

再生水灌溉条件下氮磷运移转化实验与数值模拟

王丽影, 杨金忠, 伍靖伟, 周发超

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉 430072

**摘要:** 利用二维饱和-非饱和土壤氮磷运移转化模型 nitrogen-2D 对污水灌溉试验的实测数据进行了分析, 结果证明所提出的模型可以较好的描述土壤中的水分运动和氮的转化运移过程, 土壤含水量及铵态氮剖面模拟值与实测数据吻合程度较好. 用检验过的数学模型模拟了不同污水灌溉方案下土壤及地下水中不同形态氮及磷的变化情况, 分析了不同灌溉方案下土壤的氮磷平衡和农田养分平衡状况, 结果表明: 适度的污水灌溉, 硝态氮和无机磷不会淋溶出 1.5 m 土层, 不会对地下水造成氮磷污染; 施入土壤的铵态氮, 由于有较强的吸附性, 不易被作物直接吸收, 49% 转化成硝态氮, 作物根系吸收以硝态氮为主, 氮肥当季利用率为 23.3%; 反硝化是进行污水灌溉时旱地土壤氮素的主要损失形式, 约占施入氮量的 12.6%.  
**关键词:** 饱和-非饱和模型; 氮磷转化; 氮磷运移; 数值模拟.

中图分类号: P641.74      文章编号: 1000-2383(2008)02-0266-07      收稿日期: 2007-04-22

Simulation of Nitrogen and Phosphorus Transport and Transformation in Saturated-Unsaturated Soil

WANG Li-ying, YANG Jin-zhong, WU Jing-wei, ZHOU Fa-chao

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract** Nitrogen-2D is a physically-based model developed on the basis of SWMS-2D to predict the fate of nitrogen and phosphorus following irrigation with effluent. To test the model, a sewage effluent irrigation experiment was conducted. In this paper, the nitrogen-2D model is extended and tested with data from four effluent-irrigated winter wheat plantations. The results show that, on the whole, measured and simulated values are in reasonably good agreement, especially soil water content and soil ammonia content, which indicates that it can offer reliable prediction of the fate of water and nitrogen in spite of the relative simplicity of the model. The model is then used to estimate the soil nitrogen and phosphorus behavior in winter wheat field under the same situation with different concentrations of nitrogen and phosphorus in the sewage effluent. The results show that under the simulated conditions, no nitrogen or phosphorus leaching happened at 1.5 m depth in the period, and because of the strong adsorbability of the soil, 49% of the ammonia following irrigation with effluent was turned into nitrate by nitrification instead of uptake. Denitrification of nitrate is the major channel resulting in loss of soil nitrogen fertilizer with a volume of about 12.6% of the input nitrogen. Nitrate is much more available for crop than ammonia and the current fertilization utilization rate is 23.3%.

**Key words:** saturated-unsaturated model; nitrogen and phosphorus transport; nitrogen and phosphorus transformation; numerical simulation.

0 引言

Nitrogen-2D 模型是杨金忠基于 SWMS-2D 模

型结合土壤氮化学及作物生理等理论建立的, 后经陆垂裕(2004)做了一些修改. 该模型可以模拟二维饱和-非饱和土壤中氮的运移、吸附、矿化/固持、硝化/反硝化、挥发及作物吸收, 本文对模型的功能做

了进一步延伸,使其能够同时模拟磷素的运移及其根系吸收.

1 模型原理

1.1 土壤水分运动模型

水分的运动用二维饱和-非饱和土壤中水分运动方程(Richards 方程)描述:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} [K(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_z^A)] - S,$$

其中:  $\theta$  为土壤体积含水率[ $L^3 L^{-3}$ ];  $h$  为土壤水分负压[L];  $S$  为根系吸水项或其他源汇项[ $T^{-1}$ ];  $x_i$  ( $i = 1, 2$ ) 为空间坐标,当研究垂直截面的平面流时,  $x_1 = x$  为横坐标,  $x_2 = z$  为垂直坐标,且取向上为正;  $t$  是时间[T];  $K_{ij}^A$  为各项异性无量纲张量的分量;  $K$  是非饱和水力传导度.

1.2 土壤氮、磷运移模型

二维饱和-非饱和条件下土壤中氮磷的运移模型可以表示为:

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + \frac{\partial \theta s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - \frac{\partial q_i C}{\partial x_i} + R,$$

式中:  $C$  为土壤溶液中溶质浓度[ $ML^{-3}$ ];  $\theta D_{ij}$  为饱和/非饱和水力弥散系数[ $L^2 T^{-1}$ ];  $s$  为吸附在土壤颗粒上的溶质浓度[ $MM^{-1}$ ],本文采用等温吸附模型的形式,即  $s = K_d C$ ;  $\rho$  为土壤干容重;  $K_d$  为土壤对该溶质的吸附系数[ $L^3 M^{-1}$ ];  $R$  为该溶质各种源汇项之和[ $ML^{-3}$ ].

1.3 土壤氮素转化模型

1.3.1 矿化/固持 本模型中,土壤有机物被假定成仅含碳素和氮素的集合体,并按照分解速率的不同分成为两部分:其中之一定义为快速反应有机物集合体,包括污水中含有的各种有机物、新鲜绿肥、作物的残枝落叶等;另一部分定义为慢速反应有机物集合体,主要以土壤中腐殖质为主,其中碳氮比取为固定值.快速反应有机物中氮素的流动方向和转换速率由该有机物中碳素的流动方向和转换速率以及土壤中有机物部分的碳氮比决定,慢速反应有机物的分解产物只有铵态氮和二氧化碳,不再向任何有机物形式进行转化.土壤中的无机氮仅划分为铵态氮和硝态氮(周爱国等, 2003).除根系吸收外,所有氮素的转化过程都受土壤含水量、温度、pH 值和碳氮比的影响,本文模拟中不考虑 pH 值的影响.

土壤中氮素流动方向由图 1 所示,对模型更详

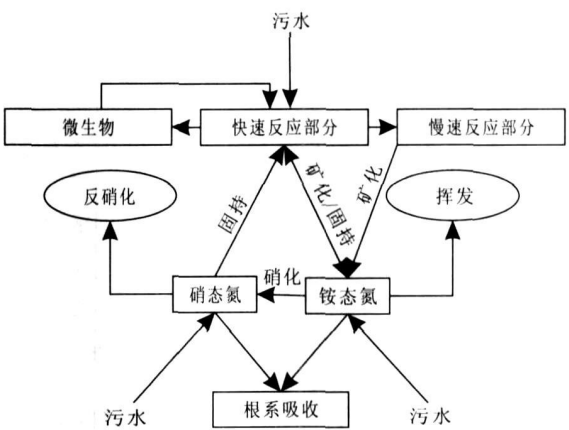


图 1 土壤中的氮素迁移转化方向  
Fig. 1 Nitrogen transport-transformation schematic diagram in soil

细的介绍见陆垂裕等(2004)的文章.

1.3.2 硝化、反硝化和挥发 硝化、反硝化和挥发是无机氮素转化的主要环节,此 3 种氮素的转化过程分别可以采用 3 种类型的转化动力学方程描述,分别为:

零阶动力反应方程  $R_{0v} = -K_0 (\theta + \rho K_d) f_i$ ;  
一阶动力反应方程  $R_{0v} = -K_1 (\theta + \rho K_d) N f_i$ ;  
Michaelis-Menten 动力反应方程  $R_{0v} = -K_m \frac{N (\theta + \rho K_d)}{N (\theta + \rho K_d) + K_c} f_i$ .

其中,  $N$  是土壤溶液中铵态氮和硝态氮的浓度;  $K_0$  是零阶速率常数;  $K_1$  是一阶速率常数;  $K_d$  为土壤对溶质的吸附系数[ $L^3 M^{-1}$ ];  $K_m$  是 Michaelis-Menten 动力反应方程中最大的速率常数;  $K_c$  是饱和系数;  $f_i$  为环境因素影响函数,一般可以表示为  $f_i = f_0 f_T f_{C/N} f_{pH}$ , 其中  $f_0$ ,  $f_T$ ,  $f_{C/N}$ ,  $f_{pH}$  分别为含水量、温度、碳氮比和 pH 值对反应速率的影响函数.这里假设土壤溶液中的溶质和被土壤胶粒吸附的溶质有着相同的反应速率.所有硝化、反硝化、挥发都可以取以上反应动力学表达式之一.  $R_{0v}$  可以用来表示反硝化速率  $R_{de}$ 、硝化速率  $R_n$  和挥发速率  $R_v$ .

1.4 根系吸收模型

本模型中溶质的根系吸收可根据使用者的需要选用 Johnsson 根系吸收模型或简单模型.

在 Johnsson 的根系吸氮模型中潜在根系吸氮速率表示为:

$$RN(t) = \frac{\partial UN(t)}{\partial t} = UN(t) a (1 - \frac{UN(t)}{UN_a}),$$

式中:  $UN(t)$  表示作物从生长季节开始氮素在作物

中的潜在累积量,其可以表示为以下形式:

$$UN(t) = \frac{UN_a}{1 + \frac{UN_a - b}{b}e^{-at}},$$

$UN_a$  是潜在年吸氮量;  $a$  和  $b$  为经验常数. 由以上两式可以得到硝态氮和铵态氮的实际吸收速率为:

$$R_{p3} = \frac{\partial N_3}{\partial t} =$$
$$\min\left[\left(\beta(x,z) \frac{N_3}{N_3 + N_4} RN(t) \times L_s, f_{NM} N_3\right)\right],$$
$$R_{p4} = \frac{\partial N_4}{\partial t} =$$
$$\min\left[\left(\beta(x,z) \frac{N_4}{N_3 + N_4} RN(t) \times L_s, f_{NM} N_4\right)\right],$$

式中:  $\beta$  为规范化的根系分布函数;  $f_{NM}$  土壤溶液中氮素可以被吸收的比例;  $L_s$  是地表的长度;  $N_3$  及  $N_4$  分别为土壤溶液中硝态氮和铵态氮的浓度.

在简单模型中,根系的氮素吸收速率与根系吸水速率和土壤溶液浓度成正比,即:

$$R^P = C_S f_R S,$$

式中:  $S$  为根系吸水速率;  $C_S$  为根系所吸水分中溶质的浓度(采用土壤溶液的溶质浓度);  $f_R$  为根系吸收比(一般取为 0.8~1.2).

1.5 温度模型

由于温度的变化将影响到氮素的转化,需建立温度模型来预测土壤温度的变化.温度模型采用以下经验公式:

$$T(z,t) = T_a + A_0 \exp(-z/D_m) \cos(\omega t + \phi - z/D_m),$$

式中:  $T$  为土壤温度;  $T_a$  为年平均温度;  $A_0$  为温度的年变幅;  $D_m$  为衰减深度;  $\omega$  为温度波的频率;  $\phi$  为相位移.

本模型既可以模拟具有不对称边界的二维问题,也可以模拟一维问题.模型中的水流运动子模型是在 SWMS-2D 模型基础上建立的,已得到过充分检验.为了检验氮素运移转化子模型,本次研究进行了清、污水灌溉试验,因为一维和二维问题能达到同样的检验效果,一维试验简单易行,所以将试验设计成在具有对称边界条件,土质均匀且各向同性的区域上进行,从而使水流运动和溶质运移具有一维特性.

2 田间试验

表 1 2004 年灌水日期及灌水量

Table 1 The irrigation date and volume in 2004

| 灌水日期                 | 1 月 7 日 | 1 月 9 日 | 3 月 10 日 | 4 月 21 日 |
|----------------------|---------|---------|----------|----------|
| 灌水量(m <sup>3</sup> ) | 0.28    | 0.105   | 0.42     | 0.42     |

测试者为王富庆、王丽影等,通过量水仪器测量,误差范围为 ±0.006 m<sup>3</sup>.

表 2 灌溉水中各形态氮浓度

Table 2 Nitrogen concentration in the sewage effluent

|    | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N<br>(mg/L) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N<br>(mg/L) | TN<br>(mg/L) |
|----|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------|
| 污水 | 0.17                                      | 30                                        | 31           |
| 清水 | 1.2                                       | 1.0                                       | 2.5          |

测试者为王丽影、周发超等.硝态氮采用酚二磺酸光度法测定,测试精度为实验室内标准偏差小于 5.4%;铵态氮采用纳氏试剂光度法测定,测试精度为单个实验室标准偏差不超过 10%;全氮采用过硫酸钾氧化、紫外分光光度法测定,精度为实验室标准偏差小于 8%.

点实验室灌溉排水综合试验场的四个大型地中蒸渗仪中进行,蒸渗仪长 2 m,宽 2 m,深 3 m,土壤干容重为 1.42 g/cm<sup>3</sup>.蒸渗仪与周围以钢板隔绝,底部添加卵石,上部设有电动遮雨棚.4 个蒸渗仪中有 3 个做污水灌溉处理,编号为 9 号坑、10 号坑和 18 号坑,污水取自武汉大学生活小区污水;一个蒸渗仪做清水对比处理,编号为 8 号坑,清水取自当地自来水.本试验共进行了两季,本文采用第二季的资料进行模拟.

小麦于 2003 年 11 月 5 日播种,每坑播小麦种子 75 g,至 2004 年 5 月 21 日收割结束共历时 198 d,测坑自 1 月 7 日起控制田面雨水补给,小麦生长期共灌水 3 次,灌水日期及灌水量见表 1.

3 次灌溉水源中硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、全氮(TN)的平均浓度见表 2.

试验观测分析项目包括:(1)2004 年 1 月 7 日至 5 月 19 日土壤含水量及土壤负压,平常为每两天观测一次,灌水前后加密;(2)土壤剖面温度,观测频率及始末时间与含水量和负压的观测相同;(3)在 3 月 8 日第二次灌水前,4 月 21 日第三次灌水前以及 6 月 1 日即小麦收割后对土壤进行了 3 次取样,这三次的取样方式都是自地表至地下 2.1 m 深处每 10 cm 土柱取为一个样品,分析土壤中的硝态氮、铵态氮和全氮含量;(4)每次灌水前取灌溉污水和自来水水样进行氮素浓度分析;(5)在小麦生长期共取植物样三次进行全氮、全磷含量分析.

3 数值模拟分析的模型输入

3.1 边界条件

模拟区域为宽 0.1 m, 深 3 m 的垂直土壤剖面, 上边界采用蒸发/入渗边界, 下边界为定水头边界, 水头根据实际情况设定为 0.1 m, 左右边界设为隔水边界。

蒸发量采用周边区域往年的实测数据, 并根据本试验实测的 8 号坑土表含水量变化情况做了调整。

3.2 初始条件

根据观测数据的情况, 本次模拟以 3 月 8 日作为起始时间点, 到 6 月 1 日结束, 共历时 86 d。首先根据土壤类型选取 van Geneuchten 模型参数, 将观测得到的初始土壤含水量在模拟剖面的节点上进行线性插值, 然后利用 van Geneuchten 参数推求与含水量相对应的各节点的初始负压水头, 作为模型的初始条件输入。本次模拟中根据 8 号坑土壤含水量的模拟结果与实测数据的吻合程度对 van Geneuchten 模型参数进行了微调, 将调整好的参数用于另外 3 个测坑的模拟。调整后的土壤水力特征参数见表 3。

表 3 土壤特征参数

Table 3 Soil characteristic parameters

| $\theta_s$ | $\theta_r$ | $\alpha$ | $n$  | $K_s$ |
|------------|------------|----------|------|-------|
| 0.41       | 0.095      | 1.9      | 1.31 | 0.524 |

3.3 转化参数及影响函数

氮素转化的各项参数选自陆垂裕等(2004)的研究成果, 氮素硝化、反硝化均采用一阶动力学方程。根据巨晓棠(2000)的研究成果, 施肥后立即灌溉的情况下, 氨挥发的损失量很小, 污水灌溉与施肥后立

即灌水的情况相似, 所以本次模拟没有考虑铵态氮的挥发。

土壤温度模型的各项参数由实测数据拟合得到。

本次模拟中温度和土壤含水量的影响函数借鉴目前较流行的氮素转化运移模型 SOILN 的表达形式(Johnsson *et al.*, 1987; Campbell *et al.*, 1994; Eckersten *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 1998):

$$f_T = \begin{cases} 3^{(T-20)/10} & (T \geq 5), \\ \frac{T}{5} \times 3^{(T-20)/10} & (T < 5). \end{cases}$$

其中:  $T$  为土壤温度, 此温度影响函数将应用于除根系吸氮之外所有的氮素转化过程。

硝态氮的反硝化有独特的含水量影响函数, 其表达式为:

$$f_{\theta}^{de} = \begin{cases} 0 & (\theta \leq 0.17), \\ \left(\frac{\theta - 0.17}{\theta_s - 0.17}\right)^2 & (\theta > 0.17). \end{cases}$$

对于土壤中其他氮素转化过程, 应用统一的含水率影响函数, 该含水率函数的表达式为:

$$f_{\theta} = \begin{cases} \frac{\theta - 0.12}{0.12} & (0.12 \leq \theta < 0.24), \\ 1 & (0.24 \leq \theta \leq 0.33), \\ 0.6 + 0.4\left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - 0.33}\right) & (0.33 < \theta \leq \theta_s). \end{cases}$$

其中:  $\theta$  为土壤体积含水率;  $\theta_s$  为土壤的饱和体积含水率。

4 模拟结果与分析

对 4 个测坑 5 月 19 日的水分割面的模拟结果见图 2, 从图 2 可以看出剖面的水分状况模拟值与

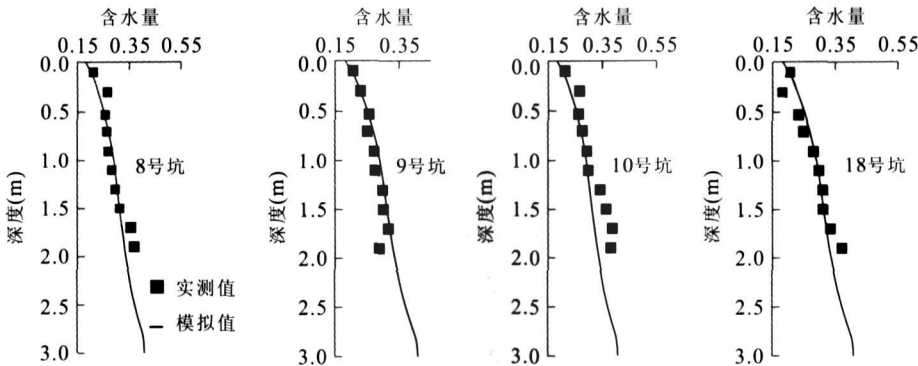


图 2 各测坑不同深度 5 月 19 日含水量剖面实测值与模拟值比较

Fig. 2 Comparison between water contents of calculation value and its measuring value

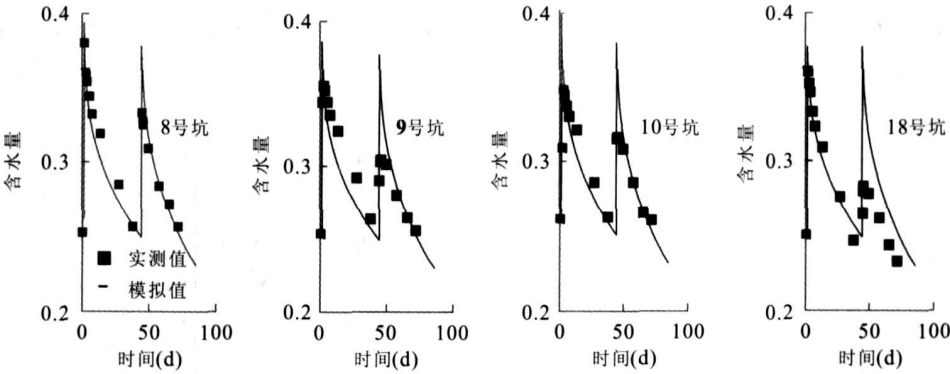


图 3 各测坑 5 cm 深度处含水量随时间变化实测值与模拟值的比较  
Fig. 3 Change process of water content at 5 cm depth in soil profile

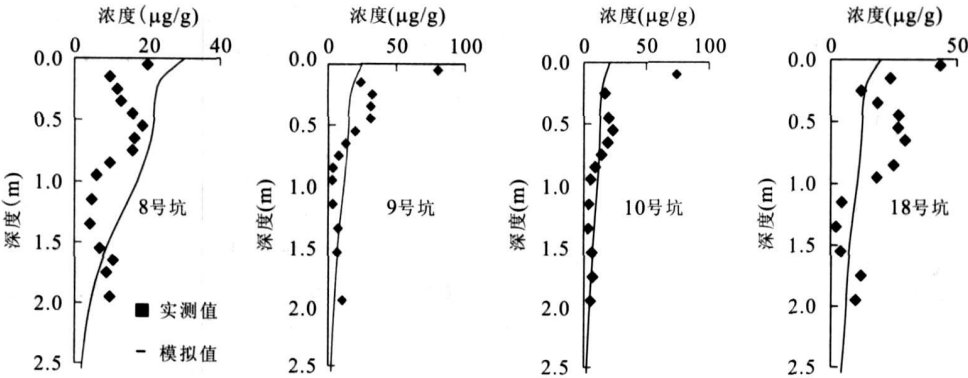


图 4 各测坑 6 月 1 日不同深度处硝态氮浓度剖面实测值与模拟值比较  
Fig. 4 Comparison between nitrate concentrations of calculation value and its measuring value in the soil profile

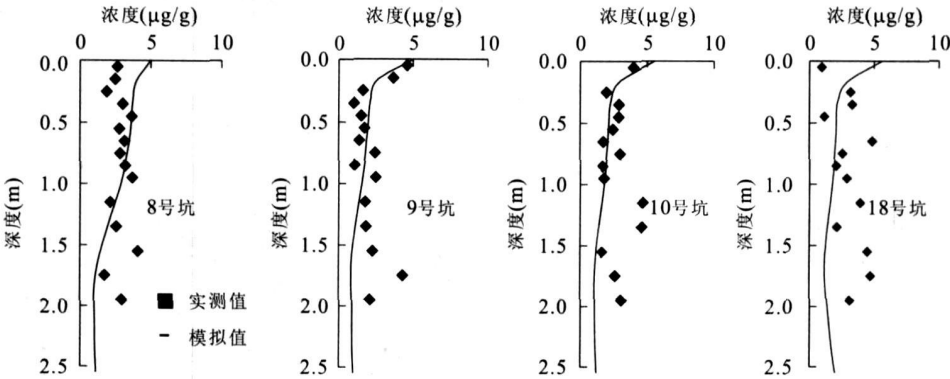


图 5 各测坑 6 月 1 日不同深度处铵态氮浓度剖面实测值与模拟值比较  
Fig. 5 Comparison between ammonia concentrations of calculation value and its measuring value in the soil profile

实测值吻合程度较好. 为了更清晰地反映土壤水分状况在灌水前后的变化, 本文还比较了各测坑 0.5 m 深度处土壤含水量随时间的变化情况, 结果显示模拟值可以很好地反映土壤水分的实际变化状况(图 3). 但是 18 号坑第二次灌水后的含水量模拟值明显高于实测值, 可能是灌水时出现了优先流, 致

使水量有一定的渗漏损失造成的. 各测坑 6 月 1 日土壤溶质浓度剖面的模拟结果见图 4 及图 5, 从图中可以看出, 除 8 号坑外, 模拟值与实测值基本吻合, 特别是铵态氮吻合情况较好, 模拟值能够反映从 3 月 8 日到 6 月 1 日溶质浓度在整个剖面上降低的过程. 8 号坑的模拟结果误差较

表 4 不同灌溉方案下土壤氮素平衡值  
Table 4 Balance of nitrogen and phosphorus

| 方案                           |     | 始末变化    | 根系吸收  | 硝化    | 反硝化   | 矿化    |
|------------------------------|-----|---------|-------|-------|-------|-------|
| 对照(0 g/ m <sup>2</sup> )     | 铵态氮 | -11.497 | 0.186 | 21.41 |       | 10.12 |
|                              | 硝态氮 | -3.772  | 10.97 |       | 14.86 |       |
|                              | 速效磷 | -0.585  | 0.582 |       |       |       |
| 1<br>(15 g/ m <sup>2</sup> ) | 铵态氮 | -4.015  | 0.393 | 28.89 |       | 10.12 |
|                              | 硝态氮 | -1.863  | 14.46 |       | 16.75 |       |
|                              | 速效磷 | +7.135  | 1.69  |       |       |       |
| 2<br>(20 g/ m <sup>2</sup> ) | 铵态氮 | -1.51   | 0.463 | 31.38 |       | 10.12 |
|                              | 硝态氮 | -1.23   | 15.62 |       | 17.38 |       |
|                              | 速效磷 | +16.555 | 3.05  |       |       |       |
| 3<br>(25 g/ m <sup>2</sup> ) | 铵态氮 | +0.99   | 0.532 | 33.85 |       | 10.12 |
|                              | 硝态氮 | -0.6    | 16.77 |       | 18.01 |       |
|                              | 速效磷 | +20.855 | 3.67  |       |       |       |

表中“+”表示盈余,“-”表示亏缺

大,可能是因为 8 号坑是用清水灌溉的,而模拟中溶质转化的参数采用的是和其他测坑一样的污水灌溉经验参数,且没有考虑清污水灌溉造成的作物生长差异,这说明污水中可能含有一些可以影响氮素转化或吸收的因素.

通过以上的分析可以看出,本模型能够很好地预测饱和一非饱和土壤水的运动及土壤中铵态氮和硝态氮的变化情况,结果是可信的.由此,可以应用此模型作进一步的预测分析.

5 数值试验

从试验数据可以看出,对比清水灌溉试验,本次试验所采用的污水氮素浓度和灌溉强度对土壤和地下水的影响不是很明显.为了研究土壤和地下水对污水灌溉的承受能力(李志萍等,2004),并努力贴近生产实践,本文设计了如下灌溉数值试验方案:以田间试验的气象条件及各参数及 9 号坑的初始条件为基础(土壤磷的初始分布采用第一季的实测值),以小麦的播种时间 11 月 5 日为模拟起始时间,至次年 5 月 21 日小麦收割为结束时间,生育期内共灌水 300 mm,分 3 次进行,每次 100 mm.设置方案 0、1、2、3 分别为铵态氮(无机磷)浓度为 0、50、66 及 83 mg/L 的污水.

根据数值试验结果,得不同灌溉方案下 0 ~ 1.5 m 土层中氮素平衡情况(表 4).从表中可以看出,氮素的各项转化量与污水中的氮浓度是高度线性相关的.通过计算可以得出:铵态氮随污水进入土壤后,约 49% 发生硝化反应生成硝态氮,只有很少一部分

被根系直接吸收利用.经硝化反应生成的硝态氮,约 46.7% 被作物吸收,约 25.3% 发生反硝化反应损失掉了,其余 28% 残留在 1.5 m 土层中,没有向下淋溶.模型中忽略了速效磷的转化,污水中的磷约 12.3% 被根系吸收,其余大部分保留在土壤表层.

从上面的分析中可以看出,施入土壤的铵态氮肥,由于吸附性较强,移动性差,很大一部分经硝化作用被氧化成硝态氮,而使硝态氮肥成为被作物吸收利用的主要形态,这与 Harmsen (1984) 研究北方麦田时得到的结论是一致的;另外,土壤氮肥的主要损失途径是反硝化损失,约占总施肥量的 12.6%,这与 Ryden *et al.* (1979) 在芹菜地土壤中的测定结果 15.3% 比较接近,与黄元仿等(1996)的模型结果也是一致的.

从氮素农田养分平衡的角度来看,方案 1、2、3 的农田养分平衡率(=收入/支出×100%)分别为 79.5%、90.0%、99.5%(鉴于本次模拟中没有考虑秸秆还田等氮素收入途径,所以此处不考虑有机氮的损失),养分实际盈亏率((收入-支出)/支出×100%)均为负值,可见在此灌溉制度下,要使用铵态氮浓度高于 83 mg/L 的污水进行灌溉,相当于施氮量为 250 公斤/公顷,农田养分才能基本平衡,而一般城市污水不会有这么高的氮浓度,所以污水灌溉的同时还要施肥才能满足农田养分平衡的要求,冯绍元等(2003)的研究结果也得到类似结论.虽然小麦对磷肥的需要量仅为氮肥需要量的 1/3 左右,但是因为磷在土壤中移动性比较差,所以施肥量一般要达到需要量的 2~4 倍才能满足作物需求.

## 6 结语

本文用田间试验对二维饱和—非饱和土壤氮磷运移转化模型进行检验,模拟计算值与实测值之间吻合程度较好,说明本模型可以用于预测和评价不同气候条件和土壤条件下土壤中的氮素行为。

和现有同类模型相比,本模型参数较少、应用简便,可以很好地模拟小区域饱和和非饱和土壤水分运动,能够反映氮素的运移转化特征,得到不同形态氮磷的转化量及其比例关系,对于控制田间氮磷流失有重要意义,在污水灌溉及农业氮肥管理实践中有很好的应用价值。模型中作物吸收部分处理较简单,会造成一定误差,需要进一步发展作物生长模型和氮磷吸收模型。

## References

- Campbell, C. A., James, Y. W., Winkleman, G. E., 1994. Mineralization rate constants and their use for estimating nitrogen mineralization in some Canadian prairie soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 64: 333—343.
- Eckersten, H., Hansson, P. E., Johnsson, H., 1996. SOILN model user's manual. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Feng, S. Y., Qi, Z. M., Huang, G. H., et al., 2003. Effect of fresh water and sewage irrigation on growth of winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 22(3): 11—14 (in Chinese with English abstract).
- Harmsen, K., 1984. Nitrogen fertilizer use in rainfed agriculture. *Fertilizer Research*, 5: 371—382.
- Huang, Y. F., Li, Y. Z., Lu, J. W., 1996. Simulation of soil nitrogen transport under field conditions. II. Verification and application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 6: 15—23 (in Chinese with English abstract).
- Johnsson, H., Bergstrom, L., Jansson, P. E., et al., 1987. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 18: 333—356.
- Ju, X. T., 2000. Fate and transformation of fertilizer N in winter wheat/summer maize system: [Dissertation] Chi-

na Agricultural University, Beijing (in Chinese).

- Li, Z. P., Zhang, J. B., Qu, J. H., et al., 2004. Influence on shallow groundwater by  $\text{NH}_4\text{-N}$  in polluted river. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(3): 363—368 (in Chinese with English abstract).
- Lu, C. Y., Yang, J. Z., Jayawardane, N., et al., 2004. Numerical modeling of nitrogen transport and transformation in sewage irrigation and treatment system. *Journal of Hydraulic Engineering*, (5): 83—88 (in Chinese with English abstract).
- Lu, W., McGeehan, M. B., 1998. A review of carbon and nitrogen processes in four nitrogen dynamics models. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 69: 279—305.
- Ryden, J. C., Lund, L. J., Letey, J., et al., 1979. Direct measurement of denitrification loss from soils: II. Development and application of field methods. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.*, 43: 110—119.
- Zhou, A. G., Chen, Y. Z., Cai, H. S., et al., 2003. New way in  $\text{NO}_3\text{-N}$  contamination study of water environment: Correlative method of  $^{15}\text{N}$  &  $^{18}\text{O}$ . *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 219—224 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 冯绍元, 齐志明, 冯冠华, 等, 2003. 清、污水灌溉对冬小麦生长发育影响的田间试验研究. *灌溉排水学报*, 22(3): 11—14.
- 黄元仿, 李韵珠, 陆锦文, 1996. 田间条件下土壤氮素运移的模拟模型: II. 田间检验与应用. *水利学报*, 6: 15—23.
- 巨晓棠, 2000. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤肥料的转化及去向(博士学位论文). 北京: 中国农业大学.
- 李志萍, 张金炳, 屈吉鸿, 等, 2004. 污染河水中氨氮对浅层地下水的影响. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(3): 363—368.
- 陆垂裕, 杨金忠, Jayawardane, N., 等, 2004. 污水灌溉系统中氮素转化运移的数值模拟分析. *水利学报*, (5): 83—88.
- 周爱国, 陈银琢, 蔡鹤生, 等, 2003. 水环境硝酸盐氮污染研究新方法—— $^{15}\text{N}$  和  $^{18}\text{O}$  相关法. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(2): 219—224.