

# 水氮配置对华北冬小麦-夏玉米种植体系 氮素利用及土壤硝态氮残留的影响

徐 杰 陶洪斌 宋庆芳 王 璞

(中国农业大学 农学与生物技术学院 农业部作物栽培与耕作重点实验室 北京 100193)

**摘要:** 针对华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系存在过量的水、氮投入问题,本研究于2008-2010年在河北吴桥设置了传统水氮、传统水氮调整、节水减氮和最少水氮4个水氮模式,以分析减少水氮投入后冬小麦-夏玉米体系的产量、氮素利用和土壤氮残留情况。结果表明:与传统水氮相比,节水减氮模式的氮肥投入量下降55%,水分投入量下降36.6%,而产量与传统模式无显著差异;节水减氮模式下氮肥偏生产力为60.17 kg/kg 2 m 土体土壤硝态氮残留量仅为99.3 kg/hm<sup>2</sup>。与传统水氮相比,周年施氮108 kg/hm<sup>2</sup>的最少水氮模式,周年总产量下降13%,氮肥偏生产力为78.96 kg/kg,土壤硝态氮残留量下降到42.8 kg/hm<sup>2</sup>。总体而言,与传统模式相比,节水减氮模式周年施氮270 kg/hm<sup>2</sup>,冬小麦季分别在拔节和开花期灌水,能够确保华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系的较高产量,并降低土壤硝态氮残留。

**关键词:** 冬小麦-夏玉米;氮肥利用效率;土壤硝态氮

中图分类号: S143 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2011)04-0153-06

## The Effect of Water-nitrogen Regimes on the Nitrogen Utilization and Soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N Residue of Winter Wheat-summer Maize System in the North China Plain

XU Jie, TAO Hong-bin, SONG Qing-fang, WANG Pu

(Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Ministry of Agriculture, College of Agronomy  
and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Over-input of water and nitrogen is a common problem of the winter wheat-summer maize system in the North China Plain, thus a field experiment was conducted to analysis the yield, nitrogen utilization and soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N residue of this system after reduced resource input in Wuqiao of Hebei province in 2008-2010. Four treatments were included: Conventional input, Conventional input (Improvement), Reduced input and Least input respectively. Compared with Conventional input pattern, N fertilization input decreased 55% and water input decreased by 36.6% of Reduced input pattern, while there was no significant difference on the yield between two patterns. Under Reduced input pattern, the PFP was 60.17 kg/kg, soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N residue was only 99.3 kg/ha in the 2 m soil profile. Under Least input pattern, the annual yield declined 13%, but nitrogen partial factor productivity was 1.78 kg/kg, soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N residue was only 42.8 kg/ha in the 2 m soil profile. In conclusion, reduced input pattern with fertilization amount of 270 N kg/ha was applied in annually and irrigation at blooming and jointing stage in winter wheat season, could assure the yield of winter wheat-summer maize rotation system, and simultaneously improve nitrogen use efficiency and reduce soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N residue.

**Key words:** Winter wheat-summer maize rotation system; Nitrogen use efficiency; Soil nitrate nitrogen

冬小麦-夏玉米复种轮作是华北平原粮食作物 的主要种植制度,为实现高产,该区农田周年化肥氮

收稿日期: 2011-05-19

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD16B15); 国家玉米产业技术体系(CARS-02)

作者简介: 徐 杰(1985-),女,山东青岛人,在读硕士,主要从事作物高产栽培与资源高效利用研究。

通讯作者: 王 璞(1957-),男,山西朔州人,教授,博士生导师,主要从事作物高产栽培与资源高效利用研究。

平均用量已高达  $545 \text{ kg/hm}^2$ , 远远超过目前全国氮肥平均用量  $378 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[1, 2]</sup>, 也大大超出了华北地区目前平均产量水平下作物对氮素的需求量  $311 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[3]</sup>。该地域的氮肥利用率仅  $16\% \sim 22\%$ <sup>[4]</sup>, 低于  $30\% \sim 41\%$  的全国平均水平<sup>[5, 6]</sup>。大量速效氮存储在土壤中, 一方面导致污染风险增加, 另一方面也造成肥料氮不能发挥增产作用。同时华北平原是我国水资源严重匮乏区, 为了维持农业生产的需要, 每年靠超采地下水来进行补充, 导致地下水位连年下降, 形成河北沧州衡水一带全国最大、世界罕见的超采漏斗区和地面沉降区<sup>[7]</sup>。因此本研究初步分析了在严重缺水 and 土壤肥力中等的吴桥地区, 适度减少水氮投入后周年的产量表现、氮肥效率及土壤

硝态氮残留情况。

## 1 材料和方法

试验于 2008 年 10 月至 2010 年 10 月在位于河北省沧州市的中国农业大学吴桥实验站 ( $36^{\circ}51'N$ ,  $117^{\circ}50'E$ ) 进行。试验地土壤为潮土,  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土层全氮含量为  $0.78 \text{ g/kg}$ , 有机质含量为  $10.3 \text{ g/kg}$ , 碱解氮含量为  $95.1 \text{ mg/kg}$ , 速效磷含量为  $22.3 \text{ mg/kg}$ , 速效钾含量为  $93.2 \text{ mg/kg}$ 。  $20 \sim 40 \text{ cm}$  土层的含量分别为  $0.43 \text{ g/kg}$ 、 $5.0 \text{ g/kg}$ 、 $44.7 \text{ mg/kg}$ 、 $3.9 \text{ mg/kg}$ 、 $82.6 \text{ mg/kg}$ 。小麦、玉米生长季温度降水情况见图 1。

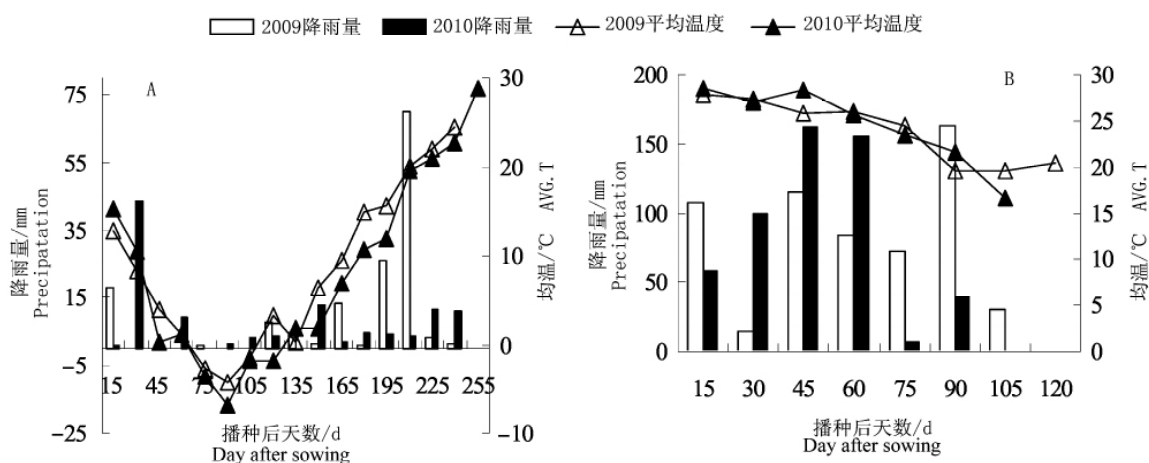


图 1 冬小麦生长季 (A 图) 和夏玉米生长季 (B 图) 降雨量和温度

Fig. 1 Average temperature and precipitation during winter wheat (A) and summer maize (B) growing season

试验为单因素定位试验, 随机区组设计。共设 4 个水氮配置模式, 分别为传统水氮模式、传统水氮调整模式、节水减氮模式和最少水氮模式, 具体的水氮配置模式见表 1。

表 1 冬小麦-夏玉米试验水氮配置模式

Tab. 1 The water-nitrogen measure of the winter wheat and summer maize rotation

模式 Treatments	冬小麦 Winter wheat		夏玉米 Summer maize	
	氮肥 / ( $\text{kg/hm}^2$ ) N fertilizer	水分 Water	氮肥 / ( $\text{kg/hm}^2$ ) N fertilizer	
传统水氮 Conventional input	300 (基肥 1:1 拔节肥)	底墒、拔节 开花、灌浆	300 (苗肥 1:2 大喇叭口肥)	
传统水氮调整 Conventional input improvement	300 (基肥 1:1 拔节肥)	底墒、越冬 拔节、开花	300 (苗肥:拔节:吐丝 1:1:1)	
节水减氮 Reduced input	150 (基肥)	底墒、拔节 开花	120 (苗肥 1:2 大喇叭口肥)	
最少水氮 Least input	105 (基肥)	底墒	75 (苗肥)	

冬小麦季分别在冬前、拔节期、开花期和收获期取样, 夏玉米季分别在拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆中期和收获期取样, 烘干称重; 采用半微量凯氏定氮法测定植株及籽粒全氮含量。取样的同时采取土样, 每小区取 2 个样点, 取土深度  $2 \text{ m}$ , 分 8 层:  $0 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 、 $60 \sim 80 \text{ cm}$ 、 $80 \sim$

$100 \text{ cm}$ 、 $100 \sim 130 \text{ cm}$ 、 $130 \sim 160 \text{ cm}$ 、 $160 \sim 200 \text{ cm}$ , 用  $\text{CaCl}_2$  溶液浸提, 测定无机氮含量。冬小麦成熟期测产面积  $3 \text{ m}^2$ , 测定亩穗数、穗粒数和千粒重, 籽粒含水量以  $13\%$  计。夏玉米每小区取  $5 \text{ m} \times 4$  行, 实收果穗折算亩穗数; 按平均穗重每区随机选取 10 穗, 考察穗部性状与产量构成, 籽粒含水量以  $14\%$

计,折算大田实际产量。数据处理采用 Microsoft Excel 2003 统计分析用 SAS 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮配置对冬小麦-夏玉米产量及产量构成因素的影响

2.1.1 水氮配置对冬小麦产量构成的影响 2008-2009 年冬小麦节水减氮模式的籽粒产量和穗数均高于其他 3 个模式,其中籽粒产量比 2 个传统水氮模式高 5.8%,该处理下亩穗数比最少水氮模式高 7 万穗。最少水氮模式的千粒重最高,且与其他

3 个处理差异达到显著水平,千粒重最低的是传统水氮调整模式,收获指数各处理间差异不显著。2009-2010 年冬小麦节水减氮模式的产量和传统水氮模式差异不显著,但比 2 个传统水氮模式降低 7%,最少水氮模式的产量最低,只有节水减氮模式的 70%。节水减氮模式的穗数最低,穗粒数低于 2 个传统水氮模式,高于最少水氮模式,差异显著。千粒重除了最少水氮模式的最低,且与其他 3 个模式达到显著性差异外,其他 3 个模式差异不显著。传统水氮调整模式的收获指数最高,而节水减氮模式最低,并达到显著性差异(表 2)。

表 2 不同水氮配置对冬小麦产量及产量构成因素的影响

Tab. 2 Effects of water-nitrogen regimes on yield and yield components of winter wheat

年份 Year	水氮模式 Water-nitrogen pattern	产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	穗数 Ear per m <sup>2</sup>	穗粒数 Kernel number	千粒重/g 1 000-grain weight	收获指数 HI
2008-09	传统水氮	7 320b	718.9a	29.1a	47.7ab	0.42a
	传统水氮调整	7 529ab	717.2a	30.4a	46.4b	0.44a
	节水减氮	7 880a	747.5a	29.9a	48.0ab	0.43a
	最少水氮	6 670c	641.7b	26.1b	49.9a	0.42a
2009-10	传统水氮	7 214ab	516.2a	36.9a	51.4a	0.42ab
	传统水氮调整	7 664 a	520.5a	35.8a	52.9a	0.44a
	节水减氮	6 915b	513.6a	33.7b	52.6a	0.41b
	最少水氮	4 861c	522.5a	27.2c	48.0b	0.42ab
方差分析	年	***	***	***	***	ns
	模式	***	**	***	*	ns
	年×模式	***	***	***	***	ns

注:同一列内同一年份数据后不同字母代表达到 5% 的显著水平;ns. 差异不显著;\*、\*\*、\*\*\*, 分别表示在 5%、1%、1%水平显著,下同。

Note: Different letter represented significant difference at 0.05 level;ns. Not significant;\* , \*\* and \*\*\*. Represented significant at 5% , 1% and 1% level , same as follows.

2 个传统水氮模式的冬小麦产量两年之间没有差异,节水减氮模式和最少水氮模式两年产量差异显著。主要是由于 2009 年小麦播种后遭遇降温,冬天遭遇了历史上的冷冬(图 1-A),春季温度回升缓慢,影响了冬小麦的生长和分蘖。2010 年亩穗数较 2009 年减少 12.5 万,其中节水减氮模式穗数降低最多。节水减氮模式的穗粒数较 2010 升高 13%,而传统水氮模式穗粒数平均升高达 22%,除最少水氮模式外,其他模式的千粒重 2010 年较 2009 年都增高。说明在正常年份节水减氮的条件下能够保证冬小麦的产量,在亩穗数明显降低的条件下,多施氮肥可以提高穗粒数,进而保证产量。

2.1.2 水氮配置对夏玉米产量构成的影响 2009 年节水减氮模式产量略低于传统水氮调整模式,穗粒数低于两个传统水氮模式,均没有显著性差异。节水减氮模式的千粒重略低于传统水氮调整模式,

但是显著高于传统水氮模式。不同水氮配置的收获指数没有差异。2010 年产量变化规律是传统水氮模式>最少水氮模式>节水减氮模式>传统水氮调整模式,4 个模式之间产量差异不显著,亩穗数差异不显著。节水减氮模式的穗粒数最低,与传统水氮模式和最少水氮模式的差异不显著。传统水氮调整模式的千粒重最低,只与最少水氮模式差异显著。不同水氮配置的收获指数之间没有差异。说明节水减氮模式降低了氮肥的投入量但是产量影响不大(表 3)。

最少水氮模式 2010 年的产量比 2009 年显著增加。比较产量构成因素,可见各模式下穗数年际间变化不大;穗粒数 2 年差异显著,2010 年比 2009 年高 99 粒;千粒重 2010 年比 2009 年降低 75.3 g,达到显著性差异。这是由于 2009 年春季低温影响了冬小麦收获期,并导致 2010 年夏玉米播种较常年晚

10 d 左右,灌浆期缩短约 5 d,且整个灌浆期温度较 2009 年降低。传统水氮模式、节水减氮模式和传统水氮调整模式 3 模式的夏玉米在吐丝后 37 d(2010 年 9 月 22 日)由于刮风导致大面积倒伏,籽粒灌浆

不充分,且传统水氮调整模式贪青晚熟,收获指数降低。而最少水氮模式下,氮肥投入较少,由于没有发生倒伏,籽粒灌浆相对较充分,对产量的影响较小。

表 3 不同水氮配置对夏玉米产量及产量构成因素的影响

Tab. 3 Effects of water-nitrogen regimes on yield and yield components of summer maize

年份 Year	水氮模式 Water-nitrogen pattern	产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	穗数 Ears per m <sup>2</sup>	穗粒数 Kernels per ear	千粒重/g 1 000-grain weight	收获指数 HI
2009	传统水氮	8 871a	8.0a	378.1a	297.3b	0.44a
	传统水氮调整	9 116a	8.0a	370.0ab	320.2a	0.49a
	节水减氮	9 079a	8.0a	363.1ab	313.0a	0.48a
	最少水氮	7 970b	7.9a	351.3b	313.9a	0.46a
2010	传统水氮	9 180a	8.1a	461.8ab	238.4ab	0.50a
	传统水氮调整	8 517a	8.0a	484.4a	227.3b	0.48a
	节水减氮	8 615a	8.1a	448.2b	235.2ab	0.50a
	最少水氮	8 924a	7.9a	464.6ab	242.2a	0.47a

## 2.2 水氮配置对冬小麦-夏玉米氮肥利用效率的影响

2008-2009 年冬小麦 PFP 最高的是最少水氮模式,其次是节水减氮模式,两者之间差异显著,且显著高于传统水氮模式和传统水氮调整模式。NUTE 最高的是最少水氮模式,其次是节水减氮模式。夏玉米 PFP、NUTE 随着施氮量的增加而降低,变化规律和冬小麦季一致。2008-2009 年周年节水减氮模式的 PFP 比最少水氮模式低 23%,比传统水氮模式和传统水氮调整模式高 13%。NUTE 最高的是最少水氮模式,其次是节水减氮模式,二者之间

没有差异。2009-2010 年冬小麦、夏玉米的 PFP、NUTE 变化规律和上年一致,仅略有差别。最少水氮模式的冬小麦籽粒产量较低,PFP 和节水减氮模式差异不显著。2010 年夏玉米最少水氮模式的 NUTE 低于节水减氮模式,差异不显著,是因为最少水氮模式籽粒产量较高,植株吸氮量较高。2009-2010 周年最少水氮模式 PFP 最大,其次是节水减氮模式,二者差异不显著。最少水氮模式 PFP 比传统水氮调整模式高 64.3%。本研究最少水氮模式的 PFP、NUTE 的最高,其次是节水减氮模式,最少水肥模式在提高氮素利用效率方面表现较好(表 4)。

表 4 不同水氮配置对冬小麦-夏玉米氮肥利用效率的影响

Tab. 4 Effects of water-nitrogen regimes on nitrogen use efficiency of winter wheat-summer maize system

kg/kg

年份 Year	水氮模式 Water-nitrogen pattern	冬小麦 Winter wheat		夏玉米 Summer maize		周年 Anniversary	
		氮肥偏生产力 PFP	氮利用效率 NUTE	氮肥偏生产力 PFP	氮利用效率 NUTE	氮肥偏生产力 PFP	氮利用效率 NUTE
2008-09	传统水氮	24.40c	31.64b	29.57c	40.10a	26.98c	35.67b
	传统水氮调整	25.10c	34.19b	30.39c	48.16a	27.74c	40.55b
	节水减氮	52.53b	38.78b	75.66b	52.67a	62.81b	44.31ab
	最少水氮	63.52a	51.32a	106.27a	55.65a	81.34a	53.32a
2009-10	传统水氮	24.05b	24.87b	30.60c	52.32a	27.32c	35.18b
	传统水氮调整	25.55b	27.38b	28.39c	50.95a	26.97c	36.05b
	节水减氮	46.10a	25.99b	71.80b	62.28a	57.52b	38.22b
	最少水氮	46.30a	37.61a	118.98a	56.13a	76.58a	47.05a

## 2.3 水氮配置对土壤硝态氮残留量的影响

从图 2 可以看出,全生长季内 2 个传统水氮模式在 2 m 土体中积累的硝态氮总量显著高于节水减氮模式和最少水氮模式,2010 年夏玉米季收获时传

统水氮模式下 2 m 土体硝态氮总积累量高达 526.9 kg/hm<sup>2</sup>。

2008-2009 年冬小麦收获后,传统水氮模式和传统水氮调整模式在 2 m 土体中土壤硝态氮含量均

表现为盈余, 分别比播前提高了  $17 \text{ kg/hm}^2$  和  $43.6 \text{ kg/hm}^2$ , 节水减氮模式和最少水氮模式则分别比播前减少  $23.2 \text{ kg/hm}^2$  和  $15.0 \text{ kg/hm}^2$ 。传统水氮模式、传统水氮调整模式、节水减氮模式、最少水氮模式夏玉米收获后比播前土壤硝态氮的含量分别提高

$45.7$ 、 $44.6$ 、 $14.5$ 、 $8.4 \text{ kg/hm}^2$ 。2008–2009 年冬小麦-夏玉米周年传统水氮模式和传统水氮调整模式土壤硝态氮分别盈余  $62.9 \text{ kg/hm}^2$  和  $98.7 \text{ kg/hm}^2$ , 而节水减氮模式和最少水氮模式土壤硝态氮的含量分别减少  $8.8 \text{ kg/hm}^2$  和  $6.6 \text{ kg/hm}^2$ 。

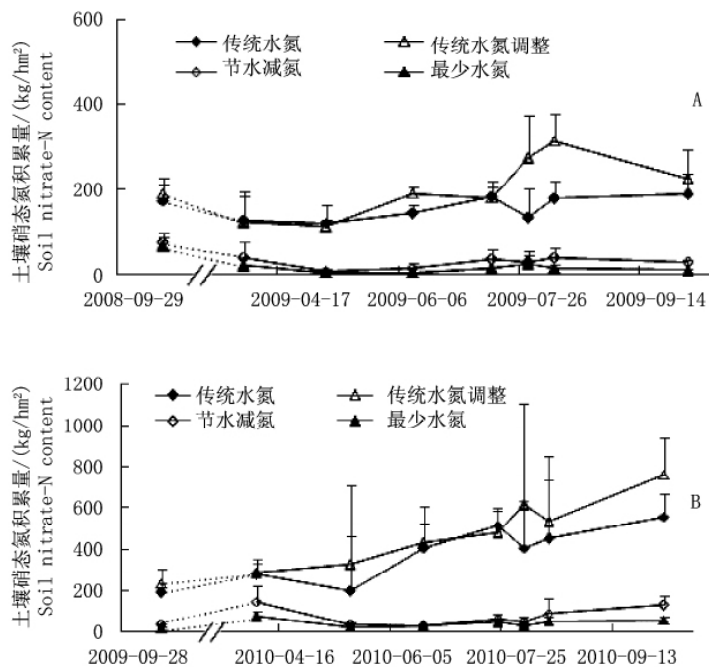


图2 2008–2009 年 (A) 和 2009–2010 年 (B) 周年 2 m 土壤硝态氮含量变化趋势

Fig. 3 Soil  $\text{NO}_3^-$ -N dynamic under different water-nitrogen regimes in the 2 m soil profile during two experimental years

与 2009–2010 年相比, 2008–2009 年土壤硝态氮的残留量相对较少, 一方面是因为 2008–2009 年的产量高于 2009–2010 年, 作物吸氮较多, 另一方面也与 2008–2009 年降雨量较大有关, 土壤硝态氮的淋洗严重。2009–2010 年节水减氮模式和最少水氮模式夏玉米收获后土壤硝态氮分别残留  $99.3$ 、 $42.8 \text{ kg/hm}^2$ , 而两个模式的硝态氮残留量则分别高达  $373.3$ 、 $526.9 \text{ kg/hm}^2$ 。如果下季作物继续高施氮, 土壤中的氮素不能被作物吸收利用, 将大部分随着降雨向下淋洗, 可能引起地下水污染。

### 3 讨论与结论

我国作物生产中氮肥的投入量普遍过高, 巨晓棠等<sup>[8]</sup>在北京郊区所做的氮肥用量试验发现, 有些田块当季作物产量对施氮量反应不明显, 但农户每年依然投入大量的氮肥, 从而导致氮肥的大量损失。本研究结果表明节水减氮模式在降低水氮投入的情况下, 能够确保冬小麦、夏玉米单季及周年产量。在资源极其紧张的情况下, 最少水氮模式周年施氮只有  $180 \text{ kg/hm}^2$ , 也能基本保证作物产量。牛斌等<sup>[9]</sup>的研究发现玉米最高产量的施氮量为  $155.2 \text{ kg/hm}^2$ , 同时随着施氮量的增加中玉 15 的氮肥偏生

产力、氮肥利用率均呈降低趋势。因此, 优化施肥量才能获得最高的氮肥利用效率。本研究最少水氮模式的 PFP、NUTE 的最高, 其次是节水减氮模式, 最少水肥模式在提高氮素利用效率方面表现较好, 但若综合考虑产量效应和资源利用效应时, 最少水氮模式在产量方面表现较差, 而节水减氮模式在产量效应和资源利用效应方面表现最好。而传统水氮模式和传统水氮调整模式则有较大的减少氮肥投入、提高 PFP 的空间。

与传统水氮模式和传统水氮调整模式相比, 节水减氮模式的氮肥用量降低  $55\%$ , 正常年份能够保证冬小麦和夏玉米的产量。但是, 在遭遇冷冬且冬小麦晚播影响出苗时, 冬小麦的产量会略有降低, 应当通过冬小麦季增施氮肥等措施加以补救, 以确保产量稳定。氮肥偏生产力、氮利用效率随着施肥量的增加而降低, 因而, 节水减氮模式的氮肥偏生产力、氮利用效率高于 2 个高水氮模式。节水减氮模式土壤硝态氮的残留量比 2 个高水氮降低  $77.9\%$ , 减少土壤硝态氮向地下水的淋洗。因此, 综合考虑产量效应和资源利用效应, 节水减氮模式能够保证作物产量的同时, 提高水氮利用效率, 减少土壤硝态氮残留。

## 参考文献:

- [1] 陈新平,冀宏杰,张福锁. 北京郊区过量施氮对蔬菜体内硝酸盐浓度的影响[M]//李晓林,张福锁,米国华. 平衡施肥与可持续优质蔬菜生产. 北京:中国农业出版社,2000:270-277.
- [2] 张卫峰,季玥秀,马骥,等. 中国化肥消费需求影响因素及走势分析 II 种植结构[J]. 资源科学,2008,30(1):31-36.
- [3] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报,2009,46(4):684-697.
- [4] 李新慧. 京郊粮田土壤氮素损失机制与提高氮肥利用率[J]. 北京土壤学会简讯,1999,2(5):5-8.
- [5] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江西科学技术出版社,1992:213-249.
- [6] 巨晓棠,张福锁. 氮肥利用的要义及其提高的技术措施[J]. 科技导报,2003,4:51-54.
- [7] 龚宇,邢成开,王璞. 沧州地区近40年来气温和降水量的变化趋势分析[J]. 中国农业气象,2008,29(2):143-144.
- [8] 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,2003,3:264-270.
- [9] 牛斌,刘社平,王激清. 氮肥用量和追肥方式对玉米中玉15产量和氮肥利用效率的影响[J]. 湖北农业科学,2009,48(8):1844-1847.
- [10] 申丽霞,王璞. 不同氮肥运筹方式对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 山西农业科学,2009,37(2):36-39.
- [11] 李志勇,陈建军,王璞. 不同水氮优化组合模式对冬小麦产量形成及水氮资源利用效率的影响[J]. 华北农学报,2005-20(2):66-71.
- [12] 高志,徐阳春,沈其荣,等. 不同氮素形态配比的复混肥对玉米苗期生长及氮肥利用效率的影响[J]. 华北农学报,2005,20(6):68-72.