植物营养与肥料学报 2013,19(3):689-697
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi:10.11674/zwyf.2013.0320

不同轮作模式对太湖地区大棚菜地土壤氮淋失的影响

陆扣萍[1,2], 闵 炬[2], 施卫明[2], 王海龙[1*]
(1 浙江农林大学环境与资源学院,浙江临安 311300;
2 中国科学院南京土壤研究所,面源污染治理技术研发中心,江苏南京 210008)

摘要:为控制太湖地区设施菜地氮素淋失,减小地下水污染风险,本研究选取2种轮作模式,即芹菜-番茄-莴苣(模式1)和金花菜-番茄-莴苣(模式2),2种轮作模式下分别设置2个施氮量水平,即习惯施氮(N1)和减量施氮(N2),研究不同轮作模式和施氮水平对设施菜地全年氮素淋洗的影响,并观测了不同轮作模式下土壤硝态氮含量、电导率和pH的变化。结果表明,与模式1相比,模式2可分别使N1和N2处理的淋洗液中的NO_3^--N平均浓度降低了36%和38%,进而使全年总氮淋洗量减少了41% 和38%,但淋洗液体积不变。模式2结合减量施氮(N2)对设施菜地氮素淋失阻控效果最佳,全年总氮淋失量为63.0 kg/hm^2,而年经济效益最高,可达51.9×10^4 Yuan/hm^2,最大经济效益提高29%。一年三季蔬菜收获后,N1处理下模式2的土壤硝态氮含量(0—20 cm)为189.2 mg/kg,而模式1的高达269.3 mg/kg。因此模式2可分别使N1和N2水平下的土壤硝态氮含量减少30%和26%,同时也显著降低了土壤pH和电导率($P<0.05$)。在太湖地区,选择需氮量较少的作物进行合理优化轮作(如金花菜-番茄-莴苣轮作模式),是减少设施菜地氮素流失的有效手段,且具有较好的经济效益。

关键词:太湖地区;设施菜地;氮淋洗;轮作模式
中图分类号:S153.6$^+$1;S344.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)03-0689-09

Effect of rotation patterns on nitrogen leaching loss from protected vegetable soil in Tai Lake region

LU Kou-ping[1,2], MIN Ju[2], SHI Wei-ming[2], WANG Hai-long[1*]
(*1 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China*;
2 Research Center of Non-point Source Pollution Control, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To control nitrogen (N) leaching loss from protected vegetable production fields and minimize the risk of N pollution of groundwater in the Tai Lake region, China, a field experiment was conducted to evaluate the effects of different rotation patterns and fertilizer application rates on nitrogen leaching loss using lysimeters. Soil NO_3^--N concentration, electrical conductivity and pH values were also analyzed. There were two types of rotation patterns, pattern 1 (celery-tomato-lettuce) and pattern 2 (burclover-tomato-lettuce), and two N levels, the conventional N application rate (N1) and reduced N application rate (N2). Comparison with the rotation pattern 1, the average NO_3^--N concentrations in the leachate of the rotation pattern 2 are decreased by 36% (N1) and 38% (N2), and the total N leaching under the two N treatments decreased by 41% and 38% respectively, although the leachate volumes are not affected by the rotation pattern or N application rates. The optimum way to control the N leaching loss is a combination of the rotation pattern 2 and the reduced N application rate (N2). For example, the total

收稿日期:2012-09-11 **接受日期**:2013-01-12
基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201003014-1);国家自然科学基金项目(41271337);浙江农林大学科研发展基金(人才引进)(2010FR097)资助。
作者简介:陆扣萍(1985—),女,江苏扬州人,硕士,助理实验师,主要从事蔬菜氮素营养生理与环境效应的研究。
E-mail:koupinglu@zafu.edu.cn。 *通信作者 E-mail:nzhailongwang@gmail.com

annual N leaching loss is 63.0 kg/ha under the combined treatment, and an economic return (up to 519 thousand Yuan/ha) is achieved, which is an increase of 29%. After growing three vegetable crops in a year, soil NO_3^--N concentration in the topsoil (0–20 cm) is 189.2 mg/kg in the N1/rotation pattern 2 combination, whereas it is 269.3 mg/kg in the N1/rotation pattern 1 combination. In addition, the rotation pattern 2 reduces soil NO_3^--N content by 30% (N1) and 26% (N2) respectively, and soil pH and electrical conductivity are reduced significantly ($P < 0.05$). In the Tai Lake region, rotation patterns requiring less N input (e.g., bur clover–tomato–lettuce) could be practiced to reduce N leaching loss and achieve greater economic return.

Key words: Taihu Lake region; protected vegetable production; nitrogen leaching; rotation pattern

太湖地区是我国化肥用量最高的地区之一,也是我国地表水体富营养化和农业面源污染较严重的地区之一。太湖流域多为水网地区,地势低平,水网交错,降水频繁。近年来,该地区设施菜地种植面积日益增加,截止 2010 年,太湖流域蔬菜地面积为 5.53 万公顷,占该区域旱地面积的 20.2%。大多数新增的菜地由几十年种植历史的稻田改种而来,种植模式多以番茄–莴苣–芹菜轮作为主。在我国蔬菜管理体系中,菜农为了提高蔬菜作物的产量而盲目高量施肥(尤其是氮肥),导致土壤及蔬菜中硝态氮累积,在 0—100 cm 土壤剖面发生明显的淋洗[1],这种现象在设施栽培条件下尤为明显。太湖地区设施菜地一年三季作物总氮(以纯 N 计)投入达到 900 ~ 1300 kg/hm^2[2],远远超出设施内当季作物的需求,造成土壤剖面 NO_3^--N 的过量累积,加之设施蔬菜地的分布区大多靠近河道水体,氮污染物进入水体的路径较短,由此可能引起的氮污染风险更为严重。

目前,降低和控制设施菜地土壤硝酸盐含量,减少硝酸盐淋失措施的研究较多,如合理施肥[3-4]、种植填闲作物[5-6]及添加化学处理剂[7-8]等。何传龙等[9]研究表明,改进减量施肥技术可使巢湖沿岸的设施番茄生长期 NO_3^--N 淋失量减少 65.7%。在北方集约化种植系统下,夏季休闲期种植甜玉米可减少 0—180 cm 土壤剖面残留的无机氮 304 ~ 333 kg/hm^2,减少氮淋失达 19% ~ 22%[10]。由于不同作物在养分吸收利用上存在差异,通过合理配置轮作作物有利于控制设施菜地土壤氮素淋失,但目前涉及这方面的研究还较少。有关改善轮作制度方面的研究多集中在作物增产增效[11-12]和改良土壤盐分积累[13-14]等方面,田舜等[12]研究表明,在施氮 150 和 225 kg/hm^2 条件下,黑麦草–水稻轮作的经济效益分别比小麦–水稻轮作高 2.54% 和 15.28%。施毅超等[15]通过 2 年大田轮作试验表明,蓖麻–白菜–蓖麻轮作可使土壤 EC 下降 5%,而辣椒–白菜–辣椒轮作则可使土壤 EC 下降 33%,辣椒–白菜–辣椒轮作降低土壤 EC 的效果优于蓖麻–白菜–蓖麻轮作。徐永刚等[16]研究了不同轮作模式对沈阳地区设施菜地土壤氮、磷淋移的影响,汤秋香等[17]采用定点取样与实地调研相结合的方法观测了洱海北部地区不同轮作模式下氮、磷污染的负荷及其影响因素,但这些研究多为模拟研究,观测的时期较短,缺乏淋洗液体积观测,更缺乏全年的动态观测,难以准确反映设施菜地的氮淋失特征。

本文以太湖地区设施菜地为研究对象,对比研究芹菜–番茄–莴苣轮作和优化轮作模式金花菜—番茄—莴苣 2 种轮作模式下设施菜地土壤硝态氮含量的变化及氮素淋洗特征,以期为控制我国南方设施蔬菜种植区硝态氮淋失和减轻地下水污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及供试材料

本试验于 2009 年 11 月至 2010 年 12 月在位于太湖地区的江苏省无锡市胡埭镇龙延村进行。试验区地处中亚热带北缘过渡地带,四季分明,雨量充沛,气候温和湿润,无霜期平均为 220 d,年平均气温 12 ~ 16℃,全年平均降水日 136 d,日降雨量≥ 50 mm 的暴雨每年出现 2 ~ 3 次,大都出现在梅雨期和台风季节。常年 6 月份暴雨最多,其次为 8 月份。多年平均降水量为 1000 ~ 1200 mm,本试验观测期间(2009 年 11 月至 2010 年 12 月),全年降水量为 1120 mm,雨季较长,主要集中在夏季。试验地全年揭棚时间从 7 月 26 日至 11 月 2 日,共计 99 d,包含了裸地休闲期(7 月 26 日至 9 月 16 日)和莴苣生长前期(9 月 17 日至 11 月 2 日)。

试验地土壤原属于太湖地区典型的水稻土,改种蔬菜地 3 年。表层土壤(0—20 cm)质地为黏土,土壤 pH 6.31、电导率 0.22 mS/cm、有机质含量 27.9 g/kg、全氮 1.06 g/kg、NO_3^--N 105.0 mg/kg、

NH_4^+-N 6.1 mg/kg、有效磷 199.8 mg/kg、速效钾 148.4 mg/kg。

1.2　试验处理及田间管理

试验设 2 种轮作制度：1）轮作模式 1（芹菜-番茄-莴苣）；2）轮作模式 2（金花菜—番茄—莴苣）。供试芹菜（*Apium graveolens* ）为四季西芹，于 2009 年 10 月 3 日播种育苗，11 月 24 日移栽定植，2010 年 3 月 30 日收获完毕。供试金花菜（*Medicagohispida Gaertn*）为大叶金花菜，于 2009 年 11 月 24 日播种，2010 年 1 月 5 日采收第一刀，2 月 20 日采收第二刀，3 月 30 日收获完毕。供试番茄（*Lycopersicum esculentum* Mill）为浦粉一号，于 2010 年 2 月 25 日播种育苗，4 月 15 日移栽定植，2010 年 7 月 25 日收获完毕。供试莴苣（*Lactuca satiua* L）品种为大青叶莴笋，适宜秋延后大棚种植，于 2010 年 8 月 18 日播种育苗，9 月 17 日移栽定植，12 月 20 日收获完毕。2010 年 7 月 26 日至 9 月 16 日试验地裸地休闲。

每种轮作模式下设 2 种施氮水平：1）N1 为农民习惯施氮，根据试验所在地农户的平均施氮水平，芹菜、金花菜、番茄、莴苣的施氮量分别为 N 620、190、370、490 kg/hm^2；2）N2 为减量施氮，芹菜、金花菜、番茄、莴苣的施氮量分别为 N 500、150、280、420 kg/hm^2。每个处理重复 3 次，小区面积为 2.5 m × 7.5 m，共 12 个小区，随机区组排列。各小区之间用 PVC 板隔开，PVC 板埋入深度为 0.8 m，以防各小区间的养分流动。

氮肥为尿素（含 N 46%），采用 1 次基肥 2 次追肥方式施入，基肥施 50%，两次追肥分别施 30% 和 20%。各处理磷、钾肥和有机肥用量相同，磷肥和有机肥作底肥一次施入，钾肥采用 1 次基肥 1 次追肥，按 50% 和 50% 的比例施用。芹菜、金花菜于 2009 年 11 月 23 日施基肥，1 月 20 日和 2 月 15 日追肥；番茄于 2010 年 4 月 13 日施基肥，6 月 4 日和 6 月 24 日追肥；莴苣于 2010 年 8 月 17 日施基肥，10 月 30 日和 11 月 11 日追肥。有机肥（鸡粪，含氮量为 2%）、磷肥（钙镁磷肥，P_2O_5 含量 12% ）和钾肥（K_2SO_4，含量 50% ）施用量分别为 N 70 kg/hm^2、P 120 kg/hm^{2}和 K 150 kg/hm^2。各蔬菜作物施肥量见表 1。田间水分管理采用当地农民传统的浇灌方法，通常在移栽当天及随后的 3 ～ 4 d 浇水，或视土壤干湿状况而定。追肥时尿素撒施后浇水，灌水为试验区附近河水，全年灌溉量为 380 mm。

表 1　不同蔬菜肥料投入量（kg/hm^2）

Table 1　Fertilizer inputs of different vegetables variety

蔬菜品种 Vegetable variety	施氮量 N rate		磷量 P rate	钾量 K rate
	N1	N2		
芹菜 Celery	620	500	120	150
金花菜 Bur clover	190	150	120	150
番茄 Tomato	370	280	120	150
莴苣 Lettuce	490	420	120	150

1.3　测定项目与方法

1.3.1 土壤样品的采集与测定[18]　第一茬作物（芹菜/金花菜）种植前，取 0—20 cm 土层土样，采取“S”混合采样法，共采集 6 个土壤样品。土壤有机质用重铬酸钾氧化 - 容量法测定；全氮用浓 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，自动定氮仪（BüCHI 399）测定；硝态氮用 1 mol/L KCl 溶液浸提—紫外分光光度计测定；有效磷用 0.5 mol/L 的 $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法测定；速效钾用 1.0 mol/L 的 NH_4OAc 浸提—火焰分光光度法测定。pH 值用 pH 计（pH 211 型）测定，水土比为 2.5∶1；电导率（EC）用 DDS - 320 型电导仪测定，水土比为 5∶1。每季蔬菜收获后，每个小区分别取 0—20 cm 土壤样品，测定土壤硝态氮含量、pH 和 EC。

1.3.2 植物样品的采集与测定　每个小区取芹菜、金花菜、番茄和莴苣可食部分全部称重计产。

1.3.3 淋洗液的收集与测定　淋洗液收集装置[19]于 2009 年 6 月埋入各处理小区，使其与土壤很好地结合。由于当地地下水位较高，经常在 80—120 cm 左右波动，为避免地下水的倒灌影响，将收集面深度确定为 50 cm。在无负压条件下全年连续收集淋洗液，收集面表面积为 0.47 m^2。每 7 ～ 10 d 取一次水样，每次取样将装置中淋洗液抽净，同时测定淋洗液体积。另取 200 mL 水样过滤，滤液用连续流动分析仪测定硝态氮、铵态氮、总氮。

淋失总量的计算公式为：

$$\omega(\text{待测物}) = \frac{\rho \times v \times 10^{-6}}{s \times t \times 10^{-4}}$$

式中：ω（待测物）为待研究物质淋失总量（kg/hm^2）；ρ 为淋洗液中待研究物质含量（mg/L）；v 为淋洗液总体积（L）；s 为收集表面积（m^2）；t 为待研究时间段的天数（d）；10^{-6}为将 mg 换算成 kg 的系数；10^{-4}为将 m^2 换算成 hm^2 的系数。

试验数据用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 等软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同轮作模式下的氮淋失特征

2.1.1 不同轮作模式下氮淋洗浓度的动态变化 不同轮作模式下淋洗液中 NO_3^--N 浓度的动态变化见图1。图1表明,在设施菜地全年轮作期间,轮作模式2下淋洗液中 NO_3^--N 浓度显著低于轮作模式1,以第一季和第二季作物生长期间差异较为显著。农民习惯施氮处理(N1) 下模式1全年 NO_3^--N 浓度在10.3～62.9 mg/L 范围内,平均达到28.2 mg/L;而模式2全年 NO_3^--N 浓度平均为18.0 mg/L,最高浓度仅为34.0 mg/L,与轮作模式1相比,轮作模式2可使淋洗液中 NO_3^--N 的平均浓度降低36.2%。同样,对于减量施氮处理(N2),轮作模式2可使 NO_3^--N 平均浓度由24.7 mg/L 降低到15.3 mg/L,降幅达38.1%。由图1还可以看出,无论是轮作模式1还是轮作模式2,N1处理下 NO_3^--N 浓度均高于N2处理,说明淋洗液中 NO_3^--N 浓度与施氮量显著相关。

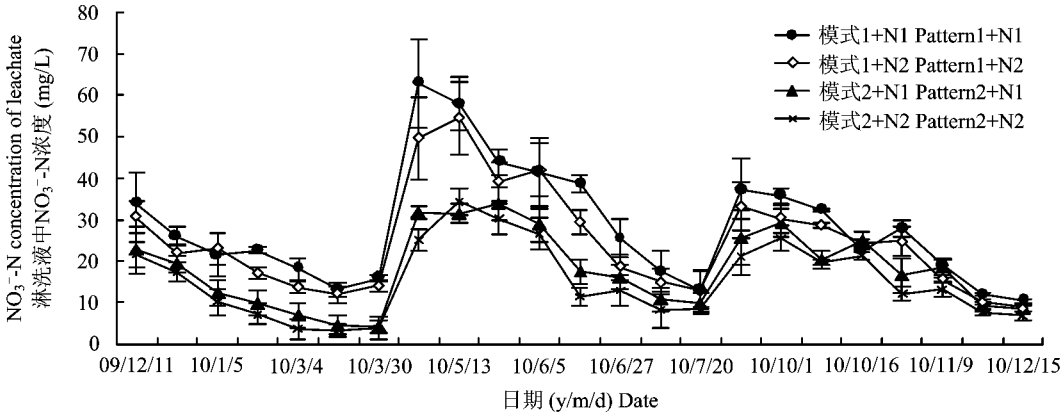

图1 不同轮作模式下淋洗液中 NO_3^--N 的动态变化

Fig.1 Dynamic of NO_3^--N concentration under different rotation patterns

2.1.2 不同轮作模式下淋洗液体积的变化 由表2可以看出,设施菜地全年(不含裸地休闲期)淋洗液体积为575～605 mm,降水量为626 mm,全年灌溉量为380 mm。淋洗液体积在不同时期表现为第三季>第二季>第一季,其中第三季(莴苣)淋洗液体积最高,达到380～410 mm,分别是第一季和第二季蔬菜生长期间淋洗液体积的3.5～5.0倍,这与莴苣生长前期揭棚,且此阶段降水较多有关。另外,表2还表明,对于同一季蔬菜生长期间,不同处理之间淋洗液体积并无显著性差异($P<0.05$)。

2.1.3 不同轮作模式下总氮淋失量 由表3可以看出,三季作物收获后,无论是轮作模式1还是轮作模式2,农民习惯施氮处理(N1)下总氮淋失量均显著高于减量施氮处理(N2),减氮处理可使模式1、模

表2 淋洗液体积和降水量

Table 2 Leachate volume and rainfall

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatment	淋洗液体积 Leachate volume(mm)				降水量 Rainfall(mm)			
		芹菜/金花菜 Celery/ Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce	总计 Total	芹菜/金花菜 Celery/ Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce	总计 Total
模式1 Pattern 1	N1	85±12 a	110±15 a	380±16 a	575	90	210	326	626
	N2	80±14 a	110±13 a	405±18 a	595				
模式2 Pattern 2	N1	90±12 a	105±13 a	410±18 a	605				
	N2	90±12 a	110±14 a	390±15 a	590				

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

式 2 全年总氮淋失量分别减少 23.4% 和 19.3%。从时间上来看,一年三季作物生长期总氮淋失量表现为第三茬(秋季) > 第二茬(春季) > 第一茬(冬季),其中以莴苣季总氮淋失量达到最高,分别占全年淋失量的 39.5%、39.6%、46.9% 和 49.0%。不同蔬菜生长期均以轮作模式 1 下 N1 处理的总氮淋失量达到最高,分别为 38.1、42.3、52.4 kg/hm^2。与轮作模式 1 相比,轮作模式 2 下的 N1 和 N2 处理的全年总氮淋失量分别减少了 41%、38%。与减量施氮措施相比,改变轮作模式对总氮淋失量的阻控效果更加显著。

表 3　不同蔬菜生长季全氮淋失量(kg/hm^2)

Table 3　The total N leaching loss at the different vegetable growth season

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatment	全年 Total	芹菜/金花菜 Celery/Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce
模式 1 Pattern 1	N1	132.8 ±24.5 a	38.1 ±6.5 a	42.3 ±5.8 a	52.4 ±5.9 a
	N2	101.7 ±12.1 b	29.5 ±4.5 b	31.9 ±7.3 b	40.3 ±3.5 b
模式 2 Pattern 2	N1	78.1 ±12.6 c	16.2 ±3.0 c	25.3 ±7.6 c	36.6 ±1.6 c
	N2	63.0 ±14.3 d	13.9 ±4.3 d	18.2 ±4.9 d	30.9 ±6.3 d

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

2.2　不同轮作模式对土壤理化性质的影响

2.2.1 不同轮作模式下土壤硝态氮含量　设施菜地一年三季作物收获后土壤 0—20cm 土层硝态氮含量见表 4。表 4 表明,一年三季作物收获后土壤 NO_3^--N 含量均表现为轮作模式 1 高于轮作模式 2,轮作模式 1 下第一季作物(芹菜)收获后,N1 处理下土壤 NO_3^--N 含量为 268.2 mg/kg,而轮作模式 2(金花菜)下仅为 94.2 mg/kg, NO_3^--N 残留减少 64.9%。第二季作物(番茄)收获后,N1 处理下轮作模式 1、模式 2 土壤 NO_3^--N 含量分别为 458.9、263.1 mg/kg,与模式 1 相比,模式 2 土壤 NO_3^--N 含量降低 42.7%。第三季作物(莴苣)收获后,不同处理下土壤 NO_3^--N 含量均有不同程度的降低,可能是因为番茄收获后设施菜地有较长一段时间的休闲期(7 月 26 日至 9 月 16 日),休闲期发生氮淋洗损失。一年三季作物收获后,与模式 1 相比,模式 2 下 N1、N2 处理的土壤硝态氮含量可分别降低 29.7%、25.6%。另外,在同一轮作模式下,不同施氮处理的土壤 NO_3^--N 含量均表现为 N1 > N2,减氮处理可相应减少土壤 NO_3^--N 残留,轮作模式 1 下一年三季作物可分别减少 NO_3^--N 残留 21.7%、7.8% 和 17.7%。

表 4　不同轮作模式下土壤硝态氮含量(mg/kg)

Table 4　Effect of rotation patterns on soil NO_3^--N concentrations

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatment	芹菜/金花菜 Celery/Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce
模式 1 Pattern 1	N1	268.2 ±29.4 a	458.9 ±30.3 a	269.3 ±22.7 a
	N2	210.1 ±30.3 b	423.1 ±38.2 b	221.7 ±14.6 b
模式 2 Pattern 2	N1	94.2 ±18.5 c	263.1 ±23.5 c	189.2 ±14.1 c
	N2	76.0 ±15.2 d	213.3 ±25.7 d	164.9 ±15.8 d

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

2.2.2 不同轮作模式下土壤 pH　从表 5 可以看出,经过第一季作物种植后,两种轮作模式下土壤 pH 均呈现不同程度的降低,且轮作模式 1 下的土壤 pH 均显著低于轮作模式 2。随着种植茬数的增加,土

壤 pH 不断下降,第三季作物收获后,N1 处理下轮作模式 1 的土壤 pH 最低降为 5.31,与第一季作物相比,下降了 0.63 个单位,降幅达到 10.6%;而模式 2 下土壤 pH 由 6.17 下降到 5.61,pH 降低了 9.1%。对于同一种轮作模式,不同施氮处理下一年三季作物收获后土壤 pH 无显著差异($P<0.05$)。

表 5 不同轮作模式对土壤 pH 的影响

Table 5 Effect of rotation patterns on soil pH

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatment	芹菜/金花菜 Celery/Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce
模式 1 Pattern 1	N1	5.94 ±0.15 b	5.62 ±0.12 b	5.31 ±0.11 b
	N2	6.01 ±0.14 b	5.78 ±0.12 b	5.32 ±0.13 b
模式 2 Pattern 2	N1	6.17 ±0.13 a	5.98 ±0.13 a	5.61 ±0.12 a
	N2	6.24 ±0.12 a	5.96 ±0.11 a	5.66 ±0.11 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

2.2.3 不同轮作模式下的土壤 EC 土壤的电导率反映了土壤盐分的累积情况。表 6 结果显示,同一轮作模式下,三季作物 N1 和 N2 处理间 0—20 cm 土层土壤电导率并无显著性差异;对于相同施氮处理,不同轮作模式下三季作物收获后土壤电导率均表现为轮作模式 1 > 轮作模式 2。经过三季作物种植后,轮作模式 1 下的 N1、N2 处理土壤电导率分别为 1.03、0.94 mS/cm,而轮作模式 2 下 N1、N2 处理的土壤电导率仅为 0.72、0.69 mS/cm,土壤盐分累积分别减少 30.0% 和 26.6%。刘哈丽等[20]提出,菜地土壤电导率在 0.4 ~ 0.8 mS/cm 范围之内除少数极不耐盐作物外对大多数作物是安全的;0.81 ~ 1.20 mS/cm 的排水良好的温室土壤也在安全范围;1.21 ~ 1.60 mS/cm 为盐渍土,超过温室土壤的要求;1.61 ~ 3.20 mS/cm 为强盐渍土。按照这一指标衡量,一年三季作物种植后,各处理电导率均仍在 1.20 mS/cm 以下,基本不危害作物正常生长。但是,在农民习惯施氮水平下,仅仅经过一年蔬菜种植,土壤盐分就已经达到了 1.03 mS/cm,积累速率非常快,后续风险不容忽视。

表 6 不同轮作模式对土壤电导率(EC)的影响 (mS/cm)

Table 6 Effect of rotation patterns on soil electrical conductivity

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatment	芹菜/金花菜 Celery/Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce
模式 1 Pattern 1	N1	0.76 ±0.10 a	0.82 ±0.14 a	1.03 ±0.13 a
	N2	0.73 ±0.08 a	0.79 ±0.12 a	0.94 ±0.09 a
模式 2 Pattern 2	N1	0.41 ±0.08 b	0.56 ±0.09 b	0.72 ±0.08 b
	N2	0.36 ±0.05 b	0.44 ±0.12 b	0.69 ±0.13 b

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

2.3 不同轮作模式对蔬菜产量的影响

从表 7 可以看出,与农民习惯施氮处理(N1)相比,减量施氮处理(N2)可显著提高轮作模式 1 下一年三季作物产量,增产幅度分别为 10.4%、9.6% 和 3.6%;轮作模式 2 也表现出同样的增产趋势,三季作物可分别增产 13.5%、3.2% 和 5.5% 。从全年经济效益来看,在相同施氮处理下,轮作模式 2 的经济效益显著高于轮作模式 1,其中以轮作模式 2 + 减量施氮处理最高,达 51.9×10^4 Yuan/hm^2,与轮作模式 1 习惯施氮处理相比,可直接增加经济效益 11.7

表 7　不同生长季的蔬菜产量及经济效益

Table 7　Vegetable yields and economic benefit at the different growth season

轮作模式 Rotation pattern	处理 Treatment	产量 Yield(t/hm^2)			年经济效益 Economic benefit ($\times10^4$ Yuan/hm^2)
		芹菜/金花菜 Celery/Bur clover	番茄 Tomato	莴苣 Lettuce	
模式 1 Pattern 1	N1	89.5 ±8.2 b	67.9 ±7.1 b	53.2 ±2.1 b	40.2
	N2	98.8 ±2.1 a	74.4 ±3.2 a	55.1 ±2.8 a	43.8
模式 2 Pattern 2	N1	63.5 ±1.7 b	76.1 ±2.9 a	52.7 ±1.8 b	48.2
	N2	72.1 ±1.5 a	78.5 ±4.4 a	55.6 ±3.2 a	51.9

注(Note)：同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. 芹菜 1.5 Yuan/kg、金花菜 3.0 Yuan/kg、番茄 1.6 Yuan/kg、莴苣 1.2 Yuan/kg Prices of celery, burclover, tomato and lettuce are 1.5, 3.0, 1.6 and 1.2 Yuan/kg, respectively.

Yuan/hm^2，最大经济效益提高 29%。

3　讨论

3.1　不同轮作模式对设施菜地氮素淋洗的影响

太湖地区设施蔬菜主要种植模式为芹菜(冬季)—番茄(春季)—莴苣(秋季)轮作模式，常年氮肥用量超标，氮素淋失严重。不仅造成氮肥利用率降低，农业生产成本上升，还对水环境造成污染，引起水体富营养化。赵营等[21]通过田间定位实验，对宁夏引黄灌区番茄—黄瓜轮作体系氮淋洗研究表明，在同一施肥处理下，黄瓜季(秋季)氮素淋失量高于番茄季(春季)。与北方设施菜地淋洗特征相比，本试验结果表明，在氮淋失发生的作物茬口上，南方太湖地区设施菜地与北方设施菜地氮淋洗特征相似，也是莴苣季(秋季)氮素淋失量显著高于番茄季和芹菜季，农民习惯施肥下莴苣季总氮淋失量达到 52.4 kg/hm^2，占全年氮淋失的 40.4%。与北方设施菜地一年两季作物轮作不同的是，南方地区通常为一年三季作物轮作，短期的蔬菜生长期加之大量的肥料施用量导致土壤硝态氮迅速累积，土壤硝态氮淋失风险更加严重。

与传统轮作相比，合理优化轮作模式是提高氮肥利用率、降低土壤硝态氮淋失的有效措施[22]。徐永刚等[16]比较了沈阳地区设施蔬菜 3 种轮作模式，结果表明，在油菜—黄瓜—豇豆轮作模式下土壤 NO_3^--N 的淋移现象较弱，氮、磷的回收率也较高。改变轮作制度需要综合考虑粮食安全、农民收入与环境风险三方面的效益，在保证粮食安全和农民经济利益的前提下，同时考虑对环境的污染[23]。乔俊等[11]在太湖地区稻田轮作中选择紫云英—水稻轮作比当地传统的小麦—水稻轮作降低 120 kg/hm^2 投入，进而降低田面水中总氮的浓度，降低排入周围自然水体的氮量。汤秋香等[17]研究发现，蚕豆—水稻轮作模式比大蒜—水稻轮作模式减少氮素流失风险 38%。在本试验条件下，减量施氮处理可使轮作模式 1 和模式 2 下的总氮淋洗量降低 21.6% 和 19.3%。金花菜及豆科植物主要分布于江浙沪一带，需肥量少且经济价值较高。将轮作模式 1 下第一茬冬季蔬菜芹菜优化为金花菜，在农民习惯施氮处理上可直接降低氮肥投入 430 kg/hm^2，进而减少冬季总氮淋失 51.1%。与轮作模式 1 相比，轮作模式 2 可分别减少 N1 和 N2 处理下全年总氮淋失量 40%、38%，可见轮作模式对总氮淋失量的阻控效果更加显著。从经济效益上来看，若将芹菜-番茄-莴苣轮作模式改为金花菜—番茄—莴苣轮作模式，则全年可增加经济收入约 11.7 $\times10^4$ Yuan/hm^2。另外，研究表明，太湖地区设施菜地全年淋洗高峰发生在夏季休闲期，其中休闲期总氮淋洗量约占全年总氮淋洗量的 28%[24]。本试验未考虑不同轮作模式下休闲期氮素淋失，如何在夏季揭棚休闲期采取有力的阻控措施还有待进一步研究。

3.2　不同轮作模式对土壤理化性质的影响

土壤 NO_3^--N 含量与施氮量之间有一定的相关性，但由于土壤类型、种植年限、作物种类、气候条件等不同而存在一定的差异。在本试验条件下，不论是轮作模式 1 还是轮作模式 2，农民传统施氮处理(N1)下的土壤 NO_3^--N 含量均显著高于减量施氮处理(N2)，土壤 NO_3^--N 的累积随着施氮量的增加而增加，这与闵炬等[25]对江苏宜兴地区土壤养分研究的结果一致。一年三季作物收获后，减量施氮处

理在轮作模式1和轮作模式2中土壤硝态氮含量分别减少了17.7%、12.8%。不同作物对土壤次生盐渍化的改良效果不同,已有研究证实,合理的轮作措施能够改良设施菜地次生盐渍化。徐永刚等[16]比较了沈阳地区设施菜地3种轮作模式,结果表明,油菜—黄瓜—豇豆轮作模式下,土壤pH的变化幅度最小,其下层硝态氮的积累有明显的削减趋势。在本试验条件下,一年三季作物收获后,轮作模式1下土壤pH变化幅度较大,与种植前相比下降了1个单位,这是由于轮作模式1下全年氮肥投入高达1580 kg/hm^2,过量的氮肥投入导致土壤pH迅速下降。施毅超等[15]研究表明,不同轮作系统对设施菜地次生盐渍化的改良效果不同,在江苏宜兴地区设施蔬菜体系中,辣椒—白菜—辣椒轮作降低土壤EC效果优于蓖麻—白菜—蓖麻轮作。本试验研究表明,与芹菜-番茄-莴苣传统轮作相比,金花菜—番茄—莴苣轮作模式下土壤硝态氮累积较低,N1、N2处理下土壤硝态氮含量分别降低29.7%、25.6%,而土壤电导率降幅分别达到30%和26.6%。主要原因是金花菜属于豆科植物,固氮能力较强;另外,与芹菜相比,金花菜氮肥投入较低,轮作模式2减少了冬季化学氮肥的直接投入量。

4 结论

1)在保证菜农经济效益的基础上,通过选择氮肥投入较少的作物进行合理优化轮作,从源头上减少设施菜地全年的氮肥投入。与轮作模式1(芹菜-番茄-莴苣)相比,N1和N2处理下轮作模式2(金花菜—番茄—莴苣)全年氮肥投入分别减少了430 kg/hm^2、350 kg/hm^2,进而减少全年总氮淋洗量41%和38%。在轮作模式2下,N1和N2处理淋洗液中NO_3^--N平均浓度可分别降低36.2%和38.1%,但并不减少淋洗液体积。各处理中以轮作模式2结合减氮处理措施对设施菜地氮素淋失阻控效果最佳,全年总氮淋失量仅为63.0 kg/hm^2,而年经济效益却最高,可达到51.9×10^4 Yuan/hm^2,最大经济效益提高29%。

2)不同轮作模式下土壤硝态氮累积效果存在差异。经过一年三季作物种植后,与芹菜-番茄-莴苣轮作模式相比,金花菜—番茄—莴苣轮作模式下的土壤硝态氮累积较低,其N1、N2处理下土壤硝态氮含量分别减少了29.7%和25.6%,pH和土壤电导率($P<0.05$)也显著降低。

参考文献:

[1] Song X Z, Zhao C X, Wang X L *et al*. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in northern China[J]. Comp. Rend. Biol., 2009, 332: 385-392.

[2] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2009, 83: 73-84.

[3] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 5-10.
Huang D F, Wang G, Li W H *et al*. Effects of different kinds of fertilization modes on yield, nitrate's content of vegetable and loss of nitrogen and phosphorus in vegetable field[J]. J. Soil Water Conserv., 2008, 22(5): 5-10.

[4] Ju M, Xu Z, Shi W M *et al*. Nitrogen balance and losses in a greenhouse vegetable system in southeastern China [J]. Pedosphere, 2011, 21(4): 464-472.

[5] Thorup-kristensen K, Magid J, Jensen L S. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones[J]. Adv. Agron., 2003, 79: 227-302.

[6] Min J, Shi W, Xing G *et al*. Effects of a catch crop and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching in greenhouse vegetable production systems[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2011, 91(1): 31-39.

[7] 俞巧钢, 陈英旭, 张秋玲, 等. DMPP对菜地土壤氮素淋失的影响研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 40-43.
Yu Q G, Chen Y X, Zhang Q L *et al*. Effect of DMPP on inorganic nirtogrn leaching loss from vegetable soil[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(4): 40-43.

[8] 赵言文, 刘常珍, 胡正义, 等. 元素硫和双氰胺对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 496-500.
Zhao Y W, Liu C Z, Hu Z Y *et al*. Effects of elemental sulphur and dicyandiamide on mitigating NO_3^--N leaching loss from vegetable soil[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(3): 496-500.

[9] 何传龙, 马有华, 于红梅, 等. 减量施肥对保护地土壤养分淋失及番茄产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 846-851.
He C L, Ma Y H, Yu H M *et al*. Effect of reducing fertilizer application on soil nutrient leaching loss and tomato yield in plastic house[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(4): 846-851.

[10] Guo R Y, Li X L, Christie P. Influence of root zone nitrogen management and a summer catch crop on cucumber yield and soilmineral nitrogen dynamics in intensive production systems [J]. Plant Soil, 2008, 313: 55-70.

[11] 乔俊, 颜廷梅, 薛峰, 等. 太湖地区稻田不同轮作制度下的氮肥减量研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 24-31.
Qiao J, Yan T M, Xue F *et al*. Reduction of nitrogen fertilizer application under different crop rotation systems in paddy fields of

Taihu Area[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2011, 19(1): 24-31.

[12] 田舜，王志刚，卜义霞，等. 黑麦草-水稻种植模式生态经济评价[J]. 农业现代化研究，2006，27(5)：380-382.
Tian S, Wang Z G, Bu Y X *et al*. Ecologic and economic evaluation of ryegrass-rice cropping system[J]. Reas. Agric. Modern, 2006, 27(5): 380-382.

[13] 李承力，杨特武，徐军驰，等. 丹江口库区坡耕地不同轮作模式作物生产力及农田养分流失比较[J]. 水土保持学报，2011，25(4)：83-87.
Li C L, Yang T W, Xu J C *et al*. Crop productivity and comparison of farmland nutrient loss in different crop patterns on slope land in danjiangkou reservoir area[J]. J. Soil Water Conserv., 2011, 25(4): 83-87.

[14] 陈先茂，彭春瑞，关贤交，等. 红壤旱地不同轮作模式的效益及其对土壤质量的影响[J]. 江西农业学报，2009，21(6)：75-77.
Chen X M, Peng C R, Guan X J *et al*. Benefit of different crop rotation modes and their effects on quality of red- yellow dry soil [J]. Acta Agric. Jiangxi, 2009, 21(6): 75-77.

[15] 施毅超，胡正义，龙为国，等. 轮作对设施蔬菜大棚中次生盐渍化土壤盐分离子累积的影响[J]. 中国生态农业学报，2011，19(3)：548-553.
Shi Y C, Hu Z Y, Long W G *et al*. Effect of crop rotation on ion accumulation in secondary salinization soil of vegetable field in greenhouse[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2011,19(3): 548-553.

[16] 徐永刚，宇万太，马强，等. 不同轮作模式下土壤氮磷淋移和蔬菜硝酸盐、亚硝酸盐积累[J]. 生态学杂志，2011，30(6)：1107-1113.
Xu Y G, Yu W T, Ma Q *et al*. Soil nitrogen and phosphorus downward translocation and vegetable nitrate and nitrite accumulation under effects of different rotation regime[J]. Chin. J. Ecol., 2011, 30(6):1107-1113.

[17] 汤秋香，任天志，雷宝坤，等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特性研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(3)：608-615.
Tang Q X, Ren T Z, Lei B K *et al*. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation systems in northern watershed of Erhai Lake[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(3): 608-615.

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000. 107-240.
Lu R K. The analytical methods for soil and agro chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 107-240.

[19] 闵炬，施卫明，王俊儒，等. 介绍一种采集大棚土壤渗漏水的装置[J]. 土壤，2007，39(6)：1009-1011.
Min J, Shi W M, Wang J R *et al*. A new installation for collect seepage of greenhouse soil[J]. Soils, 2007, 39(6): 1009-1011.

[20] 刘哈丽. 测土施肥技术与瓜果蔬菜施肥技术[M]. 上海：化工部上海化工研究院，1987.
Liu H L. Fertilization technology for soil testing and fruits and vegetables[M]. Shanghai: Shanghai Chemical Industry Research Institute, Ministry of Chemical Industry, 1987.

[21] 赵营，张学军，罗健航，等. 施肥对设施番茄-黄瓜养分利用与土壤氮素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(2)：374-383.
Zhao Y, Zhang X J, Luo J H *et al*. Effect of fertilization on nitrogen leaching loss from soil and nutrients utilization by tomato and cucumber in greenhouse[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(2): 374-383.

[22] Kayser M, Müller J, Isselstein J. Nitrogen management in organic farming: comparison of crop rotation residual effects on yields, N leaching and soil conditions[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2010, 87: 21-31.

[23] 陈鸿飞，杨东，梁义元，等. 头季稻氮肥运筹对再生稻干物质积累、产量及氮素利用率的影响[J]. 中国生态农业学报，2010，18(1)：50-56.
Chen H F, Yang D, Liang Y Y *et al*. Effect of nitrogen application strategy in the first cropping rice on dry matter accumulation, grain yield and nitrogen utilization efficiency of the first cropping rice and its ratio on rice crop[J]. Chin. J. Eco-Agric. 2010, 18(1): 50-56.

[24] 陆扣萍，闵炬，李蒙，等. 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报，2012，34(1)：706-712.
Lu K P, Min J, Li M *et al*. Effect of nitrogen fertilizer application rates on annual nitrogen leaching loss from protected vegetable production system in Taihu Lake region[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2012, 34(1): 706-712.

[25] 闵炬，施卫明. 不同施氮水平对大棚蔬菜氮磷钾养分吸收及土壤养分含量的影响[J]. 土壤，2008，40(2)：226-231.
Min J, Shi W M. Effects of N fertilizer application rate on vegetable N,P,K uptake and soil nutrient content in greenhouse [J]. Soil, 2008, 40(2): 226-231.