

太湖和滇池流域保护地蔬菜氮肥去向研究

社会英¹, 冀宏杰², 徐爱国², 张认连², 程波¹, 张维理²

(1.农业部环境保护科研监测所, 农业部/天津市产地环境与农产品安全重点开放实验室, 天津 300191; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与养分循环重点开放实验室 北京 100081)

摘要:为了研究化肥氮在保护地土壤-蔬菜系统中的当季利用与损失, 在浙江嘉兴和云南昆明 15 个点位上进行 ¹⁵N 田间微区试验。结果表明, 保护地莴苣化肥氮当季利用率为 8.32%~14.52%, 保护地西芹化肥氮当季利用率为 6.34%~13.85%, 保护地结球生菜化肥氮当季利用率为 11.34%。相同土壤、同一种类蔬菜保护地种植中, 随着保护地种植年限的增加, 蔬菜对化肥氮当季利用率显著降低。莴苣和西芹吸收化肥氮和土壤氮的比例在不同种植年限保护地土壤上差异不显著。当季蔬菜收获后, 0~20 cm 土层 ¹⁵N 丰度和化肥氮残留量显著高于 20 cm 以下各土层。在保护地莴苣种植系统中, 施入土壤中的化肥氮有 18.98%~42.5% 损失。在保护地西芹种植系统中, 有 11.7%~18.9% 损失。在保护地生菜种植系统中, 施入土壤中的化肥氮有 16.0% 损失。

关键词: 蔬菜; 氮利用率; 氮素去向; ¹⁵N

中图分类号: X501 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2010)07-1410-07

Fate of Nitrogen Fertilizer Applied to Vegetables Cultivated in Plastic Greenhouses in Taihu and Dianchi Watersheds, China

DU Hui-ying¹, JI Hong-jie², XU Ai-guo², ZHANG Ren-lian², CHENG Bo¹, ZHANG Wei-li²

(1. Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Production Environment Agro-product Safety of Ministry of Agriculture and Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Food Safety, Tianjin 300191, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, the Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Beijing 100081, China)

Abstract: The application of large amounts of fertilizers, a conventional practice for the production of vegetable, generally lead to substantial accumulation of soil nutrients within a relatively short period of time. Fifteen ¹⁵N-labeled micro-plot field experiments were carried out to investigate the utilization and loss of chemical nitrogen fertilizer in soil-vegetable systems in Jiaying, Zhejiang Province and Kunming, Yunnan Province. The results showed that nitrogen use efficiency of lettuce (*Lactuca sativa*), celery (*Apium graveolens* L.) and leaf lettuce (*Lactuca sativa*) grown in the greenhouse in the same season were 8.32%~14.52%, 6.34%~13.85% and 11.34%. For the same kind of vegetables grown in the same soil, the nitrogen fertilizer use efficiency decreased with increasing cultivation time. There was little difference in ratio of nitrogen uptake of fertilizer and soils. After the current vegetable harvest, ¹⁵N abundance and nitrogen residue of 0~20 cm soil were significantly higher than that of deeper soil. 18.98%~24.3% of nitrogen was lost from soil-lettuce system. 11.7%~18.9% of nitrogen was lost from soil-celery system. 16.0% of nitrogen was lost from soil-leaf lettuce system.

Keywords: vegetable; nitrogen utilization; fate of nitrogen fertilizer; ¹⁵N

蔬菜保护地栽培能够形成蔬菜的反季节生产, 是我国蔬菜生产发展的主要趋势。此种生产方式蔬菜产

量高、养分循环强度大, 在实际生产中, 菜农非常注重肥料的施用, 尤其是氮肥。而长期大量施用氮肥将导致土壤中硝态氮累积^[1], 蔬菜品质下降^[2], 蔬菜对氮肥的利用率降低^[3-4]。Zotarelli 等^[5]通过 3 a 的田间试验证实, 番茄氮肥利用率随施氮量的增加而降低, 当施氮量超过 220 kg·hm⁻² 时, 番茄氮肥利用率显著降低。Carranca 等^[6]研究表明, 在土壤供氮充足的情况下, 继续增施化肥氮, 会造成化肥氮的当季利用率偏低。

近几年, 太湖流域保护地蔬菜生产向高效化方向

收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家科技部 973 项目(2002CB410806); 云南省院省校科技合作计划(2006YX35); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(农业部环境保护科研监测所)专项资金资助(2010-aepl-6)。

作者简介: 社会英(1977—), 女, 河北唐山人, 博士, 主要从事农业资源与环境方面研究工作。E-mail: duhuiying@tom.com。

通讯作者: 冀宏杰 E-mail: hjji@caas.ac.cn

迅速发展,蔬菜氮肥投入量均较高,每茬次氮肥投入量甚至超过 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [7]。杜连凤 [8] 采用微区试验研究表明,大蒜化肥氮当季利用率平均为 8.31%。闵炬等 [9] 对太湖地区保护地黄瓜和番茄化肥氮当季利用率进行研究得出,黄瓜化肥当季利用率为 16.16%~22.48%,番茄化肥当季利用率为 18.4%~29.3%。在滇池流域,雷宝坤等 [10] 证实,滇池湖滨带保护地西芹氮肥利用率为 4.3%~15.1%。杜彩艳等 [11] 对不同氮磷钾配比下花椰菜氮肥利用进行研究,得出花椰菜化肥氮当季利用率为 16.05%~31.13%。

我国保护地栽培大多是小农户经营,蔬菜的轮作类型、施肥和管理方式等存在一定的差异,影响蔬菜对氮的吸收利用。因此,要了解一个区域内蔬菜当季氮吸收利用和损失情况,需要同时进行多位点氮肥试验,而保护地蔬菜多位点氮肥试验的研究未见报道。本文对太湖和滇池流域保护地蔬菜氮肥当季去向进行研究,以明确我国蔬菜种植区氮肥当季利用率和损失率,使所得数据一方面为同类研究者提供参考,另一方面对于指导菜农合理施肥、安全生产、维护生态环境提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖流域属于典型的季风气候,四季分明,年均温为 $15.7 \text{ }^\circ\text{C}$,年降雨量为 $1060 \sim 1180 \text{ mm}$,平原被纵横交错的塘、浦、河、渠所分割,田、地、水交错分布。土

壤类型为水稻土,一季蔬菜作物的施氮量为 $37 \sim 1800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内。

滇池流域年平均气温 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,平均降雨量为 931.8 mm ,土壤类型为冲积性水稻土,成土母质是滇池湖积土,地下水位较浅,深为 70 cm 左右,土壤为粘质红壤,蔬菜施氮量变幅为 $211 \sim 1406 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2 试验设计

试验设种植 5 a 以下和种植 10 a 以上两个种植年限,在研究区域内选取种植 5 a 以下保护地 7 个点位(嘉兴 4 个点位,编号 1~4;昆明 3 个点位,编号 8~10),种植 10 a 以上保护地 8 个点位(嘉兴 4 个点位,编号 5~7;昆明 6 个点位,编号 11~15),每个点位均采用田间微区试验,微区面积为 0.39 m^2 ,试验点位 0~20 cm 土壤理化性状见表 1。嘉兴莴苣氮肥分两次施入,2/3 做基肥,1/3 做追肥随水浇入;昆明西芹氮肥 1/3 基肥,2/3 分 2 次追施,结球生菜 1/2 基肥施入,1/2 追施。磷肥和钾肥一次性做基肥施入。试验用氮肥为 ^{15}N 标记尿素, ^{15}N 丰度为 5.23%,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,试验点种植蔬菜和施用养分量见表 2。

埋设微区时,先将试验地块深耕 20 cm 耙平,PVC 筒($65 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$)放于微区所在的位置,用深耕耢小心将微区四周的土挖开,按照上下层的顺序放好,微区挖好后,将 PVC 筒小心套入土柱中,并保持与土壤紧贴,筒顶端距地面 10 cm ,将挖出来的土按照原来的顺序分别回填,压实。挑选大小一致的幼苗进行移栽,每个微区内栽蔬菜 4 株,移栽后,灌水 200 mm 。

表 1 试验地基本化学性状(0~20 cm)

Table 1 The basic chemical properties of experiments soil(0~20 cm)

点位	种植年限	编号	pH/H ₂ O	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	硝态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
嘉兴	5 a 以下	1	5.07	34.0	2.30	143	21.3	204	365
		2	4.72	36.2	2.31	186	22.0	164	348
		3	5.23	23.2	1.76	159	14.6	145	241
		4	5.70	53.7	2.88	44.2	13.1	15.7	76.7
	10 a 以上	5	4.53	43.9	3.09	285	71.6	213	213
		6	4.38	26.8	1.67	56.7	3.87	134	109
		7	5.05	20.0	1.31	43.9	3.34	171	123
昆明	5 a 以下	8	7.63	25.3	1.96	34.2	1.86	28.8	69.0
		9	6.71	26.8	2.05	32.5	0.00	38.9	80.5
		10	7.55	32.8	2.12	99.4	6.64	35.0	144
		11	6.19	41.0	2.61	246	8.19	110	662
	10 a 以上	12	6.59	30.8	2.24	183	39.3	38.1	165
		13	6.56	30.6	2.76	155	11.7	38.9	137
		14	7.03	24.7	1.60	141	5.03	143	106
		15	5.00	23.3	1.59	297	13.3	114	91.2

表2 试验点养分用量

Table 2 The amount of nutrients in the experiment at different sites

点位	种植年限	编号	蔬菜	种植时间	收获时间	N/kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O/kg·hm ⁻²
嘉兴	5 a 以下	1	茼蒿	2005-10-17	2005-12-26	375	225	225
		2	茼蒿	2005-10-10	2005-12-26	375	225	225
		3	茼蒿	2005-10-16	2006-1-10	375	225	225
		4	茼蒿	2005-10-16	2005-12-28	375	225	225
	10 a 以上	5	茼蒿	2005-10-13	2006-1-9	375	225	225
		6	茼蒿	2005-10-16	2006-1-8	375	225	225
		7	茼蒿	2005-10-16	2006-1-8	375	225	225
昆明	5 a 以下	8	西芹	2005-10-26	2006-3-10	450	150	375
		9	西芹	2005-10-26	2006-3-10	450	150	375
		10	西芹	2005-10-26	2006-3-10	450	150	375
		11	西芹	2005-10-26	2006-3-10	450	150	375
	10 a 以上	12	西芹	2005-10-26	2006-3-10	450	150	375
		13	西芹	2005-10-26	2006-3-10	450	150	375
		14	结球生菜	2005-10-26	2006-1-17	300	150	225
		15	结球生菜	2005-10-26	2006-1-17	300	150	225

1.3 试验方法

1.3.1 取样方法

每个试验点种植前取 0~20 cm 基础土样,收获时取微区内地上部蔬菜样品,计算鲜重,烘干粉碎后测植物全氮和 ¹⁵N 丰度;同时分 4 层取土样,0~20、20~40、40~60 cm 和 60~80 cm,土壤样品分别装入塑料袋、标记密封,带回实验室自然风干,处理后测定土壤全氮、¹⁵N 丰度。

1.3.2 测定方法

(1)植株全氮的测定:常规凯氏法测定^[12]。

(2)土壤全氮的测定:风干土样先通过 5%的高锰酸钾及还原铁粉还原硝态氮后,再用常规凯氏法测定^[12]。

(3)¹⁵N 丰度的测定方法:将凯氏法定氮后的蒸馏液酸化、浓缩,用稳定同位素气体质谱仪(MAT-251)测定^[13]。

(4)土壤 pH:水(去二氧化碳)土比为 2.5:1,搅拌 1 min,数显酸度计(PHS-2ST)测定^[12]。

(5)土壤硝态氮 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提,紫外分光光度计比色法^[12]。

(6)土壤铵态氮 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提,靛酚蓝比色法^[12]。

1.3.3 计算方法

(1)土壤各土层来自肥料全氮 Nitrogen derived from fertilizer, Ndff(%)

$$= \frac{\text{土壤中各层全氮的}^{15}\text{N原子百分超}}{\text{肥料的}^{15}\text{N原子百分超}} \times 100$$

(2)土壤各土层肥料氮残留量 Ndff(kg·hm⁻²)=土壤中各层全氮量(kg·hm⁻²)×Ndff(%)

(3)氮肥土壤残留率(%)

$$= \frac{\text{土壤Ndff(kg} \cdot \text{hm}^{-2})}{\text{氮肥施用量(kg} \cdot \text{hm}^{-2})} \times 100$$

(4)蔬菜地上部 Ndff(%)

$$= \frac{\text{蔬菜中的}^{15}\text{N原子百分超}}{\text{肥料的}^{15}\text{N原子百分超}} \times 100$$

(5)氮肥利用率(%)= $\frac{\text{蔬菜}^{15}\text{N原子百分超}}{\text{氮肥}^{15}\text{N原子百分超}} \times$

$$\frac{\text{蔬菜地上部吸氮量(kg} \cdot \text{hm}^{-2})}{\text{施氮量(kg} \cdot \text{hm}^{-2})} \times 100$$

(6)蔬菜 Ndff(kg·hm⁻²)

$$= \text{蔬菜 Ndff}(\%) \times \text{蔬菜地上部吸氮量(kg} \cdot \text{hm}^{-2})$$

(7)植物来自土壤全氮 Nitrogen derived from soil, Ndfs (kg·hm⁻²)=植物地上部吸氮量(kg·hm⁻²)-植物 Ndff(kg·hm⁻²)

1.3.4 统计方法

文中数据用 SAS 6.12 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤-蔬菜系统中化肥氮的去向

表 3 结果表明,相同种类蔬菜种植中,增加保护地蔬菜种植年限,显著降低化肥氮当季利用率。在嘉兴保护地茼蒿种植中,种植 5 a 以下保护地茼蒿化肥

氮当季平均利用率是种植 10 a 以上保护地莴苣的 1.7 倍,一季莴苣收获后,7 个点位 0~80 cm 土壤残留率的平均值为 59.1% 种植年限对化肥氮残留率影响不显著。在昆明保护地蔬菜种植中,种植 5 a 以下保护地西芹化肥氮当季平均利用率是种植 10 a 以上保护地西芹的 2.2 倍,在种植 10 a 以上的保护地蔬菜土壤上,结球生菜化肥氮的当季利用率是 11.34%,与西芹化肥氮的当季利用率无显著差异,种植年限对保护地蔬菜土壤的化肥氮残留率影响不显著。

以 0~80 cm 土壤中残留的化肥氮和当季蔬菜吸收的化肥氮为当季化肥氮总回收,计算化肥氮的损失(表 3)。分析可知,在嘉兴保护地莴苣种植系统中,种植 5 a 以下保护地化肥氮总回收量为施用化肥氮量的 81.0% 种植 10 a 以上保护地化肥氮总回收量为施用化肥氮量的 57.5%,经过莴苣一季吸收后,施入土壤中化肥氮有 19.0%~42.5% 损失。在昆明保护地西芹种植系统中,不同种植年限间,保护地西芹当季化肥氮的损失率差异不显著,有 11.7%~18.9% 损失,而保护地结球生菜种植中有 16.0% 的化肥氮损失。

2.2 化肥氮在不同土层中的分布

嘉兴试验点位中,莴苣不同种植年限土壤 0~20 cm 土层 ¹⁵N 丰度显著高于 20 cm 以下各土层,而 20 cm 以下各土层 ¹⁵N 丰度无显著差异(表 4)。相同土层、不同种植年限间 ¹⁵N 丰度差异不显著。昆明试验点位中,西芹保护地 40 cm 以上土层 ¹⁵N 丰度显著高

于 40 cm 以下土层,且保护地土壤 0~20 cm 土层 ¹⁵N 丰度显著高于 20~40 cm 土层。结球生菜保护地土壤 0~20 cm 土层 ¹⁵N 丰度显著高于 20 cm 以下各土层,而 20 cm 以下各土层 ¹⁵N 丰度无显著差异。

表 5 为化肥氮施入土壤中的残留量。嘉兴各试验点中,一季化肥氮施入土壤后,0~20 cm 土层化肥氮残留量显著高于 20 cm 以下各土层当季化肥氮残留量,种植 5 a 以下保护地土壤,0~20 cm 土层化肥氮残留量占 0~80 cm 土层化肥氮总残留量的 66%,种植 10 a 以上保护地土壤,0~20 cm 土层化肥氮残留量占 0~80 cm 土层化肥氮总残留量的 70%。在昆明 8 个试验点中,当季西芹收获后,0~20 cm 土层化肥氮残留量占 0~80 cm 化肥氮总残留量的 48%~58%,结球生菜收获后,0~20 cm 土层化肥氮残留量占 0~80 cm 化肥氮总残留量的 52%。

2.3 化肥氮对蔬菜当季氮吸收的贡献

蔬菜吸收的氮主要来源于化肥氮和土壤氮。从试验结果看出(表 6),嘉兴 7 个试验点上,莴苣地上部总吸氮量中有 42.6%~51.3% 来自化肥氮,土壤氮的贡献占 48.7%~57.4%,种植年限对莴苣吸收化肥氮和土壤氮的比例影响不显著;在相同施肥量的前提下,由于不同种植年限保护地土壤上莴苣地上部总吸氮量不同,随着保护地种植年限的增加,莴苣吸收的化肥氮量显著降低。

昆明试验点中,西芹地上部吸收的化肥氮和土壤

表 3 保护地土壤-蔬菜系统中化肥氮去向

Table 3 The fate of ¹⁵N fertilizer in soil-vegetable system

点位	种植年限	试验点数/n	蔬菜吸收		0~80 cm 土壤残留		损失量	
			吸收量/kg·hm ⁻²	利用率/%	残留量/kg·hm ⁻²	土壤残留率/%	损失量/kg·hm ⁻²	损失率/%
嘉兴	5 a 以下	4	107bc	14.5a	249ab	66.5a	71.2ab	19.0ab
	10 a 以上	3	75.2c	8.32bc	184b	49.2a	159a	42.5a
昆明	5 a 以下	3	199a	13.9ab	335a	74.5a	52.7ab	11.7b
	10 a 以上	3	131b	6.34c	334a	74.7a	85.4ab	18.9ab
		2	75.3c	11.3abc	218b	72.7a	47.9ab	16.0ab

注:同一地点不同种植年限字母不同为差异显著,5%,下同。

表 4 不同土层 ¹⁵N 丰度(%)

Table 4 ¹⁵N abundance in different soil depths

土层/cm	嘉兴(n=7)			昆明(n=8)			
	5 a 以下(n=4)	10 a 以上(n=3)	平均	5 a 以下(n=3)	10 a 以上(n=3)	10 a 以上(n=2)	平均
0~20	0.653a	0.622a	0.639a	0.781a	0.762a	0.742a	0.761a
20~40	0.444b	0.414b	0.429b	0.625b	0.580b	0.491b	0.565b
40~60	0.438b	0.409b	0.423b	0.467c	0.518bc	0.462b	0.482c
60~80	0.410b	0.396b	0.403b	0.405c	0.431c	0.421b	0.419c

表5 土壤中不同层次化肥氮残留量(kg·hm⁻²)Table 5 Residual ¹⁵N amount in different soil depths at two sites(kg·hm⁻²)

土层/cm	嘉兴(n=7)			昆明(n=8)			
	5 a 以下(n=4)	10 a 以上(n=3)	平均	5 a 以下(n=3)	10 a 以上(n=3)	10 a 以上(n=2)	平均
0~80	249	184	222	335	378	218	314
0~20	164a	130a	150a	194a	180a	114a	167a
20~40	46.3b	26.0b	37.6b	98.1b	105b	64.2b	90.4b
40~60	25.6b	19.2b	22.9b	31.9c	74.8bc	21.3c	41.1c
60~80	13.1b	9.17b	11.4b	11.4c	18.8c	19.0c	15.7c

表6 蔬菜地上部吸收肥料氮和土壤氮的比例

Table 6 Ratios of N uptake from fertilizer and soil to total vegetable N uptake

点位/site	种植年限	蔬菜/vegetable	试验点数/n	来自肥料氮/%	来自肥料氮/kg·hm ⁻²	来自土壤氮/%	来自土壤氮/kg·hm ⁻²
嘉兴	5 a 以下	茼蒿	4	51.3a	54.5ab	48.7c	52.6c
	10 a 以上	茼蒿	3	42.6ab	31.2c	57.4bc	44.0c
昆明	5 a 以下	西芹	3	31.4bc	62.3a	68.6ab	136a
	10 a 以上	西芹	3	21.9c	28.5c	78.1a	102b
		结球生菜	2	44.4ab	34.0bc	55.6bc	41.3c

氮的比例在不同种植年限保护地上差异不显著,相同的施肥量,种植5 a 以下保护地土壤上西芹吸收的化肥氮和土壤氮量显著高于种植10 a 以上保护地上西芹的吸氮量。对于结球生菜而言,种植10 a 以上保护地土壤,地上部总吸氮量中有50%以上来自土壤氮。相同种植年限的土壤上,结球生菜吸收肥料氮的比例显著高于西芹吸收肥料氮的比例,吸收土壤氮的比例显著低于西芹吸收土壤氮的比例。

3 讨论

提高氮肥当季利用率的潜力主要在于适量施肥,减少其施入土壤后的损失^[14]。Halitligil等^[15]研究证实,当施氮量从400 kg·hm⁻²增至1 000 kg·hm⁻²时,土豆的当季利用率降低50%。闵炬等^[9]对大棚番茄和黄瓜的研究表明,随着施氮量的增加,番茄和黄瓜氮素当季利用率呈降低趋势。本研究表明,随着保护地种植年限的增加,同一地点、相同种类的保护地蔬菜化肥氮当季利用率显著降低。目前有关茼蒿对氮肥当季利用的研究结果不一。肖时运等^[16]研究表明,茼蒿氮肥当季利用率为18.8%~27.8%,黄云等^[17]报道,在重庆市沙坪坝区白市驿镇紫色土,茼蒿施用尿素后,当季利用率为37.5%,而本研究太湖流域7个点位保护地茼蒿化肥氮当季利用率为8.3%~14.5%,明显低于以上的研究结果。这一方面与土壤供氮水平有关,本研究保护地土壤供氮充足,继续增施化肥氮,会造成化肥氮的当季利用偏低,另一方面,还可能由于本研究

区域水补充较多,氮素通过淋洗途径损失相对较多有关。对滇池流域6个点位保护地西芹化肥氮当季利用率为6.34%~13.9%,2个点位保护地结球生菜化肥氮当季利用率为11.34%。雷宝坤等^[10]对滇池湖滨带一个点位保护地西芹氮肥利用进行研究,西芹化肥氮当季利用率为4.30%~15.1%,与本研究结果较一致。

本试验中,太湖流域7个点位和滇池流域8个点位上0~80 cm土壤-蔬菜系统中化肥氮的总损失率为11.7%~42.5%。Jackson等^[18]认为,氮肥用量超过蔬菜的需要而使得土壤中硝态氮淋失。Insaf等^[19]研究表明,蔬菜种植区地下水中硝酸盐含量显著高于其他土地利用方式。宋科等^[20]研究证实,太湖流域菜地渗漏水中氮素含量显著高于水田,而土壤中氮素损失量与施氮量和土壤水分有关^[21]。张学军等^[22]认为,在高量的氮素处理中,土壤中会残留大量以硝态氮为主的无机氮,控制灌水可减少当季土壤-芹菜系统中氮素的淋洗损失。胡万里等^[23]研究表明,保护地西芹施氮肥后,有相当部分被直接淋洗到地下水,施氮量为450 kg·hm⁻²时,直接淋洗量达到41.7 kg·hm⁻²。本研究区域地下水位较高,蔬菜生产中灌水的次数频繁,损失的部分可能主要以渗漏的形式损失进入水环境。

4 结论

(1)同一种类蔬菜保护地种植中,随着蔬菜保护地种植年限的增加,蔬菜对化肥氮当季利用率显著降低。不同种植年限保护地土壤对茼蒿、西芹和结球生

菜吸收肥料氮和土壤氮的比例影响不显著。

(2)嘉兴试验点位中,莴苣不同种植年限土壤上0~20 cm 土层 ^{15}N 丰度显著高于20 cm 以下各土层 ^{15}N 丰度;昆明试验点位中,西芹保护地40 cm 以上土层 ^{15}N 丰度显著高于40 cm 以下土层 ^{15}N 丰度,且保护地土壤0~20 cm 土层 ^{15}N 丰度显著高于20~40 cm 土层 ^{15}N 丰度。

(3)同一点位、不同种植年限保护地蔬菜种植系统中,蔬菜当季化肥氮的损失率差异不显著。经过莴苣一季吸收后,施入土壤中化肥氮有19.0%~42.5%损失。在昆明保护地西芹种植系统中,施入土壤中化肥氮有11.7%~18.9%损失。

参考文献:

- [1] 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 氮肥施用量对设施番茄氮素利用及土壤 NO_3^- -N 累积的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3761-3768.
ZHANG Xue-jun, CHEN Ying, CHEN Xiao-qun, et al. Nitrogen fertilizer effects on N recovery and residual soil NO_3^- -N for greenhouse grown tomato[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3761-3768.
- [2] Lisiewska Z, Kmieciak W. Effect of level of nitrogen fertilizer, processing conditions and period of shortage of frozen broccoli and cauliflower on vitamin C retention[J]. *Food Chemistry*, 1996, 57(2): 267-270.
- [3] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 南京郊区番茄中氮肥的效应与去向[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1839-1844.
CAO Bing, HE Fa-yun, XU Qiu-ming, et al. Use efficiency and fate of fertilizer N in tomato field of Nanjing suburb[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1839-1844.
- [4] 张贵龙, 任天志, 邱建军, 等. 日光温室白萝卜生产系统的氮素利用与平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1500-1507.
ZHANG Gui-long, REN Tian-zhi, QIU Jian-jun, et al. Nitrogen utilization and balance of *Raphanus sativus* L. production system in greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1500-1507.
- [5] Zotarelli L, M D Dukes, Scholberg J M S, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96: 1247-1258.
- [6] Carranca C, Silva A, Fernandes M, et al. ^{15}N fertilizer use efficiency by spinach grown under Portuguese field conditions[J]. *Acta Horti*, 2001, 563: 67-72.
- [7] 冀宏杰, 张认连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与养分平衡状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2008, 5: 70-75.
JI Hong-jie, ZHANG Ren-lian, WU Shu-xia, et al. Analysis of fertilizer input and nutrient balance of farmland in Taihu watershed [J]. *Soil and Fertilizer of China*, 2008, 5: 70-75.
- [8] 杜连凤. 长江三角洲地区菜地系统氮肥利用与土壤质量变异研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
DU Lian-feng. The nitrogen fertilizer use efficiency and soil quality variation of vegetable-soil system in Yangtze delta area[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.
- [9] 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.
- [10] 雷宝坤, 段宗颜, 张维理, 等. 滇池流域保护地西芹施肥研究[J]. 西南农业学报, 2004, 17: 121-126.
LEI Bao-kun, DUAN Zong-yan, ZHANG Wei-li, et al. Study on fertilization of protective cultivation of America celery in Dianchi Lake drainage areas[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2004, 17: 121-126.
- [11] 杜彩艳, 段宗颜, 胡万里, 等. 氮磷钾肥不同配比对花椰菜产量和养分吸收利用的研究[J]. 西南农业学报, 2008, 21(3): 714-717.
DU Cai-yan, DUAN Zong-yan, HU Wan-li, et al. Study of different NPK treatments on head yield and nutrient uptake of cauliflower[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(3): 714-717.
- [12] 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.
LU Ru-kun. Analytical method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 2000.
- [13] 苏波, 韩兴国, 黄建辉. ^{15}N 自然丰度法在生态系统氮素循环研究中的应用[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 408-416.
SU Bo, HAN Xing-guo, HUANG Jian-hui. Application of ^{15}N natural abundance method to the research on nitrogen cycling in natural ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 408-416.
- [14] 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 施氮模式对番茄氮素吸收利用及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2623-2630.
JIANG Hui-min, ZHANG Jian-feng, YANG Jun-cheng, et al. Effects of models of N application on greenhouse tomato N uptake, utilization and soil NO_3^- -N accumulation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2623-2630.
- [15] Halitigil M B, Akin A, Ylbeyi A. Nitrogen balance of nitrogen-15 applied as ammonium sulphate to irrigated potatoes in sandy textured soils[J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, 35: 369-378.
- [16] 肖时运, 刘强, 荣湘民, 等. 不同施氮水平对莴苣产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 913-917.
XIAO Shi-yuan, LIU Qiang, RONG Xiang-min, et al. Effects of N applying rates on yield, quality of Asparagus lettuce and the N use efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 913-917.
- [17] 黄云, 廖铁军, 王正银, 等. 控释氮肥对莴苣生长及氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 219-222.
HUANG Yun, LIAO Tie-jun, WANG Zheng-yin, et al. Influence of controlled release nitrogen fertilizer on growth and nitrogen fertilizer utilization ratio of the lettuce[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 219-222.
- [18] Jackson L E, Stivers L J, Warden B T, et al. Crop nitrogen utilization

- and soil nitrate loss in a lettuce field[J]. *Fert Res*, 1994, 37 :93-105.
- [19] Insaf S Babiker, Mohamed A A Mohamed, H Terao, et al. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system [J]. *Environment International*, 2004, 29 :1009-1017.
- [20] 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 farm lands with different crop in riverine plain area of Taihu Lake [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(3) :88-92.
- [21] 高月亮, 华 璐, 蔡典雄, 等. 氮肥利用及其提高利用率的途径与方法[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2006, 27(4) :57-61/67.
GAO Yue-liang, HUA Lu, CAI Dian-xiong, et al. Utilization of nitrogenous fertilizer and the ways or methods on improving its efficiency[J]. *Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition)*, 2006, 27(4) :57-61/67.
- [22] 张学军, 罗建航, 陈晓裙, 等. 不同施氮措施对土壤-芹菜体系中无机氮动态变化与平衡的影响[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(3) :52-56/72.
ZHANG Xue-jun, LUO Jian-hang, CHEN Xiao-qun, et al. Effect of different water and nitrogen measures dynamic inorganic N movement and balance in soil- celery system[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2007, 30(3) :52-56/72.
- [23] 胡万里, 孔令明, 段宗颜, 等. 滇池流域西芹保护地氮流失分析[J]. 云南农业大学学报, 2006, 21(5) :670-672/680.
HU Wan-li, KONG Ling-ming, DUAN Zong-yan, et al. Analysis on runoff of nitrogen protective celery field Dianchi Lake drainage areas[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2006, 21(5) :670-672/680.