

杨育文, 陈秋会, 席运官, 等. 有机与常规种植模式下菜地氮、磷的淋溶特征[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 902-909.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.012

## 有机与常规种植模式下菜地氮、磷的淋溶特征

杨育文<sup>1</sup>, 陈秋会<sup>1</sup>, 席运官<sup>1</sup>, 刘明庆<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 高丽<sup>1</sup>, 杨涛明<sup>2</sup>, 李丽娜<sup>2</sup>, 和丽萍<sup>2</sup>  
(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 云南省生态环境科学研究院, 云南 昆明 650034)

**摘要:** 为了探究有机、常规 2 种种植模式下菜地土壤养分的淋溶特征, 采用渗漏计装置收集地下 1 m 深的淋溶水, 通过 2018 年、2019 年连续 2 年的田间试验, 比较等氮投入条件下有机、常规种植菜地中淋溶水氮和磷质量浓度、淋溶量及化学需氧量(COD)。结果表明, 在有机种植模式下, 2018 年、2019 年的总氮淋溶量分别比常规种植模式降低了 42.88%、48.00%; 在有机种植模式下, 2018 年、2019 年的总磷淋溶量分别比常规种植模式降低了 28.09%、16.25%, 但在有机种植模式下, 土壤淋溶水 COD 比常规模式提高了 118.01%。菜地土壤中的养分淋失以氮为主, 氮素在施肥初期, 尤其是强降雨发生时最易发生淋失, 硝态氮是氮素淋溶损失的主要形态。综上, 与常规种植模式相比, 有机种植能有效减少菜地土壤中的氮淋溶, 在一定程度上减少磷淋溶, 但会显著增加淋溶水 COD 的风险。

**关键词:** 菜地; 有机种植; 淋溶; 氮; 磷; 化学需氧量(COD)

**中图分类号:** S157.4; X820.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2021)04-0902-08

## Leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in vegetable fields under organic and conventional farming systems

YANG Yu-wen<sup>1</sup>, CHEN Qiu-hui<sup>1</sup>, XI Yun-guan<sup>1</sup>, LIU Ming-qing<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, GAO Li<sup>1</sup>,  
YANG Tao-ming<sup>2</sup>, LI Li-na<sup>2</sup>, HE Li-ping<sup>2</sup>

(1. *Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Nanjing 210042, China*; 2. *Yunnan Provincial Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming 650034, China*)

**Abstract:** To explore the leaching characteristics of soil nutrients in vegetable fields under organic and conventional farming systems, the leaching water from 1 m underground was collected using lysimeter, and mass concentration of nitrogen (N) and phosphorus (P), chemical oxygen demand (COD) and leaching amount of leaching water in organic and conventional vegetable fields under the condition of equal N input were compared through continuous two-year field experiment in 2018–2019. The results showed that the total N leaching amount in 2018 and 2019 under organic planting pattern was 42.88% and 48.00% lower than that under conventional planting pattern respectively. The total P leaching amount in

2018 and 2019 under organic planting pattern was 28.09% and 16.25% lower than that under conventional planting pattern respectively. However, the COD in soil leachate under organic planting pattern increased by 118.01% compared with that under the conventional planting system. N was the main nutrient leached in vegetable soil. Most of the N leaching loss occurred in the initial period of fertilization, especially during intensive rainfall, and nitrate nitro-

**收稿日期:** 2020-11-10

**基金项目:** 云南省生态环境厅土壤修复项目[YNZDZB(2017)002];  
中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX200104、  
GYZX210514)

**作者简介:** 杨育文(1991–), 女, 甘肃武威人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为有机农业与农村面源污染防治。(E-mail) yy-wofrec@126.com

**通讯作者:** 席运官, (E-mail) xyg@nies.org

gen was the main form of N leaching loss. In summary, compared with the conventional planting system, the N loss of vegetable soil via leaching can be reduced effectively under organic planting pattern, and P leaching can be reduced partly, but the risk of COD in leaching water can be increased significantly.

**Key words:** vegetable field; organic cultivation; leaching; nitrogen; phosphorus; chemical oxygen demand(COD)

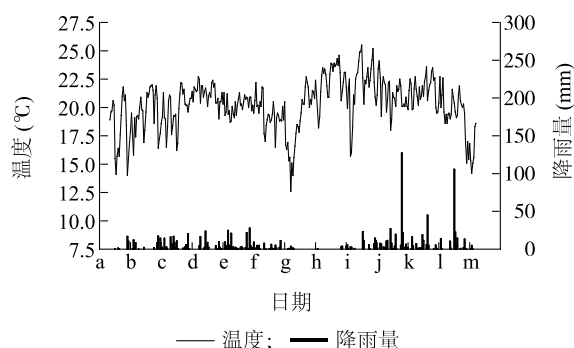
云南省是蔬菜大省,土壤类型主要为红壤,土壤阳离子交换量低,对营养元素的保蓄能力较差<sup>[1]</sup>,且菜地肥料投入量大,因不合理施肥导致养分大量淋失,对地下水和周边供水水源地产生潜在污染危害,这种危害在水环境敏感区域尤为突出。松华坝水库是昆明市重要的生活水源地,《昆明市松华坝水源保护区管理规定》中提出鼓励农户施用农家肥、少用化肥,积极推广生态农业和生物防治新技术,并且为了协调经济发展与环境保护之间的矛盾,当地政府积极引导农民在二、三级保护区内发展有机种植。在有机种植的过程中禁止施用化学农药与肥料,以有机肥为主要肥源,施用有机肥能增加土壤有机质含量,促进土壤团粒结构形成,增强土壤保肥力,减少氮、磷流失风险。黄东风等<sup>[2]</sup>通过土柱模拟试验发现,施用有机肥可以减少氮、磷随渗漏水淋溶而造成的损失量。中国农业大学对有机蔬菜种植的长期定位试验结果表明,有机种植模式在减少氮素淋溶方面比常规模式更有优势,但增加了磷素淋失风险,并在一定程度上提高了淋溶水的化学需氧量(COD)<sup>[3]</sup>。国外研究发现,有机种植农田较常规种植农田减少了8.67%~65.58%的氮素淋溶量<sup>[4]</sup>。但也有研究发现,在种植过程中施用有机肥而淋失的氮素量比施用矿质态氮肥的更多<sup>[5]</sup>,长期大量施用有机肥会导致磷素渗漏淋失风险大大提高<sup>[6]</sup>。近年来,松华坝水库水质劣变的原因以氮、磷,尤其是氮超标为主<sup>[7]</sup>,因此,关于在松华坝饮用水源保护区发展有机蔬菜种植是否能够降低土壤养分淋失风险的问题值得深入研究。本研究通过分析云南省昆明市松华坝水库饮用水水源保护区有机、常规种植模式下菜地土壤淋溶水中氮、磷的质量浓度以及COD、淋溶量的变化特征,探究2种植模式对土壤养分淋失的影响,旨在为降低该地区菜地养分淋失风险提供科学依据,同时为水环境敏感区开展有机种植以及减少农业面源污染提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

田间试验于2018年、2019年连续2年的4~9月

在云南省昆明市盘龙区露地蔬菜种植基地(地理位置为102.7°E,25.05°N)开展。盘龙区属滇池盆地,地势平坦,为中亚热带高原季风气候区,冬无严寒,夏无酷暑,该地区全年平均气温为14.9℃,最高气温为31.5℃,最低气温为-7.8℃。年平均降雨量约为1000.5 mm,月最大降雨量为208.3 mm。2018年4~9月降雨量为501.0 mm,其中较大的降雨发生在7月12日、8月3日、8月24日,降雨量分别为24.0 mm、25.0 mm、28.0 mm;2019年4~9月的降雨量为702.6 mm,较大的降雨发生在7月20日、9月9日,降雨量分别为127.4 mm、105.9 mm。2018~2019年降雨季温度和降雨量变化情况见图1。



a; 2018-03-31; b; 2018-04-30; c; 2018-05-30; d; 2018-06-29; e; 2018-07-29; f; 2018-08-28; g; 2018-09-27; h; 2019-04-27; i; 2019-05-27; j; 2019-06-26; k; 2019-07-26; l; 2019-08-25; m; 2019-09-24。

图1 2018~2019年降雨季雨量和温度的变化情况

Fig.1 Variation of rainfall and temperature in rainy season during 2018-2019

试验区的土壤类型为红壤,土质疏松,保水保肥性较差,雨水主要通过淋溶流失。有机菜地已连续4年用于有机蔬菜生产,土壤颗粒组成中黏粒占36.86%,砂粒占23.27%,粉(砂)粒占39.87%;常规菜地土壤颗粒组成中黏粒占32.69%,砂粒占21.08%,粉(砂)粒占46.23%。供试土壤的基本理化性质如表1所示。

### 1.2 试验设计

试验小区长6 m,宽4 m,面积为24 m<sup>2</sup>,为防止串水,每个小区之间设置50 cm宽、25 cm高的田

埂,地块四周设保护行,保护行各边宽度不少于 1 m。试验共设 2 个处理,每个处理设 3 次重复,共 6 个小区。处理 1 为常规种植模式(CF),按农户常规方式管理,施用复合肥(主要成分 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的质量比为 18:6:24),施肥量根据菜地多年的施肥经验确定,每季蔬菜施肥 2.5 t/hm<sup>2</sup>;处理 2 为有机种植模式(OF),完全按有机方式进行管理,使用等氮

量自制腐熟发酵羊粪有机肥,人工除草,施用生物源、植物源和矿物源农药进行病虫害防治,羊粪有机肥中全氮、全磷、全钾养分含量分别为 1.69%、2.52%、1.91%,有机质含量为 53.8%,每季蔬菜的施肥量为 26.7 t/hm<sup>2</sup>。有机、常规种植模式下的施肥方式均为一次性基施,不追施。

表 1 有机和常规菜地土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soils from organic and conventional vegetable fields

菜地类别	pH 值	有机质含量 (g/kg)	总氮含量 (g/kg)	总磷含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)
常规菜地	4.97b	18.79b	0.92a	1.74a	39.72b	25.48a
有机菜地	6.09a	22.56a	1.13a	2.10a	73.16a	19.36b

同一列数据后标有不同小写字母的表示在 0.05 水平差异显著。

开展试验前,在各试验小区设置渗漏计以收集淋溶液。分别在各小区中间位置挖 1 个底面积 0.5 m×0.5 m、深 1.0 m 的坑,放置淋溶水收集盘,在坑的底部沟槽继续深挖 1 个平面斜坡,斜坡一边距地面 1.0 m,另一边距地面 1.1 m,在坑壁的一侧沿斜坡挖 1 个 0.2 m 宽的沟槽用于放软管,斜坡另一侧继续垂直深挖 1 个直径 0.15 m、深 1.6 m 的坑用于储放淋溶水接收装置(渗漏计),为了防止地表水进入渗漏计,其上沿须高出表土 5 cm,渗漏计最大储水容量为 28 L,采集 1.0 m 土壤深处的淋溶液。

在 2018 年的试验期共种植 2 季蔬菜,分别于 4 月 26 日施基肥定植花椰菜(*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.),品种为兴利花王,行距为 45 cm,株距为 40 cm,7 月 25 日收获;8 月 2 日施基肥定植白菜[*Brassica pekinensis* (Lour.) Rupr.],品种为春黄 56,行距为 45 cm,株距为 30 cm,9 月 22 日收获。2 季蔬菜的长势均良好。2019 年的试验期只种植 1 季蔬菜,6 月 17 日施基肥定植辣椒(*Capsicum annuum* L.),品种为云椒 2 号,行距为 60 cm,株距为 30 cm,9 月 30 日收获,受气候、病虫害、人工管理等因素影响,辣椒长势较差,植株矮小、枝梢稀疏。

### 1.3 样品的采集

在蔬菜种植前采集 0~20 cm 土层的土壤样品,风干、过筛后用于测定土壤的基本理化性质。

用渗漏计收集土壤淋溶水,用抽水泵从中抽取淋溶水,记录淋溶水总体积,然后取 1 L 淋溶水放入采样瓶中,标注样品编号和取样时间,随后带回实验室于-20 ℃保存待测。

2018-2019 年共收集了 7 份淋溶水样,其中 2018 年收集了 4 份淋溶水样,取样时间分别为 6 月 15 日、7 月 10 日、8 月 1 日和 9 月 6 日,收集到的淋溶水量分别为 5.00~11.10 L、0.98~4.50 L、0.53~4.85 L、7.12~15.73 L;2019 年收集了 3 份淋溶水样,取样时间分别在 7 月 13 日、8 月 16 日、9 月 27 日,收集到的淋溶水量分别为 9.50~12.60 L、4.90~17.00 L、3.50~15.00 L。

### 1.4 测定项目与方法

土壤 pH 值采用 pH 计测定,总氮含量采用凯氏定氮法测定,总磷含量采用钼锑抗分光光度法测定,速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 法浸提后通过钼锑抗比色法测定,硝态氮含量用 1 mol/L KCl 溶液浸提后通过流动分析仪检测,有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。

参照 HJ 667-2013《水质 总氮的测定 连续流动-盐酸萘乙二胺分光光度法》、HJ 670-2013《水质 磷酸盐和总磷的测定 连续流动-钼酸铵分光光度法》的方法测定水样中的总氮(TN)含量、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)含量、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量、总磷(TP)含量、可溶性磷酸盐(DP)含量;COD 的测定采用重铬酸盐法。淋溶水中总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、可溶性磷酸盐淋溶量及 COD 的计算公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times V_i}{S} \times f$$

式中, $P$  为总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、可溶性磷酸盐淋溶量(kg/hm<sup>2</sup>)及 COD; $C_i$  为第  $i$  次淋溶水中总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、可溶性磷酸盐的质量浓度

(mg/L)及 COD; $V_i$ 为第  $i$  次淋溶水的体积(L); $S$  为监测单元面积( $0.25\text{ m}^2$ ); $f$  为换算系数(0.04)。

1.5 数据分析

用 Excel 2010 和 Origin 2019 进行数据处理和制图,用 SPSS 22.0 软件进行显著性检验,采用方差分析(ANOVA)法进行检验,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 种植模式对菜地土壤淋溶水中氮质量浓度和淋溶量的影响

由表 2 可以看出,2018 年、2019 年菜地土壤淋

溶水中氮质量浓度的变化规律基本一致,菜地土壤淋溶水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度明显低于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量浓度,CF 模式菜地土壤淋溶水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、总氮的质量浓度均高于 OF 模式菜地。2018 年 CF、OF 模式菜地土壤淋溶水中总氮的质量浓度分别达到 $12.15\sim 29.41\text{ mg/L}$ 、 $2.43\sim 20.74\text{ mg/L}$ ,2019 年 CF、OF 模式菜地土壤淋溶水中总氮的质量浓度分别达到 $96.81\sim 214.98\text{ mg/L}$ 、 $19.61\sim 77.66\text{ mg/L}$ 。2018 年、2019 年 CF 模式菜地土壤淋溶水中总氮的质量浓度分别是 OF 模式菜地的 1.1~5.0 倍、1.5~5.2 倍。

表 2 菜地土壤淋溶水中总氮、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、总磷、可溶性磷酸盐(DP)的质量浓度

Table 2 Mass concentrations of total nitrogen,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , total phosphorus, soluble phosphate (DP) in farmland leachate

年份	时间	种植模式	质量浓度 (mg/L)				
			总氮	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	总磷	DP
2018 年	6 月 15 日	CF	23.29a	21.35a	0.91a	0.11a	0.06a
		OF	20.74a	17.86a	0.75a	0.04a	0.02a
	7 月 10 日	CF	29.41a	22.27a	0.55a	0.06a	0.03b
		OF	10.77b	10.08b	0.64a	0.13a	0.11a
	8 月 1 日	CF	12.15a	10.35a	0.82a	0.03a	0.02a
		OF	2.43b	2.11b	0.57b	0.07a	0.05a
	9 月 6 日	CF	14.89a	10.51a	0.16a	0.09a	0.07a
		OF	4.99b	4.02a	0.17a	0.05a	0.02a
2019 年	7 月 13 日	CF	96.81a	74.73a	0.21a	0.12a	0.11a
		OF	63.47a	52.57a	0.06a	0.06b	0.04b
	8 月 16 日	CF	214.98a	196.92a	0.08a	0.06a	0.06a
		OF	77.66a	76.13a	0.05a	0.05a	0.03a
	9 月 27 日	CF	101.07a	37.10a	ND	0.08a	0.08a
		OF	19.61a	19.07a	0.08	0.05a	0.05b

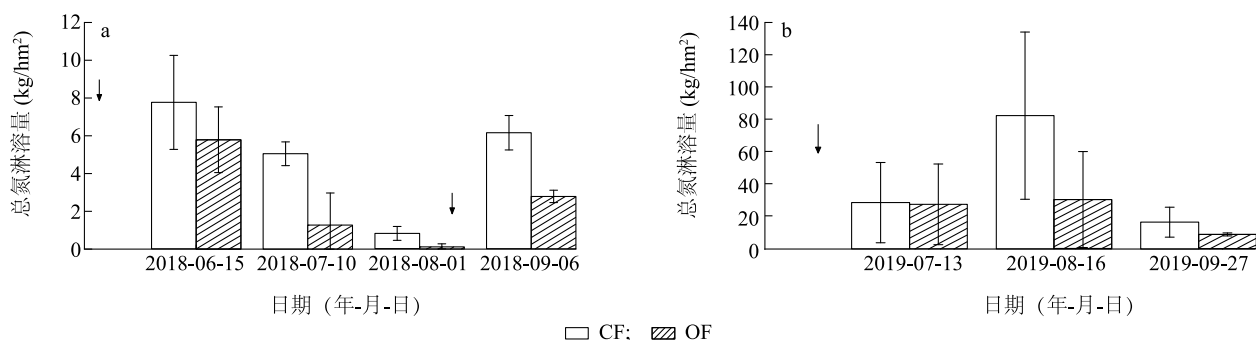
同一取样时间同一列数据后标有不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );CF:常规种植模式;OF:有机种植模式;ND:未检出;DP:可溶性磷酸盐。

由图 2 可以看出,在 CF 种植模式下,菜地土壤中总氮淋溶量始终高于 OF 种植模式,除 2019 年的 CF 种植模式外,其他种植模式总体上表现为施肥初期总氮淋溶量较高,随后逐渐降低。CF 种植模式下菜地土壤中的总氮淋溶量在 2019 年 8 月 16 日出现峰值,随后迅速降低,该峰值明显高于 OF 种植模式下的土壤中总氮淋溶量,OF 种植模式下土壤中的总氮淋溶量一直处于相对较低水平,波动较平缓。

由图 3 可以看出,与 CF 种植模式相比,OF 种植模式菜地土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、总氮淋溶量较低。

2018 年 OF、CF 种植模式菜地土壤中的总氮淋溶量分别为  $10.55\text{ kg/hm}^2$ 、 $18.47\text{ kg/hm}^2$ ,2019 年 OF、CF 种植模式菜地土壤中的总氮淋溶量分别为  $65.81\text{ kg/hm}^2$ 、 $126.56\text{ kg/hm}^2$ 。在 OF 种植模式下,2018 年、2019 年菜地土壤中总氮淋溶量分别较 CF 种植模式降低了 42.88%、48.00%,在 OF 种植模式下,2018 年、2019 年菜地土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量分别比 CF 种植模式降低了 44.47%、43.60%。2 年菜地土壤中淋溶的氮素以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量占总氮淋溶量的比例达到 64.94%~98.14%。

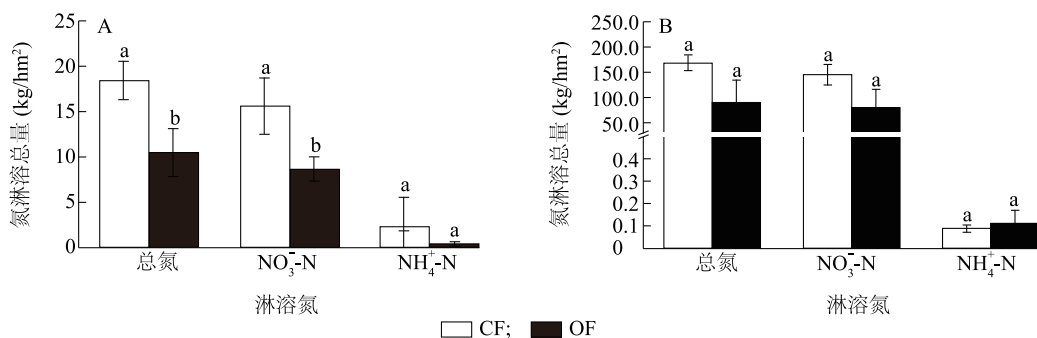




A: 2018年; B: 2019年; CF: 常规种植模式; OF: 有机种植模式; 箭头所指的为施肥时间, 从左到右依次为 2018 年 4 月 26 日、2018 年 8 月 2 日、2019 年 6 月 17 日。

图 2 有机和常规种植模式下菜地土壤中总氮淋溶量的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of total nitrogen leaching loss under organic and conventional farming systems



A: 2018 年; B: 2019 年; CF: 常规种植模式; OF: 有机种植模式; 同一种淋溶氮不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 菜地土壤中总氮、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的淋溶量

Fig.3 Leaching amount of total nitrogen, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in farmland leachate

## 2.2 种植模式对菜地土壤淋溶水中磷质量浓度和淋溶量的影响

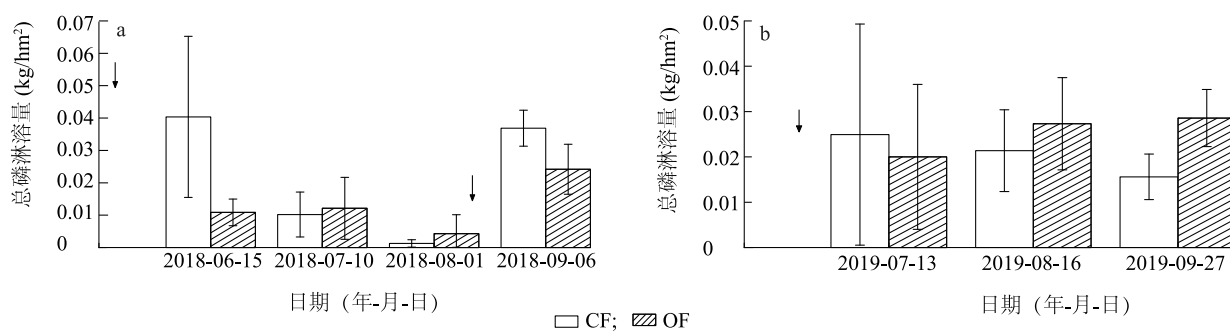
由表 2 可知,菜地土壤淋溶水中总磷、DP 质量浓度的变化趋势基本一致,2018 年 CF、OF 种植模式下菜地土壤淋溶水中的总磷质量浓度分别达到 0.03~0.11 mg/L、0.04~0.13 mg/L,淋溶水中的 DP 质量浓度分别达到 0.02~0.07 mg/L、0.02~0.11 mg/L;2019 年 CF、OF 种植模式下淋溶水中的总磷质量浓度分别达到 0.06~0.12 mg/L、0.06~0.11 mg/L,淋溶水中的 DP 质量浓度分别达到 0.06~0.11 mg/L、0.03~0.05 mg/L。

由图 4 可以看出,2018 年,在 CF 种植模式下,菜地土壤中总磷的淋溶主要发生在施肥后第 1 次取样时,随后淋溶量逐步减少,而 OF 种植模式下土壤总磷的淋溶出现滞后现象,呈先升高后降低的趋势。

由图 5 可以看出,在 2018 年、2019 年 OF 种植模式下土壤中 DP、总磷淋溶量都低于 CF 种植模式,但未达到显著水平。2018 年 OF、CF 种植模式下菜地土壤的总磷淋溶量分别为 0.064 kg/hm<sup>2</sup>、0.089 kg/hm<sup>2</sup>,OF 种植模式下总磷淋溶量比 CF 种植模式减少了 28.09%;2019 年 OF、CF 种植模式下菜地的总磷淋溶量分别为 0.067 kg/hm<sup>2</sup>、0.080 kg/hm<sup>2</sup>,OF 种植模式下菜地的总磷淋溶量比 CF 种植模式减少了 16.25%。

## 2.3 种植模式对菜地土壤淋溶水 COD 的影响

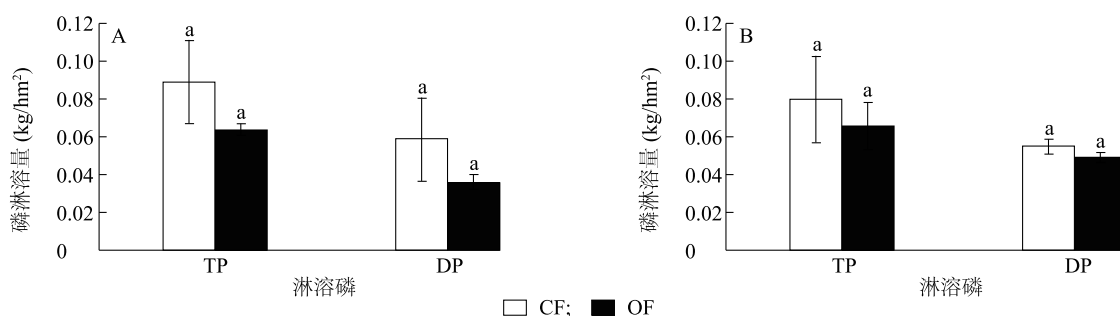
由图 6 可见,OF 种植模式下淋溶水的 COD 显著高于 CF 种植模式,CF、OF 种植模式下 COD 分别达到 9.00~12.33 mg/L、13.50~19.50 mg/L,淋溶水 COD 总量分别为 10.77 kg/hm<sup>2</sup>、23.48 kg/hm<sup>2</sup>,OF 种植模式下菜地淋溶水 COD 总量较 CF 种植模式增加了 118.01%。



A:2018 年;B:2019 年;CF:常规种植模式;OF:有机种植模式;箭头所指的为施肥时间,从左到右依次为 2018 年 4 月 26 日、2018 年 8 月 2 日、2019 年 6 月 17 日。

图 4 有机和常规种植模式下菜地土壤总磷淋溶量的动态变化

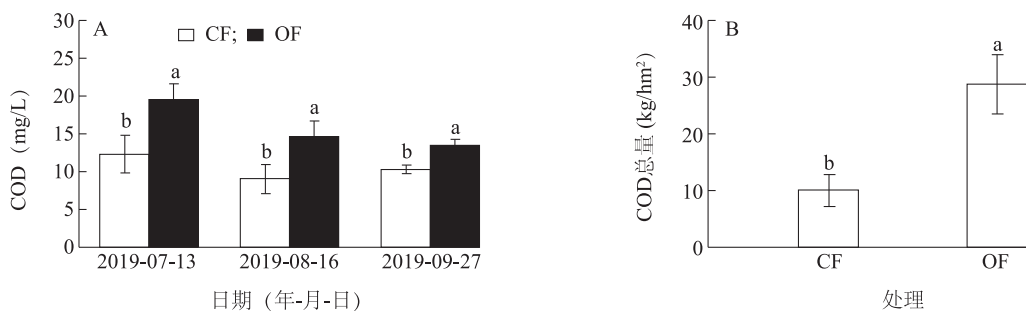
Fig.4 Dynamic changes of total phosphorus leaching loss under organic and conventional farming systems



A:2018 年;B:2019 年;CF:常规种植模式;OF:有机种植模式;TP:总磷;DP:可溶性磷酸盐;同一种磷不同处理间标有不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图 5 菜地土壤淋溶水中总磷、可溶性磷酸盐量

Fig.5 Leaching amount of total phosphorus and soluble phosphorus in farmland leachate



A:不同取样时间淋溶水 COD;B:淋溶水 COD 总量;CF:常规种植模式;OF:有机种植模式;同一取样时间不同处理间标有不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图 6 菜地土壤淋溶水化学需氧量(COD)

Fig.6 The chemical oxygen demand (COD) in farmland leachate

### 3 讨论

通过 2018 年、2019 年连续 2 年的菜地田间淋溶试验发现,氮淋溶主要发生在施肥初期,随着作物生长吸收及养分的流失,除 2019 年的 CF 种植模式

外,其他种植模式的淋溶量呈下降趋势。在常规种植模式下,菜地土壤中的氮淋溶量相对于有机种植模式更高,这是因为化肥养分释放快,易随水淋失,而有机种植模式下总氮、硝态氮淋溶量明显降低,表明有机种植有利于减少氮淋失。在本研究中,有机

菜地的有机质含量比常规菜地高 20.06%, 土壤的理化性质得到改善, 保水保肥能力增强, 有助于减少氮素淋失<sup>[8]</sup>。同时由于有机种植模式下氮的矿化率低于常规模式, 作物收获后土壤中的矿质氮水平显著低于常规地块<sup>[9]</sup>, 能有效降低氮淋失和地下水污染风险<sup>[10]</sup>。在 2 种种植模式下, 土壤氮淋失形态均以硝态氮为主, 硝态氮易随入渗水向土壤深层迁移, 淋溶速度快、强度大, 而铵态氮易被土壤吸附, 淋溶强度较弱, 这与相关研究结果<sup>[3,11]</sup>一致。

除种植模式外, 菜地土壤中氮素的淋溶还受作物种类、生长状况、降雨频次和强度的影响<sup>[12]</sup>。2019 年菜地土壤中氮的淋溶量高于 2018 年, 一方面可能由于当年辣椒生长状况不佳, 肥料吸收利用率不高, 加上植株矮小稀疏, 导致菜地作物覆盖度低, 土壤养分极易被降雨冲刷; 另一方面由于 2019 年 7 月 20 日、8 月 14 日和 9 月 9 日分别发生了 127.4 mm、45.1 mm、105.9 mm 的较大降雨, 最大降雨量是 2018 年最大降雨量的 4.6 倍, 从而导致淋溶渗漏大大增加。李太魁等<sup>[13]</sup>研究发现, 土壤中氮素流失量与雨量呈显著正相关。王玉霞等<sup>[14]</sup>发现, 在二次降雨条件下, 第 2 次降雨引起的总氮流失量远大于第 1 次, 连续降雨越频繁, 土壤中的氮素越难保持。

在 2 种种植模式下, 菜地土壤中磷素淋溶量均远低于氮素, 这是因为磷在土壤中的移动性差, 土壤中可溶性磷的含量很低, 大部分转化为不易溶解的固定态磷, 仅有极少部分进入土壤溶液中<sup>[15]</sup>。长期施用化肥会导致土壤理化性质变差, 因此常规种植模式在施肥后迅速发生磷素淋失; 在有机种植模式下, 蔬菜生长后期土壤中的磷淋溶量出现增长, 略高于常规模式。已有研究发现, 当土壤中速效磷含量超过临界值后, 磷淋失量呈线性增加的趋势<sup>[16-17]</sup>, 尽管红壤有强大的固磷能力, 但有机菜地土壤的本底速效磷含量较高, 施肥一段时间后, 有机肥中的磷开始释放, 当土壤对磷的吸附能力达到极限时, 磷素淋失量迅速增加。

2018 年、2019 年, 有机种植模式下菜地土壤磷淋溶量均比常规模式有所降低, 在一定程度上降低了磷淋溶风险, 这与黄东风等<sup>[2,18]</sup>的研究结果一致。但滕艳敏等<sup>[3]</sup>研究发现, 有机种植模式下菜地土壤的磷淋溶量高于常规种植模式, 这可能与土壤性质及土壤本底磷含量较高有关。在本研究中, 有机菜

地的 pH 值、有机质含量均高于常规菜地, 有研究发现, 随着土壤中有机质含量增加, 磷的保留性和稳定性增强<sup>[19]</sup>, 且随着土壤 pH 值的提高, 磷的释放能力降低, 土壤中磷的淋溶量降低<sup>[20]</sup>, 而常规种植模式下土壤酸化导致土壤对磷的吸附能力降低, 磷流动性增大, 淋失风险随之增加<sup>[21]</sup>。

有机菜地土壤淋溶水的 COD 显著高于常规菜地, 究其原因, 有机菜地的有机质本底含量高于常规菜地, 施用腐熟羊粪有机肥又增加了土壤中的微生物数量及酶活性<sup>[22]</sup>, 从而加快了有机物质的腐殖化过程, 使土壤中可溶性有机物大量增加, 淋溶水 COD 升高。因此, 在有机种植模式中要合理控制有机肥施用量, 增加豆科绿肥种植以降低土壤淋溶水中 COD 风险。

## 4 结 论

在有机、常规种植模式下, 菜地土壤淋溶水中氮的质量浓度和淋溶量都远大于磷, 其中硝态氮是氮素淋失的主要形态。在有机和常规种植模式下, 氮淋溶损失主要发生在施肥初期, 因此施肥初期是进行菜地田间管理、减少养分淋失最关键的时期, 应避免在频繁降雨期或强降雨来临前施肥以及施肥后大水漫灌。在有机种植模式下, 氮、磷的淋溶量均低于常规模式, 淋溶水 COD 高于常规模式, 表明有机种植模式会增加淋溶水 COD 风险, 但有利于降低菜地土壤中氮、磷淋失的风险, 因此在松华坝水库周边开展有机种植有助于减少农业生产中氮、磷的排放。

## 参考文献:

- [1] 孙 波, 王兴祥, 张桃林. 红壤养分淋失的影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 257-262.
- [2] 黄东风, 王 果, 李卫华, 等. 施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及模拟土柱氮磷淋失的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 68-73.
- [3] 滕艳敏, 韩 卉, 郝梓依, 等. 不同蔬菜种植模式对土壤淋溶水总氮、总磷和 COD 的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 759-768.
- [4] MUSYOKA M W, ADAMTEY N, MURIUKI A W, et al. Nitrogen leaching losses and balances in conventional and organic farming system in Kenya[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2019, 114(3): 237-260.
- [5] SIEMENS J, KAUPENJOHANN M. Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils [J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2002, 165(6):

- 675-681.
- [6] 高德才,张 蕾,刘 强,等. 菜地土壤氮磷污染现状及其防控措施[J]. 湖南农业科学, 2013(17):51-55,61.
- [7] 任真臻,付 伟. 松华坝水库水质变化趋势与防治措施研究[J]. 环境科学导刊, 2017,36(1):18-20.
- [8] 许 莹,孙良杰,杜立宇,等. 常规田间管理条件下旱田土壤氮素淋失影响因素研究进展[J]. 土壤通报,2020,51(5):1246-1254.
- [9] POUDEL D D, HORWATH W R, LANINI W T, et al. Comparison of soil N availability and leaching potential, crop yields and weeds in organic, low-input and conventional farming systems in northern California[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(2):125-137.
- [10] CLARK M S, HORWATH W R, SHENNAN C, et al. Changes in soil chemical properties resulting from organic and low-input farming practices[J]. Agronomy Journal, 1998, 90(5):662-671.
- [11] 欧阳祥,莫明浩,计 勇,等. 基于室内土柱模拟的坡耕地红壤氮磷淋溶特征[J].环境科学与技术, 2019, 42(11):40-46.
- [12] KNUDSEN M T, KRISTENSEN I S, BERNTSEN J, et al. Estimated N leaching losses for organic and conventional farming in Denmark[J]. The Journal of Agricultural Science, 2006, 144(2):135-149.
- [13] 李太魁,杨小林,花可可,等. 紫色土坡耕地可溶性有机碳淋失特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10):1836-1842.
- [14] 王玉霞,龙天渝,卢齐齐. 二次降雨条件下紫色土壤中流的氮磷流失特征研究[J]. 中国水土保持, 2011(5):33-35.
- [15] 安 迪,杨 令,王冠达,等. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J]. 化工进展, 2013, 32(8):1967-1973.
- [16] 王荣萍,丁效东,廖新荣,等. 华南地区蔬菜地不同质地土壤磷素淋失临界值研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(19):246-250.
- [17] 徐红娇,包 立,张乃明,等. 滇池流域不同利用方式红壤渗滤液的磷素形态变化[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):267-271.
- [18] 马金奉,朱昌雄,李红娜,等. 粪污肥料化产物对土壤磷淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(9):585-593.
- [19] BRAR B S, SINGH J, SINGH G, et al. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation[J]. Agronomy, 2015, 5(2):220-238.
- [20] FEI C, ZHANG S R, WEI W L, et al. Straw and optimized nitrogen fertilizer decreases phosphorus leaching risks in a long-term greenhouse soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019,20(1):1-9.
- [21] YAN Z J, CHEN S, LI J L, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181(1):26-35.
- [22] 李 颖,王 竞,李 娟,等. 有机肥发酵常用物料肥效试验[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(10):268-272.

(责任编辑:徐 艳)