

# 不同灌水和施氮对黄土性土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 迁移和淋失的影响\*

陈晓歌, 马耀光

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 通过室内土柱渗透试验, 研究了不同灌水和施氮对黄土性土壤中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  迁移和淋失的影响。结果表明: 土壤含水量随灌水量增大而增大, 大灌水定额时, 在近饱和土壤水分条件下, 氮素淋失严重; 在小灌水定额条件下, 0-35 cm 土层含水量显著减小,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  未发生淋失; 施氮量一定时, 土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量随灌水量增大而减小, 随土层深度增加呈显著增加趋势; 土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量随施氮水平的增加有递增趋势, 与土壤含水量成消长关系。土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  累积量与施氮量、土层深度、渗透时间成正比, 与灌水量成反比, 符合多元非线性模型。因此, 为减小  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  淋溶损失, 从经济和环境效益方面考虑, 黄土性土壤适宜灌水量应小于 121 mm, 次施氮量不宜高于 2.40 mg/cm<sup>2</sup>。

**关键词:** 黄土; 灌水;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  运移; 淋失效应

中图分类号: S153.61

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)05-0109-03

## Effect of Different Irrigation Water and Nitrogen Rate on Transfer and Leach Soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in Loess Soil

CHEN Xiaoge, MA Yaoguang

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Soil infiltration experiment was carried out to study the effect different irrigation water and nitrogen rate on transfer and leach soil  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in loess soil. The results indicated that soil water content increased with irrigation water quantity increase. In large irrigation quota, soil moisture downward migration rapidly in nearly saturated soil layer, nitrogen leach seriously. Under conditions of small irrigation quota, soil moisture in 0-35 cm reduced significantly, not occurring nitrogen leaching. When nitrogen rate is certain,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  content in soil profile decreases with the increasing of irrigation content and have significantly increasing trend with the increased depth of soil.  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  content in soil profile have an increasing trend with increase of the nitrogen rate, and soil moisture is inversely relation with soil  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  content. There have a positive correlation of soil nitrogen accumulation with the nitrogen rate, soil depth and infiltration time, and have a negative correlation with irrigation water good quantity, which can be described with multiple non linear model. So in order to reduce nitrogen leaching losses, and consider the economic and environmental benefits, the reasonable rate of irrigation and application N were 80 mm and 1.80 mg/cm<sup>2</sup> respectively in loess soil.

**Key words:** loess soil; irrigation;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  transport; nitrogen leaching effect

水分和氮素是作物生长的两大重要因素<sup>[1]</sup>。土壤中氮素状况直接影响着农作物的生长和发育<sup>[2]</sup>。为提高土壤氮素水平,人们在农业生产中广泛使用大量的氮素化肥。目前,我国已成为世界上氮肥用量最多的国家之一<sup>[3-4]</sup>,单位面积的施用量也高于世界水平。然而,我国氮肥利用率仅为30%~50%<sup>[5]</sup>,施肥经济效益下降,而且对人类和牲畜以及土壤环境造成污染<sup>[6]</sup>。研究表明:全世界施入土壤中的肥料大约有30%~50%经土壤淋溶进入地下水<sup>[7]</sup>,而氮素的淋

溶率达8.5%~8.7%<sup>[8]</sup>。由农业硝态氮造成的地下水体污染研究已引起了农业生态学与环境科学的密切关注。

国内外的学者在灌水和施肥对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在土壤和地下水中的迁移转化过程方面进行了较为广泛的研究,取得了显著的成果<sup>[9-14]</sup>。但就灌溉和施氮组合对黄土中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  运移规律的研究不多。该文主要的研究不同灌水和施氮条件下,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在黄土性土壤中的运移和动态变化规律,为黄土农业区合理灌溉施氮,提高水分,氮利用率,防止地下水污

\* 收稿日期: 2008-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(50579066)

作者简介: 陈晓歌(1982-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事水土环境保护方面研究。E-mail: xiaogechen1016@126.com

通信作者: 马耀光(1957-),男,陕西武功人,教授,硕士生导师,主要从事水资源与水环境保护方面的研究。E-mail: myg0609@yahoo.com.cn

染提供科学依据,对农业生态环境和水环境的保护将具有重要的指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验土壤采自西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的灌溉试验站。土壤为黄土性土壤,地下水埋藏约 80 m, 1 m 土壤剖面质地为重壤土。采用人工探井取原状土,长×宽×深分别为 1.5 m×1.0 m×10 m,取土样点间隔 20 cm,测定土壤容重、含水量、比重、铵态氮、硝态氮含量等,其岩性剖面特征见表 1。

表 1 试验区黄土层剖面岩性特征

埋深/cm	黄土层剖面岩性
0-20	土壤耕层,根孔、裂隙发育,土质松散
20-100	现代土壤层,棕红色重壤土
100-150	含分散钙质结核层,现代土壤淀积层
150-480	黄土,底层 10 cm 含分散、小粒钙质结核
480-550	沙性黄土,底层 10-20 cm 含分散钙质结核
550-790	黄壤土,含分散钙质结核
790-935	棕红色古土壤,白色 CaCO <sub>3</sub> 淀积物发育
935-955	含钙质结核,裂隙孔隙壁有 CaCO <sub>3</sub> 淀积物
955-1000	浅棕色中壤土

根据分析测定结果选取有代表性的黄土进行室内均质土柱模拟试验研究。其土样理化性状为:比重 2.626,干容重 1.387 g/cm<sup>3</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量 8.64 mg/kg。

黄土的灌水和施氮入渗模拟试验是在一维垂直土柱中进行,土柱内径为 10 cm,高 50 cm,底层 3 cm 为排水装置,装有滤网和止水垫、排水小孔,以便测定出流量,入渗过程中土柱上面加盖以防蒸发。土样经风干后过 2 mm 筛,按 1.36 g/cm<sup>3</sup> 土壤容重控制装填。试验在不同灌水和施氮条件下进行土壤入渗试验,入渗结束后测定不同深度的土壤水分和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。

入渗实验设计灌水定额分别为 63.7 mm(W1),121 mm(W2),159 mm(W3),235.6 mm(W4)和 254 mm(W5),施氮量处理分别为 1.20 mg/cm<sup>2</sup>(N1),1.80 mg/cm<sup>2</sup>(N2),2.40 mg/cm<sup>2</sup>(N3),3.00 mg/cm<sup>2</sup>(N4),3.60 mg/cm<sup>2</sup>(N5)。采用完全组合设计,共 25 个组合。灌水后 27 h,33 h,39 h,45 h,51 h,在 5,15,25,35,45 cm 深处测点取土,测定土壤含水量、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。采用纯硝酸铵,施肥方式采用溶水灌施。

### 1.2 测定方法

土样采用取土测定方法,所取的土壤分 2 份,1 份测定土壤含水量,采用烘干法。另一份用来测定土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。土样自然风干过 2 mm 筛,用 1.0 mol/L KCl 溶液浸提,水土比为 5:1,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 用紫外分光光度法测定。土壤比重用比重瓶法测定,容重用环刀法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水量对土壤剖面含水量分布的影响

图 1 为 N3 处理 4 种不同灌水定额条件下灌水结束后 51 h 土壤剖面的含水量分布。可以看出,土壤含水量在整个

剖面中随土层深度增加而减小,但各处理间剖面土壤含水量随灌水量增大也相应增大。灌水量为 235.6 mm 和 254 mm 时,在近饱和状态下土壤水分快速向下运移;灌水量为 121 mm 和 159 mm 时,0-35 cm 土层含水量显著减小,35 cm 以下接近凋萎点,减小幅度达 19.1%~35.5%。

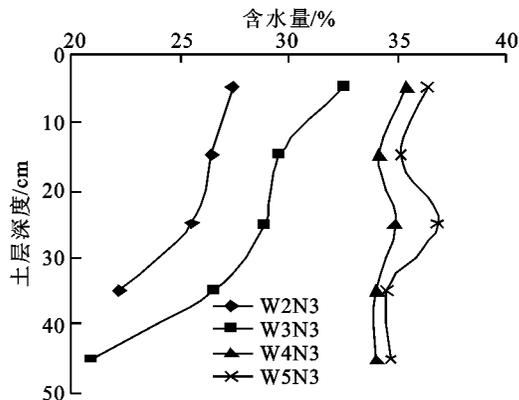


图 1 含水量随土层深度变化曲线

### 2.2 灌水量对土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分布的影响

图 2 为 N2 处理 4 种不同灌水定额条件下灌水结束后 51 h 土壤剖面 0-50 cm NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分布曲线。结果表明,在施氮量一定的条件下,0-50 cm 土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均表现出随灌水量增大而减小的趋势,即 W5<W4<W3<W2;在土壤表层和底层表现尤为突出。但各处理随土层深度增加有显著增加趋势。这是因为灌水量越大对表层土壤的淋洗作用越强烈。试验结果还表明,小灌水定额(W2,W3)时,上层土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量随水分运移至下层,无渗漏水流出,未发生氮素淋失;大灌水定额(W4,W5)时,由于灌水量超过土壤饱和持水量,土柱底部均有渗漏水流出,发生强烈氮素淋失,灌水量越大,渗透液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 总量越大,淋失量也就越大,淋失锋面越深,表现出显著的协同淋失效应。因此,为减小氮素淋溶损失,黄土适宜灌水量应小于 121 mm。

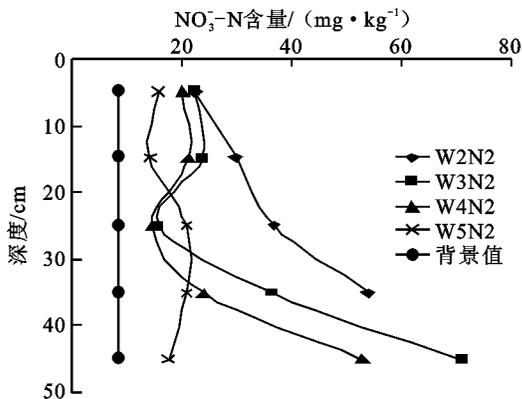


图 2 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量随土层深度变化曲线

### 2.3 施氮量对土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的影响

图 3 为 5 个施氮水平,灌溉定额为 159 mm(W3)入渗结束后 51 h 测定的土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的分布。不同施氮水平土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量高于背景值(8.64 mg/kg),并随施氮水平的增加而有递增趋势。当施氮水平为 1.20 mg/cm<sup>2</sup>时,土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量为 11.75~13.09 mg/kg,变

化范围较小; 施氮量为 2.40 mg/cm<sup>2</sup> 时达到 11.54~24.62 mg/kg; 在施氮量为 3.60 mg/cm<sup>2</sup> 时 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量达到 40 mg/kg 左右。施氮量对各层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量的影响不尽相同, 0~25 cm 变化较稳定, 影响最大的为 25 cm 以下, 各处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量均增大, 最大增幅达 84.4%, 而且 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量均是处理 5 或处理 4 为最大。从经济和环境效应方面考虑, 2.40 mg/cm<sup>2</sup> 为适宜施氮量。

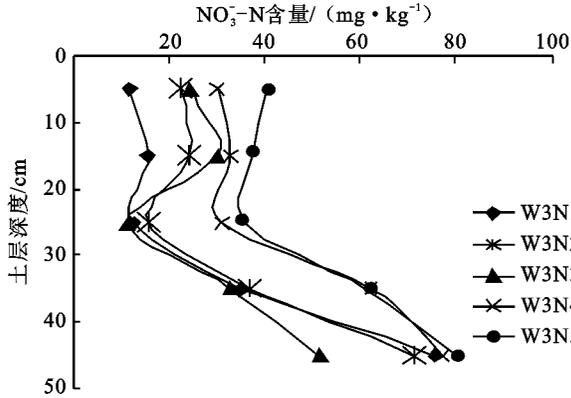


图 3 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量随土层深度变化曲线

### 2.4 灌水和施氮条件下土壤剖面含水量与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 浓度的分布特征

土壤表面不仅是水分下渗的通道, 而且直接接触 to 肥液中的溶质离子。由于土壤胶体具有较大的表面积, 使它具有吸附其它物质分子能力的表面能。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量分布与土壤含水量有着密切的关系。灌水量为 235.6 mm, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 浓度为 3.60 mg/cm<sup>2</sup> 时土层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量与含水量的变化见图 4。由图可知, 在整个剖面中, 含水量变化较小, 为 31.78%~37.22%, 土层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量变化较大, 为 15.18

~30.42 mg/kg, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量与土壤含水量成消长关系, 含水量增大时 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量减小, 含水量减小时 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量则增大。

由于本试验氮肥采用纯硝酸铵, 硝态氮肥施入土壤后可直接解离出 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的迁移受到土壤含水量的控制<sup>[15]</sup>。随着灌溉量的增加, 土壤剖面中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 通过对流和扩散等途径逐渐向深层移动, 氮素深层淋溶损失量也明显增大<sup>[16-17]</sup>。

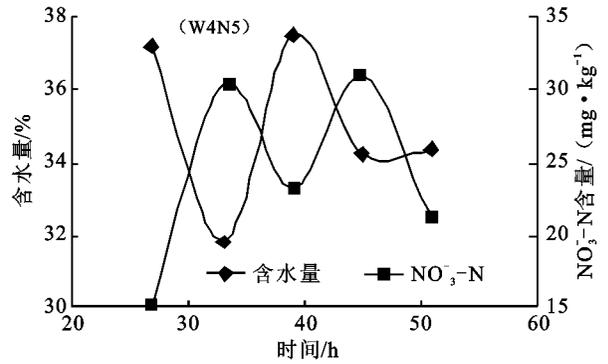


图 4 剖面土壤含水量与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 浓度的变化关系

### 2.5 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 累积量的数学模型

入渗条件下土壤的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 累积量受灌水量、施肥量、土层深度、入渗时间等影响。经分析, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 累积量可用以下公式表达:

$$C_s = a_1 W^{a_2} N^{a_3} S^{a_4} T^{a_5} \quad (1)$$

式中:  $W$ ——灌水量(mm);  $N$ ——施氮量(mg/cm<sup>2</sup>);  $S$ ——土层深度(cm);  $T$ ——时间(h);  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ ——拟合参数。利用表 2 实验数据回归分析得:

$$C_s = 15.2308W^{-0.3128}N^{-0.8024}S^{0.0334}T^{1.1578} \quad R^2 = 0.9995 \quad (2)$$

表 2 多因素条件下土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 实测值与拟合值对比

灌水量/ mm	施氮量/ (mg · cm <sup>-2</sup> )	深度/ cm	时间/ h	实测 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	拟合/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	残差
63.7	1.20	5	27	26.9230	26.9152	0.0078
121	1.80	15	33	29.2220	29.1575	0.0645
159	2.40	25	39	29.7430	29.8771	-0.1341
235.6	3.00	35	45	33.0386	33.1402	-0.1016
254	3.60	45	51	33.4756	33.2162	0.2594

从拟合模型可以看出, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 入渗累积量与施氮量、土层深度、取土时间成正比, 与灌水量成反比, 这与前面分析结果吻合, 说明采用式(1)能较好地描述土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 的累积特征。

## 3 结 论

(1) 土壤剖面含水量随灌水量增大也相应增大。大灌水定额条件下, 在近饱和状态下土壤水分快速向下运移; 小灌水定额时, 0~35 cm 土层含水量显著增加。在施氮量一定的条件下, 0~50 cm 土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量均表现出随灌水量增大而减小的趋势, 即 W5 < W4 < W3 < W2, 但各处理随土层深度增加而显著增加。在低灌水量(W2, W3)时, 上层土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量随水分运移至下层, 未发生氮素淋

失; 灌水量高(W4, W5)时, 发生氮素淋失。为减小氮素淋溶损失, 黄土区适宜灌水量应小于 121 mm。

(2) 土壤剖面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量随施氮水平的增加而有递增趋势。施氮量对各层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量的影响不尽相同, 0~25 cm 变化较稳定, 25 cm 以下变化较大, 各处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量增大, 且 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量均是处理 5 或处理 4 为最大。从经济和环境效应方面考虑, 2.40 mg/cm<sup>2</sup> 为适宜施氮量。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量分布与土壤含水量有着密切的关系。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 含量与土壤含水量成消长关系。

(3) 土壤中氮素累积量受灌水量、施肥量、土层深度、入渗时间等因素的影响。用多因素符合多元非线性模型能较好地描述土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 累积特征。

基本农田保护率为 86%, 然后依据理想点贴近度的排序结果, 进行基本农田的划分, 配置结果如附图 12 所示。其中, 依据理想点贴近度排序划定的基本农田实际保护率为 86.02%。

## 6 结 论

实现耕地入选基本农田的空间定位是实现基本农田保护规划标准化、科学化的一个重要环节, 本文借助 GIS 技术, 以龙口市为例, 在建立了耕地入选基本农田的指标体系的基础上, 通过建立决策矩阵, 采用综合评价法对耕地入选基本农田进行排序, 生成龙口市基本农田保护区规划图, 从而为土地整理规划提供依据, 为基本农田保护规划的科学化、标准化奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 山东省国土资源厅. 山东省农用地分等技术报告[R]. 2006.
- [2] 于朝升. 山东省土地利用总体规划研究[M]. 山东: 中国农业科技出版社, 2000.
- [3] 中华人民共和国国土资源部. 农用地分等规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [4] 李赓, 吴次芳, 曹顺爱. 划定基本农田指标体系的研究

[J]. 农机化研究, 2006(8): 46-48.

- [5] 程锋, 石英, 朱德举. 耕地入选基本农田决策模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 50-53.
- [6] 陈文波, 赵丽红, 叶明珠, 等. 省级基本农田数量确定与指标分解方法初探[J]. 中国土地科学, 2006, 20(6): 47-48.
- [7] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [8] 汤江龙, 赵小敏, 师学义. 理想点法在土地利用规划方案评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 56-59.
- [9] 郑新奇, 杨树佳, 象伟宁, 等. 基于农用地分等的基本农田保护空间规划方法的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 68-69.
- [10] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 2002.
- [11] 党安荣, 贾海峰. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] 宋小东, 钮心毅. 地理信息系统实习教程[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] 汤国安, 刘学军. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

(上接第 111 页)

### 参考文献:

- [1] Li Wenlong, Li Weide, Li Zizhen. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semiarid regions[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67: 35-46.
- [2] 王夏晖, 刘军, 刘益全. 不同施肥方式下土壤氮素的运移转化特征研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 202-206.
- [3] 中国农业年鉴农业编辑委员会. 中国农业年鉴[Z]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [4] 赵允格, 邵明安. 不同施肥条件下农田硝态氮迁移的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 37-40.
- [5] 崔玉亭. 化肥与生态环境保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 5-10.
- [6] 刘敏超, 温小乐. 氮肥施用量对冬小麦氮肥利用率及土壤剖面  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  动态分布的影响[J]. 湛江海洋大学学报, 2000, 20(2): 36-39.
- [7] 张玉良. 农业化学与生物圈[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987: 151-175.
- [8] 朱济成. 关于氮肥地下流失率初步研究[J]. 环境科学, 1983(5): 35-39.
- [9] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 等. 长期施肥对垄土硝态氮分布、累积和移动的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 134-158.

- [10] 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 16-21.
- [11] 马耀光, 郭大勇, 许永功, 等. 黄土层中灌溉对尿素淋失特征的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 30-34.
- [12] 康银红, 马耀光, 王巧焕. 灌溉条件下包气带黄土中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的深部运移[J]. 干旱地区农业研究, 2006(6): 147-150.
- [13] Van Genuchten M T H, Parker J C. Boundary Conditions for Displacement Experiments through Short Laboratory Soil Columns[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1984, 48: 403-708.
- [14] Jury W A. Solute Travel Time Estimates for Tile Drained Field: I. Theory[J]. Soil Sci. Amer. Proc. 1975, 39: 1020-1024.
- [15] 鲁如坤. 土壤植株营养学原理和施肥[M]. 化学工业出版社, 1998: 121-123.
- [16] 张思聪, 吕贤弼, 黄永刚. 灌溉施肥条件下氮素在土壤中迁移转化的研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30(5): 6-8.
- [17] 李世清, 卜彤英, 李生秀. 石灰性土壤中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的硝化与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的粘土矿物固定[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(增刊): 99-106.