

交替灌溉条件下水氮耦合对土壤气态氮排放的影响

韩坤¹, 张纪涛¹, 上官宇先¹, 师日鹏¹, 李志军², 王林权^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘要:通过大田试验, 以密闭法与硼酸吸收法收集和测定土壤 NH_3 挥发量, 以密闭法收集和气相色谱法测定土壤 N_2O 释放量. 采用二元二次正交旋转组合设计, 研究交替灌溉施肥条件下的水氮数量耦合对 NH_3 挥发, N_2O 排放及夏玉米产量的影响, 并建立相应的数学模型. 交替灌溉施肥处理 NH_3 -N 挥发量为 $4.78 \sim 17.00 \text{ kg/hm}^2$, 氮挥发引起的氮肥损失率为 $1.89\% \sim 11.89\%$; N_2O -N 排放量为 $0.59 \sim 0.88 \text{ kg/hm}^2$, 氮肥损失率为 $0.01\% \sim 0.31\%$; 常规处理 NH_3 -N 和 N_2O -N 排放量分别为 19.55 kg/hm^2 和 1.29 kg/hm^2 , 其氮肥损失率分别为 8.27% 和 0.45% . 交替灌溉施肥处理的籽粒产量为 $4163.18 \sim 6942.00 \text{ kg/hm}^2$. 模拟结果表明, 气态氮 (NH_3 -N + N_2O -N) 最低释放量为 9.28 kg/hm^2 , 相应水氮配比为 $800.00 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (灌水量) 和 24.80 kg/hm^2 (施氮量). 最高籽粒产量为 6367.07 kg/hm^2 , 相应水氮配比为 $930.12 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (灌水量) 和 238.19 kg/hm^2 (施氮量). 气态氮释放量 $\leq 12.84 \text{ kg/hm}^2$ 的管理方案: 灌水量 $658.06 \sim 941.94 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 施氮量 $87.36 \sim 131.16 \text{ kg/hm}^2$. 籽粒产量 $\geq 4934.91 \text{ kg/hm}^2$ 的管理方案: 灌水量 $910.22 \sim 1134.20 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 施氮量 $215.89 \sim 270.78 \text{ kg/hm}^2$. 控制性交替灌溉施肥条件下, 气态氮损失较低和产量较高的灌水量范围为 $910.22 \sim 941.94 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 氮肥用量则无交集. 与常规灌溉施肥相比, 水肥异区交替灌溉施肥显著降低气态氮释放, 增加产量.

关键词:水氮耦合; 交替灌溉; 氮挥发; 氧化亚氮排放

中图分类号: X51; X275.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)06-1557-07

Effects of Water and Nitrogen Coupling on Soil Gaseous Nitrogen Emission Under Alternate Irrigation & N Placement

HAN Kun¹, ZHANG Ji-tao¹, SHANGGUAN Yu-xian¹, SHI Ri-peng¹, LI Zhi-jun², WANG Lin-quan¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: A field experiment was conducted by second-order central designed with composite orthogonal rotational matrix for two variables to investigate the effects of quantity coupling between water and N under AINP (alternate irrigation and N Placement) on soil NH_3 volatilization and N_2O emission and summer maize yield. The gaseous N was collected by open-bottomed chambers made from PVC in field. NH_3 was absorbed in the chamber with boric acid and then titrated with dilution H_2SO_4 in the lab. A 5mL sample of headspace air was taken at 2-4 d interval after fertilization and stored in evacuated glass vials with butyl rubber seals which were put in 4°C fridge until analysis. The N_2O concentration of each sample was measured by Varian 3800 gas chromatograph. The results indicated that total NH_3 -N volatilization accumulation of AINP were $4.78\text{--}17.00 \text{ kg/hm}^2$, and $1.89\%\text{--}11.89\%$ of applied N, while soil N_2O -N emission were $0.59\text{--}0.88 \text{ kg/hm}^2$, and $0.01\%\text{--}0.31\%$ of applied N. Total NH_3 -N volatilization and N_2O -N emission from conventional treatment were 19.55 kg/hm^2 and 1.29 kg/hm^2 , and 8.27% and 0.45% of applied N respectively. Maize yield of AINP were $4163.18\text{--}6942.00 \text{ kg/hm}^2$. The simulation results showed that the lowest of total NH_3 -N volatilization and N_2O -N emission would be 9.28 kg/hm^2 when water amount was $800.00 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ and N rate was 24.80 kg/hm^2 . The highest maize yield would be 6367.07 kg/hm^2 when optimal water amount and N ratio were $930.12 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ and 238.19 kg/hm^2 respectively. The NH_3 volatilization and N_2O emission could be lower ($\leq 12.84 \text{ kg/hm}^2$) when irrigation water were $658.06\text{--}941.94 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ and N rate were $87.36\text{--}131.16 \text{ kg/hm}^2$. The maize yield could be higher ($\geq 4934.91 \text{ kg/hm}^2$) when the water amount were $910.22\text{--}1134.20 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ and N rate were $215.89\text{--}270.78 \text{ kg/hm}^2$. Under AINP, there could be not only lower the gaseous N loss but also higher yield when the optimal irrigation water were $910.22\text{--}941.94 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, but there was no agreement of the N rate between higher yield treat and the lower N loss one. Compared with conventional irrigation and N application, AINP could decrease NH_3 volatilization and N_2O emission and increase summer maize yield significantly.

Key words: coupling of water and N; alternate irrigation and N placement; NH_3 volatilization; soil N_2O emission

收稿日期: 2010-06-21; 修订日期: 2010-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571085); 西北农林科技大学创新团队支持计划项目 (2010)

作者简介: 韩坤 (1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为植物营养与调控, E-mail: hankun@nwsuaf.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: linquanw@yahoo.com.cn

水资源匮乏是限制干旱半干旱地区农业发展的主要因子,节水农业是其可持续发展的必经之路.康绍忠等^[1]提出的控制性分根交替灌溉技术可以显著提高灌水利用效率和植物水分利用效率,在干旱半干旱地区受到普遍关注.水肥异区交替灌溉施肥技术是在交替灌溉理论上提出的一种新型节水施肥技术.在夏玉米灌溉过程中,将水分和氮肥分别施在相邻的两沟中,水肥不同区;第二次灌溉时交换施肥沟与灌水沟^[2~4].与常规灌溉施肥处理相比,水肥异区交替灌溉施肥,在不减少产量或减产很少的情况下,可显著提高水肥利用效率^[5],降低夏玉米田土壤的硝态氮淋溶^[4].

氮肥施用量占我国化肥养分施用总量的 60% 左右,氮肥损失率达 45%,平均利用率只有 35%^[6~8].土壤施用尿素所引起的气态氮素排放($\text{NH}_3 + \text{N}_2\text{O}$)是造成氮肥损失和环境污染的直接原因之一^[9,10].气态氮素是重要的温室气体,其主要来源是农业土壤^[11].农田水分含量及其分布与土壤中含氮物质转化密切相关,显著影响 NH_3 挥发和 N_2O 排放通量^[12~18].

交替灌溉施肥显著影响氮素与水分在土壤中的分布^[19,20],势必对土壤的气态氮形成与释放产生重要影响.但是交替灌溉施肥条件下,水氮耦合对土壤 NH_3 挥发及 N_2O 等气态氮排放影响的研究还鲜见报道.本试验在水肥空间耦合基础上,通过大田试验,采用二元二次正交旋转组合设计研究了交替灌溉条件下的水氮数量耦合对夏玉米田土壤 NH_3 挥发与 N_2O 排放以及玉米产量的影响,以探索适用于本地区的具有较佳环境效应和生产效益的优化水氮模式,以期当地农业生态管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2008 年在地处陕西杨凌农业高新技术产业示范区的西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室,农业部旱区农业节水重点开放实验室的灌溉试验站($\text{E}108^{\circ}04'02''$, $\text{N}34^{\circ}17'38''$, 海拔 520 m) 进行.试验地土壤为旱耕人为土垫土,属重壤土,土壤 pH 值为 7.90,全 N 为 1.18 g/kg,有效 N 为 142.31 mg/kg,有效 P 为 7.81 mg/kg,有效 K 为 111.65 mg/kg,有机质含量为 12.16 g/kg,土壤田间持水量为 25.22%,土壤容重为 1.25 g/cm³. 该地区属于暖温带半湿润气候,年降水量为 550 ~ 650 mm,且多集中在 7 ~ 9 月.2008 年夏玉米生育期降

雨分布如图 1 所示.

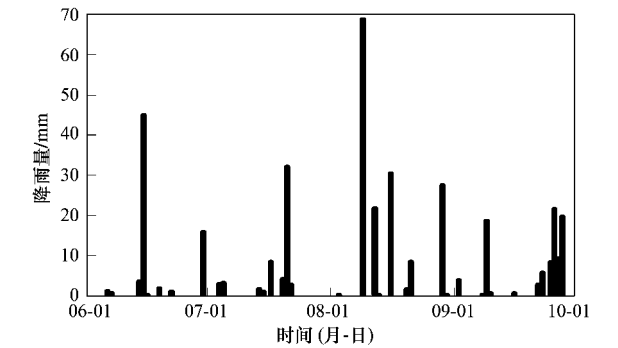


图 1 2008 年夏玉米生育期的降雨分布
Fig. 1 Rainfall distribution of the growth period of summer maize in 2008

1.2 供试材料

供试作物为夏玉米陕单 902,供试肥料为尿素(含氮量为 46%) .

1.3 试验设计

本试验采用二元二次正交旋转组合设计(如表 1),涉及灌水和施肥 2 因素.灌水量设 0.00 m³/hm² (W0)、234.22 m³/hm² (W1)、800.00 m³/hm² (W2)、1 365.78 m³/hm² (W3) 和 1 600.00 m³/hm² (W4) 5 个水平,施氮量设 0.00 kg/hm² (F0)、58.56 kg/hm² (F1)、200.00 kg/hm² (F2)、341.44 kg/hm² (F3) 和 400.00 kg/hm² (F4) 5 个水平;设置空白对照(F0W0)和常规处理(CT),即均匀灌溉施肥(灌水量 1 800.00 m³/hm²,施氮量 300.00 kg/hm²).共 11 个处理,中心点(F2W2)设 15 个重复,其它每个处理重复 3 次.采用大田试验,小区面积为 20 m² (4 m×5 m).种植密度为 47 578 株/hm²,株、行距分别为 30 cm 和 60 cm.2008 年 6 月 10 日播种,10 月 1 日收获.

表 1 二元二次正交旋转组合设计方案
Table 1 Design of second-order central designed with composite orthogonal rotational matrix for irrigation water and N

处理号	施氮量/kg·hm ⁻²	灌水量/m ³ ·hm ⁻²
F0W0	-1.414(0.00)	-1.414(0.00)
F0W2	-1.414(0.00)	0(800.00)
F1W1	-1(58.56)	-1(234.22)
F1W3	-1(58.56)	1(1 365.78)
F2W0	0(200.00)	-1.414(0.00)
F2W2	0(200.00)	0(800.00)
F2W4	0(200.00)	1.414(1 600)
F3W1	1(341.44)	-1(234.22)
F3W3	1(341.44)	1(1 365.78)
F4W2	1.414(400.00)	0(800.00)
CT	(300.00)	(1 800.00)

施肥采取分次施肥方式,1/2 作为基肥施入,1/4 在拔节期追肥,1/4 在抽雄期追肥. 追肥采用条施法,在施肥沟垄中离根 10 cm 处开深 5 cm 的浅沟,施肥后盖土. 同时采用水肥异区隔沟交替灌溉方式灌溉,即灌水与施肥分别在相邻的 2 个垄沟中进行,水肥不同区. 拔节期(第 1 次灌溉施肥)的灌水沟在抽雄期(第 2 次灌溉施肥)变成施肥沟,而相应的施肥沟则变成灌水沟. 第 1 次灌溉施肥在 8 月 5 日,第 2 次灌溉施肥在 8 月 25 日. 2 次灌溉量分别为总灌溉量的 1/2. CT 处理的施肥灌水时期与交替灌溉相同,施肥灌水在同一沟中进行,先施肥后灌水.

1.4 样品的收集与测定

采用密闭法收集气体样品. 气体捕获装置是由聚氯乙烯硬质塑料制成的一面敞开的正方体捕获箱(20 cm×20 cm×20 cm). 追肥后,在各小区的施肥和灌水区分别放置 1 个捕获装置,箱内置有 1 个装有 20 mL 2% 硼酸溶液的培养皿. 次日或隔日 09:00 时取样. 气体样品用 5 mL 注射器由箱子顶部的橡皮塞抽取,将气体样品注射到密闭的真空安培瓶中,密封后置于 4℃ 冰箱中保存. 样品 N₂O 含量利用气相色谱(美国 Varian 产 GC3800)测定. 采完气体样品后,将培养皿中的硼酸吸收液倒入塑料瓶中密闭保存. 用蒸馏水润洗培养皿,并加入 20 mL 2% 的新鲜硼酸溶液,扣置捕获箱,进行下次气体收集.

施肥后第 1 周,每 2 d 取 1 次样,第 2 周,每 3 d 取样 1 次,第 3 周每 4 d 取样 1 次,直至测定的氨挥发量与对照接近时,每周采样一次. 遇降雨时采样顺延.

气态氮采用硼酸吸收,硫酸滴定法测定. 具体方法参见文献[21]. N₂O 采用气相色谱法测定. 标准

气为北京产 8.8 μL/L N₂O,用 99.999% 的高纯氮气稀释样品,气相色谱测定 N₂O 的变异系数 <5%. 分析气体样品为 1 mL. 测定分离柱为 2 根串联的长 2 m 和 1 m 的不锈钢填充柱,柱内填充料为 PorapakQ,计算机程序 + 滤阀将样品中的水分在进入检测器前反吹掉,载气为高纯氮气,流速为 60 mL/min. 检测器温度,柱温,进样口温度分别为 350、80 和 120℃.

1.5 计算方法

根据二元二次正交旋转组合设计的矩阵列表(表 1),以灌水量和施氮量的编码值为自变量,NH₃ 挥发量,N₂O 排放量,气态氮释放总量和籽粒产量等为因变量,利用最小二乘法逐步回归计算,得到回归方程. 以回归方程为基础,通过最优组合方案的频数统计分析,确定模型的最优组合. 详尽计算步骤参见文献[22]. 方程回归利用 Excel 2003 逐步回归分析.

2 结果与分析

2.1 NH₃ 挥发量、N₂O 排放量和玉米籽粒产量分析

由表 2 可以看出,交替灌溉施肥处理 NH₃-N 挥发量为 4.78 ~ 17.00 kg/hm²,占施氮量的 1.89% ~ 11.89%,其中 F4W2 最高,F0W2 最低;N₂O-N 排放量在 0.59 ~ 0.88 kg/hm² 之间,占施氮量的 0.01% ~ 0.31%,其中 F0W2 最高,F2W0 最低;气态氮素(NH₃-N + N₂O-N)排放总量为 5.66 ~ 17.65 kg/hm²,其中 F4W2 最高,F0W2 最低. CT 处理的 NH₃-N 挥发量为 19.55 kg/hm²,N₂O-N 排放量为 1.29 kg/hm²,其氮肥损失率分别为 8.27% 和 0.45%;气态氮素(NH₃-N + N₂O-N)排放总量为 20.84 kg/hm²,显著高于交替灌溉施肥处理. 和常规处理相比,交替灌溉施肥处理的 NH₃ 挥发降低了

表 2 NH₃ 挥发量、N₂O 排放量和籽粒产量¹⁾/kg·hm⁻²
Table 2 NH₃ volatilization, N₂O emission and maize yield/kg·hm⁻²

处理号	NH ₃ -N 挥发量	NH ₃ -N 挥发 损失率/%	N ₂ O-N 排放量	N ₂ O-N 排放 损失率/%	NH ₃ -N 和 N ₂ O-N 排放量	籽粒产量
F0W0	7.15	—	0.62	—	7.77	4 002.14
F0W2	4.78	—	0.88	—	5.66	4 163.18
F1W1	10.54	11.58	0.67	0.15	11.21	4 313.95
F1W3	10.63	11.89	0.71	0.31	11.34	6 318.00
F2W0	10.31	3.16	0.59	—	10.90	5 016.58
F2W2	9.61	2.46	0.68	0.06	10.29	6 942.00
F2W4	9.04	1.89	0.84	0.22	9.88	5 887.39
F3W1	15.84	5.09	0.77	0.09	16.61	5 260.56
F3W3	14.34	4.21	0.79	0.10	15.13	6 705.26
F4W2	17.00	4.93	0.65	0.01	17.65	5 826.24
CT	19.55	8.27	1.29	0.45	20.84	5 094.05

1) NH₃ 挥发损失率 = (各处理的 NH₃ 挥发量 - F0W0 的 NH₃ 挥发量)/当次施氮量; N₂O 排放量损失率 = (各处理的 N₂O 排放量 - F0W0 的 N₂O 排放量)/当次施氮量

13.04% ~ 75.55%, N_2O 排放量降低了 31.59% ~ 54.28%. 说明交替灌溉施肥能显著降低 NH_3 挥发和 N_2O 排放, NH_3 挥发是气态氮素损失的主要途径.

同一施氮水平条件下, NH_3 挥发随灌溉量的增加而降低, 而 N_2O 排放随灌溉量的增加而增加. 灌溉量相同时, NH_3 挥发随施氮量的增加而增加; 在灌溉量为 W0、W1 和 W3 水平, N_2O 排放随施氮量的增加而增加, 但在 W2 水平下, N_2O 排放随施氮量的增加而降低.

交替灌溉施肥处理的籽粒产量为 4 163.18 ~ 6 942.00 kg/hm^2 , 其中 F2W2 最高, F3W3 次之, F0W2 最低. 交替灌溉施肥处理籽粒产量均高于 CK, 其中 F2W2、F3W3、F1W3、F2W4、F3W1 和 F4W2 等处理均显著高于常规处理 (CT). 在灌水量 W0、W1 和 W3 水平下, 籽粒产量随施氮量的增加而增加; 在施氮量 F0、F1 和 F3 水平下, 籽粒产量随灌溉量的增加而增加. 在施氮量为 F2 水平, 籽粒产量随灌溉量的增加而先增加而后降低, 在灌溉量为 W2 水平下, 籽粒产量随施氮量的增加而先增加而后降低.

2.2 回归方程的建立

分别以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发量, $\text{N}_2\text{O-N}$ 排放量, 气态氮 ($\text{NH}_3\text{-N} + \text{N}_2\text{O-N}$) 释放总量和籽粒产量 (表 2) 为目标函数, 灌水量和施氮量的编码值为自变量, 求得其与水氮 2 因素的回归方程为:

$$Y_1 = 10.57 + 3.28x_1 - 0.40x_2 + 1.27x_1^2 + 0.67x_2^2 - 0.40x_1x_2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0.71 - 0.02x_1 + 0.04x_1^2 + 0.05x_2 + 0.01x_2^2 - 0.01x_1x_2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 11.30 + 3.27x_1 + 1.32x_1^2 - 0.35x_2 + 0.69x_2^2 - 0.40x_1x_2 \quad (3)$$

$$Y_4 = 6\,189.20 + 460.75x_1 - 867.12x_1^2 + 585.10x_2 - 638.48x_2^2 - 139.84x_1x_2 \quad (4)$$

式中, Y_1 为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 挥发量 (kg/hm^2), Y_2 为 $\text{N}_2\text{O-N}$ 排放量 (kg/hm^2), Y_3 为气态氮素 ($\text{NH}_3\text{-N} + \text{N}_2\text{O-N}$) 释放总量 (kg/hm^2), Y_4 为籽粒产量 (kg/hm^2); x_1 、 x_2 分别为实验设计的施氮量和灌溉量的编码值. 经检验, 回归模型模拟项的 $F_1 = 17.47$, $F_3 = 10.20$, $F_4 = 24.91$, 均大于 0.01 水平下的 F 值 (5.64), 说明 NH_3 挥发, 气态氮释放和籽粒产量回归方程是极显著的, 模型与实际情况拟合很好, 能够反映 NH_3 挥发, 气态氮释放和籽粒产量与灌溉量和施氮量之间

的关系. $F_2 = 1.85$ 小于 0.10 水平下的 F 值 (2.52), 说明 N_2O 排放回归方程不显著, 模型与实际情况拟合不好, 模型不能反映 N_2O 排放与灌溉量和施氮量之间的关系.

经过方程系数项的显著性检验, 方程 (1)、(3) 和 (4) 可以简化为方程 (5) ~ (7):

$$Y_1 = 10.57 + 3.28x_1 + 1.27x_1^2 + 0.67x_2^2 \quad (5)$$

$$Y_3 = 11.30 + 3.27x_1 + 1.32x_1^2 + 0.69x_2^2 \quad (6)$$

$$Y_4 = 6\,189.20 + 460.75x_1 + 585.10x_2 - 867.12x_1^2 - 638.48x_2^2 \quad (7)$$

2.3 水氮综合效应分析

由表 2 及方程 (5) 和 (6) 可以看出, NH_3 挥发量占土壤气态氮损失的 90% 以上, NH_3 挥发量与气态氮素排放量具有相同规律. 因此本研究只分析气态氮素释放总量的回归方程 (6).

由图 2 可以看出水氮对气态氮释放总量的效应呈开口向上的曲面变化, 随着水氮投入量的增加, 气态氮释放量效应呈凹面状; 由图 3 可知水氮对玉米籽粒产量效应呈开口向下曲面状, 玉米籽粒产量效应呈凸面状.

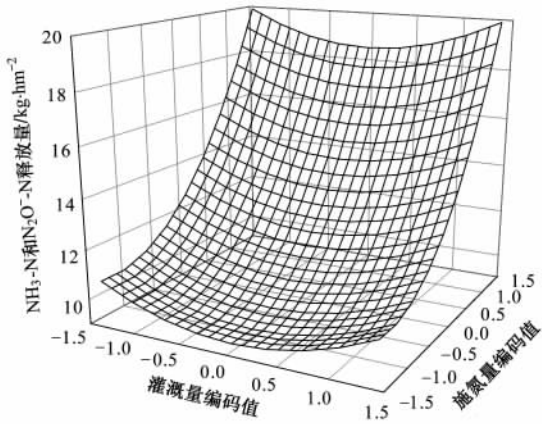


图 2 灌水量和氮肥量对气态氮素释放总量的影响
Fig.2 Effects of irrigation and N fertilizer on gaseous N loss

当灌水量和施氮量增加时, 气态氮释放量先小幅降低, 达到最低点后又大幅升高 (图 2), 而籽粒产量则先大幅上升后小幅下降 (图 3). 气态氮释放量最低点出现在灌水量中等水平和施氮量较低水平; 最高籽粒产量出现在中等施氮量和中等灌水量处. 当灌水水平一致时, 气态氮释放量随着施氮量的增加呈先减后增的趋势; 而籽粒产量随着施氮量的增加呈先增后减的趋势. 施氮量处于同一水平时, 增加灌水量, 气态氮释放量呈先减后增的趋势, 而籽粒产量先增加后减少.

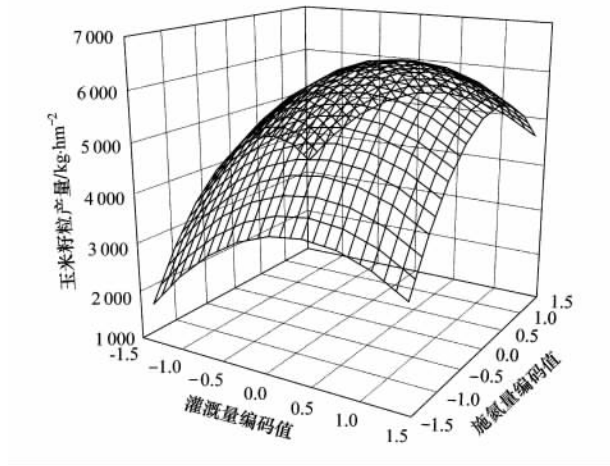


图3 灌水量和氮肥量对玉米产量的影响

Fig.3 Effects of irrigation and N fertilizer on maize yield

2.4 模型寻优

根据方程(6),在 $-1.414 \leq x_i \leq 1.414$ 之间,以步长为0.353 5,取9个水平,利用2因素编码值组合可得到气态氮($\text{NH}_3\text{-N} + \text{N}_2\text{O-N}$)释放总量小于平

均值 12.97 kg/hm^2 的组合方案48套,占全部方案的59.26%;气态氮释放量 $>12.97\text{ kg/hm}^2$ 的管理方案为:灌水量 $658.06 \sim 941.94\text{ m}^3/\text{hm}^2$,施氮量 $87.36 \sim 131.16\text{ kg/hm}^2$;最低气态氮释放量为 9.28 kg/hm^2 ,相应的灌水量为 $800.00\text{ m}^3/\text{hm}^2$,施氮量为 24.80 kg/hm^2 (表3)。

同理,根据方程(7),可得到产量大于平均值 $4\,934.91\text{ kg/hm}^2$ 的组合方案45套,占全部方案的55.56%;籽粒产量 $>4\,934.91\text{ kg/hm}^2$ 的管理方案为:灌水量 $910.22 \sim 1\,134.20\text{ m}^3/\text{hm}^2$,施氮量 $215.89 \sim 270.78\text{ kg/hm}^2$;最高产量为 $6\,367.07\text{ kg/hm}^2$,相应的灌水量为 $930.12\text{ m}^3/\text{hm}^2$,施氮量为 238.19 kg/hm^2 (表3)。

由表(3)可得,控制性交替灌溉施肥条件下气态氮释放量较低和产量较高的灌水量范围交集为 $910.22 \sim 941.94\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。而氮肥则无交集,说明在供试条件下,施氮量不能完全满足产量效益和环境效益的统一。

表3 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{N}_2\text{O-N}$ 释放量小于平均值 12.97 kg/hm^2 以及籽粒产量大于平均值 $4\,934.91\text{ kg/hm}^2$ 水氮因子取值频率分布及配比方案配合¹⁾

Table 3 Factors frequency distribution and cooperation plans with $\text{NH}_3\text{-N}$ volatilization and $\text{N}_2\text{O-N}$ emission amount below average 12.97 kg/hm^2 and grain yield surpass average $4\,934.91\text{ kg/hm}^2$

水平编码	$\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{N}_2\text{O-N}$ 释放量统计(次数)		籽粒产量统计(次数)	
	x_1	x_2	x_1	x_2
-1.414	9	5	0	0
-1.060 5	9	5	0	0
-0.707	9	5	6	5
-0.353 5	9	6	7	6
0	9	6	7	7
0.353 5	3	6	7	7
0.707	0	5	7	7
1.060 5	0	5	7	7
1.414	0	5	4	6
总次数	48	48	45	45
编码加权均数	-0.642	0.000	0.306	0.393
标准差	0.079	0.128	0.099	0.101
95% 置信区间	-0.796 ~ -0.487	-0.251 ~ 0.251	0.112 ~ 0.500	0.195 ~ 0.591
最优配比方案	87.36 ~ 131.16	658.06 ~ 941.94	215.89 ~ 270.78	910.22 ~ 1134.20
最高产量(6 367.07 kg/hm ²)	—	—	238.19	930.12
最低气态氮(9.28 kg/hm ²)	24.80	800.00	—	—

1) x_1 为施氮量,单位是 kg/hm^2 , x_2 为灌水量,单位为 m^3/hm^2

3 讨论

Nelson^[23]研究表明,尿素水解产物氨的挥发是尿素肥效降低的主要原因,氨挥发损失占氮肥用量的40%。FAO和IFA总结了世界各地的试验资料^[24],认为尿素地表撒施的氨挥发损失率为15%~20%,尿素与土壤混合处理的损失率为5%~15%。邓美华等^[25]研究表明,优化施肥和习惯施肥的 NH_3 挥发损失率分别为 $7.05\% \pm 1.37\%$ 和 $9.81\% \pm 0.38\%$ 。李新

慧^[26]研究表明,表施尿素的 NH_3 挥发损失量可达施氮量的45%~73%;施肥结合灌水的损失率可降至2%~8%;深施或施肥后覆土的损失率则不足5%。本试验中常规施肥灌水处理的 NH_3 挥发损失率达到8.27%,与尿素混施的结果基本一致。除低施氮处理(F1W1和F1W3)外,交替灌溉处理的 NH_3 挥发损失率为1.89%~4.93%,和常规施肥灌水处理相比, NH_3 挥发降低了50%以上。

研究表明,来自肥料的 $\text{N}_2\text{O-N}$ 释放量占施氮量

的 0.001% ~ 6.8%^[27~31]. 不同施肥方式也会影响 N_2O 排放, 尿素表施和穴施的 N_2O 排放量分别为施氮量的 1.94% 和 1.67%^[32]. Akiyama 等^[11] 研究表明, N_2O -N 释放量占施氮量的 0.01% ~ 1.65%. 本试验结果表明, 常规施肥灌水处理的 N_2O 排放量为 1.29 kg/hm², 占施氮量的 0.45%, 属于较低水平. 交替灌溉施肥处理的 N_2O 排放量为 0.59 ~ 0.84 kg/hm², 占氮肥施用量的 0.01% ~ 0.31%, 显著降低了夏玉米田土壤 N_2O 排放. 土壤水分显著影响土壤 N_2O 的产生^[12]. 当土壤含水量低于 WFPS(土壤可持水孔隙)的 50% 时, 硝化过程占主导地位, NO 是硝化-反硝化过程的主要产物; 当达到 88% WFPS 时, 反硝化作用起主要作用, 其主要产物是 N_2O ^[16]. 而在 60% WFPS(相当于田间持水量)时 N_2O 排放量最高, 而 NO 与 N_2O 的排放量相当^[33]. 本试验条件下, 由于灌溉和降水的影响, 夏玉米地土壤含水量较高, 一般维持在田间持水量左右, 硝化-反硝化作用产生的 N_2O 和 NO 相当, 说明交替施肥灌溉条件下硝化-反硝化过程损失的气态氮($N_2O + NO$)最多只有 1.18 ~ 1.68 kg/hm², 损失率为 0.02% ~ 0.62%. 因此在供试条件下, 气态氮素损失的主要途径不是氮氧化物排放, 而是 NH_3 挥发.

邢维芹等^[2,34] 研究证明水肥异区交替灌水是非充分灌溉条件下一种较好的水肥耦合形式. 由方程(7)和图 3 可以看出, 交替灌溉施肥条件下, 适当的水氮配比增产效应显著. 施氮量较低时, 增加灌水量, 产量增加不明显; 施氮量在中等水平时, 产量随灌水量的增加而显著增加; 反之亦然. 但灌水量和施氮量过高时, 产量会小幅下降. 说明在交替灌溉施肥条件下, 存在水、氮的最佳耦合. 这与薛亮等^[5] 的研究结果类似. 但也有研究表明, 交替分根灌溉不同程度地降低作物产量^[35~38], 这可能与气候条件、作物品种和灌水量等的差异有关.

合理灌溉施肥的首要目的是增加产量和提高水肥利用率. 水分的供应要与适当的氮素配合, 而氮素的有效利用也需要适宜的水分供应^[39]. 水氮配置不合理就会降低水肥利用效率^[3], 增加土壤 NH_3 挥发^[40] 和 N_2O 释放^[41], 污染环境, 浪费资源. 只有充分利用水氮耦合效应, 才能达到节水节肥的目的. 本研究表明, 控制性交替灌溉施肥条件下, 气态氮损失较低和产量较高的灌水量范围为 910.22 ~ 941.94 m³/hm². 交替灌溉施肥条件下, 适当的灌水量既能满足玉米的生理需求, 又可以较好地协调氮素在土

壤中的转化和植物的养分吸收, 提高氮素利用效率, 降低气态氮素的排放, 减少其环境污染. 但本研究未找到能同时满足产量较高和气态氮损失较低的施肥区间. 降低施氮量, 会降低气态氮排放, 但不能满足玉米的生理需求, 降低玉米产量; 增加施氮量, 能满足玉米的生理需求, 增加玉米产量, 但同时也增加了气态氮的排放, 增大大气环境污染的风险.

4 结论

(1) 控制性交替灌溉施肥条件下, 水、氮对夏玉米土壤气态氮释放和产量均有显著影响. 夏玉米田土壤气态氮释放最低值以及相应水氮配比为: 9.28 kg/hm²、800.00 m³/hm² 和 24.80 kg/hm². 玉米最高籽粒产量以及相应的水氮配比为: 6367.07 kg/hm²、930.12 m³/hm² 和 238.19 kg/hm².

(2) 控制性交替灌溉施肥条件下, 气态氮损失较低和产量较高的灌水量范围为: 910.22 ~ 941.94 m³/hm², 氮肥用量则无交集.

(3) 与常规施肥灌水相比, 水肥异区交替灌溉施肥能显著降低 NH_3 挥发和 N_2O 排放, 适当的水氮配比增产效应显著.

致谢: 本研究在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室和农业部旱区农业节水重点开放实验室的试验田完成, 特此表示衷心感谢.

参考文献:

- [1] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1-5.
- [2] 邢维芹, 王林权, 李生秀. 半干旱地区夏玉米的水肥空耦合效应[J]. 农业现代化研究, 2001, 22(3): 150-153.
- [3] 李志军, 张富仓, 康绍忠. 控制性根系分区交替灌溉对冬小麦水分与养分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 17-21.
- [4] 谭军利, 王林权, 李生秀. 不同灌溉模式下水分养分的转移及其利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 442-448.
- [5] 薛亮, 周春菊, 王林权, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91-94.
- [6] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 学苑出版社, 2004.
- [7] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen loss from fertilizers applied to maize-wheat and rice in the North China plain[J]. Nutrient Cycling in Agro-ecosystems, 2002, 63(2-3): 187-195.
- [8] 陈同斌, 陈世庆, 徐鸿涛, 等. 中国农用化肥氮磷钾需求比例的研究[J]. 地理学报, 1998, 53(1): 32-41.
- [9] Suprayogo D M, Noordwijk K H, Cadisch G. The inherent safety net of Ultisols: Measuring and modeling retarded leaching mineral nitrogen[J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53: 185-

- 194.
- [10] 朱霞, 韩晓增, 乔云发, 等. 外加可溶性碳、氮对不同热量带土壤氮挥发的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3465-3470.
- [11] Akiyama H, McTaggart I P, Ball B C, *et al.* N₂O, NO, and NH₃ emissions from soil after the application of organic fertilizers urea and water[J]. Water, Air, and Soil Pollution 2004, **156**(1-4): 113-129.
- [12] 魏玉云, 杜春梅, 茶正早, 等. 不同母质砖红壤中尿素氮挥发差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(增刊): 243-247.
- [13] 邵立明, 邱伟坚, 张后虎, 等. 渗滤液灌溉土壤 N₂O 释放及氮挥发的研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3520-3524.
- [14] 李慧琳, 韩勇, 蔡祖聪. 运用 Jayaweera-Mikkelsen 模型对太湖地区水稻田稻季氮挥发的模拟[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1045-1052.
- [15] Liu X J, Mosier A R, Halvorson A D, *et al.* Dinitrogen and N₂O emissions in arable soils: effect of tillage, N source and soil moisture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, **39**(9): 2362-2370.
- [16] Ruser R, Flessa H, Russow R, *et al.* Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, **38**: 263-274.
- [17] Watzinger A, Reichenauer T G, Blum W E, *et al.* The effect of landfill leachate irrigation on soil gas position: methane oxidation and nitrous oxide formation [J]. Water, Air & Soil Pollution, 2005, **164**: 295-313.
- [18] Zhang J F, Han X G. N₂O emission from the semi-arid ecosystem under mineral fertilizer (urea and superphosphate) and increased precipitation in Northern China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(2): 291-302.
- [19] 邢维芹, 王林权, 李立平, 等. 半干旱区玉米水肥空间耦合效应 II. 土壤水分和速效氮的动态分布[J]. 土壤, 2003, **35**(3): 242-247.
- [20] 谭军利, 王林权, 王西娜, 等. 不同灌水模式对土壤水分和硝态氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, **27**(5): 29-33.
- [21] 王朝晖, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(2): 205-209.
- [22] 袁志发. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 360-387.
- [23] Nelson D W. Nitrogen in agricultural Soils [M]. Madison. Wisconsin USA, 1982. 327-363.
- [24] FAO. Global estimation of gaseous emission of NH₃, NO and N₂O from agricultural land[M]. Rome, Italy: 2001.
- [25] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氮挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, **38**(3): 263-269.
- [26] 李新慧. 北京地区农田氮素损失机理和提高氮肥回收率的途径[A]. 见: 北京土壤学会简讯[C], 1999. 5-8.
- [27] 黄国宏, 陈冠雄, 吴杰, 等. 东北典型旱作农田 N₂O 和 CH₄ 排放通量研究[J]. 应用生态学报, 1995, **6**(4): 383-386.
- [28] Adviento B, Haddix M, Binder D, *et al.* Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems [J]. Global Change Biology, 2007, **13**(9): 1972-1988.
- [29] Ma B, Wu T, Tremblay N, *et al.* Nitrous oxide fluxes from corn fields: On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(1): 156-170.
- [30] Stehfest E, Bouwman L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, **74**: 207-228.
- [31] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data[J]. Journal of Environmental Quality, 1990, **19**: 272-280.
- [32] Ding H, Cai G X, Wang Y S, *et al.* Nitrification-denitrification loss and N₂O emission from urea applied to crop-soil systems in north China plain[J]. Agricultural Sciences in China, 2002, **1**(2): 184-188.
- [33] Davidson E A. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems [A]. In: Rogers J E, Whitman W B, (eds.). Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides, and halomethane [C]. American Society of Microbiology, Washington DC, 1991. 219-235.
- [34] 邢维芹, 王林权, 骆永明, 等. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2002, **18**(6): 46-49.
- [35] Buttar G S, Thind H S, Aujla M S. Methods of planting and irrigation at various levels of nitrogen affect the seed yield and water use efficiency in transplanted oilseed rape [J]. Agriculture Water Management, 2006, **85**: 253-260.
- [36] Kang S Z, Hu X T, Goodwin I, *et al.* Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under a shallow groundwater table condition in a pear orchard [J]. Scientia Horticulturae, 2002, **92**(3-4): 277-291.
- [37] Wakrim R, Wahbi S, Tahi H, *et al.* Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, **106**(2-3): 275-287.
- [38] Wang L, De Kroon H, Bögemann G M, *et al.* Partial root drying effects on biomass production in *Brassica napus* and the significance of root responses[J]. Plant and Soil, 2005, **276**(1-2): 313-326.
- [39] 陆景凌. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 23-34.
- [40] 雷杨莉, 王林权, 薛亮, 等. 交替灌溉施肥对夏玉米土壤氮挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(4): 41-46.
- [41] Ma B L, Wu T Y, Tremblay N, *et al.* On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer on ammonia volatilization [J]. Agronomy Journal, 2010, **102**(1): 134-144.