 cm 土层增加了 139%~287%。这与本研究结果本研究中,不同混播水平下,土壤 C 储量分配 0~20 cm 土层以 C1 处理较高,20~50 cm 土层以 C4 处理较高;土壤 N 储量分配 0~30 cm 土层以 C1 处理较高,30~40 cm 土层以 C4 处理较高。此外,本研究还发现 0~20 cm 土层燕麦单播较混播土壤 C、N 储量分配均高于混播处理,这可能是由于单播燕麦处理下,植物从土壤中吸收 C、N 较少,表现为土壤表层 C、N 储量分配较

高,而深层土壤中则以 C4 处理 C、N 储量分配较高。

3.2 土壤碳、氮储量分配模式

本研究中,乳熟期不同土层土壤 C、N 储量分配模式均表现为 0~10 cm>10~20 cm>20~30 cm>30~40 cm>40~50 cm。这与前人研究^[2-3]结果一致。这是因为在土壤表层,由于植物根系的存在、施肥措施和豆科牧草的混播,增加了土壤中 C、N 的积累。一方面,施肥使土壤表层 C、N 的主要来源;另一方面,豆科牧草混播以后,由于豆科牧草根固氮作用,增加了土壤 N 库,同时,根系死亡、枯枝落叶也是土壤表层 C、N 的主要来源。

3.3 系统 C、N 储量分配格局

研究发现土壤 C、N 储量占整个生态系统的 90% 以上^[33]。这与本研究结果相同。本研究中,0~50 cm 土层土壤 C、N 储量分别占整个系统的 98.69% 和 98.96%,而植物仅占 1.31% 和 1.04%。土壤 C、N 库是最重要的 C、N 来源。3 种措施下,品种对系统 C、N 储量的分配无显著影响,而施肥和混播显著影响了土壤 C、N 储量,其中在尿素+磷酸二铵+有机肥施肥下系统总 C、N 储量最大,分别为 184.45 t·hm⁻² 和 12.51 kg·hm⁻²,75 kg·hm⁻² 混播下系统总 C、N 储量最大,分别为 182.76 t·hm⁻² 和 11.90 kg·hm⁻²。

4 结论

本研究结果表明,品种、施肥和混播均显著影响了土壤 C、N 储量和分配。各时期施肥和混播对 C、N 储量分配影响较大。燕麦乳熟期不同土层 C、N 储量分配模式均表现为 0~10 cm>10~20 cm>20~30 cm>30~40 cm>40~50 cm;总生物 C、N 储量分配分别表现为茎>叶>穗>根、叶>穗>茎>根。0~50 cm 土层 C、N 储量分别占整个系统的 98.69% 和 98.96%,而植物仅占 1.31% 和 1.04%。尿素+磷酸二铵+有机肥处理下,系统总 C、N 储量最大,分别为 184.45 t·hm⁻² 和 12.51 kg·hm⁻²;箭筈豌豆混播 75 kg·hm⁻² 处理下,系统总 C、N 储量最大,分别为 182.76 t·hm⁻² 和 11.90 kg·hm⁻²。本研究,未考虑品种、施肥、混播三因素交互作用的影响,可在今后研究中进一步完善。

参考文献:

[1] 钟杨权威. 长期施氮对旱作麦田土壤碳库平衡及其稳定性影响机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016

[2] 张开, 罗怀良, 王睿. 安岳县 2008-2012 年农田作物植被碳储量及其空间分布[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1860-1866

[3] 张宏运, 张艳芳, 位贺杰, 王妹. 近 20 年来陕西省农作物碳截获

的时空特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 65-71

[4] 肖春艳, 贺玉晓, 赵同谦, 李少华, 焦立恒. 退耕湿地典型植被群落土壤氮分布及储量特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 139-147

[5] 白秀玲, 周云凯, 王杰华, 李文丽. 鄱阳湖湿地灰化苔草生长季氮磷含量与储量的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 1-8

[6] 代冬雪, 旭日, 徐兴良, 王迎红. 西藏纳木错高寒草原豆科与非豆科优势植物群落碳氮储量及收支的对比研究[J]. 生态科学, 2015, 34(5): 29-37

[7] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 王健波, 何文清, 陈保青, 刘恩科. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 240-247

[8] Yang X L, Gao W S, Zhang M, Chen Y Q, Sui P. Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 76(2): 131-139

[9] 李硕. 秸秆还田与减量施氮对土壤固碳、培肥和农田可持续生产的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017

[10] 张春华, 王宗明, 任春颖, 宋开山, 张柏, 刘殿伟. 松嫩平原玉米带土壤碳氮储量的空间特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 631-639

[11] 谷家川, 查良松. 皖江城市带农作物碳储量动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(12): 1507-1513

[12] 刘阳. 玉米农田生态系统碳储量变化特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012

[13] 雒明伟, 毛亮, 李倩倩, 赵旭, 肖玉, 贾婷婷, 郭正刚. 青藏高原路取土迹地恢复植物群落与土壤的碳氮磷化学计量特征研究[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 1-10

[14] 余欣超, 姚步青, 周华坤, 金艳霞, 杨月娟, 王文颖, 董世魁, 赵新全. 青藏高原两种高寒草甸地下生物量及其碳分配对长期增温的响应差异[J]. 科学通报, 2015, 60(4): 379-388

[15] 娜仁图雅. 氮肥对燕麦生物固碳量及土壤碳储量的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013

[16] 尚辉, 孙智广, 陈慧杰, 海江波, 黄亚萍. 不同施肥对作物碳储量及土壤碳固定的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(11): 65-70

[17] 陈娟, 马忠明, 刘莉莉, 吕晓东. 不同耕作方式对土壤有机碳、微生物量及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 667-675

[18] Zhou Z Y, Sun O J, Huang J H, Li L H, Liu P, Han X G. Soil carbon and nitrogen stores and storage potential as affected by land-use in an ag-ro-pastoral ecotone of northern China[J]. Biogeochemistry, 2007, 82(2): 127-138

[19] 张法伟, 李英年, 汪诗平, 赵新全. 青藏高原高寒草甸土壤有机质、全氮和全磷含量对不同土地利用格局的响应[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3): 323-326, 334

[20] 彭阳, 白彦锋, 姜春前, 徐睿, 刘秀红. 耕地造林和撂荒 2 种植被恢复方式碳储量差异[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2): 235-242

[21] 杜宝红, 高翠萍, 哈达朝鲁. 不同放牧强度对锡林郭勒典型草原生产力及碳储量的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 139-146, 152

- [22] 魏猛,张爱君,李洪民,唐忠厚,陈晓光,王会,诸葛玉平,娄燕宏. 长期不同施肥对潮土有机碳储量的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(1): 233-238
- [23] 胡莹洁,李月,孔祥斌,段增强,陆明环. 1980-2010年北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 1-11
- [24] 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 301-308
- [25] 张瑜. 陇中黄土高原雨养农区草地不同利用方式对土壤的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2017
- [26] 刘文辉,张英俊,师尚礼,孙建,魏小星. 高寒地区燕麦 (*Avena sativa* L.) 人工草地生物量分配对施肥和混播措施的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 398-407
- [27] 刘文辉,张英俊,师尚礼,魏小星,张永超. 高寒地区燕麦人工草地生物量积累对施肥和箭筈豌豆混播水平的响应[J]. 草原与草坪, 2017, 37(2): 35-42
- [28] 张凯,陈年来,顾群英,王小娟,刘斌. 不同抗旱性小麦气体交换特性和生物量积累与分配对水氮的响应[J]. 核农学报, 2016, 30(4): 797-804
- [29] 张健. 呼伦贝尔人工草地碳储量的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012
- [30] 孔毅明. 施肥措施对稻田土壤碳、氮积累的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012
- [31] 申晓慧,姜成,李如来,李建东,张华,郑海燕,郭伟,孙力,冯鹏. 苜蓿与草地羊茅单混播根系生理变化与抗寒性的关系[J]. 核农学报, 2016, 30(10): 2065-2071
- [32] 陈露. 黄土高原原区多年生栽培草地表层土壤碳库组成及其特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2010
- [33] 丁晨曦. 山东省结缕草暖性草丛生态系统固碳特征及影响因子[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013

Effect of Different Agronomy Treatments on the Carbon and Nitrogen Stock and Allocation of the Oat Cultivation Grassland on Alpine Meadow

LIU Wenhui QIN Yan* LIANG Guoling JIA Zhifeng

(Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau/Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Xining, Qinghai 810016)

Abstract: To reveal the carbon and nitrogen storage allocation mechanism of the oat cultural grassland, the study investigated the effect of the varieties, fertilization level and legume mixture on the carbon and nitrogen storage allocation. Oats varieties, levels of nutrient addition and four legume mixture levels were designed to analysis the carbon and nitrogen stock and allocation characters under different soil depth. As the results showed, the factors of variety, fertilizer and mixture significantly affect the soil carbon and nitrogen storage, the effect of fertilizer and mixture are greater. Under the IM + OM treatment, the system carbon and nitrogen storage are greater than the other fertilizer treatments (184.45 t·hm⁻² and 12.51 kg·hm⁻²), the carbon and nitrogen storage under the legume mixture of 75 kg·hm⁻² are much higher than the other mixture levels (182.76 t·hm⁻² and 11.90 kg·hm⁻²). The distribution model of soil carbon and nitrogen sequestration in different soil layers were 0~10 cm>10~20 cm>20~30 cm>30~40 cm>40~50 cm at the milk stage of oats. The carbon and nitrogen decreased as the soil depth increased, and the carbon allocation at the different soil layers is 27.35%, 24.50%, 21.39%, 14.38% and 11.08%, and the nitrogen allocation at the different soil layers is 28.62%, 24.43%, 17.95%, 15.47% and 12.49%, respectively. The carbon and nitrogen storage at the 0~50 cm soil layer took up 98.69% and 98.96%, while the plant only took up 1.31% and 1.04%, especially for plant stem, leaf, ear and root on take up 0.58%, 0.30%, 0.28% and 0.15% of carbon, and 0.28%, 0.42%, 0.29% and 0.06% of nitrogen, respectively. This finding provides a theoretical basis for studying the carbon and nitrogen storage allocation of the cultural grassland on Alpine Meadow.

Keywords: alpine area, oats cultural grassland, carbon and nitrogen storage, carbon and nitrogen allocation