

文章编号:2095-6134(2018)03-0417-08

简报

青藏高原高寒草原土壤微生物量对氮磷肥添加的响应*

赵国强¹,王淑平^{1†},崔骁勇²,董俊夫¹,常旭卉¹,汪诗平³

(1 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049; 2 中国科学院大学生命科学学院,北京 100049;
3 中国科学院青藏高原研究所,北京 100101)
(2017 年 3 月 16 日收稿; 2017 年 5 月 3 日收修改稿)

Zhao G Q, Wang S P, Cui X Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus application on soil microbial biomass carbon and nitrogen contents on an alpine grassland on Tibetan Plateau[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018,35(3):417-424.

摘 要 土壤微生物在维持和提高高寒草地植被生产力水平、改善土壤环境等方面起着重要作用,基于连续 2 年(2014 和 2015 年)的小区施肥控制试验,探讨高寒草原土壤剖面微生物量碳、氮对氮、磷肥添加的响应。结果如下。1)施用无机氮、磷肥对土壤微生物量碳的影响主要表现在 0~10 cm 土层,其均值分别是 10~20 cm 和 20~30 cm 土层的 1.67 倍和 1.28 倍。2)单施高量氮肥显著降低土壤微生物量碳、氮含量, N_2P_0 (15 g N/m², 0 g P₂O₅/m²) 处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的微生物量碳分别比空白处理显著降低 60.39% 和 29.2%;在施磷肥的基础上增施氮肥提高土壤微生物量碳、氮含量,当施磷 30 g P₂O₅/m² 时,施氮 15 g N/m² 处理 0~10 cm 土层微生物量碳比不施氮处理增加 61.54%,差异显著。3)单施磷肥各土层微生物量碳、氮含量相对于空白均无显著差异;在施氮 15 g N/m² 的基础上增施 15 和 30 g P₂O₅/m² 磷肥,0~10 cm 土层微生物量碳含量比不施磷处理分别显著增加 159.8% 和 279.98%,10~20 cm 土层微生物量氮含量分别显著增加 53.78% 和 38.66%;施磷 7.5 g P₂O₅/m² 时,10~20cm 土层微生物量氮含量比不施磷处理显著增加 68.35%。
关键词 高寒草原;养分添加;微生物量碳;微生物量氮
中图分类号:S158; S812.2 **文献标志码**:A **doi**:10.7523/j.issn.2095-6134.2018.03.017

Effects of nitrogen and phosphorus application on soil microbial biomass carbon and nitrogen contents on an alpine grassland on Tibetan Plateau

ZHAO Guoqiang¹, WANG Shuping¹, CUI Xiaoyong², DONG Junfu¹, CHANG Xuhui¹, WANG Shiping³
(1 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2 College of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Soil microbes play an important role in maintaining and improving plant productivity as

* 国家自然科学基金(41230750)和“973 计划”(2013CB956000)资助
† 通信作者, E-mail: wshuping@ucas.ac.cn

well as soil quality. Based on a two-year field experiment of fertilizer application to an alpine steppe on the Tibetan Plateau, effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) contents in the upper 30 cm soil were studied. The results are given as follows. 1) Nitrogen and phosphate addition influenced soil MBC content mainly in the 0-10 cm soil layer, and the content was 1.67 times and 1.28 times the contents in the 10-20 cm and 20-30 cm soil layers, respectively. 2) Sole nitrogen addition significantly decreased soil MBC and MBN contents, whereas nitrogen application in addition to phosphorus fertilization increased soil MBC and MBN contents. 3) Phosphorus fertilization alone had no significant effect on soil MBC and MBN contents. Combined with nitrogen fertilizer at the N_2 level of 15 g N/m^2 , phosphorus application at the levels of 15 and $30\text{ g P}_2\text{O}_5/\text{m}^2$ (i. e. , P_2 and P_3 levels) significantly increased MBC content in the 0-10 cm soil layer and MBN content in the 10-20 cm soil layer, as compared with control treatment. Furthermore, MBN content in the 10-20 cm soil layer was also significantly higher in the N_2P_1 (15 g N/m^2 and $7.5\text{ g P}_2\text{O}_5/\text{m}^2$) treatment than CK treatment.

Keywords alpine steppe; phosphorus addition; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen

土壤微生物包括不同类型的细菌、放线菌、真菌、藻类和原生动物,是土壤生态系统的重要组成部分,其数量巨大,直接或者间接地参与土壤的生物化学转化过程^[1],对生态系统的养分循环、能量流动都有重要影响^[2]。土壤微生物量是土壤有机质降解和养分转化的动力,为植物提供重要的养分来源和储存库^[3]因而直接影响到养分循环及其生物有效性。同时,土壤微生物量 C 或 N 转化速率较快,可以作为表征土壤总碳或总氮变化的敏感的生物学指标和土壤质量可持续性演变的重要指标^[4-6]。

藏北高原草地面积达 0.42 亿 hm^2 ,占西藏总草地面积的 67.9%,其主体为高寒草原,是青藏高原腹地分布最广泛的生态系统类型^[7],对中国乃至亚洲整体的生态安全具有重要的屏障作用^[8]。藏北高寒草原存在着不同程度的退化,其生态恢复也受到越来越广泛的关注。施肥是一项传统的农业生产措施,在土壤养分供应受限的自然生态系统上施肥往往能够增加植物群落的生产力,也能显著影响土壤微生物量碳、氮含量^[9-10]。目前国内外关于施肥对微生物量碳氮影响的研究已有大量报道,多集中于水稻^[11-12]、小麦^[13-14]、玉米^[15]等粮田土壤,以及芹菜^[16]等菜地土壤。关于施用无机肥料对于土壤微生物量碳、氮的影响尚无一致的结论。如:在温带森林中 Gallardo 和 Schlesinger^[17]发现添加氮素对微生物生长有促进作用,提高土壤的微生物量,但是另外两个研究的结果却是长期氮素添加降低土壤微生物的生物量

与活性^[18-19],而在农田和草地上也有研究发现氮素的添加对土壤微生物并没有显著影响^[20-21];添加磷肥对微生物量的研究报道较少,Biederbeck 等^[22]发现长期施用磷肥可促进土壤微生物的增长。这些研究结果的差异可能与无机肥的种类、施用方式、土壤及气候类型等有关。

目前对土壤微生物量的研究主要集中于表层 0~10 cm 和 0~20 cm 土壤^[23-25]。大量研究表明,施肥对土壤表层的土壤微生物数量、微生物量的影响最为显著^[26],且影响随着土壤深度的增加而降低^[27-28]。但也有研究表明,随着植物根系向更深层土壤的延伸和肥料随降雨向深层土壤的迁移,施肥可能会对较深层土壤的微生物产生影响^[29],因此有必要深入探讨不同深度土壤中微生物量碳、氮对施肥的响应。

由于社会经济和工业的发展,全球范围内活性氮的排放量逐渐增加,导致陆地生态系统的大气氮沉降加剧^[30],已经成为植物群落结构改变的重要因子^[31-32]。氮是限制陆地生态系统生产力的重要元素之一,由于不同植物对氮素增加的响应不同,因此氮沉降对不同植物会产生不同的影响,长期氮沉降将会改变植物群落的结构,进而影响生态系统的结构、功能和稳定性,包括生态系统的碳循环过程。在大气氮沉降增加的背景下,研究包括微生物在内的土壤环境变化过程,有助于全面认识生态系统碳循环对气候变化的响应。尽管国内外开展了不少草地无机养分添加的研究,但是针对藏北高寒草原的养分添加试验还鲜见报

道。本研究位于西藏自治区那曲地区班戈县的典型高寒草原,通过连续 2 个生长季添加不同水平的氮、磷肥,探讨氮、磷添加对高寒草原不同层次土壤微生物量碳、氮含量的影响,以期为退化草原人工恢复及土壤培肥提供科学依据,为高寒草原植物土壤微生物群落结构和功能的演变预测提供支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概括

本研究区位于西藏自治区那曲地区班戈县普保镇,GPS 方位为 90°02'12"E、31°26'36"N,平均海拔 4 745 m,属高原亚寒带季风半干旱气候区。气候数据表明:该地区年日照时数 3 210.3 h,昼夜温差大,年最高气温 21.9 ℃,年最低气温 -28.6 ℃。年蒸发量(1 993.4 ~ 2 104.1 mm)是年降水量(289 ~ 389 mm)的 6.9 ~ 7.3 倍。班戈县地处南羌塘高原湖盆地区,草地广阔,除部分为高山草甸外,多数主要是高山草原^[33]。研究区土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质
Table 1 Properties of tested soil

深度/ cm	有机质 含量/ (g/kg)	全氮 含量/ (g/kg)	全磷 含量 (g/kg)	碱解 氮/ (mg/kg)	有效磷 含量/ (mg/kg)	pH 值
0 ~ 10	32.53	1.65	0.618	128.17	4.96	6.97
10 ~ 20	18.80	1.09	0.741	77.30	3.04	7.04
20 ~ 30	20.17	1.16	0.674	67.11	3.24	7.70

1.2 试验设计

2013 年在所选样地设置网围栏,并捡除样地内可见的牛羊粪便以排除试验前放牧带入的动物粪便的影响。试验包括氮肥、磷肥 2 个因子,其中 N 设置 3 个水平(每年施用 0、7.5 和 15 g N/m²)、P 设置 4 个水平(每年施用 0、7.5、15 和 30 g P₂O₅/m²),共 12 个处理,每个处理重复 5 次,共 60 个小区,采用完全随机区组设计。每个小区面积为 5 m × 5 m,相邻小区间隔 2 m。试验于 2013 年 8 月中旬第 1 次施肥,施肥量为年施肥量的 1/3;2014 和 2015 年每年分 2 次等量撒施,7 月初第 1 次施肥,在地表看不到肥料颗粒时进行第 2 次施肥,时间间隔约为一个月。氮肥选用尿素,其含氮量为 46.4%;磷肥用重过磷酸钙(Ca(H₂PO₄)₂),含 P₂O₅ 为 46%。为保证施肥效果,施肥时间选择在晴天的傍晚和雨后。

1.3 土壤样品采集及测定方法

在 2015 年 8 月下旬,即植物生长旺盛期,在每个小区中随机设置 1 个 1 m × 1 m 的样方,齐地面剪取样方框内植物的地上部分后,采用 S 型采样法在每个样方内选取 7 个采样点,用直径为 2.8 cm 的土钻分 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 深度采集土壤样品,若碰到鼠洞则重新选点取样。将每个样方同一层次 7 个点的样品混合为一个土样,去除石砾和植物残根等杂物后混和均匀,过 2 mm 土壤筛后于 4 ℃ 冰箱内保存,用保温箱(干冰保温)带回北京测定。

土壤微生物量碳、氮含量采用熏蒸浸提-TOC 仪测定,计算公式分别为:

$$B_C = E_C / K_{EC},$$
$$B_N = E_N / K_{EN}.$$

式中: B_C 为微生物量碳(mg/kg), E_C 为熏蒸土壤与未熏蒸土壤的差值; K_{EC} 为转换系数,取值 0.38; B_N 为微生物量氮(mg/kg), E_N 为熏蒸土壤与未熏蒸土壤的差值; K_{EN} 为转换系数,取值 0.45。

土壤基本理化性质采用常规分析方法^[34]:土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法,外加热、硫酸亚铁溶液滴定;土壤全氮含量采用半微量凯氏法测定,土样碱化后蒸馏出来的氨用硼酸吸收,以标准酸溶液滴定;碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定;pH 值采用 2.5:1 水土比,酸度计测定。

1.4 数据处理

用 SPSS19.0 对试验数据进行统计分析,其中,各施肥处理、氮肥和磷肥对不同土层微生物量碳、氮含量的影响采用 One-way ANOVA 分析,而处理与土层之间的交互作用、氮磷肥之间的交互作用均采用 Two-way ANOVA,方差齐性检验均用 Duncan 方法检验,显著性水平为 $P = 0.05$ 。图形绘制用 Origin 9.1 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 氮磷添加对土壤微生物量碳的影响

施加不同比例氮磷肥对土壤微生物量碳含量的影响如图 1 所示。1) 在 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层,各施肥处理的微生物量碳含量与不施肥处理(N₀P₀)之间差异均不显著;氮、磷肥施用主要影响表层土壤的微生物碳含量,0 ~ 10 cm 土层微

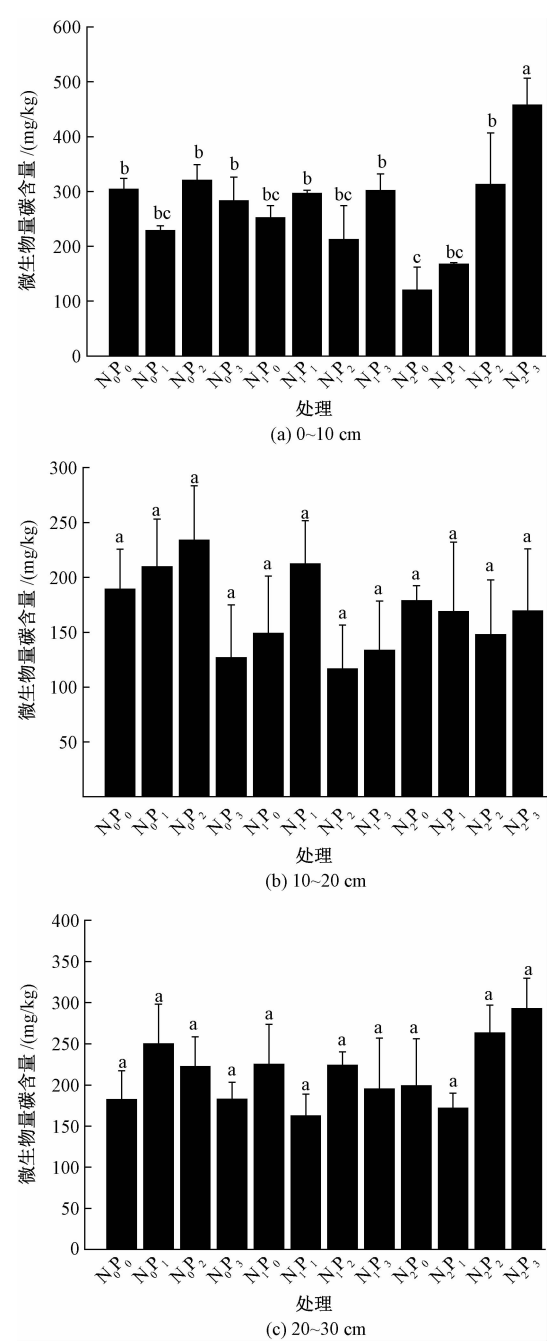


图 1 各处理不同土层微生物量碳含量

Fig. 1 Microbial biomass carbon content at different treatment levels of nitrogen and phosphorus

生物量碳含量均值分别是 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土层的 1.67 倍和 1.28 倍。2) 0 ~ 10 cm 土层在 N₀ (0 g N/m²) 和 N₁ (7.5 g N/m²) 水平下, 增施磷肥与空白处理 (N₀P₀) 之间微生物量碳含量差异不显著, 这表明低浓度氮下磷不是微生物量碳含量的主要限制因素, 此时添加磷肥并不能促进微生物量碳含量的增加。3) 在 N₂ (15 g N/m²) 水平下, 微生物量碳含量随磷肥施用量的添加逐渐增加, 且在施磷 15 和 30 g P₂O₅/m² 与不施磷肥

处理差异达显著水平。说明当施氮 15 g N/m² 时, 磷元素成为限制因子, 添加磷肥有利于微生物量碳含量的增加。4) 从处理 N₀P₀、N₁P₀ 和 N₂P₀ 可以看出, 在不施磷的条件下添加氮肥降低微生物量碳含量, 且在不施氮与施氮 15 g N/m² 处理之间差异达显著水平。从处理 N₀P₃、N₁P₃ 和 N₂P₃ 可以看出, 在施磷 30 g P₂O₅/m² 条件下增施氮肥, 土壤微生物量碳含量逐渐增加, 且施氮 15 和 7.5 g N/m² 与不施氮之间差异达显著水平。说明微生物量碳含量受土壤磷元素限制, 但当施磷达 30 g P₂O₅/m² 时, 氮元素进一步成为限制因子。综合分析, 氮、磷肥配施相对于单施氮、磷肥, 更有利于 0 ~ 10 cm 土层微生物量碳含量的积累。

2.2 氮磷添加对土壤微生物量氮的影响

不同土层微生物量氮含量对氮、磷添加的响应如图 2 所示。1) 在 0 ~ 10 cm 土层, 除 N₂P₃ 外, 各施肥处理之间差异均不显著, 说明表层土壤微生物量氮含量对较低的氮、磷施用响应不敏感; 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层的微生物量氮含量总体比 0 ~ 10 cm 土层高。2) 对于 10 ~ 20 cm 土层, 在 N₀ 水平下增施磷肥, 随着磷肥施用量的增加, 微生物量氮含量逐渐增加, 但差异并不显著; 在 N₂ 水平下施加磷肥, 各施磷处理都与不施磷处理的差异达显著水平, 随磷肥的添加呈先增加后降低趋势, 说明施磷促进 10 ~ 20 cm 土层微生物量氮的积累, 但施肥过量反而不利于微生物量氮的增加。3) 对于 20 ~ 30 cm 土层, 在各施氮水平的基础上增施磷肥, 各施磷处理与不施磷处理之间差异都未达显著水平。4) 比较同一磷水平下各施氮梯度可知: 0 ~ 10 cm 土层在不施磷的条件下增施氮肥, 微生物量氮含量呈下降趋势但差异不显著, 而在施磷 7.5 和 15 g P₂O₅/m² 条件下施氮, 微生物量氮含量呈上升趋势但差异不显著; 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层在不施磷的条件下施氮肥 15 g N/m² 显著低于施氮 0 g N/m², 说明单施氮肥并不利于土壤微生物量氮的积累, 且过度施氮 (15 g N/m²) 反而会造成微生物量氮含量显著下降; 在适当施加磷肥的基础上增施氮肥, 可促进土壤微生物量氮含量的增加。总之, 对于土壤微生物量氮, 氮、磷配施效果强于单独施用, 且施氮 7.5 g N/m² 更能促进土壤微生物量氮含量的增加。

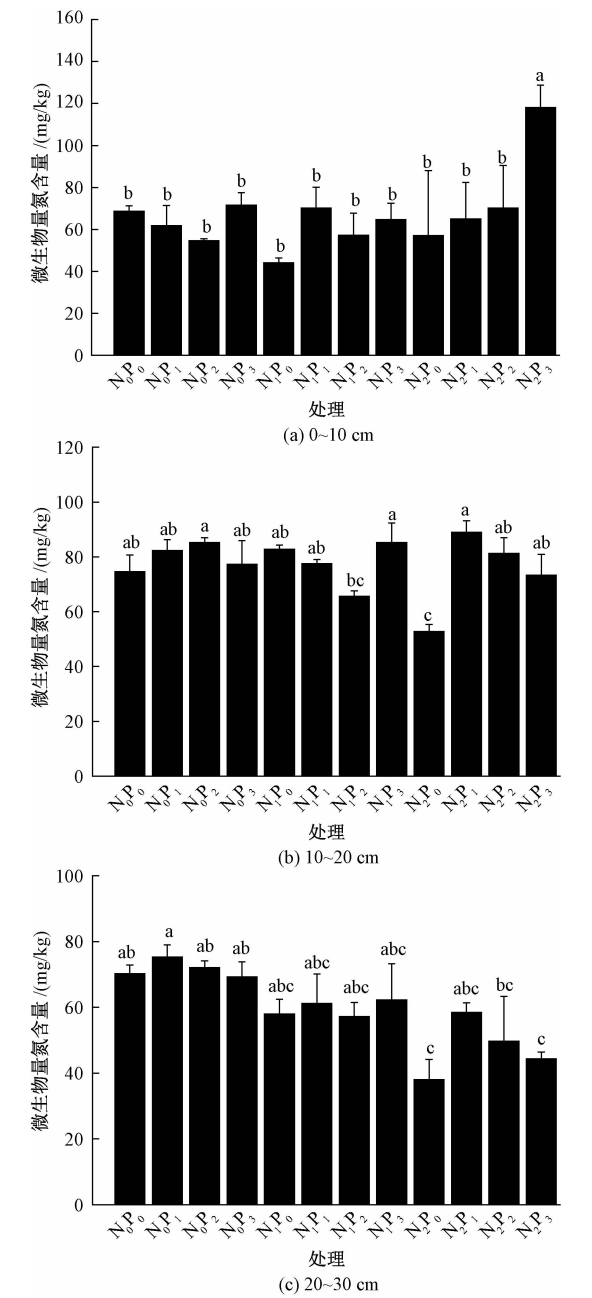


图 2 各处理不同土层微生物量氮含量

Fig.2 Microbial biomass nitrogen content at different treatment levels of nitrogen and phosphorus

表 3 氮磷及其互作对不同层土壤微生物量碳含量和微生物量氮含量影响的方差分析

Table 3 Two-way ANOVA of nitrogen and phosphate on microbial biomass carbon and nitrogen contents in different soil layers

	微生物量碳含量						微生物量氮含量					
	0 ~ 10 cm		10 ~ 20 cm		20 ~ 30 cm		0 ~ 10 cm		10 ~ 20 cm		20 ~ 30 cm	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
氮肥 (N)	0.379	0.689	0.686	0.511	0.310	0.736	1.517	0.242	1.179	0.321	6.878	0.004
磷肥 (P)	2.715	0.071	0.852	0.477	0.222	0.880	1.131	0.359	2.969	0.048	0.771	0.521
氮肥 * 磷肥 (N * P)	3.086	0.025	0.332	0.914	1.091	0.394	0.506	0.797	4.249	0.003	0.292	0.935
处理 (treatment)	3.197	0.006	0.629	0.792	0.845	0.599	1.102	0.396	3.278	0.005	2.147	0.048

注:氮肥各水平之间的比较指每个氮水平下 16 个重复的平均值之间的比较,磷肥各水平间比较指每个磷水平下 12 个重复的平均值之间的比较。

2.3 氮磷添加对微生物量碳氮含量影响的双因素方差分析

由表 2 可知,不同土层之间的微生物量碳、氮含量差异显著 ($P < 0.001$),而处理和土层之间的交互作用对土壤微生物量碳、氮含量无显著影响。

表 2 土层及土层与处理之间的交互作用对微生物量碳、氮含量影响的方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of soil layer and treatment on microbial carbon and nitrogen

	微生物量碳		微生物量氮	
	F	P	F	P
土层	11.862	<0.001	9.800	<0.001
处理 * 土层	1.102	0.364	1.235	0.245

注:差异显著性用黑体标注 ($P < 0.05$)。

由表 3 可知,施加氮肥对 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层微生物量碳含量的影响均未达到显著水平;磷肥对 0 ~ 10 cm 土层微生物量碳含量的影响接近显著 ($P = 0.071$),而对 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层无影响;氮、磷之间的交互作用对 0 ~ 10 cm 土层微生物量碳含量的影响达显著水平 ($P < 0.05$);不同比例的氮、磷处理对 0 ~ 10 cm 土层微生物量碳含量的影响达显著水平 ($P = 0.006$)。单施氮、磷肥还是氮、磷之间的互作对于 0 ~ 10 cm 土层微生物量氮含量的影响均未达显著水平;施加磷肥对于 10 ~ 20 cm 土层微生物量氮含量的影响达显著水平 ($P < 0.05$),且氮、磷肥交互作用显著 ($P < 0.05$);施加氮肥显著影响 20 ~ 30 cm 土层微生物量氮含量;不同比例的氮磷肥处理显著影响 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层的微生物量氮含量 ($P = 0.005$, $P = 0.048$)。

3 讨论与小结

微生物量碳在很大程度上取决于土壤微生物的数量,在土壤全碳中虽然只占很小比例,但却是其中最为活跃的部分,能够反映土壤养分的生物有效性,对土壤施肥非常敏感,是评价微生物活性的重要指标。本研究结果显示,氮磷添加主要影响 0~10 cm 土层微生物量碳的含量,而对 10~20 和 20~30 cm 土层微生物量碳含量几乎无影响(图 1)。可能原因是,随着土层加深,高寒草原土层温度降低和营养物质供应会减少,因而在该植被下 0~10 cm 土层微生物量均大于 10~20 和 20~30 cm 土层,这与蔡琰和丁贵杰^[35]对马尾松林下土壤微生物量的研究结果一致。由图 1 可知,在不施磷肥的条件下单施氮肥,0~10 cm 土层微生物量碳含量降低,且施氮 15 g N/m² 相对于不施氮显著降低 60.4%,这与裴雪霞等^[36]研究结果类似。原因可能有:1)施加氮肥导致土壤 pH 降低,而 pH 较低的土壤微生物量也较低^[37];本试验中 0~10 cm 土层微生物量碳含量与 pH 之间存在显著的正相关关系。2)施加氮肥加剧土壤有机质的退化,并抑制微生物菌群的活力^[38-39]。但是,在施磷 30 g P₂O₅/m² 的基础上添加氮肥,微生物量碳含量显著增加,施氮 7.5 g N/m² 和 15 g N/m² 相对于不施氮分别增加 86.5% 和 172.8%。这与 Gallardo、Hart、Insam 等^[17,40-41]的研究类似。另外,在施加氮肥 15 g/m² 的基础上增施磷肥,微生物量碳含量显著增加,施磷 30 g P₂O₅/m² 相对于不施磷增加 279.9%。原因可能是:1)磷肥的施加促进植物根系及部分微生物对无机氮的同化与吸收,从而减缓 pH 的下降;2)磷肥添加增加根系生物量及根系分泌物,促进微生物的生长,同时也为微生物提供充足的碳源^[42-43];本试验中 0~10 cm 土层微生物量碳含量与全磷和速效磷存在极显著的正相关关系。

土壤微生物量氮作为土壤氮素的重要储备,对土壤氮素循环和转化有着重要的调节功能。虽然土壤微生物量低于植物的吸氮量,但是由于微生物量氮周转率高,因此矿化氮主要来自于土壤微生物量氮^[44-45]。本研究结果表明,施加氮磷肥主要影响 10~20 和 20~30 cm 土层的微生物量氮,其含量变化范围分别是 52.83~88.94 和 38.07~75.31 mg/kg(图 2)。可能原因是:1)该地区特有的气候环境条件形成“过云就是雨”的

气候现象,且施肥主要选择在傍晚临降雨之前,造成氮肥随雨水向更深的土层迁移^[46-47]。2)高寒草原土壤温度普遍较低,死亡根系未来得及被微生物分解,从而造成深层土壤有机物的累积,为较深层土壤微生物提供食物和碳源。对于 10~20 和 20~30 cm 土层,在未施磷肥的基础上单施氮肥,其微生物量氮含量下降,且过量施氮(15 g N/m²)与不施氮处理之间差异显著,原因可能是单施氮肥造成土壤 pH 的下降,从而不利于微生物的生长与繁殖;在本试验中,10~20 cm 土层全氮、全磷与 pH 之间存在显著的负相关关系,说明施加氮肥造成 pH 值的下降可能是微生物量氮下降的主要原因。当施氮 15 g N/m² 时,施加磷肥显著增加 10~20 cm 土层微生物量氮含量,且施磷 7.5、15 和 30 g P₂O₅/m² 相对于不施磷微生物量氮含量分别增加 68.35%、53.78% 和 38.86%。本试验研究表明,氮磷配施时土壤微生物量氮明显高于单施氮、磷肥,说明配施条件下有较多的氮素通过同化作用转入到微生物体内,而被暂时固定,相应地减少了氨挥发和硝态氮的淋失,这对调节土壤氮素供应,提高土壤氮素利用率,保护大气环境都具有重要的意义。但本文中关于施加氮磷肥主要影响 0~10 cm 微生物量碳含量和 10~20 cm 土层微生物量氮含量,其原因有待进一步的研究。

4 结论

本实验研究发现,单施高量氮肥土壤微生物量碳、氮含量显著下降,而单施磷肥对土壤微生物量碳氮含量几乎无影响,这两种施肥方式均不能有效改善高寒草原土壤环境。适量的氮、磷配施能够保持或提高土壤中微生物量碳氮含量,因此,在未来全球氮沉降的大背景下,选择科学合理的氮、磷配施方案,以利于土壤生态环境的改善,增加土壤中的微生物量,从而减少经济和工业发展给脆弱的西藏高寒草原带来的负面影响,这对维持藏北高寒草原的可持续发展和生态系统的平衡具有重要意义。

参考文献

[1] 周丽霞,丁明慧. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 162-171.
[2] 白清云. 土壤微生物群落结构的化学估价方法[J]. 农业环境保护, 1997, 16(6): 13-17, 26.
[3] Gregorich E G, Liang B C, Drury C F, et al. Elucidation of

- the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(5): 81-87.
- [4] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21(4): 471-479.
- [5] Powlson D S, Prookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(2): 159-164.
- [6] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Soil Research*, 1992, 30(2): 195-207.
- [7] 毛绍娟, 吴启华, 祝景彬, 等. 藏北高寒草原群落维持性能对封育年限的响应[J]. *草业学报*, 2015, 24(1): 21-30.
- [8] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [9] Kautz T, Wirth S, Ellmer F. Microbial activity in a sandy arable soil is governed by the fertilization regime [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2004, 40(2): 87-94.
- [10] Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B, et al. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72(1): 9-17.
- [11] Jiang X, Shi X, Wright A L. Seasonal variability of microbial biomass associated with aggregates in a rice-based ecosystem [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 48(56): 84-88.
- [12] Liu M, Hu F, Chen X, et al. Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: The influence of quantity, type and application time of organic amendments [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 166-175.
- [13] Mandal A, Patra A K, Singh D, et al. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(18): 3 585-3 592.
- [14] Tamilselvi S M, Chinnadurai C, Ilamurugu K, et al. Effect of long-term nutrient managements on biological and biochemical properties of semi-arid tropical Alfisol during maize crop development stages [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48(8): 76-87.
- [15] 徐永刚, 宇万太, 马强, 等. 长期不同施肥制度对潮棕壤微生物生物量碳、氮及细菌群落结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2 078-2 085.
- [16] 王文锋, 李春花, 黄绍文, 等. 不同施肥模式对设施菜田土壤微生物量碳、氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(05): 1 286-1 297.
- [17] Gallardo A, Schlesinger W H. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(10): 1 409-1 415.
- [18] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 159-171.
- [19] Compton J E, Watrud L S, Porteous L A, et al. Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 143-158.
- [20] Bonde T A, Schnürer J, Rosswall T. Microbial biomass as a fraction of potentially mineralizable nitrogen in soils from long-term field experiments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20(4): 447-452.
- [21] Ross D J. Influence of soil mineral nitrogen content on soil respiratory activity and measurements of microbial carbon and nitrogen by fumigation-incubation procedures [J]. *Soil Research*, 1990, 28(2): 311-321.
- [22] Biederbeck V O, Campbell C A, Zentner R P. Effect of crop rotation and fertilization on some biological properties of a loam in southwestern Saskatchewan [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1984, 64(3): 355-367.
- [23] 陈丹梅, 刘益仁, 段玉琪, 等. 长期施肥对作物产量、土壤养分及真菌群落的影响[C]//第八次全国土壤生物与生物化学学术研讨会暨第三次全国土壤健康学术研讨会, 广东河源, 2015: 5-6.
- [24] 付宇佳. 施肥对泡桐人工林土壤微生物特性及酶活性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [25] 耿赛男. 豆科绿肥对旱坡地紫色土地力提升的机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [26] 赵晓琛, 皇甫超河, 刘红梅, 等. 贝加尔针茅草原土壤酶活性及微生物量碳氮对养分添加的响应[J]. *草地学报*, 2016, 24(1): 47-53.
- [27] 丁玲玲, 祁彪, 尚占环, 等. 东祁连山不同高寒草地型土壤微生物数量分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(6): 2 104-2 111.
- [28] 卢虎, 姚拓, 李建宏, 等. 高寒地区不同退化草地植被和土壤微生物特性及其相关性研究[J]. *草业学报*, 2015, 24(5): 34-43.
- [29] 贺凤鹏, 曾文静, 王翌迪, 等. 温带草原退化对土壤剖面微生物学特征的影响[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(3): 702-711.
- [30] Dentener F, Drevet J, Lamarque J F, et al. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(4): 1-21.
- [31] Reich P B. Elevated CO₂ reduces losses of plant diversity caused by nitrogen deposition [J]. *Science*, 2009, 326(5958): 1 399-1 402.
- [32] Vourlitis G L, Pasquini S C. Experimental dry-season N deposition alters species composition in southern Californian

mediterranean-type shrublands [J]. Ecology, 2009, 90(8): 2 183-2 189.

[33] 徐瑶, 何政伟, 陈涛. 西藏班戈县草地退化动态变化及其驱动力分析[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 377-380.

[34] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[35] 蔡琼, 丁贵杰. 黔中地区连栽马尾松林对土壤微生物的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(3): 131-133.

[36] 裴雪霞, 周卫, 梁国庆, 等. 长期施肥对黄棕壤性水稻土生物学特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4 198-4 206.

[37] Jenkinson D S, Davidson S A, Powlson D S. Adenosine-triphosphate and microbial biomass in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1979, 11(5): 521-527.

[38] Bossio D A, Scow K M, Gunapala N, et al. Determinants of soil microbial communities: effects of agricultural management, season, and soil type on phospholipid fatty acid profiles[J]. Microbial Ecology, 1998, 36(1): 1-12.

[39] 白震, 张明, 闫颖, 等. 长期施肥对农田黑土微生物活力与群落结构的影响 [J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 107-116.

[40] Hart S C, Stark J M. Nitrogen limitation of the microbial biomass in an old-growth forest soil [J]. Ecoscience, 1997, 4(1): 91-98.

[41] Insam H, Mitchell C C, Dormaar J F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23(5): 459-464.

[42] Goyal S, Chander K, Mundra M C, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions [J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(2): 196-200.

[43] Simek M, Hopkins D W, Kalcik J, et al. Biological and chemical properties of arable soils affected by long-term organic and inorganic fertilizer applications [J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(3): 300-308.

[44] Puri G, Ashman M R. Relationship between soil microbial biomass and gross N mineralisation [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(2): 251-256.

[45] Schnürer J, Rosswall T. Mineralization of nitrogen from 15 N labelled fungi, soil microbial biomass and roots and its uptake by barley plants[J]. Plant and Soil, 1987, 102(1): 71-78.

[46] 胡昱欣, 李育松, 卞建民, 等. 一定灌溉条件下大安灌区土壤氮素迁移规律 [J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(3): 324-327, 345.

[47] 刘金山, 戴健, 刘洋, 等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 112-120.