

降水对农田排水沟渠中氮磷流失的影响

于会彬^{1,2}, 席北斗^{2*}, 郭旭晶^{1,2}, 翟丽华^{2,3}, 何连生², 许其功², 刘鸿亮²

1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012

3. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084

摘要: 以浙江嘉兴双桥农场为研究对象, 分析降水对农田沟渠中氮、磷流失的影响, 揭示氮、磷在降水径流中流失的一般规律。在单晚稻生长期, 同步监测了施肥后的 2 次降水量和沟渠径流量, 并对 2 次降水径流的全过程进行污染物含量的测定, 对农田排水沟渠径流量与污染物含量随 2 次降水变化过程进行监测。结果表明: 污染物含量变化呈现出大致相同的趋势, 且污染物含量峰值比流量峰值提前 2~3 h; 在降水初期, 污染物含量随径流量的增大而升高; 随着流量的继续增大, 含量呈下降趋势。施肥后 4 d 内降水的农田沟渠中氮、磷随径流的流失量比 4 d 后大。影响氮、磷流失的因素主要有降水量、降水时间间隔、径流量、施肥的种类和数量、土壤前期含水量以及沟渠中的沉积物等。氮流失的主要形态为氨氮和硝氮; 磷流失的主要形态为磷酸盐。通过回归分析发现, 径流量与氮、磷排放负荷间符合多项式关系。

关键词: 农田排水沟渠; 降水径流; 氮; 磷; 回归分析

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6929(2009)04-0409-06

Effect of Rainfall Runoff on Nitrogen and Phosphorus Loss in Farming Drainage Ditch

YU Hui-bin^{1,2}, XI Bei-dou², GUO Xu-jing^{1,2}, ZHAI Li-hua^{2,3}, HE Lian-sheng², XU Qi-gong², LIU Hong-liang²

1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The relationship of nitrogen and phosphorus loss and rainfall runoff based on natural rainfall events was monitored in a field drainage ditch of Shuangqiao farm in Jiaxing, Zhejiang Province. During growth of a single crop of late rice, rainfalls and ditch runoffs after fertilizing were measured twice simultaneously, and contents of nitrogen and phosphorus were also measured. The variations of nutrient concentration and runoff were measured and analyzed. The trends of concentration variation for nitrogen and phosphorus were almost the same, and their peak values were two to three hours earlier than the peak runoff. Shortly after rainfall started, the concentrations of nitrogen and phosphorus increased with increasing runoff flow. Later, they decreased with increased runoff flow. The loss of nitrogen and phosphorus within the first four days after fertilizing was greater than the loss after four days. The predominant factors affecting nitrogen and phosphorus loss were rainfall, rain interval, runoff, type and quantity of fertilizer, preliminary water content in soil, sediments in farming ditch and so on. The loss of nitrogen was mainly in the form of ammonia nitrogen and nitric-nitrogen; and the loss of phosphorus was mainly in the form of dissolved phosphate. Regression analysis results showed that a polynomial relationship existed between runoff and nutrient loads.

Key words: farming drainage ditch; rainfall-runoff; nitrogen; phosphorus; regression analysis

农业非点源中营养物的过度排放是引起水体富营养化的主要原因之一^[1], 农业用地中排放的氮、磷

不仅会造成巨大的经济损失, 也会威胁到地下水和饮用水的安全^[2]。受化肥施用量增加、施肥结构不合理、农田排水直接进入河流等因素影响, 农田排放的营养物对水体的危害也在日益加剧^[3]。降水引起的地表土壤侵蚀及农田化肥、农药的流失是非点源污染的重要原因^[4], 因此在降水条件下, 径流的观测是研究农业非点源污染的基础^[5]。农田排水沟渠是农田流失氮、磷进入接纳水体前的运输通道^[6], 因

收稿日期: 2008-04-01

修订日期: 2008-05-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB724203);
博士点专项基金项目(20050027011)

作者简介: 于会彬(1972-), 男, 山东青岛人, yhybyx@163.com.

*责任作者, 席北斗(1969-), 男, 安徽砀山人, 研究员, 博士, 主要研究流域水过程, xibeidou@263.com

此,选择我国南方典型高产农业流域——浙江嘉兴小流域为研究对象,分析降水对农田沟渠中氮、磷流失的影响,揭示氮、磷的迁移变化规律,以期为该区域农业非点源污染治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浙江省嘉兴市秀洲区的双桥农场位于杭嘉湖平原北端(120°42'E,30°50'N),见图1。该地区海拔较低,地势平坦,田地成块,沟渠呈网状分布,沟渠坡度(<0.2)较小;属于典型的亚热带季风气候区,年均气温 $15\sim 16$ 。年均降水量 $1\,193.7\text{ mm}$,最大降水量 $1\,750\text{ mm}$ (1999年),最小降水量 766.6 mm (1978年)。降水大部分集中在3—9月,占全年总降水量的76%。有3个明显的降水时段:3—5月的春雨,特点是雨日多;6—7月的梅雨,一般来说,梅雨雨量较大,但变化也大;9月的秋雨,也被称为台风雨,降水强度较大,多出现在8—9月。雨季分配呈现梅雨型(6月峰值)和台风型(9月峰值)的双峰型降水特征。



图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

农场现有土地总面积为 42 hm^2 ,其中水田 22 hm^2 ,果、蔬基地 3.5 hm^2 ,畜牧场 4 hm^2 ,其他土地 1.4 hm^2 。农场土地平整,土壤肥沃,田块成方,排灌自如,基础设施条件较好。农业种植区主要以单晚稻和冬小麦为主。种植方式为每年2季。植物种植组成见图2。

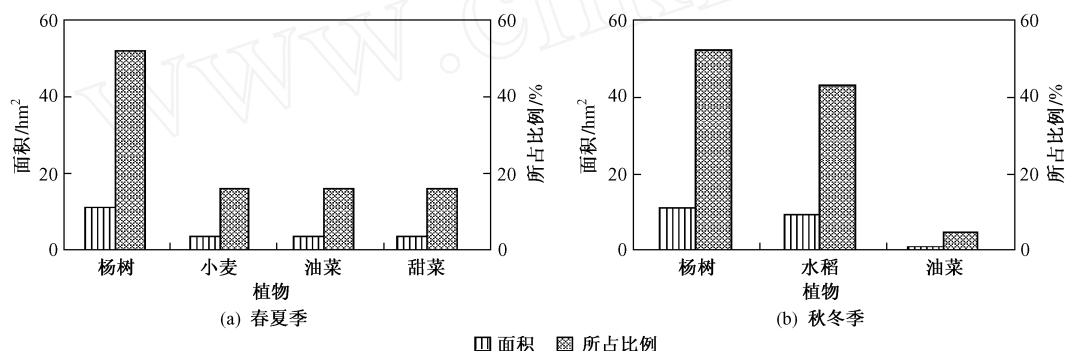


图2 种植面积及其所占比例

Fig. 2 Crops area and proportion in a year

农场具有较完整的沟渠系统,降水或灌溉产流后,依次进入毛渠、支渠,最后汇入干渠并排入邻近河流水系。沟渠排水性能良好,沟渠底面和侧面均为水泥抹面,水力条件较好,沟渠总长 $2\,222.9\text{ m}$,占地 $2\,053.2\text{ m}^2$,沟渠中水量与作物的耕作和季节变化密切相关,每年3—11月初,沟渠中的水位保持在 $10\sim 40\text{ cm}$,其中6—9月较深,11月水位逐渐下降,到11月底干涸,次年3月逐渐开始蓄水。

双桥农场是国营农场,创办于1949年11月,为浙江省现代农业示范园区,耕作制度50年不变,农场及周边地区水网密布。因此,不论从农事管理还是自然地理特征来讲,该农场在杭嘉湖平原水网区都具有一定的代表性。

1.2 研究方法

试验区位于双桥农场南部,是农作物种植区沟渠系统的重要组成部分,耕作方式为小麦和水稻轮作,具体分布如图3所示。汇水面积为 22 hm^2 ,在沟

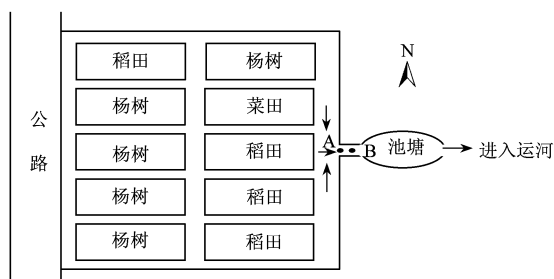


图3 排水沟渠分布

Fig. 3 Drainage ditch distribution

渠总出口 A 处进行采样,并设置降水量自动观测仪,实时记录降水量的变化. 为准确观测沟渠的径流过程和流量,在 B 处设置矩形堰,矩形堰的长、宽和深分别为 5, 0.5 和 0.5 m. 在矩形堰内监测断面设置水位自动监测仪,实时记录水位的变化,根据水位自动监测仪显示的水位 - 流量关系曲线可查得实时流量.

农田排水沟渠径流中氮、磷流失量与降水和施肥间隔以及降水量有关^[7]. 因此选取 2 种情境说明污染物含量随径流量的变化. 情境 1,单晚稻播种时施基肥(复合肥 450 kg/hm²) 2 d 后日降水量为 21 mm 的降水期;情境 2,第 2 次追肥(尿素 150 kg/hm²) 5 d 后累计降水量为 44 mm 的降水期. 不同情境下的降水特征见表 1.

表 1 不同情境下的降水特征
Table 1 Rainfall characteristics in different conditions

情境	监测日期	降水量/mm	历时/h	最大雨强/(mm/h)	平均雨强/(mm/h)	检测次数/次
1	2005 - 05 - 29—30	21	16	3.93	1.31	33
2	2005 - 07 - 09—10	44	28	8.92	1.69	47

1.3 样品采集与监测

降水前采样 1 次,作为参照值. 降水历时 1 h 内,采样时间间隔为 15 min;降水历时 1~7 h,采样间隔为 30 min;之后,采样间隔为 1 h,直至水位回复到降水前位置时止. 沟渠水样采集后运回实验室,分析 $\rho(\text{总氮})$, $\rho(\text{氨氮})$, $\rho(\text{硝氮})$, $\rho(\text{总磷})$ 和 $\rho(\text{磷酸盐})$. $\rho(\text{总氮})$ 和 $\rho(\text{总磷})$ 均用原水样进行测定. $\rho(\text{总氮})$ 采用过硫酸钾氧化,紫外分光光度比色法分析; $\rho(\text{总磷})$ 采用过硫酸钾氧化消解法,用钼锑抗分光光度法测定. 水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后测定 $\rho(\text{氨氮})$, $\rho(\text{硝氮})$ 和 $\rho(\text{磷酸盐})$. $\rho(\text{氨氮})$ 采用钠氏试剂分光光度法测定; $\rho(\text{硝氮})$ 采用紫外分光光度比色法分析; $\rho(\text{磷酸盐})$ 用钼锑抗分光光度法测定.

2 结果与讨论

2.1 污染物含量随排水沟渠流量的变化规律

2 种情境下的流量过程线和污染物含量见图 4. 在情境 1 中,降水量和流量均出现了 2 个明显的峰值,流量峰值比降水量的峰值滞后约 3 h [见图 4 (a)];在情境 2 中,流量峰值比降水量的峰值滞后约 2 h [见图 4 (b)],这主要是由土壤的前期含水量决定的. 在相同的土地利用和下垫面条件下,土壤的前期含水量是决定产流时间的关键因素. 3 月排水沟渠开始蓄水,水位为 15~25 cm,5 月 15—28 日区域内降水量仅为 18 mm;而 6 月 15—30 日降水量多达 55 mm,排水沟渠水位为 25~35 cm,此时土壤含水量要大于情境 1. 因此,导致了流量峰值出现的时间相差约 1 h. 图 4 中污染物含量与流量变化趋势大致相同. 在监测时段内,污染物含量也出现了 2 个峰值,而且这 2 个峰值的出现时间比流量峰值提前 2~

3 h,比降水峰值略有滞后;第 1 个峰值明显高于第 2 个峰值. 随着流量的增加,污染物含量呈逐渐递减趋势;在降水过程的后期,随着流量的减小,污染物含量有小幅度的锯齿状变化,但变幅很小,总体上呈递减趋势.

污染物含量峰值出现在降水峰值与径流峰值之间且更接近前者,主要是由排水沟渠的特征引起的:

在降水初期,侵蚀作用处于主导地位,污染物随降水径流大量进入排水沟渠,导致含量增大; 化学肥料的大量流失; 沟渠中沉积物释放出部分氮、磷. 沟渠底部有 10~20 cm 的沉积物,在沟渠沉积物间隙水中 $\rho(\text{硝氮})$, $\rho(\text{氨氮})$ 和 $\rho(\text{磷酸盐})$ 都比较高,尤其是 $\rho(\text{氨氮})$,比沟渠水体高 8 倍. 沉积物对氮、磷的吸附能力与界面性质、水体的温度^[8] 以及 pH ^[9] 有关. 降水初期,由于沟渠径流量的突增,导致水体的温度降低, pH 升高,沉积物的吸附能力下降;加之雨点的撞击,致使界面扰动增强,沉积物间隙水释放出氮、磷(见表 2).

由图 4 可见,情境 1 $\rho(\text{总氮})$ 低于情境 2,但 $\rho(\text{总磷})$ 高于后者,这主要是由于化肥种类和施肥量等因素所致. 情境 1 为复合肥 450 kg/hm² (氮素为 37 kg/hm²,磷素为 19 kg/hm²),而情境 2 为尿素 150 kg/hm² (氮素为 69 kg/hm²);虽然施肥时二者氮素相差近 1 倍,但前者 $\rho(\text{总氮})$ 最大值为 5.00 mg/L,后者为 5.20 mg/L,相差不大. 张志剑等^[10-12] 对水稻田面水氮素的动态特征及流失规律进行的研究指出,氮的流失一般是施肥后,其大多还存于土壤及作物表面,较易随田间水排入沟渠;而 3~4 d 后,养分大多已进入土壤,并发生了一定的转化. 情境 1 是施肥 2 d 后降水,而情境 2 为施肥 5 d 后降水,所以前者氮

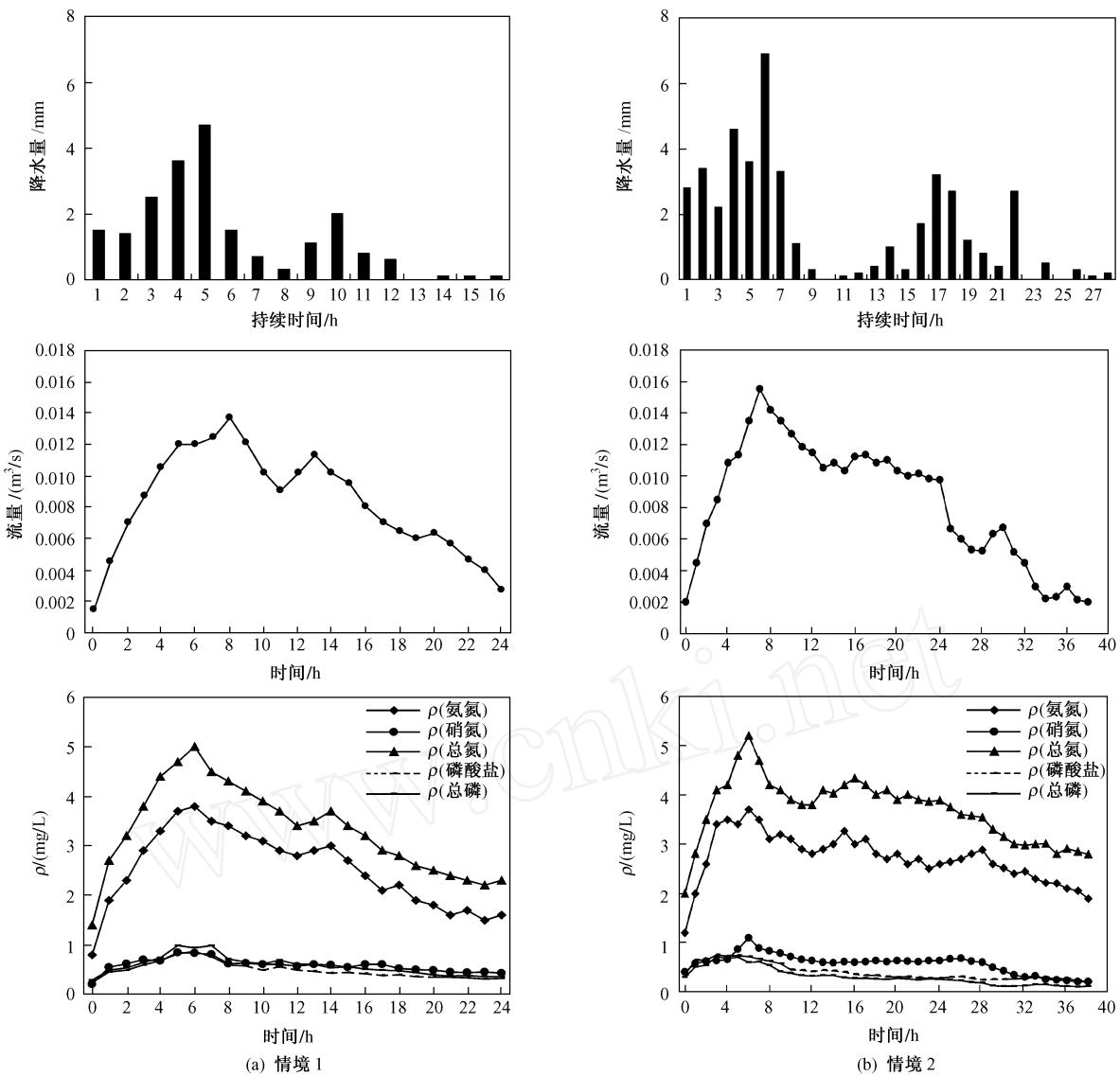


图 4 降水径流过程及污染物含量变化

Fig. 4 Change of rainfall-runoff and nutrients concentration

表 2 情境 2 中沟渠水体与沉积物间隙水的污染物含量比较

Table 2 Pollutions comparison in water of drainage ditch and water of sediment

类别	mg/L									
	ρ(总氮)		ρ(硝氮)		ρ(氨氮)		ρ(总磷)		ρ(磷酸盐)	
	降水前	最大值 ¹⁾	降水前	最大值	降水前	最大值	降水前	最大值	降水前	最大值
沟渠水体	2.00	5.20	0.40	1.10	1.20	3.70	0.35	0.76	0.30	0.72
沉积物间隙水			1.23	1.09	9.12	5.70			0.82	0.76

1) 指降水期间测得的最大值.

流失的比例大于后者. 在 2 种情境中,同一水样 $\rho(\text{总磷})$ 和 $\rho(\text{磷酸盐})$ 的差值为 0.04~0.12 mg/L,说明流失的磷主要是磷酸盐. 情境 1 $\rho(\text{磷酸盐})$ 最大值为 0.97 mg/L,而情境 2 $\rho(\text{磷酸盐})$ 最大值为 0.71 mg/L,并且 2 种情境的 $\rho(\text{磷酸盐})$ 虽有一定程度的增加,但变幅比氮小,说明降水对于农田土壤中磷酸盐

的流失影响不大.

到了降水后期,由于土壤中污染物含量的下降和流量的持续增大,水的稀释作用开始占主导地位,从而导致污染物含量进一步降低.

因此,径流中污染物含量的变化不仅与径流量有关,同时还取决于降水量、降水时间间隔、施肥的

种类和数量、土壤前期含水量及沟渠中的沉积物等多种因素。

2.2 污染物排放负荷与径流量的回归分析

研究表明^[13], 径流量与污染物排放负荷之间存在着非线性关系。为研究二者的关系, 对径流量与污染物排放负荷进行了回归分析。在排水沟渠总出口处的污染物排放负荷根据流量和污染物质量浓度同步监测值进行计算, 计算公式如下:

$$y_j = \int_0^t c_i(t) q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \quad (1)$$

$$x = \int_0^t q_i(t) dt \approx \sum_{i=1}^{n-1} \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \Delta t_i \quad (2)$$

式中, y_j 为第 j 种污染物的排放负荷, g; c_i 为 t 时刻

径流中第 j 种污染物的质量浓度, mg/L; q_i 为 t 时刻的流量, m^3/s ; c_i 为第 j 种污染物在样本 i 监测时的质量浓度, mg/L; q_i 为样本 i 的监测流量, m^3/s ; x 为径流量, m^3 ; Δt 为样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔, s。

对 5 种污染物的排放负荷和径流量进行多项式回归分析, 结果见图 5。由图 5 可以看出, 污染物排放负荷与径流量之间存在着多项式关系, 且 $R^2 > 0.95$, 表明污染物的排放负荷累积流量与累积通量有很强的相关性。但是, 由于 2 个变量中都有流量, 并且试验结果只有 2 个实测径流量过程及对应的输出通量, 建立预报关系数据太少, 采用该曲线进行预报及外推误差可能很大。因此, 通过计算 2005 年总氮和总磷的年通量, 然后外推降水产流后的氮、磷的年通量, 进而估算肥料的流失率, 以估计该方法的误差大小。

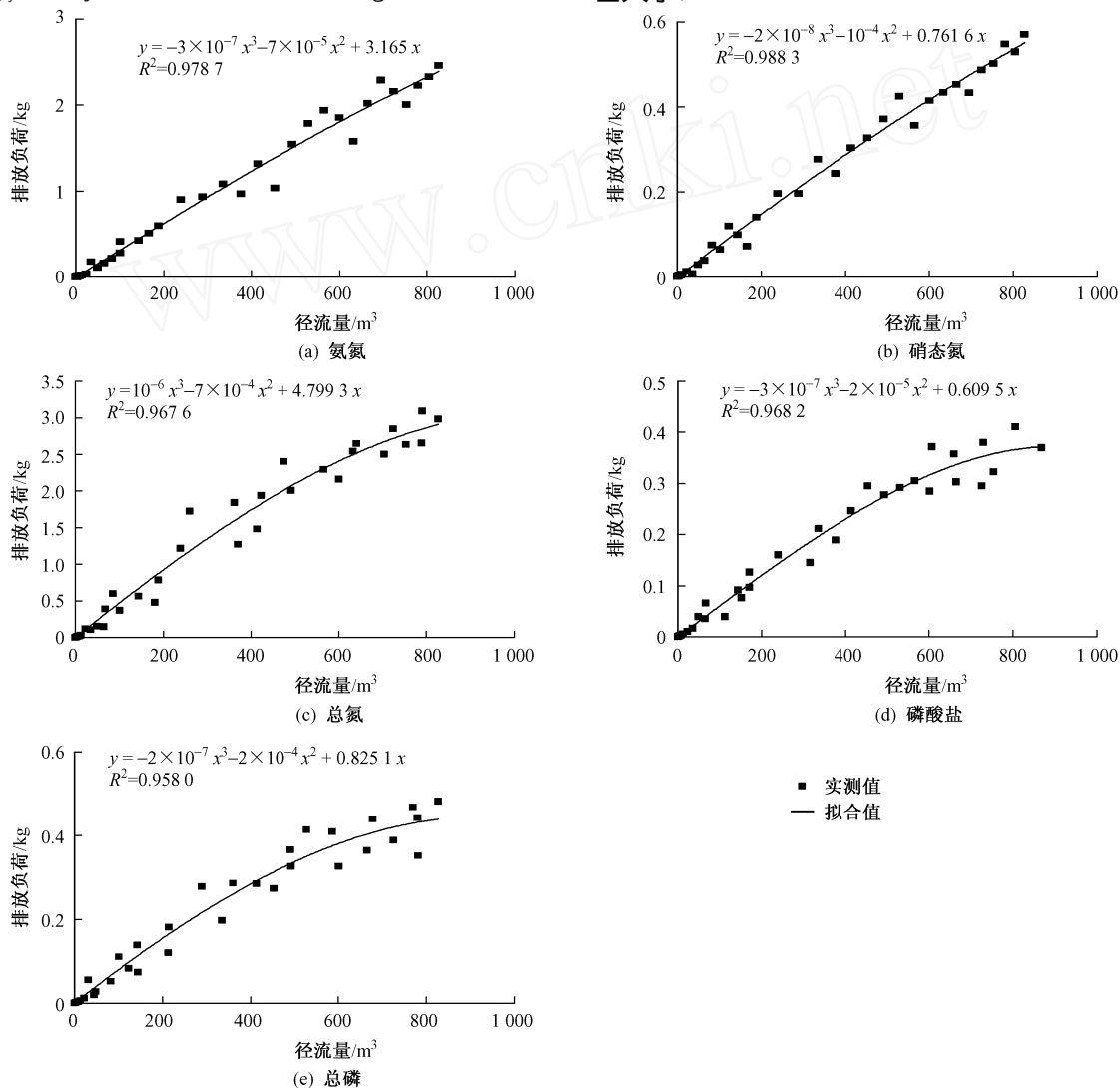


图 5 径流量与污染物排放负荷的多项式回归分析

Fig. 5 Polynomial regression of runoff and pollutants load

由于把农田及其排水沟渠视为人工小流域,所以采用下式计算总氮和总磷的年通量:

$$W = K \sum_{i=1}^n C_i \bar{Q}_i \quad (3)$$

式中, W 为年通量; K 为估算时间段的转换系数; C_i 为污染物的瞬时质量浓度, mg/L ; $\bar{Q}_i$ 为代表时段平均流量, L/s ; n 为估算时间段的样品数量。

因为式(3)强调径流量的作用,较适合非点源占优的情况^[14]。

根据实测数据和有关文献^[15],算出 2005 年研究区总氮和总磷的年通量分别为 8 964 和 1 752 t/a。根据嘉兴水文站实测资料得到实测年的累积年径流量约为 $82\,103\text{ m}^3$,代入图 5 的总氮和总磷回归方程,计算可得总氮、总磷的年通量预测值为 12 437 和 2 481 t/a。总氮、总磷年通量的相对误差为 0.387 和 0.416,尽管相对误差较大,但在预测时扣除误差后,仍具有一定的参考价值。

通过这些回归方程,并根据流域内某次降水径流量,可计算出该流域的污染物排放负荷。在我国的其他地区也得出过类似的经验方程,同样说明了污染物排放负荷与径流量有明显的指数或对数关系^[16-17]。但是,由于非点源污染与研究区域的土地利用类型、土壤的理化性质、流域管理措施等多种因素有关,各研究区域得出的经验方程相差很大,因此,该方程只能用于杭嘉湖平原农田排水沟渠。

3 结论

a. 农田排水沟渠系统本身不太稳定,在降水的作用下可以引起一系列变化。在 2 种情境中,降水量和流量均出现了 2 个明显的峰值,且流量峰值比降水量的峰值滞后约 2~3 h;污染物含量也出现了 2 个峰值,而且这 2 个峰值的出现时间比流量峰值的出现时间提前 2~3 h,比降水峰值略有滞后。随着流量的增大,稀释开始占据主导作用,污染物含量表现出随流量增大而递减的趋势。

b. 试验期间,2 种情境 ρ (总氮), ρ (氨氮) 和 ρ (硝氮) 的最大值分别为 5.00 和 5.20 mg/L , 3.90 和 3.70 mg/L , 0.87 和 1.10 mg/L , 沟渠系统输出氮的主要形态为氨氮和硝氮;沟渠系统输出磷的主要形态为磷酸盐, ρ (总磷) 和 ρ (磷酸盐) 的最大值分别为 1.06 和 0.75 mg/L , 0.97 和 0.72 mg/L 。

c. 通过回归分析发现,氨氮、硝氮、总氮、总磷和磷酸盐的排放负荷与径流量之间存在着多项式关系, R^2 分别为 0.978 8, 0.988 5, 0.967 9, 0.967 6 和

0.958 0。其中,总氮、总磷的相对误差为 0.387 和 0.416。在杭嘉湖平原,该经验方程可直接应用于降水情境下农田排水沟渠中氮、磷流失量的计算,计算值要相应的扣除误差影响。

参考文献(References):

- [1] HOLLINGER E, CORNISH P S, BAGINSKA B, et al. Farm-scale storm water losses of sediment and nutrients from a market garden near Sydney, Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 47(3): 227-241.
- [2] CAMEIRA M R, FERNANDO R M, PEREIRA L S. Monitoring water and $\text{NO}_3\text{-N}$ in irrigated maize fields in the Sorraia Watershed, Portugal[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 60(3): 199-216.
- [3] OWENS L B, VAN KEUREN R W, EDWARD W M. Budgets of non-nitrogen nutrients in a high fertility pasture system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, 70(1): 7-18.
- [4] 万超,张思聪.基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷计算[J]. *水力发电学报*, 2003, 81(2): 62-68.
- [5] 徐红灯,席北斗,王京刚,等.水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(2): 84-88.
- [6] OWENS L B, VAN KEUREN R W, EDWARDS W M. Non-nitrogen nutrient inputs and outputs for fertilized pastures in silt loam soils in four small Ohio watersheds[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 97(1/2/3): 117-130.
- [7] 梁新强,陈英旭,和苗苗,等.近沟渠稻田氮素多维通量模型开发及验证[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2007, 33(6): 671-676.
- [8] 翟丽华,刘鸿亮,徐红灯,等.浙江某农场土壤和沟渠沉积物对氨氮的吸附研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(8): 1770-1773.
- [9] 席北斗,徐红灯,翟丽华,等. pH 对沟渠沉积物截留农田排水沟渠中氮、磷的影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(7): 490-494.
- [10] 张志剑,董亮,朱萌涓.水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(4): 475-480.
- [11] 翟丽华,刘鸿亮,席北斗,等.沟渠系统氮、磷输出特征研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(2): 35-39.
- [12] 陈月,何连生,席北斗,等.流速对河道系统截留氮、磷的影响[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 99-103.
- [13] YE W, BATES B C, VINEY N R, et al. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments[J]. *Water Resour Res*, 1997, 33(1): 153-166.
- [14] 富国.河流污染物通量估算方法分析:时段通量估算方法比较分析[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(1): 1-4.
- [15] 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: 32-69.
- [16] 于兴修,杨桂山,梁涛.西苕溪流域土地利用对氮素径流流失过程的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 424-427.
- [17] 张荣保,姚琪,计勇,等.太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1): 94-98.

(责任编辑:孔 欣)