

不同钾肥对再生水灌溉条件下土壤—作物系统 Cd 的影响

景若瑶^{1,2}, 崔二苹^{1,3}, 樊向阳^{1,3,4}, 胡超^{1,4},

李中阳^{1,4}, 赵志娟^{1,4}, 李松旌^{1,2}, 刘源^{1,4}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;

3. 中国农业科学院新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002;

4. 中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453002)

摘要: 为了探明再生水灌溉条件下不同施钾肥处理对土壤—作物系统 Cd 的影响及差异性, 通过田间微区试验研究了不同施钾肥处理对再生水灌溉番茄植株、果实以及根际土与非根际土 Cd 含量的影响。结果表明: 再生水灌溉条件下, 施钾肥处理可提高番茄果实产量, 施加 KCl 较 K₂SO₄ 增产效果明显, 分别较不施肥处理可增产 6.10%~24.00% 和 1.36%~13.16%; 不施钾肥较不施肥处理番茄果实 Cd 含量降低, 但降低幅度小于施加钾肥处理, 施加 KCl 较 K₂SO₄ 处理番茄果实 Cd 含量较低, Cd 含量分别较不施钾肥处理分别减少 58.33% 和 8.33%, 且各处理均未超 0.05 mg/kg 的限值标准; 不施钾肥处理较不施肥处理土壤 pH、Cd 含量有所降低, 降低幅度小于施钾肥处理, 有效态 Cd 有所增加, 施加 KCl 和 K₂SO₄ 较不施肥处理有效态 Cd 降低, 施加 KCl 和 K₂SO₄ 较不施钾肥处理根际土和非根际土 pH、Cd 含量和有效态 Cd 含量均有所降低, 其中施加 KCl 根际土和非根际土 Cd 含量分别降低 2.96%~3.11% 和 5.75%~14.22%, 施加 K₂SO₄ 分别降低 4.14%~5.90% 和 8.10%~8.29%; 施加 KCl 根际土和非根际土有效态 Cd 含量分别降低 10.75%~16.19% 和 13.98%~28.74%, 施加 K₂SO₄ 分别降低 15.97%~20.55% 和 19.91%~24.70%。因此, 再生水灌溉条件下, 可通过选择施加适宜的钾肥种类, 调控重金属 Cd 在土壤—作物系统的分布及其生物有效性, 施加 K₂SO₄ 较 KCl 相比, 可一定程度降低土壤 Cd 含量及有效态 Cd 含量。

关键词: 再生水灌溉; 钾肥; 番茄; Cd; 根际土; 非根际土

中图分类号: S273.5; S143.3; X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0328-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.051

Effects of Different Potassium (K) Fertilizers on Cadmium Content in Soil-Crop System Under Reclaimed Water Irrigation

JING Ruoyao^{1,2}, CUI Erping^{1,3}, FAN Xiangyang^{1,3,4}, HU Chao^{1,4},

LI Zhongyang^{1,4}, ZHAO Zhijuan^{1,4}, LI Songjing^{1,2}, LIU Yuan^{1,4}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences,

Xinxiang, Henan 453002; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences,

Beijing 100081; 3. Agricultural Water Soil Environmental Field Research Station of Xinxiang, Chinese

Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 4. Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002)

Abstract: In order to find out the effects of different potassium (K) fertilizer on cadmium (Cd) in soil-crop system under the condition of reclaimed water irrigation, the field experiment was conducted to study the effects of different K fertilizer treatments on the Cd content of tomato plants, fruits, rhizosphere soil and non-rhizosphere soil. The results showed that under the condition of reclaimed water irrigation, applying K fertilizer could increase the yield of tomato fruits, the effect of KCl on the tomato fruit yield was more obvious than that of K₂SO₄, and the yield was increased by 6.10%~24.00% and 1.36%~13.16%, respectively, compared with the treatment without K fertilizer. The Cd content of tomato fruit in the treatment without K fertilizer was lower than that of the no fertilization treatment, but the decrease range was less than that of the treatment with K fertilizer. The Cd content of tomato fruit treated with KCl was lower than that

收稿日期: 2018-10-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(51479201, 41701265); 中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所, FIRI2016-15)

第一作者: 景若瑶(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事再生水水资源安全高效利用理论研究。E-mail: jry6545@126.com

通信作者: 樊向阳(1974-), 男, 研究员, 主要从事农业水资源与水环境研究。E-mail: fxy0504@126.com

treated with K_2SO_4 , and the Cd content decreased by 58.33% and 8.33%, respectively, compared with the treatment without K fertilizer, and the content of Cd in all treatments did not exceed 0.05 mg/kg limit value. The pH value and the total Cd content of soil in the treatment without K fertilizer was lower than that in the treatment without fertilizer, but the decrease range was less than the treatment with K fertilizer. The available Cd increased. When KCl and K_2SO_4 were applied, the available Cd decreased compared with no fertilization treatment, and the total Cd content, available Cd content and the pH value in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil were lower than those of treatment without K fertilizer. When the KCl was applied, the total Cd content of rhizosphere soil and non-rhizosphere soil decreased by 2.96%~3.11% and 5.75%~14.22%, respectively, and the available Cd content decreased by 10.75%~16.19% and 13.98%~28.74%, respectively. When the K_2SO_4 was applied, the content of total Cd in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil decreased by 4.14%~5.90% and 8.10%~8.29%, respectively, and the available Cd content decreased by 15.97%~20.55% and 19.91%~24.70%, respectively. Therefore, under the condition of reclaimed water irrigation, the distribution and biological effectiveness of Cd in plant-soil system could be regulated by selecting appropriate K fertilizer. Compared with KCl, the application of K_2SO_4 could reduce the total Cd content and the available Cd content.

Keywords: reclaimed water irrigation; potassium fertilizer; tomato; cadmium; rhizosphere soil; non-rhizosphere soil

我国是水资源严重短缺的国家之一,正常年份缺水量达 500 亿 m^3 ^[1],其中,农业水资源供需矛盾尤为突出,缺水量达 300 亿 m^3 。解决我国农业水资源短缺的关键,一方面要大力发展节水农业,另一方面则应广辟水源,加大再生水等非常规水源的开发利用。再生水是指污水经适当再生工艺处理后,达到一定水质要求,满足某种使用功能要求,可以进行有益使用的水^[2]。作为潜在的替代水源,再生水具有量大(预测 2030 年将达到 850 亿 m^3 ~1 060 亿 m^3)、面广特点,和海水淡化、跨流域调水相比,具有明显的优势,用于农田灌溉将可大大缓解农业用水短缺矛盾。再生水灌溉一方面因其富含氮、磷、钾等能增加土壤的有机质,提高土壤肥力和生产力^[3],另一方面再生水中仍含有一定量的重金属、病原菌、有机物及大量的盐分等,长期灌溉对土壤环境、作物品质乃至人体健康将可能产生一定的影响^[4]。因此,对再生水灌溉下土壤重金属积累分布过程及调控机制开展研究具有重要意义。目前关于再生水灌溉条件下重金属在植物和土壤中的迁移、分布、积累规律的研究主要结合不同灌溉制度和技术,如沟灌、滴灌等不同灌水技术和方式、清水再生水配比灌溉、植物不同生长期灌溉、不同灌溉量等。

已有研究^[5-6]表明,土壤施肥后可影响土壤的 pH、氧化还原电位、离子强度等土壤理化性质,从而影响重金属的形态和总量。钾肥及其伴随离子通过与重金属在土壤-植物系统中相互作用进而改变重金属的存在形态与分布,对重金属迁移转化可产生影响^[7],在一定程度上改变重金属的植物有效性。同时钾是作物的品质元素和生长发育所必需的矿质元素,在优化光合性

能、促进光合产物的运输、改善气孔运动、增强抗性等方面具有重要作用^[8]。目前对再生水灌溉下不同钾肥及其伴随离子对灌溉水中重金属在土壤-植物系统迁移转化的影响及差异性鲜有研究。镉(Cd)是对植物和动物毒性最强的重金属元素之一,因其在土壤中的移动性相对较小,可在表层土壤 0—20 cm 不断累积^[9],易被作物根系吸收,并进而转移到作物的可食部,通过食物链进入人体,危害人体健康^[10]。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》^[11]显示我国土壤 Cd 的点位超标率达 7.0%,位于八大超标金属元素之首。本文以番茄为研究对象,采用田间微区试验,针对再生水灌溉条件下不同钾肥处理对水中 Cd 在土壤-作物系统的迁移转化规律开展研究,以期对再生水安全灌溉及合理施用钾肥提供科学依据。

1 材料与试验方法

1.1 试验区概况

试验分别于 2016 年和 2017 年 4—7 月在中国农业科学院新乡农业水土环境野外科学观测试验站(35°19' N, 113°53' E, 海拔 73.2 m)温室大棚进行。试验站年均气温 14.1 °C,多年平均年降水量 588 mm,年均蒸发量 2 000 mm,无霜期 210 d,年均日照时间 2 398 h。试验地土壤为粉砂黏壤土,土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验设计 2 种钾肥:K1 施 KCl、K2 施 K_2SO_4 和 K3 不施钾肥,CK 不施肥共计 4 个处理,其中 K1、K2、K3 处理同时施加尿素($CO(NH_2)_2$)、过磷酸钙($CaP_2H_4O_8$, P_2O_5 含量 14%)。每个处理重复 5 次,共 20 个小区。采用田间微区试验,各处理微区宽 1

m、长 6 m,面积 6 m²。以番茄作为供试作物,供试番茄为“新美 200”;番茄先进行室内营养钵育苗,待秧苗 3~4 片叶适时移栽;每个微区沿长边种植 2 行番茄,行距 30 cm,株距 30 cm;番茄整枝打芽、蘸花、保花保果、病虫害防治等田间管理方法相同。施肥

量参照试验所在地常规施肥水平,分别按 1 444 kg/hm² 纯 N、1 281 kg/hm² 纯 P 和 300 kg/hm² 纯 K 施入,其中钾肥、磷肥作为底肥一次施入,氮肥分 3 次施入,60% 作为底肥施入,番茄第 1 穗果和第 3 穗果膨大期分别追施 20%。

表 1 试验地土壤基本理化性质

土层深度/cm	pH	有机质含量/%	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	干容重/(g·cm ⁻³)
0—10	7.99	0.95	1.16	1.99	11.44	18.47	133.00	1.40
10—20	8.02	0.80	0.98	1.69	10.08	16.15	114.75	1.40
20—30	8.05	0.64	0.60	1.39	8.71	11.28	96.75	1.41
30—40	8.08	0.46	0.58	0.99	7.35	7.53	78.25	1.42
40—60	8.11	0.39	0.52	0.86	5.98	5.28	60.00	1.44

试验用再生水为取自试验站附近河南省新乡市骆驼湾污水处理厂的二级出水,污水来源主要为城市生活污水和部分工业废水,污水处理工艺为 A/O 反硝化生物滤池和臭氧氧化组合工艺。试验期间污水处理厂二级出水总钾、总氮、硝态氮、铵态氮、总磷和 Cd 的浓度变化范围分别为 20.18~24.42,32.09~65.47,3.13~11.33,23.18~36.28,0.83~2.94,0.001~0.003 mg/L,pH 变化范围为 7.40~7.45。由于再生水中重金属 Cd 浓度较低,且时段变化较大,短期灌溉条件下重金属在土壤中的累积、迁移现象不明显,因此,为研究再生水灌溉最不利水质条件下施肥对 Cd 在土壤和番茄植株体内迁移的影响,同时保证每次灌水水质的一致性,依据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)^[12]和《再生水水质标准》(SL 368—2006)^[13],在每次灌水前根据再生水 Cd 分析检测结果,采用外源添加 CdCl₂ 将灌溉用再生水 Cd 浓度配置至二级水水平,即 Cd 0.01 mg/L。试验采用田间小畦灌的灌水方式,为减少灌水量对试验的影响,各处理试验年份灌水量保持一致。灌水时期以 K1 和 K2 处理田间布设的张力计测定结果作为依据,2016 年和 2017 年分别灌水 4,5 次,灌水总量分别为 3 230.77,3 384.62 m³/hm²。

1.3 测定项目与方法

灌溉水质指标:每次灌水前采集灌水水样,测定灌溉水 pH 和氮、磷、钾、Cd 等含量;土壤全氮、全磷含量采用流动分析仪(BRAN LUEBBE AA3 德国)测定;水样中钾含量采用火焰光度法测定;水样中 Cd 含量采用火焰原子分光光度法^[14]测定。

肥料中 Cd 含量:施肥前分别测定肥料中 Cd 含量,测定结果表明试验用肥料 Cd 均未检出。

番茄生长指标及不同器官 Cd 含量:每个小区选取 5 株代表性番茄植株样品,待番茄果实成熟后分批分别测定果实鲜重及 Cd 含量。拉秧后,将植株用自

来水冲洗 3 遍后,按根、茎和叶分离,经二次水冲洗,在 105 ℃烘箱中杀青 30 min,并置于干燥箱 65 ℃烘至质量恒定,称重后研磨粉碎,植株不同器官 Cd 含量采用火焰原子分光光度法^[15]测定。

土壤 pH、养分及 Cd 含量:番茄拉秧后,取代表性植株根际和非根际土壤样品,经自然风干后,研磨过 100 目筛用于分析测定土壤 pH、氮、磷、钾、Cd 含量及有效态。土壤 pH 采用 pHS-1 型酸度计测定;土壤全氮、全磷含量采用流动分析仪(BRAN LUEBBE AA3 德国)测定;土壤钾含量采用火焰光度计测定;土壤样品中 Cd 含量采用火焰原子分光光度法测定^[16];土壤样品中重金属 Cd 的有效态含量采用 EDTA 提取法测定^[17]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行试验数据统计、处理,并采用 SPSS 21.0 软件对试验数据进行方差分析,采用 Duncan 多重检验法对各处理进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同钾肥处理对土壤化学特性的影响

由表 2 可知,2 个试验年份 K1、K2、K3 较对照 CK 的根际土与非根际土 pH 显著降低($P < 0.05$)。施加钾肥处理 K1、K2 较不施加钾肥处理 K3 土壤 pH 显著降低($P < 0.05$),2016 年 K1、K2 根际土 pH 较 K3 分别降低 0.45,0.63 个 pH 单位,非根际土分别降低 0.44,0.55 个 pH 单位;2017 年根际土分别降低 0.86,0.93 个 pH 单位,非根际土分别降低 0.78,0.93 个 pH 单位。施加不同钾肥处理 K1 和 K2 相比,根际土与非根际土 pH 均未达到显著水平($P < 0.05$)。

K1、K2、K3 较对照 CK 土壤硝态氮显著增加($P < 0.05$),可能主要因对照 CK 未施氮肥所致;施加钾肥处理 K1、K2 较不施钾肥处理 K3 土壤硝态氮含量增加。K1、K2、K3 较对照 CK 根际土与非根际土速效磷含量也显著增加,同样可能是由于对照 CK 未施磷肥所致;施加钾肥处理 K1、K2 较不施钾肥处理 K3 土壤速效磷

含量也有所增加。不施钾肥处理 K3 较对照 CK 土壤速效钾,除 2016 年根际土稍高外,无显著差异($P < 0.05$),可能由于 2 个处理均未施钾肥所致;施加钾肥处理 K1、K2 较对照 CK 和不施钾肥处理 K3 土壤速效钾含量均显著增加($P < 0.05$),其中 2016 年根际土速效钾含量 K1、K2 较 K3 分别增加 41.62% 和 35.84%,非根际土分别增加 75.79% 和 81.56%,

K1、K2 较 CK 根际土速效钾含量分别增加 56.55% 和 50.16%,非根际土分别增加 85.41% 和 91.49%;2017 年根际土速效钾含量 K1、K2 较 K3 分别增加 81.42% 和 77.05%,非根际土分别增加 65.71% 和 63.33%,根际土 K1、K2 较 CK 分别增加 74.97% 和 70.75%,非根际土分别增加 62.62% 和 60.28%,可能是由于对照 CK 和对照 K3 均未施钾肥所致。

表 2 不同处理对土壤 pH 和氮磷钾养分含量的影响

处理	2016 年								2017 年							
	pH		硝态氮/(mg·kg ⁻¹)		速效磷/(mg·kg ⁻¹)		速效钾/(mg·kg ⁻¹)		pH		硝态氮/(mg·kg ⁻¹)		速效磷/(mg·kg ⁻¹)		速效钾/(mg·kg ⁻¹)	
	根际土	非根际土	根际土	非根际土	根际土	非根际土	根际土	非根际土	根际土	非根际土	根际土	非根际土	根际土	非根际土	根际土	非根际土
K1	7.98ab	7.97a	162.55c	231.66c	33.99c	46.53b	490.00c	610.00b	7.85a	7.94a	201.60c	194.11b	71.58b	72.64c	415.00b	435.00b
K2	7.80a	7.86a	164.85c	252.75c	23.53b	40.09b	470.00c	630.00b	7.78a	7.79a	197.47c	194.68b	74.94b	71.94c	405.00b	428.75b
K3	8.43b	8.41b	77.16b	164.48b	20.75b	39.86b	346.00b	347.00a	8.71b	8.72b	156.15b	188.93b	66.29b	64.17b	228.75a	262.50a
CK	8.98c	8.99c	12.93a	9.49a	9.49a	16.20a	313.00a	329.00a	9.21c	9.28c	12.84a	9.92a	33.95a	34.31a	237.19a	267.50a

注:同一列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同钾肥处理对番茄产量和植株生物量的影响

由表 3 可知,2 个试验年份施加钾肥处理 K1、K2 较对照 CK 也有小幅增产,其中 2016 年 K1、K2 较 CK 增产 6.10% 和 1.36%,2017 分别增产 24.00% 和 13.16%;但不施钾肥处理 K3 较对照 CK 处理产量减少,2016 年、2017 年分别减产 4.04% 和 3.53%,可能是由于不平衡施肥所致,也表明钾肥对番茄产量的形成具有积极意义,可一定程度上增加番茄产量。施加钾肥处理 K1、K2 较不施钾肥处理 K3 番茄产量有所增加,但各处理间差异未达显著水平($P < 0.05$)。施加 KCl 处理 K1 和施加 K₂SO₄ 处理 K2 相比,K1 产量高于 K2,其中 2017 年度 2 处理产量差异达到显著水平($P < 0.05$)。

表 3 不同钾肥处理对番茄产量和干物质质量的影响

处理	产量/(kg·株 ⁻¹)		干重/(g·株 ⁻¹)	
	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年
	K1	41.06±0.66a	39.45±4.05b	53.95±0.22a
K2	39.23±3.06a	36.00±1.00ab	51.91±10.51a	97.88±11.87b
K3	37.14±3.00a	30.69±1.05a	41.96±2.29a	87.60±7.61b
CK	38.70±1.43a	31.82±4.24a	47.64±10.70a	69.33±0.25a

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

由表 3 可知,施加钾肥处理 K1、K2 较对照 CK 番茄植株干物质质量也略有增加,其中 2017 年达显著水平分别增加 27.89% 和 41.18%;不施钾肥处理 K3 较对照处理 CK 在 2016 年和 2017 年表现不相一致,2016 年 K3 番茄植物干物质质量小于 CK,2017 年则相反。施加钾肥处理 K1、K2 较不施钾肥处理 K3 番茄干物质质量有所增加,但各处理间差异未达显著水平($P < 0.05$)。不同施钾肥处理 K1 和 K2 在 2016 年、2017 年 2 个试验年份番茄植株干物质质量差异不同,其中 2016 年施加 K₂SO₄ 处理番茄植株干物质质量略

高于施加 KCl 处理,2017 年度则相反,但 2 个试验年份处理间差异均未达到显著水平($P < 0.05$)。

2.3 不同钾肥处理对番茄不同器官 Cd 含量的影响

由表 4 可知,Cd 主要累积在番茄植株的茎和叶中,根和果实中 Cd 含量较少。2 个试验年份不同器官 Cd 累积含量总体表现为:叶>茎>根,但各处理不同器官 Cd 累积含量有所差异。K1、K2 较 CK 番茄根系 Cd 累积量,2016 年 K2>K1>CK,2017 年 CK>K1>K2;K3 较 CK 番茄根系 Cd 累积量,2016 年 K3<CK,2017 年 K3>CK;施加钾肥处理 K1、K2 较不施加钾肥处理 K3 番茄根系 Cd 累积量,2016 年 K2>K1>K3,2017 年 K3>K1>K2。2 个试验年份 K1、K2、K3 较 CK 番茄茎秆 Cd 累积含量增加,其中 2016 年 K1、K2 达显著水平($P < 0.05$),2017 年 K1、K2 未达显著水平($P > 0.05$);K1、K2 较 K3 番茄茎秆 Cd 累积含量 2016 年显著增加($P < 0.05$),2017 年则表现为含量降低,但差异不显著($P > 0.05$);不同钾肥处理 K1、K2 番茄茎秆 Cd 累积含量,2016 年 K1>K2,但 2017 年 K2>K1。2 个试验年份 K1、K2、K3 较对照 CK 番茄叶 Cd 累积含量增加,其中 2016 年 K1、K2 未达显著水平($P > 0.05$),2017 年 K1、K2 达显著水平($P < 0.05$);K1、K2 较 K3 番茄叶 Cd 累积含量 2016 年显著降低($P < 0.05$),2017 年番茄叶 Cd 累积含量增加,但差异不显著($P > 0.05$);不同施钾肥处理 K1、K2 番茄叶 Cd 累积含量 2 年均均为 K2>K1,但未达显著水平($P > 0.05$)。K1、K2、K3 较 CK 番茄整个植株 Cd 总累积量显著增加($P < 0.05$),但 K3 增加量小于 K1、K2 增加量,其中 2016 年、2017 年 K1 和 K2 较 CK 分别增加 13.49%,13.76% 和 21.52%,24.55%;K1、K2 较 K3 番茄整个植株 Cd 总累积量增加,2016 年和 2017 年分别增加 6.72%,6.97% 和

1.52%, 4.05%, 表明施加钾肥增加番茄植株 Cd 累积量; 不同施钾肥处理 K1、K2 整个植株 Cd 总累积含量 $K2 > K1$, 表明施加 K_2SO_4 较 KCl 增加番茄植株吸收累积 Cd。

2 个试验年份 K1、K2、K3 较对照 CK 番茄果实 Cd 含量降低, 2016 年 K3 番茄果实 Cd 较 CK 降低 51.02%, 2017 年 K3 较 CK 降低 75.51%, K3 降低幅度小于 K1、K2 降低幅度, 2016 年 K1、K2 番茄果实 Cd 均未检出, 2017 年 K1、K2 较 CK 分别降低 90.02% 和 77.05%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$), 但各处理番茄果实 Cd 含量均未超出《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[18] 限值标准 (0.05 mg/kg); K1、K2 较 K3 番茄果实 Cd 含量降低, 2017 年 K1、K2 较 K3 减少 58.33% 和 8.33%, 表明再生水灌溉条件下施加钾肥可抑制 Cd 向果实的迁移, 降低番茄果实 Cd 含量; 2017 年不同施钾肥处理番茄果实 Cd 含量 K1 低于 K2, 但未达显著水平 ($P > 0.05$)。

表 4 不同处理番茄植株不同器官及部位 Cd 含量

试验年份	处理	Cd 含量/(mg·株 ⁻¹)				番茄果实 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)
		根	茎	叶	总量	
2016	K1	0.0011ab	0.0055c	0.0363ab	0.0429b	0a
	K2	0.0013c	0.0042b	0.0375ab	0.0430b	0a
	K3	0.0010a	0.0039a	0.0389b	0.0402b	0.0240b
	CK	0.0011ab	0.0037a	0.0330a	0.0378a	0.0490c
2017	K1	0.0018ab	0.0076ab	0.0307b	0.0401b	0.0050a
	K2	0.0014a	0.0080ab	0.0317b	0.0411b	0.0110a
	K3	0.0024b	0.0098b	0.0273ab	0.0395b	0.0120a
	CK	0.0022ab	0.0068a	0.0240a	0.0330a	0.0490b

表 5 不同处理对根际土与非根际土 Cd 含量和有效态 Cd 含量的影响

处理	Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)				有效态 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹)			
	根际土		非根际土		根际土		非根际土	
	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年
K1	0.2017±0.0133a	0.3825±0.0101c	0.1901±0.0099b	0.4047±0.0162b	0.0830±0.0015a	0.0766±0.0020ab	0.0768±0.0120ab	0.0652±0.0074a
K2	0.1783±0.0151a	0.3721±0.0013b	0.1857±0.0254ab	0.3871±0.0214b	0.0800±0.0016a	0.0651±0.0106a	0.0732±0.0074a	0.0618±0.0050a
K3	0.2079±0.0292a	0.3948±0.0117ab	0.2021±0.0003a	0.4221±0.0210ab	0.0930±0.0020b	0.0914±0.0128b	0.0914±0.0020b	0.0821±0.0022b
CK	0.2120±0.0001a	0.4289±0.0141a	0.2227±0.0077a	0.4231±0.0021a	0.0913±0.0078b	0.0809±0.0080ab	0.0854±0.0082ab	0.0781±0.0022b

土壤 Cd 存在形态分别有水溶交换态、铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态、有机结合态和残渣态, 其中水溶交换态活性最高, 容易被作物吸收利用。由表 5 可知, 2017 年番茄收获后不同处理根际土与非根际土有效态 Cd 含量较 2016 年番茄种植前均有所增加, 其中, 根际土和非根际土有效态 Cd 含量 K1、K2、K3、CK 分别增加 66.52%, 41.59%, 98.70%, 75.80% 和 41.74%, 34.35%, 78.41%, 69.71%; 但 2017 年番茄收获后不同处理根际土与非根际土有效态 Cd 含量较 2016 年番茄收获后均有所降低, 表明随着种植番茄茬数增加, 土壤有效态 Cd 含量逐渐降低。2 个试

2.4 不同钾肥处理对番茄根际土、非根际土 Cd 含量及有效态 Cd 含量分布的影响

由表 5 可知, 随着试验年份增加, 不同处理根际土与非根际土 Cd 含量均有所增加, 其中 K1、K2、K3 和 CK 根际土和非根际土 Cd 含量较 2016 年番茄种植前分别累积 247.76%, 238.28%, 258.93%, 289.88% 和 267.87%, 251.93%, 283.75%, 284.66%; 处理 K1、K3 根际土 Cd 含量累积增幅小于非根际土; K2、CK 根际土 Cd 含量累积增幅大于非根际土, 但各处理根际土 Cd 累积量均低于非根际土。虽然根际土和非根际土 Cd 含量不断累积, 但 2 年试验后根际土、非根际土 Cd 累积量仍低于《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)^[19] 二级标准 (0.6 mg/kg)。施加钾肥处理 K1、K2 较对照 CK 根际土和非根际土 Cd 含量有所降低, 根际土 2017 年达显著水平 ($P < 0.05$); 非根际土均达显著水平 ($P < 0.05$); 不施钾肥处理 K3 较对照 CK 土壤 Cd 含量也有所降低, 但未达显著水平 ($P > 0.05$), 可能由于土壤中施加氮肥和磷肥所致。K1、K2 较 K3 根际土和非根际土 Cd 含量有所降低, 2016 年 K1、K2 较 K3 根际土和非根际土 Cd 含量分别降低 2.96%, 14.22% 和 5.90%, 8.10%, 未达显著水平 ($P > 0.05$), 2017 年分别降低 3.11%, 5.75% 和 4.14%, 8.29%, 均达显著水平 ($P < 0.05$), 表明施加钾肥可减少土壤 Cd 累积量。施加 KCl 处理 K1 和施加 K_2SO_4 处理 K2 相比, 2 个试验年份根际土与非根际土 Cd 含量均表现为 K1 大于 K2, 表明对试验土壤而言, 施加 K_2SO_4 较 KCl 可一定程度上减少 Cd 在土壤中的累积。

验年份施钾肥处理 K1、K2 较对照 CK 土壤有效态 Cd 含量降低, 其中 2016 年根际土差异达显著水平 ($P < 0.05$); 2017 年非根际土差异达显著水平 ($P < 0.05$); 而不施钾肥处理 K3 较对照 CK 土壤有效态 Cd 含量略有增加, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。2 个试验年份 K1、K2 较 K3 土壤有效态 Cd 含量降低, 其中 2016 年根际土与非根际土有效态 Cd 含量 K1、K2 较 K3 分别降低 10.75%, 13.98% 和 15.97%, 19.91%; 2017 年分别降低 16.19%, 28.74% 和 20.55%, 24.70%, 均达显著水平 ($P < 0.05$), 表明施加钾肥可降低土壤有效态 Cd 含量。施加 KCl 处理 K1 和施加 K_2SO_4 处理

K2 相比,2 个试验年份根际土与非根际土有效态 Cd 含量 $K1 > K2$,表明施加 K_2SO_4 较 KCl 可降低根际土与非根际土有效态 Cd 含量。

3 讨论

土壤 pH 是影响重金属在土壤-作物体系中迁移的主要因素,施加 KCl 较 K_2SO_4 降低土壤 pH 显著,与赵晶等^[9]研究结果一致。番茄高产需要吸收大量的钾,施加 KCl 和 K_2SO_4 可以满足番茄对钾的需求,同时提高番茄抗逆性,从而促进番茄植株的生长和果实的形成、膨大^[20],本试验中在再生水灌溉条件下,施加 KCl 和 K_2SO_4 均能够增加番茄植株干重和产量,尤其是施加 KCl 对番茄产量增幅较大,只施氮肥和磷肥而不施钾肥番茄植株产量略有降低,分析可能由于施肥不均衡所致。2 年试验结果均表明,所有处理番茄果实中 Cd 含量低于《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[18] 中新鲜蔬菜 Cd 限值标准(0.05 mg/kg),其中施加 KCl 和 K_2SO_4 的再生水灌溉番茄果实 Cd 含量显著低于不施肥处理和不施钾肥处理,表明钾肥可抑制番茄果实对 Cd 的吸收转运,提高再生水利用食品的安全性,不施钾肥处理番茄果实 Cd 含量低于不施肥处理,但降低幅度小于施钾肥处理,也表明施氮肥和磷肥的同时,施钾肥更有利于抑制番茄果实 Cd 含量的吸收运转。通过 2 年连续试验,再生水灌溉条件下施加 KCl 和 K_2SO_4 番茄植株 Cd 总富集量大于不施用钾肥处理和不施肥处理,不施钾肥处理大于不施肥处理,表明在相同供试条件下,施加钾肥处理番茄植株所累积吸收的有效态 Cd 含量大,土壤中残留 Cd 含量会相应减少,再生水灌溉条件下施加氮肥、磷肥和 KCl 较施加氮肥、磷肥和 K_2SO_4 ,根际土与非根际土 Cd 含量大。对再生水灌溉番茄根际土与非根际土中有效态 Cd 含量研究表明,不施加钾肥处理增加了番茄根际土与非根际土有效态 Cd 含量,施加 KCl 和 K_2SO_4 处理降低了番茄根际土与非根际土有效态 Cd 含量,其中 K_2SO_4 较 KCl 处理根际土与非根际土有效态 Cd 含量低,这一结果与前人^[21]研究结果一致,主要是由于氯离子易与镉离子形成可溶性配合物从而降低土壤对重金属 Cd 的吸附,增加可溶态 Cd 含量^[17],而土壤对 SO_4^{2-} 的吸附为专性吸附,专性吸附结果使得土壤胶体所带的净负电荷增加,增强了土壤对 Cd 的吸持^[22]。综上所述,钾肥影响再生水灌溉条件下水中 Cd 在土壤-作物系统的迁移转化,再生水灌溉与施加 K_2SO_4 相结合更有利于减少 Cd 及有效态在土壤-作物系统累积,提高再生水安全利用性。

关于施加不同钾肥伴随离子对再生水长期灌溉土壤重金属影响机理及其与如氮、磷肥及其伴随离子的交互作用等应开展进一步的深入研究。

4 结论

(1)再生水灌溉条件下,施加 KCl 和 K_2SO_4 可以增加番茄植株干物质量,较不施肥和不施钾肥处理番茄植株干质量增加;不施钾肥处理降低番茄产量,施钾肥处理可提高番茄果实产量,施加 KCl 和 K_2SO_4 较不施肥处理可增产 6.10%~24.00% 和 1.36%~13.16%,在施氮肥和磷肥的同时施加 KCl 较 K_2SO_4 增产效果明显。

(2)再生水灌溉条件下,不施钾肥较不施肥处理番茄果实 Cd 含量降低,但降低幅度小于施加钾肥处理,钾肥在一定程度上可减少 Cd 在番茄果实的累积,施加 KCl 和 K_2SO_4 番茄果实 Cd 含量较不施钾肥处理分别减少 58.33% 和 8.33%,表明再生水灌溉条件下施加钾肥可抑制 Cd 向果实的迁移,降低番茄果实 Cd 含量;施加 KCl 较 K_2SO_4 番茄果实 Cd 含量降低,各处理均未超出国标中新鲜蔬菜 Cd 限值标准(0.05 mg/kg)。

(3)再生水灌溉条件下,不施钾肥处理较不施肥处理土壤 pH、Cd 含量有所降低,降低幅度小于施钾肥处理,有效态 Cd 有所增加,施加 KCl 和 K_2SO_4 较不施肥处理有效态 Cd 降低,较不施钾肥处理根际土和非根际土 pH、Cd 含量和有效态 Cd 含量均有所降低,其中施加 KCl 根际土和非根际土 Cd 含量分别降低 2.96%~3.11% 和 5.75%~14.22%,施加 K_2SO_4 分别降低 4.14%~5.90% 和 8.10%~8.29%;施加 KCl 根际土和非根际土有效态 Cd 含量分别降低 10.75%~16.19% 和 13.98%~28.74%,施加 K_2SO_4 分别降低 15.97%~20.55% 和 19.91%~24.70%;施加 K_2SO_4 较 KCl 可降低根际土与非根际土 Cd 全量及有效态 Cd 含量;各处理 Cd 累积含量均远低于国标二级标准(0.6 mg/kg)。施加钾肥与再生水灌溉相结合有利于减少 Cd 在土壤-作物系统累积,施加 K_2SO_4 优于施加 KCl。

参考文献:

- [1] 刘智超.从河湖管理与保护角度看新时代兴水治水“系统治理”的必然:关于“系统治理”的学习心得[J].水利发展研究,2018,18(7):22-23.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 25499-2010 城市污水再生利用绿地灌溉水质[S].北京:中国标准出版社,2011:3.
- [3] Eran F. Water reuse-an integral part of water resources management: Israel as a case study [J]. Water Policy, 2011, 3(1): 29-39.
- [4] 侯伟,李智,陈峰,等.再生水回灌的农业环境风险及对策[J].土壤通报,2013,44(1):240-244.
- [5] 王凤花,任超,李新燕,等.3 种肥料对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J].中国土壤与肥料,2016,(1):124-128.

- Cd and diesel [J]. *Data in Brief*, 2018, 17: 47-56.
- [3] 周际海,袁颖红,朱志保,等. 土壤有机污染物生物修复技术研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(2): 343-351.
- [4] Al-Mutairi N, Bufarsan A, Al-Rukaibi F. Ecorisk evaluation and treatability potential of soils contaminated with petroleum hydrocarbon-based fuels [J]. *Chemosphere*, 2008, 74(1): 142-148.
- [5] Simarro R, Gonzalez N, Bautista L F. Assessment of the efficiency of in situ bioremediation techniques in a creosote polluted soil: change in bacterial community [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 262: 158-167.
- [6] 秦樊鑫,魏朝富,李红梅. 重金属污染土壤修复技术综述与展望[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(增刊 2): 199-208.
- [7] 生态环境部. GB 36600—2018 土壤环境质量—建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 3-5.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 北京农业出版社, 2000: 238-239.
- [9] 韩桂琪,王彬,徐卫红,等. 重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 复合污染对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 238-242.
- [10] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-339.
- [11] 王伟华,刘毅,唐海明,等. 长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 430-437.
- [12] 刘自力,王红旗,孔德康,等. 不同植物-微生物联合修复体系下石油烃的降解[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(1): 190-197.
- [13] 梁楚涛,张骄阳,艾泽民,等. 黄土丘陵区不同施肥处理对土壤微生物特性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3592-3602.
- [14] 吕盛,王子芳,高明,等. 秸秆不同还田方式对紫色土微生物量碳、氮、磷及可溶性有机质的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 266-272.
- [15] 程坤,周际海,金志农,等. 土壤微生物活性对石油原油、铅镉及其复合污染的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(5): 1976-1982.
- [16] 李晓楼. 石油污染对土壤微生物群落多样性的影响[J]. *生物工程学报*, 2017, 33(6): 968-975.
- [17] 刘捷豹,陈光水,郭剑芬,等. 森林土壤酶对环境变化的响应研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 110-117.
- [18] 唐珺瑶,贾蓉,曲东,等. 生物质炭对水稻土中脱氢酶活性和铁还原过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 262-267.
- [19] 褚素贞,张乃明,史静. 云南省设施土壤过氧化氢酶活性变化趋势研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(15): 220-225.
- [20] 卢冠男,夏梦洁,贾丹阳,等. 我国 14 种典型土壤脲酶、脱氢酶活性对汞胁迫的响应[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(7): 1788-1793.
- (上接第 333 页)
- [6] 何其辉,谭长银,曹雪莹,等. 肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(5): 942-951.
- [7] 徐明岗,武海雯,刘景. 长期不同施肥下我国 3 种典型土壤重金属的累积特征[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2319-2324.
- [8] 陈宪军. 钾肥的作用[J]. *吉林农业*, 2007(8): 33.
- [9] 赵晶,冯文强,秦鱼生,等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 953-961.
- [10] 杜丽娜,余若祯,王海燕,等. 重金属镉污染及其毒性研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2013, 30(2): 167-174.
- [11] 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17) [2018-08-10]. <http://www.gov.cn/foot/sitel/20140417/782bec88840814ba158d01.pdf>.
- [12] 国家环保总局,国家质量监督检验检疫总局. GB 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 5.
- [13] 中华人民共和国水利部. SL 368—2006 再生水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 4.
- [14] 张杨. 原子吸收分光光度法测定水中重金属含量的应用[J]. *吉林农业*, 2018(17): 58, 111.
- [15] 刘杰英,杜鹏程,汪风云,等. 石墨炉原子吸收光谱法测定水果和蔬菜中的痕量铅镉[J]. *现代预防医学*, 2016, 43(22): 4171-4173.
- [16] 王秀丽,梁成华,马子惠,等. 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(4): 1437-1444.
- [17] 焦鹏,高建培,王宏宾,等. NPK 肥对玉米幼苗吸收和积累重金属的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(6): 1094-1102.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762—2017 食品安全国家标准食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 4.
- [19] 国家环境保护局,国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995: 2.
- [20] 贺志文,李灵芝,任瑞娟,等. 不同钾肥种类及配比对大棚番茄产量及品质的影响[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(7): 73-76.
- [21] 陈苏,孙丽娜,孙铁珩,等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(1): 182-188.
- [22] 陈怡. 钾肥对铅镉污染土壤白菜的效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.