

DOI: 10.11766/trxb201808260218

模拟氮沉降下施石灰对休耕红壤优势植物根际土壤微生物群落的影响*

邓玉峰¹ 田善义¹ 成艳红² 胡正锟¹ 刘满强¹ 胡 锋¹ 陈小云^{1†}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 江西省红壤研究所, 南昌 331717)

摘 要 氮沉降引起红壤酸化加剧和土壤生态系统功能退化。采用休耕植物自然演替恢复土壤生物多样性和生态系统功能; 同时, 针对氮沉降造成的土壤酸化, 通过施石灰来调控土壤 pH, 以期加速土壤生态恢复进程。土壤微生物群落结构的改变能够指示土壤恢复措施的影响。为探究氮沉降背景下, 石灰施用措施对休耕红壤生态功能的恢复效果, 以高强度农作休耕地上最初出现的优势植物狗尾草 (*Setaria viridis* (L.) Beauv) 根际为研究对象, 研究模拟氮沉降 (0 kg·hm⁻², 45 kg·hm⁻² 和 90 kg·hm⁻²) 下施石灰 (0 kg·hm⁻² 和 110 kg·hm⁻²) 对根际土壤微生物群落的影响。结果表明, 模拟氮沉降降低了各类群微生物磷脂脂肪酸 (PLFA) 量、革兰氏阴/阳性细菌比及香农多样性指数。在没有额外施氮的处理中, 施石灰降低了各类群微生物 PLFA 量。而氮和石灰交互作用下, 各类群微生物 PLFA 量均随氮沉降量增加而增加。结构方程模型显示, 石灰对微生物群落的影响最为强烈; 模拟氮沉降和施石灰通过综合影响土壤 pH、养分有效性及植物—微生物养分竞争而改变微生物群落结构和多样性。总之, 模拟氮沉降下施用石灰措施能够改善休耕红壤生境, 降低因氮沉降造成的酸化对根际微生物群落的危害, 加速土壤生态系统恢复。

关键词 退化红壤; 休耕地; 模拟氮沉降; 生态恢复; 根际土壤微生物

中图分类号 X825 **文献标识码** A

不合理的人为活动导致全球大气氮沉降量逐渐增加, 氮沉降成为全世界关注的重要环境问题之一^[1]。近年来我国氮沉降量急剧增加, 总氮沉降量每年已超过 1 500 万吨, 成为继欧洲和北美之后的世界第三大氮沉降区^[2]。过量的氮输入导致的土壤酸化、速效养分流失、生物多样性降低、微生物群落改变等问题已得到深入研究^[2-4]。红壤作为我国重要的土壤资源, 由于其自身发育以及气候等因素作用已经面临严重的酸化、生物退化等生态问题, 同时严重的氮沉降势必会加剧红壤地区的生态退化, 每年氮沉降输入红壤旱地的氮含量约为 94.50~

185.99 kg·hm⁻², 农田氮沉降普遍盈余, 对红壤生态系统造成威胁^[5-6], 阻碍红壤地区的经济社会可持续发展。

为维护我国生态安全, 有必要采取有效措施遏制氮沉降下土壤生态环境的继续恶化, 促进土壤生态功能的恢复和可持续性发展。近年来, 人们意识到依靠植被的自然恢复能力等调控措施恢复土壤生态健康的重要性, 通过农田休耕, 停止人为干扰后植被自行修复能够恢复生物多样性和生态系统功能^[7-8]。休耕演替初期, 占据生境的优势植物对土壤环境的改变起到了至关重要的作用, 且植物根际性质是其利用

* 国家自然科学基金项目 (41371263) 及中央业务费重点项目 (KYTZ201404) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41371263) and the Key Project of Central Business Fee (No. KYTZ201404)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xychen@njau.edu.cn

作者简介: 邓玉峰 (1990—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: 15295592116@163.com.cn

收稿日期: 2018-08-26; 收到修改稿日期: 2018-12-23; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-02-18

土壤养分和适应脆弱环境的最直接表征之一^[9]。同时,针对氮沉降下红壤恢复过程中存在的关键限制因子——土壤酸化,采取施用石灰可以有效克服这一限制因子。石灰作为土壤酸度改良剂,能够提高土壤肥力^[10],加速红壤生态恢复进程。土壤生态恢复过程伴随着土壤生物群落和生物功能的改变。根际微生物存在于植物根系与土壤物质交换最为活跃的界面——根际中,是根际土壤的重要组成部分,对环境因子较为敏感,生境的改变(如:土壤酸度、养分含量等)会引起根际微生物群落结构和多样性发生改变^[11],同时土壤微生物作为生态系统中物质循环和能量流动的重要参与者,在维持和反映生态系统健康方面起着重要作用,是评价自然或人为干扰引起土壤质量变化的重要指标^[12]。

本研究通过氮添加模拟大气氮沉降,并通过石灰调控土壤酸度,选取休耕地演替初期先锋优势植物狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv)的根际土壤微生物群落为研究对象,结合全球变化因素和人为管理措施的综合影响因子,研究模拟氮沉降背景下施石灰对休耕红壤根际微生物群落的影响。基于已有的研究提出以下假说:模拟氮沉降能够增加土壤肥力而促进初级生产力,施石灰能够提高根际土壤 pH 改善根际微生物群落生境,因而氮沉降与石灰共同作用可增加土壤微生物生物量;但是由于减少了环境限制因子的维度和生态位,氮沉降与石灰的共同作用会降低微生物多样性。预期结果有助于深入了解氮沉降下改良剂施用对休耕红壤微生物群落的影响,还将为热带和亚热带生态系统恢复措施完善提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于江西省红壤研究所(116°20'24"E, 28.3°15'30"N),属亚热带季风气候,年均气温 17.7~18.5 °C,年均降雨量 1 537 mm,年蒸发量 1 100~1 200 mm。土壤质地为粉砂质黏土,初始土壤 pH 5.27,土壤有机碳 10.37 g·kg⁻¹,全氮 0.99 g·kg⁻¹,全磷 0.62 g·kg⁻¹,速效钾 179.07 mg·kg⁻¹。休耕前连续多年种植制度为花生—红薯轮作,休耕后对耕层土壤进行混匀处理以减少土壤异质性对试验结果的

影响。休耕前两年禾本科植物狗尾草为优势物种,生物量约占每个小区总生物量的 80%。

1.2 试验设计

定位试验始于 2015 年 1 月,休耕后植被自然生长,试验采用 3 氮×2 石灰的二因素完全交互设计。当地氮沉降量为每公顷每年 40 kg N,在此基础上模拟低量(N0)、中量(N1)、高量(N2)三个氮(N)沉降水平,分别施 N 0、45、90 kg·hm⁻²·a⁻¹,以 NH₄NO₃ 形式于每年 3 月份和 7 月份分两次施入。石灰需要量通过理论计算,以提升耕层土壤(20 cm) pH 1 个单位确定石灰用量,石灰处理(L)设置 L0、L1 两个水平,施用量 0、110 kg·hm⁻²·a⁻¹,以 Ca(OH)₂ 形式直接施入土壤,每年 3 月份一次性施入。小区面积为 6.3 m×4 m,每个处理设置 5 个重复,随机区组排列。

1.3 样品采集

于 2016 年 10 月 5 日,此时为狗尾草生物量最大期。每个小区内随机采集 30 cm×30 cm 面积大小的狗尾草生长区域,将植物样品地上部和根系分离后分开保存,烘干称重后粉碎用于养分含量分析。采用抖根法收集根际土壤样品并立即带回实验室,室内过 2 mm 筛混匀。部分土样保存于 4 °C 条件下用于土壤速效养分分析并迅速测定;部分土样冷冻干燥后用于微生物磷脂脂肪酸(PLFA)的测定;部分土样风干后用于土壤 pH、交换性钙(Ca²⁺)与交换性铝(Al³⁺)的测定。

1.4 土壤基础性质测定

采用常规方法测定土壤 pH 用 1:2.5(土:水, w:v)浸提, pH 计(METTLER-S220-K)测定;交换性钙(Ca²⁺)含量用 1 mol·L⁻¹ NH₄COOH 交换,原子吸收分光光度法测定;交换性铝(Al³⁺)含量采用 1 mol·L⁻¹ KCl 交换,中和滴定法测定;矿质氮(NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 之和)采用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提,流动分析仪(Auto Analyser AA3,德国)测定;有效磷采用 0.03 mol·L⁻¹ NH₄F-0.025 mol·L⁻¹ HCl 溶液浸提,钼蓝比色法测定;可溶性有机碳(DOC)采用超纯水浸提 TOC 分析仪(Elementar,德国)测定。

1.5 磷脂脂肪酸(PLFA)的提取、分离、鉴定

采用修正的 Bligh-Dyer 方法进行提取^[13]:称取 8 g 冷冻干燥土样于特氟龙试管中,用柠檬酸缓冲溶液(pH 4.0):氯仿:甲醇(体积比为 0.8:1:2)

振荡提取总脂类,经过 SPE 硅胶柱分离去除中性脂、糖脂,从而得到磷脂,碱性甲酯化后,用 Agilent GC-6850 气相色谱仪分析 PLFA 的成分,内标为正十九烷酸甲酯(19:0),各成分脂肪酸通过 MIDI Sherlock 软件进行微生物的鉴定。根据磷脂脂肪酸的分子结构将其划分不同的微生物类群^[14-16],细菌以 i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0, 16:1 ω 7 \square , \square y17:0, 18:1 ω 7 \square , \square y19:0 来表征;真菌以 16:1 ω 5 \square , 18:1 ω 9 \square , 18:2 ω 6,9 \square 来表征;放线菌以 10Me16:0, 10Me17:0, 10Me18:0 来表征。其中 i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0 代表革兰氏阳性菌(G^+), 16:1 ω 7 \square , \square y17:0, 18:1 ω 7 \square , \square y19:0 代表革兰氏阴性菌(G^-), 16:1 ω 5c 代表丛枝菌根真菌(AMF), 18:1 ω 9 \square , 18:2 ω 6,9 \square 代表腐生真菌。

1.6 数据处理

采用 Statistica 7 软件进行数据相关性分析,用 Origin 8.5 软件作柱状图, R 3.3.1 软件作结构方程模型(SEM)。采用多因素方差分析氮和石灰添加对土壤化学性质、植物生物量和微生物群落的影响,采用单因素方差分析评价处理间的差异显著性,平均值多重比较统计学检验采用最小显著极差法(LSD)。利用结构方程模型(SEM)探明模拟氮沉降和施石灰对微生物群落直接及通过根际土壤 pH、速效养分、植物生物量间接产生的影响,其中速效养分用包含 DOC、矿质氮、有效磷和交换性 Ca^{2+} 的 PCA 一轴(PC1)数据表征,植物生物量由包含茎叶和根系生物量的 PCA 一轴(PC1)数据表征。

2 结果

2.1 根际土壤化学性质

方差分析显示,模拟氮沉降对除交换性 Ca^{2+} 以外其他土壤化学指标均有显著影响($P < 0.05$),石灰对所有测定土壤化学指标的影响均达到显著水平,而二者交互作用仅对 DOC、交换性 Al^{3+} 含量有显著影响(表 1)。与对照相比,模拟氮沉降导致根际土壤 pH、有效磷含量降低,矿质氮、交换性 Al^{3+} 含量升高,DOC 含量则随模拟氮沉降量增加呈先下降后上升的趋势(表 2)。模拟氮沉降下施石灰, pH 和交换性 Ca^{2+} 含量升高,DOC、有效磷、交换性 Al^{3+} 含量降低,矿质氮含量则无显著变化(表 2)。

2.2 植物生物量

方差分析表明,模拟氮沉降对植物茎叶和根系生物量均有显著影响,而石灰仅对根系生物量有显著影响,而二者交互作用对茎叶和根系生物量均没有显著影响(表 1)。无论石灰施用与否,植物茎叶生物量、根系生物量均随模拟氮沉降量增加呈上升趋势,且石灰处理下上升更为明显(图 1)。

2.3 根际土壤微生物群落

方差分析显示,模拟氮沉降对微生物总量、细菌总量、革兰氏阴性菌生物量(PLFA 含量表征)以及革兰氏阴/阳性细菌比有显著影响,施石灰对真菌总量、丛枝菌根真菌生物量、革兰氏阴性菌生物量、革兰氏阴/阳性细菌比、真菌/细菌比及香农多样性指数均有显著影响,氮和石灰交互作用对几乎所有的

表 1 模拟氮沉降和施石灰对根际土壤化学性质和植物生物量的影响方差分析

Table 1 ANOVAs of effects of simulated nitrogen deposition and liming on rhizosphere soil chemical properties and plant biomass

变异来源	pH	可溶性有机碳	矿质氮	有效磷	交换性铝	交换性钙	茎叶生物量	根系生物量
Source of variation		DOC	MN	AP	Ex Al	Ex Ca	SB	RB
N	43.45**	14.28**	5.99**	4.91*	115.70**	2.08	9.26**	12.47**
L	1 308.60**	65.46**	7.41*	11.52**	339.19**	15.91**	1.34	4.81*
N×L	2.43	7.00**	0.36	1.10	106.40**	0.71	0.19	1.61

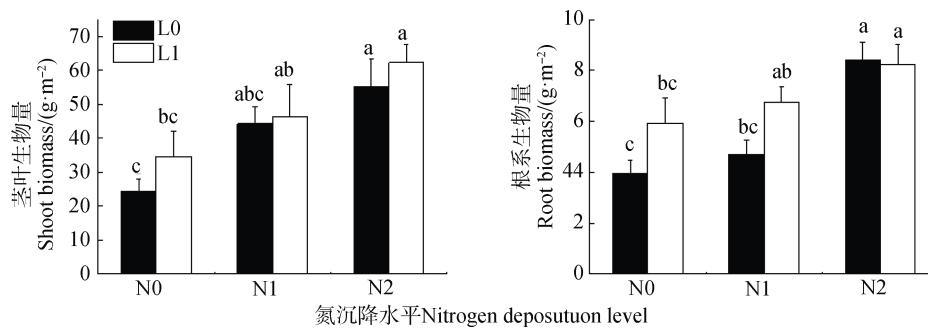
注: N, 氮; L, 石灰; N×L, 氮×石灰; 表中数据和星号为 F 值和显著水平, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; DOC: 可溶性有机碳; MN: 矿质氮; AP: 有效磷; Ex Al: 交换性铝; Ex Ca: 交换性钙; SB: 茎叶生物量; RB: 根系生物量。下同 Note: N stands for nitrogen; L for lime; and N×L for Interaction of nitrogen and lime amendments; The data in the table are F values; * means $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$; DOC stands for dissolve organic carbon; MN for mineral nitrogen; AP for available phosphorus; Ex Al for exchangeable aluminum; Ex Ca for exchangeable calcium; SB for shoot biomass; and RB for root biomass. The same below

表 2 模拟氮沉降和施石灰对根际土壤化学性质的影响

Table 2 Effects of simulated nitrogen deposition and liming on rhizosphere soil chemical properties

处理 Treatment	pH	可溶性有机碳 DOC/ (mg·kg ⁻¹)	矿质氮 MN/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	交换性铝 Ex Al ³⁺ / (cmol·g ⁻¹)	交换性钙 Ex Ca ²⁺ / (g·kg ⁻¹)	
N0	L0	5.4±0.0d	162.5±10.0b	10.6±2.2bc	2.9±0.3a	224.0±47.8b	0.9±0.3ab
	L1	6.5±0.0a	124.9±2.6c	7.8±0.7c	1.9±0.2bc	10.0±1.6c	1.1±0.1a
N1	L0	5.2±0.0e	125.9±6.6c	13.3±1.3ab	1.9±0.2bc	271.0±85.9b	0.5±0.0bc
	L1	6.3±0.0b	103.3±5.5d	10.1±0.7bc	1.5±0.2c	15.0±4.2c	1.1±0.2a
N2	L0	5.1±0.0f	181.9±6.9a	17.9±2.2a	2.2±0.2bc	961.0±47.0a	0.4±0.1c
	L1	6.1±0.1c	111.1±5.9cd	12.4±2.3bc	1.7±0.2bc	28.5±2.4c	1.0±0.1a

注：不同字母表示处理之间差异显著 (P < 0.05) Note: Different letters mean significant difference between treatments at 0.05 level



注：不同字母表示处理之间差异显著 (P < 0.05) Note : Different letters represent significant difference among treatments at 0.05 level

图 1 模拟氮沉降和施石灰对植物茎叶和根系生物量的影响

Fig. 1 Effects of simulated nitrogen deposition and liming on plant aboveground and root biomass

微生物群落指标均有影响 (表 3)。除革兰氏阳性菌外,模拟氮沉降导致各类群微生物生物量及真菌/细菌比、革兰氏阴/阳性细菌比、香农多样性指数降低 (图 2,图 3);在没有额外施氮条件时施石灰也导致

各微生物群落生物量下降,而革兰氏阴/阳性细菌比则显著升高;模拟氮沉降下施石灰,所测各类群微生物生物量均随氮沉降量增加呈上升趋势;而香农多样性指数并未受交互作用的影响。

表 3 模拟氮沉降和施石灰对根际土壤微生物群落影响的方差分析

Table 3 ANOVAs results of effects of simulated nitrogen deposition and liming on rhizosphere soil microbial community

变异来源 Source of variation	微生物总量 Total PLFA	细菌总量 Total bacterial	真菌总量 Total fungi	放线菌 Actinomycetes	丛枝菌根真菌 AMF	腐生真菌 Saprophytic fungi
N	3.91*	5.02*	2.32	0.95	2.37	1.77
L	0.02	0.14	4.51*	0.12	12.13**	0.18
N×L	6.04**	5.56*	9.50**	5.53*	8.67**	7.77**

变异来源 Source of variation	革兰氏阳性菌 G ⁺	革兰氏阴性菌 G ⁻	真菌/细菌比 F/B	革兰氏阴/阳性细菌比 G ⁻ /G ⁺	香农多样性指数 H
N	2.05	11.53**	1.63	8.38**	1.68
L	1.85	6.64*	15.56**	39.64**	6.35*
N×L	7.19**	4.49*	4.95*	6.51**	1.69

注：AMF：丛枝菌根真菌，G⁺：革兰氏阳性菌，G⁻：革兰氏阴性菌，F/B：真菌/细菌比，G⁻/G⁺：革兰氏阴阳细菌比，H：香农多样性指数。下同 Note: AMF stands for Arbuscular mycorrhizal fungi; G⁺ for Gram positive bacteria; G⁻ for Gram negative bacteria; F/B for Ratio of fungi to bacteria; G⁻/G⁺ for Ratio of gram negative bacteria to gram positive ones; and H for Shannon diversity index. The same below

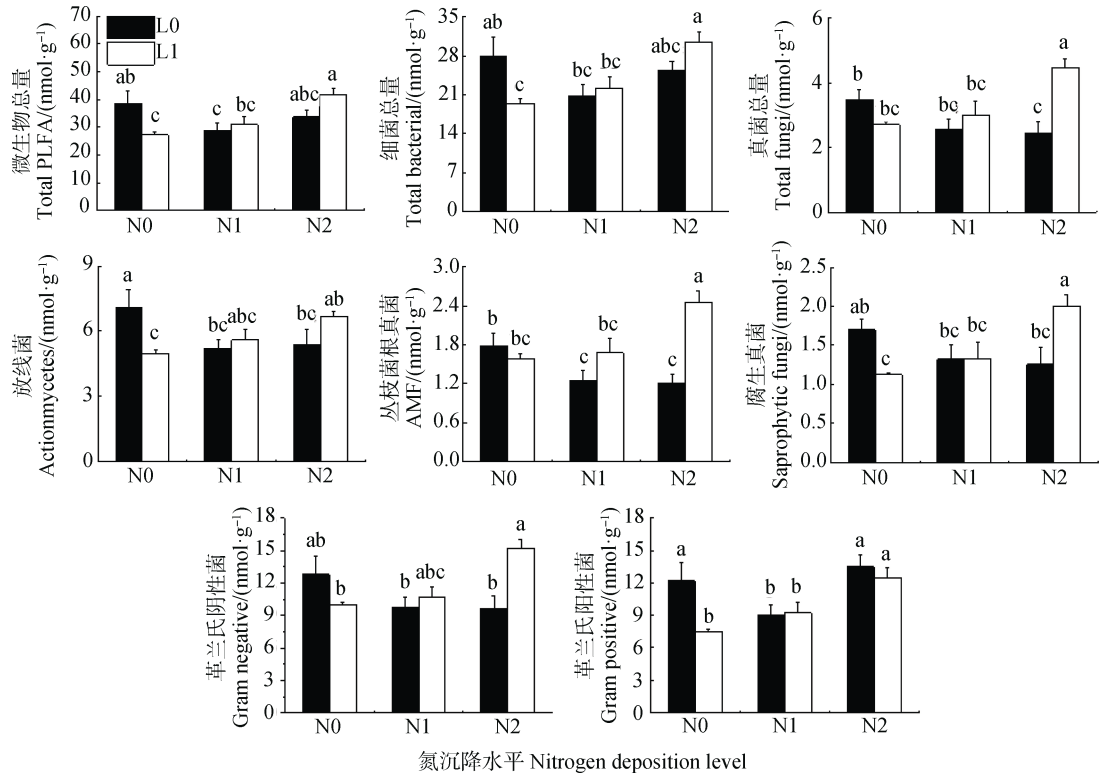


图2 模拟氮沉降和施石灰对各类群微生物 PLFA 含量的影响
Fig. 2 Effects of simulated nitrogen deposition and liming on microbial PLFAs

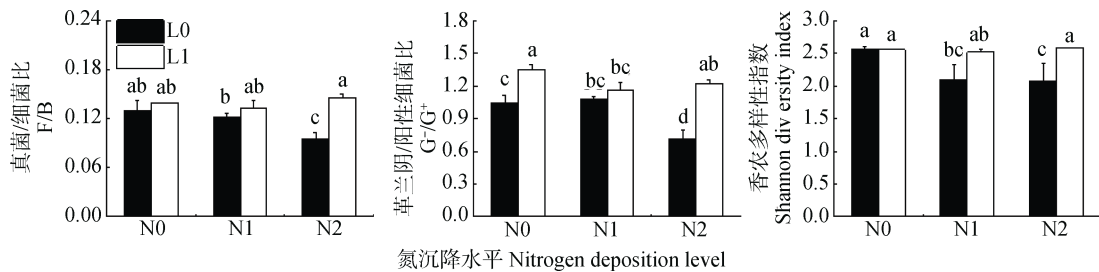


图3 模拟氮沉降和施石灰对根际土壤真菌/细菌比、革兰氏阴/阳性细菌比、香农多样性指数的影响
Fig. 3 Effects of simulated nitrogen deposition and liming on the F/B ratio, G⁻/G⁺ ratio and Shannon diversity in rhizosphere soil

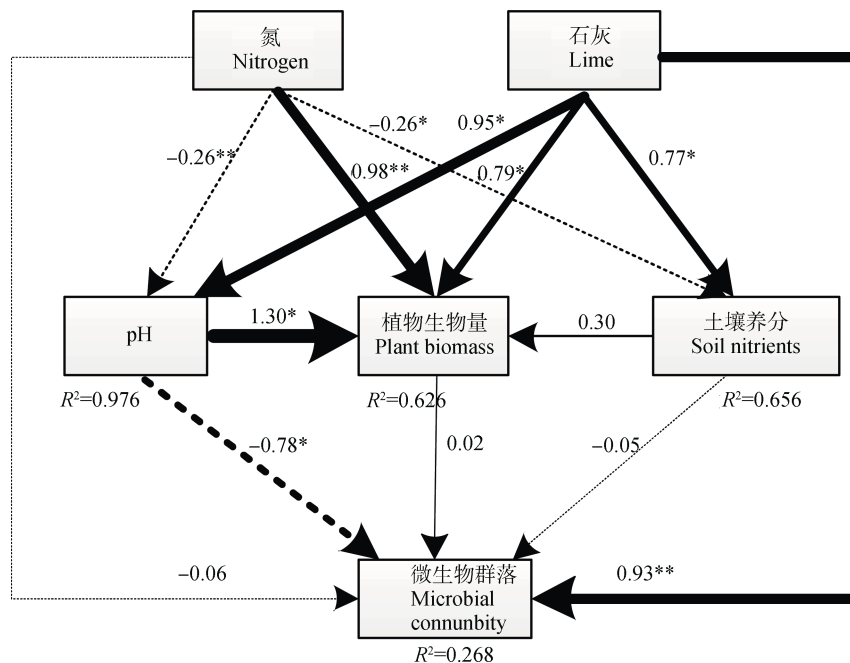
2.4 模拟氮沉降和施石灰下环境因子对微生物群落的影响

结构方程模型阐明了模拟氮沉降和施石灰情况下根际土壤 pH、土壤养分、植物生物量和微生物群落间的关系。最终模型拟合结果为：卡方值 $\chi^2 = 0.11$ ，自由度 $df = 1.00$ ，显著性概率值 $P = 0.74$ ，渐进残差均方和平方根 $RMSEA = 0.00$ ， $\chi^2 / df < 2$ ， $P > 0.05$ ， $RMSEA < 0.05$ ，说明模型适配良好。石灰对微生物群落的影响最大 ($\lambda = 0.93$)，氮和石灰综合影响下，土壤 pH 对微生物群落的影响最大 ($\lambda = -0.78$) (图 4)。

3 讨论

3.1 模拟氮沉降和施石灰对优势植物根际土壤性质和生长的影响

已有文献表明，休耕植物演替恢复过程中禾本科植物逐渐占据生态优势地位^[17]。本研究中，禾本科狗尾草能够利用有限资源快速繁殖，符合 r 型生殖策略，成为休耕初期的优势种植物^[18]。氮沉降下狗尾草根际土壤 pH 降低，且伴随着交换性 Al^{3+} 含量的升高。大量研究证实，氮沉降增加导致土壤酸化^[19-20]。对于本身 pH 较低且缓冲能力较弱的红壤



注：植物生物量：包括植物茎叶和根系生物量；土壤养分：包括 DOC、矿质氮、有效磷和交换性 Ca^{2+} 含量；微生物群落：包括各类群微生物 PLFA 含量、真菌/细菌比和香农多样性指数；箭头：指标对指向指标的影响；箭头粗细：所受影响程度（箭头越粗表示影响越大）；箭头上系数： λ 值，通径系数；实线：正相关；虚线：负相关；*表示指标间 $P < 0.05$ ，**表示指标间 $P < 0.01$ 。Note：Plant biomass includes plant shoots and roots；Soil nutrients include DOC, mineral N, available P and exchangeable Ca^{2+} ；and Microbial community indices include PLFA content, fungi to bacterial ratio, and Shannon diversity index. Arrow means impact of starting point index on ending point index；width of the arrow, extent of the impact (the thicker the bigger)；digit on the arrows, λ value (path coefficient)；Solid line, positive correlation；and Dotted line, negative correlation, * $P < 0.05$ between the indexes, ** $P < 0.01$ between the indicators

图 4 模拟氮沉降和施石灰作用下根际土壤 pH、养分、植物生物量及微生物群落间关系概念模型

Fig. 4 A structural equation model (SEM) showing the causal relationships of plant biomass, rhizosphere soil pH and soil nutrients with soil microbial community as affected by nitrogen deposition and liming

而言，土壤酸化伴随着 Ca^{2+} 等盐基离子的流失。同时，土壤化学反应导致土壤中磷被固定^[21]。而植物生物量表现出对氮沉降的积极响应，说明氮素缺失是抑制生产力增加的主要因素。石灰作为常用碱性改良剂还能够显著增加土壤交换性 Ca^{2+} 含量^[22]，这为植物生长创造了有利条件。

值得注意的是，施入石灰导致根际土壤可溶性有机碳含量降低，且同一氮沉降水平下，施石灰矿质氮含量低于不施石灰，这与土壤 pH 升高促进微生物对土壤活性有机质的降解能力有关^[23]。施石灰也会降低土壤有效磷含量，有研究表明施石灰，酸性土壤 pH 上升，活性铝产生的沉淀聚合体和土壤中增加的 Ca^{2+} 能够吸附土壤中的磷，从而降低土壤有效磷含量^[24]。生物对磷的吸收也是有效磷含量降低的主要原因，尤其是在磷养分贫乏的红壤地区，在矿质氮含量增加条件下，植物和微生物之间对磷

的争夺更为激烈。已有研究表明在养分受限的生态系统中，微生物与植物存在对土壤养分的争夺^[25]，因此土壤养分水平以及植物-微生物间养分竞争是影响微生物群落的重要因素。

3.2 模拟氮沉降和施石灰对优势植物根际土壤微生物的影响

模拟氮沉降显著抑制根际土壤各微生物类群，结构方程模型进一步表明，对于酸性较强、缓冲性较弱的红壤，模拟氮沉降引起的根际土壤 pH 降低是造成该结果的主要原因。酸化导致土壤的交换性 Al^{3+} 含量升高，对微生物产生抑制作用^[26]。模拟氮沉降促进植物生长的同时导致土壤磷有效性降低，植物和微生物对磷素的竞争加剧，限制了微生物群落的发展。除此之外，本研究发现模拟氮沉降使真菌/细菌比以及革兰氏阴/阳性细菌比均显著降低，这可能是由于氮素增加降低了植物对菌根真菌的依

赖, 导致植物向根系分配的碳含量减少^[27]。革兰氏阳性菌更偏好利用难降解有机物, 而革兰氏阴性菌偏好利用易分解有机物^[28], 模拟氮沉降影响植物凋落物质量, 增加了难降解有机碳比例, 降低了革兰氏阴/阳性细菌比^[29]。仅施石灰也会降低微生物生物量。施石灰促进了植物对土壤养分的吸收, 加剧了微生物和植物的养分竞争。尽管很多研究认为微生物相较于植物具备较大的比表面积, 繁殖速率快等属性使其在养分竞争上具有优势^[30-31], 但也有相反的观点, 如植物可通过调节自身生理等来提高养分利用^[32]。本研究中, 植物在与微生物的养分竞争中占据了主导地位, 尤其是受氮、磷水平变化较为敏感的丛枝菌根真菌^[33]。仅施石灰显著增加革兰氏阴/阳性细菌比, 说明偏中性环境下微生物群落向革兰氏阴性菌方向转变。

模拟氮沉降和仅施石灰均导致根际微生物生物量降低, 而氮和石灰交互作用能够有效遏制氮沉降和单施石灰对微生物造成的不利影响。模拟氮沉降下施石灰, 一方面中和土壤 pH, 缓解了 Al^{3+} 对微生物毒害, 另一方面植物地上和地下生物量的增加表明凋落物和根系输入资源的增加 (图 1), 促进微生物生长。DOC 作为土壤微生物的能量来源之一^[34], 交互处理下 DOC 含量降低, 从另一个角度表明微生物对 DOC 消耗增加。此外, 氮和石灰交互作用对微生物生物量的影响受氮水平的调控。施石灰时, 高氮处理下微生物生物量增长效果优于低氮处理, 表明石灰影响下的土壤环境中微生物生长受土壤氮水平的限制。氮和石灰交互处理下真菌/细菌比、香农多样性指数与对照相比无显著变化, 这一结果说明交互作用能够维持氮沉降下总体微生物群落结构和多样性稳定且石灰在其中起主导作用 (表 3)。本结果部分支持之前假说, 即模拟氮沉降能够增加土壤肥力而促进初级生产力, 施石灰能够提高土壤 pH 改善根际土壤微生物群落生境, 因而石灰与氮沉降共同作用可增加土壤微生物生物量, 但微生物多样性并未受影响。

本研究也暗示, 鉴于土壤环境和生物群落在支持生态系统结构和功能中的重要地位, 今后应加强研究石灰对土壤有机碳积累、土壤团聚化、植物群落功能及养分循环等关键生态功能的影响, 尤其是加强结合根系和根际动态揭示驱动生态系统多功能服务恢复的影响机制研究。

4 结 论

模拟氮沉降下施石灰有效提高根际土壤 pH, 降低交换性 Al^{3+} 含量, 提高植物生物量和各类群微生物生物量 (以 PLFA 含量表征), 同时, 维持真菌/细菌比和香农多样性指数不变。氮和石灰交互作用能够改善休耕红壤根际土壤环境, 缓解土壤酸化, 提高土壤生产力, 促进微生物生长同时维持微生物群落结构和多样性稳定。pH 对根际土壤微生物群落影响最为强烈, 且植物与微生物间对土壤资源的竞争也可能是影响微生物群落的关键因素。

参 考 文 献

- [1] Zhou L Y, Zhou X H, Zhang B C, et al. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2014, 20 (7): 2332—2343
- [2] 黄幸然, 郭萍萍, 吴旺旺, 等. 模拟氮沉降增加对不同树种土壤微生物群落结构的影响. *生态学杂志*, 2016, 35 (6): 1420—1426
Huang X R, Guo P P, Wu W W, et al. Influence of simulated nitrogen deposition enhancement on soil microbial community of different tree species (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35 (6): 1420—1426
- [3] Isbell F, Reich P B, Tilman D, et al. Nutrient enrichment, biodiversity loss, and consequent declines in ecosystem productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (29): 11911—11916
- [4] Davis M P, David M B, Voigt T B, et al. Effect of nitrogen addition on miscanthus × giganteus yield, nitrogen losses, and soil organic matter across five sites. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 7 (6): 1222—1231
- [5] 崔键, 周静, 马友华, 等. 我国红壤旱地氮素平衡特征. *土壤*, 2008, 40 (3): 372—376
Cui J, Zhou J, Ma Y H, et al. Characteristic of N-balance in red soil upland in China (In Chinese). *Soils*, 2008, 40 (3): 372—376
- [6] 崔键, 周静, 杨浩, 等. 我国红壤区大气氮沉降及其农田生态环境效应. *土壤*, 2015, 47 (2): 245—251
Cui J, Zhou J, Yang H, et al. Review on atmospheric nitrogen deposition and its influence in red soil agro-ecosystem, Southern China (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (2): 245—251
- [7] Zhang C, Liu G, Xue S, et al. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau. *Soil Biology &*

- Biochemistry, 2016, 97: 40—49
- [8] Li W J, Li J H, Liu S S, et al. Magnitude of species diversity effect on aboveground plant biomass increases through successional time of abandoned farmlands on the eastern Tibetan Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28 (1): 370—378
- [9] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应. *土壤学报*, 2011, 48 (6): 1219—1226
- Song T Q, Peng W X, Zeng F P, et al. Soil ecological effects of converting cropland to forest and grassland in depressions between Karst hills (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6): 1219—1226
- [10] 程琳, 孙晓, 庄舜尧, 等. 模拟石灰添加对雷竹林土壤氮矿化的影响. *土壤*, 2013, 45 (6): 992—998
- Cheng L, Sun X, Zhuang S Y, et al. Effect of liming on soil nitrogen mineralization of *phyllostachys praecox* using lab incubation experiment (In Chinese). *Soils*, 2013, 45 (6): 992—998
- [11] Ai C, Liang G, Sun J, et al. Reduced dependence of rhizosphere microbiome on plant-derived carbon in 32-year long-term inorganic and organic fertilized soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 80: 70—78
- [12] Dinesh R, Chaudhuri S G. Soil biochemical/ microbial indices as ecological indicators of land use change in mangrove forests. *Ecological Indicators*, 2013, 32: 253—258
- [13] 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. *Microbial Ecology*, 1998, 36 (1): 1—12
- [14] Frostegard A, Baath E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. *Biology & Fertility of Soils*, 1996, 22 (1/2): 59—65
- [15] Bossio D A, Scow K M. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: Phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. *Microbial Ecology*, 1998, 35 (3): 265—278
- [16] Mikola J, Setälä H. No evidence of trophic cascades in an experimental microbial-based soil food web. *Ecology*, 1998, 79 (1): 153—164
- [17] 赵丽娅, 高丹丹, 熊炳桥, 等. 科尔沁沙地恢复演替进程中群落物种多样性与地上生物量的关系. *生态学报*, 2017, 37 (12): 4108—4117
- Zhao L Y, Gao D D, Xiong B Q, et al. Relationship between the aboveground biomass and species diversity of sandy communities during the process of restoring succession in the Horqin Sandy Land (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (12): 4108—4117
- [18] 郑颖, 温仲明, 宋光, 等. 延河流域森林草原区不同植物功能型适应策略及功能型物种数量随退耕年限的变化. *生态学报*, 2015, 35 (17): 5834—5845
- Zheng Y, Wen Z M, Song G, et al. Adaption strategies of different plant functional types and their composition along a vegetation restoration gradient in a forest-steppe zone in the Yanhe River catchment (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (17): 5834—5845
- [19] 刘贺永, 何鹏, 蔡江平, 等. 模拟氮沉降对内蒙古典型草地土壤 pH 和电导率的影响. *土壤通报*, 2016, 47 (1): 85—91
- Liu H Y, He P, Cai J P, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil pH and electric conductivity in a typical grassland of Inner Mongolia (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47 (1): 85—91
- [20] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展. *土壤*, 2015, 47 (2): 238—244
- Xu R K. Research progresses in soil acidification and its control (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (2): 238—244
- [21] 王方超, 邹丽群, 唐静, 等. 氮沉降对杉木和枫香土壤氮磷转化及碳矿化的影响. *生态学报*, 2016, 36 (11): 3226—3234
- Wang F C, Zou L Q, Tang J, et al. Influence of nitrogen deposition on soil nutrient supply and organic carbon mineralization in *Cunninghamia lanceolata* and *Liquidambar formosana* plantations (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (11): 3226—3234
- [22] 韩天富, 王伯仁, 张会民, 等. 长期施肥及石灰后效对不同生育期玉米根际钾素的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (6): 1497—1507
- Han T F, Wang B R, Zhang H M, et al. Effect of long-term fertilization and residual effect of liming on potassium in rhizosphere of maize relative to growth stage of the crop (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6): 1497—1507
- [23] Tan B, Fan J, He Y, et al. Possible effect of soil organic carbon on its own turnover: A negative feedback. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 69 (1): 313—319
- [24] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展. *中国农学通报*, 2010, 26 (9): 206—213
- Cai D, Xiao W F, Li G H. Advance on study of liming on acid soils (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26 (9): 206—213
- [25] Dijkstra F A, He M, Johansen M P, et al. Plant and microbial uptake of nitrogen and phosphorus affected by drought using ¹⁵N and ³²P tracers. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 82: 135—142
- [26] Kunito T, Isomura I, Sumi H, et al. Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 97: 23—30
- [27] Treseder K, Allen E B, Egerton - Warburton L M, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi as mediators of ecosystem responses to nitrogen deposition: A trait-based predictive framework. *Journal of Ecology*, 2018, 106 (2): 480—489
- [28] Treseder K, Kivlin S N, Hawkes C V. Evolutionary

- trade-offs among decomposers determine responses to nitrogen enrichment. *Ecology Letters*, 2011, 14 (9): 933—938
- [29] Norris M D, Avis P G, Reich P B, et al. Positive feedbacks between decomposition and soil nitrogen availability along fertility gradients. *Plant and Soil*, 2013, 367 (1/2): 347—361
- [30] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 979—988
Jiang J, Song M H. Review of the roles of plants and soil microorganisms in regulating ecosystem nutrient cycling (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34 (8): 979—988
- [31] Hodge A, Fitter A H. Microbial mediation of plant competition and community structure. *Functional Ecology*, 2013, 27 (4): 865—875
- [32] Yin H, Wheeler E, Phillips R P. Root-induced changes in nutrient cycling in forests depend on exudation rates. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 213—221
- [33] Heijden M G A V D, Martin F M, Selosse M, et al. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist*, 2015, 205: 1406—1423
- [34] 苏丹, 张凯, 陈法霖, 等. 施氮对不同有机碳水平桉树林土壤微生物群落碳代谢的影响. *生态学报*, 2015, 35 (18): 5940—5947
Sun D, Zhang K, Chen F L, et al. Effects of nitrogen application on carbon metabolism of soil microbial communities in eucalyptus plantations with different levels of soil organic carbon (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (18): 5940—5947

Effects of Liming on Rhizosphere Soil Microbial Communities of Dominant Plants in Fallowed Red Soil under Simulated Nitrogen Deposition

DENG Yufeng¹ TIAN Shanyi¹ CHENG Yanhong² HU Zhengkun¹ LIU Manqiang¹
HU Feng¹ CHEN Xiaoyun^{1†}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717, China)

Abstract 【Objective】Unreasonable anthropogenic activities tend to cause gradual increase in global atmospheric nitrogen deposition, which has become one of the most important environmental problems that arouses attentions the world over. Red soil, as an important soil resource in China, has come to face a series of serious ecological problems, such as soil acidification, biological degradation and so on, owing to its own development characteristics and specific climate factors. At the same time, nitrogen deposition is liable to exacerbate soil acidification and degenerate functions of the red soil ecosystem, posing a serious threat to the red soil ecosystem and impeding sustainable development of the economy and society of the red soil region. In order to promote restoration and sustainable development of the ecological functions of red soil, a series of practices have been adopted, such as leave farmlands in fallow or “grain for green” and stop artificial interference of the soil to let the vegetation and then the soil recover in biodiversity and ecosystem function through natural succession. This study was oriented to explore the effects of atmospheric N deposition on the soil microbial community in the rhizosphere of *Setaria viridis* (L.) Beauv, the dominant plants in fallow farmlands in the initial phase of the succession, as affected by soil acidification, controlled by liming. The factors of global change and comprehensive impact of artificial management practices were also taken into account. 【Method】 For the study, a field experiment designed to have three levels of artificial atmospheric N deposition, through N application, i.e., 0 kg·hm⁻², 45 kg·hm⁻² and 90 kg·hm⁻² and two levels of liming, i.e., 0 kg·hm⁻² and 110 kg·hm⁻². Samples of rhizospheric soil under *Setaria viridis* (L.) Beauv were collected and analyzed for the structure of the soil microbial community. 【Result】 Results showed that the simulated nitrogen deposition significantly inhibited the soil microbial community in rhizosphere by reducing its microbial phospholipid fatty acid (PLFA) content, the ratio of gram-negative bacteria/gram-positive ones, fungi / bacteria ratio, and Shannon diversity. In the plots without nitrogen deposition (0 kg·hm⁻²), liming decreased microbial PLFA, but significantly increased the ratio of Gram-negative bacteria to Gram-positive ones. The interaction of nitrogen and lime restrained the adverse effects of applying nitrogen and lime separately alone on microbial biomass. PLFA in all groups of soil microbes increased with decreasing nitrogen deposition. The structural equation model (SEM) shows that the effect of liming was much stronger on the

microbial community. Simulated nitrogen deposition and liming jointly through interaction affected soil pH, nutrient availability and competition for nutrient between soil microbes and plants, thus altering structure and diversity of the soil microbial community. 【Conclusion】 This study demonstrates that the interaction of nitrogen and lime could improve rhizosphere soil environment, mitigate soil acidification, increase soil productivity, promote microbial growth and maintain stability of the microbial community structure and diversity in fallow red soil. In conclusion, application of lime can offset the adverse impacts of atmospheric nitrogen deposition on soil microbial community by improving the habitat of fallow red soil, alleviating damage to the soil microbial community in rhizosphere and promoting restoration of the soil ecosystem.

Key words Degraded red soils; Fallowed farmland; Simulated nitrogen deposition; Ecological restoration; Rhizosphere soil microorganism

(责任编辑: 卢 萍)