

优化施肥对春小麦产量、氮素利用及氮平衡的影响

赵 营^{1,2}, 周 涛², 郭鑫年², 梁锦秀²,
吴 霞², 冀宏杰¹, 张维理^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 2009~2010 年, 在宁夏引黄灌区分别以宁春 11 号和宁春 16 号小麦为供试作物, 利用田间试验研究了优化施肥(OPT)和习惯施肥(CON)对春小麦产量、氮素吸收利用和土壤硝态氮累积的影响, 表观评估了土壤—小麦体系氮素平衡。结果表明, 相对于 CK 处理, OPT 和 CON 都显著提高春小麦籽粒产量地上部生物量, 并促进籽粒 N 和地上部 N 的吸收累积, 但二者之间差异不显著。施肥对小麦收获指数无显著影响, 但 OPT 处理更有利于小麦产量构成与农学性状的改善, 较好地发挥其产量潜力。OPT 较 CON 提高了小麦的氮肥利用率、农学利用率和偏生产力。土壤硝态氮累积随土壤深度的增加而呈降低趋势, OPT 处理可有效地减少 0~100 cm 各层土壤硝态氮的累积。土壤—小麦体系氮素表观平衡表明, 应充分挖掘土壤和环境养分潜力, 通过优化施肥来降低 N_{min} 残留和氮素表观损失。

关键词: 春小麦; 施肥; 产量; 氮素利用; 土壤硝态氮累积; 氮平衡

中图分类号: S512.1⁺2; S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)06-0119-06

春小麦是宁夏引黄灌区优势特色作物之一, 它对全自治区的粮食贡献在 30% 以上^[1]。施肥是作物增产的重要措施, 但不合理施用会导致肥料利用率低, 经济效益下降, 更加剧了环境污染^[2,3]。我国禾谷类作物的氮肥利用率只有 28%~41%^[4], 大部分氮素通过各种途径损失掉, 而硝态氮淋洗是土壤氮素的主要损失途径^[5]。在春小麦产量、水肥管理和栽培技术等方面已开展了很多的研究工作^[6~8], 但随着品种更替和栽培技术的提高, 宁夏春小麦的单产潜力还有待进一步挖掘。为获得较高的产量, 灌区农民普遍施肥过量, 而且施肥结构不合理。王明国等^[9]调查显示, 宁夏引黄灌区春小麦单季平均施 N 318 kg/hm²、P₂O₅ 171 kg/hm², 2/3 以上氮肥一次基肥施入。利用合理的施肥技术和高效栽培技术来挖掘新型小麦品种的单产潜力成为解决这一问题的关键。Raun 和 Johnson^[10]提出了土壤—植物系统对土壤剖面硝态氮累积缓冲作用的概念, 即土壤—植物系统能够在达到最高产量施氮量时, 抑制土壤剖面硝态氮累积。综合研究土壤—作物体系的氮素平衡, 是评价氮肥合理施用与否的关键。因此, 本文通过田间试验, 在宁夏引黄灌区, 研究了优化施肥量、施肥配比与氮肥运筹对春小麦产量、氮素利用及土壤硝态氮累积的影响, 评价优化施肥的环境效应, 为宁夏引黄灌区春小麦的合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2009~2010 年在宁夏中宁县舟塔乡康滩村进行连续定位试验, 试验地地理坐标为东经 105°38'7", 北纬 37°30'38", 该地海拔 1 115 m, 主要气候特点是干旱少雨, 年均降水量 200 mm, 蒸发量 2 000 mm, 年均气温 9℃, 是典型的灌溉农业区, 种植制度多为水旱轮作。试验地土壤类型为灌淤土, 0~20 cm 土壤有机质 15.6 g/kg, 全氮、全磷和全钾含量分别为 0.87 g/kg、0.92 g/kg 和 18.3 g/kg, 有效磷 25.7 mg/kg, 速效钾 106.5 mg/kg。0~100 cm 各层土壤容重和无机氮含量如表 1 所示。

表 1 试验前 0~100 cm 各层土壤容重和无机氮含量

Table 1 Soil bulk density and N_{min} content in 0~100 cm

soil before the experiment			
土层深度 Soil depth (cm)	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)
0~20	1.37	20.7	0.04
20~40	1.50	11.5	0.01
40~60	1.45	6.7	0.03
60~80	1.45	3.7	0
80~100	1.30	12.9	0

收稿日期: 2011-05-13
基金项目: “十一五”国家科技支撑计划课题(2008BADA4B09, 2006BAD05B07); 宁夏自然科学基金(NZ0971)
作者简介: 赵 营(1979—), 男, 河南项城人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事农田养分循环与环境研究。E-mail: tony029@126.com。
* 通讯作者: 张维理(1953—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业面源污染与数字土壤研究。E-mail: wlzhang@caas.ac.cn。
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 试验设计

试验设 3 个处理,分别是不施肥(CK)、习惯施肥(CON)和优化施肥(OPT)。习惯施肥根据当地调查的农户施肥模式,即全生育期施肥 2 次(基施和追肥各 1 次),施纯 N 315、 P_2O_5 180 kg/hm²,2/3 的 N 和全部磷肥基施,1/3 的氮肥在小麦灌头水前追施。优化施肥通过优化施肥量、施肥结构和氮肥运筹进行,即全生育期施纯 N 225、 P_2O_5 120、 K_2O 60 kg/hm²,采用氮肥后移技术,60%的 N 和全部磷钾肥基施,在小麦分蘖期和拔节期各追施 20%。氮肥为尿素(N 46%),磷肥和钾肥分别为重过磷酸钙(P_2O_5 46%)和硫酸钾(K_2O 50%)。小区面积为 52.8 m² (9.6 m×5.5 m),重复 4 次,随机区组排列。

2009 年供试春小麦品种为宁春 11 号,播种量为 375 kg/hm²,当年 2 月 27 日播种,7 月 5 日收获。2010 年春小麦品种为宁春 16 号,播种量为 300 kg/hm²,3 月 2 日播种,7 月 13 日收获。灌水方法:4 月底灌完头水,5 月上中旬灌第二水,5 月下旬灌三水,6 月 20 日左右灌第四水,总灌水量为 4 500 m³/hm²。其它管理同当地大田。

1.3 样品采集与测定

土壤样品:试验前后,分别按 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm 采集各层土样,播前采 3 个混合样测定,收获后按小区采集 3 个土壤剖面,相同层次混合。新鲜土样用 1 mol KCL 按水土比 4:1 浸提,流动注射分析仪测定 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量^[11]。土壤 N_{min}=NO₃⁻-N+NH₄⁺-N,并根据各层土壤容重将单位换算成 kg/hm²。

植株样品:春小麦成熟期,每小区收割 3 个 2 m² 植株样品,按籽粒和秸秆两部分进行生物量统计,测定植株含水量折算干物质量。同时每小区取 1 m 样段,用于产量构成因素与农学性状调查。采集的植物样烘干后,粉碎,用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解,自动定氮仪测全氮。

灌溉水样:每次灌水,估算灌水量,并采集 500 mL 灌溉水样,碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定全氮,以计算灌水输入的氮素。

1.4 计算公式与统计方法

氮效率评价公式如下:

氮收获指数=籽粒氮积累量/地上部总氮积累量

氮肥利用率(%)=(施氮区吸氮量-不施氮区吸氮量)/施氮量×100%

氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区产量/施氮量

有关氮平衡计算公式如下^[12]:

土壤氮素矿化=无肥区地上部氮积累+无肥区土壤残留 N_{min}-无肥区土壤起始 N_{min}

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

氮表观损失(kg/hm²)=氮素总输入-作物吸收-土壤残留 N_{min}

数据和图表处理用 Excel 2003 及 DPS 5.01 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 优化施肥对春小麦产量与产量构成的影响

表 2 结果表明,相对于 CK 处理,OPT 和 CON 都能显著增加春小麦籽粒产量和地上部生物量,但二者之间差异不显著。2009 年,OPT 和 CON 的籽粒产量比 CK 分别提高了 28.3%和 30.0%,2010 年分别提高了 86.8%和 61.6%。两年试验中,OPT 比 CON 处理节约了 29%的氮肥,但其籽粒产量并没有降低,地上部生物量的累积反而会增加。2010 年春小麦生长期间,受灌浆期阴雨天气的影响,造成当年小麦产量潜力受限,但 OPT 依然可获得 5.9 t/hm² 和 15.5 t/hm² 的籽粒产量和地上部生物量,较 CON 分别增加了 15.6%和 21.4%。各施肥处理间的收获指数无显著差异,2009 年小麦收获指数为 0.44~0.48,2010 年仅为 0.33~0.38,进一步反映了 2010 年小麦产量潜力并没有发挥出来。以上结果说明,优化施肥更有利于地上部生物量的形成,从而提高小麦籽粒产量。

2009 年小麦收获后,调查了春小麦的产量构成与农学性状(表 3)。结果表明,千粒重以 CK 最高,达 41.7 g,可能是其穗粒数和单位面积穗数较少的原因。CON 处理单位面积穗数最高,但其千粒重和穗粒数都不高,从而最终影响小麦籽粒产量的形成。OPT 处理的千粒重、穗粒数和单位面积穗数等构成因素相对比较合理,可获得较高的产量。另外,OPT 处理的株高和穗长分别为 67 cm 和 7.0 cm,比 CON 处理都具有较高的生物学优势。OPT 和 CON 的理论产量分别可达 6.8 t/hm² 和 7.2 t/hm²,OPT 的实际产量与理论产量比较一致,而 CON 实际产量与理论产量还有 0.3 t/hm² 的差距。优化施肥更有利于春小麦产量构成因素与农学性状的改善,从而较好地发挥其产量潜力。

表 2 优化施肥对春小麦产量及收获指数的影响

Table 2 Effect of optimum fertilization on yield and harvest index of spring wheat

处理 Treatment	籽粒产量(t/hm ²) Grain yield		地上部生物量(t/hm ²) Shoot biomass		收获指数 Harvest index	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
CK	5.3±0.8 _b	3.1±1.2 _b	11.0±1.4 _b	9.6±3.4 _b	0.48±0.03 _a	0.33±0.04 _a
OPT	6.8±0.6 _a	5.9±0.6 _a	15.5±0.9 _a	15.5±1.9 _a	0.44±0.03 _a	0.38±0.02 _a
CON	6.9±0.4 _a	5.1±0.6 _a	14.9±0.8 _a	13.8±1.0 _a	0.46±0.01 _a	0.37±0.02 _a

注:同一列数据不同字母代表差异达 5%显著水平,下同。
Note: The values in the same column with different letters show significant difference at 5%, and they are the same in the follows.

表 3 优化施肥对春小麦产量构成因素与农学性状的影响

Table 3 Effect of optimum fertilization on yield composition and some agronomical characteristics of spring wheat

处理 Treatment	千粒重 1000-grain weight (g)	穗粒数 Grain/ear	穗数 Ears/m ²	株高 Height (cm)	穗长 Ear length (cm)	理论产量 Theoretical yield (t/hm ²)
CK	41.7±0.8	25±2	714±121	52±2	4.3±0.2	5.5±0.9
OPT	38.2±2.0	30±2	787±78	67±2	7.0±0.2	6.8±0.8
CON	36.4±1.2	29±2	907±61	65±2	6.6±0.3	7.2±0.9
平均 Mean	38.8	28	803	61	6.0	6.5

2.2 优化施肥对春小麦氮素吸收利用的影响

从表 4 可以看出,相对于 CK 处理,OPT 和 CON 都显著促进了春小麦籽粒 N 和地上部 N 的吸收累积。2009 年,各施肥处理地上部累积 N 为 137.2~187.6 kg/hm²,2010 年为 104.6~175.6 kg/hm²,OPT 和 CON 处理间地上部氮素累积差异并不大,可能是优化施肥通过平衡施肥更能促进春小麦对氮素的吸

收利用。氮收获指数反映了氮素向籽粒转移的强度,2009 年,各处理的 N 收获指数为 0.77~0.82,2010 年为 0.69~0.76,CON 处理都是最高,与 CK 和 OPT 处理存在显著的差异性,可能由于过量施用氮肥造成籽粒对氮素的奢侈吸收,但其对籽粒产量形成并没有起到积极作用。在 OPT 处理下,小麦地上部氮素的吸收和转运更有利于籽粒产量形成。

表 4 优化施肥对春小麦氮素吸收的影响

Table 4 Effect of optimum fertilization on N uptake by spring wheat

处理 Treatment	籽粒 N (kg/hm ²) Grain N uptake		地上部 N (kg/hm ²) Shoot N uptake		N 收获指数 N harvest index	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
CK	108.6±18.7 _b	72.6±28.1 _b	137.2±28.8 _b	104.6±37.9 _b	0.80±0.03 _{ab}	0.69±0.02 _b
OPT	142.0±12.7 _a	126.3±13.0 _a	185.4±14.9 _a	171.6±17.7 _a	0.77±0.02 _b	0.74±0.02 _a
CON	154.6±14.3 _a	134.8±22.0 _a	187.6±15.3 _a	175.6±23.5 _a	0.82±0.02 _a	0.76±0.03 _a

从氮肥利用率(RE)、农学利用率(AE)和偏生产力(PFP)三方面评价春小麦的氮效率(表 5)。结果表明,OPT 处理下,2009~2010 年春小麦的氮肥当季利用率分别为 21.4%和 29.8%,比 CON 处理分别提高了 6.4 和 7.3 个百分点。两年小麦种植体系,CON 处理分别有 84.0%和 77.5%的氮素未被当季作物吸收利用,大大增加了氮素损失的可能。氮肥利用率主要反映作物对肥料氮的吸收情况,但不能反映作物吸收的氮转化成了经济产量的程度。农学利用率指每投入单位肥料氮增加的作物产量,反映肥料的增产效益。由于土壤基础肥力作用,2009

年,OPT 和 CON 处理的氮肥农学利用率差异不大,但 2010 年 OPT 处理的农学利用率达 12.1 kg/kg,显著高于 CON。氮肥偏生产力表示每投入单位肥料氮所能生产的作物籽粒产量,OPT 处理的偏生产力比 CON 明显提高。因此,优化施肥可提高小麦氮肥生产效率,增加单位面积作物籽粒产量。

2.3 优化施肥对土壤硝态氮累积的影响

2009~2010 年春小麦收获后 0~100 cm 土壤剖面硝态氮累积动态如图 1 所示。可以看出,2009 年小麦收获后,施肥均增加了 0~100 cm 土体土壤硝态氮的累积,尤其是 CON 处理下硝态氮累积明显高

表 5 优化施肥对春小麦氮效率的影响(%)
Table 5 Effect of optimum fertilization on N utilization efficiency

处理 Treatment	氮肥利用率 Recovery efficiency of applied N (RE, %)		氮肥农学利用率 Agronomy efficiency of applied N (AE, kg/kg)		氮肥偏生产力 Partial factor productivity from applied N (PFP, kg/kg)	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010
OPT	21.4±11.3 _a	29.8±17.2 _a	6.6±3.9 _a	12.1±4.4 _a	30.1±2.7 _a	26.1±2.8 _a
CON	16.0±12.4 _a	22.5±19.1 _a	5.0±3.5 _a	6.1±4.8 _b	21.8±1.4 _b	16.1±1.8 _b

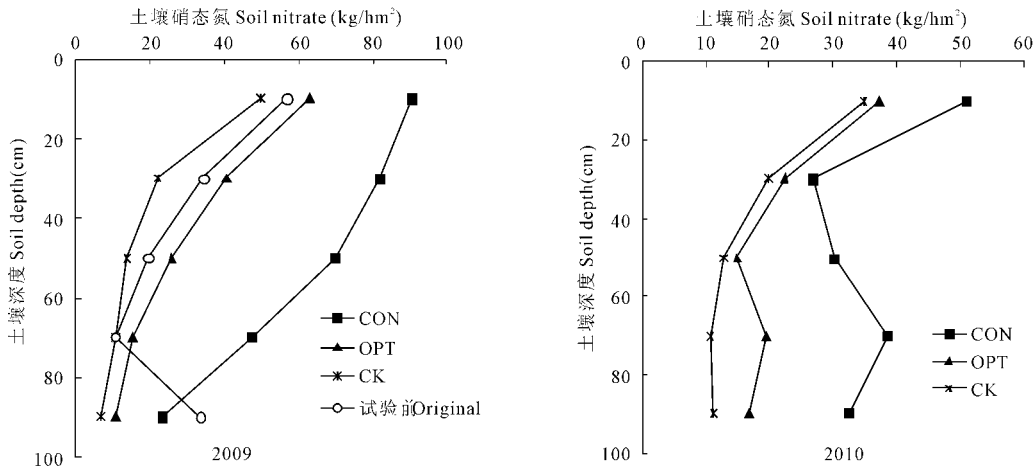


图 1 2009~2010 年春小麦收获后 0~100 cm 土壤硝态氮累积
Fig.1 Soil nitrate accumulation in 0~100 cm soil depth after spring wheat harvest from 2009~2010

于 OPT 和 CK 处理。CK、OPT 和 CON 处理下,0~100 cm 各层土壤硝态氮累积量分别在 6.8~49.9 kg/hm²、10.7~62.9 kg/hm² 和 23.4~90.4 kg/hm² 之间,随着土壤深度的增加而呈降低的趋势,这说明第一季春小麦施用的氮肥主要在 0~100 cm 土体范围发生累积。2010 年春小麦收获后,CK、OPT 和 CON 处理下 0~100 cm 各层土壤硝态氮累积变化分别在 11.3~34.9 kg/hm²、15.1~37.4 kg/hm² 和 26.8~51.1 kg/hm² 之间,0~60 cm 的土壤硝态氮累积明显降低。这可能是由于连续施肥和上茬作物残留在土壤中的硝态氮超过了作物的生长需求,造成了累积的土壤硝态氮在强灌水作用下向小麦根区以下淋洗。但总体来说,优化施肥相对于习惯施肥可有效地减少硝态氮在 0~100 cm 土层累积和向深层淋洗的可能。

2.4 土壤-小麦体系氮素表观平衡

通常以作物根系主要分布范围的 0~100 cm 土体来评价土壤-小麦体系氮素平衡^[12]。从表 6 可知,氮肥、土壤残留 N_{min}和矿化是氮素主要输入项,灌溉和种子也能带入小部分氮素;氮素的输出包括作物吸氮、土壤残留 N_{min}和表观损失。2009 年春小麦季,起始 N_{min}和当季氮素矿化量之和达 236.1

kg/hm²,远可满足作物地上部氮素需求。因此,施肥造成了 0~100 cm 土壤无机氮大量累积,CON 和 OPT 处理的当季氮素表观损失仅为 25.2 kg/hm² 和 93.6 kg/hm²,而 CON 处理的当季无机氮累积量高达 338.4 kg/hm²,显著高于 OPT 处理的 182.1 kg/hm²,增加了土壤残留氮素淋洗损失的风险。2010 年春小麦季,土壤残留的 N_{min}值已超过小麦氮素需求量,施肥造成的氮素表观损失明显增加,CON 处理下表观损失高达 364.3 kg/hm²。优化施肥可降低氮素的盈余(土壤 N_{min}残留+表观损失),2009 和 2010 年,OPT 较 CON 分别减低了 24%和 44%的土壤氮素盈余。因此,在评价了土壤-小麦体系氮素表观平衡后,最有效的调控措施是通过优化氮肥用量来降低土壤 N_{min}残留和氮素表观损失。

3 结论与讨论

施肥是影响作物产量、产量构成和氮效率的重要因素。研究表明,施用氮肥可显著提高春小麦的籽粒产量和地上部总吸氮量,但过量施用氮肥增产效果不显著^[13],施肥增产率与籽粒产量、生物产量、穗粒数呈高度正相关^[14]。也有研究表明,小麦籽粒产量随出苗率的增加而增加^[15],小麦产量降低主要

表 6 2009~2010 年土壤—小麦体系氮素表观平衡
Table 6 Apparent N balance in soil-wheat system from 2009~2010(0~100 cm)

作物季 Crop season	2009 年春小麦 Spring wheat 2009			2010 年春小麦 Spring wheat 2010		
	CK	OPT	CON	CK	OPT	CON
氮输入 N input (kg/hm ²)						
① 氮肥 N fertilizer	0	225	315	0	225	315
② 起始 N _{min} Initial	155.1	155.1	155.1	113.5 _b	182.1 _b	338.4 _a
③ 矿化 Mineralization	81	81	81	73	73	73
④ 灌溉水 Irrigation	7.8	7.8	7.8	7.6	7.6	7.6
⑤ 种子 Seed	6.8	6.8	6.8	5.4	5.4	5.4
总投入 Total input : ①+②+③+④+⑤	250.7	475.7	565.7	199.5	493.1	739.4
氮输出 N output (kg/hm ²)						
⑥ 地上部吸氮 Shoot N uptake	137.2 _b	185.4 _a	187.6 _a	104.6 _b	171.6 _a	175.6 _a
⑦ 残留 N _{min} Reside	113.5 _b	182.1 _b	338.4 _a	94.9 _b	119.3 _b	186.5 _a
⑧ 表观损失 Apparent losses	—	93.6	25.2	—	189.3	364.3
氮盈余 N surplus : ⑦+⑧	113.5	275.7	363.6	94.9	308.6	550.8

是穗密度低和千粒重小而造成的^[16],适当增加氮肥用量可以增加单位面积的穗数,降低产量损失。确定适宜密度和氮磷钾的用量,可促进小麦分蘖的形成,提高分蘖成穗率,有利于获得高产^[17]。从产量构成三要素来看,对春小麦产量的直接作用大小依次为穗粒数>千粒重>穗数^[18]。而本研究中,优化施肥合理地协调了小麦千粒重、穗粒数和单位面积穗数等产量构成因素,改善了农学性状,从而获得较高的产量。施肥对小麦收获指数无显著差异,2009年为0.44~0.48,2010年仅为0.33~0.38。而根据宁夏春小麦生长发育的生态条件,理想的株高应在80 cm左右,收获指数为0.45~0.48,每穗粒数为30~40粒,千粒重45 g以上,理论产量可达10~11 t/hm²^[18]。因此,通过优化施肥和高效栽培技术的结合,该地春小麦单产潜力还有待挖掘。

根据小麦生长发育的需要,结合土壤水分和土壤养分的测定来优化水氮管理,可比习惯施肥节氮75%,而不降低小麦产量^[19]。本试验中,OPT和CON处理都能显著提高春小麦籽粒产量和地上部生物量,二者差异不显著,而OPT较CON节约了29%的氮肥。OPT和CON也都显著促进了籽粒N和地上部N的吸收累积,CON处理过量施氮造成籽粒对氮素的奢侈吸收^[20],其对籽粒产量形成并没有积极作用。本研究从氮肥利用率(RE)、农学利用率(AE)和偏生产力(PFP)三方面评价了春小麦的氮效率,OPT较CON处理可显著提高氮肥农学利用率和偏生产力。张爱平在宁夏引黄灌区研究结果表明^[13],在施N 120、240、360 kg/hm²水平下,春小麦氮肥利用率分别为18.2%、24.3%、27.2%,氮肥利用率随施氮量增加而降低;而本试验在OPT(N 225 kg/hm²)处理下,两年春小麦的氮肥当季利用率分别

为21.4%和29.8%,与该研究结果十分接近。因此,优化施肥可提高春小麦对氮素的吸收利用效率,增加单位面积作物籽粒产量,从而提高其增产潜力。

郭天财等^[21]研究认为,施氮水平对高产麦田氮素利用及氮平衡具有调控效应,适当增施氮肥有利于提高籽粒产量,未被当季作物利用的氮主要以氮表观损失和残留无机氮的形式损失,且随施氮水平的增加而增加。也有研究认为^[22,23],氮磷配施或与有机肥配施能够有效地减少土壤剖面中硝酸盐的累积和淋溶,本研究通过优化施肥量、施肥结构和氮肥运筹能明显降低0~100 cm土体土壤硝态氮累积,减少淋溶损失发生的可能。在氮素表观平衡中,作物携出量并不随输入量的增加有显著的变化,从而导致施氮量高时氮素盈余量也很高^[24]。OPT处理可降低氮素的盈余(土壤N_{min}残留+表观损失),2009和2010年,分别较CON处理减低了24%和44%的氮素盈余,从而减少了氮素的表观损失。

本试验条件下,优化施肥有利于春小麦地上部生物量和籽粒产量的提高,有利于协调其产量构成与改善农学性状,可有效地减少硝态氮的淋失,从而降低土壤N_{min}残留和氮素表观损失。在保证小麦产量的基础上,考虑到土壤N_{min}残留、氮素矿化及环境氮输入,氮肥用量依然有进一步优化的空间。

参 考 文 献:

[1] 宁夏统计局.宁夏统计年鉴[M].北京:中国统计出版社 2008.
[2] 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.
[3] 全为民,严力蛟.农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J].生态学报,2002,22(3):292~299.
[4] 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.
- [5] Vanes H M, Czymmek K J, Ketterings Q M. Management effects on nitrogen leaching and guidelines for a nitrogen leaching index in New York[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(4): 499—54.
- [6] 李 军, 路阳明, 史俊通. 宁夏银川平原灌区春小麦与春玉米栽培方案优化模拟研究[J]. *西北农业学报*, 2001, 10(3): 77—79.
- [7] 张学军, 罗代雄, 桂林国, 等. 宁夏扬黄新灌区春小麦氮营养诊断及追肥推荐量[J]. *西北农业学报*, 2001, 10(1): 72—74, 87.
- [8] 赵桂芳, 张学军, 陈晓群, 等. 宁夏扬黄新灌区春小麦氮磷施用量研究[J]. *甘肃农业科技*, 2004, (3): 44—46.
- [9] 王明国, 马玉兰, 冯 静, 等. 宁夏农户施肥调查与评价[J]. *农业科学研究*, 2009, 30(1): 13—15.
- [10] Raun W R, Johnson G V. Soil—plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 1995, 87: 827—834.
- [11] Emteryd O. 植株—土壤—水—空气无机营养元素的物理化学分析[M]. 梁东丽, 同延安, 校译. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002: 140—144.
- [12] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(7): 1122—1128.
- [13] 张爱平, 杨世琦, 杨淑静, 等. 不同供氮水平对春小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 137—142.
- [14] 何文寿, 陈素生, 康建宏. 不同基因型春小麦氮磷钾养分效率与其农艺性状的相关性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2000, 18(3): 37—43.
- [15] Husrev M, Bernard H Z. Effect of wheat (*Triticum aestivum*) cultivars and seeding rate on yield loss from Galium aparine (cleavers) [J]. *Crop Protection*, 2005, 24: 1061—1067.
- [16] Sieling K, Stahl C, Winkelmann C, et al. Growth and yield of winter wheat in the first 3 years of a monoculture under varying N fertilization in NW Germany [J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 22: 71—84.
- [17] 张永平, 张铁山, 刘克礼, 等. 春小麦分蘖发生及成穗规律[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(3): 64—69.
- [18] 康建宏, 周续莲, 代晓华, 等. 宁夏平原春小麦品种更替中农艺性状的演变规律研究[J]. *农业科学研究*, 2005, 26(1): 6—9, 17.
- [19] 范仲学, 王 璞, Boening—Zilkens M, 等. 优化灌溉和施肥对冬小麦产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(4): 99—103.
- [20] 同延安, 赵 营, 赵护兵, 等. 施氮对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 64—69.
- [21] 郭天财, 宋 晓, 冯 伟, 等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量[J]. *作物学报*, 2008, 34(5): 886—892.
- [22] 赵云英, 谢永生, 郝明德. 施肥对黄土旱塬区黑垆土土壤肥力及硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1273—1279.
- [23] 张爱平, 刘汝亮, 李友宏, 等. 施用磷肥对春小麦产量与吸氮特性及土体中硝态氮累积的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(5): 30—34.
- [24] 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.

Effect of optimum fertilization on spring wheat yield, N utilization and apparent N balance

ZHAO Ying^{1,2}, ZHOU Tao², GUO Xin-nian², LIANG Jin-xiu²,
WU Xia², JI Hong-jie¹, ZHANG Wei-li^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

Abstract: In order to investigate the effects of optimum (OPT) and conventional (CON) fertilization on spring wheat yield, N utilization and soil nitrate accumulation, and simultaneously evaluate the apparent N balance in the soil-wheat system, a field experiment with Ningchun 11 and Ningchun 16 of spring wheat growing was conducted in the Yellow River Irrigation Region of Ningxia from 2009~2010, respectively. The results showed that both OPT and CON treatments significantly increased the grain yield, shoot biomass, grain N uptake and shoot N uptake compared with CK, but there was no significant difference found between OPT and CON. Fertilization had no significant influence on harvest index of spring wheat, however, OPT was beneficial to improve the yield composition and some agronomical characteristics, and achieve high grain yield. In contrast to CON, OPT treatment could increase more or less the recovery efficiency (RE), agronomy efficiency (AE) and partial factor productivity (PFP) of applied N. Soil nitrate accumulation had the declining trend with the soil depth increasing, therefore, OPT treatment effectively decreased the soil nitrate accumulation in 0~100 cm soil. Apparent N balance in the soil-wheat system indicated that soil residual N_{min} , mineralization and irrigation N input should be taken into account, and then reduced soil residual N_{min} and apparent N losses by optimum fertilization.

Keywords: spring wheat; fertilization; yield; N utilization; soil nitrate accumulation; apparent N balance