

DOI: 10.5846/stxb201403040364

刘碧荣, 王常慧, 张丽华, 董宽虎. 氮素添加和刈割对内蒙古弃耕草地土壤氮矿化的影响. 生态学报, 2015, 35(19): - .

Liu B R, Wang C H, Zhang L H, Dong K H. Effect of nitrogen addition and mowing on soil nitrogen mineralization in abandoned grasslands in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

氮素添加和刈割对内蒙古弃耕草地土壤氮矿化的影响

刘碧荣^{1, 2}, 王常慧^{1, *}, 张丽华¹, 董宽虎²

1 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

2 山西农业大学动物科技学院, 太谷 030801

摘要: 本文以内蒙古多伦县恢复生态学试验示范研究站弃耕 10 余年的草地为研究对象, 于 2006 年起分别设置对照 (Control)、氮素添加 (N addition)、刈割 (Mowing) 和氮素添加+刈割 (N addition + Mowing) 4 种处理, 每种处理 6 次重复, 研究弃耕草地氮素添加和刈割对土壤氮矿化的影响, 结合土壤理化性质和植被地上生产力的动态变化, 分析弃耕草地土壤氮矿化对植被恢复的响应, 为当地草地恢复与重建提供理论依据和数据支持。实验结果表明: 1. 氮素添加显著增加了植物地上净初级生产力 (Aboveground net primary productivity) 和土壤无机氮库, 与对照相比分别提高 115% 和 196%, 同时显著提高了土壤总硝化速率; 但是氮素添加对总氨化速率、土壤微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon)、氮 (Microbial biomass nitrogen)、微生物生物量碳氮比 (Microbial biomass carbon/nitrogen ratio)、微生物呼吸 (Microbial respiration) 以及呼吸熵 (Microbial metabolic quotient) 均无显著影响; 2. 总氨化速率和硝化速率对刈割处理的响应均不显著, 但是刈割处理显著降低了土壤 MR ($P < 0.05$); 3. 氮素添加+刈割处理 5—7 年后, 土壤总氨化和硝化速率均无显著变化; 但是氮素添加+刈割处理显著增加了 ANPP、土壤无机氮库和 qCO_2 , 同时显著降低了 MBC 和 MBC/MBN。这说明在弃耕草地适应性管理中, 氮素添加可以显著提高草地生产力, 但是长期的氮添加对土壤微生物氮的转化是否有利还值得我们进一步研究。

关键词: 氮素添加; 刈割; 草地; 微生物; 氮转化; 交互作用; 恢复

Effect of nitrogen addition and mowing on soil nitrogen mineralization in abandoned grasslands in Inner Mongolia

LIU Birong^{1, 2}, WANG Changhui^{1, *}, ZHANG Lihua¹, DONG Kuanhu²

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 College of Animal Science, Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China

Abstract: Agricultural restructuring and conservation priorities have led to the abandonment of farmlands in China and elsewhere. Restoration of croplands to grassland has become an important management practice during the past ten years in the grassland of Inner Mongolia in northern China. In our experimental region, grassland (steppe) represents the typical arid and semiarid regional vegetation type, which is also typical across a vast area of the Eurasian continent. Mowing of grassland is an important management practice in this area. N availability and microbial N transformation processes are key parameters for evaluation of this management practice, because these parameters greatly affect steppe productivity. However, few studies have evaluated their relative importance and interaction in old-fields in China. We investigated effects of N addition and mowing on soil N mineralization in abandoned croplands, and examined the relationships between soil N mineralization and vegetation recovery in combination with dynamic variation in soil physical-chemical properties and aboveground productivity, to provide a scientific foundation for restoration and reconstruction practices. In this study, we

基金项目: 国家自然科学基金 (31170455, 41371111); 中国科学院方向性项目

收稿日期: 2014-03-04; **网络出版日期:** 2014-12-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangch@ibcas.ac.cn

examined how two management practices, namely mowing and N addition, affect gross microbial N mineralization (ammonification and nitrification), microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN) and microbial respiration (MR) in a grass-dominated grassland in an old-field community in northern China. We began the long-term N addition and mowing experiment in 2006 in grassland that had been abandoned for ten years, near the Duolun Restoration Ecology Experimentation and Demonstration Station in Inner Mongolia, China. Four treatments were conducted, each with six replicates: control (no N addition or mowing), N addition, mowing, and N addition + mowing. N addition increased gross nitrification rate, while it had no effect on gross ammonification rate, soil MBC, MBN, microbial biomass carbon/nitrogen ratio (MBC/MBN), MR, or microbial metabolic quotient ($q\text{CO}_2$). However, N addition significantly enhanced aboveground net primary productivity (ANPP) and soil inorganic nitrogen, which increased by 115% and 196% respectively compared to controls. Mowing had no significant effect on gross nitrification and ammonification rates, while it significantly reduced soil MR. After five to seven years, N addition + mowing had no significant effect on soil gross ammonification and nitrification rates. However, this treatment had significant positive effects on ANPP, $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$, and $q\text{CO}_2$, while it had significant negative effects on MBC and MBC/MBN. Therefore, N addition is an effective means of increasing productivity in abandoned grasslands, but we need think carefully whether long-term N addition promotes soil microbial N transformation in abandoned grasslands. Our results highlight the need for further study of the importance of belowground C supply as a control of microbial N cycling processes. Furthermore, during the restoration of degenerated croplands, N cycling rates are stimulated, but the magnitude of this stimulation is modulated by plant community composition. Considering the significant effect of inter-annual rainfall variability on the key microbial parameters we investigated in our semi-arid study region, we emphasize that further long-term studies are needed to examine the responses of N transformation, microbial biomass, and MR to anthropogenic perturbations such as mowing and N addition.

Key Words: Nitrogen addition; Mowing; Grassland; Microbe; Nitrogen transformation; Interaction effect; Restoration

土壤氮矿化是在土壤微生物的作用下,土壤中的有机态氮转化为无机态氮的生物化学过程,决定着土壤氮素的可利用性^[1]。微生物是土壤氮转化的主体,由微生物驱动的氮转化过程包括生物固氮作用、硝化作用、反硝化作用和氨化作用等^[2-3]。其中,氨化与硝化反应是土壤氮转化的两个重要过程^[4],不仅决定着地上植被对土壤有效氮的利用程度,同时与温室气体(如 NO 、 N_2O)排放和硝酸盐淋溶引起的水体污染等一系列生态环境问题直接相关。微生物生物量及其呼吸速率是衡量土壤微生物活性的重要指标^[5-6]。

内蒙古草地是欧亚大陆植被类型的典型代表区域之一^[7]。20 世纪 80 年代以来,由于长期的超载过牧和过渡开垦,导致该地区草地植被严重退化,土壤的保水保墒能力下降,氮素的可利用性降低^[8-9]。草地施氮肥在增加土壤无机氮库的同时可以显著提高地上生产力^[7,10-12]。氮素添加对草地土壤氮矿化的影响随土壤养分含量、气候类型、施氮时间长短及其剂量的不同在各研究中结果不同。于占源等^[13]认为沙质草地的土壤净氮矿化速率与硝化速率在添加氮素后显著增加,白洁冰等^[14]发现氮素添加显著增加了高寒草原和高寒湿地的土壤氮矿化速率,从而促进土壤氮素转化,但张璐等^[10]对内蒙古羊草草原研究发现低氮处理($5 \text{ g NH}_4\text{NO}_3/\text{m}^2$)显著增加了土壤净氮矿化,而高氮处理($80 \text{ g NH}_4\text{NO}_3/\text{m}^2$)则呈现相反趋势。Aber 等^[15]发现长期氮素添加降低了土壤的氮矿化速率。

添加氮肥增加了草地生产力,生产力增加后如何合理利用和管理草地?刈割是高产人工和天然草地主要的利用方式之一,可以为家畜储存冬季牧草。施氮和割草是否对草地养分循环有补偿效应?Robson 等^[16]指出刈割显著促进法国阿尔卑斯山地草地植物的氮素吸收,降低微生物生物量碳氮比,从而提高土壤氮素的转化速率。而 Wang 等^[17]发现刈割在增加土壤温度的同时降低了土壤水分含量,导致微生物活性降低,土壤氮转化速率下降,但刈割+氮素添加则显著增加了微生物活性,土壤微生物氮转化速率提高。目前,刈割对天然草地和人工草地土壤氮转化影响的研究报道较多^[16-17],但关于刈割对我国弃耕草地土壤氮矿化的研究还未

见报道。另外,刈割从草地生态系统中带走部分氮素,而氮素添加和刈割交互作用对土壤氮矿化的影响还不清楚^[17]。因此,我们选择内蒙古多伦县弃耕后以 C_4 植物为优势种的草地开展了氮素添加和刈割处理的实验,旨在探讨土壤氮矿化对氮素添加和刈割的响应,以期更好地掌握施氮和刈割对草地氮矿化可能的影响机制,并为我国退化草地的恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 自然概况

野外实验在中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验示范研究站($42^{\circ}02'N$, $116^{\circ}17'E$)进行。该地区海拔高度约为 1324 m,属于半干旱草原气候,冬季寒冷干燥,夏季温和湿润。年均气温 $2.1^{\circ}C$,月平均温度从 1 月的 $-17.5^{\circ}C$ 到 7 月的 $18.9^{\circ}C$;年降水量 385.5 mm 左右,主要降水发生于 5—9 月,占全年降水量的 86% 左右^[18]。植物的平均生长季为 150 d,该区域优势种白草(*Pennisetum centrasaticum*)和克氏针茅(*Stipa krylovii*),土壤类型为栗钙土^[18]。

1.2 实验设计

样地布置采用完全随机区组设计,共设置 24 个 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 小区,各区间有 2 m 缓冲带,4 种处理依次为对照(Control)、氮素添加(N addition)、刈割(Mowing)和氮素添加+刈割(N addition + Mowing),每种处理 6 次重复。样地于 20 世纪 60 年代开始耕作,1995 年退耕撂荒自然恢复草地植被,并未进行任何方式的管理利用,2005 年围栏;2006—2012 年间,每年在 7 月中旬(该区域刚进入雨季)添加氮素 NH_4NO_3 (10 g N/m^2)。氮素添加是将 NH_4NO_3 与少量洗涤干净的细砂混匀后撒施于对应的实验样地;刈割在每年 8 月底进行,移除植物地上部分,留茬高度为 3 cm。

1.3 样品采集

2011—2013 年 8 月中旬,采用 5 cm 的土钻对 0—10 cm 土壤进行取样,每个小区设置 5 个取样点,每个样地的样品混合均匀后装入封口袋中带回实验室。土壤样品在室内过筛处理(2 mm 土壤筛)后,手工挑出可见的粗根和杂质;约 100 g 经过预处理的土壤样品风干处理,其余土壤样品在 $4^{\circ}C$ 保存。在每个小区的对角线上,随机布置 $0.2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方,齐地面剪取植物地上部分,烘干称重后获得草地地上净初级生产力(Aboveground net primary productivity)。

1.4 指标测定

土壤基本理化性状的分析采用常规方法测定^[19]。铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)用全自动微量流动注射仪(FLASTAR5000, FOSS, Sweden)测定;全氮(Total nitrogen)用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec™ 2300, FOSS, Sweden)测定;总有机碳(Total organic carbon)用重铬酸钾外加热氧化法;全磷用高氯酸-浓硫酸-钼锑抗比色法;速效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;土壤 pH 值用 pH 计测定(土:水 = 1:2.5);土壤含水量(Soil moisture content)用烘干法测定。

土壤微生物生物量采用 Joergensen 和 Mueller^[20] 及 Brookes 等^[21] 的 CHCl_3 熏蒸- K_2SO_4 浸提法,浸提液中的微生物生物量碳(Microbial biomass carbon)用重铬酸钾外加热氧化法,微生物生物量氮(Microbial biomass nitrogen)用半微量凯氏定氮法。

土壤微生物呼吸(Microbial respiration)采用静态碱液吸收法测定^[22]:称取 20 g 过筛土装入 500 ml 玻璃烧瓶,摇晃瓶口使土样平铺于瓶底,同时用移液枪向与玻璃烧瓶连接的试管中注入 5 ml 0.5 M NaOH 溶液,瓶口用橡皮塞密闭,置于 $25^{\circ}C$ 恒温培养箱培养 7 d;然后抽取 2 ml NaOH 溶液,注入 2 ml 1 M BaCl_2 ,形成白色沉淀,再注入 2—3 滴酚酞指示剂,溶液呈现红色;最后用 0.05 M HCl 滴定,直到红色恰好消失,记录盐酸的消耗量。

微生物呼吸熵(Microbial metabolic quotient)的测定参照 Wardle 和 Ghani^[23] 的方法:公式为 $q\text{CO}_2(\text{mg CO}_2 - \text{C} \cdot \text{g}^{-1} \text{C}_{\text{microbial}} \cdot \text{h}^{-1}) = \text{MR} \times \text{培养天数}/\text{MBC}/(\text{培养天数} \times 24\text{ h}) \times 1000$,式中,MR 为每天每千克土壤呼吸放出 CO_2 的毫克数。

土壤总氮化和硝化速率测定:称取两份过筛土各 180 g,分别标记上($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ 和 K^{15}NO_3 同位素溶液(3 ml/100 g 鲜土),标记后的土样均匀混合且分装到 6 个塑料瓶中,每瓶 30 g,用封口膜密封。($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ 或 K^{15}NO_3 标记的一半土样迅速添加 0.5 M K_2SO_4 溶液浸提(T_0),另一半标记土样需放回原地,埋入原位土壤培养 24—48 h 后取回,再次用 0.5 M K_2SO_4 溶液浸提(T_1)。浸提液中 $^{15}\text{NH}_4^+$ 和 $^{15}\text{NO}_3^-$ 丰度的测定采用 ^{15}N 库稀释法,步骤详见 Müller 等^[24]和 Dannenmann 等^[25]的测定。根据 Kirkham 和 Bartholomew^[26]的方程计算土壤总氮矿化与总 NH_4^+ 消耗率。以上的测定结果均以干重计算。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 初步整理和计算数据,用 SAS9.0 单因素方差分析(One-way ANOVA)实验样地的基本信息,用 Duncan's 多重比较差异显著性。3 因素方差分析(Three-way ANOVA)年份、氮素添加和刈割间的交互作用,并线性回归(Linear regression)分析 SM、土壤 MBC、MBN、MR、 $q\text{CO}_2$ 、总氮化和硝化速率等指标间的相关性。

2 结果

2.1 基本信息

2012 年施氮和刈割处理后,施氮显著增加土壤有机碳、全氮以及植物全氮含量($P < 0.05$),但土壤 pH 值呈减低趋势,比对照减少 0.68。刈割对样地的各种指标均没有显著影响,但与氮素添加相比,刈割显著降低了土壤有机碳和全氮含量,同时增加土壤 pH 值($P < 0.05$)。氮素添加+刈割处理显著提高植物全氮含量,但降低了土壤 pH 值和真菌/细菌($P < 0.05$);土壤全氮含量在氮素添加后显著高于氮素添加+刈割处理;植物全氮含量在刈割后显著低于氮素添加+刈割处理,但土壤 pH 值显著增加($P < 0.05$)(表 1)。

表 1 2013 年不同实验处理中植物-土壤-微生物的基本信息

Table 1 The basic information of plant-soil-microorganisms under different treatments in 2013

指标 Indicators	对照 Control (CK)	氮素添加 N addition (N)	刈割 Mowing (M)	氮素添加+刈割 N addition + Mowing (N + M)
土壤有机碳 Soil organic carbon /(g/kg)	26.92 ± 0.99 b	30.02 ± 0.98 a	27.47 ± 0.75 b	27.75 ± 0.25 ab
土壤全氮 Soil total nitrogen /(g/kg)	1.56 ± 0.06 b	1.75 ± 0.03 a	1.57 ± 0.06 b	1.61 ± 0.04 b
土壤碳氮比 Soil carbon/nitrogen ratio	17.30 ± 0.32 a	17.17 ± 0.54 a	17.56 ± 0.27 a	17.33 ± 0.51 a
土壤全磷 Soil total phosphorus /(g/kg)	0.14 ± 0.01 a	0.15 ± 0.01 a	0.13 ± 0.01 a	0.14 ± 0.00 a
土壤速效磷 Soil available phosphorus /(g/kg)	0.0015 ± 0.0001 a	0.0018 ± 0.0002 a	0.0014 ± 0.0002 a	0.0015 ± 0.0002 a
pH	7.51 ± 0.08 a	6.83 ± 0.12 b	7.41 ± 0.07 a	6.61 ± 0.10 b
植物总碳 Plant total carbon /(g/kg)	423.15 ± 9.01 a	441.02 ± 4.69 a	435.41 ± 16.73 a	458.43 ± 20.46 a
植物全氮 Plant total nitrogen /(g/kg)	9.69 ± 0.33 c	13.32 ± 1.62 ab	11.06 ± 0.47 bc	15.97 ± 0.75 a
真菌/细菌 ^[27] Fungi/Bacteria ratio	0.21 ± 0.00 a	0.20 ± 0.00 ab	0.20 ± 0.00 ab	0.19 ± 0.00 b

表中数据为平均值±标准误;不同小写字母代表不同处理间差异显著($P < 0.05$)

2.2 氮素添加和刈割对土壤含水量的影响

土壤含水量在不同年际间的差异极显著($F = 341.58, P < 0.01$),2012 年土壤含水量极显著高于 2011 和 2013 年,2013 年极显著高于 2011 年的土壤含水量($P < 0.01$)(图 1)。氮素添加对土壤含水量没有显著影响,刈割与对照相比仅在 2013 年极显著降低了土壤含水量($P < 0.01$)。氮素添加、刈割以及氮素添加+刈割不同处理间的土壤含水量均没有显著差异($P > 0.05$)。

2.3 氮素添加和刈割对地上净初级生产力的影响

地上净初级生产力(ANPP)受年降雨量的影响,不同年际间差异达到极显著水平($P < 0.01$)(图 2)。氮素添加极显著提高 ANPP($P < 0.01$),比对照增加了 115%;刈割对 ANPP 没有显著影响($P > 0.05$),但与氮素添加相比,ANPP 在刈割后减少了 41%;刈割和氮素添加的交互作用使 ANPP 显著提高 72%($F = 20.29, P <$

0.01), 但刈割降低了氮素添加对 ANPP 的正效应 ($P < 0.01$)。

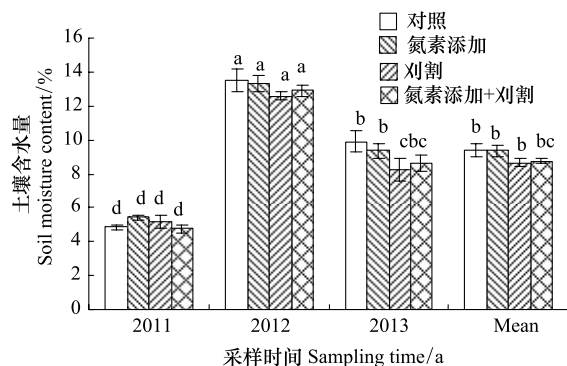


图1 氮素添加和刈割对土壤含水量的影响(平均值±标准误)

Fig.1 Effects of N addition and mowing on soil moisture content (mean ± SE)

CK, 对照 Control; N, 氮素添加 addition; M, 刈割 Mowing; N + M, 氮素添加+刈割 N addition + Mowing; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.01$)

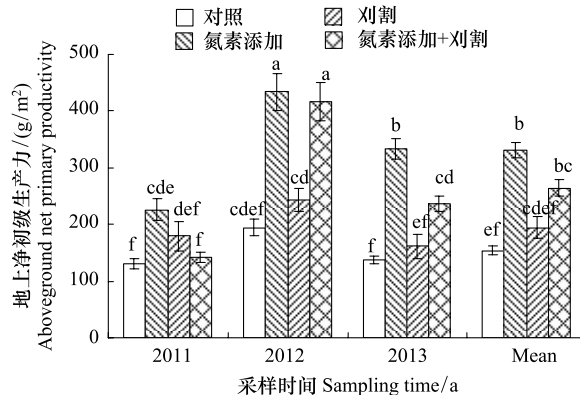


图2 氮素添加和刈割对地上净初级生产力的影响(平均值±标准误)

Fig.2 Effects of N addition and mowing on aboveground net primary productivity (mean ± SE)

CK, N, M, N + M 同图 1; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.01$)

2.4 氮素添加和刈割对土壤无机氮库、总氨化和硝化速率的影响

土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 和无机氮库 ($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$) 的浓度在不同年际间差异极显著 ($P < 0.01$) (图 3)。氮素添加显著增加了土壤的无机氮库, 比对照提高 196% ($P < 0.05$); 刈割对土壤无机氮库没有显著影响 ($P > 0.05$), 且土壤无机氮库的浓度在刈割后显著低于氮素添加和氮素添加+刈割处理; 氮素

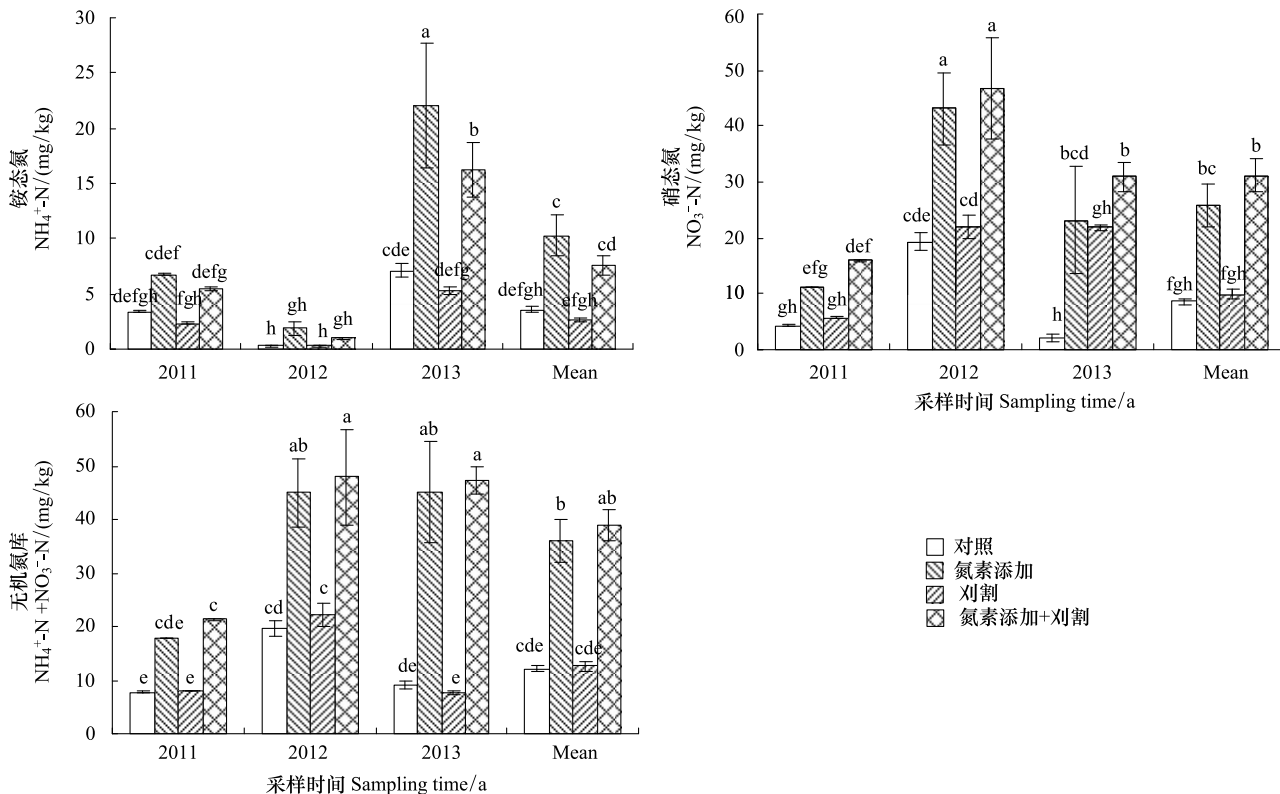


图3 氮素添加和刈割对土壤无机氮库的影响(平均值±标准误)

Fig.3 Effects of N addition and mowing on soil inorganic nitrogen pool (mean ± SE)

CK, N, M, N + M 同图 1; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

添加+刈割与对照相比,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度均显著增加 ($P < 0.05$),而氮素添加和氮素添加+刈割处理间的差异均不显著。其中,2012 年土壤无机氮库主要以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形式存在 ($P < 0.05$)。

氮素添加和刈割对土壤总氨化速率均没有显著影响 ($P > 0.05$) (图 4)。施氮显著地提高土壤总硝化速率,比对照高出 223% ($P < 0.05$);刈割对土壤总硝化速率没有显著影响 ($P > 0.05$),但刈割与氮素添加相比,土壤总硝化速率显著降低了 62% (图 5)。氮素添加和刈割的交互作用对土壤总硝化速率没有显著影响 ($P > 0.05$)。

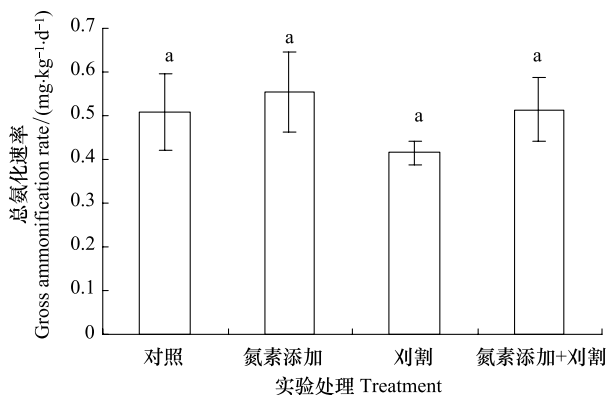


图 4 2012 年氮素添加和刈割对土壤总氨化速率的影响 (平均值 ± 标准误差)

Fig. 4 Effects of N addition and mowing on soil gross ammonification rate in 2012 (mean ± SE)

CK、N、M、N + M 同图 1; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

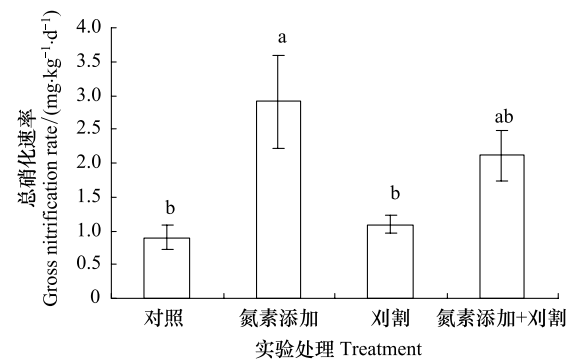


图 5 2012 年氮素添加和刈割对土壤总硝化速率的影响 (平均值 ± 标准误差)

Fig. 5 Effects of N addition and mowing on soil gross nitrification rate in 2012 (mean ± SE)

CK、N、M、N + M 同图 1; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.5 氮素添加和刈割对土壤微生物的影响

土壤 MBC、MBN、MBC/MBN、MR 和 $q\text{CO}_2$ 在不同年际间均存在极显著差异 ($P < 0.01$) (图 6, 7)。施氮对土壤微生物无显著影响,且氮素添加和刈割处理间没有显著差异 ($P > 0.05$);刈割处理在 2012 年显著降低土壤 MR,与对照相比减少 19% ($P < 0.05$)。2011—2013 年,氮素添加和刈割的交互作用显著降低土壤 MBC ($P < 0.01$) 和 MBC/MBN ($P < 0.01$),分别比对照减少 30% 和 42%,2011 年和 2012 年土壤 $q\text{CO}_2$ 在氮素添加+刈割处理后显著上升 ($P < 0.05$),均比对照提高 29%、78%。

3 讨论

3.1 氮素添加与土壤氮转化

草地施氮是提高草地生产力的有效手段,添加氮素增加土壤无机氮库的同时激发了土壤有机质的分解^[7,10-12],本实验结果表明多年施氮增加了草地土壤的无机氮库,显著提高了地上生产力,说明氮素是该地区草地初级生产力的主要限制因子之一^[28]。但是,多年施氮的结果并没有显著提高土壤总的氨化速率,却显著提高了土壤总的硝化速率,进一步证实添加氮素可以促进土壤硝化反应的发生,增强土壤微生物的氮素转化^[13-14],这与多数人的研究结果相一致,其原因是参与硝化反应的微生物活性的增强^[29]。

短期施氮能够迅速增强土壤微生物的活性及生物量,随着施氮年限的延长,土壤中难分解有机物与有毒物质(如铝离子)逐渐累积,抑制了微生物活性,从而降低土壤氮转化^[15,28,30]。本研究氮素添加 5—7 年后,土壤微生物生物量和微生物呼吸与对照相比差异不显著。其原因可能有:(1)土壤真菌和细菌对施氮剂量的敏感性存在差异,如真菌/细菌在较低施氮水平下无显著变化,而在较高施氮水平下显著降低^[31-32]。而本研究土壤真菌/细菌在氮素添加 (10 g N/m^2) 后稍有降低 ($P > 0.05$),说明土壤真菌和细菌类群之间没有选择压

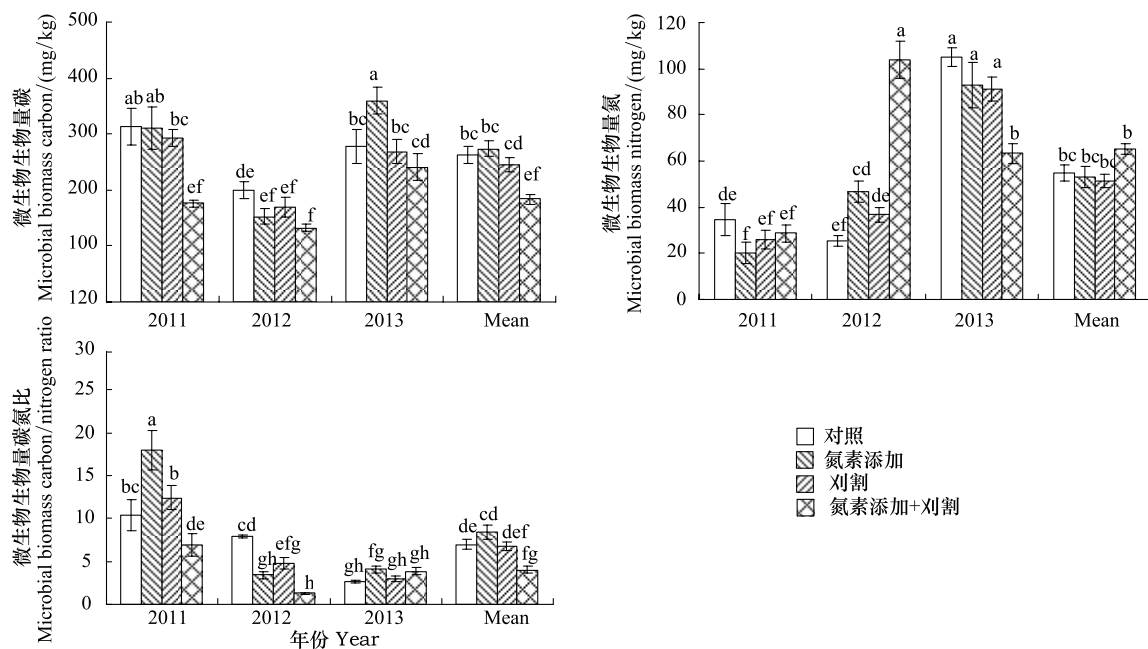


图 6 氮素添加和刈割对土壤微生物生物量的影响(平均值±标准误)

Fig.6 Effects of N addition and mowing on soil microbial biomass (mean ± SE)

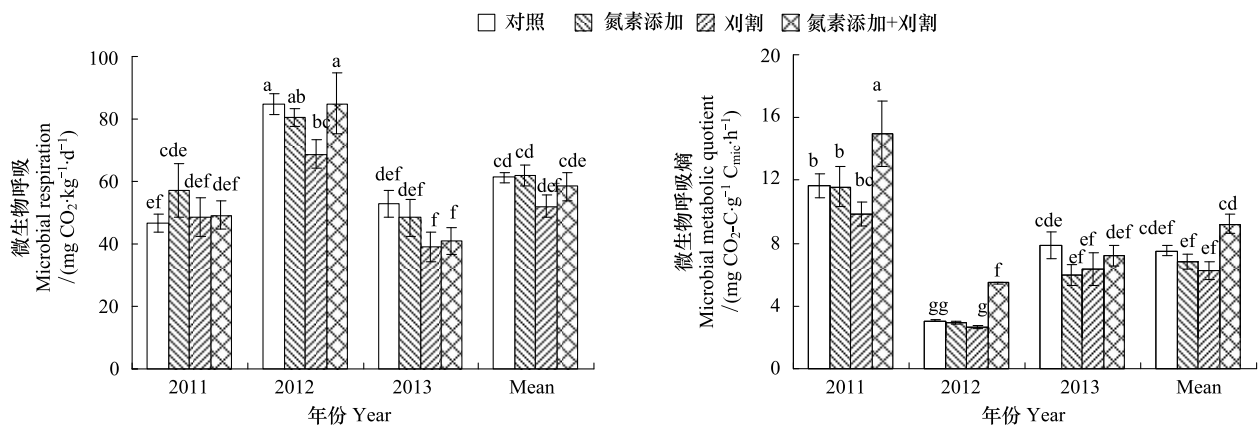
CK、N、M、N + M 同图 1; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 7 氮素添加和刈割对土壤微生物呼吸及其熵的影响(平均值±标准误)

Fig.7 Effects of N addition and mowing on soil microbial respiration and metabolic quotient (mean ± SE)

CK、N、M、N + M 同图 1; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

力,微生物群落已适应这种长期氮素添加的干扰;(2)氮素添加可能通过促进地上生产力引起植物群落氮吸收量的增加(表 1),土壤微生物的活性受植物调控的程度大于氮素添加的直接调控作用^[33]。

3.2 刈割与土壤氮转化

本研究刈割处理没有增加初级生产力,分析有 2 方面的原因:(1)氮素是内蒙古草地初级生产力的主要限制因子之一^[28],土壤无机氮库及氮转化在割草处理后均无显著变化;(2)水分是半干旱草地生产力和微生物活性的重要限制因子之一,割草在增加地表温度的同时降低了土壤含水量^[17]。刈割通过改变微生物的活性来影响土壤氮的转化速率,Uhlířová 等^[34]提出割草通过降低地上部分有机碳的输入量来减少微生物生长的能量来源,从而降低土壤微生物氮转化。而 Kuzyakov 等^[35]认为,刈割可促进植物的根系分泌,较多的根系分泌物增加了土壤微生物生物量,从而增强土壤微生物的氮转化能力。Wang 等^[17]提出土壤 MBC 和 MBN 在刈割后均显著降低了 10.3%、7.1%,其原因可能是土壤较低的 pH 值($pH = 6.84$)导致的。因为低 pH 值提高

了土壤溶液中交换性铝离子的生物毒性,抑制碳从植物向土壤中释放,同时降低植物碳转化为微生物碳的效率,减少土壤微生物生物量^[36]。

本研究表明土壤微生物生物量、全氮和总有机碳在刈割后均无显著变化,与 Uhlířová 等^[34] 研究结果一致,微生物生物量与土壤有机质浓度有关,呈正相关关系。土壤微生物呼吸强度的主要影响因素包括原核生物多样性、土壤微生物生物量、有机质和土壤水分含量^[37],刈割显著降低了土壤 MR,但土壤 MR 与土壤水分含量、pH 值、微生物生物量和有机质均无显著的相关性,可能是多年刈割使原核生物多样性发生变化;但由于缺乏土壤微生物多样性的直接数据,该推测还有待于进一步验证。

3.3 氮素添加+刈割与土壤氮转化

氮素添加和刈割共同作用 5—7 年后,草地土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度均显著增加,同时地上生产力呈现升高的趋势,意味着氮素是限制弃耕草地的主要元素之一,较高的无机氮浓度通过促进植物生长引起植物群落氮吸收量的增加(表 1),增强植物-微生物对土壤养分的竞争。衡量土壤微生物对养分利用有效性的重要指标是微生物呼吸熵^[38]。对土壤真菌/细菌单因素方差分析显示,细菌的相对丰富度在氮素添加+刈割处理后显著增加(表 1),导致土壤 $q\text{CO}_2$ 值增加,这与 Grayston 等^[39] 的研究结果一致。土壤 $q\text{CO}_2$ 值较大,表明微生物呼吸消耗的碳比例较高,合成微生物自身细胞的碳比例相对较低,从而降低土壤微生物的代谢速率^[38]。本研究较高的 $q\text{CO}_2$ 值致使微生物合成自身细胞的碳比例降低,因此土壤 MBC 和 MBC/MBN 在氮素添加+刈割处理后呈现降低趋势。总之,在半干旱草原生态系统中,氮素添加和刈割的共同作用降低了土壤微生物生物量及其代谢速率,倾向于降低土壤微生物氮转化。

4 结论

氮素添加和刈割对内蒙古弃耕草地土壤氮矿化及微生物活性具有重要影响,主要结论如下:(1)氮素添加可增加土壤中的无机氮库,同时显著提高植物 ANPP,弃耕草地土壤微生物经多年氮素添加后已处于一种相对稳定的状态。氮素添加显著增强土壤总硝化速率,促进土壤微生物氮转化。

(2)刈割显著降低土壤 MR,而土壤总氮矿化无显著影响。氮素添加+刈割处理后显著增加植物 ANPP、土壤无机氮库和 $q\text{CO}_2$,同时减少 MBC 和 MBC/MBN,土壤微生物氮转化呈降低趋势。

(3)内蒙古弃耕草地是受氮素限制的生态系统,氮素添加是提高生产力和恢复退化草地的有效手段。氮素添加和刈割的交互作用显著降低土壤微生物生物量,增加土壤微生物呼吸熵,从而降低了土壤氮素的利用率,究其原因是刈割从草地生态系统中带走部分氮素,降低生态系统的氮素利用率,进而降低土壤氮素转化。因此在内蒙古弃耕草地恢复过程中,增施氮肥有利于增加草地植被生产力,同时增强土壤微生物的氮素转化,有利于该地区草地的可持续利用。

参考文献(References):

- [1] 王常慧,邢雪荣,韩兴国. 温度和湿度对我国内蒙古羊草草原土壤净氮矿化的影响. 生态学报, 2004, 24(11): 2472-2476.
- [2] Holst J, Liu C Y, Brüggemann N, Butterbach-Bahl K, Zheng X H, Wang Y S, Han S H, Yao Z S, Jin Y, Han X G. Microbial N turnover and N-oxide ($\text{N}_2\text{O}/\text{NO}/\text{NO}_2$) fluxes in semi-arid grassland of Inner Mongolia. Ecosystems, 2007, 10(4): 623-634.
- [3] Müller C, Rütting T, Kattge J, Laughlin R J, Stevens R J. Estimation of parameters in complex ^{15}N tracing models by Monte Carlo sampling. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(3): 715-726.
- [4] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: effects of management changes. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27(7): 969-975.
- [5] 何亚婷,董社社,齐玉春,肖胜生,刘欣超. 草地生态系统土壤微生物量及其影响因子研究进展. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1350-1359.
- [6] 贾丙瑞,周广胜,王凤玉,王玉辉. 土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1547-1552.
- [7] Zhang N L, Wan S Q, Li L H, Bi J, Zhao M M, Ma K P. Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi-arid temperate steppe in northern China. Plant and Soil, 2008, 311(1/2): 19-28.
- [8] Yuan Z Y, Li L H, Han X G, Huang J H, Jiang G M, Wan S Q, Zhang W H, Chen Q S. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China. Journal of Arid Environments, 2005, 63(1): 191-202.

- [9] Yuan Z Y, Li L H, Han X G, Chen S P, Wang Z W, Chen Q S, Bai W M. Nitrogen response efficiency increased monotonically with decreasing soil resource availability: a case study from a semiarid grassland in northern China. *Oecologia*, 2006, 148(4): 564-572.
- [10] 张璐, 黄建辉, 白永飞, 韩兴国. 氮素添加对内蒙古羊草草原净氮矿化的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 563-569.
- [11] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响. *生态学报*, 2007, 27(1): 197-204.
- [12] Köchy M, Wilson S D. Nitrogen deposition and forest expansion in the northern Great Plains. *Journal of Ecology*, 2001, 89(5): 807-817.
- [13] 于占源, 曾德慧, 艾桂艳, 姜凤岐. 添加氮素对沙质草地土壤氮素有效性的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(11): 1894-1897.
- [14] 白洁冰, 徐兴良, 付刚, 宋明华, 何永涛, 蒋婧. 温度和氮素输入对青藏高原 3 种高寒草地土壤氮矿化的影响. *安徽农业科学*, 2011, 39(24): 14698-14700, 14756-14756.
- [15] Aber J D, Magill A H. Chronic nitrogen additions at the Harvard Forest (USA): the first 15 years of a nitrogen saturation experiment. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 1-5.
- [16] Robson T M, Baptist F, Clément J C, Lavorel S. Land use in subalpine grasslands affects nitrogen cycling via changes in plant community and soil microbial uptake dynamics. *Journal of Ecology*, 2010, 98(1): 62-73.
- [17] Wang C H, Butterbach-Bahl K, Han Y, Wang Q B, Zhang L H, Han X G, Xing X R. The effects of biomass removal and N additions on microbial N transformation and biomass at different vegetation types in an old-field ecosystem in northern China. *Plant and Soil*, 2011, 340(1/2): 397-411.
- [18] Liu W X, Zhang Z, Wan S Q. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, 2009, 15(1): 184-195.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Joergensen R G, Mueller T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the K_{EN} value. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(1): 33-37.
- [21] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [22] Hu S, van Bruggen A H C. Microbial dynamics associated with multiphasic decomposition of ^{14}C -labeled cellulose in soil. *Microbial Ecology*, 1997, 33(2): 134-143.
- [23] Wardle D A, Ghani A. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO_2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(12): 1601-1610.
- [24] Müller C, Stevens R J, Laughlin R J. A ^{15}N tracing model to analyze N transformations in old grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(4): 619-632.
- [25] Dannenmann M, Gasche R, Ledebuhr A, Papen H. Effects of forest management on soil N cycling in beech forests stocking on calcareous soils. *Plant and Soil*, 2006, 287(1/2): 279-300.
- [26] Kirkham D, Bartholomew W V. Equations for following nutrient transformations in soil, utilizing tracer data. *Soil Science Society of America Journal*, 1954, 18(1): 33-34.
- [27] Balasooriya W K, Deneff K, Huygens D, Boeckx P. Translocation and turnover of rhizodeposit carbon within soil microbial communities of an extensive grassland ecosystem. *Plant and Soil*, 2014, 376(1/2): 61-73.
- [28] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.
- [29] Barnard R, Le Roux X, Hungate B A, Cleland E E, Blankinship J C, Barthes L, Leadley P W. Several components of global change alter nitrifying and denitrifying activities in an annual grassland. *Functional Ecology*, 2006, 20(4): 557-564.
- [30] Wallenstein M D, McNulty S, Fernandez I J, Boggs J, Schlesinger W H. Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 459-468.
- [31] Rousk J, Brookes P C, Baath E. Fungal and bacterial growth responses to N fertilization and pH in the 150-year 'Park Grass' UK grassland experiment. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 76(1): 89-99.
- [32] de Vries F T, Hoffland E, van Eekeren N, Brussaard L, Bloem J. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(8): 2092-2103.
- [33] Liu W X, Xu W H, Han Y, Wang C H, Wan S Q. Responses of microbial biomass and respiration of soil to topography, burning, and nitrogen fertilization in a temperate steppe. *Biology and Fertilization of Soils*, 2007, 44(2): 259-268.
- [34] Uhlířová E, Šimek M, Jantrůčková H. Microbial transformation of organic matter in soils of montane grasslands under different management. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28(3): 225-235.
- [35] Kuzyakov Y, Biryukova O V, Kuznetsova T V, Mölter K, Kandeler E, Stahr K. Carbon partitioning in plant and soil, carbon dioxide fluxes and enzyme activities as affected by cutting ryegrass. *Biology and Fertilization Soils*, 2002, 35(5): 348-358.
- [36] Pietri J C A, Brookes P C. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7): 1856-1861.
- [37] 贾建伟, 王磊, 唐玉姝, 李艳丽, 张文俊, 王红丽, 付小花, 乐毅全. 九段沙不同演替阶段湿地土壤微生物呼吸的差异性及其影响因素. *生态学报*, 2010, 30(17): 4529-4538.
- [38] 周焱, 徐宪根, 王丰, 阮宏华, 汪家社, 方燕鸿, 吴焰玉, 徐自坤. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(qMB , qCO_2). *生态学杂志*, 2009, 28(2): 265-269.
- [39] Grayston S J, Griffith G S, Mawdsley J L, Campbell C D, Bardgett R D. Accounting for variability in soil microbial communities in temperate grassland ecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(4/5): 533-551.