

# 水氮用量组合对冻融期土壤相变区硝态氮 迁移与累积的影响

刘姗姗, 郑秀清, 陈军锋, 吴 博  
(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为了研究冻融期水氮用量对土壤硝态氮迁移及累积的影响, 设置了两个灌水量 ( $375, 750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )、三个施肥水平 ( $100, 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 组成 6 种水氮组合, 进行田间冬灌试验。结果表明, 水氮处理显著增加了相变区 ( $0 \sim 60 \text{ cm}$ ) 土壤硝态氮水平, 各处理下硝态氮累积量差异显著。未冻期和冻结期  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土壤硝态氮累积量随水、氮量的增加而增加, 消融期硝态氮累积量随肥量的增加而增加。冻结前、后期土壤剖面聚氮区 (特指硝态氮) 由  $0 \sim 30 \text{ cm}$  逐渐下移至  $30 \sim 60 \text{ cm}$ 。硝态氮向相变区的迁移量随水氮量的增加而呈增加态势, 在 N500 下迁移趋势更明显。封冻前  $0 \sim 30 \text{ cm}$  土壤硝态氮的相对累积量随灌水量增加而降低,  $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则增加。冻结期, 随施氮量的增加,  $0 \sim 30 \text{ cm}$  土层硝态氮相对累积量增加,  $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则降低。消融期  $0 \sim 30 \text{ cm}$  土层硝态氮相对累积量随施氮量的增加而增加, 随灌水量的增加而减少, 而  $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则呈现相反规律。

**关键词:** 水氮用量组合; 冻结期; 消融期; 硝态氮; 土壤相变区; 迁移; 累积

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

## Effect of irrigation and nitrogen treatments on nitrogen migration and accumulation in soil phase transition during freezing-thawing period

LIU Shan-shan, ZHENG Xiu-qing, CHEN Jun-feng, WU Bo

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to study the influences of irrigation and nitrogen treatments on soil nitrate migration and accumulation during freezing-thawing period, nitrate transfer experiment was conducted in freezing-thawing period under six irrigation  $\times$  nitrogen treatments of two irrigation levels ( $375, 750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) and three levels of fertilizer application ( $100, 300, 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). The results showed that fertilizer and irrigation significantly increased the nitrate accumulation of the  $0 \sim 60 \text{ cm}$ , and the accumulation was significantly different. In unfrozen and frozen stages, accumulation amount at  $0 \sim 60 \text{ cm}$  layers increased with the increase of irrigation level and nitrogen rate, and increased with the increase of the fertilizer during thawing period. Nitrate accumulative area moved down from  $0 \sim 30 \text{ cm}$  to  $30 \sim 60 \text{ cm}$  in the prophase and anaphase of freezing. Nitrate migration amount was increased with the increase of irrigation level and nitrogen rate, and the migration effect was obvious at N500. Pre-period of freezing, with the increase of irrigation level, relative nitrate nitrogen of soil in  $0 \sim 30 \text{ cm}$  layer decreased, and that of soil in  $30 \sim 60 \text{ cm}$  increased. Relative nitrate nitrogen of soil in  $0 \sim 30 \text{ cm}$  layer increased with the increase of nitrogen rate in freezing period, but decreased in  $30 \sim 60 \text{ cm}$  depth. In thawing period, relative accumulation of nitrate nitrogen in  $0 \sim 30 \text{ cm}$  soil increased with the increase of nitrogen rate, but decreased with the increase of irrigation level, while the  $30 \sim 60 \text{ cm}$  soil layer showed the opposite laws.

**Keywords:** irrigation-nitrogen treatments; freezing; thawing; nitrate nitrogen; soil phase transition; migration; accumulation

近年来,随着水肥对农业发展贡献与制约的矛盾更加突出,我国从华北到西北干旱区、再到东北寒

温带均大面积推广采用水肥一体化灌溉新技术<sup>[1-2]</sup>进行冬春灌溉,以缓解水资源日益短缺及氮肥低效

收稿日期: 2016-07-07

修回日期: 2017-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572239); 教育部博士点基金项目(20131402110008); 山西省自然科学基金项目(2015021169)

作者简介: 刘姗姗(1991—), 女, 陕西榆林人, 硕士生, 研究方向为季节性冻融土中水热盐迁移规律。E-mail: 1276252650@qq.com。

通信作者: 郑秀清(1958—), 女, 山西交口人, 教授, 博士生导师, 主要从事孔隙介质流体力学、水资源与水环境方面的研究。E-mail: zxq6818@qq.com。

损耗问题,满足越冬作物及春耕的水分、养分需求。

越冬土壤系统中硝态氮的主要运移方式为随水对流迁移。氮易溶于水,移动性强,土壤水分运动通量直接影响硝态氮的对流,且可溶性肥料是系统氮素迁移底物的直接输入源,所以冬灌水、肥量成为决定土壤剖面硝态氮含量分布极其重要的因素。同时,冻结期土壤封冻温度较低,硝态氮从冰相中离析沉淀,冻结缘内未冻水中的硝态氮含量急剧增加,促使层状土壤系统硝态氮再分布,导致冻融过程中不同水肥量组合下的硝态氮分布存在独特差异。目前,国内外学者就非冻结期土壤中的硝态氮迁移累积规律做了详尽研究<sup>[3-11]</sup>,但是冻融作用与水氮耦合下土水体系中硝态氮迁移累积规律的研究较少。本文以位于太原内陆盆地中部的山西省东阳试验区为依托,重点探索不同水氮量组合下非饱和冻融土壤介质中硝态氮迁移累积规律,为北方大型灌区适宜施氮量的确定和水肥的综合管理提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2013年10月至2014年3月在山西省太原内陆盆地中部的东阳试验区分块进行。试验地块初冻始于11月中旬,12月10日后土壤快速冻结,1月下旬进入稳定冻结,受太阳净辐射和底层地热交互作用的影响,2月下旬冻层双向融化,3月中旬达到融通。根据试验区未处理裸地的自然冻融过程,将整个冻融期分为未冻期(11月17日—12月8日)、冻结前期(12月9日—1月19日)、冻结后期(1月20日—2月27日)和消融期(2月28日—3月16日),试验期间土壤最大冻结深度为58 cm,降水主要集中在11月8日和1月10日前后,降雨量分别为2.4 mm和3.5 mm。试验基地土壤质地以壤质黏

土和黏土为主,地下水位的埋深变化在1.0~3.0 m之间。试验区常年耕种,土壤耕作层深度约30 cm,均为壤质黏土,犁底层较为明显,其下为10 cm左右的黏土夹层。表土层有机质较高,分布范围在10%左右,pH约为8,全氮0.1%,全磷0.089%。根据美国质地分类法对土壤剖面各土层颗粒含量、有机质、含水率等进行取样测定分析,结果如表1所示。

### 1.2 试验设计

试验地块常年种植玉米,种植密度约为500万株·hm<sup>-2</sup>。秋收后对大田进行除茬、平地。将整块地用30 cm高、40 cm宽的土埂分割为3 m×3 m的试验小区,小区之间留有约1 m的人行过道。试验以溶解性尿素为氮肥,冬灌时,在试验地块的进水口处设置容器溶解定量尿素,使其完全融于水后随畦灌水流均匀施入大田。冬灌时间为2013年10月25日。灌水后,水分携氮素在土壤剖面进行重分布。本次试验设置两个灌溉量、三个施肥水平,采用完全区组设计,共6个处理,以未处理裸地为对照,每个组合设置3个重复,共设21个试验小区,在大田内采取随机排列方式。水氮具体设计方式见表2。

### 1.3 样品采集及测定

东阳镇试验区设有地面气象观测系统,试验所需观测阶段为2013年11月至2014年4月。观测的主要项目为:日照、水汽压、气温、风向风速、降水量、冻土深度等。观测时间为每天上午8:00和下午19:00。

试验地块冬灌施肥时间均为10月20日,灌溉后土壤水氮耦合经历一定时段的再分布过程。土壤硝态氮原位取样层分别为10、20、30、40、50、60、80 cm和110 cm。选取各冻融阶段典型时间点进行取样,取样日期为11月10日、12月1日、12月22日、1月11日、1月17日、1月28日、2月16日、3月1日和3月15日,整个冻融期共采集9次土样,采集时

表1 试验地块各层土壤状况

Table 1 Soil properties of the tested plots

土壤深度/cm Soil depth	有机质/% Organic matter	土壤粒径/mm Soil particle size			质地分类 Soil texture classification	土壤容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤初始 含水率/% Soil initial water content
		< 0.002	0.02 ~ 0.002	2 ~ 0.02			
0 ~ 10	10.2	31.2	30.3	38.5	壤质黏土 Loamy clay	1.12	6.5
10 ~ 20	11.8	27.1	31.8	41.1	壤质黏土 Loamy clay	1.12	14.8
20 ~ 30	8.3	33.6	28.9	37.5	壤质黏土 Loamy clay	1.45	16.7
30 ~ 40	5.7	46.3	37.0	16.7	黏土 Clay	1.45	17.8
40 ~ 50	4.6	38.5	29.8	31.7	壤质黏土 Loamy clay	1.37	20.9
50 ~ 60	3.3	44.3	40.0	15.7	壤质黏土 Loamy clay	1.37	19.4
60 ~ 70	3.5	46.9	41.6	11.5	黏土 Clay	1.46	20.3
70 ~ 90	2.5	43.0	32.6	24.4	壤质黏土 Loamy clay	1.40	18.7
90 ~ 110	2.0	35.2	31.3	33.5	壤质黏土 Loamy clay	1.47	18.6

表 2 试验设计

Table 2 The experimental design

编号 No.	灌水量 Irrigation amount /( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	施肥量 Fertilizing amount /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
$N_0W_0$	0	0
$N_{100}W_{375}$	375	100
$N_{300}W_{375}$	375	300
$N_{500}W_{375}$	375	500
$N_{100}W_{750}$	750	100
$N_{300}W_{750}$	750	300
$N_{500}W_{750}$	750	500

间为上午 8:00 ~ 10:00。各层土壤鲜样取回后用高精度电子秤称取 6.000 g, 加入 50 ml  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 KCl 溶液进行浸提, 经 AA3 型连续流动分析仪测定滤液中硝态氮含量。

#### 1.4 数据的处理

土壤硝态氮绝对累积量 = 土壤硝态氮含量  $\times$  土壤容重  $\times$  土层厚度 / 10

相对累积量 = (某一土层硝态氮绝对累积量 / 整个剖面硝态氮累积量)  $\times$  100%<sup>[12]</sup>

## 2 试验结果分析

由于本次试验期间未处理裸地自然冻融状态下土壤最大冻结深度延伸至 58 cm, 且 0 ~ 30 cm 土壤层受耕作、施肥和灌溉影响最为强烈, 本文重点研究不同水氮用量组合下冻结相变区 (0 ~ 60 cm) 及耕作层 (0 ~ 30 cm) 土壤硝态氮的分布及累积情况。

### 2.1 土壤硝态氮含量

如图 1a 所示, 封冻前硝态氮主要随过冷水对流迁移, 表层土壤溶液中硝态氮由于蒸发作用向上输运浓缩于土表, 随深度增加, 土壤硝态氮含量逐渐减少, 并在 30 cm 左右出现极小值。由表 3 可见,  $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 0 ~ 30 cm 土壤硝态氮含量分别为 11.45、13.15  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 21.60  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $W_{375}$  下分别为 14.18、15.53  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 16.36  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{100}$  下硝态氮含量分别为 11.45  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 14.18  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $N_{300}$  下分别为 13.15  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 15.35  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $N_{500}$  下分别为 21.60  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 16.36  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而  $N_0W_0$  硝态氮含量仅为 5.90  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 说明各处理地块硝态氮水平显著高于  $N_0W_0$ , 且在同一灌水量下, 土壤硝态氮含量均值随氮量增加而增加。在  $N_{100}$  和  $N_{300}$  条件下, 硝态氮含量均值随灌水量增加而减少, 但在  $N_{500}$  条件下, 硝态氮含量均值随灌水量增加而增加。这说明高水、

氮下, 土壤硝态氮的淋溶损失量并不是最大的<sup>[13]</sup>。从 30 ~ 60 cm 土层看,  $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下土壤硝态氮含量分别为 15.57、16.66  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 17.27  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $W_{375}$  下分别为 12.78、11.82  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 10.30  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{100}$  下硝态氮含量分别为 15.57  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 12.78  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $N_{300}$  下分别为 16.66  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 11.82  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $N_{500}$  下分别为 17.27  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 10.30  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而  $N_0W_0$  地块 30 ~ 60 cm 硝态氮含量仅为 4.15  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。说明 30 ~ 60 cm 硝态氮含量均值显著高于未灌水裸地, 且随着灌水量的增加而增加。

之后, 土壤迅速封冻蒸发减弱, 未、正冻区土壤溶液携硝态氮在冻结作用形成的附加基质势梯度下向已冻区迁移并在冰相中析出。如图 1b 和表 3 可知, 冻结前期  $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 0 ~ 30 cm 土壤硝态氮含量分别为 18.36、21.74  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 32.30  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $W_{375}$  下分别为 17.25、20.04  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 26.40  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{100}$  下硝态氮含量分别为 18.36  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 17.25  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $N_{300}$  下分别为 21.74  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 20.04  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $N_{500}$  下分别为 32.30  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 26.40  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $N_0W_0$  地块 0 ~ 30 cm 硝态氮含量为 13.68  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 说明 0 ~ 30 cm 土壤硝态氮含量随着水、氮量的增加而增加。且相对于未冻期, 0 ~ 30 cm 土壤硝态氮含量的增幅较为明显,  $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 0 ~ 30 cm 增幅分别为 6.91、8.59  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 10.70  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $W_{375}$  下分别为 3.07、4.51  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 10.04  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $N_0W_0$  硝态氮含量增幅为 7.78  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 表明冻结特性驱动下硝态氮的迁移量随施氮量的增加而增加, 当施肥量为 500  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 硝态氮迁移效果更显著。

冻结后期, 各处理硝态氮沿剖面呈波动递减趋势 (图 1c)。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{500}$  下 0 ~ 30 cm 土壤硝态氮含量分别为 45.55  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 30.74  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较冻结前期分别增加了 41.02% 和 16.44%, 而其它处理变化较小。说明施氮量为 500  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 硝态氮从冰相中离析沉淀的时间延长, 含量增加。随着冻结锋面的向下发展, 60 cm 以下未冻区硝态氮源源不断补给迁移至 30 ~ 60 cm。由表 4 可知,  $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 30 ~ 60 cm 土壤硝态氮含量分别为 14.40、15.89  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 27.16  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $W_{375}$  下分别为 11.55、12.75  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 17.19  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{100}$  下硝态氮含量分别为 14.40  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 11.55  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 在  $N_{300}$  下分别为 15.89  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和

12.75 mg·kg<sup>-1</sup>,在 N<sub>500</sub>下分别为 27.16 mg·kg<sup>-1</sup>和 17.19 mg·kg<sup>-1</sup>,N<sub>0</sub>W<sub>0</sub> 地块 30~60 cm 硝态氮含量仅为 3.86 mg·kg<sup>-1</sup>,说明水氮处理显著增加 30~60 cm 冻层的硝态氮含量,且随着水氮用量的增加,硝态氮含量也随之增加。相比于冻结阶段前期,冻层 30~60 cm 硝态氮含量增幅也较明显,N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下硝态氮含量的增幅分别为 1.71、3.64 mg·kg<sup>-1</sup>和 9.58 mg·kg<sup>-1</sup>,在 W<sub>375</sub>下分别为 1.52、2.83 mg·kg<sup>-1</sup>和 8.18 mg·kg<sup>-1</sup>,而 N<sub>0</sub>W<sub>0</sub> 硝态氮含量增幅为 -4.62 mg·kg<sup>-1</sup>,说明冻结后期灌水量一定时,高施氮量有利于冻结特性驱动下硝态氮向 30~60 cm 土层迁移。综合来看,冻结过程中冻结相变区土壤硝态氮的迁移顺序主要取决于冻结峰向下的发展过程。整个冻结期内 N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下 0~60 cm 硝态氮含量均值分别为 15.08、16.83 mg·kg<sup>-1</sup>和 30.65 mg·kg<sup>-1</sup>,在 W<sub>375</sub>下分别为 13.96、15.63 mg·kg<sup>-1</sup>和 20.84 mg·kg<sup>-1</sup>,W<sub>750</sub>和 W<sub>375</sub>在 N<sub>100</sub>下 0~60 cm 硝态氮含量均值分别为 15.08 mg·kg<sup>-1</sup>和 13.96 mg·kg<sup>-1</sup>,在 N<sub>300</sub>下分别为 16.83 mg·kg<sup>-1</sup>和 15.63 mg·kg<sup>-1</sup>,在 N<sub>500</sub>下分别为 30.65 mg·kg<sup>-1</sup>和 20.84 mg·kg<sup>-1</sup>,而 N<sub>0</sub>W<sub>0</sub> 地块仅为 8.71。随水氮用量的增加,冻结期内 0~60 cm 土壤硝态氮均值增加。

消融期土体的入渗能力恢复到冻结前水平,土体内冻层积存的硝态氮受消融水蒸发和下渗共同作

用沿剖面呈“S”型展布(图 1d),以 40 cm 为界在土壤表层和底层形成高值区。由表 4 可知,N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下 0~30 cm 硝态氮含量均值分别为 20.11、31.88 mg·kg<sup>-1</sup>和 34.83 mg·kg<sup>-1</sup>,是 N<sub>0</sub>W<sub>0</sub> 的 1.23~2.14 倍,在 W<sub>375</sub>下分别为 17.02、22.38 mg·kg<sup>-1</sup>和 38.80 mg·kg<sup>-1</sup>,是 N<sub>0</sub>W<sub>0</sub> 的 1.04~2.38 倍,W<sub>750</sub>和 W<sub>375</sub>在 N<sub>100</sub>下硝态氮含量分别为 20.11 mg·kg<sup>-1</sup>和 17.02 mg·kg<sup>-1</sup>,在 N<sub>300</sub>下分别为 31.88 mg·kg<sup>-1</sup>和 22.38 mg·kg<sup>-1</sup>,在 N<sub>500</sub>下分别为 34.83 mg·kg<sup>-1</sup>和 38.80 mg·kg<sup>-1</sup>,说明同一灌溉水平下,表层土壤硝态氮含量均值随施氮量的增加而增加。在 N<sub>100</sub>和 N<sub>300</sub>条件下,硝态氮含量均值随水量增加而增加,但在 N<sub>500</sub>条件下,硝态氮含量均值随灌水量增加而减小。30~60 cm 为剖面硝态氮纵向迁移的过渡带,不同水氮处理下硝态氮含量均值变化在 16.75~20.73 mg·kg<sup>-1</sup>之间,差异较小。

## 2.2 土壤硝态氮累积量

由表 5 可知,不同水氮用量组合下土壤硝态氮累积量变化在 112.07~162.73 kg·hm<sup>-2</sup>之间,是 N<sub>0</sub>W<sub>0</sub> 的 2.82~4.07 倍。N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下 0~60 cm 土壤硝态氮累积量分别为 120.28、124.68 kg·hm<sup>-2</sup>和 162.73 kg·hm<sup>-2</sup>,在 W<sub>375</sub>下分别为 112.07、112.25 kg·hm<sup>-2</sup>和 114.01 kg·hm<sup>-2</sup>。W<sub>750</sub>和 W<sub>375</sub>在下 N<sub>100</sub>下 0~60 cm 硝态氮累积量分别为

表 3 未冻期和冻结前期不同水氮用量组合下土壤剖面硝态氮含量/(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 3 Average nitrate nitrogen content in the soil profile under different irrigation-nitrogen models during the non-freezing stage and frozen prophase

深度 Soil depth /cm	未冻期 Non-freezing period							冻结前期 Prozen prophase						
	W <sub>750</sub>			W <sub>375</sub>			N <sub>0</sub> W <sub>0</sub>	W <sub>750</sub>			W <sub>375</sub>			N <sub>0</sub> W <sub>0</sub>
	N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>		N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>	
0~30	11.45a	13.15a	21.60a	14.18a	15.53a	16.36a	5.90b	18.36a	21.74ab	32.30a	17.25ab	20.04ab	26.40a	13.68b
30~60	15.57ab	16.66a	17.27a	12.78ab	11.82ab	10.30b	4.15d	12.69ab	12.25bc	17.58a	10.03bc	9.92bc	9.01bc	8.48c
0~60	13.51a	14.91a	19.44a	13.48a	13.68a	14.33a	5.03b	14.53a	16.00a	24.94a	13.64a	15.48a	17.71a	11.08a

注:同一行不同字母表示  $\alpha=0.05$  水平上差异显著,下同。

Note: The different letters in the same columns mean significant difference at the 0.05 level. The same as below.

表 4 冻结后期和消融期不同水氮用量组合下土壤剖面硝态氮含量/(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Average nitrate nitrogen content in the soil profile under different irrigation-nitrogen models during the later freezing and thawing period

深度 Soil depth /cm	冻结后期 Later freezing period							消融期 Thawing period						
	W <sub>750</sub>			W <sub>375</sub>			N <sub>0</sub> W <sub>0</sub>	W <sub>750</sub>			W <sub>375</sub>			N <sub>0</sub> W <sub>0</sub>
	N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>		N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>	N <sub>100</sub>	N <sub>300</sub>	N <sub>500</sub>	
0~30	16.74cd	19.40cd	45.55a	17.01cd	21.39cd	30.74b	11.82d	20.11ab	31.88ab	34.83ab	17.02b	22.38ab	38.80a	16.30b
30~60	14.40b	15.89ab	27.16a	11.55b	12.75b	17.19ab	3.86c	17.26ab	20.73a	17.93a	16.91ab	16.78ab	16.75ab	11.69b
0~60	15.62ab	17.65ab	36.36a	14.28ab	15.77ab	23.97ab	6.34c	18.69a	26.31a	26.38a	16.97a	19.58a	27.28a	14.00a

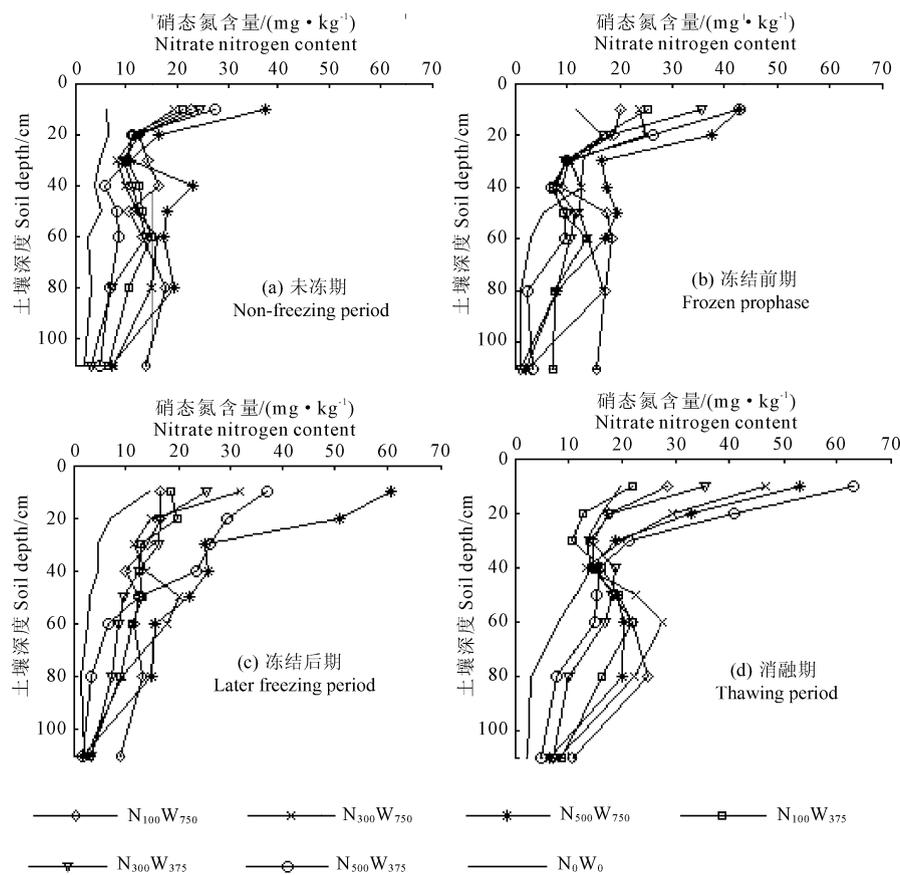


图 1 冻融期土壤剖面硝态氮分布

Fig. 1 Distribution of soil nitrate nitrogen in freeze-thaw period

120.28 kg·hm<sup>-2</sup>和 112.07 kg·hm<sup>-2</sup>,在 N<sub>300</sub>下分别为 124.68 kg·hm<sup>-2</sup>和 112.25 kg·hm<sup>-2</sup>,在 N<sub>500</sub>下分别为 162.73 kg·hm<sup>-2</sup>和 114.01 kg·hm<sup>-2</sup>,说明水氮处理显著增加了封冻前 0~60 cm 土壤硝态氮累积量,且随水、氮量的增加,土壤硝态氮储量也呈增加态势。N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下 0~30 cm 土壤硝态氮相对累积量分别为 45.30%、48.58%和 50.07%,在 W<sub>375</sub>下分别为 51.80%、55.00%和 66.03%。W<sub>750</sub>和 W<sub>375</sub>在 N<sub>100</sub>下 0~30 cm 硝态氮相对累积量分别为 45.30%和 51.80%,在 N<sub>300</sub>下分别为 48.58%和 55.00%,在 N<sub>500</sub>下分别为 50.07%和 66.03%,说明 W<sub>750</sub>条件下表层硝态氮的相对累积量较低,30~60 cm 土层则较高。且同一施肥量下,不同水量处理之间土壤硝态氮相对累积量的差值随氮肥用量的增加而增加。

冻结期是土壤冻结作用显露、强度增加并逐步向下发展的过程。从表 5 可见,冻结前期 0~60 cm 土层硝态氮累积量变化在 109.18~201.60 kg·hm<sup>-2</sup>之间,是 N<sub>0</sub>W<sub>0</sub>的 1.29~2.38 倍。N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下 0~60 cm 土壤硝态氮累积量分别为 127.05、

131.83 kg·hm<sup>-2</sup>和 201.60 kg·hm<sup>-2</sup>,在 W<sub>375</sub>下分别为 124.68 kg·hm<sup>-2</sup>和 112.25 kg·hm<sup>-2</sup>,在 N<sub>300</sub>下分别为 124.68 kg·hm<sup>-2</sup>和 112.25 kg·hm<sup>-2</sup>,在 N<sub>500</sub>下分别为 162.73 kg·hm<sup>-2</sup>和 114.01 kg·hm<sup>-2</sup>,说明水氮处理显著增加了封冻前 0~60 cm 土壤硝态氮累积量,且随水、氮量的增加,土壤硝态氮储量也呈增加态势。N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下 0~30 cm 土壤硝态氮相对累积量分别为 45.30%、48.58%和 50.07%,在 W<sub>375</sub>下分别为 51.80%、55.00%和 66.03%。W<sub>750</sub>和 W<sub>375</sub>在 N<sub>100</sub>下 0~30 cm 硝态氮相对累积量分别为 45.30%和 51.80%,在 N<sub>300</sub>下分别为 48.58%和 55.00%,在 N<sub>500</sub>下分别为 50.07%和 66.03%,说明 W<sub>750</sub>条件下表层硝态氮的相对累积量较低,30~60 cm 土层则较高。且同一施肥量下,不同水量处理之间土壤硝态氮相对累积量的差值随氮肥用量的增加而增加。

131.83 kg·hm<sup>-2</sup>和 201.60 kg·hm<sup>-2</sup>,在 W<sub>375</sub>下分别为 109.18、122.16 kg·hm<sup>-2</sup>和 137.07 kg·hm<sup>-2</sup>。W<sub>750</sub>和 W<sub>375</sub>在 N<sub>100</sub>下 0~60 cm 硝态氮累积量分别为 127.05 kg·hm<sup>-2</sup>和 109.18 kg·hm<sup>-2</sup>,在 N<sub>300</sub>下分别为 131.83 kg·hm<sup>-2</sup>和 122.16 kg·hm<sup>-2</sup>,在 N<sub>500</sub>下分别为 201.60 kg·hm<sup>-2</sup>和 137.07 kg·hm<sup>-2</sup>,随水、氮量的增加,0~60 cm 土壤硝态氮累积量明显增加。N<sub>100</sub>、N<sub>300</sub>和 N<sub>500</sub>在 W<sub>750</sub>下 0~30 cm 土壤硝态氮相对累积量分别为 52.79%、59.26%和 64.68%,在 W<sub>375</sub>下分别为 61.15%、65.33%和 73.45%。W<sub>750</sub>和 W<sub>375</sub>在 N<sub>100</sub>下 0~30 cm 硝态氮相对累积量分别为 52.79%和 61.15%,在 N<sub>300</sub>下分别为 59.26%和 65.33%,在 N<sub>500</sub>下分别为 64.68%和 73.45%。说明冻结前期 0~30 cm 土层硝态氮相对累积量随施肥量的增加而增加,30~60 cm 土层则降低。但同一肥量下,0~30 cm 土壤硝态氮相对累积量反而随灌水量的增加而降低,这与封冻前 W<sub>750</sub>处理 0~30 cm 土壤硝态氮淋失量较大有关。冻结后期,水氮处理地块硝态氮累积量较裸地显著提高。如表 6 所示,0~60 cm 硝态氮累积量变化在 120.13~237.53 kg·hm<sup>-2</sup>之间,是 N<sub>0</sub>W<sub>0</sub>

的 2.48 ~ 4.91 倍。 $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 0 ~ 60 cm 土壤硝态氮累积量分别为 130.75、146.78  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 237.53  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在  $W_{375}$  下分别为 120.13、138.83  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 190.63  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{100}$  下 0 ~ 60 cm 硝态氮累积量分别为 130.75  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 120.13  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在  $N_{300}$  下分别为 146.78  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 138.83  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在  $N_{500}$  下分别为 237.53  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 190.63  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。随不同水氮用量的增加, 0 ~ 60 cm 土层硝态氮累积量增加, 且各处理硝态氮累积量差异显著。 $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 0 ~ 30 cm 土壤硝态氮相对累积量分别为 48.20%、50.33% 和 62.33%, 在  $W_{375}$  下分别为 52.51%、54.71% 和 63.74%。随施氮量的增加, 0 ~ 30 cm 土层硝态氮相对累积量增加, 30 ~ 60 cm 土层则降低。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{100}$  下 0 ~ 30 cm 硝态氮相对累积量分别为 48.20% 和 52.51%, 在  $N_{300}$  下分别为 50.33% 和 54.71%, 在  $N_{500}$  下分别为 62.33% 和 63.74%。同一肥量下, 不同灌溉水平 0 ~ 30 cm 硝态氮相对累积量相差较小。

由表 6 可见, 消融期不同水氮用量组合下 0 ~ 60 cm 土壤硝态氮累积量变化在 102.09 ~ 162.73  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间, 是  $N_0W_0$  的 1.24 ~ 1.91 倍。 $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 0 ~ 60 cm 土壤硝态氮累积量分别为 114.75、158.78  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 163.53  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在  $W_{375}$  下分别为 102.09、120.38  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 171.07  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在下  $N_{100}$  下 0 ~ 60 cm 硝态氮累积

量分别为 114.75  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 102.09  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在  $N_{300}$  下分别为 158.78  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 120.38  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在  $N_{500}$  下分别为 163.53  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 171.07  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 说明在同一灌溉水平下, 0 ~ 60 cm 硝态氮累积量随肥量的增加而增加。在  $N_{100}$  和  $N_{300}$  条件下, 硝态氮累积量随水量增加而增加, 但在  $N_{500}$  条件下, 硝态氮累积量随灌水量增加而稍有减小。 $N_{100}$ 、 $N_{300}$  和  $N_{500}$  在  $W_{750}$  下 0 ~ 30 cm 土壤硝态氮相对累积量分别为 50.57%、52.23% 和 66.32%, 在  $W_{375}$  下分别为 54.11%、55.77% 和 73.30%。 $W_{750}$  和  $W_{375}$  在  $N_{100}$  下 0 ~ 30 cm 硝态氮相对累积量分别为 50.57% 和 54.11%, 在  $N_{300}$  下分别为 52.23% 和 55.77%, 在  $N_{500}$  下分别为 66.32% 和 73.30%。说明消融期水氮处理地块 0 ~ 30 cm 土层硝态氮相对累积量随施氮量的增加而增加, 随灌水量的增加而减少, 而 30 ~ 60 cm 土层则呈现相反规律。

### 3 讨论

冻融期土壤剖面依据水分相体自上而下分为冻结相变区和未相变区<sup>[14]</sup>, 土壤冻结过程中硝态氮随未冻水向相变区迁移<sup>[15]</sup>。水分和氮素的输入与土壤相变区集氮(特指硝态氮, 下同)情况密切相关。未冻期 0 ~ 60 cm 土层硝态氮累积量随水、氮量的增加而增加, 这与已有研究结果一致<sup>[16-18]</sup>。冻结开始后随着土壤冻结锋面向下推进, 土壤剖面聚氮区由 0 ~ 30 cm 逐渐下移至 30 ~ 60 cm。硝态氮向相变

表 5 未冻期和冻结前期不同水氮用量组合下土壤剖面硝态氮累积量

Table 5 Nitrate accumulation in the soil profile under different irrigation-nitrogen models during the Non freezing stage and frozen prophase

深度 Soil depth /cm	累积量 单位 Unit	未冻阶段 Non-freezing period							冻结阶段前期 Frozen prophase						
		$W_{750}$			$W_{375}$			$N_0W_0$	$W_{750}$			$W_{375}$			$N_0W_0$
		$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$	$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$		$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$	$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$	
0 ~ 30	%	45.30	48.58	50.07	51.80	55.00	66.03	—	52.79	59.26	64.68	61.15	65.33	73.45	—
30 ~ 60	%	54.70	51.42	49.93	48.20	45.00	33.97	—	47.21	40.74	35.32	38.85	34.67	26.55	—
0 ~ 60	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	120.28b	124.68b	162.73a	112.07b	112.25b	114.01ab	39.96c	127.05bc	131.83b	201.60a	109.18bc	122.16bc	137.07ab	84.66c

表 6 冻结后期和消融期不同水氮用量组合下土壤剖面硝态氮累积量

Table 6 Nitrate accumulation in the soil profile under different irrigation-nitrogen models during the later freezing and thawing period

深度 Soil depth /cm	累积量 单位 Unit	冻结阶段后期 Later-freezing period							消融阶段 Thawing period						
		$W_{750}$			$W_{375}$			$N_0W_0$	$W_{750}$			$W_{375}$			$N_0W_0$
		$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$	$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$		$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$	$N_{100}$	$N_{300}$	$N_{500}$	
0 ~ 30	%	48.20	50.33	62.33	52.51	54.71	63.74	—	50.57	52.23	66.32	54.11	55.77	73.30	—
30 ~ 60	%	51.80	49.67	37.67	47.49	45.29	32.26	—	49.43	47.77	33.68	45.89	44.23	26.70	—
0 ~ 60	$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	130.75b	146.78ab	237.53a	120.13b	138.83ab	190.63ab	48.43c	114.75ab	158.78ab	165.53a	102.09ab	120.38ab	171.07a	82.38b

区的迁移量随水氮量的增加而增加,当施肥量为  $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,迁移量最大。说明水氮量促进冻结特性驱使下硝态氮向相变区运移,导致冻结期  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土层硝态氮累积量随水氮量的增加而增加,这也是冻结期相变区硝态氮再分布的独特之处。

硝态氮相对累积量<sup>[19]</sup>表明了不同时期某一土层的硝态氮在水氮处理下的运移趋势。未冻期  $0 \sim 30 \text{ cm}$  土壤硝态氮的相对累积量随灌水量增加而降低, $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则增加。说明灌水量加大了表层硝态氮向亚层淋失的可能性。冻结期施氮量的主导效应逐渐增强,冻结缘附近氮量越高,冻结作用形成的附加基质势梯度越大,越有利于硝态氮向集氮区运移。导致  $0 \sim 30 \text{ cm}$  土层硝态氮相对累积量随氮量的增加而增加, $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则降低。消融期, $0 \sim 30 \text{ cm}$  土层硝态氮相对累积量随施氮量的增加而增加,随灌水量的增加而减少,而  $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则呈现相反规律。说明施氮量增加更有利于硝态氮的原位累积,而灌水量加大了表层硝态氮向亚层的淋洗趋势。

本次试验未考虑降水对冻融期间硝态氮迁移和累积的影响,因为试验期间降雨集中 11 月 8 日和 11 月 11 日至 14 之间。11 月 8 日为未冻期,降雪相对于灌水量对硝态氮的影响可忽略。而 11 月中旬土壤为密实状冻结,冻层成为入渗水流的控制界面,它对融雪水的减渗作用较强<sup>[20]</sup>。所以降水对冻层内的硝态氮运移及累积的影响并不明显。

## 4 结 论

1) 冻结前、后期土壤剖面聚氮区(特指硝态氮)由  $0 \sim 30 \text{ cm}$  逐渐下移至  $30 \sim 60 \text{ cm}$ 。硝态氮向聚氮区的迁移量随水氮量的增加而增加,在  $N_{500}$  条件下迁移效果更显著。

2) 冻融期水氮处理显著增加了  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土层硝态氮累积量,各处理下硝态氮累积量差异显著。未冻期和冻结期,随水、氮量的增加,土壤硝态氮累积量也呈增加态势。消融期, $0 \sim 60 \text{ cm}$  硝态氮累积量随肥量的增加而增加。

3) 未冻期, $0 \sim 30 \text{ cm}$  土壤硝态氮的相对累积量随灌水量增加而降低, $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则增加。冻结期,随氮量的增加, $0 \sim 30 \text{ cm}$  土层硝态氮相对累积量增加, $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则降低。消融期  $0 \sim 30 \text{ cm}$  土层硝态氮相对累积量随施氮量的增加而增加,随灌水量的增加而减少,而  $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层则呈现相反规律。

## 参 考 文 献:

- [1] 高 鹏,简红忠,魏 祥,等.水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J].现代农业科技,2012,8:250+257.
- [2] 梁海玲,吴祥颖,农梦玲,等.根区局部灌溉水肥一体化对糯玉米产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2012,5:109-114,122.
- [3] 李京玲,孙西欢,马娟娟,等.蓄水坑灌条件下土壤水氮运移的研究进展[J].节水灌溉,2012,31(7):50-52.
- [4] 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.
- [5] 黄丽华,沈根祥,钱晓雍,等.滴灌施肥对农田土壤氮素利用和流失的影响[J].农业工程学报,2008,24(7):49-53.
- [6] Guimera J, Marfa O, Candela L, et al. Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1995,56:121-135.
- [7] Asadi M E, Clemente R S, Gupta A D, et al. Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in an acid-sulphate soil in Thailand[J]. Agricultural Water Management, 2002,52:197-213.
- [8] Ajdary K, Singh D K, Singh A K, et al. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2007,89:15-28.
- [9] 黄 擎,刘博睿,蔡华杰,等.冻融交替对不同施肥水平的黑土中氮磷元素含量的影响[J].农业工程学报,2015,31(1):188-195.
- [10] 王春辉,祝鹏飞,束良佐,等.分根区交替灌溉和氮形态影响土壤硝态氮的迁移利用[J].农业工程学报,2014,30(11):92-101.
- [11] 王 琦,李锋端,张智慧.灌溉与施氮对黑河中游新垦沙地农田土壤硝态氮动态的影响[J].环境科学,2008,7(29):2037-2044.
- [12] 巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J].中国农业科学,2002,11:1361-1368.
- [13] Kundu M C, Mandal B. Assessment of the potential hazards of nitrate contamination in surface and groundwater in a heavily fertilized and intensively cultivated district of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009,152(1-4):97-103.
- [14] 郑秀清,樊贵盛,邢述彦,著.水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M].北京:地质出版社,2002:20-60.
- [15] 李瑞平,海 滨,王长生,等.秋灌定额对越冬期土壤水盐运移分布的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(6):43-46.
- [16] 尹 娟,费良军,朱悦发.灌水定额对波涌灌溉土壤中硝态氮浓度的影响[J].农业工程学报,2009,25(5):30-34.
- [17] 陈子明,袁锋明,姚造华,等.氮肥施用对土体中氮素移动利用及其对产量的影响[J].土壤肥料,1995,4:36-42.
- [18] 巨晓棠,刘学军,张福锁.不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J].中国生态农业学报,2004,12(1):92-94.
- [19] 叶优良,李 隆.水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J].农业工程学报,2009,(1):33-39.
- [20] 何志萍.冻融土壤水分入渗规律的试验研究[D].太原:太原理工大学,2003.