

高产粮区不同施肥模式下玉米季农田氮素损失途径分析

林立^{1,2}, 胡克林^{2*}, 李光德¹, 王欢元²

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271017; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100193)

摘要: 研究不同施肥模式下土壤氮素损失的途径, 有助于制定合理的施肥措施. 2009 年在山东桓台典型高产粮区设置了 4 种施肥模式: 对照 (CK)、农民习惯 (FP)、优化施肥 (OPT) 和控释肥 (CRF), 监测了土壤水氮动态和作物生长状况, 采用水氮管理模型 (WNMM) 模拟了不同施肥模式下玉米季土壤的水分动态和氮素去向. 2009 年夏玉米季 3 个施肥处理的氮素淋失量占施肥量的比例范围为 6% ~ 18%, 平均为 12.7%, 其中优化施肥处理的氮素淋失量最低, 仅为 14.5 kg·hm⁻². 氮挥发量所占的比例范围为 5% ~ 34%, 平均为 20.7%, 其中控释肥处理的氮挥发量最低, 仅为 7.6 kg·hm⁻². 4 个处理的氮素总损失量顺序为: FP 处理 > OPT 处理 > CRF 处理 ≈ CK 处理. 本研究表明在保证作物产量的前提下, 优化施肥和施用缓控释肥均可以有效减少氮素损失, 提高氮肥利用效率和保护生态环境.

关键词: 夏玉米; 不同施肥模式; 水氮管理模型; 氮素淋失; 气体损失

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2617-08

Evaluation of Nitrogen Loss Way in Summer Maize System Under Different Fertilizer N Managements

LIN Li^{1,2}, HU Ke-lin², LI Guang-de¹, WANG Huan-yuan²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Shandong Agricultural University, Taian 271017, China; 2. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate nitrogen (N) loss from soil-crop systems under different fertilizer N managements, and to provide some suggestions on optimizing fertilizer management practices. The experiment was carried in high yield production area of Hantai county in Shandong province in 2009. Four kinds of fertilizer N application practices were designed, including CK, farmer practice (FP), optimizing fertilizer application (OPT) and controlled release fertilizer (CRT) for studying the fate of N during the maize growth season in 2009. The water and nitrogen management model (WNMM) was used to simulate the dynamics of soil water and N fate. The results indicated that the ratio of nitrate leaching and NH₃ volatilization accounting of fertilizer N ranged from 6% to 18% and 5% to 34%, and their means were 12.7% and 20.7%, respectively. The amount of N leaching under OPT was 14.5 kg·hm⁻², was the lowest in all treatments. The amount of NH₃ volatilization under CRT was 7.6 kg·hm⁻², respectively, was the lowest in all treatments. The order of total N loss under four treatments followed as: FP > OPT > CRF ≈ CK. Both OPT and CRT treatments are the best management practices considering their high grain yield, water and nitrogen use efficiencies, and environmental protection.

Key words: summer maize; different fertilizer treatments; water and nitrogen management model; nitrate leaching; gaseous emission

华北平原是我国粮食的主要产区之一, 近年来由于氮肥的大量投入, 粮食产量迅速增长, 但也造成了大气、水体污染等环境问题^[1], 引起众多的关注. 有研究表明, 我国农田施用的氮肥中, 大约有 35% 的氮以气体形式损失到大气中, 通过农田径流和淋洗进入水体的氮量分别占施氮量的 8.5% ~ 28.7%^[2]. 在我国北方集约化粮区, 有关地下水硝酸盐污染问题已引起了广泛关注, 并且成为了当地主要的生态环境问题^[3]. 在我国华北高产粮区的研究均表明化肥使用量与浅层地下水硝酸盐浓度的升高显著相关^[3~5]. 大多数研究都表明将目前的施肥量减少约 1/3, 不仅产量不下降, 而且可以大大减少硝

酸盐的淋失^[6~9]. 一些学者在华北平原开展了不同施肥方法和肥料种类下氮素气体损失的研究. 发现采用氮肥深施覆土、施肥后立即灌水、有机肥配施氮肥或者控释肥等措施均可大大减少氮挥发损失^[10~14].

由于田间情况复杂多变, 如土壤类型、气候和田间管理措施的不同对硝酸盐淋失和氮素气体损失

收稿日期: 2010-10-01; 修订日期: 2011-01-06

基金项目: 公益性行业 (农业) 科技专项 (200803036); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2009CB118607); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-07-0809)

作者简介: 林立 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态学, E-mail: linli511@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hukel@cau.edu.cn

均有显著影响,因此采用田间试验的方法来研究不仅费时费力,而且结果的精度不高.近年来,国内外广泛采用计算机模型来模拟研究农田氮素淋失和气体损失,相关的研究可参考文献[15,16],所采用的模型主要有 NLEAP、LEACHM、DNDC、APSIM、DAISY、RZWQM 和 DSSAT 等.由于我国北方集约化粮区水肥投入量很高,这些模型均不能很好地解决该问题.最近针对我国国情研发的水氮管理模型(WNMM)^[17],已经在我国的华北地区和南方红壤地区进行了很好的验证和应用^[6,8,18].

虽然目前我国对农田氮素损失途径及影响因素的研究已有一些报道,但采用数学模型量化不同施肥模式下硝酸盐淋失量及氨挥发损失的研究报道较少.本研究以农业面源污染风险极高的华北高产粮区为对象,通过大田试验,采用水氮管理模型(WNMM)分析了4种施肥模式下玉米季(雨季)农田氮素损失的途径,旨在为制定提高肥

料利用效率、减少环境污染的施肥措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验在山东省桓台县中国农业大学试验站进行,该站位于东经117°50′~118°10′,北纬36°54′~37°04′,平均海拔6.5~29.5 m,属于暖温带大陆型季风气候,年均日照时数2 833 h,年平均气温11.8~12.9℃,多年年均降水量600 mm,主要集中在6~8月,平均无霜期为198 d.该区冬小麦和夏玉米的平均产量分别为7.5 t和8.5 t·hm⁻²,是典型的冬小麦-夏玉米高产轮作区.灌溉水来源于地下水,采用大水漫灌;作物秸秆基本用来还田.表层土壤基本肥力性状如下:有机质13.9 g·kg⁻¹,碱解氮48 mg·kg⁻¹,速效磷38 mg·kg⁻¹,速效钾86 mg·kg⁻¹.土壤剖面基本物理性质及水力学参数见表1.

表1 土壤剖面基本物理性质及水力学参数

Table 1 Basic soil physical properties and hydraulic parameters in soil profile										
土壤层次 /cm	粒径组成/%			土壤质 地 ¹⁾	容重 /g·cm ⁻³	pH	θ_{wp} /cm ³ ·cm ⁻³	θ_s /cm ³ ·cm ⁻³	FC /cm ³ ·cm ⁻³	K_s /cm·d ⁻¹
	砂粒	粉粒	黏粒							
0~20	36.0	52.6	11.4	粉壤	1.45	8.0	0.074	0.453	0.290	22.8
20~40	31.4	47.8	20.8	壤土	1.64	8.5	0.071	0.381	0.300	3.3
40~110	10.6	56.8	32.6	粉壤	1.43	9.1	0.070	0.460	0.310	14.7
110~170	19.8	47.6	32.6	壤土	1.55	9.1	0.141	0.415	0.320	14.7
170~200	18.9	46.4	34.7	黏壤土	1.65	8.8	0.170	0.377	0.320	14.7

1) 土壤质地分类采用美国制; θ_{wp} 为作物萎蔫点; θ_s 为土壤饱和含水量; FC 为田间持水量; K_s 为土壤饱和导水率

1.2 试验设计

试验设置了4个处理:对照(不施氮,CK)、农民习惯(FP)、优化施肥(OPT)和控释肥(CRF),每个处理3次重复,试验采用随机区组设计.FP施肥量为330 kg·hm⁻²,考虑到作物的实际需要量,OPT比FP施用量减少了30%,为240 kg·hm⁻²,CRF比OPT施用量又减少了30%,为168 kg·hm⁻².FP和OPT处理施用尿素(含N 46.7%),基追比均为1:1,追肥在降雨前撒施.控释肥采用以尿素和添加剂为原料的自制包膜控释肥,基施.各处理P、K投入一致,磷肥(重过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)均在播种前作为基肥一次性撒施110 kg·hm⁻².作物灌溉采取畦灌.玉米品种选用华丰16号,于2009年6月20日播种,播种量为37.5 kg·hm⁻²,行株距为50 cm和100 cm.6月21日沟施底肥,6月25日出苗,6月30日拔节期灌水60 mm,8月6日大喇叭口期追肥,由于夏季雨水较多,故未设置不同灌溉处理.

1.3 测定项目和方法

试验前开挖土壤剖面,按照土壤发生层取样,参照文献[19]分别测定了土壤容重:采用环刀法;土壤质地:采用吸管法;pH值:水土比2.5:1,酸度计测定;有机质:重铬酸钾容量法;全氮:半微量开氏法;速效钾:NH₄OAc浸提-火焰光度法;速效磷:NaCO₃浸提-钼锑抗比色法.

在各个试验小区,土壤水分用TDR(Trime-IPH)每7 d测定一次,测定深度为0~180 cm,每20 cm一层,共9层.分别在作物播种、拔节期、吐丝和收获时取土测定土壤无机氮含量,用土钻以20 cm为间隔一直取到180 cm深度,每个小区取2钻,同层次的土样混合成一个样.土样用1.0 mol·L⁻¹的KCl溶液浸提(水土比10:1),用流动分析仪(TRAACS2000)测定NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的浓度.在作物关键生育期各取1 m²的植物样分别测定叶面积指数(LAI)和干物重.夏玉米收获时每个小区取16 m²的样方测产.

1.4 模型简介及输入参数

本研究采用了水氮管理模型(WNMM)来定量模拟土壤水氮运移的各个过程.该模型可以用来模拟土壤水分运动及碳氮循环的关键过程,包括冠层截流、土壤蒸发和作物蒸腾、水分动态、土壤温度、N 素迁移与转化、累积生物量、LAI 和作物吸氮以及农田管理措施(如灌溉、施肥及耕作)等的影响.在模型中,采用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量.土壤剖面含水量动态和水流通量采用水量平衡模型来模拟;根系吸水采用 van Genuchten 模型.土壤温度用 Arnold 等的经验方程来估算.硝态氮和铵态氮的运移及作物生长模块,均采用 EPIC 模型方法来进行模拟.根据逐日能量累积计算作物的生长发育期、用收获指数计算籽粒产量,应用 Monteith 方法计算作物潜在生物量,并根据根区土壤水分、氮素和温度进行校正,其基本原理详见文献[17].

初始条件:本模型需要的初始含水量、初始无机氮浓度、阳离子交换量、有机质等均由各处理作物种植前的实测值来给定.

边界条件:上边界设定为潜在土面蒸发或水分入渗边界^[17].由于本试验点地下水埋深为 18~20m,故下边界设为自由排水边界.

气象数据:包括太阳辐射、最低温、最高温、风速、湿度、降雨等都来自本试验点的自动气象站.

水力学参数:包括土壤各层的萎蔫含水量、田间持水量、饱和含水量、饱和导水率等,见表 1.

碳氮转换参数:氮矿化、固持、氮挥发和反硝化等的速率常数参考文献[6,18]在华北平原的研究结果.

作物参数:夏玉米最大株高为 2.5 m,最大根深为 1.6 m.夏玉米生长的最佳和下限温度分别设定为 25℃和 8℃;生育期的有效积温为 1700℃;冠层光合有效辐射为 $0.50 \text{ J} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$.在发芽期、半熟期和成熟期的植株全氮含量分别设定为:0.025、0.02 和 $0.014 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$.最大 LAI 为 6.0,收获时 LAI 根据实际测定值设定,收获指数为 0.49.认为作物根系吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的比例相同,均为 0.50.

2 结果与分析

2.1 模型校验

本研究采用 WNMM 模型模拟桓台地区夏玉米生育期田间土壤水氮的运移过程,土体下边界设在 1.8 m 处,计算时间从 6 月 20 日~9 月 28 日.利用 2009 年农民习惯处理(FP)的田间实测数据校准模

型水分运动及氮素迁移转化参数,用其它 3 个处理(CK、OPT 和 CRF)的数据来验证模型,实测数据均采用 3 次重复.本研究仅给出了 OPT 处理的水分和硝态氮的模拟结果(图 1、2).夏玉米叶面积指数、干物质重及作物吸氮的模拟结果见图 3~5.模型验证结果表明,土壤水分的模拟值与实测值比较吻合,结果令人满意,土壤剖面硝态氮浓度的模拟值与实测值具有较好的一致性.作物生物学指标的模拟结果也令人满意.因此,该模型可以用来分析本地区的土壤水分动态及氮素去向.

2.1.1 土壤水分的模拟

由图 1 可以看出,OPT 处理下不同土层的含水量动态变化基本一致,土壤含水量在 60 cm 以上土层变化比较剧烈,随着深度的增加(120 cm 以下)而变化比较平缓,这与根系主要分在 0~1 m 土层有关.在玉米生育前期(出苗期-拔节期),恰逢雨季降水丰富,约占全年降水量的 46.1%,不同深度的土壤含水量都有显著提高.另外,在 6 月 30 日灌溉 60 mm,8 月 16~26 日总降水 48.1 mm,模拟的表层土壤含水量分别在对应时间或时间段出现了峰值或峰值波动,说明模拟结果符合实际情况.由于本研究没有设置不同灌溉处理,其他处理的水分模拟结果表现出同样的变化规律.

2.1.2 土壤硝态氮的模拟

2009 年夏玉米各处理在 6 月 21 日沟施基肥,模拟的各施肥处理表层土壤硝态氮浓度在对应时间均出现了峰值.如 OPT 处理(图 2),随着尿素水解并转化成硝态氮,6 月 29 日在表层出现峰值,OPT 处理和 CRF 处理的表层土壤硝态氮浓度峰值均在 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右;FP 处理的峰值为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,这可能与缓控释肥和 FP 处理施肥量大有关.6 月 30 日漫灌后,氮素随着土壤水分逐渐渗入到下层,大约 10 d 后在 1 m 处出现峰值.另外,FP 和 OPT 处理在 8 月 6 日进行了追肥,在对应时间内,模拟的表层土壤硝态氮浓度也出现了峰值,但相对于基施,峰值明显降低,这与后期作物吸氮量大的实际情况是相符的.

2009 年夏玉米生育前期(7 月),由于雨季降水丰富(见前面含水量分析),高强度的降雨必然导致部分硝态氮转移累积至深层土壤中,在对应的时间内,模拟的深层土壤硝态氮浓度明显提高.这与在其他地区研究得到的降雨量和硝酸盐淋失量呈显著线性相关的结果是比较吻合的^[20].

2.1.3 作物生长发育指标及产量的模拟

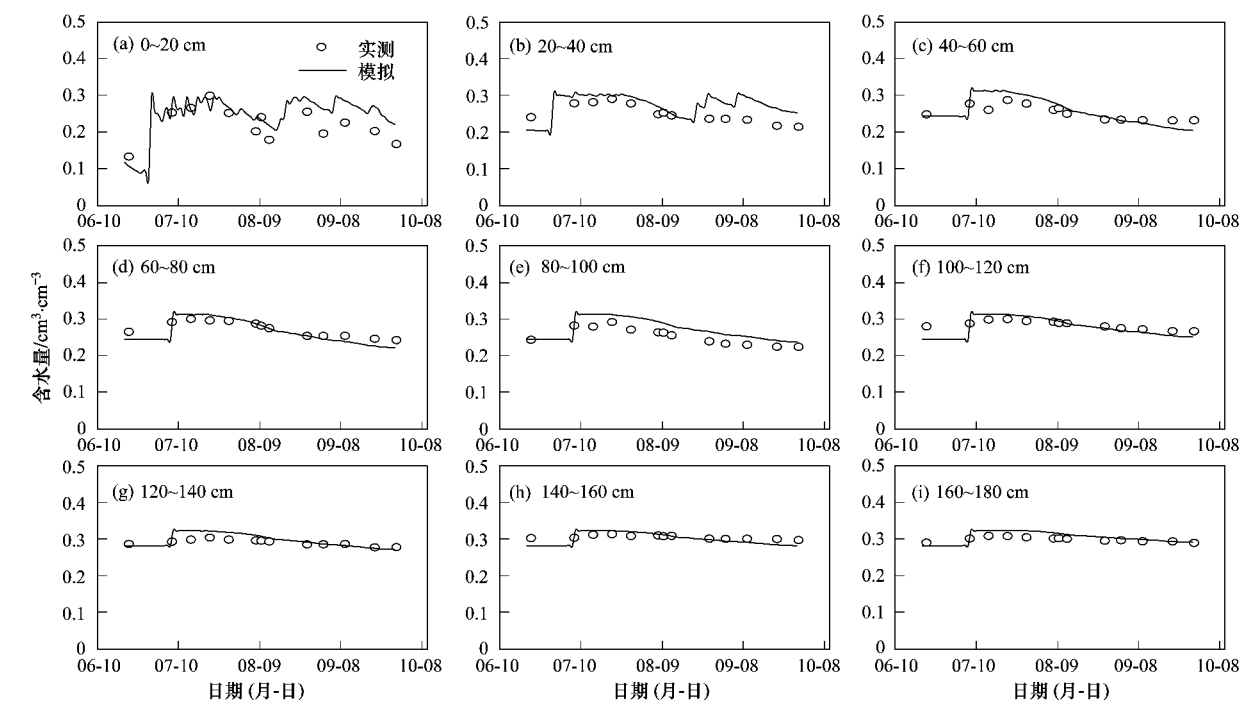


图 1 OPT 处理土壤剖面含水量模拟值与实测值的比较

Fig. 1 Comparison of simulated and measured soil volumetric water content under the OPT treatment

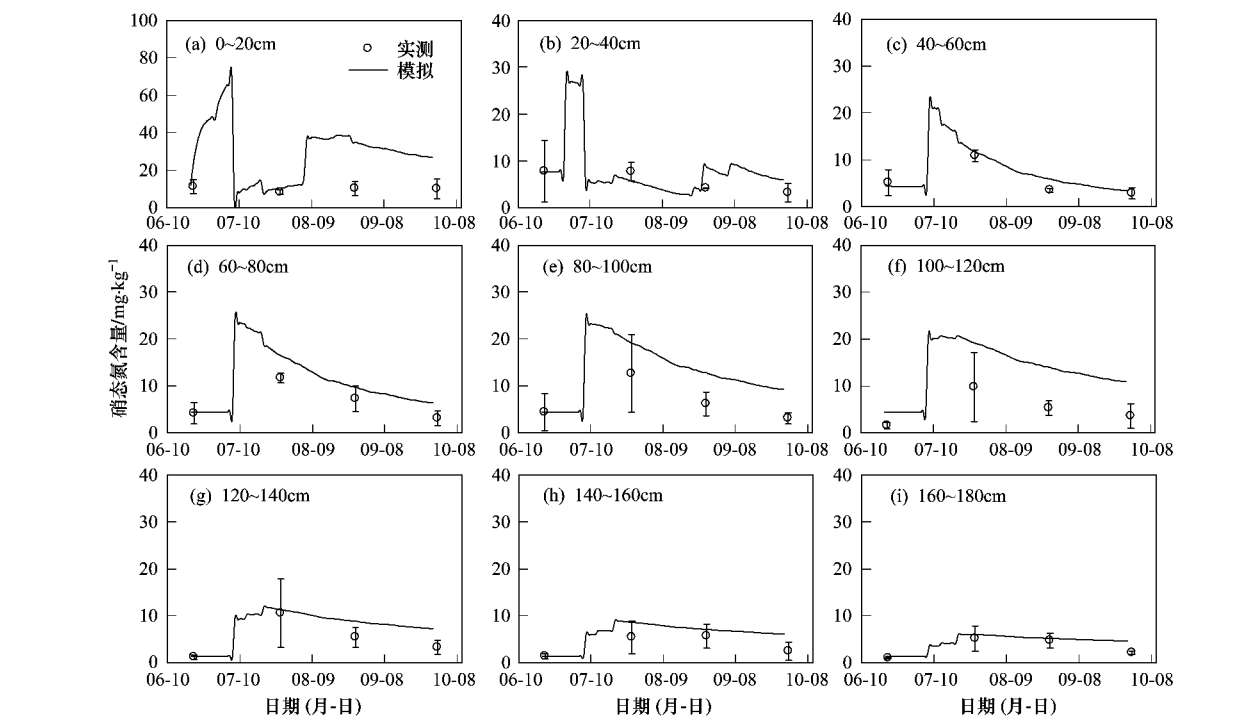


图 2 OPT 处理土壤剖面硝态氮含量模拟值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of simulated and measured NO_3^- -N content under the OPT treatment

从图 3 可以看出,夏玉米 LAI 先随着生育进程的推移而增大,到 8 月下旬达到最大值,然后 LAI 开始下降。除 CK 处理 LAI 较低,最大值仅为 3.09 外,其他处理 LAI 差异不明显,最大值在 4.0 ~ 4.2 之间。4 个不同肥料处理的 LAI 的模拟值与实测值趋势基本一致,结果均比较理想。

作物吸氮与地上部干物重的变化趋势基本一致(图 4、5),均随着生育进程的推移呈增加的趋势. CK 处理的作物吸氮量和地上部总干物重要明显低于其它施肥处理. 作物吸氮量图中最后一个点下落很快,可能是由于在作物生长后期植株本身的氮挥发损失导致的^[21],而本模型没有考虑植株氮的损失.

从产量模拟结果来看,各处理的模拟产量与实测产量的相关系数为 0.994 2 ($y = 0.843\,2\,x + 1\,086.1, R^2 = 0.988\,4$),达到了极显著水平 ($P < 0.01, n = 12$),模拟结果也令人满意.

2.2 不同施肥模式下农田氮素损失途径

2.2.1 土壤水分渗漏和硝酸盐淋失动态

图 6 为模型模拟得到的 3 个施肥处理 (FP、OPT、CRF) 下 1.8 m 土体的水分渗漏和硝酸盐淋失情况. 由图 6 可知,水分渗漏主要发生在降雨期,除

了土壤初始含水量差异导致的 3 个处理第一次水分渗漏量差别较大外,其余 2 次的水分渗漏量差别不大.

由于土壤初始含水量较低,6 月 30 日的灌溉并未引发土壤水分的深层渗漏. 进入 7 月雨季后,3 次大的降雨均导致了较严重的水分渗漏. 第 1 次大的降雨由于处于作物生育前期,作物需水量相对较小,另外距离灌溉时间也短,因此导致了较强的水分渗漏,FP、OPT 和 CRF 这 3 个处理的该次水分渗漏量分别占整个生育期总渗漏量的 48.0%、31.7% 和 47.1%. OPT 处理的渗漏量比其他 2 个处理低的原因可能与剖面的初始含水量低有关. 第 2 次降雨由于降雨量远远低于第 1 次,水分渗漏量也大大降低;第 3 次降雨处于作物生长旺盛期,作物需水量也大,但由于连续的降雨,故导致了水分渗漏量也较大.

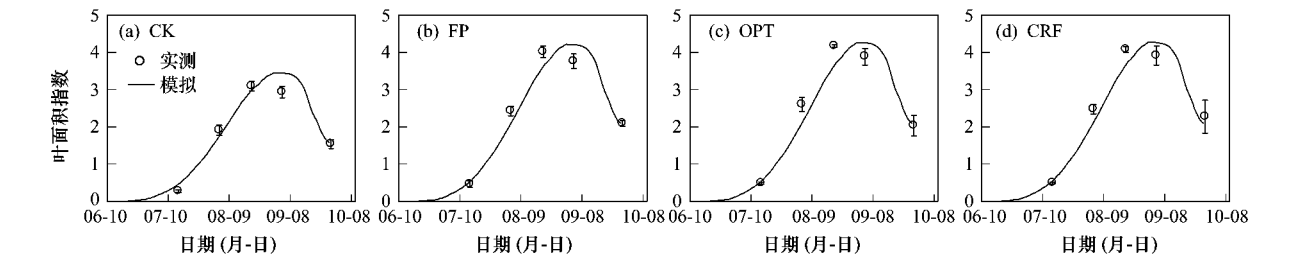


图 3 不同处理下叶面积指数的模拟值与实测值的比较
Fig. 3 Comparison of simulated and measured leaf area index (LAI) under different fertilizer treatments

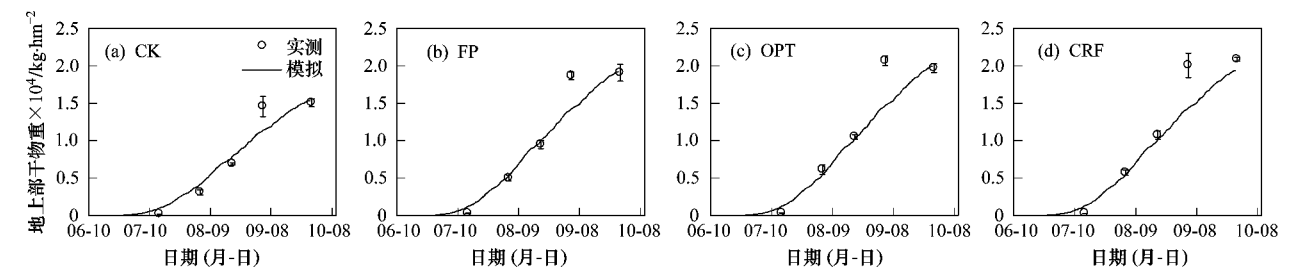


图 4 不同处理下作物地上部干物重的模拟值与实测值的比较
Fig. 4 Comparison of simulated and measured total dry matter under different fertilizer treatments

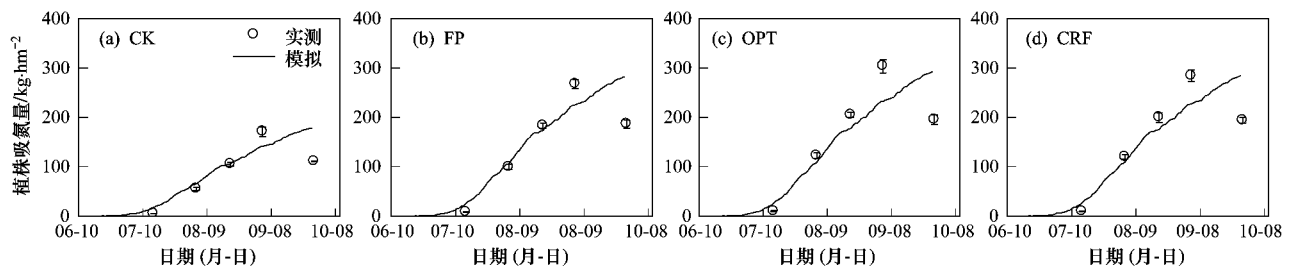


图 5 不同处理下作物吸氮的模拟值与实测值的比较
Fig. 5 Comparison of simulated and measured crop nitrogen uptake under different fertilizer treatments

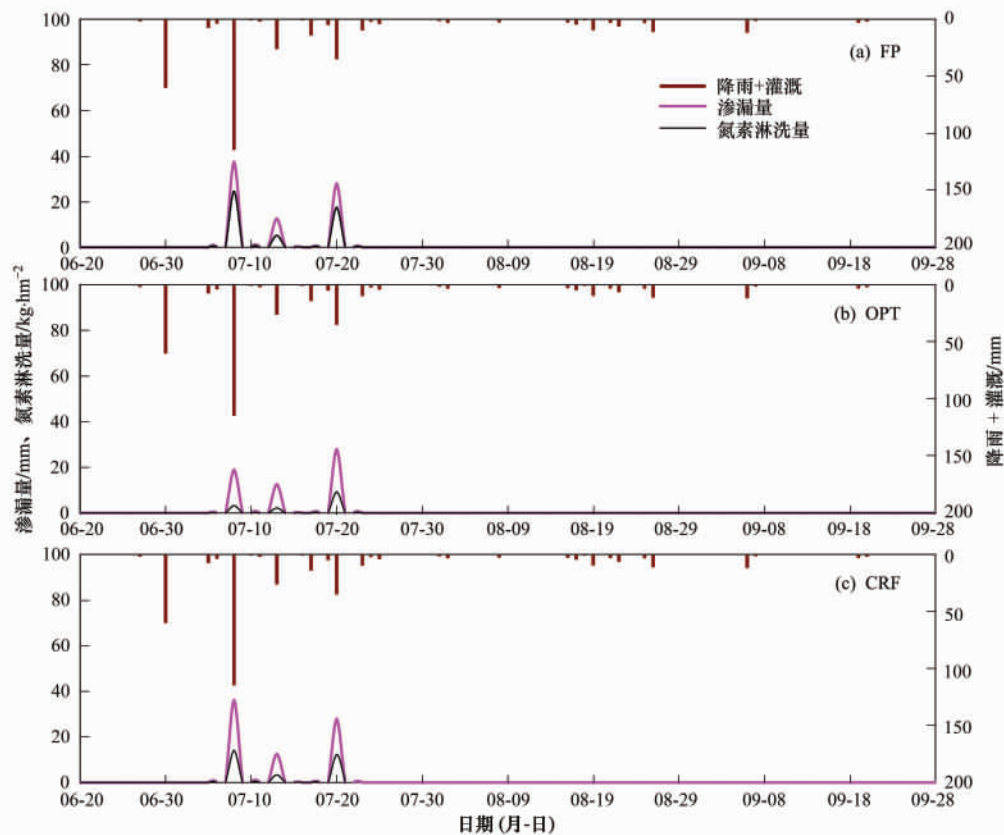


图 6 FP、OPT 和 CRF 处理下边界土壤水分渗漏量及硝酸盐淋失量变化曲线

Fig.6 Dynamics of water drainage and nitrate leaching under the FP, OPT and CRF treatments

硝酸盐淋失过程及数量与水分渗漏过程表现出相同的趋势,由于氮素淋失量与水分渗漏量成正相关^[8],第1次和第3次较大的水分渗漏导致了氮素淋失量也较高,OPT、CRF 和 FP 处理的这2次淋失量分别占整个生育期总淋失量的比例为88.9%、85.1%和88.5%。另外,氮素淋失量与施肥量密切相关,FP 处理施肥量最高,淋失量也最高。

2.2.2 农田水分平衡分析

各处理农田水分平衡的结果见表2。水分损失的主要途径是蒸散,4个处理的蒸散量差别不大,范围为285~288 mm,除CK处理的水分渗漏量为103 mm,其余3个处理的水分渗漏量差别不大,分别为78、59和77 mm,渗漏比例分别达到了18.9%、

14.3%和18.6%。各处理的土体水储量在作物收获时都是正的,这与玉米生育期处于雨季有关。CK处理的水分利用率最低,仅为1.69 kg·m⁻³,这是与CK处理未施氮肥,作物产量远低于其它处理有关。各施肥处理的水分利用率表现为:FP处理<CRF处理<OPT处理。

2.2.3 农田氮素损失分析

4个处理的氮素损失结果见表3。由于CK处理未施氮肥,作物长势不好,对氮素的吸收及作物产量显著低于其它施肥处理(表3)。由于FP处理施肥量最高,故其氮素淋失量最高。OPT处理的氮素淋失量最低,主要与该处理的水分渗漏量和施肥量均较低有关。CK处理的氮素淋失量达到35.9 kg·hm⁻²,甚

表 2 各处理下 1.8m 土体的水分平衡¹⁾
Table 2 Water balance in 1.8 m soil profile for different fertilizer treatments

处理	降水/mm	灌溉/mm	蒸散/mm	渗漏/mm	平衡/mm	产量/kg·hm ⁻²	水分利用率/kg·m ⁻³
CK	352	60	285	103 (25.0%)	24	6 547	1.69
FP	352	60	285	78 (18.9%)	49	8 342	2.30
OPT	352	60	286	59 (14.3%)	67	8 595	2.49
CRF	352	60	288	77 (18.6%)	47	8 632	2.36

1) 括号内的数字表示渗漏比(水分渗漏/水分总输入);水分利用效率=产量/(蒸腾+渗漏)

表 3 不同施肥模式下的作物产量及氮素损失¹⁾/kg·hm⁻²
Table 3 Crop yield and nitrogen loss under different fertilizer treatments/kg·hm⁻²

处理	施氮量	实测产量	作物吸收	氮淋失量	氮挥发	反硝化	总损失
CK	0	6 547a	178a	35.9	2.0	0.64	38.5
FP	330	8 342b	282b	47.4 (14%)	111.2 (34%)	2.37	161.0 (49%)
OPT	240	8 595b	283b	14.5 (6%)	55.9 (23%)	1.87	72.3 (30%)
CRF	168	8 632b	284b	29.7 (18%)	7.6 (5%)	1.03	38.3 (23%)

1) 数字后面的字母表示差异显著性; 括号内的数值表示该项占施肥量的比例

至高于施肥的 OPT 和 CRF 处理,这主要与上季作物收获后土壤剖面的残留氮较高(145 kg·hm⁻²)有关,另外有研究表明不施氮肥处理的氮矿化量要远高于施氮肥处理^[16],这可能是其淋失量高的原因.4 个处理的氮素淋失量顺序为:FP 处理 > CK 处理 > CRF 处理 > OPT 处理.3 个施肥处理的氮素淋失量占施肥量的比例范围为 6% ~ 18%.

4 个处理的反硝化损失数量均不大,范围为 0.64 ~ 2.37 kg·hm⁻²,所占施肥量的比例均低于 1%.4 个处理的氮挥发量顺序为:FP 处理 > OPT 处理 > CRF 处理 > CK 处理.其中 FP 处理的氮挥发量达到 111.2 kg·hm⁻²,约为 OPT 处理的 2 倍,其氮挥发损失量占到施肥量的 34%.OPT 处理的施肥量比 FP 处理少 90 kg·hm⁻²,而其氮挥发损失却减少了多达 60 kg·hm⁻².CRF 处理的氮挥发损失仅为 7.6 kg·hm⁻²,远远低于 FP 和 OPT 处理,甚至与 CK 处理差不多,说明肥料种类对于减少氮挥发损失具有十分重要的作用.3 个施肥处理的氮挥发量占施肥量的比例范围为 5% ~ 34%.

由于不同施肥模式下的氮素淋失量与气体损失的规律不一样,因此计算了其总损失.从表 3 可知,FP 处理的总损失量最大,为 161.0 kg·hm⁻²,约占施肥量的 49%,CRF 处理的总损失量最小,为 38.3 kg·hm⁻²,约占施肥量的 23%.4 个处理的氮素总损失量顺序为:FP 处理 > OPT 处理 > CRF 处理 ≈ CK 处理.

3 讨论

旱地农田氮素损失的主要途径是硝态氮淋失和氮挥发损失^[11,12].大量的研究表明,降雨、灌水量、灌溉方式、施肥量、施肥方式及种植制度等均是水分渗漏和硝酸盐淋失的主要因素^[22,23].本研究仅仅考虑了肥料管理的不同,发现水分渗漏和硝酸盐淋失也主要发生在灌溉或高强度降雨后,这与已有的一些研究报道是一致的.

施肥量与氮素淋失量密切相关,有研究指出农民习惯的水氮投入如果能减少 30% ~ 60%,氮素淋

失损失最大能减少一半左右^[24].优化的氮肥管理可以显著减少氮素淋失^[6~9],特别是考虑作物需求的氮肥管理有助于提高氮肥利用效率和减少氮素淋失损失^[25].本研究发现优化施肥处理下的硝酸盐淋失量仅为 14.5 kg·hm⁻²,明显低于农民习惯处理的 47.4 kg·hm⁻²,再次证实了高施氮量必然导致高淋失量^[3~5,26].

控释肥可以有效减少农田氮挥发,有研究表明,控释肥的氮挥发速率上升缓慢,最大挥发高峰出现时间比普通肥处理晚 7 d,土壤氮挥发量比普通肥处理约减少 51.3% ~ 91.3%^[14].孙克君等^[13]采用“静态吸收法”在温室中研究了几种控释肥对氮挥发的影响效果,结果表明控释氮肥的氮挥发量显著低于普通尿素.本研究发现控释肥处理下的氮挥发量仅为 7.6 kg·hm⁻²,低于优化施肥处理的 55.9 kg·hm⁻²,并且远远低于农民习惯处理的 111.2 kg·hm⁻².主要原因是普通肥料施入土壤后,很快与土壤水结合进行水解,以较快的速度形成很高的氨分压,而且本试验地土壤偏碱性,导致初期就有大量氮挥发出来;控释肥则不同,它的包膜材料具有疏水性,可有效地减缓膜内尿素溶出过程所需水分的运移补充,在高施氮条件下仍具有很强的控释效果,施入后不会很快释放大 量氮,显著降低了氮挥发速率^[14].

本研究发现不同施肥模式下的氮素淋失量与气体损失的规律不一样,气体损失表现为:FP 处理 > OPT 处理 > CRF 处理 > CK 处理,而氮素淋失量表现为:FP 处理 > CK 处理 > CRF 处理 > OPT 处理.其中 CK 处理的氮素淋失量高于 CRF 和 OPT 处理的主要原因是作物长势不好,对氮素的吸收能力也较弱,导致了作物产量和吸氮量显著低于其他 3 个处理,因此,其以前累积在土体剖面中的硝酸盐大部分被淋洗掉了.CRF 处理的淋失量大于 OPT 处理的可能原因是与水分渗漏量有关,前者的水分渗漏量是后者的 1.3 倍.由于影响农田氮素损失的因素十分复杂,不同种类的肥料进入土壤后,在各种外界环境的作用下,它们的迁移转化规律及其对氮素损失的影响还需要深入研究.

4 结 论

(1)WNMM 模型校验结果表明模拟的土壤各层含水量、无机氮浓度、作物干物重、叶面积指数和产量都与实测值吻合得很好,说明该模型可以用来量化评价不同施肥模式下的农田氮素损失途径.

(2)2009 年模型模拟结果表明旱地农田的硝态氮淋失和氨挥发损失与肥料种类及施氮量均密切相关.4 个处理的氮素总损失量大小顺序为:FP 处理 > OPT 处理 > CRF 处理 ≈ CK 处理.优化施肥处理下的氮素淋失量为 $14.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,低于控释肥处理的 $29.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远低于农民习惯处理的 $47.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.控释肥处理下的氮素总损失量为 $38.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,为 4 个处理中最低,其氨挥发量仅为 $7.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,低于优化施肥处理的 $55.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远远低于农民习惯处理的 $111.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.因此,优化施肥和控释肥在保证作物产量的前提下,不仅可以有效减少农田硝态氮淋失和氨挥发损失,节约资源,提高水氮利用效率,而且可以很好地保护环境,有助于我国农业的可持续发展.

致谢:感谢山东农业科学院土壤肥料研究所江丽华、徐钰博士提供了本研究的部分试验数据.

参考文献:

[1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.

[2] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63: 117-127.

[3] 陈淑峰,李帷,胡克林,等. 基于 GIS 的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征[J]. 环境科学,2009,30(12):3541-3547.

[4] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报,2006,43(3):406-413.

[5] 杜连凤,赵同科,张成军,等. 京郊地区 3 种典型农田系统硝酸盐污染现状调查[J]. 中国农业科学,2009,42(8):2837-2843.

[6] 李晓鹏,张佳宝,朱安宁,等. 基于 WNMM 模型的潮土地区农田水氮优化管理[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(1):62-68.

[7] Mack U D, Feger K H, Gong Y S, *et al.* Soil water balance and nitrate leaching in winter wheat-summer maize double-cropping systems with different irrigation and N fertilization in the North China Plain [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(4): 454-460.

[8] Hu K L, Li Y, Chen W P, *et al.* Modeling nitrate leaching and optimizing water and nitrogen management under irrigated maize in desert oasis in Northwestern China [J]. Journal of

Environmental Quality, 2010, 39(2): 667-677.

[9] Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, *et al.* Nitrate leaching in an irrigated wheat-maize rotation field in the North China Plain [J]. Pedosphere, 2005, 15(2):196-203.

[10] 李贵树,李保国,陈德立. 利用 Bowen 比仪测定大面积农田土壤氨挥发的方法研究[J]. 中国农业大学学报,2001,6(5):56-62.

[11] 张玉铭,胡春胜,董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3):417-419.

[12] 李宗新,董树亭,王空军,等. 不同肥料运筹对夏玉米田间土壤氮素淋溶与挥发影响的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(6):998-1005.

[13] 孙克君,毛小云,卢启明,等. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2347-2350.

[14] 赵斌,董树亭,王空军,等. 控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(11):2678-2684.

[15] Shaffer M J, Ma L W, Hansen S. Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management [M]. Lewis Publishers Boca Raton. FL. 2001.

[16] 朱兆良,张福锁等著. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M]. 北京:科学出版社,2010.339-400.

[17] Li Y, White R E, Chen D L, *et al.* A spatially referenced Water and Nitrogen Management Model (WNMM) for (irrigated) intensive cropping systems in the North China Plain [J]. Ecological Modelling, 2007, 203: 395-423.

[18] Sun B, Chen D L, Li Y, *et al.* Nitrogen leaching in an upland cropping system on an acid soil in subtropical China: lysimeter measurements and simulation [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81(3):291-303.

[19] 中国土壤学会化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社,1983.

[20] Wang H Y, Ju X T, Wei Y P, *et al.* Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10):1646-1654.

[21] 范仲学,王璞,梁振兴. 谷类作物的氮肥利用效率及其提高途径研究进展[J]. 山东农业科学,2001,4:47-50.

[22] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000,9(1):1-6.

[23] 李晓鹏,张佳宝,刘金涛,等. 天然文岩渠流域土壤水分渗漏和氮素淋失模拟[J]. 环境科学,2009,30(3):864-869.

[24] Fang Q X, Ma L W, Yu Q, *et al.* Modeling nitrogen and water management effects in a wheat-maize double-cropping system [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(6):2232-2242.

[25] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X, *et al.* On-farm evaluation of soil N_{min} test for summer maize fertilization in North China Plain [J]. Agronomy Journal,2008,100(3):1-9.

[26] 杨荣,苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J]. 生态学报,2009,3(29):1460-1468.