

磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程^{*}

晏维金^{**} 尹澄清 (中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

孙 濮 韩小勇 夏首先 (安徽省水文总站, 合肥 230022)

【摘要】 水稻田湿地系统是我国东南部高产农业区的主要土地利用类型, 是我国特有的景观结构. 在巢湖六叉河小流域进行的野外实验结果表明, 这一湿地系统的水塘、水沟和水稻田都能有效地截留来自村庄、森林地和旱地的磷氮非点源污染物. 实验同时研究了磷氮物质从水稻田中的径流流失方式和机理, 结果发现磷氮物质从水稻田中的径流流失量与水稻田持水量、施肥量、降雨量、水稻生长过程和水稻田排水堰高度等因素有关, 并提出了一个模型计算磷氮径流流失量, 表明在施肥情况下的磷氮流失量分别高达 0.69 和 11.2 kg·hm⁻², 是最大的潜在非点源污染.

关键词 磷 氮 水稻田 模型 非点源污染

Phosphorus and nitrogen transfers and runoff losses from rice field wetlands of Chaohu Lake. Yan Weijin, Yin Chengqing (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Academia Sinica, Beijing 100085), Sun Pu, Han Xi-aoyong, Xia Shouxian (Anhui Hydrology Service, Hefei 230022). -Chin. J. Appl. Ecol., 1999, 10(3): 312~316.

Rice field wetland system is the main land use type in the high-product agricultural watersheds of Southeast China. Field experiments show that rice fields, ditches and multipond systems can effectively retain nonpoint phosphorus (P) and nitrogen (N) pollution from different land uses in a subwatershed of Chaohu Lake. The mechanisms of P and N transfers and runoff losses from rice fields are mainly studied. By the analysis of P and N dynamics in rice fields, it was found that P and N loads in runoff were depended on field water level, applied fertilizer amount, precipitation, rice growth process, and height of field overflow mouth. A simple model was built to calculate the quantity of P and N loads in runoff from rice fields. It shows that the total loads can reach 0.69 and 11.2 kg·hm⁻² for P and N respectively under the condition of applying fertilizers, which is the potential effect on Chaohu Lake eutrophication.

Key words Phosphorus, Nitrogen, Rice fields, Model, Nonpoint pollution.

1 引言

磷(P)、氮(N)是重要的生命元素, 生命支持系统不可替代的主成分, 也是促进农业持续发展的根本要素. 环境、人口和粮食是当今人类社会面临的互相关联的三大问题. 特别是中国, 在不可能大规模扩大耕地面积而且耕地还在逐年减少的情况下, 磷氮肥料的投入是实现我国粮食增产最有效的措施之一. 但是, 磷氮肥料的投入, 带来了令人担忧的环境问题. 例如, 就非点源污染而言, 近一二十年来的研究表明, 磷氮非点源污染负荷已占受纳水体污染负荷的 50% 以上, 并对受纳水体产生严重影响^[3,4,8-10]. 农业非点源污染是最主要的非点源污染, 例如, 我国湖泊达到富营养化水体的已占 63.6%, 一些农业高产地区的湖泊如太湖、巢湖、滇池等总磷、总氮浓度分别是 80 年代初的十几倍, 其中 50% 以上的磷氮污染负荷来自农业非点源污染负荷^[12,6], 但人们对磷氮元素在特定流域的迁移转化和循环缺乏定量的数据^[12,13]. 另一方面, 在我国农业生产中, 水稻生产是最主要的生产^[1]. 我国水稻田面积占耕地面积的 26.18%, 而在南方占到 70.19%^[5]. 由

水稻田径流流失的磷氮化肥量在农业非点源污染负荷中占有非常重要的地位. 因此从我国农业持续发展和环境保护中存在的实际问题出发, 为满足不断增长的人口对粮食的需求, 而又不以牺牲环境为代价, 研究化肥中磷氮物质在水稻田中的迁移转化和径流流失机理对于非点源污染控制有重要的意义. 本文选择我国南方一典型的高产农业流域巢湖六叉河小流域进行磷氮化肥在水稻田湿地系统中的迁移转化和径流流失机理的研究.

2 研究地点和实验方法

实验研究于 1994 和 1995 年在安徽巢湖六叉河小流域进行. 该流域位于巢湖北岸(图 1), 全流域面积 7.32 km². 该流域内分布 16 个村庄, 人口约 3000 人. 小流域的社会、经济状况为典型农业群落, 和巢湖周围其它地区一样, 其农作物组成为: 油菜(小麦)-早稻-晚稻; 小麦-棉花(花生、大豆)及蔬菜. 水稻生产主要使用化肥包括碳铵、尿素和磷肥. 随着农业生产的发展, 化肥使用量迅速增长, 由 1953 年 0.45 kg·hm⁻² 增长到 1995 年

^{*} 国家自然科学基金资助项目(49371062).

^{**} 通讯联系人. 现在中国科学院地理研究所, 北京 100101.
1997-01-27 收稿, 1998-10-22 接受.

$2100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 小流域的磷氮非点源污染主要来源于化肥和村庄的粪便污染. 小流域主要土地利用类型为: 水稻田 284 hm^2 (38.8%)、旱地 229 hm^2 (31.3%)、林 131 hm^2 (17.9%)、村庄 52 hm^2 (7.1%)、水塘和水沟 35.5 hm^2 (4.9%).

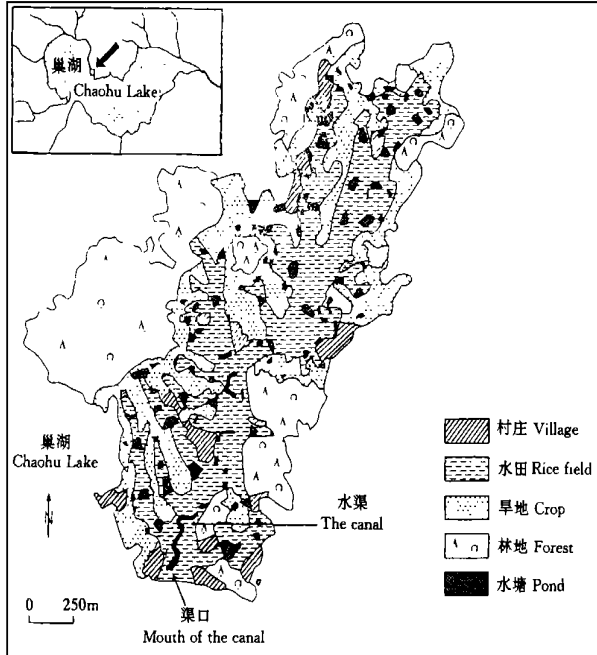


图1 小流域位置及土地利用状况

Fig.1 Location of the experimental agricultural watershed and distribution of land uses.

水稻田、水塘及连接水稻田和水塘的水沟共同构成一个农业湿地系统, 成为农业灌溉网络的组成部分. 它是我国特有的农业景观结构. 这一湿地系统占六叉河小流域土地利用类型的43.7%, 因而成为小流域主要的土地利用类型. 在这一湿地系统中, 水塘截留和储存天然降水, 水沟起到水的输送作用: 一方面, 在降水时, 水稻田由溢流产生的地表径流经水沟流到水塘储存; 另一方面, 在干旱时, 水塘的水通过水沟输送到水稻田进行灌溉. 水沟包括小水沟和大水沟, 在低水位情况下, 水主要经过小水沟; 在高水位情况下, 水通过大水沟. 水在水稻田-水沟-水塘湿地系统中的动态过程如图2所示.

实验共选择水塘2个, 水塘间的大、小水沟各1个及水稻田1块. 大水沟沟长250m, 沟底平均宽3.2m, 沟内有生长正常的菖蒲; 小水沟沟长200m, 宽0.35m, 沟内有生长正常的草地. 大、小水沟两端均用土坝垒堰, 出水口端留孔让水向外流动. 实验选择的两个水塘的面积分别为 840 m^2 和 710 m^2 , 平均水深分别为1.5m和1.7m. 水稻田面积为 267 m^2 , 水稻田在插秧后的第10天进行实验, 水稻秧生长良好. 水稻田保持水深0.07m. 实验开始前, 分别配制一定量的碳酸氢氨和过磷酸钙经溶解后均匀洒入水塘, 使水塘的总磷和总氮浓度均在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 然后开始用水泵向大小水沟灌水, 小水沟的水再流向实验的水稻田. 实验选择发生频率较高的中等以下水文条件, 即保持大水沟平均水深0.7m, 流量控制为 $0.04\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; 保持小水沟水深0.15m, 流量控制为 $0.005\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. 水稻田人工灌溉溢流模拟100mm降雨量. 当水稻田水深达到0.07m时, 开始向水稻田均

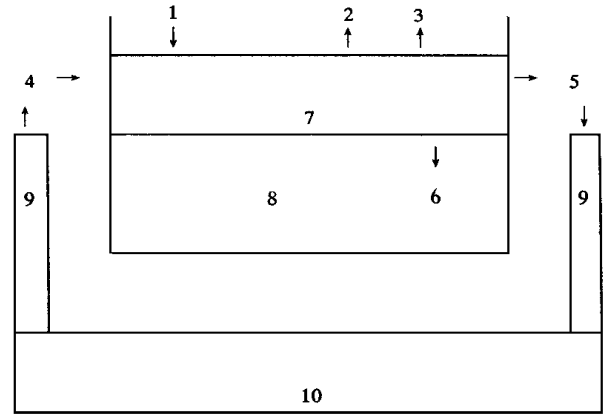


图2 水在水稻田湿地系统中的动态过程

Fig.2 Water dynamic processes in rice field wetland system.

1) 降雨 Rainfall, 2) 蒸发 Evaporation, 3) 蒸腾 Transpiration, 4) 灌溉 Irrigation, 5) 径流 Runoff, 6) 下渗 Seepage, 7) 水稻田水层 Water layer in rice field, 8) 水稻田土层 Soil layer of rice field, 9) 水沟 Ditch, 10) 水塘 Water pond.

匀洒入液体碳酸氢氨和过磷酸钙, 使总磷和总氮浓度分别达100和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 在连续灌溉9h后开始采样, 大水沟样品采自0(入口)、50、100、150、200、250m(出口); 小水沟样品采自0(入口)、25、50、75、100、125、150、175、200m(出口); 水稻田水样采自表层水, 水塘水样采自表层水和0.5m深以下水等量均匀混合. 水稻田磷氮径流流失量的实验包括施肥后人工灌水溢流实验和天然降雨溢流实验, 分别测定了6月20日114mm和6月22日30mm降雨时水稻田地表径流的磷氮流失量. 水样采集后2h内在附近实验室进行处理, 总磷和总氮用过硫酸钾氧化后^[11]用标准方法测定^[7].

3 结果与讨论

3.1 磷氮元素在水稻田湿地系统中的迁移转化

磷氮物质在水稻田湿地系统中的浓度随时间有明显变化. 图3、4分别表示磷氮在水塘、大小水沟和水稻田中的浓度变化. 其中总氮、铵态氮和总磷的浓度明显下降, 但硝态氮浓度上升. 氮在水稻田-水塘湿地系统中的变化主要受植物吸收、挥发、硝化和反硝化的影响. 碳酸氢氨施入水中后, 一部分挥发, 一部分转变为液相氨, 并为植物吸收, 还有一部分转化为硝态氮, 这种转化一般在5~6d内完成. 而硝态氮不易被土壤吸收, 很容易迁移, 从而随降雨-径流流失或通过反硝化减少. 氮在水稻田湿地系统中的这种迁移转化过程是总氮浓度下降的主要原因. 与氮相比, 磷的迁移转化主要是通过吸附作用进行的. 在淹水情况下, 水中颗粒或土壤对磷的吸附量增加, 从而使得总磷浓度下降. 由图3、4可知, 水稻田湿地系统对磷氮物质有明显的截留作用. 表1总结了水稻田湿地系统中不同结构对磷氮物质的截留效果. 这种截留效果从能量的角度来分析, 表现为小流域内任一水平点磷氮物质的流动主要是该

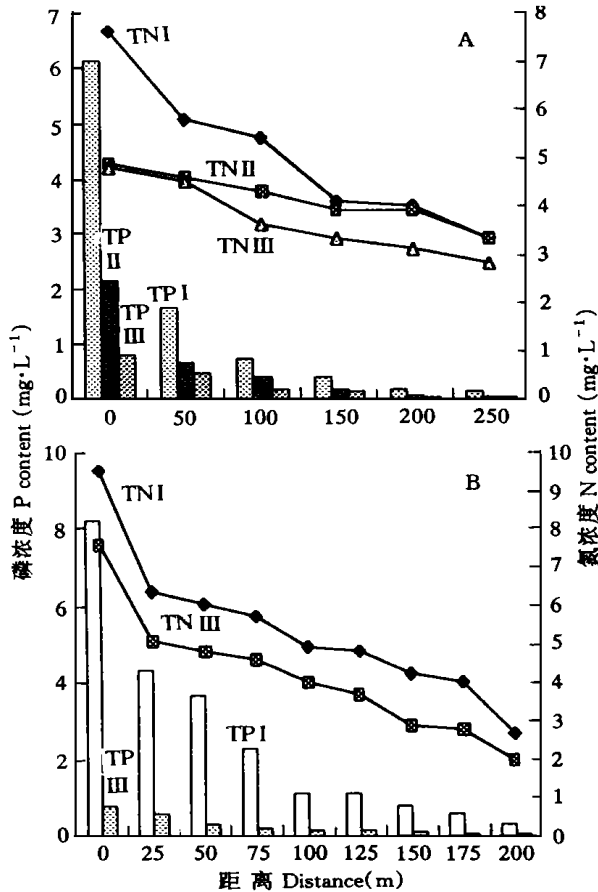


图3 磷氮经过250m大小沟(A)和200m小水沟(B)的浓度变化
Fig. 3 Changes of P & N concentration along large and small ditch.
· 灌水后第1d, · 灌水后2d, · 灌水后3d after influent.

表1 水稻田湿地系统对磷氮的截留率

Table 1 P and N retention rate by rice field wetland system

湿地系统种类 Type of wetland	长(宽)度 Length (width) (m)	污染物 Pollutants	初始浓度 Init. conc. (mg L ⁻¹)	截留率 Retention rate (%)
小水沟 Small ditch	200	TP	8.11	97.2
大水沟 Large ditch	250	TN	9.38	69.9
水塘 Water pond	34	TP	6.22	94.8
水稻田 Rice field	56	TN	7.56	57.3
		TP	8.65	95.0
		TN	12.26	73.4
		NH ₄ ⁺ -N	9.52	87.7
		TP	12.23	98.2
		TN	71.85	93.3
		NH ₄ ⁺ -N	68.3	98.3

点地表的位能,流经该点地表的水流动能和此种磷氮化合物的自由能的函数,并且与该点附近水平点的上述能量值有关.此种磷氮化合物的自由能主要决定于该点该物质化学平衡浓度和该点的氧化还原电位(或吸附能).在该小流域5种不同土地利用类型中,其能量的大小比较如下:1)位能:森林>旱地>村庄>水稻田>水塘,2)水流动能:村庄>裸旱地>森林>水稻田>水塘,3)物质自由能:村庄>水稻田>旱地>水塘>森林.由此可知,水塘具有较低的位能和水流动能,表现为较大的净输入,即对磷氮物质的截留作用;水稻田

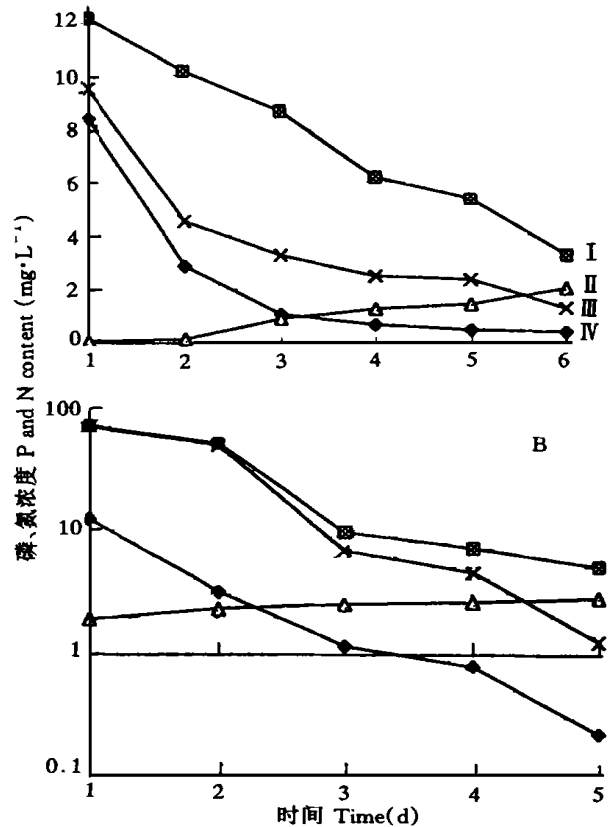


图4 磷氮在水塘和稻田中的浓度变化

Fig. 4 Changes of P & N concentration in pond and rice field.
· TN, · NO₃-N, · NH₄⁺-N, · TP.

具有较大的位能和水流动能,但具有较高的物质自由能,在不同的情况下表现为输入或输出:一方面,在六叉河小流域,由于水稻田位能低,来自森林、旱地和村庄等不同地块的污染物随地表径流以串流或汇流的方式重新流入水稻田,并在水稻田中稀释,或被土壤吸附固定,或被水稻植物吸收,因而水稻田能截留别的地块产生的磷氮污染物,表现为输入;另一方面,水稻田在施肥后又是最大污染源,表现为输出.因此,水稻田具有双重的性质.水稻田湿地系统的这种双重性质对于非点源污染的产生和控制具有重要作用.

3.2 磷氮在水稻田中的径流流失机理

水稻田磷氮的流失途径有两种:降雨引起的径流流失和农田排水流失.水稻田常年储水,土壤含水量处于饱和状态,田间持水量不仅包括土壤田间持水量,还包括水稻田允许水深(取决于水稻田排水堰高度).当降雨使水稻田的储水量大于田间持水量时产生径流,从而使磷氮物质流失.由于降雨和径流是随机的过程,往往难以控制,而农田排水可人为控制,且流量较小,因此,水稻田磷氮流失主要是指径流流失.由于水稻生长的田间管理要求,水稻在不同的生长期内要求不同的水深,因此,水稻田在不同的生长期内持水量各不相

表 2 水稻耕作生长过程及相应的田间水深
Table 2 Processes of rice cultivation and the corresponding water depth

早稻时间	11.1~4.25	4.25~5.1	5.1~5.10	5.10~5.25	5.25~6.25	6.25~7.5	7.5~8.1
晚稻时间			8.1~8.7	8.7~8.20	8.20~9.20	9.20~10.5	10.5~10.31
生长阶段	旱作物	准备	插秧和返青	分蘖	稻穗分化	抽穗灌浆	成熟收割
Growing period	Crops	Preparation	Planting	Tillering	Developing	Tasseling	Harvest
田间水深	0.0	0~15	50~70	20~40	0~20	30	0~10
Water depth of rice field(mm)							
时段	175	5	7~10	13~15	31	10~15	26
Date (d)							

同.表 2 表示水稻耕作过程及水稻生长过程,在不同的过程有不同的田间允许水深.水稻田磷氮径流流失量主要决定于降雨量,田间水深和水稻田水层中磷氮浓度,并可通过降雨-地表径流来测定.水稻田的降雨-径流过程由于排水堰的高度而分为 3 个状态:初始状态、临界状态和径流状态(图 5).

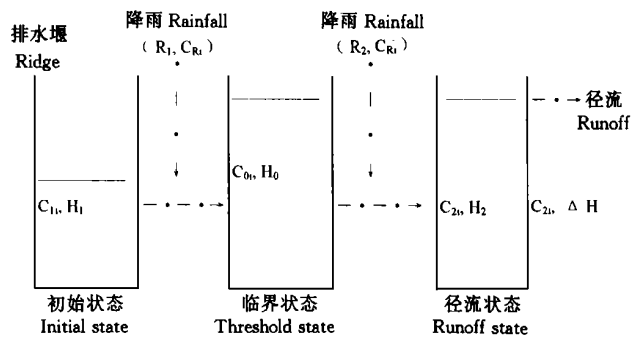


图 5 水稻田降雨-径流过程
Fig. 5 Rainfall-runoff process of rice field.
 H_0 :临界状态时水稻田水层高度,此时开始产生径流,它由排水堰高度决定(m), C_{1i} :降雨开始时水稻田水层的磷氮浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), H_1 :初始状态时(降雨前)水稻田水层高度(m), C_{Ri} :雨水中磷氮浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), R_1 :使水层达到临界状态时的降雨水深(m), C_{0i} :达到临界状态时水稻田水层的磷氮浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), R_2 :达到临界状态后的持续降雨水深(m), H :在降雨水深 R_2 的情况下产生的径流水深(m), C_{2i} :径流水中磷氮浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), H_2 :整个降雨水深(m), $H_2 = R_1 + R_2 = H_0 + H$.

在降雨 R_1 情况下,水稻田由初始状态达到临界状态,水稻田水层由 H_1 达到 H_0 ,这时水稻田没有径流,水稻田水层磷氮浓度计算如下:

$$C_{0i} = (C_{1i}H_1 + C_{Ri}R_1) \div H_0$$

表 3 不同降雨和施肥情况下水稻田磷氮径流流失量
Table 3 P and N loss amount in runoff from rice field under different conditions

降雨日期	5月27日	6月20日	6月22日
Date of rainfall	May 27	June 20	June 22
降雨量 Depth of rainfall (m)	0.10 *	0.114	0.03
施肥情况 Fertilizer condition	施肥 Fertilizer	未施肥 No fertilizer	未施肥 No fertilizer
水稻田持水量 Water depth in initial state(m)	0.07	0.03	0.103
降雨中磷(氮)浓度 P(N) conc. in rainfall ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.21(1.87)	0.06(0.31)	0.06(0.31)
排水堰高度 Water depth at which runoff occur(m)	0.126	0.126	0.126
达到临界状态时降雨量 Rainfall depth at which runoff occur(m)	0.056	0.096	0.023
产生径流的降雨量 Rainfall depth after runoff(m)	0.044	0.018	0.007
降雨前水稻田磷(氮)浓度 Initial P(N) conc. in rice field($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.08(52.15)	0.38(3.42)	0.18(2.96)
磷(氮)流失量 P (N) Loss amount ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	0.69(11.2)	0.024(0.18)	0.011(0.17)

* 用人工灌溉模拟降雨.

在降雨 R_2 情况下,水稻田由临界状态达到径流状态,这时降雨和径流同时发生.假定降雨和水稻田水均匀混合,径流水中磷氮浓度计算如下:

$$C_{2i} = (C_{Ri}H + C_{0i}H_0) / (H_0 + H)$$

因此,水稻田瞬间磷氮径流流失量为:

$$Q_i = A \times H \times C_{2i}$$
$$= A \times H \times (C_{Ri}H + C_{0i}H_0) / (H_0 + H)$$

式中, A 为水稻田面积(hm^2).

其累积磷氮径流流失量为:

$$Q_i = \int_0^{R_2} C_{2i} \times dH$$

通过求积分得:

$$Q_i = A [C_{Ri}R_2 + (C_{1i}H_1 + C_{Ri}R_1 - C_{Ri}H_0) (1 - e^{-R_2/H_0})]$$
$$= A [C_{Ri}R_2 + (C_{1i}H_1 - C_{Ri}H_1) (1 - e^{-R_2/H_0})]$$
$$= A [C_{Ri}R_2 + H_1 (C_{1i} - C_{Ri}) (1 - e^{-R_2/H_0})]$$
$$Q_i = A [C_{Ri}R_2 + H_1 (C_{1i} - C_{Ri}) (1 - e^{-R_2/H_0})]$$

即为水稻田在降雨-径流情况下的磷氮流失量模型.很显然,水稻田磷氮流失量由水稻田面积、水稻田持水量、施肥、降雨量及排水堰等因素决定.进一步,在水稻田面积和降雨量确定的情况下,磷氮流失量由施肥量、水稻田持水量和排水堰高度三者决定,而这三者最终由水稻耕作和生长过程决定.由图 3、4 知,水稻田在插秧、返青和抽穗灌浆等阶段田间持水量较大,水深达 30~70mm,因此,这时由降雨产生的径流量也大,因而磷氮流失量大;同时根据水稻生长需要,一般在插秧前一天和插秧后的第 10 天施肥两次,这时水稻田水层

中磷氮浓度较大,由图 3、4 可知,其磷氮浓度分别为 $0.2 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.因此,在插秧后的 15d 内由降雨产生的磷氮径流流失量最大.

运用模型 $Q_i = A [C_{Ri} R_2 + H_1 (C_{1i} - C_{Ri}) (1 - e^{-R_2/H_0})]$ 计算野外两次降雨和一次施肥模拟实验,其磷氮径流流失量计算结果列于表 3.由表 3 可知,在施肥情况下人工灌溉模拟水稻田磷氮径流流失量分别为 0.69 和 $11.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是不施肥情况下的 $10 \sim 30$ 倍.因此,水稻田在施肥情况下是最大的非点源污染源.此外,水稻田磷氮径流流失量还与水稻秧的高度和密度有关.显然,在插秧初期,水稻秧密度较疏,高度较低,降雨雨点打击土壤表层的冲量大,溅起土壤颗粒,使细小颗粒悬浮在水中,因而水中的磷氮浓度高,径流流失量大.综上所述,在水稻插秧后的 15d 内,磷氮径流流失量是最大的潜在污染源.

4 结 论

4.1 通过对六叉河小流域水稻田-水塘湿地系统的野外研究发现水稻田具有双重的性质:一方面,水稻田湿地系统能有效地截留磷氮非点源污染,在中等水文条件下,这一湿地系统中的水沟、水塘和水稻田对总磷和总氮的截留率分别在 90% 和 50% 以上;另一方面,水稻田本身又是一个潜在的污染源.

4.2 水稻田非点源污染主要是由降雨引起的磷氮径流流失.通过分析水和磷氮在水稻田中的动态过程,发现水稻田磷氮径流流失量决定于施肥量、水稻田持水量、降雨量、水稻生长过程和排水堰高度等因素.

4.3 水稻田磷氮径流流失量可通过模型 $Q_i = A [C_{Ri} R_2 + H_1 (C_{1i} - C_{Ri}) (1 - e^{-R_2/H_0})]$ 来进行定量计算.

野外实验结果表明在施肥情况下,水稻田磷氮流失量分别高达 0.69 和 $11.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是不施肥情况下的 $10 \sim 30$ 倍.因此,化肥使用量是造成水稻田非点源污染的主要因素,尤其是在水稻生长的前 15d 内.

参考文献

- 1 丁 颖. 1962. 中国水稻栽培学. 北京: 农业出版社.
- 2 马立珊. 1992. 苏南太湖水系农业非点源污染及其控制对策. 应用生态学报, 3(4): 346 ~ 354.
- 3 包锡南. 1992. 美国非点污染源及其治理对策. 国外农业环境保护, (3): 3 ~ 6.
- 4 吴炳方. 1991. 水田植物营养素的流失和控制措施. 环境科学, 12(3): 88 ~ 91.
- 5 沈 冰、王全九、李怀恩等. 1995. 土壤中农用化合物随地表径流迁移研究述评. 水土保持通报, 15(3): 1 ~ 7.
- 6 屠清瑛、顾丁锡、尹澄清等. 1990. 巢湖富营养化研究. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 7 American Public Health Association. 1986. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16th ed.
- 8 Canter, L. W. 1986. Environmental impacts of agricultural production activities. Lewis Publishers, Inc.
- 9 Coote, D. R., MacDonald, E. M. and Dickinson, W. T. et al. 1982. Agriculture and water quality in the Canadian Great Lakes Basin I. Representative agricultural watersheds. J. Environ. Qual., 11: 473 ~ 481.
- 10 Donigan, Jr. A. S. and Huber, W. C. 1991. Modeling of nonpoint source water quality in urban and non-urban areas. EPA/600/3-91/039, Washington: USEPA.
- 11 Ebina, J., Tsutsui, T. and Shirai, T. 1983. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidation. Water Res., 17: 1721 ~ 1726.
- 12 Jorgensen, S. E. and Mitsch, W. J. 1983. Application of ecological modeling in environmental management, part B. Elsevier Scientific Publishing Company.
- 13 Tiessen, H. 1995. Phosphorus cycles and transfers in the global environment. SCOPE, Newsletter, 47: 1 ~ 4.

作者简介 晏维金,男,33岁,副研究员,博士后,从事环境生物地球化学等学科研究.已在国际SCI刊物发表论文3篇,国内核心刊物发表论文6篇.