

宁夏黄灌区灌淤土硝态氮运移规律研究

易 军, 张晴雯, 王 明, 张 惠, 王永生, 杨正礼 *

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要:为研究硝态氮在宁夏黄灌区灌淤土中的基本运移规律,采用水平土柱进行硝态氮水平运移规律研究,并采用自制垂直土柱完成了硝态氮垂直运移规律研究。硝态氮水平运移规律研究表明:硝态氮运移与水分湿润峰迁移具有很好的一致性,随着硝态氮运移距离的增加,硝态氮浓度升高,并在湿润峰处累积;硝态氮浓度随含水量的增加而减少,并呈幂函数关系;硝态氮运移速率随运移距离增加而减小,且呈幂函数关系。硝态氮垂直运移实验表明:由于有机质和粘粒含量不同,各土层硝态氮穿透曲线差异较大;CXTFIT 模型的拟合结果与实测结果相关性很好,说明可以使用 CXTFIT 模型进行土壤硝态氮运移预测和土壤硝态氮运移参数的测定。

关键词:灌淤土;硝态氮;水平运移;垂直运移;穿透曲线

中图分类号:X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2046-08

Nitrate-nitrogen Transport in an Anthropogenic-alluvial Soil of Ningxia Irrigation Area, China

YI Jun, ZHANG Qing-wen, WANG Ming, ZHANG Hui, WANG Yong-sheng, YANG Zheng-li*

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Nitrate nitrogen (NO_3^- -N) transport has special patterns in anthropogenic-alluvial soil of Ningxia irrigation area. In this paper, we studied the NO_3^- -N transport characteristics using the horizontal and vertical soil columns. The results on NO_3^- -N horizontal transport experiment indicated that the NO_3^- -N horizontal transport followed very well with the soil moisture movement. With the increases of NO_3^- -N horizontal transport distance, the concentration of NO_3^- -N was higher, and reached the maximum at the interface of wetting front. The concentration of NO_3^- -N decreased with the increases of the soil water content, and their relationships could be fitted with a power function. The NO_3^- -N transport rate decreased with the increase of the NO_3^- -N horizontal movement distance, following a power function as well. Vertically, the NO_3^- -N breakthrough curve (BTC) significantly different along with the soil depths, as affected by the different content of the organic matter and the clay in different soil layers. The CXTFIT was used to simulate the breakthrough curve. Parameters obtained with CXTFIT fitted very well with the measured values, indicating that the CXTFIT model could be used for NO_3^- -N transport prediction in anthropogenic-alluvial soil of Ningxia irrigation area.

Keywords: anthropogenic-alluvial soil; nitrate nitrogen; horizontal transport; vertical transport; break through curve

氮素引起的水体污染问题已受到全世界的广泛关注,而硝态氮浓度超标是地下水污染的主要问题之一^[1-4]。土壤硝态氮浓度过高对地下水安全构成巨大威胁,关于硝态氮在土壤中运移规律的研究也是如今土壤学和环境科学的研究热点^[5-7]。

宁夏黄灌区属干旱地区,灌溉水源主要为黄河

水。宁夏黄灌区是宁夏主要农业生产区,是全国 12 个商品粮基地之一,受传统耕作习惯影响,大水漫灌和氮肥过量施用的现象仍然十分普遍^[8-11]。在提供大量商品粮的同时,由于大量施用化肥(氮肥占绝对优势)而造成的面源污染导致地下水和黄河水污染日益严重^[10-12]。

本实验对宁夏黄灌区典型灌淤土的硝态氮水平运移规律和垂直运移规律进行研究,为研究和解决硝态氮在浅层地下水环境中的运动及其影响提供科学的预测与预报;同时为该地区土壤与浅层地下水氮素运移模型的建立提供相关参数,为该地区农田水肥管

收稿日期:2011-03-02

基金项目:黄河上游灌区农田退水污染控制与湿地生态修复关键技术研究与示范(2008ZX07212-004)

作者简介:易 军(1987—),男,湖北公安人,在读硕士,研究方向为农田污染防治。E-mail:yijun_soil@yahoo.cn

* 通讯作者:杨正礼 E-mail:yangzli@caas.org.cn

理提供数据与技术支持,为黄河大型灌区农田氮素流失污染控制提供科学依据。

1 研究区自然状况与供试土样理化性质

宁夏青铜峡灌区灵武农场农田为研究对象,该地区位于北纬 $38^{\circ}03' \sim 38^{\circ}15'$,东经 $106^{\circ}14' \sim 106^{\circ}29'$,属于典型中温带大陆性半干旱气候,是宁夏引黄灌区典型农业生产区。海拔 1 114 m,年均降水量 180~220 mm,且集中在 7—9 月,年均蒸发量 1 100~1 600 mm。年均日照时间 2 800~3 100 h,无霜期 164 d,年平均气温 $8 \sim 9^{\circ}\text{C}$,作物生长季节(4—9 月) $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 3 200~3 400 $^{\circ}\text{C}$ 。研究区土壤为黄河水长年灌溉形成的灌淤土,稻旱轮作为该地区典型种植模式,水稻、小麦、玉米、葵花为主要种植作物。

供试土壤于 2009 年 10 月水稻收获后挖取剖面,以 7~15 cm 为一层分层采集土壤,风干后磨碎过 1 mm 筛备用。根据粒径分析结果对土壤重新分层并进行相关性测定。

土壤基本性质的测定方法如下:(1)土壤容重:环刀法;(2)土壤质地:BT-9300H 型激光粒度分布仪,质地分类按照国际制分类标准;(3)土壤有机质:重铬酸钾外加热法;(4)土壤孔隙度:比重瓶法(结合土壤容重计算)^[13-14]。供试土壤理化性质见表 1。

2 实验方法

2.1 硝态氮水平运移实验

采用水平土柱完成硝态氮水平运移试验。

实验装置包括有机玻璃扩散筒和马氏瓶两部分。扩散筒共分 18 节,每节 2 cm,直径为 5 cm,分为水室段与试样段:水室段长 2 cm,连接马氏瓶;试样段长 34 cm,供填装供试土样。通过调节马氏瓶起泡点控制水室内液面与试样段土样的高度相同,以消除重力势和压力势对土壤水分扩散的影响。实验过程中记录时间、马氏瓶液面高度与扩散筒湿润峰位置,当湿润峰

运移到扩散筒 2/3 左右时停止实验,迅速分段取土。土样混匀后分为 4 份,2 份用于测定土壤含水量,2 份用于测定土壤硝态氮浓度。

用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KCl}$ 溶液以 10:1 的水土比,浸提土壤中的硝态氮,振荡过滤后使用紫外分光光度法测定^[14]。

2.2 硝态氮垂直运移实验

采用自制垂直土柱完成不同土层硝态氮穿透曲线试验,并用 STANMOD(Studio of Analytical Models)软件中的 CXTFIT 子模型完成穿透曲线的拟合^[15-16],获取相关硝态氮运移参数。

土柱为内径 10.5 cm、高度 15 cm 的圆柱形 PVC 管,管底密封后再开一个直径为 1.5 cm 圆孔,在开孔处连接直径为 2 cm、长 5 cm 圆管,以便收集淋洗液。整个装置在使用前需检查各连接处,确保不漏水。填土前先在管底部放置一层无纺布,并填装 1 cm 厚石英砂。填土以 1 cm 为单位按原容重分层进行,填土总高度为 10 cm。填土时尽量保证各层均匀且各层之间不会分层,特别注意将土柱边缘土壤压实,防止壁流现象产生。填土完成后在表层填装 0.5 cm 厚的石英砂,防止加液时破坏土体表面。

整个实验使用马氏瓶控制水头,通过调整马氏瓶起泡点高度实现。实验前,先从土柱底部圆管进水,使土体饱和直至土柱出现液面,然后从土柱上端加水,淋洗土柱 2~5 d,直至淋出液硝态氮浓度到极低水平;再后从土柱上端加入 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝态氮溶液 100 mL,待硝态氮示踪液全部渗入土体后,使用蒸馏水淋洗。整个实验过程水头控制在 0.5~1.0 cm。根据淋滤速率确定不同土层取样时间:0~45 cm 与 45~60 cm 为 2 h,60~90 cm 为 0.5 h,90~100 cm 为 1 h,100~120 cm 为 0.25 h,取样后记录各次样品的体积,并测定淋出液的硝态氮浓度。

硝态氮测定采用紫外分光光度计法^[14]。

试验结束后将单位时间得到的硝态氮浓度输入 STANMOD 软件中的 CXTFIT 子模型,完成对穿透曲

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of test soils

土层/cm	土壤质地/%				容重/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	孔隙度/%
	粘粒	粉粒	沙粒	质地			
0~45	18.25	53.76	27.99	粉壤土	1.532	12.7	44.25
45~60	28.04	67.71	4.26	粉粘土	1.591	8.30	42.07
60~90	12.11	31.96	55.93	壤土	1.503	5.56	44.82
90~100	15.96	42.05	42.00	粉壤土	1.520	4.48	43.72
100~120	6.41	26.93	66.67	砂壤土	1.479	3.55	45.28

线的拟合,并得到相关参数。

CXTFIT 模型可以用于确定实验室和田间条件下溶质运移模型的适应性参数,该模型使用的一维条件下反应性溶质的溶质运移方程描述如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c_r + \rho_b s) = \frac{\partial}{\partial x}(\theta D \frac{\partial c_r}{\partial t} - J_w c_r) - \theta \mu_l c_r - \rho_b \mu_s s + \theta \gamma_l(x) + \rho_b \gamma_s \quad (1)$$

式(1)中: c_r 是液相的剩余浓度($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$); s 是吸附相浓度($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$); D 是弥散系数($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$); θ 是容积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); J_w 是水通量密度($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ_b 是土壤容重($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); μ_l 和 μ_s 分别是液相和吸附相溶质的降解系数; γ_l 和 γ_s 分别为液相和吸附相的活度系数; x 为运移距离(m); t 为时间(h)。

若认为该溶质的吸附等温线是线性的,那么在均匀土质稳态流的条件下,上述方程可以写为:

$$R \frac{\partial c_r}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_r}{\partial x^2} - v \frac{\partial c_r}{\partial x} - \mu c_r + \gamma(x) \quad (2)$$

式(2)中新参数 v 为平均水孔隙流速($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$), R 为阻滞系数(无量纲参数),其他参数同式(1)。

3 结果与讨论

3.1 硝态氮水平运移规律

3.1.1 硝态氮浓度与运移距离的关系

硝态氮浓度与运移距离关系(图1)表明,随着运移距离的增加,硝态氮浓度逐渐升高。这与陈效民、杜臻杰等的研究结果类似^[17-18],而与孙志高等的研究结果相反^[9]。这可能由于土壤质地差异较大导致,孙志高的研究对象为粘粒含量很高的沼泽土,沙粒含量极少,而本研究比陈效民、杜臻杰所选用的土壤沙粒含量相对较高。

在土柱进水端硝态氮浓度上升趋势较为缓和,而

在接近湿润峰处硝态氮浓度急剧上升,且在湿润峰处出现累积。说明硝态氮运移与湿润峰迁移有很好的-一致性,可以通过湿润峰的迁移速率来表征硝态氮的水平运移速率。

在近湿润峰处,0~45 cm 土层硝态氮浓度升高趋势较其他土层缓和。可能由于有机质对硝态氮有一定的吸附作用^[20-21],而表层土壤有机质含量较高,少部分硝态氮被有机质吸附,且近湿润峰端土壤含水量较低,被吸附的硝态氮在含水量较低条件下不易被淋洗,导致硝态氮随着湿润峰的向前推移出现了滞后现象,所以在邻近湿润峰端硝态氮上升幅度较为缓慢。

各土层湿润峰处硝态氮浓度变化范围为 142~191 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中 45~60 cm 与 90~100 cm 土层硝态氮浓度较其他土层高。这可能是由于表层土有机质含量较高,有机质对硝态氮的吸附作用阻碍了硝态氮的运移,这将导致湿润峰处的硝态氮浓度的降低;而 60~90 cm 与 100~120 cm 土体沙粒含量较高,虽然硝态氮将较快运移至湿润峰处,但随着沙粒含量的增加,阴离子扩散作用更加明显^[22],这将不利用湿润峰处硝态氮的累积。

3.1.2 硝态氮浓度与含水量的关系

硝态氮浓度与含水量关系(图2)表明,各土层硝态氮浓度随土壤含水量的增加而降低,且均呈幂函数关系($R^2_{0-45 \text{ cm}}=0.950, n=12; R^2_{45-60 \text{ cm}}=0.777, n=11; R^2_{60-90 \text{ cm}}=0.907, n=12; R^2_{90-100 \text{ cm}}=0.774, n=11; R^2_{100-120 \text{ cm}}=0.861, n=13$)。

由于硝态氮运移受到土壤水势梯度的影响,硝态氮随着水流持续向水势较低(即含水量较低)处移动,导致含水量较高处硝态氮减少,浓度降低。另外由于含水量较高对硝态氮有稀释作用也将导致高含水量条件下低硝态氮浓度现象的产生。这与杜臻杰、邓建

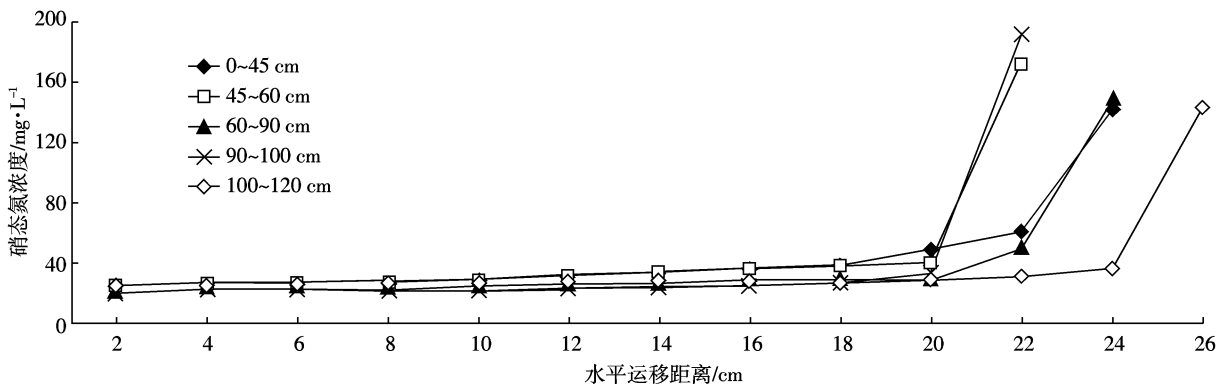


图1 硝态氮浓度与运移距离的关系

Figure 1 Relationship between the concentration of nitrate nitrogen and transport distance in different soil layers

才等的研究结果一致^[18,23]。

3.1.3 硝态氮运移速率与运移距离的关系

硝态氮水平运移的推动力主要是硝态氮的浓度梯度、干湿土层之间的水势梯度和土壤的基质势。图3表明在硝态氮水平运移过程中,其运移速率与运移距离并不是线性关系。而是随着运移距离的增加,硝态氮水平运移速率逐渐降低,呈现幂函数关系($R^2_{0\sim45\text{ cm}}=0.971, n=40; R^2_{45\sim60\text{ cm}}=0.968, n=28; R^2_{60\sim90\text{ cm}}=0.985, n=30; R^2_{90\sim100\text{ cm}}=0.989, n=23; R^2_{100\sim120\text{ cm}}=0.983, n=47$),且相关性均达到极显著水平。

60~90 cm与100~120 cm土体硝态氮水平运移速率较快,当运移到15~20 cm,其运移速率才基本稳定,60~90 cm土体稳定在 $0.03\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,100~120 cm稳定在 $0.06\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右;另外3层土体硝态氮运移速率较慢,当硝态氮移动至5 cm左右即达到较稳定状态,0~45 cm稳定在 $0.005\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,45~60 cm稳定在 $0.004\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,90~100 cm稳定在 $0.01\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右。

硝态氮运移速率主要受硝态氮浓度梯度、水势梯度和基质势影响。在运移速率较快的阶段主要受到浓

度梯度和水势梯度的影响,在湿润峰附近,基质势为主导因素,而基质势主要受土壤物理性状的影响。相关性分析结果表明,粘粒含量越高,稳定时(运移相同距离)的硝态氮运移速率越慢($R^2=0.725$),这与孙志高、陈效民等的研究结果相似^[19,24]。

3.2 硝态氮垂直运移规律

土壤溶质运移的穿透曲线反映溶质在不同介质中的混合置换和溶质运移特征,同时也反映溶质与介质或土壤达到反应平衡所需时间等特征。因此,土壤溶质运移穿透曲线是描述其运移过程的最基本、最直接的资料,也是人们研究土壤溶质迁移特性必不可少的工具^[25-26]。

3.2.1 硝态氮穿透曲线参数与影响因素分析

首先通过硝态氮出流总量来判断穿透曲线的合理性。整个实验硝态氮总输入量为 $0.1\text{ L}\times100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}=10\text{ mg}$,将每次的出流体积乘以硝态氮浓度后相加可得到实际硝态氮出流总量。结果表明,每层土的出流总量均接近10 mg,说明通过此实验得到的穿透曲线结果是可信的。

表2为硝态氮穿透曲线的基本观测参数:流速为

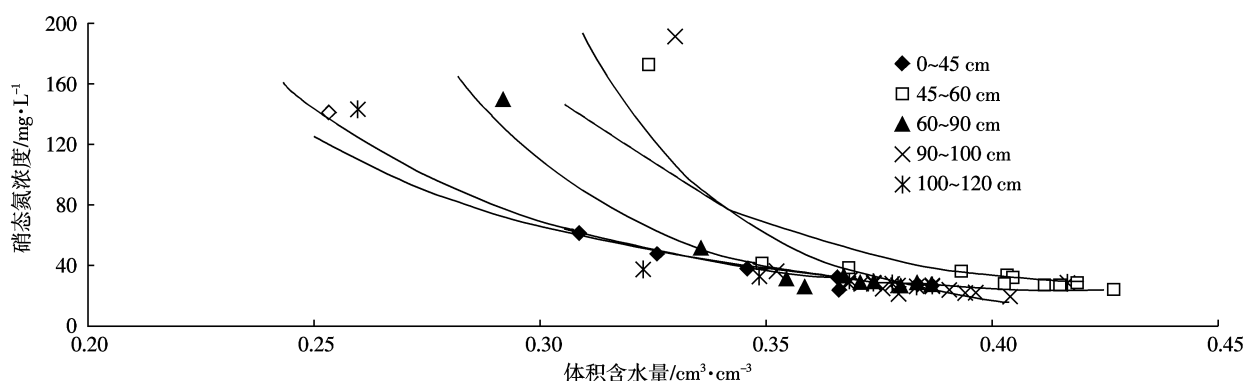


图2 不同土层硝态氮浓度与土壤含水量关系

Figure 2 Relationship between nitrate nitrogen and soil water content of different soil layers

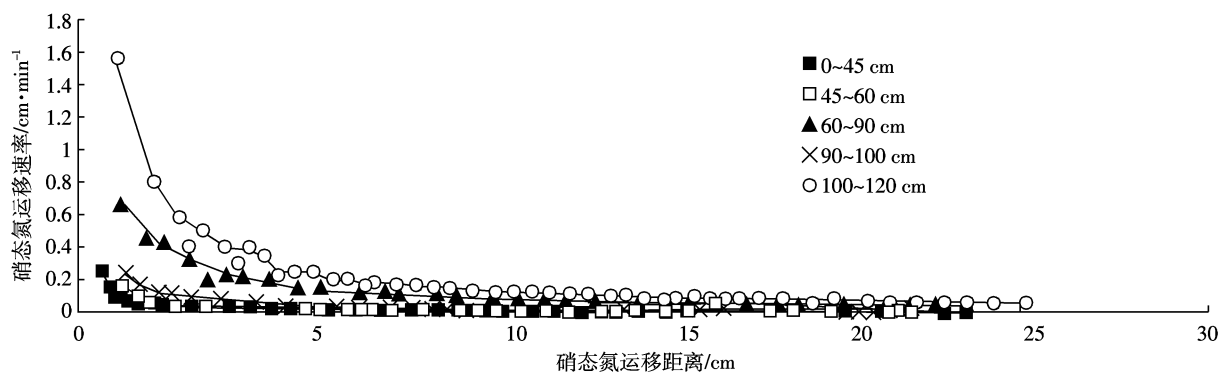


图3 不同土层硝态氮运移速率与运移距离的关系

Figure 3 Relationship between nitrate nitrogen transported velocity and transport distance in different soil layers

土柱淋洗液出流速度、出流时间为硝态氮最初被检测到的时间、峰值时间为检出液硝态氮浓度最高的时间、结束时间为硝态氮被完全淋洗出土柱的时间、穿透时间指硝态氮可以被检测到的时间、峰值指穿透曲线顶点的值,一般用出流液浓度(C)与标记液浓度(C_0)之比表示。结果表明,流速越快,出流时间越短,穿透耗时越短,峰值(C/C_0)越大,而不同土层硝态氮穿透曲线差异较大。

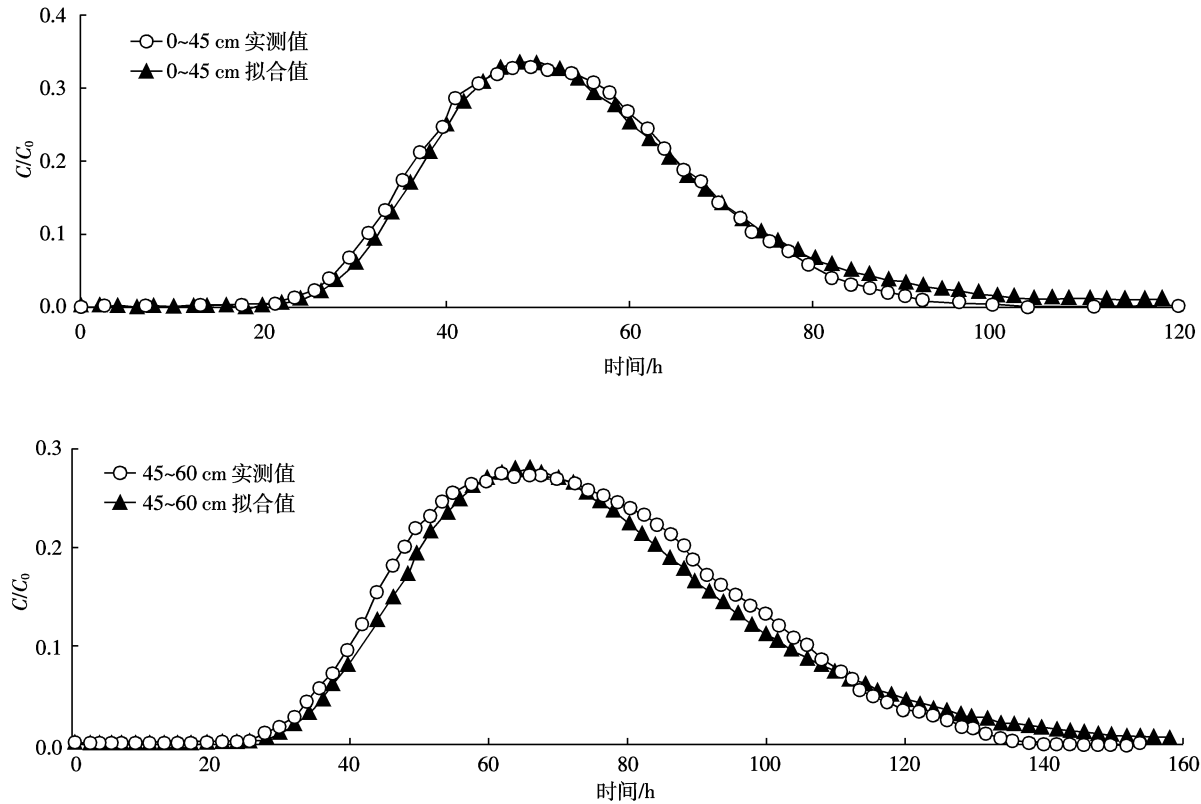
相关性分析结果表明,出流速度和峰值与土壤粘粒含量呈显著负相关($R^2=0.601、0.852;n=5$),与出流时间、穿透时间呈显著正相关($R^2=0.922、0.922;n=5$),这是因为土壤质地越粘,土壤颗粒越细,其表面积越大,堆积起来之后形成的土壤孔隙也就愈小,土壤对水的吸持能力就越大,导致水在土壤内的运移

速度变小;因而硝态氮穿透时间就越长,穿透曲线则趋于平缓。而出流速度、峰值、出流时间和穿透时间这 4 个观测参数与土壤有机质含量相关性相对较差($R^2=0.351、0.552、0.523、0.512;n=5$),这可能是由于各土层质地差异较大导致。由此得知,在水分饱和的定水头条件下,宁夏地区灌淤土硝态氮穿透曲线主要受土壤中粘粒含量的影响。

图 4 表明,所有穿透曲线都显出不对称性,各穿透曲线在结束前都有拖尾现象,上层土壤拖尾现象更加明显,这可能是受土壤有机质和土壤粘粒影响。虽然一般认为土壤颗粒对带负电荷的硝态氮不具有吸附性,但由于有机质表面的特殊结构和官能团能吸附带负电的离子,所以在有机质含量较高的情况下,少部分硝态氮也会被土体所吸附^[20-21],所以有可能引起

表 2 不同土层硝态氮穿透曲线观测参数
Table 2 Observed parameters of nitrate nitrogen BTCs in different soil layers

土层/cm	流速/mL·h ⁻¹	出流时间/h	峰值时间/h	结束时间/h	穿透时间/h	峰值/(C/C_0)
0~45	7.50	21.5	49.5	99.5	68	0.325 7
45~60	5.58	26	66	140	114	0.273 5
60~90	30.17	10.25	16.42	24.5	14.25	0.650 9
90~100	13.50	16	29	53	32	0.453 0
100~120	129.00	2.37	3.33	6.33	3.96	0.726 2



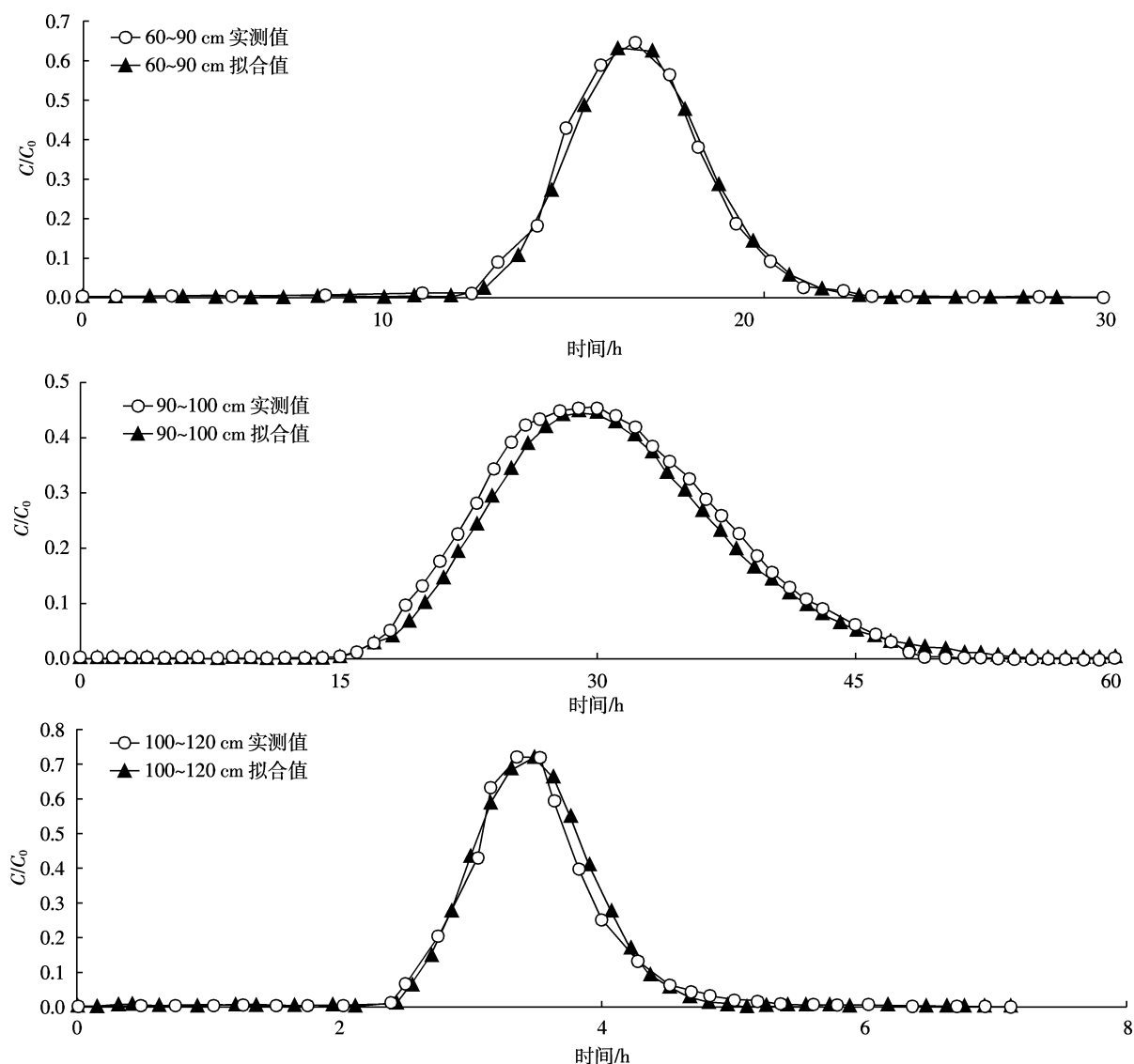


图4 不同土层硝态氮穿透曲线实测值与拟合值

Figure 4 The determined and fitted values of nitrate nitrogen BTC in different soil layers

穿透曲线的拖尾。另外,由于土体孔隙的非均一性,土体中存在一些封闭或半封闭孔隙,这就导致土体中水流的非均一性,即两区模型理论^[27]。这种造成穿透曲线不对称的物理原因正是由于土柱内存在不流动水体,它们不参与溶质的对流运移,它们与流动水体的溶质交换主要是以弥散(扩散)作用完成的,其交换速率显著低于对流运移速率。另一方面,由于这部分水体流动性差又占有部分孔隙,结果加快了动水区的水流速度,使溶质的对流运移速度也变大。这种运移速度的分异,也是造成穿透曲线不对称的原因^[28],而这种拖尾现象在非饱和条件下表现得更为明显^[29]。

3.2.2 CXTFIT 模型拟合结果

图4与表3为使用CXTFIT模型拟合硝态氮穿

透曲线的结果,各土层穿透曲线拟合结果与实测结果决定系数均在0.98以上,硝态氮淋出液的实测值与模拟值非常吻合,这说明用CXTFIT模型对稳流条件下饱和土壤中硝态氮淋失规律的模拟具有较高精度。

表3 CXTFIT模型拟合硝态氮运移参数

Table 3 Parameters of nitrate nitrogen transporting fitted by CXTFIT model

土层/cm	$v/\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	$D/\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	R	v/D	R^2
0~45	1.688	0.725 6	8.156	2.326	0.993 3
45~60	1.055	0.663 1	7.169	1.591	0.981 7
60~90	5.173	0.336 4	7.720	15.38	0.996 1
90~100	2.842	0.751 7	7.717	3.781	0.9911
100~120	32.76	2.304 0	9.989	14.28	0.993 2

相关性分析结果表明,使用 CXTFIT 模型拟合得到的土壤平均孔隙水流速度(v)与观测流速的相关性决定系数(R^2)为 0.994,说明使用 CXTFIT 模型拟合得到的结果是可靠的。拟合时发现参数 v 、 D 对结果影响较大,而 R 表现不是很敏感,故不对 R 进行相关性分析。平均孔隙水流速度(v)与粘粒含量呈幂函数关系($R^2=0.969$),而水动力弥散系数(D)与土壤粘粒相关性不明显($R^2=0.346$),但 v/D 与粘粒含量的幂函数关系决定系数也较高($R^2=0.783$),这表明在粘粒含量较高的土体中,对流作用和弥散作用对溶质运移均有较大影响;当粘粒含量较低时,弥散作用对溶质运移影响很小,对 v 和 D 的相关性分析结果($R^2=0.901$)表明, v 和 D 呈现正相关关系,这与陈效民等的研究结果一致^[28]。而有机质含量与 v 、 D 、 v/D 相关性均较差($R^2=0.320$ 、 0.187 、 0.390)。以上结果说明粘粒含量对硝态氮穿透曲线影响较大,这与使用硝态氮观测参数进行回归分析得到的结果一致,进一步说明使用 CXTFIT 模型拟合得到的硝态氮运移参数结果是可靠的。

在大田研究过程中,由于大孔隙的存在以及大田空间变异性的影响,通过室内实验获取的参数与大田的参数可能不完全一致,但这些室内测定的参数在一定程度上仍可以定量描述不同土层硝态氮运移的差异,且在进行大田氮素运移模型模拟的参数校正工作时,仍可以把这些室内参数作为初始参数使用。因此,室内试验结合 CXTFIT 模型是一种硝态氮运移规律研究与参数确定既简便又有效的方法。

4 结论

(1)硝态氮水平运移规律研究表明:硝态氮运移与湿润峰迁移具有很好的一致性,随着硝态氮运移距离增加,硝态氮浓度升高,并在湿润峰处累积;硝态氮浓度随含水量的增加而降低,并呈幂函数关系;硝态氮运移速率随运移距离增加而减小,且呈幂函数关系。有机质含量、土壤粘粒含量对硝态氮水平运移有较大影响。

(2)硝态氮垂直运移规律研究表明:由于有机质和粘粒含量不同,各土层硝态氮穿透曲线差异较大;在水分饱和的定水头条件下,研究区土壤硝态氮穿透曲线主要受土壤中粘粒含量的影响。CXTFIT 模型的拟合结果与实测结果相关性很好,使用 CXTFIT 模型拟合得到的硝态氮运移参数是可信的。

参考文献:

- [1] Mohammad N Almasri, Jagath J Kaluarachchi. Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 343:211-229.
- [2] 张维理,田哲旭,张 宁,等.我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J].植物营养与肥科学报,1995,1(2):80-87.
ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in north China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(2): 80-87.
- [3] Liu G D, Wu W L, Zhang J, et al. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107: 211-220.
- [4] Fathi M Anayah, Mohammad N Almasri. Trends and occurrences of nitrate in the groundwater of the West Bank, Palestine[J]. *Applied Geography*, 2009, 29:588-601.
- [5] Mahdi Gheysari, Seyed Majid Mirlatifi, Mehdi Homaei, et al. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96:946-954.
- [6] van der Laana M, Stirzakera R J, Annandalea J G, et al. Monitoring and modeling draining and resident soil water nitrate concentrations to estimate leaching losses[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97:1779-1786.
- [7] Wang Huanyuan, Ju Xiaotang, Wei Yongping. Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97:1646-1654.
- [8] 武雪萍,蔡典雄,梅旭荣,等.黄河流域农业水资源与水环境问题及对策[J].生态环境,2007,16(1):248-252.
WU Xue-ping, CAI Dian-xiong, MEI Xu-rong, et al. The problems and countermeasures for agricultural water resources and water environment in The Yellow River Basin[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 248-252.
- [9] 高 婷,马云瑞.宁夏化肥施用中的严峻问题与建议[J].宁夏农林科技,2006,6:77-78.
GAO Ting, MA Yun-rui. The serious problems and suggestions of fertilize in Ningxia [J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Science*, 2006, 6: 77-78.
- [10] 于 涛,陈静生.农业发展对黄河水质和氮污染的影响:以宁夏灌区为例[J].干旱区资源与环境,2004,18(5):1-7.
YU Tao, CHEN Jing-sheng. Impacts of the agricultural development on the water quality and nitrogen pollution of Yellow River-Case of Ningxia irrigation area[J]. *Journal of Arid Land and Resources and Environment*, 2004, 18(5):1-7.
- [11] 张爱平,杨世琦,杨正礼,等.宁夏灌区农田退水污染形成原因及防治对策[J].中国生态农业学报,2008,16(4):1037-1042.
ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, YANG Zheng-li, et al. Influencing factors and countermeasures of irrigation return flow pollution in

- Ningxia Yellow River Water Irrigation District[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4):1037-1042.
- [12] 张学军,陈晓群,刘宏斌,等.宁夏引黄灌区稻田氮磷流失特征初探[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(5):1202-1209.
- ZHANG Xue-jun, CHEN Xiao-qun, LIU Hong-bin, et al. Preliminary study on nitrogen and phosphorus loss in Yellow River irrigated paddy field of Ningxia [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5):1202-1209.
- [13] 中科院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社, 1978.
- Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical properties measurement[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [14] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil agro-chemistry analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] Simunek J, van Genuchten M Th, Sejna M, et al. The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation [M]. Golden, Colorado: Versions 1.0 and 2.0, IGWMC-TPS-71, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, 1999:32.
- [16] Toride N, Leij F J, van Genuchten M Th, et al. The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments[M]. California: U S Salinity Laboratory, Agricultural research service, U. S. Department of agriculture, Riverside, 1995.
- [17] 陈效民, 邓建才, 张佳宝, 等. 黄淮海平原主要土类中硝态氮水平运移规律[J]. *环境科学*, 2002, 23(5):96-99.
- CHEN Xiao-min, DENG Jian-cai, ZHANG Jia-bao, et al. Horizontal transport of nitrate in main soil groups of Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(5):96-99.
- [18] 杜臻杰, 陈效民, 方 堃, 等. 典型红壤旱地硝态氮水平运移规律的研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(6):1349-1352.
- DU Zhen-jie, CHEN Xiao-min, FANG Kun, et al. Study on horizontal transport of nitrate-N in dry land of representative red soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6):1349-1352.
- [19] 孙志高, 刘景双, 王金达, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤中硝态氮水平运移的模拟研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 26(3):51-56, 64.
- SUN Zhi-gao, LIU Jing-shuang, WANG Jin-da, et al. Simulation of horizontal movement of nitrate nitrogen in typical calamagrostis angustifolia wetland soils of Sanjiang plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 26(3):51-56, 64.
- [20] 郭胜利, 余存祖, 戴鸣钧, 等. 有机肥对土壤剖面硝态氮淋失影响的模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(4):123-126.
- GUO Sheng-li, YU Cun-zu, DAI Ming-jun, et al. Simulated test of effects of organic manure on leaching of nitrate nitrogen in soil profile[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(4):123-126.
- [21] A Endo S, Mishima K Kohyama. Modeling nitrate leaching on a cropped Andosol[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2009, 85:41-61.
- [22] Ishidera T, Miyamoto S, Sato H, et al. The effect of silica sand content on diffusion of CO_3^{2-} , Cl^- and I^- ions in compacted bentonite[C]. Nippon Genshiryoku Kenkyujo JAERI, 2005:264-269.
- [23] 邓建才, 陈效民, 柯用春, 等. 土壤水分对土壤中的硝态氮水平运移的影响[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(3):280-284.
- DENG Jian-cai, CHEN Xiao-min, KE Yong-chun, et al. Influence of soil moisture on the horizontal transport of nitrate-N in the soil[J]. *Chinese Environmental Science*, 2004, 24(3):280-284.
- [24] 陈效民, 潘根兴, 沈其荣, 等. 太湖地区主要水稻土中硝态氮水平运移规律的研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1):95-97.
- CHEN Xiao-min, PAN Gen-xin, SHEN Qi-rong, et al. Horizontal transport of nitrate nitrogen in main paddy soil of Tai lake area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1):95-97.
- [25] 邵明安, 王全九, 黄明斌, 等. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu, HUANG Ming-bin, et al. Soil physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [26] 王全九, 邵明安, 郑纪勇, 等. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an, ZHENG Ji-yong, et al. Soil moisture movement and solute migration[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2007.
- [27] Coats K H, Smith M B. Dead-end pore volume and dispersion in porous media[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1964, 4:73-84.
- [28] Chen Xiaomin, Wu Huashan, Wo Fei, et al. Nitrate vertical transport in the main paddy soils of Tai Lake region[J]. *Geoderma*, 2007, 142:136-141.
- [29] 邓建才, 陈效民, 卢 信, 等. 封丘地区主要土壤中硝态氮运移规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1):128-133.
- DENG Jian-cai, CHEN Xiao-min, LU Xin, et al. Rule of nitrate transport in main soils in Fengqiu region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):128-133.