

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.013

施肥模式对日光温室土壤铵态氮和硝态氮的影响*

商放泽¹ 杨培岭¹ 任树梅¹ 王 勍² 李云开¹ 刘培斌³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014;
3. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

【摘要】 通过种植两茬油菜,设置7种施肥模式:有机肥施氮量600 kg/hm²;有机肥施氮量300 kg/hm²;无机肥施氮量767 kg/hm²;无机肥施氮量383 kg/hm²;有机肥施氮量450 kg/hm²,无机肥施氮量153 kg/hm²;有机肥施氮量300 kg/hm²,无机肥施氮量383 kg/hm²;有机肥施氮量150 kg/hm²,无机肥施氮量191 kg/hm²,研究了日光温室0~200 cm土壤中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的迁移累积。结果表明,不同施肥模式主要影响0~40 cm土壤中NH₄⁺-N的平均累积量和平均质量比,单施无机肥的相应值大于单施有机肥;不同施肥模式主要影响0~40 cm土壤中NO₃⁻-N的平均累积量和平均质量比,当施氮量小于383 kg/hm²时,相应值从大到小依次为:单施无机肥、单施有机肥、有机肥和无机肥配施,不同施肥模式也影响40~160 cm土壤中NO₃⁻-N的迁移累积。从地下水污染风险和产量考虑,北京农业种植区日光温室油菜种植可按照有机肥150 kg/hm²、无机肥191 kg/hm²的施肥模式进行施肥。

关键词: 日光温室 施肥模式 铵态氮 硝态氮 迁移 累积

中图分类号: S151.9; S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0073-06

Effects of Fertilization Patterns on NH₄⁺-N and NO₃⁻-N
in Solar Greenhouse Soils

Shang Fangze¹ Yang Peiling¹ Ren Shumei¹ Wang Qing² Li Yunkai¹ Liu Peibin³
(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hydrochina Corporation, Hangzhou 310014, China
3. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract

Over the course of two rape growing cycles, fertilization types and application rates affected plant growth and groundwater pollution from solar vegetable greenhouses in Beijing agricultural region were studied. Seven fertilization patterns were selected, and in each treatment, the NH₄⁺-N and NO₃⁻-N migration and accumulation in 0~200 cm solar greenhouse soil and the affect on rape yield were studied. The results showed that the different fertilization patterns mainly affected the average NH₄⁺-N accumulation and content in the 0~40 cm soil layer. Average soil NH₄⁺-N accumulation and content was larger in the treatment of only chemical fertilizer than that of only organic manure. When N application rate was less than 383 kg/hm², the average soil NO₃⁻-N accumulation and content in the 0~40 cm soil layer were found to be in the following descending order: use of only chemical fertilizer, use of only organic manure, use of both organic manure and chemical fertilizer. The different fertilization patterns also affected the migration and accumulation of NO₃⁻-N in 40~160 cm soil. It is concluded that organic manure (N application 150 kg/hm²) mixed with chemical fertilizer (191 kg/hm²) is the best fertilization pattern for planting rape in solar greenhouses in Beijing agricultural region.

Key words Solar greenhouse, Fertilization patterns, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, Migration, Accumulation

收稿日期: 2011-08-13 修回日期: 2011-11-14
*北京市科技计划课题资助项目(D07050601510703-3)
作者简介: 商放泽, 博士生, 主要从事水土资源与环境研究, E-mail: shangfangze@126.com
通讯作者: 杨培岭, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境、灌溉理论与技术研究, E-mail: yang-pl@163.com

引言

日光温室蔬菜种植便于水肥管理,能显著提高蔬菜产量,近年来得到了很大发展。然而,中国大部分地区日光温室仍然沿用“肥大水勤”^[1]的水肥管理方式,过多氮肥投入可能引起 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 在土壤中的累积和迁移,使硝酸盐进入地下水体,而地下水硝酸盐超标会危害人体健康^[2~3]。因此,如何降低土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的累积和迁移、减少地下水硝酸盐污染是国内外学者共同关注的问题^[4~7]。

国内外学者对日光温室菜地单施有机肥^[8~9]以及单施无机肥对土壤氮素的影响的研究较多^[10~11],对有机肥和无机肥配施的研究较少^[12~13];对 100 cm 深度以内土壤氮素的研究较多,对深层土壤的研究较少^[14~15];对土壤 NO_3^- -N 的研究较多,对土壤 NH_4^+ -N 的研究较少^[16~17]。北京地区极度缺水,供

水水源以地下水为主,占总供水量的 70% 左右^[18],地下水的水质直接影响到人们的身体健康。针对以上特点,本文在温室种植两茬油菜,通过有机肥和无机肥配施和单施,对比研究不同施肥模式下 0 ~ 200 cm 深层土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的累积和迁移,旨在探讨不同施肥模式对深层土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 累积和迁移的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 累积和迁移试验在北京市海淀区西北旺镇后厂村日光温室内进行。

试验用日光温室为拱圆式,长 70 m,宽 8 m。挖土壤剖面,田间实际观测和粒径分析结合,把 0 ~ 200 cm 土壤共分为 6 层,土壤质地分类采用国际制,土壤物理特性见表 1,土壤基本养分指标见表 2。

表 1 供试土壤物理特性
Tab.1 Physical properties for the experiment soil

土层深度/cm	不同粒径颗粒所占质量分数/%			土壤质地	容重 /g·cm ⁻³	田间持水率	饱和含水率	饱和导水率 /cm·s ⁻¹
	0 ~ 0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 2 mm					
0 ~ 20	7.4	34.8	57.8	砂质壤土	1.47	0.180	0.434	0.000 379
20 ~ 40	3.4	37.8	58.8	砂质壤土	1.64	0.122	0.403	0.000 221
40 ~ 80	3.0	40.8	56.2	砂质壤土	1.44	0.194	0.465	0.000 217
80 ~ 120	13.6	35.8	50.6	壤土	1.52	0.168	0.430	0.000 179
120 ~ 160	6.8	40.8	52.4	壤土	1.51	0.198	0.423	0.000 158
160 ~ 200	7.0	44.8	48.2	壤土	1.54	0.216	0.481	0.000 147

表 2 试验前供试日光温室土壤基础养分状况
Tab.2 Nutrient contents before experiment in the tested solar greenhouses

土层深度 /cm	有机质质量比 /g·kg ⁻¹	全氮质量比 /g·kg ⁻¹	有效磷质量比 /mg·kg ⁻¹	有效钾质量比 /mg·kg ⁻¹	NO_3^- -N 质量比 /mg·kg ⁻¹	NH_4^+ -N 质量比 /mg·kg ⁻¹
0 ~ 20	18.92	1.22	151.86	188.59	43.51	0.86
20 ~ 40	16.15	0.86	105.43	164.52	12.84	0.82
40 ~ 80	12.63	0.63	79.21	110.76	10.27	0.61
80 ~ 120	9.87	0.58	25.54	75.66	8.59	0.44
120 ~ 160	4.25	0.46	9.21	58.42	7.05	0.53
160 ~ 200	3.92	0.42	4.48	40.37	6.83	0.79

1.2 试验设计

供试材料为“春华青梗”油菜,生育期 40 d,株高 22 cm,开展度 30 cm,叶柄宽 5 cm,油菜种植密度以相邻两株油菜不互相影响光照为准^[19]。2009 年 10 月 31 日种植第 1 批油菜,2009 年 12 月 31 日收获,2010 年 1 月 2 日种植第 2 批油菜,2010 年 3 月 2 日收获。试验设计 7 种不同的施肥模式(表 3),

施用无机肥为尿素(N 质量分数 46%)、有机肥为均匀的鸡粪牛粪(N 质量分数 2%),施肥方式为撒施,其中处理 5 为当地常规施肥模式。播种后施肥灌水,播种后 20 d 再施肥灌水,试验期间共分 4 次施肥和灌水,每次施肥量和灌水量为总量的 1/4,施肥和灌水处理见表 3。试验小区面积为 3 m × 5 m,3 个重复,试验小区之间设置 0.5 m 隔离带,小区随机排列。

表 3 施肥模式和灌水处理

Tab.3 Fertilization patterns and irrigation treatments

处理序号	无机肥施肥量 /kg·hm ⁻²	有机肥施肥量 /kg·hm ⁻²	灌水量 /mm
1	0	600	400
2	0	300	400
3	767	0	400
4	383	0	400
5	153	450	400
6	383	300	400
7	191	150	400

1.3 田间管理及取样分析方法

7 种施肥模式除施肥类型、数量不同外,其他日光温室管理措施均保持一致。每次施肥灌水后 20 d,分 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 80 cm、80 ~ 120 cm、120 ~ 160 cm、160 ~ 200 cm 共 6 层采集土壤样品,带回实验室放入冰箱冷冻,防止 NH₄⁺-N 挥发。称取 12.00 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤样品放入 180 mL 的塑料瓶中,加入 100 mL 0.01 mol/L 的 CaCl₂溶液,振荡 1 h,过滤,采用连续流动分析法 (continuous flow analytical,简称 CFA)测定滤液中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量。

数据用 EXCEL 2007 和 SPSS 17.0 软件进行分析处理。

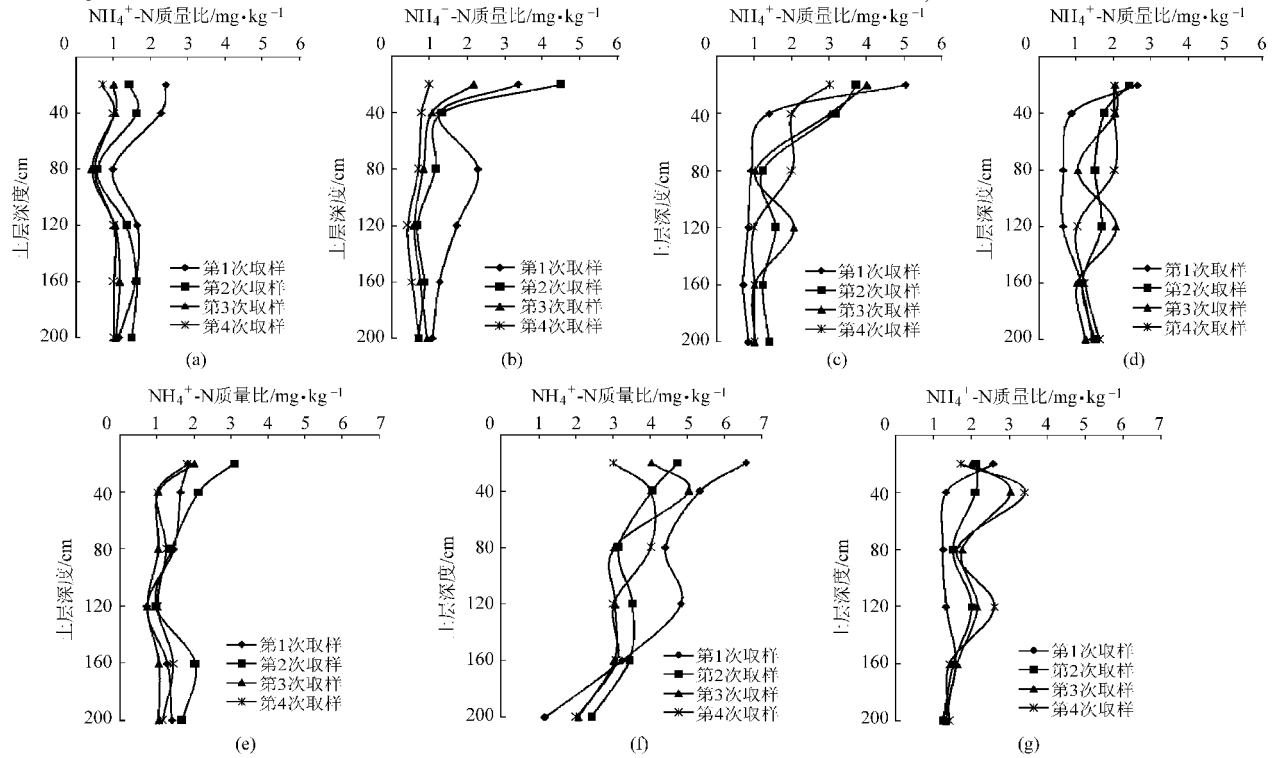


图 1 不同施肥模式对 NH₄⁺-N 在土壤中迁移累积的影响

Fig.1 Effect of different fertilization patterns on soil NH₄⁺-N migration and accumulation

(a) 处理 1 (b) 处理 2 (c) 处理 3 (d) 处理 4 (e) 处理 5 (f) 处理 6 (g) 处理 7

2 结果与分析

2.1 NH₄⁺-N 在土壤中的迁移累积

不同施肥模式对 NH₄⁺-N 的影响见图 1。处理 1 施有机肥量是处理 2 的 2 倍,处理 1 和处理 2 土壤 NH₄⁺-N 主要在 0 ~ 40 cm 土层中累积,高施肥量的处理 1 表层 0 ~ 40 cm 土层 NH₄⁺-N 的累积量是处理 2 的 1.72 倍,处理 1 累积峰到达 40 ~ 80 cm 土层,而处理 2 的累积峰在 20 ~ 40 cm 土层中,表明有机肥施氮量越多,NH₄⁺-N 累积量越多,累积峰下移深度越深。处理 3 施无机肥量是处理 4 的 2 倍,处理 3 主要在 0 ~ 40 cm 土层中累积,累积量是处理 4 的 2.06 倍。处理 3 和处理 4 第 2 次和第 3 次灌水后累积峰都下移到 80 ~ 120 cm 深度,但处理 3 累积量比处理 4 大,原因是处理 3 施肥量大。处理 5、处理 6 和处理 7 都是有机肥与无机肥配施,处理 5 为当地常规施肥处理,处理 6 施肥量是处理 7 的 2 倍,0 ~ 40 cm 土层中高施肥量的处理 6 累积量分别是处理 5 和处理 7 的 3.91、2.57 倍,处理 5 和处理 7 在 160 cm 深度以内有不同程度的累积现象,处理 6 在 80 ~ 120 cm 土层中累积,160 cm 深度以下 NH₄⁺-N 质量比基本维持不变。

不同施肥模式主要影响 NH₄⁺-N 在 0 ~ 40 cm 土层的累积量和质量比,以及在 40 ~ 160 cm 土壤中的

累积和迁移,但 40 cm 以下不同施肥模式土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比差异不超过 1.81 mg/kg,160 cm 以下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不受施肥影响。

不同施肥模式 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 0 ~ 40 cm 土层中平均累积量和平均质量比见表 4,通过方差分析,处理 1 和处理 4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均累积量未达到 0.05 水平显著差异,其他处理之间达到显著差异;处理 1、处理 4 和处理 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量比未达到 0.05 水平显著差异,其他处理之间达到显著差异。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 0 ~ 40 cm 土层中平均累积量和平均质量比从大到小依次为:处理 6、处理 3、处理 7、处理 4、处理 1、处理 5、处理 2,即单施无机肥的相应值大于单施有机肥。单施有机肥、单施无机肥以及有机肥和无机肥配施 3 种情况下,施氮量越多,0 ~ 40 cm 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积量也越多。

2.2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在土壤中的迁移累积

不同施肥模式对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响见图 2。处理 1 与处理 2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均主要在表层 0 ~ 40 cm 处累积,处理 1 累积量是处理 2 的 1.99 倍,处理 1 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在 40 ~ 80 cm 处出现累积峰,而施有机肥较少的处理 2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在 4 次灌水后都没有累积峰出现,原因是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 被油菜根系吸收,没有多余的累积。处理 3 和处理 4 土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要在表层 0 ~ 40 cm 处累积,处理 3 累积量是处理 4 的 3.46 倍,处理 3 在

表 4 0 ~ 40 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均累积量和平均质量比

Tab.4 Average soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ accumulation and content in 0 ~ 40 cm soil layer

处理序号	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均累积量 /kg·hm ⁻²	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量比 /mg·kg ⁻¹
1	6.57 ^a	1.94 ^a
2	3.81 ^b	1.45 ^b
3	14.32 ^c	3.18 ^c
4	6.95 ^a	1.97 ^a
5	5.99 ^d	1.82 ^a
6	23.42 ^e	4.6 ^d
7	9.12 ^f	2.29 ^c

注:不同字母表示 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著,下同。

40 ~ 80 cm 和 120 ~ 160 cm 土层中出现累积峰,处理 4 在 40 ~ 80 cm 和 80 ~ 120 cm 处出现累积峰,施无机肥较多的处理 3 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 下移深度较深,累积峰值也较大。处理 6 在 0 ~ 40 cm 的累积量分别是处理 5 和处理 7 的 1.7、7.4 倍。处理 5 第 2 次灌水后在 80 ~ 120 cm 处出现峰值,可能该处有大孔隙存在,处理 7 在 40 ~ 80 cm 处出现峰值,而高施肥量的处理 6 第 4 次灌水后 0 ~ 80 cm 土体内质量比也明显增加。

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在土壤中的质量比总体表层高、深层低,不同施肥模式主要影响 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在 0 ~ 40 cm 土

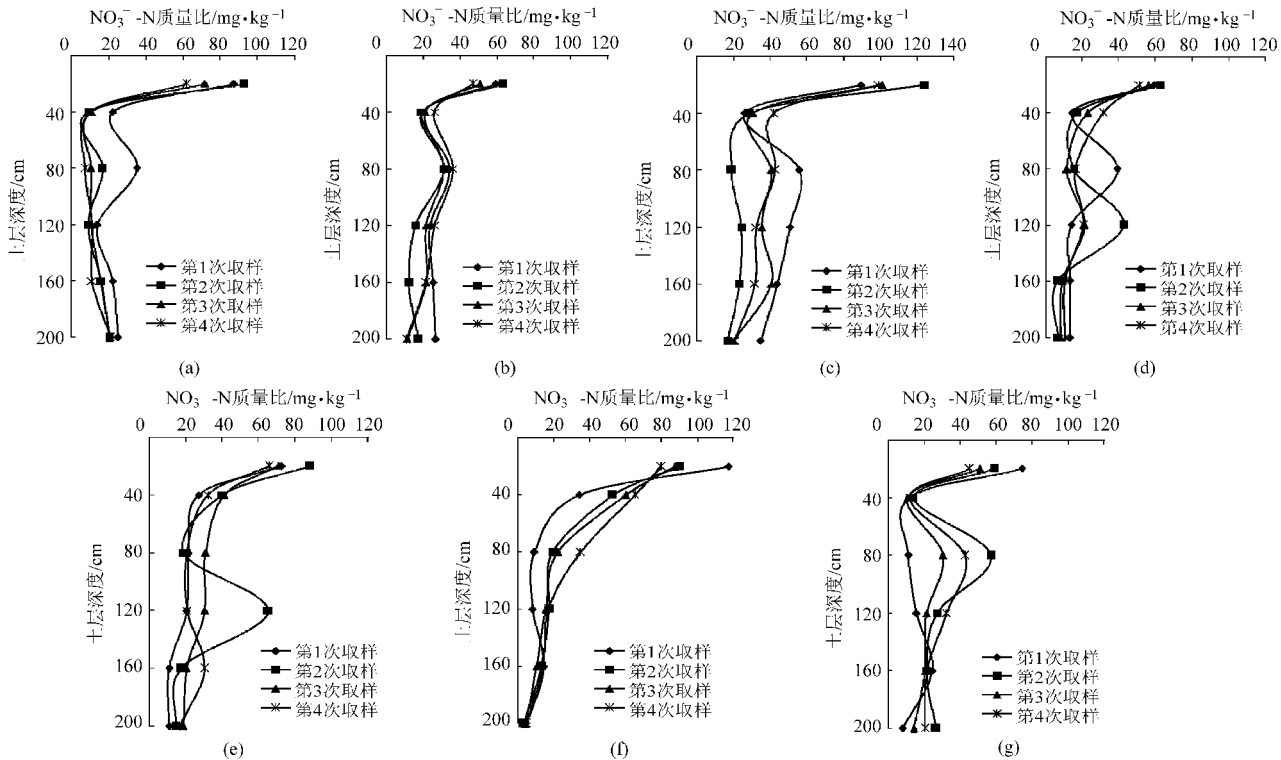


图 2 不同施肥模式对土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 迁移累积的影响

Fig.2 Effect of different fertilization patterns on soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ migration and accumulation

(a) 处理 1 (b) 处理 2 (c) 处理 3 (d) 处理 4 (e) 处理 5 (f) 处理 6 (g) 处理 7

层的累积量和质量比,以及在 40 ~ 160 cm 土壤中的迁移累积,160 cm 以下土壤 NO₃⁻-N 不受施肥影响。

不同施肥模式 NO₃⁻-N 在 0 ~ 40 cm 土壤中平均累积量和平均质量比见表 5,通过方差分析,NO₃⁻-N 累积量各处理之间达到 0.05 水平显著差异,处理 2 和处理 4 之间 NO₃⁻-N 平均质量比未达到 0.05 水平显著差异,其他处理之间达到显著差异,而油菜折合产量处理 1、处理 5 和处理 7,处理 2 与处理 4,处理 3 与处理 6 均未达到 0.05 水平显著差异,但三者达到 0.05 水平显著差异。不同施肥处理下 NO₃⁻-N 在 0 ~ 40 cm 土层中的平均累积量和平均质量比从大到小依次为:处理 6、处理 3、处理 5、处理 1、处理 4、处理 2、处理 7,即当施氮量不超过 383 kg/hm² 时,从大到小依次为:单施无机肥、单施有机肥、有机肥和无机肥配施,当施氮量大于 600 kg/hm² 时,单施无机肥相应值大于单施有机肥。单施有机肥、单施无机肥以及有机肥和无机肥配施 3 种情况下,施氮量越多,0 ~ 160 cm 土壤中 NO₃⁻-N 累积量越多,迁移深度也越深。

表 5 0 ~ 40 cm 土体 NO₃⁻-N 平均累积量和平均质量比
Tab.5 Average soil NO₃⁻-N accumulation and content in 0 ~ 40 cm soil layer

处理 序号	NO ₃ ⁻ -N 平均累积量 /kg·hm ⁻²	NO ₃ ⁻ -N 平均质量比 /mg·kg ⁻¹	油菜折合产量 /kg·hm ⁻²
1	104.46 ^a	45.91 ^a	26 010 ^a
2	52.48 ^b	38.09 ^b	25 740 ^b
3	238.06 ^c	67.56 ^c	26 325 ^c
4	68.73 ^d	39.37 ^b	25 815 ^b
5	164.88 ^e	54.92 ^d	26 070 ^a
6	280.50 ^f	73.54 ^e	26 400 ^e
7	37.82 ^g	34.66 ^f	26 055 ^a

3 讨论

NH₄⁺-N 带正电,易被土壤胶体吸附,40 ~ 160 cm 土体中 NH₄⁺-N 虽然有迁移累积,但不同施肥模式质量比差异在 0 ~ 1.81 mg/kg 之间,土壤中 NH₄⁺-N 质量比相对较稳定,与唐莉莉^[20] 等研究结果一致,NH₄⁺-N 主要累积于表层 0 ~ 40 cm,但累积量仅相当

于 NO₃⁻-N 累积量的 7.4%,NH₄⁺-N 对地下水的污染风险较小。NO₃⁻-N 带负电,不易被土壤胶体吸附,易随水分下移,NO₃⁻-N 主要在 0 ~ 40 cm 土层中累积,与杨合法^[21] 等结论一致,但本文有机肥和无机肥配施与单施累积量的多少,与施氮量有关,与杨合法等无机肥比有机肥和无机肥配施累积量多不一致,可能是研究期不同。姜慧敏等^[16] 研究认为施肥越多,NO₃⁻-N 在土壤中累积就越多,与本文研究结果相似。

处理 2、处理 4 和处理 7 表层 0 ~ 40 cm NO₃⁻-N 的累积量比其他模式小,而处理 7 累积量最小;处理 7 油菜产量比处理 4 和处理 2 大,折合产量每公顷只比最大产量少 1.31%。处理 7 有机肥和无机肥配施对地下水的污染风险最小,油菜产量只有小幅减少,为最佳施肥模式。

4 结论

(1)日光温室中,不同施肥模式主要影响 0 ~ 40 cm 土壤中 NH₄⁺-N 的平均累积量和平均质量比,而且单施无机肥相应值大于单施有机肥,而单施和配施累积量和质量比的多少与施氮量有关。40 cm 以下土体中 NH₄⁺-N 质量比相对较稳定。单施有机肥、单施无机肥以及有机肥和无机肥配施 3 种情况下,施氮量越多,0 ~ 40 cm 土壤中 NH₄⁺-N 累积量也越多。

(2)NO₃⁻-N 质量比表层高、深层低,不同施肥模式主要影响 0 ~ 40 cm 土层 NO₃⁻-N 的平均累积量和平均质量比,当施氮量不超过 383 kg/hm² 时,从大到小依次为:单施无机肥、单施有机肥、有机肥和无机肥配施,当施氮量大于 600 kg/hm² 时,单施无机肥相应值大于单施有机肥,单施和配施累积量和质量比的多少与施氮量有关。单施有机肥、单施无机肥以及有机肥和无机肥配施 3 种情况下,施氮量越多,NO₃⁻-N 在 0 ~ 40 cm 土壤中累积量越多,在 0 ~ 160 cm 土壤中迁移深度越深,累积峰峰值越大。160 cm 以下土壤 NO₃⁻-N 不受施肥影响。

(3)有机肥和无机肥配施的处理 7 为北京农业种植区日光温室油菜的最佳施肥模式。

参 考 文 献

1 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):1 091 ~ 1 094.
Wang Zhaohui, Zong Zhiqiang, Li Shengxiu. Difference of several major nutrients accumulation in vegetable and cereal crop soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1 091 ~ 1 094. (in Chinese)

2 王西娜,王朝辉,李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. 生态学报,2007,27(1):197 ~ 204.
Wang Xi'na, Wang Zhaohui, Li Shengxiu. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water nitrogen dynamics [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1):197 ~ 204. (in Chinese)

- 3 潘洁,赵宏孺,陆文龙,等. 天津几种主要蔬菜硝酸盐污染及防治对策[J]. 天津农业科学,1998,4(3):12~15.
Pan Jie, Zhao Hongru, Lu Wenlong, et al. Nitrate pollution of eight main vegetables in Tianjin and its control [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 1998, 4(3):12~15. (in Chinese)
- 4 尤彩霞,陈清,王真,等. 不同有机肥对日光温室黄瓜土壤氮运移的影响的研究[J]. 土壤肥料,2006(2):52~55.
You Caixia, Chen Qing, Wang Zhen, et al. Effect of different organic manure fertilizers on soil nitrogen dynamic characteristics of cucumber in solar-greenhouse [J]. Soils and Fertilizers, 2006(2):52~55. (in Chinese)
- 5 Ramos C, Agut A, Lidón A L. Nitrate leaching in important crops of the Valencian Community region (Spain) [J]. Environmental Pollution, 2002, 118(2):215~223.
- 6 Diez J A, Caballero R, Roman R, et al. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(5):1 539~1 547.
- 7 Kevin W F, Kevin M O, Crum J R. The fate of nitrogen applied to a mature Kentucky bluegrass turf [J]. Crop Science, 2006, 46(1):209~215.
- 8 郭颖,王俊,吴蕊,等. 有机肥对设施菜地土壤硝态氮垂直运移的影响[J]. 土壤通报,2009,40(4):815~819.
Guo Ying, Wang Jun, Wu Rui, et al. Effect of organic manure on vertical distribution of NO_3^- -N in protected cultivation soil depth profile [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4):815~819. (in Chinese)
- 9 Evanylo G, Sherony C, Spargo J, et al. Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 127(1~2):50~58.
- 10 郭佩秋,李絮花,王克安,等. 氮肥用量对日光温室黄瓜和土壤硝态氮含量的影响[J]. 华北农学报,2009,24(1):185~188.
Guo Peiqiu, Li Xuhua, Wang Kean, et al. Effect of different levels N application on the nitrate accumulation in cucumber and soil in sunlight greenhouse [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(1):185~188. (in Chinese)
- 11 Neeteson J J, Booij R, Whitmore A P. A review on sustainable nitrogen management in intensive vegetable production systems [J]. ISHS Acta Horticultural, 1999, 506:17~26.
- 12 王立河,赵喜茹,王喜枝,等. 有机肥与氮肥配施对日光温室黄瓜和土壤硝酸盐含量的影响[J]. 土壤通报,2007,38(3):472~476.
Wang Lihe, Zhao Xiru, Wang Xizhi, et al. Effect of co-application of organic and nitrogen fertilizer on nitrate content of cucumber and soil in greenhouse [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007,38(3):472~476. (in Chinese)
- 13 Esawy M, Nasser A K, Paul R, et al. Effects of different organic and inorganic fertilizers on cucumber yield and some soil properties [J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2009, 5(4):408~414.
- 14 唐政,邱建军,邹国元,等. 有机种植条件下水肥管理对氮素淋洗和氮素平衡的影响研究[J]. 中国土壤与肥料,2010(1):19~24.
Tang Zheng, Qiu Jianjun, Zou Guoyuan, et al. Effects of different water and organic fertilizer managements on the N balance and nitrate leaching in sunlight greenhouse vegetable system [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(1):19~24. (in Chinese)
- 15 高伟,朱静华,李明悦,等. 有机无机肥料配合施用对设施条件下芹菜产量、品质及硝酸盐淋溶的影响[J]. 植物营养与肥科学报,2011,17(3):657~664.
Gao Wei, Zhu Jinghua, Li Mingyue, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of celery and soil nitrate leaching under greenhouse condition [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3):657~664. (in Chinese)
- 16 姜慧敏,张建峰,杨俊诚,等. 不同氮肥用量对设施番茄产量、品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(12):2 338~2 345.
Jiang Huimin, Zhang Jianfeng, Yang Juncheng, et al. Effects of different treatments of nitrogen fertilizer on yield, quality of tomato and soil NO_3^- -N accumulation in vegetable-greenhouse [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12):2 338~2 345. (in Chinese)
- 17 张迪,牛明芬,王少军,等. 不同有机肥处理对设施菜地土壤硝态氮分布影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(增刊):156~161.
Zhang Di, Niu Mingfen, Wang Shaojun, et al. Effects of different organic manure fertilization on NO_3^- -N distribution in greenhouse soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(Supp.): 156~161. (in Chinese)

- 3 Davis J P, Rohrer C A, Roesner L A. Calibration of rural watershed models in the North Carolina piedmont ecoregion [C]// Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat. Reston: ASCE, 2007:1 ~ 10.
- 4 Karuppasamy E, Postel N, Pomeroy C A, et al. The impact of smaller detention basins on flood hazard areas in Lenexa, Kansas [C]// Proceedings of the 2009 World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers. Kansas: ASCE Press, 2009: 845 ~ 849.
- 5 谷良贤,仇理宽,龚春林. 全局灵敏性分析方法研究[J]. 航空计算技术,2011,41(1):1 ~ 4,13.
Gu Liangxian, Qiu Likuan, Gong Chunlin. Study on global sensitivity analysis method [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011,41(1):1 ~ 4,13. (in Chinese)
- 6 Mishra S, Deeds N, Ruskauff G. Global sensitivity analysis techniques for probabilistic ground water modeling [J]. Ground Water, 2009, 47(5): 730 ~ 747.
- 7 Saltelli A, Chan K, Scott M. Sensitivity analysis [M]. New York: John Wiles & Sons Ltd., 2000.
- 8 Cloke H L, Pappenberger F, Renaud J P. Multi-method global sensitivity analysis (MMGSA) for modeling flood plain hydrological processes [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(11): 1 660 ~ 1 674.
- 9 王浩昌,杜鹏飞,赵冬泉,等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. 中国环境科学,2008,28(8):725 ~ 729.
Wang Haochang, Du Pengfei, Zhao Dongquan, et al. Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model [J]. China Environmental Science, 2008, 28(8): 725 ~ 729. (in Chinese)
- 10 Brockmann D, Morgenroth E. Comparing global sensitivity analysis for a biofilm model for two-step nitrification using the qualitative screening method of Morris or the quantitative variance-based Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) [J]. Water Science and Technology, 2007, 56(8): 85 ~ 93.
- 11 Varella H, Guérif M, Buis S. Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation: the case of soil parameters and a crop model [J]. Environmental Modeling and Software, 2010, 25(3): 310 ~ 319.
- 12 Sobol' I M, Tarantola S, Gatelli D, et al. Estimating the approximation error when fixing unessential factors in global sensitivity analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92(7): 957 ~ 960.
- 13 DiMaggio J, DiazRicci J C, Diaz M S. Global sensitivity analysis in dynamic metabolic networks [J]. Computers and Chemical Engineering, 2010, 34(5): 770 ~ 781.
- 14 Cropp R A, Braddock R D. The new Morris method: an efficient second-order screening method [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 78(1): 77 ~ 83.
- 15 Francos A, Elorza F J, Bouraoui F, et al. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behavior in hydrological studies at the catchment scale [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(2): 205 ~ 218.
- 16 Nguyen T G, DeKok J L. Systematic testing of an integrated systems model for coastal zone management using sensitivity and uncertainty analyses [J]. Environmental Modeling and Software, 2007, 22(11): 1 572 ~ 1 587.
- 17 Xu Y, Mynett A E. Application of uncertainty and sensitivity analysis in river basin management [J]. Water Science & Technology, 2006, 53(1): 41 ~ 49.

(上接第 78 页)

- 18 杨忠山,窦艳兵,王志强. 北京市地下水水位下降严重原因分析及对策研究[J]. 中国水利,2010(19):52 ~ 54.
Yang Zhongshan, Dou Yanbing, Wang Zhiqiang. Analysis on the reasons of the decline of ground water level in the primary water supply source area of Beijing and the countermeasures [J]. China Water Resources, 2010(19):52 ~ 54. (in Chinese)
- 19 辛术贞,武丹,武爽,等. 单施尿素和有机肥对温室油菜产量的影响[J]. 北方园艺,2009(9):124 ~ 125.
Xin Shuzhen, Wu Dan, Wu Shuang, et al. Effects of urea and organic fertilizer on the yield of greenhouse rape [J]. Northern Horticulture, 2009(9):124 ~ 125. (in Chinese)
- 20 唐莉莉,陈竹君,周建斌. 蔬菜日光温室栽培条件下土壤养分累积特性研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):70 ~ 74.
Tang Lili, Chen Zhujun, Zhou Jianbin. Characteristics of soil nutrient accumulations under solar greenhouse cultivation condition [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2):70 ~ 74. (in Chinese)
- 21 杨合法,范聚芳,梁丽娜,等. 长期不同施肥模式对日光温室土壤硝态氮时空分布及累积的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):246 ~ 252.
Yang Hefa, Fan Jufang, Liang Li' na, et al. Effects of long-term fertilization modes on spatio-temporal distribution and accumulation of soil nitrate nitrogen in solar greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2):246 ~ 252. (in Chinese)