

水-土耦合的稻田磷素动态流失模型

王 鹏, 姚 琪, 韩龙喜, 丁训静

(河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 磷是湖泊富营养化的限制性因子, 稻田排水损失是磷素的重要来源. 为了精确计算稻田磷素损失量, 从质量守恒原理出发, 考虑土壤磷的矿化和固定、淋溶、水稻吸收等作用, 结合土壤胶体对磷的吸附-解吸速率公式, 建立了水-土耦合的稻田磷素动态模型, 并采用田间实测数据对模型参数进行了率定和验证, 同时还对关键参数进行了灵敏性分析. 计算结果表明, 模型能较好地模拟田面水及渗漏水中溶解态无机磷(DIP)浓度的动态变化.

关键词 稻田; 磷损失模型; 吸附速率; 解吸速率

中图分类号: X531 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2005)01-0001-05

我国农业, 大多数地区还是粗放型管理, 没有达到测土施肥、施药和科学管理的程度. 特别是为了取得连续稳定的高产, 大量增加化肥施用量, 从而导致土壤养分富集. 这些养分随降雨和径流迁移至水体, 会造成水体富营养化. 研究表明^[1-5], 磷素是水体富营养化的限制性因子. 为了估算由稻田排水以及渗漏引起的磷素损失, 需建立水-土耦合的稻田磷素动态流失模型.

描述磷素运移过程的传统方法是根据土壤溶质运移原理建立垂向一维土壤水分和磷素运移基本方程, 再用该方程动态模拟土壤中水分及磷素的运移转化. 虽然土壤水动力学模型能够在更短的时间和更小的空间尺度上模拟土壤养分和水分的动态变化, 但水动力学模型参数较多, 难以大范围推广, 而且描述水分运移的基本方程为非线性偏微分方程, 需用数值方法求解, 计算工作量大. 本文从质量守恒原理出发, 综合考虑土壤磷素矿化和固持、磷素的淋溶渗漏、作物根系的吸收、磷素与土壤胶体间的吸附-解吸等作用, 动态模拟土壤耕层及田面水中溶解态无机磷(DIP)的运移和转化及随稻田排水和渗漏的流失量.

估算流域中的稻田磷素损失是估算面污染源的重要组成部分, 为了定量计算稻田排水的产污量, 需要从稻田土壤中磷素和水分的运移和转化出发, 建立简单实用、机理明确的磷素和水分平衡模型. 稻田土壤中磷素的运移和转化发生在田面水和土壤中, 主要包括大气干湿沉降、土壤胶体的吸附和解吸、磷素淋溶渗漏、田面水排水损失、作物吸收、土壤磷素矿化和固持等. 在稻田土壤水分运移方面主要考虑降水、灌溉、蒸腾蒸发、田间渗漏、田面排水 5 个因素.

由于水稻是浅根作物, 92% 的根群集中在土壤耕层 0~20 cm 深度内, 所以模型的研究范围包括田面水和土壤耕层(0~20 cm), 模拟时间为从水稻移栽到成熟期. 由于 DIP 可被生物直接利用, 是湖泊富营养化的限制性因子, 所以动态模拟的水质指标定为溶解态无机磷质量浓度 $\rho(\text{DIP})$.

1 土壤磷素和水分的运移和转化

1.1 稻田土壤磷素的运移和转化

1.1.1 湿沉降

大气的湿沉降是指随降水带入稻田的磷素. 对苏南太湖地区降水的监测分析表明, 降水中磷的质量浓度为 0.014~0.023 mg/L^[6]. 根据地表水环境质量标准中湖、库 TP 的标准限值, 降水可达到 II 类水的要求. 由此可见, 苏南太湖地区随降水带入稻田的磷的质量浓度不高.

由于降水中磷的质量浓度不高, 而且其变化也不大, 所以模型中取降水中磷的质量浓度的平均值作为湿

沉降中 DIP 的质量浓度.

1.1.2 土壤胶体的吸附和解吸

土壤胶体,由于巨大的比表面积和带电性使其具有吸附性.吸附等温线可用来描述吸附达到平衡时,颗粒物表面的吸附量与溶液中溶质平衡浓度间的关系.常用的等温线有 Henry 型、Freundlich 型和 Langmuir 型 3 种,其中 Langmuir 方程在土壤胶体对离子吸附的研究中应用较为广泛.由于磷肥施入土壤后很快被吸附到土壤胶体表面与土壤中的 Fe、Al、Ca 等离子生成难溶的磷酸盐,使得磷易被土壤吸附而固定下来,不易被淋溶^[7].研究发现^[8~10],淹水还原条件下,由于形成的 Fe^{3+} - Fe^{2+} 混合氢氧化物具有比 Fe^{3+} 氢氧化物更大的比表面积和更多的磷吸附位,大部分水稻土对磷的固定能力较淹水前有所提高.

以往有关土壤胶体对离子的吸附研究主要集中于平衡状态下吸附量与溶液平衡浓度的相关关系.本文从吸附-解吸的动态观点出发,将吸附-解吸速率公式引入模型.根据 Langmuir 单分子层吸附理论,则吸附-解吸速率由下式决定:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k_a \rho_a (M_m - M) - k_d M \quad (1)$$

式中: M ——单位质量吸附剂的实际吸附量; M_m ——单位质量吸附剂的表面覆盖满单分子层吸附分子时的最大吸附量; k_a ——吸附速度常数; ρ_a ——溶液中吸附分子的质量浓度; k_d ——解吸速度常数; t ——时间.

由于土壤胶体的吸附-解吸发生在水土界面和土壤中,所以模型考虑 DIP 在水土界面处和随水下渗过程中的吸附和解吸作用.

1.1.3 磷素淋溶

稻田土壤中的磷也可以随水淋溶,但实验^[11~13]表明,除了过量施肥的土壤或对磷吸持能力较弱的砂质土壤外,稻田淋溶水中磷的质量浓度很低且变化不大,即磷肥施入土壤后易被固定,随水淋溶流失的可能性很小.

模型中的淋溶损失是指水分通过耕层土壤间隙时,在土壤胶体吸附-解吸和水稻吸收的作用下,耕层(20 cm)界面处淋溶水中磷素的损失.

1.1.4 水稻吸收

作物生长所需的磷源主要来源于土壤和肥料,部分来自降水和灌溉水.刘德林^[14]应用放射性 ^{32}P 示踪技术研究了杂交水稻的吸磷特性,发现稻株全生育期吸磷总量的约 20% 来自肥料,剩余 80% 来源于土壤.磷肥的当季表观利用率大多在 10% ~ 25% 之间,剩余的磷肥在土壤中积累起来^[15].

1.1.5 土壤磷素矿化和固定

磷素矿化是指土壤中的有机磷在微生物作用下分解成无机磷的过程.已矿化的无机磷或施入土壤的磷肥很快被吸附到土壤胶体表面与土壤中的 Fe、Al、Ca 等离子生成难溶的磷酸盐,使得土壤中的有效磷转化为无效态磷.这些无效态磷在作物根系分泌的有机酸作用下可提高磷的有效性^[16,17].

为了反映上述转化效果,模型中磷素的矿化和固定过程用一级反应动力学模式来模拟.

1.2 稻田土壤水的运移

1.2.1 降水和灌溉

降水和灌溉是稻田生长的水分来源,不同生育期的水稻有不同的适宜水深上限 h_u 、下限 h_b 以及耐淹水深 h_m .根据田面水深与三者间的相互关系模拟田面水的排灌. $h_1 > h_m$ 时稻田排水,若 $(h_1 - h_m)/t > R_{dm}$,则排水速率 $R_d = R_{dm}$;若 $(h_1 - h_m)/t < R_{dm}$,则排水速率 $R_d = (h_1 - h_m)/t$. $h_u < h_1 < h_m$ 时稻田排水,若 $(h_1 - h_u)/t > R_{dm}$,则排水速率 $R_d = R_{dm}$;若 $(h_1 - h_u)/t < R_{dm}$,则排水速率 $R_d = (h_1 - h_u)/t$. $h_b < h_1 < h_u$ 时稻田不排灌, $R_d = h_i = 0$. $h_1 < h_b$ 时稻田灌溉,灌溉深度 $h_i = (h_u + h_d)/2 - h_1$.其中: h_1 、 h_u 、 h_b 、 h_m 、 h_i 分别为田面水深、适宜水深上限、适宜水深下限、耐淹水深和灌溉水深; R_d 、 R_{dm} 分别为实际排水速率、最大排水速率.

田面水水深 h_1 由下式求得.

$$h_1(t) = h_1^0 + h_i + (R_r - R_d - R_a - R_e - R_l)t \quad (2)$$

式中: $h_1(t)$ —— t 时刻田面水深度; h_1^0 ——初始时刻田面水深度; R_r 、 R_a 、 R_e 、 R_l ——降水强度、叶片蒸腾速率、棵间蒸发速率及渗漏速率.

1.2.2 蒸腾蒸发和田间渗漏

水稻田间耗水量包括水稻需水量(蒸腾蒸发量)和田间渗漏量两大部分. 水稻需水量又分为水稻叶片蒸腾和棵间蒸发, 它随生育期的不同而变化. 地区差异也十分明显. 总得来说, 需水量随时间呈现由小到大, 再由大到小的变化规律. 文献 [18] 给出了水稻生育期每日的叶片蒸腾和棵间蒸发量.

稻田渗漏量与土壤质地、土壤结构、地下水位、田面水层深浅及边界条件密切相关. 饱和条件下, 土壤中的水分运动符合达西定律. 田间试验结果^[19]表明, 苏南地区整个稻季稻田的渗漏强度在 233 ~ 426 mm 之间.

1.3 模型建立

从质量平衡观点出发, 根据上述每个环节的特点建立稻田磷素运移转化模型, 以从宏观上预测稻田磷素随排水的流失量. 对于田面水中的 DIP, 考虑磷肥溶解、吸附-解吸以及田面水蒸发、渗漏、降水、灌溉和排水等因素, 建立了平衡方程

$$\frac{d(h_1\rho_1)}{dt} = R_i\rho_i + R_r\rho_r - (R_d + R_a + R_l)\rho_1 - [k_{a1}\rho_1(M_{m1} - M_1) - k_{d1}M_1]\rho_s h_{us} + 100F_p \quad (3)$$

式中: ρ_1 ——田面水 DIP 的质量浓度, mg/L; R_i ——灌溉速率, mm/h; ρ_i ——灌溉水中 DIP 的质量浓度, mg/L; ρ_r ——降水中 DIP 的质量浓度, mg/L; M_{m1} ——表层土壤对 DIP 的最大吸附量, g/kg; M_1 ——表层土壤吸附的 DIP, g/kg; k_{a1} ——表层土壤对 DIP 的吸附速度常数, $m^3/(g \cdot h)$; k_{d1} ——表层土壤对 DIP 的解吸速度常数, 1/h; ρ_s ——土壤体积质量, kg/m^3 ; h_{us} ——与田面水发生吸附-解吸的表层土壤厚度, mm; F_p ——单位时间单位面积施肥量, $kg/(hm^2 \cdot h)$.

由于水稻生长期处于淹水状态下, 土壤耕层含水率变化不大, 所以模型忽略含水率随时间的变化, 对于土壤孔隙水中的 DIP, 考虑田面水下渗、作物吸收、吸附-解吸等因素, 则

$$h_w = 0.01 h_s k_w \quad (4)$$

$$h_w \frac{d\rho_2}{dt} = (R_a + R_l)\rho_1 - R_l\rho_2 - 100M_p - [k_{a2}\rho_2(M_{m2} - M_2) - k_{d2}M_2]\rho_s h_s \quad (5)$$

式中: ρ_2 ——土壤耕层孔隙水 DIP 的质量浓度, mg/L; h_w ——土壤耕层含水量, mm; h_s ——与孔隙水发生吸附-解吸的耕层土壤厚度, mm; k_w ——土壤耕层含水率(容积百分比), %; M_p ——水稻对土壤耕层 DIP 的吸收速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$; M_{m2} ——耕层土壤对 DIP 的最大吸附量, g/kg; M_2 ——耕层土壤吸附的 DIP, g/kg; k_{a2} ——耕层土壤对 DIP 的吸附速度常数, $m^3/(g \cdot h)$; k_{d2} ——耕层土壤对 DIP 的解吸速度常数, 1/h.

对于表层和耕层土壤表面吸附的磷素, 考虑有机磷矿化和固定、吸附-解吸等因素, 则方程为

$$\frac{dM_1}{dt} = k_{m1}N_{m1} - k_{f1}M_1 + k_{a1}\rho_1(M_{m1} - M_1) - k_{d1}M_1 \quad (6)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = k_{m2}N_{m2} - k_{f2}M_2 + k_{a2}\rho_2(M_{m2} - M_2) - k_{d2}M_2 \quad (7)$$

式中: N_{m1} , N_{m2} ——表层和耕层土壤磷的矿化势, g/kg; k_{m1} , k_{m2} ——表层和耕层土壤磷的矿化速率常数, 1/h; k_{f1} , k_{f2} ——表层和耕层土壤磷的固定速率常数, 1/h.

式(3)~(7)构成了相互耦合的非齐次常微分方程组, 直接求解较为困难, 故本文采用隐式离散的数值方法进行求解.

2 结果与讨论

2.1 参数率定

为了较准确地确定参数的取值, 先采用文献 [8, 20~22] 所列试验数据初步确定各参数取值范围, 再结合田间试验^[13]C2 处理(施过磷酸钙 60 kg/hm²)的实测数据对参数进行率定.

2.2 模型验证

采用田间试验^[13]C3 处理(施过磷酸钙 75 kg/hm²)的实测数据对模型进行验证, 结果如图 1 所示.

由图 1 可见, 模型较好地模拟了田面水 DIP 浓度的变化规律. 根据计算, 实测值与模拟值的相对误差在 21.8% 以内.

2.3 水田磷素损失

建模的目的是为了预测稻田磷素在田面排水及渗漏两种情况下的损失量. 为了比较施肥量对磷素损失量的影响程度, 表1列出了4种施肥条件下的磷素损失量.

由表1可见, 各种磷素损失量随施肥量的增加略有增加, 其中渗漏是水田磷素损失的主要途径, 其次是田面排水损失. 造成渗漏损失大于排水损失的主要原因有两个: 一是渗漏水量显著大于排水量; 二是排水发生时, 田面水 DIP 质量浓度与 20 cm 渗漏水 DIP 质量浓度差别不大. 总损失量随施肥量变化不大主要是因为试验选择了太湖地区有代表性的普通铁渗水耕人为土(黄泥土)作为供试土壤, 而黄泥土在淹水条件下对磷有很强的吸持能

表1 不同施肥条件下稻田 DIP 损失量

Table 1 DIP loss in paddy field under different amounts of fertilizer

施肥量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	排水损失量/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	渗漏损失量/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	总损失量/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)
45	20.584	114.129	134.713
60	21.998	113.249	135.247
75	23.454	112.668	136.122
90	24.806	113.730	138.536

本文以 $60\text{ kg}/\text{hm}^2$ 施肥水平为研究方案, 改变参数取值, 分析了其对磷素损失的影响程度, 结果见表2.

表2 模型参数敏感性分析

Table 2 Sensitivity analysis of the model

参数名	参数值	排水损失量/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	渗漏损失量/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	总损失量/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	总损失量偏差/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	偏差百分比/ %
矿化速率常数	0.00040 h^{-1}	21.998	113.249	135.247	0	0
	0.00032 h^{-1}	19.379	94.445	113.824	-21.423	-15.84
	0.00048 h^{-1}	24.280	129.827	154.107	18.860	13.94
固定速率常数	0.0020 h^{-1}	21.998	113.249	135.247	0	0
	0.0016 h^{-1}	30.936	143.400	174.336	39.089	28.90
	0.0024 h^{-1}	16.866	92.838	109.704	-25.543	-18.89
渗漏速率	$5.0\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$	21.998	113.249	135.247	0	0
	$4.0\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$	20.288	90.502	110.790	-24.457	-18.08
	$6.0\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$	20.040	136.039	156.079	20.832	15.40

由表2可见, 减小矿化速率常数可减少 DIP 的矿化量, 从而减少磷的排水和渗漏损失量; 减小固定速率常数使得 DIP 的固定速率降低, 从而增加了磷的排水和渗漏损失量; 减小渗漏速率使得稻田的渗漏量降低, 从而减少了磷的渗漏损失量. 3个参数中, 固定速率常数敏感性最强, 对计算结果影响最大. 计算结果表明, 灌溉制度对稻田排水损失也有较为显著的影响, 若在施肥期排水, 则磷素排水损失会显著增大. 因此, 合理安排灌溉制度对减少磷素流失有积极意义.

3 结 论

- 稻田磷素动态流失模型能较好地定量预测田面水 DIP 质量浓度的变化特征.
- 各种磷素损失量随施肥量的增加略有增加, 由于渗漏水量大于排水量, 而且排水发生时田面水与 20 cm 渗漏水 DIP 质量浓度差别不大, 所以渗漏是水田磷素损失的主要途径.
- 固定速率常数敏感性最强, 对计算结果影响最大.
- 由于施肥期排水会使磷素排水损失显著增大, 所以合理安排灌溉制度对减少磷素流失有积极意义.

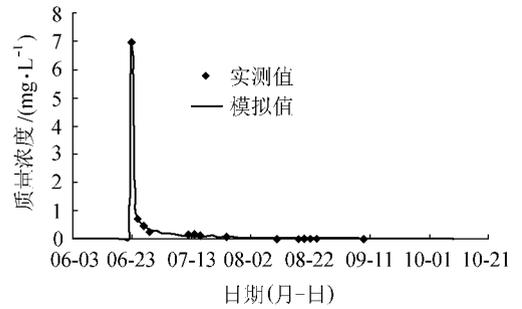


图1 田面水 DIP 的质量浓度实测值与模拟值的比较

Fig.1 Measured and simulated data of DIP concentration in field surface water

力^[8,13,20], 肥料施入后, 溶解于田面水中的磷酸盐大量被吸附, 所以田面水的 DIP 质量浓度会在短时间内迅速下降, 从而导致总损失量随施肥量的变化不大. 田间试验^[13]表明, 稻田渗漏水中 TP 质量浓度很低, 含量变化不大, 几乎不受施肥量的影响.

2.4 灵敏性分析

通过灵敏性分析可找出对磷素损失量影响较大的关键参数, 从而可为减少稻田磷素损失量提供定量依据. 本

参考文献:

- [1] 陈 刘文炜 陈宗永. 南湖富营养化主要控制因子分析[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 31—35.
- [2] SIMS J T, SIMARD R R, JOERN B C. Phosphorus loss in agricultural drainage : historical perspective and current research[J]. J Environ Qual, 1998, 27(1): 277—293.
- [3] CORRELL D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters : a review[J]. J Environ Qual, 1998, 27(1): 261—266.
- [4] 晏维金 尹澄清 孙濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 312—316.
- [5] 司有斌 王慎强 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188—193.
- [6] 张水铭 冯杏法. 苏南太湖地区农业面源磷的污染[J]. 土壤, 1995, 27(3): 141—143.
- [7] 李寿田 周健民 王火焰, 等. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 908—914.
- [8] 高超 张桃林 吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 67—72.
- [9] SHUKLA S S, SYERS J K, WILLIAMS J D, et al. Sorption of inorganic phosphate by lake sediment[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1971, 35 : 244—249.
- [10] KHALID R A, PATRICK W H, LAUNE R D. P sorption characteristics of flooded soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1977, 41 : 305—310.
- [11] RYDEN J C, SYERS J K, HARRIS R F. Phosphorus in runoff and streams[J]. Adv Agron, 1973, 25 : 1—45.
- [12] HECKRATH G, BROOKES P C, POULTON P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment[J]. J Environ Qual, 1995, 24 : 904—910.
- [13] 连纲 王德建 林静慧, 等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1879—1883.
- [14] 刘德林. 两系杂交稻对磷素营养吸需特性研究[J]. 激光生物学报, 1999, 8(3): 201—204.
- [15] 鲁如坤 时正元 顾益初, 等. 土壤积累态磷研究 II. 磷肥的表观积累利用率[J]. 土壤, 1995, 27(6): 286—289.
- [16] OBERSON A, FARDEAU J C, BESSON J M, et al. Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural method[J]. Biol Fertil Soils, 1993, 16(1): 111—117.
- [17] OBERSON A, BESSON J M, MAIRE N, et al. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping system[J]. Biol Fertil Soils, 1996, 21(1): 138—148.
- [18] 彭世彰. 水稻节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 15—17.
- [19] 马立珊 汪祖强 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 39—47.
- [20] 高超 张桃林 吴蔚东. 氧化还原条件对土壤磷素固定与释放的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 542—549.
- [21] 李孝良. 几种水稻土对磷的吸附及解吸特性研究[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 1999, 13(1): 21—26.
- [22] 邱凤琼 严昶升 陈恩凤. 土壤肥力实质的研究 IV. 水稻土[J]. 土壤学报, 1987, 24(3): 232—238.

Water-soil coupled phosphorus loss dynamic model for paddy fields

WANG Peng, YAO Qi, HAN Long-xi, DING Xun-jing

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : Phosphorus is the restrictive factor of lake eutrophication, and the runoff loss of paddy fields is the main source of phosphorus pollution, so exact calculation of phosphorus loss is of great importance to remediation of non-point source pollution. A water-soil coupled phosphorus loss model for paddy fields was developed according to the principle of mass balance with consideration of mineralization, immobilization, eluviation, and rice absorption of phosphorus. In addition, a formula of adsorption-desorption rate of phosphorus was introduced into the model. The model was calibrated and verified with the measured data of water quality parameters of paddy fields. Furthermore, a sensitivity analysis was carried out on several key parameters. Calculated results show that the variation of dissolved inorganic phosphorus (DIP) in field surface water and leakage water can be simulated dynamically by the model.

Key words : paddy field ; phosphorus loss model ; adsorption rate ; desorption rate