水肥一体化结合植物篱对减缓果园土壤氮磷地表径流流失的效果

宋 科[1,2]，秦 秦[1]，郑宪清[1,2]，孙丽娟[1]，孙雅菲[1]，吕卫光[1,2]，薛 永[1]
(1.上海市农业科学院生态环境保护研究所，上海 201403；2.农业部上海农业环境与耕地保育科学观测实验站，上海 201403)

摘要：为了探究降低集约化果园氮、磷流失，减缓农业面源污染的技术措施。通过田间定位试验，比较分析了水肥一体化施肥方式结合田间植物篱对减少果园氮、磷地表径流流失影响，提升沟渠水质量的技术效果。结果表明：果园中构建植物篱提高了发生地表径流的最低日降雨量，减少了径流发生频次，地表径流水发生量比没有植物篱降低 19.18%。与常规施肥相比，水肥一体化施肥全氮(TN)、全磷(TP)浓度分别降低 31.23%和 25.18%；植物篱处理 TN、TP 浓度分别降低 16.74%和 13.60%；水肥一体化＋植物篱处理径流水中 TN、TP 浓度最低，分别比对照降低 52.32%和 43.89%。水肥一体化＋植物篱处理 TN、TP 流失总量分别比对照降低 45.38%和 36.81%，该处理相对应的沟渠水中 TN、TP 浓度分别比对照降低 23.98%和 26.64%。在果园等集约化农田中推行水肥一体化灌溉施肥结合植物篱措施能够有效降低氮、磷径流流失，减缓农业面源污染物的排放，在实际应用中具有很大的推广应用价值。

关键词：果园；水肥一体化；植物篱；地表径流；TN；TP
中图分类号：S365 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)03-0083-07
DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.012

Effect of Drip Fertigation Combined with Plant Hedgerows on Reducing Nitrogen and Phosphorus Loss by Soil Surface Runoff in Orchard

SONG Ke[1,2], QIN Qin[1], ZHENG Xianqing[1,2], SUN Lijuan[1],
SUN Yafei[1], LÜ Weiguang[1,2], XUE Yong[1]
(1.*Eco-environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai* 201403; 2.*Shanghai Scientific Observation and Experimental Station for Agricultural Environment and Land Conservation, Shanghai* 201403)

Abstract: In order to explore the technical measures to reduce nitrogen and phosphorus loss in intensive orchards and slow down agricultural non-point source pollution, this study compared and analyzed the effect of drip fertigation and plant hedgerows on reducing nitrogen and phosphorus loss in surface runoff and improving the water quality in field ditch based on field positioning experiments. The results showed that the plant hedgerows increased the minimum daily rainfall of surface runoff, and reduced the frequency of runoff. The amount of surface runoff was reduced by 19.18% compared with the treatment without plant hedgerows. Compared with CK treatment, the TN and TP concentrations in runoff water of the drip fertigation treatment decreased by 31.23% and 25.18%, respectively. The TN and TP concentrations in the plant hedgerows treatment decreased by 16.74% and 13.60%, respectively, and the TN and TP concentrations in the treatment of drip fertigation + plant hedgerows decreased by 52.32% and 43.89% than the CK treatment, which were the lowest in all treatments. The loss fluxes of TN and TP in the treatment of drip fertigation + plant hedgerows decrease by 45.38% and 36.81%, respectively, compared with the CK treatment. In the treatment of drip fertigation + plant hedgerows, the TN and TP concentrations in the ditch water decreased by 23.98% and 26.64%, respectively, compared with the CK treatment. These results indicated that the implementation

收稿日期：2020-12-23
资助项目：水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205)；上海市“科技创新行动计划”国际科技合作领域项目(20390731200)；上海市农业科学院卓越团队计划项目(SPERT-2017A03)
第一作者：宋科(1980—)，男，博士，副研究员，主要从事土壤生态与植物营养研究。E-mail：songke115@aliyun.com
通信作者：薛永(1979—)，男，博士，研究员，主要从事土壤生态与微生物研究。E-mail：exueyong211@163.com

of drip fertigation combined with plant hedgerows in intensive farmland such as orchards can effectively reduce nitrogen and phosphorus loss in runoff and slow down the discharge of agricultural non-point source pollutants, which has great prospects in practical applications.

Keywords: orchard; drip fertigation; plant hedgerow; surface runoff; TN; TP

水是最重要的自然资源之一,可以为人类生存,可持续的社会经济发展和生态系统保护提供支持。近年来,许多具有挑战性的水问题,例如水质恶化和水短缺,引起了全世界的广泛关注[1]。中国从 20 世纪 70 年代开始,各大湖泊和重要水域水体的氮、磷富营养化问题急剧恶化[2]。到目前为止,在点源污染得到有效控制的情况下,农业面源污染仍是导致湖泊水体质量下降的重要因素[3]。尤其是随着我国农业和农村的快速发展,农业生产水平不断提高,农业化学品投入居高不下,农田氮、磷养分流失仍是水体中氮、磷等污染物质的主要来源[4]。以农业生产比较发达的太湖为例,太湖流域 2017—2019 年化肥、农药施用折纯量近年来虽有下降趋势,但施用总量仍然较大。特别是江苏省,从单位农作物总播种面积所施化肥量来看,2017 年江苏省化肥施用强度是 402.11 kg/hm^2,高于全国平均水平 352.27 kg/hm^2,接近国家为防止化肥污染而制定的安全使用上限(225.1 kg/hm^2)的 2 倍。农田中大量施用的化肥仅有一部分被农作物吸收利用,其中氮素利用率约为 40%～50%,磷素利用率约为 20%～30%,其余的氮、磷很大一部分被农田排水和地表径流携带至天然水体中,造成水体富营养化等水环境问题[5]。因此,需要从提高农田养分利用率,阻止氮、磷流失入手,防控农业面源污染引起的水质恶化。

提高肥料利用率,减少养分在表层土壤中的累积无疑是降低农田氮、磷流失的根本。在农艺措施上,有机肥与无机肥相结合,施用配方肥料、化肥深施和增施缓释肥等措施都能在一定程度上提高肥料利用率[6]。但这些措施没有从本质上改变施肥方式,也难以改变农民传统的施肥习惯。水肥一体化技术是现代种植业生产的一项综合水肥管理措施,具有显著的节水、节肥、省工、优质、高效、环保等优点,是对传统施肥方式的根本性转变[7]。在水肥一体化技术条件下,利用滴灌系统将溶解后的肥料直接输送到作物根系最集中部位,充分保证根系对养分的快速吸收,能够大大提高肥料利用效率,相应地减少肥料施用量[8],尤其对于菜果花等施肥量大的经济作物而言,采用水肥一体化技术不仅能够增加作物产量,而且能够从源头上降低氮、磷投入量与流失量。除了源头减控,过程截留也是降低农田氮、磷流失的重要措施,植物篱是一种传统的水土保持措施,具有分散地表径流、降低流速、增加入渗和拦截泥沙等多种功能,生态效益、经济效益均显著[9]。美国农业部[10]在 20 世纪 50 年代提出了植物篱,经过多年的研究已经证明植物篱可减少 6%的地表径流和 75%的泥沙。日本学者 Mihara 等[11]研究植物篱对水土保持的作用时发现 7.2 m 宽的植物篱缓冲区可以截留 99.6%的地表径流流失量。法国学者 Dorioz 等[12]通过总结植物篱减缓磷流失的研究提出植物篱能够降低水土流失过程中磷素的损失。我国从 20 世纪 90 年代开始研究和应用植物篱,已有研究[13-14]表明,植物篱能够减小径流、降低土壤流失的原因主要有 3 个方面:覆盖阻挡作用、局部径流改变和土壤颗粒性质改变。

鉴于此,以往对于水肥一体化技术应用效果的研究[15-16]多集中于对作物产量和肥料利用率影响,而对于水肥一体化技术减少氮、磷流失的报道很少,尤其对于水肥一体化结合植物篱减少农业面源污染的研究未见报道。为了明确水肥一体化施肥方式和植物篱对降低果园等集约化农田氮、磷地表径流流失的作用,本研究在太湖流域水源地保护区梨树种植基地对比分析了水肥一体化施肥方式和植物篱对拦截地表径流和降低氮、磷径流流失的效果,以期为提升农业面源污染源头减控和过程截留提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省苏州市吴中区太湖西山岛衙角里村(120°13′22″ E,31°07′29″ N)。西山岛是太湖中最大的岛屿,主岛陆地面积 79.8 km^2,是典型的南方丘陵地区,岛上果树、茶树是最主要的作物种植形式。该区地处北亚热带,气候温和湿润,属季风气候,年平均气温为 16.8 ℃,年平均降水量为 1 108.5 mm,年平均日照时间为 2 209 h,无霜期 236 天。试验基地种植梨树,为 2011 年 10 月移植,总面积 5.4 hm^2,整个基地为平地,无坡度,海拔 6.4 m。土壤为沼泽土,耕层土壤(0—20 cm)有机质含量 21.64 g/kg,全氮含量 1.29 g/kg,全磷含量 0.94 g/kg,碱解氮含量 55.24 mg/kg,有效磷含量 34.85 mg/kg,速效钾含量 94.22 mg/kg,pH 为 6.68(水土比 5∶1)。

1.2 试验设计

本研究开始于 2018 年 10 月,试验共设置 4 个处理:常规处理(常规,T1)、水肥一体化处理(水肥,T2)、常规+植物篱处理(常规+植物篱,T3),水肥一

体化+植物篱处理(水肥+植物篱,T4),具体设计见图 1。水肥一体化施肥是借助滴灌管道和插入土壤的滴箭将水肥同时滴入 5－10 cm 土层。植物篱为麦冬植物篱,每个条带宽度 50 cm,均匀种植 4 行麦冬。每个处理设置 3 个小区,每个小区包括 4 条梨树种植田带和 3 条田间沟渠,每个小区面积为1 080 m^2,梨树田带面积为 6 m×36 m=216 m^2,田间沟渠面积为 2 m×36 m=72 m^2,每个小区共种植梨树 30 棵。田间沟渠为倒置梯形,底沿宽 1.6 m,上沿宽 2 m,高 0.6 m,2 个斜边用水泥硬化。每条田间沟渠一端连接主沟渠,另一端封闭。4 条主沟渠,长 30 m,宽 2 m,面积 60 m^2,深度为 0.8 m,分别与各小区的田间沟渠相连,但各主沟渠之间不相通,只可独立排水。

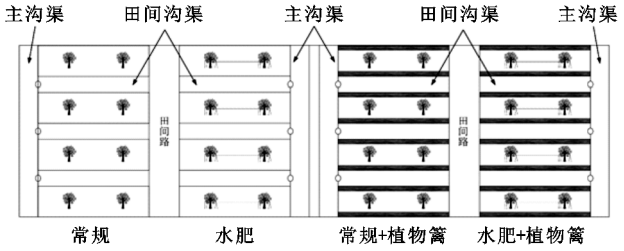


图 1　试验小区示意

1.3　施肥管理

施肥分为基肥和追肥,基肥为商品有机肥(上海练科有机肥料厂,N∶P_2O_5∶K_2O=1.53∶2.94∶1.78),施肥时间为秋季梨树果实收获后(10 月下旬—11 月上旬),施肥量为 500 kg/666.7 m^2,施肥方式为以树干为圆点 30 cm 为半径挖掘环沟,施肥后土壤回填覆盖。追肥分为传统追肥和水肥一体化追肥 2 种方式,传统追肥方式分别于梨树萌芽前期(3 月上中旬),施用尿素(江苏灵谷化工有限公司,N 含量 46.7%)15 kg/666.7 m^2;落花后(4 月下旬—5 月上旬)施用复合肥(江苏灵谷化工有限公司,N∶P∶K=15∶15∶15)25 kg/666.7 m^2;果实膨大期(7 月中下旬)施用复合肥 25 kg/666.7 m^2,采果后(10 月下旬－11 月上旬)施用尿素 10 kg/666.7 m^2。施肥方式同基肥施用方式,然后人工浇水。水肥一体化追肥方式分别于梨树萌芽前期施用水溶性尿素(时科生物科技(上海)有限公司,N 含量 46.7%)15 kg/666.7 m^2;落花后施用水溶复合肥(时科生物科技(上海)有限公司,N∶P∶K=20∶20∶20)18.75 kg/666.7 m^2;果实膨大期施用水溶复合肥 11.25 kg/666.7 m^2,采果后施用水溶性尿素 10 kg/666.7 m^2。水肥一体化追肥方式通过水肥一体化设施在灌水的同时以滴灌的方式施入土壤中 5－10 cm 土层。不同方式的施肥量和纯养分用量见表 1。

表 1　不同处理施肥状况

生育期	灌水量/(m^3·666.7 m^{-2})	常规施肥		水肥一体化施肥		纯养分含量/(kg·666.7 m^{-2})		
		施肥品种	施用量/(kg·666.7 m^{-2})	施肥品种	施用量/(kg·666.7 m^{-2})	N	P_2O_5	K_2O
基肥	20	商品有机肥	500.00	商品有机肥	500.00	7.65	14.70	8.90
萌芽前	15	尿素	15.00	水溶性尿素	15.00	7.01	0	0
落花后	15	复合肥	25.00	水溶复合肥	18.75	3.75	3.75	3.75
果实膨大期	15	复合肥	15.00	水溶复合肥	11.25	2.25	2.25	2.25
采果后	15	尿素	10.00	水溶性尿素	10.00	4.67	0	0
合计	80	/	565.00	/	555.00	25.33	20.70	14.90

1.4　水样采集

本试验从 2018 年 10 月开始设置监测小区,安装径流水采集装置,进行施肥管理和预试验。采集径流水的监测小区面积为 4.8 m×3 m=14.4 m^2,每个监测小区内种植 2 棵梨树。地表径流水从地表径流收集器中采集(图 2)。地表径流收集器为长方体不锈钢采集槽,横断面为边长 20 cm 的正方形,采集槽长度为 200 cm,3 边高度为 20 cm,进水口边高度为 18 cm。采集槽 1 端安装直径 10 cm 的导流管,径流水通过导流管,流入埋设于土壤中的储水桶内,储水桶为容积 120 L 的圆形塑料桶。安装时在每个梨树种植小区的边缘挖掘 20 cm×20 cm×200 cm 的沟槽,将收集器放置于沟槽内,18 cm 高度的边与地面齐平,承接径流水,其余 3 边支撑顶盖,防止降水进入收集器内。储水桶埋入地面以下,储存采集槽收集的径流水。

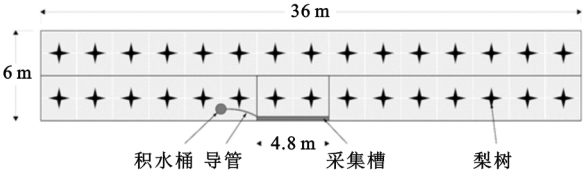


图 2　径流水采集示意

从 2019 年 7 月至 2020 年 6 月对各监测小区的地表径流水和相对应的沟渠水进行采集。地表径流水在每次降雨结束后从储水桶中采集,采集时先测量储水桶中的存水高度,计算储水量,然后用搅拌棒搅匀,用 500 mL 塑料瓶采集径流水并标号。地表径流水采集后将储水桶中的液体用小型抽水泵排出。采集地表径流水时记录每次的降雨量。沟渠水每月

12—17 日之间采集 1 次，也用 500 mL 塑料瓶采集并标号。土壤样品在 2018 年 10 月试验开始前采集基础土样，到 2020 年 6 月再次采集土壤样品，采集的土壤样品包括 0—5，5—20，20—40 cm 3 个土层。每次采集的水样和土壤样品放入车载冰箱内，带回实验室测定，水样用于测定总氮(TN)和总磷(TP)浓度，TN 采用过硫酸钾氧化－紫外分光光度法，TP 采用钼酸铵分光光度法[17]测定。土壤样品用于测定碱解氮和速效磷，碱解氮采用碱解扩散法测定，速效磷采用碳酸氢钠法[17]测定。

1.5 数据计算与分析

在 1 年的监测周期内，TN 与 TP 的排放通量计算公式为：

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

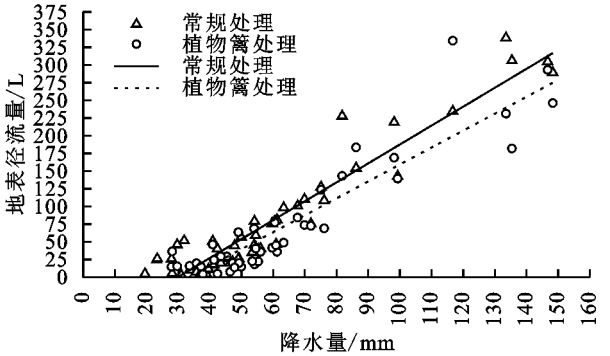
式中：F 为 TN、TP 随径流水的排放通量(kg/hm^2)；n 为监测周期内的地表径流次数；V_i(L)为第 i 次产流的水量；C_i 为第 i 次产流 TN、TP 的浓度(mg/L)；S 为地表径流监测小区的面积(m^2)；f 为 TN、TP 排放量单位转换系数。

数据经 Microsoft Excel 2010 软件整理后，采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析，显著性差异检验采用 SPSS 17.0 软件中的 one-way ANOVA 在 $P<0.05$ 水平进行，不同处理之间多重比较采用 Tukey 方法，图形制作采用 Origin 8.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 常规和植物篱处理对地表径流的影响

由于梨树种植小区 2 侧的沟渠均为水泥硬化，防止了侧渗的发生，所以地表径流是研究区最主要的排水方式，也是氮、磷流失的主要驱动力。根据当地气象站的监测结果，2019 年 7 月至 2020 年 6 月共有 118 天产生降雨，总降雨量为 1 186 mm。通过监测常规处理和植物篱 2 种不同地表覆盖下地表径流水的发生量表明，在没有植物篱的常规处理中共产生地表径流 51 次。发生地表径流排水时，当日降雨量与地表径流排水量呈显著的正相关关系(图 3)，$Y=2.67X-79.68$ ($R^2=0.902$)。根据拟合公式得出，当日降雨量高于 29.84 mm 时，监测小区可能发生地表径流。而实际观测的结果是发生地表径流的最低日降雨量为 19.52 mm。实际观测值低于公式拟合值的主要原因是由于连日降雨导致的土壤含水量增加，甚至达到田间饱和持水量。而在植物篱处理中，监测周期内共产生地表径流 43 次。发生地表径流排水时，当日降雨量与地表径流排水量也呈显著的正相关关系，$Y=2.39X-79.87$ ($R^2=0.839$)。根据拟合公式得出，当日降雨量高于 33.41 mm 时，监测小区可能发生地表径流。而实际观测的结果表明，发生地表径流的最低日降雨量为 27.93 mm。在观测的 1 年周期中，植物篱比常规处理地表径流排水量降低了 19.18%。



注：地表径流量为监测小区内地表径流排水量除以监测小区面积；图上显示的常规处理地表径流量的值为常规处理与水肥一体化处理 2 个处理 6 个重复的平均值；植物篱处理地表径流量的值为常规＋植物篱处理与水肥一体化＋植物篱处理 2 个处理 6 个重复的平均值。

图 3 常规和植物篱处理降雨量与地表径流量相关关系

2.2 不同处理地表径流水中 TN 和 TP 浓度

从 2019 年 7 月至 2020 年 6 月通过实地采样监测了地表径流水中 TN 和 TP 的浓度变化，其中常规处理与水肥一体化处理 2 个处理共采集水样 51 次；常规＋植物篱与水肥一体化＋植物篱 2 个处理采集水样 43 次。通过分析每次采集的径流水中 TN 与 TP 的浓度，与常规处理相比，水肥一体化和植物篱均在一定程度上降低了径流水中 TN 和 TP 的浓度。由图 4 可知，不同处理在不同时期地表径流水中 TN 的浓度变化，常规处理径流水中 TN 浓度的平均值为 8.83 mg/L，水肥一体化处理 TN 浓度的平均值为 6.07 mg/L，比常规处理降低 31.23%；常规＋植物篱 TN 的平均浓度为 7.35 mg/L，比常规处理降低 16.74%；水肥一体化＋植物篱 TN 的平均浓度为 4.21 mg/L，比常规处理降低 52.32%。不同处理在不同时期地表径流水中 TP 的浓度变化，与 TN 的规律相似，常规处理径流水中 TP 的平均浓度最高为 1.24 mg/L，水肥一体化处理 TP 的平均浓度为 0.92 mg/L，比常规处理降低 25.18%；常规＋植物篱 TP 的平均浓度为 1.07 mg/L，比常规处理降低 13.60%；水肥一体化＋植物篱 TP 的平均浓度为0.69 mg/L，比常规处理降低 43.89%。

2.3 不同处理沟渠水中的 TN 和 TP 浓度

由图 5 可知，不同施肥方式和植物篱拦截对沟渠水中TN 与 TP 浓度的影响。在整个监测期间，采集沟渠水 12 次，每次 4 个处理，每处理 3 个重复，共采集沟渠水样 144 个。常规处理，水肥一体化处理，常规＋植物篱和水肥一体化＋植物篱 4 个处理 TN 平均含量分别为 4.54，3.70，4.04，3.45 mg/L，标准误分别为 1.73，1.34，1.43，1.19，显著性差异的检验结

果表明,常规处理 TN 平均浓度显著高于水肥一体化+植物篱,水肥一体化处理和常规+植物篱 TN 的平均浓度虽然低于常规处理,但差异不显著。这些结果表明,水肥一体化施肥方式结合植物篱拦截显著降低了农田受纳沟渠氮素的含量。不同处理沟渠水中 TP 的浓度,4 个处理沟渠水中 TP 的平均含量分别为 0.65,0.53,0.61,0.48 mg/L,标准误分别为 0.14,0.11,0.13,0.10,常规处理和常规+植物篱 TP 平均含量显著高于水肥一体化处理和水肥一体化+植物篱。这一结果表明,水肥一体化施肥方式显著降低了农田收纳沟渠中磷素的含量,而植物篱拦截没有产生显著差异。

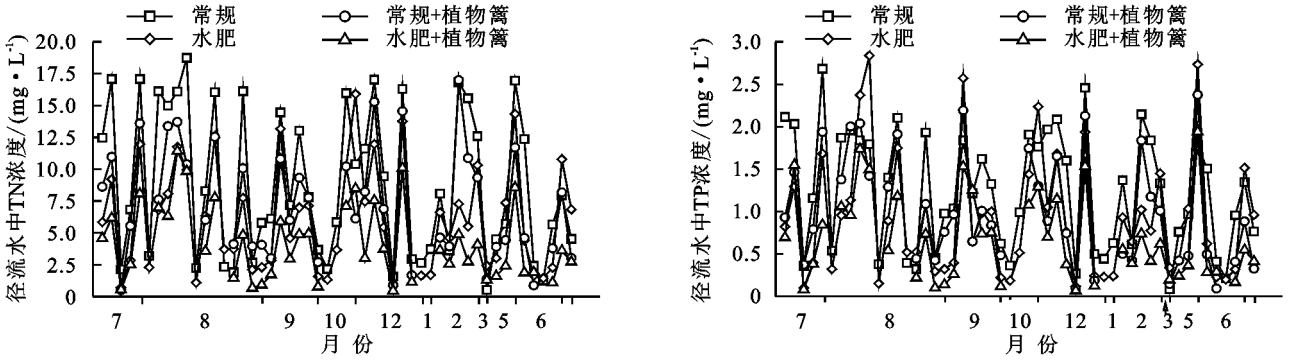
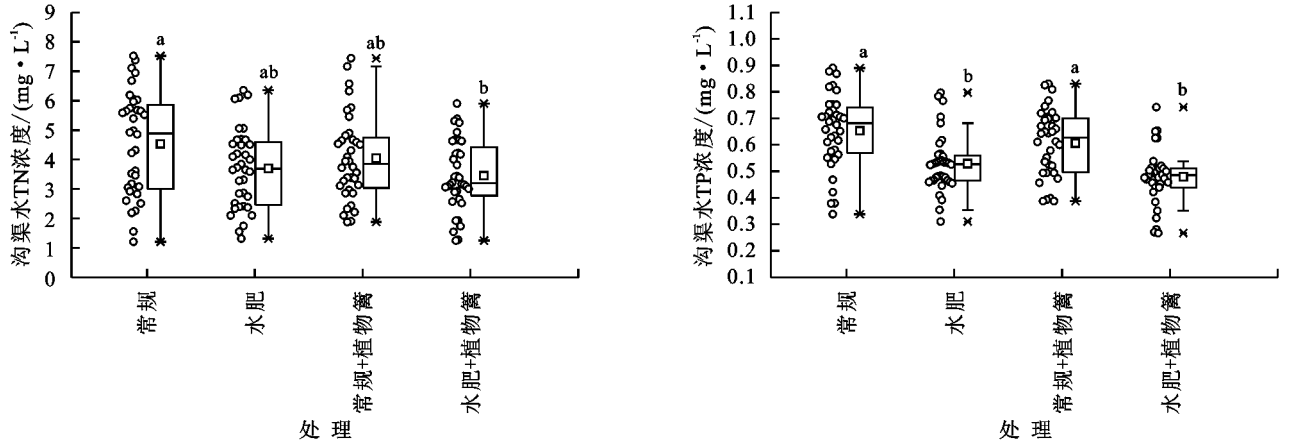


图 4　不同处理地表径流水中 TN、TP 的浓度变化



注:图中每个 TN 与 TP 含量的值为同一处理 3 次重复的平均值;框图中□为平均值;——为中位值;* 为最大(小)值;不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 5　不同处理沟渠水中 TN 与 TP 浓度

2.4　不同处理 TN、TP 流失总量

从 2019 年 7 月至 2020 年 6 月,统计了每次采集径流水的水量(图 3),分析了 TN 和 TP 的浓度,根据农田面源污染排放通量的计算公式,计算获得 TN、TP 排放通量。由图 6 可知,常规处理、水肥一体化处理、常规+植物篱和水肥一体化+植物篱 4 个处理的 TN 流失总量分别为 27.97,18.39,22.21,15.28 kg/(hm^2·a),其中,水肥一体化处理和植物篱处理分别比常规处理降低 34.24%和 20.60%,均与常规处理差异显著,水肥一体化+植物篱处理 TN 流失总量最低,比常规处理降低 45.38%,差异显著。与 TN 相比,TP 的流失总量显著降低,但不同处理流失总量的高低次序与 TN 相同,其中,常规处理和常规+植物篱流失量分别为 3.56,3.11 kg/(hm^2·a),二者均显著高于水肥一体化处理(2.76 kg/(hm^2·a)),水肥一体化+植物篱处理 TP 流失总量最低(2.25 kg/(hm^2·a)),比常规处理降低 36.81%。

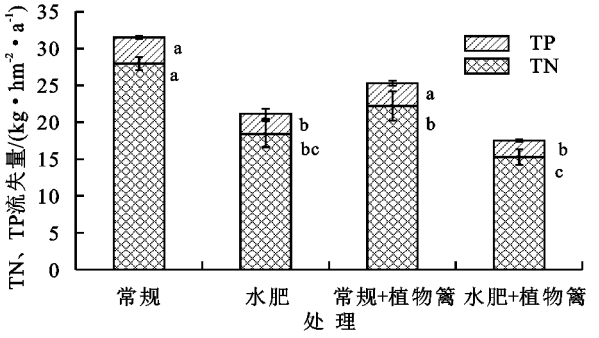


图 6　监测周期内不同处理 TN 与 TP 流失总量

3　讨 论

农田氮、磷流失是水、肥等多因素综合作用的结果,其中降雨和施肥是影响种植业农田氮、磷流失的两大主要因素。因此,减少农田地表水迁移和降低土壤表层氮、磷养分含量是防止农田氮、磷流失的有效措施。本研究针对太湖流域降雨丰沛、果园施肥量

大、氮、磷流失风险高的特点，对比分析了水肥一体化施肥方式和植物篱拦截措施对降低农田氮、磷径流流失的效果。通过 1 年的跟踪监测结果表明，在相同的施肥量和降雨条件下，水肥一体化处理地表径流水中 TN 和 TP 平均浓度比常规处理显著降低。为了探究产生这一结果的原因，评估了不同处理方式对土壤中氮、磷养分的影响，结果表明，水肥一体化施肥方式降低了 0－5 cm 土层碱解氮和速效磷含量，增加了 5－20，20－40 cm 土层碱解氮和速效磷含量。这说明果园中常规施肥在将固体化肥施入土壤表层时，增加了土壤表层的氮、磷累积，在降雨的条件下很容易随地表径流和泥沙的流失横向迁移进入地表水体。而水肥一体化施肥，采用滴箭直接将肥水滴入距地表 5 cm 以下土层中，减少了养分在土壤表层的累积，降低了地表径流流失风险。不仅如此，由于本研究中的栽培作物为梨树，梨树的根系一般分布在地下 20－40 cm 土层，常规施肥方式下化肥难以直接到达这一深度，而采用水肥一体化施肥方式能够促进氮、磷养分随水进入根系密集区，促进作物根系对养分的吸收，增加养分利用率的同时，也降低了氮、磷地表径流流失量。已有的研究[18-20]也表明，水肥一体化技术能够显著提升养分利用率，减少面源污染的发生。Li 等[18]通过分析 1991 年 1 月至 2019 年 12 月发表的 130 篇关于水肥一体化技术应用效果的论文，比较了滴灌施肥与农民习惯施肥对作物产量，水生产率和氮利用效率的影响，结果表明，滴灌施肥可显著提高作物产量 12%，水生产率 26.4%和氮利用效率 34.3%；李若楠等[19]对设施菜地的研究结果表明，滴灌施肥能够显著减少硝态氮的流失；邓兰生等[20]在香蕉种植过程中跟踪监测滴灌施肥的结果也表明，土壤中有效磷含量显著高于畦灌和常规施肥处理，有效磷向下垂直迁移量增加，地表径流流失量显著降低。本研究结果也说明，由于水肥一体化施肥降低了表层土壤中碱解氮和速效磷的含量，减少了土壤表层氮、磷随地表径流的流失量，减缓了农田面源污染的发生。

除了施肥的影响，降雨是地表径流发生的主要驱动力[21]，也是影响氮、磷流失的重要因素。已有研究[22-23]表明，降雨量与地表径流发生量呈显著的正相关关系，而地表植被覆盖能够拦截因降雨产生的地表径流，减少水流的横向迁移。本研究通过对比常规处理和地表覆盖处理下降雨量对地表径流排水量的结果也表明，植物篱能够降低径流水的排水量，产生这一结果的主要原因是麦冬植物篱不仅减少了降雨引起的地表径流发生次数，同时，也提高了发生地表径流的最低日降雨量。除了对水流的拦截作用，植物篱还能够固定土壤颗粒，保持土壤氮、磷养分，本研究对土壤中碱解氮和速效磷的含量分析也表明，植物篱没有降低土壤表层速效氮、磷的含量，径流水中 TN 与 TP 的平均浓度和总流失量均比常规处理降低，这些结果说明在果园中设置植物篱，增加地表覆盖，能够起到拦截氮、磷养分流失的作用。植物篱主要通过切割径流、过滤沉淀和延长径流滞留时间等方式降低径流发生量，而通过固定土壤颗粒，保持土壤养分的形式拦截氮、磷流失。

当前，以太湖为代表的各大湖泊水域均有不同程度的水体富营养化等问题，其中 TN、TP 是最主要的污染物质[24]。而在农田土壤中，氮、磷是作物生长不可或缺的营养物质，要想减少农田土壤中的氮、磷流失，一方面要改进施肥方法，减少化肥施用量，提高氮、磷养分利用率；另一方面要增加地表覆盖，减少养分随地表径流流失进入水体。水肥一体化施肥能够将肥料溶解于水，并通过管道以微灌的方式直接输送到作物根部，不但克服了固体化肥容易在土壤表层积累的弊端，而且避免了大水漫灌等传统灌溉形式引起的氮、磷随水流失，在提高氮、磷养分利用率的同时，避免了降水冲刷引发的大量氮、磷径流流失。除了从源头上减少氮、磷的输出，基于植物篱的过程拦截也是降低氮、磷流失进入地表水体的有效措施，植物篱主要通过减缓径流发生量和水流迁移速度，过滤和沉淀径流与产沙等作用，在兼顾保水保土与农田排水的同时，控制了较大部分水土流失量，降低了农田氮、磷径流流失负荷。水肥一体化施肥与植物篱的结合对降低太湖流域集约化农田氮、磷流失，减缓水体富营养化的发生具有实践意义。

4 结 论

本研究在高度集约化和高施肥量的果园中研究水肥一体化施肥与植物篱拦截对防控农田氮、磷流失，减缓面源污染的效果，结果表明，不论是水肥一体化施肥，还是麦冬植物篱拦截都在不同程度上降低了 TN、TP 的流失量，而将水肥一体化施肥与植物篱拦截 2 项措施耦合的防控效果最好，该措施下 TN 和 TP 的流失总量分别比常规处理降低 45.38%和 36.81%，相对应的沟渠水中 TN 和 TP 含量也最低，分别比常规处理降低 23.98%和 26.64%，这些结果表明，在果园中推行水肥一体化结合植物篱等拦截措施能够有效降低氮、磷径流流失，减缓农业面源污染物的排放，在实际应用中具有很大的推广价值。

参考文献:

[1] Liu M, Huang G H, Liao R F, et al. Fuzzy two-stage non-point source pollution management model for agricultural systems-A case study for the Lake Tai Basin, China [J]. Agricultural Water Management, 2013, 121: 27-41.

[2] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形式估计及控制对策Ⅰ. 21 世纪初期中国农业面源污染的形式估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.

[3] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等.中国农业面源污染形式估计及控制对策Ⅲ. 中国农业面源污染控制中存在问题分析[J].中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.

[4] 洪燕婷,仇蕾.太湖流域农业面源污染防控措施研究分析[J].环境科技,2015,28(3):17-26.

[5] 丘雯文,钟涨宝,李兆亮,等.中国农业面源污染排放格局的时空特征[J].中国农业资源与区划,2019,40(1):26-34.

[6] 王静,郭熙盛,王允青,等.巢湖流域不同耕作和施肥方式下农田养分径流流失特征[J].水土保持学报,2012,26(1):6-11.

[7] 张晶,党建友,张定一,等.节水灌溉方式与磷钾肥减施对小麦产量、品质及水肥利用效率的影响[J].水土保持学报, 2020,34(6):166-171.

[8] 王远,许纪元,潘云枫,等.长江下游地区水肥一体化对设施番茄氮肥利用率及氨挥发的影响[J].土壤学报, 2020,57(6):12-17.

[9] 毕明浩,梁斌,董静,等.果园生草对氮素表层累积及径流损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):102-105.

[10] Mutegi J K, Mugendi D N, Verchot L V, et al. Combining napier grass with leguminous shrubs in contour hedgerows controls soil erosion without competing with crops [J]. Agroforestry Systems, 2008, 74(1): 37-49.

[11] Mihara M. The effect of natural weed buffers on soil and nitrogen losses in Japan [J]. Catena, 2006, 65: 265-271.

[12] Dorioz J M, Wang D, Poulenard J. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics-A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 117(1): 4-21.

[13] 李晓娜,张国芳,武美军,等.不同植被过滤对农田径流泥沙和氮、磷拦截效果与途径[J].水土保持学报,2017,31(3):40-50.

[14] 刘枭宏,李铁,谌芸,等.香根草植物篱带宽对紫色土坡地产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):93-101.

[15] 李传哲.设施菜地养分状况调查及水肥一体化技术应用效果研究[D].南京:南京农业大学,2016.

[16] 邢英英,张富仓,张燕,等.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J].中国农业科学, 2015,48(4):713-726.

[17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].3 版.北京:中国农业科学出版社,2000.

[18] Li H R, Mei X R, Wang J D, et al. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 244: 1-10.

[19] 李若楠,武雪萍,张彦才,等.滴灌氮肥用量对设施菜地硝态氮含量及环境质量的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1642-1651.

[20] 邓兰生,颜自能,龚林,等.滴灌与喷水带灌溉对香蕉生长及水肥利用的影响[J].节水灌溉,2010(8):45-48.

[21] 王月,房云清,纪婧,等.不同降雨强度下旱地农田氮、磷流失规律[J].农业资源与环境学报,2019,36(6):814-821.

[22] Xia L Z, Hoermann G, Ma L, et al. Reducing nitrogen and phosphorus losses from arable slope land with contour hedgerows and perennial alfalfa mulching in Three Gorges Area, China [J]. Catena, 2013, 110: 86-94.

[23] Lu W X, Zhang H J, Cheng J H, et al. Effect of a hedgerow agroforestry system on the soil properties of sloping cultivated lands in the Three-Gorges area in China [J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2012, 10: 1368-1375.

[24] 张继宗.太湖水网地区不同类型农田氮、磷流失特征[D].北京:中国农业科学院,2006.