植物营养与肥料学报 2012,18(3):571-578
Plant Nutrition and Fertilizer Science

生态集约化养分管理对春玉米产量和氮素利用率的影响

苗建国[1],金继运[1],仇少君[1],谢佳贵[2],侯云鹏[2],徐新朋[1],何 萍[1]*
(1 农业部植物营养与肥料重点开放实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
2 吉林省农业科学院农业资源与环境研究中心,吉林长春 130124)

摘要:通过两年田间试验,研究了吉林玉米带不同氮素管理措施对春玉米产量、氮素吸收、氮素平衡状况以及经济效益的影响。两年的结果表明:与农民习惯施肥(FP)相比,生态集约化养分管理措施(EI)在减少氮肥用量28%的情况下,并未影响作物的产量和氮素吸收,而其氮素回收率,农学效率,偏生产力和经济效益却分别提高了48.1%、56.9%、43.8%和11.0%;第一年不施氮肥第二年补施氮肥不会影响第二年春玉米产量和氮肥利用率。在氮素输出项中,EI处理两季作物氮素总表观损失仅为97 kg/hm^2,而FP处理高达226 kg/hm^2。因此,在考虑高产的基础上兼顾保护环境的要求,基于氮肥农学效率、作物目标产量和作物施肥反应的生态集约化养分管理措施是一种较为理想的氮素管理措施。

关键词:养分管理专家系统;氮素农学效率;氮素管理;氮素平衡
中图分类号:S513.062　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)03-0571-08

Effect of ecological intensification nutrient management on the yield and nitrogen use efficiency of spring maize

MIAO Jian-guo[1], JIN Ji-yun[1], QIU Shao-jun[1], XIE Jia-gui[2], HOU Yun-peng[2], XU Xin-peng[1], HE Ping[1]*
(*1 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Agricultural Resource and Environment Research Centre, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130124, China*)

Abstract: It was investigated that different nitrogen managements affected crop yield, nitrogen uptake, nitrogen balance and net profit of spring maize production in two years' field experiment in Jilin maize belt. The results showed that compared with famers' practice (FP), the grain yield and nitrogen uptake under ecological intensification nutrient management (EI) which reducing N fertilizer by 28% were not decreased while the recovery efficiency, agronomic efficiency and partial factor productivity of nitrogen and net profit were increased by 48.1%, 56.9%, 43.8% and 11.0%, respectively. The grain yield and nitrogen utilization have no significant effect in the second year when no nitrogen fertilizer was applied in the first year. Apparent nitrogen loss of EI and FP in two crops was 97 and 226 kg/ha, respectively. The nitrogen management based on agronomic efficiency of fertilizer, crop target yield and the response of crop to fertilizer application could be a feasible N management practice for both high yield production and environmental protection.

Key words: Nutrient Expert; agronomic efficiency of nitrogen; nitrogen management; nitrogen balance

收稿日期:2011-10-24　　**接受日期**:2011-12-25
基金项目:国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109306);国家科技支撑计划课题(2006BAD02A14);国际植物营养研究所资助。
作者简介:苗建国(1986—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要从事养分资源利用方面的研究。E-mail:zhmiaojianguo@126.com
*通讯作者 Tel:010-82108000,E-mail:phe@caas.ac.cn

“生态集约化”(ecological intensification)这一理念自1986年Egger提出以来,不同研究背景的学者对其有不同的理解和定义[1-4]。针对人口增长带来的巨大的粮食需求压力和不当的养分管理措施给环境带来了日益严重的污染这一背景,Cassman[5]从小麦、玉米和水稻生产的角度对这一理念进行了新的阐述。这一理念的核心是通过综合运用一切可能的农艺措施尤其是养分管理措施使土壤维持在一个较高的肥力水平,提高水肥利用效率和单位面积上作物产量以实现环境友好的农业可持续发展[5]。在我国,人口膨胀带来的巨大的粮食安全压力和养分管理不当带来的严重环境问题日益严峻[6-8],因此,Cassman提出的生态集约化这一理念对于我国农业生产尤其是养分管理方面亦具有重要的指导意义。

国内外在施肥模型方面开展了大量研究,在众多的施肥模型中,基于土壤测试和目标产量的测土推荐施肥在理论上能够得到比较广泛的共识,被国内外学者广泛应用[9-12]。但在实践中对于土壤有效养分的供应量特别是土壤氮素供应量的确定,迄今为止仍是困扰着大多数学者的一个难题[13-14]。评价土壤养分供应能力和作物生产能力主要通过作物产量的高低来反映,因此,依据作物产量反应(施某一养分作物地上部的产量与不施该养分作物地上部的产量之差)来表征作物的营养状况是更为直接的评价施肥效应的有效手段。该方法的原理主要是在Witt等[15]水稻养分管理的SSNM(site-specific nutrient management)基础上结合QUEFTS(quantitative evaluation of the fertility of tropical soils)模型进行改进,在此基础上结合不同作物种植体系和管理方式而发展成为适合当地生产条件的养分管理和推荐施肥系统。该系统在中国的形成主要以国际植物营养研究所(IPNI)在中国的多年多点田间试验为基础,根据不同地区的作物反应和农学效率进行调整,从而根据不同试验地点的不同条件进行有针对性地推荐施肥。该养分管理方法的主要创新之处在于:应用QUEFTS对来自我国2001～2010年期间4000多个田间试验产量和养分吸收数据进行了模拟和矫正,得出我国玉米和小麦种植区一定目标产量下的养分最佳吸收曲线,避免了以往单一数据带来的养分缺乏或过量情况下的偏差,而且该养分最佳吸收曲线包含了我国主要玉米或小麦种植区生产中应用的品种和环境条件信息,具有一定的普遍性。对于氮、磷、钾素养分推荐,主要依据作物产量反应和作物养分移走的供给平衡,同时充分考虑作物种植体系中上季作物残留的养分[15-19]。中微量元素的推荐则以土壤养分测试数据为依据,进行适当补充。该系统在中国的形成主要依托于IPNI在我国多年多点的田间试验,将不同试验地点、不同条件下的作物产量反应输入数据库,根据数据库对模型进行校正后,形成了我国的作物养分管理专家系统(Nutrient Expert)。应用Nutrient Expert于2010年在华北地区的129个农户进行玉米推荐施肥,结果表明[20],与农民习惯施肥和当地推荐施肥比较,基于Nutrient Expert推荐施肥表现出一定的增产和提高经济效益的趋势。更为重要的是,基于Nutrient Expert能够节约氮肥24～31 kg/hm^2(或11.4%～11.5%),同时平衡了磷、钾养分。而农民习惯施肥或当地推荐施肥由于氮素用量过高或养分施用不平衡并没有进一步提高产量,反而增加了因氮素过量施用而带来的环境风险。有研究表明[21]在越南、菲律宾和印度使用Nutrient Expert指导田间养分管理的农户与常规养分管理的农户相比产量分别增加了0.2、0.3和0.8 t/hm^2,相应的净利润分别增长了34、106和168 $/hm^2,同时在菲律宾和越南农田$N_2O$的排放量分别降低了27.0%和8.9%,证明Nutrient Expert指导的田间养分管理和推荐施肥方法能够保障作物增产增收、提高肥料利用率和保护环境,是一种简便易行的生态集约化养分管理方法。

吉林省是我国的主要玉米产区,该区域春玉米生产大多属雨养农业,年春玉米总产量占我国玉米年总产量的12.9%[22],因此,该地区的春玉米生产对于保障我国的粮食安全具有重要意义。本文以生态集约化养分管理这一理念作为技术指导核心,以作物施肥产量反应、氮肥的农学效率和目标产量作为推荐施肥的技术基础,以Nutrient Expert模型作为技术支撑,研究春玉米连续施肥和土壤肥力耗竭条件下氮素的产量反应,氮素吸收和利用以及土壤氮素平衡状况,为建立高产、高效和可持续的生态集约化养分管理体系提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2009年和2010年在吉林省公主岭市刘房子镇刘房子村(43.6°N,124.6°E)进行。该区属寒温带半湿润大陆性气候,年平均气温18.2℃,积温3331.1℃,无霜期140 d左右,2009年和2010年

生育期内降水量分别为 257 mm 和 459 mm。供试土壤为黑土,播前 0—20 cm 土壤基础肥力为:有机质含量 20.4 g/kg、碱解氮 118.25 mg/kg、速效磷 75.72 mg/kg、速效钾 122.38 mg/kg,pH 值为 6.06。

1.2　试验设计

试验采用裂区设计,主区为生态集约化养分管理措施(EI)和农民习惯施肥(FP);裂区为氮肥施用方式,包括:两年都不施氮肥(N0/2)、每两年施一年氮肥(N1/2)和两年都施氮肥(N2/2),共计 6 个处理(具体施肥方案见表 1),每个处理 4 次重复。其中,农民习惯施肥量是通过对该区域的农户调查来确定,代表了该地区典型的农民习惯施肥方式;EI 处理的肥料施用量是基于 Nutrient-expert 模型确定的最佳用量,施肥方法是 1/4 氮肥和全部磷、钾肥作底肥,3/4 氮肥于 6 月中下旬玉米 8 叶期追施;FP 处理施肥方法氮、磷、钾肥全部做基肥一次底施。供试春玉米品种为先玉 335,氮、磷、钾肥料分别采用尿素、重过磷酸钙和氯化钾,种植密度为 65000 株/hm^2,每小区间有 2 m 宽过道,小区面积为 45 m^2,其他田间管理措施同当地高产田。

表 1　试验处理

Table 1　Experimental treatment

处理 Treatment		肥料用量 Fertilizer application rate ($N-P_2O_5-K_2O$, kg/hm^2)	
		2009	2010
EI	N2/2	180-75-90	180-75-90
	N1/2	0-75-90	180-75-90
	N0/2	0-75-90	0-75-90
FP	N2/2	251-145-100	251-145-100
	N1/2	0-145-100	251-145-100
	N0/2	0-145-100	0-145-100

1.3　田间取样与测定方法

在作物生理成熟期,在每个小区随机采取 5 株有代表性的植株样品,分为秸秆和籽粒,于 105℃杀青,80℃烘至恒重后,称重并粉碎,用半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量[23]。同时每个小区取中间四垄玉米计产、考种,玉米籽粒水分含量按 14% 计算。

在作物收获后,采取每个小区 0—100 cm 土层的土壤样品,每个小区随机取三点混合为一个样品,置于 -20℃冷冻保存。土壤解冻后均匀过 2 mm 筛,用 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液浸提(水土比为 5∶1),振荡 45 min 后过滤,用流动注射分析仪(Foss FIAstar5000,瑞士)测定硝态氮与铵态氮含量,同时测定土壤含水量。

1.4　相关指标计算方法

氮素回收率(RE_N,%) = (施氮区作物地上部吸氮量 - 无氮区作物地上部吸氮量)/施氮量 × 100

氮素农学效率(AE_N,kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 空白区籽粒产量)/施氮量

氮素偏生产力(PFP_N,kg/kg) = 施氮区籽粒产量/施氮量

生育期土壤氮素净矿化量(kg/hm^2) = 不施氮肥区作物地上部氮素积累量 + 不施氮肥区土壤无机氮残留量 - 不施氮肥区土壤起始无机氮含量

氮素表观损失 = 施氮量 + 土壤起始 N_{min} + 土壤氮素净矿化量 - 作物吸氮量 - 收获后土壤残留 N_{min}

1.5　数据处理

所有数据采用 SAS 8.0 进行统计分析,除氮肥利用率用双方面分类的方差分析外,其它数据采用裂区设计的方差分析方法。

2　结果与分析

2.1　玉米氮素吸收与产量

2009 和 2010 两年的研究结果(表 2)表明:EI 和 FP 处理氮素吸收无显著差异,FP 处理多施用的氮肥并未显著的促进作物对氮素的吸收。与氮素吸收有所不同,两处理产量年际间表现出一定的差异,2009 年 EI 处理产量显著高于 FP 处理,而 2010 年则 EI 处理略低于 FP 处理,籽粒产量减少 3.0%。

方差分析结果进一步表明,不同施氮方式对不同年份的氮素吸收和籽粒产量均有显著的影响。与连续两年施氮的处理(N2/2)相比,2009 年不施氮肥的 2 个处理(N1/2 和 N0/2)的春玉米氮素吸收和籽粒产量显著降低,两处理的氮素吸收量分别为 N2/2 处理的 53.6% 和 53.6%,其籽粒产量分别为 N2/2 处理的 61.6% 和 62.5%。而 N1/2 处理在 2009 年不施氮的基础上,通过 2010 年施用氮肥使其氮素吸收和籽粒产量基本恢复到与 N2/2 处理相当的水平。而第二年连续不施氮肥的处理(N0/2)其氮素吸收和籽粒产量则分别降低为 N2/2 处理的 44.4% 和 49.1%。

表2 不同养分管理方式对玉米氮素吸收和产量的影响(kg/hm²)

Table 2 Nitrogen uptake and grain yield of spring maize as influenced by different nutrient management practices

处理 Treatment	2009		2010	
	氮素吸收 Total N uptake	籽粒产量 Grain yield	氮素吸收 Total N uptake	籽粒产量 Grain yield
EI – N2/2	110	8505	187	11092
EI – N1/2	60	4876	180	10991
EI – N0/2	59	4756	73	5441
FP – N2/2	113	7477	187	11365
FP – N1/2	60	5112	179	11412
FP – N0/2	60	5082	93	5585
施肥量 Fertilizer application rate (F)				
EI	76 a	6045 a	147 a	9174 b
FP	78 a	5890 b	153 a	9454 a
施肥方式 Fertilization method (M)				
N2/2	112 a	7991 a	187 a	11229 a
N1/2	60 b	4919 b	180 a	11201 a
N0/2	60 b	4994 b	83 b	5513 b
显著性检验(*P* 值) Significance test (*P* value)				
F	0.6379	0.0356	0.1168	0.0240
M	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
F × M	0.8704	0.0001	0.0720	0.5922

注(Note): 同列数据后相同字母表示邓肯检验5%水平差异不显著 Means followed by the same letter in a column are not significantly different (Duncan's multiple range test, $P>0.05$).

2.2 氮素利用率

由表3可以看出,两年结果均表现为不同养分管理方式显著影响玉米的氮素利用率。与FP处理比较,EI处理显著提高了氮素回收率、氮素农学效率和氮素偏生产力,EI处理的氮素回收率、氮素农学效率和氮素偏生产力分别为FP处理的1.32～1.71倍、1.35～2.16倍和1.35～1.58倍。

与N2/2处理比较,2010年的N1/2处理由于没有显著影响玉米的氮素吸收和籽粒产量,因此其氮素利用率的各项参数差异不显著。2010年氮素利用率的各项参数明显高于2009年,这与N0/2处理连续两年不施氮导致土壤肥力下降,致使氮素吸收和籽粒产量降低有关。

2.3 玉米氮素平衡

氮素平衡状况是田间和区域尺度上评估氮素表观损失的有效方法[24-25]。氮素的表观损失是氮素输入总量与作物吸收和土壤残留 N_{min} 两项输出之差,即施肥处理相对于不施肥处理的氮素损失量。由于0—100 cm是作物根系主要的活动层次,因此,本研究仅计算0—100 cm土层内的氮素平衡用以评估春玉米对氮肥的利用状况。

纵观两季作物氮素的平衡结果(表4)可以看出,在氮素输入项中氮肥的投入占主要地位,分别占氮素总投入的62.1%和67.1%,是作物主要的氮素来源。在氮素输出项中,EI和FP两处理氮素残留量和氮素表观损失量分别占盈余氮素总量的41.9%和58.1%、22.3%和77.7%;氮素的表观损失要高于氮素残留,FP表现尤是如此,表明盈余的氮素主要以损失的形式进入环境中而非保留在土壤中,从而增加了环境污染风险。FP处理两季作物氮素总投入达到377 kg/hm²,相比于EI氮肥投入的270 kg/hm²,多增加氮肥投入107 kg/hm²,而作物氮素吸收量仅增加1 kg/hm²,其氮素表观损失却是EI的2.3倍。这表明在当前条件下,EI处理是一种

表 3　不同养分管理方式对玉米氮素利用率的影响

Table 3　Comparison of nutrient use efficiency parameters as influenced by different nutrient management practices

处理 Treatment	2009			2010		
	氮素回收率 RE_N (%)	氮素农学效率 AE_N (kg/kg)	氮素偏生产力 PFP_N (kg/kg)	氮素回收率 RE_N (%)	氮素农学效率 AE_N (kg/kg)	氮素偏生产力 PFP_N (kg/kg)
EI – N2/2	28.2	20.5	47.2	63.3	31.4	61.6
EI – N1/2				59.3	30.8	61.1
EI – N0/2						
FP – N2/2	21.3	9.5	29.8	41.9	23.0	45.3
FP – N1/2				37.8	23.2	45.5
FP – N0/2						
施肥量 Fertilizer application rate (F)						
EI	28.2 a	20.5 a	47.2 a	59.3 a	30.8 a	61.1 a
FP	21.3 b	9.5 b	29.8 b	37.8 b	23.2 b	45.5 b
施肥方式 Fertilization method (M)						
N2/2	24.8	15.0	38.5	50.4 a	27.2 a	53.5 a
N1/2				46.8 a	27.0 a	53.2 a
N0/2						
显著性检验(P 值) Significance test (P value)						
F	0.0293	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
M				0.1191	0.8197	0.7411
F × M				0.8110	0.6517	0.5136

注(Note): RE_N—Recovery efficiency; AE_N—Agronomic efficiency; PFP_N—Partial factor productivity of nitrogen. 同列数据后相同字母表示邓肯检验5%水平差异不显著 Means followed by the same letter in a column are not significantly different (Duncan's multiple range test, $P>0.05$).

表 4　两年春玉米氮素总平衡 (kg/hm²)

Table 4　Nitrogen balance of spring maize in two years

处理 Treatment	氮素输入 Nitrogen input			氮素输出 Nitrogen output		
	施氮量 N application rate	起始 N_{min} Initial N_{min}	净矿化量 Net mineralization	作物吸收 Crop uptake	残留 N_{min} Residual N_{min}	表观损失量 Apparent loss
EI – N2/2	360	52	113	297	91	136
EI – N1/2	180	52	113	240	48	57
EI – N0/2	0	52	113	132	32	1
FP – N2/2	502	52	133	300	77	309
FP – N1/2	251	52	133	239	54	143
FP – N0/2	0	52	133	153	32	0
施肥量 Fertilizer application rate						
EI	270	52	113	269	70	97
FP	377	52	133	270	65	226
施肥方式 Fertilization method						
N2/2	431	52	123	299	84	223
N1/2	216	52	123	240	51	100
N0/2	0	52	123	143	32	1

高效、可持续的生态集约化养分管理方式，而FP处理造成了大量氮素损失不仅增加了生产成本，且给环境带来沉重的负担。

2.4 经济效益分析

综合两年春玉米收益结果（图1）可知，EI的处理纯利润（春玉米的产值与肥料成本之差）均高于FP。2009年EI处理的纯利润显著高于FP处理，相比FP处理增加了26%；2010年EI处理相比FP处理虽然产量上略有下降，但纯利润仍然提高了2%。与FP处理相比，EI处理使农民共计增收10%。

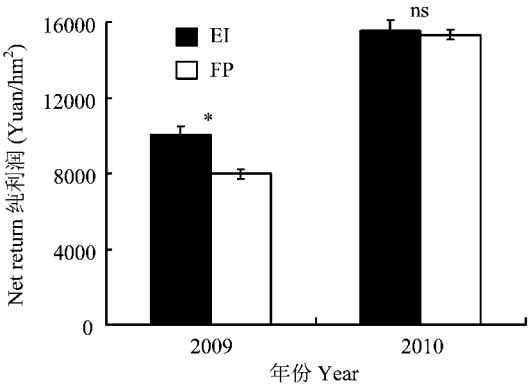

图1 不同养分管理措施对玉米纯收益的影响

Fig. 1 Comparative analysis of net profit as influenced by different nutrient management practices for maize across two years

[注(Note)：肥料价格2009年N，P_2O_5，K_2O和春玉米的价格分别为4.35，4.39，4.67 and 1.36 元/kg；2010年N，P_2O_5，K_2O和春玉米的价格分别为4.75，5.31，4.67，和1.56 元/kg。The prices for fertilizer N，P_2O_5，K_2O，and maize used was 4.35，4.39，4.67 and 1.36 yuan/kg for the year 2009；and those were 4.75，5.31，4.67，and 1.56 yuan/kg for the year 2010. * 表示处理间差异达5%显著水平 Indicate significant at 5% level between the treatments；ns—表示差异不显著 Means no significant difference.]

3 讨论与结论

合理施用氮肥减少氮素损失，提高氮素利用率，是实现农业可持续发展的关键。闫湘等[26]研究表明，在我国农民习惯施肥条件下氮素回收率仅为28.7%，不合理施肥和养分的不平衡投入是肥料利用率低的重要原因。综合两年的研究结果，本试验条件下生态集约化养分管理（EI）氮素利用率各参数氮素回收率、农学效率、偏生产力相比于FP分别提高了56.5%、58.3%和44.3%（表3）；EI处理两年平均产量为9773 kg/hm²，相比于FP处理（9419 kg/hm²）增产4.0%。上述结果主要是归因于两方面：一方面，生态集约化养分管理（EI）的合理氮素运筹模式满足了作物在不同时期的养分需求；另一方面，依据Nutrient Expert模型确定的氮肥施用量与作物氮素需求总量相吻合，因此既满足了作物生长的需要，又未造成肥料的浪费。总之，生态集约化养分管理在减少氮肥投入的情况下，依据作物不同时期对氮素的需求特点合理推荐氮素施用比例和用量，获得了与FP处理相当的氮素吸收量和玉米籽粒产量，减少了氮肥的损失，因此能够在保证作物产量的同时，显著提高氮素利用率，与Pampolino等[21]研究结果一致。Nutrient Expert模型之所以能够对氮肥施用量做出准确的推荐，一方面是由于其经过了菲律宾、越南、印度等东南亚国家的田间试验的校正和推广，证明其原理和技术模式是可行且可靠的；另一方面归功于IPNI中国项目课题组在多年、多点、多土壤类型和不同生态区做了大量田间试验，从区域上探明并积累了各省区土壤本底氮素供应量、氮素农学效率和作物对氮肥的产量反应等大量翔实的数据，为Nutrient Expert模型的校正奠定了坚实的基础，因此其在区域上能够进行准确地氮肥推荐，这与何萍等[20]的研究结果一致。Nutrient Expert模型使用时仅需农民回答一些简单的前一年肥料使用状况、历年栽培管理措施、种植区域（主要以省为单位）等问题，系统便可在已有的数据库基础上进行推荐施肥，在我国以小农户经营为主，难以做到家家测土配方的农业生产体系中，作为测土工程的辅助工具，具有广泛的推广价值和应用前景。不同的施肥方式之间，N1/2处理在土壤氮素耗竭一年的情况下，第二年补施氮肥并没有影响第二年作物产量和氮肥利用率，这可能由于冻融交替一方面加速了土壤有机氮的矿化和可溶性铵离子的释放，另一方面又促进了微生物脱氮化作用[27-28]，这样就在一定程度上增加了土壤中无机氮的含量，缓解了上一季对土壤无机氮素的耗竭状态，使第二年春播时土壤基础肥力有所恢复，因此在补施氮肥的情况下，没有显著的影响当季作物对氮素的吸收和产量的形成。

东北春玉米大多是雨养农业，因此其生长受降水条件强烈影响，不同年际间可能产生较大变异。本试验条件下，2009年春玉米生育期内降水量仅为257 mm，相当于2010年降水量的56%，严重阻碍了作物对氮素的吸收利用，导致2009年EI和FP两处理春玉米氮素吸收量和产量较2010年分别降低47%、50%和34%、38%。年际降水量的不同是氮素吸收量和产量年际变化的主要原因。也正是因为

2009 年较少的降水显著地影响了玉米对氮素的吸收和产量的形成，致使 2009 年氮素的回收率、农学效率和偏生产力都远低于 2010 年结果（表 3）。而近年来，随着全球气候变暖，极端气候频繁出现，如何将 Nutrient Expert 专家系统与气象资料相结合实现极端气候条件下养分的科学管理还有待于进一步研究。

无机氮在土壤中的残留因气候条件、土壤质地、作物种类、氮肥管理方式而异。有研究认为，长期大量施用氮肥会造成氮在土壤剖面中大量积累，且积累量随着施氮量的增加而增加[6]；赵士诚等[29]研究表明，在农民习惯施肥下，夏玉米收获后土壤残留的无机氮含量显著高于优化施肥处理；但 Raun 和 Johnson[30]认为，当施氮量超过最佳经济施氮量时对作物收获后土壤无机氮的残留量无显著影响。综合本研究两年结果可以发现，N2/2 处理土壤氮素残留量都要高于 N1/2 和 N0/2 处理，相应的 N1/2 处理要高于 N0/2 处理（表 4），表明氮肥的施用是导致土壤无机氮残留增加的重要因素；而收获后 EI 与 FP 处理土壤无机氮残留量分别为 70 和 65 kg/hm^2，表明在黑土上，当施氮量超过 180 kg/hm^2 后，施氮量对收获后土壤无机氮残留无显著影响，即在一定范围内土壤无机氮残留量随施氮量的增加而增加，但当施氮量超过一定值后就不会显著地影响土壤无机氮的残留，这与叶东靖等[31]的研究结果一致。Raun 等[30]认为土壤 - 作物系统对土壤中硝态氮的积累有一个缓冲作用，即氮素环境承受力，由于这一缓冲作用的存在，随着氮肥施用量的增加，土壤中硝态氮残留量表现为先平滑后突然上升的现象。本试验条件下的黑土本身可能存在着较大的氮素环境承受力，加之起始硝态氮含量较低，氮肥施入土壤后并未超过土壤的氮素环境承受力，因此表现为 FP 处理相比 EI 在高氮肥用量的情况下，无机氮残留量与 EI 处理无明显差异。

尽管本试验条件下 EI 处理氮素利用率远高于 FP 处理，但与世界上玉米氮素平均利用率（回收率、农学效率、偏生产力分别为 65.0%、24.2 kg/kg、72.0 kg/kg）[32]相比还有一定距离。造成这种差距的原因虽然与世界上（包括非洲、亚洲、欧洲、美国和澳大利亚）玉米氮肥平均施用量较低仅为 123 kg/hm^2[32]有关，但更多原因是由于我们缺少从整体上将影响产量的各个因素整合起来的综合的农艺管理措施。有研究[33]指出，通过延迟玉米的播种时期、增加种植密度、改进玉米品种，在未增加作物施氮量的情况下作物产量却是农民常规管理的 1.9 倍，提高了氮肥利用效率，有效减少了氮肥的损失。因此进一步提高产量和肥料利用率还需与作物品种、栽培措施等其他农艺措施相结合。综上所述，基于氮素农学效率、作物目标产量和作物施肥反应的养分管理措施能够有效提高春玉米产量，增加氮素吸收和提高氮素利用率，同时提高农民的收入，是能够兼顾高产、养分高效利用和环境友好的一种可行的生态集约化养分管理措施。

参 考 文 献：

[1] Egger K. Ecological intensification. Soil conservation and improvement of tropical soils by pastoral agroforestry systems[J]. Collect. Doc. Syst. Agratr., 1986, 6: 129-135.

[2] Witt C, Fairhurst T H, Griffiths W. The need to increase profitability in oil palm plantations: matching crop and nutrient management principles with evolving strategies [J]. Planter, 2006, 82: 377-403.

[3] Affholder F, Jourdain D, Morize M *et al*. Ecological intensification in the mountains of Vietnam: constraints to the adoption of cropping systems based on mulches and cover crops [J]. Cah. Agric., 2008, 17(3): 289-296.

[4] Bommel P, Bonaudo T, Barbosa T *et al*. The complex relationship between cattle ranching and the forest in Brazilian Amazonia. A multiagent modelling approach[J]. Cah. Agric., 2010, 19(2): 104-111.

[5] Cassman K G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 1999, 96 (11): 5952-5959.

[6] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2002, 63 (2-3): 117-127.

[7] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. Nature, 2005, 435(7046):1179-1186.

[8] 金继运，李家康，李书田. 化肥与粮食安全[J]. 植物营养与肥料学报，2006，12(5)：601-609.
Jin J Y, Li J K, Li S T. Chemical fertilizer and food security[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(5): 601-609.

[9] 金继运，张宁，梁鸣早，等. 土壤养分系统研究方法在土壤肥力研究及测土施肥中的应用[J]. 植物营养与肥料学报，1996，2(1)：1-8.
Jin J Y, Zhang N, Liang M Z *et al*. Systematic approach for soil nutrient status evaluation and its use in fertilizer recommendation [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1996, 2(1): 1-8.

[10] 陈新平，张福锁. 通过"3414"试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. 中国农技推广，2006，4(22)：36-39.
Chen X P, Zhang F S. Establishing fertilization recommendation index based on the "3414" field experiments[J]. China Agric.

Tech. Extens., 2006, 4(22): 36-39.

[11] Prasad R, Prasad B. Fertilizer requirements for specific yield targets of soybean based on soil testing in alfisols[J]. J. Indian Soc. Soil Sci., 1996, 44(2): 332-333.

[12] Reddy K C, Ahmed S R. Soil test based fertilizer recommendation for maize grown innceptisols of jagtiyal in andhra pradesh [J]. J. Indian Soc. Soil Sci., 2000, 48(1): 84-89.

[13] 周鸣铮. 中国的测土施肥[J]. 土壤通报, 1987, 18(1): 7-13.
Zhou M Z. Nutrient recommendations in China[J]. Chin. J. Soil Sci., 1987, 18(1): 7-13.

[14] 侯彦林. "生态平衡施肥"的理论基础和技术体系[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 653-658.
Hou Y L. Theory and technological system of ecological balanced fertilization[J]. Acta Ecol. Sin., 2000, 20(4): 653-658.

[15] Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S *et al*. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia[J]. Field Crops Res., 1999, 63: 113-138.

[16] Satyanarayana T, Majumdar K, Biradar D P. New approaches and tools for site-specific nutrient management with reference to potassium[J]. Karnataka J. Agric. Sci., 2011, 24 (1): 86-90.

[17] Smaling E M A, Janssen B H. Calibration of QUEFTS, a model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices[J]. Geoderma, 1993, 59: 21-44.

[18] Haefele S M, Wopereis M C S, Ndiaye M K *et al*. Internal nutrient efficiencies, fertilizer recovery rates and indigenous nutrient supply of irrigated lowland rice in Sahelian West Africa [J]. Field Crops Res., 2003, 80(1): 19-32.

[19] Das D, Maiti D, Pathak H. Site-specific nutrient management in rice in Eastern India using a modeling approach[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2009, 83: 85-94.

[20] 何萍, 金继运, Pampolino M F, Johnston A M. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.
He P, Jin J Y. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. 2012, 18(2): 499-505.

[21] Pampolino M F, Manguiat I J, Ramanathan S R *et al*. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems [J]. Agric. Syst., 2007, 93(123): 1-24.

[22] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴(2006)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Editorial Committee of Chinese Agriculture Yearbook. Chinese agriculture yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.

[23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 147-159.
Lu R K. Analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000. 147-159.

[24] Lord, E I, Anthony S G, Goodlass G. Agricultural nitrogen balance and water quality in the UK[J]. Soil Use Manag., 2002, 18(4): 363-369.

[25] Sacco D, Bassanino M, Grignani C. Developing a regional agronomic information system for estimating nutrient balances at a larger scale[J]. Eur. J. Agron., 2003, 20(1-2): 199-210.

[26] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 4(2): 450-459.
Yan X, Jin J Y, He P *et al*. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 4(2): 450-459.

[27] 朴河春, 刘广深, 洪业汤. 干湿交替和冻融作用对土壤肥力和生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 1995, 14(6): 29-34.
Piao H C, Liu G S, Hong Y T. Effect of alternative drying-rewetting and freezing-thawing on soil fertility and ecological environment[J]. Chin. J. Ecol., 1995, 14(6): 29-34.

[28] 蔡红光, 米国华, 陈范骏, 等. 东北春玉米连作体系中土壤氮矿化、残留特征及氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1144-1152.
Cai H G, Mi G H, Chen F J *et al*. Characteristics of nitrogen mineralization and residual in the soil and nitrogen balance in the continuous spring maize cultivation system in Northeast China [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(5): 1144-1152.

[29] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 492-497.
Zhao S C, Pei X X, He P *et al*. Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 492-497.

[30] Raun W R, Johnson G V. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat[J]. Agron. J., 1995, 87: 827-834.

[31] 叶东靖, 高强, 何文天, 等. 施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 552-558.
Ye D J, Gao Q, He W T *et al*. Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(3): 552-558.

[32] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J *et al*. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects [J]. Adv. Agron., 2005, 87: 85-156.

[33] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M *et al*. Integrated soil-crop system management for food security [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 2011, 108(16): 6399-6404.