

青藏高原人工草地土壤微生物量碳及酶活性动态变化特征

王 榛^{1,2}, 马晓林³, 刘 攀¹, 吕燕花¹, 李香芬¹, 周华坤⁴, 魏胜强⁵, 王文颖¹

1. 青海师范大学 生命科学学院, 西宁 810008

2. 兰州大学 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730020

3. 青海省林业厅, 西宁 810001

4. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008

5. 青海省祁连县林场, 青海 祁连 810499

摘要: 在青海省三江源地区不同高寒人工草地选取人工建植垂穗披碱草、星星草、冷地早熟禾草地为研究对象, 探讨不同建植年限(2 a、4 a)人工草地土壤微生物量碳及土壤脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶在生长季内(6-9月)的动态变化特征, 了解土壤微生物量碳和土壤酶活性之间的相互关系, 为人工草地生态系统的管理提供参考依据. 结果表明: 不同建植年限3种人工草地土壤微生物量碳均呈显著季节变化; 同一土壤深度, 垂穗披碱草、星星草和冷地早熟禾人工草地的土壤微生物量碳差异显著; 同一人工草地、不同酶活性随生长季在一定范围内波动, 具有显著的季节变化特征. 不同人工草地同一土壤酶活性的季节变化不同; 高寒人工草地土壤微生物量碳及其酶活性不仅受土壤温度、土壤水分和气温等的影响, 还受牧草种类、建植年限、生长月份及其交互作用的影响; 不同人工草地土壤微生物量碳与土壤酶活性呈显著相关关系, 不同酶的活性之间也存在显著的相关关系.

关键词: 高寒草地; 微生物量碳; 脲酶; 磷酸酶; 季节动态

中图分类号: Q145 文献标识码: A 文章编号: 0455-2059(2018)04-0472-08

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2018.04.007

Dynamic changes of soil microbial biomass carbon and soil enzyme activities in alpine artificial grasslands

Wang Zhen^{1,2}, Ma Xiao-ling³, Liu Pan¹, Lü Yan-hua¹, Li Xiang-feng¹, Zhou Hua-kun⁴, Wei Shen-qiang⁵, Wang Wen-ying¹

1. School of Life Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

2. State Key Laboratory of Grassland and Agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

3. Forestry Department of Qinghai Province, Xining 810001, China

4. Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Region of Qinghai Province, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

5. Qilian County Forest Farm, Qilian 810499, Qinghai, China

收稿日期: 2017-11-16 修回日期: 2017-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501906-1, 2016YFC0501901-05); 国家自然科学基金项目(41761107); 青海省自然科学基金项目(2016-ZJ-913); 大学生本科生科技创新项目(qhnxskj2017022); 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)

作者简介: 王 榛(1991-), 男, 甘肃通渭人, 博士研究生, e-mail: wangzh17@lzu.edu.cn, 研究方向为草地生态学; 王文颖(1973-), 女, 青海湟源人, 教授, 博士, e-mail: wangwy0106@163.com, 研究方向为草地生态学, 通信联系人.

Abstract: Artificial grassland of *Elymus nutans*, *Puccinellia tenuiflora* and *Poa crymophila* were selected as the research objects in different alpine artificial grasslands in the Sanjiangyuan Area of Qinghai Province. Soil microbial biomass carbon (SMBC) and soil enzyme (urease, alkaline phosphatase, nitrate reductase) activities were analyzed aiming to reveal their growth season (June-September) dynamic characteristics and the relationships between the SMBC and soil enzyme activities. This study could provide a reference for the restoration and management of degraded alpine grassland ecosystem. The results indicated that the content of SMBC in divers aged artificial grasslands varied observably during the growing season. Grassland cultivated *Elymus nutans* was more conducive to the accumulation of SMBC than *Puccinellia tenuiflora* and *Poa crymophila* grassland. The activities of soil urease, alkaline phosphatase and nitrate reductase in alpine artificial grasslands fluctuated in a certain range during the growing season, i.e. having significant seasonal variations. The same soil enzyme activity in different artificial grasslands was also diverse. The SMBC content and soil enzyme activity was not only significantly affected by soil and climate factors such as soil temperature, soil moisture and air temperature, but also by grass species, cultivation periods and growth months as well as their interactions. A correlation analysis showed that there was a obvious correlativity between SMBC and different soil enzyme activities in the alpine artificial grassland, and there also existed a marked significant correlation between different soil enzyme activities.

Key words: alpine grassland; microbial biomass carbon; urease; phosphatase; seasonal dynamics

青藏高原是世界上海拔最高、面积最大、形成最晚的高原,也是中国面积最大的天然草地,青藏高原草地生态系统对区域生态系统甚至全球碳动态平衡影响巨大^[1-2]。青藏高原也是中国重要的生态安全屏障和畜牧业基地之一,草地面积约 $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。近年来,由于气候变化和人类活动的干扰,草地退化严重,青藏高原退化草地面积约为 $4.251 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占可用面积的33%,草地退化不仅严重限制了区域经济、社会、环境的可持续发展,而且严重威胁着中国和东亚地区的生态安全^[3-5]。随着高寒草地退化的日益严重,植被恢复与重建已成为一个重要课题。适度建植人工草地,开展种草养畜与天然草场协调、合理利用,不仅可以解决退化草地植被的快速恢复和生态重建问题,还可解决草地畜牧业饲料季节不平衡的问题^[6-8]。

土壤中植物-微生物相互作用是植物多样性影响生态系统功能重要的组成部分^[9],土壤微生物在生物地球化学循环中扮演着非常重要的角色^[9],土壤微生物是土壤有机质和土壤养分C、N、P、S等转化和循环的动力,并参与土壤中有有机质的分解、腐殖质的形成、土壤养分的转化循环等生化过程^[10]。土壤微生物量碳(soil microbial biomass carbon, SMBC)的变化对陆地生态系统的养分循环发挥重要作用,尤其对土壤有机碳变化的响应特别敏感^[11]。土壤酶和土壤微生物的关系被认为是土壤质量的潜在指标,易于测定、能够快速响应土壤管理的变化^[12],土壤微生物产生的胞外酶能够催化降解包含在土壤有机聚合物中的

碳,可以矿化植物可利用的营养和养分的保留^[13],碳循环酶潜在活性能增加无机氮的可利用性,而氮循环酶潜在活性可增强碳的可利用性^[14],参与土壤中元素循环的酶活性跟土壤有机质呈显著正相关关系^[15-17]。草地生态系统中土壤酶活性大致反映了草地土壤生物化学过程的相对强度^[18]。因此,研究土壤微生物量和土壤酶活性对加深认识人工草地生态系统土壤养分转化和循环,了解草地生态系统的结构和功能具有重要意义。

近年来,对青藏高原高寒人工草地生态系统的研究主要围绕在群落特征^[6, 19]、群落结构与土壤养分的关系、放牧对人工草地影响^[20]及生态系统 CO_2 交换^[21]等方面,针对高寒人工草地SMBC和酶活性动态特征的研究目前还不多见。本研究以青藏高原高寒人工草地生态系统为研究背景,以青海省牧草良种繁殖场不同高寒牧草建植的人工草地为研究对象,研究不同建植期人工草地SMBC及土壤酶活性沿生长季的动态变化特征,了解人工草地微生物群落与地下生态过程的相互关系,为退化生态系统的恢复和管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究地点在青海省海南藏族自治州同德县境内的青海省牧草良种繁殖场,地理位置为 $35^\circ 00' 09'' \text{N}$, $100^\circ 00' 09'' \text{E}$,位于同德巴滩地区,海拔3 280 m,年均降水量429.8 mm,年均温 0.2°C , $>0^\circ \text{C}$ 的活动积温 $1 503.0^\circ \text{C}$,牧草生长季内的活动积温 $1 309.0^\circ \text{C}$,

无绝对无霜期,地势平坦.草地类型主要以温性草原为主,土壤类型为暗栗钙土.植物生长季为6-9月.

1.2 样地设置

在同德牧草良种繁殖场选择种植2 a、4 a的单播人工草地进行研究.单播牧草为垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)和冷地早熟禾(*Poa crymophila*),单播实验小区共18个(3种牧草×2个龄级×3个重复),小区面积为3 m×4 m,小区间距1 m,各小区牧草于9月初刈割收获,留茬高度5 cm.

1.3 取样及分析

于植物生长季在每个小区分别随机收集3个0~10、10~20 cm的土核(直径为3.5 cm),同一小区和同一深度采集的土壤混合成1个样品.用铝盒分0~10、10~20 cm层取大约30 g土样测定土壤含水量.收集的土样在野外立即过2 mm筛,移出砾石和根系后,装入自封袋立即带回实验室保存,取出一部分新鲜土样4℃保存,用于土壤酶活性的测定,其余土壤样品-20℃冷冻保存,用于SMBC测定.

SMBC测定采用氯仿熏蒸提取法——K₂SO₄浸提法,浸提液中的微生物量碳采用重铬酸钾氧化滴定法测定^[22-23].土壤脲酶(S-UE)采用靛酚蓝比色法测定,单位(U/g)定义为24 h每克土样中产生1 μg NH₃-N的量为一个S-UE活力单位;碱性磷酸酶(S-ALP)活性测定采用磷酸苯二钠比色法,活性单位(U/g)定义为37℃中每克土壤每天释放1 μmol酚的量为一个S-ALP活力单位;硝酸还原酶(S-NR)活性测定采用磺胺比色法.硝酸还原酶作用于NO₃⁻使之还原为NO₂⁻,NO₂⁻与磺胺和α-萘胺在酸性条件下生成粉红色化合物,用比色法在520 nm下读取光密度值,单位定义为24 h每克土样中产生1 μmol NO₂⁻的量为一个S-NR活力单位.

1.4 计算及统计分析

基本数据处理采用Excel处理.参数间差异显著性比较采用单因素方差分析法,主效应的多重比较采用最小显著差数法,参数间相关性分析采用皮尔逊相关法,均采用SPSS 17.0完成,所有图采用Origin 8.5完成.

2 结果与分析

2.1 人工草地SBMC生长季节动态

2 a人工草地生长季SBMC动态变化见图1

a、b. 0~10 cm土层,垂穗披碱草、星星草、冷地早熟禾建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 分别为 $1.752 3 \times 10^{-4} \sim 2.102 7 \times 10^{-3}$ 、 $4.256 3 \times 10^{-4} \sim 1.522 1 \times 10^{-3}$ 、 $5.998 5 \times 10^{-4} \sim 1.240 1 \times 10^{-3}$,总体上SMBC最低值分别出现在6、7月,9月达到最高值.10~20 cm土层,垂穗披碱草、星星草、冷地早熟禾建植人工草地生长季 $w(\text{SMBC})$ 分别为 $5.291 1 \times 10^{-4} \sim 2.113 0 \times 10^{-3}$ 、 $8.530 2 \times 10^{-4} \sim 1.731 6 \times 10^{-3}$ 、 $5.451 5 \times 10^{-4} \sim 8.211 5 \times 10^{-4}$,最低值分别出现在6、7月,在9月达到最高值.生长季内垂穗披碱草、冷地早熟禾建植人工草地SMBC均表现出先升高再降低最后升高,呈“N”形波动趋势;星星草建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 6-8月呈“V”形波动趋势.整个生长季,2 a人工草地平均 $w(\text{SMBC})$ 表现为:垂穗披碱草>星星草>冷地早熟禾.

4 a人工草地 $w(\text{SMBC})$ 季节动态变化见图1c、d. 0~10 cm土层,垂穗披碱草、星星草、冷地早熟禾建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 分别为 $4.251 8 \times 10^{-4} \sim 1.020 3 \times 10^{-3}$ 、 $3.014 9 \times 10^{-4} \sim 1.200 7 \times 10^{-3}$ 、 $2.911 8 \times 10^{-4} \sim 1.011 5 \times 10^{-3}$,垂穗披碱草、星星草建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 生长季内呈先升高后降低动态趋势,8月达到峰值,随后迅速降低,9月降至最低;冷地早熟禾建植人工草地则随生长季峰值出现在6月.10~20 cm土层,垂穗披碱草、星星草、冷地早熟禾建植人工草地生长季 $w(\text{SMBC})$ 分别为 $3.169 5 \times 10^{-4} \sim 1.505 8 \times 10^{-3}$ 、 $5.596 8 \times 10^{-4} \sim 9.353 4 \times 10^{-4}$ 、 $6.346 6 \times 10^{-4} \sim 8.384 5 \times 10^{-4}$,整个生长季,垂穗披碱草、冷地早熟禾建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 均表现出先升后降的动态,呈“A”形,峰值出现在8月;星星草建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 则为“N”形波动.相比2 a人工草地,4 a草地平均 $w(\text{SMBC})$ 明显下降.方差分析表明(表1):高寒人工草地 $w(\text{SMBC})$ 受牧草种类、建植年限、月份及其交互作用影响显著,不同深度变化规律不明显.

2.2 人工草地土壤酶活性生长季节动态特征

2 a人工草地土壤酶活性季节动态见表2.垂穗披碱草、星星草建植人工草地S-UE活性沿生长季逐渐降低,最低值出现在9月,冷地早熟禾建植人工草地S-UE活性动态则表现出先升高后下降的“A”型趋势,8月到达最高.土壤S-ALP活性季节变化在垂穗披碱草、星星草建植人工草地一致,均表现出“N”形波动趋势,9月最高,6月最低.冷

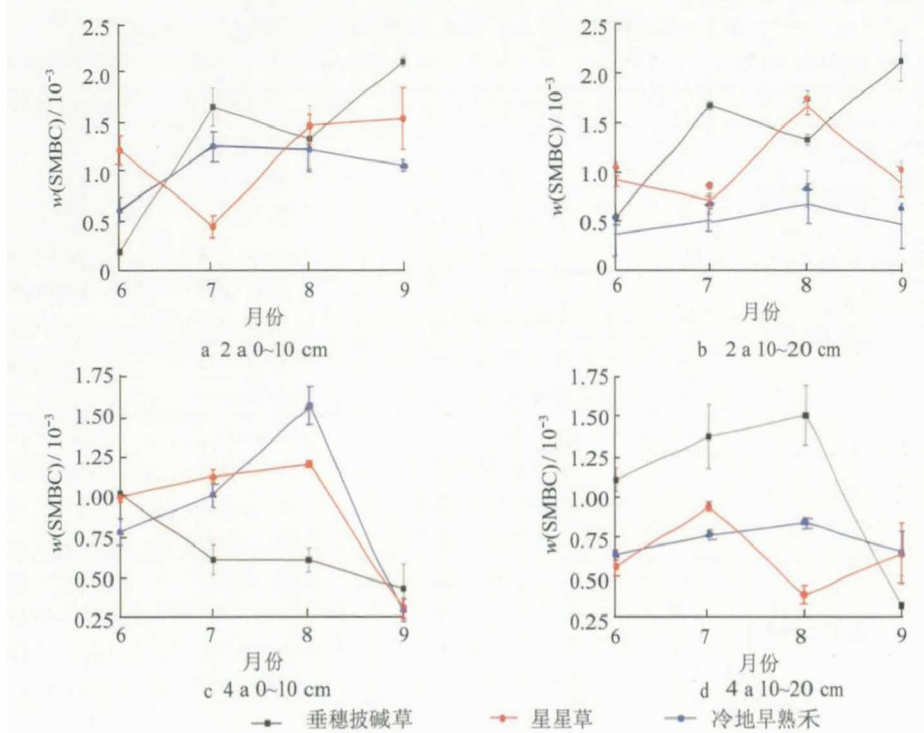


图1 不同建植年限人工草地 w(SMBC) 季节动态

Fig. 1 Monthly dynamics of w(SMBC) in artificial grassland of different cultivation years

表1 不同牧草品种、建植年限、生长季节对高寒人工草地 w(SMBC)、土壤酶活性双因素方差分析

Table 1 Results of two-way ANOVA for the analysis the main effects of the pasture types, season, cultivation years and their interaction for w(SMBC) and soil enzyme activity in artificial grassland

解释变量	w(SMBC)		S-UE 活性		S-ALP 活性		S-NR 活性	
	df	F	df	F	df	F	df	F
品种	2	19.82	2	12.03	2	1.074	2	361.29
种植年限	1	67.96	1	1.21	1	22.259	1	82.58
月份	3	21.01	3	83.07	3	14.611	3	131.91
品种×种植年限	2	14.39	2	3.69	2	7.312	2	14.69
品种×月份	6	8.64	6	42.44	6	9.662	6	138.78
种植年限×月份	3	43.30	3	17.98	3	33.806	3	50.90

除建植年限 ($P=0.278$) 对 S-UE 活性没有显著影响外, 其他变量及其交互作用均显著影响 w(SMBC)、S-UE 活性、S-ALP 活性、S-NR 活性 ($P<0.001$).

地早熟禾建植人工草地 S-ALP 活性沿生长季呈“V”型变化, 最高值出现在 6 月. 不同草地中, S-NR 活性季节动态分别呈“N”“A”“V”形变化, 最高值分别出现在 9、8、6 月.

4 a 人工草地土壤酶活性季节动态见表 2, 垂穗披碱草建植人工草地 S-UE、S-ALP 活性随生长季表现为先升高再下降的状态, 极大值出现在 7 月, S-NR 活性则沿生长季迅速下降, 9 月下降到最低值. 星星草建植人工草地 S-UE 活性随季节变化缓慢下降, 而 S-ALP、S-NR 活性分别为“N”“V”型波动趋势, 最高值均出现在 7 月; 冷地早熟禾建植人工草地 3 种酶活性动态变化均呈“A”型, 最大值分别出现在 7、8、9 月. 方差分析表明(表 1): 牧草

种类、人工草地建植年限、生长月份及交互作用对土壤 S-ALP 活性、S-NR 活性均达到极显著影响 ($P<0.001$).

2.3 SBMC 与土壤酶活性相关性分析

SBMC 与土壤酶活性相关性分析见表 3. 除 2 a 星星草建植人工草地外, 其他人工草地土壤酶活性和 w(SMBC) 呈显著相关关系, 部分达到极显著水平, 如 2 a 垂穗披碱草建植人工草地 w(SMBC) 与 S-UE 活性呈极显著负相关关系, 与 S-ALP 活性呈极显著正相关关系; 4 a 星星草建植人工草地 S-UE 活性与 w(SMBC) 呈显著正相关关系; 不同酶活性之间也存在显著甚至极显著的相关关系, 如 2 a 冷地早熟禾建植人工草地 3 种酶活性之间相关

表2 不同建植年限人工草地土壤酶活性季节动态

Table 2 Seasonal dynamics of soil enzyme activity in artificial grassland of different cultivation years

建植年限	品种	月份	S-UE活性/(U/g)	S-ALP活性/(U/g)	S-NR活性/(U/g)
2 a	垂穗披碱草	6	1 011.83 (2.02) ^{aA}	17.05 (0.03) ^{bB}	49.45 (1.20) ^{bB}
		7	943.08 (29.64) ^{bA}	18.59 (0.02) ^{bC}	53.55 (0.34) ^{bB}
		8	924.72 (25.97) ^{bB}	17.31 (0.02) ^{aA}	23.94 (0.79) ^{bB}
		9	891.22 (8.49) ^{bA}	20.94 (0.29) ^{aA}	56.94 (4.78) ^{bB}
	星星草	6	1 004.26 (2.28) ^{aA}	16.58 (0.08) ^{bC}	52.58 (1.96) ^{bB}
		7	958.52 (1.34) ^{bA}	18.86 (0.01) ^{bB}	68.69 (6.92) ^{bB}
		8	914.23 (21.90) ^{bB}	16.69 (0.08) ^{bB}	86.92 (4.57) ^{aA}
		9	839.65 (13.15) ^{bB}	20.46 (0.39) ^{aA}	76.16 (2.80) ^{bA}
	冷地早熟禾	6	863.54 (23.89) ^{bB}	20.97 (0.04) ^{aA}	119.23 (7.81) ^{aA}
		7	968.71 (6.31) ^{bA}	19.07 (0.03) ^{aA}	90.17 (3.74) ^{bA}
		8	1 046.79 (25.58) ^{aA}	17.41 (0.05) ^{dA}	21.90 (0.60) ^{bB}
		9	861.79 (7.84) ^{bB}	20.44 (0.14) ^{bA}	77.87 (0.89) ^{bA}
4 a	垂穗披碱草	6	930.98 (1.22) ^{bB}	17.42 (0.02) ^{bA}	137.56 (3.38) ^{aA}
		7	1 029.15 (3.20) ^{aA}	19.75 (0.06) ^{bC}	47.93 (1.46) ^{bB}
		8	1 011.83 (3.93) ^{bB}	16.86 (0.05) ^{bC}	14.12 (0.27) ^{bC}
		9	847.95 (1.26) ^{bC}	14.93 (0.01) ^{bB}	12.62 (0.73) ^{bC}
	星星草	6	938.85 (0.25) ^{bA}	15.65 (0.02) ^{bC}	124.27 (0.67) ^{aA}
		7	950.65 (1.65) ^{bC}	19.96 (0.04) ^{bB}	123.63 (2.02) ^{aA}
		8	871.55 (5.24) ^{bC}	17.66 (0.05) ^{bB}	41.29 (0.25) ^{bC}
		9	870.68 (2.06) ^{bB}	19.23 (0.01) ^{bA}	65.21 (0.70) ^{bB}
	冷地早熟禾	6	811.26 (1.56) ^{bC}	17.18 (0.02) ^{bB}	24.22 (0.58) ^{bC}
		7	990.85 (2.65) ^{bB}	20.16 (0.01) ^{aA}	48.95 (1.06) ^{bB}
		8	996.97 (1.42) ^{aA}	19.12 (0.02) ^{bA}	144.77 (1.35) ^{aA}
		9	910.88 (0.69) ^{aA}	13.12 (0.01) ^{bC}	107.97 (0.37) ^{bA}

a~d分别表示2 a、4 a人工草地土壤酶活性不同生长季节间差异显著 ($P<0.05$); A~C分别表示同一生长季节2 a、4 a不同人工草地间土壤酶活性差异显著 ($P<0.05$).

表3 不同人工草地土壤酶活性和 $w(\text{SBMC})$ 相关系数Table 3 Correlative coefficients between $w(\text{SBMC})$ and soil enzyme activity under different artificial grassland

品种	垂穗披碱草建植人工草地				星星草建植人工草地			
	$w(\text{SBMC})$	S-UE活性	S-ALP活性	S-NR活性	$w(\text{SBMC})$	S-UE活性	S-ALP活性	S-NR活性
2 a	$w(\text{SBMC})$	1			1			
	S-UE活性	-0.759 ^a	1		-0.417	1		
	S-ALP活性	0.817 ^a	-0.637 ^b	1	-0.275	-0.691 ^b	1	
	S-NR活性	0.184	0.059	0.588 ^b	1	0.490	-0.681 ^b	0.181
4 a	$w(\text{SBMC})$	1			1			
	S-UE活性	0.768 ^a	1		0.702 ^b	1		
	S-ALP活性	0.665 ^b	0.822 ^a	1	0.079	-0.089	1	
	S-NR活性	0.447	-0.021	0.315	1	0.521	0.958 ^a	0.079
品种	冷地早熟禾建植人工草地							
	$w(\text{SBMC})$	S-UE活性	S-ALP活性	S-NR活性				
2 a	$w(\text{SBMC})$	1						
	S-UE活性	0.592 ^b	1					
	S-ALP活性	-0.643 ^b	-0.925 ^a	1				
	S-NR活性	-0.587 ^b	-0.755 ^a	0.872 ^a	1			
4 a	$w(\text{SBMC})$	1						
	S-UE活性	0.596 ^b	1					
	S-ALP活性	0.789 ^a	0.483	1				
	S-NR活性	0.362	0.597 ^b	-0.160	1			

a代表 $P<0.01$; b代表 $P<0.05$.

性均到达极显著水平, S-UE活性与S-ALP活性、S-NR活性表现为负相关关系, S-ALP活性与S-NR活性表现为正相关关系, 4 a 星星草建植人工草地S-UE活性和S-NR活性呈极显著正相关关系。

3 讨论

3.1 高寒人工草地SBMC季节动态

土壤温度和水分季节变化直接控制着生态系统中微生物量和酶活性波动^[24], SMBC与土壤湿度、土壤温度、降雨、相对湿度、平均气温等非生物因素有显著正相关关系^[25], 环境气温和土壤温度是SMBC的直接影响因素^[26]。在高寒草甸生态系统中, 土壤水分是调节土壤微生物代谢及物质转化的关键因子^[27]。土壤微生物量季节性涨落主要与土壤中可利用碳和养分资源的限制、植物生长节律有关^[28]。在人工草地建植初期, 草地群落处于物种组成单一、生产力高且比较稳定的阶段, 加之实施人为管理(施肥、除草等), 群落结构简单、土壤养分质量分数相对较高^[29], 退化高寒草甸上不同建植年限人工草地各菌群微生物量和微生物总量存在很大差异^[30]。在土壤层次上, 4 a 草地土壤熟化程度更高、土壤肥力呈下降趋势^[31-32]。滕应等^[33]发现种植不同牧草使矿区土壤根际微生物量碳发生了显著变化, 不同牧草根际微生物群落利用碳源种类和数量存在明显差异, 牧草生长过程中, 不同草地类型、植被结构类型不同, 对土壤表面的覆盖程度不尽相同, 造成了土壤温度、湿度的差异。

本研究中2 a 草地生产力比较高, 群落结构简单, 4 a 草地开始出现杂草入侵, 群落类竞争开始加剧的生长发育、枯枝落叶物多少有别, 影响了土壤微生物数量和活动状况^[34-35], 根系分泌物也有可能影响SMBC的季节波动。李娇等^[36-37]发现在不同林龄下, 根际土中土壤微生物量碳均显著高于非根际土, 且随林龄的增加差异增大, 物种多样性与群落生产力之间可能没有必然的因果关系, 土壤肥力通过决定植物群落的物种属性而成为决定群落生产力的主导因素^[36]。高寒人工草地生态系统生长季雨热同期, 土壤微生物在生长季变化活跃。不同高寒人工草地 $w(\text{SMBC})$ 在一定范围内呈现出明显的季节变化, 同一土壤深度, 垂穗披碱草、星星草、冷地早熟禾建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 之间变化差异显著; 不同牧草草地 $w(\text{SMBC})$ 在土壤深分布水平变化不明显; 时间尺

度上, 建植4 a 人工草地 $w(\text{SMBC})$ 季节变化相比2 a 草地出现较大扰动。高寒人工草地 $w(\text{SMBC})$ 不仅受到土壤温度、水分、气温等土壤和气候因素的影响, 还受牧草种类、建植年限、生长月份及其相互作用的影响显著。垂穗披碱草建植人工草地相比其他两种类型草地更有利于SMBC的积累。

3.2 高寒人工草地土壤酶活性季节动态

在草地生态系统中, 草地退化程度、施肥、放牧、土壤微生物、草地生长年限及土壤理化性质都是影响土壤酶活性的影响因子^[19]。本研究在不同人工草地, 不同土壤酶活性均表现出明显的季节变化, 主要原因是在牧草的生长季, 雨热同期, 土壤温度和湿度呈现比较明显的季节变化, 直接影响土壤酶活性。它们通过影响植物的生长节律、与土壤微生物及植物对土壤养分的竞争关系来影响土壤酶活性的季节波动^[37]。在季节尺度上, 不同牧草之间同一土壤酶活性差异显著。例如2 a 垂穗披碱草、星星草建植人工草地土壤S-UE活性均呈逐渐下降趋势, S-UE活性均表现为升-降-升的“N”型季节波动, 冷地早熟禾建植人工草地则没有表现出相似的趋势, S-UE活性为先上升后下降趋势, 其原因是不同植被类型的凋落物和根系分泌物通过影响土壤微生物, 从而影响土壤酶活性^[38]。建群种自身的生物学特性和土壤的理化性质是造成不同群落土壤酶活性存在差异的主要原因, 如根系分布特点及分泌物的不同、凋落物数量及成分的差异、根系共生菌数量和种类的不同等^[39], 植物的这些特性均对土壤的理化性质产生较大影响, 也会对微生物的种类、增殖和代谢活动产生影响, 进而体现在微生物量和酶活性的差异上^[29], 因此不同人工草地的土壤酶活性季节变化并不一致。S-UE、S-ALP、S-NR等酶不仅参与土壤中氮素、磷素的循环, 而且跟土壤有机质质量分数有显著关系^[16-18]。本研究结果表明: 除2 a 星星草建植人工草地外, 其余不同建植年限、不同草地类型土壤酶活性跟土壤 $w(\text{SMBC})$ 均有显著的相关性; 不同建植年限对人工草地土壤S-ALP、S-NR活性有极显著影响, 高寒人工草地土壤酶活性不仅与人工草地的建植年限有关, 还和土壤微生物量碳关系密切。建植人工草地不仅可以改善土壤微生物量, 而且可以改变土壤酶活性的动态, 从而导致土壤功能的改变, 这对高寒退化草地的恢复有一定的指导意义。

4 结论

高寒人工草地生态系统生长季雨热同期, 土壤微生物在生长季变化活跃, 不同高寒人工草地 SMBC 在生长季呈现明显的季节变化, 同一土壤深度, 垂穗披碱草、星星草、冷地早熟禾建植人工草地 $w(\text{SMBC})$ 之间差异显著, 不同草地 $w(\text{SMBC})$ 沿土壤深度变化不明显; 时间尺度上, 4 a 人工草地 $w(\text{SMBC})$ 季节变化相比 2 a 草地出现较大的波动, 高寒人工草地 $w(\text{SMBC})$ 受牧草种类、建植年限、生长月份及其交互作用影响显著; 垂穗披碱草建植人工草地相比其他两种类型草地有更多 SMBC 的积累. 高寒人工草地土壤酶活性随生长季在一定范围内波动, 有显著的季节变化. 2 a 人工草地, 垂穗披碱草、星星草建植人工草地 S-UE 活性变化沿生长季逐渐降低, 冷地早熟禾建植人工草地呈升-降的“A”型动态. 垂穗披碱草、星星草建植人工草地土壤 S-ALP 活性季节变化一致, 均表现出升-降-升的“N”形波动趋势, 冷地早熟禾建植人工草地 S-ALP 活性沿生长季呈降-升的“V”型变化; S-NR 季节动态分别呈“N”“A”“V”形变化. 4 a 人工草地, 垂穗披碱草建植人工草地 S-UE、S-ALP 活性随生长季表现为“A”型动态, S-NR 活性则沿生长季迅速下降, 星星草建植人工草地 S-UE 活性随季节变化缓慢下降, 而 S-ALP、S-NR 活性分别为“N”“V”波动趋势, 冷地早熟禾建植人工草地 3 种酶活性动态变化均呈“A”型. 高寒人工草地土壤酶活性的变化受到季节、牧草种类、土壤理化性质、建植年限及其交互作用的影响. 建植人工草地可以改变土壤环境因子, 通过影响土壤微生物及酶的活性, 从而改变了高寒人工草地有机碳库和养分循环, 因此建植人工草地是高寒退化草地恢复的有效途径之一.

参考文献

- [1] 岳广阳, 赵林, 赵拥华, 等. 青藏高原草地生态系统碳通量研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 166-174.
- [2] 李娜, 王根绪, 高永恒, 等. 青藏高原生态系统土壤有机碳研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(4): 512-519.
- [3] 马玉寿, 王启基. “黑土型”退化草地研究工作的回顾与展望[J]. 草业科学, 1999, 16(2): 5-9.
- [4] 李媛媛, 董世魁, 朱磊, 等. 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4683-4691.
- [5] 刘兴元, 龙瑞军, 尚占环. 青藏高原高寒草地生态系统服务功能的互动机制[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7688-7697.
- [6] 李昂. 青藏高原人工草地群落结构与生产力稳定性关系的生态学机制研究[D]. 兰州: 兰州大学生命科学学院, 2011.
- [7] 王文颖, 李文全, 周华坤, 等. 高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 30-35.
- [8] 张小静, 王文颖, 李文全, 等. 高寒草甸土壤可溶性有机氮库动态变化格局[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2016, 52(5): 623-627.
- [9] Zak D R, Holmes W E, White D C, et al. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links?[J]. Ecology, 2003, 84(8): 2042-2050.
- [10] Fierer N, Strickland M S, Liptzin D, et al. Global patterns in below ground communities[J]. Ecology Letters, 2009, 12(11): 1238-1249.
- [11] 黄懿梅, 陈利顶, 安韶山, 等. 黄土高原典型植物根际对土壤微生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 976-983.
- [12] 王晖, 莫江明, 鲁显楷, 等. 南亚热带森林土壤微生物量碳对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 470-478.
- [13] Dick R P, Breakwell D P, Turco R F, et al. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators[M]//Doran N. Handbook of methods for assessment of soil quality. Madison: SSSA Special Publication, 1996: 247-272.
- [14] Stone M M, Weiss M S, Goodale C L, et al. Temperature sensitivity of soil enzyme kinetics under N-fertilization in two temperate forests[J]. Global Change Biology, 2012, 18(3): 1173-1184.
- [15] Bowles T M, Acosta M V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 252-262.
- [16] 安宁宁, 范伟国, 谭秋平, 等. 不同配比土壤对平邑甜茶苗木生长和土壤微生物及土壤硝酸还原酶的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(6): 1022-1026.
- [17] 程伟, 隋跃宇, 焦晓光, 等. 土壤有机质含量与磷酸酶活性关系研究[J]. 土壤与作物, 2008, 24(3): 305-307.
- [18] 杨敬天, 苏智先, 胡进耀, 等. 珙桐林土壤有机质与酶活性的通径分析[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(2): 164-167.
- [19] 向泽宇, 王长庭, 宋文彪, 等. 草地生态系统土壤酶活性研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(10): 1801-1806.
- [20] 李昂, 杜国祯. 青藏高原东缘人工草地群落结构和土壤养分对选择效应的影响[J]. 生态科学, 2014, 33(2):

- 307-312.
- [21] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 放牧强度对高寒混播人工草地群落特征及地上现存量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(1): 10-16.
- [22] 吴力博, 古松, 赵亮, 等. 三江源地区人工草地的生态系统 CO₂净交换、总初级生产力及其影响因子[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7): 770-780.
- [23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [24] 李振高. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 322-325.
- [25] Bell C, McIntyre N, Cox S, et al. Soil microbial responses to temporal variations of moisture and temperature in a Chihuahuan Desert Grassland[J]. *Microbial Ecology*, 2008, 56(1): 153-167.
- [26] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 220-227.
- [27] 赵先丽, 周广胜, 周莉, 等. 盘锦芦苇湿地土壤微生物量C的季节动态[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 43-46.
- [28] 王启兰, 曹广民, 王长庭. 高寒草甸不同植被土壤微生物数量及微生物量的特征[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1002-1008.
- [29] 曹成有, 陈家模, 邵建飞, 等. 科尔沁沙地四种固沙植物群落土壤微生物量及酶活性的季节动态[J]. 生态学杂志, 2011, 30(2): 227-233.
- [30] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 三江源区不同建植年代人工草地群落演替与土壤养分变化[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 737-744.
- [31] 杨希智, 王长庭, 字洪标, 等. 三江源区不同建植年限人工草地土壤微生物群落结构特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(2): 341-349.
- [32] 尉海东, 董彬. 鲁东南杨树人工林土壤微生物量碳的时空动态[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 233-238.
- [33] 滕应, 黄昌勇, 龙健, 等. 复垦红壤中牧草根际微生物群落功能多样性[J]. 中国环境科学, 2003, 23(3): 295-299.
- [34] 文都日乐, 李刚, 张静妮, 等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 94-102.
- [35] 梁儒彪, 梁进, 乔明锋, 等. 模拟根系分泌物C:N化学计量特征对川西亚高山森林土壤碳动态和微生物群落结构的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(5): 466-476.
- [36] 李娇, 蒋先敏, 尹华军, 等. 不同林龄云杉人工林的根系分泌物与土壤微生物[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 325-332.
- [37] 代巍, 张荣, 独占彪, 等. 土壤肥力和物种属性决定亚高寒草甸实验群落的生产力[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 45-52.
- [38] 杨文彬, 耿玉清, 王冬梅. 漓江水陆交错带不同植被类型的土壤酶活性[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4604-4612.
- [39] 药静宇, 王国印, 李晨蕊, 等. 不同区域典型植被类型的净生态系统碳交换特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(5): 622-627.

(责任编辑: 王春燕)