

减少氮、磷流失的多目标控制排水模型

殷国玺¹ 张展羽¹ 邵光成^{1 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 运用多目标决策技术, 减少农田排水氮、磷输出, 保持适宜作物生长的土壤含水量, 探讨地表控制排水的控制时间。通过田间试验和 SPSS 回归模拟, 应用均值土壤一维垂直入渗 Philip 公式计算累计入渗量, 研究田间尺度降雨排水中氮、磷浓度的变化规律, 拟合控制排水氮、磷浓度对数函数模拟方程。建立减少氮、磷流失和排涝、除渍的多目标控制排水模型, 提出求解模型的非劣解和均衡解的方法。

关键词 控制排水; 面源污染; 土壤入渗; 多目标决策

中图分类号 S276 文献标识码 A 文章编号 1004-693X(2006)04-0056-03

Multi-objective controlled drainage model for reducing nitrogen and phosphorus losses

YIN Guo-xi¹, ZHANG Zhan-yu¹, SHAO Guang-cheng^{1 2}

(1. Department of Modern Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Saving Park of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract In order to reduce nitrogen and phosphorus in the farmland drainage and to keep suitable water content in soil, multi-objective decision technique was used to determine the control time of surface drainage. Based on field experiments, SPSS regressive simulation, and the calculation of accumulative infiltration amount by the averaged 1-D Philip formula for vertical infiltration in soil, the variation law of nitrogen and phosphorus concentration in drainage of rainfall in farmland was studied. with the fitted logarithmic function of nitrogen and phosphorus concentration in controlled drainage, a multi-objective controlled drainage model was established to reduce nitrogen and phosphorus losses and drain flooded fields. Methods to obtain the non-inferior solutions and averaged solutions of the model were proposed.

Key words controlled drainage; non-point source pollution; rainfall infiltration; multi-objective decision

农田排水能够满足除涝防渍需要, 但同时也加大了农田土壤颗粒、养分和其他污染物的流失, 增大对水环境的面源污染。农田排水与降雨径流有密切关系。黄满湘等^[1]通过试验, 得出暴雨径流氮的流失量与累积径流量成正相关。邬伦等^[2]在于桥水库流域氮、磷流失进行了定点监测。马立珊等^[3]研究了农业面源污染负荷量与降水量和灌溉量的关系。朱成立等^[4]研究了灌溉模式对稻田氮磷损失及环境影响。Ingrid^[5]在瑞典通过控制排水强度, 减少了排水中氮、磷的输出。控制排水使地表水处于非流动状态, 水中泥沙颗粒易于沉淀, 降低了雨滴击溅侵

蚀、径流冲刷和细沟侵蚀。控制排水能够降低排水中氮、磷浓度, 减少排水量, 从而减少了氮、磷流失。同时, 控制排水使得入渗量增加, 易产生涝渍。因此, 减少氮、磷流失与排涝、除渍是相互矛盾的排水目标, 往往无法找到使所有目标同时达到最优的排水控制时间, 需要研究减少氮、磷流失和排涝、除渍的多目标控制排水模型。

1 控制排水试验与分析

1.1 试验田布置

试验田位于江苏省句容市。试验田长 8 m、宽

6 m。内有 2 条平行墒沟 ,间距 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 0.9 m、比农田地面高出 15 cm 的塑料隔板与周围农田隔开 ,把试验田分隔成两块长 8 m ,宽 3 m 的田块。一条排水沟为非控制排水 ,另一条排水沟为控制排水。

1.2 处理设计

由于暴雨形成径流量大 ,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阶段 ,选择暴雨作为典型天然降雨强度。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。降雨发生于 2005 年 3 月 10 日 ,开始降雨时降雨强度较弱 ,当降雨强度达到 0.49 mm/min 时移开塑料雨棚 ,2 h 6 min 后用塑料布遮盖试验田 ,试验田只取 2 h 6 min 作为降雨历时。在非控制排水地块 ,田间排水沟处于自然排水状态。在控制排水地块 ,降雨形成的地表径流由排水沟出口处小闸门拦蓄在试验田块中。

1.3 观测内容及方法

在非控制排水地块 ,从产生径流后按照每 10 min 分别收集流出农田径流 ,用于测量各时段径流量和径流沉积物 ,同时用 1 000 mL 塑料瓶分时段取水样 ,用于分析各时段径流中氮、磷浓度。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 ,用于分析控制排水条件下各时段地表水中氮、磷浓度 ,同时记录该时刻排水沟中水深。试验结束把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 ,并取总排水量水样 ,用于比较非控制与控制排水地表排水总量和氮、磷流失总量。

1.4 实验结果与分析

1.4.1 控制与非控制排水各时段水样氮、磷浓度

根据各时段水样 ,测得氮、磷浓度汇总于表 1 ,用对数函数拟合得图 1、图 2。

表 1 非控制与控制排水各时段氮、磷质量浓度

时段/ min	$\rho(P)(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\rho(N)(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
	非控制	控制	非控制	控制
10	17.8	16.3	21.0	18.1
20	15.2	13.4	19.2	14.4
30	12.4	11.1	16.6	11.2
40	10.7	8.9	14.2	9.6
50	8.9	7.8	11.7	8.8
60	7.6	7.1	8.9	7.9
70	6.4	6.5	7.8	7.1
80	5.7	6.0	6.7	6.6
90	4.8	5.4	5.8	6.3
100	4.4	5.1	5.4	5.9
110	4.1	4.8	4.9	5.3
120	3.7	4.4	4.4	5.1

根据控制排水氮、磷浓度拟合曲线 ,得拟合曲线对数式 :

$$x_N = - 5.218 1\ln t + 29.565 \tag{1}$$

$$x_P = - 4.926 3\ln t + 27.615 \tag{2}$$

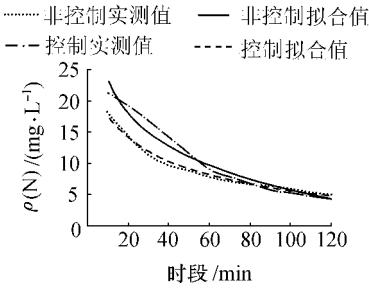


图 1 排水氮浓度变化

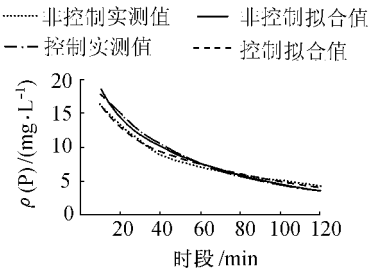


图 2 排水磷浓度变化

1.4.2 控制排水各时段累计入渗量

各时段降雨量、增加的地表积水量和累计入渗量观测值 ,见表 2。

表 2 各时段降雨量、增加的地表积水量和累计入渗量观测值

时段/min	降雨量/mm	积水量/mm	入渗量/mm
10	4.8	1.8	3.0
20	4.9	2.1	5.8
30	4.8	2.2	8.4
40	4.8	2.3	10.8
50	4.7	2.5	13.0
60	4.7	2.6	15.0
70	4.7	2.8	16.9
80	4.7	2.9	18.7
90	4.7	3.0	20.4
100	4.6	3.0	22.0
110	4.5	3.1	23.4
120	4.6	3.2	24.7

用土壤水动力学研究降雨的入渗量 ,利用 Philip 一维垂直入渗公式计算累计入渗量

$$K(t) = St^{1/2} + At \tag{3}$$

式中 :S 为吸渗率 ;A 为稳定入渗率 ;K(t) 为累计入渗量 ;t 为入渗时间(排水控制时间)。

Philip 公式中的吸渗率 S 和稳定入渗率 A ,由各时段累计入渗量观测值用 SPSS 非线性回归确定。设 S 的初始值为 0.6 ,A 的初始值为 0.2 ,经过 3 次迭代 ,S 的回归值为 0.81 ,A 的回归值为 0.138。得

回归后的 Philip 累计入渗量

$$I(t) = 0.81t^{1/2} + 0.138t \quad (4)$$

2 农田多目标地表控制排水模型

2.1 多目标控制排水目标函数

农田降雨地表控制排水的主要目标可归纳为两个方面：①及时排除降雨形成的地表积水，减少土壤入渗量，保持有利于作物生长的土壤含水率。②通过控制排水，降低排水中较高的氮、磷浓度，减少农田面源污染。

目标函数：

$$\min x_N = -5.2181 \ln t + 29.565 \quad (5)$$

$$\min x_P = -4.9263 \ln t + 27.615 \quad (6)$$

$$\min I(t) = 0.81t^{1/2} + 0.138t \quad (7)$$

约束条件：

$$x_N \leq x_0 \quad x_P \leq x_1 \quad (8)$$

式中： x_0, x_1 为农田排水氮、磷的最大排放浓度，对应于 x_0, x_1 的控制排水时间为 t_1, t_2 。

入渗量约束： $I(t) \leq I_0 \quad (9)$

式中： I_0 为排涝、除渍允许的最大入渗量，相应控制排水时间为 t_3 。

2.2 目标函数的非劣解及均衡解

如图 3 所示，随着排水控制时间增加，氮、磷浓度逐步下降，但入渗量不断增加。目标函数(5)、(6)、(7)在约束条件(8)、(9)的情况下，介于 t_2 到 t_3 区间内的任意点均是该多目标决策问题的非劣解。因为在这个区域内，若想减少 x_N, x_P 的值，需要增加控制排水时间，这将增加累计入渗量 $I(t)$ ；反之亦然。

控制排水时间的非劣解集为

$$t_1, t_2 \leq t \leq t_3$$

式中： t_1, t_2, t_3 为对应于 x_0, x_1, I_0 的控制排水时间。

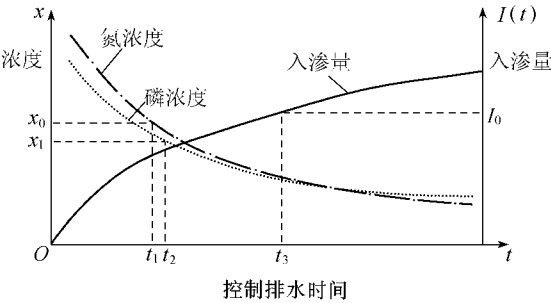


图 3 农田控制排水氮、磷浓度和入渗量随时间变化曲线

均衡解是根据土壤含水量以及周围水体污染情况，由决策者在非劣解集内，确定多目标控制排水效应最佳的控制排水时间 t 。例如根据土壤含水量，2 h 6 min 的降雨入渗量不能超过 17.56 mm，减去自由入渗阶段入渗量 3 mm，得 $I_0 = 14.56$ mm，由式(7)得

$t_3 = 60$ min。若排水中氮的质量浓度不允许超过 $x_0 = 10.3$ mg/L，磷的质量浓度不允许超过 $x_1 = 9.4$ mg/L，由式(5)、(6)得 $t_1, t_2 = 40$ min。非劣解区间 40 ~ 60 min(产生地表积水 40 ~ 60 min 后排除积水)。若排涝除渍比减少氮、磷排放重要，均衡解采用非劣解下限，控制排水时间 40 min。反之，均衡解采用非劣解上限，控制排水时间 60 min。

3 结 论

a. 通过田间试验和理论研究，田间地表控制排水是降低氮、磷输出浓度，从源头上减少农田面源污染的重要措施。

b. 减少农田氮、磷输出和保持适宜作物生长的土壤含水量是控制排水的目标。建立了多目标控制排水目标函数，提出了求解排水控制时间非劣解和均衡解的方法。

c. 目标函数应用均值土壤一维垂直入渗 Philip 公式计算累计入渗量，用 SPSS 回归 Philip 公式系数。建立氮、磷输出浓度对数函数回归模拟方程。田间试验数据和回归方程模拟一致。

d. 本模型可应用于我国南方湿润地区菜地和旱作农田地表控制排水方式。

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): 5-10.
[2] 邬伦, 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] 朱成立, 张展羽. 灌溉模式对稻田氮磷损失及环境影响研究展望[J]. 水资源保护, 2003(6): 56-58.
[5] INGRID W, INGMAR M, HARRY L, et al. Controlled drainage-effects on drain outflow and water quality[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(2): 85-100.

(收稿日期 2005-05-16 编辑: 傅伟群)

