

轮作不同高粱品种阻控设施菜田氮素损失潜力研究

康凌云, 黄诗坤, 陈 硕, 陈 清*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:为缓解华北地区设施菜田夏季休闲期氮素淋洗损失严重等问题,提高氮素利用率及土壤生物多样性,结合高粱的生物学特征,选取晋杂 12 等 6 种北方常见高粱品种为供试品种,以常规填闲作物甜玉米为对照,筛选适宜作为北京设施菜田夏季填闲作物的高粱品种。结果表明,从生物量、根系及养分带走量等方面来看,晋杂 12 较其他品种均占优势,成熟期生物量为 $11.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 0~45 cm 总根长为 299 m,作物地上部氮素带走量为 $139 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,均显著高于常规填闲作物甜玉米,可以替代甜玉米推广使用。同时研究发现冀梁 2 号品种在尿素施用后土壤铵态氮含量明显高于其他品种,可能是作物根系分泌的生物硝化抑制剂减缓了硝化过程。与甜玉米相比,高粱可能通过释放生物硝化抑制剂和根系在土壤剖面生物提氮共同起到减少氮素损失的作用。

关键词:填闲作物;高粱;根系;氮素吸收;氮素转化

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)03-0215-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0336

The Potential to Reduce Nitrogen Loss Through Rotating Different Sorghum Varieties in Greenhouse Vegetable Field

KANG Ling-yun, HUANG Shi-kun, CHEN Shuo, CHEN Qing*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In North China plain, excessive fertilization in vegetable greenhouse always results in nitrate accumulation in soil and possible nitrogen leaching with potential environmental risk. It is necessary to rotate appropriate catch crop to absorb surplus nitrogen in fallow season and reduce rootzone nitrate level. An experiment was carried out to select suitable sorghum variety as catch crop to reduce nitrogen loss in Beijing suburb. Six common varieties were used in the experiment as conventional catch crop, sweet corn as the control. The results indicated that the biomass, root growth and nitrogen accumulation in shoots of sorghum Jinza 12 were highest in the catch crops. It demonstrated that the variety Jinza 12 was an appropriate catch crop for reducing nitrogen accumulation in surface soil layer compared with sweet corn. Meanwhile, variety Jiliang 2 maintained highest proportion of soil NH_4^+-N content after urea application, which might be related to the biological nitrification inhibitors (BNI) released by the root system of sorghum. It implied that sorghum could be used as catch crop to reduce nitrogen loss through plant extraction i.e. nitrogen uptake and stabilization i.e. BNI inhibition, in comparison with sweet corn.

Keywords: catch crop; sorghum; root; nitrogen uptake; nitrogen transformation

针对蔬菜种植的高收益和人多地少等矛盾,大多数菜田普遍存在养分过量投入和长期连作问题,不仅导致养分积累和土壤微生物区系失衡、根结线虫等土传病害问题,而且造成菜田生产更依赖于化肥、有机

肥以及化学药剂的供给,盲目高量施肥(氮肥和有机肥)成为农户传统蔬菜管理体系的典型特征^[1-2]。施入农田中的氮肥,当季被作物利用的仅有 30%~40%,其余的则通过氨挥发、硝化、反硝化、渗漏和径流等多种途径损失^[3]。在设施蔬菜生产中,氮肥的淋洗损失被认为是氮素损失的主要途径之一,也是造成地下水硝酸盐污染的重要原因^[3]。我国北方设施菜田夏季揭棚休闲期及秋冬季定植后正是土壤硝态氮淋洗的高峰期^[4]。夏季温度升高,微生物活动增强,有机肥氮素矿化量与速率均呈增大的趋势^[5],在北方设施菜田有机

收稿日期:2014-11-29

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD14B04-2);
现代农业产业技术体系北京市果类蔬菜创新团队项目

作者简介:康凌云(1987—),女,山西太原人,博士研究生,现从事蔬菜养分管理方面的研究工作。

E-mail: kanglingyun0429@163.com

* 通信作者:陈 清 E-mail: qchen@cau.edu.cn

肥氮素矿化的季节性差异明显,设施菜田中冬春茬和秋冬茬每周土壤有机氮素矿化平均速率分别为 $2.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [6],夏季休闲期的矿化速率可能还要更高,从而导致大量的无机氮累积,休闲期揭膜后雨水及下茬定植后大量灌水均会导致土壤表层累积的无机氮向深层淋洗[7]。研究表明夏季休闲期种植填闲作物甜玉米通过吸收(和)或固定作用可以在很大程度上进一步阻控硝酸盐淋洗,减少氮素损失[8-12],但是由于设施菜田表层土壤养分较高,甜玉米根系下扎能力不足,0~45 cm 土层的根长分别占 0~105 cm 土层总根长的 85% [8],对深层氮素的吸收作用较弱。而高粱在我国旱作农区,凡不适于玉米、小麦栽培的干旱或半干旱瘠薄耕地,种植高粱均能获得较高和较稳定的籽粒产量[13],其抗逆性较强的特点与发达的根系有关[14],因此本文选择北方常见的 6 个高粱品种作为填闲作物,以甜玉米作为对照,在北京郊区设施菜田研究不同品种高粱在生物量、养分带走量、根系发育及土壤氮素转化方面的差异,筛选适宜于北方夏季种植、生长迅速、根系下扎深且高效吸氮的填闲作物,为控制我国北方集约化蔬菜种植区硝态氮淋失、减轻地下水污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试日光温室及土壤

试验地点选于北京市房山区温室菜园,为 2010 年新建日光温室,采取半下沉式设计,低于地面约 30 cm,实际面积为 $5.2 \text{ m} \times 61 \text{ m}$ 。试验土壤为壤土,试验开始前 0~30 cm 土层的 pH 值为 6.87(水土比为 2.5:1),EC 值为 $0.84 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ (水土比为 5:1),无机氮(N_{min})含量为 $174.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有机质含量为 $18.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量、Olsen-P 以及 $\text{NH}_4\text{OAc-K}$ 含量分别为 $1.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $121 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $210 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试品种

选择适宜北方地区生长的高粱品种:晋杂 12 [15]、

晋杂 15 [16]、抗四 [17]、晋中 405 [18]、龙杂 9 号 [19]、冀梁 2 号 [20],根据品种特性、生育期、株高等设施菜田休闲期种植作物限制因素,重点关注晋杂 12、抗四和冀梁 2 号,玉米品种选择甜玉 4 号作为对照(表 1)。

1.3 试验设计

试验包括 7 个不同品种的高粱、甜玉米及空白休闲对照,共 8 个处理,3 次重复,常规方式种植,株行距 $35 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$,每个小区定植 3 行作物,于 2013 年 7 月 21 日播种,后因高温出苗率低,于 2013 年 8 月 1 日补种,8 月 6 日出苗,9 月 7 日在高粱拔节期沟施尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,12 月 3 日收获。

1.4 测定项目与方法

植株养分吸收量:在收获期,各小区分别取有代表性的植株 3 株,烘干后称重,测定生物量,粉碎过筛后测植株全氮、磷、钾。全氮: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮-半微量蒸馏法;全磷: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮-钼锑抗吸光光度法;全钾: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮-火焰光度法 [21]。

株高:在收获期,各小区分别取有代表性的植株 3 株,测定其株高。

根系生长:在收获期,选择冀梁 2 号、抗四、晋杂 15 测定根系生长情况,甜玉 4 号作为对照。用根钻法采集根系样品,以植株为中轴沿行间方向用高为 15 cm、直径为 10 cm 的根钻密集取样。采样深度为 0.45 m,水平方向取 3 钻。样品采集后装入封口袋,带入室内,用洗根法将根挑出、洗净后使用 EPSON-V750 扫描仪进行扫描,利用 WinRHIZO 软件进行分析,得出根长、根直径、表面积等数据。

土壤无机氮测定:在施肥后 1、3、5 d 及收获后分 0~30 cm 和 30~60 cm 2 个土层于植株行内两株植株之间用土钻取土,将同一土层的样品迅速装入一个封口袋内,带回室内,立即过 2 mm 筛并混匀。称取 20 g 左右鲜土于铝盒中,在 105°C 下烘干 12 h,测定土壤含水量;同时称取 12.00 g 鲜土样于塑料瓶中,加入 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液 100 mL 浸提,过滤后置 -18°C 冰柜

表 1 高粱品种生物学特性

Table 1 Biological characteristics of different sorghum varieties

品种	父本	母本	株高 /cm	生育期 /d
晋杂 12	1383-2(HM65 晋梁 5/恢 7)	具 A ₂ 细胞质的 V ₄ A	200	123
晋杂 15	自选恢复系七抗七	外引不育系黑龙 11A	170	127
抗四	Tx622A	晋梁 5 号	220	100
晋中 405	7501A	晋粮 5 号	200	135
龙杂 9 号	哈恢 118	黑龙不育 325A	196	114
冀梁 2 号	优抗 75-1	象牙白	170	105

内冷冻贮存,流动分析仪 San++system 测定铵态氮、硝态氮^[21]。

试验数据利用 SAS 8.0 统计软件和 Excel 2013 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 填闲作物株高及生物量

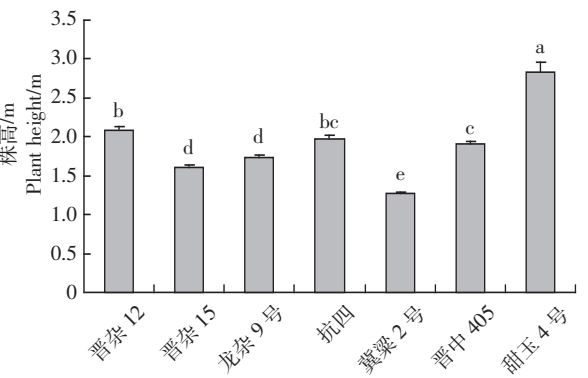
收获后各处理株高及生物量(干重)如图 1 所示,对比株高,甜玉 4 号株高达到 2.8 m,显著高于各品种高粱,高粱株高在 1.3~2.1 m 范围内,其中晋杂 12>抗四>晋中 405>龙杂 9 号>晋杂 15>冀梁 2 号,相比甜玉米,高粱品种对于不同拱高的设施大棚适用性更广。对比生物量,收获后晋杂 12 地上部分的生物量达到了 11.2 t·hm⁻²,显著高于晋杂 15、龙杂 9 号、冀梁 2 号、晋中 405、甜玉 4 号的地上部分生物量,其中冀梁 2 号地上部分生物量显著低于晋杂 12,为 6.0 t·hm⁻²,和甜玉 4 号无显著性差异。

2.2 填闲作物地上部养分带走量

收获后各处理作物地上部氮磷钾养分带走量如表 2 所示。晋杂 12 植株从土壤中带走的氮素养分量达到 138.8 kg·hm⁻²,与晋杂 15、龙杂 9 号、晋中 405、甜玉 4 号氮素养分带走量有显著性差异。晋杂 12 从土壤中带走的磷养分含量达到 28.2 kg·hm⁻²,与晋杂 15、甜玉 4 号有显著性差异。晋杂 12 从土壤中带走的钾养分含量达到 126.3 kg·hm⁻²,与晋杂 15、龙杂 9 号、抗四、冀梁 2 号、晋中 405、甜玉 4 号钾养分带走量有显著性差异。

2.3 填闲作物根系生长特点

收获后冀梁 2 号、抗四、晋杂 12、甜玉 4 号 0~45



不同字母表示各处理间差异达到 5%显著水平

The different letters mean significant difference for different treatments ($P<0.05$)

图 1 不同高粱品种筛选试验植株株高及生物量

表 2 不同高粱品种筛选试验作物地上部养分带走量(kg·hm⁻²)

Table 2 Nutrient uptake of sorghum selection experiment in greenhouse located at Fangshan, Beijing in 2013 (kg·hm⁻²)

作物	品种	N	P	K
高粱	晋杂 12	138.8a	28.2a	126.3a
	晋杂 15	42.3c	13.1b	39.9b
	龙杂 9 号	81.7bc	20.3ab	67.3b
	抗四	98.8ab	22.2ab	90.3b
	冀梁 2 号	97.1ab	14.2ab	66.8b
	晋中 405	82.2bc	20.2ab	78.6b
玉米	甜玉 4 号	72.9bc	11.7b	76.3b

注:每一列不同字母表示各处理间差异达到 5%显著水平。下同。

Note: The different letters in the same row mean significant difference for different treatments ($P<0.05$). The same below.

cm 土层总根长、根表面积、根系平均直径及根体积分布如图 2 所示。晋杂 12 的根长在 0~15 cm 的土层内达到 138 m,显著高于冀梁 2 号;15~30 cm 土层内各处理根长无显著性差异;30~45 cm 土层内晋杂 12 根长可达到 69 m,显著高于冀梁 2 号。晋杂 12 在 0~15 cm 土层内根表面积达到 2 961 cm²,显著高于冀梁 2 号、抗四、甜玉 4 号这 3 种作物;而在 15~30、30~45 cm 深度的土层内,4 种作物根表面积无显著性差异。各处理根系在不同土层直径无显著性差异,其中晋杂 12 在 0~15、15~30、30~45 cm 土层内平均根直径可达到 2.94、0.75、0.63 mm。晋杂 12 在 0~15 cm 土层内的根体积可达到 59.9 cm³,显著高于冀梁 2 号、甜玉 4 号,15~30、30~45 cm 土层内 4 种作物根体积无显著性差异。

2.4 填闲作物对施肥后土壤无机氮影响

施肥后 1、3、5 d 后土壤中 0~30、30~60 cm 土层

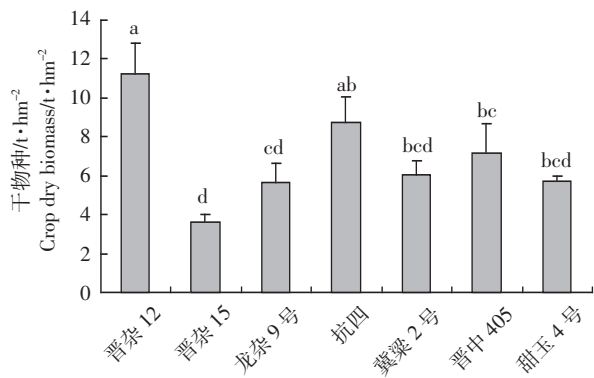
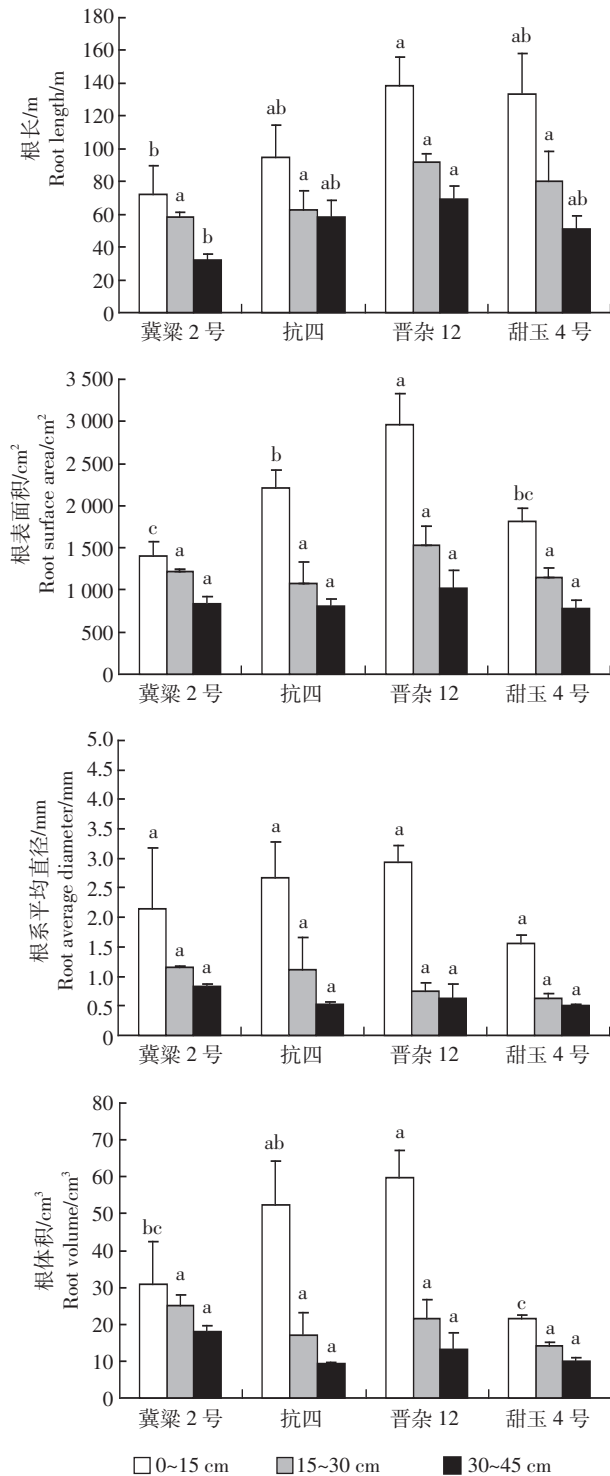


Figure 1 Plant height and above-ground dry biomass of sorghum selection experiment in greenhouse located at Fangshan, Beijing in 2013



不同字母表示相同土层不同处理间差异达到 5% 显著水平
The different letters in the same soil layer mean significant difference for different treatments ($P < 0.05$)

图 2 不同高粱品种筛选试验不同土层植株总根长、根表面积、根系平均直径及根体积分布

Figure 2 Root length, surface area, average diameter and volume at different soil layers of sorghum selection experiment in greenhouse located at Fangshan, Beijing in 2013

的无机氮含量如图 3 所示。从图 3 中可得知,在施肥后 1 d, 晋杂 12、甜玉 4 号和空白土壤中 0~30 cm 土层内的硝态氮迅速达到了峰值, 之后呈明显下降趋势。而冀梁 2 号在施肥 1 d 后, NO_3^- -N 显著低于其他品种, 施肥 3~5 d 后, NO_3^- -N 含量缓慢达到峰值; 30~60 cm 土壤 NO_3^- -N 呈现相同变化趋势。施肥后空白和甜玉 4 号处理 0~30 cm 土层铵态氮含量显著低于

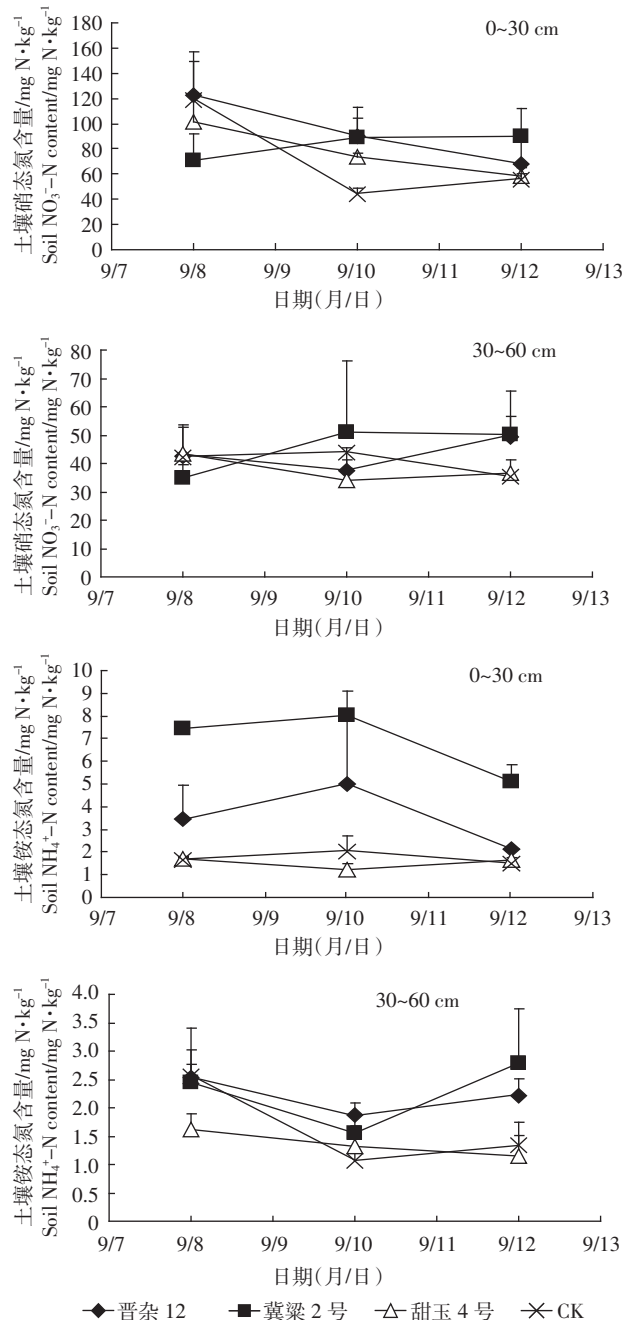


图 3 不同高粱品种筛选试验 0~60 cm 土壤无机氮含量

Figure 3 Soil mineral nitrogen content in different soil layers after urea application of catch crop selection experiment in greenhouse located at Fangshan, Beijing in 2013

晋杂 12 和冀梁 2 号。施肥 1 d 及 5 d 后,冀梁 2 号铵态氮含量显著高于晋杂 12; 在 30~60 cm 土层内,施肥 1~3 d 各处理土壤铵态氮呈下降趋势,5 d 后随表层养分淋洗,铵态氮含量呈增加趋势,其中晋杂 12 和冀梁 2 显著高于甜玉 4 号和空白。

2.5 填闲期间氮素表观平衡

根据休闲期前后 0~60 cm 土壤无机氮含量、肥料投入及植株养分带走量计算填闲期表观氮素平衡,从表 3 可见试验开始前各处理 0~60 cm 土层无机氮含量无显著性差异,休闲结束后,休闲处理 0~60 cm 土层中无机氮含量有明显的积累现象,而填闲作物的种植由于氮素吸收减少了无机氮在土体中的积累,各填闲处理无机氮含量显著低于休闲处理,但品种间差异不显著。

3 讨论

综合比较甜玉米和高粱在株高、生物量、氮磷钾养分带走量及根系生长特征等方面的差异,可见高粱植株为矮壮型,株高均低于甜玉 4 号;除晋杂 15 外,高粱生物量均高于甜玉 4 号;高粱氮磷钾养分带走量均显著高于或与甜玉 4 号养分带走量无显著性差异,根长、根表面积、根平均直径及根体积高粱均高于甜玉 4 号,特别是晋杂 12 的生物量最大、带走养分最多、根系最发达,同时具有生育周期短、耐高温、抗涝等特点,可以作为北方夏季填闲作物种植,特别是越冬长茬温室种植,在 7—10 月约有 4 个月的夏季休闲期,可以保证高粱 100~123 d 的生育期^[13]。

通过研究高粱拔节期尿素施用后土壤中硝态氮和铵态氮的动态变化,初步可以看出高粱冀梁 2 号处理土壤中的硝态氮出现高峰时间较其他作物根系环境土壤中硝酸盐高峰时间滞后,且铵态氮含量保持较高水平,下降速度缓慢,其他作物根际土壤中的硝酸盐通常在施肥后一两天就达到了峰值,铵态氮则迅速下降到最低,推测冀梁 2 号处理土壤中的硝化速率较为缓慢。甜玉米则未发生硝化速率降低的现象。Subbarao 等^[22-24]关于生物硝化抑制剂(BNI)的研究可

以解释这一现象,高粱根系可以分泌对羟基苯丙酸甲酯^[25],具备显著的硝化抑制物质分泌能力,但不同品种的高粱分泌生物硝化抑制剂能力也各不相同,要通过实验,综合各种因素评定最优选。另外的常见粮食作物如大麦、小麦、玉米均不具备充分的生物硝化抑制剂能力,部分品种水稻具备一定 BNI 能力,但是在田间试验中氮素形态变异较大,受多方面因素影响,除了自然条件的影响外,冀梁 2 号生物量较低,根系吸氮速率可能会低于其他品种作物,而且不同品种对氨氮及硝氮的偏好也是未知的,冀梁 2 号是否是由于释放生物硝化抑制剂导致的土壤硝化过程减缓仍需进一步证明,可以通过收集根系分泌物,使用重组亚硝化单胞细菌(*Nitrosomonas europaea*)的生物发光方法来检测根系分泌的硝化抑制剂活性^[19]。Subbarao 等^[22]通过收集臂形草根系分泌物,添加至土壤中进行培养试验,证明根系分泌生物硝化抑制剂培养 55 d 后仍对硝化过程有抑制作用。高粱分泌的硝化抑制剂是否能发挥 55 d 的作用,仍值得研究,但已进一步明确高粱填闲作物收获后对下茬作物生长期间土壤氮素硝化过程的抑制作用强度及作用时间。张莹等^[26]研究表明高粱分泌生物硝化抑制剂的能力主要受土壤中不同形态氮素的影响,相对于硝态氮,铵态氮明显地促进了硝化抑制剂的分泌,同时 pH 值也影响了生物硝化抑制剂的分泌,在 pH<6 时,硝化抑制剂的活性随着根系分泌氢离子的增加而增强。在北方设施菜田, pH 值普遍在 7~9 之间^[27],硝态氮含量一般高于铵态氮,是否会对高粱分泌生物硝化抑制剂能力有所限制,还需要进一步的试验证明。

填闲季结束后填闲处理及休闲处理氮素平衡均出现负值,说明在设施蔬菜种植体系,夏季高温环境下,土壤中有大量氮素被矿化,且大部分土壤氮素存留在土壤表层,造成土壤无机氮素在夏季填闲结束后都有所增加,填闲处理显著降低土壤表层无机氮的积累,减少了下一季由于定植大量灌水而造成的淋洗风险。

综上比较各处理作物生物学性状及对氮素转化

表 3 填闲期间氮素表观平衡分析(kg N·hm⁻²)
Table 3 Calculated N balance in summer fallow time (kg N·hm⁻²)

处理	输入	定植前 0~60 cm 土壤 N _{min}	收获后 0~60 cm 土壤 N _{min}	作物带走	表观氮平衡
晋杂 12	70	440a	602b	139a	-231b
冀梁 2 号	70	471a	701b	97b	-257b
甜玉 4 号	70	418a	640b	73b	-225b
休闲	70	463a	862a	0	-329a

的影响,可知晋杂12因其较大的生物量、发达的根系,从土壤中带走养分的能力是最强的,而冀梁2号虽然在生物量、根系、生物量等方面不如晋杂12,但是冀梁2号明显减缓了土壤中发生的硝化反应,使铵态氮保持较高水平,可以减少硝酸盐淋洗风险。但是填闲作物从土壤中提氮和抑制硝化的能力并不匹配,究竟较大的养分带走量减少硝酸盐淋洗的作用更强,还是通过分泌硝化抑制剂抑制硝化过程减少硝酸盐淋洗更重要,我们仍需要进一步的深入研究。

4 结论

(1)从养分带走量、生物量、根系等方面来看,晋杂12较其他品种均占优势,成熟期生物量为 $11.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,0~45 cm根长为299 m,氮素带走量为 $139\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,均显著高于常规填闲甜玉米,是北方设施菜田较好的填闲作物品种,可以替代甜玉米推广使用。

(2)冀梁2号处理在尿素施用后土壤铵态氮含量高于其他处理,可能是作物根系分泌的生物硝化抑制剂减缓了土壤硝化过程,但是该品种生物量、根长等指标低于甜玉米,仍需进一步试验研究比较释放生物硝化抑制剂和生物提氮作用在减少氮素损失方面的作用,以筛选出更高效减少氮素损失的高粱品种。

参考文献:

- [1] 何飞飞. 设施番茄生长体系的氮素优化管理及其环境效应研究[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 2006: 16-28.
HE Fei-fei. Studies on optimizing nitrogen management and environmental implications in greenhouse tomato cropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006: 16-28. (in Chinese)
- [2] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the north China plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 117-125.
- [3] Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies[J]. *Nutrient Cycling Groecosys-tems*, 2002, 46: 237-256.
- [4] 和亮, 刘宏斌, 文宏达, 等. 设施菜地夏季休闲期甜玉米经济产量及环境效益分析[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 105-109.
HE Liang, LIU Hong-bin, WEN Hong-da, et al. Economic yield and environmental benefits of sweet corn in facility vegetable field in summer[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(5): 105-109. (in Chinese)
- [5] Deneve S, Hartmann R, Hofman G. Temperature effects on N mineralization: changes in soil solution composition and determination of temperature coefficients by TDR[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 49-61.
- [6] 贾伟, 王丽英, 陈清. 华北平原菜田有机氮素净矿化速率的季节性差异[J]. 华北农学报, 2013, 28(5): 198-205.
- [7] Spalding R F, Exner M E. Occurrence of nitrate in groundwater: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22: 392-402.
- [8] 郭瑞英. 设施黄瓜根层氮素调控及夏季种植填闲作物阻控氮素损失研究[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 2007: 43-44.
GUO Rui-ying. Studies on nitrogen control in rootzone and summer catch crop planting for reducing N loss in greenhouse cucumber cropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007: 43-44. (in Chinese)
- [9] 任智慧, 李花粉, 陈清, 等. 甜玉米填闲减缓菜田土壤硝酸盐淋溶的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 245-249.
REN Zhi-hui, LI Hua-fen, CHEN Qing, et al. Soil nitrogen uptake by sweet corn to reduce nitrogen leaching in the vegetable field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(9): 245-249. (in Chinese)
- [10] 赵小翠, 姜春光, 袁会敏, 等. 夏季种植甜玉米减少果菜类菜田土壤氮素损失的效果[J]. 北方园艺, 2010(15): 194-196.
ZHAO Xiao-cui, JIANG Chun-guang, YUAN Hui-min, et al. Effect of summer sweet corn planting on the reduction of soil N loss in greenhouse vegetable field[J]. *Northern Horticulture*, 2010(15): 194-196. (in Chinese)
- [11] 张继宗, 刘培财, 左强, 等. 北方设施菜地夏季不同填闲作物的吸氮效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2663-2667.
ZHANG Ji-zong, LIU Pei-cai, ZUO Qiang, et al. Nitrogen uptake by different catch crops in facility vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2663-2667. (in Chinese)
- [12] 赵秀芬, 赵扩元, 李俊良. 填闲作物在日光温室黄瓜生产中的应用效果[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(12): 5446-5447, 5478.
ZHAO Xiu-fen, ZHAO Kuo-yuan, LI Jun-liang. Effects of catch crop on cucumber production in solar greenhouse[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2009, 37(12): 5446-5447, 5478. (in Chinese)
- [13] 辽宁农业科学院. 中国高粱栽培学[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 22-23.
Liaoning Academy of Agricultural Sciences. China sorghum cultivation [M]. Beijing: Agriculture Press, 1988: 22-23. (in Chinese)
- [14] 张喜英. 高粱根系生长发育规律及动态模拟[J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 65-67.
ZHANG Xi-ying. Characters and dynamic model of sorghum root growth and development[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(5): 65-67. (in Chinese)
- [15] 韦耀明, 李团银, 李三棉, 等. 高粱杂交种晋杂12号选育报告[J]. 山西农业科学, 1992(9): 8-9.
WEI Yao-ming, LI Tuan-yin, LI San-mian, et al. Breeding of Jinza 12 sorghum hybrid[J]. *Journal of Shanxi Agriculture Science*, 1992(9): 8-9. (in Chinese)
- [16] 平俊爱, 程庆军, 杜志宏, 等. 早熟高粱晋杂15特性及高产栽培技术[J]. 作物杂志, 2002(2): 31.
PING Jun-ai, CHENG Qing-jun, DU Zhi-hong, et al. Characteristics and high-yield cultivation technique of Jinza 15 sorghum hybrid[J]. *Journal of Crop*, 2002(2): 31. (in Chinese)

- [17] 徐瑞洋, 赵随堂, 冯未娥, 等. 抗 4、抗 7 高粱品种选育及对丝黑穗病抗性的遗传[J]. 华北农学报, 1997, 12(4): 33–37.
XU Rui-yang, ZHAO Sui-tang, FENG Wei-e, et al. Breeding of Kang 4 and Kang 7 sorghum hybrids and inheritance of the resistance to head smut in sorghum[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1997, 12(4): 33–37. (in Chinese)
- [18] 董水仙. 杂交高粱—晋中 405[J]. 作物杂志, 1990(4): 37–38.
DONG Shui-xian. Breeding of Jinzhong 405 sorghum hybrid[J]. *Journal of Crop*, 1990(4): 37–38. (in Chinese)
- [19] 黑龙江省农业科学院作物育种研究所. 龙杂 9 号[EB//OL]. <http://www.theworldseeds.com/dbindex.php?vid=1883>, 2014, 4.
Institute of Crop Breeding, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences. Longza 9 sorghum hybrid[EB//OL]. <http://www.theworldseeds.com/dbindex.php?vid=1883>, 2014, 4. (in Chinese)
- [20] 张继益. 高粱新品种冀梁 2 号[J]. 作物品种资源, 1996(2): 50–51.
ZHANG Ji-yi. Breeding of Jiliang 2 sorghum hybrid[J]. *Journal of Crop Variety Resources*, 1996(2): 50–51. (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis (third edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [22] Subbarao G V, Ishikawa T, Ito O, et al. A bioluminescence assay to detect nitrification inhibitors released from plant roots: a case study with *Brachiaria humidicola*[J]. *Plant and Soil*, 2006, 288(1–2): 101–112.
- [23] Subbarao G V, Rondon M, Ito O, et al. Biological nitrification inhibition (BNI): is it a widespread phenomenon?[J]. *Plant and Soil*, 2007, 294(1–2): 5–18.
- [24] Subbarao G V, Nakahara K, Ishikawa T, et al. Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1–2): 243–259.
- [25] Zakir H A K M, Subbarao G V, Pearse S J, et al. Detection, isolation and characterization of a root exuded compound, methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate, responsible for biological nitrification inhibition by sorghum (*Sorghum bicolor*)[J]. *New Phytologist*, 2008, 180(2): 442–451.
- [26] 张莹, 张明超, 朱毅勇, 等. 高粱在不同氮源处理下分泌生物硝化抑制剂的差异[J]. 土壤, 2012, 44(6): 982–986.
ZHANG Ying, ZHANG Ming-chao, ZHU Yi-yong, et al. The mechanism of biological nitrification inhibitor released by sorghum under different nitrogen sources[J]. *Soils*, 2012, 44(6): 982–986. (in Chinese)
- [27] 曹文超, 张运龙, 严正娟, 等. 种植年限对设施菜田土壤 pH 及养分积累的影响[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 134–141.
CAO Wen-chao, ZHANG Yun-long, YAN Zheng-juan, et al. Effect of planting years on soil pH and nutrient accumulation in greenhouse vegetable fields[J]. *China Vegetables*, 2012(18): 134–141. (in Chinese)