

水肥管理及秸秆还田对设施菜田土壤钾素淋洗的影响

陈 硕¹, 严正娟², 樊兆博², 陈 清², 李志芳¹

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:针对设施蔬菜传统水肥管理模式中钾素过量投入、因缺镁造成果类蔬菜品质下降等问题,以一年两季设施番茄为研究对象,通过对不同土壤深度钾素淋洗的周年动态监测,研究了不同水肥管理模式及秸秆还田对设施菜田土壤钾素淋洗的影响。结果表明,滴灌施肥处理下菜田平均每季钾素盈余 394 kg/hm²,明显低于漫灌施肥处理;滴灌施肥菜田 0~60 cm 土层土壤速效钾累积程度小于漫灌施肥,且显著降低了钾素淋洗量,50,90 cm 处平均每季淋洗量分别为 15.9,4.2 kg/hm²,而漫灌施肥体系则分别达到 26.9,16.9 kg/hm²,漫灌体系过量灌溉和施肥是导致钾素大量淋洗的根本原因;漫灌体系下添加秸秆后有降低表层土壤速效钾积累的趋势,增加了土壤钾素淋洗。

关键词:漫灌;滴灌;秸秆还田;钾素淋洗;设施菜田

中图分类号:S143.3 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2015)02-0232-07

doi:10.7668/hbxb.2015.02.039

Effect of Irrigation, Fertilization and Straw Incorporation on Soil Potassium Leaching in Vegetable Greenhouse

CHEN Shuo¹, YAN Zheng-juan², FAN Zhao-bo², CHEN Qing², LI Zhi-fang¹

(1. College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Excessive inputs of water and fertilizers under conventional greenhouse vegetable production have resulted in waste of potassium (K) resource and decrease of fruit quality. A field experiment was conducted in a greenhouse tomato double-cropping system to monitor the annual leaching dynamic of K in different soil depth and investigate the effects of management modes of water and fertilizer, and straw incorporation on K leaching. Results showed that K surplus was 394 kg/ha per season in fertigation treatment, which was much lower than that in conventional management (application of fertilizer with flooding irrigation). Compared to conventional management, fertigation decreased the accumulation of available K in the 0-60 cm soil layer and the leaching of K. Mean seasonal K leaching were 15.9, 4.2 kg/ha under fertigation system, while that were 26.9, 16.9 kg/ha under conventional management system in 50, 90 cm soil depth, respectively. Excessive inputs of water and fertilizers in conventional management system significantly contribute to the leaching of K. Straw incorporation decreased the content of soil available potassium in surface soil and increased the leaching of K in conventional management system.

Key words: Flooding irrigation; Drip irrigation; Straw incorporation; Potassium leaching; Vegetable greenhouse

集约化设施果类蔬菜生产对肥料的依赖程度高,以及作物根系较浅等特征,决定了生产中需要频繁施肥和灌溉^[1],造成过量施肥现象非常普遍^[2]。由于果类蔬菜吸收钾素比例大于氮素,以及提高蔬菜产量和品质方面的需求,生产上往往更加注重高

钾配方专用肥的施用,从而导致设施生产上钾素过量累积。例如,寿光地区钾素年投入量高达 2 853 kg/hm²^[3],而一般蔬菜形成 1 000 kg 产量平均吸收钾素为 3.5 kg^[4],钾素投入量远远超过了作物的吸收量。由于钾离子在土壤中移动性明显小于硝态

收稿日期:2015-01-17

基金项目:现代农业产业技术体系北京市果类蔬菜创新团队项目

作者简介:陈 硕(1989-),女,内蒙古赤峰人,在读硕士,主要从事蔬菜养分管理研究。

通讯作者:陈 清(1968-),男,山东威海人,教授,博士,博士生导师,主要从事经济作物养分管理、养分循环及土壤质量研究。

氮,过量钾素投入会导致土壤有效钾积累,一些设施菜田表层土壤有效钾含量为 250 ~ 1 334 mg/kg^[5],伴随着大水漫灌以及较长的种植年限易造成钾素向深层土壤移动。有研究表明,5,10,14 年日光温室表层土壤速效钾的含量均超过 300 mg/kg,种植年限较长的温室土壤钾素淋移至根层以下,发生强烈淋失^[6]。

土壤过量钾素积累会对果类蔬菜品质带来不利的影响。土壤溶液中过高的钾离子会与溶液中其他阳离子发生拮抗作用,影响作物对这些离子的有效吸收。孟利芬等^[7]的研究表明,设施番茄缺镁与土壤交换性钾显著增加、番茄吸收钾素过多有关,此外,果类蔬菜缺镁后,会影响叶片光合产物有效输入到果实和根部中,进而降低作物抗逆性和影响果实品质^[8]。

改变现有的水分管理模式对于设施蔬菜的可持续发展具有重要意义。滴灌施肥可以精确控制灌溉水量、施肥量及灌溉和施肥时间,降低养分的损失,减轻土壤和地下水污染^[9],达到高产、优质、高效的目标,而在设施菜田中,钾素的淋洗特征,及其滴灌施肥对钾素淋洗的影响尚缺乏相关报道。同时,已有研究表明,秸秆还田可以改变土壤物理性状、基本养分变化及增加产量^[10]。很多研究已经表明了其在阻控氮素淋洗方面的作用^[9],并且诸多研究中也

可以增加土壤孔隙度和降低土壤容重^[12]。然而,秸秆本身含有丰富的钾素资源,施用秸秆后对钾素累积和淋洗的影响有待研究。

本研究以寿光典型番茄温室作为研究对象,对比分析了不同灌溉、施肥模式和秸秆还田对土壤中钾素累积及其淋洗特征的影响,并且估算了菜田钾素平衡,旨在为设施蔬菜生产中的钾素合理管理和实现蔬菜可持续生产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验位于山东省寿光市中国农业大学蔬菜研究院示范基地日光温室。日光温室长 95 m,宽 12 m,实际种植面积 924 m²,一年两季种植番茄。试验于 2008 年开始,耕层土壤(0 ~ 30 cm)的化学性质为碱解氮 174 mg/kg、土壤 pH 值 8.32、有机质 9.28 g/kg、EC 321 μ S/cm、Olsen-P 130 mg/kg、交换性钾 181 mg/kg。作物栽培方式采用传统畦栽方式,畦长 10 m,畦宽 1.4 m,宽行 0.8 m,窄行 0.6 m,畦间距为 0.3 m,滴灌与漫灌区株距分别为 0.35,0.45 m。2011 年 2 ~ 6 月冬春季及 2011 年 8 月 ~ 2012 年 1 月秋冬季,种植的番茄品种分别为保罗塔和威德;2012 年 1 ~ 6 月冬春季及 2012 年 8 月 ~ 2013 年 1 月秋冬季,种植的番茄品种分别为保罗塔和齐大力,每季番茄留 6 穗果。

表 1 2008 年秋冬季至 2012 年秋季不同处理化学肥料投入量和灌溉量

Tab. 1 Inputs of chemical fertilizers and irrigation from 2008AW to 2012AW in different treatments

生长季 Growing season	漫灌 Flooding irrigation				滴灌 Drip irrigation			
	养分投入/(kg/hm ²) Nutrients input			灌溉量/mm Irrigation	养分投入/(kg/hm ²) Nutrients input			灌溉量/mm Irrigation
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
2008AW	1 035	691	1035	287	163	257	449	259
2009WS	641	472	641	648	136	198	394	340
2009AW	623	623	623	439	236	233	576	231
2010WS	1 022	1 022	1 022	567	211	229	555	342
2010AW	1 042	1 042	1 042	535	204	226	542	264
2011WS	1 004	1 004	1 004	581	206	227	545	296
2011AW	1 004	1 004	1 004	571	211	229	549	279
2012WS	1 039	1 039	1 039	725	235	232	574	347
2012AW	1 039	1 039	1 039	751	221	228	549	420
平均 Average	939	882	939	567	203	229	526	309

注:WS. 冬春季;AW. 秋冬季。

Note: WS. Winter-spring growing season; AW. Autumn-winter growing season.

试验设置 3 个处理:漫灌施肥;漫灌施肥 + 玉米秸秆还田;滴灌施肥。所有处理施用有机肥(商品鸡粪),每季平均施用量相当于 210 kg/hm² N, 127 kg/hm² P₂O₅ 和 154 kg/hm² K₂O;秸秆还田处理,每季添加相当于有机碳 3 144 kg/hm² C 的秸秆,其带

入的氮磷钾养分平均分别为:10 kg/hm² N, 23 kg/hm² P₂O₅ 和 47 kg/hm² K₂O。滴灌处理依据目标产量法估算作物整个生育期内的需肥和需水总量,然后根据不同生育期的需肥需水规律将其分配到每天进行滴灌施肥;同时,根据作物养分吸收累积特点,确定

肥料品种及比例;漫灌处理为当地菜农传统畦灌,灌溉量和灌溉时期模拟当地农户传统习惯,每季基施 NPK 复合肥(16-16-16) 2 165 kg/hm²,根据番茄品种特性、长势以及气候状况确定追肥时期和追肥量,每次灌溉前将称好的肥料溶于水中,随水冲施于地表。2008-2012 年肥料及灌溉量见表 1。滴灌区定植时采用漫灌,有助于移苗成活,按照作物的养分需求规律进行灌溉施肥,2011-2012 年每次灌溉量见

图 1。监测 2012 年周年灌溉水,钾素含量几乎为零。

通过在各处理小区内埋设张力计(张力计陶土头在各处理分别埋置 45,55 cm 和 80,100 cm 深来指示 50,90 cm 深处土壤水势变化),每天早上 8:00-10:00 读数,另外,分别在每组张力计陶土头中间位置(50,90 cm 处)埋置土壤水采集器用来收集此深度的淋洗液。土壤基本物理性质见表 2。

表 2 不同土壤土层的剖面物理性质

Tab. 2 Soil physical properties in 0~90 cm soil profile

深度/cm Depth	容重/(g/cm ³) Bulk density	机械组成/% Particle fraction		
		2~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
0~30	1.56	19	52	29
30~60	1.58	18	53	29
60~90	1.65	23	49	28

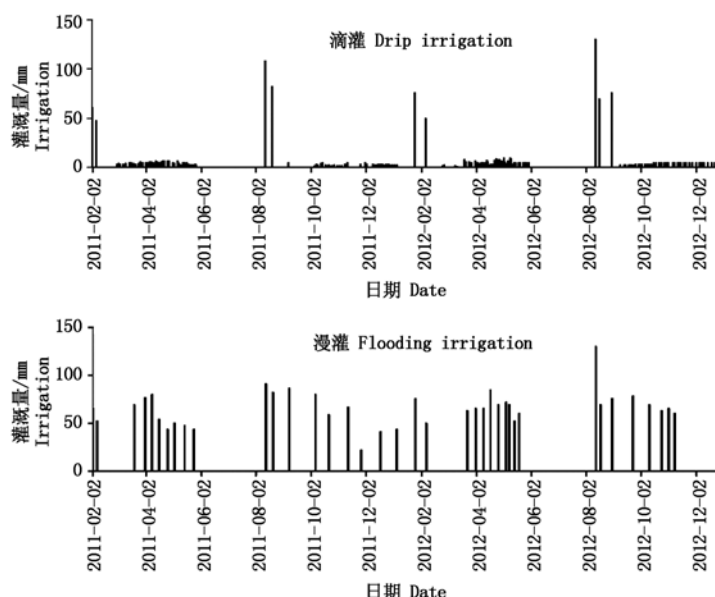


图 1 2011-2012 年滴灌和漫灌模式下每次灌溉量

Fig. 1 Irrigation rates under drip and flooding irrigation modes from 2011 to 2012

在番茄移栽定植后,及时去除多余枝杈和底部老叶,并根据节气及市场行情决定预留果穗数,在番茄长出预留果穗数后及时封顶;在第一穗果膨大后,每隔 7~10 d 进行追肥和喷施杀菌剂(主要防治番茄叶霉病和晚疫病)。

1.2 样品采集与分析方法

1.2.1 样品采集 土壤采集:分别于 2008 年试验开始前和 2013 年冬春季番茄拉秧后,在每个小区取 3 个点混为一个土样,采样深度为 0~30,30~60,60~90 cm,采集的土样经风干、研磨、过筛、混匀后进行下一步分析。

淋洗液的采集:通过土壤溶液提取法收集淋洗液,分别在不同处理的 50,90 cm 处埋置土壤溶液提取器,同时各个处理监测区内布置 45,55,80,100 cm 深的张力计一套,测定土壤水势的变化情况,

并在每天 9:00 读取张力计读数,每次灌溉后进行土壤溶液的抽提,保存在 -18℃,待测定。

1.2.2 样品分析方法 土壤速效钾:称取风干土壤(2 mm)5.00 g 于 250 mL 塑料瓶中,加入 1.0 mol/L NH₄OAc 溶液 50 mL,振荡 30 min 后过滤,用火焰光度计测定滤液中钾含量。

淋洗液中钾浓度:将淋洗液过滤后采用 ICP-AES 电感耦合等离子体发射光谱仪测定。

1.3 钾素淋洗量的计算

通过达西定律计算 50,90 cm 处土壤水通量,得到淋洗液的淋洗体积,再结合 50,90 cm 处钾素的浓度计算钾镁的淋洗量。钾镁淋洗量通过以下公式计算:

$$K_L = \sum C_i \Delta Q_i \quad \text{公式①}$$

其中 C_i 为钾素浓度, ΔQ_i 为某次提取溶液所对

应时间段内的水分渗漏量,土壤水分渗漏量计算公式为:

$$Q_i = \sum j_w \Delta t_i \quad \text{公式②}$$

其中 $\Delta t_i = \frac{(T_i - T_{i-1}) + (T_{i+1} - T_i)}{2}$, t_i 为每次张力计记录日期, j_w 为每次水分通量,由达西定律计算:

$$j_w = -K \frac{\Delta H}{\Delta Z} \quad \text{公式③}$$

其中 ΔH 为水势差, ΔZ 为高度差即为张力计所处土壤深度差, K 为导水率,导水率计算公式为:

$$K = K_s = \frac{\{1 - (\alpha|\varphi|)^{n-1} [1 + (\alpha|\varphi|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha|\varphi|)^n]^m} \quad \text{公式④}$$

其中 φ 为土壤基质势,根据张力计获得。土壤基质势 $\varphi = D + A - 1.26X$,其中张力计读数 X 为毫米水银柱, D 为陶土头埋设的深度 (cm); A 为张力计水银底部距地表的垂直距离 (cm), m 、 n 和 α 是通过水分特征曲线拟合时获得的土壤水力参数。 K_s 为饱和导水率,根据定水头法测定。式中分别采用 45, 55 cm 以及 80, 100 cm 处土壤导水率的调和平均值作为 50, 90 cm 处的土壤导水率。当钾素淋洗到土壤 90 cm 处则为淋洗损失,而土层 50 cm 处的养分以及水分可以根据作物的需求向地表移动。

1.4 钾素盈余计算

钾素盈余 = 来自有机肥钾素 + 来自秸秆钾素 + 化肥钾素 - 作物带走钾素量

1.5 数据处理

数据处理和统计分析采用 Excel 2010 和 SPSS

表 3 2008 - 2012 年设施番茄种植体系平均每季钾素投入、作物吸收以及盈余情况

Tab. 3 Mean seasonal K input, yield, crop removal, and K surplus in different treatments from 2008 to 2012

处理 Treatment	不同来源钾素投入/(kg/hm ²) K ₂ O input			作物产量 /(t/hm ²) Crop yield	钾素吸收 /(kg/hm ²) Uptake	钾素盈余 /(kg/hm ²) Surplus
	鸡粪 Chicken manure	秸秆 Straw	化肥 Chemical fertilizer			
漫灌施肥 Flooding irrigation	154	0	939	75a	297a	796
漫灌施肥 + 秸秆 Flooding irrigation + Straw	154	47	939	80b	317b	823
滴灌施肥 Fertigation	154	0	562	82b	322b	394

注:不同字母表示不同处理间差异达到 5% 显著水平。表 5 同。

Note: The different letters mean significant differences for different treatments ($P < 0.05$). The same as Tab. 5.

2.3 菜田 50, 90 cm 土层深度水分渗漏量

采用达西定律计算土壤水分渗漏量,通过表 4 可以看出,漫灌施肥处理平均每季下渗到 90 cm 处的水分渗漏量为 118 mm,为滴灌施肥处理的 2.3 倍。每季定植水灌溉后,滴灌和漫灌施肥处理的水分通量均会形成一个峰值,而追肥过程中,滴灌施肥处理并未观测到明显的高峰。漫灌施肥处理平均每次灌溉量为 63 mm,而滴灌的仅 4.1 mm,因此,漫灌

(Version 17.0) 软件进行,处理之间的比较采用单因素方差分析。

2 结果与分析

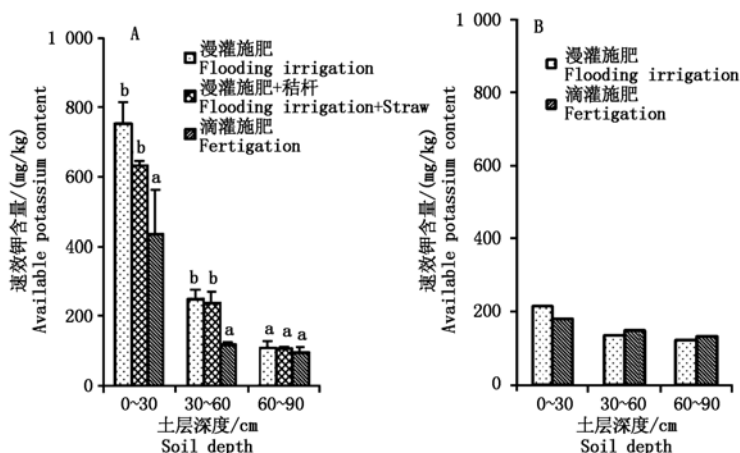
2.1 蔬菜产量及钾素表观盈余

传统漫灌施肥处理平均每季钾素投入量为 1 093 kg/hm² K₂O,是滴灌施肥处理的 1.5 倍,是作物吸收的 3.7 倍(表 3),很明显,这种盈余显著增加了钾素的累积和淋失风险,但过量的钾素投入并没有增加番茄的产量。滴灌较漫灌施肥处理显著增加了番茄产量和钾素吸收量,其每季番茄钾素带走量占钾素投入量的 47%,而漫灌处理仅为 27%。漫灌和滴灌施肥处理下,平均每季钾素表观盈余量分别占钾素投入总量的 72% 和 58%。秸秆还田显著增加了漫灌条件下的产量(7%)。因此,滴灌施肥可以不同程度降低钾素的投入以及钾素盈余,进而降低钾素淋洗的风险。

2.2 土壤剖面速效钾含量

根据土壤剖面速效钾含量变化可以看出,漫灌和滴灌条件下 0 ~ 30 cm 土层土壤速效钾含量分别为 751, 434 mg/kg(图 2),远高于试验开始前漫灌区和滴灌区速效钾含量。相对于漫灌施肥,滴灌施肥显著降低了 0 ~ 60 cm 土层土壤速效钾的累积,漫灌条件下,秸秆施用有降低表层土壤速效钾含量的趋势,降幅为 17%,其原因一方面是由于秸秆还田显著增加了番茄钾素吸收量(表 3),另一方面可能是由于秸秆增加了土壤孔隙度,促进了钾素淋洗(表 4)。

施肥处理的 50 cm 处水分渗漏量明显高于 90 cm,而 50 cm 处靠近作物根层,作物吸收以及土壤蒸发从而水分向上运动,特别在 2011 年冬春季中,导致滴灌施肥处理 50 cm 处水分渗漏量略低于深层土壤(图 3)。另外,漫灌施肥处理下添加秸秆后 50, 90 cm 处水分渗漏量分别增加了 22% 和 11%,因此,漫灌施肥下添加秸秆可以在一定程度上增加土壤水分通量。



A. 2013 年冬春茬拉秧后土壤速效钾含量;B. 2008 年试验开始前土壤速效钾含量;
不同字母表示相同土层不同处理间差异达到 5% 显著水平。

A. Available potassium content in soil after harvesting in winter-spring season,2013;B. Available potassium content in soil before planting,2008;The different letters in the same soil layer mean significant differences for different treatments ($P < 0.05$).

图 2 水肥管理及秸秆还田对土壤剖面速效钾含量的影响
Fig. 2 Available potassium contents in soil profile influenced by different water and fertilizer managements and straw incorporation

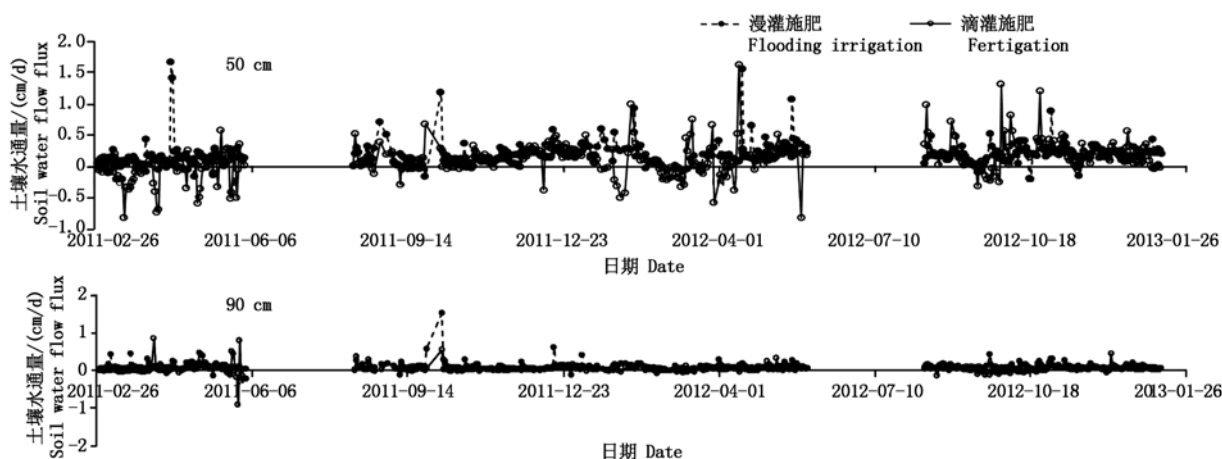


图 3 2011 - 2012 年不同灌溉模式下不同土层土壤水通量周年动态变化

Fig. 3 Annual dynamics of soil water flow flux in different soil depths under two irrigation systems from 2011 to 2012

2.4 钾素淋洗特征

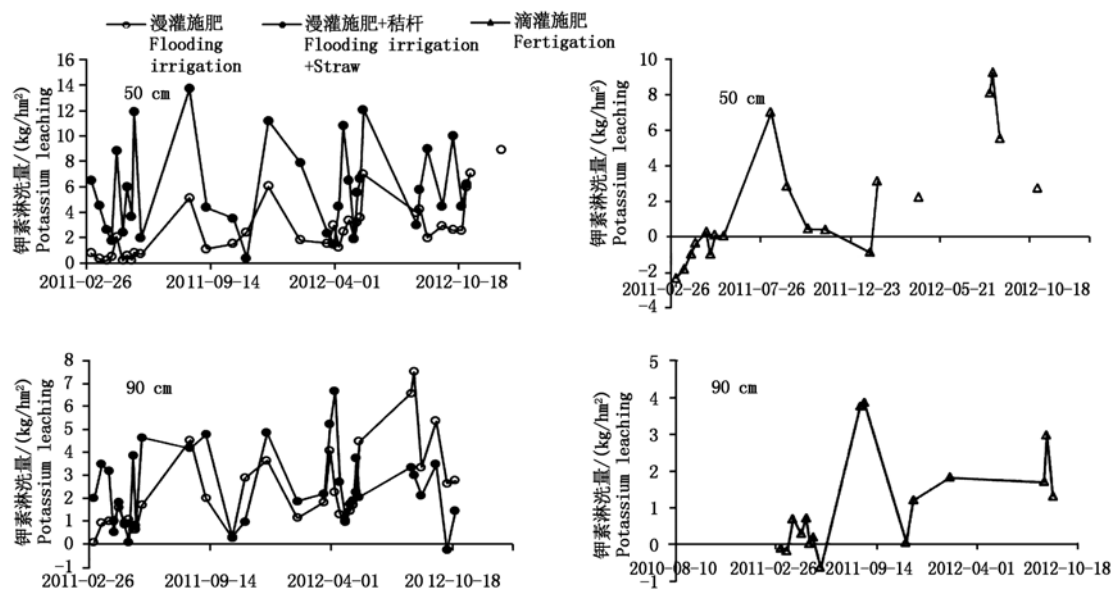
漫灌体系平均每季钾素淋洗量显著高于滴灌体系,50,90 cm 土层钾素淋洗量分别为 26.9,16.9 kg/hm²,是滴灌体系的 1.7,4.0 倍。漫灌体系添加秸秆后均显著增加了钾素淋洗量,50,90 cm 土层分别增加了 135%,62% (表 5)。50 cm 土层钾素淋洗

均高于 90 cm,由于 2011 年冬春季表层土壤水分上行,没有发生淋洗现象。钾素淋洗高峰出现在每次灌溉后 1~2 d,漫灌体系平均每次灌水量达 63 mm,灌溉后均会出现峰值,而滴灌由于灌水量较低,后期峰值并不明显(图 4)。

表 4 2011 - 2012 年不同灌溉模式下不同土层每季水分渗漏量

Tab. 4 Seasonal soil water drainages in different soil depths under two irrigation systems from 2011 to 2012 mm

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	2011WS	2011AW	2012WS	2012AW	平均每季 Average season
50	漫灌施肥	179	245	199	302	231
	漫灌施肥 + 秸秆	251	220	307	352	283
	滴灌施肥	7	192	108	305	157
90	漫灌施肥	105	133	92	140	118
	漫灌施肥 + 秸秆	123	127	124	150	131
	滴灌施肥	54	67	35	53	52



滴灌处理中由于在某些时期没有抽提出水样,故数据缺失。
The missing data due to lack of samples for some date in drip irrigation.
图 4 2011 - 2012 不同灌溉条件下不同土层深度钾素淋洗量动态变化

Fig. 4 Annual dynamics of K leaching in different soil depths under two irrigation treatments from 2011 to 2012

表 5 2011 - 2012 年不同灌溉模式下不同土层每季钾素淋洗量

Tab. 5 Seasonal K leaching in different soil depths under two irrigation systems from 2011 to 2012							kg/hm ²
土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	2011WA	2011AW	2012WA	2012AW	平均每季 Average season	
50	漫灌施肥	5.8b	15.8a	26.3a	59.8a	26.9b	
	漫灌施肥 + 秸秆	49.9c	33.1b	55.1b	115.0b	63.3c	
	滴灌施肥	-3.9a	9.8a	4.4a	33.6a	15.9a	
90	漫灌施肥	0.8a	8.7ab	19.4b	38.8b	16.9b	
	漫灌施肥 + 秸秆	15.3b	13.5b	28.7c	52.3b	27.4c	
	滴灌施肥	0.6a	7.8ab	2.2a	6.0a	4.2a	

3 讨论

菜田土壤钾素损失与钾肥的投入、钾素盈余以及交换性钾的含量有较大关系。有研究表明,土壤交换性钾与钾素盈余有很好的相关性,钾素盈余导致土壤交换性钾含量增高,进而增加钾素淋洗^[13]。另外,土壤质地等因素也影响土壤速效钾含量及其淋洗,砂土中阳离子容易随水淋失,而黏土阳离子交换量较大,对钾离子吸附能力较强^[14]。本试验漫灌体系下,淋洗到土体 90 cm 处的钾素数量为 16.9 kg/hm²,占钾素盈余的 2.1%,而本试验中土壤质地为黏土,其淋洗量可能会低于其他质地。此外,Waston 等^[15]的研究表明,采用渗漏池方法测定的硝酸盐淋洗量为 58 kg/hm²,相同氮肥施用量情况下,Barton 等^[16]采用达西定律方法测定的硝酸盐淋洗量为 45 kg/hm²,则达西定律测定水分淋洗量可能导致结果偏低。因此,由本研究可以看出,大水漫灌条件下,土壤剖面 30 ~ 60 cm 处土壤速效钾含量有较大增幅。

漫灌条件下秸秆还田可以显著增加番茄产量,这与乔俊卿等^[17]关于秸秆还田技术可以提示设施番茄产量的研究结果一致。漫灌条件下,秸秆还田增加了钾素的淋洗量,可能是由于秸秆的添加减少了土壤对钾素的固定,一方面秸秆还田增加了水分通量,由于秸秆投入对土壤性质的影响,如土壤孔隙分布等的影响,已有大量研究表明,作物秸秆施入土壤后,改变了土壤部分物理结构,改善了土壤孔隙状况,提高土壤水分入渗能力^[18-20];另一方面,伴随每次大量灌溉,秸秆会逐渐释放钾素,其释放需要一定的时间,释放出来的秸秆钾从土壤进入水体比化肥钾进入水体有滞后性,秸秆在释放钾的同时也会释放出 Na⁺ 和 NH₄⁺ 等伴随阳离子,它们和 K⁺ 的水合半径接近,能侵占部分层间吸附位点,减少秸秆钾的固定量^[21]。同时,秸秆腐解溶液可能会间接地促进矿物钾的释放,则长期秸秆还田不仅可以起到归还养分的作用,还可能促进矿物钾的释放。因此,秸秆的添加促进了钾素的淋洗,这与李继福等^[22]的研究结果一致。

设施菜田土壤中钾素的过量累积,会抑制植株对镁素的吸收,造成镁素的生理性缺乏,进而促进镁在土壤的累积,增加了其淋洗的风险;与此同时,在生产中为了预防或缓解镁素缺乏症状,一般会通过叶面喷施和土壤施用镁肥,进一步增加了镁在土壤中的累积和淋洗风险,同时也会带来菜田土壤盐渍化等问题^[23]。因此,在实际生产中应该注重土壤钾素的管理和养分平衡,合理施肥,提高养分利用效率,最大程度的减少养分淋洗损失。滴灌施肥低投入低损失的生产体系有更高的参考价值。

滴灌施肥和漫灌施肥菜田体系下,平均每季钾素盈余为 394,796 kg/hm² K₂O;滴灌施肥在保证或增加产量的情况下,明显降低了钾素盈余;滴灌施肥体系显著降低了 0~60 cm 土层土壤速效钾含量,降幅为 92%;秸秆还田有降低漫灌菜田体系表层土壤的速效钾积累的趋势,降幅为 17%。滴灌体系显著降低了钾素淋洗量,50,90 cm 处平均每季淋洗量分别为 15.9,4.2 kg/hm²,而漫灌体系的分别达到 26.9,16.9 kg/hm²;漫灌过量灌溉和施肥是导致钾素大量淋洗的根本原因,且添加秸秆增加了漫灌体系下钾素淋洗。因此,滴灌施肥为相对稳定的生产体系。

参考文献:

- [1] Thompson R B, Martínez-Gaitan C, gallardo M. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(3): 261–274.
- [2] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, *et al.* Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 982–989.
- [3] 余海英,李廷轩,张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(3): 514–522.
- [4] 杜会英. 保护地蔬菜氮肥利用、土壤养分和盐分累积特征研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2007.
- [5] 曹文超,张运龙,严正娟,等. 种植年限对设施菜田土壤 pH 及养分积累的影响[J]. *中国蔬菜*, 2012(18): 134–141.
- [6] 吕福堂,张秀省,董杰,等. 日光温室土壤速效养分的累积和淋移特征研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 191–194.
- [7] 孟利芬. 设施番茄缺镁因素分析及改善效果研究[D]. 青岛:青岛农业大学, 2011.
- [8] 谢小玉. 温室黄瓜(*Cucumis sativus* L.) 镁含量变化规律及镁作用机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- [9] Fan Z B, Lin S, Zhang X M, *et al.* Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 144: 11–19.
- [10] 吴婕,朱钟麟,郑家国,等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(2): 192–195.
- [11] 陈德章. 稻草还田对土壤理化性质及产量的影响[J]. *土壤肥料*, 2000(5): 24–27.
- [12] 矫丽娜,李志洪,殷程程. 秸秆还田培肥土壤的研究现状[J]. *安徽农学通报*, 2014, 20(10): 54–56.
- [13] Kayser M, Benke M, Isselstein J. Potassium leaching following silage maize on a productive sandy soil[J]. *Plant Soil and Environment*, 2012, 58(12): 545–550.
- [14] 张玲娥,双文元,云安萍,等. 30 年间河北省曲周县土壤速效钾的时空变异特征及其影响因素[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 923–933.
- [15] Watson C J, Jordan C, Lenox S D, *et al.* Organic nitrogen in drainage water from grassland in northern Ireland[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 1233–1238.
- [16] Barton L, Wan G, Colmer T D. Turfgrass (*Cynodon dactylon* L.) sod production on sandy soils: II. effects of irrigation and fertiliser regimes on N leaching[J]. *Plant and Soil*, 2006, 284(1–2): 147–164.
- [17] 乔俊卿,刘卹洲,余翔,等. 集成生物防治和秸秆还田技术对设施番茄增产及土传病害防控效果研究[J]. *中国生物防治学报*, 2013, 29(4): 547–554.
- [18] Gill B S, Jalota S K. Evaporation from soil in relation to residue rate, mixing depth, soil texture and evaporativity[J]. *Soil Technology*, 1996, 8(4): 293–301.
- [19] Mellouli H J, Van Wesemael B, Poesen J, *et al.* Evaporation losses from bare soils as influenced by cultivation techniques in semi-arid regions[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 42(3): 355–369.
- [20] 杨永辉,武继承,吴普特,等. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 70–75.
- [21] 陈小琴,周健民,王火焰,等. 铵钾施用次序和比例对油菜生长和氮钾养分吸收的影响[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 571–574.
- [22] 李继福,任涛,鲁剑巍,等. 水稻秸秆钾与化肥钾释放与分布特征模拟研究[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1017–1022.
- [23] 余海英,李廷轩. 辽宁设施栽培土壤盐分累积变化规律研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 80–83.