

冬小麦生长条件下土壤硝态氮淋洗的 传递函数模拟和预报

任 理^{1,2}, 袁福生^{1,2}, 张福锁^{1,2}

(1. 中国农业大学资源与环境学院; 2. 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100094)

摘要:观测了地中渗透计的土壤在 3 种不同施肥量下冬小麦自播种至返青期硝态氮的淋洗动态,由试验资料获得了硝态氮在土壤中迁移时间的概率密度函数,进而运用传递函数模型对土壤排水出流液中的硝态氮浓度和淋洗量动态进行了数学模拟和预报。

关键词:土壤;地中渗透计;冬小麦;硝态氮;淋洗;传递函数模型;模拟;预报

Simulation and prediction of nitrate-nitrogen leaching from soils under the growth period of winter wheat using transfer function model

REN Li¹, YUAN Fu-Sheng¹, ZHANG Fu-Suo¹ (1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University; 2. Key Laboratory of Plant-soil Interactions MOE, Beijing 100094, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2281~2288.

Abstract: The leaching losses of indigenous and applied nitrate-nitrogen were measured for the non-weighing lysimeter in soils under the condition of winter wheat cropping. The transfer function model (TFM) developed by Jury *et al.* and White was used to simulate nitrate-nitrogen transport through unsaturated heterogeneous soils. The probability density functions (pdfs) of the travel times of the nitrate-nitrogen under the experiment condition were determined from the normalized rates of loss of nitrate-nitrogen mass to the drains. The pdfs for the experimental site conformed to a lognormal distribution. The nitrate-nitrogen concentrations in the output flow at 200cm depth and the accumulative quantities of nitrate-nitrogen leached in soils during the winter wheat cropping were simulated using the equations proposed by White. Good agreements were obtained between the simulated and the measured values both the dynamics of concentration and the quantities of nitrate-nitrogen leached. In addition, using same equation proposed by White with the pdfs of the travel time of the nitrate-nitrogen obtained from different experimental site of the lysimeter, the accumulative quantities of nitrate-nitrogen leached during the winter wheat cropping were also predicted. A reasonable leaching of nitrate-nitrogen results was estimated for three treatments of fertilizer in the field according to the mathematical model. Finally, the effects of the amount of nitrogenous fertilization, crop season on the leaching of nitrate-nitrogen were primarily analyzed.

Key words: soil; lysimeter; winter wheat; nitrate-nitrogen; leaching; transfer function model; simulation; prediction

文章编号: 1000-0933(2004)10-2281-08 中图分类号: S151+.3, S154.1, TV121.3 文献标识码: A

田间非均质土壤中硝酸盐的淋洗是很难预报的,因为淋洗速率不仅受到土壤水运动复杂性的影响,而且还受到由生物转化、植物吸收和化肥氮的施加而造成的可利用的硝酸盐库在时、空上变异性的影响^[1]。针对溶质在土壤中运移具有时、空变化的不确定性, Sposito 等认为用“随机”来描述最为恰当^[2]。这是 Jury^[3]创立并由 Jury 等^[4]、White 等^[5]、White^[6]及 Sposito 和 Jury^[7]

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011803);北京市自然科学基金重大资助项目(6980001)

收稿日期: 2004-03-02; 修订日期: 2004-07-15

作者简介: 任理(1959~),男,北京市人,博士,教授,主要从事土壤物理与水环境的数学模拟研究。E-mail: renli@cau.edu.cn

致谢: 刘学军博士和巨晓棠博士提供了田间试验资料,博士研究生李春友提供了潜在蒸散量的计算结果,在此一并致谢

Foundation item: the National Key Basic Research Special Funds(No. G1999011803); Beijing Natural Science Foundation(No. 6980001)

Received date: 2004-03-02; Accepted date: 2004-07-15

Biography: 任理,男,1959年生,北京市人,博士,教授,主要从事土壤物理与水环境的数学模拟研究。E-mail: renli@cau.edu.cn

发展的土壤溶质运移传递函数模型(Transfer Function Model, TFM)的理论基础。

White 把硝态氮(NO_3^- -N)在土壤中的淋洗视为一个随机过程,采用 TFM 对湿润气候的浅排水农田成功地模拟和预报土壤中 NO_3^- -N 的淋洗^[6]。任理等运用 TFM 理论,较好地模拟了冬小麦苗期入渗-重分布条件下地中渗透计的土壤在 2m 出口处 NO_3^- -N 的淋洗动态,但模拟时段较短^[8,9]。本文的目标就是进一步检验 White 提出的 TFM 理论能否用于模拟和预报冬小麦较长生育期旱作土壤中 NO_3^- -N 的淋洗动态。为此,依据在中国农业大学科学园非称重力地中渗透计获得的冬小麦从播种到返青期(1998 年 10 月 9 日至 1999 年 4 月 8 日)3 种不同施肥量条件下土壤中 NO_3^- -N 的淋洗观测资料,建立 NO_3^- -N 迁移时间的概率密度函数,考察 White 模型对土壤 NO_3^- -N 淋洗动态的模拟和预报精度,同时给出本文试验条件下较为合理的土壤运移体积分中初始 NO_3^- -N 浓度的估计值。

1 模型理论

土壤溶质运移的传递函数方程一般可表为^[6]:

$$Q_{\text{out}}(t) = \int_0^t g(t-t') \cdot Q_{\text{in}}(t') \cdot dt' \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{out}}(t)$ 为 t 时刻溶质质量(包括下渗和侧渗及所有脱离所研究土壤的溶质)的损失速率; $Q_{\text{in}}(t')$ 为 t' 时刻在输入端溶质的输入速率; $g(t-t' | t')$ 为溶质存活时间(lifetimes)亦即 $t-t'$ 在溶质输入时间 t' 条件下的概率密度函数。

由方程(1)可见,溶质在 t 时刻从某一确定的土壤体积内流失的速率是根据“加权”后的溶质质量输入速率来计算的,而其中的“加权因子”是溶质在土体内存活时间 τ (它是时刻与较早输入时刻 t' 之差)的条件概率密度函数。若把 $g(\tau | t') d\tau$ 定义为 τ 到 $\tau+d\tau$ 这段时间内溶质存活时间的条件概率,则函数 $g(\tau | t')$ 就是溶质存活时间的概率密度函数(probability density function, pdf)。

溶质的输入方式一般可概化为两种,一种是阶跃输入(step-change input),即从零时刻开始就保持某一定常浓度的溶质输入,直至试验结束;另一种是脉冲输入(pulse-change input),即在零时刻有一给定浓度的溶质从入流口输入,而在其它时刻无溶质输入。在本文的定位观测试验中,施肥与灌溉时间即溶质的输入时间相对于土壤硝态氮淋洗动态的监测时段来说比较短,故可概化为脉冲输入,这样 $Q_{\text{in}}(t')$ 便可用 δ 函数的形式来表达^[6],即: $Q_{\text{in}}(t') \cong k\delta(t')$, 这里 k 为常数。若假定存活时间的 pdf 与输入时间 t' 无关,则条件概率密度函数 $g(t-t' | t')$ 就可简化为非条件概率密度函数 $g(t-t')$, 于是(1)式变为:

$$Q_{\text{out}}(t) = k \int_0^t g(t-t') \cdot \delta(t') \cdot dt' \quad (2)$$

根据 δ 函数的性质^[10]:

$$\int_0^t f(t-t') \cdot \delta(t') \cdot dt' = f(t) \quad (3)$$

则有

$$Q_{\text{out}}(t) = k \cdot g(t) \quad (4)$$

或

$$g(t) = k^{-1} \cdot Q_{\text{out}}(t) \quad (5)$$

因为地中渗透计的土壤中 NO_3^- -N 的损失最易在出口处观测到,如果假定来自土壤体积的 NO_3^- -N 损失仅明显地发生在出口处,而忽略其通过别的途径从所研究土体中的损失,则上式中的 $g(t)$ 就变成 NO_3^- -N 在土壤中迁移时间(travel times)而不是存活时间的概率密度函数,于是:

$$g(t) = k^{-1} \cdot Q_{\text{ex}}(t) = Q'_{\text{ex}}(t) \quad (6)$$

式中, $g(t)$ 为 NO_3^- -N 迁移时间的概率密度函数; $Q_{\text{ex}}(t)$ 是 NO_3^- -N 质量通过出流口的损失速率; k 为归一化常数(normalized constant),假如全部排水期间一直进行淋洗观测,该常数可由每一个事件中淋洗的 NO_3^- -N 累积质量来计算。

概率密度函数有多种表示方式,其中对数正态分布能较好地反映溶质迁移的随机特性^[6,8,9]:

$$g(t) = Q'_{\text{ex}}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot t} \exp \left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (7)$$

式中, t 是观测时间; μ 和 σ^2 分别为 $\ln t$ 分布的数学期望(均值)和方差。上式可用来计算 NO_3^- -N 和 Cl^- 及某些其它非反应性示踪剂溶质(nonreactive tracer solute)的迁移时间^[6]。

迁移时间 pdf 的中心位置既可由中值迁移时间 t_m 也可由均值迁移时间 $\bar{t}$ 来辨识^[5,6], 计算公式分别为:

$$t_m = \exp(\mu) \quad (8)$$

和

万方数据

$$\bar{t} = \exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right)$$

(9)

于是,运移体积分数 θ_{st} 可由如下方程计算^[8,9]:

$$\theta'_{st} = dt_m l^{-1}$$

(10)

或

$$\theta''_{st} = d\bar{t} l^{-1}$$

(11)

式中, d 为出流(或排水)速率。

已知驻留在一个确定的土壤体积内的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 相应于降雨或灌溉的一个脉冲输入(在本文中模拟时段发生的一次灌溉和几次小的降水合并视为一个输入事件)而被淋洗,且运移体积 V_{st} 是有效输运 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的土壤体积内的流体体积,则在观测时段 $[t_1, t_2]$ 内 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋洗量 ΔN 为^[6]:

$$\Delta N = \Delta C \cdot V_{st} = - \int_{t_1}^{t_2} Q_{ex} \cdot dt$$

(12)

式中, ΔC 为土壤运移体积内 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的变化;“ $-$ ”表示溶质的减少。 V_{st} 定义为可操作的运移体积(Operationally defined transport volume)^[5],它是运移体积分数 θ_{st} 与所研究的土壤单元体积 V_s (对本文而言为 8 m^3)的乘积。

由于 $Q_{ex}(t)$ 是土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量在出流口处的损失速率,可用 t 时刻的排水速率 D 与 t 时刻排水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的通量平均浓度 C)的乘积来表示。若取样观测间隔 Δt 较短,则有:

$$- \int_{t_1}^{t_2} Q_{ex}(t) \cdot dt = - D \cdot C \cdot \Delta t$$

(13)

于是,有:

$$\Delta C \cdot V_{st} = - D \cdot C \cdot \Delta t$$

(14)

分离变量后写成微分形式并积分得:

$$C_t = C_0 \cdot \left[\exp\left(-\frac{D_0 \cdot t}{V_{st}}\right) \right]$$

(15)

因此,有^[6]:

$$\Delta C = C_0 - C_t = C_0 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{D_0 \cdot t}{V_{st}}\right) \right]$$

(16)

故:

$$\Delta N = \Delta C \cdot V_{st} = C_0 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{D_0 \cdot t}{V_{st}}\right) \right] \cdot V_{st}$$

(17)

式中, C_0 为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在运移体积内的初始浓度; D_0 为在特定事件发生期间在时刻 t 的平均排水率; C_t 为在时刻 t 排水中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度。

2 田间试验

2.1 试验装置的布设

定位观测试验在中国农业大学科学园的非称重式地中渗透计(Non-weighing Lysimeter)上南侧的3个池(以下简记为SE2、SE3和SE4)中进行。池中土体尺度为 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ 。土壤为经历了多年耕种熟化的回填土,剖面质地见表1^[11]。在2m深的土壤剖面上每隔20cm安装了负压计系统(WM-1型)探头,并在20、40、60、80、100、140、180cm处安装了土壤溶液提取器。在

表 1 池中土壤剖面的各层次粒径分析结果^[11]

Table 1 Particle size analysis on each soil layer in the lysimeter^[11]

土层 Soil layer(cm)	颗粒组成 Particle composition			土壤类别* Soil type
	2~0.02(mm)	0.02~0.002(mm)	<0.002(mm)	
0~25	66.54	68.44	15.02	砂质粘壤土 Sandy clay loam
25~43	65.43	17.30	17.26	砂质粘壤土 Sandy clay loam
43~61	73.22	7.61	19.61	砂质粘壤土 Sandy clay loam
61~81	56.77	16.00	27.29	砂质粘土 Sandy clay
81~140	59.18	13.12	27.71	砂质粘土 Sandy clay
140~185	68.47	5.76	25.77	砂质粘土 Sandy clay
>185	56.48	18.49	25.03	砂质粘土 Sandy clay

万方数据

* 依据国际标准划分 According international standard

深为 2m 的土壤之下为 0.5m 厚的反滤层,底部有一个起排水作用的出流管。试验设 3 个施肥处理,即 3 个氮肥水平,施肥量分别为 0、120、240 kg N/hm²。所施氮肥品种为尿素;磷肥品种为过磷酸钙肥,肥量为 P₂O₅ 60 kg/hm²。在整个试验过程中对地中渗透计的出流进行监测,记录出流量,并从中取出一部分出流液用于测定 NO₃⁻-N 浓度。此外,利用溶液提取器定期抽提土壤剖面溶液。对所收集的溶液样品全部用流动分析仪(Analytical Conssle,TRAACS2000)测定其中的 NO₃⁻-N 含量。小麦于 1998 年 10 月 8 日播种,品种为农大 518。播种后施肥,施肥量的 50% 作为基肥于播种同一天撒施于土壤表面,然后马上覆一薄层土,施肥量的另 50% 作为追肥于 1999 年 4 月 11 日一次性全部撒施于土表,之后马上灌水。在模拟时段内仅于 1998 年 10 月 9 日进行了 1 次灌溉,每池灌溉量均为 75mm,灌溉方式为漫灌。试验点附近配有田间气象观测站,可定期观测并收集有关气象资料。

2.2 土壤物理参数

地中渗透计剖面不同层次的土壤水分特征曲线见表 2^[11]。

表 2 池中土壤剖面的水分特征曲线^[11]

Table 2 Soil water retention curve in each soil layer in the lysimeter^[11]

层次 Layer	深度(cm) Depth	拟合曲线的方程 Equation of fitted curves	相关系数 Coefficient of correlation
1	0~25	$\theta_v = 24.1652 - 2.4181 \times \log \varphi_m $	$R = -0.9771$
2	25~43	$\theta_v = 28.4279 - 2.7042 \times \log \varphi_m $	$R = -0.9244$
3	43~61	$\theta_v = 23.5240 - 3.1924 \times \log \varphi_m $	$R = -0.9319$
4	61~81	$\theta_v = 26.8479 - 2.2341 \times \log \varphi_m $	$R = -0.9211$
5	81~140	$\theta_v = 29.6247 - 2.2903 \times \log \varphi_m $	$R = -0.8793$
6	140~185	$\theta_v = 38.2058 - 2.0868 \times \log \varphi_m $	$R = -0.8803$
7	185~	$\theta_v = 35.9749 - 2.5929 \times \log \varphi_m $	$R = -0.9287$

2.3 气象及土壤水分动态

图 1 和图 2 是冬小麦自播种至返青期(1998 年 10 月 9 日~1999 年 4 月 8 日)的降水及灌溉量分布情况与累积潜在蒸散量动态。从图中可见,蒸散量明显大于降水及灌溉量之和。由于年降雨量为 373.9mm,所以试验期间属于干旱年份。

图 3~图 5 是模拟时段各池土壤剖面的体积含水量实测动态,可见这段时期内土壤水流呈拟稳态。

3 计算结果

3.1 概率密度函数的模拟

若设 t 为一个随机变量,则土壤中 NO₃⁻-N 的 N 阶迁移时间矩为^[12]:

$$E(t^N) = \int_0^\infty t^N g(t) \cdot dt = \exp\left(N\mu + \frac{1}{2}N^2\sigma^2\right) \quad (18)$$

由上式可得 $\ln t$ 的数学期望 μ 与方差 σ^2 ,即:

$$\mu = 2\ln E(t) - \frac{1}{2}\ln E(t^2) \quad (19)$$

$$\sigma^2 = \ln E(t^2) - 2\ln E(t) \quad (20)$$

另一方面,显然有:

$$g(t_j) = \frac{\frac{\Delta V_j}{\Delta t_j} C_j}{\sum_{i=0}^n \Delta V_i \cdot C_i} \quad (21)$$

式中, j, n 为采样次数,其中 n 为试验期间总的采样次数; i 为采样次数循环变量; $g(t_j)$ 为 NO₃⁻-N 在时段 $[0, t_j]$ 内通过厚度为 L 土层的概率密度; C_i 为第 i 次从出流液中取样测定的 NO₃⁻-N 浓度; ΔV_i 为第 i 次取样测定的出流量; $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ 。

将(18)式写成如下离散形式:

$$E(t^N) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{t_i + t_{i+1}}{2} \cdot \frac{g(t_i) + g(t_{i+1})}{2} \cdot \Delta t_i \quad (22)$$

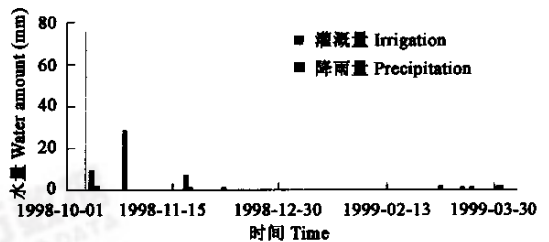


图 1 模拟时段降水量与灌溉量分布

Fig. 1 Precipitation and irrigation during the simulated period

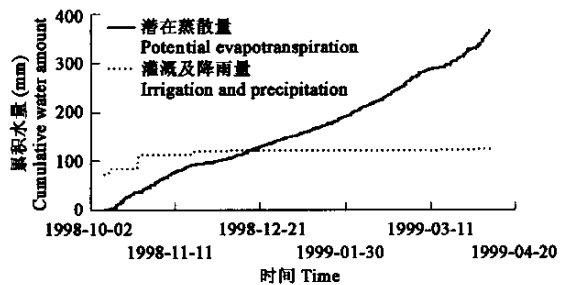


图 2 模拟时段累积降水与灌溉量及潜在蒸散量动态

Fig. 2 Cumulative precipitation and irrigation and cumulative evapotranspiration during the simulated period

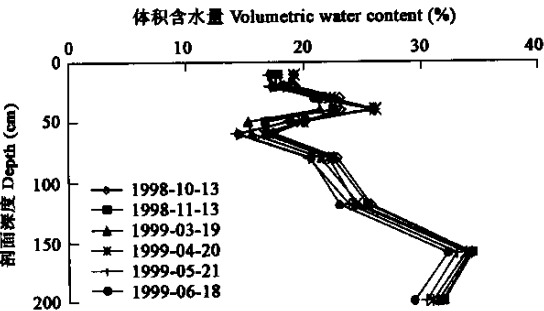


图3 SE2池土壤剖面水分动态

Fig. 3 Soil water content distribution in lysimeter SE2 for different times

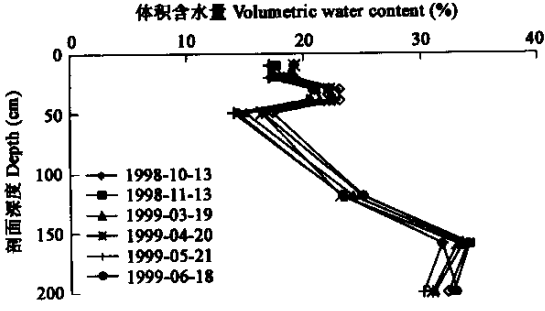


图4 SE3池土壤剖面水分动态

Fig. 4 Soil water content distribution in lysimeter SE3 for different times

$$E(t^2) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2} \right)^2 \cdot \frac{g(t_i) + g(t_{i+1})}{2} \cdot \Delta t_i \right]$$

(23)

根据公式(22)、(23)与(19)、(20)可求得 SE2、SE3 和 SE4 三池的 μ 和 σ^2 , 结果分别为 SE2: $\mu=4.006703, \sigma^2=0.130145$; SE3: $\mu=3.972504, \sigma^2=0.238967$; SE4: $\mu=3.930126, \sigma^2=0.219984$ 。然后分别代入公式(7)得到概率密度函数的模拟值。通过对比(图7、图8和图9),可见模拟值与实测值吻合较好。说明本文试验条件下 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在土壤中迁移时间的概率密度函数基本上是服从对数正态分布的。由于参数 μ 和 σ^2 主要反映的是某种质地土壤对溶质迁移时间随机分布特征的影响,所以该参数的大小与施肥量处理无关。

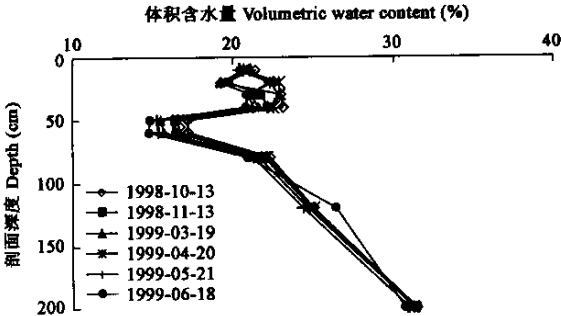


图5 SE4池土壤剖面水分动态

Fig. 5 Soil water content distribution in lysimeter SE4 for different times

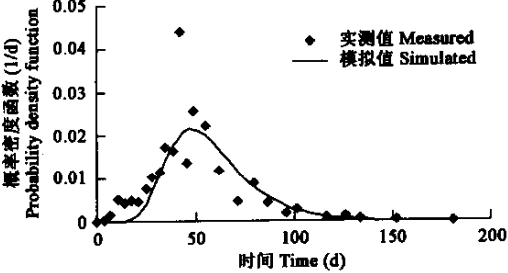


图6 SE2池土壤NO₃⁻-N迁移时间的概率密度函数

Fig. 6 Probability density function of the travel time of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in lysimeter SE2

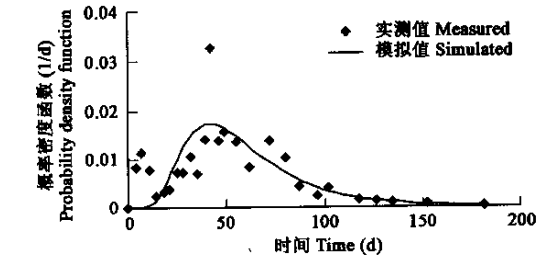


图7 SE3池土壤NO₃⁻-N迁移时间的概率密度函数

Fig. 7 Probability density function of the travel time of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in lysimeter SE3

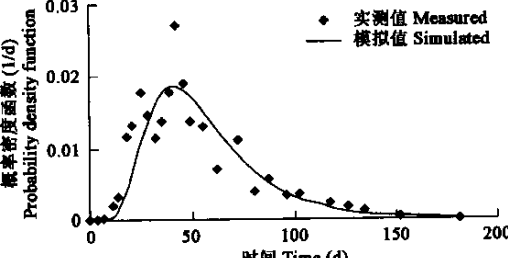


图8 SE4池土壤NO₃⁻-N迁移时间的概率密度函数

Fig. 8 Probability density function of the travel time of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in lysimeter SE4

White 通过对 13 个直径 23cm 长约 28cm 的粘壤土的土芯,阶跃输入氯化钙溶液,研究了表施 Cl^- 和土壤固有 NO_3^- 的淋洗,并得出用土芯第一个出流液中 NO_3^- 的浓度作为土壤运移体积中初始 NO_3^- 浓度的估计值具有一定合理性的结论^[1]。考虑到本文试验条件的地中渗透计为排水较深且模拟的初始时刻有出流,故将由溶液提取器获得的土壤剖面初始 NO_3^- -N 浓度的平均值与初始排水样本溶液中 NO_3^- -N 的浓度取算术平均作为模拟计算中的 C_0 值。利用式(15)可求得 200cm 出流面处(忽略反滤层) NO_3^- -N 的出流浓度动态,其模拟结果与实测值的比较如图 9~图 11。可见,实测值与模拟值趋势上一致。

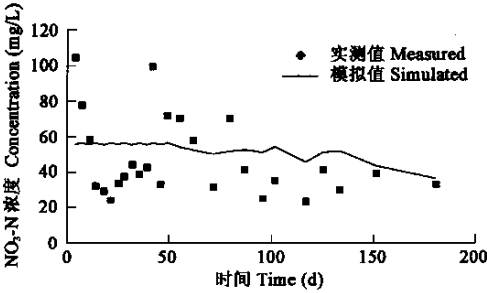


图 9 SE2 池土壤出流液中 NO_3^- -N 浓度动态
Fig. 9 NO_3^- -N concentration of effluent in lysimeter SE2

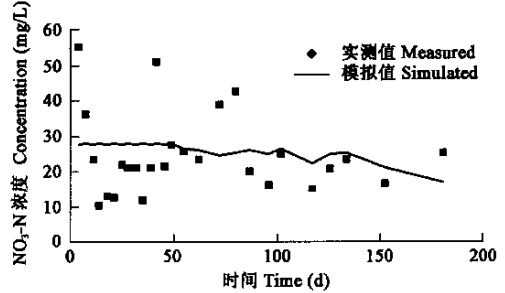


图 10 SE3 池土壤出流液中 NO_3^- -N 浓度动态
Fig. 10 NO_3^- -N concentration of effluent in lysimeter SE3

3.3 出流液中 NO_3^- -N 累积淋洗量动态的模拟和预报

根据(17)式模拟了冬小麦从播种到返青期地中渗透计土壤 NO_3^- -N 的累积淋洗量,如图 12、图 13 和图 14 及表 3 所示。同时用 SE2 池的参数预报了 SE3 池的淋洗量;用 SE3 池的参数预报了 SE4 池的淋洗量;用 SE4 池的参数预报了 SE2 池的淋洗量。累积淋洗量动态的模拟和预报精度见表 4。

从图 12~图 14 可见,在模拟时段中后期,模拟值较明显地大于实测值,这是由于模型未考虑 NO_3^- -N 在土壤-作物系统中的转化作用,因而过高地估计了土壤中 NO_3^- -N 的淋洗量。

为了评价施用不同数量氮肥对排水和地下水质的影响,Lars Bergstorm 等人设计了一个排水系统,按照 0,50,100,150,200 $\text{kgN}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的处理施氮。结果表明,当施肥量小于 $100\text{kgN}/\text{hm}^2$ 时,硝酸盐的淋洗量是缓和的;施肥量在 91 到 200 $\text{kgN}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 范围内,淋洗量随施肥量的增加而增加, NO_3^- 淋洗量的增加仅仅发生在施用了过量氮肥($200\text{kgN}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)的情形下^[13]。美国洛桑姆斯太试验站的试验结果也表明施肥量达到 $100\text{kg}/\text{hm}^2$ 时, NO_3^- 的淋洗将迅速增加^[13]。从本文的试验与模拟结果看,施氮量为 $240\text{kg}/\text{hm}^2$ 的处理在 2m 深处 NO_3^- -N 的淋失量是氮肥施用量为 $120\text{kg}/\text{hm}^2$ 处理在同样埋深处 NO_3^- -N 淋洗量的两倍多,这进一步验证了国外学者的有关研究结论。

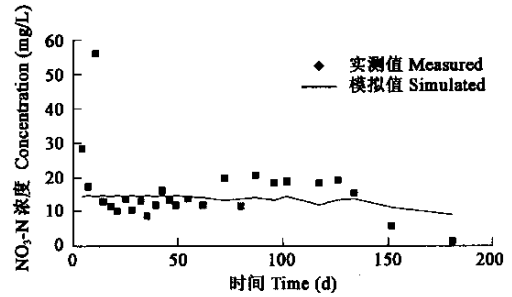


图 11 SE4 池土壤出流液中 NO_3^- -N 浓度动态
Fig. 11 NO_3^- -N concentration of effluent in lysimeter SE4

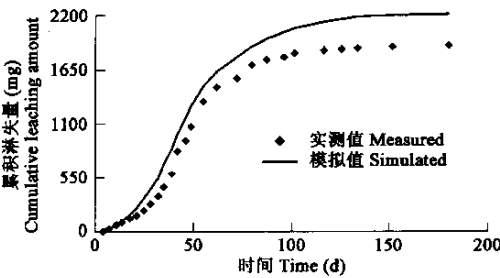


图 12 SE2 池土壤埋深 200cm 出流处 NO_3^- -N 累积淋洗量动态
Fig. 12 Cumulative leaching amount of NO_3^- -N at the depth of 2m in lysimeter SE2

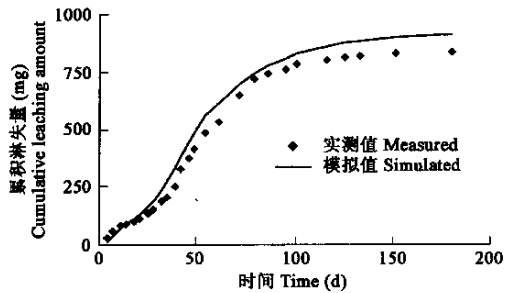


图 13 SE3 池土壤埋深 200cm 出流处 NO_3^- -N 累积淋洗量动态
Fig. 13 Cumulative leaching amount of NO_3^- -N at the depth of 2m in lysimeter SE3

表 3 冬小麦不同生育期地中渗透计土壤 2m 出口处 NO₃⁻-N 累积淋洗量的模拟结果

冬小麦生育期 Growing season of winter wheat	模拟值 Simulated data (mg)			实测值 Measured data(mg)		
	SE2	SE3	SE4	SE2	SE3	SE4
	(240kg N/hm ²)	(120kg N/hm ²)	(0kg N/hm ²)	(240kg N/hm ²)	(120kg N/hm ²)	(0kg N/hm ²)
苗期 Seedling(10-09~11-30)	1284.09	488.09	349.28	1072.79	418.96	276.93
越冬期 Hibernation(12-01~03-10)	919.71	415.75	190.52	813.93	413.64	204.09
返青期 Turning green(03-11~04-08)	5.32	6.60	1.74	3.83	7.28	0.21

表 4 地中渗透计土壤 2m 埋深出口处 NO₃⁻-N 的累积淋洗量

池号 No.	ΔN _{meas}	ΔN _{calc}		相对误差 Relative error (%)	
	实测值(mg) Measured data	模拟值(mg) Simulated results	预报值(mg) Predicted results	模拟值 Simulated results	预报值 Predicted results
SE2	1890.5385	2209.12	2205.31	16.85	16.65
SE3	839.8867	910.45	908.24	8.40	8.14
SE4	481.2234	541.53	543.29	12.53	12.90

在冬小麦各生育期,由于作物对肥料需求量存在差异,因而会对土壤中 NO₃⁻-N 的淋洗产生不同的影响。在作物生长初期,由于其生物量较小,所以需水、需肥量较少,故在大水灌溉时易发生 NO₃⁻-N 的淋洗;随着冬小麦的发育,作物对水肥需求量增多,土壤中的水分和氮素大多被作物吸收利用,因而随水分运动向下淋洗的 NO₃⁻-N 相对减少。这是本文试验条件下土壤中 NO₃⁻-N 淋洗量的 90% 以上发生在小麦越冬期之前的主要原因(图 12~图 14,表 3)。

德国学者的研究表明^[13],当施肥量分别为 80kg/hm² 和 160kg/hm² 时,壤土淋失的硝态氮中肥料氮的淋失分别仅占总淋洗量的 7.2% 和 9.9%。对土壤 NO₃⁻-N 淋洗的主要贡献是在较高施肥水平下,在土壤中残留的 NO₃⁻-N,它导致下季作物生长时产生较多的 NO₃⁻-N 淋洗。在与地中渗透计相邻的农田对照试验地取土测试的结果(表 5)表明,在高施氮水平下,土壤中残留氮的数量要明显高于低氮水平。从表 4 中可知,240kgN/hm² 处理的 NO₃⁻-N 淋洗量是 0kgN/hm² 处理淋洗量的近 4 倍,这与不同施肥量条件下土壤中残留 NO₃⁻-N 的高低是一致的。

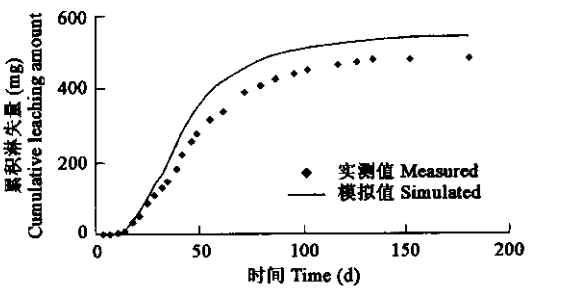


图 14 SE4 池土壤埋深 200cm 出流处 NO₃⁻-N 累积淋洗量动态
Fig. 14 Cumulative leaching amount of NO₃⁻-N at the depth of 2m in lysimeter SE4

表 5 冬小麦收获后残留在土壤中的 NO₃⁻-N

处 理 Treatment (N kg/hm ²)	土壤剖面 NO ₃ ⁻ -N 浓度 NO ₃ ⁻ -N concentration in soil profile(mg/kg)									
	20 (cm)	20~40 (cm)	40~60 (cm)	60~80 (cm)	80~100 (cm)	100~120 (cm)	120~140 (cm)	140~160 (cm)	160~180 (cm)	180~200 (cm)
0	2.82	1.15	1.22	1.22	2.19	0.67	0.69	0.82	1.71	2.10
120	19.73	5.56	1.92	1.72	1.83	1.13	1.28	2.64	3.84	4.66
240	18.88	8.56	4.70	3.18	2.73	8.96	9.92	13.03	7.53	6.48

References :

[1] White R E. Prediction of nitrate leaching from a structured clay soil using transfer functions derived from externally applied or indigenous solute fluxes. *Journal of Hydrology*, 1989, **107**: 31~42.

[2] Sposito G, Gupta V K. Fundamental problems in the stochastic convection-dispersion model of solute transport in aquifers and field soils. *Water Resour. Res.*, 1986, **22**: 77~88.

[3] Jury W A. Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water Resour. Res.* , 1982, **18** (2): 363~368.

[4] Jury W A, Sposito G, White R E. A transfer function model of solute transport through soil 1. Fundamental concepts. *Water Resour. Res.* , 1986, **22** (2): 243~247.

[5] White R E, Dyson J S, Haigh R A, *et al.* A transfer function model of solute transport through soil 2. Illustrative applications. *Water Resour. Res.* , 1986, **22** (2): 248~254.

[6] White R E. A transfer function model for the prediction of nitrate leaching under field conditions. *Journal of Hydrology*, 1987, **92**: 207~222.

[7] Sposito G, Jury W A. The lifetime probability density function for solute movement in the subsurface zone. *Journal of Hydrology*, 1988, **102**: 503~518.

[8] Ren L, Liu Z G, Li B G. Transfer function approach of solute transport in unsaturated homogeneous soil under unsteady flow condition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, **2**: 7~15.

[9] Ren L, Yuan F S, Zhang F S. A transfer function for the simulation and prediction of nitrate nitrogen leached in soil. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, **4**: 21~27.

[10] Mathematics manual. *Compiling group of mathematics manual*. Beijing: Advanced Education Press, 1997.

[11] Feng G L. Research on water dynamics and water saving irrigation in early and late planting wheat field in suburbom Beijing. MSC Dissertation of Beijing Agricultural University,1992.

[12] Jury W A, Roth K. Transfer functions and solute movement through soil: Theroy and applications. Birkhanser Verlag Basel. Boston Berlin, 1990.

[13] Yi X. Research on leaching pollution of nitrogen fertilizer. *Agricultural Eenvironment Protection*, 1991, **10** (5): 223~226.

参考文献:

[8] 任理,刘兆光,李保国. 非稳定流条件下非饱和均质土壤溶质运移的传递函数解. *水利学报*,2000,**2**:7~15.

[9] 任理,袁福生,张福锁. 土壤硝态氮淋洗的传递函数模拟和预报. *水利学报*,2001,**4**:21~27.

[10] 数学手册. 数学手册编写组. 北京:高等教育出版社,1997.

[11] 冯广龙. 京郊早、晚播表田水分动态及节水灌溉研究. 中国农业大学硕士学位论文,1992.

[13] 易秀. 氮肥的渗漏污染研究. *农业环境保护*,1991,**10**(5):223~226.

