

施肥管理措施对潮土和红壤作物氮素利用效率 与病虫害发生的影响

刘四义¹, 韩燕来², 李培培², 张勤斌³, 黄惠³, 葛安辉^{1,4}, 熊超^{1,4},
吴传发^{1,2}, 邓娜^{1,4}, 张丽梅^{1,4*}

(1 中国科学院生态环境研究中心 / 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2 河南农业大学资源与环境学院, 河南郑州 450046; 3 曲靖市麒麟区土壤肥料工作站, 云南曲靖 655000; 4 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 【目的】秸秆还田、生物炭和硝化抑制剂等措施常用来配合氮肥减施, 以避免减氮对作物产量可能产生的影响。研究长期不同氮肥管理措施对作物产量、氮素利用率以及病虫害的影响, 为潮土和红壤地区氮肥管理措施优化和病虫害防治提供参考依据。【方法】在河南许昌潮土和云南曲靖红壤上开展田间定位试验, 设置不施氮肥对照 (CK), 常规施氮肥 (N), 减氮 20% (80%N), 以及减氮 20% 的基础上配合秸秆还田 (80%NS)、添加硝化抑制剂 (80%NI)、种植翻压冬季绿肥 (80%NGM)、喷施固氮菌剂 (80%Nkle)、同时施用生物炭和秸秆还田 (80%NBS)、同时施用生物炭和硝化抑制剂 (80%NBI) 处理。通过观测玉米和大麦 (小麦) 的生产力、氮肥利用和玉米螟、大斑病发生情况, 探讨不同氮肥管理措施的实施效果。【结果】与常规施氮肥处理 (N) 相比, 80%NBS 和 80%NBI 处理显著提高了曲靖红壤表层土壤有机质和全碳含量, 其他处理对土壤基本理化性质没有显著影响; 80%N 处理显著降低了许昌作物产量, 而 80%NS、80%NI 和 80%Nkle 维持了作物产量, 氮素利用率显著提升了 21%~34%, 土壤氮盈余降低了 33%~42%。同样, 80%N、80%NS、80%Nkle、80%NBS、80%NBI 处理均可以保障曲靖的作物稳产, 并使氮肥利用率提升约 29.4%, 氮盈余显著降低约 31.1%。许昌样地玉米螟的虫害较为严重, 且玉米螟蛀孔数和玉米产量、吸氮量有显著的正相关关系。80%NGM 处理降低了曲靖样地玉米螟虫害, 并显著提高了玉米生产力。80%NS 处理显著增加了许昌样地的大斑病病情指数; 在曲靖样地中大斑病病情较为严重, 且大斑病病情指数与玉米吸氮量、茎叶氮含量、土壤全氮含量等指标呈显著的负相关关系。【结论】在许昌潮土和曲靖红壤上, 在减少 20% 氮肥用量的基础上配合施用硝化抑制剂、生物炭、固氮菌剂等措施, 可以实现作物的稳产增产, 提升氮肥利用率, 降低氮盈余量。秸秆还田显著提高了许昌潮土玉米大斑病病情指数, 而绿肥轮作则使曲靖红壤的玉米螟蛀孔数降低, 并显著提高玉米生产力。因此, 养分循环利用方式与病虫害发生的关系还有待进一步研究。

关键词: 氮肥减施; 氮素盈余; 硝化抑制剂; 生物炭; 绿肥; 大斑病; 玉米螟

Effects of fertilizer managements on crops nitrogen use efficiency and disease incidence in fluvo-aquic and red soils

LIU Si-yi¹, HAN Yan-lai², LI Pei-pe², ZHANG Qin-bin³, HUANG Hui³, GE An-hui^{1,4}, XIONG Chao^{1,4},
WU Chuan-fa^{1,2}, DENG Na^{1,4}, ZHANG Li-mei^{1,4*}

(1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences / State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Beijing 100085, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Hennan 450046, China; 3 Qilin Soil and Fertilizer Station of Qujing, Yunnan 655000, China; 4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objectives】 This study investigated the effects of N management practices on crops productivity, N utilization efficiency and disease incidence of maize. 【Methods】 Five consecutive years of field trials were conducted in fluvo-aquic soil of Xuchang City (XC) of Hennan Province, and red soil of Qujing City (QJ) of

收稿日期: 2022-11-07 接受日期: 2023-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42007077); 国家重点研发计划 (2017YFD0200606); 吉安市科技计划项目 (20211-055345)。

联系方式: 刘四义 E-mail: syliu@rcees.ac.cn; * 通信作者 张丽梅 E-mail: zhanglm@rcees.ac.cn

Yunnan Province since 2016, respectively. The nine treatments included: no N control (CK), conventional N fertilizer rate (N), reducing 20% of conventional N input (80%N), and the combination of 80%N with straw return (80%NS), nitrification inhibitor (80%NI), green manure (80%NGM), asymbiotic N_2 -fixing bacteria *Klebsiella variicola* inoculant (80%NKle), biochar + straw return (80%NBS), biochar + nitrification inhibitor (80%NBI). The productivity and N utilization of crops were measured in each season, and maize fungal disease index (leaf blight) and insect pest corn borer (*Ostrinia nubilalis*) were monitored since 2018. **【 Results 】** Compared with N treatment, 80%NBS and 80%NBI significantly increased soil organic matter and total carbon in red soil of QJ, the other treatments had no significant effect on soil physicochemical properties of the two experimental sites. In XC, 80%N significantly decreased the crops productivity, while 80%NI and 80%NKle maintained crop productivity and increased N use efficiency by 21%–34%, and reduced N surplus by 33%–42% simultaneously. In QJ, 80%N did not cause crop yield decrease, but increased the N use efficiency (NUE) by 29.4% and reduced N surplus by 31.1% simultaneously. Generally, corn borer is more serious in XC than in QJ, the pest incidence in XC ($P < 0.05$) was positively correlated with the maize yield and total N uptake. 80%NGM treatment significantly decreased the occurrence of corn borer in QJ. 80%NS treatment significantly increased the disease index of maize leaf blight in XC. The leaf blight disease in QJ was serious, and the disease index was ($P < 0.05$) negatively correlated with plant N uptake, stem and leaf N contents, and soil total N. **【 Conclusions 】** In XC and QJ, reducing 20% of conventional N fertilizer and combined with application of nitrification inhibitors, biochar or diazotroph inoculant is effective in maintaining crop yield and NUE, and decreasing soil nitrogen surplus. Straw return might increase the disease incidence of leaf blight in XC, while green manure incorporation could decrease corn borer holes and enhance corn yield in QJ. Further studies need to be conducted for the relationship of nutrient cycling managements with the occurrence of pest disease.

Key words: N fertilizer reduction; N surplus; nitrification inhibitor; biochar; green manure; maize leaf blight; *Ostrinia nubilalis*

氮元素是蛋白质、核酸等许多有机化合物的重要组成部分，对植物的生长发育有着至关重要的作用。施用氮肥是提高作物产量和品质的关键措施，为保障我国 14 亿人口的粮食安全作出了巨大贡献^[1-2]。但是，不合理的氮肥施用不仅导致氮肥的大量损失浪费，也造成了一系列生产和环境问题，如水体富营养化、土壤酸化、温室气体排放以及生物多样性下降和作物病虫害发生等^[3-5]。为解决粮食生产与生态环境安全之间的矛盾，必须进一步优化氮肥的管理措施以提高氮肥的利用效率、减少氮肥施用的环境影响。由于气候条件、种植结构、施肥方式和土壤性质的巨大差异，不同区域的作物氮素利用效率、氮肥减施效果和适宜的管理措施各不相同，针对不同区域的养分管理措施进行研究和改良，对于提升粮食产量、确保国家粮食安全更具现实意义。

国内外学者针对不同氮肥管理措施下作物产量、氮素吸收和损失（淋溶、氨挥发、 N_2O 排放等）及其机理机制做了大量研究，并提出了合理施肥的“4R”原则，即施用正确的肥料种类（right source）和正确的氮肥用量（right rate），在正确的时间（right

time）以及正确的位置（right place）施用肥料的原则^[6-11]。基于上述原则，人们提出在减施氮肥的基础上，配合相应的氮肥调控措施来提高作物氮肥利用效率，并保障作物产量。比如，施用硝化抑制剂抑制土壤的硝化过程降低氮素淋溶损失的风险；施用固氮菌剂通过固氮作用增加土壤的氮素来源替代化学氮肥；绿肥轮作、秸秆还田、施用生物质炭等措施可以改良土壤理化性质，从而增加氮肥的利用效率^[10-13]。然而，相当多的研究表明相同的氮肥管理措施在不同地区和不同作物系统中的增产效应有很大差异，比如硝化抑制剂可以显著提高碱性土壤的水稻产量，在酸性土壤中的效果不明显^[11, 14]。秸秆还田对作物产量、氮素吸收的影响也因试验地点、作物种类等不同而有很大差异^[15-18]。同一措施在不同土壤-作物系统的效果存在差异，可能与当地气候条件、土壤 pH 以及作物对无机氮的喜好等因素有关^[19]。

此外，土壤的基础地力和养分供应也与作物病虫害的发生有密切关系。如在缺氮状态下，植物生长发育不良，抗病性较弱；而氮素过量也会造成植物徒长，植物茎秆细胞扩大但相对强度变弱，易发

生倒伏、真菌性疾病和虫害^[3,20-22]。然而, 这些研究大都是重点关注不同氮肥管理措施下作物产量、氮肥利用以及损失情况, 较少关注不同区域农田氮肥减施配合不同辅助管理措施对作物生产、氮肥利用及病虫害发生的影响。本研究在河南许昌潮土和云南曲靖红壤上开展了连续 5 年的田间定位试验, 通过田间测产与病虫害调查, 研究了减量施氮配合施用生物质炭、硝化抑制剂、固氮菌剂以及秸秆还田等措施, 对作物产量、氮肥利用率和玉米螟虫害、大斑病病害的影响, 以明确不同措施在潮土和红壤上的减氮增效潜力, 以及不同氮肥管理措施对玉米病虫害发生的影响, 为不同地区氮肥管理措施的优化和病虫害的防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间定位观测试验于 2016 年春季设置于河南农业大学许昌校区农场 (34°08'N, 113°48'E) 和云南省

曲靖市东山镇转长河村 (25°09'N, 104°01'E)。河南许昌试验基地海拔 79 m, 属于暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 15℃, 玉米季平均气温 23.9℃, 麦季平均气温 12.5℃, 年均降水量 728.3 mm, 60% 出现在 6—10 月份。许昌试验基地土壤类型为潮土, 种植模式为一年两季, 夏玉米—冬小麦轮作。云南曲靖试验地海拔 1850 m, 属于亚热带高原季风气候, 年平均温度 14.5℃, 年均降雨量 1008 mm, 主要集中于 4—10 月份。曲靖试验基地土壤属于高原红壤, 种植模式为一年两季, 夏玉米—大麦轮作。试验开始时两地土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 田间小区试验设计与管理

采用随机区组设计, 曲靖 9 个处理, 许昌 10 个处理, 每个处理 3 个重复, 随机区组排列。曲靖基地小区面积为 30 m² (3 m×10 m), 许昌基地小区面积为 24 m² (3 m×8 m)。具体试验处理及实施情况见表 2。

许昌和曲靖两地常规施氮处理氮肥用量均为 N

表 1 试验地耕层土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties in surface soil of tested farmland

地点 Site	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Alkeline-N	有效磷 (mg/kg) Olsen-P	速效钾 (mg/kg) Available K	净硝化速率 [N mg/(kg·d)] Net nitrification rate
许昌 Xuchang	7.8	41.3	0.8	68.7	14.3	90.4	29.1
曲靖 Qujing	5.3	73.2	1.5	101.0	18.2	166.0	18.0

表 2 许昌和曲靖田间试验的处理及其实施情况

Table 2 Treatment and implementation in field experiments of Xuchang and Qujing

处理 Treatment	实施方式 Implementation	许昌 Xuchang	曲靖 Qujing
CK	不施氮肥 No N control	√	√
N	常规施用氮肥处理 Conventional N fertilizer rate	√	√
80%N	常规施氮肥基础上减少20%的氮肥 20% N fertilizer reduction on the basis of conventional N fertilizer rate	√	√
80%NS	减氮20%, 配合秸秆还田 Combination of 80%N with straw return	√	√
80%NI	减氮20%, 配合施用硝化抑制剂 Combination of 80%N with nitrification inhibitor	√	√
80%NGM	减氮20%, 配合在冬季种植绿肥并在春天还田 Combination of 80%N with green manure return in spring	√	√
80%Nkle	减氮20%, 配合施用固氮菌剂 Combination of 80%N with symbiotic N ₂ -fixing bacteria <i>Klebsiella variicola</i> inoculant	√	√
80%Nkle-S	减氮20%, 配合施用无菌固氮菌培养基质 Combination of 80%N with sterile N ₂ -fixing bacteria culture substrate	√	—
80%NBS	减氮20%, 配合施用生物质炭并进行秸秆还田 Combination of 80%N with biochar + straw return	√	√
80%NBI	减氮20%, 配合施用生物质炭和硝化抑制剂 Combination of 80%N with biochar + nitrification inhibitor	√	√

注: “√”表示设置该处理; “—”表示没有设置该处理。2018年后80%NI处理不再施用硝化抑制剂。

Note: “√” indicates the treatment is set; “—” indicates the treatment is not set. Nitrification inhibitor were not applied in 80%NI treatment since 2018.

400 kg/(hm²·a), 其中, 曲靖夏玉米氮肥用量为 300 kg/(hm²·a), 冬大麦为 100 kg/(hm²·a); 许昌夏玉米和冬小麦各 200 kg/(hm²·a)。两个试验地的氮肥和磷肥均为尿素和过磷酸钙; 许昌和曲靖的钾肥分别为氯化钾和硫酸钾。两个试验地所有处理磷肥和钾肥用量相同, 均为 P₂O₅ 90 kg/(hm²·a) 和 K₂O 90 kg/(hm²·a)。曲靖玉米磷钾肥全部作为基肥, 在播种时一次性沟施, 全部氮肥在播种 1 个月后沟施。许昌玉米全部磷钾肥和 50% 的氮肥作为基肥在播种前沟施, 其余 50% 的氮肥在玉米大喇叭口期追施。

秸秆还田处理将上一季作物秸秆全部还田, 具体操作为: 将秸秆粉碎至 2~3 cm 左右, 均匀撒入供试小区, 使用翻耕机以表层土覆盖。试验所用的硝化抑制剂为浙江奥夫托公司生产的三氯甲基吡啶 (CP, 70% 可湿性粉剂), 按照 1050 g/hm² 的用量与氮肥均匀混合后施入土壤。固氮菌剂为本实验室筛选的联合固氮菌 w12, 经分子鉴定为变栖克雷伯氏菌 (*Klebsiella variicola*), 无致病性^[12]。固氮菌剂在玉米大喇叭口期, 或者大麦/小麦返青期, 按照 333 L/hm² 的用量以灌根的方式施入。云南曲靖轮作绿肥为光叶紫花苕, 许昌为紫花毛苕或禾草。轮作绿肥全部收割后作为家畜饲料。供试生物炭原料为玉米秸秆, 由湖北金日能源有限公司生产, 生物炭用量为 1500 kg/hm², 每 2 年施用 1 次, 在玉米播种前施用。

许昌试验玉米品种是豫单 9953, 种植密度 66750 株/hm², 小麦品种是秋乐 2122, 播种量 120 kg/hm²。曲靖试验玉米品种为师单 8 号, 种植密度 66750 株/hm², 大麦品种是 V43, 播种量 120 kg/hm²。试验田除草、灌溉和病虫害防治等生产管理措施均按照当地习惯进行。曲靖玉米一般在每年 5 月 15 日—20 日播种, 10 月 15 日—20 日收获, 大麦在 10 月 25 日—31 日播种, 第二年 5 月 6 日—10 日收获。许昌玉米则在每年 6 月 10 日—15 日播种, 9 月 28 日—10 月 5 日收获, 小麦在每年 10 月 10 日—14 日播种, 第二年 6 月 1 日—5 日收获。关于田间试验的更多详细信息可参考已发表的相关论文^[23-24]。

1.3 测产与玉米病虫害调查

2016—2020 年调查了玉米、小麦/大麦产量和生物量, 2018—2020 年调查了玉米大斑病病情指数和玉米螟蛀孔数。大斑病病情指数在玉米抽雄期进行, 采用五点取样法调查, 即在每个小区取 5 个点, 在每个点调查 10 株, 每个小区共调查 50 株玉米。调查时, 取玉米穗位置以上和以下各 3 片叶子, 每株共调查 6 片, 观察每片叶子上病斑的大小

和数量, 根据病斑的面积对每片叶子的病害程度进行分级^[25]。大斑病病情分级标准为: 0 级, 无可见症状; 1 级, 病斑占总叶面积的 1%~3%; 3 级, 病斑占总叶面积的 11%~25%; 5 级, 病斑占总叶面积的 46%~60%; 7 级, 病斑占总叶面积的 71%~80%; 9 级, 病斑占总叶面积的比例大于 91%。随后根据调查结果计算大斑病的病情指数, 具体公式如下:

大斑病病情指数 = 100 × Σ(各级病叶数 × 各级代表值) / (调查总叶数 × 最高级代表值)

玉米成熟收割时, 调查每个小区玉米螟的蛀孔数和产量、生物量。每小区取样按照“S”形随机选取 15 株玉米, 剥去叶片, 观察并记录茎部玉米螟的蛀孔数。

另在小区样方内, 连续收取 20~40 株玉米, 将玉米穗烘干、脱粒、称重。依据穗籽粒重量和小区内玉米植株数, 折算玉米产量。同时称取收获玉米植株鲜重, 并随机选择若干玉米植株测定其含水率, 依据玉米植株鲜重、含水率和小区内玉米植株数计算玉米生物量。在大麦/小麦成熟时, 在小区选择 1 m² 的样方, 并将样方内作物全部收割、脱粒, 烘干后对籽粒和秸秆进行称重, 获得产量和生物量。

1.4 土壤样品采集与理化性质分析

于 2020 年玉米抽雄期采集土壤样品。按照“S”形布点法在每个小区布置 7 个采样点, 使用土钻采集 0—15 cm 表层土壤样品, 混合、风干后研磨、过筛用于相关理化性质的分析。

土壤 pH 采用电位法 (Mettler Toledo, Switzerland) 测定, 土水质量比为 1 : 5; 土壤全碳 (TC)、全氮 (TN) 和植株样品全氮含量采用元素分析仪 (Vario TOC, Germany) 测定。土壤有机质含量采用烧失法测定, 具体方法为将干燥的土壤样品在 500℃ 的马弗炉中灼烧 8 h, 通过测定烧失的土壤重量来计算土壤有机质含量^[26-27]。

1.5 数据计算与统计分析

使用差减法计算化学氮肥利用率 (NUE), 具体公式如下:

$$\text{NUE} (\%) = \frac{N_{\text{uptake1}} - N_{\text{uptake2}}}{T_{\text{Nf}}} \times 100$$

式中: N_{uptake1} 指施用氮肥处理的作物总吸氮量, N_{uptake2} 指不施氮肥的 CK 的作物吸氮量, T_{Nf} 指施肥处理所施用的总氮量。

不同处理的氮素盈余参考 Zhang 等^[28]的计算方法, 即氮素盈余等于施用的化肥氮与环境供应的氮

(主要为生物固氮与大气氮沉降)之和减去植物所吸收的氮量。将 CK 处理下植物所吸收的氮量作为生物固氮、大气氮沉降等环境氮素来源的氮量。因此氮盈余的计算公式为:

$$N_{\text{sur}} = N_{\text{fer}} + N_{\text{uptake2}} - N_{\text{uptake1}}$$

式中: N_{sur} 为氮盈余, N_{fer} 为施用化肥的氮量。

采用最小显著差异法 (LSD) 检验不同施肥处理间玉米产量、生物量、收获指数、大斑病的病情指数和玉米螟蛀孔数平均值的差异, 当 $P < 0.05$ 时, 即认为它们之间存在显著差异。采用 Pearson 相关性分析, 探究玉米产量、生物量、收获指数等生产力指标与大斑病的病情指数、玉米螟蛀孔数之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 氮肥管理措施对土壤基本理化性质的影响

许昌潮土 pH 高于曲靖红壤, 全氮和有机质含量低于曲靖红壤 (表 1、表 3), 许昌潮土净硝化速率比曲靖红壤高 61.19% (表 1)。与常规施氮肥处理 (N) 相比, 80%N 处理对许昌潮土和曲靖红壤的有机质、全碳、全氮含量和 pH 均没有显著影响; 80%NBS、80%NBI 处理显著提高了曲靖红壤有机质和全碳含

量, 但对许昌潮土有机质含量无显著影响, 80%NBS 显著提高了许昌潮土全碳含量。80%NS 和 80%NGM 处理有增加潮土和红壤有机质的趋势, 但差异不显著。生物炭施用显著提高了红壤的 pH 约 0.5 个单位 (表 3)。

2.2 氮肥管理措施对作物年平均产量与生物量的影响

在许昌, 80%N 处理玉米 2016—2020 年的平均产量和生物量较 N 处理分别降低了 9.2% 和 7.2% (图 1), 小麦年平均产量和生物量分别降低了 7.1% 和 13.2% (图 2)。与 80%N 相比, 80%NI 的玉米产量和生物量分别提高了 19.5% 和 14.8%, 80%NBS 的小麦产量提高了 22.9%。

与常规施氮肥相比, 施氮量减少 20% 对曲靖红壤中玉米和大麦的产量、生物量均没有显著影响 (图 1, 图 2)。在减氮 20% 的基础上配合硝化抑制剂、固氮菌剂、秸秆还田和生物炭等处理对作物的产量和生物量的提升效果有限。在玉米季, 除 80%NGM 处理使玉米产量和生物量较 80%N 分别处理显著增加 19.2% 和 14.1%, 80%NBI 处理使玉米生物量较 80%N 处理显著增加 13.9% 外, 其他调控措施的产量、生物量均与 80%N 处理没有显著差异 (图 1)。

表 3 氮肥管理方式对表层土壤基本理化性质的影响

Table 3 Effects of N fertilizer managements on the physicochemical properties of surface soil in Xuchang and Qujing

处理 Treatment	许昌 Xuchang (潮土 Fluvo-aquic soil)				曲靖 Qujing (红壤 Red soil)			
	有机质 (g/kg) Organic matter	pH	全碳 (g/kg) Total C	全氮 (g/kg) Total N	有机质 (g/kg) Organic matter	pH	全碳 (g/kg) Total C	全氮 (g/kg) Total N
CK	41.99±1.98 b	8.19±0.03 a	17.44±0.20bc	1.19±0.03 b	75.85±3.55 b	6.10±0.10 a	19.68±0.95 c	1.58±0.06 d
N	41.88±0.78 b	8.16±0.03 ab	17.50±0.40 bc	1.25±0.02 ab	70.01±0.59 b	5.46±0.20 c	18.81±0.86 c	2.10±0.29 abc
80%N	42.19±0.91 b	8.13±0.10 abc	17.46±0.24 bc	1.25±0.04 ab	70.96±4.14 b	5.55±0.09 c	18.77±1.61 c	2.01±0.12 bc
80%NS	44.30±1.88 ab	8.12±0.00 bc	17.46±0.61 bc	1.25±0.07 ab	74.95±7.00 b	5.61±0.41 bc	18.63±0.74 c	1.99±0.06 bc
80%NI	44.43±1.77 ab	7.99±0.03 e	17.82±0.14 bc	1.30±0.07 a	71.47±5.83 b	5.58±0.32 c	18.92±1.78 c	1.93±0.15 cd
80%NGM	44.63±1.12 ab	8.05±0.05 de	17.61±0.05 bc	1.30±0.07 a	72.89±2.40 b	5.49±0.16 c	18.66±1.79 c	2.01±0.07 bc
80%Nkle	49.17±6.47 a	8.05±0.03 de	17.34±0.12 bc	1.25±0.04 a	79.12±0.59 b	5.49±0.29 c	21.19±0.95 c	2.03±0.06 bc
80%Nkle-S	45.01±4.86 ab	8.10±0.01 bcd	16.98±0.50 c	1.17±0.07 b				
80%NBS	44.83±2.05 ab	8.01±0.06 e	19.45±0.89 a	1.32±0.03 a	90.12±1.03 a	6.02±0.20 a	37.27±1.61 a	2.38±0.16 ab
80%NBI	46.83±3.44 ab	8.07±0.04 cd	18.28±0.60 b	1.21±0.08 b	97.57±8.22 a	6.01±0.17 ab	32.64±5.17 b	2.33±0.29 a

注: CK 为不施氮肥对照; N 代表常规施氮肥; 80%N、80%NS、80%NI、80%NGM、80%Nkle、80%Nkle-S、80%NBS、80%NBI 分别代表减氮 20%, 减氮 20% 配合秸秆还田、硝化抑制剂、绿肥、固氮菌剂、无菌固氮菌培养基、生物炭+秸秆还田、生物炭+硝化抑制剂。同列数据后不同小写字母表示不同氮肥管理措施间显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: In the treatment codes, CK represents no N control; N represents conventional N fertilizer rate; 80%N represents reducing 20% of conventional N input; 80%NS, 80%NI, 80%NGM, 80%Nkle, 80%Nkle-S, 80%NBS, and 80%NBI represent the combination of 80%N with straw return, nitrification inhibitor, green manure, azotobacter strain, substrate for azotobacter without azotobacter, biochar + straw return, biochar + nitrification inhibitor. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant difference among N fertilizer managements ($P < 0.05$).

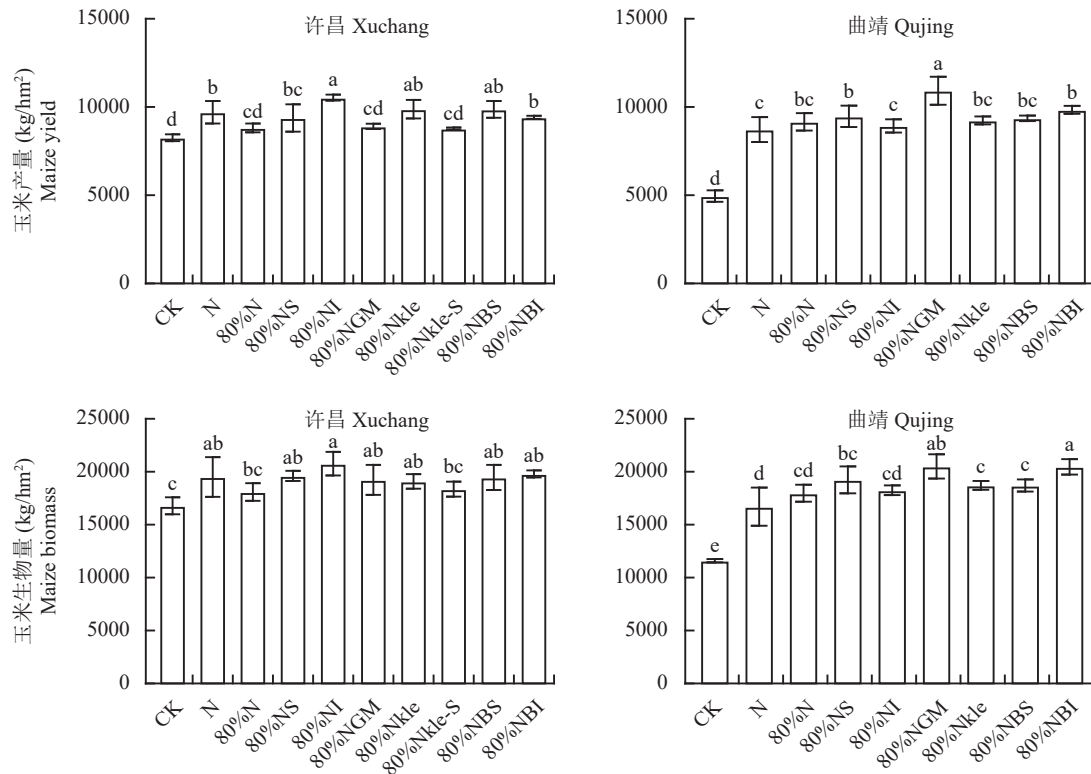


图 1 氮肥管理措施对许昌和曲靖玉米年平均产量与生物量的影响

Fig. 1 Effects of N management on annual average maize yield and biomass in Xuchang and Qujing

注: CK 为不施氮肥对照; N 代表常规施氮肥; 80%N 代表在常规施氮量的基础上减氮 20%; 80%NS、80%NI、80%NGM、80%Nkle、80%Nkle-S、80%NBS、80%NBI 分别代表减氮 20% 基础上配合秸秆还田、硝化抑制剂、绿肥、固氮菌剂、无菌固氮菌培养基、生物炭+秸秆还田、生物炭+硝化抑制剂。数据为平均值±标准差。柱上不同小写字母表示不同氮肥管理措施间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: In the treatment codes, CK represents no N control; N represents conventional N fertilizer rate; 80%N represents reducing 20% of conventional N input; 80%NS, 80%NI, 80%NGM, 80%Nkle, 80%Nkle-S, 80%NBS, and 80%NBI represent the combination of 80%N with straw return, nitrification inhibitor, green manure, azotobacter strain, substrate for azotobacter without azotobacter, biochar + straw return, biochar + nitrification inhibitor. The data is expressed as average ± standard deviation, and different lowercase letters above the bars indicate significant difference among N fertilizer managements ($P < 0.05$).

在大麦季, 仅 80%NS 处理的产量较 80%N 处理显著增加了 20.74%, 其他调控措施的大麦产量和生物量均与 80%N 处理没有显著差异 (图 2)。

2.3 氮肥管理措施对作物氮素利用的影响

图 3 显示氮肥管理和试验地点等因素对作物的年平均吸氮量、氮肥利用率以及氮素盈余产生了显著影响。总体而言, 许昌潮土的年平均吸氮量高于曲靖, 而两地作物的氮肥利用率和氮素盈余均差异较小。与常规施氮肥相比, 减氮 20% 使许昌潮土作物的年平均吸氮量显著降低了 16% ($P < 0.05$)。在减氮 20% 的基础上实施秸秆还田及施用硝化抑制剂、固氮菌剂和生物炭等调控措施的作物年平均吸氮量则与常规施氮肥处理一致。常规施氮肥处理下, 许昌潮土的氮肥利用率、N 盈余分别为 40.2%、239 kg/(hm²·a)。与常规施氮肥相比, 减氮 20% 对氮盈余没有显著影响, 但作物氮肥利用率降低了 28.6%。在

减氮 20% 的基础上辅以秸秆还田及施用硝化抑制剂、生物炭、固氮菌剂等措施则可以使作物的氮肥利用率提升 21%~34%, 并使氮素盈余降低 33%~42%。

常规施氮肥处理下曲靖红壤的氮肥利用率、N 盈余分别为 32.73% 和 269 kg/(hm²·a)。与常规施氮肥处理相比, 80%N 处理使曲靖红壤作物的氮肥利用率显著提升 29.4%, 氮盈余显著降低 31.1%。而在减氮基础上实施秸秆还田及施用生物炭、硝化抑制剂、固氮菌剂等调控措施下作物的氮肥利用率、氮素盈余等指标均与减氮处理没有显著差异。

2.4 氮肥管理措施对玉米螟虫和大斑病害的影响

图 4 显示, 不同氮肥管理措施下两地的年平均玉米螟虫和大斑病发病情况存在显著差异。总体来说, 许昌潮土中玉米螟蛀孔数显著大于曲靖红壤中玉米螟蛀孔数 ($P < 0.05$)。在许昌潮土中, 不同氮肥管理措施之间的玉米螟蛀孔数没有显著差异 ($P > 0.05$);

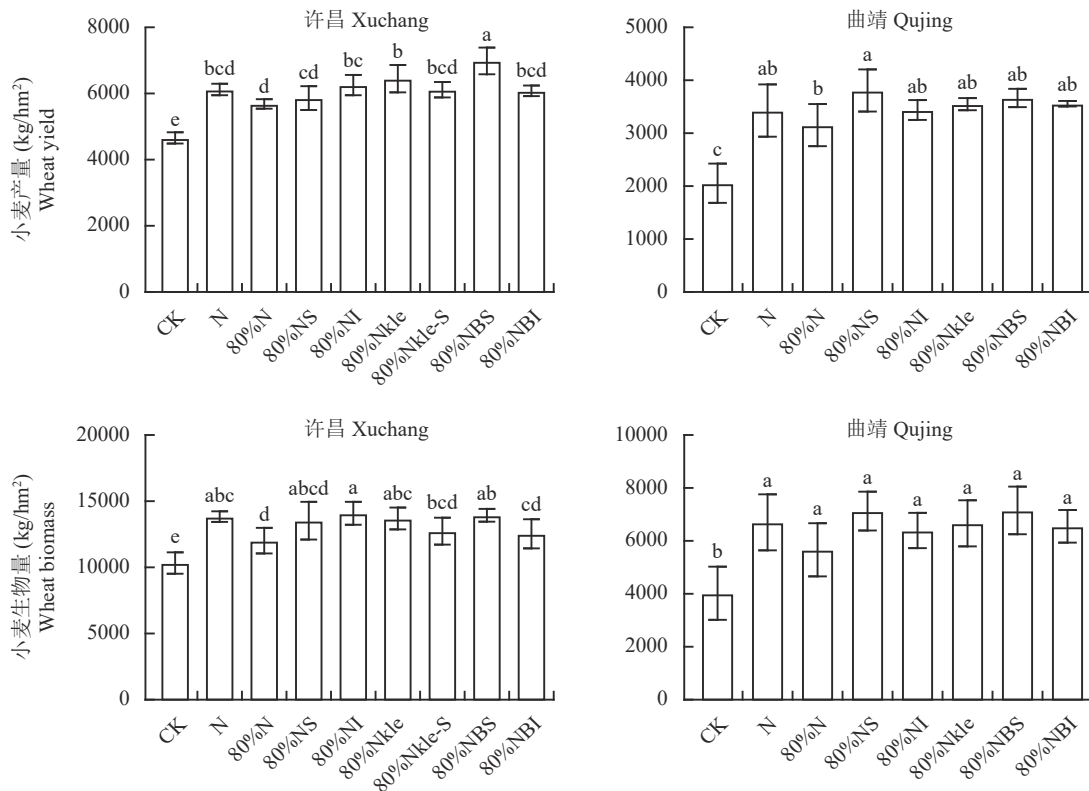


图 2 氮肥管理措施对许昌小麦和曲靖大麦年平均产量与生物量的影响

Fig. 2 Effects of N management on annual average yield and biomass in wheat of Xuchang and barley of Qujing

注: CK 为不施氮肥对照; N 代表常规施氮肥; 80%N 代表在常规施氮量的基础上减氮 20%; 80%NS、80%NI、80%Nkle、80%Nkle-S、80%NBS、80%NBI 分别代表减氮 20% 基础上配合秸秆还田、硝化抑制剂、固氮菌剂、无菌固氮菌培养基、生物炭+秸秆还田、生物炭+硝化抑制剂。数据为平均值±标准差, 柱上不同小写字母表示不同氮肥管理措施间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: In the treatment codes, CK represents no N control; N represents conventional N fertilizer rate; 80%N represents reducing 20% of conventional N input; 80%NS, 80%NI, 80%Nkle, 80%Nkle-S, 80%NBS, and 80%NBI represent the combination of 80%N with straw return, nitrification inhibitor, azotobacter strain, substrate for azotobacter without azotobacter, biochar + straw return, biochar + nitrification inhibitor. The data is expressed as average ± standard deviation, and different lowercase letters above the bars indicate significant difference among N fertilizer managements ($P < 0.05$).

而在曲靖红壤中, 80%NGM 处理的玉米螟蛀孔数小于其他处理。和玉米螟虫害相反, 许昌潮土的玉米大斑病发病指数显著小于曲靖红壤 ($P < 0.01$)。与常规施氮肥和减氮处理相比, 单独秸秆还田处理 (80%NS) 增加了许昌潮土中大斑病病情指数, 但在红壤上无显著影响。与常规施氮肥相比, 不施氮肥处理 (CK) 显著增加了红壤中大斑病的病情指数 ($P < 0.05$), 但在潮土中无显著影响。

Pearson 相关性分析显示, 许昌潮土的玉米螟蛀孔数和玉米产量、吸氮量有显著的正相关关系, 但和玉米生物量及土壤有机质、全碳、全氮、pH 之间的相关关系不显著 (表 4)。曲靖红壤的玉米产量、生物量及土壤有机质、全碳、全氮、pH 和玉米螟蛀孔数之间均没有显著的相关关系 (表 4)。许昌潮土大斑病的病情指数和玉米产量、生物量、吸氮量以及土壤有机质、全碳、全氮等指标没有显著的相关性, 与土壤 pH 呈极显著正相关; 而曲靖红壤的大斑病病

情指数则与当地玉米产量、生物量及玉米吸氮量、茎叶氮含量、土壤全氮含量呈显著的负相关关系 (表 4)。

3 讨论

3.1 氮肥管理措施对作物生产力及氮肥利用的影响

合理的氮肥施用量对保障较高作物产量、维持土壤肥力和降低氮肥施用所引起的环境污染有极重要意义^[29-30]。目前, 我国农田的氮肥施用量普遍高于发达国家, 而氮肥利用率却远远低于发达国家, 迫切需要减少氮肥施用量以降低过量施用化肥所造成的环境风险^[28, 31]。然而, 减少氮肥用量是否会对土壤肥力和作物产量产生不利影响, 一直是社会各界十分关心的问题^[29, 32]。本研究结果显示, 与常规施氮肥处理相比, 减施 20% 的氮肥并没有显著改变许昌潮土和曲靖红壤有机质、总碳、全氮含量和 pH 等性质, 说明连续 5 年减施 20% 氮肥对土壤肥力的影响

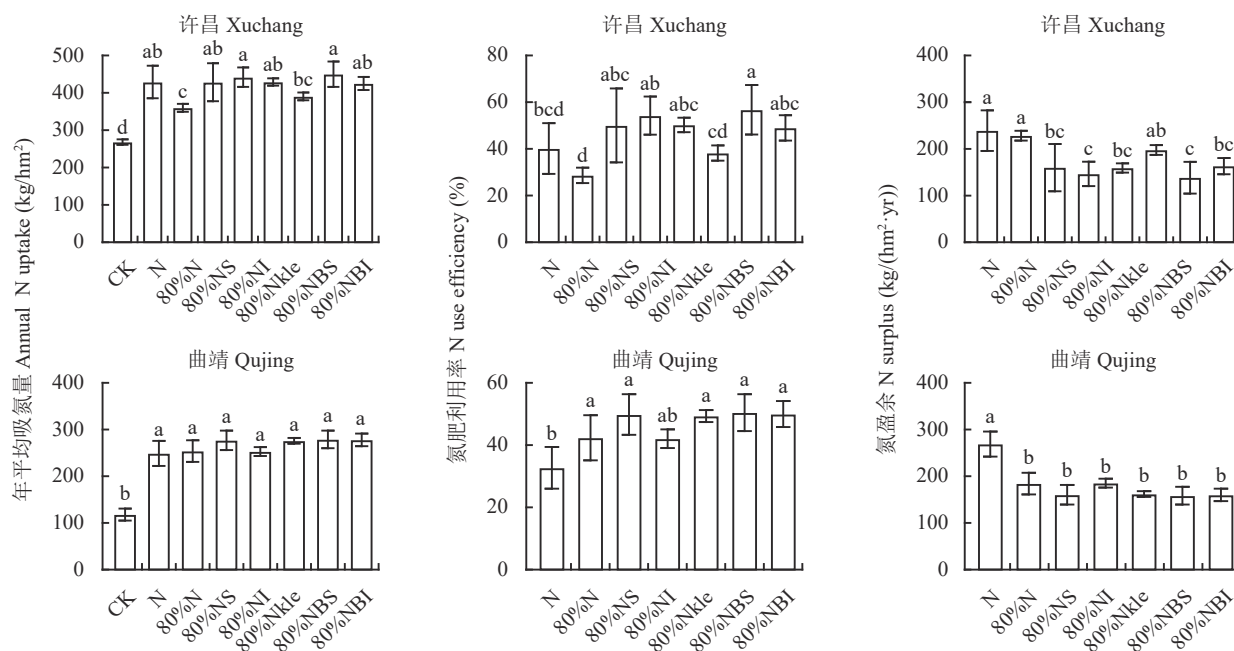


图3 氮肥管理措施对许昌和曲靖作物年平均吸氮量、氮肥利用率及氮盈余的影响

Fig. 3 Effects of N management on annual average N uptake, N use efficiency and N surplus in Xuchang and Qujing

注：CK 为不施氮肥对照；N 代表常规施氮肥；80%N 代表在常规施氮量的基础上减氮 20%；80%NS、80%NI、80%Nkle、80%Nkle-S、80%NBS、80%NBI 分别代表减氮 20% 基础上配合秸秆还田、硝化抑制剂、固氮菌剂、无菌固氮菌培养基、生物炭+秸秆还田、生物炭+硝化抑制剂。数据为平均值±标准差。柱上不同小写字母表示相同地点不同氮肥管理措施间有显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: In the treatment codes, CK represents no N control; N represents conventional N fertilizer rate; 80%N represents reducing 20% of conventional N input; 80%NS, 80%NI, 80%Nkle, 80%Nkle-S, 80%NBS, and 80%NBI represent the combination of 80%N with straw return, nitrification inhibitor, azotobacter strain, substrate for azotobacter without azotobacter, biochar + straw return, biochar + nitrification inhibitor. The data is expressed as average \pm standard deviation. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among N fertilizer managements in the same site ($P < 0.05$).

有限。然而，在许昌潮土减施 20% 的氮肥，却使玉米和小麦的产量和生物量降低了 7%~13%，说明单纯减施 20% 的氮肥会影响作物对速效氮的获取，从而一定程度上降低当地作物的生产力。曲靖样地为典型的山地红壤，由于春季积温低和春旱等导致冬麦产量较低等原因，当地习惯将肥料集中于夏粮生产。本研究参考当地习惯施肥，麦季和玉米季施 N 量分别为 100 和 300 kg/hm²，在此基础上减施 20% 的氮肥，没有对玉米和大麦的产量、生物量产生显著影响，表明当前的氮肥用量已超过当季作物的氮素需求，适当减少氮肥用量不会对作物的产量产生显著影响。这些结果表明农田的减氮措施需要在综合评估作物氮素需求和当地肥料用量的基础上实施。

已有的研究表明，施用生物质炭、添加硝化抑制剂、秸秆还田等措施有利于提升土壤肥力，实现作物的稳产增产，并提高氮肥的利用率^[7,30]，但其作用效果受不同地区、土壤类型、气候条件等的影响^[19]。因此，根据当地实际情况，针对性地推荐相应区域的作物氮肥管理措施，对于保障粮食生产、减

少氮肥损失及污染具有重要的现实意义。本研究结果表明，许昌潮土中减施 20% 氮的基础上配合施用硝化抑制剂、固氮菌剂、秸秆还田、秸秆还田+生物炭处理下玉米和小麦的产量、生物量均较减氮处理高；而在曲靖红壤中，硝化抑制剂和固氮菌剂处理没有表现出明显促进玉米增产的效果，仅秸秆还田处理对大麦有一定的增产作用。曲靖地区春旱较严重，秸秆还田有利于土壤水分的保持，一定程度上减缓了春旱对大麦生长的不利影响^[33]。绿肥轮作显著提高了曲靖样地的玉米产量和生物量，表现出了良好的稳产、增产效果，表明轮作绿肥改良土壤值得在当地进行推广应用。本研究使用的豆科绿肥品种在许昌种植生长较弱，难以越冬，是其未表现出明显增产效果的主要原因，绿肥在北方的种植和应用模式有待进一步探索。

氮肥利用率和氮盈余是评价田间氮肥管理是否合理、氮损失风险及其对环境影响的两个重要指标^[30]。常规施氮肥条件下许昌潮土和曲靖红壤全年作物的氮肥利用率最高仅为 40%，N 盈余均大于 200

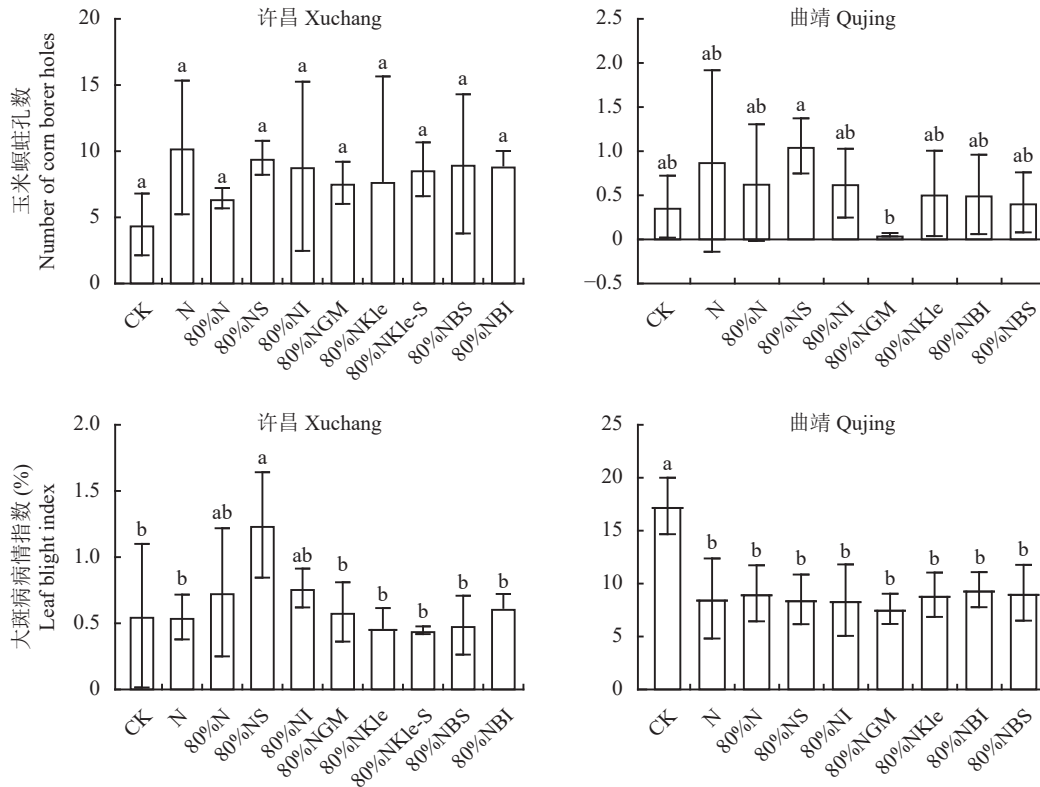


图 4 氮肥管理措施对许昌和曲靖年平均玉米螟蛀孔数与大斑病病情指数的影响

Fig. 4 Effects of N management on annual average holes of maize borer and leaf blight index in Xuchang and Qujing

注: CK 为不施氮肥对照; N 代表常规施氮肥; 80%N 代表在常规施氮量的基础上减氮 20%; 80%NS、80%NI、80%NGM、80%Nkle、80%Nkle-S、80%NBS、80%NBI 分别代表减氮 20% 基础上配合秸秆还田、硝化抑制剂、绿肥、固氮菌剂、无菌固氮菌培养基、生物炭+秸秆还田、生物炭+硝化抑制剂。数据为平均值±标准差, 柱上不同小写字母表示不同氮肥管理措施间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: In the treatment codes, CK represents no N control; N represents conventional N fertilizer rate; 80%N represents reducing 20% of conventional N input; 80%NS, 80%NI, 80%NGM, 80%Nkle, 80%Nkle-S, 80%NBS, and 80%NBI represent the combination of 80%N with straw return, nitrification inhibitor, green manure, azotobacter strain, substrate for azotobacter without azotobacter, biochar + straw return, biochar + nitrification inhibitor. The data is expressed as average ± standard deviation, and different lowercase letters above the bars indicate significant difference among N fertilizer managements ($P < 0.05$).

表 4 玉米螟蛀孔数、大斑病病情指数与玉米生产力、土壤理化性质之间的相关关系

Table 4 Relationships among maize borer holes, leaf blight index, productivity, and soil physicochemical properties

指标 Index	许昌 Xuchang		曲靖 Qujing	
	玉米螟蛀孔数 Holes of maize borer	大斑病病情指数 Leaf blight index	玉米螟蛀孔数 Holes of maize borer	大斑病病情指数 Leaf blight index
玉米产量 Maize yield	0.37*	0.09	0.01	-0.79**
玉米生物量 Maize biomass	0.34	0.01	0.07	-0.72**
玉米吸氮量 Maize N uptake	0.36*	0.04	0.24	-0.67**
玉米茎叶氮含量 Maize stem and leaf N content	0.20	0.12	0.31	-0.45*
土壤有机质 Soil organic matter	-0.19	-0.24	-0.02	-0.14
土壤全碳 Total C	-0.10	-0.09	-0.06	-0.03
土壤全氮 Total N	-0.09	-0.16	-0.05	-0.58**
pH	-0.07	0.51**	-0.13	0.16

Note: *— $P < 0.05$, **— $P < 0.01$.

kg/(hm²·a), 属于氮肥利用率偏低、氮素损失风险较高的地区^[28]。与作物生产力的研究结果类似, 在许昌潮土条件下, 仅减少 20% 的氮肥投入并不能显著提高作物的氮肥利用率, 降低氮盈余。但是在减氮 20% 的基础上实施秸秆还田 (配施生物炭)、硝化抑制剂、固氮菌剂等调控措施, 则可以显著提升作物的氮肥利用率、降低氮盈余。这进一步说明, 在许昌潮土中实施减氮必须配合硝化抑制剂、固氮菌、秸秆还田 (配施生物炭) 等调控措施, 才可以取得较好的减肥增效的作用。而在曲靖的红壤中, 只需减少 20% 的氮肥投入就可以显著提高作物的氮肥利用率、降低氮盈余, 但在此基础上实施硝化抑制剂、固氮菌剂、秸秆还田等调控措施对氮肥利用率、氮盈余等指标的影响却不显著, 说明适当降低化肥用量是曲靖红壤合理的氮肥管理措施。

硝化抑制剂对氮肥利用、损失以及作物产量的调控效果与土壤的硝化速率关系较大, 土壤的硝化能力越弱, 硝化抑制剂的调控效果越不明显^[11, 34]。以往研究发现, 许昌潮土的硝化能力很强, 而曲靖红壤的硝化能力较弱^[35]。本研究结果也显示许昌潮土的净硝化速率比曲靖红壤高 61.19%, 这可能是硝化抑制剂在碱性潮土上调控效果较好的主要原因。同样, 在福建和四川水稻田同时开展氮素调控试验也发现, 硝化抑制剂在四川碱性紫色土上的调控效果比在酸性红壤上更好^[11]。这意味着, 尽管可能会增加碱性土壤氨挥发损失的风险, 硝化抑制剂在碱性土壤上仍有很大的推广价值。在许昌, 减氮+施用无菌固氮菌培养基质处理的玉米生物量、产量等指标与减氮处理没有显著差异, 说明 80%Nkle 处理下显著较高的玉米生产力主要得益于固氮菌功能的发挥。而固氮菌剂在许昌和曲靖两地完全不同的调控效果, 可能是因为曲靖土壤偏酸性, 一定程度上影响了固氮菌的定植与功能发挥^[36]。由此可见, 根据当地的土壤、气候等环境条件和不同氮肥调控措施对作物产量、生物量的影响, 来优选相应的氮肥管理措施才是实现氮肥减施增效的必由之路。

此外, 由于本研究没有测定作物的百粒重、分蘖数、有效穗数等产量构成指标, 无法从产量构成的角度去分析相关氮肥管理措施提高产量的原因。因此, 未来需要进一步收集作物产量构成的数据, 并结合¹⁵N 同位素示踪技术、微生物组学、代谢组学等技术手段, 进一步揭示固氮菌剂、硝化抑制剂等不同氮肥调控措施在许昌潮土和曲靖红壤中调控效果差异较大的内在机理。

3.2 不同管理措施下病虫害和玉米生产力之间的关系

玉米螟虫和大斑病是农业生产中常见的两类病虫害, 对玉米的生长发育和产量、生物量有重要影响, 控制其爆发对维护玉米的生长和产量形成有重要意义^[37-40]。本研究结果显示, 许昌潮土的玉米螟虫害比曲靖红壤严重, 而大斑病病害则是曲靖红壤更为严重。虽然, 喷洒农药等田间管理方式的差异可能对两地玉米螟虫害和大斑病病害有重要影响, 但曲靖大斑病病害较许昌更为严重的原因很可能与玉米生长季气候条件有关。据气象资料, 曲靖夏季玉米温度适宜、降水集中、空气湿度大, 这为大斑病病原菌的孢子分生、传播创造了良好的环境条件; 而许昌夏季炎热、空气湿度相对较小, 不利于大斑病病原菌的繁殖, 在一定程度上限制了大斑病的发生^[41]。

不同的氮肥管理措施也对两个试验地的玉米螟虫害和大斑病病害有显著影响。秸秆还田处理下, 许昌玉米的大斑病病情指数高于其他处理, 这与董怀玉等^[42]的研究结果类似。李慧玲等^[43]研究发现秸秆粉碎还田和秸秆覆盖还田, 使玉米的大斑病病情指数显著增加了 16.84~39.54%。其可能原因是大斑病菌以休眠菌丝体或分生孢子形式在玉米秸秆中越冬, 成为翌年发病的侵染源^[42]。前人^[43-44]研究发现绿肥与作物轮作直接增加了农田作物多样性, 提供了更多的动物栖息环境, 并改变土壤动物和微生物群落结构, 由此增加食物链组成和天敌数量, 进而减少病虫害如根结线虫病的发生。本研究也发现, 80%NGM 处理下曲靖红壤中的玉米螟蛀孔数较其他处理低, 说明绿肥轮作处理可减缓玉米螟虫害的发生。这进一步证明了绿肥轮作对防治农作物病虫害的重要意义。曲靖不施氮肥处理的大斑病病情比其他处理严重的可能原因是, 不施氮肥影响了当地玉米的生长发育, 降低了其对玉米大斑病的抵抗力^[45]。

不同氮肥管理措施下玉米病害发生情况的差异, 也可能对玉米生产力的形成产生影响。一般情况下, 病虫害只有在严重爆发时才会影响到作物的生产力, 轻微病害或者虫害对作物生产力几乎没有影响。本研究也发现, 曲靖红壤的玉米螟虫害和许昌的大斑病病害相对较轻, 因而, 相应的玉米产量和生物量与玉米螟蛀孔数、大斑病病情指数没有显著的相关关系。进一步分析发现, 在病害或虫害比较严重的情况下, 不同氮肥管理措施下玉米螟虫害和大斑病病害与玉米生产力的形成有密切联系。

在曲靖红壤中, 玉米产量、生物量均与大斑病病情指数呈极显著的负相关关系。这意味着, 大斑病的发病情况可能是导致不同氮肥管理措施下玉米产量、生物量差异的重要原因。而在玉米螟虫害比较严重的许昌潮土中, 玉米螟蛀孔数则随着玉米产量和生物量的增加呈增加的趋势。这不能认为是玉米螟虫害的发生促进了玉米的生长和产量的形成, 而很可能是因为一些氮肥管理措施有利于玉米对氮素的吸收, 因而植株、叶片更为鲜嫩, 在一定程度上促进了玉米螟虫害的发生^[46-47]。鉴于玉米螟虫害对作物生长和产量的严重影响, 本研究推测玉米螟的发生可能在一定程度上削弱了氮肥调控措施在许昌的稳产、增产效果。因此, 未来需要加强对不同氮肥管理措施下作物病虫害的发生规律及其成灾机理的研究, 从而实现农田生态系统更大的减氮增效潜力。

4 结论

在许昌潮土和曲靖红壤上, 减少 20% 氮肥用量的基础上配合施用硝化抑制剂、生物炭、固氮菌剂等措施, 可以实现作物的稳产增产, 提升氮肥利用率, 降低氮盈余量。秸秆还田提高了许昌潮土玉米大斑病病情指数, 而绿肥轮作则使曲靖红壤的玉米螟蛀孔数降低, 并显著提高玉米生产力。因此, 养分循环利用方式与病虫害发生的关系还有待进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] Erisman J W, Galloway J N, Sutton M S *et al.* How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geosciences*, 2008, 1: 636–639.
- [2] Huang J K, Yang G L. Understanding recent challenges and new food policy in China[J]. *Global Food Security*, 2017, 12: 119–126.
- [3] Dordas C. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(1): 33–46.
- [4] Yu C Q, Huang X, Chen H, *et al.* Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567: 516–520.
- [5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.
- [6] 陈防, 张过师. 农业可持续发展中的“4R”养分管理研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 21(23): 245–250.
Chen F, Zhang G S. Research progress of “4R” nutrient stewardship in sustainable agricultural development[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 21(23): 245–250.
- [7] Xia L, Lam S K, Chen D, *et al.* Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917–1925.
- [8] Linquist B A, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C M, *et al.* Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 10–21.
- [9] Snyder C S. Enhanced nitrogen fertilizer technologies support the ‘4R’ concept to optimise crop production and minimise environmental losses[J]. *Soil Research*, 2017, 55(6): 463–472.
- [10] Li T, Zhang W, Yin J, *et al.* Enhanced-efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 511–521.
- [11] Liu S Y, Chi Q D, Shan J, *et al.* Evaluation of the effectiveness of N process inhibitors in paddy rice via ¹⁵N tracing approach[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 147(8): 107855.
- [12] Zhang L M, Silvano E, Rihtman B, *et al.* Biochemical mechanism of phosphorus limitation impairing nitrogen fixation in diazotrophic bacterium *Klebsiella variicola* W12[J]. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 2022, 1(2): 108–117.
- [13] Gao Y, Fang Z, Van Zwieten L, *et al.* A critical review of biochar-based nitrogen fertilizers and their effects on crop production and the environment[J]. *Biochar*, 2022, 4(1): 1–19.
- [14] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, *et al.* Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 189: 136–144.
- [15] Liu J, Jiang B, Shen J, *et al.* Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 311: 107286.
- [16] Qin X, Huang T, Lu C, *et al.* Benefits and limitations of straw mulching and incorporation on maize yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107128.
- [17] 何艳, 严田蓉, 唐源, 等. 栽插和秸秆还田方式对水稻氮素吸收利用和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(1): 90–99.
He Y, Yan T R, Tang Y, *et al.* Effects of transplanting and straw returning on nitrogen uptake, utilization and yield of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 90–99.
- [18] 张鑫, 隋世江, 刘慧颖, 等. 秸秆还田下氮肥用量对玉米产量及土壤无机氮的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(3): 279–284.
Zhang X, Sui S J, Liu H Y, *et al.* Effect of different application rate of nitrogen fertilizer under straw return on maize yield and inorganic nitrogen accumulation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3): 279–284.
- [19] Zhang J, Cai Z, Müller C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant-specific N preferences: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 488–501.
- [20] 郭明亮. 中国水稻氮过量对农药用量的影响[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2016.
Guo M L. The impact of excessive nitrogen fertilizer on pesticide usage on rice in China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2016.
- [21] 张舒, 罗汉钢, 张求东, 等. 氮钾肥用量对水稻主要病虫害发生及产量的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2008, 27(6): 732–735.
Zhang S, Luo H G, Zhang Q D, *et al.* Effects of nitrogen and potassium fertilizer application on yield and occurrence of major diseases

- and insect pests of rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 27(6): 732–735.
- [22] Brady N C, Weil R R, Weil R R. The nature and properties of soils [M]. London: Pearson, 2008.
- [23] Xiong C, Zhu Y G, Wang J T, *et al.* Host selection shapes crop microbiome assembly and network complexity[J]. *New Phytologist*, 2021, 229(2): 1091–1104.
- [24] Xiong C, Singh B K, He J Z, *et al.* Plant developmental stage drives the differentiation in ecological role of plant bacterial and fungal microbiomes[J]. *Microbiome*, 2021, 9(1): 1–15.
- [25] 李永国, 程高峰. 东北及华北春玉米骨干品种对玉米大斑病抗性评价[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(10): 2001–2003.
- Li Y G, Cheng G F. Resistance evaluation of spring corn varieties from Northeast and North China against *Exserohilum turcicum*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(10): 2001–2003.
- [26] 胡彩莉, 马玉贞, 郭超, 等. 烧失量法测定土壤有机质含量的实验条件探究[J]. *地球与环境*, 2016, 44(1): 110–118.
- Hu C L, Ma Y Z, Guo C, *et al.* Optimization of the experiment conditions for estimating organic matter content with loss-on-ignition method[J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(1): 110–118.
- [27] Dean W E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1974, 44(1): 242–248.
- [28] Zhang C, Ju X, Powlson D, *et al.* Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(12): 6678–6687.
- [29] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 1–6.
- Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(1): 1–6.
- [30] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 1–13.
- Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1–13.
- [31] Norton R, Davidson E, Roberts T. Nitrogen use efficiency and nutrient performance indicators. GPNM Task Team Report and Recommendations[C]//Position Paper from the GPNM's Task Team Workshop. 2014.
- [32] 颜晓元, 夏龙龙, 迺超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 177–183.
- Yan X Y, Xia L L, Di C P. Win-win nitrogen management practices for improving crop yield and environmental sustainability[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 177–183.
- [33] Akhtar K, Wang W, Khan A, *et al.* Wheat straw mulching offset soil moisture deficient for improving physiological and growth performance of summer sown soybean[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 16–25.
- [34] Zhang J, Tian P, Tang J, *et al.* The characteristics of soil N transformations regulate the composition of hydrologic N export from terrestrial ecosystem[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1409–1419.
- [35] 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.
- Wu C F, Xiong C, Han Y L, *et al.* Mechanism of combination of nitrogen fertilizer reduction and straw returning in regulating dryland nitrification intensity and keeping stable crop yield in long run[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1782–1793.
- [36] Jnawali A D, Ojha R B, Marahatta S. Role of azotobacter in soil fertility and sustainability: A review[J]. *Advance in Plants and Agriculture Research*, 2015, 2(6): 1–5.
- [37] Szöke C, Zsombori Z, Pók I, *et al.* Significance of the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hübn.) in maize production[J]. *Acta Agronomica Hungarica*, 2002, 50(4): 447–461.
- [38] Shiri M, Ebrahimi L, Badali A. Evaluation of yield and some resistance-related traits of three maize hybrids against European corn borer *Ostrinia nubilalis* (Hubner)[J]. *Cereal Research Communications*, 2021, 49(3): 433–440.
- [39] Sucher J, Boni R, Yang P, *et al.* The durable wheat disease resistance gene Lr34 confers common rust and northern corn leaf blight resistance in maize[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2017, 15(4): 489–496.
- [40] Mubeen S, Rafique M, Munis M F H, *et al.* Study of southern corn leaf blight (SCLB) on maize genotypes and its effect on yield[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017, 16(3): 210–217.
- [41] 赵海军, 张静峰, 张连奎, 等. 内蒙古突泉县玉米大斑病发生与温湿度灰色关联分析[J]. *现代农业研究*, 2021, (3): 50–53.
- Zhao H J, Zhang J F, Zhang L K, *et al.* Correlation analysis on the occurrence and temperature and humidity of maize spot disease in Tuquan County, Inner Mongolia[J]. *Modern Agriculture Research*, 2021, (3): 50–53.
- [42] 董怀玉, 董智, 刘可杰, 等. 不同秸秆还田模式对玉米主要病害发生为害的影响[J]. *作物杂志*, 2020, (6): 104–108.
- Dong H Y, Dong Z, Liu K J, *et al.* Effects of different maize straw returning modes on occurrence of main diseases of maize[J]. *Crops*, 2020, (6): 104–108.
- [43] 李慧玲, 郭剑雄, 张辉, 等. 茶园间作不同绿肥对节肢动物群落结构和多样性的影响[J]. *应用昆虫学报*, 2016, 53(3): 545–553.
- Li H L, Guo J X, Zhang H, *et al.* The effects of intercropping different green manure plants on the structure and diversity of arthropod communities in tea plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2016, 53(3): 545–553.
- [44] Wanic M, Zukolaszewska K, Orzech K, *et al.* Catch crops and the soil environment: A review of the literature[J]. *Journal of Elementology*, 2019, 24(1): 31–45.
- [45] Manching H C, Balint-Kurti P J, Stapleton A E. Southern leaf blight disease severity is correlated with decreased maize leaf epiphytic bacterial species richness and the phyllosphere bacterial diversity decline is enhanced by nitrogen fertilization[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 403.
- [46] Wilhelm W W, Schepers J S, Mielke L N, *et al.* Dryland maize development and yield resulting from tillage and nitrogen fertilization practices[J]. *Soil and Tillage Research*, 1987, 10(2): 167–179.
- [47] Masoero F, Gallo A, Zanfi C, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on chemical composition and rumen fermentation of different parts of plants of three corn hybrids[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 164(3/4): 207–216.