

长期紫云英配施减量化肥对土壤铵态氮 吸附解吸特征的影响

刘春增¹, 张成兰^{1*}, 张琳², 丁丽², 杜光辉², 张香凝¹, 郑春风¹,
张济世¹, 吕玉虎², 李本银¹, 李敏³, 曹卫东⁴

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2. 信阳市农业科学院,
河南 信阳 464000; 3. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽 合肥 230031;
4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为明确长期紫云英配施减量化肥对土壤铵态氮吸附解吸特征的影响, 以 13 年长期定位试验为平台, 设不施肥 (CK)、单施化肥 (CF)、22500 kg/hm² 紫云英 +80% 化肥 (G+0.8CF)、22500 kg/hm² 紫云英 +60% 化肥 (G+0.6CF)、22500 kg/hm² 紫云英 +40% 化肥 (G+0.4CF) 共 5 个处理, 研究了不同施肥处理对土壤铵态氮吸附解吸特征的影响, 并分析了土壤吸附解吸特征参数与土壤理化性质的关系。结果显示, Langmuir 等温吸附方程能较好地拟合土壤铵态氮的吸附特征 (R^2 为 0.9969 ~ 0.9979, $P < 0.01$)。与 CK 相比, 紫云英配施减量化肥处理土壤铵态氮的最大吸附量、最大缓冲容量分别降低了 4.85% ~ 13.46%、4.55% ~ 7.36%; 土壤铵态氮的平均解吸量和解吸率为 $G+0.8CF > G+0.6CF > G+0.4CF > CF > CK$ 。与 CK 相比, 紫云英配施减量化肥处理土壤全氮和速效氮含量分别增加了 19.42% ~ 46.60%、15.24% ~ 25.88%。相关性分析结果显示, 解吸率与土壤全氮、土壤速效氮呈显著正相关, 与土壤 pH 呈显著负相关; 冗余分析结果显示, pH 和速效氮是造成土壤铵态氮吸附解吸特征参数差异的主要因素, 分别解释了全部变异的 56.7% 和 39.1% ($P < 0.05$)。综上所述, 长期紫云英配施减量化肥降低土壤对铵态氮的吸附, 增加土壤对铵态氮的解吸, 减少了土壤对氮的固持, 提高氮的有效性。综合考虑土壤铵态氮的吸附解吸特性及土壤养分含量, 以减量 20% ~ 40% 化肥配施 22500 kg/hm² 紫云英处理效果较好。

关键词: 紫云英; 土壤铵态氮; 吸附解吸; 特征参数

氮是作物生长发育不可或缺的营养元素之一, 合理的氮肥施用对作物的生长至关重要。然而, 施入土壤中的氮肥并不能被作物完全利用, 其中一个原因就是土壤对氮有强烈的吸附作用^[1]。土壤铵态氮的吸附解吸影响土壤氮在固液相间的转化和迁移, 进而影响土壤中氮的形态及有效性^[2]。关于土壤对铵态氮吸附解吸特征的研究始于 20 世纪 30 年代^[1], 研究者们提出等温吸附方程可描述和评价土壤铵态氮的吸附性能, 且吸附过程可

用 Langmuir、Freundlich 及 Temkin 等方程较好地拟合, 以 Langmuir 等温方程的应用较为广泛^[3-5], 并通过该方程获得一些评价土壤铵态氮吸附能力的参数, 如土壤铵态氮的最大吸附量 (k_m)、土壤铵态氮最大缓冲容量 (MBC) 等。

土壤有机质、pH、黏粒含量、离子强度、温度等是影响土壤铵态氮的吸附解吸行为的重要因素^[1]。李慧琳等^[5]通过研究太湖地区 6 种典型水稻土发现, 土壤离子强度、pH、温度影响土壤对 NH_4^+ 的吸附; Ranjbar 等^[6]通过研究钙质土得出, 土壤铵态氮吸附与土壤 pH、阳离子交换量、黏粒含量呈正相关, 与砂粒含量呈负相关; Duan 等^[7]通过研究关中盆地不同质地土壤提出, 土壤黏土矿物、有机质与土壤铵态氮的吸附量呈正相关。当前研究已证实, 土壤类型^[2]、土壤质地^[8]、施肥^[4]及外源生物质炭的添加^[9-10]等均可影响土壤对铵态氮的吸附解吸, 特别是施肥, 施肥可以通过改变

收稿日期: 2023-08-08; 录用日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700203); 国家绿肥产业技术体系项目 (CARS-22); 河南省农业科学院科技创新团队项目 (2023TD24); 河南省中央引导地方科技发展资金项目 (Z20221341071)。

作者简介: 刘春增 (1967-), 研究员, 本科, 主要从事绿肥利用和种子生产研究。E-mail: liucz321@aliyun.com。

通讯作者: 张成兰, E-mail: 616704053@qq.com。

土壤理化性质进而影响土壤铵态氮的吸附解吸^[1]。然而,关于施用外源有机肥料对土壤铵态氮吸附解吸影响的研究结果并不一致。Fernando等^[11]研究表明,畜禽粪便可提高土壤铵态氮的吸附能力,降低解吸能力;丛日环等^[4]研究指出,长期水稻秸秆还田降低了红壤性水稻土铵态氮的吸附量,增加了紫色土铵态氮的吸附量。绿肥作为农业生产中一项重要的有机肥源,其养分含量、结构组分、翻压腐解环境等均不同于其他有机肥源,而目前关于绿肥翻压还田对土壤铵态氮吸附解吸行为的影响还鲜见报道。

紫云英属豆科绿肥,自身具有生物固氮作用,众多研究指出^[12-14],紫云英翻压还田可改善土壤团粒结构和通透性,调节土壤pH,提高土壤有机质和活性有机氮含量,进而影响土壤氮的固持、库容及转化。因此,研究紫云英翻压还田后土壤氮固持与释放特征的变化,对于了解农田氮肥施用具有重要的意义。本研究以13年长期定位试验为平台,分析长期紫云英配施减量化肥对土壤铵态氮吸附解吸特征的影响,旨在明确不同减肥模式下土壤铵态氮吸附解吸差异,以期为豫南稻区合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地区概况

试验地位于河南省信阳市农业科学院试验园区(32°07'31"N, 114°05'18"E),该地区属亚热带向暖温带过渡区,日照充足,年均1900~2100 h,无霜期220 d左右,年均气温15.1~15.3℃,降水丰沛,年降水量900~1400 mm,空气湿润,相对湿度年均77%。田间定位试验始于2008年,供试土壤为黄棕壤性潜育型水稻土,试验前土壤基本理化性质为有机碳12.96 g/kg、全氮1.30 g/kg、碱解氮71.5 mg/kg、有效磷16.5 mg/kg、速效钾78.2 mg/kg、pH 6.67。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设5个处理,4次重复。5个处理:(1)不施肥(CK);(2)100%化肥(CF);(3)22500 kg/hm²紫云英+80%化肥(G+0.8CF);(4)22500 kg/hm²紫云英+60%化肥(G+0.6CF);(5)22500 kg/hm²紫云英+40%化肥(G+0.4CF)。紫云英原地种植,供试品种为信紫1号,每年于盛花期按照各处理翻压量进行

翻压,多余的移出小区,量不足时从别的小区移入。其中所施化肥中氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。100%化肥指当地常规施肥量(N 165 kg/hm²、P₂O₅ 112.5 kg/hm²、K₂O 112.5 kg/hm²)。试验中磷肥、钾肥均作基肥一次施用,氮肥按基肥、分蘖肥、孕穗肥各占50%、30%、20%分次施用。小区面积6.67 m²,长3.33 m,宽2.0 m,小区间筑埂,上覆塑料薄膜防止串水串肥。区组间留0.3 m宽的沟,便于上水和排水。水稻供试品种为扬两优013,于每年5月底划行移栽,小区栽插密度16.7 cm×20 cm,每穴2棵基本苗。移栽后灌浅水使秧苗返青,分蘖肥在移栽后1周施用,孕穗肥在晒田复水后施用,其他田间管理与大田一致。

1.3 样品采集与分析

试验于2020年水稻收获后采集土壤样品,每小区按照5点采样法采集0~20 cm耕层土样,风干后用于样品测定。土壤基础理化性状采用《土壤农业化学分析方法》^[15]中的方法测定。

1.4 土壤铵态氮的吸附解吸

土壤铵态氮吸附试验:称取1.50 g过0.5 mm筛的风干土样8份,分别加入含0、25、50、100、200、400、800、1200 μg/mL铵态氮溶液15 mL,20℃条件下连续恒温振荡1 h,5000 r/min离心5 min,过滤,流动注射分析仪测定滤液中的铵态氮浓度,以此计算土壤NH₄⁺吸附量。以吸附量为纵坐标,平衡液浓度为横坐标绘制吸附曲线。

土壤铵态氮解吸试验:上述吸附试验后的土壤样品,经无水乙醇淋洗至无NH₄⁺后,再加入0.01 mol/L的KCl溶液15 mL,在20℃条件下连续恒温振荡1 h,5000 r/min离心5 min,过滤,流动注射分析仪测定滤液中的铵态氮浓度,计算NH₄⁺的解吸量。

1.5 计算方法^[8]

(1) Langmuir 方程: $C/S=1/(k_m \times k_a) + C/k_m$

式中,C为吸附平衡时溶液中的铵态氮含量,mg/L;S为吸附平衡时土壤中的铵态氮含量,mg/kg; k_m 为土壤中铵态氮理论最大吸附量,mg/kg; k_a 为吸附系数。

根据Langmuir等温吸附方程,土壤铵态氮MBC(mg/kg)= $k_a \times k_m$;铵态氮解吸率(DR,%)=土壤铵态氮解吸量(mg/kg)/土壤铵态氮的吸附量

(mg/kg) × 100。

1.6 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 对数据进行统计分析, 采用 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha=0.05$), 利用 Origin 2021 进行作图, Canoco 5 进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 长期紫云英配施减量化肥对土壤铵态氮吸附特征的影响

如图 1 所示, 整体上土壤铵态氮的吸附量随铵态氮浓度的增加呈逐渐上升的趋势, 不同施肥处理土壤铵态氮等温吸附曲线变化较为一致, 以 CK 处理曲线居于最上方, 其次为 CF 处理, 紫云英配施减量化肥处理曲线居于下方, 其中铵态氮平均吸附量为 CK (1502.83 mg/kg) > CF (1416.79 mg/kg) > G+0.4CF (1409.74 mg/kg) > G+0.6CF (1400.74 mg/kg) > G+0.8CF (1391.50 mg/kg), 当铵态氮浓度为本试验最大浓度时, 土壤对铵态氮的吸附仍未达到饱和。

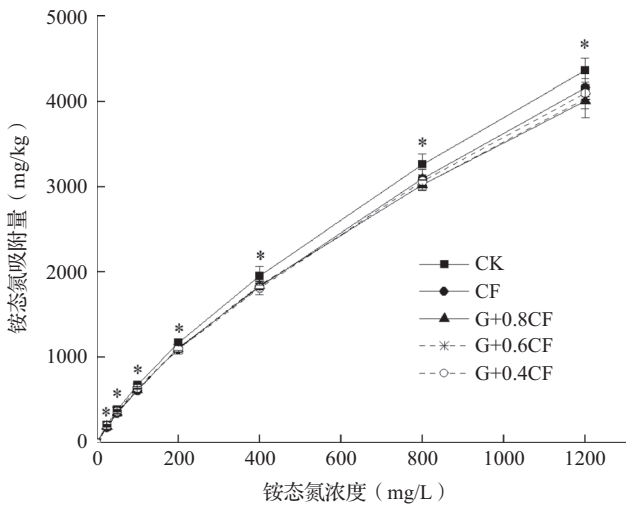


图 1 不同施肥处理土壤铵态氮的吸附曲线

注: * 表示在 0.05 水平差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 长期紫云英配施减量化肥对土壤铵态氮吸附方程的影响

等温吸附方程可以有效地评价土壤对铵态氮的吸附特征和能力, 对研究铵态氮在环境中的迁移和转化具有重要的意义。本研究采用 Langmuir 模型研究铵态氮吸附过程, 由表 1 可知, Langmuir 吸附模型能较好地描述土壤铵态氮的等温吸附特征 ($P<0.01$), 决定系数 R^2 为 0.9969 ~ 0.9979。 k_m 表示土壤铵态氮的理论最大吸附量, 其大小反映了土壤铵态氮的吸附点位, 与 CK 和 CF 相比, 紫云英配施减量化肥处理 k_m 分别降低了 4.85% ~ 13.46%、4.84% ~ 13.45%, 以 G+0.8CF 处理 k_m 最低; k_a 表示吸附性能的大小, 与 CK 相比, G+0.8CF 和 G+0.6CF 处理 k_a 分别增加了 8.73%、8.81%; MBC 是 k_m 与 k_a 的乘积, 表示土壤铵态氮的最大缓冲容量, 与 CK 相比, 紫云英配施减量化肥处理 MBC 降低了 4.55% ~ 7.36%, 说明长期紫云英配施减量化肥降低了土壤铵态氮的吸附能力。

2.3 长期紫云英配施减量化肥对土壤铵态氮解吸特征的影响

土壤铵态氮的解吸与土壤铵态氮的生物有效性密切相关。如图 2 所示, 土壤对铵态氮的解吸量随铵态氮浓度的升高呈逐渐上升趋势, 当铵态氮的浓度为 0 ~ 400 mg/L 时, 土壤对铵态氮的解吸速率较快, 当铵态氮浓度为 400 ~ 1200 mg/L 时, 土壤对铵态氮的解吸速率变慢, 土壤铵态氮的平均解吸量及平均解吸率均表现为 G+0.8CF>G+0.6CF>G+0.4CF>CF>CK, 说明长期紫云英配施减量化肥可提高土壤铵态氮的解吸能力。如图 3 所示, 当铵态氮浓度为 0 ~ 400 mg/L, 解吸率曲线呈逐渐上升趋势, 当铵态氮浓度为 400 ~ 1200 mg/L 时, 解吸率曲线呈逐渐下降趋势, 以紫云英配施减量化肥处理居于曲线上方, 紫云英

表 1 不同施肥处理下土壤铵态氮吸附特征参数

处理	R^2	k_m $\times 10^3$ (mg/kg)	k_a ($\times 10^{-4}$)	MBC (mg/kg)
CK	0.9973**	10.083 ± 0.135a	6.220 ± 0.141ab	6.271 ± 0.151a
CF	0.9977**	10.082 ± 0.223a	5.747 ± 0.139b	5.787 ± 0.080b
G+0.8CF	0.9979**	8.887 ± 0.442b	6.763 ± 0.347a	5.964 ± 0.020ab
G+0.6CF	0.9972**	8.898 ± 0.297b	6.768 ± 0.291a	5.998 ± 0.104ab
G+0.4CF	0.9969**	9.617 ± 0.272ab	6.100 ± 0.316ab	5.841 ± 0.151b

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。 ** 表示 $P<0.01$ 。 R^2 、 k_m 、 k_a 、MBC 分别表示决定系数、最大吸附量、吸附系数、最大缓冲容量。下同。

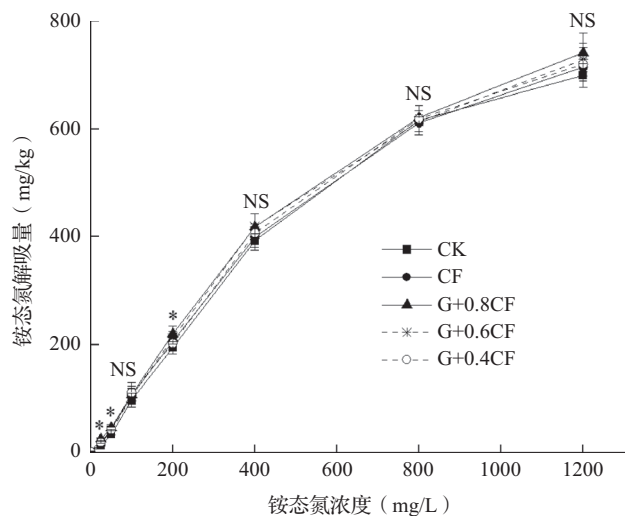


图2 不同施肥处理土壤铵态氮的解吸曲线

注: * 表示在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$), NS 表示差异不显著。下同。

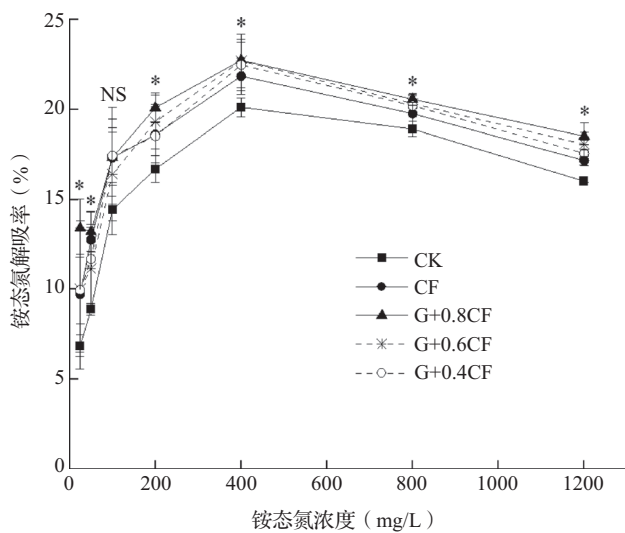


图3 不同施肥处理土壤铵态氮解吸率

配施减量化肥处理在铵态氮浓度较低时,解吸率不断增加,而当浓度较高时,解吸率不断下降,说明紫云英配施减量化肥处理对土壤氮的保持和供应功能具有一定的调节作用。

2.4 长期紫云英配施减量化肥对土壤理化性状的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,紫云英配施减量化肥土壤有机质含量增加了 4.40% ~ 10.65%,但差异并不显著。紫云英配施减量化肥较不施肥提高土壤全氮含量,增幅为 19.42% ~ 46.60%,紫云英配施减量化肥较不施肥提高土壤速效氮含量,增幅为 15.24% ~ 25.88%,单施化肥较不施肥土壤速效氮含量增加 21.93%。与 CK 相比,施肥能提高土壤有效磷含量,紫云英配施减量化肥较不施肥土壤有效磷含量增加 20.42% ~ 65.00%,单施化肥较不施肥土壤有效磷含量增加 77.50%。与 CK 相比,单施化肥增加了土壤速效钾含量,但差异并不显著,紫云英配施减量化肥较不施肥土壤速效钾含量显著降低,降幅为 5.37% ~ 11.39%。与 CK 相比,施肥降低土壤 pH,紫云英配施减量化肥处理土壤 pH 较不施肥降低 6.09% ~ 10.40%,单施化肥处理土壤 pH 较不施肥降低 3.51%。与 CK 和 CF 相比,长期紫云英配施减量化肥处理土壤阳离子交换量分别降低了 0.91% ~ 6.02%、1.77% ~ 6.92%。

2.5 土壤铵态氮吸附解吸特征参数与土壤理化性状的关系

相关性分析结果显示(表 3),DR 与全氮、速效氮呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关。冗余分析结果显示(图 4),土壤理化性质能解释土壤铵态氮吸附解吸特征参数全部变异的 98.90%,第一冗余因子(RDA1)能解释 59.46%,第二冗余因子(RDA2)能解释 39.44%。根据交互式向前选择方法分析表明,pH 和速效氮是造成吸附解吸特征参数差异的主要因素,分别解释了全部变异的 56.7% 和 39.1% ($P < 0.05$),其次为阳离子交换量和有机质,分别解释了变异的 2.7%、1.4%,但差异并不显著 ($P > 0.05$)。

表 2 不同施肥处理下土壤理化性状

处理	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH	阳离子交换量 (cmol/kg)
CK	22.25 ± 0.37a	1.03 ± 0.05b	157.43 ± 5.76b	4.80 ± 0.13c	91.17 ± 0.53a	6.79 ± 0.09a	18.85 ± 0.30a
CF	22.31 ± 0.34a	1.17 ± 0.19ab	191.96 ± 3.71a	8.52 ± 0.30a	94.29 ± 1.37a	6.56 ± 0.14ab	19.01 ± 0.12a
G+0.8CF	23.23 ± 1.29a	1.51 ± 0.08a	198.17 ± 11.75a	7.92 ± 0.24a	84.80 ± 1.81bc	6.15 ± 0.04c	18.65 ± 0.12a
G+0.6CF	24.62 ± 0.79a	1.23 ± 0.12ab	181.42 ± 5.68ab	5.78 ± 0.58bc	86.52 ± 1.94b	6.35 ± 0.13bc	17.78 ± 0.42b
G+0.4CF	23.35 ± 0.75a	1.25 ± 0.07ab	190.98 ± 16.84a	6.47 ± 0.51b	81.85 ± 0.57c	6.40 ± 0.09bc	18.68 ± 0.12a

表 3 土壤铵态氮吸附解吸参数与土壤理化性状的相关性

特征参数	有机质	全氮	速效氮	有效磷	速效钾	pH	阳离子交换量
k_m	-0.835	-0.762	-0.448	-0.073	0.642	0.872	0.751
k_a	0.716	0.550	0.059	-0.250	-0.526	-0.622	-0.736
MBC	-0.138	-0.419	-0.872	-0.791	0.154	0.482	-0.091
DR	0.467	0.911*	0.951*	0.728	-0.475	-0.944*	-0.242

注：* 表示 $P<0.05$ ，** 表示 $P<0.01$ 。DR 为解吸率，下同。

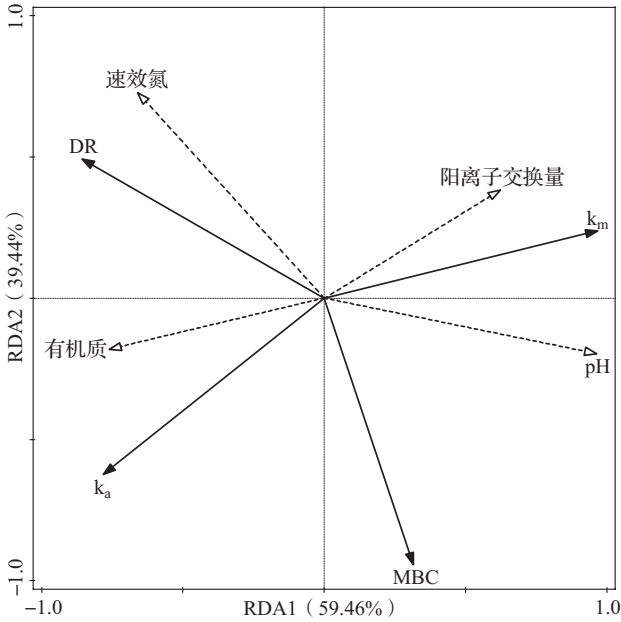


图 4 土壤铵态氮吸附解吸参数与土壤理化性质的冗余分析

3 讨论

3.1 长期紫云英配施减量化肥对土壤铵态氮吸附解吸特征的影响

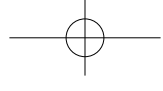
本研究中，不同施肥处理等温吸附曲线变化规律大致相似，土壤铵态氮的吸附量随平衡液浓度的增加呈逐渐上升的趋势，Langmuir 等温吸附方程能较好地描述土壤铵态氮的吸附特征，这与大多数学者得到的研究结果一致^[4, 16]。本研究中紫云英配施减量化肥较 CK 和 CF 处理降低了土壤铵态氮 k_m ，提高了土壤铵态氮的平均解吸量及解吸率，说明紫云英配施减量化肥可降低土壤对铵态氮的吸附，增加土壤对铵态氮的解吸。紫云英年均干基氮含量约为 N 3.0%，减量 20% ~ 40% 化肥配施 22500 kg/hm² 紫云英约向土壤中提供 N 166.5 ~ 199.5 kg/hm²，高于单施化肥处理 (N 165 kg/hm²)，而研究指出^[17]，在长期定位试验土壤上添加外源氮能提高土壤对铵态氮的吸附能力，说明紫云英配施减量化肥降低土壤铵态氮吸附的原因可能是紫云英翻压引起土壤

理化性状、微生态环境等的改变而造成的，但要明确具体的原因及机理机制还需要进一步深入的研究。

3.2 长期紫云英配施减量化肥下土壤理化性状与土壤铵态氮吸附解吸特征的关系

本研究中，土壤 pH、土壤全氮、速效氮与土壤铵态氮吸附解吸参数具有显著相关性；冗余分析结果显示，土壤 pH 和土壤速效氮分别解释了全部变异的 56.7% 和 39.1%，并达到差异显著水平 ($P<0.05$)，说明土壤 pH 和速效氮是造成不同处理土壤铵态氮吸附解吸差异的主要因素。研究表明^[2, 18]，土壤 pH 的升高将增加土壤铵态氮的吸附，降低土壤铵态氮的解吸，本研究也得出相似的结论。本研究通过相关性分析发现，土壤 pH 与土壤铵态氮解吸率呈显著负相关，说明随着土壤 pH 的升高，土壤中 H⁺ 减少，与 NH₄⁺ 吸附点位的竞争减少，从而增加了土壤对铵态氮的吸附，降低了土壤对铵态氮的解吸。本研究中，土壤铵态氮解吸率与土壤全氮和速效氮呈显著正相关，说明土壤全氮和速效氮含量的增加会促进土壤铵态氮的解吸，主要原因是土壤中氮含量的增加会增强土壤氮矿化和硝化速率，进而抑制微生物对土壤氮的固持作用，促进土壤铵态氮的解吸^[19]。

关于土壤阳离子交换量对土壤铵态氮吸附解吸影响的研究，众多研究结果并不一致。有研究指出，土壤阳离子交换量与土壤铵态氮的吸附量呈显著正相关^[4, 20]，土壤中阳离子可促进铵态氮的吸附^[21]；但也有研究表明，土壤中阳离子会与 NH₄⁺ 竞争吸附点位，抑制土壤铵态氮的吸附^[22]，这可能与阳离子种类不同有关；而本研究中，土壤阳离子交换量与土壤铵态氮吸附解吸特征参数的相关性并不显著 ($P>0.05$)，说明土壤阳离子交换量并不是影响本研究土壤铵态氮吸附解吸差异的主要因素。有研究指出^[23-25]，土壤有机质是影响铵态氮吸附行为的主要因素，且土壤铵态



氮吸附量随土壤有机质含量的增加而降低,而本研究中土壤有机质与土壤铵态氮 k_m 呈负相关关系 ($r=-0.835$, $P>0.05$),说明土壤有机质含量的增加会降低土壤铵态氮的吸附量,但差异并未达到显著水平。本研究结果显示,土壤有效磷和速效钾与土壤铵态氮吸附解吸参数并不显著相关,且冗余分析结果中土壤有效磷和速效钾并不能解释造成土壤铵态氮吸附解吸差异的原因,说明土壤有效磷和速效钾对土壤铵态氮吸附解吸特征的影响较小。然而关于土壤铵态氮吸附解吸影响因素众多,但本研究仅对土壤理化性质等部分因素进行了分析,关于土壤质地(黏粒、粉粒、砂粒)、温度、氧化还原条件等因素,还有待进一步研究。

4 结论

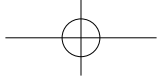
长期紫云英配施减量化肥能降低土壤对铵态氮的吸附,增加土壤对铵态氮的解吸,主要表现在土壤铵态氮 k_m 和 MBC 的降低及土壤平均解吸量和解吸率的增加上。相关性分析表明,解吸率与土壤全氮、速效氮呈显著正相关,与土壤 pH 呈显著负相关。冗余分析表明,土壤 pH 和速效氮是影响土壤铵态氮吸附解吸特征的主要因素。

参考文献:

- [1] 付海曼,贾黎明. 土壤对氮、磷吸附/解吸附特性研究进展[J]. 中国农学通报,2009,25(21):198-203.
- [2] 简燕,朱坚,彭华,等. 不同类型水稻土对氮磷养分的吸附解吸特征研究[J]. 湖南农业科学,2020(6):24-30.
- [3] 弓晓峰,张静,张振辉,等. 鄱阳湖南矶山自然保护区沼泽湿地土壤对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附能力的研究[J]. 农业环境科学学报,2006,35(1):179-181.
- [4] 丛日环,张丽,鲁艳红,等. 长期秸秆还田下土壤铵态氮的吸附解吸特征[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):380-388.
- [5] 李慧琳,韩勇,蔡祖聪. 不同反应条件下太湖地区水稻土对 NH_4^+ 的等温吸附特性[J]. 土壤通报,2009,40(1):89-95.
- [6] Ranjbar F, Jalali M. Measuring and modeling ammonium adsorption by calcareous soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185: 3191-3199.
- [7] Duan L, Wang W K, Sun Y Q. Ammonium nitrogen adsorption-desorption characteristics and its hysteresis of typical soils from Guanzhong basin, China[J]. Asian Journal of Chemistry, 2013, 25(7): 3850-3854.
- [8] 吴德丰,王春颖,韩宇平,等. 不同质地土壤铵态氮吸附/解吸特征[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),

2020, 41(6): 18-25.

- [9] Hale S E, Alling V, Martinsen V, et al. The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars[J]. Chemosphere, 2013, 91(11): 1612-1619.
- [10] Aghoghovwia M P, Hardie A G, Rozanov A B. Characterisation, adsorption and desorption of ammonium and nitrate of biochar derived from different feedstocks[J]. Environmental Technology, 2022, 43(5): 774-787.
- [11] Fernando W A R N, Xia K, Rice C W. Sorption and desorption of ammonium from liquid swine waste in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1057-1065.
- [12] Garcia-Franco N, Albaladejo J, Almagro M, et al. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 66-75.
- [13] 陈云峰,邹贤斌,罗时明,等. 连年翻压紫云英对早稻田土壤性质及酶活性动态的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(2): 24-29.
- [14] 刘春增,常单娜,李本银,等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. 土壤学报,2017,54(3): 657-669.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [16] 陈安强,雷宝坤,刘宏斌,等. 洱海近岸菜地不同土壤发生层的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附解吸特征[J]. 农业环境科学学报,2017,36(2): 345-352.
- [17] 张丽. 长期秸秆还田对水稻土氮固持与释放的影响研究[D]. 武汉:华中农业大学,2016.
- [18] Karadag D, Koc Y, Turan M, et al. A comparative study of linear and non-linear regression analysis for ammonium exchange by clinoptilolite zeolite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(1-2): 432-437.
- [19] 郭亚兵,毛晋花,王聪,等. 氮、磷添加对热带森林土壤氮转化及损失影响的研究进展[J]. 生态学杂志,2021,40(10): 3339-3354.
- [20] 薛泉宏,尉庆丰,高彦,等. 陕西省几种代表性土壤 NH_4^+ 吸附、解吸动力学特征研究[J]. 土壤学报,1996,33(2): 129-137.
- [21] Dontsova K M, Norton L D, Johnston C T. Calcium and magnesium effects on ammonia adsorption by soil clays[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1225-1232.
- [22] 温东辉,唐孝炎. 天然斜发沸石对溶液中 NH_4^+ 的物化作用机理[J]. 中国环境科学,2003,23(5): 62-67.
- [23] Kowalenko C G, Yu S. Solution, exchangeable and clay-fixed ammonium in south coast British Columbia soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 76(4): 473-483.
- [24] Porter L K, Stewart B A. Organic interferences in the fixation of ammonium by soils and clay minerals[J]. Soil Science, 1970,



109 (4): 229–233.

NH₄⁺-N 的吸附特征 [J]. 海洋学报 (中文版), 2005 (5): 60–66.

[25] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 长江口潮滩表层沉积物对

Effects of long-term Chinese milk vetch application coupled with reduced chemical fertilizer usage on soil ammonium nitrogen adsorption and desorption characteristics

LIU Chun-zeng¹, ZHANG Cheng-lan^{1*}, ZHANG Lin², DING Li², DU Guang-hui², ZHANG Xiang-ning¹, ZHENG Chun-feng¹, ZHANG Ji-shi¹, LV Yu-hu², LI Ben-yin¹, LI Min³, CAO Wei-dong⁴ (1. Institute of Plant Nutrition, Agriculture Resources and Environment Sciences, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 2. Xinyang Academy of Agricultural Sciences, Xinyang Henan 464000; 3. Soil and fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei Anhui 230031; 4. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: This study aimed to clarify the effects of the long-term application of reduced chemical fertilizers combined with Chinese milk vetch on the adsorption and desorption characteristics of ammonium nitrogen in soil. A 13-year long-term positioning test was conducted using five treatments: no fertilizer (CK), fertilizer only (CF), 22500 kg/hm² Chinese milk vetch + 80% fertilizer (G+0.8CF), 22500 kg/hm² Chinese milk vetch + 60% fertilizer (G+0.6CF), and 22500 kg/hm² Chinese milk vetch + 40% fertilizer (G+0.4CF). The ammonium nitrogen adsorption and desorption characteristics of soil subjected to different fertilization treatments were examined, and the relationship between soil ammonium nitrogen adsorption and desorption characteristic parameters and soil physicochemical properties was analyzed. The results showed that Langmuir's isotherm adsorption equation demonstrated a good fit with the adsorption characteristics of soil ammonium nitrogen ($R^2=0.9969-0.9979$, $P<0.01$). Compared with those in CK soil, the maximum adsorption amount and maximum buffering capacities of ammonium nitrogen in soil subjected to Chinese milk vetch + reduced fertilizer treatment decreased by 4.85%–13.46% and 4.55%–7.36%, respectively. The average desorption amount and desorption rate of soil ammonium nitrogen were in the following order: G+0.8CF > G+0.6CF > G+0.4CF > CF > CK. Compared with those of CK soil, the total nitrogen and available nitrogen concentrations of soil treated with Chinese milk vetch combined with reduced fertilizer increased by 19.42%–46.60% and 15.24%–25.88%, respectively. Correlation analyses revealed that the desorption rate had significantly positive correlations with soil total nitrogen and available nitrogen and a significantly negative correlation with soil pH. Redundancy analysis demonstrated that pH and available nitrogen were the main factors causing the differences in adsorption and desorption characteristic parameters of soil ammonium nitrogen, accounting for 56.7% and 39.1% of all variations, respectively ($P<0.05$). In summary, long-term Chinese milk vetch application coupled with reduced chemical fertilizer usage reduced soil adsorption of ammonium nitrogen, increased soil desorption of ammonium nitrogen, reduced soil nitrogen fixation, and improved nitrogen availability. Considering the adsorption and desorption characteristics of soil ammonium nitrogen and soil nutrient content, treatments involving a chemical fertilizer reduction of 20%–40% combined with 22500 kg/hm² of Chinese milk vetch were potentially suitable for the southern Henan rice area.

Key words: Chinese milk vetch; soil ammonium nitrogen; adsorption and desorption; characteristic parameters