

玉米秸秆还田配施氮肥对冬小麦土壤氮素表观盈亏及产量的影响

李 玮, 乔玉强, 陈 欢, 曹承富*, 杜世州, 赵 竹

(安徽省农业科学院作物研究所, 安徽省农作物品质改良重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要: 【目的】以秸秆还田定位试验为平台, 探讨玉米秸秆还田配施氮肥对冬小麦产量、土壤硝态氮积累、氮素表观盈余和氮肥利用率的影响规律, 明确砂姜黑土玉米秸秆全量还田条件下冬小麦生长季的最佳施氮量。【方法】试验以秸秆处理为主区, 设秸秆还田和秸秆移除 2 个水平; 施氮量为副区, 设 6 个水平, 分别为 0、162.0、202.5、243.0、283.5、324.0 kg/hm²。测定了冬小麦播种前、拔节期、成熟期地上部植株含氮量, 土壤 0—20、20—40 和 40—60 cm 硝态氮含量, 小麦产量以及籽粒氮含量, 计算了冬小麦生育期土壤的氮素表观盈余, 小麦基肥和追施氮肥的利用效率以及不同阶段的氮素盈余。【结果】玉米秸秆还田后小麦增产 365 ~ 844 kg/hm², 增产率为 4.2% ~ 9.3%, 尤其以配施 243.0 kg/hm² 的增幅最高, 产量达 9858 kg/hm²。小麦整个生育期, 秸秆还田显著增加了 0—60 cm 土层的土壤硝态氮累积量, 而秸秆移除条件下, 土壤硝态氮累积量与氮肥施用量相关, 高量氮肥增加了硝态氮累积量, N 施用量高于 243.0 kg/hm² 时, 硝态氮累积量较小麦播种前增加 19.8% ~ 28.6%。施氮均显著增加了植株氮素积累量; 小麦播种到拔节期, 植株的氮素积累量随基肥比例的增加而增加。小麦生育期不施氮处理表现为氮素亏缺, 施氮处理显著增加了 0—60 cm 土层的土壤氮素盈余量, 且随基肥、追肥量的增加而增加, 盈余值每增加 100.0 kg/hm², 秸秆还田配施氮肥和单施氮肥的土壤剖面硝态氮累积量就会分别增加 74.2 和 91.4 kg/hm²。秸秆还田配施氮肥提高了氮肥农学效率、植株地上部氮肥吸收利用率、籽粒氮肥吸收利用率, 特别是在高氮肥时, 基肥和拔节肥的利用率显著高于单施氮肥。在施氮处理间、相同氮肥施用下秸秆还田和移除处理间氮素收获指数均无显著差异。氮肥表观回收率随施氮量的增加而降低, 基肥表观回收率显著高于拔节肥表观回收率。【结论】秸秆还田和施氮水平对小麦植株氮素的吸收转运没有显著影响, 但可提高基肥和追施氮肥的利用率, 可增加土壤 0—60 cm 土层中硝态氮的含量。综合各项指标, 冬小麦生长季玉米秸秆全量还田适宜的氮肥配施量为 202.5 ~ 243.0 kg/hm²。

关键词: 秸秆还田; 施氮量; 氮素盈余; 氮肥利用率; 冬小麦

中图分类号: S147.35; S512.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)03-0561-10

Effects of combined maize straw and N application on soil nitrogen surplus amount and yield of winter wheat

LI Wei, QIAO Yu-qiang, CHEN Huan, CAO Cheng-fu*, DU Shi-zhou, ZHAO Zhu

(Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences/Anhui Key Laboratory of Quality Improvement of Crops, Hefei 230031, China)

Abstract: 【Objectives】In this paper, influence of straw incorporation and N application rates on wheat yield, soil NO₃⁻-N accumulation, nitrogen surplus amount and nitrogen use efficiencies was systematically studied to explicit the optimum nitrogen application rate under straw incorporation conditions in lime concretion black soil based on data from a four year experiment in Mengcheng City, Anhui Province. 【Methods】A split field trial with two factors of straw and N fertilizer was carried out. The main plot was straw treatment, designed as straw incorporation and straw cleaning up. Each main treatment was composed of 6 levels of N application amount: 0, 162.0, 202.5,

收稿日期: 2014-01-20

接受日期: 2014-11-21

网络出版日期: 2015-02-04

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD16B06, 2012BAD04B09, 2013BAD07B08); 安徽省农科院院长青年基金(13B0217); 安徽省农科院创新团队项目(11C0202, 13C0212)资助。

作者简介: 李玮(1980—), 女, 甘肃定西人, 博士, 助理研究员, 主要从事农田生态系统养分循环研究。E-mail: jtlw2007@163.com

* 通信作者 E-mail: caocfu@126.com

243.0, 283.5 and 324.0 kg/hm². The soil NO₃⁻-N contents, winter wheat yields and N contents in wheat grains were determined, the apparent surplus of nitrogen in soil during winter wheat growth period, nitrogen fertilizer use efficiency and the relationship between nitrogen surplus and soil nitrate nitrogen accumulation were analyzed, and the appropriate amount of nitrogen fertilizer in winter wheat growth season was explored under the straw returned to soils. **【Results】** Compared to the straw cleaning up, the wheat yields in the four years under the straw incorporation were increased by 365–844 kg/hm², with the increased rates of 4.2%–9.3%, especially for the N application rate of 243.0 kg/hm², its yield was as high as 9858 kg/hm². The N treatments under the straw incorporation could significantly increase soil NO₃⁻-N accumulation at 0–60 cm soil depth in the whole growth period of wheat, while under the no straw incorporation, the NO₃⁻-N accumulation was related to N fertilizer application rates, the soil NO₃⁻-N accumulation was increased by 19.8%–28.6% when the N fertilizer application rates exceed 243.0 kg/hm². The wheat plant N accumulation from sowing to jointing stage was increased by N fertilizations, and the increases were positively dependent on the ratio of basal N fertilization. The nitrogen applications significantly increase nitrogen surplus in the soil profiles of 0–60 cm. The soil NO₃⁻-N accumulations under straw incorporation and cleaning up will increase respectively 74.2 and 91.4 kg/hm² for every 100 kg/hm² of soil N surplus. At the same N fertilizer application levels, there are no obvious differences in the stage N absorption and accumulation of wheat plant, soil NO₃⁻-N accumulation and soil N surplus with straw incorporation or cleaning up. A combination of straw returning and N fertilizer applications increases N agronomic efficiency, plant N recovery efficiency and grain recovery efficiency, especially the basal and jointing fertilizer N use efficiencies at the high N application rates are significantly higher than the single nitrogen treatments, but the results were on the contrary under the single low N application rates. Significant differences in the N harvest indices do not exist among the N treatments and between the straw incorporation and cleaning up at the same N fertilizer application rates, which indicates that effects of the straw returning and N fertilizer application levels on N absorption and transportation of wheat plant are not significantly different. The apparent N recovery is decreased with the increase of the N fertilizer application rate, and is significantly higher in the basal fertilizer than that in the jointing fertilizer. **【Conclusions】** The main effect of combined straw incorporation with N application in increasing yield and N fertilizer efficiencies is due to the high soil NO₃⁻-N accumulations in soil depth of 0–60 cm, which provides a stable application of N nutrition during the whole growth stage of wheat. Comprehensively, the optimum N application rates for winter wheat are from N 202.5 to 243.0 kg/hm² under the total maize straw incorporation

Key words: straw incorporation; nitrogen application rate; nitrogen surplus amount; nitrogen use efficiency; winter wheat

安徽省黄淮海南部砂姜黑土区是全省主要的粮食产区,但该区土壤质地粘重、结构性差、有机质含量低、养分贫乏,严重影响作物的正常生长,导致土壤生产率较低。作物秸秆全量直接还田将成为黄淮海南部地区秸秆处理的主要方式,也是提升农田土壤基础肥力的重要措施。已有研究表明,通过合理利用秸秆生物质资源可以有效增加土壤有机质含量、改善土壤结构、减缓地力衰竭、提高土壤养分含量和增加作物产量^[1-3],增加耕层土壤微生物数量^[4-6]。但是秸秆碳氮比值较高,短期分解过程中与土壤微生物争夺氮素会影响土壤氮素和肥料氮素的作物有效性,并进一步影响作物的前期生长^[7-8],因此研究秸秆还田条件下的氮肥配施量对土壤有效

氮以及作物生长的影响极其重要。目前,众多研究表明,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^[9-11]。国内开展的关于秸秆还田的大量研究,主要集中在作物产量^[12]、土壤肥力^[13]、土壤水分状况^[14-15]和土壤钾素^[16]等方面,关于秸秆还田配施氮肥对土壤氮素平衡以及小麦生长影响的研究则很少见报道,而在砂姜黑土上进行的相关研究则更少。鉴于此,本文利用4年定位试验研究了冬小麦~夏玉米轮作全量玉米秸秆粉碎还田对0–60 cm土层的硝态氮积累、氮素盈余、氮肥利用率及作物产量的影响,以期为本地区秸秆全量还田条件下氮肥的合理施用和粮食增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2008~2012年度在安徽省蒙城县农业示范场进行,试验地为砂姜黑土,0—20 cm 土层养分含量为:土壤有机质 14.24 g/kg,全氮含量 1.0 g/kg,碱解氮 57.8 mg/kg,全磷含量 0.7 g/kg,有效磷 21.6 mg/kg,速效钾 197.5 mg/kg。供试小麦品种为济麦 22,玉米品种为郑单 958。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,设秸秆还田和施氮量两因

素。其中秸秆处理为主区,玉米秸秆粉碎还田(S)和移除(R)两种方式,秸秆还田量 12000 kg/hm²;氮肥施用为副区,设置 6 个处理,施 N 量为 0、162.0、202.5、243.0、283.5、324.0 kg/hm²,分别用 N0、N1、N2、N3、N4、N5 表示,氮肥施用量见表 1 所示。小麦于拔节期追肥,基追比 55:45。P₂O₅、K₂O 年施用量为 180 kg/hm²、180 kg/hm²,除 N0(对照)之外,其余氮肥处理均施用磷钾肥,且施用量一致,均在小麦播种时一次性基施。小麦 10 月中旬播种,小区面积 21.6 m²,随机排列,3 次重复。

表 1 不同处理施氮量(N kg/hm²)
Table 1 N application amounts under different treatments

处理 Treatment	秸秆还田 Straw returning			秸秆移除 Straw removal		
	总施用量 Total amount	基肥 Basal amount	追肥 Topdressing	总施氮量 Total amount	基肥 Basal amount	追肥 Topdressing
N0	0	0	0	0	0	0
N1	162.0	89.1	72.9	162.0	89.1	72.9
N2	202.5	111.4	91.1	202.5	111.4	91.1
N3	243.0	133.7	109.3	243.0	133.7	109.3
N4	283.5	155.9	127.6	283.5	155.9	127.6
N5	324.0	178.2	145.8	324.0	178.2	145.8

1.3 田间取样与测定方法

分别于播种前、拔节期、成熟期以 20 cm 为一层分 3 层取 0—60 cm 土样,每个样品均为多点采集混合而成,然后用“四分法”取出足够样品,保存于 4℃ 冰箱中,4 d 之内测完。土壤硝态氮采用 2 mol/L KCl 浸提,分光光度计双波长(220 nm,275 nm)法测定^[17]。

在采集土壤样品的同时取地上部植物样品 20 株(成熟期取单茎),鲜样在 105℃ 下杀青 30 min 后,70℃ 烘干至恒重称重,计算地上部干物重。样品粉碎后 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮、半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量^[18]。小麦成熟后实收每小区产量。

1.4 计算方法

氮素表观盈亏量(apparent nitrogen surplus amount)=(土壤无机氮起始总量+施氮量+土壤氮素的矿化量)-(土壤无机氮残留量+作物吸氮量+土壤中生物固定的化肥氮)=(土壤无机氮起始总量+施氮量)-(土壤无机氮残留量+作物吸氮量)^[19];

植株氮积累量(nitrogen accumulation amount,

NAA)=植株干物重×植株含氮量;

氮肥农学效率(nitrogen agronomic efficiency, NAE)=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量^[20];

氮收获指数(nitrogen harvest index, NHI)=籽粒氮积累量/植株总氮积累量^[20];

地上部植株氮肥吸收利用率(plant nitrogen recovery efficiency, PRE)=(施氮肥区地上部分氮积累量-不施氮肥区地上部分氮积累量)/施氮量×100%^[20];

籽粒氮肥吸收利用率(grain nitrogen recovery efficiency, GRE)=(施氮肥区籽粒氮积累量-不施氮肥区籽粒氮积累量)/施氮量×100%;

氮肥表观回收率(apparent nitrogen recovery efficiency, NRE)=(施氮肥区植株氮积累量-不施氮肥区植株氮积累量)/施氮量×100%。

1.5 数据分析

试验数据采用 SPSS 16.0 和 Excel 2003 软件进行处理和作图。

2 结果与分析

2.1 长期秸秆还田和施肥对冬小麦籽粒产量的影响

从图 1 可以看出, 秸秆还田和秸秆移除条件下, 不同施氮水平的小麦产量变化规律不完全一致, 但均以不施氮处理(N0)最低。秸秆还田配施 N3 水

平(243.0 kg/hm^2)的产量最高, 为 9858 kg/hm^2 ; 而秸秆移除条件下 N4(283.5 kg/hm^2)的产量最高, 达 9344 kg/hm^2 , 前者高出后者 5.5%。相比秸秆移除, 秸秆还田在 N2 (202.5 kg/hm^2)、N3、N4 和 N5 (324.0 kg/hm^2) 施氮水平下小麦产量显著提高, 分别增产 365、844、409 和 792 kg/hm^2 , 增产率分别为 4.2%、9.3%、4.4% 和 8.9%, N3 处理的增幅最高。

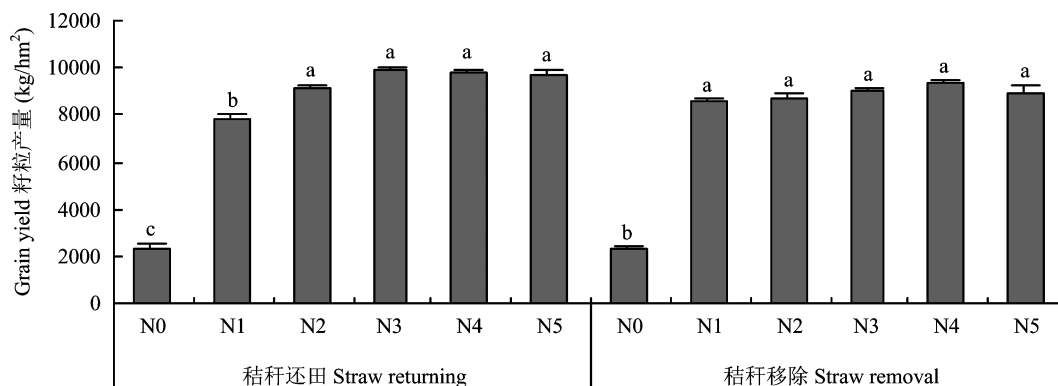


图 1 2011~2012 年不同处理的小麦产量

Fig. 1 Yields of winter wheat in the cropping year 2011–2012 under different treatments

[注 (Note): 同一秸秆处理方式下, 不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平 Different letters indicate significant among different treatments under the same straw treatment method at the 0.05 level.]

2.2 秸秆还田配施氮肥对土壤硝态氮累积的影响

由表 2 可以看出, 随着氮肥用量的增加, 秸秆还田和秸秆移除处理在小麦播种前和收获后土壤剖面硝态氮累积量均呈增加的趋势。不施肥条件下, 0—60 cm 土层的土壤硝态氮小麦收获后较播种前下降, 其中秸秆还田处理下降幅度显著高于秸秆移除处理, 分别为 101.3% 和 48.4%, 主要是由于还田秸秆的腐烂分解消耗了一定量的有效氮; 秸秆还田配施不同氮肥水平, N0、N1 处理小麦收获后土壤剖面硝态氮平均含量显著降低, 而 N2、N3、N4 和 N5 处理显著增加, 处理间差异显著; 秸秆移除单施氮肥, 除 N0 处理之外, N1、N2、N3、N4 和 N5 处理小麦收获后土壤剖面硝态氮平均含量高于播种前。

从表 2 还可以看出, 秸秆还田和氮肥施用对土壤剖面不同层次硝态氮累积量影响不同。秸秆还田播种前, 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 的土壤硝态氮累积量分别为 $26.9 \sim 67.9 \text{ kg/hm}^2$ 、 $22.0 \sim 69.0 \text{ kg/hm}^2$ 和 $2.8 \sim 53.6 \text{ kg/hm}^2$, 收获后为 $12.9 \sim 80.9 \text{ kg/hm}^2$ 、 $10.0 \sim 79.0 \text{ kg/hm}^2$ 和 $2.9 \sim 63.6 \text{ kg/hm}^2$, 显然收获后硝态氮的波动范围增大。与播种前相比, 除 N4、N5 之外, 0—20 cm 和 20—40 cm

土层的硝态氮累积都下降, 40—60 cm 均显著增加。秸秆移除处理, 收获后 N0、N1 和 N2 处理 0—20 cm 土层的硝态氮累积较播种前下降 47.8%、25.7% 和 14.3%, N3、N4 和 N5 处理增加 19.8%、41.6% 和 28.6%, 20—40 cm 和 40—60 cm 的硝态氮累积与 0—20 cm 土层的变化趋势一致。

2.3 秸秆还田与施肥对冬小麦生育阶段氮素表现盈亏量的影响

施入土壤中的氮肥总量减去被作物吸收和残留在土壤中无机氮外的那部分氮素被称为氮素的表现盈亏^[21]。由表 3 可以看出, 播种到成熟阶段, 秸秆还田配施氮肥和单施氮肥处理, 施氮均显著增加了植株氮素积累量、0—60 cm 土层硝态氮残留量及土壤氮素盈余量。

不施氮处理在各生育阶段均出现氮素表现盈亏, 这主要与土壤的供氮量无法满足小麦全生育期的吸氮量有关系。施氮处理在播种到成熟期均出现氮素表现盈余, 且氮素盈余量和土壤硝态氮残留总量随基肥和追肥比例的增加而增加; 播种到拔节期, 植株的氮素积累量随基肥比例的增加而增加, N5 处理显著高于 N1、N2、N3 和 N4 处理, 但拔节到成熟

表 2 不同处理下 0—60 cm 土层不同深度土壤硝态氮的累积 (kg/hm²)

Table 2 NO₃⁻-N accumulation in soil profile at different depths under straw incorporation and nitrogen application rates

秸秆处理 Treatment	取样时期 Sampling stage	土层 (cm) Soil depth	氮肥处理 N fertilizer treatment					
			N0	N1	N2	N3	N4	N5
秸秆还田 Straw returning	播种前 Before planting	0—20	26.9 aD	38.3 aC	41.3 bC	59.9 aB	67.9 aA	57.1 dB
		20—40	22.0 bE	27.5 bD	38.0 cC	48.3 bB	37.4 dC	69.0 bA
		40—60	2.9 dE	12.6 dD	17.5 eC	15.9 dC	28.2 eB	53.6 dA
	收获后 After harvest	0—20	12.0 cF	26.7 bE	56.7 aC	48.3 bD	64.2 bB	80.9 aA
		20—40	10.0 cE	17.5 cD	36.0 cC	38.3 cC	47.4 cB	79.0 aA
		40—60	2.9 dE	27.6 bC	22.5 dD	45.9 bB	48.2 cB	63.6 cA
秸秆移除 Straw removal	播种前 Before planting	0—20	24.49 aD	30.4 aC	33.9 aC	37.5 bC	39.2 dB	42.3 eA
		20—40	16.14 bE	26.0 bD	35.4 aC	32.8 cC	47.1 cB	71.2 cA
		40—60	10.54 cD	12.8 eC	22.1 cC	38.6 bB	24.7 fC	49.4 dA
	收获后 After harvest	0—20	12.79 cF	22.6 cE	29.0 bD	44.9 aC	55.5 aB	84.4 aA
		20—40	10.14 cD	16.0 eC	35.5 aC	37.2 bC	53.1 bB	80.2 bA
		40—60	11.5 cE	19.8 dD	29.1 bC	31.6 cC	34.7 eB	69.4 cA

注 (Note): 同一秸秆处理、同一列数据后不同小写字母表示不同土层间差异达 0.05 显著水平, 同一行数据后不同大写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters in the same column indicate significantly different at the 0.05 probability level, and values followed by different capital letters in the same row are significantly different among different treatments under the same straw treatment method at the 0.05 probability level.

期 N3 处理显著高于其它处理。同一施氮水平下, 秸秆还田配施氮肥与单施氮肥在小麦各生育阶段植株氮素积累量、硝态氮残留总量以及氮素盈亏量无显著差异。

2.4 长期秸秆还田和施肥对冬小麦氮肥利用效率的影响

由表 4 可以看出, 施氮处理的氮素收获指数显著高于不施氮处理, 随施氮量的增加处理间无显著差异; 相同施氮量情况下, 秸秆还田配施氮肥和单施氮肥间亦无显著差异, 表明秸秆还田和不同的施氮水平对小麦植株吸收氮素的转运没有显著影响。氮肥农学效率和籽粒吸收利用率分别反映了氮肥对籽粒产量和籽粒氮积累量的贡献。氮肥农学效率、地上部植株氮肥吸收利用率、籽粒氮肥吸收利用率均随施氮量的增加而显著降低。在相同施氮量条件下, 秸秆还田配施氮肥可提高上述氮肥利用率的指标值。

氮肥总表观回收率和不同生育阶段氮肥表观回收率的表现趋势不同 (表 4)。各氮肥处理间, 播种

到拔节期的基肥表观回收率显著高于拔节到成熟期的拔节肥表观回收率, 且均随基肥和拔节肥的增加而呈下降的趋势; 不同氮肥处理间, N1、N2 和 N3 水平在单施氮肥条件下播种到拔节期、拔节到成熟期的表观回收率显著高于秸秆还田配施氮肥处理, 而 N4 和 N5 水平的变化趋势相反; 总表观回收率也表现为随施氮量的增加而下降。总体看来, 施氮量较高的处理, 秸秆还田配施氮肥对基肥和拔节肥的利用率显著高于单施氮肥; 施氮量较低的处理, 单施氮肥对基肥和拔节肥的利用率较高, 这主要与还田的秸秆腐烂分解需要消耗一定量氮素有关。

2.5 农田氮素盈余与土壤剖面硝态氮积累量的关系

随着农田土壤氮素盈余量的增加, 土壤 0—60 cm 剖面积累的硝态氮量随之增加。由回归方程可知, 土壤氮素盈余值每增加 100.0 kg/hm², 0—60 cm 土壤剖面硝态氮的积累量秸秆还田配施氮肥和单施氮肥分别增加 74.2 和 91.4 kg/hm², 单施氮肥的增加量显著高于秸秆还田配施氮肥 (图 2)。

表 3 秸秆还田和施肥对小麦不同生育阶段 0—60 cm 土层氮素表观盈亏量的影响 (kg/hm²)
Table 3 Effect of the straw incorporation and nitrogen application on nitrogen surplus amount
at 0–60 cm in growth stages of winter wheat

处理 Treatment	生育时期 Growth stage	指标 Index	N0	N1	N2	N3	N4	N5
秸秆 还田 Straw returning	播 种 ~ 拔 节期 Sowing to jointing stage	施氮量 Nitrogen rate	0	89.1	111.4	133.6	155.9	178.2
		起始硝态氮总量 Initial NO ₃ ⁻ -N	30.9	55.3	65.4	68.7	79.1	92.7
		植株氮素积累量 N accumulation	19.0 c	62.0 b	63.6 b	65.0 b	70.5 b	85.6 a
		硝态氮残留总量 Residual NO ₃ ⁻ -N	30.9 d	55.3 c	65.4 bc	75.3 b	77.0 b	103.8 a
		氮素盈亏量 Apparent N surplus	-19.0 e	27.1 d	47.8 c	48.6 c	85.5 a	68.4 b
	拔节~成熟期 Jointing to maturity stage	施氮量 Nitrogen rate	0	72.9	91.1	109.4	127.6	145.8
		植株氮素积累量 N accumulation	38.0 d	88.7 b	87.6 b	104.4 a	92.0 b	77.7 c
		硝态氮残留总量 Residual NO ₃ ⁻ -N	13.9 e	26.7 d	57.7 bc	48.3 c	64.2 b	81.9 a
		氮素盈亏量 Apparent N surplus	-21.0 d	12.8 c	11.2 c	32.0 b	48.3 b	90.0 a
		土壤氮净矿化 Net N mineralization	39.9	39.9	40.0	39.9	39.9	39.9
	播种~成熟期 Sowing to maturity stage	小麦吸氮量 N uptake	57.0 c	150.7 b	151.2 b	169.4 a	162.5 a	163.2 a
		残留硝态氮总量 Residual NO ₃ ⁻ -N	13.9 e	26.7 d	57.7 bc	48.3 c	64.2 b	81.9 a
		氮素盈亏量 Apparent N surplus	-39.9 f	39.9 e	59.0 d	80.7 c	133.8 b	158.3 a
秸秆 移除 Straw removal	播 种 ~ 拔 节期 Sowing to jointing stage	施氮量 Nitrogen rate	0	89.1	111.4	133.6	155.9	178.2
		起始硝态氮总量 Initial NO ₃ ⁻ -N	21.7	56.9	52.4	55.3	67.0	79.5
		植株氮素积累量 N accumulation	19.7 c	70.2 ab	72.0 ab	67.8 ab	65.4 b	76.3 a
		硝态氮残留总量 Residual NO ₃ ⁻ -N	31.7 e	56.9 cd	52.4 d	68.7 bc	79.1 b	101.7 a
		氮素盈亏量 Apparent N surplus	-29.7 e	18.9 d	39.4 c	65.8 b	90.5 a	92.9 a
	拔节~成熟期 Jointing to maturity stage	施氮量 Nitrogen rate	0	72.9	91.1	109.4	127.6	145.8
		植株氮素积累量 N accumulation	24.4 c	95.2 a	92.3 a	104.0 a	93.5 a	80.1 b
		硝态氮残留总量 Residual NO ₃ ⁻ -N	12.8 d	23.6 c	29.0 c	45.9 b	75.5 a	84.4 a
		氮素盈亏量 Apparent N surplus	-5.5 e	11.1 d	22.2 c	28.2 bc	37.7 b	82.9 a
		土壤氮净矿化 Net N mineralization	35.2	35.2	35.2	35.2	35.2	35.2
	播种~成熟期 Sowing to maturity	小麦吸氮量 N uptake	44.1 c	165.4 ab	164.3 ab	171.7 a	158.9 b	156.4 b
		残留硝态氮总量 Residual NO ₃ ⁻ -N	12.8 d	23.6 c	29.0 c	45.9 b	75.5 a	84.4 a

注 (Note): 同一行数据后不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters in a row indicate significantly different at the 0.05 probability level.

3 讨论与结论

关于秸秆还田对小麦产量的影响,国内外做了大量研究。认为作物秸秆中含有相当数量的植物营养元素,降解后可补充土壤养分。秸秆还田可提高土壤有机碳的积累,改善土壤结构,保水保肥能力提高而增产^[22]。单鹤翔等^[23]研究发现,玉米秸秆还

田对冬小麦籽粒产量的影响不显著,在一定量的氮肥施用条件下,土壤供氮水平是主要的影响因素。本研究表明,相比单施氮肥,玉米秸秆还田配施氮肥提高了小麦籽粒产量,提高幅度达 4.2%~9.4%,且随施氮量的增加而增加;当施氮量增加至 N 243.0 kg/hm² 时获得最高产量,为 9858 kg/hm²,施氮量超过 N 243.0 kg/hm² 有降低产量的趋势;单施

表 4 秸秆还田和施肥量对小麦氮素利用率的影响

Table 4 Effects of the straw treatments and N fertilizer rate on the nitrogen use efficiencies

处理 Treatment		氮肥农学 效率	收获指数 N harvest	地上部植株氮 肥吸收利用率	籽粒氮肥吸 收利用率	氮肥表观回收率 NRE(%)		
		NAE	index	PRE	GRE	播种~拔节期	拔节~成熟期	播种~成熟
		(kg/kg)	(%)	(%)	(%)	Sowing to jointing	Jointing to maturity	Sowing to maturity
秸秆 还田 Straw returning	N0		55.5 b					
	N1	34.3 a	69.8 a	68.3 a	50.9 a	47.5 a	24.3a	68.3 a
	N2	33.6 a	68.8 a	57.5 b	41.8 b	39.4 b	17.4 b	57.5 b
	N3	31.1 b	68.5 a	53.6 b	38.6 b	33.9c	22.9 a	53.6 b
	N4	26.3 c	68.5 a	42.6c	30.7 c	32.6 c	19.4 b	42.6 c
	N5	22.9 d	68.8 a	37.1 c	26.9 c	37.0 b	17.4 b	37.1 d
秸秆 移除 Straw removal	N0		50.7 b					
	N1	38.6 a	70.5 a	65.8 a	49.8 a	56.7 a	46.8 a	65.8 a
	N2	31.8 b	69.7 a	55.8 b	41.5 b	47.0 b	32.6 b	55.8 b
	N3	27.6 c	70.6 a	46.9 c	35.4 c	36.0 c	32.0 b	46.9 c
	N4	24.9 c	69.7 a	41.8 d	30.9 d	29.3 d	16.2 c	41.8 c
	N5	20.4d	69.9 a	34.1 e	25.5 e	31.8 d	16.0 c	34.1 d

注(Note): 同一列数据后不同小写字母表示同一秸秆处理不同氮肥水平间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters in the same column are significantly different amount different treatments for the same straw treatment at the 0.05 probability level.

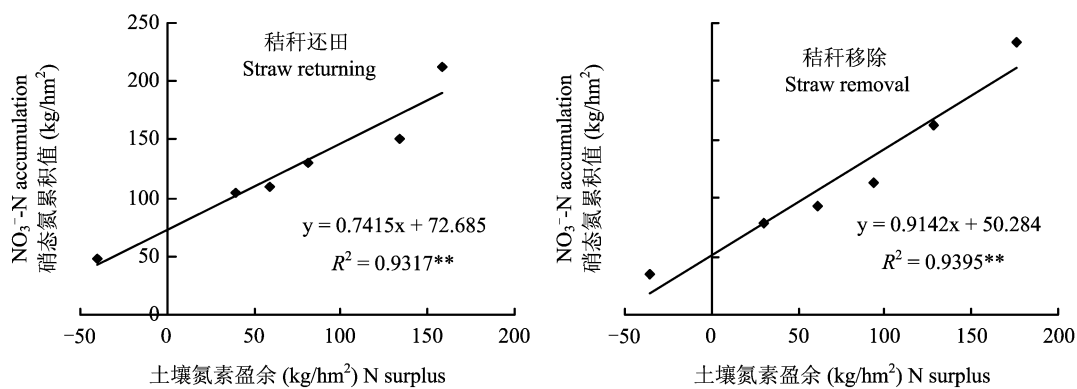


图 2 2012 年小麦收获后土壤 0—60 cm 剖面硝态氮积累与氮素盈余的关系

Fig. 2 Relationship between $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation in 0—60 cm soil profiles and N surplus in 2012

氮肥不同水平之间小麦产量无显著差异;秸秆还田配施氮肥,配施氮量为 N 202.5 ~ 324.0 kg/hm^2 时小麦产量均显著高于单施氮肥处理,与张静等的研究结论一致^[24]。

关于对施氮水平下的土壤氮素表观盈亏、氮素平衡值等研究较多,但有关秸秆还田配施氮肥水平对土壤氮素平衡等方面的研究颇少。硝态氮是氮素在土壤中存在和植株极易吸收利用的主要氮素形

态^[25]。施氮显著增加了土壤无机氮残留量,且以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留为主^[26],在低施氮量时,残留氮以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 形式存在很少;在高施氮条件下,以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 形式存在的比例很高^[10]。杨宪龙等^[27]研究表明,随施氮量增加,残留氮和表观损失均显著增加;秸秆还田措施下,氮素表观损失和损失率降低了 22.9%,但对残留氮和表观残留率的影响不显著。本研究条件下,玉米秸秆还田提高了土壤 0—60 cm

土层的硝态氮积累;小麦收获后,秸秆还田配施氮低于 $N\ 202.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时 $0\text{--}60\ \text{cm}$ 土层的土壤硝态氮累积量较播种前下降,不同土层的硝态氮累积量随施氮量的增加而增加,但表层硝态氮有向土壤下层移动的趋势。周顺利等^[28-29]的研究也表明,氮肥施用量越高,土壤硝态氮累积量越高,硝酸盐向深层淋洗也越严重。由此可见,高氮水平条件下容易残留较多的氮肥,容易在集中降水或者大量灌溉条件下随水淋洗进入深层,造成浅层地下水的污染。

本研究在分析农田氮素盈亏时,没有考虑秸秆还田对土壤矿化的激发效应,仅考虑了氮的表观输入和输出。结果发现,不施氮处理在小麦生长季表现为氮素亏缺,施氮显著增加了 $0\text{--}60\ \text{cm}$ 土层的土壤氮素盈余量,且盈余量随施氮量的增加而增加;无论秸秆还田与否,土壤氮素盈余与其相应的 $0\text{--}60\ \text{cm}$ 土层土壤硝态氮积累呈极显著正相关关系,其他学者也有类似的研究结果^[30-31]。巨晓棠等^[32]对华北平原北部冬小麦/夏玉米轮作体系的研究表明,氮肥施用量超过作物的需要量时,氮素盈余急剧增加。倪玉雪等^[33]研究得出,秸秆 50% 还田和 100% 还田情况下,土壤氮素盈亏量与施氮量之间均呈线性极显著正相关,且土壤氮库达到平衡时的施 N 量分别是 $192.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $166.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。本研究条件下,玉米秸秆还田 4 年,小麦季施 $N\ 162.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时土壤 $0\text{--}60\ \text{cm}$ 的氮素盈余 $39.9\ \text{kg}/\text{hm}^2$,但较该施氮水平秸秆移除处理降低了小麦产量。所以在农业生产实践中,砂姜黑土玉米秸秆全量还田条件下,配施氮肥要略高于 $N162.0\ \text{kg}/\text{hm}^2$,才能保证小麦产量不受秸秆还田的影响。

本研究结果发现,秸秆还田配施氮肥可提高氮肥农学效率、地上部植株氮肥吸收利用率、籽粒氮肥吸收利用率;秸秆还田配施高量氮肥对基肥和拔节肥的利用率显著高于单施氮肥,单施低量氮肥对基肥和拔节肥的利用率较高,与徐国伟等^[34]在水稻田中的研究结论一致,但有研究认为,玉米秸秆还田施氮肥显著降低了冬小麦地上部氮素积累量,使得冬小麦氮肥回收率下降 $9.6\%\sim 15.7\%$ ^[23],与该研究结论相反,其原因有待于做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 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 Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618-623.

- [2] 刘义国,林琪,王月福,等. 秸秆还田与氮肥耦合对冬小麦光合特性及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 42-44.
- Liu Y G, Lin Q, Wang Y F *et al.* Effects of coupling of straw-return and nitrogen fertilizer on photosynthetics and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 42-44.
- [3] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R *et al.* Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices [J]. *American Society of Agronomy*, 2000, 92(6): 1096-1103.
- [4] Mary B, Recous S, Darwis D *et al.* Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil [J]. *Plant and Soil*, 1996, 181(1): 71-82.
- [5] Recous S, Aita C, Mary B. *In situ* changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 31(1): 119-133.
- [6] 李贵朝,赵紫娟,黄元仿,李保国. 秸秆还田对土壤氮素转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 162-167.
- Li G T, Zhao Z J, Huang Y F, Li B G. Effect of straw returning on soil nitrogen transformation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 162-167.
- [7] 王旭东,陈鲜妮,王彩霞,等. 农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 252-257.
- Wang X D, Chen X N, Wang C X *et al.* Decomposition of corn stalk in cropland with different fertility [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10): 252-257.
- [8] Ichir L L, Ismaili M, Hofman G. Recovery of 15N labeled wheat residue and residual effects of N fertilization in a wheat-wheat cropping system under Mediterranean conditions [J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2003, 66(2): 201-207.
- [9] 林治安,赵秉强,袁亮, Hwat B S. 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, Hwat B S. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2809-2819.
- [10] 巨晓棠,潘家荣,刘学军,张福锁. 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, Zhang F S. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 264-270.
- [11] 赵鹏,陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1014-1018.
- Zhao P, Chen F. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1014-1018.
- [12] 乔玉强,曹承富,赵竹,等. 秸秆还田与施氮量对小麦产量和品质及赤霉病发生的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33

- (4): 727-731.
- Qiao Y Q, Cao C F, Zhao Z *et al.* Effects of straw-returning and N - fertilizer application on yield, quality and occurrence of fusarium head blight of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(4): 727-731.
- [13] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 307-314.
- Zhang Y L, Lü J L, Jin J Y *et al.* Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 307-314.
- [14] 王兆伟, 郝卫平, 龚道枝, 等. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(2): 244 - 250.
- Wang Z W, Hao W P, Gong D Z *et al.* Effect of straw mulch amount on dynamic change of soil moisture and temperature in farmland [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(2): 244-250.
- [15] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同麦秸覆盖量对夏玉米田棵间土壤蒸发和地温的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 95-100.
- Zhang J P, Sun J S, Liu Z G *et al.* Effects of different straw mulching quantity on soil evaporation and soil temperature in summer corn field [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 95-100.
- [16] 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 potash and wheat straw on crop yield and soil potassium under different planting systems [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133-139.
- [17] Norman R J, Edberg J C, Stucki J W. Determination of nitrate in soil extracts by dual-wavelength ultraviolet spectrophotometry [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(5): 1182-1185.
- [18] 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.
- Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [19] 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 spring maize season [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 417-423.
- [20] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1456-1461.
- Liu L J, Sang D Z, Liu C L *et al.* Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1456-1461.
- [21] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮累积量和氮平衡的影响[J]. *生态学报*, 2013, 26(11): 3661-3669.
- Shi Y, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate and ration of base and topdressing on yield of wheat, content of soil nitrate and nitrogen balance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 26(11): 3661-3669.
- [22] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 373-378.
- Tian S Z, Ning T Y, Wang Y *et al.* Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 373-378.
- [23] 单鹤翔, 卢昌艾, 张金涛, 等. 不同肥力土壤下施氮与玉米秸秆还田对冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 18(1): 35-41.
- Shan H X, Lu C A, Zhang J T *et al.* Effect of maize straw applied with N fertilizer on nitrogen absorption of winter wheat under different soil fertility [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 18(1): 35-41.
- [24] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 612-619.
- Zhang J, Wen X X, Liao Y C *et al.* Effect of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 612-619.
- [25] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2-3): 117-127.
- [26] 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*, 2011, 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 on Northeast China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 18(1): 89-97.
- [27] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 19(1): 68-77.
- Yang X L, Lu Y L, Tong Y A *et al.* Effect of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 19(1): 68-77.
- [28] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 I. 冬小麦[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1782-1789.

- Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatial-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (11): 1782-1789.
- [29] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏 II. 夏玉米 [J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 48-53.
- Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatial-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen II. Summer maize [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 48-53.
- [30] 党廷辉, 戚龙海, 郭胜利, 郝明德. 旱地土壤硝态氮与氮素平衡, 氮肥利用的关系 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3): 573-577.
- Dang T H, Qi L H, Guo S L, Hao M D. Relationship between soil nitrate, nitrogen balance and utilization in rainfed land [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 573-577.
- [31] 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 Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1335-1341.
- [32] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁, 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [33] 倪玉雪, 尹兴, 刘新宇, 等. 华北平原冬小麦季化肥氮去向及土壤氮库盈亏量化探索 [J]. *生态环境学报*, 2013, 29(3), 392-397.
- Ni Y X, Yin X, Liu X Y *et al.* Fate of nitrogen fertilizer and quantitative soil nitrogen pool budget in growing season of winter wheat in north China plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 29(3), 392-397.
- [34] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻产量, 品质及氮肥利用的影响 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2736-2746.
- Xu G W, Tan G L, Wang Z Q *et al.* Effects of wheat straw application and site-specific nitrogen management on grain yield, quality and nitrogen use efficiency in direct-seeding rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2736-2746.