

田块尺度上土壤/地下水中硝态氮动态变化特征及模拟^①王志敏¹, 林青¹, 王松禄², 徐绍辉^{1*}

(1 青岛大学环境科学系, 山东青岛 266071; 2 平度市水文局, 山东青岛 266700)

摘要:以青岛市大沽河下游地区冬小麦-夏玉米轮作农田为对象,通过田间试验和室内分析,研究了不同深度土壤和地下水中 NO_3^- -N 在一个轮作周期内的动态变化特征,探讨了不同氮肥施用量和灌溉量对土壤-地下水系统中 NO_3^- -N 时空分布的影响,并基于土壤水动力学和溶质运移理论对土壤中 NO_3^- -N 运移过程进行了数值模拟。模拟结果表明:小麦季施氮(N)量达到 380 kg/hm^2 ,玉米季施氮量达到 290 kg/hm^2 时,季末剖面深度 $130 \sim 160 \text{ cm}$ 土壤 NO_3^- -N 含量超过 10 mg/kg ;由地下水 NO_3^- -N 月累计量估算模型得出, NO_3^- -N 在 6 月和 8 月向浅部地下水的淋失量最大,分别为 7.20 、 7.67 mg/L 。

关键词:土壤;地下水;硝态氮;Hydrus-1d 模型;氮淋失

中图分类号: S512.1

中国农田土壤中 NO_3^- -N 的淋失严重,对地下水环境造成严重的污染风险。据报道,土壤中的肥料约有 $30\% \sim 50\%$ 因淋失而进入地下水^[1]。因学科或研究目的不同,目前对 NO_3^- -N 运移规律的研究多把土壤和地下水作为两个相对独立的系统^[2-4],而未将两者作为一个整体统一考虑,导致无法全面解析土壤中 NO_3^- -N 淋失对地下水产生的污染风险。

本研究通过对田块尺度上冬小麦-夏玉米整个生育期内土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和土壤含水量在不同深度上的动态监测,分析不同施氮量、灌溉量对 NO_3^- -N 迁移的影响;应用 Hydrus-1D 软件模拟 NO_3^- -N 在土壤中的迁移过程,建立地下水 NO_3^- -N 月累计量估算模型,得到土壤 NO_3^- -N 淋失到地下水中的月累积量。研究结果不仅揭示了研究区 NO_3^- -N 的运移特征,也可为农田合理灌溉施肥提供一定的科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于即墨市蓝村镇四里村($36^\circ 41' \text{N}$, $120^\circ 16' \text{E}$),地处大沽河下游河谷冲积平原,主要由第四系全新统松散堆积物、洪冲积物组成,其地层结构简单、层序清晰,属暖温带、沿海湿润季风气候区,空气湿润,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年平均气

温 12.2°C ,年降雨量 708.0 mm ,降雨年际变化大且年内分布不均,主要集中在夏季,夏季降雨量约占全年 72% ^[5]。试验区农田面积约 0.65 hm^2 ,农作物为小麦-玉米一年两作,土壤类型主要为棕壤,地下水埋深 4 m 左右。

1.2 试验处理

把试验区划分为 6 个不同的子块(每个子块内设 3 个重复),小麦季进行 3 个施氮水平(以纯 N 计 200 、 250 和 300 kg/hm^2)和 1 个灌溉水平 90 mm 处理,玉米季进行 3 个施氮水平(160 、 200 和 230 kg/hm^2)和 2 个灌溉水平(30 、 45 mm)的水肥交互试验,分别见图 1 和表 1。

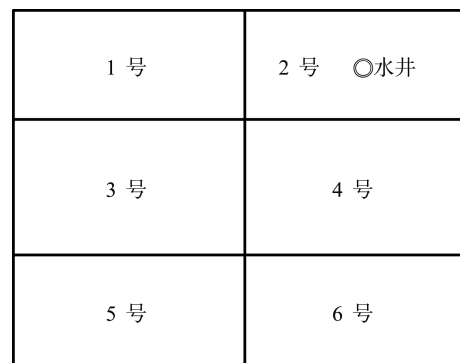


图 1 试验田示意图
Fig. 1 Test field sketch

基金项目:国家自然科学基金项目(41171183)和青岛市民生计划项目(13-1-3-132-nsh)资助。

* 通讯作者(shhxu@qdu.edu.cn)

作者简介:王志敏(1988—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事地下环境中水流和溶质运移的数值模拟研究。E-mail: wangzhimin2011@163.com

表 1 试验小区施氮、灌溉处理
Table 1 Nitrogen fertilization and irrigation in the test field

小区 处理	冬小麦		夏玉米	
	N(kg/hm ²)	灌溉量(mm)	N(kg/hm ²)	灌溉量(mm)
1	250	90	200	30
2	250	90	200	45
3	300	90	230	30
4	300	90	230	45
5	200	90	160	30
6	200	90	160	45

在 6 个小区内分别用土钻取样 取样深度为 160 cm，分 6 层 表层 0~40 cm 每 20 cm 取一个样，40~160 cm 每 30 cm 取一个样，每两周采样 1 次(灌溉、降雨、施肥后加测 1 次)，测定土壤水分、NO₃⁻-N 及 NH₄⁺-N 含量。在 2 号区设立观测井，测定地下水位及 NO₃⁻-N

含量动态变化。

土壤 NO₃⁻-N 测量采用国标法——紫外分光光度法，NH₄⁺-N 的测定用凯氏定氮仪完成。

2 结果与分析

2.1 冬小麦-夏玉米生长周期内土壤 NO₃⁻-N 动态变化

氮肥进入土壤后，基本归宿主要有 3 个方面：被作物吸收、以无机态残留、淋失或固持。图 2 为 2013 年不同深度土壤 NO₃⁻-N 含量变化曲线，可以看出，表层 0~40 cm 土壤 NO₃⁻-N 含量高，波动大，全年大部分时期都大于 10 mg/kg，为作物氮素的主要利用层。土壤中 NO₃⁻-N 含量全年波动性明显，6 个试验区均会出现 3 个明显的峰，分别是越冬期、四月份和八月份。

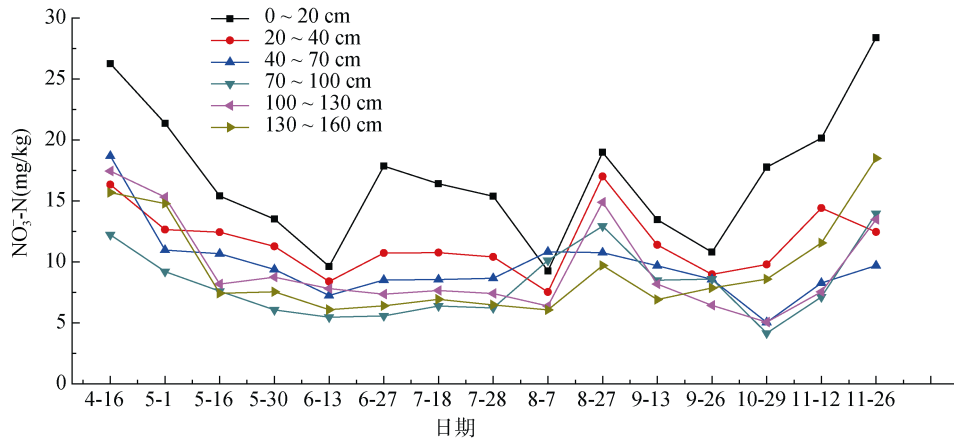


图 2 生长周期内土壤 NO₃⁻-N 含量变化
Fig. 2 Soil nitrate variation in growing period

不同深度土壤 NO₃⁻-N 平均含量及变异系数均不同，见表 2。由表 2 可知，0~20 cm 土壤 NO₃⁻-N 含量明显高于下层土壤，随着土壤深度增加，整体呈递减趋势，但在 100~130 cm 土层要普遍高于 70~100 cm 土层，尤其是小麦季，100~130 cm 土层 NO₃⁻-N 富集趋势明显。由变异系数可以看出，表层 0~20 cm 及 100~130 cm 土层 NO₃⁻-N 波动最强烈，原因是表层土质疏松，持水性差，蒸挥发强烈，受施肥灌溉、农作物吸收、氨挥发、淋洗影响明显。100~130 cm 土

层含砂土较多，持水性差，土壤含水量在该层变异系数较大，又 NO₃⁻-N 含量受水分影响大，故两者对应关系强。40~70 cm 土层存在黏土层，持水性较强，故该层土壤含水量和 NO₃⁻-N 变异系数均较小。

2.2 冬小麦-夏玉米生长周期内土壤 NH₄⁺-N 动态变化

土壤 NH₄⁺-N 含量与 NO₃⁻-N 含量相比，较稳定，如图 3 所示。同 NO₃⁻-N 一样，NH₄⁺-N 可以被作物直接吸收。NH₄⁺带正电荷，容易被土壤胶体吸附，还可

表 2 不同深度土壤 NO₃⁻-N 含量
Table 2 Nitrate contents in soils of different depths

统计值	小麦季						玉米季					
	0~20 cm	20~40 cm	40~70 cm	70~100 cm	100~130 cm	130~160 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~70 cm	70~100 cm	100~130 cm	130~160 cm
平均值	14.98	11.20	9.57	7.09	10.02	8.96	14.60	10.98	9.37	8.34	8.33	7.20
标准差	4.89	1.95	1.70	1.67	2.52	1.94	4.60	2.97	1.05	2.59	1.96	1.24
变异系数 (%)	32.61	17.46	17.74	23.61	25.14	21.65	31.52	27.05	11.25	31.08	23.52	17.24

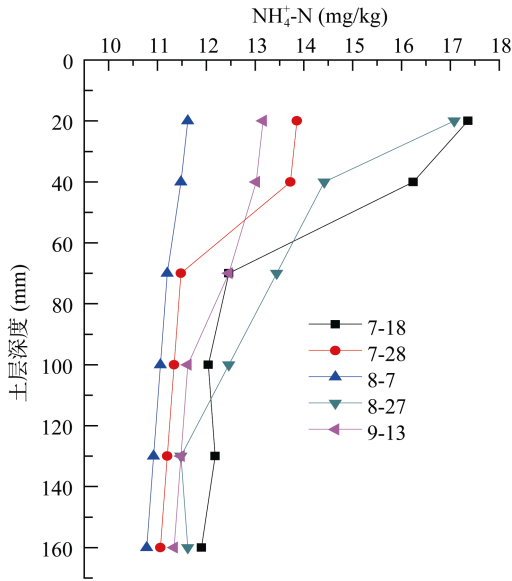


图 3 NH₄⁺-N 含量变化
Fig. 3 Ammonium nitrogen variation

以进入黏土矿物的晶体中，成为固定态^[6]。因此，与 NO₃⁻-N 相比，NH₄⁺-N 的移动性小，不容易随水分运动。实验结果表明：0~40 cm 土壤 NH₄⁺-N 含量较高，60 cm 以下 NH₄⁺-N 含量较低且垂直变化不明显。

2.3 施氮量对土壤 NO₃⁻-N 含量的影响

以玉米季为例，分析施氮量对土壤 NO₃⁻-N 含量的影响。玉米季进行 3 个施氮水平(160、200 和 230 kg/hm²) 处理，分别对应 5、1、3 号区，从图 4 中可以看出，高施肥量 3 号区土壤 NO₃⁻-N 含量明显高于农民习惯施肥量 1 号区和低施肥量 5 号区。试验田于 6 月 23 日播种玉米，小麦秸秆还田并施用复合肥，10 月初收获，生长周期约 100 天。玉米生长季前期 NO₃⁻-N 含量逐渐降低，此时间段玉米处于出苗期到拔节期，植株较小，吸收氮相对有限，7 月中下旬减少尤其明显，在此时间段，雨量充分，处于拔节期到大喇叭口期，玉米吸氮快。8 月 10 号追肥，土壤 NO₃⁻-N 含量

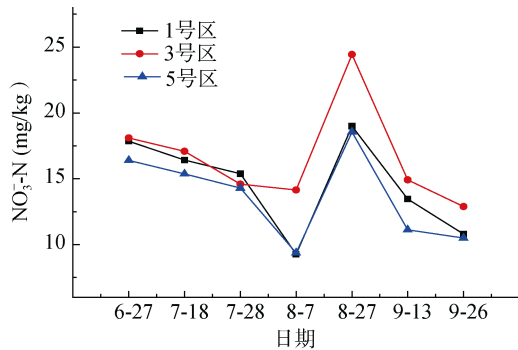


图 4 玉米季 1、3、5 号区 0~20 cm 土壤 NO₃⁻-N 含量
Fig. 4 Nitrate contents in 0~20 cm depth at corn season of area 1,3 and 5

明显增高，进入 9 月份后玉米进入抽穗期和乳熟期，此时期根系发达，根系大小与吸氮量呈正相关^[7]，是吸收氮素的高峰期，季末 NO₃⁻-N 含量达到最低值。

2.4 灌溉量对土壤 NO₃⁻-N 含量的影响

以玉米季为例，分析灌溉量对土壤 NO₃⁻-N 含量的影响。玉米季雨量充分，灌溉量需求少，只是在施肥期间有少量灌溉。从图 5 中可以看出，玉米季 8 月追肥期间，同样施肥量，不同灌溉量对比发现，高灌溉量处理 130~160 cm 土层土壤 NO₃⁻-N 含量高于低灌溉量，多余水分渗漏到土壤下层，引起 NO₃⁻-N 下移，灌溉量越大，下移越明显。

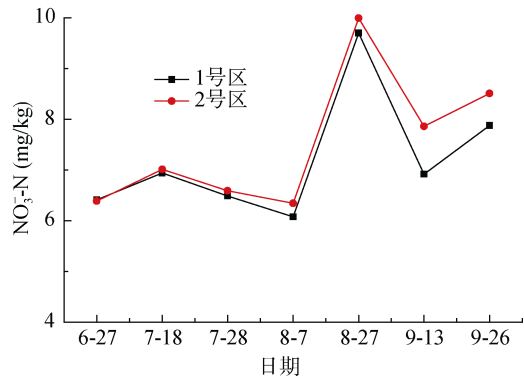


图 5 玉米季 1 号和 2 号区 130~160 cm 土壤 NO₃⁻-N 含量
Fig. 5 Nitrate contents in 130~160 cm depth at corn season of area 1 and 2

2.5 土壤中 NO₃⁻-N 运移的模拟

利用 Hydrus-1d 软件建立模型^[8-9]，分别对 2013 年试验田冬小麦(从 3 月 31 日到 6 月 18 日)、夏玉米(从 6 月 23 日到 9 月 30 日)的土壤含水率和 NO₃⁻-N 含量进行模拟。上边界选择浓度通量边界条件，在作物生育期内逐日输入上边界的变量值：灌溉量、降雨量、温度以及溶质通量，下边界选择自由排水边界。土壤中氮素转化过程非常复杂，该模型中做如下假设：肥料施入土壤后立即全部转化为 NO₃⁻-N，施肥灌溉后氮的损失率为 20%~25%^[10]。

土壤剖面各层水力学参数利用 Rosetta 软件获取。将试验得到的土壤砂粒、粉粒、黏粒百分含量和土壤容重(体积质量)输入软件，利用基于神经网络的土壤转换函数法推求出模拟所需的 van Genuchten 模型参数，土壤剖面不同质地参数见表 4。

图 6 为 2013 年 3 月 31 日至 6 月 18 日小麦季土壤含水率及 NO₃⁻-N 含量的模拟值和实测值对比。模拟效率系数 *Ens*^[11]均大于 0.5，0~20 cm 土层土壤含水量波动比较大，原因是表层土壤松散，受蒸发、灌溉、降雨影响大；而 130~160 cm 土层小麦季前期含水率波动性却较小，维持在 0.30 cm³/cm³ 左右，原因

表 4 土壤剖面不同质地参数
Table 4 Different texture parameters of soil profile

土壤深度 (cm)	土壤类型	残余含水量 r (cm ³ /cm ³)	饱和含水量 s (cm ³ /cm ³)	经验参数 (cm ⁻¹)	曲线形状参数 n	饱和导水率 K (cm/d)
0~40	壤土	0.068	0.42	0.048	1.42	28.49
40~70	砂质黏壤土	0.072	0.41	0.051	1.39	22.36
70~160	砂质壤土	0.047	0.38	0.037	1.76	81.92

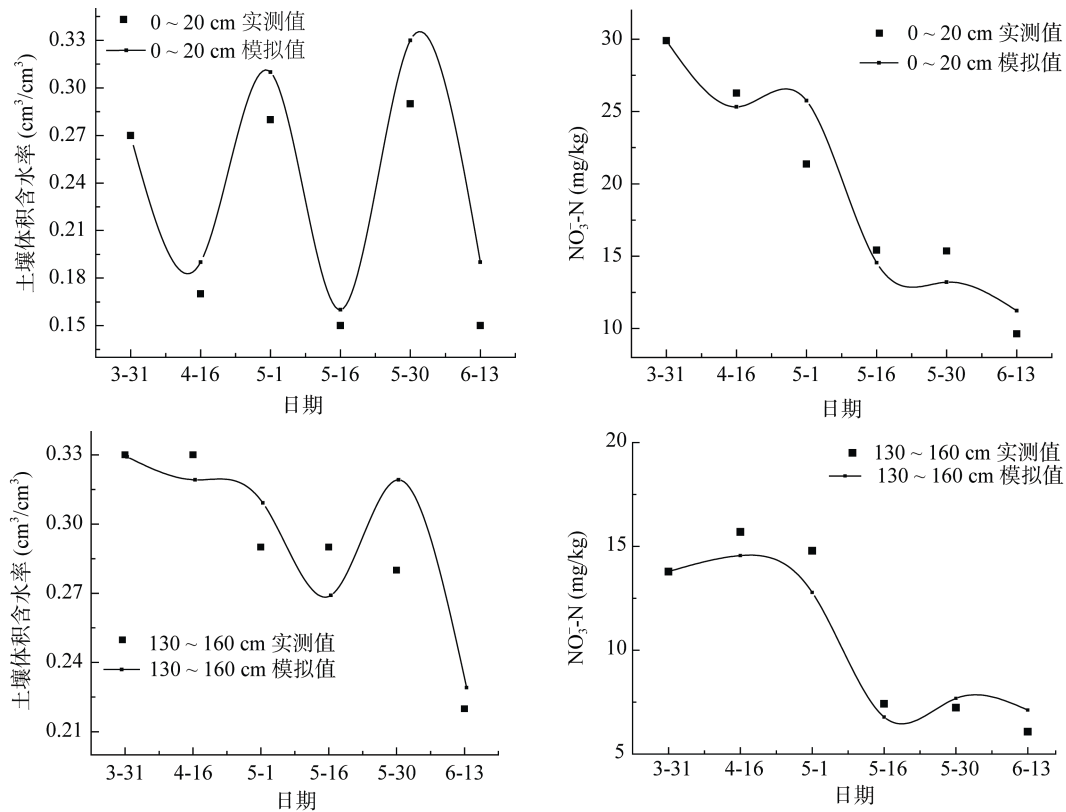


图 6 小麦季土壤含水量及 NO₃-N 含量模拟值与实测值对比
Fig. 6 Comparison of observed and predicted nitrate and moisture contents at wheat season

是该处土质密实，受灌溉、降雨影响较小，且几乎不受蒸发影响，又距潜水面近，地下水补充及时，故小麦季前期保持较平稳状态。模型模拟结果可以反映出 NO₃-N 的迁移特征。根据现有模型模拟，当该地小麦季施氮量超过 380 kg/hm² 时，小麦季末 130~160 cm 土层 NO₃-N 含量会超过 10 mg/kg。若深层土壤 NO₃-N 含量超过 10 mg/kg，已证明存在 NO₃-N 严重污染，会进一步淋失进入地下水中。国标规定饮用水中 NO₃-N 含量不得高于 10 mg/L。

氮肥的施用量能显著增加土壤中 NO₃-N 的淋失量，小麦季结束后，对施氮量和 130~160 cm 土层 NO₃-N 含量进行拟合，符合二次相关关系(图 7)。按照华北农民施肥习惯，通常小麦季施氮量 250 kg/hm² 左右，由拟合方程计算出，当小麦施肥量达到 449.1 kg/hm² 时，130~160 cm 土层 NO₃-N 的淋失浓度会大于 10.0 mg/kg，这与模型模拟结果施氮量 380 kg/hm² 较接近。

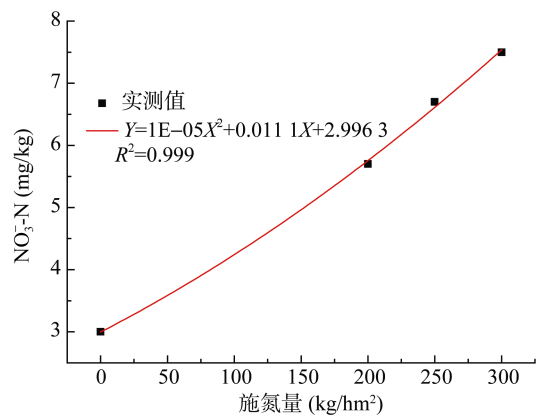


图 7 小麦季 130~160 cm 土壤 NO₃-N 含量与施氮量关系

Fig. 7 Relationship of nitrate content and nitrogen application rate in 130~160 cm soil at wheat season

图 8 为 2013 年 6 月 23 日至 9 月 30 日玉米季土壤含水量及 NO₃-N 含量的模拟值和实测值对比，土

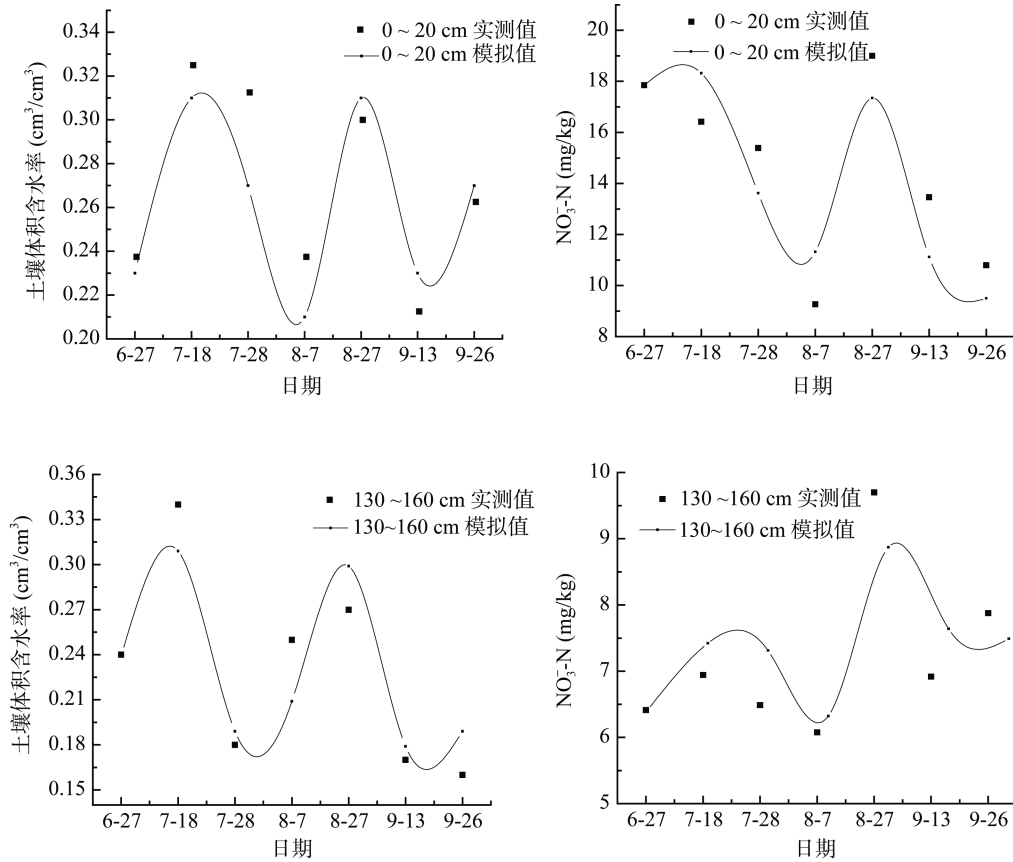


图 8 玉米季土壤含水率及 NO₃-N 含量模拟值与实测值对比
Fig. 8 Comparison of observed and predicted nitrate and moisture contents at corn season

壤含水率模拟结果吻合度比较高,可以基本上反映出田间水分分布和运移情况。玉米季 0~20 cm、130~160 cm 土壤 NO₃-N 模拟值与实测值对比,总体而言,模拟准确度要高于小麦季。依据该模型,当该地玉米季施氮量超过 290 kg/hm² 时,玉米季末 130~160 cm 土层 NO₃-N 含量会超过 10 mg/kg。

玉米季结束后,对施氮量和 130~160 cm 土层 NO₃-N 含量进行拟合,符合二次相关关系(图 9)。按照华北农民施肥习惯,通常玉米季施氮量 200 kg/hm² 左右,由拟合方程计算出,当玉米季施氮量控制在 200 kg/hm² 左右时,130~160 cm 土层季末土壤 NO₃-N 含量为 7.9 mg/kg;当施氮量达到 272.2 kg N/hm² 时,130~160 cm 土层 NO₃-N 的淋失浓度会大于 10.0 mg/kg,这与模型模拟结果施氮量 290 kg/hm² 比较接近。

2.6 地下水 NO₃-N 累积量模型

研究区冬小麦-夏玉米生长期地下水 NO₃-N 含量如图 10 所示。土壤中无机氮的淋洗以 NO₃-N 为主,淋失的 NO₃-N 可能会进入浅层地下水中。土壤 NO₃-N 累积量=土壤 NO₃-N 氮含量×土壤容重×土壤厚度^[12-15]。本研究中,由于土壤剖面中 NO₃-N 的监测最深仅到 160 cm,而此深度以下到地下水(地下水埋深 4 m 左右)没有监测,因此,有多少 NO₃-N 从

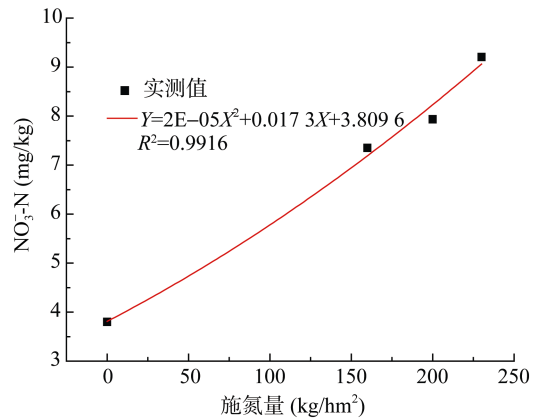


图 9 玉米季 130~160 cm 处土壤 NO₃-N 含量与施氮量关系
Fig. 9 Relationship of nitrate content and nitrate application rate in 130-160 cm soil at corn season

非饱和带淋失进入地下水是未知的。与文献[16]的假定条件类似,本研究区地下水 NO₃-N 除了接收来自非饱和带 NO₃-N 的淋失外,还存在着自然衰减。根据文献[16],t+1 月地下水 NO₃-N 量为 t 月地下水 NO₃-N 剩余量和输入量之和。数学模型表示为:

$$C_{t+1} = I_{t+1} + C_t (1 - R\%) \tag{1}$$

式中: I_{t+1} 为 t+1 月 NO₃-N 的输入浓度,即土壤中

NO₃-N 的淋失量，反映了地下水 NO₃-N 月增加量：
C_t 为 t 月地下水原有 NO₃-N 浓度；C_{t+1} 为 t+1 月 NO₃-N 浓度。

据已有研究，砂质壤土地下水中 NO₃-N 的自然衰减率在 37% ~ 38% [16]。把公式(1)展开，可以计算得出 NO₃-N 对地下水的月输入量，转化为下式：

$$I_{t+1} = C_{t+1} - C_t(1 - R\%) \quad (2)$$

根据式(2)及冬小麦-夏玉米生长期地下水 NO₃-N 的观测值，计算出 4—11 月地下水 NO₃-N 月输入量分别为：4.63、5.20、7.46、2.21、7.67、4.97、4.10、3.12 mg/L。

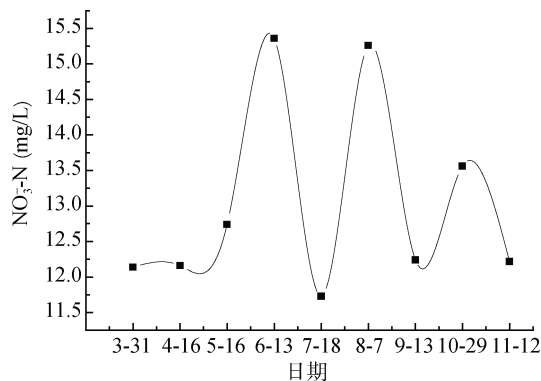


图 10 地下水 NO₃-N 含量动态变化曲线
Fig. 10 Dynamic change of groundwater nitrate content

土壤中 NO₃-N 的淋失量与降雨量有关。试验期内月降雨量与地下水 NO₃-N 的月输入量的关系如图 11 所示。由图 11 可知：NO₃-N 在 6 月和 8 月向地下水中的淋失量最大，淋失进入地下水较灌溉和降雨具有滞后性。其中冬小麦在 4、5、6 三个月份中由包气带淋失进入地下水的 NO₃-N 含量总和为 17.29 mg/L，夏玉米在 7、8、9 三个月份中由包气带淋失进入地

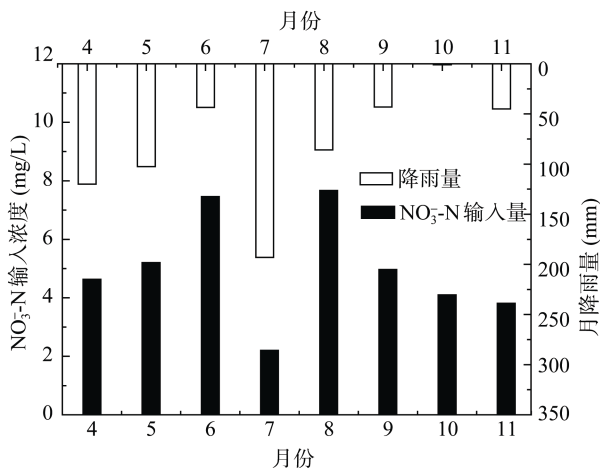


图 11 地下水 NO₃-N 月输入量与降雨量
Fig. 11 Monthly precipitation and nitrate input of groundwater

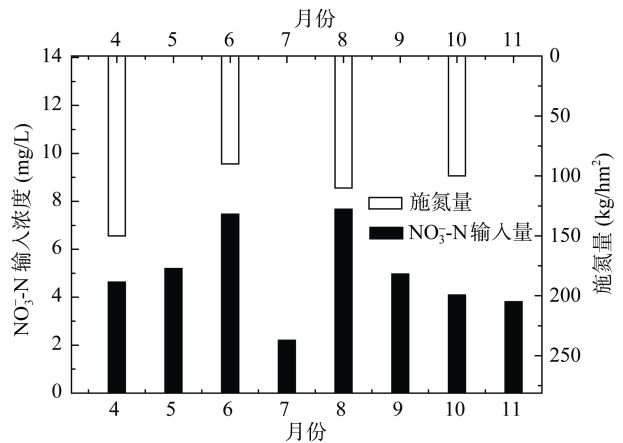


图 12 地下水 NO₃-N 月输入量与施氮量
Fig. 12 Monthly nitrate application rate and nitrate input of groundwater

下水的 NO₃-N 含量总和为 14.85 mg/L。冬小麦生长周期为从前一年的 10 月到来年的 6 月，共 8 个月，夏玉米生长周期为从 7 月到 10 月份，共计 3 个月，以单季来算，小麦季淋失到地下水中的 NO₃-N 量要远远大于玉米季。因此，小麦季是 NO₃-N 淋失的主要时期，这与毕经纬等的研究结果相一致 [4]。

当然，土壤 NO₃-N 的月淋失量，即地下水 NO₃-N 月输入量与施氮量和施肥时间也有较强的对应关系，见图 12。从图中可以看出，4 月份施肥后，4、5、6 月份土壤中 NO₃-N 的淋失量在不断增加，6 月份再施肥时，该月的 NO₃-N 淋失量达到了较高点。尤其是 8 月份，玉米追肥，又恰逢雨季，是 NO₃-N 淋失最严重的月份。

3 结论

1) 土壤 NO₃-N 含量受施肥、灌溉及降雨影响大，垂直变化明显，0 ~ 20 cm 土层 NO₃-N 含量最大；土壤 NH₄⁺-N 含量比较低，随深度增加而降低，60 cm 以下垂直变化不明显。

2) 应用 Hydrus-1d 模型对小麦、玉米季土壤含水率和 NO₃-N 含量模拟分析，表明小麦单季施肥量超过 380 kg/hm² 时，小麦季末 130 ~ 160 cm 土壤 NO₃-N 含量会超过 10 mg/kg；玉米季单季施肥量超过 290 kg/hm² 时，季末 130 ~ 160 cm 土壤 NO₃-N 含量会超过 10 mg/kg，NO₃-N 淋失风险严重。

3) 根据地下水 NO₃-N 月累积量估算模型，分别得到包气带土壤对地下水 NO₃-N 月累积量。表明 6 月份和 8 月份地下水中 NO₃-N 月累积量最高，分别为 7.20、7.67 mg/L，小麦季淋失到地下水 NO₃-N 量大于玉米季。

参考文献：

- [1] 浮海梅, 金云霄. 浅谈地下水硝酸盐污染[J]. 地下水, 2009, 31(3): 85-87
- [2] 曹巧红, 龚元石. 应用 Hydrus-1d 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 139-145
- [3] 马军花, 任理. 冬小麦生育期农田尺度下土壤硝态氮淋失动态的数值模拟[J]. 生态学报, 2004, 10(24): 2 291-2 298
- [4] 毕经纬, 张佳宝, 陈效民, 朱安宁, 冯杰. 应用 Hydrus-1d 模型模拟农田土壤水渗漏及硝态氮淋失特征[J]. 农业生态环境, 2004, 20(2): 28-32
- [5] 廖凯华. 大沽河流域土壤水资源评价及农业节水灌溉模式研究[D]. 山东青岛: 青岛大学, 2009
- [6] 孙传范, 戴廷波, 曹卫星. 不同施氮水平下增铵营养对小麦生长和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 33-38
- [7] Wang Y, Mi GH, Chen FJ, Zhang JH, Zhang FS. Response of root morphology to nitrate supply and its contribution to nitrogen uptake in maize[J]. Journal of Plant Nutrition, 2004, 27: 2 189-2 202
- [8] Šimůnek J M, Sejna T, van Genuchten M Th. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the One-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media[M]. Version 3.0. Riverside, CA, 2005
- [9] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield[M]. New York: John Wiley and Sons, 1978
- [10] 曹巧红. 随机降雨/天气变化条件下冬小麦-夏玉米农田氮淋失特征模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2002
- [11] Hoffman GJ, Van Genuchten MTh. Soil properties and efficient water use: Limitations and efficient water use in crop production[A]//Taylor, HM, Jordan WR, Sinclair TR. Water management for salinity control[C]. Madison, WI: Am. Soc. of Agron., 1983: 73-85
- [12] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3 661-3 669
- [13] 薛滨, 姚书春, 王苏民, 夏威夷. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 122-127
- [14] Vyn T J, Janovicek K J, Murry H. Soil nitrate accumulation and corn response to preceding small-grain fertilization and cover crops[J]. Agronomy Journal, 1999, 91: 17-24
- [15] 石福臣, 李瑞利, 王绍强, Sasa Kaichiro. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1 425-1 431
- [16] 段磊. 关于盆地地下环境氮污染机理与地下水水质安全评价[D]. 西安: 长安大学, 2010

Dynamic Characteristic and Numerical Simulation of Nitrate Nitrogen in Soil-Groundwater System at Field Scale

WANG Zhi-min¹, LIN Qing¹, WANG Song-lu², XU Shao-hui^{1*}

(1 Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;

2 Hydrological Bureau of Pingdu, Qingdao, Shandong 266700, China)

Abstract: Taking the farmland with summer corn and winter wheat rotation in Dagou River downstream of Qingdao as the study object, the dynamic characteristics of nitrate nitrogen in soil at different depths and groundwater in the rotation period were revealed through field experiment and lab analysis. The impacts of fertilization and irrigation on nitrate in soil and groundwater were explored and the nitrate pollution process in soil and groundwater based on the theory of soil water dynamics and solute transport was numerically simulated. Nitrate content exceeded 10 mg/kg at the depth of 130 – 160 cm at the end of the season, when the nitrogen rates reached N 380 kg/hm² in wheat season and 290 kg/hm² in corn season. A monthly cumulative model of nitrate in groundwater was established. Results showed that monthly cumulant of groundwater nitrate was higher in June and August with the values of 7.20 mg/L and 7.67 mg/L respectively.

Key words: Soil; Groundwater; Nitrate nitrogen; Hydrus-1d model; Nitrogen leaching