

文章编号： 1000-5013(2007)02-0174-04

土壤中硝态氮存储结构及其对运移通量影响

张润润，薛联青，崔广柏，洪 滨

(河海大学 水文水资源学院，江苏 南京 210098)

摘要：以室内原状土柱进行的人工模拟降雨和人工控制淹水实验为基础，间接研究硝态氮在土壤中的存储结构，以及在模拟排水情况下，该存储结构对硝态氮运移通量的影响。结果表明，土壤结构和含水率决定了硝态氮在大小孔隙中的分配比例，在不考虑大孔隙硝态氮的影响下，硝态氮运移通量跟单位面积总水量成幂函数关系。该结论可为土壤质量评价和环境保护研究，提供实验研究参考和理论依据。

关键词：硝态氮；人工降雨；模拟；土壤；通量

中图分类号：X 14 **文献标识码：**A

近年来，大量氮肥的施用已造成相当严重的地表水及地下水的污染，我国湖泊、水库的水质富营养化问题日趋严重。对江苏太湖地区的地表水调查结果表明，各河流总氮量超标率为 88 % ~ 100 %，湖泊水样总氮量超标率为 100 %^[1-3]。我国长江河口的河水中，硝酸盐质量浓度高达 0.49 ~ 0.95 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，而世界河口的平均值仅为 0.1 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[4]。张维理等^[5]对我国北方 14 个县 69 个地点的地下水硝酸盐调查结果显示，有半数以上饮用水的硝酸盐超过最大允许量 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，造成农业非点源污染。氮素中对环境影响较大的是 $\text{NO}_3\text{-N}$ (硝态氮)，因此，研究硝态氮在土壤中的储存结构和迁移转化规律，对于认识和防治农业非点源污染及土壤质量评价有十分重要的意义。国内外对氮素污染的研究多采用野外田间实验研究和室内装填土柱实验研究，其效果均不佳。本实验采用的是室内原状土柱实验，能较好地反映实际土壤状况，并易于对实验条件进行控制，效果较好。

1 研究对象与试验方法

1.1 土样采集

土样取自山东泰安市刘家庄坡耕地，根据土样采集要求和作物生长特性，分别选取了 5 个点进行土样采集(土样编号与土柱编号一致)，取土深度约为 27 cm。采样时，将由 PVC 管制成的采样器垂直于地面，慢慢敲进土里。等到 PVC 管下部达所需深度时，再用取土铲将 PVC 管旁边的土壤铲开，达到 PVC 管底部时，将采样器同所需土样一起铲出，确保对土样的扰动降低到最小。土样情况如表 1 所示。表中， d 为内径，1, 2 号土槽和 4, 5 号土样分别取自不同的两块耕地，3 号土样取自另外一块耕地。

表 1 土样状态表
Tab. 1 Status of the soil samples

土样编号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
d/cm	20	20	11	11	11
采集位置	田埂	种植区	种植区	田埂	种植区
作物情况	无	茶苗 3 株	麦苗一簇	无	麦苗一簇

1.2 实验模拟

实验土柱由 PVC 管制成，高 38 cm，内径为 20 cm 和 11 cm，具体各土柱内径见表 1。土柱底部均有

收稿日期： 2006-12-02

作者简介： 张润润(1982-)，女，现为河海大学水文水资源及水利工程科学国家重点实验室(江苏 南京 210098)博士研究生。主要从事水环境保护的研究。E-mail: runrunbright@163.com.

基金项目： 国家自然科学基金重大项目(50239030)；国家自然科学基金青年项目(50609006)

反滤层和可控排水口,离土面约1 cm有出水孔,以排出土壤表面集水。由于土壤采集及运输过程采取防护措施,故土壤受到的扰动比较小。将土柱运回实验室后,培育30 d,使土壤跟管壁接触较好,因此实验中不考虑土壤扰动和管壁测流对实验的影响。根据实验需要,在模拟降雨8 d前对土样进行施肥,单位面积施肥量跟实际耕作时相同。

实验分为两个阶段进行,即人工模拟降雨实验和人工控制淹水实验。第1阶段共进行两次人工模拟降雨实验。第1次于2005年4月28日进行,历时127 min,雨强为 $5.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。第2次于2005年5月25日进行,历时104 min,雨强为 $3.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。为了保证土柱底部出流体积足够指标分析使用,且能够获得尽量多的水样,两次实验水样收集时均不固定时间段。当出流水样体积达到分析使用要求(约为600 mL)时,即作为该时段的终点,转而收集下一时段水样。

第2阶段实验为人工控制淹水实验,选择1号土柱进行,试验过程中保持土壤表面以上约1 cm的淹水深度。试验从2005年6月3日开始,历时180 min。各次试验均采用紫外分光光度法测定各土柱下渗水中硝态氮的质量浓度。

2 实验结果与分析

2.1 数据处理

第1阶段两次人工模拟降雨实验中,土柱4和土柱5收集的水样分别为2个水样和1个水样。对于数据的分析贡献不大,故只选用1,2,3号土柱水样测试结果进行对比分析,每个土柱每次收集的水样均不少于4个。

2.2 土壤中硝态氮存储结构分析

由于土壤结构复杂性,很难直接测定硝态氮在土壤中的存储结构。本文通过间接的方式,根据土柱底部的出流水样的硝态氮质量浓度(M),分析硝态氮在土壤中的存储结构。图1是两次模拟降雨过程中,土柱底部出流水样中硝态氮与出流流速(v)的关系曲线。从图1可以明显看出:(1)出流水样中的硝态氮质量浓度总体上随着出流流速的增大而减少;(2)在实验的后期,出流水样中的硝态氮质量浓度变化很小。这是因为土壤中硝态氮主要是通过对流、分子扩散和机械弥散这3个物理过程,在土壤的水分中的进行交换^[6],并随着水分的迁移而迁移。无论是对流还是机械弥散,其溶质的迁移量跟土柱底部出流的速率都成正相关性。这跟实验的结果不符合。可见在实验过程中,扩散作用起到决定性作用。由于扩散作用主要发生在土壤小孔隙与大孔隙的交界面上,同时由于小孔隙的毛细管作用力的作用,以及其扩散作用面较小,导致在实验中后期出流水样中,硝态氮质量浓度随着出流流速的增大而减少。在土壤中流流速变化不大的情况下,出流水样中硝态氮的质量浓度变化也不大。

笔者认为,土壤结构对其中硝态氮的存储结构有很大的影响。土壤被放置期间,随着土壤水分的蒸发,土壤大孔隙中的硝态氮质量浓度不断增大,但由于毛细管力的作用,小孔隙中的水分很难随着蒸发而减少,因此小孔隙中的硝态氮质量浓度保持不变。当大孔中的硝态氮质量浓度大于小孔隙中的硝态氮质量浓度时,在浓度梯度作用下,大孔隙中的硝态氮将不断地扩散到小孔隙中去。可见小孔隙中存储的硝态氮的分量的大小,决定于土壤的含水率和土壤的孔隙率。本实验中,3个土柱中硝态氮大量储存在小孔隙中。当降雨开始后,水分进入土壤,使得大孔隙中的硝态氮质量浓度远小于小孔隙的硝态氮的质量浓度。因此,在浓度梯度的作用下,硝态氮从小孔隙中扩散到大孔隙的水分中,并随着水流向下渗漏。但是由于小孔隙中水分的不流动性和扩散作用只发生在大孔隙或裂隙跟微孔的交界面上,加上分子力的作用,使得小孔隙中的硝态氮只能以一定范围内的速率向大孔隙扩散。这便使得随着流速增大,出流中的硝态氮质量浓度减少。同时也由于这一原因,在同一降雨过程中,尤其是到降雨后期,就某一土柱而言,硝态氮的质量浓度变化不会很大,只会一定的范围内波动。

2.3 模型及经验公式的建立

在第1阶段实验的基础上,实验的第2阶段选取1号土柱进行长时间的人控制淹水实验。在模拟排水条件下的土水环境,通过控制底部出流的速率,分析土壤小孔隙中硝态氮对某一横截面上硝态氮垂向运移通量的影响,并建立某一横截面通过单位总水量跟过流中硝态氮质量浓度的函数关系。由于大孔隙中的硝态氮对出流水样浓度的影响只发生在实验前期很短的时间,对于长时间淹水实验的结果影响不

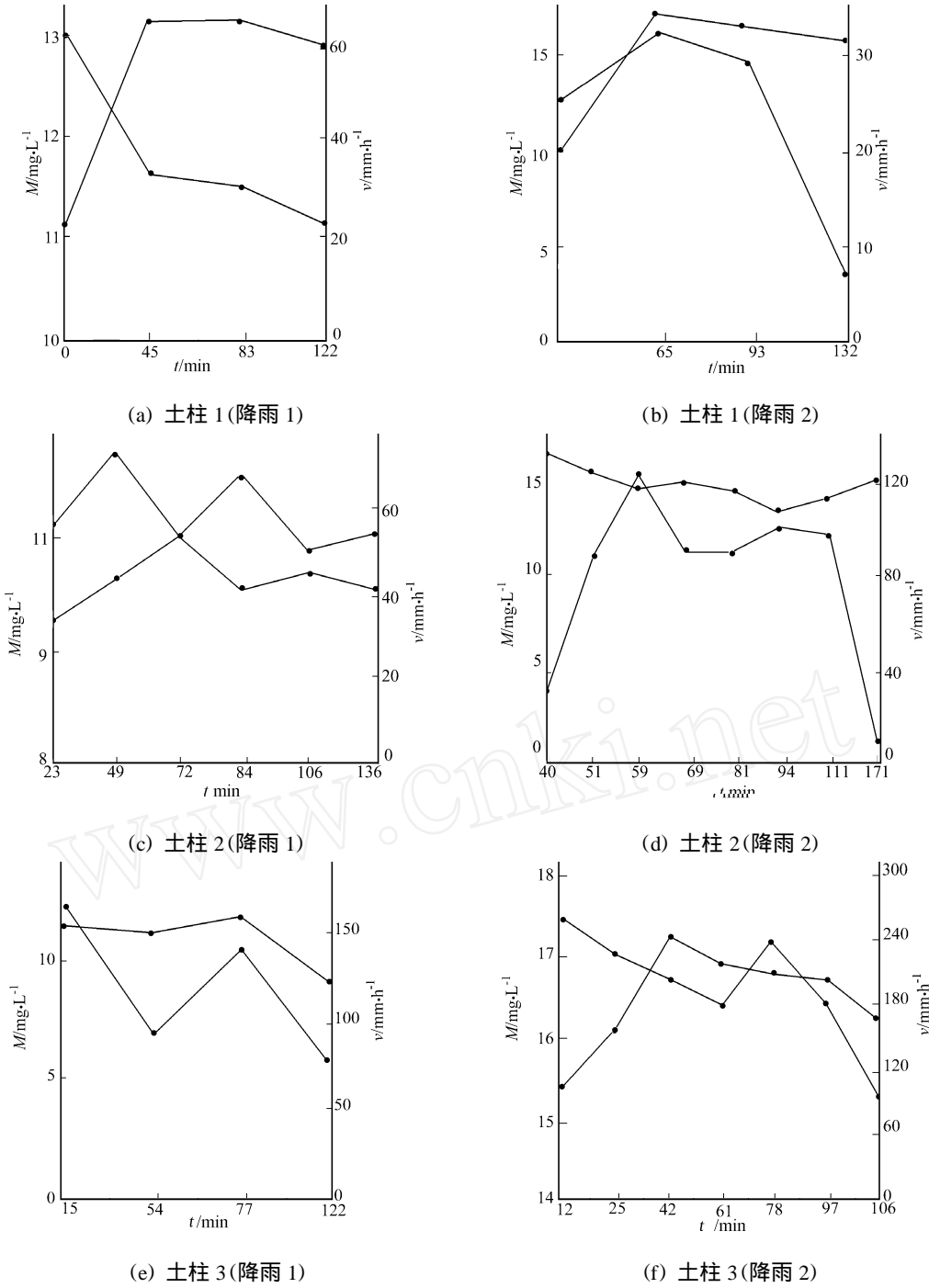


图 1 硝态氮质量浓度随出流速率变化曲线

Fig. 1 Relation between nitrate concentration and the filter rate

大,故在该实验中可以忽略其影响. 淹水实验的前 811 min,出流速率平均为 $153.44 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;在 811 min 至 1 929 min 间,出流速率平均为 $84.41 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. 分析两时段出流中硝态氮质量浓度和出流量量的关系,如图 2 所示. 第 1 时间段内硝态氮质量浓度与水量有 $y = 1\,580.3x^{-1.0405}$ 的关系, $R^2 = 0.9916$, 可见其相关性很好. 在第 2 时间段内,硝态氮质量浓度随流量变化很小,已经达到了稳定,且与第 1 时段的变化趋势一致,可以认为是第 1 时间段的延续. 可见在流速平稳的情况下,受浓度梯度的作用,土壤某一横截面的硝态氮通量跟该时间段通过该断面的单位面积水量存在着幂函数关系 $y = ax^b$. 其中 y 为硝态氮通量,单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; x 为该时间段通过该断面的单位面积水量,单位为 $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$; a, b 为经验公式的系数,主要取决于土壤的结构、土壤小孔隙中的硝态氮质量浓度和土壤表面的水压. 对于某一地区而言,土壤结构是相同的,而且降雨入渗速率也是稳定的. 所以,可以通过取样实验测定某地区的经验系数 a, b ,并进一步研究该地区硝态氮的迁移规律.

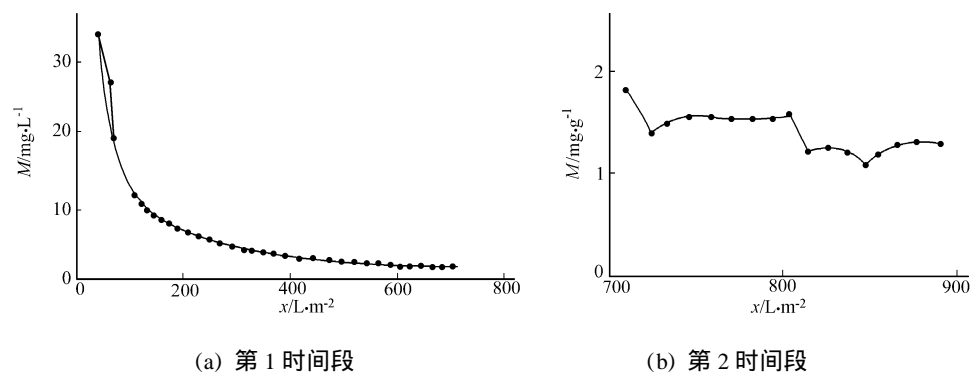


图 2 硝态氮质量浓度与水量关系曲线

Fig. 2 Relationship between nitrate concentration and the water content

3 结束语

通过实验研究分析,可得以下 5 个结论. (1) 硝态氮在土壤中的小孔隙和大孔隙的分配,主要取决于土壤的结构和含水率. (2) 硝态氮在土壤的迁移,受到土壤大孔隙中硝态氮质量浓度与土壤小孔隙中硝态氮质量浓度梯度的共同影响,两者的比例决定了硝态氮迁移速率及迁移持续时间. (3) 在不考虑大孔隙的影响下,土壤某一横截面上硝态氮流通量与通过该截面的总水量成幂函数关系. (4) 相对于大孔隙而言,小孔隙中的硝态氮对环境的污染的延续时间较长,跟降雨结束并不同步且贡献率不小,故其在非点源污染防治中值得重视. (5) 其他离子在土壤中迁移也应有相同的规律.

参考文献：

[1] 熊正琴. 太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究[J]. 农业生态环境, 2002, 18(2): 29-33.

[2] 吕忠贵. 浅析氮、磷化肥的使用及对农业生态环境污染[J]. 农业环境与发展, 1997, 14(3): 30-34.

[3] 吕耀. 农业生态系统中氮素造成的非点源污染[J]. 农业环境保护, 1998, 17(1): 35-39.

[4] 许秀成. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告磷肥与复肥[J]. 2000, 15(4): 5-7.

[5] 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]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.

[6] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 124-129.

The Distribution of Nitrate Nitrogen in Soil and
Its Effect on the Flux of Nitrate Nitrogen

ZHANG Run-run , XUE Lian-qing , CUI Guang-bai , HONG Bin

(Water Resources and Environment College in Hohai University , Nanjing 210098 China)

Abstract : According to intact soil incubation , combined with the theory of the transformation of nitrogen in soil , the distribution of nitrate nitrogen in the soil was studied based on the experiments under the simulated rainfall and water-level-controlled conditions and its effect on the flux of nitrate nitrogen under water-level-controlled conditions was also investigated. The results obtained are summarized as follows: the proportion of the nitrate nitrogen stored in the large holes and small pores depends on the structure of the soil and the water content. If taking no account of the influence of the nitrate nitrogen in large holes , the flux of nitrate nitrogen tends to vary with the water quantity , presenting exponential curve. This theory can provide some experiment gist and theoretical guide to research for soil quality estimation and environmental protection.

Keywords : nitrate nitrogen ; simulated rainfall ; simulation ; soil ; flux

(责任编辑：黄仲一)