

施氮量对冬小麦—夏玉米土壤氮素表观盈亏的影响

辛思颖, 翁玲云, 吕敏娟, 杨晓卡, 马文奇, 魏静

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000)

摘要: 通过河北清苑连续 6 年的田间定位试验, 以冬小麦—夏玉米轮作体系作为对象, 设置不同的施氮处理 (N_0 、 N_{100} 、 N_{180} 、 N_{255} 、 N_{330}), 研究不同施氮量对冬小麦—夏玉米轮作体系的土壤氮素表观盈亏的影响。结果表明: 6 年土壤表观氮素累积盈亏量随施氮量的增加而增加, N_0 和 N_{100} 处理的土壤氮素累积盈亏量为负值, N_{180} 、 N_{255} 和 N_{330} 处理的土壤氮素累积盈亏量分别高达 382, 1 173, 2 116 kg/hm²; 各处理的氮素表观盈亏量年际间变异较大, 而在 2 种作物上的氮素累积盈亏量差异不大; 在冬小麦季和夏玉米季, 土壤氮库达到平衡状态的施氮量分别为 155, 134 kg/hm²; 土壤氮素表观盈亏量均与土壤无机氮变化量呈显著负相关, 与施氮量呈显著正相关, 且随降雨量的增加呈增加趋势; 不同生育期的结果表明, 在冬小麦—夏玉米生长前期均表现土壤氮素盈余, 而后期土壤氮素亏缺。因此合理施用氮肥既要考虑土壤氮素盈亏, 也要关注生育期的分配。

关键词: 施氮量; 冬小麦; 夏玉米; 氮素盈亏

中图分类号: S143.1; S512.1; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0257-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.038

Effects of Nitrogen Application Rates on Apparent Surplus and Deficit of Soil Nitrogen in Winter Wheat and Summer Maize Rotation System

XIN Siying, WENG Lingyun, LÜ Minjuan, YANG Xiaoqia, MA Wenqi, WEI Jing

(College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: The apparent surplus and deficiency of soil N in winter wheat-summer maize rotation were investigated under different N application rates (N_0 , N_{100} , N_{180} , N_{255} , N_{330}) in consecutive six years in Qingyuan, Hebei. Results showed that the cumulative apparent nitrogen balances changed from the deficit in N_0 and N_{100} treatments to the surplus in N_{180} , N_{255} and N_{330} treatments, which reached up to 382, 1 173 and 2 116 kg/hm², respectively. The large annual variations of the apparent N balances were found, but the differences of the N balances between the two crops were small, which were 155 kg/hm² and 134 kg/hm², respectively. Meanwhile, it was observed that the apparent soil N balances were negatively correlated with the changes of soil inorganic N and the precipitation, but positively correlated with N application rates. In addition, the apparent soil N surplus in the earlier stage and deficit in the later stage during the growing seasons of winter wheat and summer maize were observed. These findings above indicated that reasonable N recommendation should be established from two aspects including soil apparent N balance and N allocation within a growing season.

Keywords: nitrogen application; winter wheat; summer maize; nitrogen surplus and deficiency

冬小麦—夏玉米轮作是华北平原主要的粮食作物生产方式。随着集约化农业的快速发展, 华北地区化肥投入量持续增加, 而且显著高于全国平均水平^[1]。据研究, 自上世纪 90 年代以后, 我国农田氮素盈余每年保持在 360~546 万 t 氮, 相当于 24~35 kg/hm²^[2]。氮素大量盈余, 造成氮肥利用率低下, 经济效益下降, 为环境安全留下隐患^[3]。为了减少氮肥损失, 缓解和解决诸多环境污染问题, 土壤氮素盈亏的研究日益受到农业、生态和环境等方面专家的关注。刘新宇等^[4]研究

发现, 冬小麦收获后, 仍有 26.7%~40.6% 的氮肥残留在 0—100 cm 土层中, 17.4%~24.8% 的氮肥损失, 残留在土壤剖面中的氮肥主要分布在表土层, 随着施氮量的增加, 土壤氮素总的平衡由亏缺转为盈余; 刘瑞等^[5]研究发现, 在夏玉米季, 随着施氮量的增加, 土壤氮素表观盈亏量增加, 当施氮量为 90~150 kg/hm² 时, 土壤氮素基本达到平衡, 当施氮量为 270~450 kg/hm² 时, 土壤氮素有明显盈余, 而且土壤氮素表观盈亏量与 0—200 cm 土层土壤硝态氮累积量之

收稿日期: 2017-10-21

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB150405); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0200403)

第一作者: 辛思颖(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土资源与环境生态研究。E-mail: 1612356598@qq.com

通信作者: 魏静(1963—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事水土资源与环境生态研究。E-mail: wei_jing_199@163.com

间呈显著正相关关系。但目前对冬小麦—夏玉米轮作体系的研究主要是通过土壤残留硝态氮累积量^[6-8]、氮肥利用率^[9-10]和去向^[11-12]以及系统整体的氮素投入与氮素支出^[13-14]来评估小麦玉米整个生育期的氮素平衡。较少考虑作物各生育期氮素平衡,而且很少有多年度定位试验的研究,对土壤—肥料氮素行为的评价缺乏完整性。

鉴于此,本文以河北山前平原区秸秆还田条件下冬小麦—夏玉米轮作体系为研究对象,通过 6 年的田间定位试验,探索施氮量对土壤氮素表观盈亏的影响,旨在为制定氮肥合理用量和减缓生态环境压力提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2010 年 6 月至 2016 年 6 月在河北省清苑县黄陀村进行。清苑县属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12 ℃,年降水量 550 mm。供试土壤为壤质潮土,2010 年播前土壤基本理化性质为:有机质含量 16.0 g/kg,全氮含量 0.8 g/kg,有效磷含量 13.2 mg/kg,速效钾含量 96.7 mg/kg。

1.2 试验方案

1.2.1 试验设计 氮肥用量设置 5 个水平梯度,对应的冬小麦和夏玉米每季施氮量分别为 0, 100, 180, 255, 330 kg/hm²,相应处理编号为 N₀、N₁₀₀、N₁₈₀、N₂₅₅、N₃₃₀,每个处理重复 3 次,随机排列,总共 15 个试验小区,小区面积为 5.5 m×8 m=44 m²,试验采用定位方式,冬小麦和夏玉米轮作,2010 年 6 月从夏玉米开始,到 2016 年 6 月小麦收获,共 6 年 12 季。

1.2.2 冬小麦季的试验管理 2010—2011 年、2012—2013 年、2013—2014 年、2014—2015 年、2015—2016 年 5 季所供试的冬小麦品种为济麦 22, 2011—2012 年所供试的品种为石新 539,播种日期分别为 2010 年 10 月 6 日、2011 年 10 月 8 日、2012 年 10 月 7 日、2013 年 10 月 5 日、2014 年 10 月 6 日和 2015 年 10 月 8 日。冬小麦播种量为 210 kg/hm²。小麦季各处理磷(P₂O₅)用量为 150 kg/hm²,钾(K₂O)为 120 kg/hm²,锌(ZnSO₄)为 15 kg/hm²,其中氮肥为尿素(含纯氮 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%)。氮肥 40%底施,其中 50%拔节期沟施,10%扬花期撒施;在五月初抽穗开花后及五月中旬喷施磷酸二氢钾;锌肥喷施分 2 次进行,第 1 次在开花后 5~7 天进行,第 2 次在开花后 14~15 天进行(喷施日期视天气状况而定)。

1.2.3 夏玉米季的试验管理 2010—2015 年夏玉米供试的品种均为郑单 958,播种日期分别为 2010

年 6 月 12 日、2011 年 6 月 13 日、2012 年 6 月 13 日、2013 年 6 月 14 日、2014 年 6 月 16 日、2015 年 6 月 15 日。夏玉米播种量为 75 kg/hm²。夏玉米季各处理磷(P₂O₅)用量为 90 kg/hm²,钾(K₂O)为 120 kg/hm²,锌(ZnSO₄)为 15 kg/hm²,其中氮肥为尿素(含纯氮 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),P₂O₅、K₂O 全部基施,氮肥基施 30%,大喇叭口期 50%,吐丝期 20%。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品 试验前随机选取 3 点,采集 0—20 cm 土壤样品,测定土壤理化性状,小麦收获期以 30 cm 为一层,采集 90 cm 土样;玉米收获期以 30 cm 为一层,采集 210 cm 土样。每个小区采 2 个土钻混合为 1 个土样,分层制样。土壤样品冷冻后迅速带回实验室,用 1 mol/L KCl 浸提,流动分析仪测定。

1.3.2 植物样品 在收获期取植物样,样品分茎、叶、穗(小麦分穗轴和穗壳,玉米分苞叶和穗轴)、籽粒 4 部分,杀青 0.5 h,于 75 ℃烘干至恒重,称重磨细过 0.25 mm 筛,测定全氮含量。

1.3.3 产量测定 小麦季每个小区选取 4 个 1 m² 面积,将穗剪下脱粒,称重。玉米季在每个小区选取 15 m² 面积,脱粒,称重。

1.4 数据处理

各指标计算公式为:

土壤 NO₃⁻-N 累积量(kg/hm²)=土层厚度(cm)×土壤容重/(g/cm³)×土壤 NO₃⁻-N 含量(mg/kg)/10

植株吸氮量(kg/hm²)=∑地上部各器官生物量×各器官氮含量

籽粒吸氮量(kg/hm²)=籽粒生物量×籽粒氮含量

秸秆吸氮量(kg/hm²)=植株吸氮量-籽粒吸氮量

朱兆良等^[15]综述有关研究结果后认为,从数量上讲,因加入化肥氮所增加的土壤氮素的矿化量(N 矿化)与被土壤中生物固定的化肥氮(N 固定)基本相当,基于此,以土壤 N_{min} 测定为基础,计算土壤氮素的表观盈亏量的公式为:

表观盈亏量(kg/hm²)=(土壤 N_{min} 起始总量+施氮量+N_{矿化})-(土壤 N_{min} 残留总量+作物吸氮量+N 固定)=(土壤 N_{min} 起始总量+施氮量)-(土壤 N_{min} 残留总量+作物吸氮量)

采用 Excel 2008 和 SPSS 软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 施氮量对小麦—玉米轮作体系土壤氮素盈亏量的影响

2.1.1 施氮量对小麦玉米轮作体系土壤氮素 12 季累积盈亏量的影响 从表 1 可以看出,氮素输出项中

主要是籽粒吸氮量,并且籽粒吸氮量在施氮量为 0~255 kg/hm² 随着氮肥施用量的增加呈依次增加趋势,当氮肥施用量为 330 kg/hm² 时,籽粒吸氮量有所减少,而土壤残留量在氮肥施用量为 0~330 kg/hm² 随之呈现递增趋势。从土壤表观氮素盈亏量来

看,12 季作物的氮素累积盈亏量随氮肥施用量的增加呈增加趋势。 N_0 和 N_{100} 处理的土壤氮素累积盈亏量为负值,即表现出土壤氮素亏缺。 N_{180} 、 N_{255} 和 N_{330} 处理的氮素总输入量远超过氮素总输出量,即表现出土壤氮素盈余,且分别高达 382,1 173,2 116 kg/hm²。

表 1 2010—2016 年土壤氮素表观盈亏量 单位:kg/hm²

处理	氮素输入			氮素输出			表观氮素盈亏量
	施氮量 ¹	秸秆还田 ²	播前 N_{min} ³	籽粒吸氮量 ⁴	最后一季秸秆 ⁵	残留 N_{min} ⁶	
N_0	0	71	86	1106	29	61	-1038
N_{100}	1200	71	86	1604	49	156	-452
N_{180}	2160	71	86	1698	58	180	382
N_{255}	3060	71	86	1760	71	214	1173
N_{330}	3960	71	86	1690	61	250	2116

注:1 表示 12 季作物总施氮量;2 表示 2010 年冬小麦秸秆粉碎还田量;3 表示 2010 年夏玉米播种前土壤硝态氮含量;4 表示 12 季作物籽粒的总吸氮量;5 表示 2016 年冬小麦秸秆含氮量;6 表示收获后土壤残留硝态氮量。

由图 1 可以看出,5 个处理 12 季的土壤氮素表观盈亏量的变化趋势基本一致,且各季的氮素盈亏量均随施氮量的增加而增加, N_0 处理在各季均表现为土壤氮素亏缺, N_{330} 处理在各季均表现为土壤氮素盈余。可见,冬小麦—夏玉米轮作体系的土壤氮素表观盈亏量受施氮量的影响不容小视。在夏玉米季,各处理的土壤氮素表观盈亏量基本呈逐年增加的趋势,而在冬小麦季,各处理的土壤氮素表观盈亏量基本呈逐年减少的趋势。因此,2010 年夏玉米季至 2012 年夏玉米季,土壤氮素表观盈亏量表现为冬小麦季大于夏玉米季,而在 2012—2013 年冬小麦季至 2015—2016 年冬小麦季,土壤氮素表观盈亏量表现为夏玉米季大于冬小麦季,这可能是由土壤硝态氮在冬小麦季累积,夏玉米季淋洗导致的。

2015—2016 年的氮素表观亏缺量最多, N_{180} 、 N_{255} 和 N_{330} 处理均在 2013—2014 年的氮素表观盈余量最大。

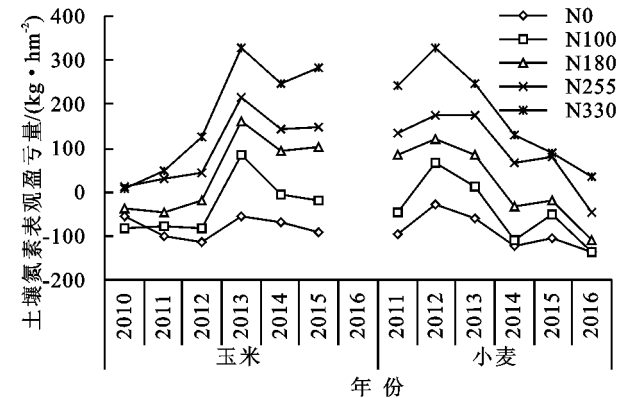


图 1 2010—2016 年 12 季作物各处理的土壤氮素表观盈亏量

不同年份间各处理的土壤氮素表现盈亏量相差较大, N_0 、 N_{100} 、 N_{180} 、 N_{255} 和 N_{330} 处理在 6 年间的变异系数分别为 20%,81%,69%,33%,20%,其中, N_{100} 和 N_{180} 处理的年际间变异最大,可能是由于施氮量在 100~180 kg/hm² 时,作物产量、土壤硝态氮累积及淋洗等综合因素受天气影响较大,从而导致年际间氮素盈亏量变化较大。

表 2 不同年份各处理的表观氮素盈亏量

处理	土壤氮素表观盈亏量/(kg·hm ⁻²)						变异系数/%
	2010—2011 年	2011—2012 年	2012—2013 年	2013—2014 年	2014—2015 年	2015—2016 年	
N_0	-152	-128	-175	-181	-175	-227	20
N_{100}	-128	-12	-72	-25	-61	-153	81
N_{180}	47	75	65	128	75	-10	69
N_{255}	147	204	217	284	220	101	33
N_{330}	248	376	371	461	339	321	20

2.1.3 施氮量对不同作物土壤氮素累积盈亏量的影响 从图 2 可以看出,冬小麦季与夏玉米季的氮素累积盈亏量均随氮肥施用量的增加而递增,夏玉米季的氮素累积盈余量在整体上略高于冬小麦季,这主要是因为冬小麦生长周期长,且生长过程中降水较少,因此易造成 90 cm 内土壤硝态氮残留下来,而夏玉米生

长期间降雨较多,较易发生氮素淋洗现象,大多氮素淋洗到 90 cm 以下土层内。

N_0 和 N_{100} 处理在冬小麦季与夏玉米季均表现为氮素亏缺, N_{180} 、 N_{255} 和 N_{330} 处理在冬小麦季与夏玉米季均表现为氮素盈余,且 N_{330} 处理在冬小麦季和夏玉米季的氮素累积盈余量分别高达 1 091,1 025 kg/

hm²。在冬小麦季,施氮量在 155 kg/hm² 时,土壤氮素基本达到平衡,在夏玉米季,施氮量在 133 kg/hm² 时,土壤氮素基本达到平衡。

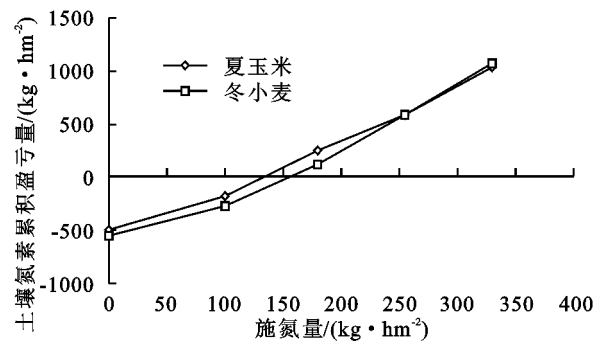


图 2 2010—2016 年不同施氮量下冬小麦、夏玉米土壤氮素表观累积盈亏量

从图 3 可以看出,冬小麦与夏玉米的土壤氮素表观盈亏量均与施氮量呈显著正相关关系,但达到盈亏平衡的施氮量存在很大的年度变异。在冬小麦季, N₀ 处理在各年份均表现为氮素亏缺,随着施氮量的增加,氮素盈亏量逐渐增加,当施氮量为 330 kg/hm² 时,土壤表观氮素在各年份均表现为盈余。在 2010—2013 年,土壤氮素达到盈亏平衡的施氮量为 29~129 kg/hm²,在 2013—2016 年,土壤氮素达到盈亏平衡的施氮量为 194~296 kg/hm²。在夏玉米季, N₀ 处理在各年份均表现为氮素亏缺,随着施氮量的增加,氮素盈亏量逐渐增加,当施氮量大于 180 kg/hm² 时,土壤表观氮素在各年份均表现为盈余。在 2010—2013 年,土壤氮素达到盈亏平衡的施氮量为 204~236 kg/hm²,在 2013—2016 年,土壤氮素达到盈亏平衡的施氮量为 40~112 kg/hm²。

冬小麦与夏玉米各处理的土壤氮素表观盈亏量均与 0—90cm 土壤无机氮的变化量呈极显著负相关,回归方程分别为 $y = -1.212x + 54.7, R^2 = 0.428^{**}$, $y = -0.592x + 37.9, R^2 = 0.234^{**}$ 。从回归关系看,土壤无机氮变化量每增加 100 kg/hm²,土壤氮素表观盈亏量分别减少约 121,59.2 kg/hm²。当一季小麦生产中土壤氮素表观盈亏量为 0 时,土壤无机氮也增加 45 kg/hm²,当夏玉米季土壤氮素表观盈亏量为 0 时,土壤无机氮增加 64 kg/hm²。相关分析表明,土壤氮素表观盈亏量与植株吸氮量无明显相关性。

在冬小麦—夏玉米轮作体系下,土壤氮素表观盈亏量随降雨量的增加呈增加趋势,而且随施氮量的增加,土壤氮素表观盈亏量受降雨量的影响越来越大。N₃₃₀ 处理的土壤氮素表观盈亏量与降雨量呈显著正相关,其回归方程为 $y = 0.6076x + 21.017, R^2 = 0.759^{*}$;从回归关系看,轮作年的降雨量每增加 100 mm,土壤氮素表观盈亏量增加 60.76 kg/hm²。

2.2 施氮量对冬小麦、夏玉米各生育期土壤氮素表观盈亏量的影响

2.2.1 施氮量对冬小麦各生育期土壤氮素表观盈亏量的影响 由表 3 可以看出,冬小麦各生育阶段土壤氮素表观盈亏量之和与全生育期土壤氮素表观盈亏量相比,偏差较大。利用播种前和收获期 2 次的测定结果计算小麦的土壤氮素表观盈亏量时, N₀ 处理在 2 年中均表现为土壤氮素的表观亏缺,而事实上 N₀ 处理在返青期—扬花期土壤氮素是盈余的,而且在 2011—2012 年播种期至返青期也是盈余的。因此为了解不同时期土壤的供氮情况,合理指导施肥,应根据冬小麦生育期分阶段计算土壤氮素的盈亏量。

表 3 冬小麦各处理各生育期的氮素表观盈亏量

		单位: kg/hm ²		
年份	处理	播种期— 返青期	返青期— 扬花期	扬花期— 收获期
2010—2011	N ₀	-25	30	-92
	N ₁₀₀	10	36	-74
	N ₁₈₀	62	70	-24
	N ₂₅₅	71	82	-17
	N ₃₃₀	146	116	-41
2011—2012	N ₀	20	12	-58
	N ₁₀₀	134	33	-103
	N ₁₈₀	169	58	-87
	N ₂₅₅	178	72	-64
	N ₃₃₀	265	125	-85

由图 4 可以看出,在两季冬小麦的各生育阶段中,随着氮肥用量的增加,土壤氮素表观盈亏量呈增加趋势,并且在播种期至返青期和返青期至拔节期趋势较为明显。在播种期至返青期,除 2010—2011 年 N₀ 处理的土壤氮素表现为亏缺外,其他各处理均表现为盈余。主要是由于较高的土壤起始无机氮量和秸秆还田量增加了氮素的总输入量,因此该阶段的土壤氮素表观盈余量相对较高。在返青期至扬花期,2 年各处理土壤氮素均表现为盈余,且盈余量随施氮量的增加呈指数上升趋势。但随着小麦对氮的吸收量增大,氮素盈余量较上一阶段有所降低。在扬花期至收获期,随着籽粒灌浆的开始,作物对氮素的吸收有所增强,2 年各处理的土壤氮素均表现为亏缺,氮素盈亏量并没有随施氮量的增加而增加,甚至在 2011—2012 年开始出现下降趋势。

2.2.2 施氮量对夏玉米各生育期土壤氮素表观盈亏量的影响 由表 4 可以看出,夏玉米各生育阶段土壤氮素表观盈亏量之和与全生育期土壤氮素表观盈亏量相比,偏差较大。利用播种前和收获期 2 次的测定结果计算夏玉米的土壤氮素表观盈亏时, N₀ 处理在 2 年中均表现为土壤氮素亏缺,而事实上 N₀ 处理在播种期—拔节期和拔节期至大喇叭口期土壤氮素是盈余的,而且在 2011 年灌浆期至成熟期也是盈余的。因此为了解不同

时期土壤的供氮情况,合理指导施肥,应根据夏玉米生

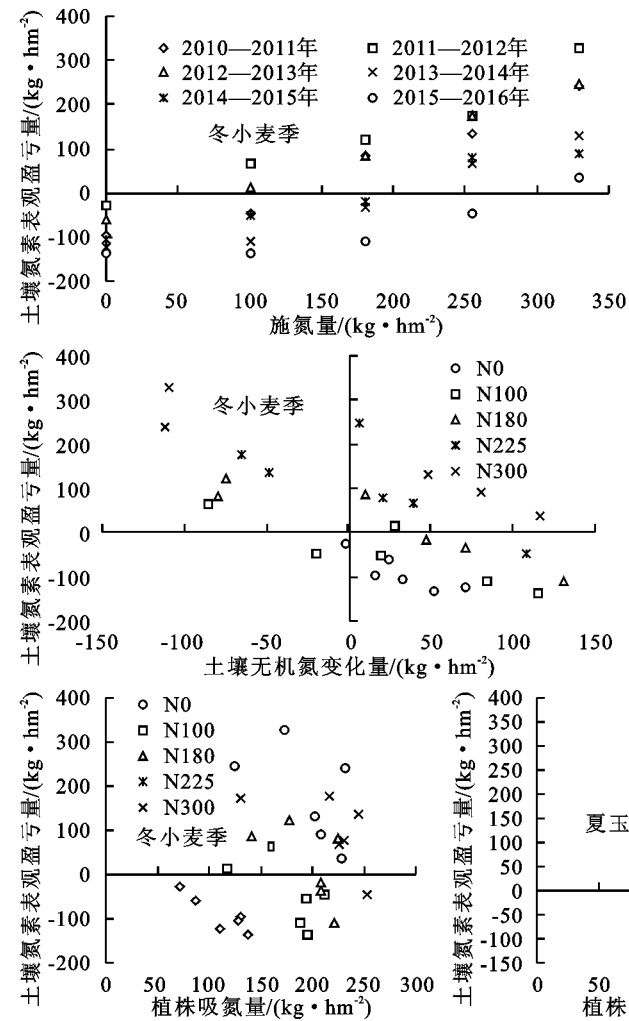


图 3 冬小麦、夏玉米土壤氮素表观盈亏量与各因素的关系

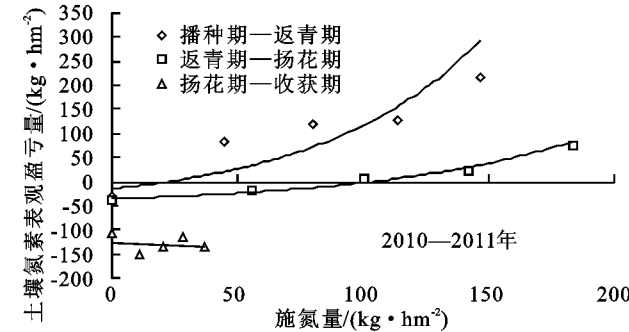


图 4 冬小麦各生育阶段土壤氮素表观盈亏量与施氮量的关系

表 4 夏玉米各处理各生育期的氮素表观盈亏量

单位: kg/hm²

年份	处理	播种期— 拔节期	拔节期— 大喇叭口期	大喇叭口期— 灌浆期	灌浆期— 成熟期
2010	N ₀	5	21	-113	23
	N ₁₀₀	-50	117	-193	20
	N ₁₈₀	40	131	-94	-132
	N ₂₅₅	16	132	-54	-73
	N ₃₃₀	43	218	-100	-200
2011	N ₀	23	53	-71	-71
	N ₁₀₀	20	155	-129	-124
	N ₁₈₀	-132	145	-37	-172
	N ₂₅₅	-73	338	-48	-141
	N ₃₃₀	-200	309	-79	-282

育期分阶段计算土壤氮素的盈亏量。

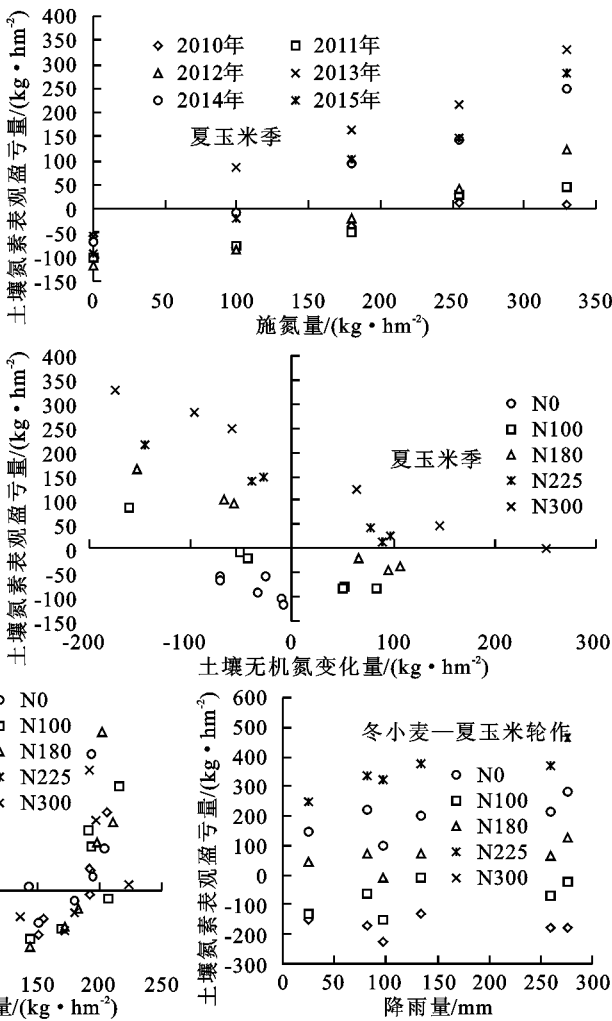


图 5 为 2 年夏玉米各生育期土壤氮素表观盈亏量与各处理总施氮量的关系。从播种期到拔节期,即使在不施氮肥处理土壤氮素也是盈余的,可能是由于播种施用氮肥激发了土壤有机质的分解,增加了土壤氮素含量,再加上土壤起始无机氮和秸秆还田带来的氮,较高的氮素输入量导致大量的土壤氮素残留及土壤氮素表现盈余;在拔节期至大喇叭口期,2010 年的氮素盈余量随施氮量的增加而增加,而 2011 年并没有明显的增加趋势;在大喇叭口期至灌浆期,随着玉米对氮素的需求量增大,土壤氮素表观盈亏量大幅度降低,出现亏缺现象;在灌浆期至成熟期,土壤氮素盈

亏量随施氮量的增加呈下降趋势,即使在最高施肥处

理土壤氮素也表现为严重亏缺。

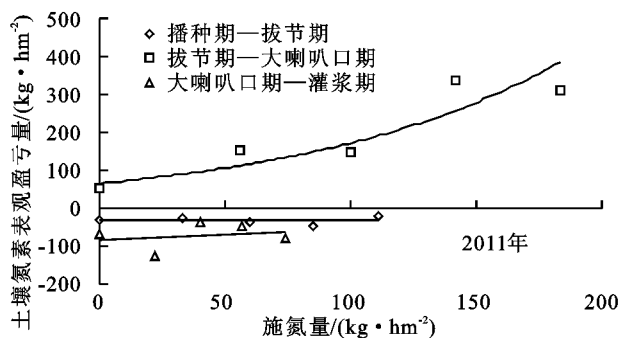
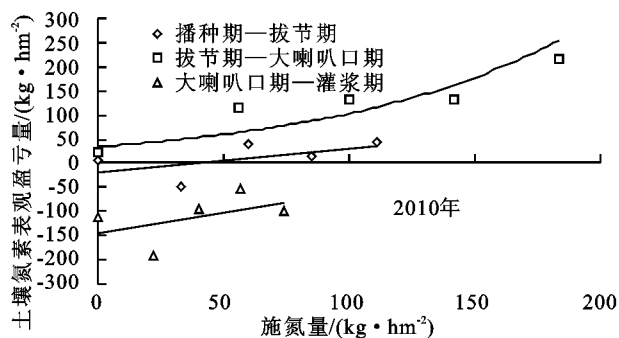


图 5 夏玉米各生育阶段土壤氮素表观盈亏量与施氮量的关系

3 讨论

华北地区是我国最重要的粮食生产基地之一。冬小麦—夏玉米轮作是这一地区的主要作物种植方式。已有调查研究表明,目前华北地区冬小麦—夏玉米轮作体系中氮肥过量施用已相当严重^[16-18],但作物产量并未随着施氮量的增加而增加,而过量氮肥的施用导致氮肥利用率降低和潜在的环境压力^[19-21]。因此,如何减少氮肥损失,保持土壤氮素表观平衡成为人们关注的热点^[22]。栗丽等^[23]研究发现,施肥、灌水等措施对土壤氮素平衡影响明显;刘瑞等^[24]研究发现,不同施氮量时土壤氮素表现平衡值(施氮量与氮素携出量的差值)与土壤 0—200 cm 剖面硝态氮累积量之间呈极显著正相关。本研究不同施氮量的定位试验表明,通过控制各施肥时期的施氮量,可以调控土壤氮素表观盈亏量,促进土壤氮素平衡,大幅度减少氮肥损失。研究结果不仅展示了该地区冬小麦、夏玉米减肥增效的巨大的潜力,也为该地区确定合理施氮量、减少环境污染提供借鉴。

巨晓棠等^[25]研究发现,在氮素输出项中,作物携出量并不随输入量的增加有显著的变化,从而导致施氮量很高时氮素盈余量也很高。在本研究中,12 季作物的土壤氮素表观累积盈亏量随氮肥施用量的增加呈增加趋势。 N_0 和 N_{100} 处理由于常年不施氮或施氮不足,表现出土壤氮素亏缺,而 N_{180} 、 N_{255} 和 N_{330} 处理的氮素总输入量远超过氮素总输出量,导致土壤氮素大量盈余,且分别高达 382, 1 173, 2 116 kg/hm²。研究表明,高水平施氮会造成土壤氮素积累和表观损失急剧增加,其中硝态氮淋洗出 0—100 cm 土体的数量占施氮量的 32%~39%^[26-27],王秀斌等^[28]发现冬小麦和夏玉米 2 个生长季氨挥发损失总量及其损失率均表现出随施氮量的增加而增加,玉米季氨挥发损失高于冬小麦季;巨晓棠等^[29]发现土壤氨挥发的损失量(以 N 计)为 12.8~64.5 kg/hm²,占施氮量的 3.8%~7.2%。可见,土壤氮素盈余带来的环境污染问

题应当引起足够的重视。

本研究 6 年的结果表明,各处理的氮素表观盈亏量年际间变异很大,而在冬小麦和夏玉米季的氮素累积盈亏量差异并不大。此外,在冬小麦—夏玉米轮作体系下,土壤氮素表观盈亏量随降雨量的增加呈增加趋势,且施氮量越大,土壤氮素表观盈亏量受降雨量的影响越大,这可能是由于降雨造成大量硝态氮淋洗。冬小麦季和夏玉米季的土壤氮素盈亏量分别呈逐年增加和减少的趋势,且均与土壤无机氮变化量呈显著负相关关系,与施氮量呈显著正相关关系。在冬小麦季施氮量为 155 kg/hm² 时,土壤氮素基本达到平衡,在夏玉米季施氮量为 134 kg/hm² 时,土壤氮素基本达到平衡。刘新宇^[30]在 3 个地区 1 年的研究结果发现,华北平原冬小麦和夏玉米季的土壤氮库的盈亏量均与施氮量之间呈正相关关系。随着施氮量的升高,土壤氮库由亏损转为盈余。在冬小麦季和夏玉米季,土壤氮库达到平衡状态的施氮量分别为 164, 126 kg/hm²。

本研究表明,冬小麦季土壤氮素在播种期—返青期和返青期—扬花期基本呈现盈余,在扬花期—收获期表现为亏缺。夏玉米季在拔节期—大喇叭口期,土壤氮素盈余,在播种期—拔节期、大喇叭口期—灌浆期、灌浆期—成熟期基本表现为氮素亏缺。石维等^[31]研究发现,0—200 cm 土壤氮素的表观盈余主要出现在小麦拔节—灌浆期间,表观亏缺主要在播种—拔节期及灌浆—收获期;王启现等^[32]研究发现,土壤氮素的表观盈余发生在吐丝期之前且 80% 以上盈余量出现在大口期前,表观亏损出现在吐丝期以后且其亏损量在乳熟期前后各占 1/2。由此可见,目前施肥模式在小麦玉米上均出现了后期施氮不足的现象,需要根据各生育期养分平衡状况适当调整施肥方案,如在冬小麦季,应降低底肥比例,增加中后期追肥比例。有研究发现,冬小麦底肥 1/3 和追肥 2/3 处理的氮素利用率高于底肥和追肥各 1/2 的处理^[33];而在底肥和追肥各 1/2 时,分 2 次追施(拔节期和开花期各 1/4)可提高氮素的积累量和利

用率,减少其损失^[34-35]。在夏玉米季,一次底施时要考虑添加缓控释氮肥,分次施肥时也应降低底施氮肥比例,增加后期追施比例。此外,只根据开始和结束2次测定值笼统计算土壤氮素盈亏量获得的结果有可能掩盖过程中的真实情况。因此,根据作物不同生育期分阶段讨论土壤氮素盈亏量对于合理指导施肥更有意义。本研究只对2年作物各生育期的土壤氮素盈亏量进行分析,后期将进行多年小麦玉米生育期内的研究,这不仅可以完善本试验,也对减少氮肥损失、保护环境具有重要意义。

4 结论

(1)冬小麦—夏玉米不同施氮量连续6年的试验结果表明土壤氮素表观累积盈亏量随施氮量的增加而增加,年际间差异较大,作物间无显著差异。

(2)土壤氮素表观盈亏量随耕作年限的增加表现出冬小麦季增加和夏玉米季减少的趋势,且随降雨量的增加呈增加趋势,施氮量越大,受降雨量的影响越大。土壤氮素表观盈亏量与土壤无机氮变化量呈显著负相关,与施氮量呈显著正相关。冬小麦季与夏玉米季的施氮量分别达到155,134 kg/hm²时,土壤氮库基本平衡。

(3)在冬小麦季,土壤氮素盈余出现在播种期—返青期和返青期—扬花期,氮素亏缺出现在扬花期—收获期。在夏玉米季,氮素盈余出现在拔节期—大喇叭口期,氮素亏缺出现在播种期—拔节期、大喇叭口期—灌浆期和灌浆期—成熟期。

参考文献:

- [1] 李鑫. 华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系中肥料氮去向及氮素气态损失研究[D]. 河北保定:河北农业大学,2007.
- [2] 张福锁,巨晓棠. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识[J]. 土壤学报,2002,39(增刊):41-55.
- [3] 王秀斌. 优化施氮下冬小麦/夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
- [4] 刘新宇,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):296-303.
- [5] 刘瑞,周建斌,崔亚胜,等. 不同施氮量下夏玉米田土壤剖面硝态氮累积及其与土壤氮素平衡的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(2):193-198.
- [6] Shi Z, Li D, Jing Q, et al. Effects of nitrogen applications on soil nitrogen balance and nitrogen utilization of water wheat in a rice-wheat rotation[J]. Field Crops Research,2012,127(1):241-247.
- [7] 赵营,周涛,郭鑫年,等. 优化施肥对春小麦产量、氮素利用及氮平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(6):119-124.
- [8] 王启现,王璞,申丽霞,等. 施氮时期对玉米土壤硝态氮含量变化及氮盈亏的影响[J]. 生态学报,2004,24(8):1582-1588.
- [9] 石岳峰,张民,张志华,等. 不同类型氮肥对夏玉米产量、氮肥利用率及土壤氮素表观盈亏的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(6):95-98.
- [10] 夏晓亮. 氮肥运筹对土壤—小麦系统氮素时空分布及氮素利用效率的影响[D]. 南京:南京农业大学,2008.
- [11] 董娴娴,刘新宇,任翠莲,等. 潮褐土冬小麦—夏玉米轮作体系氮肥后效及去向研究[J]. 中国农业科学,2012,45(11):2209-2216.
- [12] 刘新宇. 华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系化肥氮后效及去向量化研究[D]. 保定:河北农业大学,2010.
- [13] 杨宪龙,路永莉,同延安,等. 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[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(1):65-73.
- [14] 赵鹏,陈阜,马新明,等. 麦玉两熟秸秆还田对作物产量和农田氮素平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):162-166.
- [15] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992:213-249.
- [16] 陈新平,张福锁. 小麦—玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [17] 张福锁,崔振岭,王激清,等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报,2007,24(6):687-694.
- [18] Ju X T, Kou C L, Christie P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution,2007,145(2):497-506.
- [19] 吕殿青,同延安,孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):8-15.
- [20] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm evaluation of an in-season Nitrogen management strategy based on soil Nmin test[J]. Field Crops Research,2008,105(1/2):48-55.
- [21] 杨新泉,冯峰,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.
- [22] 庄振东. 冬小麦—夏玉米轮作体系氮肥去向及平衡状况研究[D]. 山东泰安:山东农业大学,2016.
- [23] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1358-1365.
- [24] 刘瑞,戴相林,周建斌,等. 不同氮肥用量下冬小麦土壤剖面累积硝态氮及其与氮素表观盈亏的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(6):1335-1341.