

农田地表控制排水对排水中磷质量浓度的影响

殷国玺¹, 张展羽¹, 邵光成²

(1. 河海大学现代农业工程系, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学节水园区, 江苏 南京 210098)

摘要:为对比研究农田地表控制和非控制排水条件下, 不同时段暴雨产生地表径流中磷质量浓度和总排水量的变化规律, 进行平均降雨强度为 0.49 mm/min、历时 126 min 的降雨排水试验。试验结果表明: 非控制排水各时段平均磷排出质量浓度为 8.48 mg/L, 控制排水平均磷排出质量浓度为 4.4 mg/L; 控制排水量比非控制排水量减少了 13.5%; 非控制排水磷排出量为 271.6 mg/m², 控制排水磷排出量为 136.5 mg/m²。控制排水总排水量的减少和排水中磷质量浓度的降低, 使得控制排水磷排出量仅为非控制排水的 50.3%。农田地表控制排水显著减少了磷的排出量。

关键词:地表控制排水; 磷质量浓度; 排水量; 面源污染

中图分类号: S276.7⁺9 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2006)04-0024-03

Effects of controlled drainage from field surface on concentration of phosphor discharge//YIN Guo-xi¹, ZHANG Zhan-yu¹, SHAO Guang-cheng²(1. Department of Modern Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Saving Park of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To find out the regularities of the variation of phosphor concentration in surface runoff caused by heavy rains with the total volume of drain discharge under the controlled drainage and non-controlled drainage for different periods, drainage experiments under rainfall lasting 126 minutes with an averaged intensity of 0.49 mm/min were performed. The results show that the averaged concentration of phosphor discharge for each duration under non-controlled drainage is 8.48 mg/L while the averaged concentration of phosphor discharge is 4.4 mg/L under controlled drainage; the volume of drain discharge under controlled drainage is 13.5% less than that under non-controlled drainage; the amount of phosphor discharge under non-controlled drainage is 271.6 mg/m² while it is only 136.5 mg/m² under controlled drainage. Because controlled drainage decreases the total volume of drain discharge and also the phosphor concentration in the drain discharge, the phosphor discharge under controlled drainage is only 50.3% of that under non-controlled drainage. Therefore the controlled drainage evidently decreases the amount of phosphor discharge.

Key words: controlled discharge from field surface; phosphor concentration; volume of drain discharge; non-point pollution

1 问题的提出

传统农田排水主要是满足农作物生长对土壤湿度和通气的需要, 很少考虑排水对环境的影响和雨水资源的有效利用。如果对农田排水没有适度控制, 排水强度将按照排涝、除渍工程设计标准实施, 就可能出现过度排水的现象, 表现在: ①过量排出了对作物生长有用的水分和养分; ②大量的氮、磷等农田养分随排水流失, 污染了周围水体和地下水; ③使土壤有机质氧化过快; ④没有根据氮、磷流失的质量浓度、形态的变化, 选择磷质量浓度较低的时间排水。针对上述问题, 需要探求新的地表控制排水管理模式。

农田排水与降雨径流有密切关系。黄满湘等^[1]通过室内降雨模拟实验表明, 农田暴雨径流氮养分的流失量与累积径流量成正相关, 认为减少地表径流、减少土壤侵蚀量和降低农田表土中速效氮养分含量是减少农田地表径流氮流失的关键。邬伦等^[2]在于桥水库流域进行定点监测得出氮、磷流失“盆地大于丘陵, 丘陵大于山地”的结论, 反映出土壤母质、土壤氮和磷含量、土壤的保水和保肥性能对氮、磷流失起着内在主导作用。马立珊等^[3]研究了覆盖苏南太湖地区的 7 种类型水旱田试验区, 认为农业面源氮素污染负荷量随年降水量和灌溉量的增加而增大, 浅层地下水硝态氮的污染负荷量与氮肥的施用量呈正相关, 稻田氮污染负荷量显著地高于旱田。

Wesström 等^[4]在瑞典南部农田进行了排水控制试验,根据田间排水需要,调整排水强度,从而减少了农田排水中氮、磷养分的排出,与传统的自然排水相比,控制排水的排水量第一年减少了 79%,第二年减少了 94%;控制排水比自然排水硝态氮流失总量第一年减少了 78%,第二年减少了 94%;磷的流失总量第一年减少了 58%,第二年减少了 85%。在美国和加拿大,通过地下水位管理,控制和减少农田排水量,减少了农田养分排出。在美国北卡罗莱纳州的 14 项农田控制排水试验^[4]表明,每年平均减少 45% 的农田氮素排出,磷减少了 35% 的排出,排水量减少了 30%。由于控制排水的环境效益明显,被美国北卡罗莱纳州的农业管理机构称为“农田最佳管理措施”。这项技术已经被推广到美国 80 万 hm^2 湿润地区。欧美国家很多农田控制排水研究得出相似的结果,控制排水对排水水质和排水量有非常明显的影响。

国内研究农田降雨地表径流过程与磷质量浓度变化、存在形态和流失量之间的关系,是在非控制排水条件下的室内实验研究,缺乏田间地表控制排水条件下的相关研究。国外对控制排水的研究,是针对地下排水系统,通过控制农田地下水位,减少农田排水量,从而减少了农田排水中磷养分的排出。地下控制排水尽管能够减少农田地表径流量,但暴雨形成的地表径流中可溶性养分以及吸附和结合在地表水中泥沙颗粒表面的无机态和有机态养分随泥沙的流失,是农田养分流失的主要途径之一。本文根据江苏省句容市传统的农田地表排水方式,在农田降雨径流情况下,对地表非控制和控制排水中磷质量浓度变化过程、排水量和农田磷排出量进行田间对比试验。

2 试验材料与方法

江苏省句容市位于我国北亚热带季风气候区的农业生产环境,土壤为第四纪下蜀黄土发育的马肝土(黄棕壤),长期采用水稻-小麦或水稻-油菜轮作的种植方式。从长期水旱轮作农田中选择长 8 m、宽 6 m 的试验田。旱作种植油菜,水田种植水稻,以油菜作为本次试验的旱季作物。油菜 11 月底栽种,栽种油菜苗时使用基肥 $600 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。油菜株间距 30 cm,地面无杂草生长,田间平均地下水埋深 1.2 m。试验田内有两条平行毛沟,间距为 3 m,深 10 cm,宽 15 cm。在试验田四周和试验田中间用地下埋深 1.5 m、比农田地面高出 15 cm 的塑料隔板与周围农田分隔开,把试验田分隔成两块长 8 m、宽 3 m 的田块。一块试验田的排水沟处于非控制排水状态,另一块的排水沟在其出口处安装小闸门,用于控制降雨径流和田间地表水位及排水量。试验布置如图 1 所示。

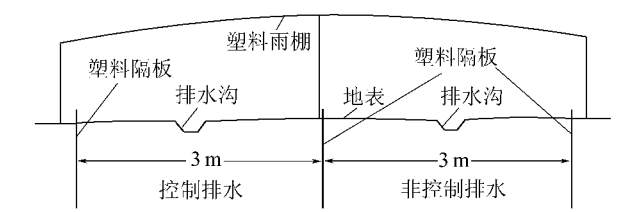


图 1 控制排水和非控制排水试验田剖面示意图

试验的主要目的,是在作物允许的耐淹水深和历时之内,分别观测控制排水和非控制排水条件下,不同时段暴雨产生地表径流中磷质量浓度的变化和排水量的变化,以确定多目标地表控制排水的水位管理模式。为使试验数据尽可能真实,选择天然降雨产生的农田地表径流进行控制和非控制地表排水试验,有关气象资料由当地气象部门提供。由于暴雨形成的径流量大,雨滴击溅侵蚀效应明显,是农田土壤表层可溶性养分以及吸附和结合在地表水中泥沙颗粒表面的无机态和有机态养分随泥沙流失的主要原因,选择暴雨作为典型天然降雨。为了能够反映雨滴击溅效应,使地面覆盖率在 40% 左右。

降雨发生于 2005 年 3 月 10 日,开始降雨时降雨强度较弱,在试验田上方架拱形支护框架,用塑料布遮盖,防止降雨初期雨滴降落在试验田中,当降雨强度达到 $0.49 \text{ mm}/\text{min}$ 时移开塑料雨棚,126 min 后降雨开始减弱并用塑料布遮盖试验田,试验田只取 126 min 作为降雨历时。在非控制地表排水地块,田间排水沟在降雨前和降雨过程中处于自然排水状态,由降雨产生的地表径流随时从排水沟中排出。降雨开始约 6 min 以后产生地表径流,在非控制排水地块,将排水用塑料管输入带有刻度的塑料桶,从产生径流排水后每 10 min 收集流出的农田排水,用于测量各时段排水量和排水沉积物,同时用 1 000 mL 塑料瓶分时段取径流水样,立即密封保存在冰箱中,用于分析各时段径流中的磷质量浓度。同时收集降雨过程中雨水作空白对照。在控制排水地块,降雨初期形成的地表径流由排水沟出口处的小闸门拦蓄在试验田块中,在排水沟和油菜田中分别设立量测水位的标尺,用于观测排水沟和地表水水深。

对田间水深和历时的控制,一方面考虑到旱作物的耐淹水深和耐淹历时,另一方面要充分反映出控制排水减少雨滴对土壤的击溅侵蚀造成的可溶性磷和结合在泥沙颗粒表面磷养分流失效应。由于雨滴直径一般在 6 mm 之内,在积水深度小于雨滴直径范围内,雨滴溅蚀是随着表面积水水深增加而增加的,当地表水深和雨滴直径接近相等时,对土粒的分散力最大,一旦积水过深,溅蚀的强度就变弱了。在控制排水地块,闸门开启原则是:农田地表水深和历时能够减少暴雨侵蚀、降低磷排出质量浓度,同时不

形成涝、渍。

本次试验控制地表水深 5 cm,历时 126 min。若地表水深未达到 5 cm,在降雨开始后 126 min 开闸排水。在控制排水地块,同样每隔 10 min 用 1 000 mL 塑料瓶分时段取地表水样,立即密封保存在冰箱中,用于分析控制排水条件下各时段地表水中的磷质量浓度,同时记录该时刻排水沟中的水深。试验结束后将控制排水闸门完全打开,田间地表水全部排空,将控制排水地块用带有刻度的塑料桶收集流出的全部排水,并用 1 000 mL 塑料瓶取总排水量水样,用于比较非控制排水与控制排水的地表排水总量和磷流失总量。

将各时段非控制排水水样和控制排水水样用 0.45 μm 过滤膜过滤,经过硫酸钾消解法预处理后,用钼锑抗分光光度法测定溶解态磷质量浓度。用浓硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定磷含量。

3 结果与分析

3.1 控制与非控制排水各时段水样磷质量浓度

根据田间试验设计,将各时段水样中的磷含量进行实验室测定,测得磷质量浓度见表 1。

表 1 试验田排水各时段水样磷质量浓度 mg/L

时段	非控制排水	控制排水	时段	非控制排水	控制排水
1	17.8	16.3	7	6.4	6.5
2	15.2	13.4	8	5.7	6.0
3	12.4	11.1	9	4.8	5.4
4	10.7	8.9	10	4.4	5.1
5	8.9	7.8	11	4.1	4.8
6	7.6	7.1	12	3.7	4.4

对表 1 各时段非控制和控制排水的磷质量浓度进行非线性回归,寻找排水中磷质量浓度的变化规律,回归曲线见图 2,磷质量浓度与时段拟合二次多项式为

$\rho_{\text{非控制}} = 0.0013x^2 - 0.2868x + 20.284 \quad (1)$

$\rho_{\text{控制}} = 0.0012x^2 - 0.255x + 18.005 \quad (2)$

式中: $\rho_{\text{非控制}}, \rho_{\text{控制}}$ 分别为非控制和控制排水磷质量浓度, mg/L; x 为时段,每时段 10 min。

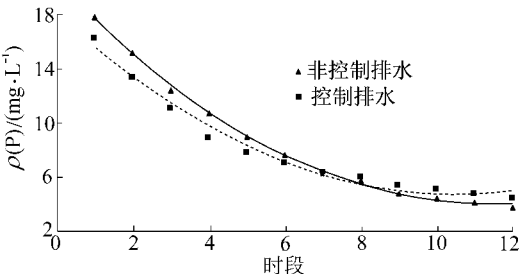


图 2 试验田排水各时段水样磷质量浓度随时间变化

降雨前在试验田中没有施肥,雨滴与土壤表层接触,磷肥在土壤容易被固定且不溶于水,排水中

只含有少量可溶性磷(9%)。由于雨滴击溅侵蚀和地表微地形变化产生的径流冲刷和细沟侵蚀,排水中与土壤颗粒和土壤团聚体结合的颗粒态磷(91%)是农田磷素流失的主要形式。在控制排水田块,排水沟中的水处于相对非流动状态,水中泥沙颗粒容易沉淀,径流冲刷和细沟侵蚀相对较弱,前期地表水中磷质量浓度比非控制排水时低。随着降雨的持续,雨滴的击溅侵蚀效应逐步减弱,排水中颗粒态磷质量浓度下降很快,控制与非控制排水的磷质量浓度均持续下降。比较 ρ 的一阶导数,非控制排水的磷质量浓度比控制排水的磷质量浓度下降快,而且在降雨后期,控制排水水样的磷质量浓度稍高于非控制排水,主要原因是控制排水降雨初期含有较高质量浓度磷的地表水没有排出,控制排水各时段水样质量浓度也就是前期各时段地表水的累积(混合)质量浓度,因此控制排水降雨累积地表水比非控制排水后期水样的磷质量浓度稍高是可以理解的。非控制排水各时段平均磷排出质量浓度为 8.48 mg/L,而控制排水最终磷排出质量浓度为 4.4 mg/L。选择合适的排水时间,当 $x = 90\text{min}$ 时,控制排水多项式 ρ 的一阶导数 $\rho' = -0.039$,随着时间的增大,趋势线趋向水平,磷的质量浓度较低,说明在 90 min 后开始排水有利于减少农田磷的排出,也不会影响作物的生长。

3.2 控制与非控制排水各时段排水量

在试验田收集到的非控制排水田块与控制排水田块各时段排水量列于表 2。

表 2 试验田各时段排水量 L

时段	非控制排水	控制排水	时段	非控制排水	控制排水
1	40.1	0	7	77.5	0
2	50.2	0	8	80.7	0
3	58.9	0	9	83.0	0
4	66.8	0	10	84.8	0
5	70.2	0	11	86.4	0
6	74.3	0	12	87.9	744.7

降雨 6 min 后开始产流排水,降雨主要在地表径流和入渗之间分配,开始入渗量较大,径流量小,逐步达到相对稳定的入渗速率。由于天然降雨的不稳定性,各时段的地表径流量有一定的不规则变化。非控制排水田块总排水量为 860.8 L。在控制排水田块,田间积水深度低于 5 cm,各时段没有排水,在降雨开始后 126 min 开闸排水,总排水量为 744.7 L。控制排水为积水入渗,入渗量较多,排水量较少,控制排水总量是非控制排水总量的 86.5%。

3.3 控制与非控制排水各时段磷排出量

根据各时段水样磷质量浓度和排水量计算出相应的磷排出量见表 3。

(下转第 39 页)

值为 328 亿元,产生的 GDP 为 1 656.4 亿元,2015 年总产值为 31 490 亿元,对四川省当年总产值的贡献率为 5.26%。2015 年 6 台机组全部投产发电,考虑厂用线损等因素,6 台机组的售电量为 157 亿 kW·h,因锦屏水电站还贷期内(还贷期为 15 年,1999 年价格)上网电价为 0.205 元/(kW·h),则锦屏水电站新增 GDP 为 47.1 亿元,2015 年时电力单位增加值贡献系数为 5.05,2015 年时 6 台机组运行新增 GDP 为 47.1 亿元,产生 GDP 总产值为 237.9 亿元,对四川省 2015 年总产值(31 490 亿元)贡献率为 0.76%,而对 2015 年经济增长(按年均 10% 的速度增长,年产值增量为 3 149 亿元)的贡献率为 7.6%。

5 结 语

分析结果表明,锦屏一级水电站投资对 2005 ~ 2013 年四川经济增长(年产值增量)的贡献为 4.27%,水电站 6 台机组运行后对 2015 年经济增长(年产值增量)的拉动作用为 7.6%。说明锦屏一级水电站建设投资及投产后运行发电对四川经济有明

显的拉动作用。
需要指出的是,本文仅就锦屏一级水电站建设对四川经济拉动作用进行分析,限于基础资料,如缺乏省外投入产出表数据等,本文未能对省际调配、各个时期基建总投资规模的调控等进行分析。

参考文献:

[1] 陈锡康.投入产出技术的发展趋势与国际动态[J].系统工程理论与实践,1991,11(2):52-56.
[2] 腾素珍.经济分析模型与应用[J].系统工程理论与实践,1998,18(9):32-36.
[3] 胡宗义.投入产出分析在经济计划中的应用[J].财经理论与实践,2000,21(1):97-100.
[4] 李浩,戴大权.投入产出分析的几种系数矩阵在管理和经济分析中的应用[J].中国管理科学,2002,10(4):28-30.
[5] 乐建红,邱忠恩.水利投入与国民经济发展适应关系分析[J].水利经济,2002,20(5):45-50.
[6] 赵敏,张天明,郑垂勇.福建省水利投入的实证分析[J].水利水电科技进展,2004,24(6):38-40.

(收稿日期:2005-03-23 编辑:高建群)

(上接第 26 页)

表 3 试验田各时段排水磷排出量 mg

时段	非控制排水	控制排水	时段	非控制排水	控制排水
1	713.8	0	7	496.0	0
2	763.0	0	8	460.0	0
3	730.4	0	9	398.0	0
4	714.8	0	10	373.1	0
5	624.8	0	11	354.2	0
6	564.7	0	12	325.2	3 276.7

试验田总面积为 48 m²,控制和非控制排水田块面积各为 24 m²,在 126 min 降雨历时、120 min 排水过程中,非控制排水磷排出量累计 6 518.4 mg,单位面积排出量累计 271.6 mg/m²;控制排水磷排出量 3 276.7 mg,单位面积磷排出量为 136.5 mg/m²;控制排水磷各时段累计排出量是非控制排水磷各时段累计排出量的 50.3%。

4 结 论

a. 暴雨雨滴对农田地表的击溅以及农田地表冲刷产生的水力侵蚀,造成了结合在土壤颗粒和土壤团聚体中的磷随径流流失,反映在降雨初期磷质量浓度很高,这是农田地表排水磷排出的主要形式。随着降雨的持续,击溅侵蚀效应减弱使得地表排水中磷质量浓度迅速下降。因此,控制降雨初期地表排水是减少农田磷养分排出的重要途径。

b. 试验田地表控制排水总排水量是非控制排水总排水量的 86.5%。非控制排水各时段平均磷排

出质量浓度为 8.48 mg/L,而控制排水平均磷排出质量浓度为 4.4 mg/L。通过控制排水,有利于地表水中泥沙颗粒沉淀和减少降雨产生的雨滴击溅和水力侵蚀,地表控制排水明显降低了农田中的磷排出质量浓度。

c. 地表控制排水比非控制排水总排水量减少,控制排水比非控制排水磷质量浓度低,这两个因素使得控制排水磷各时段累计排出量是非控制排水磷各时段累计排出量的 50.3%。

d. 通过地表控制排水减少了农田中的磷排出量,提高了农田养分和雨水资源的利用率,减少了对下游水体的污染。在持续降雨情况下,地表控制排水对土壤含水量和地下水水质及地下水位的影响需进一步研究。控制排水减少了排水量,对不同作物及作物不同生长阶段生长及产量的影响值得进一步研究。

参考文献:

[1] 黄满湘,章申,唐以剑.模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J].土壤与环境,2001,10(1):6-10.
[2] 郭伦,李佩武.降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究[J].环境科学学报,1996,16(1):111-116.
[3] 马立珊,汪祖强,张水铭.苏南太湖水系农业面源污染及控制对策研究[J].环境科学学报,1997,17(1):39-47.
[4] WESSTRÖM I, MESSING I, LINNÉR H, et al. Controlled drainage: effects on drain outflow and water quality[J]. Agricultural Water Management, 2001,47(2):85-100.

(收稿日期:2005-04-25 编辑:熊水斌)