植物营养与肥料学报 2013,19(1):65-73
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0108

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

杨宪龙,路永莉,同延安*,林 文,梁 婷
(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要:在陕西关中小麦-玉米轮作区,通过4年田间定位试验研究了长期施氮和秸秆还田对作物产量、氮肥利用率、0—100 cm土层无机氮残留及体系氮平衡的影响。结果显示,施氮能显著提高作物产量,小麦、玉米4年平均产量增幅分别为64.1%和48.8%,均随施氮量的增加先增加后减小。优化施肥小麦、玉米氮肥用量较农民习惯施肥分别减少了27.3%和55.6%,但连续4年作物产量没有显著降低。秸秆还田随种植年限的推移其增产效果逐渐明显。轮作体系作物累计氮肥利用率逐年升高,前8季作物达33.3%～56.6%,说明氮肥后效明显。施氮增加了0—100 cm土层无机氮残留,且NO_3^--N残留明显高于NH_4^+-N,并与年施氮量表现出显著的正相关关系,秸秆还田对无机氮残留影响不明显。体系氮平衡表明,随施氮量增加,作物累计氮素吸收先显著增加后增幅不变,而残留N_{min}和表观损失均显著增加。秸秆还田措施下,作物累计氮素吸收和氮肥利用率分别增加了13.0% 和26.2%,氮素表观损失和损失率均降低了22.9%,但对残留N_{min}和表观残留率的影响不显著。

关键词:长期施氮;秸秆还田;作物产量;累计氮肥利用率;无机氮残留;氮平衡
中图分类号:S153.6+1 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)01-0065-09

Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system

YANG Xian-long, LU Yong-li, TONG Yan-an*, LIN Wen, LIANG Ting
(*College of Resources and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: In a 4-year field experiment, effects of the long-term N application and straw returning on crop yield, NUE, residual N_{min} and N budget are studied under wheat-corn rotation system in the Guanzhong Plain. The results show that the N application significantly increase the crop yields of winter wheat and summer maize with averages of 64.1% and 48.8% respectively, and the trends are increased at first and then decreased with N application rate increasing. The yields are not decreased in the 4-year successive harvests, though the nitrogen application rates are reduced by 27.3% for winter wheat and 55.6% for summer maize. The crop yields under the straw returning on are increased gradually with planting years. The accumulative NUEs of crops are increased with the increase of cropping rotation time and the NUEs in the four years are from 33.3% to 56.6%, which shows that the N fertilization has a carryover effect. The nitrogen application significantly enhances the residual N_{min} in which the residual nitrate-N is apparently larger than the residual ammonium-N. The residual nitrate-N in 0-100 cm soil layer shows a positive relationship with the annual N fertilizer inputs. The straw returning shows no effects on mineral N residual in this experiment. The results of N budget show that the N accumulative uptakes by the crops are firstly increased and then declined, while the residual N_{min} and apparent N loss are increased significantly. The straw

收稿日期:2012-04-11 **接受日期**:2012-06-19
基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项"主要农区农业面源污染监测预警与氮磷投入阈值研究"(20100314)资助。
作者简介:杨宪龙(1988—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail:yangxianlong1988@126.com
*通信作者 Tel:029-87081213, E-mail:tongyanan@nwsuaf.edu.cn

returning has strong influences on nitrogen budgets of the rotation system, N accumulative uptakes by the crops, and the NUEs are increased by 13.0% and 26.2%, respectively. Both the apparent N loss and apparent N loss efficiency are decreased by 22.9%, while the apparent fertilizer N is kept in soil (N_{min} residual) and its percentage in the straw returning treatment is not affected significantly compared with the treatment without straw returning.

Key words: long-term N application; straw returning; crop yield; NUE; residual N_{min}; N budget

土壤-作物体系的氮素平衡是评价氮肥管理合理与否的关键。据报道[1-2],80年代以后,我国农田氮素开始盈余,并呈现增长趋势。90年代以后,氮盈余量每年保持在360～546万吨,相当于N 24～35 kg/hm^2。冬小麦-夏玉米轮作是陕西关中平原典型的种植制度,为陕西粮食生产发挥着重要作用。然而,过量施肥现象在这一地区普遍存在。吕殿青等[3]指出,1990～2003年,陕西省80%的小麦、玉米存在过量施肥现象。同延安等[4]2004年在陕西中部地区调查发现,与小麦推荐施氮量N 135～180 kg/hm^{2}和玉米推荐施氮量N 180 kg/hm^{2}相比,陕西中部地区小麦生长季节,69%的农户平均过量施氮N 55 kg/hm^2,64%的农户平均过量施氮N 90 kg/hm^2。过量施肥导致大量氮素累积,表观损失量和损失率显著增加,利用率降低[5-7]。可见,在本地区开展农田氮素平衡研究意义重大。关中地区秸秆资源十分丰富,但集中焚烧现象普遍,既污染环境又浪费资源。研究表明[8],农作物秸秆不仅含有相当数量的碳、氮、磷、钾等营养元素,而且具有改善土壤理化性状,提高土壤肥力,提高作物产量等作用。目前,国内针对秸秆还田开展了大量研究,但大多集中在作物产量与品质[9-10],土壤肥力[8,11-12]、土壤水分状况[13-14]和土壤钾素[15]等方面,而有关小麦-玉米轮作体系氮素平衡的研究报道较少。鉴于此,本文利用4年定位试验研究了长期施氮和秸秆还田对作物产量、氮肥利用、0—100 cm土层无机氮残留和体系氮平衡的影响,以期为本地区合理施肥和粮食增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2007年10月～2011年10月在陕西省杨凌示范区"国家黄土肥力肥效监测基地"(34°4′N、108°2′E)进行。试验站位于关中平原西部,海拔534 m,年平均气温13℃,≥10℃积温4196.2℃。年均降水量550～600 mm,主要集中在7～10月,年均蒸发量993 mm,无霜期184～216d,属暖温带半湿润偏旱气候。地下水位28 m,深井抽水灌溉。实行冬小麦-夏玉米轮作的一年两熟制。试验土壤为渭河谷地的主要土类—垆土,成土母质为黄土,播前耕层土壤有机质含量17.1 g/kg、全氮0.85 g/kg、有效磷15.0 mg/kg、有效钾365.8 mg/kg、pH 7.38。

1.2 试验设计

试验共设6个处理,3次重复,小区面积5 m×6 m=30 m^2,田间完全随机排列。处理分别为:不施肥(N0)、减量施氮(N165)、优化施肥(N330)、农民习惯施肥(N471)、增量施氮(N495)和优化施肥+秸秆覆盖(N330+S)。小麦和玉米季具体施肥方案见表1。供试小麦品种为小偃22、玉米为郑单958,均为当地农民惯用品种。氮肥用尿素(含N 46.4%),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50%氮肥在播前一次性撒施,然后翻耕入土,另50%氮肥于返青后拔节前追施。在小麦播前将玉米秸秆5000 kg/hm^{2}粉碎还田。玉米季磷、钾肥在5叶期施入,氮肥分2次施,第一次于5叶期施入(50%),另50%于喇叭口期追施。玉米秸秆还田在5叶期进行,覆盖粉碎的小麦秸秆5000 kg/hm^2。其他田间管理措施和当地农民习惯保持一致。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 土样采集与测定 玉米收获时用土钻在每个试验小区分0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm和80—100 cm 5个层次采集土样,每小区采集5个点,按层次混合后放入预先准备好的冰盒,然后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。

表 1　冬小麦、夏玉米施肥方案

Table 1　The fertilizer application rates in the experiment

处理 Treatment	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize				年施氮量 Fertilizer rate of one year [kg/(hm² · a)]
	肥料施用量 Fertilizer rate (kg/hm²)		秸秆还田量 Straw returning (kg/hm²)	肥料施用量 Fertilizer rate (kg/hm²)			秸秆还田量 Straw returning (kg/hm²)	
	N	P_2O_5		N	P_2O_5	K_2O		
N0	0	0	0	0	0	0	0	0
N165	75	100	0	90	60	75	0	165
N330	150	100	0	180	60	75	0	330
N471	191	100	0	280	60	75	0	471
N495	225	100	0	270	60	75	0	495
N330 + S	150	100	5000	180	60	75	5000	330

1.3.2 植株样品采集与测定　冬小麦一般于当年 10 月上旬播种,次年 6 月中旬收获。收获时采收一定面积的小麦样品带回,风干后脱粒,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。夏玉米一般于当年 6 月播种(小麦收获后一周内),当年 10 月收获。玉米各小区全部收获(分肉穗和秸秆两部分),分别称量各小区秸秆和肉穗鲜重。然后每小区取 20 个玉米肉穗和部分秸秆带回实验室,风干、脱粒、称量干重,以小区总鲜重折算生物量。小麦、玉米植株样品的制备分籽粒和秸秆两部分进行,将采集的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,采用火焰光度计测定钾含量。

1.3.3 灌溉水和大气干湿沉降的监测　在每次灌溉时采集灌溉水样品带回实验室低温冷冻保存,采用 cleverchem200 间断化学分析仪测定 NO_3^--N 和 NH_4^+-N。干湿沉降样品采集利用 APS-2A 型降水降尘自动采样器进行,样品测定同灌溉水样。

1.4　计算方法及公式

试验数据采用 Excel 和 SAS 软件进行统计分析,分析过程所用公式如下:

作物吸氮量(kg/hm²) = (籽粒烘干产量 × 籽粒含氮量) + (秸秆烘干产量 × 秸秆含氮量);

累计氮肥利用率(%) = (一段时期内施氮作物累计氮素吸收量 - 该时期内不施氮作物累计氮素吸收量)/该时期内累计氮肥投入量 × 100;

表观残留 N_{min}(kg/hm²) = 土层厚度 × 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} - 灌溉和干湿沉降带入氮量;

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　结果与分析

2.1　长期定位施氮和秸秆还田对轮作体系冬小麦产量的影响

长期定位施氮和秸秆还田对冬小麦产量(2008～2011 年)的影响如表 2 所示。不同年份小麦产量随氮肥用量的增加均表现为先增加后不变甚至降低的趋势。连续 4 年统计结果显示,小麦季施氮介于 150～191 kg/hm² 时,作物已能获得较高产量,施氮量过高或过低都有减产的风险。N330 + S 处理随种植年限的推移其增产效果逐年增大,从 2010 年开始,其产量已显著高于 N330 处理,增幅分别达 19.0%(2010 年)和 29.8%(2011 年)。各施氮处理相对于不施氮处理而言,不同年份的增产效果均达到了 5% 的显著性水平。轮作 4 年后各施氮处理较空白处理增产变幅为 43.4%～79.8%,平均为 64.1%,表明施氮具有显著的增产效果。各处理中 N330 + S 处理增产幅度最大,为 79.8%,可见秸秆

表2 不同处理对冬小麦产量的影响(2008～2011年)

Table 2 Effects of different treatments on yields of winter wheat during the year 2008-2011

处理 Treatment	施氮量 N fertilizer rate (kg/hm²)	不同年份冬小麦籽粒产量(kg/hm²) Grain yield of winter wheat in each year				平均产量 Average (kg/hm²)	增产率 Increased rate (%)
		2008	2009	2010	2011		
N0	0	3185 ± 365 b	4320 ± 462 c	3485 ± 195 d	3264 ± 286 d	3563	—
N165	75	4303 ± 753ab	5371 ± 283 b	5753 ± 706 c	5006 ± 736 c	5108	43.4
N330	150	4479 ± 901 a	6240 ± 453 a	5947 ± 523 bc	6163 ± 237 bc	5707	60.2
N471	191	4534 ± 336 a	5786 ± 613 ab	6936 ± 622 ab	7113 ± 193 ab	6092	71.0
N495	225	4438 ± 521 a	6007 ± 454 ab	6470 ± 733 abc	6764 ± 1403 ab	5920	66.1
N330 + S	150	4730 ± 455 a	5821 ± 76 ab	7080 ± 502 a	7996 ± 656 a	6407	79.8

注(Note)：同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at the 5% level.

还田多年后可显著提高小麦籽粒产量。同农民习惯施肥N491处理相比,优化施氮N330处理每季节氮27.3%,但在连续4年种植中二者产量均没有显著差异。

2.2 长期定位施氮和秸秆还田对轮作体系夏玉米产量的影响

从表3可以看出,和小麦季相似,不同年份(2008年～2011年)各处理玉米籽粒产量也是随施氮量的增加表现为先增加后不变甚至降低的趋势。同农民习惯施肥N471处理相比,优化施氮N330处理每季节氮55.6%,但不同年份二者籽粒产量差异不显著,其4年平均产量N471(8655 kg/hm²)和N330(8681 kg/hm²)也是非常接近,可见过高的氮肥用量并不利于产量的增加。除08年外,各施氮处理玉米产量均显著高于对照处理,4年平均增幅为36.6%～59.6%,可见施氮能显著提高玉米籽粒产量。和小麦季类似,秸秆还田N330 + S处理对玉米的增产效果也是随着种植年限的增加逐渐明显,同优化施氮N330处理相比,08年籽粒产量有降低趋势,但差异不显著。从2009年开始,其增产趋势逐年增大,2010年增产达12.5%。

2.3 长期定位施氮和秸秆还田对轮作体系氮肥利用率的影响

考虑到轮作体系小麦、玉米对氮肥利用具有累加与转移效应,特将小麦季和玉米季作为一个整体,研究氮肥用量与整个体系累计氮肥利用率的关系,

表3 不同处理对夏玉米产量的影响(2008～2011年)

Table 3 Effects of different treatments on yields of summer maize during the year 2008-2011

处理 Treatment	施氮量 N fertilizer rate (kg/hm²)	夏玉米籽粒产量(kg/hm²) Grain yield of summer maize				平均产量 Average (kg/hm²)	增产率 Increased rate (%)
		2008	2009	2010	2011		
N0	0	5847 ± 413 b	4454 ± 209 c	7255 ± 141 d	5160 ± 390 c	5679	
N165	90	7340 ± 526 ab	6478 ± 337 b	8871 ± 584 c	8351 ± 184 ab	7760	36.6
N330	180	8740 ± 1075 a	7330 ± 329 ab	9988 ± 333 b	8668 ± 866 ab	8681	52.9
N471	270	7745 ± 1379 a	7181 ± 1334 ab	9558 ± 547 bc	7873 ± 454 b	8089	42.4
N495	280	8570 ± 1467 a	7900 ± 565 a	9799 ± 344 b	8351 ± 587 ab	8655	52.4
N330 + S	180	8172 ± 816 a	7911 ± 321a	11236 ± 258 a	8943 ± 347 a	9065	59.6

注(Note)：同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at the 5% level.

结果见表 4。结果显示,随着种植季的推移,氮肥的后效逐渐显现,体系累计氮肥利用率以增幅递减的方式缓慢增加,且逐渐趋于稳定。各处理 8 季作物累计氮肥利用率的变幅为 33.3%～56.6%,平均为 44.9%,明显高于第 1 季的利用率(15.9%～29.2%),可见氮肥也存在后效。不同种植季其累计氮肥利用率随施氮量的增加而减小。N330 + S 处理其累计利用率随种植季逐步增加,从第 5 季开始,其累计利用率已显著高出 N330 处理 20.6%,第 8 季的累计利用率为 56.4%,较 N471 和 N330 分别高出 67.4% 和 26.2%,可见秸秆覆盖措施能显著提高小麦-玉米轮作体系的氮肥利用效率,但其效果的体现需要一定时间。

表 4　小麦-玉米轮作体系累计氮肥利用率动态变化(4 年 8 季作物)

Table 4　Accumulative N use efficiency of the wheat-maize rotation system varies with cropping seasons

处理 Treatment	第 1 季 The 1st Season	第 2 季 The 2nd Season	第 3 季 The 3rd Season	第 4 季 The 4th Season	第 5 季 The 5th Season	第 6 季 The 6th Season	第 7 季 The 7th Season	第 8 季 The 8th Season
小麦-玉米轮作体系累计氮肥用量 Accumulative N fertilizer input of wheat-maize rotation system (kg/hm^2)								
N0	0	0	0	0	0	0	0	0
N165	75	165	240	330	405	495	570	660
N330	150	330	480	660	810	990	1140	1320
N471	191	471	662	942	1133	1413	1604	1884
N495	225	495	720	990	1215	1485	1710	1980
N330 + S	150	330	480	660	810	990	1140	1320
小麦-玉米轮作体系氮素吸收量 N uptake by wheat-maize (kg/hm^2)								
N0	41	91	50	39	81	125	62	105
N165	63	124	77	73	146	189	117	179
N330	66	122	130	86	153	225	170	232
N471	72	118	119	89	203	225	202	200
N495	77	124	121	96	186	229	212	208
N330 + S	69	119	120	102	200	251	236	242
小麦-玉米轮作体系累计氮素吸收量 Accumulative N uptake by wheat-maize rotation system (kg/hm^2)								
N0	41	132	181	220	301	427	489	594
N165	63	187	264	337	483	672	789	968
N330	66	189	319	405	557	782	953	1185
N471	72	191	310	399	602	826	1029	1229
N495	77	201	322	418	603	833	1045	1253
N330 + S	69	188	308	410	610	861	1097	1339
小麦-玉米轮作体系累计氮肥利用率 Accumulative N use efficiency of wheat-maize rotation system (%)								
N0	—	—	—	—	—	—	—	—
N165	29.2 a	33.6 a	34.5 a	35.5 a	44.9 a	49.6 a	52.6 a	56.6 a
N330	17.1 a	17.3 b	28.7 a	28.0 b	31.6 c	35.9 bc	40.7 b	44.7 b
N471	16.5 a	12.5 b	19.4 b	19.0 c	26.5 cd	28.3 c	33.7 b	33.7 c
N495	15.9 a	14.0 b	19.5 b	20.0 c	24.9 d	27.3 c	32.5 b	33.3 c
N330 + S	18.7 a	16.9 b	26.3 ab	28.8 b	38.1 b	43.9 a	53.3 a	56.4 a

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at the 5% level.

2.4 长期定位施氮和秸秆还田对土壤无机氮残留的影响

从表5可以看出,施氮显著增加了0—100 cm土层土壤无机氮的残留,且NO_3^--N残留明显高于NH_4^+-N,占无机氮残留量的62.2%～89.0%(4年变幅),说明北方旱地NO_3^--N是无机氮的主要存在

表5 不同处理对玉米收获期0—100 cm土层土壤无机氮残留的影响(2008～2011年)

Table 5 Effects of different treatments on mineral N accumulation in 0－100 cm soil layer at the harvest stage of maize during the year 2008–2011

处理 Treat.	NO_3^--N					NH_4^+-N					无机氮 N_{min}
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	0—100 cm
2008年玉米收获后 After summer maize harvested in the year 2008 (kg/hm^2)											
N0	6.5 d	7.9 d	6.8 b	7.7 bc	7.7 b	7.8 a	6.0 b	8.5 a	10.7 a	5.4 a	75 c
N165	10.7 bcd	7.9 d	7.9 b	6.4 c	6.6 b	7.2 a	6.5 b	9.0 a	10.6 a	9.8 a	83 c
N330	8.5 cd	16.3 cd	13.3 b	17.0 abc	14.3 a	8.0 a	10.9 a	9.3 a	7.4 a	7.9 a	113 bc
N471	14.9 b	24.1 bc	26.6 a	19.0 ab	14.2 a	8.1 a	9.6 ab	8.8 a	17.5 a	8.7 a	152 ab
N495	22.0 a	39.1 a	30.5 a	27.5 a	15.4 a	7.8 a	8.8 ab	9.6 a	20.8 a	9.3 a	191 a
N330+S	12.7 bc	30.2 ab	15.9 b	9.1 bc	5.7 b	6.5 a	5.7 b	6.9 a	11.1 a	11.3 a	115 bc
2009年玉米收获后 After summer maize harvested in the year 2009 (kg/hm^2)											
N0	13.2 b	9.2 b	5.2 b	6.8 c	4.6 b	5.1 ab	9.1 a	7.0 a	6.7 a	6.0 a	73 b
N165	6.9 b	19.9 ab	11.2 ab	6.9 c	6.2 b	4.0 b	6.1 ab	6.7 a	6.7 a	6.2 a	81 b
N330	52.0 ab	24.3 ab	14.4 ab	6.4 c	9.3 ab	5.0 ab	7.4 ab	7.5 a	6.7 a	5.1 a	138 ab
N471	69.1 a	64.1 a	84.9 a	58.7 ab	44.2 a	6.5 a	5.2 b	6.4 a	7.8 a	5.3 a	353 a
N495	57.5 ab	65.7 a	83.4 ab	72.8 a	42.2 a	4.1 b	5.0 b	5.6 a	7.5 a	4.7 a	349 a
N330+S	56.8 ab	36.1ab	36.0 ab	15.6 bc	18.3 ab	5.4 ab	5.5 ab	6.3 a	8.6 a	4.6 a	193 ab
2010年玉米收获后 After summer maize harvested in the year 2010 (kg/hm^2)											
N0	13.1 b	4.9 d	4.9 d	4.0 c	2.4 d	3.1 a	2.9 b	2.9 a	3.1 a	2.4 a	44 c
N165	15.7 b	8.9 d	9.1 d	4.2 c	3.4 d	3.0 a	2.7 b	4.1 a	2.7 a	2.6 a	56 c
N330	33.7 a	27.3 c	25.8 bc	25.7 b	19.9 b	3.3 a	2.7 b	3.1 a	3.1 a	2.4 a	147 b
N471	41.6 a	45.2 a	54.5 a	40.7 a	36.6 a	2.9 a	3.1 ab	3.1 a	2.5 a	3.0 a	233 a
N495	44.5 a	39.5 ab	39.6 ab	36.9 a	34.2 a	2.6 a	3.0 ab	3.3 a	3.3 a	2.6 a	210 a
N330+S	38.4 a	28.6 bc	18.3 cd	11.5 c	12.2 c	3.2 a	3.3 a	4.0 a	2.8 a	2.9 a	125 b
2011年玉米收获后 After summer maize harvested in the year 2011 (kg/hm^2)											
N0	9.6 b	5.2 b	1.4 d	0.5 c	0.3 c	0.5 b	1.6 ab	0.7 c	1.7 bcd	1.0 a	22 d
N165	16.3 b	6.9 b	4.9 cd	13.8 b	2.1 c	1.3 ab	2.7 ab	4.3 a	0.5 d	1.8 a	55 c
N330	27.0 a	8.7 b	4.7 cd	13.9 b	9.1 b	2.2 a	1.3 b	1.4 c	2.8 ab	2.3 a	73 b
N471	31.1 a	20.4 a	11.9 b	25.3 a	20.7 a	2.8 a	3.1 a	1.8 bc	1.1 cd	1.8 a	120 a
N495	31.4 a	19.7 a	19.3 a	23.4 a	24.0 a	2.2 a	1.0 b	3.1 ab	2.0 abc	2.8 a	129 a
N330+S	30.4 a	9.3 b	7.2 c	10.1 b	7.4 b	1.5 ab	1.5 ab	1.8 bc	3.1 a	2.1 a	75 b

注(Note):同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at the 5% level.

形式。在连续 4 年的作物种植中,0—100 cm 土层 NH_4^+-N 累积量年际间差异不大,平均变幅为 9.6 ～ 45.9 kg/hm^2。施氮对 NH_4^+-N 含量的影响主要在 0—40 cm 土层,表现出随施氮量增加先增加后降低的趋势,40 cm 土层以下各处理间差异基本不显著,可见 40 cm 以下 NH_4^+-N 含量受施肥的影响较小。NO_3^--N 含量受施肥的影响较大,随着土层深度的增加,不同年份其累积量均表现为先增加后降低的趋势,但在 80—100 cm 土层其含量却没有明显降低,尤其是施氮量较高的处理,说明 1m 土层以下仍有大量 NO_3^--N 累积。不同年份间 0—100 cm 土层硝态氮累积量差异较大。2008 年收获后,各处理 NO_3^--N 累积量为 36.5 ～ 134.4 kg/hm^2,平均为 75.4 kg/hm^2。2009 年平均为 167.0 kg/hm^2,较 2008 年增加了 1.2 倍。2010 年、2011 年分别为 120.9 kg/hm^{2}和 69.3 kg/hm^2,较 2009 年分别降低了 27.6%和 58.5%,这可能是2010、2011 年较多的降雨将 NO_3^--N 淋洗至 1m 土层以下所致。0—100 cm 土层 NO_3^--N 累积量在不同年份均随施氮量的增加而增加,且二者表现为较好的相关性,2008、2009、2010 和 2011 年其相关系数分别达 0.839、0.827、0.926 和 0.959,均达到了 5% 的显著性水平。秸秆覆盖对无机氮残留的影响在不同年份均没有表现出明显差异。

2.5　长期定位施氮和秸秆还田对轮作体系氮素平衡的影响

将小麦-玉米轮作体系作为一个整体,其氮素输入输出平衡结果如表 6 所示。在计算氮素表观平衡时,将土层定义在 0—100 cm 范围内,即作物根系的主要吸收区域。结果显示,在氮素的输入项中,化肥氮是氮素输入的主要部分,占总输入量的 51.7% ～76.3%。起始 N_{min}、矿化氮、灌水及干湿沉降带入氮为 616.5 kg/hm^2,占氮素输入量比例为 24.7% ～48.3%。土壤氮素输出项中,随施氮量增加,作物累计氮素吸收先显著增加后增幅不变,而残留 N_{min}、表观损失和氮盈余均显著增加。由此可见氮肥的过量投入不仅不能促进作物吸氮,而且导致损失量急剧增加。氮肥表观利用率的变幅为 33.3% ～56.6%,随施氮量的增加显著降低。表观损失率变幅为 38.6% ～61.4%,随施氮量的增加显著增加,氮肥表观残留率变幅较小,且处理间差异不显著。这可能是由于以 0—100 cm 土层计算氮素平衡低估

表 6　2008 ～2011 年小麦-玉米轮作体系氮素平衡(4 年 8 季作物)

Table 6　Nitrogen budgets of the wheat-maize rotation system during the year 2008-2011

氮素各项收支 N budget	处理 Treatment					
	N0	N165	N330	N471	N495	N330 + S
土壤氮输入 Soil N input (kg/hm^2)						
1 肥料氮 Fertilizer N	0	660	1320	1884	1980	1320
2 起始 N_{min} Initial N_{min}	46	46	46	46	46	46
3 矿化氮 Mineralized N	379	379	379	379	379	379
4 灌水及沉降带入 N from irrigation and deposition	191	191	191	191	191	191
总输入(1 +2 +3 +4)Total input	616	1276	1936	2500	2596	1936
土壤氮输出 Soil N output (kg/hm^2)						
5 作物吸收 Crop uptake N	594 d	968 c	1185 b	1229 b	1253 ab	1339 a
6 残留 N_{min} Residual N_{min}	22 d	55 c	73 b	120 a	129 a	75 b
7 表观损失 Apparent loss N	0 e	255 d	679 b	1152 a	1215 a	524 c
氮盈余(6 +7) N surplus	22	309	752	1272	1344	598
氮肥表观利用率 Apparent N recovery by crop (%)		56.6 a	44.7 b	33.7 c	33.3 c	56.4 a
氮肥表观残留率 Apparent N remained in soil (%)		4.9 ab	3.9 b	5.2 ab	5.4 a	4.0 ab
氮肥表观损失率 Apparent N loss ratio (%)		38.6 c	51.4 b	61.1 a	61.4 a	39.6 c

注(Note): 同列数据后不同字母表示差异达5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at the 5% level.

了无机氮的实际残留水平,表5中80—100 cm土层较高的NO_3^--N残留证明了这一点。秸秆还田对体系氮素平衡影响较大,N330+S较N330处理作物累计氮素吸收量增加了13.0%,累计氮肥利用率增加了26.2%,氮素表观损失和损失率均降低了22.9%,但对残留N_{min}和氮肥表观残留率的影响不显著。

3 讨论与结论

施氮可以显著提高作物产量,然而当施氮量增加至一定程度时,产量不再继续增加,反而表现为下降的趋势。林治安等[16]2009年在22年的长期定位试验得到的结果与此一致,认为高量施氮无助于作物产量提高,巨晓棠等[7]2003年的研究也得到相似的结论。在本试验条件下,小麦施氮N 150～191 kg/hm^2、玉米施氮N 180 kg/hm^{2}作物即可获得高产,施氮过高或过低都有减产的风险。秸秆还田对作物的增产效果随种植年限的推移越来越明显,小麦和玉米季均在还田2年后表现出显著的增产效果。谭德水等[15]2007年在华北平原13年的秸秆覆盖试验中发现同样的规律,认为秸秆还田不仅能缓解土壤钾素下降,还能提高小麦和玉米产量。于舜章等[14]2004年的研究也发现,小麦秸秆还田处理均比相应的不还田处理使玉米平均增产14.6%。累计利用率是指一段时期内作物累计从土壤中吸收的养分量与累计施入土壤中的肥料养分量的比值,它可以消除年际间的差异和肥料的后效。时间越长,肥料的利用率越稳定,更能准确说明肥料利用的真实情况[17]。本研究显示,小麦-玉米轮作体系累计氮肥利用率随种植季推移缓慢增加,前8季作物达33.3%～56.6%,说明氮肥存在后效,这与李世清等[18]2000年的研究结果一致,他认为仅用当季利用率难以客观评价氮肥利用状况。在关中小麦-玉米轮作体系优化施氮(小麦季施氮N 150 kg/hm^2、玉米季施氮N 180 kg/hm^2)的基础上,每季作物秸秆还田5000 kg/hm^{2}能显著提高体系的氮肥累计利用率,8季作物累计利用率高达56.4%,较农民习惯施肥和优化施肥处理分别增加67.4%和26.2%。这一点与张水清等[19]在水稻和霍竹等[20]在玉米上得出的结论一致。

蔡红光等[21]2012年在连续3年东北春玉米试验中发现,施氮显著增加了土壤无机氮残留量,且以NO_3^--N残留为主,本试验结果与此一致,并且发现0—100 cm土层NO_3^--N累积量与施氮量存在显著的正相关关系。刘瑞等[22]2011年研究了冬小麦土壤剖面NO_3^--N残留,指出随施氮量增加其呈指数趋势增加,该结果与此相近。秸秆还田对土壤无机氮残留在本试验条件下没有表现出显著影响,而赵鹏等[11]2010年的研究指出,秸秆还田提高了土壤铵态氮含量。这可能与采样时间、土壤类型和秸秆还田量等因素存在差异有关。

本试验条件下,随着氮肥用量的增加,残留N_{min}、表观损失和表观损失率均显著增加,氮肥表观利用率显著降低,这与巨晓棠等[7]2003年在华北平原小麦、玉米的研究上得到的结论一致。然而,氮肥表观残留率变幅较小,且处理间差异不明显,这一点与王西娜等[1]在0—200 cm土层研究中得出的氮肥表观残留率随施氮量增加而增加的结论不一致。认为仅以0—100 cm土层作为计算对象,可能低估了氮肥的残留而过高估计了表观损失。但刘学军等[23]2004年研究发现,1—2 m土层中累积的硝态氮不因减量施氮而下降,说明这一土层的硝态氮可能难以被作物吸收利用,其最终归属无疑是离开土壤-作物系统进入环境,或进一步淋洗进入地下水体,或通过深层反硝化进入大气。本研究在分析农田氮素平衡时没有考虑秸秆还田对土壤矿化的激发效应,而把土壤看作"黑箱",仅考虑了氮的表观输入和输出,但从宏观角度看,这并不影响说明秸秆还田对农田生态系统氮素平衡有重要影响。

参 考 文 献:

[1] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 759-764.
Wang X N, Wang Z H, Li S X. Soil nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system on dry-land of Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(6): 759-764.

[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.
Zhang F S, Ju X T. Discussion on nitrogen management and environment in agro-ecosystems of sustained development of agriculture[J]. Acta Pedol. Sin., 2002, 39 (Suppl.): 41-55.

[3] 吕殿青, 同延安, 孙本华, 等. 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.
Lü D Q, Tong Y A, Sun B H *et al*. Study on environment pollution affected by nitrogen fertilizer application[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(1): 8-15.

[4] 同延安, Emteryd Ove, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1239-1244.
Tong Y A, Emteryd O, Zhang S L *et al*. Evaluation of over-application of nitrogen fertilizer in China's Shaanxi province[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(8): 1239-1244.

[5] 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.
Liu X Y, Ju X T, Zhang L J *et al*. Effect of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 296-303.

[6] 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 滴灌施肥中施氮量对两年蔬菜产量、氮素平衡及土壤硝态氮累积的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2535-2545.
Zhang X J, Zhao Y, Chen X Q *et al*. Effects of application of nitrogen on vegetable yield, nitrogen balance and soil nitrogen accumulation under two years, drip fertigation[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(11): 2535-2545.

[7] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 264-270.
Ju X T, Pan J R, Liu X J *et al*. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat-summer maize rotation system in Beijing suburban[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(3): 264-270.

[8] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z *et al*. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 618-623.

[9] 蒋向, 任洪志, 贺德先. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦生长发育和产量的影响研究进展[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(3): 569-574.
Jiang X, Ren H Z, He D L. Research progress on effects of returning maize straws into soil on soil physical & chemical characters and on development and yield of wheat as succeeding crop[J]. Acta Triticeae Crops, 2011, 31(3): 569-574.

[10] 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.
Zhao P, Chen F, Ma X M *et al*. Effects of integrated straw on crop yield and nitrogen balance in winter wheat & summer maize[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2010, 28(2): 162-166.

[11] 赵鹏, 陈阜, 李莉. 秸秆还田对冬小麦农田土壤无机氮和土壤脲酶的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 165-169.
Zhao P, Chen F, Li L. Effects of straw mulching on inorganic nitrogen and soil urease in winter wheat field[J]. Acta Agric. Bor. Sin., 2010, 25(3): 165-169.

[12] 颜丽, 宋杨, 贺靖, 等. 玉米秸秆还田时间和还田方式对土壤肥力和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 143-148.
Yan L, Song Y, He J *et al*. Effects of maize stems returning back to the field on the yield of plants and soil fertility[J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(2): 143-148.

[13] 刘婷, 贾志宽, 张睿, 等. 秸秆覆盖对旱地土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 68-76.
Liu T, Jia Z K, Zhang R *et al*. Effect of straw mulching on soil moisture and water use efficiency of winter wheat in dry-land[J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.), 2010, 38(7): 68-76.

[14] 于舜章, 陈雨海, 周勋波, 等. 冬小麦期覆盖秸秆对夏玉米土壤水分动态变化及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 175-178.
Yu S Z, Chen Y Q, Zhou X B *et al*. Effect of straw-mulch during wheat stage on soil water dynamic changes and yield of summer maize[J]. J. Soil Water Conserv., 2004, 18(6): 175-178.

[15] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 133-139.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W *et al*. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. Sci. Agric. Sin., 2007, 40(1): 133-139.

[16] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819.
Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L *et al*. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(8): 2809-2819.

[17] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期定位施肥对玉米肥料利用率影响的研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(4): 129-133.
Huang S M, Bao D J, Huangpu X R *et al*. Effect of long term fertilization on fertilizer utilization efficiency on maize in fluvo-aquic soil[J]. Maize Sci., 2006, 14(4): 129-133.

[18] 李世清, 李生秀. 旱地农田生态系统氮肥利用率的评价[J]. 中国农业科学, 2000, 33(1): 79-84.
Li S Q, Li S X. Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dry-land agro-ecosystem[J]. Sci. Agric. Sin., 2000, 33(1): 79-84.

[19] 张水清, 钟旭华, 黄农荣, 等. 稻草覆盖还田对水稻氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 611-616.
Zhang S Q, Zhong X H, Huang N R *et al*. Effect of straw-mulch-incorporation on nitrogen uptake and N fertilizer use efficiency of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(3): 611-616.

[20] 霍竹, 付晋锋, 王璞. 秸秆还田和氮肥施用对夏玉米氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2005, 37(2): 202-204.
Huo Z, Fu J F, Wang P. Effects of application of N-fertilizer and crop residues as manure on summer maize N recover rate[J]. Soils, 2005, 37(2): 202-204.

[21] 蔡红光, 米国华, 张秀芝, 等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 89-97.
Cai H G, Mi G H, Zhang X Z *et al*. Effect of different fertilizing methods on nitrogen balance in the black soil for continuous maize production in Northeast China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(1): 89-97.

[22] 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.
Liu R, Dai X L, Zhou J B *et al*. Relationship between accumulated nitrate nitrogen in soil profiles and apparent nitrogen budget in winter wheat fields under nitrogen fertilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(6): 1335-1341.

[23] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. 应用生态学, 2004, 15(3): 458-462.
Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(3): 458-462.