不同水分条件下平衡施肥对旱地冬小麦土壤硝态氮运移的影响

杨万忠[1,2], 牟思维[1,2], 韩清芳[1,2*], 许卫娜[1,2], 贾志宽[1,2], 杨 丽[1,2], 杨宝平[1], 杨海迪[1]

(1. 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了探明不同水分条件下旱地冬小麦养分管理措施对土壤环境的影响,在控雨池栽条件下,设置水分与肥料双因素随机区组试验,以不施肥为对照,研究了 0~200 cm 土层在底墒为 650 mm 时,不同水分条件下 3 个平衡施肥处理(Y1:N 13.9 kg·hm^{-2}、P_2O_5 4.65 kg·hm^{-2}、K_2O 15.3 kg·hm^{-2},Y2:N 97.5 kg·hm^{-2}、P_2O_5 32.7 kg·hm^{-2}、K_2O 107.6 kg·hm^{-2},Y3:N 181.2 kg·hm^{-2}、P_2O_5 60.6 kg·hm^{-2}、K_2O 199.8 kg·hm^{-2})对旱地冬小麦主要生育时期土壤硝态氮运移的影响。结果表明:开花期、灌浆期,在各水分条件下,0~80 cm 土层土壤硝态氮平均含量及积累量在 Y1 施肥量水平下与不施肥处理(Y0)差异不显著,Y2、Y3 水平较 Y0 和 Y1 硝态氮平均含量增加 98.6%~363.6%(P<0.05),硝态氮积累量增加 98.2%~260.9%,Y3 与 Y2 无显著差异;施肥量的增加对 80~160 cm 土层土壤硝态氮含量及累积量无显著影响。在生育期补灌 100 mm(R3)、78 mm(R2)、56 mm(R1)条件下,冬小麦成熟期 3 个施肥量 80~160 cm 土层的土壤硝态氮累积量较不补灌(R0)分别减少 27.2%~41.0%、44.8%~48.4%、23.7%~49.4%,较高的水分条件加剧了土壤硝态氮向深层的淋溶。从满足冬小麦营养需求、减少土壤硝态氮的累积、提高肥料利用效率等方面综合考虑,冬小麦的适宜施肥量为 Y2 水平。

关键词:水分条件;平衡施肥;冬小麦;硝态氮运移

中图分类号:S153 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2014)10-1956-08 doi:10.11654/jaes.2014.10.012

Effects of Balanced Fertilization on Soil Nitrate Transport in Rainfed Winter Wheat Field Under Different Water Conditions

YANG Wan-zhong[1,2], MOU Si-wei[1,2], HAN Qing-fang[1,2*], XU Wei-na[1,2], JIA Zhi-kuan[1,2], YANG Li[1,2], YANG Bao-ping[1], YANG Hai-di[1]

(1.Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University/Key Laboratory of Crop Phyic-ecology and Tillage in Northwestern loess Plateau, Minister of Agriculture, Yangling 712100, China; 2.College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Excessive nitrogen application has led to nitrate accumulation and leaching from soils, causing groundwater pollution. A rainfall-controlled experiment was conducted to evaluate the effects of balanced nutrient managements on soil nitrate in a rainfed winter wheat area under different water conditions. The experiment included four irrigation rates(R0:0 mm, R1:56 mm, R2 :78 mm, R3:100 mm) and four nutrient levels(Y0:no fertilization as control, Y1:N 13.9 kg·hm^{-2}, P_2O_5 4.65 kg·hm^{-2}, K_2O 15.3 kg·hm^{-2}, Y2:N 97.5 kg·hm^{-2}, P_2O_5 32.7 kg·hm^{-2}, K_2O 107.6 kg·hm^{-2}, Y3:N 181.2 kg·hm^{-2}, P_2O_5 60.6 kg·hm^{-2}, K_2O 199.8 kg·hm^{-2}). No significant differences in nitrate accumulations were found between Y1 and Y0 in 0~80 cm soil layer during flowering and filling stages under the same water condition. Compared with Y0, the average nitrate contents and accumulation were respectively increased by 98.6%~363.6% and 8.2%~260.9% in Y2 and Y3 treatments, with no differences between Y2 and Y3. The effects of increased fertilizer application on nitrate content and accumulation in 80~160 cm soil layers was insignificant. At the maturity stage, however, the nitrate accumulation in 80~160 cm soil layers for three fertilizer rates was 27.2%~41.0%, 44.8%~48.4% and 23.7%~49.4% lower in R3, R2 and R1 than in R0, respectively. Higher water contents moved nitrate to a deeper soil, causing groundwater pollution. Our results suggest that the reasonable fertilizer rate for winter wheat would be Y2 as it satisfies the nutrient needs of winter wheat growth, reduces nitrate accumulation in soils and improves fertilizer utilization efficiency.

Keywords: water conditions; balanced fertilization; winter wheat; nitrate transport

收稿日期:2014-03-12

基金项目:"十二五"国家科技支撑计划课题(2012BAD09B03);国家863 课题(2013AA102902);国家支撑计划课题(2011BAD29B09-1-3B);高等学校学科创新引智计划(No.B12007)

作者简介:杨万忠(1989—),男,硕士研究生,主要从事植物资源高效利用研究。E-mail:yangwanzhong168@163.com

* **通信作者**:韩清芳 E-mail:hanqf88@nwsuaf.edu.cn

农业生产中化肥的不合理使用易造成肥料利用率降低、损失严重、环境污染等不良后果,过量施肥会导致小麦产量降低和地下水污染[1-3]。农田生态系统中过量施用的氮肥除了有一部分残留在土壤中,其余的会以氨挥发、反硝化、淋洗、径流等途径损失掉,给自然环境和人类健康带来严重危害[4]。过度施用氮肥对农田生态环境的负效应备受关注[5]。硝态氮是反映农田土壤氮素水平的一个重要指标[3,6-7],也是旱地农田土壤无机氮存在的主要形态[8],过量施氮会造成旱地土壤硝态氮大量累积[9]。硝态氮在土壤中不易被吸附,土壤剖面中累积的硝态氮易随水分从上层不断向下淋溶,对地下水造成污染[10]。硝态氮污染已成为国际上普遍关注的问题,我国地下水质量已不同程度地受到了硝态氮污染的影响[11-13]。大量研究表明,农田土壤硝态氮的累积和运移受作物氮素吸收利用率、养分管理、降雨、灌溉、土壤特征等诸多因素的影响[14]。目前,对小麦地土壤硝态氮的研究多集中于施氮量和灌水量等方面[15-17],且受大田试验条件的限制,以一定施肥条件下不同灌溉量和一定水分条件下不同施肥量的研究为主,灌水和施氮不仅影响小麦对氮素的吸收而且影响氮素尤其是硝态氮在土壤剖面的积累和淋溶[18]。Campbell 等[19]的研究表明,受灌溉水的影响,许多硝态氮的淋溶甚至发生在低于作物最佳施氮量的处理。合理的肥料施用配合适宜的水分管理可以减少硝态氮在土壤中的累积,实现肥料和水分的高效利用,从而减轻施肥对环境的负面效应[20]。本研究通过防雨棚池栽试验,设置不同水分和施肥处理组合,研究不同水分下施肥对旱地冬小麦主要生育时期 0~160 cm 土层土壤硝态氮的影响,以期为旱地冬小麦肥料和水分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2011—2012 年在陕西杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院的移动式防雨棚内进行。棚内设置栽培池,池壁为水泥砖墙,每池面积 2.13 m×3.15 m=6.7 m^2,深 2.5 m,分层填入相应深度挖出的过筛塿土,池底设滤层(0.5 m 厚沙子和碎石)。池内 0~40 cm 土壤的基本理化性状如表 1。

1.2 试验设计

试验为水分与肥料双因素随机区组设计,共 16 个处理,每池为 1 个重复,每个处理重复 3 次。供试小麦品种为“长旱 58”。播种前所有处理统一控制 0~200 cm 土层底墒为 650 mm,所有肥料播前一次性均匀施入,2011 年 10 月 18 日播种,2012 年 6 月 6 日收获。按照 2.25×10^4 株·hm^{-2} 的密度,人工点播,行距 25 cm。田间管理措施同高产大田。试验期间通过试验场内的大型电动防雨棚控制自然降水。

设置 4 个水分水平:依据年降雨量 400~600 mm 地区小麦生育期的实际降雨量,在控雨条件下,设计冬小麦生育期 0、112、156、200 mm 4 个补水量水平,按照小麦返青后(2 月至成熟)降雨量占生育期降雨的 50%,在小麦返青后分三次用水表控制,在栽培池内均匀补灌 0 mm(R0)、56 mm(R1)、78 mm(R2)、100 mm(R3)4 个不同水量水平(表 2)。

表 2 冬小麦生育期补水方案

Table 2 Schedule for irrigation during winter wheat growth

水分处理 Water rates/mm	补水量 Supplemental water amount/mm			
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	合计 Total
R0(0)	0	0	0	0
R1(56)	18.5	12.5	25.0	56.0
R2(78)	21.8	18.8	37.5	78.0
R3(100)	25.0	25.0	50.0	100.0

设置 4 个施肥水平:以不施肥(Y0)为对照,依据养分平衡规律(植物带出=投入利用),氮、磷、钾肥利用率分别以 35%、20%、30%计算,按照目标籽粒产量设计施肥水平 Y1(目标产量 2625 kg·hm^{-2})、Y2(目标产量 4875 kg·hm^{-2})、Y3(目标产量 7125 kg·hm^{-2})。N 用量:Y1(13.95 kg·hm^{-2})、Y2(97.5 kg·hm^{-2})、Y3(181.2 kg·hm^{-2})。P_2O_5 用量:Y1(4.65 kg·hm^{-2})、Y2(32.7 kg·hm^{-2})、Y3(60.6 kg·hm^{-2})。K_2O 用量:Y1(15.3 kg·hm^{-2})、

表 1 供试土壤基本理化性质(0~40 cm)

Table 1 Basal physical and chemical characteristics of soil(0~40 cm)

土层 Soil layer/cm	有机质 Organic matter/g·kg^{-1}	全氮 Total N/g·kg^{-1}	碱解氮 Alk-hydro N/mg·kg^{-1}	硝态氮 Nitric N/mg·kg^{-1}	速效磷 Available P/mg·kg^{-1}	速效钾 Available K/mg·kg^{-1}	土壤容重 Soil bulk density/g·cm^{-3}	pH
0~20	10.01	0.91	38.31	10.11	14.16	163.49	1.37	8.15
20~40	9.30	0.87	41.03	8.86	12.02	116.94	1.43	8.12

Y2(107.6 kg·hm^{-2})、Y3(199.8 kg·hm^{-2})。氮肥施用尿素(N,46%),磷肥施用过磷酸钙(P_2O_5,16%),钾肥施用硫酸钾(K_2O,50%)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤硝态氮含量测定

于冬小麦开花期、灌浆期、成熟期,分别在各小区按 20 cm 为一层用土钻取 0~160 cm 土层土样,每小区随机取两点,相同层次的土壤混合为 1 个样,立即装入自封袋中并置于-20 ℃冰柜冷冻保存。测定时将土壤鲜样解冻,充分混匀后过 1 mm 筛,称取 5 g 土壤样品,加入 25 mL 0.01 mol·L^{-1} 的 $CaCl_2$ 溶液浸提,振荡 30 min 后过滤,即为浸提液。用德国产 AA3 型连续流动分析仪测定土壤硝态氮含量,同时测定土壤含水量,计算干土硝态氮含量。

1.3.2 土壤硝态氮累积量计算

土壤硝态氮累积量(kg·hm^{-2})=土层厚度(cm)×土壤容重(g·cm^{-3})×土壤硝态氮含量(mg·kg^{-1})÷10

1.3.3 数据处理分析

用 Microsoft Excel 2007 处理数据、图表;DPS 7.5 进行数据统计分析,不同处理间多重比较采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 施肥对不同生育期 0~160 cm 土层土壤硝态氮含量的影响

2.1.1 开花期

开花期各土层硝态氮含量随土层深度增加呈逐渐降低的趋势(图 1),在 0~80 cm 以上土层较高,向 80 cm 以下土层运移较少。在 R0 水分条件下,0~100 cm 土层的土壤硝态氮含量均表现为施肥处理 Y1、Y2、Y3 显著大于不施肥处理 Y0(P<0.05),平均分别增加 111.3%、228.2%和 286.6%;100~140 cm 土层为 Y2、Y3>Y0、Y1(P<0.05);140~160 cm 土层各处理间无显著差异。R1 水分条件下,0~20 cm、80~120 cm 土层土壤硝态氮含量表现为处理 Y2、Y3 显著高于 Y0、Y1(P<0.05);20~80 cm 土层为 Y3>Y2>Y1>Y0(P<0.05);120~160 cm 土层各处理间土壤硝态氮含量均无显著差异。R2 水分条件下,0~160 cm 土层处理 Y2、Y3 的

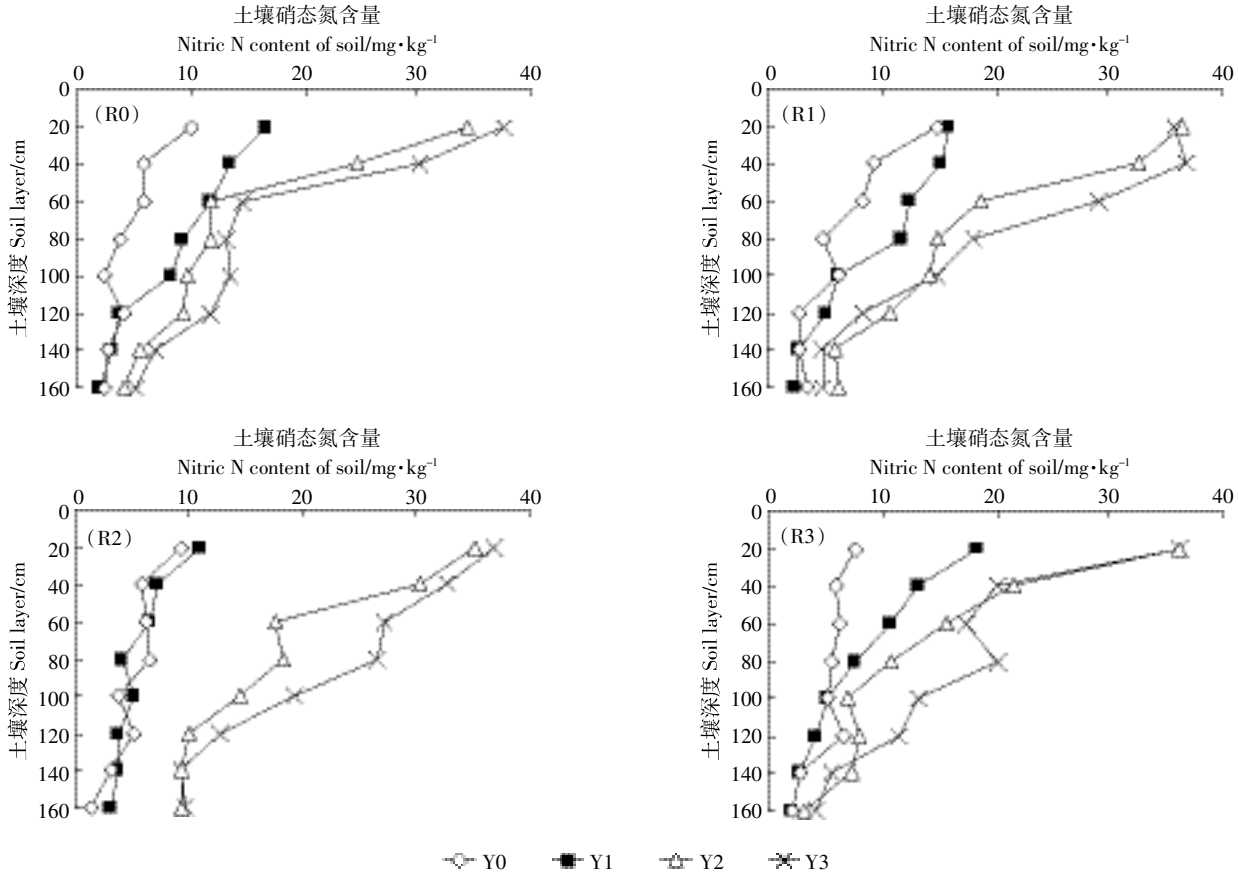

图 1 冬小麦开花期 0~160 cm 土层硝态氮含量

Figure 1 Contents of NO_3^--N in 0~160 cm soil layers at flowering stage of winter wheat

土壤硝态氮含量显著高于 Y0、Y1(P<0.05)。R3 水分条件下,0~60 cm 土层土壤硝态氮含量均表现为处理 Y2、Y3>Y1>Y0,Y1、Y2 和 Y3 较 Y0 分别增加 115.3%、273.6%和 274.2%(P<0.05);60~120 cm 土层硝态氮含量均表现为 Y3 处理显著高于其他处理。

以上结果表明,增加施肥量会导致冬小麦开花期上层(0~80 cm)土壤硝态氮含量明显增加,随着施肥量的增加,硝态氮含量也逐渐升高;随土壤水分的增加,施肥量 Y2、Y3 可导致下层硝态氮含量的增加,使硝态氮向下层土壤淋失的风险加大。

同一肥力水平下水分条件对土壤硝态氮含量的影响各不相同。Y0 水平下,0~40 cm 土层硝态氮含量表现为 R1>R0、R2、R3(P<0.05);40~160 cm 土层各处理间无显著差异。Y1 水平下,0~60 cm 土层硝态氮含量表现为 R0、R1、R3>R2(P<0.05);60~160 cm 土层各处理间无显著差异。Y2、Y3 水平下,0~160 cm 土层硝态氮含量各处理间无显著差异。

2.1.2 灌浆期

与开花期相比,灌浆期土壤硝态氮含量较高的土层下移至 80~100 cm,说明随着生育进程的推进,土壤硝态氮有下移趋势(图 2)。在 R0 水分条件下,0~100 cm 土层的土壤硝态氮含量均表现为 Y3>Y2>Y1、Y0(P<0.05),Y2、Y3 较 Y0 分别增加 150.8%、269.1%;100~160 cm 土层,Y3 处理显著大于其他处理(P<0.05)。施肥量 Y2、Y3 增加了 0~80 cm 土层的土壤硝态氮含量,并分别在 60~80 cm、80~100 cm 处出现明显累积峰。R1 水分条件下,0~100 cm 土层硝态氮含量也表现为 Y2、Y3>Y1、Y0(P<0.05);100~160 cm 土层,Y1、Y2、Y3 较 Y0 分别增加 137.7%、201.7%、197.7%(P<0.05)。R2 水分条件下,0~60 cm 土层处理 Y2 和 Y3 土壤硝态氮含量分别较 Y0 增加 126.31%、149.44%(P<0.05);60~160 cm 土层硝态氮含量各处理间均无显著差异。R3 水分条件下,0~140 cm 土层土壤硝态氮含量均表现为处理 Y2、Y3 显著高于 Y0 和 Y1(P<0.05),在 0~80 cm 土层处理 Y1 显著高于 Y0(P<0.05)。表明施肥增加了灌浆期 0~100 cm 土层的土壤硝态氮含量;在补水条件下,较高的施肥量(Y2、Y3)会导致下层土壤硝态氮含量增加。

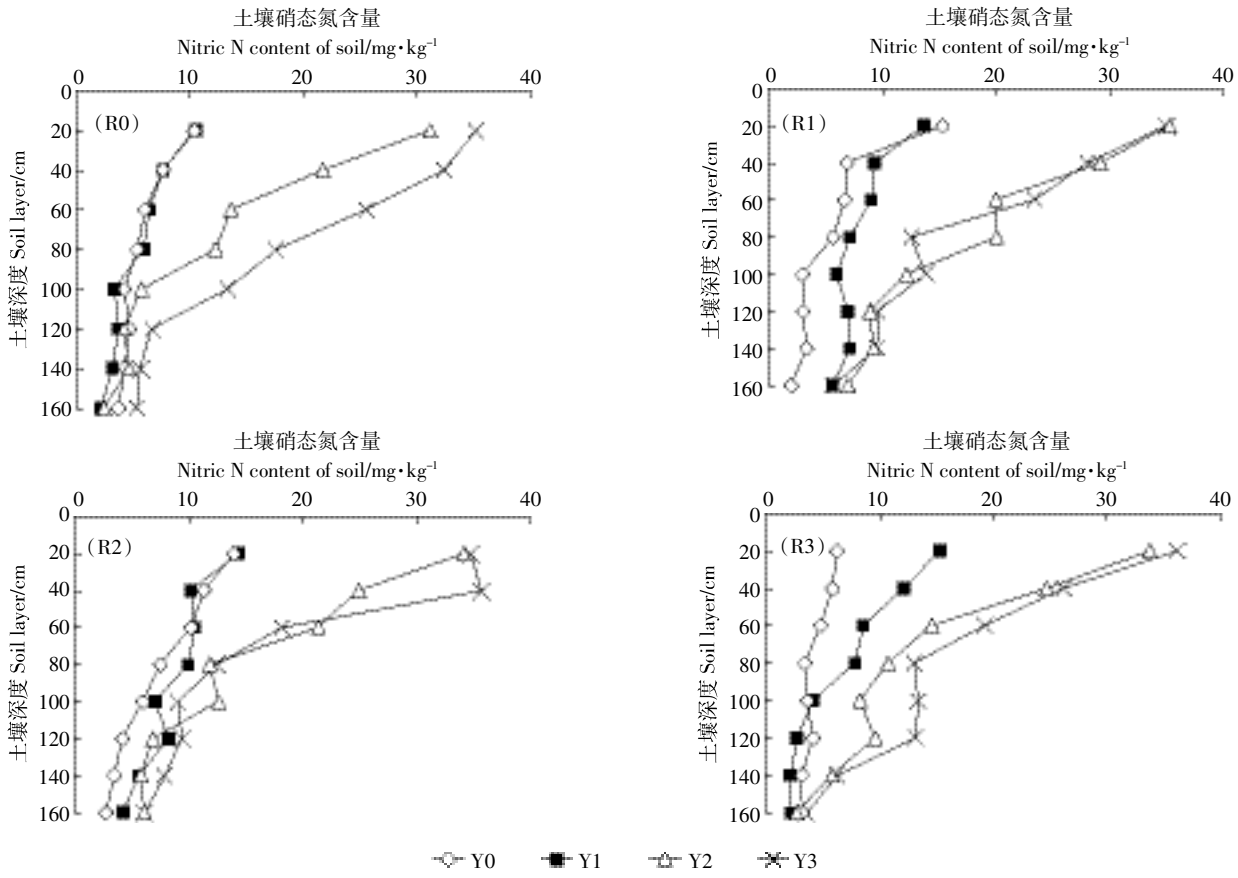

图 2 冬小麦灌浆期 0~160 cm 土层硝态氮含量

Figure 2 Contents of NO_3^--N in 0~160 cm soil layers at filling stage of winter wheat

同一肥力水平下水分条件对土壤硝态氮含量的影响表现为处理 R1、R2 的浅层(0~40 cm)土壤硝态氮含量大于 R0、R3,这可能是因为土壤水分不足时硝态氮的产生受到了抑制,而高土壤水分增加了作物对氮素的吸收。

与开花期相比,冬小麦灌浆期各处理上层(0~100 cm)土壤硝态氮含量无明显变化,100~160 cm 土层硝态氮含量有一定减少,在 R2、R3 水分条件下减少幅度较大,可能是由于氮素被植株吸收利用和随水分迁移造成的。

2.1.3 成熟期

如图 3 所示,在 R0、R1 水分条件下,0~100 cm 土层的土壤硝态氮含量均表现为 Y2、Y3 显著大于 Y0、Y1 (P<0.05),其中在 R0 条件下,Y1 处理在 60~80 cm 土层出现硝态氮累积峰;100~160 cm 土层各处理间硝态氮含量均无显著差异。R2 水分条件下,0~40 cm 土层土壤硝态氮含量表现为 Y2、Y3>Y1、Y0(P<0.05);40~140 cm 土层 Y3 处理的土壤硝态氮含量显著高于其他处理(P<0.05);140~160 cm 土层硝态氮含量各处理间无显著差异。R3 水分条件下,0~40 cm 土层土壤硝态氮含量表现为 Y2、Y3>Y0、Y1,差异显著(P<0.05);40~80 cm 土层为 Y3>Y2>Y0、Y1(P<0.05),Y1 与 Y0 间无显著差异;80~160 cm 土层各处理间硝态氮含量无显著差异。以上结果说明,施肥量 Y2、Y3 增加了 0~80 cm 土层的土壤硝态氮含量;施肥量 Y3 可显著增加 R2 水分条件下 40~140 cm 土层的土壤硝态氮含量。

同一肥力水平下水分对硝态氮含量的影响:Y0水平下,0~20 cm 土层硝态氮含量表现为 R2>R0、R1、R3(P<0.05);60~100 cm 土层表现为 R1、R2、R3>R0(P<0.05);其余土层硝态氮含量各处理间无显著差异。Y2 水平下,0~20 cm 土层硝态氮含量表现为 R2、R3>R0、R1(P<0.05);20~160 cm 土层硝态氮含量各处理间无显著差异。Y1、Y3 水平下,0~160 cm 土层硝态氮含量各处理间无显著差异。

随着生育期的推进和灌浆期的补水,R0 水分条件下成熟期 0~160 cm 土层硝态氮较灌浆期有不同程度的增加;在 R1、R2、R3 水分条件下,80 cm 以下土层土壤硝态氮含量均有明显降低。说明硝态氮的迁移对水分的响应非常灵敏,随着生育期的推进,在较高

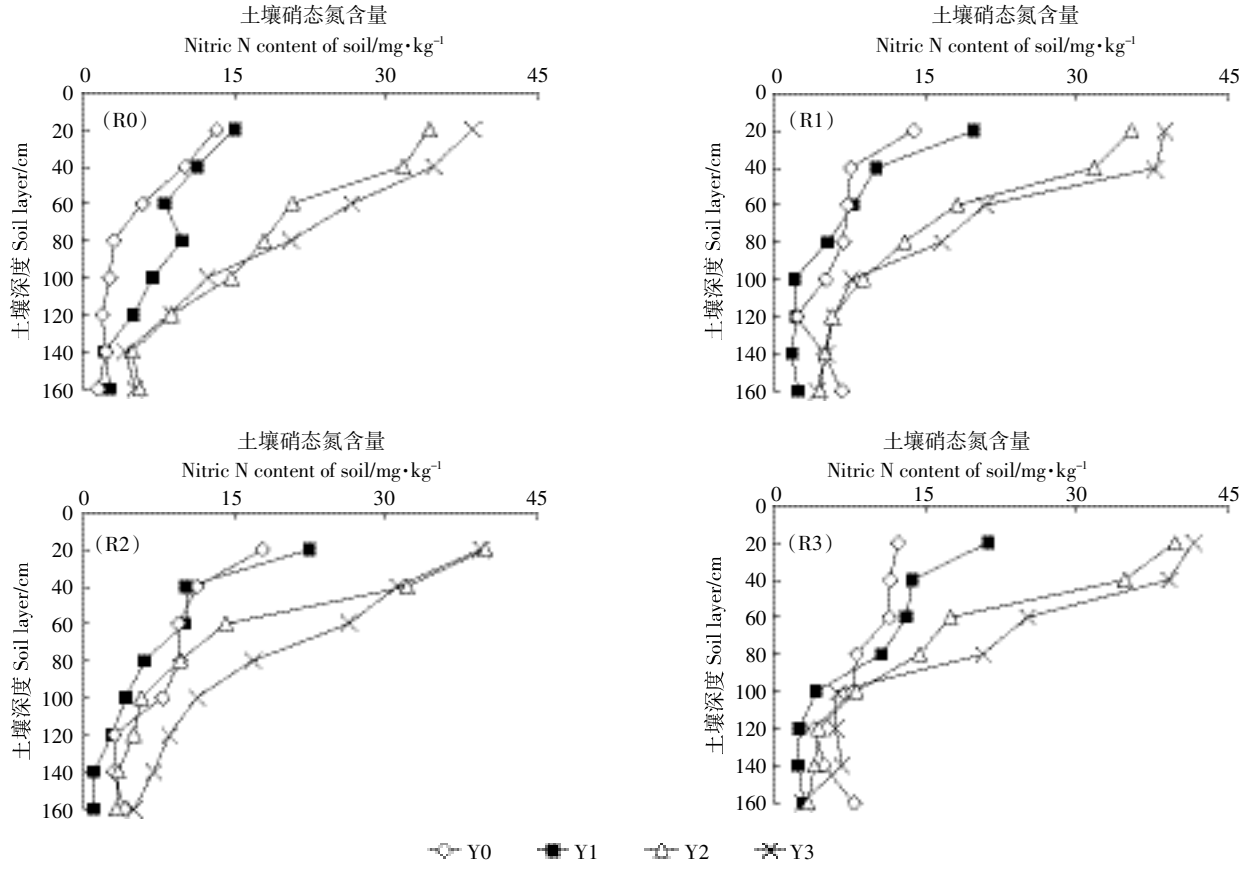

图 3 冬小麦成熟期 0~160 cm 土层硝态氮含量

Figure 3 Contents of NO_3^--N in 0~160 cm soil layers at maturity stage of winter wheat

水分条件下,80 cm 以下土层土壤硝态氮向深层淋溶加剧。

2.2 施肥对土壤剖面硝态氮累积的影响

如表 3 所示,开花期 0~160 cm 土层的土壤硝态氮累积量与 0~80 cm 土层表现一致:Y3>Y2>Y1>Y0,在 R0、R1、R3 水分条件下各处理间均差异显著($P<0.05$),R2 水分条件下仅 Y0、Y1 间差异不显著。80~160 cm 土层的土壤硝态氮累积量表现为:R0 水分条件下,Y3>Y2>Y1>Y0($P<0.05$);R1 水分条件下为 Y2、Y3 显著大于 Y0、Y1 ($P<0.05$);R2 、R3 水分条件下为 Y3>Y2>Y0、Y1。随施肥量的增加,土壤硝态氮累积量逐渐增加;当施肥量大于 Y2 水平时,显著增加了 0~160 cm 土层中土壤硝态氮累积量,且主要增加了 80~160 cm 土层中的累积量。

成熟期,在 R0、R1、R3 水分条件下,施肥处理的 0~80 cm 土层土壤硝态氮累积量显著高于不施肥处理($P<0.05$),其中 Y3 处理最高,Y2 次之;R2 水分条件下,Y3>Y2>Y0、Y1($P<0.05$)。80~160 cm 土层中的硝态氮累积量表现为:R0 水分条件下,Y2、Y3>Y1>Y0($P<0.05$);R1、R2、R3 水分条件下均为其他处理显著大于 Y1($P<0.05$),Y3 处理最高。0~160 cm 土层,在 R0 水分条件下, 土壤硝态氮累积量表现为:Y3>Y2>Y1>Y0($P<0.05$);在 R1 水分条件下为 Y2、Y3 显著高于 Y0、Y1 ($P<0.05$);R2、R3 水分条件下为 Y3>Y2>Y0、Y1 ($P<0.05$)。表明当施肥量大于 Y2 水平时,可显著增加 0~160 cm 土层中土壤硝态氮累积量, 增加淋溶的可能性。经过一季冬小麦的生长消耗,成熟期 0~160 cm 土体的硝态氮累积主要集中在 0~80 cm 土层,成熟期 80~160 cm 土层硝态氮累积量较开花期显著降低。

3 讨论

在北方旱区农田,施入土壤的氮大部分经硝化作用被氧化成硝态氮, 是作物吸收利用的主要形态,硝态氮在土体中的大量积累在遇到较强降雨和灌水时会导致其向下淋溶损失[21]。关于施氮量对土壤硝态氮影响的研究结论基本一致,即随施氮量增加,各土层硝态氮含量显著增加,长期大量施用氮肥会造成硝态氮在土壤中的累积[22-24]。亦有研究认为,高施氮量促进作物氮素吸收, 以致当施氮量超过作物最佳需氮量时,土壤硝态氮含量变化很小[14]。Bergstrom 等[25]研究表明,施氮量小于 100 kg·hm^{-2} 时,硝酸盐的淋失量缓和,施氮量在 100~200 kg·hm^{-2},淋失量随着施氮量的增加而增加。土壤水分对硝态氮运移的影响研究结论

表 3 平衡施肥对开花期和成熟期土壤硝态氮累积量的影响(kg·hm^{-2})

Table 3 Effects of balanced fertilization on soil NO_3^--N accumulation at flowering and maturity stages of winter wheat(kg·hm^{-2})

处理 Treatment		开花期 Jointing stage			成熟期 Maturity stage		
		0~80 cm	80~160 cm	0~160 cm	0~80 cm	80~160 cm	0~160 cm
R0	Y0	72.55d	33.21d	105.76d	90.91d	24.13c	115.04d
	Y1	144.54c	49.59c	194.13c	125.20c	48.42b	173.62c
	Y2	232.81b	81.76b	314.57b	295.11b	97.33a	392.44b
	Y3	269.30a	107.31a	376.61a	339.90a	86.73a	426.63a
R1	Y0	107.16d	43.73b	150.89d	100.53c	55.07a	155.60b
	Y1	157.12c	47.31b	204.43c	121.50b	24.48b	145.98b
	Y2	288.90b	106.84a	395.74b	295.53a	69.67a	365.20a
	Y3	338.25a	95.12a	433.36a	303.62a	66.17a	369.79a
R2	Y0	79.07c	38.56c	117.63c	135.90c	51.93b	187.83c
	Y1	82.20c	44.57c	126.77c	137.70c	26.72c	164.42c
	Y2	285.33b	122.09b	407.42b	269.37b	50.26b	319.63b
	Y3	348.93a	145.84a	494.76a	321.03a	91.88a	412.91a
R3	Y0	71.53d	48.35c	119.88d	122.92d	55.12b	178.04c
	Y1	141.36c	41.17c	182.53c	166.10c	35.00a	201.09c
	Y2	237.13b	73.71b	310.84b	299.92b	57.43a	357.35b
	Y3	263.98a	98.37a	362.35a	357.20a	63.20a	420.40a

注:同一列数字后不同字母间差异达 5%的显著水平。

Note: Values with different letters in the same column are significantly different at 5% level.

不尽一致。陈子明等[26]对潮土的研究表明[26],土壤硝态氮的淋失与土壤水分含量有关,灌水量或降水量越多,土壤水分条件越好,硝态氮淋失就越多。王晓英等[27]认为,灌水是导致冬小麦收获期 0~100 cm 土层中硝态氮累积量提高的主导因素,施氮量和灌水共同影响了硝态氮向深层的淋失,且灌水效应大于施氮效应。但也有研究表明,在作物生长期,虽然灌水量较大,但硝态氮的淋失并不多[28]。高亚军等[29]进行的水氮互作研究也表明,施氮量是造成土壤中硝态氮累积的主要因素,但灌水量对硝态氮积累量的影响较小。

本研究结果表明,冬小麦不同生长阶段,同一施肥水平下,不同水分条件对 0~160 cm 土层土壤硝态氮含量无显著影响。在同一水分条件下,随施肥量的增加,土壤硝态氮含量增加,当施肥量大于 Y2 水平时,0~80 cm 土层土壤硝态氮含量增加,加大了向下层土壤淋失的风险。开花前土壤中的硝态氮主要集中在 0~80 cm 土层,向 80 cm 土层以下运移较少。灌浆期与开花期相比,硝态氮在土体中的移动加深,在 80~100 cm 土层硝态氮含量有一定程度的减少,一方面可能是因为冬小麦植株的吸收利用,另外,随着水分的迁移,一部分氮素也会向下淋失。成熟期与灌浆期相比,R0 水分条件下 0~160 cm 土层土壤硝态氮在土体中的移动继续向下加深;其他水分条件下,0~80 cm 土层土壤硝态氮含量无明显变化,80 cm 以下土层土壤硝态氮含量明显降低,说明随着生育期的推进,在较高水分条件下,下层的土壤硝态氮向深层淋溶加剧,不利于肥料利用率的提高。

冬小麦开花期,各水分条件下,0~160 cm 土层的土壤硝态氮累积量随施肥量的增加而逐渐增加,当施肥量大于 Y2 水平时,80~160 cm 土层土壤硝态氮累积量显著增加。成熟期各水分条件下,当施肥量大于 Y2 水平时,可显著增加 0~80 cm 土层土壤硝态氮累积量,而 80~160 cm 土层中各处理间土壤硝态氮累积量较开花期显著降低,这可能同时受冬小麦吸收和硝态氮随水分迁移淋溶的影响。

4 结论

根据不同施肥量对冬小麦 0~160 cm 土层土壤剖面的硝态氮含量和硝态氮累积量的影响结果,从满足冬小麦的营养需求、减少土壤硝态氮的累积从而降低环境危害、提高肥料利用效率以增加肥料效益等方面综合考虑,3 种不同水分条件下冬小麦的合理施肥量以 Y2 水平(N 97.5 kg·hm^{-2}、P_2O_5 32.7 kg·hm^{-2}、K_2O 107.6 kg·hm^{-2})为宜。

参考文献:

[1] Dana L D, Douglas L K, Dan B J, et al. Nitrogen management strategies to nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94:153- 171.

[2] Rampino P, Pataleo S, Gerardi C, et al. Drought stress response in wheat:Physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29(12):2143-2152.

[3] 杨新泉, 冯 锋, 宋长青, 等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):373-376.
YANG Xin-quan, FENG Feng, SONG Chang-qing, et al. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystems[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3):373-376.

[4] Nosengo N. Fertilized to death[J]. *Nature*, 2003, 425(6961):894-895.

[5] 张庆忠, 陈 欣, 沈善敏. 农田土壤硝酸盐积累与淋失研究进展[J]. 应用生态学报, 2002(2):233-238.
ZHANG Qing-zhong, CHEN Xin, SHEN Shan-min. Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002(2):233-238.

[6] 赵海祯, 梁哲军, 齐宏立, 等. 不同时期水肥藕合对旱地小麦光合特性和产量的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(增刊):61-65.
ZHAO Hai-zhen, LIANG Zhe-jun, QI Hong-li, et al. Effect of irrigation combined with fertilization in different stage of wheat on photosynthetic characteritics and yield in dry land field[J]. *Acta Agriculae Boreali-Sinica*, 2002, 17(Suppl):61-65.

[7] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):270-277.
ZHANG Shu-lan, TONG Yan-an, LIANG Dong-li, et al. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):270-277.

[8] 程 杰, 高亚军, 强 秦. 渭北旱塬小麦不同栽培模式对土壤硝态氮残留的影响[J]. 水土保持学报, 2008(4):104-110.
CHEN Jie, GAO Ya-jun, QIANG Qin. Effects of different wheat cultivation methods on residual nitrate nitrogen in soil in Weibei dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008(4):104-110.

[9] 杨玉惠, 张仁陟. 氮肥施用对黄土高原中部雨养农业区土壤硝态氮分布与累积的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(4):672-676.
YANG Yu-hui, ZHANG Ren-zhi. Effects of nitrogen rate on the distribution and accumulation of soil residual nitrate in the rainfed agricultural region of the middle loess plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4):672-676.

[10] Chaney K. Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrate-nitrogen content after harvesting winter wheat[J]. *Agricultural Science*, 1990, 114:171-176.

[11] 张维理, 田哲旭, 张 宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2):80-87.
ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investgation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(2):80-87.

[12] 张明泉, 高洪宣, 吴克俭. 兰州马滩水源地 NO_3^--N 污染环境条件分析[J]. 环境科学, 1990, 11(5):79-82.
ZHANG Ming-quan, GAO Hong-xuan, WU Ke-jian. A survey on the cause of nitric radical(NO_3^--N) pollution in Matan water-supply, source site of Lanzhou City[J]. *Environmental Science*, 1990, 11(5): 79-82.

[13] 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):405-413.
LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Yun-gui, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rual areas of Beijng plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):405-413.

[14] Ottman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soils influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 64(5):1883-1892.

[15] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3040-3048.
DUAN Wen-xue, YU Zhen-wen, ZHANG Yong-li, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen absorption, translocation and nitrate nitrogen content in soil of dryland wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(15):3040-3048.

[16] 姜东燕, 于振文. 灌溉量对冬小麦产量和土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3):703-705.
JIANG Dong-yan, YU Zhen-wen. Effects of irrigation rate on the yield of wheat and the content of soil nitrate[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3):703-705.

[17] 蒋会利, 温晓霞, 廖允成. 施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):237-241.
JIANG Hui-li, WEN Xiao-xia, LIAO Yun-cheng. Effects of nitrogen application on winter wheat yield and translation of soil NO_3^--N[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):237-241.

[18] 栗 丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮互作对冬小麦氮素吸收分配及土壤硝态氮积累的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):138-142.
LI Li, HONG Jian-ping, WANG Hong-ting, et al. Effects of nitrogen and irrigation winter wheat interaction on nitrogen uptake and distribution in and nitrate accumulation in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):138-142.

[19] Campbell C A, Zentner R P, Selles F, et al. Nitrate leaching as influenced by fertilization in the brown soil zone[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1993, 73:387-397.

[20] 杨治平, 陈明昌, 张 强, 等. 不同施氮措施对保护地黄瓜养分利用效率及土壤氮素淋失影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2):57-60.
YANG Zhi-ping, CHEN Ming-chang, ZHANG Qiang, et al. Effects of different fertilizer measurement on nutrient utilization in cucumber and nitrate leaching loss from soil in greenhouse[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2):57-60.

[21] Harmsen K. Nitrogen fertilizer use in rain fed agriculture[J]. Fertilizer research, 1984, 5(4):371-382.

[22] Guillard K, Griffin G F, Allinson D W, et al. Nitrogen utilization of selected cropping system in the US Northeast:Soil profile nitrate distribution and accumulation[J]. *Journal of Agronomy*, 1995, 87:199-207.

[23] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2):111-124.

[24] Malhi S S, Brandt S A, Ulrich D et al. Accumulation in the soil profile under various alternative cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 25:2499-2520.

[25] Bergstrom L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N leaching plisses and distribution of inorganic N in soil[J]. *Plant Soil*, 1986, 93(3):333-345.

[26] 陈子明, 袁锋明, 姚造华, 等. 北京潮土 NO_3^--N 在土体中的移动特点及其淋失动态[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2):73-81.
CHEN Zi-ming, YUAN Feng-ming, YAO Zao-hua, et al. The movement and leaching loss of NO_3^--N in profile of Chao soil in Beijing[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(2):71-81.

[27] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2):685-694.
WANG Xiao-ying. HE Ming-rong, LIU Yong-huan, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movment across soil profile in winter wheat field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2):685-694.

[28] 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1):16-21.
FAN Bing-quan, HU Chun-fang, PING Jian-li. Effect of irrigation and fertilization on nitrate leaching in loamy Fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(1):16-21.

[29] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6):63-66.
GAO Ya-jun, LI Sheng-xiu, LI Shi-qing, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6):63-66.