

# 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素淋失的影响

陆扣萍<sup>1,2,3</sup>, 闵 炬<sup>3</sup>, 李 蒙<sup>4</sup>, 施卫明<sup>3</sup>, 谢寅峰<sup>4</sup>

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 3. 中国科学院南京土壤研究所面源污染治理技术研发中心, 南京 210008; 4. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘 要:**采用田间小区试验,研究了太湖地区设施菜地一年三季作物(番茄-茼蒿-芹菜)氮素淋失特征。结果表明:太湖地区设施菜地氮淋失以  $\text{NO}_3^-$ -N 为主,氮素淋洗量受施氮量的直接影响,以农民习惯施氮量(N5)处理下的淋洗总量最高,全年 TN 淋失总量高达  $193.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在 N5 基础上减施 N 40%(N3)可分别减少番茄、茼蒿和芹菜季 TN 淋洗损失 40.4%、49.2%和 57.5%,同时可分别增产 15.1%、39.0%和 27.8%。设施菜地氮素淋洗高峰发生在揭棚期(7—11 月),其中包括揭棚休闲期和茼蒿生长前期。揭棚期淋洗液 TN 平均浓度为  $51.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,是盖棚期 TN 浓度的 1.7 倍;TN 淋洗量为  $129.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,约占全年总氮淋洗量的 66.7%。

**关键词:**太湖地区;设施菜地;氮;淋失

**中图分类号:**X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0706-07

## Effect of Nitrogen Fertilizer Application Rates on Annual Nitrogen Leaching Loss from Protected Vegetable Production System in Tai Lake Region, China

LU Kou-ping<sup>1,2,3</sup>, MIN Ju<sup>3</sup>, LI Meng<sup>4</sup>, SHI Wei-ming<sup>3</sup>, XIE Yin-feng<sup>4</sup>

(1.College of Environment and Resources, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Lin'an Zhejiang 311300, China; 2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University Lin'an, Zhejiang 311300, China ; 3.Research Center of Non-point Source Pollution Control, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4.College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to evaluate the effect of nitrogen(N) fertilizer application rates on N leaching loss from protected vegetable soil in Tai Lake region, China. Five N treatments, including N1(no fertilizer), N5(conventional N application rate at  $1560 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), N2(at 40% of N5 the N rate), N3(at 60% of the N5 N rate), and N4(at 75% of the N5 N rate), were applied to a tomato, lettuce and celery rotation, a typical protected vegetable cropping system in the region. It was found that the main form of the N leached was nitrate-N, and the leaching loss increased with the N rates. The highest annual total N leaching loss at  $193.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  occurred in the N5 treatment. Compared with the N5 treatment, the N leaching loss in the N3 treatment reduced by 40%, 49% and 58%, and yield increased by 15%, 39% and 28%, in the tomato, lettuce and celery season, respectively. The leaching loss of N peaked in the open period, from July to November when the plastic cover was removed and the soil was subject to rainfall, including fallow period and early stage of lettuce. The average total N concentration in the leachate was  $51.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  during the open period, which was 1.7 times greater than that in the covered period. The total N leaching loss was  $129.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  in the open period, which accounted for 67% of the total annual loss. Our results demonstrate that the technique of reducing N fertilizer application rate can greatly minimize the environmental risk of N loss from protected vegetable field without any negative effect on vegetable yields. The fallow period should be the most critical period for controlling the total N leaching loss.

**Keywords:** Tai Lake region; protected vegetable ; nitrogen; leaching loss

收稿日期:2011-10-12

**基金项目:**公益性行业(农业)科研专项(201003014-1);国家科技重大专项“水体污染控制与治理”湖泊主题太湖项目课题:闸控入湖河流直湖港及小流域污染控制技术工程示范(2008ZX07101-005)

**作者简介:**陆扣萍(1985—),女,江苏扬州人,硕士,主要从事蔬菜氮素营养生理与环境效应的研究。E-mail:kkping111@163.com

太湖流域是我国农业最发达的地区之一,设施栽培特别是设施蔬菜栽培面积增长迅速,蔬菜生产的施肥环节出现了诸多问题,尤其是氮肥过量施用现象普遍<sup>[1-3]</sup>。农民传统的大水大肥水肥管理模式,造成土体中硝酸盐的淋洗,同时导致地下水硝酸盐富集,带来了一系列环境问题<sup>[4-5]</sup>。

目前,国内外在土壤水肥淋失方面的研究较多,但这些研究多集中在粮食作物<sup>[6-9]</sup>,对旱作农田中蔬菜地尤其是南方地区设施菜地土壤硝态氮淋洗方面研究相对较少。收集分析淋洗液的研究表明,在山东寿光的设施菜地表层 1 m 土体内硝酸盐的淋失量达到 152~347 kgN·hm<sup>-2</sup>,与当地地下水污染直接相关<sup>[10]</sup>;何传龙等<sup>[11]</sup>在巢湖沿岸的设施菜地对番茄生长期土壤剖面硝态氮含量的变化研究表明,改进减量施肥技术可使番茄 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量减少 65.7%;王吉莘等<sup>[12]</sup>通过 GLEAMS 模型对我国东南亚热带地区农业小流域的研究结果表明,菜地硝态氮淋失峰值出现在降雨量和强度均较大的 7、8 月份。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,因而难以准确反映设施菜地的氮淋失特征。

由于降雨和地下水位等气候水文特征的显著差异,不同地区设施菜地的氮淋失特点也不尽相同。太湖流域多为水网地区,大多数新增的菜地是由几十年种植历史的稻田改变而来,且设施蔬菜地大多靠近河道,N 污染物进入水体的路径较短,加之设施蔬菜需肥量大、复种指数高等特点,可能引起的氮污染风险更为严重。目前,针对太湖流域稻田氮淋洗排放规律已有大量研究<sup>[13-14]</sup>,但设施菜地淋洗排放规律仍不清楚,从而导致对设施菜地氮排放的控制针对性弱。因此,本文以太湖地区设施菜地作为研究对象,观测设施菜地一周年的氮素淋洗特征,以期合理施用氮肥、保护农业生态环境提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地及供试材料

试验于 2010 年 4 月至 2011 年 4 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℃,全年平均雨日 136 d,日降雨量 ≥ 50 mm 的暴雨每年 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。多年平均降雨量为 1 000~

1 200 mm,本试验观测期间(2010 年 4 月至 2011 年 4 月),全年降雨量为 1 120 mm,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)。

试验地耕层土壤(0~20 cm)原来属于太湖地区典型的水稻土,已改种蔬菜 3 a。质地为黏土,土壤 pH 值为 6.09,电导率 0.19 mS·cm<sup>-1</sup>,有机质 27.9 g·kg<sup>-1</sup>,全 N 1.06 g·kg<sup>-1</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 35.0 mg·kg<sup>-1</sup>,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 1.07 mg·kg<sup>-1</sup>,速效 P 199.8 mg·kg<sup>-1</sup>,速效 K 148.4 mg·kg<sup>-1</sup>。

供试番茄(*Lycopersicon 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,7 月 25 日收获完毕。供试莴苣(*Lactuca sativa* 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。供试芹菜(*Apium graveolens*)为四季西芹,于 2010 年 10 月 20 日播种育苗,2011 年 1 月 3 日移栽定植,4 月 25 日收获完毕。

### 1.2 试验处理及田间管理

试验共设 6 个处理。N0:对照处理,不施肥。N1:仅施有机肥,不施化肥氮和磷钾肥。N2:番茄、莴苣、芹菜施化肥氮量分别为 160、208、256 kg·hm<sup>-2</sup>。N3:番茄、莴苣、芹菜施化肥氮量分别为 240、312、384 kg·hm<sup>-2</sup>。N4:番茄、莴苣、芹菜施化肥氮量分别为 300、390、480 kg·hm<sup>-2</sup>。N5:习惯施化肥氮处理,根据试验区农户的习惯施化肥氮量确定,番茄、莴苣、芹菜施化肥氮量分别为 400、520、640 kg·hm<sup>-2</sup>。

氮肥施用普通尿素,采用 1 次基肥 2 次追肥,分别按 50%、30%和 20%的比例施用。各处理(N1 至 N5)P、K 肥和有机肥用量相同,P 肥和有机肥用量作底肥一次施入,K 肥采用 1 次基肥 1 次追肥,分别按 50%和 50%的比例施用。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;芹菜于 2011 年 1 月 2 日施基肥,2 月 24 日和 3 月 21 日追肥。有机肥(含氮量为 2% 的鸡粪)、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 12%)和钾肥(K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量 50%)施用量分别为 70 kg N·hm<sup>-2</sup>、120 kgP·hm<sup>-2</sup>和 150 kgK·hm<sup>-2</sup>。

小区面积为 2.5 m × 7.5 m,重复 3 次,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,以防各小区相互间的养分流动。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。灌溉水为试验区附近河水,全年灌溉量为 380 mm。

### 1.3 样品采集及项目测定

番茄、茼蒿和芹菜可食部分以每小区全部称重计产。淋洗液收集装置<sup>[5]</sup>于 2009 年 6 月埋入各处理小区,使其与土壤很好地结合。由于当地地下水位高,经常在 80~120 cm 范围波动,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渗漏水,收集面表面积为 0.47 m<sup>2</sup>。每 7~10 d 取一次水样,每次取样将装置中淋洗液抽净,同时测量淋洗液体积。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。

土壤理化性质的测定<sup>[6]</sup>:有机质采用外加热重铬酸钾氧化-容量法测定;全氮用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,自动定氮仪(BÜCHI 399)测定;速效氮采用 1 mol·L<sup>-1</sup> KCl 溶液浸提,浸提液用紫外分光光度计进行测定;速效磷采用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1.0 mol·L<sup>-1</sup> 的 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰分光光度法测定;pH 值测定水土比为 2.5:1,用 pH 计(pH 211 型)测定;电导率测定水土比为 5:1,采用 DDS-320 型电导仪测定。

### 1.4 淋失总量的计算

数据用 Excel 2007、SPSS 13.0 等统计分析软件进行统计分析。有关参数计算式如下:

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

式中: $\omega$ (待测物)为待研究物质淋失总量,kg·hm<sup>-2</sup>; $\rho$ 为淋洗液中待研究物质含量,mg·L<sup>-1</sup>; $V$ 为淋洗液总体积,L; $S$ 为收集表面积,m<sup>2</sup>; $t$ 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<sup>2</sup> 换

算成 hm<sup>2</sup> 的系数。

## 2 结果分析

### 2.1 农民习惯施肥下氮的淋失

#### 2.1.1 淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 浓度的动态变化

农民习惯施肥处理下的 NO<sub>3</sub>-N 浓度的动态变化见图 1。番茄生长季从 4 月 10 日移栽至 6 月 13 日,土壤淋洗液中的 NO<sub>3</sub>-N 浓度在 31.6~54.4 mg·L<sup>-1</sup> 之间,随后有明显的下降趋势,到 7 月 20 日番茄收获完毕,NO<sub>3</sub>-N 浓度降至 10.8 mg·L<sup>-1</sup>。番茄收获后揭棚,淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 浓度快速上升,至 8 月 19 日淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 浓度达到最高,为 95.5 mg·L<sup>-1</sup>。11 月 2 日盖棚,淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 浓度开始下降,12 月 15 日茼蒿收获后,淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 浓度较低,为 12.2 mg·L<sup>-1</sup>。与番茄季和茼蒿季淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 浓度相比,芹菜季淋洗液浓度整体水平较低,在 11.0~29.2 mg·L<sup>-1</sup> 之间,平均为 20.4 mg·L<sup>-1</sup>。

#### 2.1.2 不同生长季淋洗液养分浓度的差异

表 1 表明,设施菜地全年各生长季中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均浓度在 0.06~0.10 mg·L<sup>-1</sup>,对水体污染影响较低。一年三季作物番茄、茼蒿、芹菜相比,淋洗液中的 NO<sub>3</sub>-N 浓度表现为番茄季最高,茼蒿季次之,芹菜季最低。番茄季淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度达到 39.2 mg·L<sup>-1</sup>,而芹菜季 NO<sub>3</sub>-N 浓度平均仅为 20.4 mg·L<sup>-1</sup>。对于一周不同时期的 NO<sub>3</sub>-N 平均浓度,以休闲期最高,在 51.2~95.5 mg·L<sup>-1</sup> 范围内,平均为 70.7 mg·L<sup>-1</sup>;同样,休闲期淋洗液中 TN 平均浓度显著高于其他生长季,分别是番茄、茼蒿、芹菜季的 1.7、2.5、3.3 倍。

值得注意的是,在设施菜地休闲期,即使没有任何肥料氮投入,在农民习惯施肥处理下,NO<sub>3</sub>-N、TN

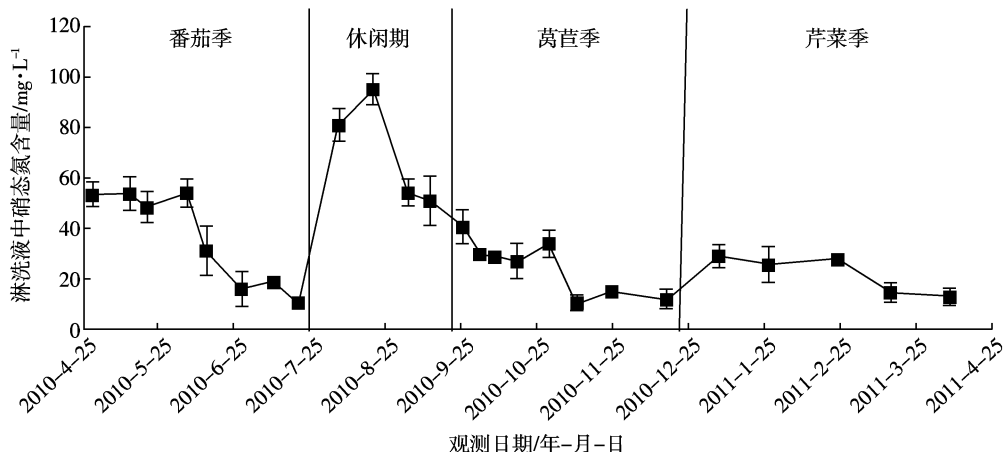


图 1 农民习惯施氮量下淋洗液中 NO<sub>3</sub>-N 动态变化

Figure 1 Dynamic changes of NO<sub>3</sub>-N under the farmer habitual N usage

浓度均达到全年最高,分别为 95.5、101.4 mg·L<sup>-1</sup>。因此,夏季揭棚休闲期有可能成为我国南方设施菜地土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失的重要时期。

2.1.3 不同生长季氮淋洗总量

设施菜地不同生长季氮淋洗总量与淋洗液体积见表 2。由表 2 可知,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋失仅占 TN 淋失量的 0.04%~0.29%,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋洗损失极低,可以忽略不计。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋洗量在不同生长季占 TN 淋洗量的 89.0%~98.9%,是设施菜地氮淋洗排放的主要形态,其排放规律也因生长季不同而异。茼蒿、番茄、芹菜生长季降雨量分别为 316、220、91 mm,各生长季淋失总量表现为茼蒿季>休闲期>番茄季>芹菜季,淋洗液体积与淋失总量变化趋势一致。芹菜生长季施用氮肥的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 当季淋失量较低,为 14.3 kg·hm<sup>-2</sup>;而茼蒿生长季施用

氮肥的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 当季淋失量较高,达到 78.9 kg·hm<sup>-2</sup>。由于茼蒿生长前期未盖棚,遇雨水淋洗后导致氮淋失量较高。番茄、茼蒿、芹菜生长期 TN 淋失总量分别占全年淋失总损失的 19.0%、44.8%、8.1%。由于夏季气温较高揭棚晒田,休闲期未种植蔬菜作物,土壤硝态氮累积量较高,又遭遇频繁强降雨,导致大量的氮素流失,休闲期降雨量 493 mm,TN 淋洗总量达到 54.6 kg·hm<sup>-2</sup>,值得关注。

2.1.4 揭棚期 TN 淋失量

由表 3 可知,高淋洗发生的揭棚期,其 TN 淋洗浓度、淋洗液体积和降雨量均显著高于盖棚期。揭棚期淋洗液 TN 浓度为 27.8~101.4 mg·L<sup>-1</sup>,平均为 51.1 mg·L<sup>-1</sup>,而盖棚期 TN 平均浓度为 30.0 mg·L<sup>-1</sup>,揭棚期 TN 浓度约是盖棚期的 1.7 倍。设施菜地全年收集到

表 1 农民习惯施氮量下不同生长季淋洗液氮浓度

Table 1 Concentration of N and P leaching in different growth period under the farmer habitual N usage

| 浓度/mg·L <sup>-1</sup>           |     | 番茄(2010.04.15—07.25) | 休闲期(2010.07.26—09.16) | 茼蒿(2010.09.17—12.20) | 芹菜(2011.01.03—04.25) |
|---------------------------------|-----|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | 平均值 | 39.2±17.0b           | 70.7±21.4a            | 23.8±9.4c            | 20.4±5.2c            |
|                                 | 最大值 | 54.4±5.4b            | 95.5±2.3a             | 34.2±1.8c            | 29.2±2.3cd           |
|                                 | 最小值 | 10.8±0.8a            | 11.0±0.4a             | 10.9±1.4a            | 11.0±3.7a            |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | 平均值 | 0.06±0.01b           | 0.10±0.01a            | 0.06±0.03b           | 0.09±0.05a           |
|                                 | 最大值 | 0.14±0.06b           | 0.28±0.03a            | 0.12±0.03b           | 0.26±0.06a           |
|                                 | 最小值 | 0                    | 0                     | 0                    | 0                    |
| TN                              | 平均值 | 39.6±17.1b           | 73.3±22.5a            | 29.7±3.6b            | 22.4±3.4c            |
|                                 | 最大值 | 55.0±5.2b            | 101.4±3.3a            | 35.4±1.9c            | 31.9±3.2c            |
|                                 | 最小值 | 11.0±0.4c            | 54.9±2.0a             | 24.0±1.6b            | 11.7±2.5c            |

注:同行不同字母表示 N5 处理下的不同生长期氮浓度在 P<0.05 水平下差异显著。

表 2 农民习惯施氮量下不同生长季氮淋洗量

Table 2 Amounts of N and P leached from different growth period under the farmer conventional N usage

| 生长季                   | TN                      | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N |           | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N |           | 淋洗液体积/<br>mm | 降雨量/<br>mm |
|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|--------------|------------|
|                       | 淋洗量/kg·hm <sup>-2</sup> | 淋洗量/kg·hm <sup>-2</sup>         | 占 TN 淋洗/% | 淋洗量/kg·hm <sup>-2</sup>         | 占 TN 淋洗/% |              |            |
| 番茄(2010.04.15—07.25)  | 36.8±2.3c               | 36.4±2.4c                       | 98.9      | 0.04±0.01b                      | 0.11      | 114±6c       | 210        |
| 休闲期(2010.07.26—09.16) | 54.6±1.5b               | 48.6±1.6b                       | 89.0      | 0.02±0.01b                      | 0.04      | 327±10b      | 493        |
| 茼蒿(2010.09.17—12.20)  | 86.6±3.5a               | 78.9±6.5a                       | 91.1      | 0.25±0.03a                      | 0.29      | 405±8a       | 326        |
| 芹菜(2011.01.03—04.25)  | 15.6±2.1d               | 14.3±1.5d                       | 91.7      | 0.02±0.01b                      | 0.13      | 89±12d       | 91         |

注:同列不同字母表示 N5 处理下的不同生长期淋洗量、淋洗液体积在 P<0.05 水平下差异显著。

表 3 农民习惯施氮量下揭棚期 TN 淋失量

Table 3 Concentration of TN leaching under the farmer habitual N usage

| 时期                                          | TN 浓度/mg·L <sup>-1</sup> |           |          | 淋洗液体积/<br>mm | 降雨量/<br>mm | TN 淋洗总量/<br>kg·hm <sup>-2</sup> |
|---------------------------------------------|--------------------------|-----------|----------|--------------|------------|---------------------------------|
|                                             | 平均值                      | 最大值       | 最小值      |              |            |                                 |
| 揭棚期(2010.07.26—11.02)                       | 51.1±25.5                | 101.4±3.3 | 27.8±2.0 | 647          | 718        | 129.2                           |
| 盖棚期(2010.04.15—07.25、2010.11.03—2011.04.25) | 30.0±14.9                | 55.0±5.2  | 11.0±0.4 | 289          | 402        | 64.4                            |
| 全年(2010.04.15—2011.04.25)                   | 37.3±21.0                | 101.4±3.3 | 11.0±0.4 | 935          | 1 120      | 193.6                           |

的淋洗液体积为 935 mm, 其中揭棚期淋洗液体积为 647 mm, 占全年淋洗液体积的 69.2%; 揭棚期降雨量为 718 mm, 占全年降雨量的 64.1%; 揭棚期 TN 淋洗总量高达 129.2 kg·hm<sup>-2</sup>, 占设施菜地全年淋洗总量的 66.7%。揭棚期淋洗液体积和淋洗总量分别达到盖棚期的 2.2 倍和 2 倍。

## 2.2 不同施氮量对设施菜地氮淋失的影响

### 2.2.1 施氮量对氮淋失总量和作物产量的影响

表 4 表明, 一年三季作物番茄、茼蒿和芹菜生长季的 NO<sub>3</sub>-N、TN 淋失总量均表现为 N5>N4>N3>N2>N1>N0。与不施肥对照(N0)处理相比, 有机肥的施用(N1 处理)增加了 NO<sub>3</sub>-N 和 TN 的淋失总量, 番茄、茼蒿、芹菜生长季分别增加了 77.4%、78.2%、96.1%(NO<sub>3</sub>-N)和 44.0%、81.7%、55.7%(TN)。与农民习惯施氮处理(N5)相比, 随着施氮量的减少, 氮素淋洗损失显著降低, 番茄季 N4、N3、N2 处理 TN 淋失总量分别减少了 25.9%、40.4%和 59.6%; 茼蒿季减少了 25.7%、49.2%、71.2%; 芹菜季减少了 36.5%、57.4 和 80.4%。随着氮肥投入的减少, 一年三季作物产量未出现减产, 反而有不同幅度增产, 其中以 N3 处理增产效果尤为显著,

与 N5 处理相比, 番茄、茼蒿、芹菜分别增产 15.1%、39.0%和 27.8%。这是由于当氮肥施用过量, 达到产量增加的潜力限度时, 作物过多吸收的养分不仅没有转换成产量, 反而不利于作物生长, 出现产量下降, 同时也造成养分浪费, 这与闵炬等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。

### 2.2.2 施氮量对设施菜地全年氮淋失总量的影响

表 5 列出了不同施氮水平下设施菜地全年 TN 淋失总量。由表中数据可知, 有机肥处理(N1)TN 的淋失量为 13.4 kg·hm<sup>-2</sup>, 占施入氮量的 13.1%。TN 的淋失量与氮肥的施用量存在正相关。随着氮肥投入的增加, TN 的淋失量随之显著增加, 各处理间达到显著差异( $P<0.05$ ), 农民习惯处理下 TN 淋失量最高, 达到 193.6 kg·hm<sup>-2</sup>。在试验供氮范围(N2~N5)内, 表观化肥氮来源的 TN 淋洗损失占施氮量的 3.0%~10.7%。农民习惯施氮(N5)处理下来自表观化肥氮的 TN 淋失量最高, 为 166.6 kg·hm<sup>-2</sup>, 淋洗损失高达施氮量的 10.7%。而 N3 处理下的 TN 淋失量仅占施氮总量的 6.1%, 与 N5 相比, 淋洗损失减少了约一半。

表 5 不同施氮量对总氮淋失的影响

Table 5 Effect of TN leaching under different nitrogen fertilizer

| 处理 | 总化氮<br>投入/kg·hm <sup>-2</sup> | TN 淋失量/<br>kg·hm <sup>-2</sup> | 表观化肥氮来源<br>TN 淋失量/kg·hm <sup>-2</sup> | 淋失化肥氮占施<br>氮量百分比/% |
|----|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| N0 | 0                             | 13.6±0.8f                      | —                                     | —                  |
| N1 | 102                           | 27.0±1.4e                      | 13.4±1.5d                             | 13.1±1.8a          |
| N2 | 624                           | 45.8±4.3d                      | 18.8±2.5d                             | 3.0±1.0c           |
| N3 | 936                           | 84.4±9.6c                      | 57.4±9.2c                             | 6.1±2.3b           |
| N4 | 1 170                         | 144.2±9.1b                     | 117.2±7.3b                            | 10.0±4.5ab         |
| N5 | 1 560                         | 193.6±14.5a                    | 166.6±14.2a                           | 10.7±3.8a          |

表 4 施氮量对不同生长季氮淋失总量和作物产量的影响

Table 4 Effect of NO<sub>3</sub>-N / TN / TP in different growth period under different N rate

| 生长期                       | 处理 | 产量/t·hm <sup>-2</sup> | NO <sub>3</sub> -N/kg·hm <sup>-2</sup> | TN/kg·hm <sup>-2</sup> |
|---------------------------|----|-----------------------|----------------------------------------|------------------------|
| 番茄<br>(2010.04.15—07.25)  | N0 | 41.7±3.7cd            | 2.5±0.1d                               | 3.9±0.1d               |
|                           | N1 | 59.4±7.1c             | 4.3±0.1d                               | 5.7±0.9d               |
|                           | N2 | 77.2±3.2b             | 13.7±0.5c                              | 14.8±0.5c              |
|                           | N3 | 82.1±2.9a             | 21.0±0.3bc                             | 21.9±0.6bc             |
|                           | N4 | 75.3±8.2b             | 26.2±1.3b                              | 27.3±1.3b              |
| 茼蒿季<br>(2010.09.17—12.20) | N5 | 71.3±7.1bc            | 36.4±2.4a                              | 36.8±2.3a              |
|                           | N0 | 39.2±4.4d             | 5.3±0.5e                               | 13.2±0.9e              |
|                           | N1 | 49.8±4.9c             | 9.4±0.5e                               | 24.0±0.8e              |
|                           | N2 | 68.7±4.8b             | 20.6±1.6d                              | 49.9±3.9d              |
|                           | N3 | 84.9±2.9a             | 35.3±0.8c                              | 88.1±0.6c              |
| 芹菜季<br>(2011.01.03—04.25) | N4 | 75.5±2.1b             | 58.8±5.9b                              | 64.3±6.0b              |
|                           | N5 | 61.1±1.2bc            | 78.9±6.5a                              | 86.6±3.5a              |
|                           | N0 | 38.9±2.0f             | 0.4±0.1e                               | 0.8±0.2e               |
|                           | N1 | 55.6±2.1e             | 0.7±0.3e                               | 1.3±0.3e               |
|                           | N2 | 90.7±1.8cd            | 2.5±0.6d                               | 3.1±0.6d               |
|                           | N3 | 111.4±1.7a            | 5.7±2.4c                               | 6.7±2.4c               |
|                           | N4 | 103.4±2.7b            | 9.1±1.6b                               | 9.9±3.7b               |
|                           | N5 | 87.2±1.5d             | 14.3±1.5a                              | 15.6±2.1a              |

注: 同列不同字母表示不同氮肥处理的同一生长期生物量、淋洗量在  $P<0.05$  水平下差异显著, 表 5 同。

## 3 讨论

### 3.1 太湖地区设施菜地与稻田氮淋失的比较

不同土地利用类型导致土壤氮淋洗差异较大。已有研究表明<sup>[13]</sup>, 在太湖地区稻-麦轮作体系中, 全年总氮淋洗量为 11.75 kg·hm<sup>-2</sup>, 稻季淋洗损失的氮仅占施氮量的 0.3%, 麦季淋洗损失的氮占施氮量的 5%, 淋洗高峰主要发生在冬季小麦季节, 夏季淋洗风险较低。在本试验条件下, 南方太湖地区农民习惯施氮量下设施菜地一周年 TN 淋洗量为 193.6 kg·hm<sup>-2</sup>, 全年淋洗氮损失占施氮量的 21.4%, 远远高于同一地区稻-麦轮作氮淋失量。与稻-麦轮作体系淋洗规律明显不同的是, 太湖地区设施菜地一周年淋洗高峰主要发生在揭棚期, 包括揭棚休闲期和茼蒿生长前期, 揭棚期 TN 淋洗达到全年淋失量的 66.7%, 而冬季淋

洗则较低,冬季芹菜地下40 cm的淋洗液硝态氮浓度平均为 $20.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,淋失总量为 $14.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,仅占全年淋失量的8.1%。

已有研究表明, $\text{NO}_3^-$ -N淋洗量与施N量有直接的关系<sup>[8]</sup>,土壤N素残留量愈高, $\text{NO}_3^-$ -N的淋洗风险愈大。跟一般农田相似,设施菜地氮淋失量也与施氮量呈正相关,施氮量愈多,淋失量愈大。蔬菜与大田作物相比,施肥及灌溉强度更大,造成土壤养分淋失也更加严重。太湖地区稻-麦轮作体系中全年施氮量为 $550 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,Shi et al<sup>[10]</sup>报导太湖地区设施菜地一年三季作物总氮投入达到 $900 \sim 1\,300 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而在本试验条件下,全年施氮量达到 $1\,770 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$ (有机氮投入 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),是稻田氮肥投入的3倍。氮肥的过量投入导致蔬菜地 $\text{NO}_3^-$ -N残留量迅速增加,提高了 $\text{NO}_3^-$ -N的淋洗风险。

合理的氮肥施用,不但不影响作物的产量,相反可提高作物的氮肥利用率,从而减少土壤表面硝态氮的残留,淋洗风险也随之降低。邱卫国等<sup>[6]</sup>对上海黄浦区水稻氮素淋洗研究表明,在化肥用量减少20%~30%的情况下,稻作期氮素淋失量可减少19.4%~25.9%,且对水稻产量没有影响。本试验条件下,在农民习惯施氮处理(N5)上减少40%氮肥投入,可使番茄、茼蒿和芹菜分别增产15.1%、39.0%和27.8%,同时分别减少TN淋洗40.4%、49.2%和57.5%。与稻田相比,源头减氮措施对于减少设施菜地氮素淋洗损失的效果更优。

### 3.2 太湖地区其他菜地氮淋失比较

董维红等<sup>[20]</sup>研究表明,浅层地下水中的 $\text{NO}_3^-$ -N浓度在时间分布上与施肥(包括施肥期、施肥量)和降雨(包括降雨期、降雨量)存在较大的相关性。贺发云等<sup>[21]</sup>的结果表明,对于太湖地区露地蔬菜,番茄生长期间发生了明显的硝酸盐淋洗,10%~10.2%的标记尿素被淋洗到40 cm以下土层。在本试验条件下,番茄生长季TN淋洗占施氮量的9.1%~9.3%,略低于露地蔬菜,这与番茄生长季处于盖棚阶段,此阶段未有雨水淋洗有关。在氮淋失发生的茬口上,南方太湖地区设施菜地与赵营等<sup>[22]</sup>研究的北方设施菜地淋洗特征相似,表现为茼蒿季(秋季)氮素淋失量显著高于番茄季和芹菜季,茼蒿季TN淋失量达到 $86.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占全年氮淋失的44.8%。从淋失率来看,本试验条件下,农民习惯施氮处理下一年三季作物番茄、茼蒿、芹菜氮淋失分别占施氮量的8.8%、14.3%、2.3%。

另外,在本试验区全年轮作过程中,淋洗液中的 $\text{NO}_3^-$ -N浓度高峰发生在休闲期,最高达到 $95.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

而宋科等<sup>[23]</sup>对太湖地区菜地淋洗研究表明,菜地40 cm淋洗液中硝态氮浓度在汛期(8—9月)已超过 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,是本试验淋洗液最高浓度的2~3倍,这可能与夏季未休闲,造成降雨与施肥期的耦合,引发大量的氮素淋失有关,而本试验在夏季选择揭棚休闲,此阶段未有氮肥投入。徐爱国等<sup>[24]</sup>在6月下旬和8月下旬通过模拟降雨研究表明,太湖地区种植年限短(<5 a)和种植年限长( $\geq 5$  a)的菜地总氮流失量平均分别为35.62、 $78.83 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,菜地TN淋失量与棚龄直接相关。本试验大棚棚龄仅为3 a,而休闲期(7—9月)TN的淋洗总量已高达 $54.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占全年淋洗总量的28.2%,高于徐爱国等的模拟研究结果,值得关注。鉴于南方设施菜地过量施氮仍较普遍<sup>[2]</sup>,蔬菜收获后土壤硝态氮残留量高,加之设施菜地有机质含量丰富、微生物活跃,有机氮矿化能力强,7—9月又是南方降雨最为集中的时期,在没有植物利用或缺乏有效利用的条件下,土壤硝态氮淋失风险极大。因此,夏季敞棚休闲期有可能成为我国南方设施菜地土壤硝态氮淋失的重要时期。

## 4 结论

太湖地区设施菜地全年总氮淋洗量为 $193.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,氮素淋洗主要以 $\text{NO}_3^-$ -N为主。由于 $\text{NO}_3^-$ -N的淋洗浓度受施氮量的直接影响,施氮量越高,淋洗液中氮浓度越高。在农民习惯施氮(N5)基础上减少40%氮处理(N3)可减少番茄、茼蒿、芹菜季淋洗损失40.4%、49.2%和57.5%,且对蔬菜产量无影响。

太湖地区设施菜地氮淋洗的高峰期在揭棚期(7—11月),包括揭棚休闲期和茼蒿生长前期,此时TN淋洗量为 $129.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,约占全年总氮淋洗量的66.7%。

结合施氮量对氮素淋洗浓度和淋洗总量的影响以及排放特征可见,在蔬菜生长期施用适量的肥料可从根本上减少氮素淋失。揭棚期,尤其是夏季揭棚休闲期应作为设施菜地氮淋失重点阻控时期,如何在此期间采取有力的阻控措施还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 陈 浮,濮励杰,曹 慧,等.近20年太湖流域典型区土壤养分时空变化及驱动机理[J].土壤学报,2002,39(2):236-245.  
CHEN Fu, PU Li-jie, CAO Hui, et al. Spatial and temporal changes of soil nutrients and their mechanism in typical area of Taihu Lake[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2):236-245.
- [2] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9):3041-

- 3046.
- [3] 陆扣萍, 谢寅峰, 闵 炬, 等. 不同施氮量对大棚茼蒿根系形态及产量和品质的影响[J]. 土壤, 2011, 43(4):542-547.  
LU Kou-ping, XIE Yin-feng, MIN Ju, et al. Effects of different n rates on root morphology, yield and fruit quality of lettuce cultivated in plastic greenhouse[J]. *Soils*, 2011, 43(4):542-547.
- [4] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 氮、磷、钾在设施蔬菜土壤剖面中的分布及移动研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):537-542.  
LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, ZHANG Wen-jun, et al. N, P, K Distributions and movement in soils for greenhouse and outdoor field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):537-542.
- [5] Yao Li-Xian, Li Guo-Liang, Tu Shi-Hua, et al. Salinity of animal manure and potential risk of secondary soil stalinization through successive manure application[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 383(12):106-114.
- [6] 邱卫国, 唐 浩, 王 超. 稻作期氮素渗漏流失特性及控制对策[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):99-103.  
QIU Wei-guo, TANG Hao, WANG Chao. Characteristics of nitrogen loss in the leakage water of rice fields and the control measurements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):99-103.
- [7] 高忠霞, 杨学云, 周建斌, 等. 小麦-玉米轮作期间不同施肥处理氮素的淋失形态及数量[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1624-1632.  
GAO Zhong-xia, YANG Xue-yun, ZHOU Jian-bin, et al. Forms and amounts of nitrogen in leachates affected by different fertilizations after one wheat-maize rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8):1624-1632.
- [8] El-Sadek A, Feyen J. Effects of subsurface drainage design on nitrate leaching and crop yield[J]. *Plant Nutrition*, 2001:934-935.
- [9] Peralta J M, Stockle C O. Dynamics of nitrate leaching under irrigated potato rotation in Washington State: A long-term simulation study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 88:23-34.
- [10] 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]. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332:385-392.
- [11] 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 Chuan-long, MA You-hua, YU Hong-mei, et al. Effect of reducing fertilizer application on soil nutrient leaching loss and tomato yield in plastic house[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4):846-851.
- [12] 王吉苹, 曹文志. 应用 GLEAMS 模型评估我国东南地区农业小流域硝态氮的渗漏淋失[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1):28-32.  
WANG Ji-ping, CAO Wen-zhi. Assessing nitrate leaching with gleams model in an agricultural small catchment in southeast China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1):28-32.
- [13] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu Lake region, China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 319:225-234.
- [14] 连 纲, 王德建, 林静慧, 等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):1879-1883.  
LIAN Gang, WANG De-jian, LIN Jing-hui, et al. Characteristics of nutrient leaching from paddy field in Taihu Lake area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1879-1883.
- [15] 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 Ju, SHI Wei-ming, WANG Jun-ru, et al. A new installation for collect seepage of greenhouse soil[J]. *Soils*, 2007, 39(6):1009-1011.
- [16] 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 Ru-kun. The analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:107-240.
- [17] 闵 炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1):151-157.  
MIN Ju, SHI Wei-ming. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu Lake region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1):151-157.
- [18] 于红梅, 李子忠, 龚元石, 等. 氮肥投入水平对蔬菜地硝态氮淋洗特征的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6):703-707.  
YU Hong-mei, LI Zi-zhong, GONG Yuan-shi, et al. Effect of N-fertilizer input level on characteristic of nitrate leaching in vegetable soil[J]. *Soils*, 2006, 38(6):703-707.
- [19] 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]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83, 73-84.
- [20] 董维红, 林学钰. 浅层地下水氮污染的影响因素分析: 以松嫩盆地松花江北部高平原为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(2):231-234.  
DONG Wei-hong, LIN Xue-yu. Analysis on the influence factors of the nitrogen pollution in shallow groundwater: A case in the north high plain of Songhua River in Songnen Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(2):231-234.
- [21] 曹 兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 露地蔬菜的氮肥效应与氮素去向[J]. 核农学报, 2008, 22(3):343-347.  
CAO Bing, HE Fa-yun, XU Qiu-ming, et al. Nitrogen use efficiency and fate of N fertilizers applied to open field vegetables[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22(3):343-347.
- [22] 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 Ying, ZHANG Xue-jun, LUO Jian-hang, et al. Effect of fertilization on nitrogen leaching loss from soil and nutrients utilization by tomato and cucumber in greenhouse[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2):374-383.
- [23] 宋 科, 徐爱国, 张维理, 等. 太湖水网地区不同种植类型农田氮素渗漏流失研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(3):88-92.  
SONG Ke, XU Ai-guo, ZHANG Wei-li, et al. Study on nitrogen leaching in farm lands with different crops in riverine plain area of Taihu Lake[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(3):88-92.
- [24] 徐爱国, 冀宏杰, 张认连, 等. 太湖水网地区原位模拟降雨条件下不同农田类型氮素流失特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4):809-816.  
XU Ai-guo, JI Hong-jie, ZHANG Ren-lian, et al. Nitrogen losses under simulated rainfall conditions in different cropping lands of Taihu Lake region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4):809-816.