

填闲作物消减蔬菜生产棚室土壤硝态氮潜力研究

尹 兴¹, 汪新颖¹, 张丽娟¹, 倪玉雪¹, 任翠莲^{1*}, 巨晓棠², 吉艳芝^{1*}

(1.河北农业大学资源与环境学院/河北省农田生态环境重点实验室/河北农业大学邸宏杰土壤与环境实验室, 河北 保定 071001;

2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:为了明确填闲作物对棚室蔬菜土壤 NO_3^- -N 的消减潜力,揭示不同填闲作物消减土壤剖面累积 NO_3^- -N 的特征,并为探索阻控棚室蔬菜土壤氮素淋溶损失机制及预防地下水污染提供理论依据,本研究以华北平原传统的棚室蔬菜轮作体系作为研究对象,在蔬菜休闲期采用种植深根型填闲作物甜玉米、甜玉米+牛膝间作和白菊花的田间原位修复技术。结果表明:甜玉米和甜玉米+牛膝处理的总氮量和吸氮量较高,分别为 20.11 、 $19.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 240.34 、 $287.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于白菊花的 $5.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $57.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;根长密度和根干重均随土壤剖面深度的加深而降低,其中白菊花处理的根长密度与根干重在 $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层显著高于其他处理, 30 cm 土层以下的根干重在各处理间无差异,根长密度在数值上表现为间作甜玉米>甜玉米>白菊花>间作牛膝;甜玉米对土壤剖面 $0\sim 200 \text{ cm}$ 土层的消减量高达 $907.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于白菊花的 $891.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和甜玉米+牛膝间作的 $879.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,在蔬菜作物轮作的间歇期,种植填闲作物能有效地降低硝态氮在土壤中的累积,控制土壤剖面硝态氮向下淋溶。

关键词:棚室蔬菜;填闲作物; NO_3^- -N 消减

中图分类号:S181

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)03-0222-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0325

The Potential Research of Catch Crop in Decrease Soil Nitrate Under Greenhouse Vegetable Production

YIN Xing¹, WANG Xin-ying¹, ZHANG Li-juan¹, NI Yu-xue¹, REN Cui-lian^{1*}, JU Xiao-tang², JI Yan-zhi^{1*}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University/Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province/Di Hong-jie Soil and Environmental Laboratory, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2.College of Agricultural Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to clarify the impact of catch crops on greenhouse vegetable soil nitrate, explore the mechanism of barrier and control soil nitrogen leaching losses in greenhouse, and provide a theoretical basis for control nitrogen leaching and prevention of groundwater pollution, this study selected the traditional greenhouse vegetable rotation system in North China plain as research subjects, using field situ remediation technologies on deep-root planting catch crops in the vegetable fallow period by sweet corn, *Achyranthes bidentata* and white *Chrysanthemum*. The results showed that: nitrogen content and nitrogen uptake of sweet corn and sweet corn with *Achyranthes bidentata* intercropping were the highest, respectively $20.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $19.62 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $240.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $287.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, significantly higher than white *Chrysanthemum*. The density of root length and root dry weight decreased with soil depth in the profiles, root length density was demonstrated in order as: intercropping sweet corn>sweet corn>white *Chrysanthemum*>intercropping *Achyranthes bidentata* blume. The reduction of NO_3^- -N of sweet corn reached $907.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in soil profile $0\sim 200 \text{ cm}$, significantly higher than sweet corn and hyssop intercropping and white *Chrysanthemum*. In the interim period of vegetable crop rotation, planting catch crops could effectively reduce nitrate accumulation in the soil, control the soil profile nitrate leaching down.

Keywords: greenhouse vegetable; catch crop; NO_3^- -N decrease

蔬菜生产是一种高度集约化的栽培模式^[1],肥料的施用量往往是作物需肥量的数倍^[2-3]。由于蔬菜作

物根系较浅,且施肥灌水量大而频繁,土壤中累积的硝酸盐容易发生淋洗,移出作物根区,对地下水源造成严重的污染^[4],直接影响到人类的健康^[5-6]。有资料显示,全国蔬菜生产规模前 10 位的省份中,氮肥的平均用量均超过了 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,甚至个别达到 $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[7],菜田在 $0\sim 100 \text{ cm}$ 土层 NO_3^- -N 的累积量达到 $700 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[8]。Ju 等^[9]对华北平原设施蔬菜种植区域的调查结果显示,小于 15 m 的浅水井硝酸

收稿日期:2014-11-18

基金项目:河北省教育厅项目(Q2012130);国家自然科学基金项目(30940048)

作者简介:尹 兴(1988—),男,河北邢台人,在读博士研究生,主要从事土壤环境质量方向的研究。

E-mail: yinxing_2007@163.com

* 通信作者:吉艳芝 E-mail: jiyanzhi@hebau.edu.cn

任翠莲 E-mail: 411970056@qq.com

盐含量超过 WHO 饮用水标准 $10\text{ mL N}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高达 99%。填闲作物具有生长期短,地上部及根系生长迅速、生物量大、根系深等特点,在蔬菜休闲期种植填闲作物,可以降低土壤硝态氮的累积,减少氮素硝酸盐的淋溶^[10-12]。Staver 等^[13]研究表明,在种植玉米后种植黑麦与休闲耕地相比能减少硝态氮淋失量的 80%;Thorup-Kristensen 等^[14]研究表明,与不种植填闲作物相比,填闲作物的种植可以减少后茬韭菜和红甜菜 1.0 m 以下 $60\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮累积。填闲作物作为生物手段在减少氮素淋洗所带来的环境问题以及提高种植体系内养分循环方面的作用在国际上已经得到了普遍的认可^[15-16],但关于华北平原填闲作物的种植对土壤硝态氮含量的变化研究较少。我国北方的气候决定填闲作物种植应在夏季,要耐高温及耐涝性强,且具有一定的经济价值。因此,本研究以华北平原传统棚室蔬菜土壤作为研究对象,在蔬菜休闲期采用种植深根型填闲作物甜玉米、白菊花、牛膝及甜玉米间作的田间原位修复技术,揭示不同填闲作物消减土壤剖面累积 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的特征,明确填闲作物对土壤 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的影响,并为探索阻控棚室蔬菜土壤氮素淋溶损失机制及预防地下水污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2010 年 6 月至 10 月在河北省定州市赵村镇西甘德村蔬菜基地进行,选择种植年限大于 10 年的日光温室大棚。西甘德村试验点所选大棚长 34.7 m ,宽 4.4 m ,面积为 153 m^2 。土壤质地为砂壤土,供试大棚土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

1.2.1 试验处理

供试填闲作物为甜玉米、白菊花和牛膝,设置休闲、甜玉米、甜玉米+牛膝间作和白菊花 4 个处理。试验小区面积为 $2\text{ m}\times 3.5\text{ m}$,小区间隔为 0.2 m ,区组间隔为 0.6 m ,试验小区采用区组条件下随机排列,每个处理重复 3 次。

1.2.2 田间管理

休闲(Fallow):作为对照,不种植任何填闲作物,定期人工除草。

甜玉米(Sweet corn):供试品种为京科糯 2000,播种量为 $1.5\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,行距 50 cm ,株距 30 cm , $6\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$,种植密度为 $60\text{ 000 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,开穴种植,每穴 3 粒,覆土 3 cm 。播种后进行灌溉。

甜玉米+牛膝间作(Sweet corn+Achyranthes bidentata):甜玉米为京科糯 2000,牛膝为怀牛膝,甜玉米与牛膝相间种植,行距 50 cm ,甜玉米的播种量为 $1.5\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,牛膝的播种量为 $3\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,采用条播密植后覆土,播种后 15 d 间苗,保留株距 5 cm 。

白菊花(Chrysanthemum):供试品种为药用白菊花,穴栽密度为 30 cm ,行距 50 cm ,每穴 2 株,种植深度为 10 cm ,栽植后浇足定根水。种植密度为 $50\text{ 000 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2010 年 9 月 27 日收获甜玉米,2010 年 10 月 28 日收获牛膝与白菊花。所有处理在生长期均不施用任何肥料,并进行定期人工除草。

1.3 样品测定方法

(1)土壤基本理化性质:采用常规方法分析测定;土壤的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 含量采用 TRACCS2000 型连续流动分析仪测定。

表 1 西甘德村供试土壤的基本理化性质
Table 1 Basic properties of the experimental soil

土层深度 /cm	容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	pH 值	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
0~20	1.21	6.69	28.94	2.49	300.92	222.30	263.35
20~40	1.31	6.85	27.77	2.35	273.38	200.16	232.00
40~60	1.48	6.72	18.40	1.68	129.49	159.68	134.95
60~80	1.55	7.21	9.48	0.90	35.99	125.03	109.56
80~100	1.61	7.54	4.89	0.56	11.58	42.81	93.16
100~120	1.41	7.67	7.33	0.79	24.40	45.60	88.97
120~140	1.49	7.81	1.83	0.38	3.04	12.13	74.70
140~160	1.53	7.80	3.76	0.51	8.19	20.24	60.43
160~180	1.55	7.90	1.02	0.27	1.28	6.81	40.19
180~200	1.54	7.82	2.00	0.37	3.23	15.51	45.19

(2)根长密度、根干重的测定:将取回的根带土冷藏保存,用水充分冲洗各层根系,过 0.15 mm 筛,用镊子挑除杂质,将待测根放在盛有少量水的长方形平盘中,用镊子小心地将根分开,避免根重叠和堆积,用扫描仪扫描根系并存储到计算机中,用 WinRhizo Pro Vision 5.0a 分析软件计算出各层根长密度。把已经扫描好的根装进信封,烘干称重。

1.4 统计方法

数据处理分别采用 Excel 2003 和 SAS V8 等软件进行数据的方差分析和 LSD 检验。运用 SURFER 软件进行等值线图的制作。

2 结果与分析

2.1 不同填闲作物地上部的生物量、含氮量和吸氮量

由表 2 可以看出,最终收获时,单作甜玉米和甜玉米+牛膝间作的总生物量分别为 20.11、19.62 t·hm⁻²,二者差异显著,且明显高于白菊花处理;间作甜玉米影响籽粒的形成,较单作减少 2.15 t·hm⁻²。含氮量与生物量的趋势正相反,在秸秆中,间作牛膝的含氮量最高,达 21.27 g·kg⁻¹,显著高于其他处理,单作甜玉米最低,仅 10.94 g·kg⁻¹;在籽粒中,白菊花的含氮量最高,与间作牛膝无显著差异,但显著高于甜玉米。吸氮量与生物量趋势一致,甜玉米+牛膝间作与单作甜玉米处理的吸氮量最高,分别为 287.56 kg·hm⁻² 和 240.34 kg·hm⁻²,二者差异不显著,但明显高于白菊花。

2.2 不同填闲作物的根长密度和根干重

填闲作物收获后的根长密度和根干重见图 1。从图 1 可以看出,根长密度和根干重均随土壤剖面深度的加深而降低。0~20 cm 土层中,白菊花的根长密度与根干重最大,间作甜玉米次之,尤其是 0~10 cm 中,白菊花的根干重明显高于其他处理;白菊花的根长密度与甜玉米差异不显著。30 cm 土层以下的根干重在各处理间无差异,但 30~90 cm 的根长密度数值上表

现为:间作甜玉米>甜玉米>白菊花>间作牛膝,部分土层的间作甜玉米显著高于白菊花和牛膝,与单作甜玉米差异不显著。

2.3 土壤剖面 NO₃⁻-N 的动态变化

图 2 反映了一年试验各处理土壤 NO₃⁻-N 含量的动态变化。总体来看,土壤硝态氮发生了向下移动的现象,种植结束时 NO₃⁻-N 出现了不同深度的累积。填闲作物种植降低了土壤剖面 NO₃⁻-N 残留,0~200 cm 的土层中,甜玉米的残留量最少,NO₃⁻-N 残留主要集中在 80~100 cm 的土层中。从各个时期来看,填闲作物生长初期的土壤表层 NO₃⁻-N 含量最高;在植物生长第 23 d 时发生了降雨,填闲作物处理表层硝态氮向下淋洗到 40 cm;种植后 40~60 d,所有填闲作物处理土壤表层硝态氮均明显降低,其中甜玉米的降低程度尤为明显,此时,休闲处理土壤 NO₃⁻-N 淋洗至 120 cm,甜玉米与间作淋洗至 60 cm,白菊花淋洗到 140 cm;植物生长到 71 d 时又出现 1 次降水,休闲处理土壤 NO₃⁻-N 已淋洗至 160 cm,甜玉米淋洗至 80 cm,甜玉米+牛膝间作和白菊花已淋洗至 140 cm;直至收获,填闲处理土壤表层 NO₃⁻-N 呈下降趋势。

2.4 填闲作物收获时土壤剖面 NO₃⁻-N 的消减量

表 3 为不同填闲作物收获时土壤剖面 NO₃⁻-N 的累积情况,可以看出,甜玉米与白菊花在 0~60 cm 土层的消减能力较强,其值分别达到 1 045.12、1 109.78 kg·hm⁻²,间作处理相对较低。从 40 cm 开始,休闲和间作处理出现硝态氮累积,80 cm 处甜玉米和白菊花处理也出现不同程度的硝态氮累积,到 100~120 cm 又出现了消减趋势,随后又表现为累积。0~200 cm 土层,土壤硝态氮的消减量为甜玉米>白菊花>间作>休闲。

3 讨论

在我国北方设施蔬菜体系中,不合理的水氮调控管理模式使土壤中累积大量的硝态氮^[9]。有研究表明,

表 2 不同填闲作物地上部生物量和吸氮量

Table 2 Aboveground biomass and N uptake of different catch crops

处理		生物量 /t·hm ⁻²			含氮量 /g·kg ⁻¹		吸氮量 /kg·hm ⁻²		
		秸秆	籽粒	合计	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	合计
甜玉米		10.51 ± 0.26a	9.59 ± 0.11a	20.11a	10.94 ± 0.38b	13.06 ± 0.19c	114.90 ± 1.60a	125.44 ± 1.23a	240.34a
间作	甜玉米	9.26 ± 0.17a	7.44 ± 0.06b	19.62b	12.49 ± 0.29b	14.36 ± 0.31bc	115.35 ± 1.37a	106.42 ± 1.08a	287.56a
	牛膝	1.60 ± 0.03c	1.32 ± 0.02c		21.27 ± 0.61a	18.52 ± 0.40ab	29.72 ± 0.58b	36.07 ± 0.33b	
	白菊花	5.05 ± 0.10b	2.42 ± 0.07c	5.81c	11.18 ± 0.35b	20.26 ± 0.37a	37.69 ± 0.34b	19.44 ± 0.25b	57.13b

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column mean significant difference at 5% level.

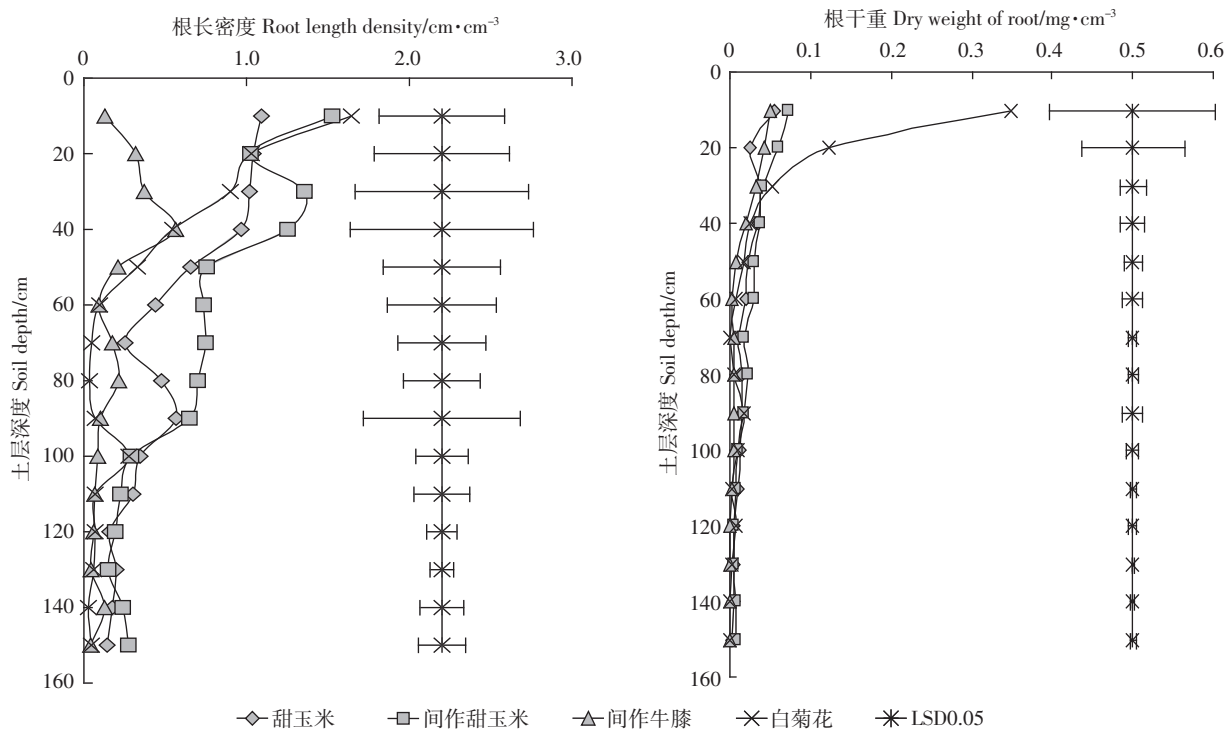


图 1 填闲作物收获后根系在不同土层的分布情况

Figure 1 Root distribution of catch crop at different soil layers after harvest

表 3 填闲作物收获后土壤剖面硝态氮的消减量

Table 3 Decrease of NO₃⁻-N in soil profile after harvest

土层深度 / cm	播种前 / kg·hm ⁻²	收获后 /kg·hm ⁻²				消减量 /kg·hm ⁻²			
		休闲	甜玉米	间作	白菊花	休闲	甜玉米	间作	白菊花
0~20	858.19	339.38	107.39	144.17	59.83	518.81	750.8	714.02	798.37
20~40	461.35	389.88	172.55	196.71	159.07	71.47	288.8	264.64	302.28
40~60	177.62	416.54	172.1	239.42	168.5	-238.91	5.52	-61.79	9.13
60~80	201.57	225.03	169.34	210.54	167.23	-23.46	32.23	-8.97	34.34
80~100	162.07	245.92	242.93	142.15	183.08	-83.86	-80.86	19.91	-21.01
100~120	225.35	225.46	156.52	106.98	172.15	-0.11	68.83	118.36	53.19
120~140	24.38	170.33	125.35	93.76	203.38	-145.95	-100.98	-69.38	-179.01
140~160	85.03	186.06	116.59	130.74	151.85	-101.02	-31.56	-45.71	-66.82
160~180	79.31	130.85	96.51	132.1	121.27	-51.54	-17.19	-52.78	-41.96
180~200	112.87	140.57	120.58	111.23	110.22	-27.7	-7.72	1.64	2.64
0~60	1 497.17	1 145.8	452.04	580.3	387.39	351.36c	1 045.12a	916.87b	1 109.78a
60~160	698.39	1 052.8	810.74	684.18	877.69	-354.40d	-112.34b	14.21a	-179.30c
160~200	192.18	271.42	217.09	243.33	231.5	-79.24c	-24.91a	-51.15bc	-39.32b
0~200	2 387.74	2 470.01	1 479.87	1 507.8	1 496.58	-82.27c	907.87a	879.93b	891.16b

注:同行数据后不同字母表示处理间差异达 5%显著水平。
Note: Values followed by different lowercase letters in the same row mean significant difference at 5% level.

棚室蔬菜在 0~400 cm 的硝态氮累积量明显高于大田,0~100、100~200、200~300 cm 和 300~400 cm 分别为农田的 12.3、3.8、4.6 倍和 5.1 倍,且棚龄年限越长,土壤中硝态氮的含量越高^[17]。累积的硝态氮在灌溉和降雨条件下很容易向深层淋洗污染地下水^[18],因此如何有效地控制硝态氮的淋洗是设施蔬菜种植体系中急需解决的问题。已有研究表明,种植填闲作物能有效地降低硝态氮在土壤中的累积,原因主要在于填闲

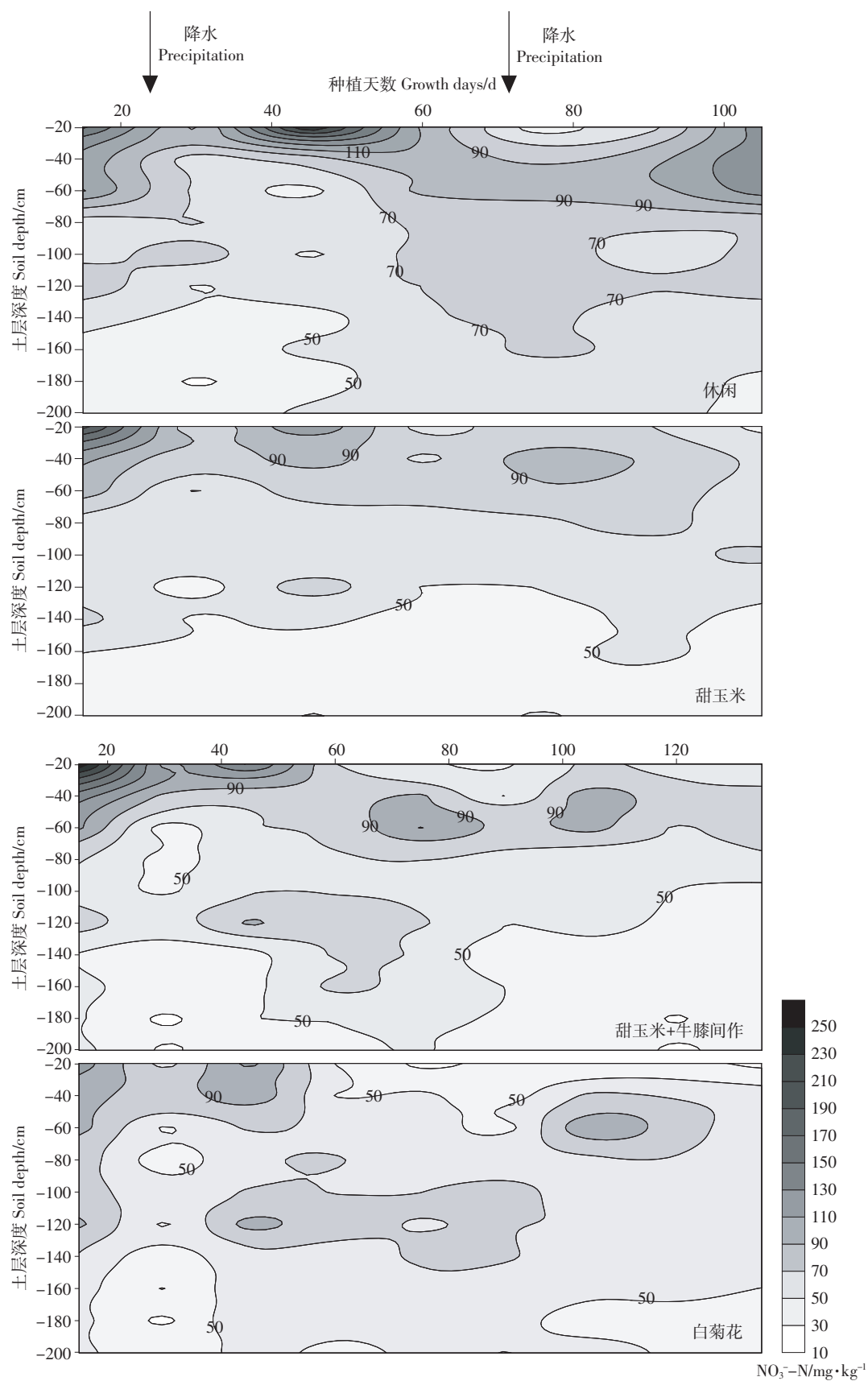


图 2 土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的动态变化

Figure 2 Dynamics of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profile

作物不仅延长植被覆盖时间,且通过植株蒸腾和养分吸收作用大量消耗土壤剖面中的水分和氮素,控制土壤剖面硝态氮向下淋溶^[19-21]。

甜玉米由于其高光效的代谢特点,生长迅速,生物量大且根系发达,能在温度较高及降雨集中的较短期间内大量吸收土壤中的硝酸盐,可作为短期填闲作物。白菊花和牛膝是中药,均为深根系植物,所以选作填闲作物,其中白菊花生长期长,可作为长期填闲作物,可以和一季蔬菜轮作。由于不同作物消减硝态氮的能力不同,所以如何选择适宜的填闲作物,要考虑当地的实际情况。本试验采用甜玉米、白菊花和牛膝作为夏季填闲作物,研究表明,甜玉米具有较高的生物量和吸氮量,甜玉米对 0~200 cm 土体 NO_3^- -N 的消减能力最强,达到 $907.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中 0~100 cm 土壤硝态氮含量急剧降低,消减量高达 $996.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,这是由于甜玉米根系主要集中在 0~100 cm,可见填闲作物是利用根系来吸收根层土壤 NO_3^- -N 来抵制 NO_3^- -N 向土壤深层淋溶;在 0~20 cm 土层中,白菊花消减力最强,这与白菊花在 0~20 cm 具有较高的根长密度和根干重有很大关系。吉艳芝^[1]在定州的填闲试验表明,甜玉米对土壤硝态氮的消减量可达 $605.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,对土壤剖面硝态氮的消减效果最好。张继宗等^[22]在北京郊区的研究也发现,设施蔬菜休闲季甜玉米生物量大、吸氮量大且速率快,阻控硝酸盐向深层土壤淋溶的能力强。本研究还表明,种植甜玉米后 100~200 cm 土壤硝态氮较种植前增加了 $88.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,说明在受到雨水淋洗的情况下,土壤浅层没有被作物利用吸收的硝态氮含量会随水分向下移动而减少,而随着土壤深层硝态氮的累积一定会继续向下移动^[23]。

填闲作物作为减少土壤硝态氮淋失的主要措施正在农业中广泛应用,而若想达到预期的效果需充分考虑当地的土壤条件并结合环境气候特点,另外还需要充分考虑填闲作物对下一季蔬菜的产量及土壤硝态氮影响。有研究表明,种植填闲作物与前茬休闲相比,对于下茬黄瓜的产量没有影响,土壤硝态氮休闲出现负累积而填闲出现正累积^[1];也有研究得出相反结论,前茬甜玉米会降低土壤硝态氮的残留,但下茬菠菜的产量降低了 84%^[24];任翠莲^[25]对填闲作物下茬作物影响的 3 年试验表明,填闲作物对于下茬黄瓜第一年有所影响,随着种植年限的延长,影响作用逐渐消失。填闲作物的种植对于下茬作物的产量和土壤硝态氮的影响是一个重要指标,填闲作物对于土壤硝态

氮的影响,是我们需要进一步研究的内容。

4 结论

填闲作物可以有效减少北方设施蔬菜土壤中的硝态氮累积,本试验研究得出甜玉米的生物量和吸氮量较大,分别为 $20.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $240.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;整体根长密度与根干重大于其他填闲作物;对土壤剖面 NO_3^- -N 的消减能力最高,在 0~200 cm 土层的消减量高达 $907.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] 吉艳芝. 填闲作物阻控设施蔬菜土壤硝态氮累积和淋失的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
JI Yan-zhi. Catch crop control soil nitrogen accumulation and leaching in greenhouse[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2010. (in Chinese)
- [2] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303.
LIU Zhao-hui, JIANG Li-hua, ZHANG Wen-jun, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 296-303. (in Chinese)
- [3] 周建斌, 陈竹君, 唐莉莉, 等. 日光温室土壤剖面矿质态氮的含量、累积及其分布特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 675-680.
ZHOU Jian-bin, CHEN Zhu-jun, TANG Li-li, et al. Mineral nitrogen content and accumulation in soil profiles under sunlight greenhouse cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 675-680. (in Chinese)
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] 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 of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [6] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: a case study on the North China plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124: 450-458.
- [7] 陈 清, 张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 8.
CHEN Qing, ZHANG Fu-suo. Theory and practice of vegetables integrated nutrient resources management[M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2007: 8. (in Chinese)
- [8] 王智超. 农田土壤硝态氮累积及干湿交替过程的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
WANG Zhi-chao. Soil nitrate nitrogen accumulation and effects of wet-

- ting and drying alternation[D]. Beijing: China Agriculture University, 2006.(in Chinese)
- [9] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate Contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 117–125.
- [10] Hansen E M, Djurhuus J. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 41: 203–219.
- [11] Rodriguez M A, Continuo J, Martins F. Efficacy and limitations of triticale as a nitrogen catch crop in a Mediterranean environment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17: 155–160.
- [12] 任智慧, 陈 清, 李花粉, 等. 填闲作物防治菜田土壤硝酸盐污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(7): 13–17.
REN Zhi-hui, CHEN Qing, LI Hua-fen, et al. The progress of controlling nitrate pollution in vegetable fields using nitrogen-catch crops[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(7): 13–17.(in Chinese)
- [13] Staver K W, Brinsfield R B. Using cereal grain winter cover crops to reduce groundwater nitrate contamination in the mid-Atlantic coastal plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 53: 230–240.
- [14] Thorup-Kristensen K. Effect of deep and shallow root systems on the dynamics of soil inorganic N during 3-year crop rotations[J]. *Plant and Soil*, 2006, 288: 233–248.
- [15] Thorup-Kristensen K, Magid J, Jensen L S. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 79: 227–302.
- [16] Berntsen J, Olesen J E, Petersen B M, et al. Long-term fate of nitrogen uptake in catch crops[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 383–390.
- [17] 叶 灵, 巨晓棠, 刘 楠, 等. 华北平原不同农田类型土壤硝态氮累积及其对地下水的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 165–168, 178.
YE Ling, JU Xiao-tang, LIU Nan, et al. Characteristics of nitrate accumulation and its effects on groundwater under typical cropping systems in North China plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 165–168, 178.(in Chinese)
- [18] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1964–1972.
ZHANG Li-juan, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo, et al. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Sci Agric Sin*, 2007, 40(9): 1964–1972.(in Chinese)
- [19] Berntsen J, Olesen J E, Petersen B M, et al. Long-term fate of nitrogen uptake in catch crops[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(4): 383–390.
- [20] Strock J S, Porter P M, Russelle M P. Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the northern U.S. corn belt[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(3): 1010–1016.
- [21] Hansen E M, Kristensen K, Djurhuus J. Yield parameters as affected by introduction or discontinuation of catch crop use[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(5): 909–914.
- [22] 张继宗, 刘培财, 左 强, 等. 北方设施菜地夏季不同填闲作物的吸氮效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2663–2667.
ZHANG Ji-zong, LIU Pei-cai, ZUO Qiang, et al. Nitrogen uptake by different catch crops in facility vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2663–2667.(in Chinese)
- [23] 和 亮. 京郊地下水硝态氮状况及设施菜地填闲作物利用研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
HE Liang. Study on nitrate status of groundwater and nitrogen uptake by catch crop in greenhouse in suburbs of Beijing City[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011.(in Chinese)
- [24] 于红梅, 曾燕舞. 填闲作物的种植对下茬蔬菜产量及土壤硝态氮含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(8): 2336–2337, 2339.
YU Hong-mei, ZENG Yan-wu. Effect of nitrogen catch crop on vegetable yields and nitrate content[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35(8): 2336–2337, 2339.(in Chinese)
- [25] 任翠莲. 填闲作物吸收棚室菜田土壤氮能力的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
REN Cui-lian. The capability of catch crop in uptaking soil nitrate under greenhouse[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2012.(in Chinese)