

层状包气带黏土层厚度对硝态氮迁移的影响

田路遥^{1,2}, 王仕琴^{1,2*}, 魏守才³, 刘丙霞¹, 刘彬彬¹, 胡春胜¹

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256600)

摘要: 层状包气带结构中黏土层对污染物进入地下水具有阻滞作用, 黏土层的厚度对硝态氮(NO_3^- -N)在包气带迁移中的淋失、累积以及反硝化作用等具有非常重要的影响, 而目前关于这方面的研究还不足。该研究通过设置高度为 40 cm、砂土与黏土层厚度比分别为 3:1, 1:1, 1:3 的“上粗下细”型以及全黏土型的 4 组填充土柱, 采用稳定浓度的定水头淋滤试验, 研究黏土层厚度不同的土柱 NO_3^- -N 溶液入渗过程、土壤 NO_3^- -N 淋滤、累积和反硝化特征, 进而阐明层状包气带黏土层厚度对 NO_3^- -N 迁移的影响。结果表明: 湿润锋运移深度和累积入渗量与入渗时间的关系在溶液穿越砂黏土层界面前后由非线性趋于线性, 累积入渗量随黏土层厚度增加而显著减小 ($P<0.05$); 当土柱内黏土层厚度达到 40 cm 时, 其对 NO_3^- -N 淋滤的阻滞作用明显强于黏土层厚度为 10~30 cm 的土柱; 淋滤试验过程中在砂黏土层界面形成水分滞留层, 界面处黏土层中 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 累积量均达到峰值, 且随着深度的增加, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 累积量降低; 黏土层厚度差不小于 20 cm 的土柱内 NO_3^- -N 累积量差异显著 ($P<0.05$), 而 40 cm 黏土层的土柱反硝化量 $[(0.15\pm0.05)\text{g}]$ 显著高于黏土层厚度为 10~30 cm 的土柱 ($P<0.05$), 说明当黏土层达到一定厚度时 (如 40 cm), 对 NO_3^- -N 的阻滞作用和反硝化作用具有显著影响, 对防止 NO_3^- -N 淋失进入地下水产生重要作用。该研究可为层状包气带土壤条件下农田施肥管理与地下水保护提供科学依据。

关键词: 土壤; 氮; 水分入渗; 层状包气带; 黏土层厚度; 硝态氮迁移; 土柱试验

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.007

中图分类号: S153

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-14-0055-08

田路遥, 王仕琴, 魏守才, 等. 层状包气带黏土层厚度对硝态氮迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 55-62.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.007 <http://www.tcsae.org>

Tian Luyao, Wang Shiqin, Wei Shoucai, et al. Effect of the thickness of clay layer in the layered vadose zone on nitrate nitrogen migration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 55-62. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.007 <http://www.tcsae.org>

0 引言

包气带是指地面以下潜水面以上的地带, 它是大气水、地表水同地下水进行水分交换的地带, 也是地表污染物进入地下的通道^[1]。农业生产中过量施用的氮肥主要以硝态氮(NO_3^- -N)形式残留在包气带土壤中, 并受到灌溉、降水等水分驱动的作用向下迁移, 造成地下水 NO_3^- -N 浓度升高, 是全球范围内普遍关注的农田面源污染问题之一^[2]。因此, 研究包气带 NO_3^- -N 迁移及其影响因素对于地下水 NO_3^- -N 污染防控具有重要意义。

包气带 NO_3^- -N 的迁移过程受土地利用方式、降水或灌溉、土壤质地、地下水水位等因素的综合影响^[3-7]。Zhou 等^[8]研究表明, 中国北方小麦、玉米、露地蔬菜区、设施内蔬菜和果树区的 0~4 m 土壤剖面 NO_3^- -N 累积量分别达 (102 ± 9) 、 (169 ± 17) 、 (269 ± 20) 、 (286 ± 25) 和

$(486\pm74)\text{kg/hm}^2$, 说明土地利用方式影响土壤 NO_3^- -N 累积量。Zheng 等^[9-10]对比了农田和自然植被包气带土壤中 NO_3^- -N 的累积和淋失过程, 表明旱季 NO_3^- -N 在土壤剖面上累积, 而在雨季特别是极端降水条件下 NO_3^- -N 淋失量增加, 且随着降水量和 NO_3^- -N 的增加, NO_3^- -N 淋失量呈现非线性增长的趋势。以往研究从不同角度研究了不同因素对土壤 NO_3^- -N 迁移的影响。其中土地利用方式和作物覆盖种类影响施氮水平, 降水和灌溉条件决定包气带迁移的水动力条件, 地下水水位变化影响 NO_3^- -N 在包气带迁移的路径与时间。而在同等施氮量、水文与地下水埋深条件下, 土壤质地分布特征则是影响 NO_3^- -N 在包气带中迁移物理运移与化学反应的重要因素^[5]。

不同土壤质地的分层结构在自然界普遍存在, 包气带层状结构特性对土壤水分入渗、地下水补给及溶质迁移等过程具有重要影响^[11-12]。根据上下层土壤质地的差异, 土壤的分层结构可分为 2 类: 一类是具有较小渗透性的细质土覆盖具有较大渗透性的粗质土, 即“上细下粗”型; 另一类则是具有较大渗透性的粗质土覆盖具有较小渗透性的细质土, 即“上粗下细”型^[12]。已有研究^[11-14]表明“上粗下细”型的土壤结构中水分入渗速率与溶质迁移速率较“上细下粗”型土壤结构均增大。如甯娜等^[14]研究表明, Br^- 和 F^- 在由细及粗的土柱中集中于表层, 而

收稿日期: 2019-12-06 修订日期: 2020-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41530859, 41471028); 河北省重点科技研发项目 (18273604D); 河北省自然科学基金青年项目 (D2017503018)
作者简介: 田路遥, 主要从事地下水环境方面研究。

Email: tianluyao2017@163.com

*通信作者: 王仕琴, 研究员, 博士生导师, 主要从事水文循环与地下水环境方面研究。Email: sqwang@sjziam.ac.cn

在由粗及细的土柱中分布较均匀且溶质穿透整个土柱的时间较短。与保守性离子运移过程不同, NO_3^- -N 迁移与层状土的土壤质地分布关系更为密切, 过程更为复杂。张学科等^[5]对比分析了灌水量和施氮量对不同类型土壤中 NO_3^- -N 迁移的影响, 表明同等施氮和灌水条件下, 黏粒和粉粒比例较大的灌淤土对 NO_3^- -N 迁移的阻滞作用强于砂粒比例较大的灰钙土。Zhou 等^[15]研究了不同灌溉水平下土柱中氮淋失过程, 表明黏壤土中氮的淋失量占总施氮量的 5.7%~9.6%, 而砂壤土中氮的淋失量高达 16.2%~30.4%。李久生等^[16]通过对比砂土、砂壤土以及上砂下壤型土壤结构的水氮运移特征, 表明砂壤界面限制了水分的垂向运动, 在砂壤界面下部(壤土区)形成水分和 NO_3^- -N 积聚区。可见, 土壤分层结构中黏土颗粒所占比例大, 对污染物具有较高的吸附和阻滞作用。此外, 已有研究^[17]还表明土砾界面和黏土活性区是土壤反硝化作用的热点区, 可以降低土壤中 NO_3^- -N 向地下水的淋失量。以往的研究较多关注土壤剖面夹层的质地、位置对水分入渗和 NO_3^- -N 迁移的影响^[12-14], 而对黏土层厚度对 NO_3^- -N 迁移影响的研究较少, 虽然也有研究提出厚度超过 5~8 m 的黏土层可以有效阻滞农田 NO_3^- -N 进入含水层^[18], 但实际中较厚黏土层分布的农田包气带并不常见, 目前针对于包气带层状结构中黏土层厚度如何影响 NO_3^- -N 累积与淋失等迁移过程的认识仍然不足。

综上所述, “上粗下细”型土壤结构的水分和溶质迁移速率均大于“上细下粗”型, NO_3^- -N 进入地下水的风险较高。因此, 本文通过设置黏土层厚度不同的“上粗下细”型土壤剖面以及全黏土土壤剖面的土柱进行对比试验, 研究黏土层厚度对 NO_3^- -N 迁移过程影响的规律, 为阻控农田过量氮肥淋失进入含水层以及保护地下水水质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用砂土取自河北省石家庄市栾城区河道, 由于河流具有较强的水动力环境, 土壤含砂量大, 粉黏粒体积分数仅为 0.09%, 且砂土中 NO_3^- -N 含量较小, 对本次试验的影响可以忽略; 黏土取自栾城区长期耕作的农田表层土壤(10~20 cm), 粉黏粒体积分数高达 90.47%, 且长期过量施肥造成表层土壤中 NO_3^- -N 累积量较大^[19]。供试土壤风干后过 2 mm 筛, 用于理化性质检测与填充土柱, 试验所用土壤的其他理化性质如表 1 所示。

表 1 土柱试验填充土壤的理化性质

Table 1 Physic-chemical characteristics of soils used in the soil column experiments

土壤质地 Soil texture	初始体积含水率 Initial volumetric moisture content/%	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	电导率 Electrical conductivity/(μS·cm ⁻¹)	pH 值 pH value	土壤有机碳质量分数 Soil organic carbon content/(g·kg ⁻¹)	硝态氮质量分数 Content of nitrate nitrogen/(mg·kg ⁻¹)
黏土 Clay	2.42	1.48	237	8.08	40.28	44.3
砂土 Sand	0.64	1.51	98.5	8.65	2.56	2.9

1.2 试验设计

采用“上粗下细”型的垂直填充土柱研究黏土层厚度对 NO_3^- -N 在层状结构包气带中迁移的影响。研究区存在较为普遍的层状结构包气带, 且黏土或黏壤土层厚度多为 10~40 cm^[19]。为模拟自然状态下田间土层分布情况, 设置 4 种填充方式, 上层为砂土, 下层为黏土, 土柱填充的高度均设置为 40 cm。如图 1 所示, 土柱淋滤试验共设置 4 种黏土层厚度, A、B 和 C 土柱砂土和黏土填充厚度分别为 30 cm 砂土+10 cm 黏土、20 cm 砂土+20 cm 黏土、10 cm 砂土+30 cm 黏土, D 土柱 40 cm 全部为黏土填充, 每种填充方式设置 3 个重复试验。通过 4 组黏土层厚度逐渐增加的土柱研究黏土层厚度对 NO_3^- -N 迁移的影响。土柱试验所用有机玻璃柱高为 50 cm, 内部直径均为 10 cm, 在有机玻璃柱的底端垫有 1 cm 厚的纱布, 并在外管壁贴上刻度尺。

按照实测田间土壤容重(表 1)进行填充, 每 10 cm 一层压实放入柱中, 层与层之间用钢钎抓毛^[20], 并将管壁粗糙化, 以防止试验过程中优先流的产生。填充完土样后在土柱顶层放置 4 层厚度为 1 mm 的尼龙网以防止溶液飞溅, 在玻璃柱两端口覆盖封口膜以防止水分蒸发, 并在土柱下方放置水样瓶以承接淋滤液, 试验装置如图 2。

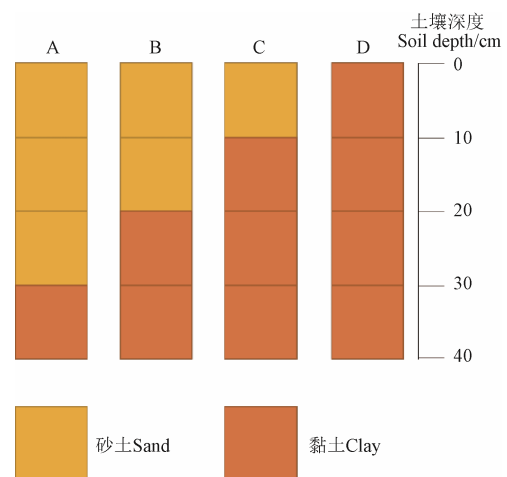
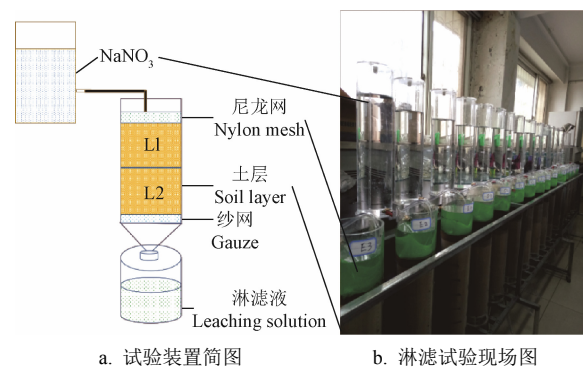


图 1 4 组土柱填充方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of four groups of soil columns



a. Sketch of experimental device b. Test site of leaching experiment

注: L1 表示砂土层; L2 表示黏土层。下同。

Note: L1 represents sand layer; L2 represents clay layer. Same as below.

图 2 淋滤试验装置

Fig.2 Device of leaching experiment

1.3 试验步骤与样品测定项

经实际调查得知该地区年平均施 N 量约为 400 kg/hm², 一年有 2 次灌溉, 单次灌溉量约为 70 mm。由于当地采取将肥料溶于水的施肥方式, 假设在水肥共施过程中所形成溶液的 N 浓度一致, 经计算形成的溶液中 N 浓度约为 285.7 mg/L。试验采用定水头、稳定浓度溶液持续垂直入渗的方式模拟农田施肥灌溉过程中水肥入渗模式, 周期设为 11~12 d。通过测定淋滤液与试验后土壤的相关水化学指标, 分析黏土层厚度不同的层状土壤 NO₃⁻-N 的迁移过程, 包括 NO₃⁻-N 的淋滤、累积与反硝化作用。

1.3.1 试验步骤

淋滤试验步骤如下: 1) 将 NaNO₃ (分析纯, 含量 >99%) 溶解于高纯水 (电导率小于 0.1 μS/cm 和残余含盐量小于 0.3 mg/L) 配制入渗溶液, 入渗溶液中 NO₃⁻-N 浓度为 285.7 mg/L。2) 室温恒定为 24 °C, 用马氏瓶 (外管壁贴有刻度尺, 内部直径 10 cm) 经导管定水头 (水头高度为 3 cm) 的方式匀速向土柱内供应溶液, 并用薄膜将土柱顶端覆盖以减少溶液蒸发。3) 将试验开始 (开始供应入渗溶液) 时刻作为 0 时, 在试验开始后记录湿润锋运移深度 (观测并记录湿润锋到达砂土和黏土界面的时刻)、马氏瓶内入渗溶液刻度的变化。4) 观测时间间隔设置如下: 第 1 天为 10 min, 2~3 d 为 1 h, 4~7 d 为 2 h, 7 d 以后为 4 h, 标记每组土柱淋滤液渗出时间; 淋滤液取样的时间间隔设置如下: 0~3 d 取样时间间隔为 1 h, 4~7 d 为 2 h, 7 d 以后为 4 h。5) 当淋滤液与入渗溶液中 NO₃⁻-N 浓度相近时, 淋滤试验再进行 3~4 d, 若淋滤液中 NO₃⁻-N 浓度稳定, 便可停止试验。

1.3.2 样品测定

淋滤液体积测定: 用 50 mL 量筒 (精度为 1 mL) 测量淋滤液体积。

入渗溶液中不含氯离子 (Cl⁻), 可以用淋滤液中 Cl⁻ 浓度变化特征来说明土壤中 NO₃⁻-N 的迁移规律。淋滤液中硝酸根 (NO₃⁻) 与 Cl⁻ 浓度的测定: 1) 利用便携式电导率仪 (SG7) 测定淋滤液的电导率。2) 将淋滤液用 0.22 μm 醋酸纤维素滤膜过滤入 5 mL 进样管后, 用液相离子色谱 (ICS-2100, Dionex, 美国) 测定 NO₃⁻ 与 Cl⁻ 浓度。

土壤中相关离子测定: 1) 淋滤试验结束后, 按照设定深度 (0~10、>10~20、>20~30 与 >30~40 cm) 用土钻垂直分层采集土柱内土壤样品风干过 2 mm 筛。2) 称取风干土样 10 g, 用高纯水进行浸提 (土水质量比为 1:5), 经离心萃取后得到上层清液^[19]。3) 经 0.22 μm 醋酸纤维素滤膜过滤上层清液, 用液相离子色谱 (ICS-2100, Dionex, 美国) 测定浸提液中 NO₃⁻ 与亚硝酸根 (NO₂⁻) 浓度。

1.4 指标计算

为研究包气带层状结构黏土层厚度对 NO₃⁻-N 迁移的影响, 计算 4 组土柱的溶液累积入渗量、剖面各层 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N 累积量、以及估算试验过程的反硝化量。

忽略试验过程中蒸发作用的影响, 则累积入渗量由式 (1) 计算:

$$V = 10^{-3} \pi r^2 \sum_{i=1}^n h_i \quad (1)$$

式中 V 为累积入渗量, L; r 为马氏瓶内部半径, cm; h_i 为第 i 个时间段供应溶液瓶内入渗溶液高度变化, cm。

剖面上某一土层 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N 累积量由式 (2) 计算^[19]

$$R = 0.1cdh_{\pm} \quad (2)$$

式中 R 为该土层土壤的 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N 累积量, kg/hm²; c 为试验后该土层土壤中 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N 含量, mg/kg; d 为该土层土壤容重, g/cm³; h_{\pm} 为该土层厚度, cm。

忽略蒸发对 NO₃⁻-N 浓度的影响, 入渗溶液没有铵态氮, 供试土壤经长期风干后铵态氮含量较小, 且试验过程中土壤长期处于淹水的还原环境, 土壤铵态氮对试验影响较小。通过量化试验前后各土柱内 NO₃⁻-N 输入与输出量, 用质量平衡法^[21] 计算出试验前后损耗量来估算 4 组土柱内反硝化作用所消耗 NO₃⁻-N 的量。所用计算公式如下:

$$O = \sum_{i=1}^n 10^{-3} C_i V_i \quad (3)$$

$$S = \sum_{j=1}^n 10^{-6} M_j C_{mj} \quad (4)$$

$$I = 10^{-3} V C_s \quad (5)$$

$$l = 10^{-6} d \pi r^2 h_d C_b \quad (6)$$

$$L = l_s + l_c \quad (7)$$

$$W = I + L - O - S \quad (8)$$

式中 O 为通过淋滤液计算得出的输出 NO₃⁻-N 量, g; C_i 为第 i 个时间段内淋滤液 NO₃⁻-N 浓度, mg/L; V_i 为第 i 个时间段内淋滤液体积, L; S 为淋滤试验结束后土柱内 NO₃⁻-N 累积量, g; M_j 为第 j 个土层土壤的质量, g; C_{mj} 为试验后第 j 个土层土壤中 NO₃⁻-N 单位累积含量, mg/kg; I 为试验过程中输入的 NO₃⁻-N 总量, g; V 为试验过程中溶液的累积入渗量, L; C_s 为输入溶液 NO₃⁻-N 浓度 (285.7 mg/L); l 为土柱内某一种土壤的 NO₃⁻-N 本底总量, g; 其中 l_s 表示砂土层中的 NO₃⁻-N 本底量, g; l_c 表示黏土层中的 NO₃⁻-N 本底量, g; h_d 为填充的某种土样的厚度, cm; C_b 为试验用土的 NO₃⁻-N 本底含量 (表 1), mg/kg; L 为试验土柱内 NO₃⁻-N 本底总量, g; W 为反硝化量, g。

数据处理和统计采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件, 用最小显著性差异法比较不同处理间的差异显著性, 用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 湿润锋运移与累积入渗量变化特征

图 3a 为 4 组土柱湿润锋运移深度与入渗时间关系图。通过对试验中相关数据的记录, A、B、C 土柱湿润锋到达砂黏土界面的时间分别为 11、10 和 3 min; 由图 3a 中湿润锋运移曲线随时间的变化特征可知, 在 A、B、C 土柱湿润锋到达砂土与黏土交界前, 湿润锋运移速率较大, 湿润锋运移深度与入渗时间趋于非线性关系; 湿润锋运移速率在水分进入黏土层后逐渐减小, 湿润锋运移深度与入渗时间趋于线性关系; D 土柱湿润锋运移深度与入

渗时间渐变为线性关系。这主要是因为层状土上下土层土壤颗粒差异较大,湿润锋转移受到不同土壤质地影响,砂土与黏土界面的土壤颗粒差异导致饱和含水率、基质吸力等差异较大,上层砂土具有较好的导水性与较差的持水性,使得湿润锋在砂土层中运移速率较大,黏土层具有较好持水性与较差导水性使得水分在黏土层聚集,因此在湿润锋由砂土层进入黏土层后,其运移速率呈降低趋势,这与以往的研究结果一致^[11,21]。A、B、C 和 D 土柱完成湿润锋运移所用时间分别为 60、248、530 和 715 min,土柱湿润锋穿透土柱所用的时间 (T , min) 与黏土层厚度 (E , cm) 呈显著线性相关 ($T=22.47E-173.5$, $R^2=0.99$, $P<0.01$),说明黏土层厚度决定湿润锋穿透时间,黏土层厚度小的土柱,湿润锋穿透较快。

图 3b 为淋滤试验过程中 4 组土柱累积入渗量与入渗时间关系图。由图 3b 可知,4 组土柱累积入渗量差异显著 ($P<0.05$),且随黏土层厚度增加而减小。湿润锋到达砂黏界面之前,上砂下黏型 (A、B、C) 土柱的累积入渗量均随入渗时间呈非线性变化;当湿润锋穿过砂黏界面后,进入稳渗阶段之后,由式 1 计算累积入渗量,4 组土柱累积入渗量 (V , L) 随入渗时间 (T , h) 趋于线性变化。当 4 组土柱入渗时间 (T) 分别大于 0.3、0.7、1.0、1.7 h 时,累积入渗量与时间关系可以用线性关系 $V=aT+b$ 来描述^[20],结果如表 2 所示。

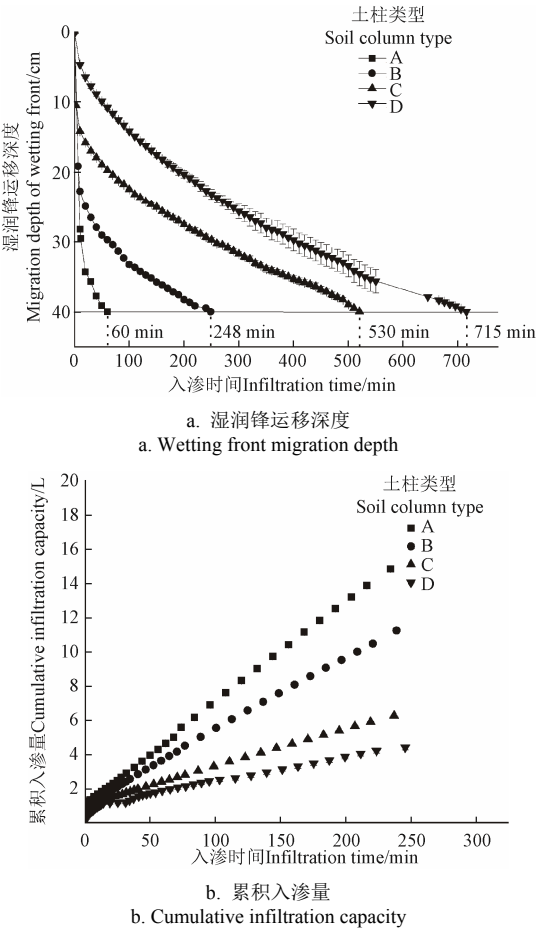


图 3 湿润锋运移深度、累积入渗量与入渗时间的关系
Fig.3 Relationships between the migration depth of wetting front, cumulative infiltration capacity and infiltration time

表 2 累积入渗量与入渗时间的线性回归结果
Table 2 Linear regression results between cumulative infiltration capacity and infiltration time

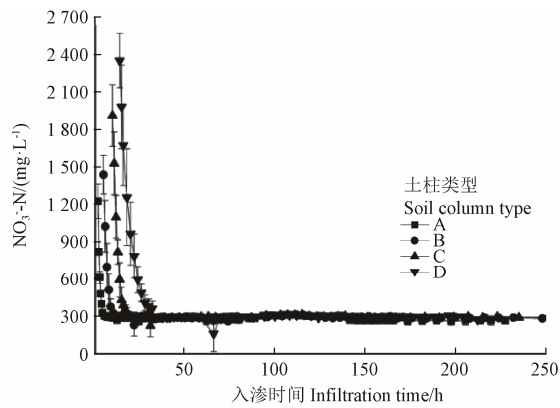
黏土层厚度 Thickness of clay layer/cm	线性回归 Linear regression	决定系数 Coefficient of determination	P 值 P value
10	$V=0.060T+1.057$	0.99	$P<0.01$
20	$V=0.044T+1.018$	0.99	$P<0.01$
30	$V=0.024T+0.885$	0.99	$P<0.01$
40	$V=0.016T+0.764$	0.98	$P<0.01$

注: V 为累积入渗量, L; T 为入渗时间, h。
Note: V is cumulative infiltration capacity, L; T is infiltration time, h.

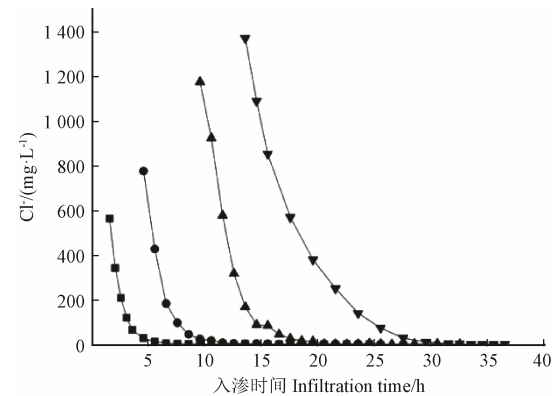
2.2 淋滤液 NO₃⁻-N 与 Cl⁻ 浓度的变化特征

图 4 为 4 组土柱淋滤液中 NO₃⁻-N 和 Cl⁻ 浓度随入渗时间的变化特征。由图 4a 可知,在模拟田间入渗淋滤条件下, A、B、C 和 D 土柱在试验开始后的 1.5、4.5、9.5 和 13.5 h 产生淋滤液,初始淋滤液中 NO₃⁻-N 浓度分别为 1 227、1 437、1 910 和 2 352 mg/L,初始淋滤液 NO₃⁻-N 浓度随黏土层厚度增大而增大,且远大于入渗溶液的 NO₃⁻-N 浓度 (285.7 mg/L)。这主要是由于黏土中 NO₃⁻-N 本底含量较高 (44.3 mg/kg),黏土层厚度越大的土柱内 NO₃⁻-N 总量越大,而 NO₃⁻-N 与土壤胶体粒子均带负电,土壤颗粒对其吸附能力较弱,淋滤过程中极易随着土壤水溶液进行迁移^[22]。因此,在入渗溶液入渗并最终穿透土柱的过程中,黏土中 NO₃⁻-N 不断被溶解并随入渗溶液形成初始淋滤液,造成 4 组土柱初始淋滤液中 NO₃⁻-N 浓度随着黏土层厚度的增加而增大。虽然砂土中也含有 NO₃⁻-N,但因其 NO₃⁻-N 本底含量较低 (2.9 mg/kg),因此对于初始淋滤液 NO₃⁻-N 浓度的变化影响较小。随着淋滤试验的进行,土壤离子溶解浸出量逐渐减少,黏土层本底 NO₃⁻-N 完全淋滤,因此淋滤液中 NO₃⁻-N 浓度逐渐趋近于入渗溶液浓度 (285.7 mg/L)。在整个淋滤试验中,4 组土柱的淋滤液 NO₃⁻-N 浓度均随时间呈非线性降低的趋势。4 组土柱淋滤液中 NO₃⁻-N 浓度分别在 9、17.5、21.5 和 33 h 之后达到稳定,达到稳定时的 NO₃⁻-N 浓度值分别为 289.5、297.8、289.0 和 287.5 mg/L,随后淋滤液与入渗溶液 NO₃⁻-N 浓度相近。

由于 Cl⁻ 具有较强的亲水性,且不与土壤中矿物质和有机物反应,化学性质保守^[14,19],且入渗溶液中不含 Cl⁻,因此可以利用淋滤液中 Cl⁻ 浓度变化特征来说明土壤中离子的迁移规律。Cl⁻ 浓度随时间的变化特征与 NO₃⁻-N 相似 (图 4b),4 组土柱淋滤液中 Cl⁻ 浓度分别在 6.5、12.5、20.5 和 31.5 h 之后达到稳定,达到稳定时的 Cl⁻ 浓度分别为 5.0、5.1、6.3、6.4 mg/L,随后浓度趋于 5 mg/L 左右 (至淋滤试验结束)。4 组土柱内 Cl⁻ 达到稳定浓度所需时间均较 NO₃⁻-N 有所缩短,说明黏土层对 NO₃⁻-N 淋滤的具有更强的阻滞作用。将 4 组淋滤液中 NO₃⁻-N 达到稳定浓度所需时间进行对比,发现随着黏土层厚度的增加,淋滤液中 NO₃⁻-N 达到稳定浓度的所需时间延长,尤其当黏土层厚度增加到 40 cm 时,淋滤液中 NO₃⁻-N 达到稳定浓度的所需时间显著大于黏土层厚度为 10~30 cm 的土柱 ($P<0.05$)。由此说明,当土柱内黏土层厚度达到 40 cm 时,其对 NO₃⁻-N 迁移的阻滞作用更为显著。



a. NO₃⁻-N 浓度随入渗时间变化
a. Change in NO₃⁻-N concentration with infiltration time



b. Cl⁻ 浓度随入渗时间变化
b. Change in Cl⁻ concentration with infiltration time

图 4 淋滤液中 NO₃⁻-N 和 Cl⁻ 浓度随入渗时间变化

Fig.4 Changes of NO₃⁻-N and Cl⁻ concentration in leachate with infiltration time

2.3 土层中 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N 累积分布特征

由式（2）计算得出淋滤试验结束后 4 组土柱每一土层中 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N 累积量（表 3）。对比试验前土样 NO₃⁻-N 含量发现，淋滤试验后土柱内各土层均产生 NO₃⁻-N 累积，砂土较淋滤试验前提高了 748%~1 447%，黏土较试验前提高了 20%~77%，这主要是因为持续高浓度 NO₃⁻-N 溶液的入渗会增加土层中 NO₃⁻-N 的累积量。同一土柱内，分层采集土壤样品并测定 NO₃⁻-N 后发现，黏土层中 NO₃⁻-N 累积量大于砂土层，说明黏土对 NO₃⁻-N 迁移的阻滞作用更强，更有利于 NO₃⁻-N 的累积，使得黏土层中 NO₃⁻-N 累积量普遍高于砂土层，这与前人研究土壤 NO₃⁻-N 累积分布特征所得结果相似^[23]。4 组土柱 NO₃⁻-N 累积总量（同一土柱内 0~40 cm 的 NO₃⁻-N 累积量之和）依次为：C 土柱、D 土柱、B 土柱、A 土柱，且黏土层厚度为 30 cm 土柱（C）的 NO₃⁻-N 累积总量略大于黏土层厚度为 40 cm 的土柱（D）。同一土柱内砂土与和黏土层透水性具有很大差异，当 NO₃⁻-N 运移至砂黏土层界面时，由于黏土层透水性差会产生相应滞水，在砂黏土层界面会产生临时滞水层^[24]，黏土层同时阻滞 NO₃⁻-N 运移，造成 NO₃⁻-N 在砂黏土层界面达到累积的峰值。其中 A、B 和 C 土柱砂黏土层界面的黏土层 NO₃⁻-N 累积均达到最大，而 D 土柱为全黏土填充，表层黏土中 NO₃⁻-N 累积达到最大。各个土柱黏土层中 NO₃⁻-N 累积量

随深度增加而减小，这与淋滤试验过程中以及在试验结束后下层黏土中较好的还原环境有关，而还原条件下反硝化作用较为活跃^[25-26]，造成下层黏土中 NO₃⁻-N 累积量减小。

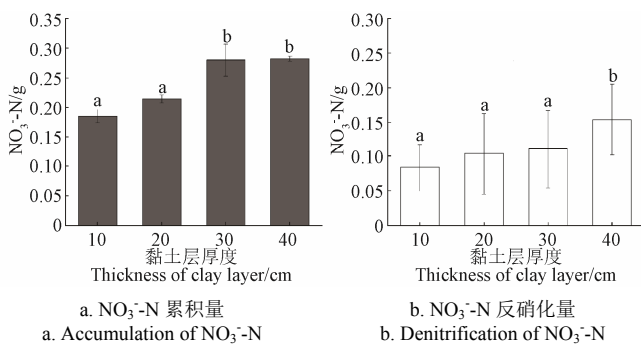
NO₂⁻-N 与 NO₃⁻-N 的累积分布特征既有相似性也有差异性。相似性表现为：黏土层中 NO₂⁻-N 累积量普遍高于砂土层；除 C 土柱的 10~20 cm 黏土层外，其他土柱表层黏土中 NO₂⁻-N 累积量高于下层，砂黏土层界面 NO₂⁻-N 累积量差异明显。由于土壤颗粒对 NO₂⁻-N 有一定吸附能力，淋滤试验中 NO₂⁻-N 也会随着土壤水溶液进行迁移^[27]，受到黏土层的阻滞作用，NO₂⁻-N 与 NO₃⁻-N 累积量同样在砂土层与黏土层界面达到较高值。此外，砂黏土层界面成为反硝化作用活跃的区域，砂黏土层界面较高的 NO₃⁻-N 含量也为反硝化作用提供了电子受体，造成界面处存在较高的 NO₂⁻-N 累积量。差异性表现为：NO₂⁻-N 累积量依次为：C 土柱、B 土柱、A 土柱、D 土柱，D 土柱（40 cm 黏土层）的 NO₂⁻-N 累积量最小（8.14 kg/hm²）。此外，A、B 和 C 土柱砂黏质地界面的 NO₂⁻-N 与 NO₃⁻-N 累积量分布特征不同，界面处砂土层 NO₂⁻-N 的累积量出现最低值。土壤有机碳为反硝化作用提供电子供体，因此 NO₂⁻-N 累积量分布与土壤有机碳分布有关^[25,28]。已有研究表明，农田反硝化作用主要以生物反硝化为主^[26]，反硝化作用共分为 2 步，第 1 步将 NO₃⁻-N 先还原成 NO₂⁻-N，第 2 步将 NO₂⁻-N 还原成 N₂，2 步反应都需要有碳源提供能量。随着 NO₃⁻-N 入渗，有机碳被上层黏土截留和所含细菌所消耗，流至深层黏土中的有机碳在为反硝化作用的第 1 步提供碳源后，第 2 步 NO₂⁻-N 的还原反应因缺少足够的碳源而难以进行，造成了土壤中 NO₂⁻-N 的累积^[24]。黏土层厚度较小的土柱中有机碳含量小，且 NO₃⁻-N 对 NO₂⁻-N 的还原具有竞争性抑制作用，造成 NO₂⁻-N 还原反应受到抑制而在土壤中累积。黏土层厚度为 40 cm 的土柱有机碳总量较大，NO₃⁻-N 浓度达标后对 NO₂⁻-N 还原反应的抑制作用会减弱，NO₂⁻-N 还原作用加强，造成土柱内 NO₂⁻-N 累积量较小^[29]。

表 3 NO₃⁻-N 与 NO₂⁻-N 累积量
Table 3 Accumulation of NO₃⁻-N and NO₂⁻-N

土柱类型 Soil column type	土层类型 Soil type	土层厚度 Thickness of layer h ±/cm	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N Nitrate nitrogen/ (kg·hm ⁻²)	亚硝态氮 NO ₂ ⁻ -N Nitrous nitrogen/ (kg·hm ⁻²)
A	L1	10	48.26±0.97	1.87±1.39
	L1	10	37.28±10.48	3.56±0.11
	L1	10	68.06±10.58	2.77±1.47
	L2	10	79.20±7.58	3.68±1.44
B	L1	10	51.39±4.16	4.78±0.48
	L1	10	63.44±8.04	0.00
	L2	10	80.22±2.94	5.87±0.12
	L2	10	78.97±7.59	3.30±2.07
C	L1	10	60.23±8.71	2.56±1.70
	L2	10	112.87±15.48	5.65±0.14
	L2	10	105.06±27.60	7.13±3.74
	L2	10	79.61±4.16	6.25±1.91
D	L2	10	116.00±22.17	3.08±1.70
	L2	10	84.47±5.65	1.74±0.21
	L2	10	80.74±10.22	1.68±0.12
	L2	10	78.64±11.21	1.59±0.29

2.4 黏土层厚度对 NO_3^- -N 迁移的影响

通过质量平衡的方法(式(3)~式(8))计算4组土柱内 NO_3^- -N 累积量,并通过估算得出反硝化量,对应得出4组土柱 NO_3^- -N 累积量和反硝化量随黏土层厚度变化的特征(图5)。如图5a所示:当黏土层厚度差不小于20 cm时, NO_3^- -N 累积量差异显著($P<0.05$);由图5可知,土柱内 NO_3^- -N 累积量与反硝化量(图5b)均随黏土层厚度的增加而增大,C土柱(30 cm黏土层)与D土柱(40 cm黏土层)中 NO_3^- -N 累积量均较大且差异不显著($P>0.05$),但D土柱(40 cm黏土层)内反硝化量最大[(0.15±0.05) g],显著高于黏土层厚度为10~30 cm的土柱($P<0.05$)。分析其原因,一方面是由于 NO_3^- -N 在土壤孔隙中的运移速率随着土柱内黏土层厚度的增加而减小,受到黏土层阻滞作用的影响越大,越有利于 NO_3^- -N 的累积,造成 NO_3^- -N 在土壤中停留的时间越长;另一方面则由于黏土层中有机碳含量较高(表1),土柱内黏土层厚度越大,有机碳总含量越大,因此在试验过程产生的还原环境条件下,越有利于反硝化作用的进行^[26],同时土柱内 NO_3^- -N 累积量也会受到黏土层中反硝化作用的影响,而这种现象在40 cm黏土层土柱内更为突出,造成其反硝化量与10~30 cm黏土层的土柱差异显著($P<0.05$),从而说明40 cm黏土层对反硝化作用影响更为显著,进一步说明40 cm的黏土层对于 NO_3^- -N 迁移具有更大的影响。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same kind amount indicate significant difference ($P<0.05$).

图5 不同黏土层厚度土柱 NO_3^- -N 累积量与反硝化量分布

Fig.5 Distribution of NO_3^- -N accumulation and denitrification in soil columns with different thicknesses of clay layer

3 结 论

本文针对 NO_3^- -N 在“上粗下细”型层状包气带结构中更易发生淋滤而引起地下水 NO_3^- -N 污染风险较高的问题,设置黏土层厚度不同的4组填充土柱作对比试验,采用稳定浓度溶液入渗方法,通过分析淋滤液与试验后土样的水化学特征,从入渗过程、淋滤液 NO_3^- -N 浓度变化、土柱内 NO_3^- -N 累积量与反硝化量探讨了层状结构包气带中黏土层厚度对 NO_3^- -N 迁移的影响。得到以下结论:

1) 层状结构包气带的入渗过程由入渗溶液到达砂黏土层界面前后可分为2个阶段。第1阶段湿润锋运移深度和累积入渗量与入渗时间趋于非线性关系;第2阶

段湿润锋运移深度与和累积入渗量和入渗时间趋于线性关系。

2) 淋滤试验过程中淋滤液 NO_3^- -N 与 Cl 浓度随入渗时间的变化特征反映了不同厚度的黏土层对溶质运移的阻滞作用。A、B、C 和 D 土柱淋滤液 NO_3^- -N 与 Cl 浓度与入渗时间呈非线性降低并依次达到稳定的特征,4组土柱淋滤液 NO_3^- -N 浓度达到稳定的时间分别为9、17.5、21.5 和 33 h。阻滞作用的增强与黏土层厚度呈非线性关系,当土柱内黏土层厚度达到40 cm时,对 NO_3^- -N 淋滤的阻滞作用显著强于黏土层厚度为10~30 cm的土柱($P<0.05$)。

3) 淋滤试验结束后土柱内各层土壤 NO_3^- -N 与 NO_2^- -N 的累积分布特征不同。受上下土层土壤物理性质与渗透性差异的影响,淋滤试验过程中在砂黏土层界面形成了临时滞水层,造成黏土层 NO_3^- -N 与 NO_2^- -N 累积量均较大。同时砂黏土层界面反硝化作用较为强烈,是反硝化作用的活跃区域。

4) 对黏土层厚度不同的土柱内反硝化量进行了估算,说明了 NO_3^- -N 累积量和反硝化量与黏土层厚度的关系。4组土柱中,黏土层厚度为30与40 cm的土柱内 NO_3^- -N 累积量相近,但40 cm黏土层的土柱反硝化量最大[(0.15±0.05) g]且与黏土层厚度为10~30 cm的土柱差异显著,说明40 cm黏土层对于 NO_3^- -N 迁移具有更大的影响。

参 考 文 献

- [1] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,2011.
- [2] Ascott M J, Goody D C, Wang L, et al. Global patterns of nitrate storage in the vadose zone[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 153-226.
- [3] 张学军,赵桂芳,朱雯清,等.菜田土壤氮素淋失及其调控措施的研究进展[J].生态环境,2004,13(1): 105-108. Zhang Xuejun, Zhao Guifang, Zhu Wenqing, et al. Nitrogen leaching from vegetable soil and control measures: A review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2004, 13(1): 105-108. (in Chinese with English abstract)
- [4] He Xinhua, Xu Minggang, Qiu Guoyu, et al. Use of ^{15}N stable isotope to quantify nitrogen transfer between mycorrhizal plants[J]. Journal of Plant Ecology, 2009, 2(3): 107-118.
- [5] 张学科,白俊英,严海霞.灌水量与施氮量对不同类型土壤中硝酸盐运移的影响[J].节水灌溉,2020(2): 83-87. Zhang Xueke, Bai Junying, Yan Haixia. Effects of irrigation and nitrogen application on nitrate transport in different soils[J]. Water Saving Irrigation, 2020(2): 83-87. (in Chinese with English abstract)
- [6] 和玉璞,张展羽,徐俊增,等.控制地下水位减少节水灌溉稻田氮素淋失[J].农业工程学报,2014,30(23): 121-127. He Yupu, Zhang Zhanyu, Xu Junzeng, et al. Reducing nitrogen leaching losses from paddy field under water-saving irrigation by water table control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(23): 121-127. (in Chinese with English abstract)

- [7] Lee K S, Bong Y S, Lee D, et al. Tracing the sources of nitrate in the Han River watershed in Korea, using $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ values[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 395(2/3): 117-124.
- [8] Zhou Junyun, Gu Baojing, Schlesinger W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 636-639.
- [9] Zheng Wenbo, Wang Shiqin, Tan Kangda, et al. Nitrate accumulation and leaching potential is controlled by land-use and extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 707(10): 136-168.
- [10] 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 等. 基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 1770-1778.
- Zheng Wenbo, Wang Shiqin, Liu Bingxia, et al. Simulation of the migration and leaching of nitrate nitrogen in the farmland soil profile in a hilly area of Taihang Mountain with the RZWQM model[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1770-1778. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吉恒莹, 邵明安, 贾小旭. 水质对层状土壤入渗过程的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 183-188.
- Ji Hengying, Shao Ming'an, Jia Xiaoxu, et al. Effects of water quality on infiltration of layered soils[J]. *Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 183-188. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 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.
- [13] 李毅, 任鑫, Horton R. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 485-490.
- Li Yi, Ren Xin, Horton R. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 485-490. (in Chinese with English abstract)
- [14] 甯娜, 许模, 段永祥, 等. 保守性离子在包气带层状土中运移规律研究[J]. *环境工程*, 2015, 33(5): 70-74.
- Ning Na, Xu Mo, Duan Yongxiang et al. Research on the migration law of conservative ion in layered soil under unsaturated zone[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(5): 70-74. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhou Jianbin, Xi Jingen, Chen Zhujun, et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: A soil column method[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 245-252.
- [16] 李久生, 杨风艳, 栗岩峰. 层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 25-31.
- Li Jiusheng, Yang Fengyan, Li Yanfeng. Water and nitrogen distribution under subsurface drip fertigation as affected by layered-textural soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(7): 25-31. (in Chinese with English abstract)
- [17] Thomas S, Waterland H, Dann R, et al. Nitrous oxide dynamics in a deep soil-alluvial gravel vadose zone following nitrate leaching[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1 333-1 346.
- [18] 范瑜, 李炬, 王石凡. 粘土覆盖层对防治污水渗漏污染地下水作用的研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2000, 1(6): 41-44.
- Fang Yu, Li Ju, Wang Shifan. Research on the effect of clay overlay on prevention and control of sewage leakage and pollution of groundwater[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2000, 1(6): 41-44. (in Chinese with English abstract)
- [19] 梁慧雅, 王仕琴, 魏守才. 华北山前平原典型厚包气带硝态氮分布累积规律[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1179-1186.
- Liang Huiya, Wang Shiqin, Wei Shoucai. Nitrate distribution and accumulation in deep unsaturated zone soils in piedmont of North China Plain[J]. *Soils*, 2017, 49(6): 1179-1186. (in Chinese with English abstract)
- [20] 仲轩野, 朱成立, 柳智鹏, 等. 不同矿化度对层状土入渗规律的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2019(5): 63-66.
- Zhong Xuanye, Zhu Chengli, Liu Zhipeng, et al. A study on the influence of different salinity on the infiltration law of layered soil[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(5): 63-66. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郎漫, 李平, 蔡祖聪. 反硝化测定方法的评述[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 1019-1024.
- Lang Man, Li Ping, Cai Zucong. The comments on methods for measuring denitrification[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(4): 1019-1024. (in Chinese with English abstract)
- [22] 高太忠, 付海燕. 氮在河北平原包气带中的迁移转化机制[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(1): 217-221.
- Gao Taizhong, Fu Haiyan. Migration and transformation regularity of nitrogen in vadose zone in Hebei plain[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(1): 217-221. (in Chinese with English abstract)
- [23] Lu Jie, Bai Zhahai, Velthof G L, et al. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 407-415.
- [24] 丁清华. 硝酸盐在包气带与饱水带中迁移转化规律[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- Ding Qinghua. Migration and Transformation Law of Nitrate in Unsaturated Zone and Saturated Zone[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [25] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 103-110.
- Shang Fangze, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(7): 103-110. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘秋丽, 马娟娟, 孙西欢, 等. 土壤的硝化-反硝化作用因素研究进展[J]. *农业工程*, 2011, 1(4): 79-83, 13.
- Liu Qiuli, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Research advancement on soil nitrification-denitrification and its

- influencing factors[J]. *Agricultural Engineering*, 2011, 1(4): 79-83, 13. (in Chinese with English abstract)
- [27] 窦妍, 古仪方. 亚硝态氮在一维土柱实验中的运移特征研究[J]. *昆明理工大学学报: 自然科学版*, 2016, 41(3): 124-129.
- Dou Yan, Gu Yifang. Migration of NO_2^- through soil column[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science*, 2016, 41(3): 124-129. (in Chinese with English abstract)
- [28] Tully K L, Hickman J, McKenna M, et al. Effects of fertilizer on inorganic soil N in East Africa maize systems: Vertical distributions and temporal dynamics[J]. *Ecological Applications*, 2016, 26(6): 1907-1919.
- [29] 李文龙, 杨碧印, 陈益清, 等. 不同外加碳源反硝化滤池的深度脱氮特性研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(11): 82-85.
- Li Wenlong, Yang Biyin, Chen Yiqing, et al. Study on denitrification biological filter depth processing characteristics with different external carbon source[J]. *Water Treatment Technology*, 2015, 41(11): 82-85. (in Chinese with English abstract)

Effect of the thickness of clay layer in the layered vadose zone on nitrate nitrogen migration

Tian Luyao^{1,2}, Wang Shiqin^{1,2*}, Wei Shoucai³, Liu Bingxia¹, Liu Binbin¹, Hu Chunsheng¹

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Agricultural Water Resource, Chinese Academy of Sciences/ Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256600, China)

Abstract: The clay layer in the vadose zone with layered structure in soils has an important effect on blocking the pollutants which will enter into the groundwater. At present, there is insufficient knowledge about the effects of the thickness of the clay layer on the migration process of nitrate nitrogen (NO_3^- -N). Nitrate nitrogen is more prone to leaching through the ‘up thick and down thin’ (the up layer of soil with larger particles and the down layer of soil with smaller particles) vadose zone with layered structure, which can cause a higher risk of nitrate nitrogen pollution to groundwater. In this study, we set up four groups soil columns with 40 cm height, the types of four groups soil columns included “up sand and down clay” and full filling with clay. The ratio of thickness (between sand and clay layer) was 3:1, 1:1, and 1:3, and the last type soil column had 40 cm clay. The content of the study in the leaching experiment under the condition of stable water head and stable concentration of nitrate nitrogen with infiltration, which included infiltration process of nitrate nitrogen solution, the characteristics of accumulation and denitrification of nitrate nitrogen in soil columns. In order to clarify the effects of the clay layer thickness on the migration process of nitrate nitrogen in the layered vadose zone, the soil columns with different thickness of clay layer. The results showed that the infiltration process of solution could be divided into two stages, namely, the relationship between the cumulative infiltration capacity with the wetting front transport depth and the infiltration time gradually changed from nonlinear to linear when the wetting front crossing the sand-clay layer interface. Meanwhile, the cumulative infiltration capacity decreased significantly with the increasing in the thickness of clay layer in the soil columns ($P < 0.05$). When the thickness of the clay layer in the soil column reached 40 cm, the effect of blocking on the nitrate leaching of nitrogen was significantly stronger than other soil column which was with the clay layer of 10-30 cm. During the leaching experiment, a water retention layer was formed at the interface of the sand-clay layer, which made the cumulative values of nitrate nitrogen and nitrite nitrogen in the clay layer at the interface were both large, while the accumulation of nitrate nitrogen and nitrous nitrogen decreased with the increasing of depth in clay layer in the same soil column. When the difference of thickness in clay layer was not less than 20 cm during different soil columns, the accumulation of nitrate nitrogen in the soil column was significantly different ($P < 0.05$). The soil column which thickness of clay layer was 40 cm had the largest amount of nitrate nitrogen used in denitrification [(0.15±0.05) g] was significantly higher than the soil column with 10-30 cm in the thickness of clay layer ($P < 0.05$), which indicated that when the thickness of clay layer reached a certain degree (such as 40 cm), it not only blocked nitrate nitrogen, but also affected the amount of denitrification. Occurrence had a significant impact which could play an important role in preventing the leaching of nitrate nitrogen into groundwater. This study can provide a reference for the management of farmland fertilization and groundwater protection under soil with layered vadose zone conditions.

Keywords: soils; nitrogen; water infiltration; layered vadose zone; thickness of clay layer; nitrate nitrogen migration; soil column experiment