

滴灌条件下施氮时段对土壤氮素分布的影响研究

王旭洋^{1,3}, 范兴科^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用单点源滴灌试验模拟土壤入渗, 并分不同时段施氮肥, 灌水施氮肥结束后, 在不同时间段和湿润体不同位置采集土样, 并测定土壤中速效氮的含量, 分析对比湿润体中不同位置硝态氮与铵态氮的时空分布, 结果表明: 滴灌全程施肥, 土壤湿润体中高氮区始终分布在滴头附近; 滴灌前 1/2 时段施肥, 硝态氮含量的最大值 ($107.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 出现在距滴头水平距离 15 ~ 20 cm, 垂直距离 15 ~ 30 cm 范围内; 后 1/2 时段施肥, 高氮区始终也分布在滴头附近, 但含量值表现极高 ($184.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 中间 1/2 时段施肥, 硝态氮主要分布在距滴头水平距离为 15 cm 左右, 垂直深度也为 15 cm 左右的土层范围内。随着时间的推移, 土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量均表现为到第 5 天前后达到最高值, 此后又开始降低; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在时间上转化速率相对较快, 在灌水施肥结束后的第 3 天硝化作用最强, 从第 3 天到第 5 天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度急剧降低。

关键词: 滴灌施氮; 施氮时段; 硝态氮; 铵态氮; 时空分布

中图分类号: S143.1; S147.23 **文献标志码:** A

Effect of nitrogen application time on the distribution of soil nitrogen under drip fertigation

WANG Xu-yang^{1,3}, FAN Xing-ke^{1,2}

(1. *Institution of soil and water Conservation, Chinese Academy of Science, Shaanxi, Yangling 712100, China;*

2. *North West Agriculture and Forestry University, Shaanxi, Yangling 712100, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Using single-point infiltrational simulation, an experiment on different nitrogen application time under drip fertigation was conducted. Soil ammonium and nitrate content in different location was measured at different time after drip irrigation. The results showed that the region with high nitrogen content was always near the drip emitter for fertigation during the whole drip irrigation. Maximum $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content occurred at 15 ~ 25 cm horizontal distance and 15 ~ 30 cm vertical distance for fertigation during the first half time of drip irrigation. The region with high nitrogen was always near the drip emitter for fertigation during the second half time of drip irrigation, but the content is rather high. Maximum $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content existed at 15cm horizontal distance and 15 cm vertical distance for fertigation in the middle half of the time. The peak content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in wetted soil body occurred on the 5th day and then became smaller with time. The transforming rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was relatively fast, and the nitrification was most strong on the third day after irrigation, resulting in the ammonium content decreased sharply from the third day to the fifth.

Keywords: fertigation; nitrogen application time; $\text{NO}_3^- - \text{N}$; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$; space-time distribution

传统的水肥分施和大量施用化肥易造成养分淋失、土壤次生盐渍化以及农业非点源污染等一系列

环境问题^[1-2]。氮素中的硝态氮是植物利用的主要形态, 但不易被土壤胶体吸附, 土壤中过量的硝态氮

如果不能及时被作物吸收利用,在大水漫灌等充分灌溉条件下,将发生向下移动甚至淋失,进一步迁移至地下导致严重的水污染^[3-5]。

滴灌条件下的水肥一体化不仅实现了水肥同施,而且灌溉施肥量和施肥时段可控,从而为农田水肥高效利用提供了技术保障。目前对灌溉施肥的研究主要集中在灌溉施肥制度方面,即根据作物的生长发育过程和对营养的需求,研究施肥时间(生育阶段)和施肥量。姚宝林等^[6]通过田间试验对不同水肥条件下土壤剖面中硝态氮的分布状况进行了研究,发现灌溉结束后硝态氮含量随灌溉水的入渗向下运移,表现为水平方向由滴头附近向湿润体边缘减少,滴头位置增加最大,垂直方向在0~30 cm这一范围分布较均匀,而在湿润体边缘出现明显积累,其中水是土壤氮素运移、分布的决定因子。李久生等^[7]在室内用15°扇柱体土箱模拟研究滴头流量、灌水量和肥液浓度对砂壤土氮素运移分布规律的影响,认为距滴头15 cm范围内滴头流量和灌水量对土壤硝态氮分布的影响不明显,距滴头15 cm以外随滴头流量增大或灌水量的减小硝态氮浓度增大,在湿润边界上出现硝态氮累积。杨梦娇等^[8]模拟滴灌施肥,研究了不同灌水和施氮梯度处理下硝态氮的分布规律,发现常规灌水条件下不同氮肥处理硝态氮平均含量在垂直方向随土层深度增加而减小,同时增大灌水量在水平方向湿润峰附近会出现硝态氮累积现象。程东娟等^[9]通过室内膜孔灌灌施尿素模拟试验,研究了膜孔灌灌施尿素条件下氮素转化和分布规律,结果表明:转化生成的铵态氮主要分布在膜孔中心附近,随着距离膜孔中心的增大而减小。黄耀华等^[10]以紫色土为供试土壤,采用室内模拟方式进行滴灌施肥试验,研究不同类型土壤中水分、硝态氮和铵态氮的分布运移规律及施肥浓度对硝态氮与铵态氮分布的影响,结果表明:以小滴头流量进行滴灌施肥条件下,土壤水分以垂直入渗方式为主;硝态氮在垂直方向比水平方向运移更加显著。铵态氮几乎只在湿润体表面,即垂直方向0~5 cm土层范围内聚集,垂直运移较少,土壤质地对铵态氮在土壤中的运移分布影响较大。但对具体的施肥过程(灌溉过程中的施肥时段)和对应的肥力因素在土壤中的分布情况研究很少。为了提高水肥利用效率,有必要了解在滴灌过程中肥随水走的痕迹,即速效氮在土壤剖面中的时空变化过程,结合作物生育阶段和根系的生长发育情况,制定便于作物利用的灌溉施肥模式,减少肥料浪费,提高肥料利用效率。

1 试验方法与设计

1.1 试验方法

本研究采用单点源滴水施肥模拟滴灌条件下水肥一体化灌溉施肥过程,供试土壤类型属粘质土,质地为砂壤土,田间持水量为24%(重量含水率),土壤风干后,风干土重量含水率为3%,经过碾细、过筛(筛孔径为2 mm),最后分层装土,容重控制在 $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右,试验桶顶部直径50 cm,底部直径40 cm,高58 cm,装土高度50 cm,每桶土重约106.38 kg,共8桶土,试验用土壤初始硝态氮含量为 $28.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮含量为 $3.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据土壤物理性质,滴灌流量选择 $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,滴头固定在桶顶土壤表面中心位置,为了便于处理控制,每个处理配备4个2 L的塑料瓶容器,用于盛装滴灌用水和水肥混合液。

1.2 试验设计

本次试验设计计划湿润层深度为30 cm,湿润半径为20 cm,经过计算,一次最大灌水量为8 L,整个滴灌历时为240 min,设计施肥量为尿素20 g。试验共设计4个处理,如表1所示,A处理采用全时段灌水施肥;B处理采用前1/2时段灌水施肥,后1/2时段纯粹灌水;C处理采用前1/2时段纯粹灌水,后1/2时段灌水施肥;D处理前1/4时段灌水,接下来1/2时段灌水施肥,最后1/4时段灌水。考虑到氮肥的时效性,取样时间确定为滴灌结束后1,3,5,7 d,由于滴灌条件下滴头浸润范围主要受土壤特性、滴头流量和灌水量的影响^[11],所以本次试验可以认为各施肥处理下湿润体范围一致,取样点分别距离入渗点横向距离为5,15,20 cm处;距地表纵向为0~5,5~15,15~25,25~35 cm处;为了保持土样氮素稳定,所取土样先密封冷藏,最后统一进行样品处理:经研磨过筛(1 mm细筛)后每个样称取5 g,以 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCL溶液为浸提液,按照土样与KCL溶液质量比1:10进行浸提,再经震荡处理后过滤,滤液用流动分析仪来测定样品 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度。

2 结果与分析

2.1 不同处理下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布及变化特征

四种不同处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布如图1~4所示。灌水施肥结束后,各处理下土壤湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量均高于灌水前的 $28.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且随着时间的推移,土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量都表现为先增大后减小的局势,统一表现为第5天时的含量最高,到第7天时

含量有所降低,说明在水肥一体化条件下,氮素的硝化需要 5~6 d。但是不同时段施肥处理下,土壤湿

润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的峰值大小和出现位置具有明显差异。

表 1 试验设计方案

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	第 1h The first hour	第 2h The second hour	第 3h The third hour	第 4h The fourth hour
A 全时段施肥 Entire fertilization		灌水 + 施肥 Irrigation and fertilization		
B 前 1/2 时段施肥 Fertilization during the first half time	灌水 + 施肥 Irrigation and fertilization			灌水 Irrigation
C 后 1/2 时段施肥 Fertilization during the second half time		灌水 Irrigation	灌水 + 施肥 Irrigation and fertilization	
D 中间 1/2 时段施肥 Fertilization during the middle time	灌水 Irrigation	灌水 + 施肥 Irrigation and fertilization		灌水 Irrigation

在 A 处理条件下,如图 1 所示,从灌溉施肥后的第 1 天到第 7 天,土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的最高值始终分布在滴头附近,从滴水点向外辐射,随着离滴头距离的增大,土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量呈逐渐降低的趋势,这与滴灌刚结束后湿润体剖面的土壤含水量分布规律比较相似。但是随着时间的推移,土壤湿润体内各个部位 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量却在发生变化:从第 1 天到第 5 天,土壤湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量逐渐增大,特别是距滴水点越近,增幅越大,在剖面中 0~10 cm 土层范围内, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度从第 1 天的 $74.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增大到第 5 天的最大值 $133.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;在湿润体的边缘地带(湿润锋处)增量较小,不到 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但从第 5 天以后,土壤湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量则呈现出逐渐减小的趋势。

在 B 处理条件下,如图 2 所示,土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的空间分布与 A 处理明显不同,从图 2 中可以看出,土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的最大值出现在距滴头水平距离 15~20 cm、垂直距离 15~30 cm 范围内,即出现在土壤湿润体的外层区域。尽管施肥量相同,但是湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的最大值略低于 A 处理。从最大值出现的位置变化可以看出,这与 B 处理的施肥时间有关,结合 A 处理的结果,说明后期灌水有稀释前期滞留在灌水中心部位湿润体中硝态氮浓度的作用,并使得硝态氮随水分运移向外发生迁移现象。但土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随时间推移的变化规律与 A 处理相同,从第 1 天到第 5 天,土壤湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量逐渐增大,到第 5 天以后,土壤湿润体内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量则呈现出逐渐减小的趋势。

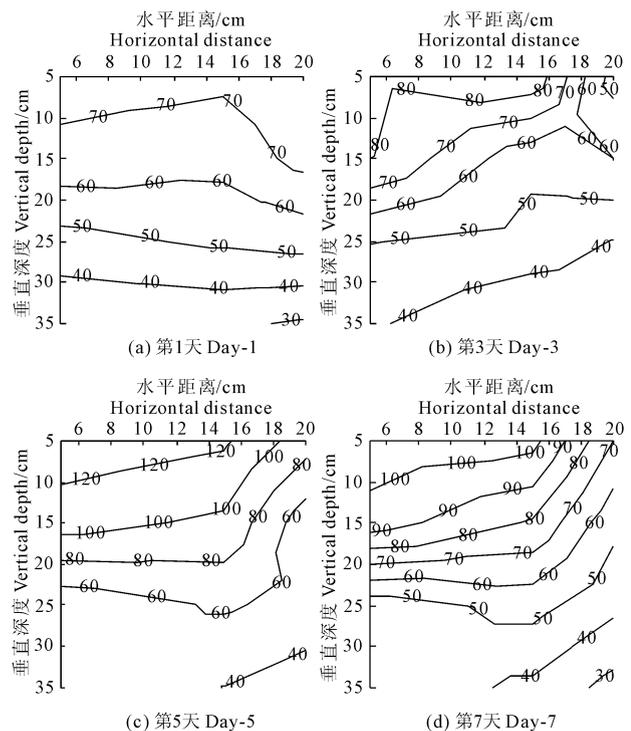


图 1 A 处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布

Fig.1 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under A treatment

在 C 处理条件下,土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布如图 3 所示,在空间分布方面,土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的最高值主要集中在靠近滴头的湿润体中心区域,从滴头向外,随着距离的增大, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量逐渐降低,分布特征与 A 处理基本相似,但 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的最高值却远远高于 A 处理的含量,例如在第 5 天 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量达到 $184.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,大于 A 处理的 $133.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但湿润体的外层, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量却低于 A 处理的含量。在 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量随时间推移的变化规律方面,与 A、B 处理相同,只是量值大小不一。

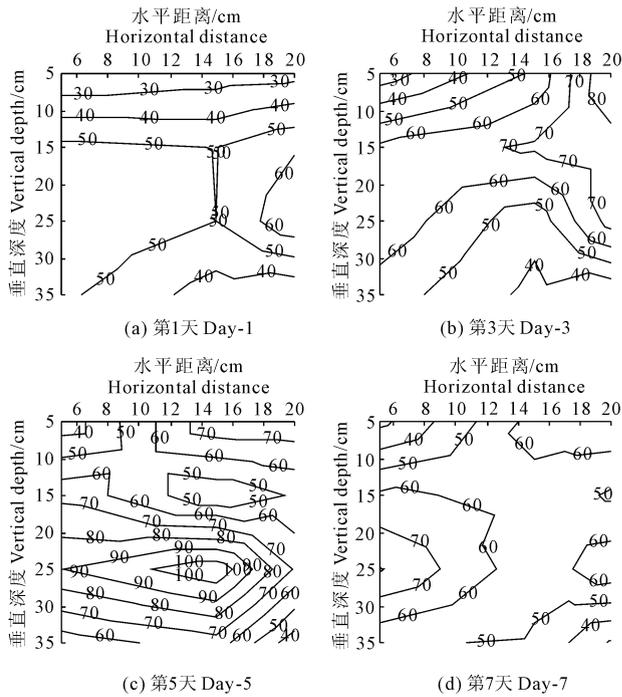


图2 B处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布
Fig.2 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under B treatment

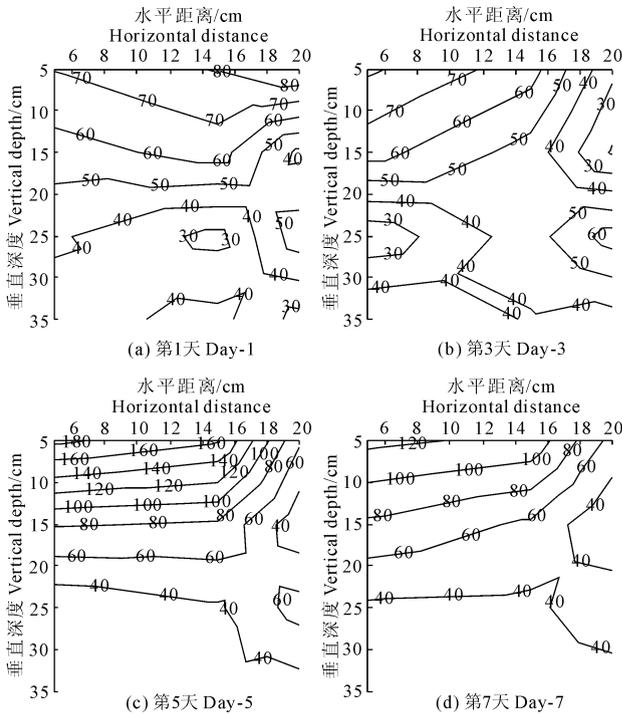


图3 C处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布
Fig.3 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under C treatment

在D处理条件下,土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布如图4所示,从图4可以看出,该处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量比较高的区

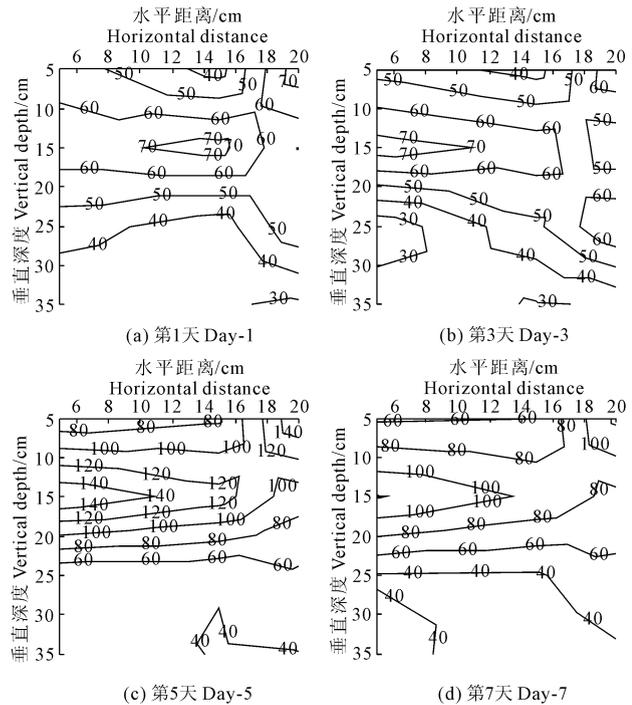


图4 D处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布
Fig.4 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under A treatment

域主要分布在湿润体的外围地带,但没有到湿润体的边缘(湿润锋处),即距滴头水平距离为15 cm左右,垂直深度也为15 cm左右的土层范围内,与B处理有点相似,其土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的最高值低于C处理的最高值,高于A、B处理的最高值。

总体来看,水肥一体化灌溉过程中不同的施肥时间处理对土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的时空分布有较大的影响。A和C处理土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 较高浓度主要集中在滴头附近,即0~15 cm土层和水平方向0~15 cm范围内,表现出明显的表聚性,B和D处理下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量出现较大值的位置与A和C的峰值分布位置明显不同,B处理下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 高含量值在距离滴头水平方向15 cm、纵深25 cm处,这是由于先滴水施肥后,在经过一段时间滴水灌溉,后1/2时段灌入土壤的水对之前滴施的肥料具有一定的稀疏作用,将氮素养分带至湿润体外围和深处,D处理也受后灌水的影响, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的高值分布在距离滴头水平方向15 cm、纵深15 cm处。

2.2 不同时段各处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的时空分布特性

4种不同灌水施肥处理下,土壤湿润体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的时空分布如图5~图8所示。整体来看,土壤湿润体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的空间分布有点类似

于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量分布,但同一位置、同一时刻 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量普遍低于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量,且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 仅在处理试验结束后的 1~3 d 内,其含量处在一个相对比较高的水平,高于土壤本底值 $3.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,3 d 之后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量都迅速降低,除过 C 处理外,基本上都降低到了灌水施肥以前风干土 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量水平以下。以距离滴头水平和纵深 5 cm 处的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量为例,四个处理第 5 天较第 3 天同比降低了 94.2%, 67.8%, 95.0%, 70.2%, 不过 4 种处理下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量随时间推移在降低的同时也有向外扩散的趋势。

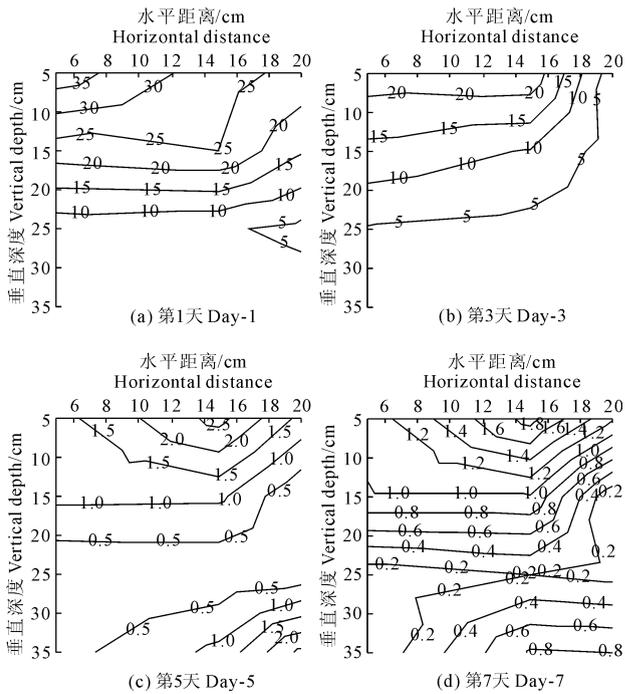


图 5 A 处理下土壤湿润体剖面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的时空分布

Fig.5 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content under A treatment

对于 A 处理,从图 5 可以看出,灌水施肥刚结束后的 3 d 内,土壤湿润体剖面中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量分布也是滴水施肥点附近最高,其值为 $37.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,向外随着距离的增大,其含量逐渐减小。但随着时间的推移,其含量始终处于减少降低的过程,且 3 天以后湿润体内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量迅速降低,普遍低于灌水施肥前的 $3.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅在表层的湿润锋处其含量的降低速度稍微缓慢,但也只有 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。

对于 B 处理,如图 6 所示,土壤湿润体剖面中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的空间分布与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量分布十分相似,其含量的高值区出现在湿润体的边缘附

近,与 A 处理不同之处就是第 3 天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量略有提高,处理相同之处是第 3 天以后,湿润体内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量也是迅速降低,普遍低于灌水施肥前的 $3.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

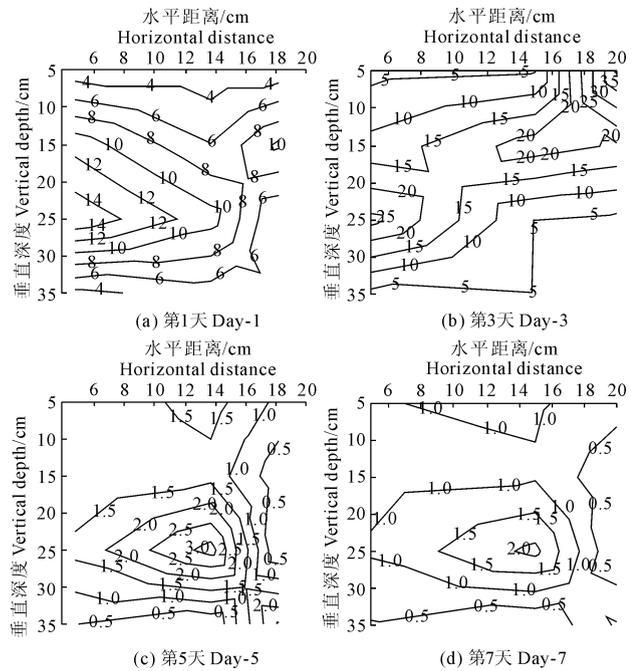


图 6 B 处理下土壤湿润体剖面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的时空分布

Fig.6 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content under B treatment

对于 C 处理,从图 7 可以看出,土壤湿润体剖面中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分布最明显的特征就是区域集中,水平方向分布范围比较大,接近 20 cm,而垂直分布范围比较小,主要分布在 15 cm 以内,前 3 天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量等值线图接近于水平平行线,而且区域内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的值远远高于其它处理,灌水施肥处理结束后的第 3 天, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量峰值达到 $114.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,到第 5 天, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量峰值出现在地表湿润锋处,其值仍然有 $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对于本处理条件下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量分布不同于其它处理,所表现出的聚表性是否与灌水方式有关,还有待于研究。

对于 D 处理,如图 8 所示,土壤湿润体剖面中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量空间分布规律性较差,即 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的高值区一直在移动,灌水施肥结束后的第 1 天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的高值区主要分布在距滴头 15~20 cm 的环状范围内,且峰值出现在水平距离为 20 cm 的近地表处,到第 3 天时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的高值区分布范围缩小,主要集中在到了滴水点下 15 cm 附近,到第 5 天时,峰值又出现在水平距离为 20 cm 的

近地表处。但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量在随时间推移变化方面与其它处理相同,仍然表现为随着时间的延长,其含量一直在降低,特别是第3天到第5天之间,降幅明显。

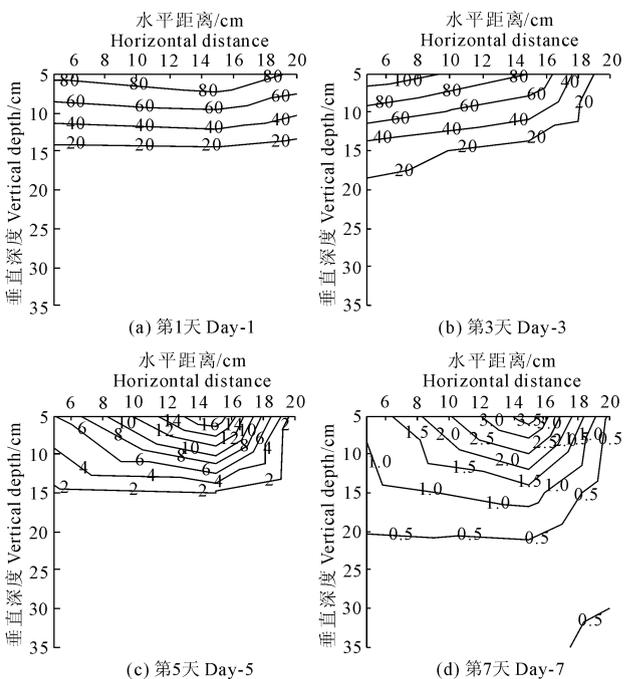


图7 C处理下土壤湿润体剖面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的时空分布

Fig.7 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content under C treatment

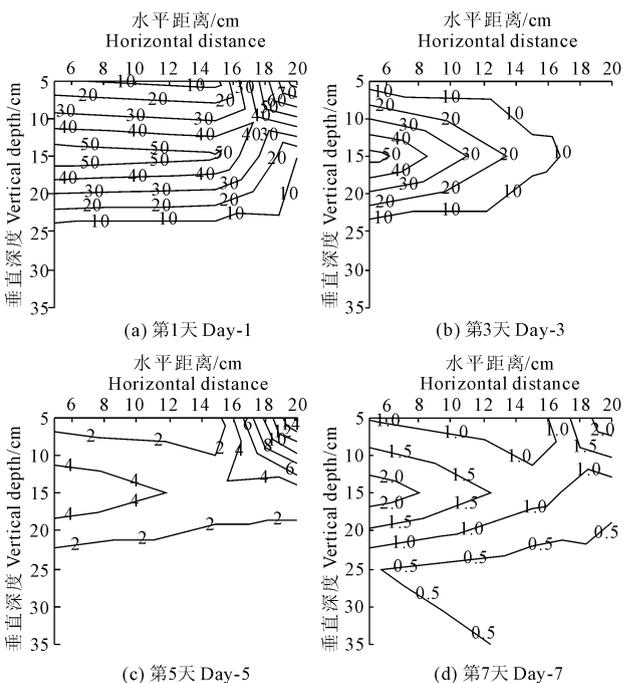


图8 D处理下土壤湿润体剖面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的时空分布

Fig.8 The temporal and spatial distribution of soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content under D treatment

从4种不同处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的时空分布变化图可以看出,在水肥一体化灌溉条件下,尽管施肥量相同,不同处理下土壤湿润体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量差异较大,且变化规律不完全一致,但施肥时段的迟早对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在土壤湿润体中的分布也有有一定的影响,表现为灌水前期施肥, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在土壤湿润体的边缘区域,后期施肥处理下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在土壤湿润体的中心区域。另外,在灌溉条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是一个很不稳定的氮素因子,在土壤湿润体中存留时间很短,一般只有3~4 d。

2.3 土壤湿润体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化关系

从土壤湿润体中各测点 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量随时间的变化过程趋势可以发现,在灌水施肥结束后前5天内,二者之间存在明显的此消彼长的现象。为了分析二者之间的关系,下面通过计算湿润体剖面中各部分土体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量来分析。以不同施肥处理下第3天各土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量为例,将每层土壤湿润体简化视作由一组同心圆柱体组成,假定在同一圆柱体内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量相同,则各层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量可用式(1)计算:

$$\text{NH}_4^+ - \text{N}(\text{mg}) = \pi h \gamma [r_1^2 c_1 + (r_2^2 - r_1^2) c_2] \quad (1)$$
 式中, π 为圆周率, h 为设定土层厚度即 10 cm, γ 为土壤干容重 $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, r_1, r_2 分别为 15 cm、25 cm, c_1, c_2 为两点间的铵态氮平均含量^[12]。计算结果见表2。

根据计算结果, A处理0~15 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 集中了总量的78.62%, B处理0~15 cm土层占到总量的73.65%, C处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分布更为集中,仅0~5 cm就分布总量的77.73%, D处理下5~15 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分布最多,占总量的70.49%。可见 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 聚集在表层小范围土壤内,这是由于土壤胶体主要带负电荷,容易交换吸附带正电荷的 NH_4^+ 离子,所以铵态氮以高浓度状态进入土壤,在迁移的过程中较快被土壤吸附,进而阻滞了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的运移,因此在水肥同步滴灌湿润土壤的方式下,铵态氮溶质很难随土壤水分一起均匀迁移到湿润体的各个部分,而是大量聚集在滴头附近一个非常有限的土壤范围内。

由式(1)也可以计算出不同施肥处理下第3天各土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量以及不同处理下不同时段整个土壤湿润体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的总含量。以A处理为例,计算结果见表3。

表 2 不同施肥处理下第 3 天各土层铵态氮含量/mg

Table 2 Soil ammonium $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content under different fertilizer treatments in the third day

处理 Treatment	点位/cm PT(point location)	5	15	25	c_1	c_2	铵态氮含量 /mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content	每层含量 所占比例/% The proportion of each layer
A	5	22.46	23.83	2.10	23.15	12.96	456.86	52.84
	15	13.54	9.55	2.82	11.54	6.19	222.92	25.78
	25	4.63	3.29	2.29	3.96	2.79	88.23	10.20
	35	2.27	4.10	3.31	3.19	3.70	96.61	11.17
B	5	3.46	4.69	40.38	4.07	22.53	436.49	33.01
	15	11.64	22.58	19.31	17.11	20.94	537.49	40.64
	25	26.43	4.96	3.69	15.69	4.33	231.27	17.49
	35	3.19	4.85	3.96	4.02	4.40	117.15	8.86
C	5	114.49	80.88	5.63	97.69	43.25	1726.75	77.73
	15	29.09	10.76	2.79	19.92	6.77	316.14	14.23
	25	2.21	3.45	2.83	2.83	3.14	83.16	3.74
	35	1.71	3.80	3.97	2.75	3.89	95.54	4.30
D	5	3.79	1.74	7.83	2.77	4.78	111.44	16.12
	15	54.69	13.40	3.75	34.04	8.57	487.38	70.49
	25	1.46	0.59	0.66	1.02	0.62	21.06	3.05
	35	1.95	3.22	2.02	2.58	2.62	71.57	10.35

表 3 A 施肥处理后不同时刻土壤中
 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的总含量Table 3 Soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under A
fertilization treatment in different moment

时间/d Time	铵态氮含量/mg $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content	硝态氮含量/mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content
1	864.62	6134.22
3	1729.13	5808.44
5	119.11	8044.05
7	83.10	6894.64

从结果可以看出:随着时间变化, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量之间存在明显的此消彼长关系,尤其在 A 处理第 3 天与第 5 天之间 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量递减率为 93.10%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增长率为 38.49%,在施肥后第 3 天硝化作用最强,说明这一此消彼长的趋势跟土壤中硝化作用有很大关联,有一部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在湿润的土壤中通过硝化作用转化成了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

3 结 论

(1) 从不同处理下土壤湿润体剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的时空分布图可以看出,在水肥一体化灌溉条件下,尽管施肥量相同,但土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的峰值大小和出现位置

明显不同,其含量分布与施肥时段有密切关系,表现为灌水前期施肥, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在土壤湿润体的边缘区域,灌水后期施肥, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在土壤湿润体的中心区域。A 和 C 处理土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 较高浓度主要集中在滴头附近,即 0~15 cm 土层和水平方向 0~15 cm 范围内表现出明显的表聚性,B 处理下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 高浓度值在距离滴头水平方向 15 cm、纵深 25 cm 处,D 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 高浓度值分布在距离滴头水平方向 15 cm、纵深 15 cm 处。相对于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 空间运移距离较小,A 和 B 处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要分布在 0~15 cm,C 处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 集中在 0~5 cm,D 处理下 5~15 cm 土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高。

(2) 各处理结束后,随着时间的推移,土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量均表现为先增大后减小的趋势,前 5 天一直增大,第 7 天减小,说明水肥一体化灌溉结束后,氮肥需要 5~6 天就可完全转化成硝态氮。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在时间上转化速率相对较快,在灌水施肥结束后的第 3 天硝化作用最强,从第 3 天到第 5 天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度急剧降低,结合土壤湿润体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量的变化规律,二者表现为此消彼长的趋势,说明部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在湿润的土壤中经硝化作用转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,这也是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在第 5

天达到高峰的部分原因。

(3) 在水肥一体化滴灌条件下,尽管氮肥中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 易溶于水,且易随水迁移,但是滴灌是一种局部湿润灌溉,所以灌水施肥后,土壤中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要分布在湿润体内,不会发生明显的氮素养分流失,因此有利于提高氮肥的利用效率。

基于上述研究结果,在实际生产中可以根据灌水施肥时段不同致使速效氮分布不一致的特点,结合作物不同生育期根系的分布特点,即当作物根系分布较浅时采用先水后肥的方式,根系分布在土壤“中间层”时可选用中间 1/2 时段施肥,先肥后水的滴灌方式更加适宜作物根系分布较深的情况,使速效氮较好地集中在作物根系附近,防止因氮素淋溶而降低氮肥利用率,从而真正提高水肥利用效率。

参考文献:

- [1] 王艳群,彭正萍,薛世川,等.过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J].农业环境科学学报,2005,(S1):81-84.
- [2] 张学军,赵桂芳,朱雯清,等.菜田土壤氮素流失及其调控措施的研究进展[J].生态环境,2004,13(1):105-108.
- [3] Ju X T, Kou C L, Zhang F S. Nitrogen balance and groundwater ni-

trate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2006, 143(1):117-125.

- [4] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1996, 59(3):223-231.
- [5] Richter J, Roelcke M. The N-cycle as determined by intensive agriculture-examples from central Europe and China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57(1):33-46.
- [6] 姚宝林,朱珠,孙建,等.不同水肥条件下土壤 N、P、K 分布规律研究[J].中国农村水利水电,2011,(10):7-10.
- [7] 李久生,张建君,任理,等.滴灌点源施肥灌溉对土壤氮素分布影响的试验研究[J].农业工程学报,2002,18(5):61-66.
- [8] 杨梦娇,吕新,侯振安,等.滴灌施肥条件下不同土层硝态氮的分布规律[J].新疆农业科学,2013,(5):875-881.
- [9] 程东娟,赵新宇,费良军,等.膜孔灌施肥条件下氮素转化和分布室内模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(12):58-62.
- [10] 黄耀华,王侃,杨剑虹,等.滴灌施肥条件下土壤水分和速效氮迁移分布规律[J].水土保持学报,2014,28(5):87-94.
- [11] Goldberg S D, Rinot M, Karu N. Effect of trickle irrigation intervals on distribution and utilization of soil moisture in a vineyard[J]. Soil Sci Soc Am J, 1971, 35(1):127-130.
- [12] 侯红雨,庞鸿宾,齐学斌,等.温室滴灌条件下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化迁移规律研究[J].灌溉排水学报,2003,(1):48-52.

(上接第 181 页)

参考文献:

- [1] 许祥明,叶和春,李国凤.植物抗盐机理的研究进展[J].应用与环境生物学报,2000,6(4):379-387
- [2] Cramer G R, Luchli A, Epstein E. Effects of NaCl and CaCl_2 on ion activities in complex nutrient solutions and root growth of cotton[J]. Plant Physiology, 1986, 81(3):792-797.
- [3] Jia Y B, Yang X E, Feng Y, et al. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2008, 9(5):427-434.
- [4] Srinivasarao C H, Benzioni A, Eshel A, et al. Effects of salinity on root morphology and nutrient acquisition by Faba beans (*Vicia faba* L.)[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 2004, 52(2):184-191.
- [5] 崔云玲,王生录,陈炳东,等.不同品种油菜对盐胁迫响应研究[J].土壤学报,2011,48(5):1051-1058.
- [6] 侯晨.早稻根对盐胁迫的生理生化响应及信号转导[D].兰州:兰州大学,2008.
- [7] 卢学琴,胡尚连,曹颖,等.NaCl 胁迫对剑麻幼苗根毛生长及其生理代谢的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(5):104-

108.

- [8] 徐芬芬,叶利民,夏晓蕾,等.人工海水胁迫对不同品种小白菜萌发和根系生长的影响[J].上饶师范学院学报,2015,35(6):81-85.
- [9] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [10] 王宝山,赵可夫.小麦叶片中 Na^+ 、 K^+ 提取方法的比较[J].植物生理学通讯,1995,31(1):50-52.
- [11] 李敏,王维华,王然,等.高温胁迫对菠菜叶片保护酶活性和脂膜透性的影响[J].园艺学报,2004,31(1):99-100.
- [12] 王爱国,罗广华.植物的超氧物自由基与羟胺反应的定量关系[M].植物生理学通讯,1990,(6):55-57.
- [13] 刘俊,吕波,徐朗莱.植物叶片中过氧化氢含量测定方法的改进[J].生物化学与生物物理进展,2000,27(5):548-551.
- [14] 刘萍,李明军.植物生理学实验技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [15] 杜秀敏,殷文璇,赵彦修,等.植物中活性氧的产生及清除机制[J].生物工程学报,2001,17:121-125.
- [16] Foreman J, Demidchik V, Bothwell J H F, et al. Reactive oxygen species produced by NADPH oxidase regulated plant growth[J]. Nature, 422:442-446.