

天津地区不同茄子种植模式对土壤氮磷淋溶损失的影响*

朱晓瑞^{1,2} 郑向群^{1*} 张春雪¹ 杨永安³

(1.农业农村部环境保护科研监测所,天津 300191;2.沈阳农业大学土地与环境学院,辽宁 沈阳 110866;

3.天津市玉米良种场,天津 301507)

摘要 蔬菜种植具有水肥需求量大等特点,导致菜地土壤氮磷淋溶损失(以下简称淋失)风险较高。茄子作为中国主要的蔬菜种类之一,其种植地氮磷淋失问题不容忽视。为探索降低茄田土壤氮磷淋失风险的种植模式,采用田间渗滤池技术,对不同种植模式(茄子单作、茄子/小白菜间作、茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱、茄子/小白菜间作+柠条/沙棘植物篱)下菜地土壤淋溶液中氮磷含量进行监测,研究茄子不同种植模式对土壤氮磷淋失的影响。结果表明,在4种植模式中,以茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱对 TN 、 NO_3^- 淋失拦截效果最佳,较茄子单作分别降低46.14%、51.62%;然而,不同种植模式对 NH_4^+ 的淋失拦截无显著差异。与茄子单作相比,其他种植模式对 TP 的淋失拦截显著,其中以茄子/小白菜间作最佳,较茄子单作相比显著减少了40.80%。在茄子生产过程中,茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱能够有效降低土壤氮磷淋失风险,是适宜天津地区治理菜地氮磷淋失的一种有效措施,研究成果将为治理天津地区面源污染提供技术指导。

关键词 茄子 种植模式 氮磷 淋溶损失

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.10.006

Effects of different planting patterns of eggplant on soil nitrogen and phosphorus leaching loss in Tianjin area ZHU Xiaorui^{1,2}, ZHENG Xiangqun¹, ZHANG Chunxue¹, YANG Yong'an³. (1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang Liaoning 110866; 3. Tianjin Corn Breeding Field, Tianjin 301507)

Abstract: Vegetable planting has the characteristics of large demand for water and fertilizer, which leads to higher risk of nitrogen and phosphorus leaching in vegetable soil. Eggplant is one of the main vegetable species in China, and the problem of nitrogen and phosphorus leaching in the planting area cannot be ignored. In order to explore the planting mode of reducing the risk of nitrogen and phosphorus leaching in the soil, the field infiltration filter technology was used to monitor the content of nitrogen and phosphorus in the soil leaching solution of the vegetable field under different planting patterns (eggplant monoculture, eggplant/cabbage intercropping, eggplant/cabbage intercropping + *Hemerocallis citrina* Baroni/dwarf *Punica granatum* hedge, eggplant/cabbage intercropping + *Caragana korshinskii* Kom./ *Hippophae rhamnoides* Linn. hedge) to study the effects of different planting patterns of eggplant on soil nitrogen and phosphorus leaching loss. The results showed that the effect of eggplant/cabbage intercropping + *Hemerocallis citrina* Baroni/dwarf *Punica granatum* hedge on decreasing TN and NO_3^- leaching was the best in all planting patterns, which was 46.14% and 51.62% lower than eggplant monoculture, respectively. However, there was no significant difference in the leaching control of NH_4^+ for each planting pattern. Compared with the eggplant monoculture, the other planting patterns had significant effect on controlling TP leaching, among which the eggplant/cabbage intercropping was the best, which decreased significantly by 40.80% compared with the eggplant monoculture. In the process of eggplant production, the eggplant/cabbage intercropping + *Hemerocallis citrina* Baroni/dwarf *Punica granatum* hedge could effectively reduce the risk of soil nitrogen and phosphorus leaching. It was an effective measure for the treatment of nitrogen and phosphorus leaching in vegetable fields in Tianjin. The research results would provide technical guidance for the treatment of non-point source pollution in Tianjin.

Keywords: eggplant; planting pattern; nitrogen and phosphorus; leaching loss

2010年发布的《第一次全国污染源普查公报》显示,我国种植业氮磷流失严重,分别占农业氮磷污

第一作者:朱晓瑞,女,1993年生,硕士研究生,研究方向为农业面源污染防治。*通讯作者。

* 国家科技支撑计划项目(No.2012BAJ24B04);中国农业科学院科技创新工程协同创新任务项目(No.CAAS-XTX2016015);天津市科技计划项目(No.14ZCZDNC00013)。

染总量的 59.08%、38.18%。在京津冀集约化种植区,农田土壤氮磷损失主要以向下淋溶为主,超过 50% 的地下水氮磷含量高于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),导致地下水污染问题严重^[1-2]。蔬菜种植具有水肥需求量大、复种指数高等特点,因此菜地土壤氮磷淋溶损失(以下简称淋失)风险高于一般农田^[3-4]。茄子是我国主要的蔬菜种类之一,在生产中占有重要地位^[5],其种植地氮磷淋失问题不容忽视。

间作、套作、轮作等种植模式在提高光热等资源利用、协同增加作物产量等方面具有一定的优势,同时在有效降低氮磷淋失风险、减少农业生产引起的环境污染、改善生态环境等方面具有很大潜力^[6-7]。WANG 等^[8]研究表明,温室茄子/水稻轮作种植模式可减少不同土壤深度氮磷淋失。滕艳敏等^[9]研究了有机、综合、常规模式下茄子/芹菜轮作土壤氮磷养分淋失情况,表明有机种植模式在减少氮素淋失方面表现较好,但会显著增加磷素淋失风险。吴琼等^[10]研究表明,与单作相比,茄子/大葱间作能有效拦截 NO_3^- 的向下淋溶,并有效减少土壤中 NO_3^- 累积量。由此可见,目前大多数研究主要集中在茄子间作、轮作种植模式对土壤氮磷淋失的影响,然而关于茄子不同种植模式下土壤氮磷淋失的对比研究较少。因此,本研究采用田间渗滤池技术进行田间原位监测试验,研究茄子不同种植模式对土壤氮磷淋失的影响,以期治理天津地区面源污染提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于天津市宁河县东棘坨乡玉米良种场(39°33'N,117°82'E),占地面积约为 0.16 hm^2 ,属大陆性季风气候,地处暖温带半干旱半湿润区,夏季气温较高且降水集中,冬季较为寒冷干燥。全年平均气温 11.2 $^{\circ}\text{C}$,最低气温和最高气温分别出现在 1 月和 7 月,全年无霜期 240 d。全年平均降水量 642 mm 左右,降水主要集中在 6—8 月,占全年总降水量的 70%,平均相对湿度 66%。试验区土壤为潮土,其基本理化性状如下:pH 8.38,有机质 9.70 g/kg,总氮(TN)0.49 g/kg,总磷(TP)0.64 g/kg,阳离子交换量(CEC)16.30 cmol/L 。

1.2 试验设计

试验设置 4 种植植模式,重复 3 次,共 12 个试验小区,随机区组排列,每个小区面积为 64 m^2 (8 m×8 m),坡度为 5°。表 1 为不同处理的具体种植模式。

表 1 不同处理的种植模式
Table 1 Planting patterns for different treatments

处理	种植模式		
	单作	间作	植物篱
L1	茄子		
L2		茄子/小白菜	
L3		茄子/小白菜	黄花菜/矮化石榴
L4		茄子/小白菜	柠条/沙棘

供试茄子和小白菜选择生长习性适宜的常用品种“天津二民茄”和“上海青”,种植密度分别为 1 400、75 000 株/ hm^2 。在 L2、L3 和 L4 中,茄子(2 条)与小白菜(2 条)条带交错排列,每个条带约为 1.7 m。供试植物篱为黄花菜/矮化石榴植物篱、柠条/沙棘植物篱,购买于当地花卉苗木集市。在 L3 和 L4 中,植物篱种植均采用移栽的方式,设置在茄子与小白菜条带中间,每条植物篱宽约为 30 cm。黄花菜按穴距 10 cm、2~3 株/穴的种植密度进行种植,矮化石榴株距为 2 m;柠条、沙棘交错种植,每棵植株间距为 2 m。试验供试肥料为磷酸二铵(16% (质量分数,下同)N、46% P_2O_5 、不含 K_2O)和大量元素水溶肥料(18% N、22% P_2O_5 、30% K_2O),分别以基肥(525 kg/hm^2)和追肥(150 kg/hm^2)的形式施用。

试验期从 2016 年 5 月 15 日开始到 9 月 30 日结束,共 139 d。试验期间,共计施肥 2 次,灌溉 4 次,淋溶样品采集 5 次。

1.3 样品采集与测定

淋溶样品采集:由于田间渗滤池技术具有安装方便、对土壤破坏强度小、适用于各种土壤类型、不影响农田管理等优点,本试验采用此方法对土壤淋溶液进行原位监测^[11]。田间渗滤池长 1.5 m,宽 0.8 m,高 0.6 m。淋溶液采集桶为聚乙烯材料的圆柱形水桶,体积约为 69 L(直径 50 cm,高 35 cm),埋深 60 cm。为避免因安装时土壤扰动带来的影响,保证试验顺利进行,田间渗滤池装置于 2015 年 5 月 10 日安装完毕,经 1 年的土壤沉积与修复后进行试验。淋溶样品采集装置如图 1 所示,设置在每个小区的中心。取样时,利用真空泵,产生负压,抽取淋溶液,先量取淋溶液体积,然后将淋溶液分别混合均匀,取 500 mL 装入洗净并晾干的聚乙烯瓶中,加酸固定,编号标记放置于有冰块的保温箱带回实验室,于 4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保存待测。采样时间根据降雨以及田间水分淋溶情况而定,每次所有采样点的淋溶液在 1 d 内收集完。

试验期间降雨、灌溉、施肥和淋溶样品采集情况如图 2 所示。5 月 20 日淋溶样品采集,5 月 25 日施

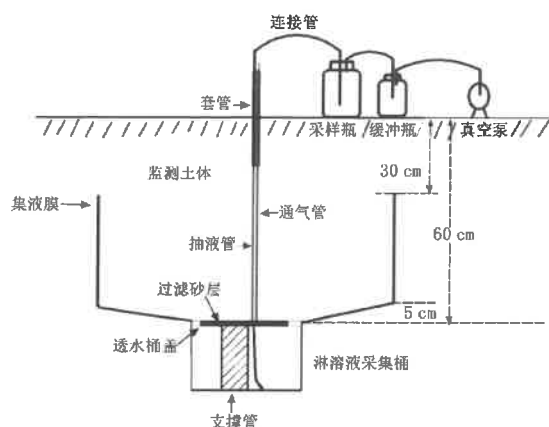
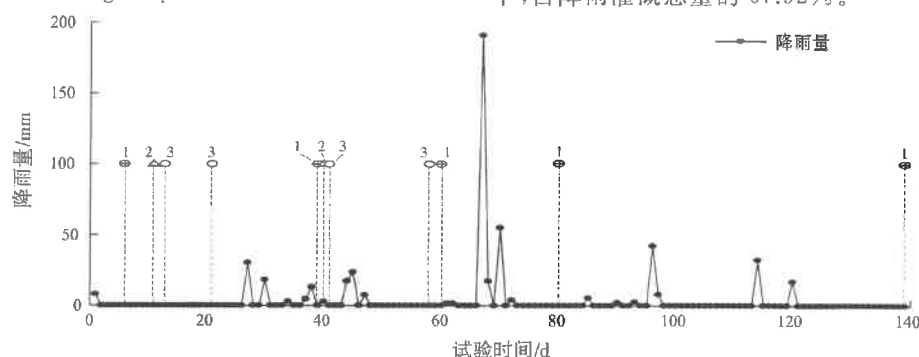


图1 淋溶样品采集装置

Fig.1 Leaching sample collection device



注:1为淋溶样品采集,在第6、39、60、80、139天进行;2为施肥,在第11、40天进行;3为灌溉,在第13、21、41、58天进行。

图2 试验期间降雨、灌溉、施肥和淋溶样品采集情况

Fig.2 Rainfall, irrigation, fertilization and sampling during the test

参考文献[12],TN采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定; NO_3^- (以N计)采用紫外分光光度法测定; NH_4^+ (以N计)采用纳氏试剂分光光度法测定;TP采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法测定;降雨量用SL3-1翻斗式雨量传感器计量。

1.4 数据处理

氮磷淋失量参考文献[13]计算,以TN为例,计算公式见式(1):

$$\text{单次淋溶 TN 淋失量} = \frac{\text{淋溶液 TN 质量浓度} \times \text{单次淋溶液体积} \times 10}{\text{试验小区面积}} \quad (1)$$

式中:单次淋溶 TN 淋失量、淋溶液 TN 质量浓度、单次淋溶液体积和试验小区面积的单位分别为 g/hm^2 、 mg/L 、 L 、 m^2 。

2 结果与讨论

2.1 淋溶液水量

图3是不同种植模式下土壤淋溶液水量。L1~L4总淋溶液水量分别为151.73、142.14、

基肥,茄子5月26日种植,5月27日灌溉,6月4日灌溉,小白菜6月20日种植,6月22日淋溶样品采集,6月23日施追肥,6月24日灌溉,7月11日灌溉,7月13日淋溶样品采集,8月2日淋溶样品采集,9月30日淋溶样品采集。试验小区采用的灌溉方式为微灌,灌溉频率及灌溉量依据试验期间降雨情况及当地农民经验,每次控制灌溉水量保证灌溉后小区内无径流水产生(即灌溉水仅产生水分下渗)。其他栽培方法及田间管理均与当地农业种植习惯相同。

试验期间,降雨灌溉总量为579.00 mm,其中试验第27天至第68天(6—7月)降雨量大且较为集中,占降雨灌溉总量的67.92%。

139.41、134.66 mm,占整个试验期间降雨/灌溉量的23.26%~26.21%。分析表明,不同种植模式之间总淋溶水量差异不显著($P>0.05$)。其原因可能是,试验前对各试验小区的土壤进行翻耕,使不同种植模式下的土壤结构、通透性等条件较为一致,淋溶强度差异不大^[14-15]。

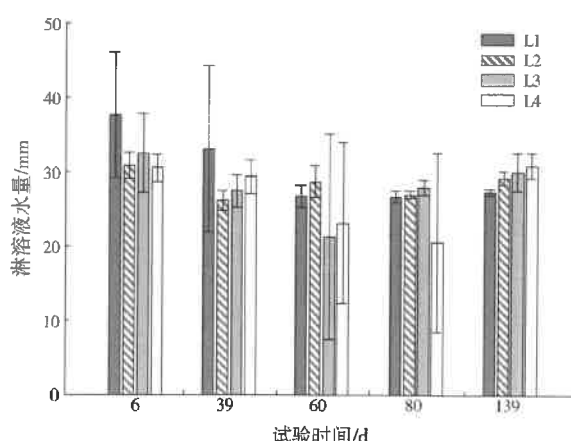


图3 不同种植模式下土壤淋溶液水量

Fig.3 Soil leaching solution volume for different planting patterns

2.2 不同种植模式对 TN 和 NO_3^- 淋失的影响

由图 4 可知,不同种植模式下土壤淋溶液中 TN 和 NO_3^- 质量浓度分别为 0.78~139.32、0.64~132.04 mg/L,淋溶液中 NO_3^- 占 TN 的 86.04%~95.74%,表明 NO_3^- 是氮素淋失的主要形式。其原因是肥料施用于土壤后,首先发生水解反应,分解产生 NH_4^+ ,随着作物的生长以及土壤中微生物的作用等, NH_4^+ 很快发生硝化反应转化成 NO_2^- 并最终转化成 NO_3^- ;其次,土壤胶体大多带负电,对带负电的 NO_3^- 吸附性较差,导致 NO_3^- 易被雨水淋洗而迅速渗漏。

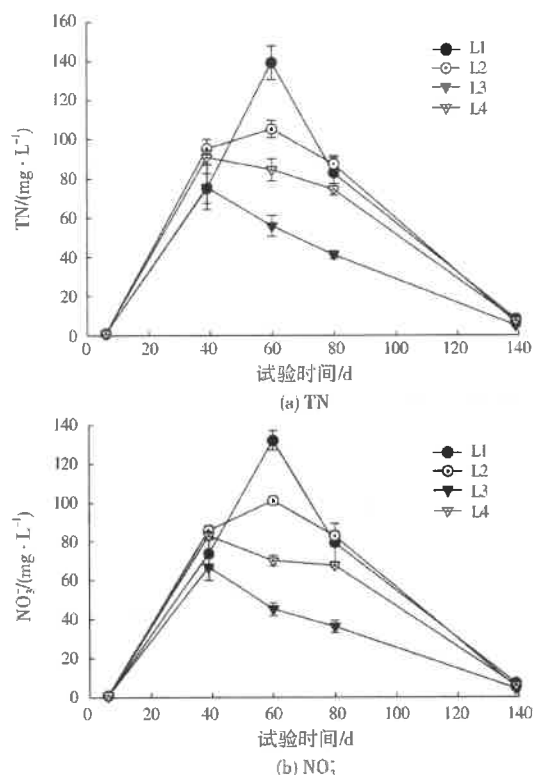


图 4 不同种植模式下 TN 和 NO_3^- 淋溶质量浓度
Fig.4 Concentrations of TN and NO_3^- in leachate for different planting patterns

不同种植模式土壤淋溶液中 TN 和 NO_3^- 浓度均呈先升高后降低趋势,其中 L1、L2 的 TN、 NO_3^- 最高浓度均出现在试验第 60 天,L3、L4 的 TN 和 NO_3^- 最高浓度均出现在试验第 39 天,且浓度低于 L1、L2。4 种植模式 5 次采样的 TN 和 NO_3^- 平均质量浓度分别为 35.66~61.23、30.68~58.62 mg/L,参照《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017),各种种植模式下土壤 NO_3^- 平均质量浓度均达到 V 类水标准(>30.0 mg/L),表明在茄子种植过程中土壤 NO_3^- 淋失风险较大。与 L1 相比,L2、L3、L4 的 TN 淋溶质量浓度分别减小了 3.61%、

41.76%、15.65%, NO_3^- 淋溶质量浓度分别减小了 5.94%、47.66%、22.31%。结果表明,与茄子单作相比,茄子/小白菜间作、茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱、茄子/小白菜间作+柠条/沙棘植物篱均能降低土壤淋溶液中 TN 含量。其原因可能是,在碱性环境条件下茄子/小白菜间作,且施用磷酸二铵,有利于小白菜根系的生长^[16],促进小白菜对 NH_4^+ 的吸收,土壤中 NH_4^+ 经硝化作用转化为 NO_3^- 的量减少,导致淋溶液中 NO_3^- 含量降低。

由图 5 可知,在整个淋溶过程中,土壤 TN 和 NO_3^- 累积淋失量在试验期前 80 天增加显著,在试验第 80 天至第 139 天变化较小。其原因是,在试验前期由于施肥、降雨量大且集中,使土壤中 TN、 NO_3^- 含量增加并随土壤水分向下迁移,试验后期由于土壤氮素的不断淋失以及植物的吸收利用等,使土壤剖面土壤中 TN、 NO_3^- 含量下降,导致土壤 TN、 NO_3^- 累积淋失量变化不大。不同种植模式下土壤 TN 和 NO_3^- 累积淋失量整体上表现为 L1>L2>L4>L3,其中 L2、L3、L4 土壤中 TN 淋失总量(即试验第 139 天的 TN 累积淋失量,其余类推)较 L1 处理分别降低 6.21%、46.14%、25.59%, NO_3^- 淋

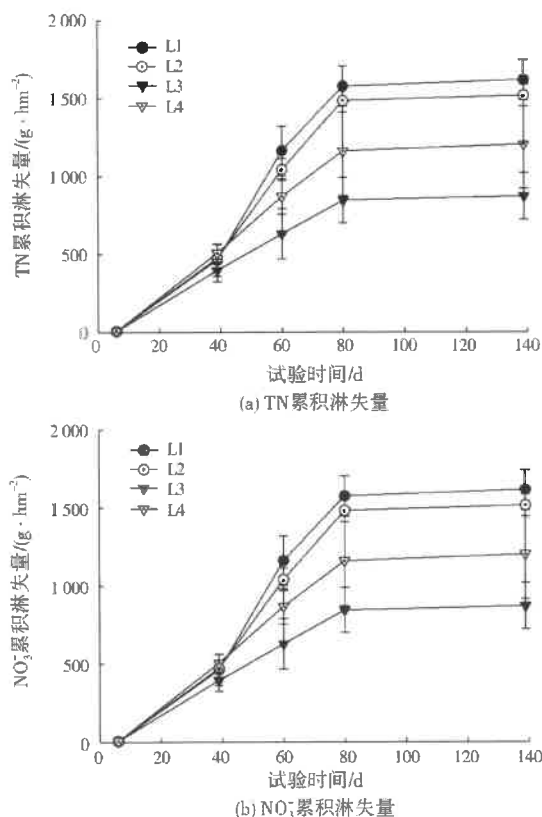


图 5 不同种植模式下 TN 和 NO_3^- 累积淋失量
Fig.5 Cumulative leaching loss of TN and NO_3^- for different planting patterns

表 2 不同种植模式土壤氮磷淋失总量比较¹⁾

Table 2 Total mass of leaching loss of nitrogen and phosphorus for different planting patterns g/hm²

指标	L1	L2	L3	L4
TN	1 617.64±129.85a	1 517.16±69.61a	871.30±149.11b	1 203.66±282.96ab
NO ₃ ⁻	1 550.37±104.36a	1 417.83±37.45ab	750.14±54.38c	1 061.27±276.08bc
NH ₄ ⁺	10.68±1.42a	8.43±1.07a	8.38±2.24a	7.88±2.34a
TP	5.49±0.28a	3.25±0.26b	3.33±0.40b	3.85±0.77b

注: ¹⁾英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

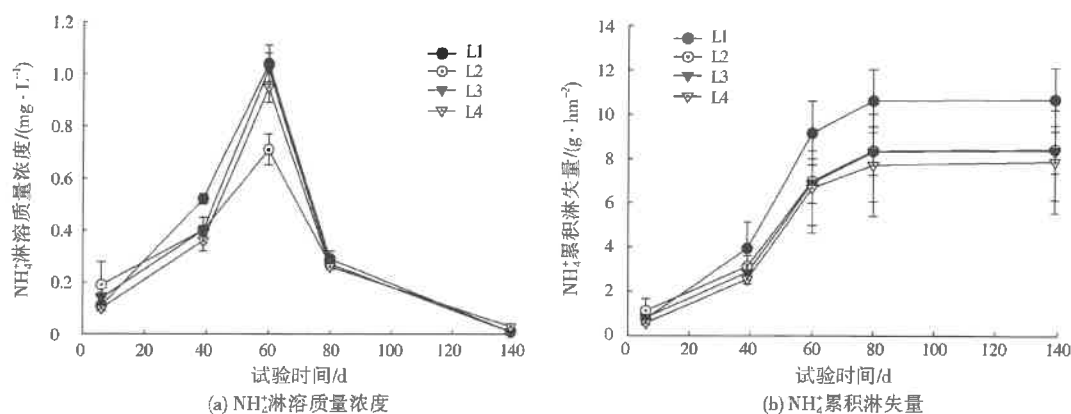


图 6 不同种植模式下 NH₄⁺ 淋溶质量浓度和累积淋失量

Fig.6 Concentrations and cumulative leaching loss of NH₄⁺ for different planting patterns

失总量比 L1 处理分别降低 8.55%、51.62%、31.55%(见表 2)。分析发现, L3 的 TN、NO₃⁻ 淋失总量低于 L4, 且显著低于 L1、L2 ($P<0.05$), 表明黄花菜/矮化石榴植物篱能够有效降低土壤 TN、NO₃⁻ 的淋失。这主要是因为黄花菜根系肥大, 地下细微根须系统覆盖范围可达 50 cm 左右, 可拦截残留于表层土壤氮素, 而矮化石榴根系分布较深, 两种植物合理搭配成植物篱可通过浅根层和深根层对不同土壤层次氮素进行全面吸收, 同时交叉的根系网能够充分利用土壤水分, 减少土壤剖面的氮素累积, 降低土壤 TN、NO₃⁻ 淋失量^[17]。

2.3 不同种植模式对 NH₄⁺ 淋失的影响

由图 6 可知, 不同种植模式下土壤淋溶液 NH₄⁺ 浓度呈先升高后降低趋势, 淋溶液中 NH₄⁺ 最高浓度均出现在试验第 60 天。不同种植模式下土壤淋溶液中 NH₄⁺ 质量浓度为 0.01~1.04 mg/L, 占 TN 的 0.54%~1.03%, 表明 NH₄⁺ 不是氮素淋失的主要形式。这主要是因为, 土壤中的 NH₄⁺ 易被带负电的土壤胶体吸附固持, 当土壤吸附量达到一定程度后, 土壤溶液中的 NH₄⁺ 才会随土壤水分向下运动而发生淋溶^[18]。4 种植模式 5 次采样的 NH₄⁺ 平均淋溶质量浓度为 0.32~0.39 mg/L, 属于 GB/T 14848—2017 中的 III 类水 (≤ 0.50 mg/L), 因此与 NO₃⁻ 相比, NH₄⁺ 的淋失风险较低。

4 种植模式下 NH₄⁺ 累积淋溶量整体上表现为 L1>L2>L3>L4, 但 NH₄⁺ 淋失总量均无显著差异(见表 2)。其原因可能是, 淋溶液的收集方法、采集深度等对 NH₄⁺ 淋失量有一定的影响, 本试验对土壤 60 cm 处氮磷淋溶状况进行监测, 而土壤中的 NH₄⁺ 易被带负电的土壤颗粒吸附固持, 导致不同种植模式下土壤中 NH₄⁺ 淋失量没有显著差异。

2.4 不同种植模式对 TP 淋失的影响

由图 7 可以看出, 不同种植模式下土壤淋溶液 TP 质量浓度为 0.04~0.32 mg/L, 4 种植模式下 TP 淋溶浓度均呈先升高后降低趋势, 除 L1 的淋溶液 TP 最高浓度出现在试验第 39 天外, 其余均出现在试验第 60 天。与 TN 相比, 土壤 TP 淋溶浓度较低, 这是因为磷肥施入土壤后, 能很快地被吸附到土壤颗粒表面或与土壤一些物质(含 Fe、Al、Ca 等)生成难溶的磷酸盐, 在很大程度上影响磷素的释放和植物的利用, 因此磷的生物有效性较低, 淋溶作用较弱^[19]。4 种植模式 5 次采样的 TP 平均淋溶质量浓度为 0.12~0.20 mg/L, 高于水体富营养化 TP 临界值(0.02 mg/L), 因此在茄子种植过程中存在一定的磷素淋失风险, 可对水体造成污染。这主要是因为, 土壤中磷素大量累积, 当达到吸附饱和时, 不能被土壤吸附以及植物利用的磷素会发生强淋溶, 极大增加了磷素的淋失风险^[20-21]。

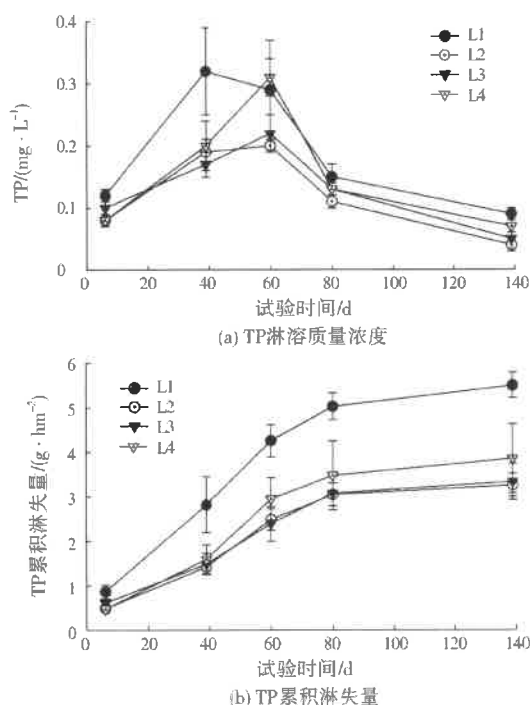


图7 不同种植模式下TP淋溶质量浓度和累积淋失量
Fig.7 Concentrations and cumulative leaching loss of TP for different planting patterns

4种植模式下TP累积淋溶量整体上表现为 $L1 > L4 > L3 > L2$,其中L2、L3、L4的土壤TP淋失总量与L1相比分别显著减少了40.80%、39.34%、29.87%(见表2)。结果表明,与茄子单作相比,茄子/小白菜间作、茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱、茄子/小白菜间作+柠条/沙棘植物篱对TP的淋失均有显著的拦截作用。其原因可能是,茄子/小白菜搭配种植在协同提高作物产量、充分利用水肥气热等资源、提高水分利用效率方面具有较好的效果,同时在高效利用土壤养分、改善生态环境、降低磷素淋失方面具有很大潜力^[22-23]。

3 结论

(1) 在4种植模式中,以茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱对TN、 NO_3^- 淋失拦截效果最佳,TN、 NO_3^- 淋失总量较茄子单作分别降低46.14%、51.62%;然而,不同种植模式对 NH_4^+ 的淋失拦截无显著差异。

(2) 不同种植模式对TP的淋失拦截作用均显著好于茄子单作。在4种植模式中,以茄子/小白菜间作、茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱种植模式对TP淋失拦截效果最佳,TP淋失总量较茄子单作分别显著减少了40.80%、39.34%。

(3) 在茄子生产过程中,茄子/小白菜间作+黄花菜/矮化石榴植物篱能够有效降低土壤氮磷淋失风险,是适宜天津地区治理菜地氮磷淋失的一种有效措施。

参考文献:

- [1] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J].土壤学报,2006,43(3):405-413.
- [2] 刘宏斌,张云贵,李志宏,等.北京市平原农区深层地下水硝态氮污染状况研究[J].土壤学报,2005,42(3):411-418.
- [3] 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.
- [4] 韦高玲,卓慕宁,廖义善,等.不同施肥水平下菜地耕层土壤中氮磷淋溶损失特征[J].生态环境学报,2016,25(6):1023-1031.
- [5] 王强,徐建明,姜丽娜,等.轮作水稻对大棚土壤硝化作用和氮挥发的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):186-190.
- [6] 张风云,吴普特,赵西宁,等.间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J].应用生态学报,2012,23(5):1400-1406.
- [7] 董娟娟,刘辰深,张丽娟,等.耕层水氮调控对土壤深层累积 NO_3^- -N运移及后效的影响[J].中国农业科学,2011,44(12):2476-2483.
- [8] WANG Q, XU J M, LIN H, et al. Effect of rice planting on the nutrient accumulation and transfer in soils under plastic greenhouse vegetable-rice rotation system in southeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(1): 204-209.
- [9] 滕艳敏,韩青,郝梓依,等.不同蔬菜种植模式对土壤淋溶水总氮、总磷和COD的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(5):759-768.
- [10] 吴琼,赵同科,安志装,等.蔬菜间作及氮肥调控对土壤硝酸盐及氮素表现损失的影响[J].农业科学与技术,2012,13(4):833-837,876.
- [11] 刘宏斌.农田面源污染监测方法与实践[M].北京:科学出版社,2015.
- [12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 单立楠.不同施肥模式下菜地氮素面源污染特征及生态拦截控制研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [14] PENG S Z, HE Y P, YANG S H, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on nitrogen leaching losses from paddy fields[J]. Paddy and Water Environment, 2015, 13(4): 303-312.
- [15] YANG X L, LU Y L, TONG Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 199: 34-42.
- [16] 马庆旭,吴良欢,曹小闯,等.营养液pH和氮形态对小白菜生长、氮素吸收及品质的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):64-68.
- [17] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):725-731.

(下转第1169页)