

减氮和秸秆还田对旱地土壤微生物和硝化潜势的影响

刘晶¹, 郑利芳², 王颖^{1,2}, 党廷辉^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:通过3年田间试验,研究减氮和秸秆还田对黄土高原南部旱地春玉米产量、硝态氮残留量及微生物学特性等指标的影响。研究共设置不施肥(CK)、传统施氮(N250)、传统施氮配合秸秆还田(N250+S)、减氮20%(N200)、减氮20%配合秸秆还田(N200+S)5个处理。结果表明:(1)连续3年减氮20%和秸秆还田可以提高玉米产量,阻控土壤硝态氮淋溶,N200较N250处理玉米增产5.9%,N200+S较N200处理玉米增产7.4%,N250+S较N250处理玉米增产9.1%;0—300 cm土层,N200较N250处理硝态氮残留量减少51.3%,N200+S较N200处理硝态氮残留量减少18.0%,N250+S较N250处理硝态氮残留量减少41.2%。(2)减氮和秸秆还田是调控土壤硝化潜势的有效措施,N200较N250处理硝化潜势降低8.8%,N250+S较N250处理硝化潜势降低14.2%,N200+S较N200处理硝化潜势降低20.4%。(3)秸秆还田显著提高土壤微生物量碳氮(SMBC、SMBN)含量,N250+S较N250处理SMBC、SMBN分别显著增加17.5%和24.0%,N200+S较N200处理SMBC、SMBN分别显著增加18.4%和31.3%。(4)施氮和秸秆还田对氨氧化古菌(AOA)影响较小,但增加了氨氧化细菌(AOB)数量。(5)氨氧化细菌(AOB)丰度与硝态氮、铵态氮、土壤微生物量碳氮(SMBC、SMBN)和硝化潜势均呈极显著正相关,而氨氧化古菌(AOA)丰度和影响因子没有明显的相关性。研究结果可为黄土旱塬春玉米种植区氮肥管理和农业可持续发展提供科学依据。

关键词:减量施氮; 秸秆还田; 土壤微生物; 硝化潜势; 土壤硝态氮残留; 产量

中图分类号:S143.1; S154.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0309-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.038

Effects of Nitrogen Reduction and Straw Returning on Dryland Soil Microbes and Nitrification Potential

LIU Jing¹, ZHENG Lifang², WANG Ying^{1,2}, DANG Tinghui^{1,2}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Through a three-year field experiment, the effects of nitrogen reduction and straw returning on the yield of spring maize, soil nitrate nitrogen and ammonia oxidizing microorganisms in dryland of the southern Loess Plateau were studied. The study set up five treatments, including no fertilizer (CK), traditional nitrogen application (N250), traditional nitrogen application combined with straw return to field (N250+S), nitrogen reduction 20% (N200), and nitrogen reduction 20% combined with straw return (N200+S). The results showed that: (1) Nitrogen reduction by 20% and straw returning to the field for 3 consecutive years can increase maize yield and control soil nitrate leaching. Compared with N250 treatment, N200 treatment increases maize yield by 5.9%, and N200+S treatment increases maize yield compared with N200 treatment 7.4%, compared with N250 treatment, N250+S treatment increased maize yield by 9.1%; In the 0—300 cm soil layer, compared with N250, N200 reduced nitrate nitrogen residue by 51.3%. And the N200+S reduced nitrate nitrogen residue by 18.0% compared with N200. The residual nitrate nitrogen in N250+S was reduced by 41.2% compared with N250. (2) Nitrogen reduction and straw returning reduced soil nitrification potential. Compared with N250, N200 reduced soil nitrification potential by 8.8%, and N250+S reduced it by 14.2%. The soil nitrification potential in N200+S was reduced by 20.4% compared with N200. (3) Returning

收稿日期:2021-11-18

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800105)

第一作者:刘晶(1997—),女,硕士研究生,主要从事土壤化学与环境研究。E-mail:1534171045@qq.com

通信作者:党廷辉(1964—),男,博士,研究员,主要从事土壤化学与环境研究。E-mail:dangth@ms.iswc.ac.cn

straw to the field significantly increased soil microbial biomass carbon and nitrogen (SMBC, SMBN). Compared with N250, the SMBC and SMBN in N250+S were increased by 17.5% and 24.0%, respectively. Compared with N200, SMBC and SMBN in N200+S were increased by 18.4% and 31.3% respectively. (4) Nitrogen application and straw returning had little effect on ammonia oxidizing archaea (AOA), but increased the abundance of ammonia oxidizing bacteria (AOB). (5) The abundance of ammonia oxidizing bacteria (AOB) was extremely significantly positively correlated with nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, SMBC, SMBN and nitrification potential, while ammonia oxidizing archaea (AOA) was abundant. There was no obvious correlation between degree and impact factor. These results could provide a scientific basis for nitrogen fertilizer management and agricultural sustainable development in the spring maize planting area of the Loess Plateau.

Keywords: nitrogen reduction; straw returning; soil microbe; nitrification potential; nitrate nitrogen; grain yield

氮肥在促进我国粮食作物增产和农业持续发展过程中起到重要作用。由于氮肥在土壤中形态不稳定,易损失,因此加强农田土壤氮素管理具有重要意义^[1-3]。众多学者^[4-5]研究表明,施氮增加土壤硝化潜势,且随施氮量的增加而增加。硝化作用增强,氮肥易被硝化成硝态氮,使作物可利用的有效氮素降低,造成氮肥无效输入、损失严重及环境污染等一系列问题^[6]。减肥增效是我国农业粮食生产持续发展的目标。科研人员进行大量研究以求优化氮肥投入,保证作物增产的同时减少硝态氮损失,促进农业健康发展^[7]。赵士诚等^[8]研究表明,当地传统施肥下减量施氮 30%后,提高了夏玉米产量,减少田间氮素损失。秸秆还田是实现节肥增效、绿色发展的重要措施。吴传发等^[9]分别在北方潮土和南方红壤 2 种典型旱作农田上进行研究后表明,秸秆还田配施减量氮肥能减缓土壤硝化潜势,提高土壤肥力,增加作物产量。因此,优化氮肥管理措施以更好地减少氮肥投入,并利用秸秆资源对促进旱地玉米产业发展具有重要意义。

氨氧化微生物驱动的氨氧化过程是硝化作用的限速步骤,在农田氮素调控中发挥着关键作用^[10]。合理施肥和秸秆还田不仅可以提高土壤质量,而且显著影响土壤氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)的数量和活性。郭俊杰等^[11]在白土型水稻土上采用田间试验研究发现,施肥通过影响 AOB 丰度,提高土壤硝化潜势,因此在调控氮素硝化进程时,需重点研究 AOB 群落结构;而 Ella 等^[12]研究表明,秸秆配施氮肥显著增加 AOA 的丰度,对 AOB 影响不显著,认为 AOA 主导试验土壤的氨氧化过程。因此,土壤氨氧化微生物对施氮和秸秆还田调控氮素转化的响应存在差异,有必要开展进一步深入研究。

黄土旱塬春玉米连作区属于雨养农业区域,该地区农田长期存在过量施氮或不平衡施氮等问题,造成土壤中硝态氮残留量过高^[13]。减量减氮、秸秆还田

是当地阻控硝态氮淋溶的重要措施,但其影响土壤氮素转化的微生物学机制等相关研究较少,有待于进一步研究。因此,本研究在长武地区布设 3 年的田间试验,通过探究黄土高原旱地春玉米连作系统中减氮和秸秆还田对春玉米产量、硝态氮残留量及微生物学特性等指标的影响,以期为本区玉米种植区氮肥管理和农业可持续发展提供理论与技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2017 年 4 月至 2019 年 9 月在陕西长武试验站(35°12'N,107°40'E)进行,海拔 1 200 m,属半干旱湿润性季风气候,年日照时间 2 230 h,年均气温 9.2℃,年均降水量 560 mm,且集中在 7—9 月。供试土壤为黏壤质黑垆土,试验初耕层土壤的有机碳含量 6.5 g/kg,全氮含量 0.8 g/kg,速效磷含量 5.0 mg/kg,速效钾 129.3 mg/kg, pH 8.4。供试作物为春玉米“先玉 335”,种植制度为每年一熟,连作种植。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,共 5 个处理,分别为:(1)CK,不施肥(对照);(2)N250,传统施氮,施氮量为 250 kg/hm²; (3)N250+S,传统施氮配合秸秆还田,施氮量为 250 kg/hm²; (4)N200,传统施氮量的 80%,即减氮 20%,施氮量为 200 kg/hm²; (5)N200+S,减氮 20%配合秸秆还田,施氮量为 200 kg/hm²,所有处理 3 次重复。秸秆还田量约为 15 000 kg/hm²,供试秸秆为当地上季玉米收获后所得原小区的全部玉米秸秆,将全部玉米秸秆切割为 30 cm 的小段,在田间小区内开 6 条沟,沟宽 40 cm,沟间距 40 cm,均匀地将秸秆埋入对应小区 30 cm 土层,覆土时,将相应位置挖出的全部土壤原位回填。所有处理均施用等量的磷钾肥(P₂O₅ 120 kg/hm²和 K₂O 38 kg/hm²),肥料采用撒施方式,根据当地的习惯施肥方式,作基肥播前一次性施入,不追肥,氮肥为尿素(含 N 46.4%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%),钾肥为硫酸钾(含

K₂O 51%)。在 2017—2019 年的原位试验中,玉米于每年的 4 月下旬播种,9 月下旬收获。小区面积为 46.75 m²(8.5 m×5.5 m),采用半地膜种植模式,膜宽 80 cm,行距 60 cm,株距 30 cm。

1.3 土壤样品采集

试验第 3 年(2019 年)在样方内采用 5 点取样法于玉米吐丝期用土钻在 0—20 cm 土层采集土样,另于玉米收获后采用同样方法分层采集 0—300 cm 的土样(0—100,100—300 cm 土层分别按间隔 10 cm 和 20 cm 等层多点混合取样)。2 个时期的土壤样品均按层次混合后放入塑封袋,用冰盒运输于实验室冷冻保藏(−20 ℃)。玉米吐丝期土壤样品过 2 mm 筛,挑去筛下土壤中可见的杂质、石块以及根系,然后将其分成 2 部分:一部分鲜土样测定硝态氮、铵态氮、土壤硝化潜能、微生物量碳和氮,余下一部分自然风干后测定土壤全氮;另一部分冰箱保存(−80 ℃),用于土壤总 DNA 提取及后续分析。玉米收获后采集的土壤样品过 2 mm 筛,挑去筛下土壤中可见的杂质、石块以及根系,用于测定硝态氮残留量。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 玉米产量测定 在每年玉米收获期,各小区随机选择 16 m²的样方取样,称量全部玉米穗鲜重,再从中选取 20 个代表性玉米穗,带回实验室,脱粒后风干,称取籽粒重并折算其产量。

1.4.2 土壤样品测定 全氮采用凯氏定氮法测定,

硝(铵)态氮的测定是将鲜土样混匀后过 2 mm 筛,称取 5.0 g 样品,用 1 mol/L KCL 浸提,然后采用流动分析仪测定。硝化潜能采用氯酸盐抑制法(水土比 4:1)^[14]。土壤微生物量碳和氮(SMBC、SMBN)的测定是氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法(水土比 4:1)^[15]。

1.5 氨氧化微生物(AOA、AOB)功能基因数量的测定

1.5.1 DNA 提取 土壤总 DNA 的提取使用 Fast DNA Spin Kit For Soil 试剂盒,参照说明进行提取,用 1%的琼脂糖凝胶电泳检测提取 DNA 纯度和完整性,用核酸定量仪测定提取 DNA 浓度和纯度。

1.5.2 标准品制备及荧光定量 PCR 将提取的混合 DNA 作为模板对目标基因进行 PCR,经过琼脂糖凝胶纯化后,测定 PCR 产物浓度,根据公式计算目标基因的拷贝数,然后逐渐稀释,制备成拷贝数的 10~10⁸倍的标准品。AOA 和 AOB 的 amoA 基因拷贝数采用 SYBR Green I 染料法进行实时定量 PCR。提取的 DNA 原液稀释 5 倍(约 5 ng/μL)后,作为定量 PCR 的模板 DNA。PCR 反应体系为 25 μL:其中 12.5 μL SYBR © Premix Ex Taq™ (Takara),正反向引物各 0.17 μL,DNA 模板 2 μL,然后用 ddH₂O 补足至 25 μL。阴性对照用 ddH₂O 代替 DNA 模板。实时定量 PCR 所用引物序列及反应程序等见表 1。将待测样品和标准品在定量 PCR 仪上同时进行 PCR 循环,依据一系列标准品的 C_t 值会自动得出标准曲线,然后根据样品的 C_t 值和标准曲线求得基因拷贝数。

表 1 实时定量 PCR 所用引物及反应程序

目标基因	引物名称	引物序列	反应程序	参考文献
AOB	amoA1F	GGGGTTTCTACTGGTGGT	95 ℃ 预变性 1 min,95 ℃ 变性 10 s,57 ℃ 退火 30 s,72 ℃ 延伸 1 min,共 40 个循环,在 80 ℃ 收集荧光信号 10 s	[16]
	amoA2R	CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC		
AOA	Arch-amoAF	STAATGGTCTGGCTTAGACG	95 ℃ 预变性 1 min,95 ℃ 变性 10 s,57 ℃ 退火 30 s,72 ℃ 延伸 1 min,共 40 个循环,在 83 ℃ 收集荧光信号 15 s	[17]
	Arch-amoAR	GCGGCCATCCATCTGTATGT		

1.6 数据处理与统计分析

采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析和相关性分析,LSD 法进行多重比较(α=0.05);采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 减氮和秸秆还田对玉米产量及土壤硝态氮残留量的影响

减氮、秸秆还田可以增加玉米籽粒产量,并减少土壤硝态氮残留量。从表 2 可以看出,2017—2019 年各处理玉米平均籽粒产量分别为 13.1 t/hm²(N250),13.9 t/hm²(N200),14.3 t/hm²(N250+S)和 14.9 t/hm²(N200+S)。对玉米籽粒产量的方差分析表明,N200 处理没有降低玉米籽粒产量,N200 较 N250 处理玉米籽粒产量提高 5.9%。秸秆还田显

著提高玉米籽粒产量(*p*<0.05),N200+S 较 N200 处理玉米籽粒产量提高 7.4%,N250+S 较 N250 处理玉米籽粒产量提高 9.1%。可见,在黄土高原旱地春玉米连作区减氮 20%不会降低春玉米籽粒产量,秸秆还田配施减量氮肥获得 3 年平均最高产量。

表 2 不同处理下玉米籽粒产量

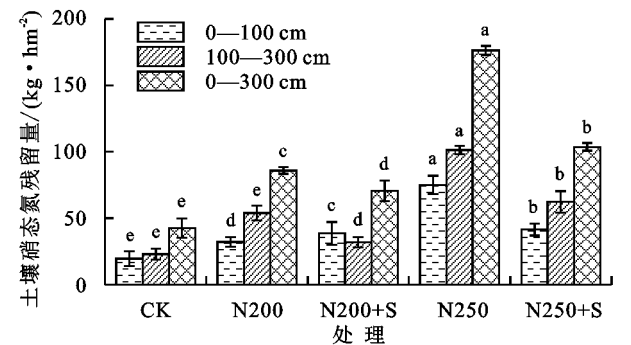
单位:t/hm²

年份	N250	N250+S	N200	N200+S
2017	13.1±0.4c	13.5±0.4c	14.4±0.2b	16.0±0.2a
2018	13.7±0.2b	16.1±0.2a	14.7±0.3b	15.3±0.4ab
2019	12.4±0.4b	13.2±0.4a	12.5±0.4b	13.3±0.5a
平均	13.1±0.5c	14.3±1.3b	13.9±1.0b	14.9±1.1a

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同字母表示不同处理间差异显著(*p*<0.05)。

从第 3 年玉米收获后土壤硝态氮测定结果(图

1)来看,施氮显著增加0—300 cm 土层硝态氮残留量,增加幅度为65.91%~315.48%,100—300 cm 土层,土壤硝态氮残留量对施氮处理的响应与0—300 cm 土层规律一致,与CK 相比,N200+S、N200、N250+S 和N250 处理土壤硝态氮残留量平均增幅分别为39.16%,134.93%,171.62%,342.36%。减氮和秸秆还田处理(N200、N250+S、N200+S)均能降低土壤硝态氮残留量($p<0.05$),且减少硝态氮向下移动。N200 较 N250 处理硝态氮残留量在0—300 cm 土层和100—300 cm 土层分别减少51.3%和46.9%; N200+S 较 N200 处理硝态氮残留量在0—300 cm 土层和100—300 cm 土层分别减少18.0%和40.8%, N250+S 较 N250 处理硝态氮残留量在0—300 cm 土层和100—300 cm 土层分别减少41.2%和38.6%。可见,减氮、秸秆还田可以降低土壤硝态氮残留量,且阻控硝态氮向下淋溶。



注:同一土层不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同处理对土壤硝态氮残留的影响

2.2 减氮和秸秆还田对土壤硝化潜势的影响

从第3年玉米吐丝期0—20 cm 土壤硝化潜势测定结果来看,施氮显著增加土壤硝化潜势,其中N250 处理硝化潜势最高,为1.97 mg/(kg·h),显著高于其他处理($p<0.05$),减氮、秸秆还田均减缓硝化潜势,N200 较 N250 处理硝化潜势降低8.8%,N250+S 较 N250 处理硝化潜势降低14.2%,N200+S 较 N200 处理硝化潜势降低20.4%。表明减氮、秸秆还田是调控土壤硝化潜势的有效措施。

2.3 减氮和秸秆还田对土壤微生物量碳、氮(SMBC、SMBN)的影响

从第3年玉米吐丝期0—20 cm 土壤测定结果(表3)可以看出,SMBC 和 SMBN 的变化趋势为N200+S>N250+S>N200>N250>CK。施氮处理的SMBC、SMBN 含量显著高于对照处理($p<0.05$),SMBC、SMBN 含量分别比对照提高12.4%~37.5%和32.0%~78.1%,减氮提高SMBC、SMBN 含量,但未达到统计学上的差异。而秸秆还田对SMBC、SMBN 影响显著,N250+S 较 N250 处理SMBC、SMBN 分别显著提高17.5%和24.0%,N200+S

较 N200 处理 SMBC、SMBN 分别显著提高18.4%和31.3%。表明秸秆还田显著提高土壤微生物碳(SMBC)和微生物氮(SMBN)含量。

表 3 不同处理下土壤微生物量碳、氮含量

处理	单位:mg/kg	
	SMBC	SMBN
CK	245.8±10.6d	21.9±0.9d
N250	276.3±5.5c	28.9±2.3c
N250+S	324.6±6.4b	35.8±0.8b
N200	285.4±13.4c	29.7±0.7c
N200+S	338.0±5.8a	39.0±0.9a

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

2.4 减氮和秸秆还田对土壤氨氧化微生物(AOA、AOB)的影响

从第3年玉米吐丝期0—20 cm 土壤测定结果(图2)可知,各处理 AOA 数量明显高于 AOB。不同处理中 AOA 和 AOB 的 amoA 基因拷贝数 log 值分别为6.70~6.77,5.49~6.29 copies/g。方差分析结果显示,AOA 数量在各处理间无显著差异,施氮显著增加 AOB 数量($p<0.05$),增幅大小依次为N200+S>N250+S>N250>N200。与CK 相比,施氮处理的氨氧化细菌数量显著增加10.3%~14.5%。减氮对 AOB 数量的变化不明显,秸秆还田增加 AOB 数量,N250+S 较 N250 处理土壤 AOB 数量增加0.6%,N200+S 较 N200 处理土壤 AOB 数量增加3.9%。综合来看,施氮和秸秆还田对 AOB 影响较大,而 AOA 则没有明显的响应。

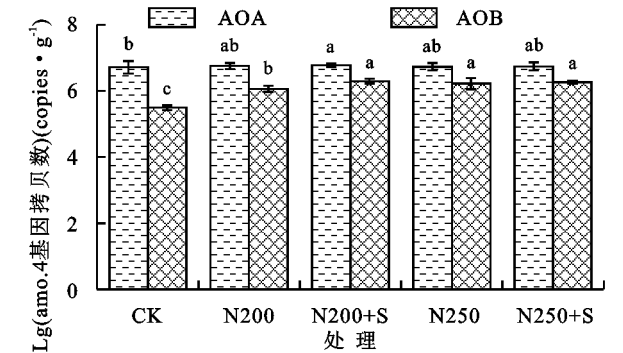


图 2 不同处理对土壤氨氧化微生物的 amoA 基因拷贝数的影响

2.5 土壤氨氧化微生物与土壤性质的相关性分析

将氨氧化微生物与土壤性质进行相关性分析(表4)表明,氨氧化细菌(AOB)的 amoA 基因丰度受到旱地春玉米土壤的硝态氮($r=0.677$)、铵态氮($r=0.839$)、SMBC($r=0.755$)、SMBN($r=0.750$)和硝化潜势($r=0.783$)的共同影响($p<0.01$),其中硝态氮、铵态氮、AOB 基因丰度对土壤硝化潜势有较强影响,具体表现为硝化潜势与硝态氮、铵态氮、AOB 基因丰度均呈极显著正相关,相关系数分别达到0.877,0.698,0.775,0.750 和 0.783($p<0.01$)。SMBN 与全

氮呈显著正相关,与 SMBC、铵态氮呈极显著正相关,相关系数分别为 0.913,0.739($p<0.01$),硝态氮与铵态氮呈极显著正相关,而氨氧化古菌(AOA) amoA 基因丰度和影响因子没有明显的相关性。

表 4 氨氧化微生物与土壤性质的 Pearson 相关系数

指标	硝化潜能	全氮	硝态氮	铵态氮	SMBC	SMBN	AOA 丰度	AOB 丰度
硝化潜能	1	0.478	0.877**	0.698**	0.417	0.477	0.098	0.783**
全氮		1	0.403	0.296	0.364	0.585*	0.508	0.409
硝态氮			1	0.616*	0.245	0.300	0.008	0.677**
铵态氮				1	0.702**	0.739**	-0.299	0.839**
SMBC					1	0.913**	0.096	0.755**
SMBN						1	0.250	0.750**
AOA 丰度							1	-0.050
AOB 丰度								1

注: * 表示显著相关($p<0.05$); ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

3 讨论

减肥增效是我国农业粮食生产持续发展的目标。本研究相关性分析表明,土壤硝化潜能受到硝态氮、铵态氮的共同影响,与硝(铵)态氮均呈极显著正相关关系,说明施氮一方面提高土壤氮素水平,另一方面也易引起硝态氮向深层土壤淋溶累积,导致氮素损失风险加大,易造成环境污染。氮肥用量对作物产量及环境影响的研究表明,在过量施氮地区,常规施肥下适量减少氮肥用量不会降低作物产量,张建军等^[18]通过 3 年田间定位试验研究表明,秸秆还田配施减量 20%~40% 氮肥能提升玉米产量,并改善产量性状;李锦等^[19]进行 4 年田间定位试验(小麦—玉米轮作系统)研究发现,在秸秆还田条件下较常规施肥(玉米施氮量 188 kg/hm²,小麦施氮量 150 kg/hm²)减氮 15%,土壤质量逐步提高,土壤 NO₃⁻—N 积累量明显降低,且作物籽粒增产 7.2%。本研究 3 年试验结果表明,在传统施肥的基础下,适量减少氮肥提高春玉米产量,显著降低土壤硝态氮残留量。进一步证实众多学者^[20-22]针对黄土高原旱作农业区的研究结论,即传统施肥下适量减少施氮量能阻控硝态氮淋溶,且不会对玉米产量产生消极影响。传统施肥模式较减氮模式作物产量下降,可能是因为氮肥超量施用导致玉米过量吸收氮肥,植株叶片生长旺盛,株间通风透光能力降低,光能利用率下降;另外也导致玉米呼吸作用旺盛,提高对光合产物的消耗,使得消耗大于合成,导致减产。其次有研究^[23-25]发现,过量施氮会抑制作物对磷素养分的吸收,降低产量收益。

在黄土旱塬区,传统施氮模式下造成硝态氮在土壤剖面中大量累积^[13],不利于环境和经济效益的提升。土壤残留氮是不容忽视的氮素资源^[26],因此,在氮素管理中要将其考虑在内,控制氮肥用量。本研究中,秸秆还田配施减量氮肥起到减肥增效的作用,这主要是因为玉米秸秆施入土壤后经过微生物的分解

转化,生成大量的有机碳源和氮源,不仅可以替代氮肥发挥作用,减少氮肥投入,降低氮肥超量施用带来的潜在风险,还可进一步给土壤微生物提供充足的养分,有利于配肥土壤,提高玉米产量。添加玉米秸秆可以刺激土壤微生物活动,促进其对硝态氮的生物固持过程,减缓土壤硝化潜能,降低土壤硝态氮残留量。此外,本研究中,将玉米秸秆均匀埋入 30 cm 土层,在翻埋秸秆过程中疏松土壤,改良土壤结构,增加好气微生物的活性,综合改善土壤质量。

土壤微生物在土壤碳、氮转化中起到重要作用^[27],是秸秆的主要分解者。土壤微生物量碳、氮(SMBC、SMBN)虽然在土壤中绝对数量不多,但对外界环境变化响应强烈,是评价土壤质量变化的活指标^[28-31]。本研究中,秸秆还田显著增加 SMBC、SMBN 含量,这与众多学者研究结果一致,王芳等^[32]在渭北旱塬耕地上进行田间试验表明,不同有机物料与化肥配施均增加 SMBC、SMBN 含量,其中秸秆堆肥处理效果为最优;马想等^[33]在南方红壤旱地试验田上探究土壤微生物对玉米秸秆配施氮肥的响应表明,添加玉米秸秆的 3 个处理,SMBC 含量约为其他处理的 10 倍,SMBN 含量约为其他处理的 8 倍。这主要是因为,玉米秸秆在微生物的作用下被分解转化为有机物质,补充土壤中的碳源和氮源,改善土壤理化性质,促进微生物对土壤活性碳氮的固定作用,从而显著增加 SMBC、SMBN 含量。相关性分析表明,土壤硝化潜能与 SMBC、SMBN 并未达到显著相关关系,这表明该地春玉米土壤硝化潜能变化趋势与 SMBC、SMBN 变化趋势并不一致。这与前人^[34]研究结果不同,说明不同地区土壤类型、水肥条件、气候差异等也影响土壤硝化潜能。

旱地黑垆土呈弱碱性,施入土壤中的氮肥易被转化为硝态氮,导致氮素淋溶损失的风险大大增加。氨氧化微生物驱动的氨氧化过程是硝化作用的限速步

骤,在农田氮素循环调控中发挥着关键作用^[10],因此,土壤硝化潜势的变化可能与氨氧化微生物密切相关。氨氧化微生物的数量和活性与土壤肥力和土壤理化性质密切相关,施氮量多少和有机物料还田均对土壤产生不同的影响,进而影响氨氧化微生物的数量。本研究中,虽然土壤 AOA 的 amoA 基因拷贝数量大于 AOB,但土壤 AOB 对施氮和秸秆还田的响应强于 AOA,传统施肥下减氮 20%、秸秆还田显著增加土壤 AOB 数量,对 AOA 数量影响较小,这与郭俊杰等^[11]研究结果一致。虽然 AOA 和 AOB 都在氮循环过程中发挥着重要作用^[35],但本研究中只有 AOB 能迅速对氮肥和玉米秸秆施用造成的土壤环境变化做出响应,这表明 AOB 可能主导本试验土壤的硝化过程。相关性分析也表明,土壤硝化潜势与 AOA 丰度无明显相关关系,但与 AOB 丰度呈极显著正相关。因此,在调控土壤硝化潜势时可以重点关注 AOB 丰度。但多种影响因子的调控造成了硝化潜势的差异,要想确定主导土壤硝化作用的微生物群落还需要进一步研究。

4 结论

(1)与传统施氮模式(N250)相比,减量减氮 20%(N200)和秸秆还田(N250+S、N200+S)处理可以提高春玉米产量,减缓土壤硝化潜势,阻控硝态氮向深层土壤淋溶。

(2)秸秆还田显著提高土壤微生物量碳氮含量,增加微生物对土壤活性碳氮的固定作用。

(3)各处理土壤氨氧化古菌(AOA)数量高于氨氧化细菌(AOB),但 AOB 对施氮和秸秆还田的响应强于 AOA。

(4)氨氧化细菌(AOB)丰度与硝态氮、铵态氮、土壤微生物量碳氮(SMBC、SMBN)和硝化潜势均呈极显著正相关,而氨氧化古菌(AOA)丰度和影响因子没有明显的相关性。

参考文献:

- [1] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106: 3041-3046.
- [2] Mulvaney R L, Khan S A, Ellsworth T R, et al. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production[J]. Journal of Environment Quality, 2009, 38: 2295-2314.
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [4] Chao A, Guo Q L, Sun J W, et al. Different roles of

rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 30-42.

- [5] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, et al. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2017, 73: 485-491.
- [6] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28.
- [7] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm estimation of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen management in the North China plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81: 37-47.
- [8] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 492-497.
- [9] 吴传发, 熊超, 韩燕来, 等. 秸秆还田结合减氮调控旱地土壤硝化潜势维持作物产量的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1782-1793.
- [10] 杨亚东, 宋润科, 赵杰, 等. 长期不同施肥制度对水稻土氨氧化微生物数量和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3829-3837.
- [11] 郭俊杰, 朱晨, 刘文波, 等. 不同施肥模式对土壤氮循环功能微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 751-759.
- [12] Ella W, Karin N, Janet K J, et al. Responses of bacterial and archaeal ammonia oxidizers to soil organic and fertilizer amendments under long-term management[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 45: 193-200.
- [13] 党廷辉, 郭胜利, 樊军, 等. 长期施肥条件下黄土旱塬土壤 NO₃⁻-N 的淋溶分布规律[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1265-1268.
- [14] Jukka K, Mirja S S, Tuula A, et al. Activity, diversity and population size of ammonia-oxidising bacteria in oil-contaminated landfarming soil[J]. FEMS Microbiology Letters, 2005, 250: 33-38.
- [15] Rainer G J. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k EC value[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28: 25-31.
- [16] Rotthauwe J H, Witzel K P, Liesack W, et al. The ammonia monooxygenase structural gene amoA as a functional marker: Molecular fine-scale analysis of natural ammonia-oxidizing populations[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63: 4704-4712.
- [17] Christopher A F, Kathryn J R, Michael B, et al. Ubiquity and diversity of ammonia-oxidizing archaea in water columns and sediments of the ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102: 14683-14688.
- [18] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 秸秆还田与氮肥减施对旱地春

玉米产量及生理指标的影响[J].草业学报,2019,28(10):156-165.

[19] 李锦,田霄鸿,王少霞,等.秸秆还田条件下减量施氮对作物产量及土壤碳氮含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):137-143.

[20] 董强,吴得峰,党廷辉,等.黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):856-863.

[21] 吴得峰,姜继韶,孙棋棋,等.减量施氮对雨养区春玉米产量和环境效应的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1202-1209.

[22] 郑利芳,吴三鼎,党廷辉,等.不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):221-227.

[23] 刘芬,同延安,王小英,等.渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):48-55.

[24] 马星竹,郝小雨,高中超,等.氮肥用量对土壤养分含量、春玉米产量及农学效率的影响[J].玉米科学,2016,24(6):131-135.

[25] 赵靓,侯振安,黄婷,等.氮肥用量对玉米产量和养分吸收的影响[J].新疆农业科学,2014,51(2):275-283.

[26] 石德杨,张海艳,董树亭,等.土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(1):37-44.

[27] 胡希远, Kuehne R F.秸秆在土壤内分解初期氮素矿化与固持的模拟测定[J].应用生态学报,2005,16(2):243-248.

[28] 张成霞,南志标.土壤微生物生物量的研究进展[J].草业科学,2010,27(6):50-57.

[29] Zhang J S, Guo J F, Cheng G S, et al. Soil microbial biomass and its controls[J].Journal of Forestry Research,2005,16(4):327-330.

[30] 周建斌,陈竹君,李生秀,等.土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用[J].生态学报,2001,21(10):1718-1725.

[31] 周元,陈远学,蒋帆,等.玉米地土壤微生物量碳、氮及微生物熵对不同物料还田的响应[J].水土保持学报,2020,34(2):173-180.

[32] 王芳,张金水,高鹏程,等.不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):702-709.

[33] 马想,黄晶,赵惠丽,等.秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1574-1580.

[34] 王萍萍,段英华,徐明岗,等.不同肥力潮土硝化潜能及其影响因素[J].土壤学报,2019,56(1):124-134.

[35] 朱国洁,张娜,杜雯,等.氨氧化微生物在氮循环中的生态功能及其影响因子[J].天津农业科学,2015,21(12):48-53.

(上接第 308 页)

[16] 周宏.现代汉语辞海[M].北京:光明日报出版社,2003.

[17] Valerie I. The Penguin Dictionary of Physics[M].Beijing: Foreign Language Press,1996:92-93.

[18] 张子璇,宋雨桐,张惠中,等.水文气候影响下黄河三角洲土壤盐分时空动态[J].应用生态学报,2021,32(4):1393-1405.

[19] 张素铭,赵庚星,王卓然,等.滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测[J].农业资源与环境学报,2018,35(4):349-358.

[20] 李萍.黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[D].山东 泰安:山东农业大学,2016.

[21] 王卓然.黄河三角洲典型地区土壤水盐动态规律、影响因素与预测模型[D]. 山东 泰安:山东农业大学,2017.

[22] 陈红艳,赵庚星,陈敬春,等.基于改进植被指数的黄河口区盐渍土盐分遥感反演[J].农业工程学报,2015,31(5):107-112.

[23] 巩腾飞.盐碱地植被覆盖度与土壤盐分含量时空耦合关系研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2016.

[24] 杨晓潇,王秀兰,王计平,等.天津市滨海新区土壤水盐空间变异分析[J].中国水土保持科学,2019,17(3):39-47.

[25] 王卓然,赵庚星,高明秀,姜曙千,常春艳,贾吉超.黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究:以垦利县为例[J].农业资源与环境学报,2015,32(2):154-161.

[26] 杨强军,范燕敏,耿庆龙,等.焉耆盆地耕地土壤盐分时空变化特征研究[J].新疆农业大学学报,2020,43(5):385-390.

[27] 王维维,麦麦提吐尔逊·艾则孜,艾提业古丽·热西提,等.焉耆盆地农田耕层土壤盐分的空间变异及分布格局[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):195-201.

[28] 李珊,杨越超,姚媛媛,等.不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响[J].土壤学报:2021,59(4):1012-1024.

[29] 胡盈盈,王瑞燕,陈红艳,等.黄河三角洲春秋两季土壤盐分遥感反演及时空变异研究[J].测绘与空间地理信息,2018,41(8):78-81.

[30] 孙亚楠,李仙岳,史海滨,等.基于多源数据融合的盐分遥感反演与季节差异性研究[J].农业机械学报,2020,51(6):169-180.