

DOI: 10.5846/stxb201301280182

杨宪龙,路永莉,同延安,马海洋,陈毓君,丁燕.陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量.生态学报,2014,34(21):6115-6123.

Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, Ma H Y, Chen Y J, Ding Y. Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain, Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6115-6123.

陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量

杨宪龙^{1,2}, 路永莉^{1,2}, 同延安^{1,2,*}, 马海洋^{1,2}, 陈毓君^{1,2}, 丁 燕^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为了确定陕西关中小麦-玉米轮作区兼顾作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量, 通过玉米-小麦-玉米连续 3 季田间试验研究了作物产量、氮肥利用效率、氮肥表观损失和土壤氮素平衡等对施氮量的响应。结果表明, 随着氮肥用量的增加, 不同年份作物产量和 3 季作物累计产量均表现为先增加后降低的趋势, 而累计氮肥农学效率、氮肥表观利用率、氮肥吸收效率和氮肥偏生产力均表现为显著的降低趋势。土壤氮素平衡结果表明, 随着施氮量的增加, 低量施氮时 (小麦施 N < 150 kg/hm², 玉米施 N < 180 kg/hm²), 氮肥残留显著增加, 表观损失和损失率变化不明显, 而高量施氮时 (小麦施 N > 150 kg/hm², 玉米施 N > 180 kg/hm²), 氮肥残留变化不明显, 表观损失和损失率却显著增加。回归和相关分析显示, 矿质氮在土壤较深层次 (100—200 cm 土层) 大量累积是氮肥表观损失的重要途径之一。小麦施 N 150 kg/hm²、玉米施 N 180 kg/hm² 时, 作物即可获得相对较高的产量和氮肥利用率, 且能保持作物收获前后土壤无机氮库的基本稳定, 同时也可将氮肥表观损失降至较低水平。

关键词: 小麦-玉米轮作体系; 适宜施氮量; 产量; 残留; 表观损失

Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain, Shaanxi Province

YANG Xianlong^{1,2}, LU Yongli^{1,2}, TONG Yan'an^{1,2,*}, MA Haiyang^{1,2}, CHEN Yujun^{1,2}, DING Yan^{1,2}

1 College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, MOA, Yangling 712100, China

Abstract: The objective of this field study was to determine the N application rate which would both maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation district of the Guanzhong Plain, Shaanxi Province. The study included six treatments replicated three times: N0 (no N application to either wheat or maize), N1 (113 kg N/hm² to wheat + 135 kg N/hm² to maize), N2 (150 kg N/hm² to wheat + 180 kg N/hm² to maize), N3 (188 kg N/hm² to wheat + 225 kg N/hm² to maize), N4 (225 kg N/hm² to wheat + 270 kg N/hm² to maize), and N5 (300 kg N/hm² to wheat + 360 kg N/hm² to maize). The study was conducted over 1.5 yr (maize-wheat-maize). The effects of N application rate on crop yield, N fertilizer use efficiency, apparent N loss, and N budget in the 0—100 cm depth were determined. The results showed that annual crop yield and cumulative crop yield both increased and then decreased as N application rate increased. In contrast, cumulative N agronomic efficiency, apparent N utilization, N uptake efficiency, and N partial productivity decreased significantly as N application rate increased. Calculation of the N budget in the 0—100 cm depth showed that residual mineral-N concentrations were significantly higher in the N2 treatment than in the N1 treatment, but apparent N loss and

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (20100314); 高等学校学科创新引智计划 (B12007)

收稿日期: 2013-01-28; 网络出版日期: 2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

loss rates were nearly the same in the two treatments. In contrast, residual mineral-N concentrations were nearly the same in the N3, N4, and N5 treatments, but apparent N loss and loss rate increased significantly in the order $N3 < N4 < N5$. Regression and correlation analysis indicated that excessive N fertilizer application resulted in the build-up of mineral-N concentrations in the deep soil profile. This build-up contributed significantly to apparent N loss. In conclusion, the application of 150 kg N/hm^2 to wheat and 180 kg N/hm^2 to maize resulted in relatively high yield and N use efficiency. These application rates also maintained residual mineral-N concentrations and reduced apparent N losses.

Key Words: wheat-maize rotation system; optimal N rate; yield; mineral-N residual; apparent N loss

氮肥投入已成为现代农业增产必不可少的措施之一^[1-3]。然而,大量研究表明^[4-8],作物产量并不随氮肥用量的增加而一直增加,当施氮量超过一定范围后,产量不再增加甚至降低,而氮肥各种途径的损失量却显著增加,进而造成资源浪费和氮素环境污染问题。可见,确定一个兼顾作物产量和环境效应的适宜氮肥用量意义重大。目前,围绕农田适宜施氮量的问题国内外已开展了大量的研究^[9-13]。一些地广人稀的西方发达国家可以通过降低氮肥用量,不惜牺牲部分产量来减轻氮肥施用对环境压力。然而,这样的措施对于当下人口与耕地矛盾日益突出的中国早已失去了借鉴意义。为保障我国粮食安全,在未来较长一段时间内将会继续依靠大量化肥投入增加作物产量^[1,3,14]。关于施氮与作物产量的关系,即氮肥农学效益问题,国内外已经形成了较为统一的认识。普遍认为,作物产量与施氮符合报酬递减律,并尝试利用二次抛物线、线性+平台和二次式+平台等模型^[9,15]模拟作物产量随施氮量的变化趋势。对于氮肥的损失问题,国内外也开展了大量氨挥发^[16-17]、硝化-反硝化 N_2O 排放^[18-19]和淋溶损失^[16,20]等方面的研究,基本查明了主要农田生态系统中各损失途径的数量、比例及其与氮肥用量的关系^[21]。但这些研究多集中在华北平原小麦/玉米和南方水稻作物上。关中平原是陕西省乃至中国重要的小麦、玉米等粮食作物的生产基地,然而结合本地区气候特征、土壤类型和种植制度等开展的适宜氮肥用量研究偏少,且多为单季试验。鉴于此,本文通过玉米-小麦-玉米连续3季作物试验,阐述了该地区作物产量对不同施氮水平的响应及其环境效应,旨在为当地农民氮肥优化管理提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2011年6月—2012年10月在陕西杨凌西北农林科技大学农作三站进行。试验站地处关中平原西部,年均气温 13°C , 年均蒸发量 993 mm , 年均降水量 $550\text{--}650 \text{ mm}$, 且多集中在7—9月份,无霜期 $184\text{--}216 \text{ d}$, 属暖温带半湿润偏旱气候。实行冬小麦-夏玉米轮作的一年两熟制。第1季夏玉米于2011年6月16日播种,2011年10月13日收获。第2季冬小麦于2011年10月16日播种,2012年6月8日收获。第3季夏玉米于2012年6月10日播种,2012年10月12日收获。供试土壤为当地典型土壤类型-壤土。试验开始前测得耕层土壤基础理化性状为:有机质 15.0 g/kg , 全氮 0.91 g/kg , 速效磷 4.5 mg/kg , 速效钾 142.7 mg/kg 。0—100 cm 土体各层次(以20 cm计)的土壤容重分别为 1.481 、 1.589 、 1.586 、 1.467 和 1.511 g/cm^3 , 100 cm 土层以下均以 1.511 g/cm^3 计算。0—200 cm 矿质氮(硝态氮和铵态氮之和)含量分别为 43.2 、 31.7 、 23.6 、 25.3 、 31.7 、 30.4 、 24.9 、 20.2 、 22.8 和 25.4 kg/hm^2 。

1.2 试验设计

试验选取土壤肥力均一、灌溉便捷、区域代表性较强的田块进行。按不同施氮梯度共设6个处理,3次重复,共计18个小区,小区面积 $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 田间完全随机排列。各处理依次用代号 N0、N1、N2、N3、N4 和 N5 表示。小麦季各处理施氮量(以纯 N 计)依次为 0 、 113 、 150 、 188 、 225 和 300 kg/hm^2 , 施磷量(以 P_2O_5 计)均为 120 kg/hm^2 , 不施钾。玉米季施氮量各处理依次为 0 、 135 、 180 、 225 、 270 和 360 kg/hm^2 , 施磷量和施钾量(以 K_2O 计)各处理一致,分别为 40 kg/hm^2 和 120 kg/hm^2 。小麦、玉米品种分别为小偃

22 和郑单 958。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用普通过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥用氯化钾(含 K_2O 60%)。小麦季磷肥和 40%氮肥在播前一次性撒施,然后翻耕入土,另 60%氮肥于返青后拔节前追施。玉米季磷、钾肥在 5 叶期施入。氮肥分 2 次施,50%于 5 叶期施入,另 50%于喇叭口期追施。灌溉、除草等其他田间管理措施参照当地农民习惯进行。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土样采集与测定

试验开始前在保护行内挖 0—100 cm 土壤剖面,采用环刀法测定每 20 cm 土层的土壤容重,并在试验小区内部按“S”形路线采集混合土样,测定基础养分含量。第 1 季和第 3 季玉米收获时,分 0—20 cm、20—40 cm、…、180—200 cm 共 10 个层次采集土样。各小区随机采集 5 个点,按层次混匀,制成混合样,然后立即带回实验室冷冻保藏(−20℃)。一周内测定含水量、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N。含水量采用常规的烘干法测定。 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 测试当天将土样混匀后过 2 mm 筛,用 0.01 mol/L $CaCl_2$ 浸提,然后采用 cleverchem200 间断化学分析仪测定。

1.3.2 植株样品采集与测定

冬小麦收获时,采收一定面积(5 m×3 m)的小麦样品带回,风干、脱粒,分籽粒和秸秆两部分称量其干重,然后以采样面积折算生物量。夏玉米收获时,所有小区分穗和秸秆两部分全部收获,分别称量秸秆和穗鲜重。然后各小区随机取 20 个玉米穗和部分秸秆带回。风干后脱粒,然后称量干重,以小区总鲜重折算生物量。小麦和玉米植株样品的制备分籽粒和秸秆两部分进行,将小麦和玉米样品烘干、粉碎、混匀,然后用浓 H_2SO_4 - H_2O_2 消解,采用凯氏定氮法测定籽粒和秸秆的氮含量。

1.4 数据计算与统计分析

试验数据绘图和统计分析分别采用 Excel 2007 和 SAS 9.1 软件进行,多重比较采用 Duncan 法,差异显著性水平 $P = 0.05$ 。分析过程所用的计算公式如下^[6, 24-25]:

累计氮肥农学效率(kg/kg) = (施氮区累计产量 - 对照区累计产量) / 累计氮肥投入

累计氮肥生理利用率(kg/kg) = (施氮区累计产量 - 对照区累计产量) / (施氮区累计吸氮量 - 对照区累计吸氮量)

累计氮肥表观利用率(%) = (施氮区累计吸氮量 - 对照区累计吸氮量) / 累计氮肥投入 × 100

累计氮肥吸收效率(kg/kg) = 施氮区累计吸氮量 / 累计氮肥投入

累计氮肥偏生产力(kg/kg) = 施氮区累计产量 / 累计氮肥投入

残留 N_{min} (以 20 cm 分层计算)(kg/hm²) = 20 × 土壤容重 × N_{min} 浓度 / 10

氮素表观矿化量(kg/hm²) = 对照区作物吸氮量 + 对照区收获后残留 N_{min} - 对照区播前 N_{min} 氮素表观损失量(kg/hm²) = 氮素总投入 - 作物氮素吸收 - 土壤残留 N_{min}

氮肥表观残留率(%) = (施氮区土壤残留 N_{min} - 对照区土壤残留 N_{min}) / 施氮量 × 100

氮肥表观损失率(%) = 100 - 氮肥表观利用率 - 氮肥表观残留率

2 结果

2.1 不同施氮水平对作物产量的影响

不同施氮水平对小麦-玉米轮作体系连续 3 季作物产量的影响如表 1 所示。结果表明,适量施氮可以显著提高作物产量。随着氮肥用量的增加,不

表 1 不同施氮水平对作物产量的影响(2011—2012 年)

Table 1 Effect of N fertilizer rate on grain yield in a maize-wheat-maize cropping season during 2011 and 2012

处理 Treatment	2011 年玉米 Maize in 2011		2012 年小麦 Wheat in 2012		2012 年玉米 Maize in 2012	
	产量 Yield / (kg/hm ²)	增幅 Increase/%	产量 Yield / (kg/hm ²)	增幅 Increase/%	产量 Yield / (kg/hm ²)	增幅 Increase/%
N0	6331±205.9 b	—	6647±354.8 b	—	6982±476.2 b	—
N1	6610±125.1 ab	4.4	8239±260.4 a	23.9	7955±622.9 ab	13.9
N2	6729±271.0 a	6.3	8518±391.3 a	28.1	8218±280.0 a	17.7
N3	6867±259.2 a	8.5	8211±207.3 a	23.5	7687±841.3 ab	10.1
N4	7001±182.0 a	10.6	8165±340.1 a	22.8	7869±872.2 ab	12.7
N5	6694±147.7 ab	5.7	7982±516.3 a	20.1	7662±326.0 ab	9.8

同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著性水平

同年份作物产量并不按比例相应增加,而是呈现报酬递减的规律,甚至表现为先增加后降低的趋势。由于 2012 年玉米种植适当增加了密度,由 2011 年约 3300 株/666.7m²(株距 34 cm,行距 60 cm)增加至约 4000 株/666.7m²(株距 28 cm,行距 60 cm),各处理产量明显高于 2011 年,但不同年份处理间玉米产量对施氮的响应规律是一致的。结合方差分析可知,小麦施 N 150 kg/hm²、玉米施 N 180 kg/hm²时(N2),连续 3 季作物均能获得相对较高的产量(6729 kg/hm²、8518 kg/hm²和 8218 kg/hm²),较对照处理 N0 的增幅依次为 6.3%、28.1%和 17.7%($P<0.05$)。施氮量过高或过低在一定程度上都会存在减产的风险。

2.2 不同施氮水平对作物氮素吸收和利用的影响

不同施氮水平对玉米-小麦-玉米连续 3 季作物累计氮素吸收和利用的影响如表 2 所示。结果显示,施氮能显著提高作物地上部氮素吸收量,较对照

处理 N0 的增幅为 27.1%—36.2% ($P<0.05$)。随着处理氮肥用量的增加,作物累计氮素吸收量呈先增加后降低的趋势,N3 最大,为 757.8 kg/hm²,显著高于 N1 ($P<0.05$),其他施氮处理间差异不显著。为了衡量与评价不同施氮水平对作物氮素吸收利用的影响,特选取 5 个国内外较为常用的评价指标,进行了 3 季作物的累计计算,公式见 1.4。回归分析显示,随着氮肥用量的增加,累计氮肥农学效率和氮肥表观利用率呈显著的线性降低趋势,回归方程依次为: $y = -0.0083x + 10.536$ ($R^2 = 0.9365^*$) 和 $y = -0.0393x + 55.819$ ($R^2 = 0.9845^*$)。但部分处理间差异不显著,这可能与处理氮水平差异设置的大小有关。累计氮肥吸收效率和氮肥偏生产力同样呈显著的线性降低趋势,回归方程依次为: $y = -0.0018x + 2.3997$ ($R^2 = 0.9499^*$) 和 $y = -0.0572x + 76.607$ ($R^2 = 0.9228^*$),且处理间差异达到了 5% 的显著性水平。累计氮肥生理利用率变化不明显。

表 2 不同施氮水平对三季作物累计氮素吸收和利用的影响 (2011—2012 年)

Table 2 Effects of N fertilizer rate on cumulative N uptake and utilization in a maize-wheat-maize cropping season during 2011 and 2012

处理 Treatment	作物累计 氮素吸收 Cumulative N uptake by crops/ (kg/hm ²)	累计氮肥 农学效率 Cumulative N agronomic efficiency/ (kg/kg)	累计氮肥 生理利用率 Cumulative N physiological use efficiency/ (kg/kg)	累计氮肥 表观利用率 Cumulative N apparent use efficiency/ (%)	累计氮肥 吸收效率 Cumulative N uptake efficiency/ (kg/kg)	累计氮肥 偏生产力 Cumulative N partial productivity/ (kg/kg)
N0	556.3 c	—	—	—	—	—
N1	707.0 b	7.4 a	18.9 a	39.3 a	1.8 a	59.5 a
N2	746.8 ab	6.9 ab	18.4 a	37.3 a	1.5 b	46.0 b
N3	757.8 a	4.4 abc	13.9 a	31.6 ab	1.2 c	35.7 c
N4	747.1 ab	4.0 bc	16.1 a	24.9 bc	1.0 d	30.1 d
N5	715.2 ab	2.3 c	15.0 a	15.6 c	0.7 e	21.9 e

2.3 不同施氮水平对作物收获期土壤剖面硝态氮分布和累积的影响

2011 年和 2012 年玉米收获后土壤剖面 0—200 cm 土层 NO₃⁻-N 的累积与分布如图 1 所示。由图可知,随着土层深度的增加,2011 年各处理 NO₃⁻-N 累积量均表现为先降低后增加的趋势。0—20 cm 土层累积量较高,20—80 cm 土层累积量较低,80 cm 土层以下累积量又逐渐增加,至 180—200 cm 土层仍有大量 NO₃⁻-N 累积。同一土层内,NO₃⁻-N 累积量随施氮量的增加而增加,但施氮处理间差异不显著,100 cm 土层以下施氮处理的 NO₃⁻-N 累积量显著高于对照处理 ($P<0.05$)。经过连续两季作物的种植,

2012 年玉米收获后,各处理 0—200 cm 土层 NO₃⁻-N 分布与累积较 2011 年变化明显。随着剖面深度的增加,NO₃⁻-N 累积量呈先增加后降低的趋势,施氮处理在 80—100 cm 土层有一累积峰。与 2011 年相比,N0 和 N1 处理 0—200 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量分别降低了 30.2 kg/hm² (20.0%) 和 21.3 kg/hm² (9.6%),而 N2、N3、N4 和 N5 处理却依次增加了 51.4 kg/hm² (22.0%)、120.5 kg/hm² (49.1%)、168.4 kg/hm² (68.0%) 和 268.3 kg/hm² (93.1%)。除表层外,同一土层内 NO₃⁻-N 累积量处理间差异明显,处理施氮量越大,相应 NO₃⁻-N 累积量越大。

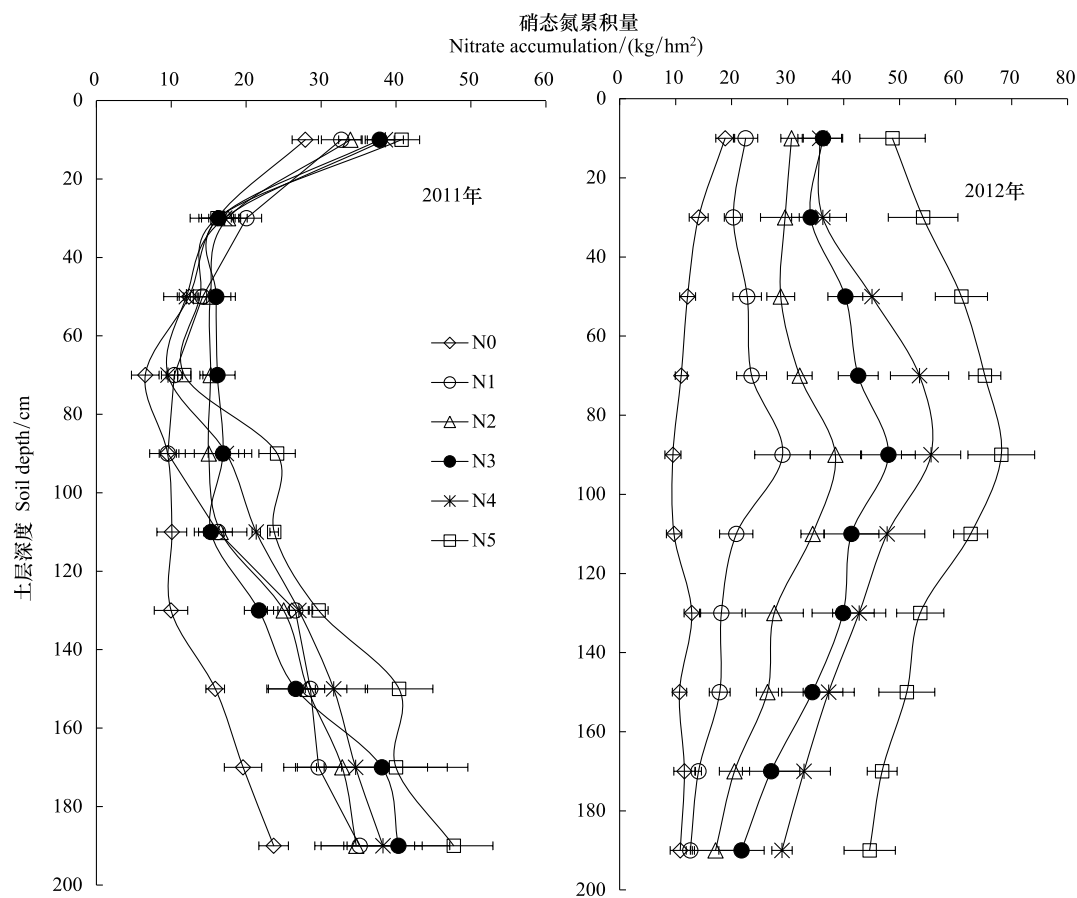


图1 不同施氮水平对玉米收获期0—200 cm 土层硝态氮分布与累积的影响

Fig.1 Effect of N fertilizer rate on nitrate distribution and accumulation in the 0—200 cm depth at maize harvest

2.4 不同施氮水平对土壤-作物系统氮素平衡的影响

土壤-作物系统0—100 cm 土层的氮素表观平衡(3季作物)如表3所示。氮素输入项包括氮肥投入、试验前0—100 cm 土层矿质氮残留和有机氮的表观矿化。氮素输出项包括作物收获携出、试验后0—100 cm 土层矿质氮残留和氮素表观损失。结果表明,3季作物累计氮素吸收量为556—758 kg/hm²,随氮素输入量增加,表现为先增加后降低趋势,而矿质氮残留、表观损失和氮盈余却显著增加($P < 0.05$)。当忽略氮肥施用的激发效应时,根据对照处理3季作物的氮素累计吸收量(556 kg/hm²)和作物收获前后0—100 cm 土层矿质氮残留的净变化(−90 kg/hm²)计算得3季作物土壤有机氮的表观矿化量为466 kg/hm²。除肥料氮外,起始 $N_{\min}$ 和矿化氮总和已高达622 kg/hm²,可占作物氮素吸收量的82.1%—111.8%。各处理氮肥表观利用率的变幅为15.6%—39.3%,随氮素投入量增加而显著降低,氮

素残留在低量施氮时(N1、N2)显著增加,在大量施氮时(N3、N4和N5)变化不明显,而氮素表观损失和损失率在低量施氮时变化不明显,在大量施氮时却显著增加($P < 0.05$)。

2.5 氮肥与产量、氮肥与环境指标的多曲线分析

为了寻求协调作物高产和环境保护的适宜氮肥用量,现以3季作物的累计产量作为产量指标,以氮肥表观损失和氮肥累计利用率作为环境指标进行多曲线分析(图2)。结果表明,施氮处理作物累计产量介于22.3—23.5 t/hm²之间,显著高于对照处理N0($P < 0.05$),增幅为11.5%—17.5%。随着氮肥用量的逐渐增大,作物累计产量表现为先增加后降低的趋势,但施氮处理间差异不显著。低量施氮时,N1和N2处理相比,二者累计产量分别为22.8 t/hm²和23.5 t/hm²,无显著差别。二者氮肥表观损失和表观利用率分别为180 kg/hm²和226 kg/hm²、39.3%和37.3%,亦无显著差别。土壤氮水平方面,N2处理试验前后0—100 cm 土层矿质氮累积量变化不明显

(156 kg/hm²和 160 kg/hm²,表 3),能维持该土层土壤矿质氮储量的基本稳定。然而,N1 处理 0—100 cm 土层矿质氮累积量却较试验前减少了 24.4%,矿质氮储量出现了一定的亏损,试验继续下去可能会存在减产的风险。高量施氮时,与 N2 处理相比,N3、N4 和 N5 处理氮肥投入量依次增加了 25%、50%和 100%,而作物累计产量差异均不显著。同时,氮肥表观损失分别增加了 33%、83%和 179%,氮肥表观利用率降低了 15%、33%和 58%,0—100 cm 土层矿质氮累积量也较试验前明显增加,分别为 201 kg/hm²、226 kg/hm²和 297 kg/hm²,这无疑增加了其潜在损失量。

表 3 不同施氮水平对土壤-作物系统 0—100 cm 土层表观氮素平衡的影响(3 季作物)
Table 3 Effects of N fertilizer rate on the apparent N budget in the 0—100 cm soil depth

氮素各项收支 N budget	处理 Treatment					
	N0	N1	N2	N3	N4	N5
土壤氮输入 Soil N input/(kg/hm ²)						
1) 肥料氮 Fertilizer N	0	383	510	638	765	1020
2) 起始 N _{min} Initial N _{min}	156	156	156	156	156	156
3) 矿化氮 Mineralized N	466	466	466	466	466	466
总输入(1+2+3) Total input	622	1005	1132	1260	1387	1642
土壤氮输出 Soil N output/(kg/hm ²)						
4) 作物吸收 Crop uptake N	556 c	707 b	747 ab	758 a	747 ab	715 ab
5) 残留 N _{min} Residual N _{min}	66 e	118 d	160 c	201 b	226 b	297 a
6) 表观损失 Apparent loss N	0 e	180 d	226 d	301 c	414 b	630 a
氮盈余 N surplus (5+6)	66 f	298 e	385 d	502 c	640 b	927 a
氮肥表观利用率 Apparent N recovery by crop/%	—	39.3 a	37.3 a	31.6 ab	24.9 bc	15.6 c
氮肥表观残留率 Apparent N remaining in soil/%	—	13.7 b	18.4 ab	21.3 a	21.0 a	22.7 a
氮肥表观损失率 Apparent N loss ratio/%	—	47.0 b	44.3 b	47.1 b	54.1 ab	61.7 a

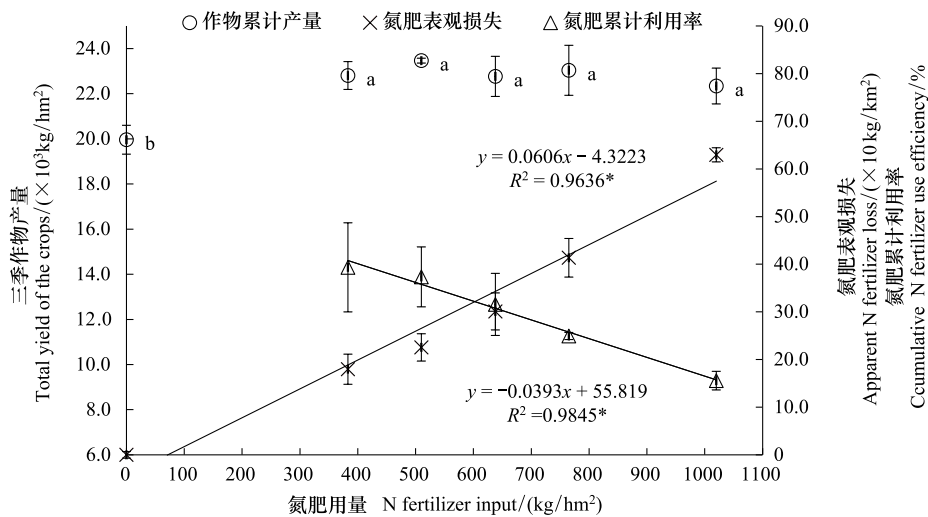


图 2 作物累计产量、累计氮肥利用率、氮肥表观损失与施氮量的关系

Fig.2 Relationships among cumulative crop yield, cumulative N fertilizer use efficiency, apparent N loss, and N fertilizer rate
图中不同标记字母表示三级作物产量的差异达到了 5% 的显著性水平

3 讨论

化肥已成为现代农业重要的生产资料,其对粮食增产的贡献率高达 50% 左右^[2],其中氮肥又起着

举足轻重的作用^[22]。然而,在农田生产中,随着氮肥用量的增加,作物产量并不是成比例增加,而是呈现报酬递减的规律或不增加^[7,23-26]。本研究结论与此一致,连续 3 季大田试验初步表明,适量施氮(小

麦:150 kg N/hm²,玉米:180 kg N/hm²)时,不同年份作物均可获得相对较高的产量,小麦为 6729 kg/hm²,玉米为 8368 kg/hm²(两年平均)。当小麦季和玉米季的氮肥用量继续增加时,作物产量不再增加,甚至有降低的趋势。同时,3 季作物累计产量随施氮量的增加也表现出相同的规律。可见,单从作物产量方面来看,过量的氮肥投入是无益的。

氮肥利用率是评价氮肥施入土壤后被作物吸收利用效率的常用指标,但它受土壤性质、作物品种、氮肥种类、施氮量、施肥深度、肥料配比和土壤供肥能力等因素的综合影响^[27-28],变幅较大。考虑到小麦-玉米轮作体系作物对氮素吸收利用的转移和叠加效应,选用 5 个国内外评价氮肥利用状况的常用指标,计算了 3 季作物对氮肥的累计利用效率。结果显示,除生理利用率变化不明显外,其他 4 个指标均随施氮量的增加呈显著的线性降低趋势($P < 0.05$)。本研究结果与隗英华等^[24]、石玉和于振文^[7]等的研究结果一致。由此说明,无论从氮素吸收、转运和利用各个角度去衡量(各评价指标的本质含义),其结论是一致的,即作物对氮肥的利用效率随氮肥用量的增加而降低。

有研究显示,土壤不同层次残留硝态氮的作物有效性随着土层深度增加而显著降低^[29],小麦和玉米根系可以利用 0—100 cm 土层的硝态氮,而难以利用 100 cm 土层以下的硝态氮^[30]。因此,本试验将土壤-作物系统氮素表观平衡定义到 0—100 cm 土层范围内计算,即作物根系对养分的主要吸收区域。结果表明,随着氮肥用量的增加,低量施氮时(N1、N2),氮素残留显著增加,表观损失和损失率变化不明显。而在高量施氮时(N3、N4 和 N5),残留变化不明显,而表观损失和损失率却显著增加。N3、N4 和 N5 处理的表观损失率分别高达 47.1%、54.1% 和 61.7%,这无疑增大了对环境的压力。

本试验条件下,2012 年玉米收获后 100—200 cm 土层内仍有大量矿质氮累积,施氮处理矿质氮累积量的变幅为 83.5—259.2 kg/hm²。回归分析显示,该土层矿质氮累积量和氮肥用量密切相关,随施氮量的增加呈指数形式快速增加($y = 53.696e^{0.0016x}$, $R^2 = 0.9707^*$)。说明施氮量越高,矿质氮在该土层的累积量越大,累积量占施氮量的比例也越大。进一步,相关性分析表明,100—200 cm 土层累积的矿

质氮和氮肥表观损失也表现出显著的线性相关关系($y = 2.8478x - 125.56$, $R^2 = 0.9663^*$),占损失量的比例各处理高达 41.2%—55.9%,说明矿质氮在土壤较深层次累积(100—200 cm)是氮肥表观损失的重要途径之一。因此,在一定程度上可将 100—200 cm 矿质氮残留量作为衡量氮肥表观损失程度的指标。因为这些氮素难以再被作物吸收利用^[30],其最终结果无疑是被多年的降雨淋洗至更深土层,或通过其他途径损失。

最后需要指出的是,由于本研究作物种植仅经历了玉米-小麦-玉米 3 季作物,且是单点试验,试验结果的代表性和说服力略显单薄,一个地区农田适宜氮肥用量的确定可能需要多年、甚至多点的田间试验为基础,所以本试验的结果还需后续研究进一步验证和探讨。

4 结论

在连续 3 季作物试验结果的基础上,综合考虑不同施氮水平的产量效应和环境效应,小麦季施氮 150 kg/hm²、玉米季施氮 180 kg/hm²时,作物即能获得相对较高的产量(小麦:6729 kg/hm²,玉米平均:8368 kg/hm²)和累计氮肥利用率(37.3%),且能维持作物收获前后 0—100 cm 土层土壤矿质氮库的基本稳定,保证了作物增产的相对可持续性。同时,氮肥表观损失和损失率也可将降至相对较低水平(表观损失量 226 kg/hm²,表观损失率 44.2%)。因此可初步作为陕西关中平原兼顾作物产量和环境效益的农田氮肥适宜用量。

致谢:同延安教授和陈毓君硕士对本研究给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Ma W Q, Zhang F S, Zhang W F. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China. *Resources Science*, 2005, 27 (3): 33-40.
- [2] Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F, Zhang F S. Integrated soil nutrients management and China's food security. *Resources Science*, 2008, 30(3): 415-422.
- [3] Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259-273.
- [4] Zhao C S, Hu C X, Huang W, Sun X C, Tan Q L, Di H J. A

- lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(1): 9-17.
- [5] Wang Y C, Wang E L, Wang D L, Huang S M, Ma Y B, Smith C J, Wang L G. Crop productivity and nutrient use efficiency as affected by long-term fertilisation in North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(1): 105-119.
- [6] Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, Lin W, Liang T. Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 65-73.
- [7] Shi Y, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on yield of wheat, content of soil nitrate and nitrogen balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (11): 3661-3669.
- [8] Tong Y A, Zhao Y, Zhao H B, Fan H Z. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1): 64-69.
- [9] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117-127.
- [10] Neeteson J J, Wadman W P. Assessment of economically optimum application rates of fertilizer N on the basis of response curves. *Fertilizer Research*, 1987, 12(1): 37-52.
- [11] Neeteson J J. Development of nitrogen fertilizer recommendations for arable crops in the Netherlands in relation to nitrate leaching. *Fertilizer Research*, 1990, 26(1/3): 291-298.
- [12] Wang D J, Liu Q, Lin J H, Sun R J. Optimum nitrogen use and reduced nitrogen loss for production of rice and wheat in the Yangtze delta region. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2): 221-227.
- [13] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Christie P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [14] Jin J Y, Li J K, Li S T. Chemical fertilizer and food security. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 601-609.
- [15] Chen X P, Zhou J C, Wang X R, Zhang F S, Bao D J, Jia X H. Economic and environmental evaluation on models for describing crop yield response to nitrogen fertilizers at winter-wheat and summer-corn rotation system. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 346-354.
- [16] Li Z X, Dong S T, Wang K J, Zhang J W, Liu P, Wang C Q, Liu C X. *In-situ* study on influence of different fertilization strategies for summer maize on soil nitrogen leaching and volatilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 998-1005.
- [17] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(3): 207-214.
- [18] Dong W X, Hu C S, Zhang Y M, Wu D M. Gross mineralization, nitrification and N₂O emission under different tillage in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(2/3): 237-247.
- [19] Nash P R, Motavalli P P, Nelson, K A. Nitrous oxide emissions from claypan soils due to nitrogen fertilizer source and tillage/fertilizer placement practices. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3): 983-993.
- [20] Wang X Y, He M R, Liu Y H, Zhang H H, Li F, Hua F X, Meng S H. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 685-694.
- [21] Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [22] Frink C R, Waggoner P E, Ausubel J H. Nitrogen fertilizer: retrospect and prospect. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(4): 1175-1180.
- [23] Wang Q, Li F R, Zhao L, Zhang E H, Shi S L, Zhao W Z, Song W X, Vance M M. Effects of irrigation and nitrogen application rates on nitrate nitrogen distribution and fertilizer nitrogen loss, wheat yield and nitrogen uptake on a recently reclaimed sandy farmland. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2): 325-339.
- [24] Juan Y H, Wang R, Sun W T, Xing Y H. Response of spring maize to nitrogen application in grain yield, nitrogen utilization and mineral nitrogen balance. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 544-551.
- [25] Ye D J, Gao Q, He W T, He P. Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 552-558.
- [26] Cui Z L, Zhang F S, Miao Y X, Sun Q P, Li F, Chen X P, Li J L, Ye Y L, Yang Z P, Zhang Q, Liu C S. Soil nitrate-N levels required for high yield maize production in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 82(2): 187-196.
- [27] Xu G H, Fan X R, Miller A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 2012, 63(1): 153-182.
- [28] Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 192-197.
- [29] Zhang L J, Ju X T, Zhang F S, Peng Z P. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers. *Scientia*

Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1964-1972.

- [30] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361-1368.

参考文献:

- [1] 马文奇, 张福锁, 张卫锋. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业. 资源科学, 2005, 27(3): 33-40.
- [2] 王激清, 马文奇, 江荣风, 张福锁. 养分资源综合管理与中国粮食安全. 资源科学, 2008, 30(3): 415-422.
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [6] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 林文, 梁婷. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 65-73.
- [7] 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. 生态学报, 2006, 26(11): 3661-3669.
- [8] 同延安, 赵营, 赵护兵, 樊红柱. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 64-69.
- [14] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601-609.
- [15] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 张福锁, 宝德俊, 贾晓红. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择—经济和环境效益分析. 土壤学报, 2000, 37(3): 346-354.
- [16] 李宗新, 董树亭, 王空军, 张吉旺, 刘鹏, 王庆成, 刘春晓. 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. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 998-1005.
- [20] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 张洪华, 李飞, 华芳霞, 孟淑华. 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. 生态学报, 2008, 28(2): 685-694.
- [21] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [24] 隗英华, 汪仁, 孙文涛, 邢月华. 春玉米产量、氮素利用及矿质氮平衡对施氮的响应. 土壤学报, 2012, 49(3): 544-551.
- [25] 叶东靖, 高强, 何文天, 何萍. 施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 552-558.
- [28] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.
- [29] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 彭正萍. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1964-1972.
- [30] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.