植物营养与肥料学报 2011,17(1):38-47
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响

刘占军[1],谢佳贵[2],张 宽[2],王秀芳[2],侯云鹏[2],尹彩侠[2],李书田[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 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:针对吉林春玉米氮肥施用中存在氮肥用量偏大,且具盲目性的现状,采用田间试验研究农民习惯施氮量和推荐施氮量下氮肥不同施用方式对春玉米干物质积累、子粒产量、氮素吸收和利用效率的影响。结果表明,推荐施氮量下,苗期和灌浆期春玉米干物质积累量显著高于习惯施肥,有机无机配合提高了春玉米干物质积累速率。施氮处理与不施氮相比均显著增加玉米子粒产量,增产 11.2%~16.8%;推荐施氮量下玉米子粒产量与习惯施氮量相当,但显著提高氮素的偏因子生产力和农学效率。在氮磷钾用量一致的基础上,用 30% 有机肥氮替代化肥氮与 100% 化肥氮处理的产量相当,对氮素利用效率也没有影响,并降低收获期土壤无机氮含量。说明合理施用氮肥不但能够维持玉米产量,还可减少氮肥投入,提高氮肥利用效率;有机肥部分替代化肥氮是吉林春玉米氮素管理的有效途径之一。

关键词:春玉米;氮肥管理;产量;氮肥利用效率
中图分类号:S513.062　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2011)01-0038-10

Maize growth and nutrient uptake as influenced by nitrogen management in Jilin province

LIU Zhan-jun[1], XIE Jia-gui[2], ZHANG Kuan[2], WANG Xiu-fang[2], HOU Yun-peng[2], YIN Cai-xia[2], LI Shu-tian[1*]
(*1 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: Aimed to the current problem of fertilizer application in Jilin province, e.g. excessive fertilization, one time fertilization, fewer or no use organic manure, and the lower fertilizer use efficiency, a field experiment was conducted to study the effects of various nitrogen managements in traditional and recommended nitrogen rate on growth, yield and nutrient uptake of maize. Results showed that dry matter accumulation of maize in seedling stage and grain filling stage was significantly increased under recommended nitrogen rate compared to under traditional farmer's practice. Dry matter accumulation rate was improved when fertilizer nitrogen was applied combined with organic manure. All the treatments with nitrogen applied significantly increased grain yield by 11.2%-16.8% compared with control without nitrogen application. Although nutrient managements under the recommended nitrogen rate produced similar grain yields to those of farmer's practices, partial factor productivity and agronomic efficiency of nitrogen were significantly improved. On the basis of the same amount of N, P and K, fertilizer nitrogen substitution by pig manure produced similar yield and nitrogen use efficiency and resulted in lower soil inorganic nitrogen compared with full chemical nitrogen applications. In summary, rational application of nitrogen fertilizer could not only sustain maize yield, reduced nitrogen input and also improved N use efficiency. Part of nitrogen substitution by organic manure may be a feasible way in nutrient management on spring maize in Jilin.

收稿日期:2010-01-28　　**接受日期**:2010-06-24
基金项目:国家"973"计划课题"肥料减施增效与农田可持续利用基础研究"(2007CB109308)资助。
作者简介:刘占军(1984—),男,河南新密市人,硕士研究生,主要从事肥料资源高效利用方面的研究。E-mail:liuzhanjun07@yahoo.cn
* 通讯作者 Tel:010-82108000-815, E-mail:stli@caas.ac.cn

Key words: spring maize; nitrogen management; yield; nitrogen use efficiency

吉林省是我国春玉米主产区,种植面积和总产量分别占全国的9.8%和12.6%[1]。2008年吉林省化肥总消费量(折纯量)为128.8万吨,其中氮肥65.6万吨,占总消费量的50.9%[1]。但是,近年来由于氮肥施用不合理以及重施化肥、少施或不施有机肥,氮肥的利用率呈逐渐下降趋势[2]。关于如何提高东北春玉米氮肥利用率及减少环境风险方面的研究已有大量报道,如通过施用地膜覆盖栽培技术[3]、施用缓控释肥[4]、氮肥分次施用[5]以及施用有机肥[6]等,其中配施有机肥或氮肥合理分配是提高氮肥利用率及作物产量的有效途径。前人对有机无机肥配施试验的研究大都是在化肥用量不变的基础上,通过增施有机肥来研究有机无机肥料配施对作物产量、肥料利用率的影响。等养分条件下通过有机肥部分替代化肥来探讨有机无机配施对作物产量、肥料利用率的影响除在南方水稻上有一定研究外[7],在东北春玉米上鲜见报道。近年来,随着化肥氮施用量的增加,我国有机肥料施用逐渐减少[8],尤其吉林省有机肥资源(主要是秸秆和畜禽粪便)的利用低于全国平均水平[9];而农民采用一次性施肥的比例高达78.3%[10]。化学氮肥利用率低,有机肥料利用不足,不仅造成肥料资源浪费,土壤肥力下降[11],还给农业生产和生态环境带来诸多不利影响[12]。因此,合理施用氮肥是提高春玉米产量、氮素利用效率以及土地可持续利用的关键。

本试验在对农民习惯施肥调查的基础上,通过氮肥减施、等养分条件下有机肥部分替代及氮肥追施相结合,研究氮肥施用方法和有机肥替代对土壤氮素供应、春玉米生长发育、产量以及氮素利用效率的影响,为吉林春玉米氮肥合理施用及充分利用有机肥资源提供理论依据和技术参考。

1　材料与方法

1.1　农户施肥现状

对吉林省玉米主产县公主岭和榆树的110个农户进行调查结果表明,氮肥用量小于N 100或大于300 kg/hm^{2}的农户很少,施氮量在N 190～200 kg/hm^{2}的农户最多,约占21%,平均施氮量为N 202 kg/hm^2(图1)。在肥料品种上超过90%的农户以各种氮、磷、钾或氮磷复合肥作基肥,尿素做追肥,基本不施有机肥,而且通常采用深条施方式一次性基施或基肥加一次追肥的方式。

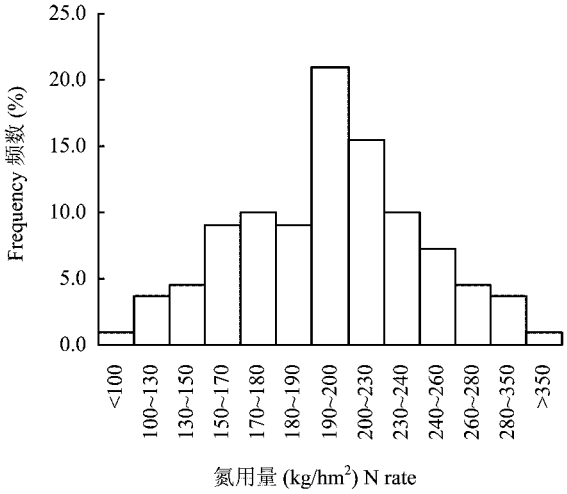

图1　吉林公主岭和榆树农民氮肥施用量

Fig. 1　Nitrogen application rate in Gongzhuling and Yushu of Jilin province

1.2 试验设计

试验于2008年5月至9月在吉林省公主岭市陶家屯进行。供试土壤为黑土,耕层土壤基本理化性质:容重1.36 g/m^3,pH 6.1,有机质29.4 g/kg,全氮1.2 g/kg,硝态氮11.1 mg/kg,铵态氮21.1 mg/kg,速效磷29.4 mg/kg,速效钾50.6 mg/kg。玉米生长季内≥10℃积温为3190℃,无霜期163 d,降水量628 mm,较近20年(1989～2008)平均降水量477 mm增加31.7%,属于降水相对丰沛年份。玉米生育期内,月降水量及最高和最低气温见图2。

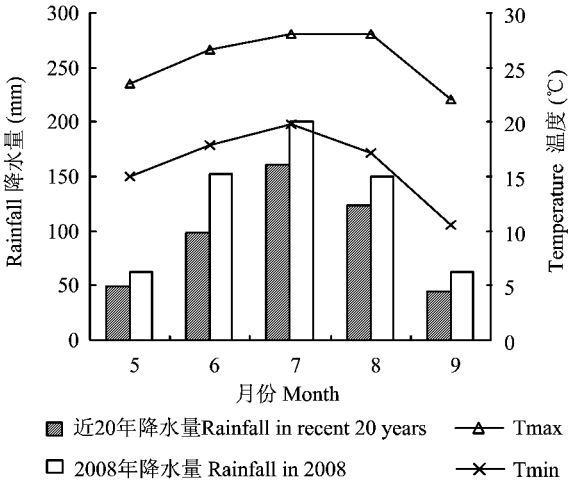

图2　玉米生育期间降水量、最高气温(Tmax)和最低气温(Tmin)

Fig. 2　The rainfall, maximum and minimum temperature of the experiment site during the growing period of maize

试验设7个处理：1）不施氮（N_0）；2）农民习惯施氮量N 190 kg/hm^2，一次性基施（N_{190}）；3）农民习惯施氮量，1/4基施，3/4追施（$N_{190(1:3)}$）；4）农民习惯施氮量，70%化肥氮+30%有机肥氮，一次性基施（$N_{190(FM)}$）；5）推荐施氮量，N 152 kg/hm^2，一次性基施（N_{152}）；6）推荐施氮量，1/4基施，3/4追施（$N_{152(1:3)}$）；7）推荐施氮量，70%化肥氮+30%有机肥氮，一次性基施（$N_{152(FM)}$）。推荐施氮量根据土壤测试和目标产量而确定。试验用化肥为尿素（N 46%）、三料过磷酸钙（P_2O_5 17%）和氯化钾（K_2O 60%）。有机肥为腐熟的猪粪，其养分（烘干物）含：C、N、P、K、Ca、Mg、Fe为101.5、41.0、25.0、35.0、47.0、11.0、13.0 g/kg；Cu 90.7、Mn 543.0、Zn 477.0、B 13.3、Mo 2.6 mg/kg。小区面积50 m^2。重复3次，随机排列。各处理磷、钾肥用量均为P_2O_5 75 kg/hm^{2}和K_2O 90 kg/hm^2，基施。供试玉米品种为郑单958，播种密度6.0×10^{4}株/hm^2。试验于2008年5月1日人工拉线播种，常规田间管理，同年9月23日收获，各小区单打单收，子粒以14%水分标准计产。

1.3 样品采集和测定

在春玉米每个生育期：苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、成熟期（即出苗后21、42、58、70、106、131 d）各小区取有代表性的玉米植株（灌浆期和成熟期分子粒和茎叶），将样品在105℃杀青，30 min后于70℃下烘干至恒重，称重，粉碎过0.5 mm筛，用H_2SO_4-H_2O_2消煮[13]，采用半微量凯氏定氮法测定全氮。

各小区采集0—20 cm、20—40 cm土壤样品，混匀，风干，过0.85 mm筛。土壤硝态氮含量采用2 mol/L KC1浸提—紫外分光光度法测定[14]，铵态氮采用2 mol/L KC1浸提—靛酚蓝比色法测定[13]。

1.4 计算公式及统计方法

不同生育期春玉米干物质积累和养分吸收可用Logistic方程描述：

$$Y = k/(1 + ae^{-bt})$$

式中：Y为干物质积累量或养分吸收量，t为出苗后天数（d），k、a、b为待定参数。

氮肥回收率（RE_N）=（收获期施氮区地上部总吸氮量－收获期不施氮区地上部总吸氮量）/氮肥施用量；

氮肥农学效率（AE_N）=（施氮区子粒产量－不施氮区子粒产量）/氮肥施用量；

氮肥偏生产力（PFP_N）= 施氮区产量/氮肥施用量[2]；

氮素分配率=（抽雄期营养体氮积累量－成熟期营养体氮积累量）/抽雄期营养体氮积累量[15]；

对子粒氮贡献率=（抽雄期营养体氮积累量－成熟期营养体氮积累量）/成熟期子粒氮积累量[15]。

试验数据采用Excel 2000和SPSS 16.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥管理对春玉米干物质累积的影响

表1表明，推荐施肥量下，苗期和灌浆期春玉米

表1 不同氮肥管理下春玉米干物质积累动态变化（kg/hm^2）

Table 1 Dynamics of dry matter accumulation of spring maize at different nitrogen management

施氮量 N rate (N kg/hm^2)	施用方法 Methods	苗期 Seedling	拔节期 Jointing	喇叭口期 Belling	抽雄期 Tasselling	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing
0		64 bc	1495 bc	4425 c	7136 c	16964 d	19590 b
190	基施 Basal	55 c	1343 c	5826 ab	7988 bc	17537 cd	21669 a
190	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	66 ab	1709 ab	6282 ab	8277 b	17752 cd	21734 a
190	30%有机肥 N 30% organic-N	57 bc	1573 bc	5427 b	8147 bc	18448 bc	21106 ab
152	基施 Basal	66 ab	1520 bc	5744 ab	9326 a	19578 a	22989 a
152	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	76 a	1913 a	6504 a	8059 bc	18156 bc	22396 a
152	30%有机肥 N 30% organic-N	58 bc	1473 bc	5410 b	8282 b	19117 ab	21502 ab
F 值显著性 Significance of *F* value							
氮用量 N rate		*	NS	NS	NS	*	NS
施用方法 Methods		**	**	*	NS	NS	NS
氮用量×施用方法 N rate × Methods		NS	NS	NS	NS	NS	NS

注（Note）：同列数据后不同字母的数字表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at 5% level. *，**分别表示5%和1%显著水平 Indicate significant difference at 5% and 1% level, respectively; NS表示未达5%显著差异 Not significant at 5% level.

干物质积累量显著高于习惯施肥量下的累积量。无论是习惯施肥量还是推荐施肥量下,不同氮素施用方法显著影响大喇叭口期以前的干物质积累,以基追比 1:3 干物质最高,30% 有机肥氮替代处理最低;但随着生育进程而差异逐渐缩小,到灌浆期和成熟期,不同施肥方法对干物质积累没有显著影响。施肥量和施肥方法间的交互作用不显著。

回归分析(表 2)表明,施氮处理比不施氮处理春玉米干物质最大累积速率提高,增幅达 1.2% ~ 20.0%。习惯施氮量下,干物质最大累积速率 $N_{190(FM)} > N_{190} > N_{190(1:3)}$;推荐施氮量下,干物质最大累积速率 $N_{152(FM)} \approx N_{152} > N_{152(1:3)}$。可见,等氮量下有机无机配合有利于春玉米干物质累积速率的提高。表 2 还表明,不施氮处理干物质最大积累速率出现的时间较早,可能是由于后期氮素缺乏,降低光合速率,影响光合作用的物质合成及运输,使干物质最大累积速率过早出现。从田间观察看,在喇叭口期(出苗后 58 d 左右)不施氮处理小区玉米植株叶片已出现明显的"黄化现象"。推荐施氮量下,基施 N_{152} 与有机替代处理 $N_{152(FM)}$ 干物质最大积累速率比其他处理高,出现的时间最早,有利于植株干物质积累和子粒形成。

表 2　春玉米干物质积累 Logistic 方程回归分析

Table 2　Logistic equation analysis for dry matter accumulation of spring maize

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	r	MAR_M [g/(plant·d)]	MAR_M 出现天数 Time in MAR(d)
N_0	$y = 308.100/(1 + 127.166e^{-0.063t})$	0.997	4.85	76.9
N_{190}	$y = 359.807/(1 + 96.695e^{-0.057t})$	0.996	5.13	80.2
$N_{190(1:3)}$	$y = 372.651/(1 + 72.561e^{-0.053t})$	0.996	4.94	80.8
$N_{190(FM)}$	$y = 375.820/(1 + 111.961e^{-0.059t})$	0.998	5.54	80.0
N_{152}	$y = 373.046/(1 + 139.448e^{-0.064t})$	0.999	5.97	77.2
$N_{152(1:3)}$	$y = 385.130/(1 + 68.083e^{-0.051t})$	0.996	4.91	82.8
$N_{152(FM)}$	$y = 369.803/(1 + 141.112e^{-0.063t})$	0.999	5.82	78.6

注(note):MAR_M—干物质最大累积速率 The maximum accumulation rate of dry matter; $r_{0.01(7)} = 0.798$.

2.2　不同氮肥管理对春玉米产量及其构成因素的影响

施氮显著提高春玉米产量,增产 11.2% ~ 16.8%;习惯施氮量和推荐施氮量间产量无显著差异,相同施氮量下,氮肥施用方法对产量也没有显著影响(表 3)。说明推荐施氮量虽然氮肥用量降低,但并不影响当季春玉米产量。而且无论是习惯施氮量还是推荐施氮量,在氮磷钾一致的基础上用 30% 有机肥氮替代化肥氮并没有造成玉米减产,与基施和基追结合处理产量相当。

不同氮素管理对玉米穗长影响不明显;习惯施氮量下有机无机配合显著缩短玉米秃尖长度。施氮均显著提高春玉米穗粒数,但各施氮处理间差异不明显。习惯施氮量下,除有机无机配合外,各施肥处理玉米百粒重与不施氮相比无显著差异,而推荐施氮量的各种施肥模式均显著提高玉米百粒重。

表 3　不同施氮处理对玉米产量及其构成因素的影响

Table 3　Effect of different nitrogen application on yield and its components in maize

处理 Treatment	穗长 Length of cob (cm)	秃尖长 Length of bald (cm)	穗粒数 Grain per cob (No.)	百粒重 100-grain wt. (g)	产量 Yield (kg/hm^2)	增产率 Yield increase (%)
N_0	16.8 a	0.26 a	589 b	320 c	9621 b	
N_{190}	16.8 a	0.03 ab	631 a	326 bc	11238 a	16.8
$N_{190(1:3)}$	17.2 a	0.12 ab	619 a	320 c	10909 a	13.4
$N_{190(FM)}$	16.5 a	0.02 b	622 a	343 a	10679 a	11.2
N_{152}	17.2 a	0.17 ab	634 a	342 a	11187 a	16.3
$N_{152(1:3)}$	16.6 a	0.05 ab	632 a	334 ab	10929 a	13.6
$N_{152(FM)}$	16.4 a	0.07 ab	631 a	333 ab	11045 a	14.8

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 are significant at 5% level.

2.3 氮素管理对春玉米氮素吸收的影响

与干物质积累一样,春玉米养分积累随生长发育而逐渐增加。表4表明,不施氮处理,除苗期外,各个生育期氮素吸收均低于施氮处理,说明苗期土壤中氮素能够满足早期玉米对氮素的需求,但后期供应不足。苗期和灌浆期推荐施肥量下基施处理的氮素积累量显著高于习惯施氮量下的相应处理,其他时期则没有显著差异。两种施氮量下基追比1:3处理的氮素累积量整个生育期均无显著差异。有机无机配合处理,除苗期和成熟期氮素累积量显著低于相同施氮量下的基施和基追比1:3处理外,其他时期则无显著差异。可见,推荐施氮量虽比习惯施氮少,但并不影响春玉米对氮素的吸收;有机肥替代不但在整个生育期供氮平稳,还限制灌浆期后对氮素的吸收,利于光合产物向子粒运输,防止贪青。

回归分析(表5)表明,施氮比不施氮处理氮素最大吸收速率提高23.3%~53.1%。习惯施氮量下,表现为 $N_{190(FM)} > N_{192(1:3)} \approx N_{190}$;推荐施氮量下,表现为 $N_{152(FM)}) \approx N_{152(1:3)} < N_{152}$。各处理氮素最大吸收速率出现的时间为52.8~55.6 d,施氮与否对氮素最大吸收速率出现的时间影响不明显。

表4 不同生育期地上部氮素吸收量变化(kg/hm²)

Table 4 Changes of N accumulation for shoot in different growth stages

氮用量 N rate (N kg/hm²)	施用方法 Methods	苗期 Seedling	拔节期 Jointing	喇叭口期 Belling	抽雄期 Tasselling	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing
0		2.2 ab	39.6 b	55.6 b	111.0 b	119.8 c	139.1 c
190	基施 Basal	1.9 b	46.4 ab	106.8 a	138.9 ab	159.0 b	191.0 a
190	基追比1:3 Basal:Topdressing 1:3	2.1 ab	49.0 ab	113.3 a	134.5 ab	174.3 ab	193.9 a
190	30%有机肥N 30% organic-N	1.9 b	50.7 a	101.9 a	136.4 ab	172.2 ab	179.0 b
152	基施 Basal	2.3 a	50.4 a	105.5 a	160.0 a	182.5 a	197.0 a
152	基追比1:3 Basal:Topdressing 1:3	2.4 a	47.9 ab	111.3 a	135.6 ab	190.3 a	197.7 a
152	30%有机肥N 30% organic-N	1.9 b	48.6 ab	101.4 a	144.3 a	171.3 ab	172.1 b
F 值显著性 Significance of *F* value							
氮用量 N rate		**	NS	NS	NS	*	NS
施用方法 Methods		**	NS	NS	NS	NS	**
氮用量×施用方法 N rate × Methods		NS	NS	NS	NS	NS	NS

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 are significant at 5% level. *, **分别表示5%和1%显著水平 Indicate significant difference at 5% and 1% level, respectively; NS表示未达5%显著差异 Not significant at 5% level.

表5 春玉米氮素吸收量 Logistic 方程回归分析

Table 5 Logistic equation analysis for N uptake of spring maize

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	*r*	MAR_N [mg/(plant·d)]	MAR_N 出现天数 Time in MAR_N(d)
N_0	$y=1.996/(1+167.761e^{-0.093t})$	0.976	46.4	55.1
N_{190}	$y=2.834/(1+109.393e^{-0.089t})$	0.991	63.1	52.8
$N_{190(1:3)}$	$y=2.946/(1+111.75e^{-0.053t})$	0.995	64.8	53.6
$N_{190(FM)}$	$y=2.970/(1+70.927e^{-0.077t})$	0.995	57.2	55.3
N_{152}	$y=3.189/(1+137.961e^{-0.089t})$	0.993	71.0	55.4
$N_{152(1:3)}$	$y=2.955/(1+93.144e^{-0.082t})$	0.996	60.6	55.3
$N_{152(FM)}$	$y=3.002/(1+90.204e^{-0.081t})$	0.993	60.8	55.6

注(note):MAR_N—氮素最大吸收速率 The maximum absorption rate of nitrogen; $r_{0.01(7)} = 0.798$.

2.4　营养体氮素再分配及其对子粒氮的贡献

Hocking[16]研究认为,营养体氮的再分配对子粒的品质有重要意义。何萍等[15]研究表明,不施氮或施氮不足可能导致营养体氮素外运过多；施氮过量则由于营养体氮素代谢过旺,使运往子粒的氮素减少。在氮素供应较好的条件下,营养体氮素再分配率和对子粒氮贡献率越高,越有利于经济产量的形成。抽雄期营养体氮素再分配率和对子粒氮的贡献率分析表明(表 6),不施氮玉米营养体氮素再分配率最高,对子粒的贡献率也高,说明供氮不足而使营养体氮素外运过多。习惯施肥量基施处理(N_{190})营养体氮素再分配率和对子粒的贡献率最低,说明氮素供应过量,导致氮素运往子粒减少,过多地保留在营养体。推荐施肥量下基施,营养体氮素再分配率和对子粒的贡献率最高,说明氮素供应适中,利于氮素的再分配。习惯施氮量和推荐施氮量下,基追比 1:3 处理和有机替代处理的营养体氮素再分配率相当。推荐施氮量下,抽雄期营养体氮素再分配率和对子粒氮贡献率为：基施(N_{152}) > 有机替代($N_{152(FM)}$)≈基追比 1:3($N_{152(1:3)}$)。而有机肥部分替代化肥的处理,习惯施肥量下($N_{190(FM)}$),营养体氮素对子粒的贡献率最高,显著高于基施和基追比 1:3 处理；而推荐施氮量下($N152_{(FM)}$),营养体氮素对子粒的贡献率最低,显著低于基施处理而与基追比 1:3 处理相当。说明习惯施氮量由于氮素用量较高,部分有机替代有利于氮素供应平缓,使氮素的分配率和对子粒氮的贡献率提高；而推荐施氮量较低的情况下,有机替代虽然不影响产量,但施氮量较低,供氮略显不足,影响氮素向子粒转移。

表 6　不同施氮处理对春玉米氮素再分配的影响

Table 6　Effect of N rates on N-redistribution rate in spring maize

处理 Treatment	氮素再分配率 N-redistribution rate (%)	对子粒氮贡献率 N-contribution rate to seed (%)
N_0	67.1 a	77.3 b
N_{190}	46.6 d	56.2 e
$N_{190(1:3)}$	57.7 bc	67.9 c
$N_{190(FM)}$	55.2 c	74.5 b
N_{152}	61.6 b	84.8 a
$N_{152(1:3)}$	57.8 bc	65.2 cd
$N_{152(FM)}$	54.9 c	61.6 d

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 are significant at 5% level.

2.5　不同氮素管理对氮肥利用效率的影响

偏生产力(PFP)是土壤肥力与肥料效应的综合指标,是指土壤本身的养分和施用肥料养分的综合效率。张福锁等[2]认为,偏生产力比较适合我国目前土壤和环境养分供应量大、化肥增产效益下降的事实,是评价肥料利用率的适宜指标。Dobermann[17]研究认为,氮肥偏生产力一般在 40～80 kg/kg 之间,大于 60 kg/kg 表明氮素管理较好或施肥量较低。表 7 表明，习惯施氮量下,3 种管理措施氮肥的偏生产力(PFP_N)均小于 60 kg/kg；而推荐施氮量下,3 种施用方法的偏生产力均大于 60 kg/kg。

从表 7 还看出,推荐施肥量下不同施用方法的农学效率(AE_N)显著高于习惯施氮量下相应的施用方法,说明推荐施肥在没有降低产量的同时,显著提高了氮素的利用效率。相同施氮量下,不同氮肥施用方法对 PFP_N 和 AE_N 没有显著影响。在氮、磷、钾用量相同的情况下,用 30% 的有机肥氮替代化肥氮(部分磷和钾也被替代)并未显著影响氮素 PFP_N 和 AE_N,可以作为减少化肥氮投入的途径之一。

氮肥用量没有显著影响氮素的回收率(RE_N),但施用方法显著影响 RE_N。主要是有机肥氮替代化肥氮并没有像以往有机无机配合试验提高氮素利用率,而是降低了氮素的回收率。以前关于有机无机配合施用的研究大都是在推荐的氮、磷、钾基础上增施有机肥,因此可能过高估计了有机肥的当季增产效果和有机无机的交互作用。

2.6　土壤无机氮含量变化

土壤无机氮(包括硝态氮、铵态氮)含量能够很好地反映植物生长过程中土壤供氮能力。表 8 表明,不施氮处理 0—20 cm 耕层土壤无机氮含量苗期至拔节期迅速下降,到喇叭口期又回升,抽雄期、灌浆期和成熟期土壤无机氮含量变化不明显,维持在一定的水平。苗期和拔节期,施氮量对土壤无机氮含量有显著影响。推荐施氮量下,不同管理措施土壤无机氮含量均低于习惯施氮量下的管理措施,拔节期则无差异。氮肥施用方法,除灌浆期外,对各时期土壤无机氮含量均有显著影响。无论是习惯施肥量还是推荐施肥量,基追比 1:3 处理土壤无机氮含量与不施氮处理变化趋势相似,尤其是在苗期和拔节期,但苗期无机氮含量显著高于不施氮处理。由于拔节期追施氮肥,喇叭口期无机氮含量有所增加,但与相同生育期等氮水平处理相比增加幅度不大,并没有因氮肥的大部分追施而出现无机氮含量的峰

表7 不同氮素管理对氮素利用效率的影响

Table7 Effect of different N management on N use efficiency of spring maize

氮用量 N rate (N kg/hm^2)	施用方法 Method	氮肥偏生产力 PFP_N (kg/kg)	农学效率 AE_N (kg/kg)	回收率 RE_N (%)
190	基施 Basal	59.1 b	8.5 a	27.3 b
190	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	57.4 b	6.8 a	28.8 b
190	30%有机肥 N 30% organic-N	56.3 b	5.7 a	21.0 b
152	基施 Basal	73.6 a	10.3 a	38.1 a
152	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	71.9 a	8.6 a	25.4 b
152	30%机肥 N 30% organic-N	72.7 a	9.4 a	21.7 b
F 值显著性 Significance of *F* value				
氮用量 N rate		**	*	NS
施用方法 Methods		NS	NS	**
氮用量×施用方法 N rate × Methods		NS	NS	*

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 are significant at 5% level. *, **分别表示5%和1%显著水平 Indicate significant difference at 5% and 1% level, respectively; NS 表示未达5%显著差异 Not significant at 5% level. PFP_N— Partial factor productivity from applied N; AE_N—Agronomic efficiency of applied N; RE_N—Apparent recovery efficiency of applied N.

表8 不同施氮处理耕层(0—20 cm)土壤无机氮含量变化 (mg/kg)

Table 8 Effect of different N treatments on the changes of mineral nitrogen in 0—20 cm soil layer

氮用量 N rate (N kg/hm^2)	施用方法 Methods	苗期 Seedling	拔节期 Jointing	喇叭口期 Belling	抽雄期 Tasselling	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing
0		32.0 f	15.6 e	27.2 d	20.8 bc	18.6 b	20.5 a
190	基施 Basal	150.4 a	114.1 a	28.6 cd	19.0 c	20.0 ab	20.3 a
190	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	75.1 d	16.5 e	33.4 a	28.9 a	23.1 a	19.7 a
190	30%有机肥 N 30% organic-N	116.9 b	43.2 c	29.2 cd	22.2 b	22.7 a	16.1 b
152	基施 Basal	103.3 c	79.6 b	30.5 bc	26.1 a	21.8 ab	20.2 a
152	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	44.3 e	14.4 e	32.3 ab	25.9 a	21.7 ab	19.7 a
152	30%有机肥 N 30% organic-N	99.9 c	34.6 d	28.6 cd	21.9 bc	21.0 ab	15.1 b
F 值显著性 Significance of *F* value							
氮用量 N rate		**	**	NS	NS	NS	NS
施用方法 Methods		**	**	**	**	NS	**
氮用量×施用方法 N rate × Methods		**	**	NS	**	NS	NS

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 are significant at 5% level. *, **分别表示5%和1%显著水平 Indicate significant difference at 5% and 1% level, respectively; NS 表示未达5%显著差异 Not significant at 5% level.

值。原因一方面是这一时期植株生长快,吸收养分较多,另一方面是这一时期降雨多(图2),部分氮素淋洗到下层20—40 cm土壤中(表9),甚至渗入更深土层[18]。基施和有机肥替代处理整个生育期土壤无机氮含量总体表现为下降趋势,苗期至喇叭口期无机氮含量下降最快,占整个生育期无机氮含量降幅的84.1%～93.6%;而抽雄期至成熟期降低较缓。氮肥全部基施处理(N_{190}和N_{152})拔节期至喇叭口期的下降幅度最大,分别降低65.7%、59.1%;而有机替代处理$N_{190(FM)}$、$N_{152(FM)}$在苗期至拔节期无机氮含量降幅最大,分别下降73.1%、77.0%。

苗期至抽雄期20—40 cm土层土壤无机氮含量受氮肥用量及施用方法显著影响。在苗期、拔节期,基施处理无机氮含量显著高于其他施氮处理,而喇叭口期无机氮含量迅速降低,表现为:$N_{152} < N_{192} \approx N_0 \approx N_{152(FM)} \approx N_{192(FM)}$。拔节期追施处理追肥以后,追施处理在喇叭口期、抽雄期该土层中无机氮含量较其他处理显著提高,灌浆期与其他处理间土壤无

表 9　不同施氮处理耕层(20—40 cm)土壤无机氮含量变化(mg/kg)

Table 9　Effect of different N treatments on the changes of mineral nitrogen in 20—40 cm soil layer

氮用量 N rate (N kg/hm^2)	施用方法 Methods	苗期 Seedling	拔节期 Jointing	喇叭口期 Belling	抽雄期 Tasselling	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing
0		31.4 e	15.9 e	21.1 c	16.8 b	14.6 ab	8.5 d
190	基施 Basal	119.1 a	51.6 a	20.1 c	16.9 b	13.0 b	9.2 cd
190	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	48.8 d	17.9 e	31.0 a	26.9 a	13.5 ab	13.9 a
190	30% 有机肥 N 30% organic-N	69.8 b	37.0 c	19.2 c	19.7 b	13.9 ab	9.5 cd
152	基施 Basal	116.5 a	60.0 a	14.1 d	21.0 b	14.9 ab	11.3 b
152	基追比 1:3 Basal:Topdressing 1:3	46.9 d	15.5 e	26.8 b	27.6 a	15.4 a	10.8 bc
152	30% 有机肥 N 30% organic-N	65.1 c	28.8 b	19.4 c	17.8 b	14.0 ab	9.2 cd
F 值显著性 Significance of *F* value							
氮用量 N rate		**	**	**	**	NS	NS
施用方法 Methods		**	**	**	**	NS	NS
氮用量×施用方法 N rate × Methods		NS	**	**	**	NS	**

注(Note):同一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 are significant at 5% level. *, ** 分别表示 5% 和 1% 显著水平 Indicate significant difference at 5% and 1% level, respectively; NS 表示未达 5% 显著差异 Not significant at 5% level.

机氮含量差异不显著。

3　讨论

氮素是玉米生长最重要的营养元素之一,施用氮肥对玉米有明显的增产效果。李家康等[19]通过对我国 2 万多个农户氮肥施用状况调查的数据分析表明,有 1/3 农户氮肥施用过量。高强等[20]研究认为,在春玉米一年一熟的连作体系下,氮肥施用过量、一次性施肥均会导致土壤中无机氮高残留,使休闲期间氮素损失增加,易引起环境污染。本试验条件下,不同推荐施氮量处理春玉米产量与习惯施氮量下相应模式间无显著差异,说明减少 20% 的氮肥用量(N 152 kg/hm^2)是完全可行的,不但可以维持春玉米产量,而且还减少化肥投入量,降低氮素环境风险,提高经济效益。这一用量与朱兆良等[21]总结大量田间试验提出的主要粮食作物最佳氮肥用量 N 150～180 kg/hm^2 的水平范围是一致的。

相关研究表明,有机无机肥配施可提高玉米产量及氮肥利用率。宋日等[22]研究表明,有机无机肥配施可通过提高玉米中下层根系数量,延缓玉米根系的衰老,增加春玉米产量;周桦等[23]的研究也看出,有机肥具有稳产高产的作用,随着有机肥用量的增加,玉米的稳产作用更加明显。本试验在两种施氮水平下,有机无机肥配施处理与等氮量下氮肥基施及基追比 1:3 施肥模式间春玉米产量相当,无明显差异;但对氮素回收率有影响,以有机无机配施回收率较低,这一结果与其他研究不同。大多数研究认为,有机无机肥配合施用显著提高玉米产量和氮素回收率[24]。但是,这些研究大多是在推荐的氮、磷、钾基础上配合施用有机肥,而不是等养分,忽略了通过有机肥施用的氮、磷、钾养分,从而过高地估计了有机肥的作用和有机无机交互作用[8]。

春玉米生长期内土壤无机氮形态以硝态氮为主,铵态氮含量处于较低水平[25]。杜红霞等[26]研究表明,不同施氮处理土壤剖面硝态氮随深度的变化表现为 0—50 cm 土层含量较高且呈降低趋势,50—110 cm 含量低且波动较小。本试验条件下,对表层 0—20、20—40 cm 土壤无机氮含量测定结果看出,有机无机肥料配施可明显加快氮素的转化速度,且成熟期土壤无机氮含量低于其他施氮处理。这可能与有机肥的施入为土壤微生物提供碳源,显著增加土壤微生物量氮[27],使玉米整个生长季内氮素供应较稳,降低收获后土壤氮素对环境污染的风险。因此,本试验条件下,利用 30% 有机肥氮替代部分化肥氮在当季是可行的,既节省化肥氮的投入,又能解决一次性施肥的问题,长期施用还能增加土壤有机碳,对维持土壤肥力有好处。但长期施用是否能够维持玉米产量还有待进一步验证。

春玉米干物质积累与氮素吸收累积过程均可用 Logistic 方程进行拟合、描述。本试验条件下,无论是习惯施氮量还是推荐施氮量下,30% 有机肥氮替代化肥氮干物质最大积累速率均高于 100% 氮素基

施处理和基追比 1:3 处理,说明等氮量下有机无机配合有利于春玉米干物质累积速率的提高。氮素最大积累速率有机肥配施处理较等氮条件下氮肥基施及基追比 1:3 处理偏低,主要是因为有机肥替代了部分化肥的氮、磷、钾后,养分的供应较平稳,利于后期养分供应充足。从二者出现的时间上可以看出,春玉米干物质增长快慢与养分吸收并不具有同步性的特点。氮素最大吸收速率出现的时间早于干物质积累最大速率,这与吴迪等[28]的研究结果一致。

高强等[5]研究认为,春玉米一次基施在正常年份及相同养分条件下不会好于分次施肥效果。本试验氮肥基追比 1:3 处理($N_{190(1:3)}$ 和 $N_{152(1:3)}$)在干物质积累、子粒产量以及养分吸收和利用率上与氮素全部基施处理并未表现出明显优势,可能与前期氮肥施用量少,土壤无机氮供应不足有关;也可能与当年的气候因素有关。说明基肥的用量不能太低,除非在高肥力的土壤上可以控制基肥量或不施基肥[29]。在氮、磷、钾施用基础上,适当配施一定量的有机肥是最好的施肥模式,对维持土壤肥力,防止地下水硝态氮污染以及获得高产有着十分重要的意义[30]。本研究仅是一年的结果,有关东北春玉米氮素合理用量的确定及等氮条件下有机无机配施对春玉米产量等经济效益和环境效应的影响还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 中国农业年鉴编委会. 中国农业统计年鉴(2008)[M]. 北京:中国农业出版社,2009.
Chinese Agricultural Almanac Editoral Committee. Chinese agricultural almanac (2008)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2009.

[2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.

[3] 初振东,李少昆,谢瑞芝,等. 东北春玉米区耐老化膜常年覆盖种植模式研究初探[J]. 玉米科学,2007,15(3):110-113.
Chu Z D, Li S K, Xie R Z *et al*. Study of ageing-resistant film mulch for spring maize conservation tillage in northeast of China [J]. J. Maize Sci., 2007, 15(3): 110-113.

[4] 马丽,张民,陈剑秋,等. 包膜控释氮肥对玉米增产效应研究[J]. 磷肥与复肥,2006, 21(4):12-14.
Ma L, Zhang M, Chen J Q *et al*. Effect of coated controlled-release nitrogen fertilizer on yield increase on corn[J]. Phosp. Comp. Fert., 2006, 21(4): 12-14.

[5] 高强,李德忠,汪娟娟,等. 春玉米一次性施肥效果研究[J]. 玉米科学,2007,15(4):125-128.
Gao Q, Li D Z, Wang J J *et al*. Effects of single fertilization for spring maize[J]. J. Maize Sci., 2007, 15(4): 125-128.

[6] 安彬,吴淑梅,孙俊华,等. 玉米应用不同数量有机肥料和化肥配施田间肥效分析[J]. 杂粮作物,2008,28(6):392-393.
An B, Wu S M, Sun J H *et al*. Analysis on the field fertilizer efficiency of combined application of the different numbers organic and chemical fertilizers on maize[J]. Rain Fed Crops, 2008, 28(6): 392-393.

[7] 孟琳,张小莉,蒋小芳,等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):290-296.
Meng L, Zhang X L, Jiang X F *et al*. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yield of rice grains and its proper substitution rate[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(2): 290-296.

[8] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报,2008,45(5):778-783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 778-783.

[9] 高强,刘振刚. 吉林省有机无机肥料的生产和使用[J]. 磷肥与复肥,2008,23(5):58-59.
Gao Q, Liu Z G. Production and application of organic and inorganic fertilizer in Jilin province[J]. Phosp. Comp. Fert., 2008, 45(5): 778-783.

[10] 李少昆,王崇桃. 玉米生产科技农民需求调研报告[R]. 玉米通讯,2005,77.
Li S K, Wang C T. Investigation report of maize productive technology and farmers' demand[J]. Maize Comm., 2005, 77.

[11] 赵兰坡,王鸿斌,刘会青,等. 松辽平原玉米带黑土肥力退化机理研究[J]. 土壤学报,2006,43(1):79-84.
Zhao L P, Wang H B, Liu H Q. Mechanism of fertility degradation of black soil in crop belt of Songliao plain[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(1): 79-84.

[12] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contribution to food production compacts on the environment and best management strategies[J]. Nutr. Cyc. Agroecosyst., 2002, 63: 117-127.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
Bao S D. Analysis of agricultural chemistry in soil[M]. China Agricultural Press, 2000. 54-56, 265-271.

[14] 宋歌,孙波,教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 土壤学报,2007,44(2):288-293.
Song G, Sun B, Jiao J Y. Comparison between ultraviolet spectrophotometry and other methods in determination of soil nitrate-N [J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(2): 288-293.

[15] 何萍,金继运,林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究[J]. 中国农业科学,1998,31(3):1-4.
He P, Jin J Y, Lin B. Effects of N application rates on leaf senescence and its mechanism in spring maize[J]. Sci. Agric. Sin., 1998, 31(3): 1-4.

[16] Hocking P J. Dry-matter production, mineral nutrient concentra-

tions, and nutrient distribution and re-distribution in irrigated spring wheat[J]. J. Plant Nutr., 1994, 17: 1289-1308.

[17] Dobermann A, Dawe D, Roetter R P *et al*. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment [J]. Agron. J., 2000, 92: 633-643.

[18] 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.
Wang Q X, Wang P, Shen L X *et al*. Effect of nitrogen application time on dynamics of nitrate content and apparent nitrogen budget in the soil of summer maize fields[J]. Acta Ecol. Sin., 2004, 24(8): 1582-1588.

[19] 李家康,林葆,梁国庆,等. 对我国化肥施用前景剖析[J]. 磷肥和复肥,2001,16(2): 1-5.
Li J K, Lin B, Liang G Q *et al*. Aanlysis for the future of chemical fertilizer application in China[J]. Phosp. Comp. Fert., 2001, 16(2): 1-5.

[20] 高强,蔡红光,黄立华,汪涓涓. 吉林省干旱地区春玉米连作体系氮素平衡研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(8): 127-132.
Gao Q, Cai H G, Hang L H, Wang J J. Study on soil nitrogen balance of spring maize continuous cropping in semi-arid area of Jilin province[J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci.), 2009, 37(8): 127-132.

[21] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策[A]. 李庆逵,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南京: 江苏科学技术出版社,1998. 38-51.
Zhu Z L. The status, problems and counter measure of nitrogen fertilizer application in China[A]. Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer issues sustainable agriculture development in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998. 38-51.

[22] 宋日,吴春胜,马丽艳,等. 有机无机肥料配合施用对玉米根系的影响[J]. 作物学报,2002,28(3): 393-396.
Song R, Wu C S, Ma L Y *et al*. Effect of application of combined fertilizers on the root system of maize[J]. Acta Agron. Sic., 2002, 28(3): 393-396.

[23] 周桦,马强,姜子绍,宇万太. 有机肥用量对玉米体内养分浓度及分配的影响[J]. 中国生态农业学报,2009,17(4): 647-650.
Zhou H, Ma Q, Jiang Z S, Yu W T. Effect of different manure application rates on nutrition content and distribution in maize [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2009, 17(4): 647-650.

[24] Hati K M, Mandal K G. Misra A K *et al*. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water-use efficiency of soybean in Vertisols of central India[J]. Bio-Resour. Tech., 2006, 97: 2182-2188.

[25] 戴明宏,陶洪斌,王利纳,等. 华北平原春玉米种植体系中土壤无机氮的时空变化及盈亏[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3): 417-423.
Dai M H, Tao H B, Wang L N *et al*. Spatial-temporal dynamics of soil mineral nitrogen and balance analysis during maize season [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(3): 417-423.

[26] 杜红霞,吴普特,冯浩,等. 氮肥用量对夏玉米土壤水氮动态及水肥利用率的影响[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4): 82-87.
Du H X, Wu P T, Feng H *et al*. Influence of nitrogen application on soil moisture-nitrogen dynamics and water-fertilizer use efficiency of Zea mays[J]. Sci. Soil Water Cons., 2009, 7(4): 82-87.

[27] 李东坡,陈利军,武志杰,等. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素[J]. 应用生态学报,2004,15(10): 1891-1896.
Li D P, Chen L J, Wu Z J *et al*. Dynamics of microbial biomass N in different fertilized black soil and its related factors[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(10): 1891-1896.

[28] 吴迪,黄绍文,金继运. 氮肥运筹、配施有机肥和坐水种对春玉米产量与养分吸收转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15 (2): 317-326.
Wu D, Huang S W, Jin J Y. Effects of nitrogen fertilizer management, organic manure application and bed-irrigation sowing on maize yield, and nutrient uptake and translocation[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15 (2): 317-326.

[29] 刘学军,赵紫娟,巨晓棠,张福锁. 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.
Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, Zhang F S. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(7): 1122-1128.

[30] Yang S M, Malhi S S, Song J R *et al*. Crop yield, nitrogen uptake and nitrate-nitrogen accumulation in soil as affected by 23 annual applications of fertilizer and manure in the rainfed region of Northwestern China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2006, 76: 81-94.