



多年生高寒栽培草地土壤微生物生物量及其化学计量特征对氮添加的响应

童永尚^{1, 2, 3}, 张春平^{1, 2, 3}, 董全民^{1, 2, 3*}, 曹 铨^{1, 2, 3}, 俞 旻^{1, 2, 3}, 张正社^{1, 2, 3},
杨增增^{1, 2, 3}, 张小芳^{1, 2, 3}, 张 雪^{1, 2, 3}, 霍丽安^{1, 2, 3}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院 / 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海大学三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘 要: 研究氮添加方式下多年生高寒栽培草地的土壤理化性质和微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)、微生物生物量磷 (MBP) 含量及其生态化学计量特征之间的关系, 对维持多年生高寒栽培草地的暂稳态具有重要意义。以 2019 年建植的青海草地早熟禾 (*Poa pratensis* Qinghai) + 青海冷地早熟禾 (*Poa crymophila* Qinghai) + 青海中华羊茅 (*Festuca sinensis* Qinghai) 混播草地为研究对象, 设置对照 CK (不施氮)、U1 (酰胺态氮 22.5 kg · hm⁻²)、U2 (酰胺态氮 45 kg · hm⁻²)、U3 (酰胺态氮 67.5 kg · hm⁻²)、A (铵态氮 67.5 kg · hm⁻²) 和 N (硝态氮 67.5 kg · hm⁻²) 6 个处理, 对不同处理下的土壤理化性质和微生物生物量及化学计量特征进行分析。结果显示, 不同氮素形态和施氮水平对土壤理化性质和微生物生物量具有显著影响。随着施氮水平的提高, 土壤容重、pH 和微生物生物量碳氮比 (MBC/MBN) 逐渐降低, 土壤速效养分、土壤全量养分、MBC、MBN、微生物生物量碳磷比 (MBC/MBP) 和微生物生物量氮磷比 (MBN/MBP) 逐渐增加。相同氮素水平下不同氮素形态相比较, 铵态氮肥对 MBC/MBN 的降低效果最为明显, 相比 CK 降低了 15.61%; 硝态氮肥对全氮、MBC、MBC/MBP 和 MBN/MNP 的促进作用最为明显。冗余分析表明, 土壤全氮、pH 和有机碳是影响土壤微生物生物量及化学计量特征的敏感指标。尽管氮沉降促进了多年生高寒栽培草地的土壤养分周转和循环, 但给生态环境带来的问题也不容忽视。

关键词: 高寒栽培草地; 暂稳态; 微生物生物量; 化学计量; 氮添加

多年生栽培草地是指将两种或两种以上抗性较强、形态学互补的多年生牧草混合栽培, 形成的具有群落结构稳定和可持续利用等优越性的人工草地^[1]。面对青藏高原高寒地区天然草地退化和草畜矛盾等亟待解决的问题, 多年生混播草地发挥着关键性作用^[2]。一方面, 建植人工草地有效地恢复了退化草地, 使原本裸露的土壤快速被植被覆盖, 从而缓解了水土流失^[3]。另一方面, 建植人工草地改善了土壤理化性质和碳汇能力, 使原本贫瘠的土壤环境得以恢复^[4-5]。再者, 人工草地的饲草产量明显高于天然草地, 有效解决了牧区冬季饲草供应不足等问题^[6]。然而, 在实践过程中发现, 多年生

人工草地在建植后 3 ~ 5 年期间开始退化^[7]。针对这一现象, 学者们开展了大量的施肥试验, 以维持多年生人工草地的生产力暂稳态^[8]。由于青藏高原高寒草地土壤氮限制比较严重, 氮素是限制植物生长的关键因子^[9]。因此, 氮素添加是维持多年生高寒栽培草地暂稳态的必要措施之一。然而, 过量的氮添加导致氮素利用率低和土壤氮素过剩, 不仅造成经济损失, 而且给生态环境构成了严重的威胁^[10-11]。因此, 精准的氮添加技术是实现草地农业可持续发展和生态环境保护双重效益的关键前提, 氮添加方案的确定是一项草地乃至农业生产实践中亟需解决的科学问题^[12]。

土壤微生物是土壤生态系统中十分活跃的生物组分, 具有分解有机质和矿物质等功能^[13], 调控着土壤肥力形成和群落演替等过程, 对土壤碳、氮、磷及生态系统的物质循环具有重要影响^[14-15]。土壤微生物通过对碳、氮和磷元素的固定间接影响土壤碳、氮、磷含量, 从而影响植物

收稿日期: 2023-11-20; 录用日期: 2024-02-03

基金项目: 青海省重点研发与转化计划项目 (2022-NK-134); 国家重点研发计划项目 (2022YFD1302104)。

作者简介: 童永尚 (1996-), 博士研究生, 从事草地生态与环境保护研究。E-mail: tongys2022@126.com。

通讯作者: 董全民, E-mail: qmdong@qhmkky.com。



的生长^[16]。土壤微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN) 和微生物生物量磷 (MBP) 是土壤活性营养库的主要构建者^[17], 是衡量土壤碳、氮、磷养分转化的重要指标, 它可以判断出草地土壤养分的限制状况^[18]。吕晶花等^[19]的一项氮添加研究表明, 土壤理化性质的效应值高于植物群落多样性和生物量。因此, 高寒草地的土壤 MBC、MBN、MBP 化学计量特征受土壤理化特性的影响较大^[20], 而外源氮素添加直接改变了土壤理化性质。以往文献报道中, 关于氮添加对土壤微生物生物量的影响结论尚不统一。王丽娜等^[21]研究发现, 氮添加改变了高寒草地土壤的 MBC 和 MBN, 且随着施氮量的增加显著降低; 而王丽君等^[22]研究发现, 氮添加显著提高了 MBC、MBN 和 MBP; 这种结论的反差很大程度上是由于试验地的环境而造成的。研究表明, 土壤含水量与微生物生物量碳氮比 (MBC/MBN) 和微生物生物量碳磷比 (MBC/MBP) 存在显著负相关关系, 土壤全氮和 MBC/MBP 存在显著负相关关系^[23]。那么氮添加方式下这种关系是否会发生改变有待进一步研究。此外, 氮素形态对土壤环境也有着显著的影响^[24], 目前, 尚未有氮素形态对高寒人工草地土壤 MBC、MBN、MBP 及其化学计量特征的影响研究。

鉴于上述研究背景, 本研究以建植 4 年的多年生人工草地为研究对象, 设置了 3 个氮素形态和 4 个施氮水平, 对不同处理下的土壤理化性质、MBC、MBN、MBP 及化学计量比进行了比较, 并深入分析了两者之间的关系, 旨在明确氮添加对青藏高原高寒人工草地 MBC、MBN、MBP 及其化学计量特征的影响, 并揭示影响 MBC、MBN 和 MBP 及其化学计量特征的主要因素, 以期为多年生高寒人工草地的暂稳态维持提供理论借鉴。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验区位于青海省海南藏族自治州共和县巴卡台农牧场 (100° 55' E, 36° 17' N), 平均海拔 3300 m, 年平均降水量 300 mm, 年蒸发量 2000 ~ 2400 mm, 年平均气温 4.1 °C。试验区冬季寒冷漫长, 夏季温和短暂, 年内干旱少雨且温度偏低, 气温垂直分布明显, 太阳辐射强, 属高原大陆性气候特征。降水季节性分布不均, 主要

集中在 7—10 月。试验地土壤为高山草甸土和黄绵土^[25]。

1.2 试验设计

2022 年 6 月, 以 4 年龄的青海草地早熟禾 (*Poa pratensis* Qinghai) + 青海冷地早熟禾 (*Poa crymophila* Qinghai) + 青海中华羊茅 (*Festuca sinensis* Qinghai) 型 3 组分混播草地为研究对象, 以不施肥 (CK) 作为对照, 设置 U1: 酰胺态氮 (尿素) 22.5 kg · hm⁻² · 年⁻¹、U2: 酰胺态氮 (尿素) 45 kg · hm⁻² · 年⁻¹、U3: 酰胺态氮 (尿素) 67.5 kg · hm⁻² · 年⁻¹、A: 铵态氮 (硫酸铵) 67.5 kg · hm⁻² · 年⁻¹ 和 N: 硝态氮 (硝酸钙) 67.5 kg · hm⁻² · 年⁻¹, 共 6 个处理。采用随机区组方案, 每个处理设有 3 个重复, 共 18 个小区, 小区面积为 4 m × 4 m, 小区间隔 5 m。将称好的肥料分为等量的 2 份, 分别于 6 月上旬和下旬加到 2 L 水中溶解摇匀后装入喷壶, 均匀喷洒在相应的小区, CK 处理喷洒相应的水。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

采用 5 点取样法, 用直径 3.5 cm 的土钻采集 0 ~ 20 cm 土层土壤, 混合均匀后分为 2 份, 其中 1 份用于测定土壤理化性质, 另 1 份储存于 4 °C 环境中, 用于测定土壤 MBC、MBN、MBP 含量^[25]。

1.3.2 测定方法

参照鲍士旦^[26]的《土壤农化分析》进行土壤理化性质 (pH、电导率、含水量、有机碳、全磷、速效氮、有效磷、全碳、全氮、硝态氮和铵态氮) 的测定。土壤微生物生物量 (MBC、MBN、MBP) 测定采用氯仿熏蒸法^[27]。

1.4 数据处理

利用 Excel 2016 对原始数据进行整理, 运用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析 ($P < 0.05$), 以检验不同处理下土壤理化性质和微生物生物量的差异。冗余分析 (RDA) 在线上平台 (<https://www.om-icstudio.cn/tool/65>) 完成, 其他图利用 Origin 2022 绘制。

2 结果与分析

2.1 氮添加对土壤理化性质的影响

由表 1 可知, 氮添加在一定程度上提高了土壤含水量, 但增幅不明显。氮添加显著降低了土壤容重和 pH ($P < 0.05$), 且随着施氮水平的提高土壤容重和 pH 逐渐降低, 相同氮水平条件下, 酰胺态

表 1 不同氮素处理下土壤理化性质变化

指标	CK	U1	U2	U3	A	N
含水量 (%)	15.18 ± 0.23bc	15.14 ± 0.03c	15.63 ± 0.08abc	15.85 ± 0.06a	15.55 ± 0.26abc	15.71 ± 0.15ab
容重 (g · cm ⁻³)	1.59 ± 0.00a	1.53 ± 0.03b	1.51 ± 0.01b	1.43 ± 0.01c	1.51 ± 0.01b	1.50 ± 0.01b
pH	9.25 ± 0.04a	8.92 ± 0.06b	8.87 ± 0.05b	8.78 ± 0.04b	8.87 ± 0.02b	8.84 ± 0.05b
电导率 (μS · cm ⁻¹)	82.80 ± 3.93d	125.87 ± 3.59b	123.87 ± 1.30b	167.27 ± 5.02a	96.53 ± 2.19c	127.87 ± 3.63b
有机碳 (g · kg ⁻¹)	4.65 ± 0.21c	5.36 ± 0.10b	5.84 ± 0.18ab	6.15 ± 0.31a	6.06 ± 0.33ab	6.24 ± 0.18a
铵态氮 (mg · kg ⁻¹)	10.04 ± 0.41c	13.92 ± 2.54bc	15.07 ± 2.13bc	17.88 ± 1.19ab	20.73 ± 1.99a	16.15 ± 0.23ab
硝态氮 (mg · kg ⁻¹)	9.83 ± 0.32b	10.70 ± 0.32b	11.90 ± 0.45a	12.60 ± 0.12a	12.80 ± 0.21a	12.73 ± 0.23a
速效氮 (mg · kg ⁻¹)	10.81 ± 0.20b	15.29 ± 1.21ab	20.75 ± 2.64a	21.18 ± 2.26a	18.00 ± 2.73a	20.85 ± 0.31a
有效磷 (mg · kg ⁻¹)	2.65 ± 0.19e	3.54 ± 0.35de	4.10 ± 0.43cd	4.63 ± 0.19c	5.85 ± 0.08b	7.31 ± 0.42a
全碳 (g · kg ⁻¹)	21.91 ± 1.15b	23.76 ± 1.21ab	27.05 ± 0.70a	28.43 ± 0.17a	26.03 ± 2.2ab	27.27 ± 2.50a
全氮 (g · kg ⁻¹)	0.37 ± 0.02c	0.61 ± 0.03b	0.61 ± 0.03b	0.66 ± 0.01b	0.65 ± 0.02b	0.77 ± 0.05a
全磷 (g · kg ⁻¹)	0.31 ± 0.00c	0.42 ± 0.04b	0.45 ± 0.04b	0.48 ± 0.01ab	0.55 ± 0.01a	0.41 ± 0.03b

注：表中数据为平均值 ± 标准差 (n=3)。不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P<0.05)。

氮对土壤容重和 pH 的作用效果最强。氮添加显著提高了土壤电导率 (P<0.05)，U1 和 U2 处理下的土壤电导率相近，相同氮水平下不同氮素形态相比，对土壤电导率的促进作用表现为酰胺态氮 > 硝态氮 > 铵态氮。此外，随着施氮水平的提高，土壤有机碳、铵态氮、硝态氮、速效氮、有效磷、全碳、全氮和全磷含量均逐渐增加。相同氮水平下不同氮素形态相比较，硝态氮肥对土壤有机碳、有效

磷和全氮的促进作用最强，铵态氮肥对土壤铵态氮和全磷的促进作用最强，酰胺态氮肥对土壤速效氮和全碳的促进作用最强。

2.2 氮添加对土壤微生物生物量及生态化学计量特征的影响

不同氮素处理对土壤微生物生物量及化学计量比具有不同程度的影响 (图 1)。由图 1 (a) 可以看出，施氮水平和氮素形态均未显著改变土壤 MBP

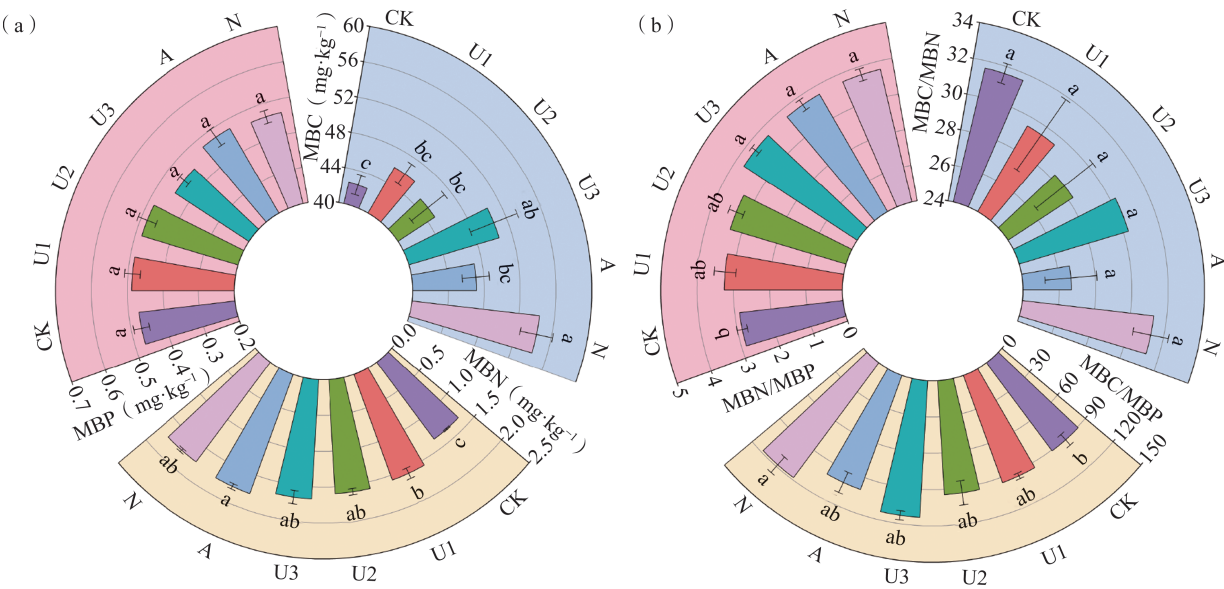


图 1 不同氮素处理下土壤微生物生物量及生态化学计量特征变化

注：同一扇形中不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P<0.05)。MBC、MBN、MBP 分别为微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷；MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP 分别为微生物生物量碳氮比、微生物生物量碳磷比、微生物生物量氮磷比。下同。

含量 ($P>0.05$)。氮添加显著提高了土壤 MBN 含量 ($P<0.05$)，3 种氮形态对 MBN 的促进效果表现为 $A>N>U3$ 。氮添加提高了土壤 MBC 含量，高氮水平下较为显著，3 种氮形态对 MBC 的促进效果表现为 $N>U3>A$ 。

由图 1 (b) 可以看出，氮添加一定程度上降低了土壤 MBC/MBN，但变化不显著 ($P>0.05$)。氮添加提高了土壤 MBC/MBP 和微生物生物量氮磷比 (MBN/MBP)，高氮水平对 MBN/MBP 具有显著的促进作用。3 种氮形态对 MBC/MBP 的作用效果表现为 $N>U3>A$ ，对 MBN/MBP 的促进效果表现为 $N>A>U3$ ，对 MBC/MBN 的削弱效果表现为 $A>U3>N$ 。

2.3 土壤微生物生物量及其生态化学计量特征的影响因素分析

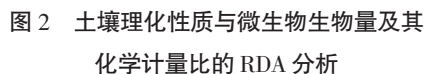
采用 Pearson 相关性分析和 RDA 分析对氮添加方式下土壤理化性质与土壤微生物生物量及其生态化学计量比间的相互关系做了进一步分析。相关性分析表明 (表 2)，土壤 MBC 与 pH 呈极显著负相

关 ($P<0.01$)，与有机碳、有效磷和全氮呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。土壤 MBN 与 pH 和容重呈极显著负相关 ($P<0.01$)，与有机碳、铵态氮、硝态氮、有效磷、全氮和全磷呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。MBP 与速效氮和全碳呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。土壤理化性质对 MBC/MBN 的影响较小。MBC/MBP 与土壤含水量、速效氮、全碳和全氮呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与土壤容重和 pH 呈显著负相关 ($P<0.05$)。MBN/MBP 与土壤容重和 pH 呈极显著负相关 ($P<0.01$)，与土壤含水量、有机碳、速效氮、有效磷、全碳和全氮呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。RDA 分析表明，第一、二排序轴解释率分别为 48.56% 和 22.02%，累计解释率达到 70.58%，说明第一、二排序轴能较好地反映两者之间的相互关系，且具有生物统计学意义 (图 2)。土壤全氮 ($r^2=0.6424$, $P=0.001$)、pH ($r^2=0.6051$, $P=0.002$) 和有机碳 ($r^2=0.6093$, $P=0.002$) 是影响土壤微生物生物量及化学计量特征的主要土壤理化因子。

表 2 土壤微生物生物量及其化学计量特征与土壤理化性质的相关分析

指标	MBC	MBN	MBP	MBC/MBN	MBC/MBP	MBN/MBP
含水量	0.586*	0.443	-0.465	0.105	0.652**	0.616**
容重	-0.518*	-0.591**	0.274	0.140	-0.495*	-0.614**
pH	-0.610**	-0.762**	0.187	0.209	-0.521*	-0.712**
电导率	0.512*	0.337	-0.240	0.140	0.478*	0.409
有机碳	0.591**	0.734**	-0.298	-0.192	0.567*	0.743**
铵态氮	0.398	0.601**	-0.118	-0.258	0.343	0.539*
硝态氮	0.556*	0.722**	-0.028	-0.223	0.415	0.586*
速效氮	0.508*	0.547*	-0.495*	-0.098	0.614**	0.722**
有效磷	0.687**	0.717**	-0.128	-0.066	0.551*	0.637**
全碳	0.529*	0.544*	-0.581*	-0.069	0.671**	0.758**
全氮	0.729**	0.776**	-0.168	-0.112	0.603**	0.715**
全磷	0.284	0.659**	0.024	-0.411	0.208	0.520*

注：*、** 分别表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平、 $P<0.01$ 极显著水平。MBC、MBN、MBP 分别为微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷；MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP 分别为微生物生物量碳氮比、微生物生物量碳磷比、微生物生物量氮磷比。



3 讨论

氮添加给土壤带来的影响与氮素形态和施氮水平密切相关^[28]。本研究中,氮添加在一定程度上提高了人工草地的土壤含水量,这与高浩诚等^[29]研究结论相似,但本研究中增幅不明显,可能与氮添加和取样时间等因素有关。土壤容重和 pH 随着施氮水平的提高而逐渐降低,这与以往大多研究结论一致^[30-31],一方面氮添加会导致土壤酸化^[32],从而降低土壤 pH;另一方面氮添加有利于土壤团聚体的形成,改善了土壤结构,进而降低了土壤容重。此外,酰胺态氮肥对土壤容重和 pH 的作用效果优于铵态氮和硝态氮,可能是因为相比铵态氮肥(硫酸铵)和硝态氮肥(硝酸钙),酰胺态氮肥(尿素)的含氮量较高,对土壤氮限制的解除更为有利。土壤电导率是精细化植物栽培的必要参数之一,可直接反映土壤质量和物理性质等信息,过高会造成烧苗,过低则养分亏缺,影响植物生长^[33-34]。本研究中,对照的土壤电导率为 $82.8 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,远低于其他区域,说明试验区土壤养分较为贫瘠,亟需要制定合理的养管理策略,以改善当前的土壤质量。本研究发现,氮添加显著提高了土壤电导率,对土壤电导率的促进作用表现为酰胺态氮 > 硝态氮 > 铵态氮,这再次说明酰胺态氮在改善土壤性质方面具有明显的优越性。此外,随着施氮水平的提高,土壤有机

3.2 氮添加对土壤微生物生物量及生态化学计量特征的影响

土壤微生物生物量化学计量比决定了微生物活动的方向及有机质养分的释放^[43]。本研究中的土壤 MBC/MBN 大于 30, 说明土壤微生物的生长受到氮源的限制。本研究通过氮添加试验发现, 氮添加一定程度上降低了土壤 MBC/MBN, 但变化不显著, 这是因为氮添加后土壤碳和氮的协同效应所致。氮添加提高了土壤 MBC/MBP 和 MBN/MBP, 高氮水平对 MBN/MBP 具有显著的促进作用。这是由于氮添加增加了 MBC 和 MBN 含量, 但并未显著改变 MBP 含量, 所以氮添加后土壤 MBC/MBP 和 MBN/MBP 有



所增加。此外,本研究中3种氮形态对MBC/MBP的促进效果表现为 $N>U_3>A$,对MBC/MBN的降低效果表现为 $A>U_3>N$,这与不同氮素形态在土壤中的转化速率以及植物的选择性吸收有很大关系。

3.3 土壤微生物生物量及其生态化学计量特征的影响因素分析

土壤理化性质驱动土壤养分利用和矿化作用,因此土壤微生物生物量与土壤养分之间存在很强的相关性^[44]。Pearson相关性分析发现,MBC、MBN含量与土壤pH和容重呈显著负相关($P<0.05$),与有机碳、硝态氮、有效磷、全氮和全磷呈显著正相关关系($P<0.05$),表明土壤微生物生物量可作为土壤肥力的重要评价指标,这与前人研究结果一致^[45-46]。本研究试验区土壤pH为9.25,说明土壤盐碱化程度较高,氮添加在提高土壤有机碳、硝态氮、有效磷、全氮、全磷和微生物生物量的同时降低了土壤pH和容重。土壤理化性质与MBC/MBN的相关性较小,说明氮添加对土壤碳氮的影响具有协同效应。胡宗达等^[47]研究表明,土壤有机碳和全氮与土壤微生物生物量化学计量比的关系不显著;李亚园^[48]研究认为,土壤有机碳和全氮与MBC/MBP和MBN/MBP之间存在显著的负相关关系。而在本研究中,MBC/MBP和MBN/MBP与土壤含水量、有机碳、速效氮、有效磷、全碳和全氮呈显著正相关关系($P<0.05$),与土壤容重和pH呈显著负相关($P<0.05$)(表2),这与陈婕妮等^[49]研究结果一致,说明微生物生物量及其化学计量特征对土壤养分状况具有较强的依赖性。当然,造成上述结论发生分歧的主要原因是试验地点和取样时间差异。此外,RDA分析表明,除土壤电导率以外,其他土壤理化性质均是影响土壤微生物生物量及其化学计量特性的关键因子,说明土壤微生物生物量及其化学计量特征对土壤养分状况具有较强的依赖性。其中,土壤全氮、pH和有机碳是影响土壤微生物生物量及化学计量特征的主要土壤理化因子,该结论与李春越等^[50]和胡洋等^[51]研究结果一致。一方面是因为高寒地区氮限制比较严重,而氮添加直接增加了土壤全氮含量,进一步影响了土壤养分循环和微生物活性;另一方面,土壤pH和有机碳已经被证明是影响土壤微生物群落的关键土壤因子^[51]。因此,土壤pH和有机碳也是影响土壤微生物生物量及化学计量特征的关键土壤理化因子。当然,也有研究报道,土壤全碳是影响土壤

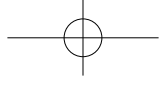
微生物生物量及化学计量特征的主要理化因子^[49]。造成这种矛盾的原因是多方面的,与海拔、气候、土壤质地和草地类型等密切相关。

4 结论

针对4龄青海草地早熟禾+青海冷地早熟禾+青海中华羊茅混播草地的研究得出以下结论:(1)随着施氮水平的提高,土壤容重和pH逐渐降低,土壤全量养分和速效养分均呈增加趋势。相同氮水平条件下,硝态氮肥对土壤有机碳、有效磷和全氮的促进作用最强,铵态氮肥对土壤铵态氮和全磷的促进作用最强,酰胺态氮肥对土壤容重和pH的降低效果最好,对土壤电导率、速效氮和全碳的促进作用最强。(2)不同氮素处理不同程度提高了土壤MBC、MBN含量、MBC/MBP和MBN/MBP,降低了MBC/MBN。对MBN的促进效果表现为 $A>N>U_3$,对MBC和MBC/MBP的促进效果表现为 $N>U_3>A$,对MBC/MBN的降低效果表现为 $A>U_3>N$ 。(3)土壤全氮、pH和有机碳是影响土壤微生物生物量及化学计量特征的主要土壤理化因子。

参考文献:

- [1] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, et al. Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland [J]. Plant and Soil, 2010, 333 (1): 469-479.
- [2] 童永尚,张春平,俞旸,等. 多年生人工混播草地暂稳态概念及维持技术解析[J]. 草地学报, 2022, 30 (11): 2845-2855.
- [3] 施建军,马玉寿,董全民,等. 人工调控对三江源区多年生禾草混播草地生产性能的影响[J]. 草地学报, 2018, 26 (4): 907-916.
- [4] 刘皓栋,田启会,刘根新,等. 混作组合对高寒牧区牧草生物量分配模式的影响[J]. 草学, 2023 (3): 46-52.
- [5] 刘欢,董凯,仁增旺堆,等. 藏沙蒿与多年生禾草混播对西藏沙化草地植被及土壤真菌群落特征的影响[J]. 草业学报, 2023, 32 (6): 45-57.
- [6] 童永尚,张春平,俞旸,等. 环青海湖地区多年生禾草的混播效应[J]. 草地学报, 2023, 31 (7): 2203-2209.
- [7] 毛军,王长庭,胡雷,等. 三江源区不同建植期禾草混播人工草地植物群落根系特征变化[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (6): 1538-1546.
- [8] 仁增旺堆,姜丽丽,汪诗平,等. 氮磷添加对垂穗披碱草人工草地生产生态功能的影响分析[J]. 高原科学研究, 2020, 4 (3): 55-61.
- [9] 方玉凤,曹志伟,孙洪升,等. 施肥和补播互作对松嫩平



- 原退化草地产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (6): 167-174.
- [10] Ma Q, Qian Y S, Yu Q Q, et al. Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 349: 108445.
- [11] 黄战, 马泽跃, 冯雷, 等. 氮肥施用对库尔勒香梨园土壤有机碳和无机碳剖面分布的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (6): 50-60.
- [12] 周一平, 张玉革, 马望, 等. 氮添加和干旱对呼伦贝尔草原5种植物性状的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29 (1): 41-48.
- [13] 石田, 曹娟, 闫瑞瑞, 等. 刈割对草甸草原土壤微生物化学计量特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (3): 127-134.
- [14] Lepcha N T, Devi N B. Effect of land use, season, and soil depth on soil microbial biomass carbon of eastern Himalayas[J]. Ecological Processes, 2020, 9 (1): 1-14.
- [15] 杨海滨, 李中林, 徐泽, 等. 不同施肥措施对重庆茶园土壤微生物学特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (8): 59-66.
- [16] Heuck C, Weig A, Spohn M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 85: 119-129.
- [17] 单文俊, 付琦, 邢亚娟, 等. 氮沉降对长白山白桦山杨天然次生林土壤微生物量碳氮和可溶性有机碳氮的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28 (8): 1522-1530.
- [18] 吴建波, 王小丹. 藏北高寒草原土壤酶活性对氮添加的响应及其影响因素[J]. 草地学报, 2021, 29 (3): 555-562.
- [19] 吕晶花, 赵旭燕, 陆梅, 等. 氮沉降下纳帕海草甸植被与土壤变化对微生物生物量碳氮的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34 (6): 1525-1532.
- [20] Chen Y L, Chen L Y, Peng Y F, et al. Linking microbial C:N:P stoichiometry to microbial community and abiotic factors along a 3500 km grassland transect on the Tibetan Plateau[J]. Global Ecology and Biogeography, 2016, 25: 1416-1427.
- [21] 王丽娜, 罗久富, 杨梅香, 等. 氮添加对退化高寒草地土壤微生物量碳氮的影响[J]. 草业学报, 2019, 28 (7): 38-48.
- [22] 王丽君, 程瑞梅, 肖文发, 等. 氮添加对三峡库区马尾松-栓皮栎混交林土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33 (1): 42-50.
- [23] 聂秀青, 王冬, 周国英, 等. 三江源地区高寒湿地土壤微生物生物量碳氮磷及其化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2021, 45 (9): 996-1005.
- [24] Dong L L, Berg B, Gu W P, et al. Effects of different forms of nitrogen addition on microbial extracellular enzyme activity in temperate grassland soil[J]. Ecological Processes, 2022, 11 (1): 195-202.
- [25] 董永尚, 张春平, 董全民, 等. 不同形态氮添加对多年生高寒栽培草地土壤理化性质和微生物群落结构的影响[J/OL]. 环境科学: 1-13 [2023-11-11]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202307216>.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [27] 张艳, 李勋, 宋思梦, 等. 马尾松与乡土阔叶树种凋落叶混合分解过程中微生物生物量特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30 (4): 681-690.
- [28] 赵连军, 张俪文, 衣华鹏, 等. 氮添加对黄河三角洲高潮滩芦苇生长和土壤理化性质的短期效应[J]. 生态科学, 2021, 40 (2): 18-25.
- [29] 高浩诚, 牧仁, 焦婷, 等. 施氮对高寒垂穗披碱草草地根际、非根际土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37 (6): 276-282.
- [30] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, et al. Soil acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China[J]. Pedosphere, 2010, 20: 399-408.
- [31] 田沐雨, 于春甲, 汪景宽, 等. 氮添加对草地生态系统土壤pH、磷含量和磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31 (9): 2985-2992.
- [32] 盛基峰, 李垚, 于美佳, 等. 氮磷添加对高寒草地土壤养分和相关酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31 (12): 2302-2309.
- [33] 倪纪恒, 毛罕平. 电导率对温室黄瓜叶面积和干物质生产影响的动态模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (12): 105-109.
- [34] 张一清, 王文娥, 胡明宇, 等. 容重及含水率对土壤电导率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40 (3): 162-169.
- [35] 郭剑波, 赵国强, 贾书刚, 等. 施肥对高寒草原草地质量指数及土壤性质影响的综合评价[J]. 草业学报, 2020, 29 (9): 85-93.
- [36] 程蕾, 周嘉聪, 林开森, 等. 氮添加对亚热带毛竹林土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 239 (6): 1929-1937.
- [37] 贾培龙, 安韶山, 李程程, 等. 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (1): 315-321.
- [38] Zhang J S, Guo J F, Chen G S, et al. Soil microbial biomass and its controls[J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16: 327-330.
- [39] 洪丕征, 刘世荣, 于浩龙, 等. 模拟氮沉降对红椎人工幼龄林土壤微生物生物量和微生物群落结构的影响[J]. 山东大学学报(理学版), 2016, 51 (5): 18-28.
- [40] 周嘉聪, 刘小飞, 郑永, 等. 氮沉降对中亚热带米槠天然林微生物生物量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37 (1): 127-135.
- [41] Kouno K, WU J, Brookes P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34: 617-622.
- [42] 李双雄, 姚拓, 王理德, 等. 祁连山东段退化高寒草地修



- 复过程中土壤微生物生物量变化[J]. 草地学报, 2023, 31 (12): 3668–3675.
- [43] 苏乐乐, 秦燕, 王墨敏, 等. 氮磷添加对燕麦与箭筈豌豆不同种植方式草地土壤微生物-胞外酶化学计量特征的影响[J]. 草业学报, 2023, 32 (3): 56–66.
- [44] Griffiths B S, Spilles A, Bonkowski M. C : N : P stoichiometry and nutrient limitation of the soil microbial biomass in a grazed grassland site under experimental P limitation or excess[J]. Ecological Processes, 2012, 1 (1): 66–76.
- [45] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35 (5): 1445–1451.
- [46] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (4): 1257–1264.
- [47] 胡宗达, 刘世荣, 刘兴良, 等. 川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤-微生物生物量及其化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41 (12): 4900–4912.
- [48] 李亚园. 贺兰山不同海拔凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征及其关系研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [49] 陈婕妮, 石思雨, 钟羨芳, 等. 武夷山不同海拔土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J/OJ]. 生态学杂志: 1–8 [2023–11–13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230626.1750.010.html>.
- [50] 李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (8): 1783–1791.
- [51] 胡洋, 丛孟菲, 陈末, 等. 氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤微生物量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2022, 42 (13): 5328–5339.

Response of soil microbial biomass and its stoichiometric characteristics to nitrogen addition in perennial alpine cultivated grassland

TONG Yong-shang^{1, 2, 3}, ZHANG Chun-ping^{1, 2, 3}, DONG Quan-min^{1, 2, 3*}, CAO Quan^{1, 2, 3}, YU Yang^{1, 2, 3}, ZHANG Zheng-she^{1, 2, 3}, YANG Zeng-zeng^{1, 2, 3}, ZHANG Xiao-fang^{1, 2, 3}, ZHANG Xue^{1, 2, 3}, HUO Li-an^{1, 2, 3} (1. Academy of Veterinary Medicine and Animal Science, Qinghai University/Qinghai Academy of Veterinary Medicine and Animal Science, Xining Qinghai 810016; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining Qinghai 810016; 3. Key Laboratory of the Alpine Grassland Ecology in the Three Rivers Region, Ministry of Education, Qinghai University, Xining Qinghai 810016)

Abstract: It is important to study the relationship between soil physicochemical properties and microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), microbial biomass phosphorus (MBP) contents and their ecological stoichiometric characteristics of perennial alpine cultivated grassland under nitrogen addition, in order to maintain the temporary steady state of perennial alpine cultivated grassland. The mixed planting grassland of *Poa pratensis* Qinghai, *Poa crymophila* Qinghai and *Festuca sinensis* Qinghai, which was established in 2019, was used as the research object. CK (no nitrogen application), U1 (amide nitrogen 22.5 kg · hm⁻²), U2 (amide nitrogen 45 kg · hm⁻²), U3 (amide nitrogen 67.5 kg · hm⁻²), A (ammonium nitrogen 67.5 kg · hm⁻²) and N (nitrate nitrogen 67.5 kg · hm⁻²) treatments were used to analyze the soil physicochemical properties, microbial biomass, and stoichiometric characteristics under different treatments. The results showed that different nitrogen forms and application levels had a significant impact on soil physicochemical properties and microbial biomass. With the increase of nitrogen application level, soil bulk density, pH, and microbial biomass carbon nitrogen ratio (MBC/MBN) gradually decreased, while soil available nutrients, soil total nutrients, MBC, MBN, microbial biomass carbon phosphorus ratio (MBC/MBP), and microbial biomass nitrogen phosphorus ratio (MBN/MBP) gradually increased. Compared with different nitrogen forms at the same nitrogen level, ammonium nitrogen fertilizer had the most significant effect on reducing MBC/MBN, with a decrease of 15.61% compared to the CK; Nitrate nitrogen fertilizer had the most significant promoting effect on total nitrogen, MBC, MBC/MBP, and MBN/MNP. Redundancy analysis indicated that soil total nitrogen, pH and organic carbon were the sensitive indicator that affected soil microbial biomass and stoichiometric characteristics. Although nitrogen deposition promoted soil nutrient turnover and cycling in perennial alpine cultivated grasslands, the problems it brought to the ecological environment couldn't be ignored.

Key words: alpine cultivated grassland; temporary steady state; microbial biomass; stoichiometry; nitrogen addition