

## 蔬菜地氮磷径流流失量及其规律研究

潘旭鸣, 丁淼, 周宇诚, 刘建国

引用本文:

潘旭鸣, 丁淼, 周宇诚, 刘建国. 蔬菜地氮磷径流流失量及其规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2262-2268.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0155>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征

陈玲, 范先鹏, 黄敏, 刘冬碧, 吴茂前, 夏颖, 张富林, 张志毅, 倪承凡, 程子珍

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1520-1530 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1397>

#### 不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究

姚金玲, 张克强, 郭海刚, 王凤, 张贵龙, 任天志

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2287-2296 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0537>

#### 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究

陈秋会, 席运官, 王磊, 李妍, 张弛, 田伟, 田然, 肖兴基, 赵克强

农业环境科学学报. 2016, 35(8): 1550-1558 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0102>

#### 不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究

杨坤宇, 王美慧, 王毅, 尹黎明, 李勇, 吴金水

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1723-1734 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0609>

#### 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558-1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

潘旭鸣, 丁淼, 周宇诚, 等. 蔬菜地氮磷径流流失量及其规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2262-2268.

PAN X M, DING M, ZHOU Y C, et al. The amounts of nitrogen and phosphorus losses from a vegetable field via runoff[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(10): 2262-2268.



开放科学 OSID

# 蔬菜地氮磷径流流失量及其规律研究

潘旭鸣, 丁淼, 周宇诚, 刘建国\*

(常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:**为研究蔬菜生产过程中氮、磷随地表径流的流失量及流失方式和时间的分布,在常州市蔬菜主产区设立定位监测点,对蔬菜地的水分运动及氮、磷的输入和流失进行研究。结果表明:蔬菜地通过降雨和灌溉输入的氮为 $21.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,输入的磷为 $1.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。通过径流水和径流水泥沙流失的氮、磷分别为 $28.91$ 、 $3.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。除去降雨和灌溉输入的氮、磷,试验期间蔬菜地氮、磷表观净排放量分别为 $7.15$ 、 $1.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在氮、磷的流失方式方面,以径流水方式流失的氮、磷占绝对优势,分别占氮、磷总流失量的 $91.63\%$ 、 $62.63\%$ 。在氮、磷的流失时间方面,流失的主要月份是6月和7月,流失的氮、磷量分别占总流失量的 $72.54\%$ 、 $73.61\%$ ,且6月与7月的流失量相当。

**关键词:**蔬菜;氮;磷;流失;地表径流

中图分类号:X52;X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)10-2262-07 doi:10.11654/jaes.2022-0155

## The amounts of nitrogen and phosphorus losses from a vegetable field via runoff

PAN Xuming, DING Miao, ZHOU Yucheng, LIU Jianguo\*

(School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** To investigate the amounts of nitrogen and phosphorus losses via surface runoff during a vegetable production cycle and the distributions of the loss ways and times, an *in-situ* monitoring site was established in the main vegetable production area of Changzhou, China. The inputs and outputs of water, nitrogen, and phosphorus in the vegetable field were monitored. The results indicate that the inputs of nitrogen and phosphorus via rainfall and irrigation during the experiment period were  $21.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $1.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. The outputs of nitrogen and phosphorus via runoff water and runoff sediment were  $28.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $3.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. Therefore, the net losses of nitrogen and phosphorus from the vegetable field (deduction of nitrogen and phosphorus inputs from the outputs) were  $7.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $1.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. Regarding the ways of nitrogen and phosphorus outputs, runoff water was predominant. The amounts of nitrogen and phosphorus outputs via runoff water accounted for  $91.63\%$  and  $62.63\%$  of the total nitrogen and phosphorus outputs, respectively. Nitrogen and phosphorus outputs were predominant during June and July. The amounts of nitrogen and phosphorus outputs in June and July accounted for  $72.54\%$  and  $73.61\%$  of total nitrogen and phosphorus outputs, respectively, and the output amounts in June were similar to those in July.

**Keywords:** vegetable; nitrogen; phosphorus; loss; surface runoff

收稿日期:2022-02-19 录用日期:2022-05-10

作者简介:潘旭鸣(1997—),男,江苏常州人,硕士研究生,从事农业环境保护研究。E-mail:997388839@qq.com

\*通信作者:刘建国 E-mail:liujianguo@cczu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31071350);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21\_1267, SJCX21\_1195)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31071350); The Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province(SJCX21\_1267, SJCX21\_1195)

随着我国点源污染治理的逐步推进,非点源污染引起的水环境问题日益凸显,尤其农业非点源污染,已成为我国水质管理中的关键<sup>[1-3]</sup>。2007年太湖蓝藻事件使太湖的生态环境问题成为世界关注的问题<sup>[4]</sup>,截至2016年,太湖平均营养指数为60.8~62.3,水质始终以中度营养水平为主,未得到根本改善<sup>[5]</sup>。太湖流域农田肥料年投入量平均为氮肥570~600 kg·hm<sup>-2</sup>、磷肥79.5~99.0 kg·hm<sup>-2</sup>,而化肥平均利用率仅为30%~35%<sup>[6-7]</sup>。过量施用化肥在增加农业生产成本和农业经济投入的同时,容易导致土壤中氮、磷等营养物质大量流失,在降雨后通过地表径流等途径流入周边水体<sup>[8-11]</sup>,造成地表水污染、水体富营养化、地下水污染等一系列环境问题<sup>[12-13]</sup>。蔬菜地是太湖流域重要的土地利用方式之一,普遍存在连年种植和肥料施用量大等问题<sup>[14-15]</sup>。因此,蔬菜地排放氮、磷的规律及对水体富营养化的贡献是亟待明确的问题。

郭智等<sup>[16]</sup>的研究表明,在农户习惯性施肥模式下,蔬菜季径流总磷平均浓度(0.55 mg·L<sup>-1</sup>)显著高于水稻季(0.29 mg·L<sup>-1</sup>),但磷素径流流失量(0.49 kg·hm<sup>-2</sup>)却显著低于水稻季(2.13 kg·hm<sup>-2</sup>)。刘琛等<sup>[17]</sup>通过田间径流池小区试验方法,对地表径流氮、磷流失特征进行田间实地监测,结果表明全年蔬菜地的氮、磷流失量分别达18.11~27.93、3.57~4.05 kg·hm<sup>-2</sup>,且氮素流失以硝态氮为主,磷素流失以颗粒态磷为主。王子臣等<sup>[18]</sup>的试验表明,蔬菜地夏、秋季氮、磷流失总量最高,且氮素流失总量占当季施氮量的16.99%,磷素流失总量占当季施磷量的1.31%。前人的研究大多聚焦蔬菜地氮、磷流失总量及流失形态分布,截至目前,鲜有关于在当地水肥管理下蔬菜地氮、磷流失方式及时间分布的研究。因此,本研究选取地处太湖流域核心区的常州市蔬菜主产区建立监测点,研究蔬菜生产中氮、磷的排放量及其规律,以期对太湖流域蔬菜地氮、磷排放控制对策的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 监测点概况

监测点设在常州市武进区前黄镇苋菜地(31°33'N, 119°57'E),位于常州市武进区南部,属亚热带季风气候,年均气温17.5℃,年均降水量1149.7 mm。监测小区土壤属黄棕壤,其基本理化性状为:pH 6.3,有机质含量35.34 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量1.86 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量1.45 g·kg<sup>-1</sup>,无机氮含量168.57 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷含量23.54 mg·kg<sup>-1</sup>。

选择的蔬菜地块远离居民区及其他污染源,共建立4个监测小区,小区面积为40 m<sup>2</sup>。每个监测小区周围建设水泥墙体结构以防止与周边地块发生串水现象,水泥墙体的高度为80 cm,埋设土面以下的部分为30 cm,土面以上的高度为50 cm。每个监测小区分别对应一个径流池,池长为5 m,宽和高均为1 m。径流池侧面的池壁和池底做防渗处理,结构为水泥建造,池壁上设置刻度线标记,以计量径流池内的积水量。径流池表面设置保护设施,防止雨水、杂物、灰尘等落在径流池内,也可防止人和动物等意外落入径流池。监测小区示意图如图1所示。

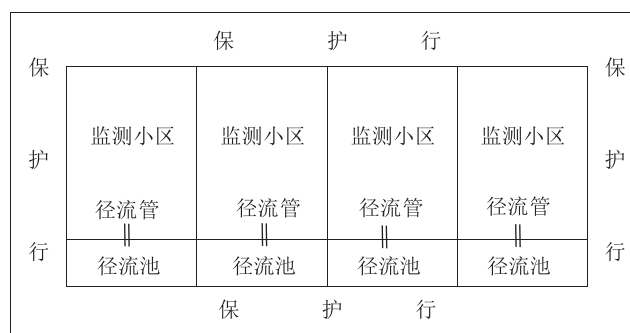


图1 监测小区示意图

Figure 1 The sketch map of monitoring plots

蔬菜地监测时间为2021年6月1日—10月31日,蔬菜品种为苋菜,施肥推荐量:纯氮240 kg·hm<sup>-2</sup>、五氧化二磷54 kg·hm<sup>-2</sup>。监测小区于6月1日整地并施入基肥,6月15日播种,田间管理及采收按当地苋菜生产常规操作,10月30日最后一次采收。肥料分3次施入:每小区1.5 kg 45%氮磷钾复合肥于6月1日作为基肥施入,每小区1.0 kg 尿素于7月20日作为追肥施入,每小区2.0 kg 碳酸氢铵于8月25日作为追肥施入。蔬菜地监测小区施肥管理依据当地生产常规技术方案,具体见表1,施肥量、肥料种类选择以及施用时间完全按照当地菜农的习惯。

### 1.2 取样及测定

每次降雨产生径流后,测量监测小区径流量,并采集径流水样,在48 h内测定其总氮、总磷浓度。测定径流水体积并取样后,用抽水机抽干径流池内剩余水量,将池内泥土取出,待泥土晾干后对总氮、总磷含量进行测定。同时,对进入蔬菜地监测小区的雨水、灌溉水量进行计量,采集雨水、灌溉水样品,测定其总氮、总磷的浓度。径流水样品中总氮浓度的测定采用国标水质凯氏氮测定方法,总磷浓度的测定采用

表1 蔬菜地监测小区施肥投入的氮、磷量

Table 1 The amounts of nitrogen and phosphorus input via fertilization in the monitoring plots

施肥品种 Kind of fertilizers	施肥量 Fertilizing amount/kg	折合纯氮量 Convert into pure nitrogen/g	折合全磷量 Convert into total phosphorus/g
碳酸氢铵	2.0	340	
45% 氮磷钾复合肥	1.5	225	225
尿素	1.0	460	
合计		1 025	225

注:总施肥量相当于每公顷施氮 256.25 kg、施磷 56.25 kg。

Note: The amounts of fertilization are equivalent to 256.25 kg·hm<sup>-2</sup> of nitrogen and 56.25 kg·hm<sup>-2</sup> of phosphorus.

国标钼酸铵分光光度法。土壤中总氮含量的测定参照《土壤全氮测定法(半微量开氏法)》(NY/T 53—1987),总磷含量的测定参照《土壤全磷测定法》(NY/T 88—1988)。

### 1.3 数据处理

监测小区通过雨水及灌溉输入的氮、磷量采用公式(1)确定。

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n \frac{C_{1i} \times V_{1i}}{4} \quad (1)$$

式中:Q<sub>1</sub>为通过雨水及灌溉水输入的氮、磷量,kg·hm<sup>-2</sup>;C<sub>1i</sub>为第i次雨水及灌溉水中氮、磷浓度,mg·L<sup>-1</sup>;V<sub>1i</sub>为第i次雨水及灌溉水的体积,m<sup>3</sup>;n为1个完整的监测期内降雨及灌溉水的事件总数。

监测小区通过地表径流流失的氮、磷量采用公式(2)确定。

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n \frac{C_{2i} \times V_{2i}}{4} \quad (2)$$

式中:Q<sub>2</sub>为通过地表径流流失的氮、磷量,kg·hm<sup>-2</sup>;C<sub>2i</sub>为第i次地表径流中氮、磷浓度,mg·L<sup>-1</sup>;V<sub>2i</sub>为第i次地表径流水的体积,m<sup>3</sup>;n为1个完整的监测期内地表径流的事件总数。

监测小区氮、磷表观净排放量采用公式(3)确定。

$$Q_3 = Q_2 - Q_1 \quad (3)$$

式中:Q<sub>3</sub>为监测小区氮、磷表观净排放量,kg·hm<sup>-2</sup>;Q<sub>2</sub>为通过地表径流流失的氮、磷量,kg·hm<sup>-2</sup>;Q<sub>1</sub>为通过雨水及灌溉输入的氮、磷量,kg·hm<sup>-2</sup>。

氮、磷流失比例=氮、磷表观净排放量÷施肥投入的氮、磷量×100%

## 2 结果与分析

### 2.1 监测小区通过雨水及灌溉输入的氮、磷量

蔬菜地监测小区通过雨水输入的氮、磷量见表

2。试验期间,各监测小区接收的降雨量为33.13 m<sup>3</sup>,其中7月降雨量最高,8月略高于6月,9月降雨量最小。不同月份降雨中的氮浓度为1.50~1.91 mg·L<sup>-1</sup>,磷浓度为0.09~0.15 mg·L<sup>-1</sup>,两者均为9月最高,6月次之,7月与8月之间差异较小。小区通过雨水输入的氮为52.48 g,折合输入量为13.12 kg·hm<sup>-2</sup>。其中7月最高,占36.15%;6月与8月相当,分别占28.83%、30.11%;9月最低。小区通过雨水输入的磷为3.55 g,折合输入量为0.89 kg·hm<sup>-2</sup>。其中7月最高,占34.08%;6月与7月相当,占33.52%;8月次之,占26.76%;9月最低。

监测小区通过灌溉输入的氮、磷量见表3。试验期间,监测小区通过灌溉输入的氮为34.58 g,折合输入量为8.65 kg·hm<sup>-2</sup>;输入的磷为1.14 g,折合输入量为0.29 kg·hm<sup>-2</sup>。不同月份通过灌溉输入氮的比例,以7月最高,占34.67%;8月与7月相比差距较小,占30.80%;6月次之,占23.13%;9月占比最低。不同月份通过灌溉输入磷的比例,以8月最高,占36.84%;6月和7月次之,分别占21.05%、27.19%;9月占比最低。

通过表2和表3计算可得,试验期间,监测小区通过降雨和灌溉输入的氮为87.06 g,折合输入量为

表2 蔬菜地监测小区通过雨水输入的氮、磷量

Table 2 The amounts of nitrogen and phosphorus input via rainfall in the monitoring plots

月份 Month	降雨量 Rainfall/ m <sup>3</sup>	氮浓度 Nitrogen concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	磷浓度 Phosphorus concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氮输入量 Nitrogen input/g	磷输入量 Phosphorus input/g
6月	9.17	1.65	0.13	15.13	1.19
7月	12.08	1.57	0.10	18.97	1.21
8月	10.53	1.50	0.09	15.80	0.95
9月	1.35	1.91	0.15	2.58	0.20
合计	33.13			52.48	3.55

表3 蔬菜地监测小区通过灌溉输入的氮、磷量

Table 3 The amounts of nitrogen and phosphorus input via irrigation in the monitoring plots

月份 Month	灌溉量 The amounts of irrigation/ m <sup>3</sup>	氮浓度 Nitrogen concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	磷浓度 Phosphorus concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氮输入量 Nitrogen input/g	磷输入量 Phosphorus input/g
6月	0.95	8.42	0.25	8.00	0.24
7月	1.20	9.99	0.26	11.99	0.31
8月	1.35	7.89	0.31	10.65	0.42
9月	0.60	6.56	0.29	3.94	0.17
合计	4.10			34.58	1.14

21.77 kg·hm<sup>-2</sup>;输入的磷为4.69 g,折合输入量为1.17 kg·hm<sup>-2</sup>。不同月份输入氮的比例,以7月为最高,占35.56%;6月、8月次之,分别占26.57%和30.38%;9月占比较小。不同月份输入磷的比例,也以7月最高,占32.41%;6月与8月相当,分别占30.49%、29.21%;9月占比较小。

## 2.2 监测小区通过地表径流流失的氮、磷量

监测小区通过径流水流失的氮、磷量见表4。试验期间,监测小区通过径流水流失的氮为105.96 g,折合流失量为26.49 kg·hm<sup>-2</sup>;流失的磷为7.76 g,折合流失量为1.94 kg·hm<sup>-2</sup>。7月通过径流水流失的氮、磷量均为最高,分别占36.80%、37.76%;6月次之,分别占35.65%、34.28%;8月占比最低,分别为27.56%、27.96%。

表4 蔬菜地监测小区随径流水流失的氮、磷量

Table 4 The amounts of nitrogen and phosphorus output via runoff water in the monitoring plots

月份 Month	径流量 The amounts of runoff water/m <sup>3</sup>	氮浓度 Nitrogen concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	磷浓度 Phosphorus concentration/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氮流失量 Nitrogen output/g	磷流失量 Phosphorus output/g
6月	2.08	18.16	1.28	37.77	2.66
7月	2.42	16.11	1.21	38.99	2.93
8月	1.94	15.05	1.12	29.20	2.17
合计	6.44			105.96	7.76

监测小区通过径流水泥沙流失的氮、磷量见表5。试验期间,监测小区通过径流水泥沙流失的氮量比通过径流水流失的氮量要少得多,仅为9.68 g,折合流失量仅为2.42 kg·hm<sup>-2</sup>;通过径流水泥沙流失的磷为4.63 g,折合流失量为1.16 kg·hm<sup>-2</sup>,少于通过径流水流失的磷。监测小区通过径流水泥沙流失的氮以7月最多,6月次之,8月最少;流失的磷以6月最多,7月次之,8月最少,但不同月份间差异较小。

表5 蔬菜地监测小区随径流水泥沙流失的氮、磷量

Table 5 The amounts of nitrogen and phosphorus output via runoff sediment in the monitoring plots

月份 Month	泥沙量 The amounts of runoff sediment/m <sup>3</sup>	氮含量 Nitrogen content/%	磷含量 Phosphorus content/%	氮流失量 Nitrogen output/g	磷流失量 Phosphorus output/g
6月	1 390.5	0.24	0.13	3.34	1.81
7月	1 717.8	0.22	0.10	3.78	1.72
8月	1 217.8	0.21	0.09	2.56	1.10
合计	4 326.1			9.68	4.63

## 2.3 监测小区氮、磷表观净排放量及氮、磷流失的方式和时间分布

蔬菜地监测小区氮、磷输入、流失量统计及表观净排放量见表6。监测小区通过雨水和灌溉输入的氮、磷分别为87.06、4.69 g,折合输入量分别为21.77、1.18 kg·hm<sup>-2</sup>;通过径流水和径流水泥沙流失的氮、磷分别为115.64、12.39 g,折合流失量分别为28.91、3.10 kg·hm<sup>-2</sup>。表观净排放量可视为肥料及土壤养分的流失量。根据公式(3)计算可得,监测小区的氮、磷表观净排放量分别为28.58、7.70 g,折合排放量分别为7.15、1.93 kg·hm<sup>-2</sup>。

蔬菜地监测小区氮、磷流失方式的分布见表7。可以看出,以径流水方式流失的氮、磷占绝对优势。通过径流水方式流失的氮占总流失量的91.63%,通过径流水泥沙方式流失的氮占比只有8.37%。在磷的流失量中,通过径流水方式流失的占比达到62.63%,通过径流水泥沙方式流失的占比为37.37%。

蔬菜地监测小区氮、磷流失的时间分布见表8。试验期间,监测小区的氮、磷流失分布在6、7、8三个月,其中主要流失月份是6月和7月,这两个月流失的氮、磷量分别占总流失量的72.54%、73.61%,且6月与7月的流失量相当;其次是8月,氮、磷流失量占比分别为27.46%、26.39%。

## 3 讨论

面源污染指在不确定的时间和空间内,污染物通

表6 蔬菜地监测小区氮、磷输入、流失量统计及表观净排放量(g)

Table 6 The inputs, outputs and net losses of nitrogen and phosphorus in the monitoring plots(g)

元素 Element	输入量 Input			流失量 Loss			表观净 排放量 Net loss
	雨水 Via rainfall	灌溉 Via irrigation	合计 Total	径流水 Via runoff water	径流水泥沙 Via runoff sediment	合计 Total	
氮	52.48	34.58	87.06	105.96	9.68	115.64	28.58
磷	3.55	1.14	4.69	7.76	4.63	12.39	7.70

表7 蔬菜地监测小区氮、磷流失方式分布

Table 7 The ways of nitrogen and phosphorus output from the monitoring plots

元素 Element	径流水 Runoff water		径流水泥沙 Runoff sediment	
	流失量 Output/g	占比 Proportion/%	流失量 Output/g	占比 Proportion/%
氮	105.96	91.63	9.68	8.37
磷	7.76	62.63	4.63	37.37

表8 蔬菜地监测小区氮、磷流失时间分布

Table 8 The times of nitrogen and phosphorus output from the monitoring plots

元素 Element	6月 June		7月 July		8月 August	
	流失量 Output/g	占比 Proportion /%	流失量 Output/g	占比 Proportion /%	流失量 Output/g	占比 Proportion /%
氮	41.11	35.55	42.77	36.99	31.76	27.46
磷	4.47	36.08	4.65	37.53	3.27	26.39

过降雨或径流以广泛的、分散的形式进入地表水或地下水,从而对环境造成复杂且潜伏周期长的污染。随着国内外点源污染治理水平逐步提升,面源污染已成为水体污染的最主要来源,特别是农业面源污染<sup>[19]</sup>。农田中通过地表径流流失的氮、磷是引起农业面源污染和造成水体富营养化的主要原因之一<sup>[20-21]</sup>。因此,研究农田氮、磷随地表径流的流失规律,不仅能为农业生产制定科学的施肥模式及田间管理措施提供依据,而且对削减农业面源污染物的排放和保护水环境有重要意义。

本研究对蔬菜地氮、磷输入的监测结果表明,在试验期间(6—9月),蔬菜地通过降雨和灌溉输入的氮为 $21.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,输入的磷为 $1.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在氮、磷的输入方式方面,降雨输入的氮、磷量明显大于灌溉输入的氮、磷量。在不同月份方面,均以7月输入的氮、磷比例最高,6月和8月次之,9月占比较小。不同月份氮、磷输入量的差异与降雨量及灌溉量的差异有关,7月份的蔬菜地降雨量占试验期总降水量的36.46%,灌溉量占试验期总灌溉量的29.27%,因此氮、磷输入量最高;6月和8月氮、磷输入量较高也与降雨量和灌溉量较高有关,6月的降雨量占试验期总降雨量的27.68%,灌溉量占试验期总灌溉量的23.17%,8月的降雨量占试验期总降雨量的31.78%,灌溉量占试验期总灌溉量的32.93%。

监测结果显示,蔬菜地通过径流水和径流水泥沙流失的氮达到 $28.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,流失的磷为 $3.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。李国栋等<sup>[22]</sup>的研究显示,蔬菜地的氮径流流失量显著大于磷,且平均氮径流流失量是磷的4~5倍,与本研究结果基本一致。除去通过降雨和灌溉输入的氮、磷后,试验期间蔬菜地氮、磷表观净排放量分别为 $7.15$ 、 $1.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,可视为肥料及土壤养分的流失量,主要为肥料的流失量。本研究蔬菜地监测小区施氮量为 $256.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,施磷量为 $56.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,蔬菜地氮、磷通过地表径流的表观净排放量分别

占蔬菜地施氮量的2.79%、施磷量的3.43%。王子臣等<sup>[18]</sup>的研究表明,在当地农民种菜施肥水平下,蔬菜地通过地表径流流失的氮占当季施氮量的比例为2.23%~16.99%,流失的磷占当季施磷量的比例为0.06%~1.31%。其研究结果中氮的流失率与本研究相当,但磷的流失率明显低于本研究的结果。根据前人的研究结果,不同种植类型的蔬菜地差异较大,其原因主要是蔬菜种植时间、降雨量以及施肥量不同<sup>[22-25]</sup>。

徐捷<sup>[26]</sup>认为,径流是导致菜地氮、磷流失的重要因素之一,而降雨是农田径流产生的主要驱动力。关于蔬菜地的氮、磷流失方式,本研究表明,以径流水方式流失的氮、磷占绝对优势,分别占总流失量的91.63%、62.63%,通过径流水泥沙方式流失的氮、磷占比分别为8.37%、37.37%。其原因为:①农田地表径流中氮的流失形态主要为溶解态<sup>[27]</sup>,王子臣等<sup>[18]</sup>认为硝态氮和有机氮是径流流失可溶性氮的主要形态,因此,通过径流水方式流失的氮量远大于通过径流水泥沙方式流失的氮量;②土壤对磷有较强的固定能力,地表径流中有部分颗粒态磷以吸附于泥沙表面的方式流失,因此通过径流水泥沙方式流失的磷的比例相较于该方式流失氮的比例要高。因此,在蔬菜生产中,尽可能减少农田径流和泥沙产生量是削减氮、磷流失的最佳方法。

在蔬菜地氮、磷流失的时间分布方面,本研究表明,试验期间氮、磷流失的主要月份是6月和7月,这两个月流失的氮、磷量分别占总流失量的72.54%、73.61%,且6月与7月的流失量相当;其次是8月,该月流失的氮、磷占比分别为27.46%、26.39%。7月流失的氮、磷量高是由于其降雨量占试验期间总降雨量的36.46%,高于其他月份,因此径流量及径流水泥沙排放量均为最高。6月虽然其降雨量、灌溉量都比7月少,而氮、磷流失量却与7月相当,主要是由于其地表径流中的氮、磷浓度高于其他月份。这一现象产生的原因可能是蔬菜地经过多年的种植及大量施肥,出现了明显的氮素、磷素累积,且累积量随着种植年限的增长而增加,当降雨强度较大或灌溉量大时,土壤中累积的氮、磷极易随着地表径流流失<sup>[26]</sup>。此外,由于监测小区磷肥作为基肥一次性施入,同时施入了较多的氮肥,而6月蔬菜植株小,对氮、磷的吸收量也小,当降雨产生径流时,大量氮、磷营养物质未被作物吸收,就随着地表径流流失。因此,要减少蔬菜地氮、磷随地表径流的流失量,一方面要尽量减少径流水

量,而径流量与降雨量和灌溉量有关,所以尽量避免在降雨前灌溉,也可在菜地表面覆盖地膜,减少农田径流和泥沙产生量;另一方面,要尽量降低径流水的氮、磷浓度,可以通过优化施肥模式、避免下雨前施肥、施用缓释肥或包膜肥等新型肥料来实现。相关研究表明,相比常规施肥模式,菜地减氮20%可减少总氮流失24%<sup>[28]</sup>;施用不同比例有机肥可减少总氮流失量7%~53%<sup>[29]</sup>。因此,优化施肥模式对减少蔬菜地面源污染尤为重要。

## 4 结论

(1)在试验期间,蔬菜地监测小区通过降雨和灌溉输入的氮为 $21.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,输入的磷为 $1.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。通过径流水和径流水泥沙流失的氮达到 $28.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,流失的磷为 $3.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(2)试验期间,通过地表径流流失的氮、磷量除去通过降雨和灌溉输入的氮、磷量后,得到蔬菜地氮、磷表观净排放量分别为 $7.15$ 、 $1.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,分别占蔬菜地施氮量的2.79%、施磷量的3.43%。

(3)蔬菜地通过径流水方式流失的氮、磷占绝对优势,分别占总流失量的91.63%、62.63%。在氮、磷的流失时间分布方面,主要流失月份为6月和7月,这两个月流失的氮、磷量分别占总流失量的72.54%、73.61%,且6月与7月的流失量相当。

## 参考文献:

[1] 王慧亮,孙志琢,李叙勇,等.非点源污染负荷模型的比较与选择[J].环境科学与技术,2013,36(5):176-182. WANG H L, SUN Z Z, LI X Y, et al. Comparison and selection among nonpoint pollution models[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(5): 176-182.

[2] 谢润婷.非点源污染河流的水环境容量动态分析与定量研究[D].杭州:浙江大学,2017:35-41. XIE R T. Dynamic analysis and quantification of water environment capacity for the non-point source pollution dominated river[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 35-41.

[3] 李娜,韩维峥,沈梦楠,等.基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J].农业工程学报,2016,32(8):224-230. LI N, HAN W Z, SHEN M N, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 224-230.

[4] GUO L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. *Science*, 2007, 317(5842):1166.

[5] 水利部太湖流域管理局,江苏省水利厅,浙江省水利厅,等.太湖健康状况报告(2016)[R].上海:水利部太湖流域管理局,2017. Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Department of Wa-

ter Resources of Jiangsu Province, Department of Water Resources of Zhejiang Province, et al. The health status report of Taihu Lake (2016)[R]. Shanghai: Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, 2017.

[6] 贾更华,颜志俊,王元元,等.太湖流域农业节水减污实地试验研究[J].人民长江,2013,44(3):81-84. JIA G H, YAN Z J, WANG Y Y, et al. Field test and research on agricultural water-saving irrigation and pollution reduction in Taihu Lake basin[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(3):81-84.

[7] 彭春瑞.农业面源污染防治理论与技术[M].北京:中国农业出版社,2013:71-75. PENG C R. Theory and technology of prevention and control of agricultural non-point source pollution[M]. Beijing: Agriculture Press, 2013:71-75.

[8] 陈秋会,席运官,王磊,等.太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1550-1558. CHEN Q H, XI Y G, WANG L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1550-1558.

[9] ZHAO X, XIE Y X, XIONG Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu Lake region, China[J]. *Plant & Soil*, 2009, 319(1/2):225-234.

[10] VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934): 1519-1520.

[11] 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.

[12] CHEN J, LU J. Establishment of reference conditions for nutrients in an intensive agricultural watershed, eastern China[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, 21(4):2496-2505.

[13] 陈乾.菜地环保施肥及其径流氮磷减排技术研究[D].杭州:浙江大学,2018:10-12. CHEN Q. Environmental friendly fertilization and runoff N/P emission reduction technology in vegetable fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018:10-12.

[14] 谢建昌,陈际型.菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥[M].南京:河海大学出版社,1997:71-75. XIE J C, CHEN J X. Soil fertility of vegetable garden and rational fertilization of vegetables[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1997:71-75.

[15] 赵其国.发展与创新现代土壤科学[J].土壤学报,2003,40(3):321-327. ZHAO Q G. Developing and innovating modern soil science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3):321-327.

[16] 郭智,刘红江,张岳芳,等.不同施肥模式对菜-稻轮作农田土壤磷素径流损失与表观平衡的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):102-109. GUO Z, LIU H J, ZHANG Y F, et al. Effects of different fertilization modes on phosphorus (P) loss by surface runoff and apparent P balance in the vegetable-rice rotation fields of Taihu Lake region, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4):102-109.

[17] 刘琛,张莉,林义成,等.不同施肥模式下苕溪流域水稻田和蔬菜

- 地氮磷流失规律[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(2):297-306. LIU C, ZHANG L, LIN Y C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by runoff from paddy and vegetable fields under different fertilization modes in Tiaoxi catchment[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(2):297-306.
- [18] 王子臣, 邱丹, 堵燕钰, 等. 太湖流域典型菜地地表径流及氮磷流失特征[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6):1501-1504. WANG Z C, QIU D, DU Y Y, et al. Characteristics of surface runoff and nitrogen and phosphorus losses in typical vegetable field of Taihu Lake basin [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(6):1501-1504.
- [19] 冉江华, 黄洁. 农业面源污染研究现状及发展趋势[J]. 山西农业科学, 2009, 37(3):7-10. RAN J H, HUANG J. Research situation and prospect of the agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2009, 37(3):7-10.
- [20] 刘方谊, 夏颖, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地地表径流氮磷流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6):550-558. LIU F Y, XIA Y, HUANG M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from farmlands through surface runoff under different cropping patterns in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(6):550-558.
- [21] ONGLEY E D, XIAOLAN Z, TAO Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1159-1168.
- [22] 李国栋, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型菜地土壤氮磷向水体径流输出与生态草带拦截控制[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8):905-910. LI G D, HU Z Y, YANG L Z, et al. Soil nitrogen and phosphorus losses with surface runoff from typical vegetable field of Taihu Lake region and their control with grass buffer strip[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8):905-910.
- [23] 黄宗楚, 郑祥民, 姚春霞. 上海旱地农田氮磷随地表径流流失研究[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(1):6-10. HUANG Z C, ZHENG X M, YAO C X. The study of nonirrigated farmland nitrogen and phosphorus loss with surface runoff in Shanghai[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19(1):6-10.
- [24] 王春梅, 蒋治国, 赵言文. 太湖流域典型蔬菜地地表径流氮磷流失[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):36-40. WANG C M, JIANG Z G, ZHAO Y W. Nitrogen and phosphorus runoff in the typical vegetable fields in Tai Lake basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):36-40.
- [25] 李盟军, 姚建武, 王荣辉, 等. 不同养分管理措施下常年菜地蔬菜生长及氮素径流特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1190-1199. LI M J, YAO J W, WANG R H, et al. Effects of different nutrition management on vegetable growth and runoff characteristics of soil nitrogen in perennial vegetable field[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(5):1190-1199.
- [26] 徐捷. 不同施肥模式下甘蓝氮磷利用及流失特征和规律的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013:35-46. XU J. Study on N/P use efficiency by cabbages and their losses from vegetable fields under different fertilization modes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013:35-46.
- [27] 谌婕妤, 王文荟, 杨思雨, 等. 梁子湖区农田地地表径流氮磷流失空间分布特征[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2020, 42(5):524-530, 538. SHEN J Y, WANG W H, YANG S Y, et al. Spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus loss from farmland surface runoff in Liangzi Lake area[J]. *Journal of Hubei University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(5):524-530, 538.
- [28] 谢真越, 卓慕宁, 李定强, 等. 不同施肥水平下菜地径流氮磷流失特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1423-1427. XIE Z Y, ZHUO M N, LI D Q, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by runoff from vegetable fields under different fertilization levels [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, 22(8):1423-1427.
- [29] 宁建凤, 徐培智, 杨少海, 等. 有机无机肥配施对菜地土壤氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3):17-21. NING J F, XU P Z, YANG S H, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on soil nitrogen runoff in vegetable field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3):17-21.

(责任编辑:宋潇)