DOI: 10.11766/trxb201603230019

吉林省不同生态区玉米施氮效果与氮肥利用效率差异*

王 寅[1] 郭 聃[1] 高 强[1†] 焉 莉[1] 宋立新[2] 刘振刚[2]

(1 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118)

(2 吉林省土壤肥料总站, 长春 130012)

摘 要 整理2005—2013年吉林省“3414”田间试验, 选取不施氮和推荐施氮处理数据, 研究不同生态区玉米的氮肥施用效果和肥料利用效率现状, 探讨区域差异及其影响因素。结果显示, 吉林省不同生态区的玉米产量水平差异显著, 总体上以中部半湿润平原区最高, 其次是东部湿润山区, 西部半干旱平原区相对较低。不同生态区玉米施氮效果也存在差异, 其中东部最高, 施氮的平均增产量与增产率分别为2.44 t hm^{-2}和38.4%, 其次为中部(2.40 t hm^{-2}, 34.3%), 西部则显著偏低(2.21 t hm^{-2}, 33.4%)。相比中、西部地区, 东部地区玉米的氮肥利用效率显著较高, 其平均氮肥农学利用率、偏生产力和肥料贡献率分别为16.6 kg kg^{-1}、65.9 kg kg^{-1}和25.0%。随不施氮处理产量的提高, 各生态区施氮处理产量均呈上升趋势而氮肥贡献率呈下降趋势, 其中, 西部地区的相对变幅较中、东部地区更为明显。可见, 应根据区域气候环境条件和施氮响应特征对氮肥进行合理的配置与施用, 建议吉林中部地区以维持作物需求为标准适当减少施氮量, 东部地区可适度增加施氮量并配合栽培措施以消减光温资源不足对产量的限制, 而西部地区应在培肥地力基础上推广高效节水用水技术, 发挥水氮耦合效应以促进高产高效。

关键词 吉林省; 生态区; 区域差异; 氮肥; 产量; 肥料利用效率

中图分类号 S143.1; S513 **文献标识码** A

近几十年来, 随着人口的持续增长, 耕地和水资源的减少, 全球粮食需求压力日益增加。因此, 肥料在作物生产尤其是粮食作物高产栽培中的地位越发重要[1-2]。氮素是影响玉米生长的重要营养因子。大量研究表明, 合理施用氮肥能促进玉米生长发育、提高光合能力和植株抗性、增加物质生产和籽粒产量, 并促进氮素及其他养分的吸收和高效利用[3-8]。玉米施氮的农学反应、养分利用与环境影响以及合理的施氮技术与措施等相关研究始终是科研人员关注的热点, 高产高效与环境友好的施用技术与成果也不断涌现[9-12]。但是, 现有成果大多是基于某一田块或某一小区域的玉米施氮效果、氮肥利用效率及推荐施氮量等方面的研究, 而面向区域角度的研究偏少, 难以为区域的氮素科学管理与氮肥合理配置提供基础信息[13-14]。

吉林省作为我国玉米主产区, 近五年玉米播种面积占全省粮食作物的70%, 总产量接近75%[15]。根据地形、气候和植被等方面的差异, 吉林省一般划分为三大生态区域[16-17], 即: 东部湿润山区(Eastern humid mountainous area, EHMA)、中部半湿润平原区(Central semi-humid plain area, CSPA)和西部半干旱平原区(Western semi-arid plain area, WSPA)。目前, 吉林省三大生态区玉米施氮效果和氮肥利用效率的现状及其差异仍不清

* 国家现代农业玉米产业技术体系项目(CARS-02)和公益性行业(农业)科研专项项目(201103003)资助 Supported by the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (No. CARS-02) and theSpecial Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201103003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gyt199962@163.com

作者简介: 王 寅(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事作物养分管理与施肥研究。E-mail: wy1986410@163.com

收稿日期: 2016-03-23; 收到修改稿日期: 2016-04-29; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-05-26

楚。为此，本研究基于国家测土配方施肥项目在吉林省开展的大量“3414”肥料试验，研究推荐施肥条件下不同生态区玉米的氮肥增产效应和氮肥利用效率，旨在明确吉林省玉米生产中氮肥的作用及其区域肥效差异，为不同地区玉米的氮肥合理调控与配置提供参考，促进因地制宜科学施肥理念和区域合理施氮技术的推广。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

吉林省现辖长春、吉林、四平、辽源、通化、白山、白城和松原8个地区和延边朝鲜族自治州，根据地形、气候和植被等方面差异分为三大生态区（图1）。东部湿润山区包括延边朝鲜族自治州、白山市全境、吉林市的蛟河、桦甸两县以及通化市除梅河口以外地区；中部半湿润平原区包括长春市和辽源市全境、松原市的扶余县、通化地区的梅河口市、吉林市除蛟河、桦甸两县以外地区，以及四平除双辽市以外地区；西部半干旱平原区包括白城市全境、四平的双辽市，以及松原除扶余县以外地区。为方便进行地区间的比较，本研究将全省分为48个县市级单位（县、县级市、地级市辖区等），东、中、西部地区分别有20、18和10个县市（图1）。

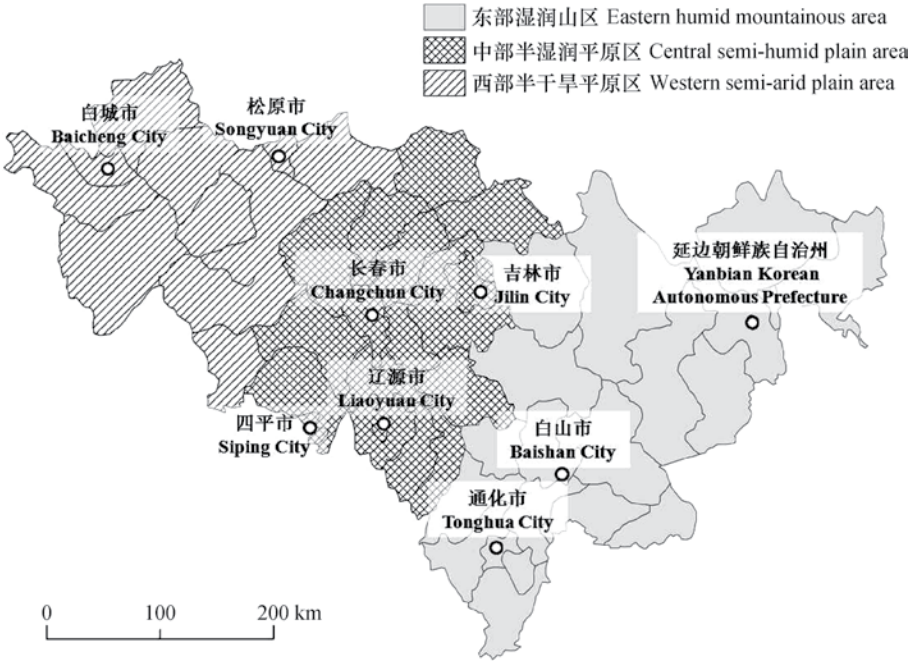


图1　吉林省不同生态区地图

Fig. 1　Map of Jilin Province with eco-zones delineated

本研究选取2005—2013年国家测土配方施肥项目在吉林省布置的1 110个玉米田间试验，其中东、中、西部地区分别有266、567和277个。东部地区土壤类型主要为白浆土、暗棕壤、冲积土等，中部地区主要为黑土、黑钙土、白浆土等，西部地区主要为草甸土、风沙土、黑钙土等。各生态区玉米试验田块的供试土壤基本理化性质如表1所示，pH由东向西逐渐升高，有机质、碱解氮和有效磷含量由东向西逐渐下降，速效钾含量以中部地区较高，东部地区相对较低。供试玉米品种均为各地区主栽品种，包括先玉系列、郑单系列、郝育系列、良玉系列、农大系列和吉单系列等。

1.2　试验设计

本研究选取“3414”田间试验中的处理2（$N0P_2K_2$）和处理6（$N_2P_2K_2$），即不施氮（-N）和施氮（+N）处理。图2显示，吉林省不同地区施氮处理的氮肥（N）用量差异明显，中部地区施氮量整体偏高，平均施氮量为177.0 kg hm^{-2}，近半数县市超过180 kg hm^{-2}，其中磐石县最高（235 kg hm^{-2}）；西部地区施氮量差异较小，所有县市都在155.8 ~ 180.0 kg hm^{-2}之间，平均为162.1 kg hm^{-2}；东部地区施氮量整体较低，75%的县市低于

表1 吉林省不同生态区玉米试验田块的土壤基本性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soils of the experiment fields in different ecological zones of Jilin Province

地区 Region	pH		有机质 Organic matter (g kg^{-1})		碱解氮 Alkaline N (mg kg^{-1})		有效磷 Available P (mg kg^{-1})		速效钾 Available K (mg kg^{-1})	
	范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD
东部湿润山区 EHMA（n=266）	3.7 ~ 7.2	5.7 ± 0.6	11.1 ~ 123.5	39.0 ± 21.7	63.0 ~ 392.2	191.6 ± 67.0	4.7 ~ 153.9	43.7 ± 28.7	24.0 ~ 374.1	115.9 ± 58.1
中部半湿润平原区 CSPA（n=567）	4.6 ~ 8.7	6.5 ± 0.8	6.2 ~ 60.1	24.2 ± 8.4	36.1 ~ 269.7	127.8 ± 39.6	4.4 ~ 103.0	31.8 ± 19.7	34.2 ~ 320.4	130.2 ± 46.2
西部半干旱平原区 WSPA（n=277）	6.1 ~ 8.9	7.7 ± 0.5	5.6 ~ 31.8	14.5 ± 5.0	37.8 ~ 245.6	99.6 ± 32.5	1.4 ~ 76.2	13.1 ± 10.2	42.3 ~ 292.1	123.3 ± 40.6

注 Note：EHMA，Eastern humid mountainous area；CSPA，Central semi-humid plain area；WSPA，Western semi-arid plain area. 下同 The same below

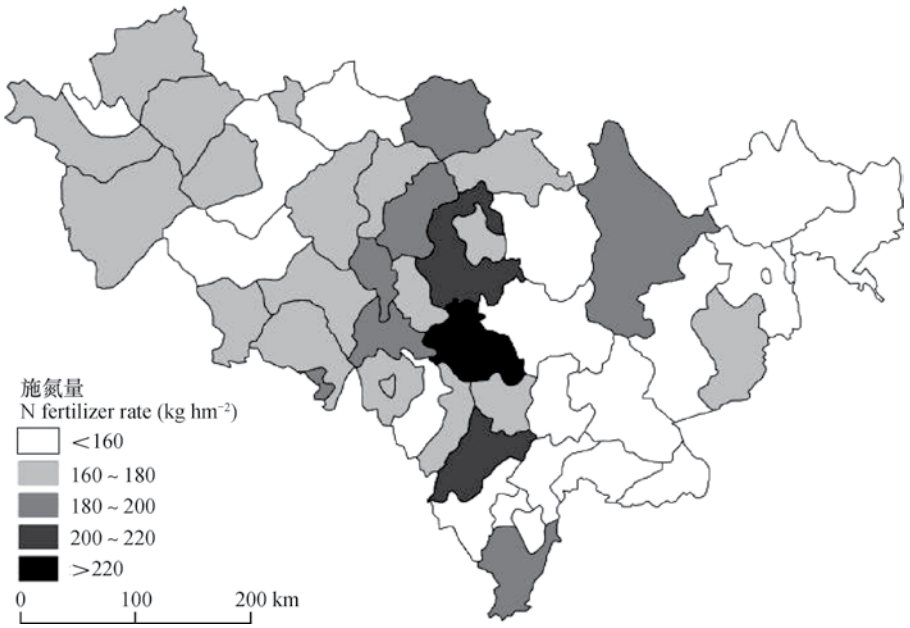


图2 吉林省玉米施氮量的区域差异

Fig. 2 Regional difference in N fertilizer application rate for maize in Jilin Province

160 kg hm^{-2}，平均为155.2 kg hm^{-2}。

所有试验点两处理的磷、钾肥用量一致，东、中、西部地区的平均磷肥（P_2O_5）用量分别为62.2、72.0和72.2 kg hm^{-2}，平均钾肥（K_2O）用量分别为69.9、74.4和67.6 kg hm^{-2}。供试肥料分别为尿素（含N 46%）、过磷酸钙（含P_2O_5 12%）和氯化钾（含K_2O 60%）。氮肥的40%和全部的磷、钾肥做基肥，剩余氮肥于玉米七叶期追施，其他田间

管理与农民习惯保持一致。

1.3　样品采集与测定

各试验点于玉米播种前取0～20 cm耕层土壤按常规法测定土壤的基本理化性质[18]：电位法测pH（水土比2.5∶1）；重铬酸钾容量法测有机质；1 mol L^{-1} NaOH扩散法测碱解氮；0.5 mol L^{-1} $NaHCO_3$浸提—钼锑抗比色法测有效磷；1 mol L^{-1} NH_4OAc浸提—火焰光度法测速效钾。

玉米成熟后，对各试验点所有小区去除边垄后进行实打实收，获得籽粒产量。

1.4　参数计算与统计分析

参考文献［19-20］，计算以下参数：

肥料农学利用率（agronomic efficiency，AE，kg kg^{-1}），指单位施肥量所增加的作物籽粒产量，即AE=（$Y-Y_0$）/ F，Y为施肥区作物产量，Y_0为无肥区作物产量，F为施肥量。

肥料偏生产力（partial factor productivity，PFP，kg kg^{-1}），指投入单位肥料所生产的作物籽粒产量，即PFP=Y / F。

肥料贡献率（fertilizer contribution rate，FCR，%）=（$Y-Y_0$）/ $Y\times100$。

采用Excel 2010软件计算和处理试验数据，用SPSS 17.0软件统计分析，用最小显著差异法（LSD法）检验处理间在$p<0.05$水平的差异显著性，采用ArcGIS 9.3软件制作地图。

2　结　果

2.1　施氮对吉林省不同生态区玉米产量的影响

吉林省玉米产量在不同生态区和施氮量条件下均有显著差异（表2），但方差分析显示生态区与氮肥之间无交互作用。三大生态区中，中部地区产量最高，东部地区次之，西部地区最低。不施氮条件下，东、西部与中部的产量差分别为0.80和0.91 t hm^{-2}，而施氮条件下分别为0.76和1.09 t hm^{-2}。

分析区域玉米产量差异发现（图3），不施氮条件下，中部除舒兰市（6.3 t hm^{-2}）和磐石县（6.8 t hm^{-2}）外，各县市产量均超过7.0 t hm^{-2}，其中东丰县达到最高的10.1 t hm^{-2}。东部有45%的县市产量低于7.0 t hm^{-2}，其中延吉市最低（5.8 t hm^{-2}）而辉南县（9.8 t hm^{-2}）最高。西部有30%的县市产量低于7.0 t hm^{-2}，除松原市（9.9 t hm^{-2}）和前郭县（8.8 t hm^{-2}）外均低于8.5 t hm^{-2}。施氮后，中部所有县市产量均超过8.5 t hm^{-2}，最高为吉林市（12.7 t hm^{-2}），而东、西部分别有15%和20%的县市产量不足8.5 t hm^{-2}，两地区最高产量分别出现在辉南县（12.3 t hm^{-2}）和松原市（12.1 t hm^{-2}）。

2.2　吉林省玉米施氮增产效果的区域差异

三大生态区中，东部地区玉米施氮的增产效

表2　吉林省不同生态区玉米施氮的产量效应

Table 2　Maize yield responses of N fertilizer in the different ecological zones of Jilin Province

地区 Region	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield（t hm^{-2}）		增产量 Yield increase（t hm^{-2}）		增产率 Yield increaserate（%）	
		范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean ± SD
东部湿润山区 EHMA（n=266）	−N	2.4～12.7	7.3 ± 1.7				
	+N	5.3～16.9	9.8 ± 1.7b	0.1～8.3	2.44 ± 1.34a	1.4～243.5	38.4 ± 31.9a
中部半湿润平原区 CSPA（n=567）	−N	3.1～13.5	8.1 ± 1.9				
	+N	5.4～15.8	10.5 ± 1.7a	～0.6～9.2	2.40 ± 1.46a	0～281.6	34.3 ± 30.7b
西部半干旱平原区 WSPA（n=277）	−N	3.7～11.7	7.2 ± 1.5				
	+N	4.3～14.9	9.4 ± 1.7c	～0.7～7.6	2.21 ± 1.26b	0～173.5	33.4 ± 23.8b

注：+N处理平均值后的小写字母表示不同生态区之间的差异显著（$p<0.05$）Note：Means followed by different lowercase letters in Treatments +N indicate significant differences between ecological zones at $p<0.05$



图3 吉林省玉米不施氮（A）与施氮（B）处理产量的区域差异

Fig. 3 Regional difference in maize yield of Treatments −N（A）and Treatments +N（B）in Jilin Province

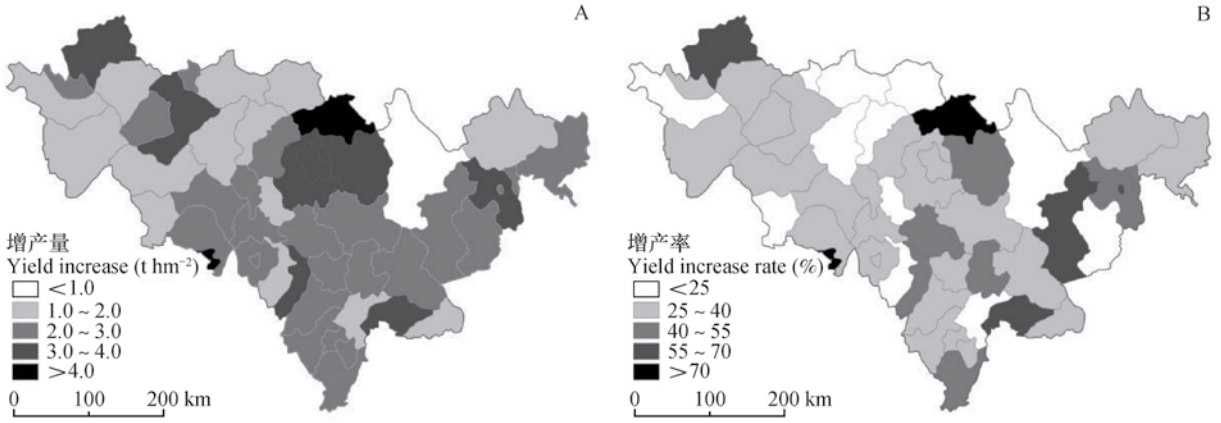


图4 吉林省玉米施氮增产量（A）与增产率（B）的区域差异

Fig. 4 Regional differences in yield increase（A）and yield increase rate（B）of the maize applied with N fertilizer in Jilin Province

果最好，平均增产2.44 t hm^{-2}（38.4%），其次为中部地区，而西部地区较东部地区显著偏低（表2）。增产量区域差异显示（图4A），东、中部地区施氮增产量整体较高，分别有80%和72%的县市超过2.0 t hm^{-2}，西部地区则有半数县市低于2.0 t hm^{-2}。单个县市来看，以东部的敦化市最低，增产仅0.90 t hm^{-2}（11.2%），而中部的四平市最高（4.70 t hm^{-2}、87.2%）。增产率与增产量的区域差异趋势相似（图4B），东、中、西部地区增产超过25个百分点的县市比例分别为85%、72%和70%，而高于40个百分点的比例分别为40%、22%和10%。

2.3 吉林省不同生态区玉米氮肥利用效率差异

吉林东部地区玉米的氮肥农学利用率、偏生产力和肥料贡献率平均分别为16.6 kg kg^{-1}、65.9 kg kg^{-1}和25.0%，显著高于中、西部地区（表3）。农学利用率的区域差异显示（图5A），东部整体较高，85%的县市高于12.0 kg kg^{-1}，而中、西部相应的比例分别为66.7%和50%。全省以中部的舒兰市最高（27.4 kg kg^{-1}），而东部的敦化市最低（5.8 kg kg^{-1}）。偏生产力方面（图5B），东部有50%的县市超过65 kg kg^{-1}，中、西部则分别为22.2%和30%，全省以东部的汪清县最高（113.8 kg kg^{-1}）而中部的磐石县最低（42.2 kg kg^{-1}）。与农学利用率一致，氮肥贡献率的全省最高、最低值分别为舒兰市（41.5%）和敦化市（9.7%）（图5C）。尽管东部所有县市的氮肥贡献率均未超过36%，但半数以上高于24%，中、西部相应比例分别为38.9%和30%。

2.4 吉林省不同生态区玉米不施氮产量与施氮产量、氮肥贡献率的关系

不施氮处理的作物产量可作为土壤基础供氮能

表3　吉林省不同生态区玉米的氮肥利用效率

Table 3　N fertilizer use efficiencies of Maize in the different ecological zones of Jilin Province

地区 Region	农学利用率 Agronomic efficiency（kg kg^{-1}）		偏生产力 Partial factor productivity（kg kg^{-1}）		肥料贡献率 Fertilizer contribution rate（%）	
	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD
东部湿润山区EHMA（n=266）	0.7 ~ 78.6	16.6 ± 10.0a	32.1 ~ 187.3	65.9 ± 21.8a	1.4 ~ 70.9	25.0 ± 12.7a
中部半湿润平原区CSPA（n=567）	0 ~ 57.3	13.6 ± 8.2b	30.1 ~ 103.0	60.2 ± 11.9b	0 ~ 73.8	22.8 ± 12.7b
西部半干旱平原区WSPA（n=277）	0 ~ 38.5	13.6 ± 7.5b	26.9 ~ 92.8	58.2 ± 10.6b	0 ~ 63.4	23.1 ± 11.4b

注：平均值后的小写字母表示不同生态区之间的差异显著（$p < 0.05$）Note：Means followed by different lowercase letters indicate significant differences between ecological zones at $p < 0.05$

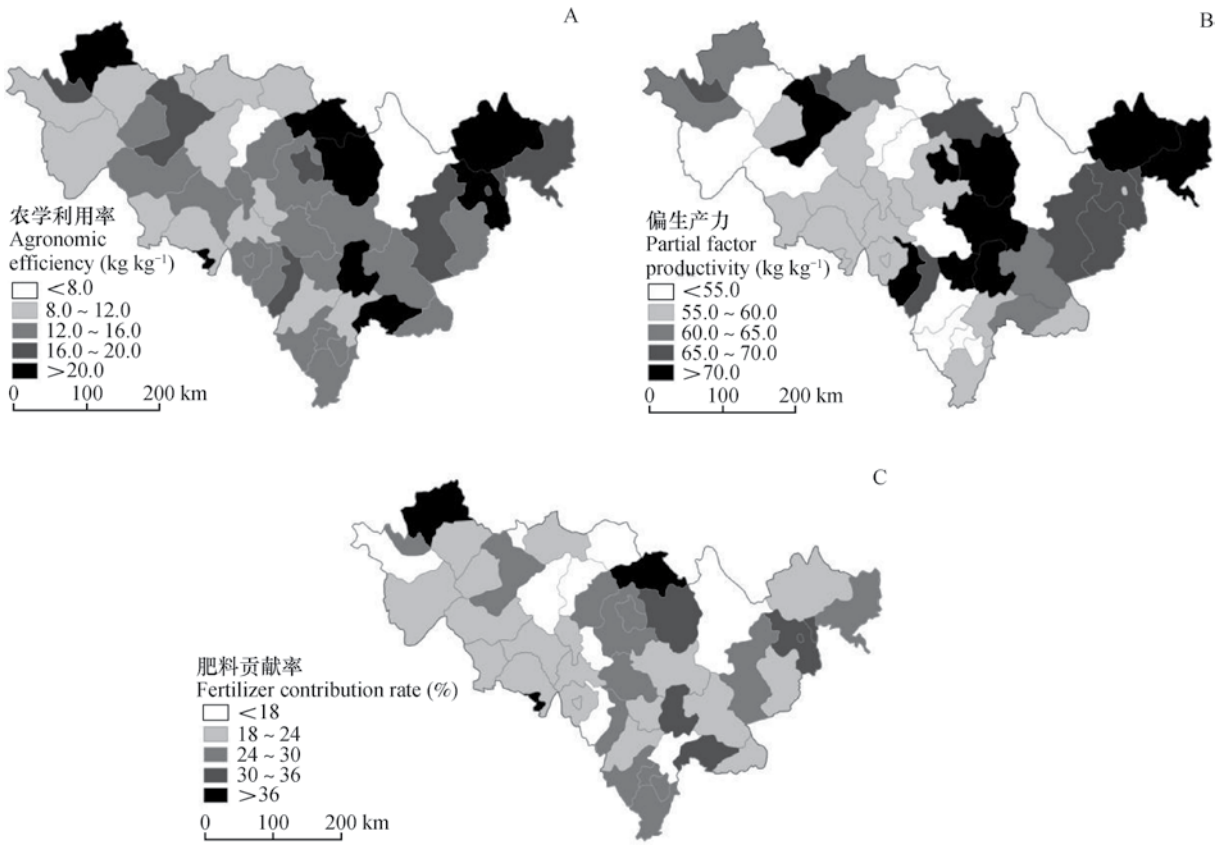


图5　吉林省玉米施氮农学利用率（A）、偏生产力（B）和肥料贡献率（C）的区域差异

Fig. 5　Regional differences in agronomic efficiency（A）, partial factor productivity（B）, and fertilizer contribution rate（C）of N fertilizer applied to maize production in Jilin Province

力的反映[20]。研究发现，吉林省东、中、西部地区施氮与不施氮处理玉米产量之间均存在极显著的正相关关系，说明较高的土壤基础供氮能力有利于获得较高的施肥产量（图6A、6B和6C）。但是，不同生态区之间施氮与不施氮产量的关系存在差异（图6D），随不施氮产量的增加，西部地区施氮产量的增幅明显较高，而中部地区明显较低，表明西部地区土壤基础供氮能力提高，可获得更大的施氮增产效果。

图7显示，氮肥贡献率与不施氮处理玉米产量之间存在显著的对数关系，氮肥贡献率随不施氮产量的增加而显著降低，说明较高的土壤基础供氮能力可减少作物对外源氮肥的依赖。比较不同生态区差异发现，随不施氮产量增加，西部地区氮肥贡献率的降幅明显低于中、东部地区，表明西部地区玉米产量受施氮的影响相比其他地区较低，其可能还受其他因素的影响。

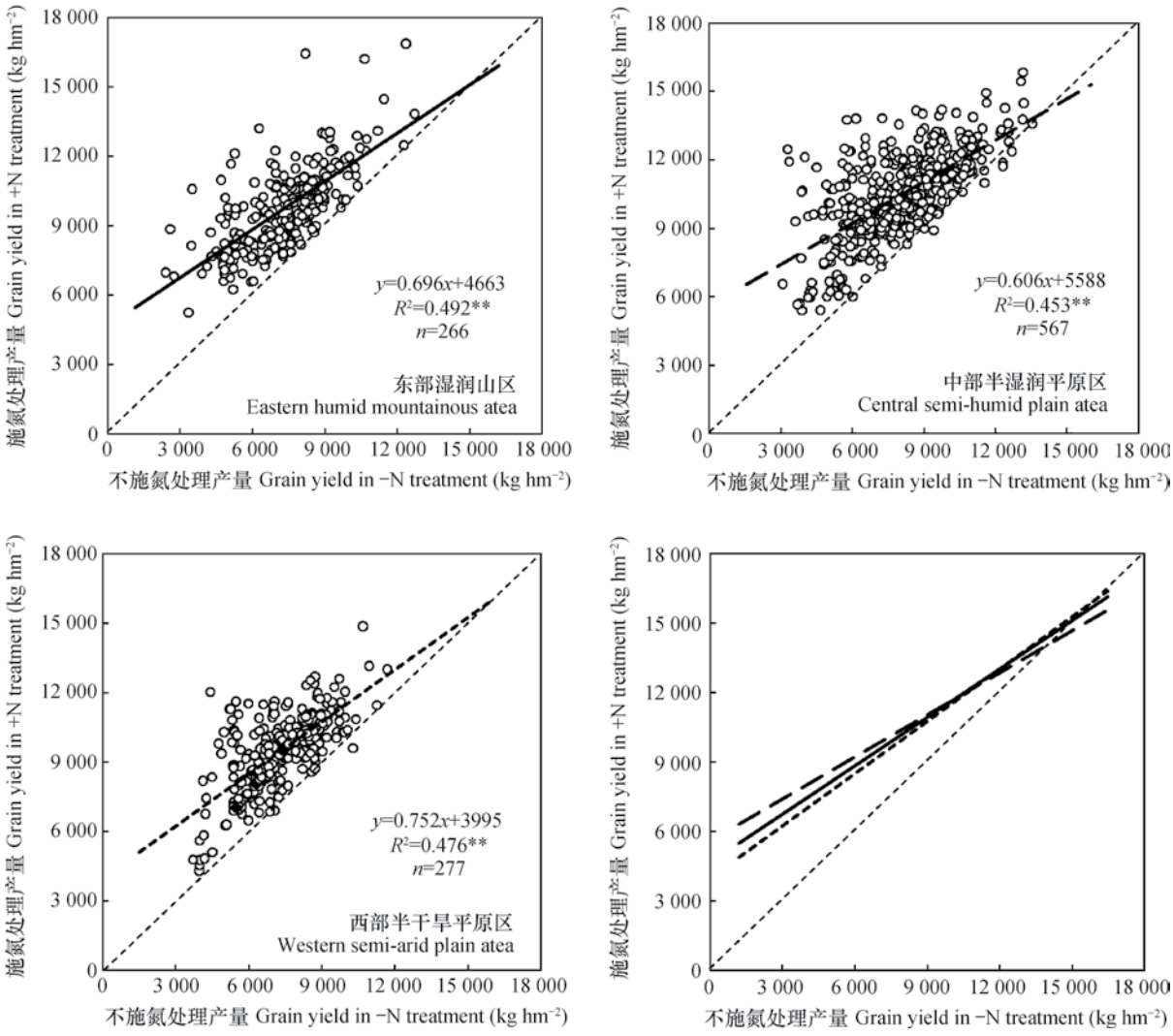
3 讨 论

科学的养分管理措施不仅应基于作物的养分需求特性，还需要综合考虑环境因素和其他栽培措施[20-22]。因此，了解不同地区间作物在产量水平、施肥响应和肥料效率等方面的差异，是实现区域养分精准管理和合理施肥的重要基础。本研究发现，吉林省不同生态区的玉米产量水平、施氮反应和氮肥利用效率均存在显著差异，这可能是土壤、光照、降雨和地形等自然条件以及耕作、施肥等人为因素综合作用的结果。

吉林省三大生态区中，中部半湿润平原区在自然条件方面最有利于玉米生产，其光照、积温和降水等气候条件适中，土壤肥力较高，耕作开垦时间相对较长[23]，而且该区域的氮、磷、钾肥施用量也明显较多，因此玉米产量显著较高。该区是吉林省乃至全国重要的商品粮生产基地，全国产粮大县排名前五位的榆树市、农安县、公主岭市、梨树县和扶余县均在此区域。东部湿润山区主要受到长白山的影响，降水较多而光照、积温相对不足，低温冷害时有发生，而且该区域大部分地区长期为森林植被系统，土壤呈酸性或微酸性，养分含量测定值尽管很高，但农田耕作开垦历史较短[17, 24]，施肥量也相对较少。因此，东部地区一些县市尤其是山区地带的玉米产量偏低，如长白山附近的白山市、临江市、通化市和通化县，不施氮时产量均低于7.0 t hm^{-2}。西部半干旱平原区位于我国北方生态环境脆弱带，常年降水偏少，一般很难满足玉米生育期的水分需求，而且农田土壤以砂性土为主，还存在大量盐碱土地带，土壤pH高而有机质、有效氮、磷等养分含量偏低[24]。该区域不良的气候环境和较低的土壤肥力限制了玉米生长，导致产量水平偏低。

本研究发现，东部地区玉米施氮的增产效果和氮肥利用效率较中、西部明显较高。这可能是由于该区土壤肥沃、有机质含量高，尽管基础产量不高，但施肥之后由于激发效应促进土壤养分供应，获得较好的增产效果[25]。另一方面，东部地区玉米种植中氮肥的施用量普遍偏低，75%的县市推荐施氮低于160 kg hm^{-2}，平均施氮量（155.2 kg hm^{-2}）较中部地区低12.4%，因而在较高施氮产量和显著增产效果基础上计算所得的农学利用率、偏生产力和肥料贡献率也均较高。该区玉米生产可在结合其他栽培措施基础上，适当补氮以促进植株发育、提高光合能力[5]。中部地区的绝对增产量与东部地区总体上接近，但其基础产量较高，因而相对增产率较低，而较高的施氮量则导致其氮肥利用效率相对偏低，因此应适当的下调施氮量以稳产增效。对于西部地区，施氮增产效果不佳的原因首先是土壤条件较差，同时也受到干旱气候的重要影响。该地区土壤基础供氮能力对玉米产量的影响程度更高，而外源氮肥对玉米产量的影响程度偏低，这也证明当前影响西部地区玉米产量和氮肥利用效率的关键因素不仅仅是氮肥，更重要的是土壤本身肥力状况和环境限制因素。因此，西部地区应重视土壤培肥工作，同时研究推广各种技术措施，保证水分的高效收集与利用，以水促肥实现高产[26-27]。

与产量表现相比，玉米氮肥利用效率在不同生态区内县域间的一致性明显较低。以中部地区为例，四平市的氮肥农学利用率和贡献率分别为23.9 kg kg^{-1}和38.7%，而德惠市分别为7.0 kg kg^{-1}和12.9%，东丰县的氮肥偏生产力高达79.6 kg kg^{-1}，而磐石县仅为42.2 kg kg^{-1}。相近地区间气候条件相似，如此巨大的差异可能是不同的土壤基础供氮能力、施氮量以及栽培措施等综合作用的结果。分析发现，四平市土壤有机质和碱解氮的含量分别为11.6 g kg^{-1}和68.9 mg kg^{-1}，不施氮产量为7.1 t hm^{-2}，土壤基础供氮能力较差，施氮197.3 kg hm^{-2}



注：虚线为1∶1线Note：The dash line indicate 1∶1 line

图6　吉林省不同生态区玉米不施氮产量与施氮产量的关系

Fig. 6　Relationships between Treatments −N and +N in maize yield in different ecological zones of Jilin Province

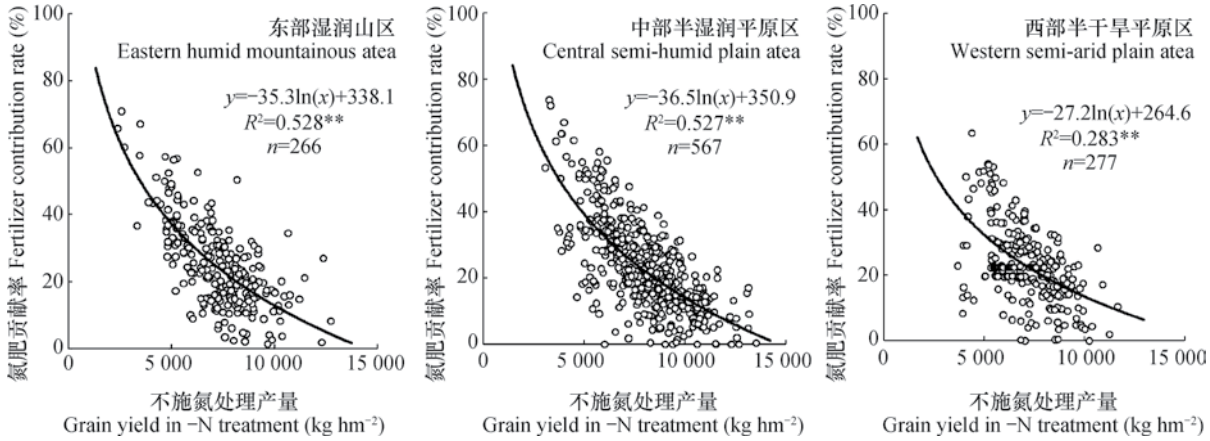


图7　吉林省不同生态区玉米不施氮产量与氮肥贡献率的关系

Fig. 7　Relationships between maize yield oftreatments −N and N fertilizer contribution rates in different ecological zones of Jilin Province

有效促进了产量提高，增产达4.7 t hm^{-2}；而德惠市土壤有机质和碱解氮的含量分别为23.3 g kg^{-1}和116.2 mg kg^{-1}，不施氮产量为7.69 t hm^{-2}，土壤供氮能力中等，施氮163.4 kg hm^{-2}后产量反应较低，仅增产1.13 t hm^{-2}，因此农学利用率和贡献率较四平市偏低。东丰县玉米的不施氮产量达10.1 t hm^{-2}，施氮150.1 kg hm^{-2}条件下产量为11.9 t hm^{-2}，因而获得较高偏生产力；磐石县不施氮产量仅6.8 t hm^{-2}，施氮235.3 kg hm^{-2}后产量大幅提高至9.7 t hm^{-2}，但由于施氮过多而导致偏生产力较低。这说明吉林省玉米的区域氮素养分管理还需进一步细化，在此情况下可采用“区域总量控制与田块微调相结合”的策略指导推荐施肥[28]，兼顾大区域与小环境，保证氮肥合理分配，促进高产高效。此外，本研究发现不同生态区玉米除在氮肥用量上有较大差异外，磷、钾肥用量也有明显不同，其中东部地区的磷、钾肥用量明显较低，这可能对玉米产量和施氮效果造成一定的影响，在一定程度上增大氮肥的增产效果与利用效率。因此，不同区域的玉米氮肥管理还要结合当地磷、钾肥施用情况，实现平衡施肥，发挥最大肥效。

4 结 论

施用氮肥是当前生产条件下保障吉林省玉米高产的重要措施，但不同生态区玉米在产量水平、施氮效果与氮肥利用效率方面存在显著差异。产量以中部半湿润平原区最高，其次为东部湿润山区，西部半干旱平原区则相对偏低，而施氮的增产效果和氮肥利用率以东部地区相对较高。针对区域气候环境特点和玉米氮肥响应特征，建议中部地区以维持作物需求为标准适当减少施氮量，尤其是永吉、磐石、四平和九台等县市；东部地区可在现有基础上适度增加施氮量，同时配合其他栽培措施消减光温资源不足对产量的限制；西部地区应积极进行土壤培肥，并推广高效节水用水技术，发挥水氮耦合效应而促进高产高效。

参 考 文 献

[1] Tilman D. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. Proceedings of the National Academy of Sciencesof the United States of America, 1999, 96 (11): 5995—6000

[2] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospectsand prospects. Advances in Agronomy, 2005, 87: 86—156

[3] Ciampitti IA, Camberato JJ, Murrell ST, et al.Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I.Macronutrients. Agronomy Journal, 2013, 105 (3): 783—795

[4] Sindelar AJ, Lamb JA, Sheaffer CC, et al. Fertilizer nitrogen rate effects on nutrient removal by corn stover and cobs. Agronomy Journal, 2013, 105 (2): 437—445

[5] Toth V, Meszaros I, Veres S, et al.Effects of the available nitrogen on the photosynthetic activity and xanthophyll cycle pool of maize in field. Journal of Plant Physiology, 2002, 159 (6): 627—634

[6] Yu P, White PJ, Hochholdinger F, et al. Phenotypic plasticity of the maize root system in response to heterogeneous nitrogen availability. Planta, 2014, 240 (4): 667—678

[7] Ordóñez R A, Savin R, Cossani C M, et al. Yield response to heat stress as affected by nitrogen availability in maize. Field Crops Research, 2015, 183: 184—203

[8] Gao Q, Li C L, Feng G Z, et al. Understanding yield response to nitrogen to achieve high yield and high nitrogen use efficiency in rainfed corn. Agronomy Journal, 2012, 104 (1): 165—168

[9] Hou P, Gao Q, Xie R Z, et al. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China. Field Crops Research, 2012, 129: 1—6

[10] Shi Y, Wu W, Meng F, et al.Integrated management practices significantly affect N_2O emissions and wheat—maize production at field scale in the North China Plain. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2013, 95 (2): 203—218

[11] 张卫建. 对我国玉米绿色增产增效栽培技术的探讨：增密减氮. 作物杂志, 2015 (4): 1—4
Zhang W J. On the cultivation approach to green improvement of maize yield and N use efficiency in China: Dense planting with less N fertilizer (In Chinese). Crops, 2015 (4): 1—4

[12] Hartmann T E, Yue S C, Schulz R, et al. Yield and N use efficiency of a maize-wheat cropping system as affected by different fertilizer management strategies in a farmer's field of the North China Plain. Field Crops Research, 2015, 174: 30—39

[13] 吴良泉，武良，崔振岭，等.中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究. 土壤学报，2015，52（4）：802—817
Wu L Q，Wu L，Cui Z L，et al.Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2015，52（4）：802—817

[14] Ju X T，Liu X J，Zhang F S，et al.Nitrogen fertilization，soil nitrate accumulation，and policy recommendations in several agricultural regions of China. Ambio，2004，33：300—305

[15] 吉林省统计局. 吉林统计年鉴2014. 北京：中国统计出版社，2014
Bureau of Statistics of Jilin Province. Jilin Statistical Yearbook 2014（In Chinese）. Beijng：China Statistics Press，2014

[16] 吉林省人民政府. 吉林省主体功能区规划.（2013-11-06）［2016-01-05］. http：//www.jl.gov.cn/zjjl/fzgh_47966/
The Peoples Government of Jilin Province. The major function oriented zones planning of Jilin Province（In Chinese）.（2013-11-06）［2016-01-05］. http：//www.jl.gov.cn/zjjl/fzgh_47966/

[17] 闫孝贡，刘剑钊，张洪喜，等.吉林省春玉米大面积增产与资源增效限制因素评估. 吉林农业科学，2012，37（6）：9—11
Yan X G，Liu J Z，Zhang H X，et al. Assessment of limiting factors on high yield of large—Scale spring maize production and high efficiency of resource in Jilin Province（In Chinese）. Journal of Jilin Agricultural Sciences，2012，37（6）：9—11

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京：中国农业出版社，2005
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis（In Chinese）. Beijing：China Agriculture Press，2005

[19] Cassman K G，Peng S，Olk D C，et al.Opportunities for increased nitrogen—Use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. Field Crops Research，1998，56：7—39

[20] 王伟妮，鲁剑巍，鲁明星，等.湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究. 植物营养与肥料学报，2011，17（3）：545—553
Wang W N，Lu J W，Lu M X，et al.Effect of nitrogen fertilizer application and nitrogen use efficiencyof early，middle and late rice in Hubei Province（In Chinese）. Plant Nutrition and Fertilizer Science，2011，17（3）：545—553

[21] 张福锁，陈新平，陈清. 中国主要农作物施肥指南. 北京：中国农业大学出版社，2009
Zhang F S，Chen X P，Chen Q. Fertilization guidelines of main crops in China（In Chinese）. Beijing：China Agricultural University Press，2009

[22] 张智，王伟妮，李昆，等. 四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究. 土壤学报，2015，52（1）：234—241
Zhang Z，Wang W N，Li K，et al. Effects of nitrogen fertilization on rice different regions of Sichuan Province（In Chinese）.Acta Pedologica Sinica，2015，52（1）：234—241

[23] 赵兰坡，张志丹，王鸿斌，等.松辽平原玉米带黑土肥力演化特点及培育技术. 吉林农业大学学报，2008，30（4）：511—516
Zhao L P，Zhang Z D，Wang H B，et al. Fertility evolution characteristics and fertilizing technologies of black soil in the corn belt of the SongliaoPain（In Chinese）. Journal of Jilin Agricultural University，2008，30（4）：511—516

[24] 焉莉，王寅，冯国忠，等.吉林省农田土壤肥力现状及变化特征. 中国农业科学，2015，48（23）：4800—4810
Yan L，Wang Y，Feng G Z，et al. Status and change characteristics of farmland soil fertility in Jilin Province（In Chinese）. Scientia Agricultura Sinica，2015，48（23）：4800—4810

[25] 沈善敏. 无机氮对土壤矿化与固定的影响—兼论土壤氮的“激发效应”. 土壤学报，1986，23（1）：10—16
Shen S M. The effect of mineral nitrogen on the mineralization and immobilization of soil nitrogen-On the excitation effect of soil nitrogen（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，1986，23（1）：10—16

[26] Yin G H，Gu J，Zhang F S，et al.Maize yield response to water supply and fertilizer input in a semi—arid environment of Northeast China.PLoS One，2014，9（1）：e86099

[27] Lu X J，Li Z Z，Bu Q G，et al.Effects of rainfall harvesting and mulching on corn yield and water use in the corn belt of Northeast China. Agronomy Journal，2014，106（6）：2175—2184

[28] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报，2008，45（5）：778—783
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2008，45（5）：778—783

Differences in Yield Response and N Use Efficiency of Maize Crops in Different Ecological Zones of Jilin Province

WANG Yin[1] GUO Dan[1] GAO Qiang[1†] YAN Li[1] SONG Lixin[2] LIU Zhengang[2]

(1 *College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University /Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in the Commodity Grain Bases in Jilin Province, Changchun* 130118, *China*)

(2 *Soil and Fertilizer Station of Jilin Province, Changchun* 130012, *China*)

Abstract 【Objective】Jilin Province is one of the leading maize production regions in China, and could be divided into three ecological zones, i.e. Central semi-humid plain area (CSPA), Eastern humid mountainous area (EHMA) and Western semi-arid plain area (WSPA), based on their significant differences inenvironment includingtopography, landform, climate condition and vegetation. Interestingly, the maize crops growing in these eco-zones differ in yield, yield response to fertilizationand use efficiency of N fertilizer. But how it comes about is still not well understood. 【Method】Hence, a field experiment, coded as "3414", was conducted with plots distributed in all the eco-zones of Jilin Province as a part of the national soil-test-based fertilization recommendation program during the years of 2005–2013. The field experiment was designed to have two treatments, i.e. Treatment–N (No N fertilizer applied) and Treatment +N (N fertilizerapplied as recommended). The data of the two treatments were collectedfor analysis of yield response to fertilization and use efficiencies of N fertilizer of the crop relative to eco-zone, and their influencing factors. 【Result】Results show that the crop varied sharply in yield with the eco-zone, being the highest in the CSPA, medium in the EHMA, and the lowest in the WSPA. On average, the maize yield of Treatments –N was 8.1 t hm^{-2} in the CSPA (ranging from 3.1 to 13.5 t hm^{-2}), 7.3 t hm^{-2} in the EHMA (ranging from 2.4 to 12.7 t hm^{-2}) and 7.2 t hm^{-2} in the WSPA (ranging from 3.7 to 11.7 t hm^{-2}); while that of Treatments +N was 10.5 t hm^{-2} (ranging from 5.4 to 15.8 t hm^{-2}), 9.8 t hm^{-2} (ranging from 5.3 to 16.9 t hm^{-2}) and 9.4 t hm^{-2} (ranging from 4.3 to 14.9 t hm^{-2}) in the three ecological zones, respectively. Not only was maize yield significantly affected by ecological zone, yield responseof the crop to N fertilizer was too. The highest maize yield responses to N fertilizer were observed in the EHMA, being 2.44 t hm^{-2} and 38.4%, on average, in absolute and relative yield increase, respectively. Correspondingly, the absolute and relative yield increasewas 2.40 t hm^{-2} and 34.3%, respectively, in the CSPA and 2.21 t hm^{-2} and 33.4%, respectively, in the WSPA. Under the present maize production condition, N use efficiency was significantly higher in the EHMA than in the others. On average, agronomic efficiency (AE), partial factor productivity (PFP), and fertilizer contribution rate (FCR) of N fertilizer was 16.6 kg kg^{-1}, 65.9 kg kg^{-1} and 25.0%, respectively, in the EHMA13.6 kg kg^{-1}, 60.2 kg kg^{-1} and 22.8%, respectively, in the CSPA and 13.6 kg kg^{-1}, 58.2 kg kg^{-1} and 23.1%, respectively, in the WSPA. With themaize yield in Treatments–N rising, Treatments +N showed similar rising trends in yield, but declining ones in FCRin all the three eco-zones, but more significantly in theWSPA than in the others.The relationships fit the linear correlation and logarithmic regression models, respectively. The variability of maize yield of treatment +N and FCR with the yield oftreatment –N were relatively higher in the WSPA, compared with those in the EHMA and CSPA. 【Conclusion】In conclusion, N fertilizer for maize production in Jilin Province should be allocated and applied appropriately in the light of regional environmental conditions and characteristics of the crop

responding to N fertilization. It is suggested that the current N application rate be reduced properly in line with the demand of the crop for N in the CSPA, while it be increased slightly in combination with effective cultivation practices in the EHMA, aiming to counter the yield limiting factors, such as insufficient light and low temperature, and in the WSPA, the technology of efficient and water saving irrigation be widely extrapolated in addition to soil fertility building to bring the coupling effects of water and nitrogen into full play and thereby to achieve high crop yield and high N efficiency.

Key words　Jilin Province; Eco-zone; Regional differences; N fertilizer; Grain yield; Fertilizer use efficiency

（责任编辑：陈荣府）