

DOI: 10.11766/trxb202112010590

巨昇容, 闵炬, 董刚强, 李建斌, 施卫明. 不同种类填闲作物阻控设施菜地氮磷淋溶效果及机制研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1650–1661.

JU Shengrong, MIN Ju, DONG Gangqiang, LI Jianbin, SHI Weiming. Effects and Mechanisms of Different Kinds of Catch Crops on Reducing Nitrogen and Phosphorus Leaching Loss in Protected Vegetable Field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(6): 1650–1661.

# 不同种类填闲作物阻控设施菜地氮磷淋溶效果及机制研究\*

巨昇容<sup>1, 2</sup>, 闵炬<sup>1†</sup>, 董刚强<sup>3</sup>, 李建斌<sup>4</sup>, 施卫明<sup>1</sup>

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 安利(中国)植物研发中心, 江苏无锡 214115; 4. 江苏省农科院蔬菜研究所, 南京 210014)

**摘要:** 设施菜地揭棚休闲期种植填闲作物是阻控淋溶发生的重要措施, 在降雨频繁地区氮磷阻控效率高的填闲作物尚不明确。以休闲为对照, 种植 5 种填闲作物: 高粱 (*Sorghum bicolor* L.)、玉米 (*Zea mays* L.)、黑麦草 (*Lolium perenne* L.)、马齿苋 (*Portulaca oleracea* L.) 和羽衣甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *acephala* DC.), 研究了不同种类填闲作物对设施菜地氮磷淋溶、土壤速效氮、土壤微生物的影响。结果表明: 与休闲处理相比, 种植填闲作物高粱、玉米、黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝分别显著减少了 12.6、16.6、27.4、28.9 和 26.8 kg·hm<sup>-2</sup> 的氮淋溶, 显著减少了 0.10、0.05、0.04、0.04 和 0.13 kg·hm<sup>-2</sup> 的磷淋溶。氮淋溶阻控率由高到低依次为马齿苋、黑麦草、羽衣甘蓝、玉米、高粱, 磷淋溶阻控率由高到低则依次为羽衣甘蓝、高粱、玉米、马齿苋、黑麦草。5 种填闲作物中黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝的氮阻控率分别达到 52.3%、55.1% 和 51.2%, 较高粱和玉米氮阻控率平均提高了近一倍。这是因为黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝在休闲前期 (21 d) 就有一定的覆盖度, 与休闲相比分别减少了 23.5%、17.1% 和 26.7% 的淋溶水量, 而高粱和玉米前期覆盖度差, 在前期降水多后期降水少的情况下其淋溶水量与休闲无显著差异; 种植黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝耕层土壤 (0~20 cm) 中硝态氮的含量为 40.1~52.8 mg·kg<sup>-1</sup>, 而种植高粱和玉米土壤硝态氮的含量为 67.8~72.7 mg·kg<sup>-1</sup>; 此外, 与高粱和玉米相比, 马齿苋和羽衣甘蓝还显著提高了耕层土壤 *nirS* 型反硝化细菌和根际土壤中 *nosZ* 型反硝化细菌的丰度, 可能增强了土壤的反硝化过程。综上, 黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝作为降雨频繁地区的夏季填闲作物可显著减少氮磷淋溶, 其中羽衣甘蓝对氮磷综合阻控的效果最佳。

**关键词:** 设施菜地; 面源污染; 马齿苋; 羽衣甘蓝; 反硝化细菌

中图分类号: S626 文献标志码: A

## Effects and Mechanisms of Different Kinds of Catch Crops on Reducing Nitrogen and Phosphorus Leaching Loss in Protected Vegetable Field

JU Shengrong<sup>1, 2</sup>, MIN Ju<sup>1†</sup>, DONG Gangqiang<sup>3</sup>, LI Jianbin<sup>4</sup>, SHI Weiming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

\* 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(18)1005) 和企业合作项目 (Am20210407RD) 资助 Supported by the Agricultural Science and Technology Innovation Fund of Jiangsu Province, China (No. CX(18)1005) and the Enterprise Cooperation Projects (No. Am20210407RD)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jmin@issas.ac.cn

作者简介: 巨昇容 (1993—), 男, 山西临汾人, 博士研究生, 主要从事土壤肥料与植物营养研究。E-mail: jushengrong@issas.ac.cn

收稿日期: 2021-12-01; 收到修改稿日期: 2022-03-29; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-06-11

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Amway(China)Botanical R&D Centre, Wuxi, Jiangsu 214115, China; 4. Institute of Vegetable Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** 【Objective】 Planting catch crops in a protected vegetable field during the fallow season is an important practice to reduce the leaching loss of important nutrients. However, few studies have been done on catch crops with high nitrogen and phosphorus leaching control efficiency in frequent rainfall areas. 【Method】 This research set up five planting catch crop treatments (sorghum treatment, maize treatment, ryegrass treatment, purslane treatment and collard treatment) and a fallow treatment to study the effect of different kinds of catch crops on nitrogen and phosphorus leaching,  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N content and soil microorganism. 【Result】 The results showed that compared with fallow treatment, sorghum, maize, ryegrass, purslane and collard treatments significantly reduced nitrogen leaching by 12.6, 26.6, 27.4, 28.9 and 26.8  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  and phosphorus by 0.10, 0.05, 0.04, 0.04 and 0.13  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. The nitrogen and phosphorus control efficiency was as follows; purslane > ryegrass > collard > maize > sorghum, and collard > sorghum > maize > purslane > ryegrass, respectively. The nitrogen control rates of ryegrass, purslane and collard reached 52.3%, 55.1% and 51.2%, respectively, which were nearly twice higher than the nitrogen control rates of sorghum and maize. This may be because the ryegrass, purslane and collard treatments had a certain coverage in the early fallow period (21 days), which reduced the leaching volume by 23.5%, 17.1% and 26.7% compared with fallow treatment. In contrast, sorghum and maize treatments had poor coverage in the early fallow period, hence there was no significant difference in leaching volume between sorghum and maize treatments and fallow treatment. In addition, the  $\text{NO}_3^-$ -N content in the surface soil (0–20 cm) of ryegrass, purslane and collard treatments was 40.1–52.8  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , while in the surface soil of sorghum and maize treatments it was 67.8–72.7  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Besides, compared with sorghum and maize treatments, ryegrass, purslane and collard treatments also significantly increased the abundance of *nirS* type denitrifying bacteria in surface soil and *nosZ* type denitrifying bacteria in rhizosphere soil, which may enhance the denitrification process in soil. This may be one of the mechanisms for high nitrogen leaching control efficiency. 【Conclusion】 In general, ryegrass, purslane and collard as the catch crops of protected vegetable field in areas with frequent rainfall can significantly reduce nitrogen and phosphorus leaching, and collard has the best effect on nitrogen and phosphorus comprehensive control.

**Key words:** Protected vegetable field; Non-point source pollution; Purslane; Collard; Denitrifying bacteria

我国是设施蔬菜种植面积最大的国家,为追求高产,农民过量投入氮磷的现象十分普遍。太湖地区设施菜地周年蔬菜作物氮磷肥使用量分别达到 1 104~1 310  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (以 N 计) 和 360~464.5  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计) [1-2], 氮磷肥的大量施用,造成了土壤剖面氮磷的过量积累。刘宏斌等[3]对 115 个设施温室的研究表明,蔬菜收获后 0~90 cm 土壤剖面硝态氮平均残留量高达 480  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 王朝辉等[4]研究发现大棚和露天菜地 0~200 cm 土层有效磷累积量分别较农田高 6.2 倍和 2.7 倍。设施菜地流失到水体和大气的氮给环境带来污染的风险极大,特别是南方水网地区[5]。闵炬等[6]研究表明,太湖地区部分设施菜地周边浅层地下水硝态氮超标率达 35%, 铵态氮超标率达 8%, 严重威胁居民的健康。

在我国蔬菜种植中,一般有 2~3 个月的夏季休闲期(6—9 月), 保护地蔬菜一般在该时期揭棚,

恰逢高温多雨, 菜地土壤残留的大量硝态氮容易发生淋洗损失。Min 等[7]研究表明, 休闲期硝酸盐淋洗占整个生育期淋洗的 41%~59%, 因此, 夏季休闲期是进行氮素流失阻控的关键时期。利用休闲期种植填闲作物来减少氮淋洗所带来的环境问题已经得到了普遍认可[8-9], 生育期短、吸收能力强、阻控氮流失效果好的作物可被用于夏季休闲期填闲。一般认为, 填闲作物的选择应具备生物量大, 根系伸展发达与吸氮量高等特点[10], 如甜/糯玉米、高粱, 还有多种禾本科牧草, 如黑麦草、紫云英和高丹草等; 也有考虑到经济效益和应用推广难度, 选择苋菜、油菜和其他速生叶菜[11-12]。有研究表明, 甜玉米填闲种植可减少 11%~30%的氮素淋溶损失[13-14], Tonitto 等[15]对填闲作物减少氮淋溶效果的分析中表明, 与休闲免耕相比, 填闲覆盖管理下的氮淋溶减排可达 70%左右。相比之下已开展应用的填闲作物

种类较少,不同填闲作物阻控氮磷淋溶的机制不同,其对氮磷淋溶的阻控率仍处在较低水平,更高效的填闲作物有待筛选发掘。因此,本试验选择已报道填闲作物高粱、玉米和黑麦草,以及植被覆盖度高的马齿苋和羽衣甘蓝蔬菜作为填闲作物,以休闲为对照,采用淋溶盘法收集淋溶液,对不同填闲处理下的氮磷淋溶量、淋溶液体积、填闲作物的生物量、吸氮量以及土壤速效氮进行观测和分析,从而筛选出阻控氮磷效率高的填闲作物,为进一步阻控降雨频繁地区休闲期氮磷淋溶损失、减轻地下水污染提出科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点概况

本试验于2020年在江苏省南京市六合龙袍现代农业园区(32.35°N, 118.83°E)设施蔬菜种植基地进行。该试验地属亚热带季风气候,年均气温17.0℃,年均降水量1294 mm,本试验所处的7—9月气温和降雨均为全年最高值,分别为27.1℃和744 mm。土壤基础理化性质为:pH为5.6(水土比

2.5:1),有机质22.2 g·kg<sup>-1</sup>,全氮2.7 g·kg<sup>-1</sup>,硝态氮120.6 mg·kg<sup>-1</sup>,铵态氮26.3 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷194.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾104.3 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验处理与田间管理

设施菜地采用常规轮作模式,其中每年7—9月为休闲期。本试验选择5种填闲作物,设6个处理,分别是高粱(*Sorghum bicolor* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)、马齿苋(*Portulaca oleracea* L.)、羽衣甘蓝(*Brassica oleracea* var. *acephala* DC.)和休闲处理,每个处理重复3次,随机区组排列。小区面积约为37.4 m<sup>2</sup>(11 m×3.4 m)。前茬作物为番茄,后茬作物为芹菜。于2020年7月23日开始揭棚休闲,至9月17日,共计56 d。期间降雨量见图1。供试玉米品种为中农甜488玉米,羽衣甘蓝为江苏省农科院选育的贝塔品种,高粱、黑麦草和马齿苋均为常规品种。所有填闲作物于7月29日播种,其中玉米和高粱穴播,株行距为40 cm,种植密度每公顷278株,黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝按推荐用量撒播,分别为0.4 kg·hm<sup>-2</sup>、0.07 kg·hm<sup>-2</sup>和0.03 kg·hm<sup>-2</sup>,9月10日收获,基本覆盖休闲期。所有处理生长期均不施肥。

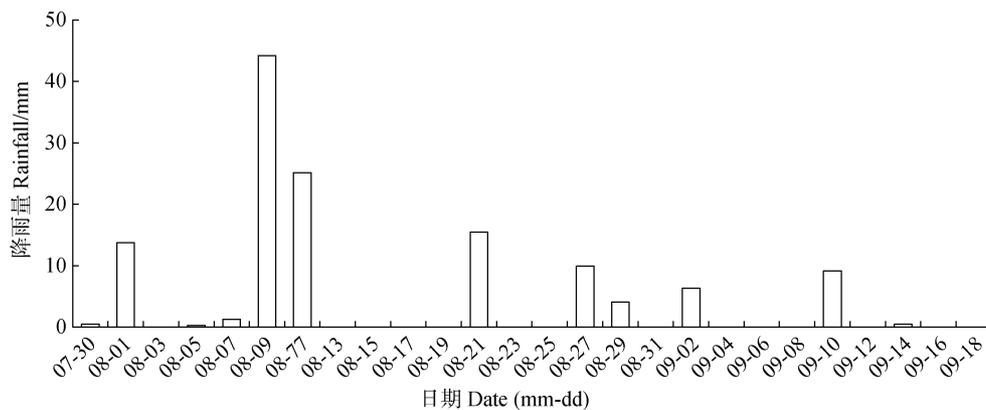


图1 设施菜地休闲期降雨量

Fig. 1 The rainfall of the protected vegetable field during the catching time

### 1.3 样品采集与测定

淋溶液:每个小区50 cm土壤深处提前1年埋设渗漏淋溶盘(50 cm×50 cm×10 cm,盘的一端开一圆孔,用联塑管密封连接收集管收集淋溶液)<sup>[2]</sup>,定植前抽干淋溶盘内水分,开始揭棚休闲后每周抽取一次淋溶液测定体积,并取100 mL样品过滤,测定淋溶液中的全氮(过硫酸钾氧化法)、硝态氮(比色法)、铵态氮(靛酚蓝分光光度法)和全磷(钼酸

铵分光光度法)含量,方法参考《土壤农业化学分析方法》<sup>[16]</sup>。

植物样品:植物样品采集时间设置在填闲21 d(填闲中期)和填闲49 d(各填闲收获时),第1次采样时,每个小区选择长势均匀的1.2 m×1.2 m样方采样,测定生物量,第2次对整个小区植物的生物量进行测定,植株样于105℃杀青,70℃烘干至恒重,粉碎过筛后用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>联合消煮法消解,采

用凯氏定氮法测定植株全氮含量。

土壤样品：填闲作物收获时，取行间 0~20 cm 土壤作为非根际土；用抖土法采集根际土。采集到的新鲜土样一部分通过紫外分光光度法测定土壤硝态氮和铵态氮含量，另一部分进行微生物检测。土壤微生物分析严格按照试剂盒说明书（Omega, cat: M5635-02, USA）提取土壤样品中的微生物 DNA，然后制备标准品并且构建标准曲线。之后采用实时荧光定量 PCR（MA-6000 实时荧光定量 PCR 仪，苏州雅睿生物技术有限公司）方法测定土壤中五种基因的丰度，扩增体系为 25  $\mu$ L，包括 5 $\times$ 反应缓冲液 5  $\mu$ L，5 $\times$ GC 缓冲液 5  $\mu$ L，dNTP (2.5 mmol·L<sup>-1</sup>) 2  $\mu$ L，前引物(10  $\mu$ mol·L<sup>-1</sup>)1  $\mu$ L，后引物(10  $\mu$ mol·L<sup>-1</sup>) 1  $\mu$ L，DNA 模板 2  $\mu$ L，灭菌水 8.75  $\mu$ L 以及 Q5 DNA 聚合酶 0.25  $\mu$ L。扩增参数为：预变性 98 $^{\circ}$ C 2 min，变性 98 $^{\circ}$ C 15 s，退火 55 $^{\circ}$ C 30 s，延伸 72 $^{\circ}$ C 30 s，终延伸 72 $^{\circ}$ C 5 min，最终保持在 10 $^{\circ}$ C 共 30 个循环，荧光定量 PCR 所用引物序列和扩增条件如表 1 所示。

## 2 结果

### 2.1 不同填闲处理对氮磷淋溶损失的影响

各处理氮磷淋溶量如表 2 所示。休闲处理的全氮淋溶量最高，达到了 52.4 kg·hm<sup>-2</sup>，与之相比，各种填闲作物均有显著的拦截作用，拦截率 24%~55%，其中黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝对氮的拦截效果更好，全氮淋溶量显著低于高粱和玉米处理，

可使全氮淋溶量分别降低至 25.0、23.5 和 25.6 kg·hm<sup>-2</sup>，拦截率达到 50%以上；与休闲处理相比，各填闲处理均降低了硝态氮和铵态氮的淋溶量，其中黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝的拦截效果达到显著水平。休闲处理的全磷淋溶损失最高，与之相比，高粱和羽衣甘蓝显著降低了全磷的淋溶损失，拦截率分别为 30.2%和 39.2%。

填闲作物可以通过吸收作用降低土壤溶液中的氮磷浓度，从而阻控氮磷的淋溶。从图 2 可以看出，整个休闲期休闲处理的全氮和硝态氮浓度始终保持在 20 mg·L<sup>-1</sup> 以上，而其他填闲处理的全氮和硝态氮浓度基本低于休闲处理，并呈现先升高后降低的趋势，特别是在第四次采样期 9 月 3 日时，各填闲处理全氮和硝态氮浓度均降至 10 mg·L<sup>-1</sup> 左右，仅为休闲处理的 13%~32%。但是各填闲处理之间的全氮

表 1 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因引物

Table 1 Primers of *nirK*, *nirS* and *nosZ*

基因名称	引物名称	序列 (5'-3')
Gene	Primer	Sequences
<i>nirK</i>	<i>nir</i> -F	TCATGGTGCTGCCGCGYGANGG
	<i>nir</i> -R	GAACTTGCCGGTKGCCAGAC
<i>nirS</i>	Cd3aF	G TSAACG TSAAGGARACSGG
	R3cd	GASTTCGGRTGSGTCTTGA
<i>nosZ</i>	<i>nos</i> ZF	GGGCTBGGGCCRTTGCA
	<i>nos</i> ZR	GAAGCGRTCCTTSGARAACCTG

表 2 不同填闲处理下氮磷淋溶量及拦截率

Table 2 Leaching losses of N and P and the mitigation efficiency of each treatment

处理 Treatment	淋溶损失量 Leaching losses/ ( kg·hm <sup>-2</sup> )				拦截率 Mitigation efficiency/%	
	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	全氮 Total N	全磷 Total P	全氮 Total N	全磷 Total P
休闲 <sup>①</sup>	42.7±7.7a	0.27±0.00a	52.4±8.5a	0.33±0.03a	—	—
高粱 <sup>②</sup>	32.3±1.0a	0.20±0.03ab	39.8±0.7b	0.23±0.05bc	24.0%	30.2%
玉米 <sup>③</sup>	26.2±2.3ab	0.26±0.03a	35.8±3.6b	0.28±0.02ab	31.8%	17.2%
黑麦草 <sup>④</sup>	21.1±2.9bc	0.16±0.05b	25.0±4.1c	0.29±0.05ab	52.3%	13.9%
马齿苋 <sup>⑤</sup>	18.5±3.3c	0.14±0.07b	23.5±5.9c	0.29±0.06ab	55.1%	14.3%
羽衣甘蓝 <sup>⑥</sup>	22.0±1.9bc	0.13±0.05b	25.6±3.1c	0.20±0.03c	51.2%	39.2%

注：同一列数据后的不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )，下同。Notes: The different letters in a column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$  levels. The same below. ①Fallow, ②Sorghum, ③Maize, ④Ryegrass, ⑤Purslane, ⑥Collard.

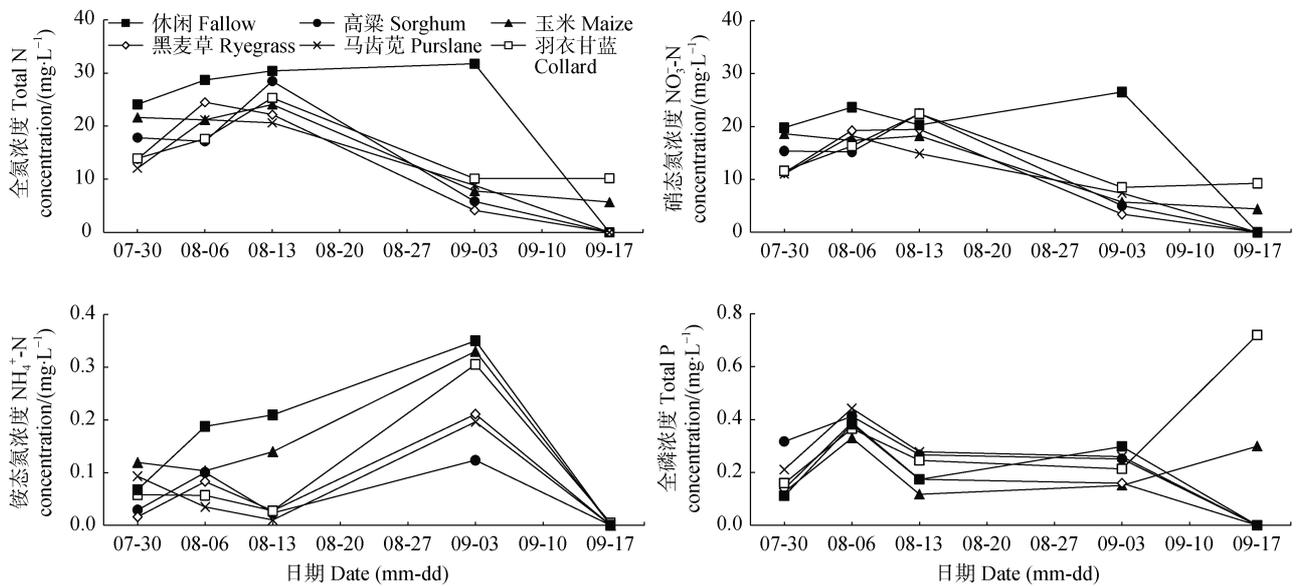


图 2 淋溶液氮磷浓度的动态变化

Fig 2 Dynamics of N and P concentrations in leachate

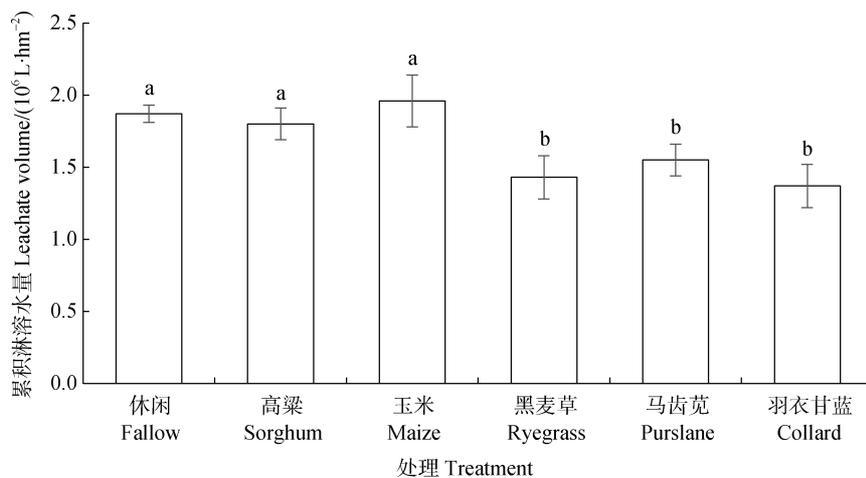
和硝态氮浓度差别不明显,这说明在本试验中,不同填闲作物通过吸收作用减低土壤溶液中氮磷浓度的效果相同。各处理淋溶液中铵态氮和全磷的浓度总体较低,浓度变化趋势一致。

### 2.2 不同填闲作物的生物量与吸氮量

填闲作物还可通过地上部的蒸腾作用和覆盖作用减少水分的渗漏。休闲期各处理的地上部生物量和累积淋溶水量见图 3,可以看出,高粱和玉米处理与休闲处理的淋溶水量差异不显著,而黑麦草、

马齿苋和羽衣甘蓝处理的淋溶水量显著低于休闲处理,分别可减少 23.5%、17.1%和 26.7%的淋溶体积。

与休闲处理相比,虽然高粱和玉米处理未显著减少淋溶水量,但填闲后期高生物量的优势仍能在阻控氮淋溶上发挥作用。从表 3 可以看出,玉米的生物量和地上部全氮含量最高,休闲期结束时玉米的吸氮量可以达到 44.4 kg·hm<sup>-2</sup>,显著高于其他处理;高粱的全氮含量较低,但由于生物量较高,吸氮量显著高于黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝。



注:不同字母表示不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同。Notes: Different letters indicate significant differences among different treatments at  $P < 0.05$  levels. The same below.

图 3 不同填闲处理下的淋溶水量

Fig. 3 Total leachate volume of each treatment

表 3 不同填闲处理下地上部生物量、全氮含量和吸氮量

Table 3 The aboveground biomass, total N content and N uptake of catch crops

处理 Treatment	填闲 21 天 After catching 21 days		填闲 49 天 After catching 49 days		
	地上部生物量 Shoot biomass/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	根系生物量 Root biomass/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	地上部生物量 Shoot biomass/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	地上部全氮含量 Shoot total N content/(g·kg <sup>-1</sup> )	地上部吸氮量 Shoot N uptake/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
	高粱 <sup>①</sup>	236.4±31.7b	60.9 ± 1.4b	550.8±91.3b	18.8±0.3c
玉米 <sup>②</sup>	316.7±19.0a	238.5 ± 42.2a	1 419.2±167.0a	31.4±0.9a	44.4±4.0a
黑麦草 <sup>③</sup>	50.3±4.7e	5.0 ± 0.0e	59.2±13.8e	18.8±0.5c	1.1±0.2e
马齿苋 <sup>④</sup>	96.1±8.2d	10.8 ± 0.8d	126.7±36.7d	27.6±0.5b	3.5±1.0d
羽衣甘蓝 <sup>⑤</sup>	185.6±11.2c	24.9 ± 0.6c	197.5±18.0c	32.2±1.1a	6.3±0.4c

①Sorghum, ②Maize, ③Ryegrass, ④Purslane, ⑤Collard.

### 2.3 不同填闲处理对土壤硝态氮和铵态氮的影响

从图 4 可以看出, 与休闲相比, 种植填闲作物能显著减少 0~20 cm 土壤中硝态氮的含量, 其中大生物量的高粱和玉米分别减少了 22.8%和 27.7%, 而小生物量的黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝硝态氮的含量显著低于高粱和玉米, 与休闲相比分别减少了 42.7%、44.9%和 55.4%; 各处理间 0~20 cm 土壤中

铵态氮含量无显著差异, 均在 5 mg·kg<sup>-1</sup> 左右。与 0~20 cm 土壤相比, 各处理根际土壤的硝态氮含量均有所降低, 高粱和玉米分别降低了 73%和 69%, 黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝分别降低了 8%、48%和 22%, 根际硝态氮均出现了亏缺的情况; 而根际铵态氮出现了积累, 与 0~20 cm 土壤相比, 不同填闲作物根际铵态氮含量均有所提高。

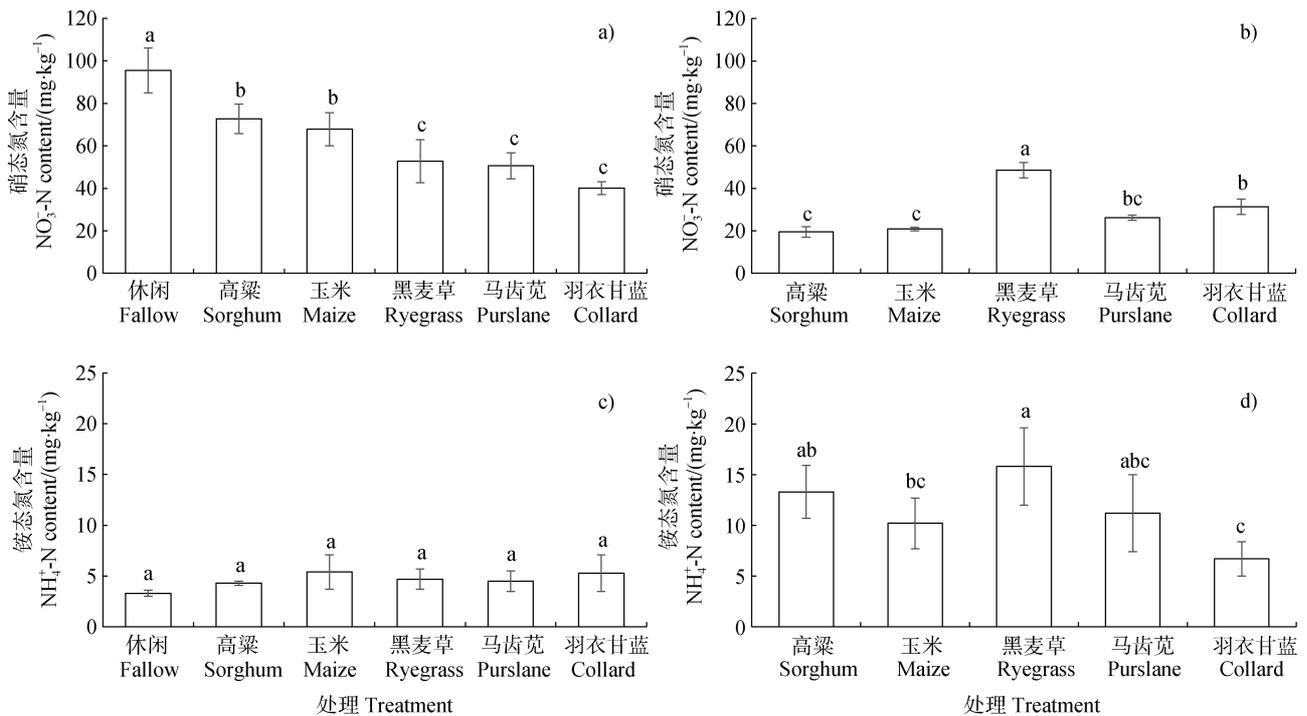


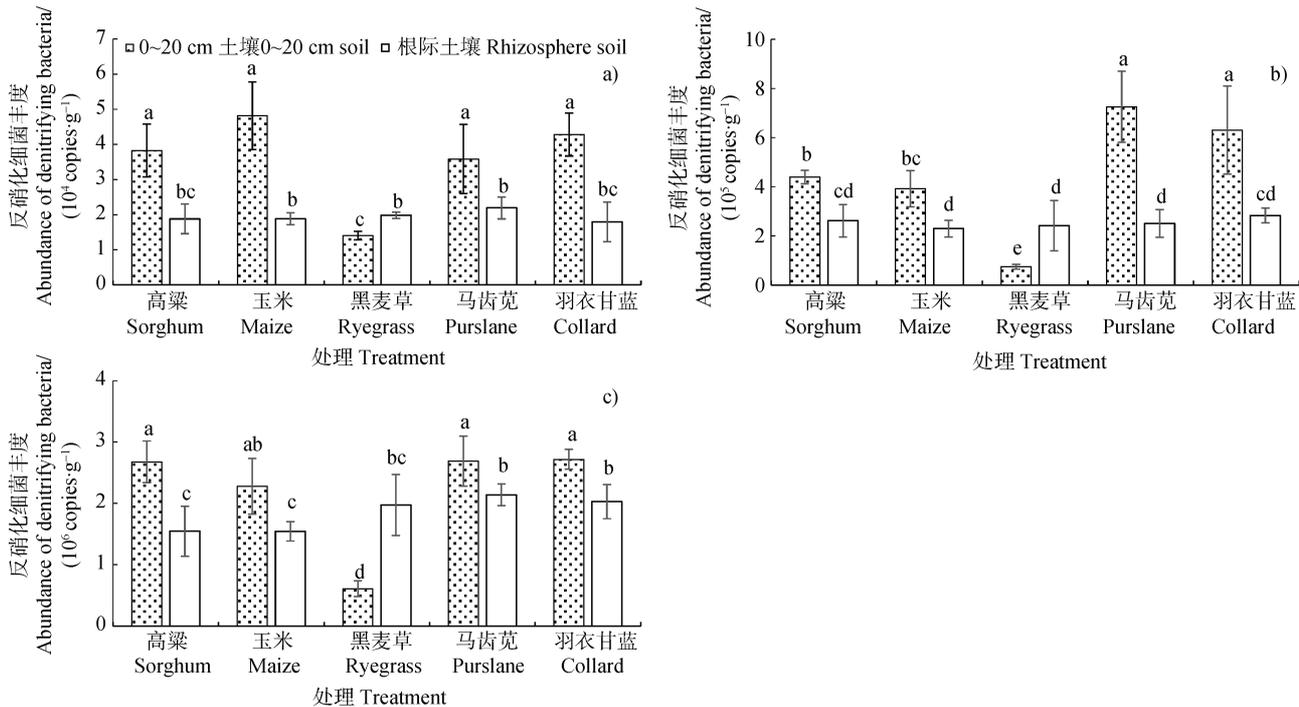
图 4 不同填闲处理下 0~20 cm 土壤和根际土中硝态氮和铵态氮含量 (a. 0~20 cm 土壤硝态氮含量, b. 根际土硝态氮含量, c. 0~20 cm 土壤铵态氮含量, d. 根际土铵态氮含量)

Fig. 4 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in 0~20 cm soil and rhizosphere soil (a. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content in 0~20 cm soil, b. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content in rhizosphere soil, c. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in 0~20 cm soil, d. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content in rhizosphere soil)

## 2.4 不同填闲处理土壤反硝化细菌丰度

对不同填闲作物根际土壤和 0~20 cm 土壤中反硝化细菌丰度 (图 5) 的分析可以看出, 不同填闲作物根际土壤中 *nirK* 型和 *nirS* 型反硝化细菌丰度无显著差异, 分别为  $1.9 \times 10^4 \sim 2.2 \times 10^4$  copy·g<sup>-1</sup> 和  $2.3 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$  copy·g<sup>-1</sup>, 与高粱和玉米相比, 黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝 *nosZ* 型反硝化细菌拷贝数显著提高了 33%; 0~20 cm 土壤中, 除黑麦草外的

各处理 *nirK* 型和 *nosZ* 型反硝化细菌丰度无显著差异, 而马齿苋和羽衣甘蓝 *nirS* 型反硝化细菌的丰度显著高于高粱和玉米, 马齿苋、羽衣甘蓝、高粱和玉米 *nirS* 型反硝化细菌的拷贝数分别为  $7.3 \times 10^5$ 、 $6.3 \times 10^5$ 、 $4.4 \times 10^5$  和  $3.9 \times 10^5$  g<sup>-1</sup>。与根际土壤相比, 除黑麦草外的 4 种填闲作物 0~20 cm 土壤的 *nirK* 型、*nirS* 型和 *nosZ* 型反硝化细菌丰度均有显著提高, 分别提高了 64%~156%、68%~190%、26%~73%。



注: 不同字母表示不同处理根际土壤和 0~20 cm 土壤之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Notes: Different letters indicate significant differences among different treatments in 0~20 cm soil and rhizosphere soil at  $P < 0.05$  levels.

图 5 不同填闲处理下根际土壤和 0~20 cm 土壤中 *nirK* (a)、*nirS* (b) 和 *nosZ* (c) 的丰度

Fig. 5 Abundance of *nirK* (a), *nirS* (b) and *nosZ* (c) genes in 0~20 cm soil and rhizosphere soil

## 3 讨论

### 3.1 不同填闲作物对氮磷淋溶损失的影响

填闲作物在减少氮淋溶方面已得到广泛认可, 填闲作物的种类也十分丰富, 如甜玉米、高粱、高丹草等禾本科植物<sup>[17-18]</sup>, 以及菠菜、苋菜、茼蒿等叶菜类植物<sup>[19]</sup>, 适用范围涵盖了我国的东北、西北、华北、长江三角洲和珠江三角洲 (珠三角) 等地区。北方设施菜地氮素淋失的监测结果表明, 种植糯玉米作为填闲作物能有效阻控 11.7% 的氮素淋失<sup>[20]</sup>; 陆扣萍等<sup>[14]</sup>对太湖地区设施菜地的研究表明,

与休闲相比, 甜玉米填闲处理可减少全氮淋洗 30.4%; 在珠三角地区进行的填闲试验发现, 甜玉米填闲可减少硝态氮淋洗 54.4%~76.5%<sup>[21]</sup>。本试验的结果表明, 与休闲相比, 玉米填闲可减少 31.8% 的氮淋洗, 与太湖地区已报道的 30% 拦截率相近<sup>[14]</sup>, 此外, 本研究中黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝填闲阻控氮淋洗的效果较玉米更好, 拦截率可达 51%~55% (表 2)。在填闲作物阻控磷淋溶的研究上, 珠三角地区的填闲试验结果表明, 玉米填闲可有效降低设施菜地土壤淋溶液全磷浓度 31%~65%<sup>[21]</sup>; 苋菜作为填闲作物对全磷淋溶的阻控率可达 30%~

44%<sup>[12]</sup>，相关研究在太湖地区未见报道。本研究表明，羽衣甘蓝在这 5 种填闲作物中阻控磷的效果最好，与休闲相比，减少了 39% 的全磷淋溶（表 2）。

学者普遍认为设施菜地夏季填闲作物应具备在较短生长期中生长迅速、生物量大、深根等特点；任智慧等<sup>[22]</sup>将生物量作为评价填闲作物的指标之一，认为苋菜、糯玉米、甜玉米这类光合作用强、生长迅速且生物量大的 C4 作物较适合作为填闲作物。甜玉米填闲种植提高了土壤水分的上行通量，减少了近 42% 的水分渗漏量<sup>[23]</sup>，且这种效果在种植深根系作物的情况下更为明显<sup>[24]</sup>，这说明填闲作物可通过减少淋溶液的体积来阻控氮淋溶。在填闲玉米上还有研究表明，与休闲相比，填闲处理淋溶液体积无显著差异<sup>[14]</sup>，但可将习惯施肥下淋溶液氮浓度从 94 mg·L<sup>-1</sup> 降至 59 mg·L<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>。Strock 等<sup>[25]</sup> 通过连续 3 年的研究表明，在玉米—大豆轮作体系中，黑麦草作为填闲作物可减少 11% 的水分渗漏和 13% 的硝酸盐淋溶；王芝义等<sup>[19]</sup> 的模拟土柱试验发现，与休闲相比，四种填闲作物（糯玉米、燕麦、豌豆和苋菜）显著降低了淋溶液中无机氮的浓度，除苋菜外，其他填闲作物还显著减少了淋溶液的体积。本研究中，与休闲相比，高粱、玉米、黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝均能显著减少淋溶液中的氮含量，在氮淋溶的高风险时期可将全氮浓度从 32 mg·L<sup>-1</sup> 降至 10 mg·L<sup>-1</sup> 以下，但不同种类填闲作物间的氮浓度并无显著差异（图 2a）；反观淋溶液体积，与休闲相比，生物量较高的高粱和玉米并未显著减少淋溶液体积（图 3），这与前人<sup>[8, 14]</sup> 报道一致，而生物量较低的黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝显著减少了 17%~27% 淋溶液体积（图 3）。张继宗等<sup>[17]</sup> 的研究表明，填闲前期（7 月 20 日—8 月 19 日）甜玉米吸氮速率相对平缓，后期（8 月 19 日后）吸氮量才急剧增长，速率开始明显提高；还有研究<sup>[26]</sup> 表明，田管作为填闲作物在减少淋溶液体积上效果显著，但在填闲 30~45 d 内无法显著降低淋溶液中硝态氮浓度；侯森<sup>[27]</sup> 三年填闲试验也显示，大量降雨事件多集中在甜玉米生育初期，此时甜玉米尚不能对硝酸盐淋失进行有效阻控，而其生长中后期生物量较大且未出现大量降雨，硝酸盐淋失量较小。本研究中，结合各填闲作物地上部生物量发现，黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝在填闲前期（21 d）就有了一定的覆盖度，与收获时（49 d）的生物量相近（表 3），可

以完全发挥其覆盖和吸收的作用；高粱和玉米在填闲前期处于苗期，生物量虽大于黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝，但种植密度小，水平方向上覆盖度不够，未能在雨量较多的休闲期前期有效减少淋溶液体积，氮素在这个阶段大量淋失，而到了休闲后期，生物量积累到一定程度时，降雨量已经变少，各处理的淋溶量均较低，甚至无淋溶，这可能就是黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝对氮淋溶阻控效果优于高粱和玉米的原因之一。建议填闲前期进行深浅根植物搭配种植，来弥补甜玉米在生育初期对土壤氮素淋失阻控效果的不足。

### 3.2 不同填闲作物对土壤硝态氮和铵态氮的影响

设施条件下，菜地硝态氮积累的情况极易发生，过量的氮存在于土壤-植物系统中，对环境有很大危害。闵炬等<sup>[6]</sup> 的研究表明，在设施菜地揭棚休闲期，种植填闲作物可使 0~10 cm 土壤中硝态氮含量从 306 mg·kg<sup>-1</sup> 下降至 195 mg·kg<sup>-1</sup>；吉艳芝<sup>[28]</sup> 两季的填闲试验发现，与休闲相比，甜玉米、甜高粱和苋菜均对土壤剖面硝态氮有不同程度的消减，尤其是在填闲作物种植后 40 d 左右，表层土壤硝态氮残留量最低，此时是这 3 种填闲作物吸氮量迅速增加的时期。本试验结果显示，与休闲处理相比，各填闲处理均显著减少了表层土壤（0~20 cm）的硝态氮含量，大生物量的高粱和玉米处理分别减少了 22.8% 和 27.7%，而小生物量的黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝处理的硝态氮含量分别减少了 42.7%、44.9% 和 55.4%，显著低于高粱和玉米（图 4a）。由根系分泌物输入和凋落物分解等过程相互作用引起的激发效应可加速有机质的矿化分解<sup>[29]</sup>。莫朝阳<sup>[30]</sup> 的研究表明，种植玉米和高粱会显著提高氮素矿化速率，促进有机质分解，增加土壤中可利用性氮素含量。还有研究<sup>[31]</sup> 发现，植物根系可分泌对土壤硝化细菌有特定抑制效果的有机分子或化合物，科学家称其为生物硝化抑制剂（Biological Nitrification Inhibitors, BNIs）。已发表的研究表明，高粱、水稻和小麦等作物均具有 BNI 能力<sup>[32-34]</sup>，而玉米广阔的遗传资源背景下过早地排除其 BNI 功能也为时尚早<sup>[35]</sup>。根系激发效应和生物硝化抑制剂可能是导致高粱和玉米处理土壤氮含量高于黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝的原因。

### 3.3 不同填闲作物对反硝化细菌的影响

夏季休闲期雨热同期的特点导致设施菜地在该时期进行频繁的干湿交替，这使得土壤的硝化与反

硝化作用增加,从而激发了土壤中  $N_2O$  的释放<sup>[36-38]</sup>。反硝化作用由多个功能基因参与,其中的标志性反应是亚硝酸盐转化为一氧化氮的过程,是反硝化过程中的重要限速步骤,其相应的亚硝酸盐还原酶基因(*nir* 基因)包括 *nirK* (*Cu-nitrite reductase gene*) 和 *nirS* (*Cd<sub>1</sub>-nitrite reductase gene*), 是反硝化微生物的代表性分子,常被用于其群落结构研究。有研究<sup>[39-41]</sup>表明 *nirK* 基因常被用来表征  $N_2O$  的释放,因为 *nirK* 基因对外界环境的响应较 *nirS* 灵敏,在土壤反硝化中的作用也更重要。也有研究<sup>[42]</sup>表明,尽管农田土壤中 *nirS* 基因丰度低于 *nirK* 基因,但 *nirS* 基因对环境参数更为敏感。本研究结果显示,不同填闲作物土壤中的 *nirK* 型反硝化细菌丰度无显著差异,且拷贝数小于 *nirS* 型反硝化细菌;马齿苋和羽衣甘蓝 0~20 cm 土壤中 *nirS* 型反硝化细菌的丰度显著高于高粱和玉米(图 5b)。由一氧化二氮酶(*nos*)催化的  $N_2O$  还原为  $N_2$  是反硝化过程的最后一步,

因此, *nosZ* 基因也常被作为分子标记,检测是否进行完全反硝化作用的关键基因,研究<sup>[43]</sup>也表明土壤  $N_2O$  的排放与反硝化细菌 *nosZ* 丰度正相关。本研究发现,土壤中 *nosZ* 型反硝化细菌拷贝数达到了  $10^6$  copy·g<sup>-1</sup>, 高于 *nirS* 和 *nirK* 型反硝化细菌,同时马齿苋和羽衣甘蓝根际土壤中 *nosZ* 型反硝化细菌丰度也显著高于高粱和玉米(图 5c)。综合而言,与高粱和玉米相比,马齿苋和羽衣甘蓝显著增加了土壤中反硝化细菌的丰度,促进了氮素气态转化的过程,从而减少了硝酸盐向下淋溶的风险。用差减法对各处理的氮素表观平衡进行估算(表 4),表中其他途径损失主要为气态损失,可以看出,休闲处理气态损失最低,与之相比,高粱和玉米处理分别提高了 94%和 54%的气态损失,而黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝处理的气态损失均处于较高水平,分别高于高粱和玉米处理 65%~85%和 108%~133%。与此同时,填闲作物对反硝化过程以及  $N_2O$  排放的影响仍值得关注。

表 4 填闲期间的氮素表观平衡

Table 4 Apparent nitrogen balance during the fallow period/ (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	填闲前土壤残留 Residual N before the fallow period	填闲结束时土壤残留 Residual N after the fallow period	植物吸收 Uptake	淋溶损失 Leaching loss	其他途径损失 Other loss
休闲 <sup>①</sup>	323.2	217.4	0	52.4	53.4
高粱 <sup>②</sup>	323.2	169.4	10.3	39.8	103.6
玉米 <sup>③</sup>	323.2	161.0	44.4	35.8	82.0
黑麦草 <sup>④</sup>	323.2	126.5	1.1	25.0	170.5
马齿苋 <sup>⑤</sup>	323.2	121.2	3.5	23.5	174.9
羽衣甘蓝 <sup>⑥</sup>	323.2	99.9	6.3	25.6	191.4

注:土壤残留氮量通过土壤无机氮含量×土壤容重×土层深度的方式估算,土壤容重为 1.1 g·cm<sup>-3</sup>,土层深度为 20 cm,其他途径损失量=填闲前土壤残留量-填闲结束时土壤残留量-植物吸收量-淋溶损失量。本表格中数据均以纯氮计。Notes: The amount of soil residual N is estimated by the soil inorganic nitrogen content × the soil bulk density × the soil layer depth, the soil bulk density is 1.1 g·cm<sup>-3</sup>, the soil depth is 20 cm, and other loss = the amount of soil residue before fallow period - the amount of soil residue after the fallow period - the amount of plant uptake - leaching loss. Data in the table represent the amount of pure nitrogen. ①Fallow, ②Sorghum, ③Maize, ④Ryegrass, ⑤Purslane, ⑥Collard.

## 4 结论

本研究筛选出黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝作为降雨频繁地区设施蔬菜休闲期填闲作物,黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝对氮淋溶的阻控率可达 51%~55%,显著高于高粱和玉米。研究也发现,氮磷阻控率均较高的填闲作物为羽衣甘蓝,其氮磷淋溶阻

控率分别为 51.2%和 39.2%。相比高粱和玉米,黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝可在短时间内形成一定的覆盖度,在休闲前期(休闲前 21 d)雨量较多时通过减少淋溶液体积显著减少了氮淋溶。此外,黑麦草、马齿苋和羽衣甘蓝还显著减少了土壤硝态氮残留,提高了土壤中 *nirS* 和 *nosZ* 型反硝化细菌的丰度,促进了反硝化过程,这可能是其阻控率高的机制之一。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21 ( 4 ): 464—472.
- [ 2 ] Min J, Sun H J, Kronzucker H J, et al. Comprehensive assessment of the effects of nitrification inhibitor application on reactive nitrogen loss in intensive vegetable production systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 307: 107227.
- [ 3 ] Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, et al. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37 ( 5 ): 692—698. [刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. *中国农业科学*, 2004, 37( 5 ): 692—698.]
- [ 4 ] Wang Z H, Zong Z Q, Li S X. Difference of several major nutrients accumulation in vegetable and cereal crop soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 ( 9 ): 1091—1094. [王朝辉, 宗志强, 李生秀. 菜地和一般农田土壤主要养分累积的差异[J]. *应用生态学报*, 2002, 13 ( 9 ): 1091—1094.]
- [ 5 ] Min J, Shi W M. Nitrogen discharge pathways in vegetable production as non-point sources of pollution and measures to control it[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613/614: 123—130.
- [ 6 ] Min J, Lu K P, Lu Y F, et al. Investigation of soil fertility and quality of ground water in greenhouse vegetable fields of Tai Lake region[J]. *Soils*, 2012, 44 ( 2 ): 213—217. [闵炬, 陆扣萍, 陆玉芳, 等. 太湖地区大棚菜地土壤养分与地下水水质调查[J]. *土壤*, 2012, 44 ( 2 ): 213—217.]
- [ 7 ] Min J, Zhang H L, Shi W M. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 111: 53—59.
- [ 8 ] Min J, Shi W M, Xing G X, et al. Effects of a catch crop and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching in greenhouse vegetable production systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 91 ( 1 ): 31—39.
- [ 9 ] Thorup-Kristensen K, Magid J, Jensen L S. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 79: 227—302.
- [ 10 ] Huang D F, Wang G, Li W H, et al. Present status, mechanisms, and control techniques of nitrogen and phosphorus non-point source pollution from vegetable fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 ( 4 ): 991—1001. [黄东风, 王果, 李卫华, 等. 菜地土壤氮磷面源污染现状、机制及控制技术[J]. *应用生态学报*, 2009, 20 ( 4 ): 991—1001.]
- [ 11 ] Li Y, Si L S, Zhang X Y, et al. Comparative study on the effects of catch crops on soil environment in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 ( 1 ): 224—229. [李元, 司力珊, 张雪艳, 等. 填闲作物对日光温室土壤环境作用效果比较研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24( 1 ): 224—229.]
- [ 12 ] Fan X, Li H L, Lei X, et al. Planting amaranth as catch crop to reduce nitrogen and phosphorus leaching losses from greenhouse vegetable soils in southern China[J]. *Soils*, 2021, 53 ( 2 ): 285—290. [范新, 李浩亮, 雷孝, 等. 南方设施菜地填闲苋菜筛选及其氮磷淋失阻控效果研究[J]. *土壤*, 2021, 53 ( 2 ): 285—290.]
- [ 13 ] Lu S C, Jiang C G. Effect of planting summer catchcrop on soil nitrogen and  $^{15}\text{N}$  conversion in the Northern greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2011 ( 13 ): 171—174. [卢树昌, 姜春光. 北方日光温室夏季种植填闲作物对土壤氮及  $^{15}\text{N}$  转化的影响[J]. *北方园艺*, 2011 ( 13 ): 171—174.]
- [ 14 ] Lu K P, Min J, Shi W M, et al. Effect of sweet corn as a catch crop on residual and leaching loss of soil nitrate in protected vegetable soil in Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 ( 2 ): 331—339. [陆扣萍, 闵炬, 施卫明, 等. 填闲作物甜玉米对太湖地区设施菜地土壤硝态氮残留及淋失的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50 ( 2 ): 331—339.]
- [ 15 ] Tonitto C, David M B, Drinkwater L E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 112 ( 1 ): 58—72.
- [ 16 ] Lu R K. Analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [ 17 ] Zhang J Z, Liu P C, Zuo Q, et al. Nitrogen uptake by different catch crops in facility vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 ( 12 ): 2663—2667. [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.]
- [ 18 ] Pei Z Q. Study on the effects of planting summer catch crops on soil nitrogen & phosphorus nutrients and related characters in greenhouse[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2020. [裴志强. 夏填闲作物种植对集约化设施土壤氮磷养分及相关性状影响研究[D]. 天津: 天津农学院, 2020.]
- [ 19 ] Wang Z Y, Guo R Y, Li F M. Effects of different summer catch crops planting on soil inorganic N residue and leaching in greenhouse vegetable cropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 ( 9 ): 2516—2523. [王芝义, 郭瑞英, 李凤民. 不同夏季填闲作物种植对设施菜地土壤无机氮残留和淋洗的影响[J]. *生态学报*,

- 2011, 31 (9): 2516—2523.]
- [ 20 ] Jiang C G, Lu S C, Chen Q. Study on the effect of simulation different rainfall on the yield, root growth and nutrient uptake of catch crop-waxy corn in greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2011 (17): 71—75. [姜春光, 卢树昌, 陈清. 模拟不同降雨条件对日光温室填闲作物糯玉米产量、根系生长及养分吸收的影响[J]. 北方园艺, 2011 (17): 71—75.]
- [ 21 ] Xiao H D, Lei X, Tu J Z, et al. Effects of maize (*Zea mays* L.) as a catch crop operating in preventing nitrogen and phosphorus leaching from intensive vegetable soils and minimize its impact on the production of the subsequent vegetable in Pearl River Delta region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29 (11): 2199—2205. [萧洪东, 雷孝, 涂金智, 等. 玉米填闲种植对珠三角菜地土壤氮磷吸收淋失阻控及其对后茬蔬菜生产影响的研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2199—2205.]
- [ 22 ] Ren Z H, Chen Q, Li H F, et al. The progress of controlling nitrate pollution in vegetable fields using nitrogen-catch crops[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003 (7): 13—17. [任智慧, 陈清, 李花粉, 等. 填闲作物防治菜田土壤硝酸盐污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003 (7): 13—17.]
- [ 23 ] Liang H, Hu K L, Hou S, et al. Simulation analysis of effect of planting summer catch crop sweet corn on nitrate leaching for greenhouse vegetable field in suburbs of Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (8): 125—136. [梁浩, 胡克林, 侯森, 等. 填闲玉米对京郊设施菜地土壤氮素淋洗影响的模拟分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47 (8): 125—136.]
- [ 24 ] Plaza-Bonilla D, Nolot J M, Raffaillac D, et al. Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: Field evidence and model simulations[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 212 (1): 1—12.
- [ 25 ] Strock J S, Porter P M, Russelle M P. Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the North U.S. corn belt[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33 (3): 1010—1016.
- [ 26 ] Ju S R. Effect of different fertilization on yield and fate of nitrogen of line pepper and immobilization mechanism analysis of catch crop[D]. Haikou: Hainan University, 2019. [巨昇容. 减氮与种植填闲作物田管降低海南稻菜轮作体系中氮损失的机制研究[D]. 海口: 海南大学, 2019.]
- [ 27 ] Hou S. Simulation and evaluation of soil water and nitrate leaching in facility farmlands in Beijing suburb[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. [侯森. 京郊设施农田土壤水氮淋失模拟与评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.]
- [ 28 ] Ji Y Z. Catch crop control soil nitrogen accumulation and leaching in greenhouse[D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2010. [吉艳芝. 填闲作物阻控设施蔬菜土壤硝态氮累积和淋失的研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2010.]
- [ 29 ] Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42 (9): 1363—1371.
- [ 30 ] Mo Z Y. Research on the effect and mechanism of rhizosphere priming effects on carbon and nitrogen transformation in two farmland soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. [莫朝阳. 根际激发效应对两种农田土壤中碳氮转化的影响及机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.]
- [ 31 ] 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.
- [ 32 ] 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.
- [ 33 ] O'Sullivan C A, Fillery I R P, Roper M M, et al. Identification of several wheat landraces with biological nitrification inhibition capacity[J]. Plant and Soil, 2016, 404 (1/2): 61—74.
- [ 34 ] Sun L, Lu Y F, Yu F W, et al. Biological nitrification inhibition by rice root exudates and its relationship with nitrogen-use efficiency[J]. New Phytologist, 2016, 212 (3): 646—656.
- [ 35 ] Coskun D, Britto D T, Shi W M, et al. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition[J]. Nature Plants, 2017, 3 (6): 17074.
- [ 36 ] Gao D C, Bai E. Influencing factors of soil nitrous oxide emission during freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45 (9): 1006—1023. [高德才, 白娥. 冻融循环期间土壤氧化亚氮排放影响因素[J]. 植物生态学报, 2021, 45 (9): 1006—1023.]
- [ 37 ] Chen L, Zeng J, Li H, et al. Research advances in the soil nitrogen cycle under global precipitation pattern change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (20): 7543—7551. [陈琳, 曾冀, 李华, 等. 全球降水格局变化下土壤氮循环研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7543—7551.]
- [ 38 ] Ouyang Y, Li X Y. Impacts of drying-wetting cycles on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from soils in different ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (4): 1251—1259. [欧阳扬, 李叙勇. 干湿交替频率对不同土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 释放的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1251—1259.]
- [ 39 ] Szukics U, Hackl E, Zechmeister-Boltenstern S, et al. Contrasting response of two forest soils to nitrogen

- input: Rapidly altered NO and N<sub>2</sub>O emissions and nirK abundance[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 45 ( 8 ): 855—863.
- [ 40 ] Yoshida M, Ishii S, Otsuka S, et al. nirK-harboring denitrifiers are more responsive to denitrification-inducing conditions in rice paddy soil than nirS-harboring bacteria [J]. *Microbes and Environments*, 2010, 25 ( 1 ): 45—48.
- [ 41 ] Morales S E, Cosart T, Holben W E. Bacterial gene abundances as indicators of greenhouse gas emission in soils[J]. *The ISME Journal*, 2010, 4 ( 6 ): 799—808.
- [ 42 ] Zhang L H, Zeng G M, Zhang J C, et al. Response of denitrifying genes coding for nitrite ( nirK or nirS ) and nitrous oxide ( nosZ ) reductases to different physico-chemical parameters during agricultural waste composting[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99 ( 9 ): 4059—4070.
- [ 43 ] Han B, Ye X H, Zhang X C, et al. Characteristics of soil nitrous oxide emissions and influence factors under different irrigation managements from greenhouse soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 ( 5 ): 310—315, 321. [韩冰, 叶旭红, 张西超, 等. 不同灌溉方式设施土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 ( 5 ): 310—315, 321.]

(责任编辑：陈荣府)