

王博博, 徐新朋, 侯云鹏, 等. 东北中部黑土连续秸秆还田下玉米适宜氮肥用量研究[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(2): 71-79.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.009

# 东北中部黑土连续秸秆还田下玉米适宜氮肥用量研究

王博博<sup>1</sup>, 徐新朋<sup>2</sup>, 侯云鹏<sup>3</sup>, 胡诚<sup>4</sup>, 何萍<sup>2</sup>, 伍玉鹏<sup>1</sup>

1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;  
3. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 4. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064

**摘要** 为确定东北地区中部黑土秸秆还田条件下玉米适宜氮肥用量, 于2017—2020年在吉林省公主岭市连续4 a设置定位试验, 分析秸秆还田下不同氮肥用量(0、70、140、210、280和350 kg/hm<sup>2</sup>)对玉米产量、氮肥利用效率和土壤氮素平衡的影响, 探讨秸秆还田下氮肥用量与玉米产量及氮素盈余率之间的关系。结果显示, 秸秆还田下玉米产量随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势, 但获得最高产量的施氮量随着试验的开展呈降低趋势, 降幅达到了15.8%。玉米累积氮素农学效率、回收率和偏生产力均随着氮肥用量的增加而降低。土壤氮素平衡结果显示, 当施氮量超过210 kg/hm<sup>2</sup>时, 显著增加了土壤矿质氮素累积量, 与播前土壤相比, 在高施氮量下(280和350 kg/hm<sup>2</sup>), 其矿质氮素累积量分别增加了13.0%和33.6%, 与此同时, 其氮素累积表观损失达到了578和833 kg/hm<sup>2</sup>。氮素表观盈余率与氮肥用量、籽粒产量、累积氮素回收率和氮素损失量相关性分析结果显示, 当盈余率为0时, 氮肥用量为188.9 kg/hm<sup>2</sup>, 产量为11 850 kg/hm<sup>2</sup>, 氮素回收率为40.1%, 氮素损失量为65.7 kg/hm<sup>2</sup>。结果表明: 秸秆还田下配施适宜氮肥可显著提高玉米产量以及氮素利用率, 并能降低土壤氮素表观损失。综合考虑作物产量、理论盈余率及土壤氮素表观平衡等因素, 所研究区域长期秸秆还田下适宜氮肥用量为179.5~198.4 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词** 秸秆还田; 氮肥用量; 氮肥利用率; 氮素损失; 养分平衡; 玉米; 秸秆资源利用

**中图分类号** S147.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0071-09

东北平原是我国重要的玉米产区, 玉米种植面积和产量分别占全国的30.9%和34.0%, 其中仅吉林省玉米产量就达到了3 045.3万t, 占全国的11.7%<sup>[1]</sup>。施用氮肥作为提高作物产量的重要措施之一, 在农业生产中发挥了重要作用<sup>[2]</sup>。然而随着我国农田氮肥施用量的不断增加, 导致玉米当季作物回收率不足30%, 施入土壤中的氮素通过氨挥发、反硝化、淋溶和径流等途径损失进入环境, 与此同时, 在我国东北地区多年的秸秆焚烧或离田, 都是造成资源浪费和环境污染问题的主要原因<sup>[3-4]</sup>。秸秆还田作为一种有效利用生物质资源的方式, 不仅能够减少秸秆焚烧造成的环境污染, 与化肥配施还能显著提高土壤微生物的活性从而改善土壤生态环境<sup>[5]</sup>。但秸秆氮素的释放需要一定时间腐解才能供给作物吸收利用<sup>[6]</sup>, 盲目降低氮肥用量会影响作物正常生长

发育。因此, 探究秸秆还田条件下农田适宜施氮量, 对指导农田养分优化管理具有重要意义。

当前中国人口与耕地矛盾日益突出, 为维持国内粮食供需平衡, 其中化肥施用量的投入是必不可少的措施<sup>[7]</sup>, 而氮素由于其易损失性备受农业科研人员的关注, 关于农田适宜氮肥用量的研究已有较多报道。作物产量与施氮量符合报酬递减规律, 施氮量的增减必须以增加作物产量和提高养分利用率为目标<sup>[8]</sup>。秸秆还田能够提高土壤有机质积累, 促进作物对氮素的吸收, 提高氮素有效性, 增加土壤肥力, 改善土壤结构, 进而有利于土壤资源的可持续利用<sup>[9-10]</sup>。秸秆还田下配施适量氮肥可延缓玉米叶片衰老, 延长叶片功能期, 提高玉米产量<sup>[11]</sup>, 并且能够减少土壤水分蒸发, 提高水分利用效率<sup>[12-13]</sup>。但在秸秆还田下施氮量过高会造成作物秸秆碳氮比的降

收稿日期: 2021-11-22

基金项目: 吉林省农业科技创新工程自由创新项目(CXGC2021ZY004); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200101)

王博博, E-mail: wangbobo991127@163.com

通信作者: 徐新朋, E-mail: xuxinpeng@caas.cn; 伍玉鹏, E-mail: wuyupeng19851205@126.com

低,影响还田后土壤有机质的增加<sup>[14]</sup>。关于当季秸秆还田对作物产量和土壤养分状况的影响的研究已有较多报道,而较少研究长期连续秸秆还田下作物对养分需求变化,尤其是缺乏结合东北中部地区土壤类型和种植制度开展的多年连续秸秆还田下的适宜氮肥用量研究。因此,本研究于2017–2020年在吉林省公主岭市开展秸秆还田定位试验,结合不同氮肥施用水平,确定连续秸秆还田下协调玉米产量、利用率和氮素损失的施氮量,为该地区秸秆资源合理利用和优化施肥管理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验起始于2017年,连续4 a在公主岭市朝阳坡进行。试验区地处公主岭市北部,四季分明,年均气温5.6℃,年均降水量594.8 mm,且多集中在6–8月,属温带季风气候,主要实行的种植制度为一年一熟的春玉米连作制度。土壤类型为黑土,试验开始前该地区秸秆未进行还田,其0~20 cm耕层土壤基础性质为:全氮1.07 g/kg,全磷0.40 g/kg,全钾18.60 g/kg,有效磷34.1 mg/kg,速效钾143.7 mg/kg,硝态氮16.7 mg/kg,铵态氮2.1 mg/kg,有机质23.4 g/kg,pH 5.86。0~100 cm土壤各层次(以20 cm计)土壤容重分别为:1.251、1.387、1.369、1.330和1.350 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验在秸秆还田条件下,共设置6个施氮梯度:0、70、140、210、280和350 kg/hm<sup>2</sup>,分别记作N0、N70、N140、N210、N280和N350。小区面积60 m<sup>2</sup>,3次重复,各处理施磷量和施钾量一致,分别为90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup>和120 kg K<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>。氮肥使用尿素(含N 46%),磷肥使用过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 18%),钾肥使用氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)。各施肥处理40%氮肥于播前一次性基施,60%于拔节期追施,所有磷肥和钾肥均作为基肥一次性施入。该地区玉米生产中,农民习惯措施为秸秆通常不还田,玉米产量在9~11 t/hm<sup>2</sup>,其施氮量在250~350 kg/hm<sup>2</sup>。根据往年秸秆生产水平,各处理每年秸秆还田量均为10 000 kg/hm<sup>2</sup>,还田前将秸秆粉碎成约10 cm长,于每年11月进行深翻还田,深度为20~40 cm,秸秆氮、磷和钾养分含量分别为7.0、0.5和12.1 g/kg,玉米播种密度

6万株/hm<sup>2</sup>。除草、打药等措施与当地玉米常规生产保持一致。

### 1.3 样品采集与分析

采集试验起始及每年当季玉米收获后0~100 cm土壤样品,分0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5个层次,土样采回后将新鲜土过孔径2 mm筛,采用1 mol/L KCl溶液(土液质量比1:5)浸提,利用流动分析仪(multit N/C 3100)测定土壤矿质氮含量。同时土壤于105℃烘干24 h,测定土壤含水量。

于玉米成熟期,每个小区选取10 m<sup>2</sup>进行收获,测定籽粒产量,并折算成14%的标准含水量。在各小区随机选取长势均匀的5个植株,于105℃烘箱杀青30 min,70℃烘干至恒质量,称质量后计算籽粒和秸秆生物量。将样品粉碎并混匀,采用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消煮,用凯氏定氮法测定秸秆和籽粒的氮含量。

### 1.4 指标计算

所有处理均在秸秆还田条件下且其秸秆用量相同,因此,在计算氮肥利用率中未将秸秆还田带入的氮量计算在内,仅考虑了施肥带入的氮量。由于试验为定位试验,采用累积肥料氮素利用率表征肥料氮素利用情况,并分析氮素表观损失,其所用计算公式<sup>[9,15-16]</sup>如下:

$$\text{累积肥料氮素农学效率(kg/kg)} = (\text{施氮区累积产量} - \text{不施氮区累积产量}) / \text{累积施氮量} \quad (1)$$

$$\text{累积肥料氮素回收率} = (\text{施氮区植株地上部氮素累积量} - \text{不施氮区植株地上部氮素累积量}) / \text{累积施氮量} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{累积肥料氮素偏生产力(kg/kg)} = \text{施氮区累积产量} / \text{累积施氮量} \quad (3)$$

$$\text{氮素表观盈余率} = (\text{累积施氮量} - \text{植株地上部累积吸氮量}) / \text{植株地上部累积吸氮量} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{土壤残留矿质氮量(以20 cm分层计算)(kg/hm}^2\text{)} = \text{土壤容重} \times 20 \times \text{矿质氮浓度} / 10 \quad (5)$$

$$\text{累积氮素表观矿化量(kg/hm}^2\text{)} = \text{不施氮区植株地上部累积吸氮量} + \text{不施氮区土壤矿质氮素残留量} - \text{不施氮区土壤起始矿质氮量} \quad (6)$$

$$\text{累积氮素表观损失量(kg/hm}^2\text{)} = \text{累积施氮量} + \text{土壤起始矿质氮量} + \text{土壤氮素表观矿化量} - \text{植株地上部累积吸氮量} - \text{收获期土壤矿质氮素累积量} \quad (7)$$

### 1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2010处理,SPSS 23.0进行统计分析,绘图采用SigmaPlot14.0软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田下施氮量对玉米产量的影响

秸秆还田下,施氮显著增加了玉米产量(表1)。随着氮肥用量的增加,各年份玉米产量对施氮的响应规律一致,均呈先增加后趋于平稳的趋势,各施氮处理较对照处理平均增产幅度为28.5%~73.2%。连续4 a玉米产量均以N210处理为最高,平均产量为12 331 kg/hm<sup>2</sup>。当施氮量超过210 kg/hm<sup>2</sup>

时,其产量不再增加,而施氮量过高或过低在一定程度上均面临减产的风险,其中N210处理的平均产量分别比N280和N350处理高119 kg/hm<sup>2</sup>和213 kg/hm<sup>2</sup>,说明在秸秆还田条件下施氮量超过一定范围并不能显著增加春玉米产量。而在本试验地区的农民习惯措施中秸秆通常不还田,施氮量通常在250~350 kg/hm<sup>2</sup>[17],其产量为9~11 t/hm<sup>2</sup>[18],说明在该地区秸秆还田配施合理的氮肥在保证产量的前提下,可以显著降低氮肥用量。

表1 秸秆还田下不同施氮量处理的玉米产量

Table 1 Yield of maize with different N fertilizer rate under straw returning

处理 Treatments	产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield					增产率/% Increasing rate
	2017	2018	2019	2020	平均 Average	
N0	8 504d	8 364d	6 934d	4 682d	7 121d	-
N70	9 686c	9 795c	8 906c	8 208c	9 149c	28.5
N140	11 729b	10 780b	10 868b	10 338b	10 929b	53.5
N210	13 262a	11 940a	12 180a	11 942a	12 331a	73.2
N280	13 028a	11 817a	12 139a	11 867a	12 212a	71.5
N350	12 872a	11 790a	12 091a	11 718a	12 118a	70.2

注:同列数值后不同小写字母表示各处理间差异显著( $P < 0.05$ ),增产率为各施氮处理较对照处理的平均增加比例。Note: Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ). The increasing rate is the mean yield increase rate compared with the N0 treatment across all four years in straw-retained.

随着秸秆还田年限的不断增加,秸秆中的氮素不断释放并供给作物吸收利用,其得到最高产量的优化施肥量呈降低趋势(图1)。利用线性加平台模型拟合玉米产量与氮肥用量的关系,得到最高玉米产量的施氮量从2017年的203.8 kg/hm<sup>2</sup>下降到2020

年的171.5 kg/hm<sup>2</sup>,降低幅度达到15.8%,表明秸秆还田下适宜的氮肥用量不仅具有显著的增产效果,同时长期的秸秆还田可进一步降低氮肥用量,但秸秆氮素的释放需要一定时间腐解才能供给作物吸收利用,短期内不宜盲目降低氮肥用量。

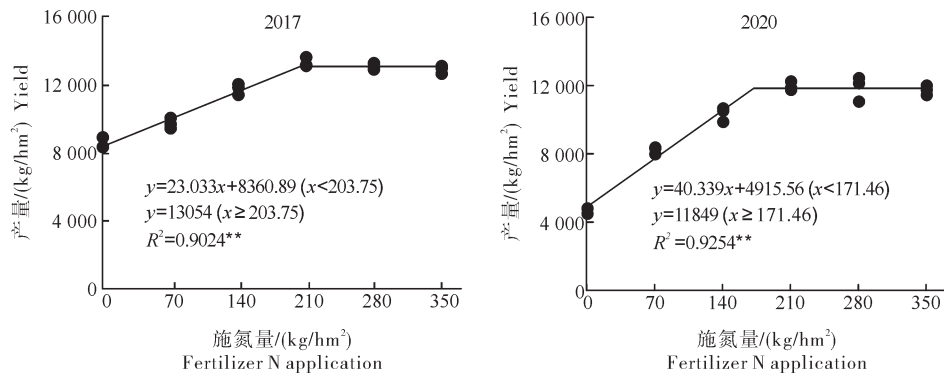


图1 秸秆还田下施氮量与玉米产量关系

Fig.1 The relationship between spring maize yield and N application rate under straw returning

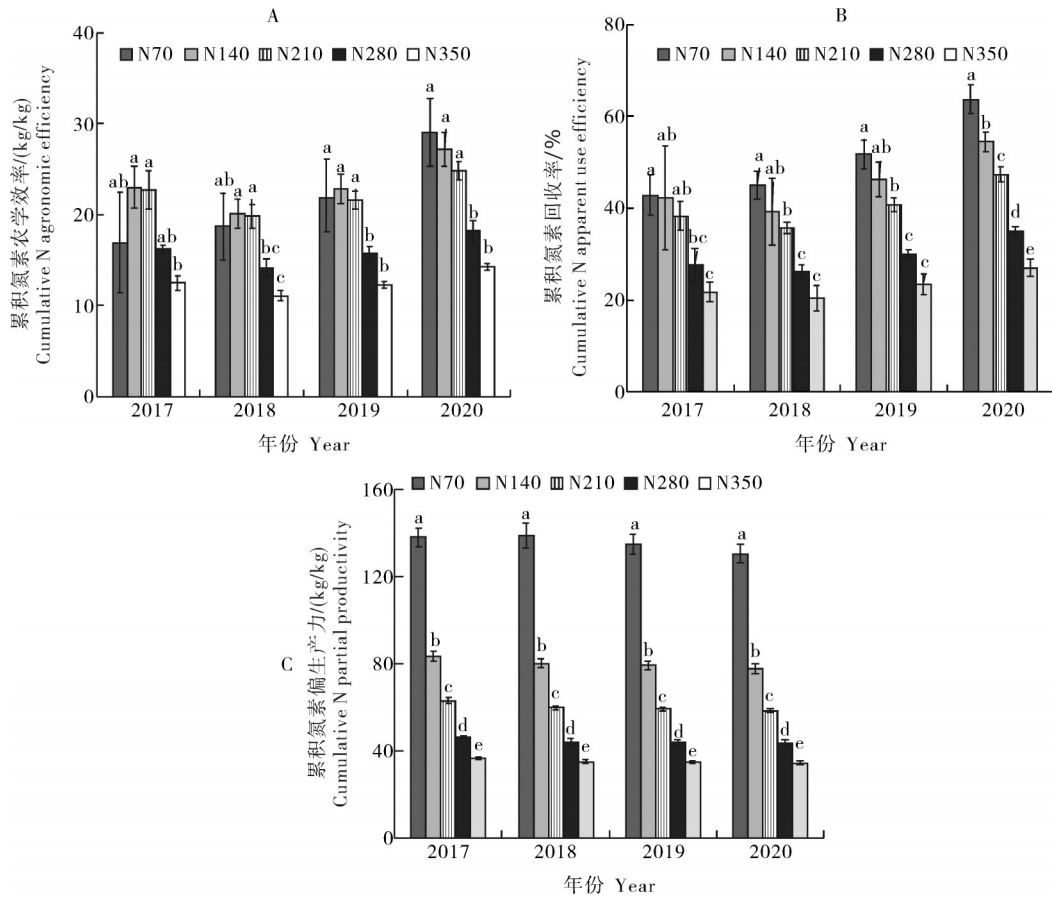
### 2.2 秸秆还田下不同施氮量对玉米氮素利用率的影响

秸秆还田下,施氮水平对春玉米的累积氮素农学效率、累积氮素回收率和累积氮素偏生产力的影响均达到了显著水平( $P < 0.05$ ),随着秸秆还田年限的增加,这些指标均随着施氮量的增加呈降低趋势(图2)。研究表明,不同氮肥用量的累积氮素

农学效率变化幅度在11.1~29.0 kg/kg,当施氮量超过210 kg/hm<sup>2</sup>时,累积氮素农学效率显著降低,降低幅度为5.6~10.5 kg/kg,然而随着秸秆还田年限的不断增加,低施氮量下(70 kg/hm<sup>2</sup>)的农学效率逐渐增加(图2A)。截至2020年收获期,其累积氮素农学效率随着施氮量的增加呈降低趋势。不同年份的累积氮素偏生产力和累积氮素回收率均与

施氮量呈负相关,截至2020年收获期,当施氮量从70 kg/hm<sup>2</sup>增加到350 kg/hm<sup>2</sup>时,其累积氮素回收率和累积氮素偏生产力分别

从63.7%和130.7 kg/kg下降到27.0%和34.6 kg/kg,其中在210 kg/hm<sup>2</sup>时,分别为47.3%和58.7 kg/kg(图2B,C),表明过量施氮难以获得较高的氮肥利用效率,因此,选择合适的施氮量对维持较高产量和增加氮素利用效率至关重要。



不同小写字母表示同一年份各处理间差异达显著水平( $\alpha=0.05$ )。下同。Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the same year at  $\alpha=0.05$  level. The same as below.

图2 秸秆还田下不同施氮量的累积氮素农学效率(A)、回收率(B)和偏生产力(C)

Fig.2 Cumulative N agronomic efficiency(A), use efficiency(B) and partial productivity(C) with different N fertilizer rate under straw returning

### 2.3 秸秆还田下不同施氮量对氮素平衡的影响

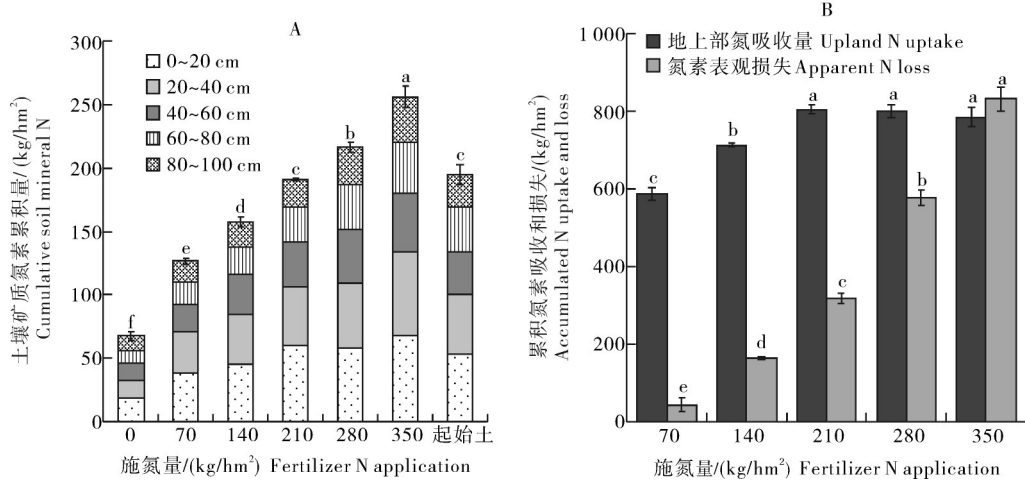
为评估秸秆还田下玉米对氮肥的利用状况,计算了0~100 cm土层的氮素表观平衡。氮素输入项包括累积氮肥投入、播种前土壤起始矿质氮(195 kg/hm<sup>2</sup>)和累积氮矿化量(280 kg/hm<sup>2</sup>),氮肥输出项包括玉米氮素吸收、收获后土壤矿质氮素累积量以及土壤氮素累积表观损失。秸秆氮含量随着施氮量增加呈增加趋势,而籽粒氮含量则随着施氮量增加呈先增加后降低趋势,N0、N70、N140、N210、N280和N350处理4 a平均秸秆氮含量分别为5.5、6.5、6.7、6.7、6.7和6.8 g/kg,籽粒氮含量分别为10.6、12.2、12.6、12.9、12.8和12.3 g/kg。秸秆还田下不同土层土壤矿质氮素累积量研究结果(图3A)显示,随

着施氮量增加,收获期土壤矿质氮素累积量呈增加趋势,截至2020年收获期,N70、N140、N210、N280和N350处理的0~100 cm土壤矿质氮素累积量分别达到126.5、157.2、191.1、216.6和256.2 kg/hm<sup>2</sup>。与播前土壤相比,在高施氮量下(280和350 kg/hm<sup>2</sup>),其土壤矿质氮素累积量分别增加了13.0%和33.6%。与此同时,高施肥量不仅增加了表层土壤的矿质氮素含量,同时增加了氮素向深层土壤淋洗,其中80~100 cm土壤较播前增加了18.4%和42.2%,增加了氮素淋洗风险。

优化施肥通过降低氮肥用量和增加氮素吸收来降低氮素表观损失(图3B),但过量施氮不仅未显著增加春玉米产量,且与210 kg/hm<sup>2</sup>施氮量相比,

N280和N350处理的氮素吸收无显著差异。随着施氮量的增加,显著增加了氮素表观损失,在连续秸秆还田下,N70、N140、N210、N280和N350处理的4 a

累积氮素表观损失分别达到42、165、318、578和833 kg/hm<sup>2</sup>,表明过量投入氮肥非但不能促进作物对氮素的吸收,还导致氮素损失量急剧增加。



图A中起始土为试验开始前采取的土壤。The initial soil in Fig. A indicated the soil taken before the start of the trial.

图3 秸秆还田下不同施氮量处理的土壤矿质氮素累积量(A)和累积氮素吸收和损失(B)

Fig.3 Cumulative soil mineral N(A), accumulated N uptake and loss(B) in soil with different N fertilizer rate under straw returning

## 2.4 秸秆还田下氮肥适宜用量的确定

确定作物适宜氮肥用量需协调产量、经济和环境等方面,秸秆还田下氮素盈余率与施氮量、产量、氮素回收率和氮损失量具有显著的相关性(图4)。氮素盈余率和施氮量呈显著线性正相关关系( $R^2=0.9798$ ),与玉米产量呈显著二次曲线关系( $R^2=0.7051$ ),与氮素回收率呈显著线性负相关关系( $R^2=0.7080$ ),与氮素损失量呈显著正指数关系( $R^2=0.6688$ )。当氮肥投入量和作物吸收氮量持平,即盈余率为零时,施氮量为188.9 kg/hm<sup>2</sup>,此时的春玉米产量为11 850 kg/hm<sup>2</sup>,氮素回收率为40.1%,氮素表观损失量为65.7 kg/hm<sup>2</sup>。以理论盈余率为0时施氮量的95%作为置信区间,综合考虑玉米植株氮素吸收量、产量和氮素盈余率3个方面,计算出该地区氮肥投入阈值为179.5~198.4 kg/hm<sup>2</sup>。

## 3 讨论

氮肥是影响作物生长、产量和品质的重要营养因子之一<sup>[19]</sup>。在农业生产中,合理的氮肥用量可以提高氮素利用率和作物产量<sup>[2]</sup>,然而当氮肥超过一定量时,产量随着施氮量的增加呈现下降的趋势<sup>[9]</sup>。本研究中不同年份虽然玉米产量有所波动,但对施氮处理的响应规律一致,秸秆还田配施适量氮肥(210 kg/hm<sup>2</sup>)时,连续4 a玉米均获得最高产量,但当氮肥

用量超过210 kg/hm<sup>2</sup>时,均呈下降趋势。氮肥的过量供应不利于养分向籽粒转运,导致籽粒养分含量下降,从而影响产量<sup>[20]</sup>。氮肥累积利用率是评价一段时期内氮肥施入土壤后玉米累积吸收利用效率,其利用率随着时间的延长呈稳定状态,能够反映肥料利用的真实情况<sup>[21]</sup>,但受土壤类型、施氮量、施氮时间及土壤供氮能力等因素的综合影响<sup>[22]</sup>。本研究发现,随着试验年限的延长,累积肥料氮素农学效率、回收率和偏生产力均表现出随施氮量的增加而降低的趋势,这与前人的研究结果一致<sup>[20,23-24]</sup>。由此可见,应确定秸秆还田条件下兼顾作物产量和土壤养分状况的适宜施氮量,以保证作物高产并避免氮素环境污染问题,减少氮肥的损失。

秸秆作为一种重要的养分资源,含有作物生长发育所必需的氮、磷以及各种营养元素,还田后不仅可以增加土壤有机碳的积累,改善土壤结构,还可以提高土壤保水保肥能力<sup>[25]</sup>。秸秆作为一种养分资源,统计结果显示,使用作物秸秆替代化肥,每年的温室气体、NH<sub>3</sub>和氮氧化物排放分别可减少708.9、1.99和4.36万t<sup>[26]</sup>。因此,充分利用秸秆氮素资源不仅有助于促进资源的可持续利用,同时可促进农业的可持续发展,是农业生产集约化的重要措施。有研究表明,秸秆作为土壤氮素来源,其还田后氮素释放率当年可达52.65%,还田2 a和3 a后累积氮素释

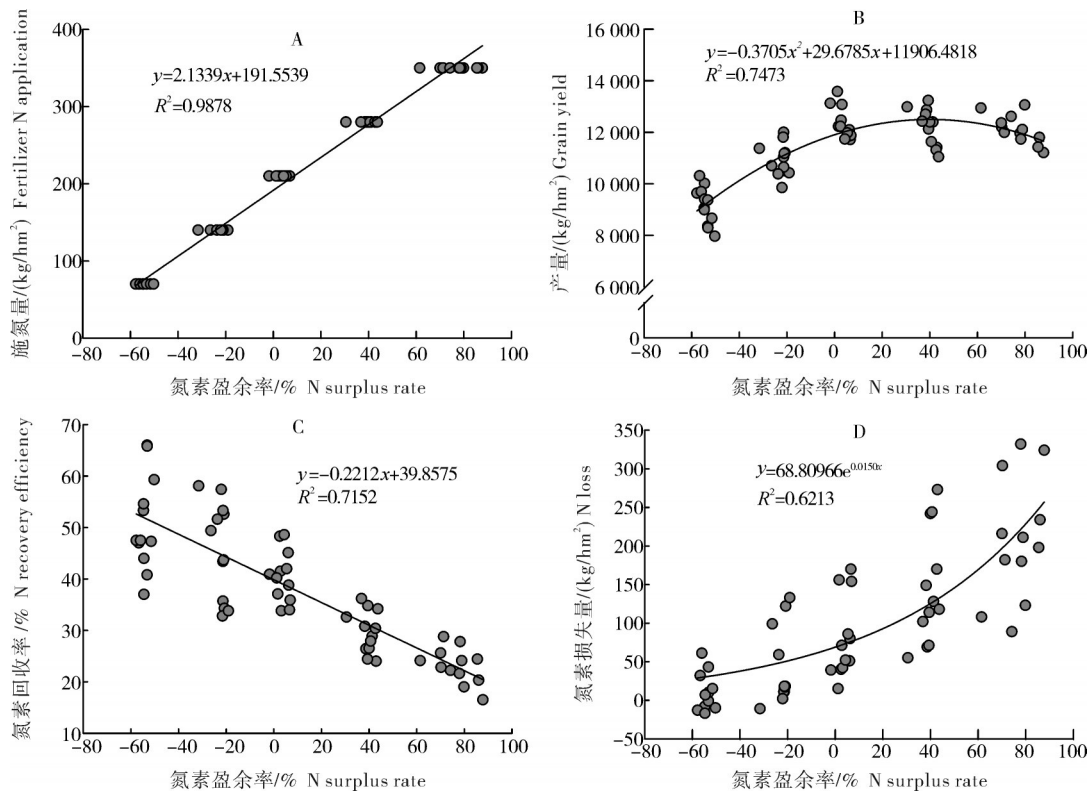


图4 秸秆还田下氮素表现盈余率与施氮量(A)、产量(B)、氮素回收率(C)和氮素表现损失量(D)的关系

Fig.4 Relationships among N surplus rate with fertilizer N application (A), yield (B), N recovery efficiency (C) and N loss (D) under straw returning

放率分别达到了70.66%和91.70%<sup>[27]</sup>。但需要注意的是,虽然秸秆的添加丰富了土壤生物多样性,提高了土壤微生物丰度,使微生物群落结构发生改变<sup>[28]</sup>,但也出现了土壤微生物与植物的“争氮”现象<sup>[29]</sup>。而配施适量的氮肥能够增强与碳分解相关的土壤酶活性,加速秸秆的腐解和养分的释放,最终实现玉米产量的提高和氮素吸收<sup>[30]</sup>。因此,在玉米养分管理中,需要在秸秆还田条件下配施适量的氮肥,以保证农田氮素平衡。本研究发现,与试验起始相比,在秸秆还田条件下低施氮量处理时,土壤氮素表现平衡表现为亏损状态,而当氮肥用量增加至210 kg/hm<sup>2</sup>后,玉米对氮素的需求低于氮素的投入,氮素表现为盈余状态。

在确定适宜氮肥用量时,大多数研究采用平方根、二次多项式和线性加平台等模型来计算施氮量<sup>[31]</sup>,但这些模型在考虑养分平衡状况上具有一定的局限性,在生产中应从作物产量、利用率和农田养分平衡等方面给予综合考虑推荐适宜用量<sup>[32]</sup>。氮素盈余率从负值、零到正值的过程反映了土壤氮的消耗、合理施氮到氮肥过量的状况。当氮素盈余率为负值时,虽然氮素损失量低,获得了较高的氮肥利用

率,但是以降低玉米产量为代价,还会消耗土壤中的矿质氮;当氮素大量盈余时,作物产量和氮素回收率显著降低<sup>[33]</sup>,这些盈余的氮素一部分残留于土壤中供作物吸收,另一部分则通过氨挥发、硝化-反硝化、淋溶和径流等途径而损失,对环境造成一定负面影响<sup>[34]</sup>。本研究结果中,盈余率与施氮量二者间呈极显著的线性关系,而与玉米产量呈二次曲线关系、与氮素回收率呈线性关系、与氮素损失量呈指数相关,综合拟合结果可得出理论盈余率下的适宜氮肥用量及其相应能够达到的产量分别为188.9和11 850 kg/hm<sup>2</sup>,氮素表观利用率为40.1%,氮损失量为65.7 kg/hm<sup>2</sup>,其结果与实际最高产量处理(N210)接近。由此以理论盈余率为0时施氮量的95%作为置信区间,确定试验区适宜氮肥用量范围在179.5~198.4 kg/hm<sup>2</sup>,在该施氮范围内获得的玉米产量最高,同时氮素表观损失量相对较低,且能够维持土壤氮素表现平衡,因此可作为研究区域连续秸秆还田条件下协调玉米产量和环境效益的施氮量依据。某地区农田适宜氮肥用量需要以多年、多点的田间试验为基础,本研究中秸秆还田量为平均水平,且是单点试验,试验结果的区域适应性仍需进一步验证和探讨。

## 参考文献 References

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. National Bureau of Statistics. China statistical year-book 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020 (in Chinese).
- [2] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 415-422. WANG J Q, MA W Q, JIANG R F, et al. Integrated soil nutrients management and China's food security[J]. Resources science, 2008, 30(3): 415-422(in Chinese with English abstract).
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273. ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2013, 19(2): 259-273(in Chinese with English abstract).
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6. ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and environmental sciences, 2000, 9(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- [5] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 150-157. YANG B J, HUANG G Q, QIAN H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. Acta pedologica sinica, 2014, 51(1): 150-157(in Chinese with English abstract).
- [6] 闫宇婷, 宋秋来, 闫超, 等. 连作秸秆还田下玉米氮素积累与氮肥替代效应研究[J]. 作物学报, 2022, 48(4): 962-974. YAN Y T, SONG Q L, YAN C, et al. Nitrogen accumulation and nitrogen substitution effect of maize under straw returning with continuous cropping[J]. Acta agronomica sinica, 2022, 48(4): 962-974(in Chinese with English abstract).
- [7] 麻坤, 刁钢. 化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1113-1120. MA K, DIAO G. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2018, 24(4): 1113-1120(in Chinese with English abstract).
- [8] 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 pedologica sinica, 2008, 45(5): 915-924(in Chinese with English abstract).
- [9] 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(in Chinese with English abstract).
- [10] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 782-786. SUN X, LIU Q, WANG D J, et al. Effect of long-term straw application on soil fertility [J]. Soils, 2007, 39(5): 782-786(in Chinese with English abstract).
- [11] 霍竹, 王璞, 付晋峰. 秸秆还田与氮肥施用对夏玉米物质生产的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 95-98. HUO Z, WANG P, FU J F. Effects of crop residues incorporation and N-fertilizer utilization on the matter production of summer maize[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2006, 14(2): 95-98(in Chinese with English abstract).
- [12] 王维钰, 乔博, AKHTAR K, 等. 免耕条件下秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2136-2152. WANG W Y, QIAO B, AKHTAR K, et al. Effects of straw returning to field on soil respiration and soil water heat in winter wheat-summer maize rotation system under no tillage[J]. Scientia agricultura sinica, 2016, 49(11): 2136-2152 (in Chinese with English abstract).
- [13] 公华锐, 李静, 马军花, 等. 秸秆还田配施有机无机肥料对冬小麦土壤水氮变化及其微生物群落和活性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2203-2214. GONG H R, LI J, MA J H, et al. Effects of straw incorporation combined with inorganic-organic fertilization on soil water and nitrogen changes and microbial community structure in winter wheat[J]. Acta ecologica sinica, 2019, 39(6): 2203-2214(in Chinese with English abstract).
- [14] 黄涛. 长期碳氮投入对土壤有机碳氮库及环境影响的机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. HUANG T. The effects of long-term C and N inputs on soil organic C and N pools and environments[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 陕西关中小麦-玉米轮作区协调作物产量和环境效应的农田适宜氮肥用量[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6115-6123. YANG X L, LU Y L, TONG Y A, et al. Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain, Shaanxi Province[J]. Acta ecologica sinica, 2014, 34(21): 6115-6123(in Chinese with English abstract).
- [16] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 286-291. LIU H B, LI Z H, ZHANG W L, et al. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. Plant nutrition and fertilizing science, 2004, 10(3): 286-291(in Chinese with English abstract).
- [17] 苏效坡, 伍大利, 夏婷婷, 等. 吉林省梨树县农户春玉米氮肥施用现状调查[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(5): 46-48, 70. SU X P, WU D L, XIA T T, et al. Investigation on current status of nitrogen application in spring maize in the farmers of Lishu County Jilin Province[J]. Journal of Jilin agricultural sciences, 2015, 40(5): 46-48, 70(in Chinese with English abstract).
- [18] 王玉莹, 张正斌, 杨引福, 等. 2002—2009年东北早熟春玉米生育期及产量变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(24): 4959-4966. WANG Y Y, ZHANG Z B, YANG Y F, et al. Growth period and yield of early-maturing spring maize in northeast

- China from 2002—2009[J]. *Scientia agricultura sinica*, 2012, 45(24):4959-4966(in Chinese with English abstract).
- [19] FRINK C R, WAGGONER P E, AUSUBEL J H. Nitrogen fertilizer: retrospect and prospect [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(4):1175-1180.
- [20] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5):622-627. ZHAO Y, TONG Y A, ZHAO H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. *Plant nutrition and fertilizer science*, 2006, 12(5):622-627(in Chinese with English abstract).
- [21] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期定位施肥对玉米肥料利用率影响的研究 [J]. *玉米科学*, 2006, 14(4):129-133. HUANG S M, BAO D J, HUANGPU X R, et al. Effect of long-term fertilization on fertilizer utilization efficiency on maize in fluvo-aquic soil [J]. *Journal of maize sciences*, 2006, 14(4):129-133(in Chinese with English abstract).
- [22] 易晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考 [J]. *生态环境*, 2003, 12(2):192-197. JU X T, ZHANG F S. Thinking about nitrogen recovery rate [J]. *Ecology and environment*, 2003, 12(2):192-197(in Chinese with English abstract).
- [23] 易镇邪, 王璞, 申丽霞, 等. 不同类型氮肥对夏玉米氮素累积、转运与氮肥利用的影响 [J]. *作物学报*, 2006, 32(5):772-778. YI Z X, WANG P, SHEN L X, et al. Effects of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen fertilizer utilization in summer maize [J]. *Acta agronomica sinica*, 2006, 32(5):772-778(in Chinese with English abstract).
- [24] 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(in Chinese with English abstract).
- [25] 李峰, 周方亮, 黄雅楠, 等. 减施化肥下紫云英和秸秆还田对土壤养分及活性有机碳的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(1):67-75. LI F, ZHOU F L, HUANG Y N, et al. Effects of Chinese milk vetch and straw returning on soil nutrient and active organic carbon under reduced application of chemical fertilizer [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(1):67-75(in Chinese with English abstract).
- [26] ZHUANG M H, ZHANG J, KONG Z Y, et al. Potential environmental benefits of substituting nitrogen and phosphorus fertilizer with usable crop straw in China during 2000—2017 [J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2020, 267:122125 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122125>.
- [27] 龚振平, 邓乃榛, 宋秋来, 等. 基于长期定位试验的松嫩平原还田玉米秸秆腐解特征研究 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8):139-145. GONG Z P, DENG N Z, SONG Q L, et al. Decomposing characteristics of maize straw returning in Songnen Plain in long-time located experiment [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(8):139-145(in Chinese with English abstract).
- [28] YAN S S, SONG J M, FAN J S, et al. Changes in soil organic carbon fractions and microbial community under rice straw return in Northeast China [J/OL]. *Global ecology and conservation*, 2020, 22:e00962 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00962>.
- [29] 李丽娜, 闫淋淋, 曹凑贵, 等. 稻虾共作系统中水稻生长及养分吸收对秸秆还田与投食响应 [J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(2):8-16. LI L N, YAN L L, CAO C G, et al. Effects of straw returning and crayfish feeding on rice growth and nutrient uptake in rice-crayfish ecosystem [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2):8-16(in Chinese with English abstract).
- [30] 张鑫, 周卫, 艾超, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对夏玉米不同时期土壤酶活性及细菌群落结构的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2):295-306. ZHANG X, ZHOU W, AI C, et al. Effects of nitrogen management on soil enzyme activities and bacterial community structure in summer maize growing stages under straw incorporation [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2020, 26(2):295-306(in Chinese with English abstract).
- [31] 贾良良, 陈新平, 张福锁, 等. 北京市冬小麦氮肥适宜用量评价方法的研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2001, 6(3):67-73. JIA L L, CHEN X P, ZHANG F S, et al. Study of optimum N supplying rate in winter wheat in Beijing area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2001, 6(3):67-73(in Chinese with English abstract).
- [32] 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 nutrition and fertilizer science*, 2010, 16(3):552-558(in Chinese with English abstract).
- [33] 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(in Chinese with English abstract).
- [34] 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*, 2012, 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 in Northeast China [J]. *Plant nutrition and fertilizer science*, 2012, 18(1):89-97(in Chinese with English abstract).



## Optimum nitrogen application rate for maize under continuous straw returning in black soil of central Northeast China

WANG Bobo<sup>1</sup>, XU Xinpeng<sup>2</sup>, HOU Yunpeng<sup>3</sup>, HU Cheng<sup>4</sup>, HE Ping<sup>2</sup>, WU Yupeng<sup>1</sup>

1. *College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

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

3. *Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China;*

4. *Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China*

**Abstract** In order to determine the appropriate nitrogen (N) fertilizer application rate for maize under straw returning in the black soil of central Northeast China, a site-specific field experiment from 2017 to 2020 was conducted in Gongzhuling County of Jilin Province. The experiment had set 6 different N fertilizer rates (0, 70, 140, 210, 280 and 350 kg/hm<sup>2</sup>) to analyze the effects of N on maize yield, N fertilizer utilization efficiency and soil N balance under straw returning, and to explore the relationship among N fertilizer rate, maize yield and N surplus rate under straw return. The results showed that the maize yield first increased and then decreased with the increase of N fertilizer application rate under straw returning condition, but the amount of N application to obtain the highest yield was decreasing with the extension of experiment, reduced by 15.8%. The cumulative agronomic efficiency, the recovery efficiency and the partial factor productivity of N application in maize all decreased with increasing rate of N fertilizer application. In addition, soil N residues were significantly increased by 13.0% and 33.6% at high N application rates (280 and 350 kg/hm<sup>2</sup>) compared with the soil before planting, respectively, while their cumulative apparent N losses reached 578 and 833 kg/hm<sup>2</sup>. The correlation analysis showed that the N fertilizer rate was 188.9 kg/hm<sup>2</sup>, yield was 11 850 kg/hm<sup>2</sup>, N recovery efficiency was 40.1% and N loss was 65.7 kg/hm<sup>2</sup> when the surplus rate was 0. The results indicated that the appropriate N fertilizer rate under straw returning conditions could significantly improve maize yield and N use efficiency, and reduce the apparent N loss. Considering the crop yield, theoretical surplus rate and apparent soil N balance, to apply 179.5-198.4 kg/hm<sup>2</sup> N fertilizer was the appreciate range under long-term straw incorporation in the experiment region.

**Keywords** straw returning; nitrogen application rate; nitrogen utilization efficiency; nitrogen loss; nutrients balance; maize; utilization of straw resources

(责任编辑:赵琳琳)