

太湖流域典型圩区农田氮素地表径流迁移特征

王 鹏^{1,2}, 徐爱兰^{1,3}

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. “浅水湖泊综合治理与资源开发”教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 南通市环境监测中心站, 江苏 南通 226006)

摘 要:太湖流域农业非点源问题日趋严峻,流域内圩区面积占较大比重,圩区水流运动的特殊性决定了圩区非点源污染物迁移规律的特殊性,而目前国内外相关研究较少,因此太湖流域典型圩区营养盐迁移转化特征研究具有重要意义。在太湖流域平原河网地区选择典型圩区开展野外原位试验,通过野外观测和室内分析相结合的方法,研究了圩区氮素在自然降雨-径流驱动下的迁移特征,建立了稻季农田氮素的迁移通量与径流通量、施肥量及降雨距施肥时间间隔三者之间的定量化关系。结果表明,径流通量是影响氮素流失通量的关键因素;施尿素后径流中氮素浓度达最高值,后呈下降趋势,氮素径流损失与施氮量呈显著正相关;施肥与径流发生的时间间隔也是决定径流氮损失的重要因素。

关键词:太湖流域;圩区;农业非点源污染;降雨径流

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1335-05

Nitrogen Losses with Surface Runoff from Farm Lands in Polder Area Around Taihu Basin

WANG Peng^{1,2}, XU Ai-lan^{1,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 3. Nantong Environmental Monitoring Centre, Nantong 226006, China)

Abstract: As to Taihu Basin, including many polders, the non-point source pollution is becoming serious gradually. It has about 14 541 km² polders, which account for 51% of the land area in its plain. These polders play an important role in protecting the safety of people's lives and properties and promote the economic development and social stabilization. However, due to the accumulation of fertilizer and pesticide in soil and the saltwater intrusion, water quality of these polders was becoming worse increasingly. The unique hydrology and transportation of contamination from polder determined the characteristic rule of the non-point pollution of polder. Since little studies have been done on this, it was necessary to pay more attention on this field. A typical agricultural watershed and runoff plots in polder areas around Taihu was selected and experiment in situ was conducted. The transportation characteristics of various forms nitrogen driven by natural rainfall-runoff were studied by field observations and laboratory tests. Regression relationships between transportation fluxes with runoff fluxes and fertilization were set up. It suggested that, runoff fluxes is the key factor influencing the transportation fluxes; the nitrogen concentration of the runoff due to fertilization arrived at the highest level, and then descends, and was positively correlated with rate of fertilizer application; the time interval between runoff and fertilizer application is also the important factor influencing the transportation fluxes of nitrogen.

Keywords: Taihu Basin; polder; agricultural non-point source pollution; rainfall-runoff

非点源污染由于其发生的随机性、机理过程的复杂性、排放途径及排放污染物的不确定性以及污染负荷的时空变异性,给研究和治理工作带来许多困难。在欧美发达国家,由于对工业和城镇生活污水等点源

污染进行了有效治理,非点源污染已成为水环境的最大污染源,其中来自农田的营养盐在非点源污染中所占比例最大^[1]。

太湖流域人口密集,是我国工农业最发达的地区之一,流域内圩区总面积占流域平原区面积的51%^[2]。由于圩区土壤中肥料、农药等污染物的淋溶而不断积聚,引起圩区水质恶化,给区域生态环境带来严重影响,对流域水环境构成严重威胁。圩也称圩田、圩子、围田、垸或圩垸。它是利用地形,或沿自然河道,筑起

收稿日期:2008-02-15

基金项目:国家自然科学基金(50239030)

作者简介:王 鹏(1979—),男,湖北宜昌人,讲师,主要从事非点源污染、水环境规划与评价方面的研究。

E-mail:hhwp@hhu.edu.cn

道道堤坝,建设闸门和泵站,将堤坝内的土地与外界河道隔离开。圩区是排除积涝而兼有灌溉、通航的水利工程形式,主要分布在长江中下游滨江及洞庭湖、鄱阳湖、太湖流域和珠江三角洲等滨江滨湖低地。平原地区的圩堤一般是闭合的,利用节制闸或泵站进行圩内与圩外水量的交换,因此圩区内所产生的径流能否汇流进入河网主要受人为控制。这种受到人为干预的水量交换方式改变了水体的天然流动特性,必然导致圩区内营养盐的产生、迁移及转化具有特殊性和复杂性。国内外在丘陵地区非点源迁移转化机理方面开展了较多的研究^[3-7],但对于圩区农业非点源污染的相关研究较少^[8],因此,需要结合圩区水流运动和污染物迁移的特点,采用野外试验、室内分析和模型研究等多种手段,对圩区非点源污染的产生、迁移和转化规律进行系统研究,分析其在时间和空间上的分布特征,建立适合平原河网典型圩区的非点源污染模型。

本文通过在太湖流域平原河网地区选择典型圩区——获泽联圩开展野外原位试验,揭示了圩区农田氮素在自然降雨-径流驱动下的迁移特征,建立了稻季农田氮素的迁移通量与径流量、施肥量及降雨距施肥时间间隔三者之间的定量化关系。

1 材料与方法

1.1 流域概况

获泽联圩位于无锡市锡山区鹅湖镇鹅湖村(120°32'14"E,北纬 31°29'57"N),距离无锡市区东南 25 km,望虞河西侧,东南为漕湖。圩区内地势平坦,地面高程介于 2.1~3.6 m,水网密布,水面比降小,一般河道都有小型闸坝控制,流速缓慢。圩区总面积 70.43 hm²,2001 年建圩,圩堤长度 1.96 km。圩区内的主要土地利用类型有稻田、菜地、林地、水面、居民区和道路,分别占圩区面积的 46%、28%、8%、13%和 5%。圩区通过郭家里以及吴埂上等两个排涝站排涝,排涝流量分别为 1 m³·s⁻¹ 和 0.534 m³·s⁻¹。

1.2 采样及分析方法

圩区排涝一般发生在降雨的次日,试验控制排涝在降雨产流发生 24 h 后进行,圩内河道水位恢复到降雨前水位时停止排涝。在圩区排涝站出口采集降雨前、排涝前和排涝后等特征时刻水样,同步记录圩内和圩外河道的水位。

在 2006 年 7 月 12 日到 2006 年 10 月 30 日期间,分别在郭家里和吴埂上排涝站收集了 8 场和 7 场排涝事件的径流样本。吴埂上排涝站的排涝时间比郭

家里排涝站长,因此,对吴埂上排涝站排涝前、排涝后和排涝过程中分别采样 5 次,对郭家里排涝站采样 4 次,采样时间间隔均匀。

水样静置 3 h 后抽取上层清液测定水相营养盐含量,测定项目包括 TN、NH₃-N、NO₃-N、NO₂-N,其中 NH₃-N、NO₃-N、NO₂-N 浓度相加作为无机氮含量,有机氮浓度采用差减法得到。水样经碱性过硫酸钾消煮测定 TN;NH₃-N、NO₃-N 和 NO₂-N 的测定分别采用纳氏比色法、酚二磺酸法和 N-(1-萘基)乙二胺光度法。水样分析方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》。

将各排涝站在降雨次日发生的排涝事件称为次降雨排涝事件。郭家里排涝站分别在 7-12、7-18、7-21、7-22、8-15、8-22、9-2、9-15 发生 8 次排涝事件,按时间先后依次编号为 G1~G8。吴埂上排涝站在 7-18、7-21、7-22、8-15、8-25、9-2、9-15 发生 7 次排涝事件,编号为 W1~W7。

1.3 营养盐迁移通量和径流量

研究表明农田营养盐流失量与径流量存在相关性。本文在研究前首先对这两个变量进行时间和空间的单位化处理,引入营养盐迁移通量和径流量的概念。其中营养盐迁移通量指圩区单位时间单位面积的营养盐迁移量;径流量指圩区单位时间单位面积的径流量。

圩区的产流过程与非圩区存在显著差异,导致圩区污染物的迁移方式与众不同。本试验圩区一般选择在降雨的次日进行排涝,约定两个变量的计算时间为降雨产流开始到圩区开始排涝为止,时间间隔为 24 h,排涝时通过水位控制使圩区河道水位恢复至降雨前。即将圩区在降雨事件后的排涝量视为圩区的径流量。

该圩区有郭家里和吴埂上两个排涝站,按式(1)和式(2)计算营养盐迁移通量和径流量。

$$\varphi = \left[\sum_{i=1}^{N_G-1} \left(\frac{C_{G_i} + C_{G_{(i+1)}}}{2} \right) \cdot Q_G \cdot t_G + \sum_{i=1}^{N_W-1} \left(\frac{C_{W_i} + C_{W_{(i+1)}}}{2} \right) \cdot Q_W \cdot t_W \right] / (A \cdot T) \quad (1)$$

$$r = (P_G + P_W) / (A \cdot T) \quad (2)$$

式中: C_{G_i} , $C_{G_{(i+1)}}$ 为郭家里排涝站前一时刻和后一时刻径流样本中的营养盐浓度, mg·L⁻¹; C_{W_i} , $C_{W_{(i+1)}}$ 为吴埂上排涝站前一时刻和后一时刻径流样本中的营养盐浓度, mg·L⁻¹; A 为圩区面积, hm²; T 为降雨产流开始至排涝开始的时间, h; r 为径流量, mm·h⁻¹; N 为样品数量; Q_G 和 Q_W 分别为郭家里和吴埂上排涝站的排

涝流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; P_c 和 P_w 分别为郭家里和吴埂上排涝站的排涝量, m^3 。

1.4 次降雨径流平均浓度 EMC

在任意一场次降雨排涝事件中, 由于降雨强度和排涝时间的随机性变化较大, 使得径流中污染物浓度随时间呈现较大的波动。因此, 通常采用“次降雨径流平均浓度”(Event Mean Concentration, EMC) 来反映次降雨排涝事件中营养盐的平均浓度水平, 定义为一次排涝引起的某种营养盐流失量除以该次排涝的径流量, 实质上代表了污染物瞬时浓度的流量加权平均值^[9]。根据定义, EMC 等于营养盐迁移通量除以径流通量, 如式(3)所示:

$$\bar{C} = \varphi / r \quad (3)$$

式中: φ 为营养盐迁移通量, $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; r 为径流通量, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 各形态水相氮素迁移通量与径流深的关系

为了更直观地表现各形态氮素迁移通量与径流深的关系, 绘制了不同径流深下各场降雨径流事件中各氮素形态平均浓度对比图, 如图1所示。

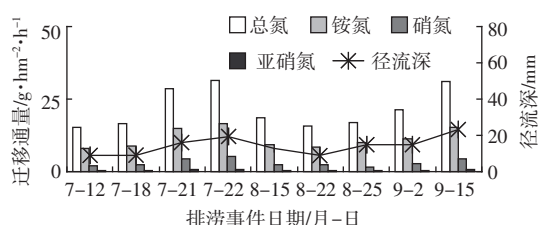


图1 不同径流深下各场降雨排涝事件后各形态氮迁移通量对比

Figure 1 Variation of nitrogen transportation fluxes under different runoff depths

由图1可见, 发生在7月22日和9月15日降雨排涝事件的径流深较大, 与之对应的氮素迁移通量显著大于其他降雨排涝事件, 说明圩区氮素迁移通量与径流深有更好的响应关系, 径流量差异是导致氮素迁移通量存在显著差异的主导因素。

通过绘制圩区水相氮素迁移通量与径流通量的散点图, 可以从总体上把握该圩区各种形态氮素的迁移特征。图2和图3分别代表圩区水相总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮的迁移通量与径流通量的相关关系。利用直线对图中的散点进行线性拟合, 得到各场降雨事件各形态氮素迁移通量与径流通量的回归方程及其相关系数。

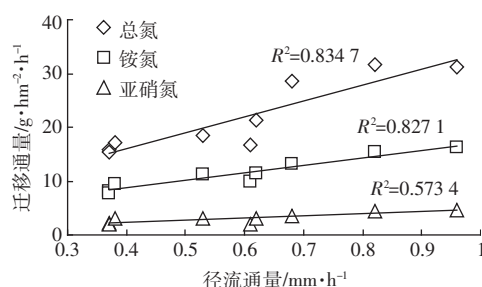


图2 水相氮素流失量与径流通量相关关系

Figure 2 Relationship between transportation fluxes of nitrogen and runoff fluxes

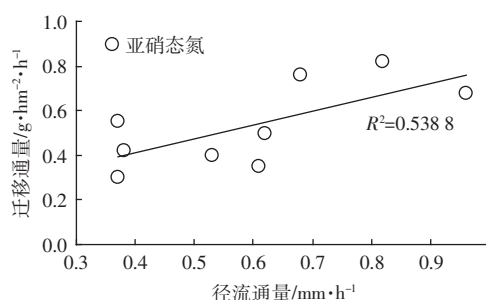


图3 水相亚硝氮流失量与径流通量相关关系

Figure 3 Relationship between transportation fluxes of nitrite nitrogen and runoff fluxes

由图2可见, 各场次水相总氮的迁移通量总体上随径流通量的增加而增加。水相总氮流失量与径流通量回归方程的相关系数最大, 达到0.835, 说明总氮流失量受其他因素的影响较小, 与径流通量表现出显著的相关性。稻季氨氮的迁移通量与径流通量也表现出较好的相关性, 相关系数达到0.827。硝态氮迁移通量与径流通量的相关系数较小, 仅为0.57, 说明硝态氮的流失量与净雨深的相关关系不显著, 可能受其他因素(施肥量、土地利用)的影响较大。由图3可见, 亚硝态氮迁移通量在3种氮素形态中最小, 与径流通量的相关系数也较小, 为0.54, 这与其化学性质不稳定, 易被氧化还原有关。

2.2 各形态水相氮素迁移通量与施肥等因素的关系

不同土壤条件、土地利用类型、耕作制度和管理水平下的野外试验结果表明, 径流中各种形态营养盐含量与土壤施肥量呈显著相关关系^[10,11], 同时, 受氨挥发、硝化等因素影响。

获泽联圩稻季4次施肥各降雨事件对应的各形态氮素径流迁移通量、施肥量、降雨与施肥的时间间隔以及径流通量见表1。

由上表可以发现同样的规律, 对于同一次施肥事件, 径流中总氮的迁移通量与径流通量、施肥量呈

表 1 圩区氮素径流量及各影响因素

Table 1 Total nitrogen runoff fluxes and its influencing factors of the polder

序号	施肥事件	降雨排涝事件	t/d	$F_N/kg \cdot hm^{-2}$	$R_o/mm \cdot h^{-1}$	$\varphi_{TN}/g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$	$\varphi_{NH_4}/g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$	$\varphi_{NO_3}/g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$
1	F1	G1	27	172.3	0.375	15.45	7.95	2.21
2	F2	G2\W1	6	56.23	0.384	16.63	8.87	2.41
3		G3\W2	9	56.23	0.682	28.54	14.98	4.39
4		G4\W3	10	56.23	0.816	31.54	16.67	5.33
5	F3	G5\W4	4	69.00	0.526	18.49	9.41	2.34
6	F4	G6	5	51.75	0.375	15.86	8.52	2.58
7		W5	8	51.75	0.605	17.04	10.08	1.45
8		G7\W6	17	51.75	0.618	21.32	11.19	2.95
9		G8\W7	29	51.75	0.963	31.12	15.37	4.54

注: t 代表降雨与施肥时间间隔; F_N 代表氮肥平均施用量; R_o 代表径流量; φ_{TN} 、 φ_{NH_4} 、 φ_{NO_3} 分别代表总氮、氨氮和硝态氮迁移通量。

正相关关系,与施肥时间 t 呈指数递减关系。利用 spss13.0 非线性回归分析得出相关关系,见式(4)~式(6)。TN 的决定系数 R^2 为 0.847, NH_4 的决定系数 R^2 为 0.849, NO_3 的决定系数 R^2 为 0.604。

$$\varphi_{TN} = [30.197 + 0.148 \times F_N \times \exp(-0.034t)] R_o^{0.969} \quad (4)$$

$$\varphi_{NH_4} = [15.562 + 0.084 \times F_N \times \exp(-0.045t)] R_o^{0.916} \quad (5)$$

$$\varphi_{NO_3} = [4.428 + 0.020 \times F_N \times \exp(-0.029t)] R_o^{1.298} \quad (6)$$

上式中: φ_{TN} 为径流中总氮的迁移通量, $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$; F_N 为最近一次施加肥料中的纯氮量, $kg \cdot hm^{-2}$; t 为最近一次施肥日期至产流当日的时长, d ; R_o 为径流量, $mm \cdot h^{-1}$; φ_{NH_4} 为径流中氨氮的迁移通量, $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$; φ_{NO_3} 为径流中硝氮的迁移通量, $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$ 。

对比式(4)~式(6)可以发现:

(1)与施肥中纯氮量 F_N 相关关系变化最为显著的为径流中 TN 的迁移通量。这主要体现在公式中的 b 项系数, TN 最大, NH_4 其次, NO_3 最小, 可见径流中 TN 的迁移通量与肥料中的纯氮量关系最为显著。

(2)与施肥至产流当日间隔天数 t 影响最为显著的是径流中 NH_4 的迁移通量。这主要体现在公式中的 c 项系数, NH_4 最大, TN 其次, NO_3 最小, 可见径流中 NH_4 的迁移通量与时间关系最为显著。

(3)与径流量 R_o 影响最为显著的是径流中的 NO_3 迁移通量。这主要体现在公式中的 d 项参数, NO_3 最大, TN 其次, NH_4 最小, 径流中的 NO_3 迁移通量与径流量关系最为显著。主要原因:土壤胶体由于巨大的比表面积和带电性使其具有了吸附性。一般情况下,除少数土壤在强酸性条件下可能显现正电荷外,大多带负电荷。由于 NH_4^+ 离子带正电,所以一般认为土壤胶体对 NH_4^+ 表现为吸附特性,不易被淋洗,在随

水下渗过程中不断被吸附,实验发现^[12]土壤胶体对 NH_4^+ 的吸附特征主要由粘粒矿物组成及其表面性质所决定,而土壤胶体对 NO_3^- 和 NO_2^- 则主要表现为解吸特性。

由上述拟合公式,可以得出如下结论:①径流量是影响氮素流失通量的关键因素;②施尿素后径流中氮素浓度达最高值,后呈下降趋势,氮素径流损失与施氮量呈显著正相关;③施肥与径流发生的时间间隔是决定径流氮损失的重要因素。该拟合公式的缺陷在于:①未考虑某次施肥前期施肥的残余效应;②未考虑某次降雨前的已发生的降雨-径流的冲刷效应。

3 结论

本研究考虑降雨及施肥对污染物迁移通量的影响,建立了太湖流域典型圩区污染物迁移通量与施肥量、降雨径流距离施肥天数以及径流量 3 因素的定量关系。得出如下规律:一次施肥后某次降雨径流产生的污染物迁移通量与时隔天数呈指数递减关系,与施肥量及径流量呈正比关系,具体关系式见式(4)~式(6)。

参考文献:

- [1] Carpenter S R, Carcao N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 559-568.
- [2] 王腊春, 彭 鹏, 周寅康, 等. 湿润地区平原圩区产流机制研究[J]. 南京大学学报, 1997, 33(1): 156-160.
WANG La-chun, PENG Peng, ZHOU Yin-kang, et al. Study on mechanism of runoff-yield in plain polders[J]. *Journal of Nanjing University (natural sciences)*, 1997, 33(1): 156-160.

- [3] 杨金玲, 张甘霖, 张 华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 16–23.
YANG Jin–ling, ZHANG Gan–lin, ZHANG Hua, et al. The impact of land uses on watershed runoff nitrogen discharge in hilly regions[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2003, 24(1): 16–23.
- [4] 梁 涛, 张秀梅, 章 申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素转移过程[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 389–396.
LIANG Tao, ZHANG Xiu–mei, ZHANG Shen, et al. Nitrogen elements transferring processes and fluxes under different land use in west Tiaoxi catchment[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4): 389–396.
- [5] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506–510.
LI Jun–ran, CHEN Li–ding, GUO Xu–dong, et al. Effects of land use structure on non–point source pollution [J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(6): 506–510.
- [6] Turner II B L. The sustainability principle in global agendas; implication for understanding land use/land cover change[J]. *The Geographical Journal*, 1997, 163(2): 133–140.
- [7] Kumar R, Ambasht R S, Srivastava A, et al. Reduction of nitrogen losses through erosion by *Leonotis nepetaefolia* and *Sida acuta* in simulated rain intensities[J]. *Ecological Engineering*, 1997, 8(3): 233–239.
- [8] 詹红丽. 大型圩区水环境随机模拟模型及应用研究[D]. 河海大学博士学位论文, 2005.
ZHAN Hong–li. Study on random model for water environment simulation and training on closed polders and its application [D]. *Hohai University*, 2005.
- [9] Thomson N R, McBean E A, Snodgrass W, et al. Sample size needs for characterizing pollutant concentrations in highway runoff [J]. *Journal of Envir Engng*, 1997, 123(10): 1061–1065.
- [10] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, et al. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff [J]. *Environ Qual*, 1999, 28(1): 170–175.
- [11] Barton A P, Fullen M, Mitchell D J, et al. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104(2): 343–357.
- [12] 张翠云, 张 胜, 贾秀梅, 等. 三氮吸附性能对比实验研究 [J]. 勘察科学技术, 2001, 6(5): 37–39.
ZHANG Cui–yun, ZHANG Sheng, JIA Xiu–mei, et al. Experimental study of comparison of absorption properties of three species nitrogens[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2001, 6(5): 37–39.