

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第 52 卷 第 4 期

Vol.52 No.4



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

目 次

综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田N₂O和CH₄排放的影响····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对¹⁵N利用及土壤累积的影响····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片: 离子型稀土矿废弃地全景 (由汤叶涛、刘文深提供)

DOI: 10.11766/trxb201409230480

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究*

吴良泉^{1, 2} 武良¹ 崔振岭¹ 陈新平^{1†} 张福锁¹

(1 中国农业大学资源环境与粮食安全研究中心, 北京 100193)

(2 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要 研究中国玉米不同区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方, 为引导区域科学施肥和复合肥产品优化提供科学依据。总结分析 2005—2010 年在全国玉米主产区进行的 1 752、7 081 和 6 328 组氮、磷和钾肥肥效试验并参考有关文献资料的基础上, 将我国玉米主产区分为 4 个大区和 12 个施肥亚区, 以氮肥总量控制、磷肥恒量监控、钾肥肥效反应的技术原理计算不同区域的氮磷钾肥的优化用量, 并根据“大配方、小调整”的技术思路确定区域肥料配方。结果表明, 东北春玉米区 (I) 和西北春玉米区 (III) 的产量水平较高 (9.0~10.5 t hm⁻²), 华北夏玉米区 (II) 和西南玉米区 (IV) 的产量水平相对较低 (7.5~8.3 t hm⁻²)。12 个施肥亚区的氮肥推荐用量平均为 N 181 kg hm⁻², 其中东北冷凉春玉米区 (I-1) 最低 (N 150 kg hm⁻²), 西北绿洲灌溉春玉米区 (III-3) 最高 (N 219 kg hm⁻²); 磷肥推荐用量平均为 P₂O₅ 75 kg hm⁻², 其中华北中北部夏玉米区 (II-1) 最低 (P₂O₅ 46 kg hm⁻²), 西北绿洲灌溉春玉米区 (III-3) 最高 (P₂O₅ 123 kg hm⁻²); 钾肥推荐用量平均为 K₂O 54 kg hm⁻², 其中西北绿洲灌溉春玉米区 (III-3) 最低 (K₂O 30 kg hm⁻²), 华北南部夏玉米区 (II-2) 最高 (K₂O 64 kg hm⁻²)。根据不同生态区域的养分推荐用量及气候、栽培和土壤条件的差异, 在 12 个施肥亚区总共确定了 16 个区域肥料配方, 包括 12 个基追结合施肥下的配方和 4 个一次性施肥配方。区域间养分推荐用量较好反映了区域土壤供肥能力、肥效反应和产量水平的特异性, 我国玉米区域大配方的制定不仅为区域肥料配方生产提供技术支撑, 也为其他相关作物的区域配肥提供理论参考。

关键词 区域; 养分推荐用量; 大配方; 小调整; 玉米

中图分类号 S143 **文献标识码** A

化肥作为重要的农业生产资料, 对保障粮食安全起着举足轻重的作用^[1]。然而, 近年来由于不合理施用化肥, 导致的肥料效率降低和环境污染 (如水体富营养化、温室气体排放和土壤酸化等) 等一系列问题, 引起国内外的高度关注^[2-6]。大量研究表明不同区域之间施肥水平差异较大, 区域间养分分配不合理的问题较为突出^[7-11]。优化不同区域的肥料用量成为保障粮食安全和保护环境的必然要求。20 世纪 80 年代, 由中国农业科学院土壤肥料研究所主持进行的全国化肥区划, 主要依据不同地区化肥施用状况和肥效特点以及土地利用方向, 提出了不同区域的化肥合理使用要求, 这对国家有计划地安排化肥生产、分配和施用提供了科学依

据^[12]。近 20 多年来, 我国化肥用量持续高速增长, 作物产量、种植结构和作物品种等发生了很大变化, 同时养分管理目标由单一增产向高产、环保、优质等多目标综合, 区域尺度上的养分管理工作必须引入新的思路、方法和手段。

另一方面, 近年来中国肥料正快速复合化, 复合肥在我国农业生产中起到越来越重要的作用。然而, 当前的复合肥产品配方尚不能很好地满足农业需求。例如, 李亮科等^[13]通过全国六个省的农户调查研究显示, 当前的复合 (混) 肥产品设计部分地脱离了土壤和作物需求, 施用复合肥导致养分投入数量和用肥成本增加, 但没有明显的增产效果; 王兴仁等^[14]认为目前市场上流行的专用复混

* 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203013, 201103003) 和国家玉米产业技术体系项目 (CARS-02-24) 资助

† 通讯作者, E-mail: chenxp@cau.edu.cn

作者简介: 吴良泉 (1987—), 男, 福建泉州人, 博士研究生, 主要从事养分资源管理研究。E-mail: liangquan01@163.com

收稿日期: 2014-09-23; 收到修改稿日期: 2015-01-29

肥基本上是按照作物需肥总量设计而未考虑到养分的基追分配，这在实际应用中造成了养分供应的失衡；张卫峰等^[15]研究表明，我国复合肥产品以高浓度、通用型和一次性基施型的配方为主，与农业生产需求相脱节。因此，通过优化区域复合肥配方以匹配作物的需求和土壤的属性对于实现优化施肥具有重要意义。然而，由于缺乏区域尺度上大量的试验数据支撑，目前大多数研究还停留在田块、村镇、县域尺度上。

玉米是集粮食、饲料和工业原料为一体的优势作物，2012年全国玉米总产量达到 $20\ 812 \times 10^4$ t（占全国粮食总产量的35.3%），已超过水稻和小麦成为第一大粮食作物（<http://www.gov.cn/jrzq/>），预计到2020年，全国新增 $5\ 000 \times 10^4$ t粮食年生产能力，其中玉米将分担53%以上的份额^[16]，玉米在未来保障我国粮食安全中具有重要的地位和作用。然而，当前玉米产区的施肥问题仍较突出，五个省的大样本农户调查数据表明玉米主产区的平均氮肥用量（包括有机肥）为 $N\ 257\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ，氮肥偏生产力仅为 $26\ \text{kg}\ \text{kg}^{-1}$ ，而优化条件下可达 $57\ \text{kg}\ \text{kg}^{-1}$ ^[17]。相关研究也表明，目前全国平均钾肥用量为 $K_2O\ 31\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ，总体水平偏低，且不同区域的钾肥用量差异较大^[18]。目前国内学者主要从县域等尺度上采用信息技术对玉米区域优化施肥用量及肥料配方进行了一些研究^[19-23]，但从全国尺度上仍缺乏系统地报道玉米不同生态区域的氮磷钾肥优化用量及区域大配方。我国玉米主产区区域跨度大，纵跨寒温带、暖温带、亚热带和热带生态区，各地的气候、栽培和土壤条件等存在很大的差异，这些差异如何影响玉米对施肥的反应？区域间是否具有规律性的变化？这些问题均不明确。

本研究以我国玉米作为研究对象，整理分析了2005—2010年进行的1 752、7 081和6 328组氮、磷和钾肥肥效试验，这些试验数据覆盖了全国玉米的主要产区，较大范围地反映了不同的生态条件、多年的气候条件和主要的管理措施，具有较好的代表性。本文首先根据气候、栽培和土壤等因素对我国玉米主产区进行施肥分区，在分区的基础上，通过对大样本试验结果的分析，以氮肥总量控制^[24-25]、磷肥恒量监控^[24-25]、钾肥肥效反应的技术原理计算不同区域的氮磷钾肥的推荐用量，并根据“大配方、小调整”^[24-26]的技术思路确定我国玉米不同

生态区域的肥料配方及施肥建议，以期为指导区域施肥技术和复合肥产品优化提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 中国玉米施肥分区

根据我国玉米的区域分布特点，本研究在参考前人研究的基础上^[27-28]，对大区的划分和分界进行适当调整，根据区域特点和生产布局（主要基于GIS的我国县域农业统计数据库）将我国玉米主产区分为4个大区，即：I 东北春玉米区、II 华北夏玉米区、III 西北春玉米区和IV 西南玉米区，这4个大区覆盖了全国玉米总面积的96%以上。在大区划分的基础上，基于GIS（地理信息系统）的我国县域农业统计数据库，在参考相关文献资料基础上^[27-34]，综合分析了大区内的气候条件、栽培条件、地形和土壤条件进行亚区的划分。亚区的划分上保持了县界的完整性，总共分为12个亚区（如图1所示）：（1）根据玉米生长季有效积温、降水和土壤类型等因素将东北春玉米区划分为4个亚区：I-1东北冷凉春玉米区（此区玉米生长季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温小于 $2\ 900\ ^\circ\text{C}$ ）、I-2东北半湿润春玉米区（此区玉米生长季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温介于 $2\ 900 \sim 3\ 400\ ^\circ\text{C}$ ，年降水量介于 $450 \sim 750\ \text{mm}$ ，土壤肥力较高，土壤类型以黑土和白浆土为主）、I-3东北半干旱春玉米区（此区年平均降水量小于 $450\ \text{mm}$ ，土壤类型以风沙土为主，保水保肥性能较差）、I-4东北温暖湿润春玉米区（此区玉米生长季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温大于 $3\ 400\ ^\circ\text{C}$ ，年平均降水量介于 $650 \sim 950\ \text{mm}$ ）；（2）根据玉米生长季有效积温和土壤条件等因素将华北夏玉米区分为2个亚区：II-1华北中北部夏玉米区（此区玉米生长季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温介于 $1\ 300 \sim 1\ 900\ ^\circ\text{C}$ ，土壤肥力较高）、II-2华北南部夏玉米区（此区玉米生长季 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温介于 $1\ 900 \sim 2\ 100\ ^\circ\text{C}$ ，土壤肥力较II-1低）；（3）根据有无灌溉条件和降水量等因素将西北春玉米区分为3个亚区：III-1西北雨养旱作春玉米区（此区以旱作玉米为主，年降水量介于 $400 \sim 600\ \text{mm}$ ）、III-2北部灌溉春玉米区（此区以灌溉玉米为主，年降水量介于 $200 \sim 400\ \text{mm}$ ，包括西辽河灌区和引黄灌区，这两个区域的土壤肥力水平较为相似，产量水平也较为接近）、III-3西北绿洲灌溉春玉米区（此区以灌溉玉米为主，年降水量小于 $200\ \text{mm}$ ）；（4）根据地形条件和土壤类型

等因素将西南玉米区分为3个亚区：IV-1四川盆地玉米区（此区以四川盆地为主，主要土壤类型为紫色土）、IV-2西南山地丘陵玉米区（此区以山地和丘陵为主，主要土壤类型为黄壤和红壤）、IV-3西南高原玉米区（该区以高原为主，主要土壤类型为红壤和赤红壤）。这12个亚区（I-1、I-2、I-3、I-4、II-1、II-2、III-1、III-2、

III-3、IV-1、IV-2、IV-3）的玉米播种面积占全国玉米播种面积的百分比分别为4.3%、14.3%、4.5%、6.1%、24.6%、5.8%、10.0%、7.0%、2.5%、3.4%、7.6%和5.9%；总产所占百分比分别为4.3%、16.5%、4.5%、6.4%、26.5%、5.5%、9.2%、7.9%、2.7%、3.2%、7.0%和5.0%。

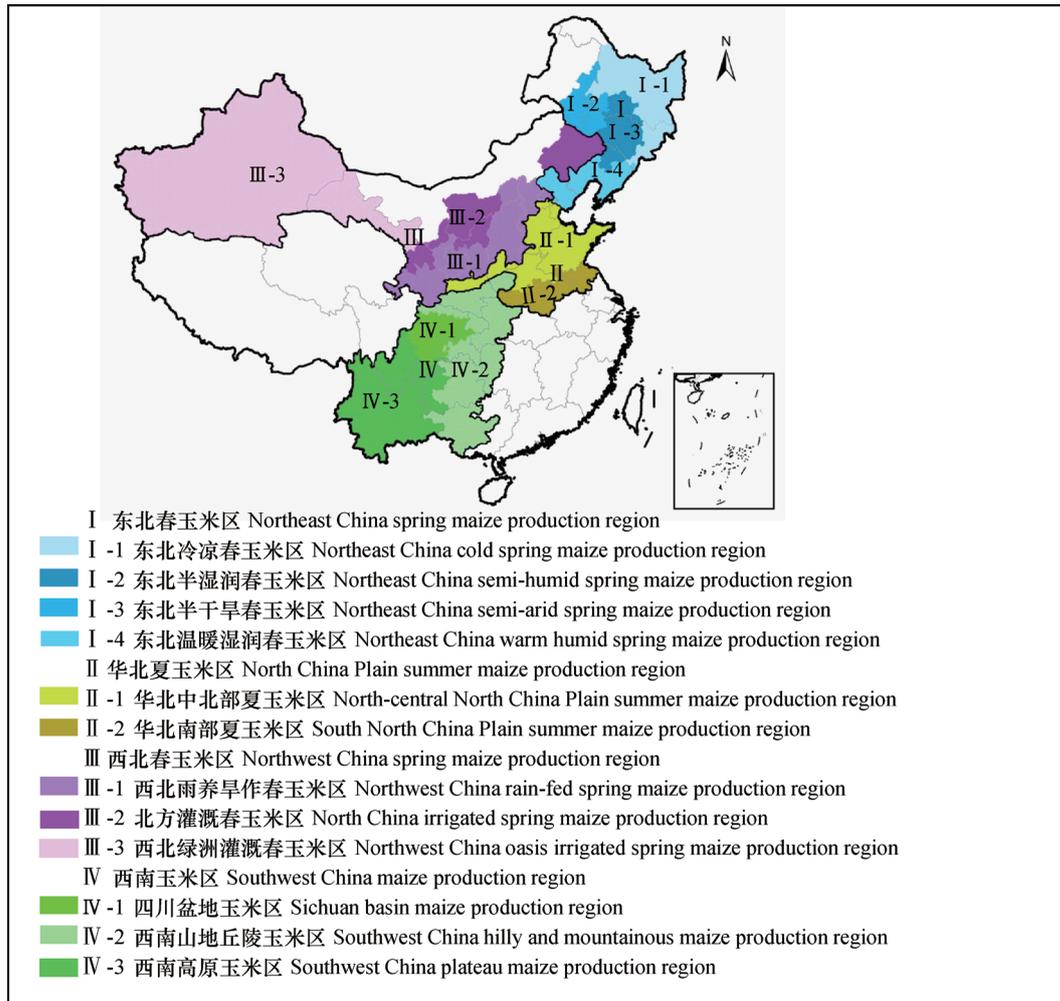


图1 中国玉米施肥分区图

Fig. 1 The regionalization of the maize fertilization in China

1.2 试验处理

在玉米施肥分区的基础上，为分析不同区域的肥效反应和确定养分推荐用量，本研究采用了来自于2005—2010年农业部测土配方施肥项目、全国养分资源管理协作网及公益性行业（农业）科研专项的1 752、7 081和6 328组氮、磷和钾肥肥效试验，各区域样本数如表1所示。其中，（1）所有氮肥肥效试验点均包含4个氮水平（即N₀、N₁、N₂和N₃）。N₀为不施肥，N₂是根据当地专家推荐确定的

优化施用量近似值，N₁=N₂×0.5，N₃=N₂×1.5。不同试验点的N₂水平施氮量有所差异，变幅为N 126~230 kg hm⁻²，平均值为N 187 kg hm⁻²。磷和钾肥的用量根据当地专家推荐确定，其供应量满足作物的正常生长需求。（2）磷肥肥效试验采用了不施磷对照和施磷区处理，重点分析区域玉米对磷肥的产量反应及其与土壤有效磷含量的关系。不同试验点的施磷区磷肥用量是根据当地专家推荐确定的优化施用量近似值，不同试验点间有所差异，

变幅为 P_2O_5 59 ~ 151 kg hm^{-2} ，平均为 P_2O_5 92 kg hm^{-2} 。氮和钾肥的用量根据当地专家推荐确定，其供应量满足作物的正常生长需求。（3）钾肥肥效试验中有5 134组试验包含4个钾水平（即 K_0 ， K_1 ， K_2 和 K_3 ）；1 194组试验包含2个钾水平（即 K_0 和 K_2 ）。 K_0 为不施肥， K_2 是根据当地专家推荐确定的优化施钾量近似值， $K_1 = K_2 \times 0.5$ ， $K_3 = K_2 \times 1.5$ 。不同试验点的 K_2 水平施钾量平均为 K_2O 91 kg hm^{-2} （变幅为 K_2O 30 ~ 226 kg hm^{-2} ）。氮和磷肥的用量根据当地专家推荐确定，其供应量满足作物的正常生长需求。所有试验均不施用有机肥，小区面积均在30 m^2 以上，随机区组排列。

1.3 取样、样品分析和测产

在试验开始实施之前，各试验取耕层（0 ~ 20 cm）土壤样品，风干过筛后用来测定pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量。土壤pH采用电位法，有机质采用外加热重铬酸钾容量法，碱解氮采用1.0 mol L^{-1} NaOH扩散法，有效磷采用0.5 mol L^{-1} $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法，速效钾采用1.0 mol L^{-1} NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定^[35]。在成熟期，每个小区划取2.5 m × 8 m的测产样方，人工进行小区测产，玉米的产量换算成含有15.5%水分的标准产量。

1.4 数据处理

1.4.1 不同区域氮肥总量控制的计算方法 本研究依据氮肥总量控制的方法确定不同区域氮肥推荐用量。氮肥总量控制^[24-25]是根据一定土壤条件、气候条件和空间范围内的土壤潜在氮素供应水平总体稳定的特点，将一定区域内作物全生育期氮肥施用总量控制在一个合理范围内。总量控制是基于区域内多年多点的肥效反应结果确定，既能保证作物产量，又不至于过量施氮造成环境污染。区域氮肥总量控制的确定方法参考了美国爱荷华州立大学（Iowa State University）采用的MRTN（Maximum return to N，区域最大收益施氮量）区域氮肥推荐方法^[36]。根据Sawyer等所描述的计算步骤来确定不同区域的氮肥用量^[36]，如下所示：

（1）对于每一个肥效试验，应用SAS软件以非线性回归方法拟合氮肥用量与产量之间的关系（所选拟合方程分别为二次曲线模型、二次曲线+平台模型和线性+平台模型进行拟合，以决定系数（ R^2 ）最大的为最优方程）；（2）应用每一个肥效试验拟合所得的最优方程来计算不同施氮量下（以

1 kg hm^{-2} 增量，变幅为0 ~ 240 kg hm^{-2} ）的增产量（施氮下的产量-不施氮的产量）、毛收入（增产量 × 玉米籽粒单价）、氮肥成本（施氮量 × 氮肥单价）和净收益（毛收入-氮肥成本）。其中氮（N）肥价格和玉米价格分别为4.87、2.37 Yuan kg^{-1} ，两者价格比为2.05（氮肥和玉米价格均来源于神农网<http://www.sn110.com/>，为2012年4个季度价格的平均值）；（3）对所有试验点不同氮量下的净收益进行平均并建立区域氮肥用量与净收益之间的函数关系，则最大净收益下的氮肥用量为氮肥推荐用量。

1.4.2 不同区域磷肥肥效反应及基于恒量监控的磷肥推荐方法 本研究以相对产量作为表征磷肥肥效效应的指标。相对产量=缺磷区产量/全肥区产量 × 100%。本文基于磷肥恒量监控的方法确定不同区域磷肥推荐用量。磷肥恒量监控是指通过磷肥的施用将土壤有效磷含量持续控制在能够持续获得高产且不造成环境风险的适宜范围内，并在一定的时空范围内保持施磷量的相对稳定。基于养分平衡原理和土壤测试确定施肥管理策略：在土壤有效磷养分处于极高或较高水平时（大于环境风险阈值），采取控制策略，施肥量小于作物带走量；在土壤有效磷养分处于适宜水平时，采取维持策略，施肥量等于作物带走量；在土壤有效磷养分处于较低或极低水平时，采取提高策略，施肥量大于作物带走量。该方法协调了作物高产、肥料高效和土壤培肥三方面关系，具有较强科学性，有利于农业可持续发展；同时又简便可行，便于在生产实践中应用，因而具有广阔的应用前景^[24-25]。根据恒量监控的原则，本研究中当相对产量 < 85%（或土壤有效磷 < 20 mg kg^{-1} ），磷肥用量为作物带走量的1.3倍；当相对产量介于85% ~ 90%（或土壤有效磷介于20 ~ 25 mg kg^{-1} ），磷肥用量为作物带走量的1.15倍。由于考虑到Ⅱ-1华北中北部夏玉米区为冬小麦-夏玉米轮作体系，且该区域的土壤磷水平处于较高水平（23.5 mg kg^{-1} ），磷肥推荐上应将更多的磷肥应用到冬小麦季上，因此，将冬小麦季磷肥用量调整为作物带走量的1.3倍，而夏玉米季磷肥用量为作物带走量；当相对产量 > 90%（或土壤有效磷 > 25 mg kg^{-1} ），磷肥用量为作物带走量。有关参数的计算如下所示：

目标产量为试验条件下优化施肥区产量的平均，为了实际操作中方便，对目标产量进一步取整

简化以便于在生产上应用,如表2所示。

不同生态区域玉米单位产量下需磷量由2000—2012年本课题组研究数据和文献调研数据计算获得。东北春玉米区每生产百千克籽粒需磷量(P_2O_5)为0.83 kg ($n=426$, n 为样本数),西北春玉米区为0.90 kg ($n=39$),华北夏玉米区为0.87 kg ($n=429$) (由于II-1华北中北部夏玉米区玉米秸秆大部分还田,因此,在计算需磷量时仅考虑籽粒带走的磷,按0.56 kg计),西南玉米区为0.82 kg ($n=238$)。

1.4.3 不同区域钾肥推荐用量的计算方法 本研究中不同区域钾肥的推荐是依据钾肥肥效反应的方法,将钾肥优先施到增产效应明显的区域和作物上。钾肥推荐应以田间试验为基础,通过施肥量与作物产量反应的数据关系计算最佳经济施肥量,这

既能保证作物产量,同时有效地将肥料用量控制在合理的范围内,达到节肥、稳产的目的。

本研究中以每个试验中的不施钾区作为对照,以100%计。钾肥的增产效应=施钾区产量/不施钾区产量 $\times 100\%$;将每个区域内的大量钾肥肥效试验进行整合分析,选用“线性+平台”模型建立施钾量与产量效应(钾肥的增产效应)之间的关系,确定区域最佳施肥量,如下所示:

$$y=a+bx \quad (x < c)$$

$$y=y_p \quad (x \geq c)$$

式中, y 为钾肥的增产效应(%); x 为钾肥用量($kg \text{ hm}^{-2}$); a 、 b 分别为不施肥时产量和线性系数; c 为钾肥推荐用量,由直线和平台的交点求得; y_p 为平台增产效应。

1.4.4 区域大配方设计及小调整方案 “大配

表1 不同区域氮磷钾肥效试验样本数

Table 1 Number of samples of on-farm nitrogen, phosphorus and potassium experiments in 12 maize sub-regions

区域 Regions	氮肥肥效试验 ^①	磷肥肥效试验 ^②	钾肥肥效试验 ^③	区域 Regions	氮肥肥效试验 ^①	磷肥肥效试验 ^②	钾肥肥效试验 ^③
I-1	132	924	239	III-2	309	1 102	1 094
I-2	62	645	630	III-3	17	51	51
I-3	126	632	632	IV-1	78	175	185
I-4	77	225	217	IV-2	344	787	777
II-1	353	1 552	1 551	IV-3	94	503	490
II-2	60	101	101	总计Sum	1 752	7 081	6 328
III-1	100	384	361				

①Nitrogen experiments, ②Phosphorus experiments, ③Potassium experiments

方、小调整”区域配肥技术是在归纳区域作物生产体系与种植制度特点及土壤养分供应特点等共性规律的基础上,根据养分资源综合管理相关技术原理确定区域氮、磷、钾及中微肥的适宜用量、比例以及相应的施肥技术,并结合工艺与市场研发区域配方肥料作为技术载体,同时配套相应的施肥技术和农化服务,实现区域高产、优质、资源高效和环境保护的目的;在区域大配方的基础上,针对部分区域或田块,还可根据产量水平、气候/土壤条件、作物长势、土壤测试和植株营养诊断等调整用量或配施一定的单质肥料,即“小调整”,以实现更为精确的养分管理^[24-26]。

(1) 大配方设计。以“氮肥总量控制”、

“磷肥恒量监控”、“钾肥肥效反应”为推荐施肥基本原则,提出不同区域氮、磷、钾的适宜用量,在此基础上开展大配方设计。本研究基于重点开发基肥型配方的配肥思路^[14],即将全生育周期所需要的全部磷钾肥和一部分氮肥作为基肥,其余的氮肥作为追肥。根据基肥中氮、磷、钾的配比提出适宜浓度的配方,并配套相应的施肥建议。

氮肥基追比例的确定:在I东北春玉米区、III西北春玉米区和II-1华北中北部夏玉米区的基追比例为4:6;西南玉米区和II-2华北南部夏玉米区的基追比例为5:5。

一次性施肥方案:在保肥性较好的区域(I-2东北半湿润春玉米区)、雨养旱作的区域

(Ⅲ-1西北雨养旱作春玉米区)、生育期较短的夏玉米种植区(Ⅱ-1华北中北部夏玉米区、Ⅱ-2华东南部夏玉米区)设计一次施肥的配方。

总养分浓度的设计：本研究以总养分浓度(N+P₂O₅+K₂O)45%为例(除了东北半湿润春玉米区的一次性施肥配方按52%外——考虑了当前用肥习惯)。

(2)小调整方案。根据产量水平调整配方肥用量：本研究以试验条件下可实现的产量(即,同一区域不同试验点优化施肥处理产量的平均)作为区域产量目标;并以目标产量为中心,分成4个产量等级:①中高产水平、②高产水平、③超高产水平、④中低产水平,每个产量等级的变幅为1.5~2.3 t hm⁻²(如表3所示);随着产量水平的提高或降低相应地增加或减少其肥料用量。

缓控释氮素的添加需求:针对一次性施肥方案,在高产条件下,东北春玉米区(>10.5 t hm⁻²),要求添加30%以上释放期为50~60天的缓控释氮素;西北春玉米区(>10.5 t hm⁻²)和华北夏玉米区(>9.8 t hm⁻²),建议添加30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素;西北春玉米区(9~10.5 t hm⁻²)和华北夏玉米区(8.3~9.8 t hm⁻²),可以添加30~40%释放期为50~60天的缓控释氮素。

2 结 果

2.1 不同区域氮肥推荐用量

由MRTN法计算得到不同区域氮肥的推荐用量(如图2C所示)。以东北冷凉春玉米区(Ⅰ-1)为例(如图2A所示),由132个氮肥肥效试验进行整合分析得到区域内不同施氮量与净收入(净收入=毛收入-氮肥成本)之间的函数关系($y = -0.2258x^2 + 67.648x + 7E-1$),由此计算得到最大收益下的施氮量,即区域氮肥推荐用量为N 150 kg hm⁻²,在该施氮水平下对应的产量为8.85 t hm⁻²,毛收入为5 796 Yuan hm⁻²,氮肥成本为730 Yuan hm⁻²,净收入为5 067 Yuan hm⁻²;同样,由353个氮肥肥效试验进行整合分析得到华北中北部夏玉米区(Ⅱ-1)的区域氮肥推荐用量为N 178 kg hm⁻²,在该施氮水平下对应的产量为8.13 t hm⁻²,毛收入为3 890 Yuan hm⁻²,氮肥成本为855 Yuan hm⁻²,净收入为3 025 Yuan hm⁻²(如图2B所示)。12个施肥亚区的氮肥推荐用量(以纯N计)变幅为150~219 kg hm⁻²,加权平均为181 kg hm⁻²。区域间的推荐用量存在一定差异,在大区上东北春玉米区(Ⅰ)的推荐用量(150~188 kg hm⁻²)略低于其他区域;在亚区上,西北绿洲灌溉春玉米区

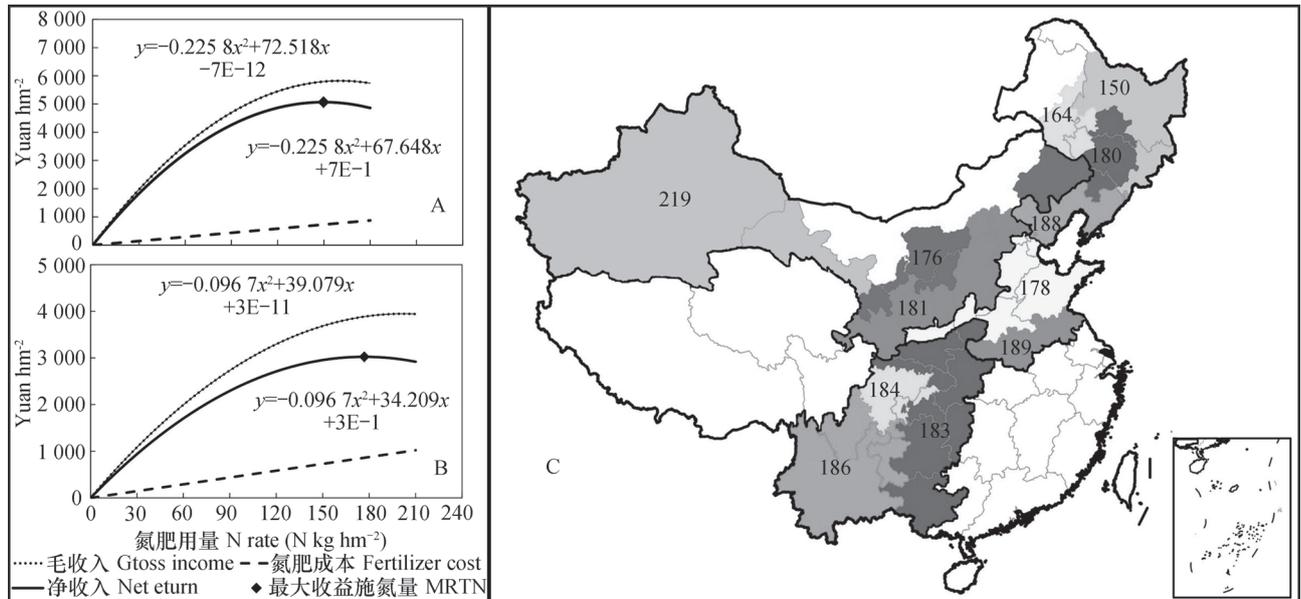


图2 东北冷凉春玉米区(A)和华北中北部夏玉米区(B)玉米毛收入、氮肥成本和净收入与氮肥用量的关系及不同区域氮肥推荐用量(C, N kg hm⁻²)

Fig. 2 Relationships of gross income of maize, N fertilizer cost and net return with N rates in Sub-region I-1 (A) and Sub-region II-1 (B) and recommended N rates for 12 maize Sub-regions in China (C, N kg hm⁻²)

(III-3) 最高 (219 kg hm⁻²), 华北南部夏玉米区 (II-2)、东北温暖湿润春玉米区 (I-2) 和西南高原玉米区 (IV-3) 次之 (分别为189、188和186 kg hm⁻²), 东北冷凉春玉米区 (I-1) 和东北半干旱春玉米区 (I-3) 较低 (分别为150和164 kg hm⁻²), 其他区域的推荐量集中在180 kg hm⁻² 左右。

2.2 不同区域磷肥推荐用量

从表2可以看出, 不同区域的土壤磷养分状况与相对产量之间直接相关, 随着土壤有效磷的增加, 缺磷区相对产量呈增加趋势 (如表2和图4所示)。不同区域的目标产量存在一定的差异。东北春玉米区 (I) 和西北春玉米区 (III) 的目标产量较高 (9~10.5 t hm⁻²), 华北夏玉米区 (II) 和西南玉米区 (IV) 的目标产量相对较低 (7.5~8.3 t hm⁻²)。其中东北半湿润春玉米区 (I-2)、西北绿洲灌溉春玉米区 (III-3) 和北方灌溉春玉米区 (III-2) 的目标产量较高 (分别为10.5、10.5和9.8 t hm⁻²); 东北冷凉春玉米区 (I-1)、东北

半干旱春玉米区 (I-3)、东北温暖湿润春玉米区 (I-4) 和西北雨养旱作春玉米区 (III-1) 的目标产量次之 (9 t hm⁻²); 华北中北部夏玉米区 (II-1) 和西南高原玉米区 (IV-3) 的目标产量较低 (8.3 t hm⁻²); 华北南部夏玉米区 (II-2)、四川盆地玉米区 (IV-1) 和西南山地丘陵玉米区 (IV-2) 的目标产量最低 (7.5 t hm⁻²)。

根据恒量监控的原则, 对于缺磷区相对产量 <85% (或土壤有效磷 <20 mg kg⁻¹) 的区域 (包括 I-3 东北半干旱春玉米区、III-2 北方灌溉春玉米区、III-3 西北绿洲灌溉春玉米区和 IV-1 四川盆地玉米区), 采取较快提高土壤肥力的策略, 这些区域的磷肥用量为作物带走量的1.3倍; 对于缺磷区相对产量介于85%~90% (或土壤有效磷介于20~25 mg kg⁻¹) 的区域 (包括 II-2 华北南部夏玉米区、III-1 西北雨养旱作春玉米区、IV-2 西南山地丘陵玉米区和 IV-3 西南高原玉米区), 采取适当提高肥力的策略, 磷肥用量为作物带走量的1.15倍 (由于考虑到 II-1 华北中北部夏玉米区为冬小

表2 不同区域磷肥推荐用量

Table 2 Recommended P rates for different sub-regions in China

区域 Regions	有效磷 Olsen-P (mg kg ⁻¹)	相对产量 Relative yield (%)	目标产量 Target yield (t hm ⁻²)	施肥策略 Strategy of P recommendation	磷肥推荐用量 Optimal P rate (P ₂ O ₅ kg hm ⁻²)
I-1	30.4 ± 17.8	90.9	9.0	等于作物带走量 ^①	75
I-2	28.3 ± 17.7	88.8	10.5	等于作物带走量 ^①	87
I-3	15.6 ± 9.3	82.7	9.0	等于作物带走量 × 1.3 ^②	97
I-4	27.5 ± 20.8	92.3	9.0	等于作物带走量 ^①	75
II-1	23.5 ± 16.0	89.7	8.3	等于作物带走量 ^{1) ①}	46
II-2	16.2 ± 6.4	87.2	7.5	等于作物带走量 × 1.15 ^③	74
III-1	20.0 ± 15.1	90.4	9.0	等于作物带走量 × 1.15 ^③	93
III-2	13.1 ± 11.1	82.8	9.8	等于作物带走量 × 1.3 ^②	114
III-3	16.3 ± 10.0	82.3	10.5	等于作物带走量 × 1.3 ^②	123
IV-1	14.5 ± 13.3	82.6	7.5	等于作物带走量 × 1.3 ^②	80
IV-2	19.1 ± 14.9	86.4	7.5	等于作物带走量 × 1.15 ^③	71
IV-3	22.3 ± 18.1	88.0	8.3	等于作物带走量 × 1.15 ^③	78

注: 1) II-1 华北中北部夏玉米区为冬小麦-夏玉米轮作体系, 磷肥推荐上将冬小麦-夏玉米视为一个整体, 将更多的磷应用到冬小麦季上, 因此, 冬小麦季磷肥用量为作物带走量的1.3倍, 夏玉米季磷肥用量为作物带走量 Note: 1) A winter wheat-summer maize rotation system was adopted in the North-central North China Plain summer maize region (II-1), P recommendation deemed the two crops as a whole, with more P allocated to winter wheat because winter wheat was more sensitive to P than summer maize: The recommended P rate for winter wheat was 130% of the P removal with the crop, while the recommended P rate for summer maize was just the same as the crop P removal. ①P rate = above-ground P uptake, ②P rate = above-ground P uptake × 1.3, ③P rate = above-ground P uptake × 1.15

麦-夏玉米轮作体系，且该区域的土壤磷水平处于较高水平（ 23.5 mg kg^{-1} ），磷肥推荐上应将更多的磷肥应用到冬小麦季上，因此，将冬小麦季磷肥用量调整为作物带走量的1.3倍，而夏玉米季磷肥用量为作物带走量；对于缺磷区相对产量 $>90\%$ （或土壤有效磷 $>25 \text{ mg kg}^{-1}$ ）的区域（包括 I-1 东北冷凉春玉米区、I-2 东北半湿润春玉米区和 I-4 东北温暖湿润春玉米区），采取维持当前土壤肥力的策略，磷肥用量为作物带走量；相应地，12个施肥亚区的磷肥推荐用量（以 P_2O_5 计）的范围为 $46 \sim 123 \text{ kg hm}^{-2}$ ，加权平均为 75 kg hm^{-2} 。西北春玉米区（III）的磷肥推荐用量最高（ $93 \sim 123 \text{ kg hm}^{-2}$ ），东北春玉米区（I， $75 \sim 97 \text{ kg hm}^{-2}$ ）和西南玉米区（IV， $71 \sim 80 \text{ kg hm}^{-2}$ ）次之，华北夏玉米区最低（II， $46 \sim 74 \text{ kg hm}^{-2}$ ）。

2.3 不同区域钾肥推荐用量

在这12个施肥亚区，“线性+平台”模型均能够很好地拟合增产效应与钾肥用量的关系（如图3所示），总体而言，我国玉米施用钾肥的增产幅度为 $7\% \sim 14\%$ 。根据“线性+平台”模型计算得到不同区域的钾肥最佳用量（以 K_2O 计），其变化范围在 $30 \sim 64 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间，加权平均为 54 kg hm^{-2} 。东北冷凉春玉米区（I-1）、东北半湿润春玉米区（I-2）、东北半干旱春玉米区（I-3）和东北温暖湿润春玉米区（I-4）的钾肥最佳用量分别为 54 、 60 、 53 和 57 kg hm^{-2} ；华北中北部夏玉米区（II-1）和华北南部夏玉米区（II-2）的钾肥最佳用量分别为 63 和 64 kg hm^{-2} ；西北雨养旱作春玉米区（III-1）、北方灌溉春玉米区（III-2）和西北绿洲灌溉春玉米区（III-3）的钾肥最佳用

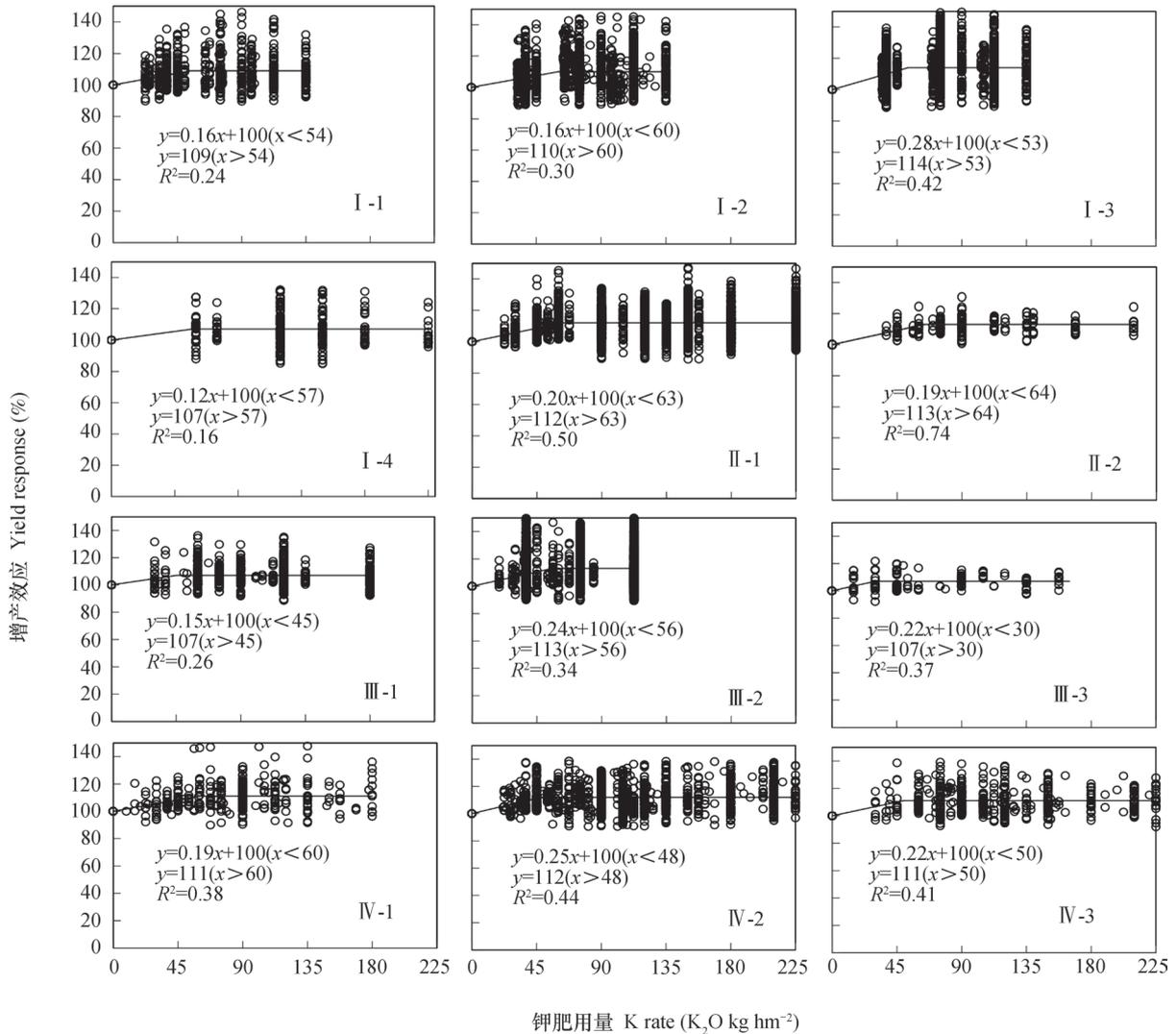


图3 不同区域钾肥用量与增产效应之间的关系

Fig. 3 Yield response and K application rate in the 12 maize sub-regions in China

量分别为45、56和30 kg hm⁻²；四川盆地玉米区（IV-1）、西南山地丘陵玉米区（IV-2）和西南高原玉米区（IV-3）的钾肥最佳用量分别为60、48和50 kg hm⁻²。

2.4 不同区域的大配方及小调整方案

如表3所示，针对全国玉米12个施肥亚区总共设计了16个肥料配方，并且不同区域的肥料配方有明显差异。其中包括基追结合施肥方式下的配方12个：东北冷凉春玉米区（I-1）、东北半湿润春玉米区（I-2）、东北半干旱春玉米区（I-3）和东北温暖湿润春玉米区（I-4）的配方分别14-18-13、15-18-12、13-20-12和17-17-12；华北中北部夏玉米区（II-1）和华北南部夏玉米区（II-2）的配方为18-12-15和18-15-12；西北雨养旱作春玉米区（III-1）、北方灌溉春玉米区（III-2）和西北绿洲灌溉春玉米区（III-3）的配方分别为15-20-10、13-22-10和17-23-6，四川盆地玉米区（IV-1）、西南山地丘陵玉米区（IV-2）和西南高原玉米区（IV-3）的配方分别为17-16-12、20-15-10和19-15-11；这些配方适宜作为基肥施用，在关键生育时期追施氮肥，并根据产量水平相应调整肥料用量（如表3所示）。

此外，根据土壤保肥能力、气候特点、栽培管理（是否雨养、生育期长短等），本文针对4个亚区设计了一次性施肥配方4个，其中：针对东北半湿润春玉米区（I-2）设计了一次性施肥配方29-13-10，适宜作为基肥或苗期追肥一次性施用（肥料用量根据产量水平进行相应调整），在高产（10.5~12 t hm⁻²）和超高产（>12 t hm⁻²）情况下，为保障后期足够的养分供应，要求有30%以上释放期为50~60天的缓控释氮素；针对华北中北部夏玉米区（II-1），华北南部夏玉米区（II-2）设计了一次性施肥的配方分别为28-7-9和26-10-8，适宜作为基肥或苗期追肥一次性施用，当产量水平为8.3~9.8 t hm⁻²时，可以添加30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素，当产量超过9.8 t hm⁻²时，建议添加30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素以保障玉米生长后期足够的养分供应；针对西北雨养旱作春玉米区（III-1）设计了一次性施肥的配方为26-13-6，适宜作为基肥或苗期追肥一次性施用，当产量水平为9.0~10.5 t hm⁻²时，可以添加30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素，当产量超过10.5 t hm⁻²

时，建议添加30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素。

3 讨论

3.1 区域间养分推荐用量的差异及其原因

从本文研究结果来看，区域间养分推荐用量存在明显的差异，反映了区域土壤供肥能力、肥效反应和产量水平的特异性。区域间的土壤供肥能力差异是肥料推荐用量存在差异的重要原因。东北冷凉春玉米区和东北半干旱春玉米区的氮肥推荐用量略低于其他区域，这可能与这两个区域的土壤供肥能力较强有关，这两个区域土壤有机质含量平均分别为37.9 g kg⁻¹（*n*=845），24.8 g kg⁻¹（*n*=492，数据未列出）。有机质含量与土壤氮素矿化量呈正相关的关系^[37]，而后者是土壤氮素供应量的重要组成部分。西北绿洲灌溉春玉米区的氮肥推荐用量最高（N 219 kg hm⁻²），这与该区的玉米产量水平较高（10.5 t hm⁻²）有关，该地区昼夜温差大、光照充足是其获得高产的主要原因，另一方面与该区域的土壤供氮能力较低有关（该区土壤有机质平均为13.7 g kg⁻¹（*n*=41），数据未列出）。

不同区域的磷肥效应与土壤有效磷含量有显著的关系（如图4所示），缺磷区相对产量随着有效磷的增加而增加。前人研究表明^[10]，土壤有效磷含量主要受到土壤磷收支平衡的影响，而磷平衡很大程度上受到经济发展水平的影响（如我国中部和东部沿海省份的磷盈余量较高）。本研究中发现西北春玉米区、西南玉米区及东北半干旱春玉米区和华北南部夏玉米区域的土壤磷含量仍处于相对较低水平（表2），在这些区域应适当增加磷肥投入以提高土壤肥力，保障玉米生产；而对于东北和华北等土壤磷含量较高的区域应适度控制磷肥的投入以便提高磷肥利用效率和保护环境。

西北春玉米区的钾肥推荐用量较低（K₂O 30~56 kg hm⁻²），这与该区域的土壤养分供应能力较高有关（平均NH₄OAc-K为142 mg kg⁻¹，*n*=1 529，数据未列出）。Wu等^[18]对我国玉米的钾肥增产效应研究也表明，西北玉米的增产效果较其他区域差，施肥区的增产效应未达到显著水平。

3.2 区域大配方的设计

由于我国分散经营的管理方式造成耕作分散、农事操作单元地块面积狭小，推荐施肥若依据田块

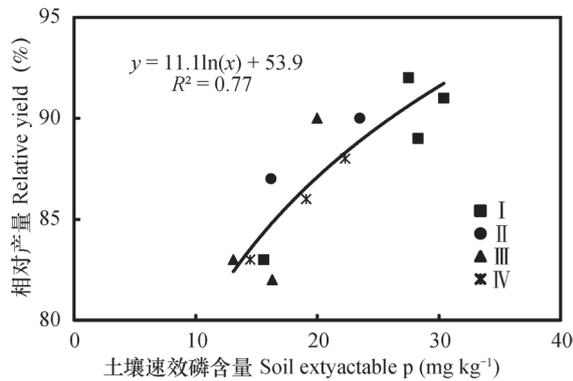


图4 不同区域土壤有效磷含量与相对产量的关系

Fig. 4 Relative yield of maize as a function of soil extractable P in the 12 sub-regions in China

进行实时管理既不经济，实际操作中也有一定难度。因此，通过对施肥的农学、经济及环境效益综合分析，我们提出了“大配方、小调整”的区域配肥技术^[24-25]。对于大田作物，可根据气候、栽培、地形和土壤肥力等因素进行养分管理区划分；在分区的基础上，再依据区域内土壤养分供应特征、作物养分需求和作物肥效反应，结合“氮素总量控制、分期调控”，“磷肥恒量监控”、“钾肥肥效反应”和“中微量元素因缺补缺”的养分资源综合管理理论和技术，提出氮、磷、钾和中微肥的适宜用量和比例，发展区域大配方，最终以复混（合）肥作为技术载体，同时配套相关的施肥技术和农化服务，这样可有效地减少不同农户施肥总量差异较大、施肥不太合理的现象，使区域整体的施肥量趋于合理。

本研究基于重点开发基肥型配方的配肥思路^[14]，将全生育周期所需要的全部磷钾肥和适当比例的一部分氮肥作为基肥，并依据基肥中氮、磷、钾的配比提出适宜浓度的配方，其余的氮肥作为追肥。对于生长期较长（如 I 东北春玉米区、III 西北春玉米区）和土壤肥力较高的区域（如 II-1 华北中北部夏玉米区）可适当降低基肥的比例（基追比例为 4 : 6）；对于土壤肥力较低而生育时期又较短的区域（IV 西南玉米区和 II-2 华北南部夏玉米区）应适当增加基肥比例（基追比例为 5 : 5）；同时兼顾考虑到一次性施肥的比例逐渐加大和高氮复合肥的市场占有率快速增加的实际，本研究中也一些较适宜区域设计了一次性施肥的配方。尽管当前玉米生产中高氮肥配方的比例较大，但在一些土壤保肥性能不好、生育期较长、产量水平较高或灌溉水用量

较大的区域，一次性施用高氮复合肥并不合适。本研究主要针对保肥性较好的区域（I-2 东北半湿润春玉米区）、北方干旱雨养的区域（III-1 西北雨养旱作春玉米区）、生育期较短的夏玉米种植区（II-1 华北中北部夏玉米区、II-2 华北南部夏玉米区）开展了一次施肥配方的设计，以适应当前农业发展现状和市场需求。

在 12 个玉米施肥亚区总共确定了 16 个区域肥料配方，包括 12 个基追结合施肥下的配方和 4 个一次性施肥配方。这些区域大配方统筹兼顾了配方的科学性和大型企业生产的可行性，为配方肥区域化需求和规模化生产找到结合点，这将有利于提高大中型企业参与的积极性，促进大中型肥料企业参与测土配方施肥成果的区域应用，实现配方肥的大规模生产、大范围推广和大面积应用，有利于从国家尺度上或省级尺度上宏观控制区域内养分的投入和产出的平衡，调控区域间肥料养分分配不合理的问题，同时也将有助于引导企业优化复合肥配方。

3.3 小调整的方案

在实际生产中，气候、土壤条件/肥力、产量水平及作物品种等都存在一定变异，即大配方在应用过程中将受到不确定性因素的影响，因此在条件允许的情况下仍可在区域大配方的基础上通过“小调整”以实现田块的精确调控：如根据产量水平调整配方肥用量，根据作物生长与营养诊断、气候条件和土壤质地调整氮钾肥追肥用量，根据土壤测试/作物营养诊断等补充中微量元素等。本研究中通过根据产量水平调整肥料用量和添加缓控释氮素等“小调整”的方式来补充区域肥料配方在实际应用中的不足。作物养分需求规律是科学施肥的重要理论依据，随着作物产量的增加，养分需求量将会相应的增加。例如，Hou 等^[38]通过大样本数据研究表明，春玉米每生产 1 t 籽粒的需氮（N）量为 17.4 kg；岳善超^[39]对华北夏玉米的研究表明，每生产 1 t 籽粒的需氮（N）量为 17.5 kg，两项研究均表明随着产量的增加地上部氮吸收也同步增加，呈显著的幂函数关系。本研究表明，东北春玉米区每生产百千克籽粒需磷（P₂O₅）量为 0.83 kg、西北春玉米区为 0.90 kg、华北夏玉米区为 0.87 kg、西南玉米区为 0.82 kg。因此，随着产量的变化应相应地调整养分的用量。本研究中，每公顷增加 1.5 t 产量，配方肥用量可适当增加 75 ~ 120 kg hm⁻²，追肥

表3 中国玉米不同区域肥料配方与施肥建议

Table 3 Region-specific fertilizer formulae and fertilizer recommendations for the 12 maize sub-regions in China

区域 Region	推荐配方 Fertilizer formula (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	产量水平 Yield level (t hm ⁻²)	基肥 (配方肥) 用量 Basal dosage (special fertilizer) (kg hm ⁻²)	追肥 (尿素) 用量 Side dressing (urea) (kg hm ⁻²)
I-1	14-18-13 ¹⁾	7.5 ~ 9.0	347 ~ 417	166 ~ 199
		9.0 ~ 10.5	417 ~ 486	199 ~ 232
		>10.5	486 ~ 556	232 ~ 266
		<7.5	278 ~ 347	133 ~ 166
I-2	15-18-12 ¹⁾	8.3 ~ 10.5	362 ~ 461	189 ~ 241
		10.5 ~ 12.0	461 ~ 527	241 ~ 275
		>12.0	527 ~ 593	275 ~ 310
		<8.3	296 ~ 362	155 ~ 189
	29-13-10 ²⁾	8.3 ~ 10.5	488 ~ 621	0
		10.5 ~ 12.0	621 ~ 709£	0
		>12.0	709 ~ 798£	0
		<8.3	399 ~ 488	0
I-3	13-20-12 ¹⁾	6.8 ~ 9.0	368 ~ 490	154 ~ 205
		9.0 ~ 10.5	490 ~ 572	205 ~ 239
		>10.5	572 ~ 653	239 ~ 273
		<6.8	286 ~ 368	120 ~ 154
I-4	17-17-12 ¹⁾	7.5 ~ 9.0	366 ~ 439	205 ~ 246
		9.0 ~ 10.5	439 ~ 513	246 ~ 287
		>10.5	513 ~ 586	287 ~ 328
		<7.5	293 ~ 366	164 ~ 205
II-1	18-12-15 ¹⁾	6.8 ~ 8.3	307 ~ 375	200 ~ 245
		8.3 ~ 9.8	375 ~ 443	245 ~ 289
		>9.8	443 ~ 511	289 ~ 333
		<6.8	239 ~ 307	156 ~ 200
	28-7-9 ²⁾	6.8 ~ 8.3	526 ~ 643	0
		8.3 ~ 9.8	643 ~ 760 §	0
		>9.8	760 ~ 877&	0
		<6.8	409 ~ 526	0
II-2	18-15-12 ¹⁾	6.0 ~ 7.5	400 ~ 500	170 ~ 213
		7.5 ~ 9.0	500 ~ 600	213 ~ 256
		>9.0	600 ~ 700	256 ~ 298
		<6.0	300 ~ 400	128 ~ 170
	26-10-8 ²⁾	6.0 ~ 7.5	578 ~ 723	0
		7.5 ~ 9.0	723 ~ 868	0
		>9.0	868 ~ 1012&	0
		<6.0	434 ~ 578	0

续表

区域 Region	推荐配方 Fertilizer formula (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	产量水平 Yield level (t hm ⁻²)	基肥 (配方肥) 用量 Basal dosage (special fertilizer) (kg hm ⁻²)	追肥 (尿素) 用量 Side dressing (urea) (kg hm ⁻²)
Ⅲ-1	15-20-10 ¹⁾	6.8 ~ 9.0	338 ~ 450	183 ~ 245
		9.0 ~ 10.5	450 ~ 525	245 ~ 285
		>10.5	525 ~ 600	285 ~ 326
		<6.8	263 ~ 338	143 ~ 183
	26-13-6 ²⁾	6.8 ~ 9.0	519 ~ 692	0
		9.0 ~ 10.5	692 ~ 808 §	0
		>10.5	808 ~ 923&	0
		<6.8	404 ~ 519	0
Ⅲ-2	13-22-10 ¹⁾	7.5 ~ 9.8	395 ~ 514	189 ~ 246
		9.8 ~ 12.0	514 ~ 632	246 ~ 303
		>12.0	632 ~ 711	303 ~ 341
		<7.5	316 ~ 395	151 ~ 189
Ⅲ-3	17-23-6 ¹⁾	8.3 ~ 10.5	410 ~ 522	221 ~ 281
		10.5 ~ 12.0	522 ~ 596	281 ~ 321
		>12.0	596 ~ 671	321 ~ 361
		<8.3	335 ~ 410	181 ~ 221
Ⅳ-1	17-16-12 ¹⁾	6.0 ~ 7.5	415 ~ 519	160 ~ 200
		7.5 ~ 9.0	519 ~ 623	200 ~ 240
		>9.0	623 ~ 726	240 ~ 279
		<6.0	311 ~ 415	120 ~ 160
Ⅳ-2	20-15-10 ¹⁾	6.0 ~ 7.5	363 ~ 453	155 ~ 194
		7.5 ~ 9.0	453 ~ 544	194 ~ 233
		>9.0	544 ~ 635	233 ~ 272
		<6.0	272 ~ 363	117 ~ 155
Ⅳ-3	19-15-11 ¹⁾	6.0 ~ 8.3	364 ~ 500	147 ~ 202
		8.3 ~ 10.5	500 ~ 636	202 ~ 257
		>10.5	636 ~ 727	257 ~ 294
		<6.0	273 ~ 364	110 ~ 147

注：1) 指基追结合施肥方式下的配方，基肥施用配方肥，大喇叭口期追施尿素（Ⅲ-1东北冷凉春玉米区于七叶期追施尿素）；2) 指一次性施肥方式下的配方，基肥或苗期追肥一次性施用配方肥；£配方肥中要求有30%释放期为50~60天的缓控释氮素；&配方肥中建议有30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素；§配方肥中可以有30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素 Note: 1) Refers to the formula of fertilizers applied as basal and top dressing, where for basal fertilization, formula basal fertilizer was used and urea was used in top-dressing at the V12 stage (but top dressing is applied at V7 stage in the cold sub-region in the Northeast China (I-1)). 2) Refers to once for all fertilization, either as basal or sidedressing at the seedling stage. £ formula fertilizer should contain at least, 30% controlled-release coated nitrogen, 50~60 d in release duration; & formula fertilizer is recommended to have 30%~40% controlled-release coated nitrogen, 50~60 d release duration; and § formula fertilizer may have 30%~40% controlled-release coated nitrogen, 50~60 d release duration

尿素可增加 $15 \sim 45 \text{ kg hm}^{-2}$ ；若为一次性施肥配方肥，用量可增加 $135 \sim 165 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

同时相关研究表明，高产作物养分需求的显著特征是开花后氮素需求量增加。例如，孟庆锋^[40]发现玉米花后氮素吸收比例由低产的16%上升至高产的45%；王宜伦等^[41]研究也表明，吐丝后期超高产夏玉米氮素吸收累积量占总累积量的40%~48%，在一次性施用条件下，施用缓/控释氮肥有利于生育后期氮素吸收利用。因此，在生产上应当注重花后的营养供应，尤其在一次性施肥下，应通过添加适宜比例的缓控释氮素以保障高产条件下玉米后期的肥料供应。控释尿素价格一般较普通尿素要高很多，适当的缓控释尿素添加比例才能保证肥料成本不至于过高且能够保证效果最佳。衣文平等^[42]研究证明在夏玉米上释放期为60天的包膜控释尿素占总施氮量30%的经济效益最高。本研究中，针对一次性施肥方案，在高产条件下，东北春玉米（ $>10.5 \text{ t hm}^{-2}$ ），要求添加30%以上释放期为50~60天的缓控释氮素；西北春玉米区（ $>10.5 \text{ t hm}^{-2}$ ）和华北夏玉米区（ $>9.8 \text{ t hm}^{-2}$ ），建议添加30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素；西北春玉米区（ $>9.0 \text{ t hm}^{-2}$ ）和华北夏玉米区（ $8.3 \sim 9.8 \text{ t hm}^{-2}$ ），可以添加30%~40%释放期为50~60天的缓控释氮素。在以上依据产量水平进行调整的基础上，在有条件的地方（如大型农场）还可以根据土壤、植株的测试和营养诊断进一步调整，将肥料用量控制到最佳，以实现养分供需的时空一致，达到最大的经济效益和环境效益。

4 结 论

我国玉米12个施肥亚区的氮肥推荐用量平均为 $\text{N } 181 \text{ kg hm}^{-2}$ （ $\text{N } 150 \sim 219 \text{ kg hm}^{-2}$ ），磷肥推荐用量平均为 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 75 \text{ kg hm}^{-2}$ （ $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 46 \sim 123 \text{ kg hm}^{-2}$ ），钾肥推荐用量平均为 $\text{K}_2\text{O } 54 \text{ kg hm}^{-2}$ （ $\text{K}_2\text{O } 30 \sim 64 \text{ kg hm}^{-2}$ ）。区域间养分推荐用量存在明显差异，反映了区域土壤供肥能力、肥效反应和产量水平的特异性。根据不同生态区域的养分推荐用量及气候、栽培和土壤条件的差异确定了12个施肥亚区的肥料配方，包括12个基追结合施肥下的配方和4个一次性施肥配方。我国玉米区域大配方的制定不仅为玉米区域配方生产提供技术支撑，也为其他相关作物的区域配肥提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] Borlaug N. Orientation//Tso T C, Tuan F, Faust M. Agriculture in China 1949—2030. Beltsville, MD, USA: IDEALS Inc., 1998: XXIII—XXIX
- [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. 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 (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5) : 915—924
- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. Science, 2010, 327: 1008—1010
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. Proceedings of the National Academy Sciences USA, 2009, 106 (9) : 3041—3046
- [5] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proceedings of the National Academy Sciences USA, 2011, 108: 20260—20264
- [6] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China. Nature, 2013, 494: 459—462
- [7] 马文奇. 山东省作物施肥现状、问题与对策. 北京: 中国农业大学, 1999. Ma W Q. Current status and evaluation of crop fertilization in Shandong Province (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 1999
- [8] 王圣瑞. 陕西省和北京市主要作物施肥状况与评价. 北京: 中国农业大学, 2002. Wang S R. Status and evaluation of fertilization for main crops in Shaanxi Province and Beijing City (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2002
- [9] 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
- [10] 曹宁. 基于农田土壤磷肥力预测的我国磷养分资源管理研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006. Cao N. Phosphorus management in Chinese agroecosystem based on forecasting the change of soil phosphorus fertility (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2006
- [11] 王旭, 李贞宇, 马文奇, 等. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析. 中国农业科学, 2010, 43 (12) : 2469—2476. Wang X, Li Z Y, Ma W Q, et al. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different

- agro-ecological regions of China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (12): 2469—2476
- [12] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划. 北京: 中国农业科技出版社, 1986: 36—90. Soil and Fertilizer Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences. China chemical fertilizer regionalization (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986: 36—90
- [13] 李亮科, 张卫峰, 王雁峰, 等. 中国农户复合(混)肥施用效果分析. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (3): 623—629. Li L K, Zhang W F, Wang Y F, et al. Effectiveness of compound fertilizer on grain yields in China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (3): 623—629
- [14] 王兴仁, 张福锁, 陈新平, 等. 重点开发基肥型专用复混肥——再论我国复混肥的发展方向. *磷肥与复肥*, 2006, 21 (2): 12—15. Wang X R, Zhang F S, Chen X P, et al. Focus on developing specialty compound fertilizer for base application—Discussion on ‘development trend of compound fertilizer in China’ (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2006, 21 (2): 12—15
- [15] 张卫峰, 李亮科, 陈新平, 等. 我国复合肥发展现状及存在的问题. *磷肥与复肥*, 2009, 24 (2): 14—16. Zhang W F, Li L K, Chen X P, et al. The present status and existing problems in China’s compound fertilizer development (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2009, 24 (2): 14—16
- [16] 张世煌, 李少昆. 国内外玉米产业技术发展报告. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009. Zhang S H, Li S K. Report of corn industry development in China and abroad (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009
- [17] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security. *Proceedings of the National Academy Sciences USA*, 2011, 108: 6399—6404
- [18] Wu L Q, Ma W Q, Zhang C C, et al. Current potassium-management status and grain-yield response of Chinese maize to potassium application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176: 441—449
- [19] 孙义祥. 测土配方施肥中区域配肥关键技术的研究. 北京: 中国农业大学, 2010. Sun Y X. Fertilization recommendation and designing special compound fertilizer in regional scale (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2010
- [20] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 乡(镇)级区域土壤养分空间变异与分区管理技术研究. *资源科学*, 2002, 24 (2): 76—82. Huang S W, Jin J Y, Yang L P, et al. Spatial variability and regionalized management technology of soil nutrients: The case of Hongqiao Township (In Chinese). *Resources Science*, 2002, 24 (2): 76—82
- [21] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究. *土壤学报*, 2003, 40 (1): 79—88. Huang S W, Jin J Y, Yang L P, et al. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the gain crop region in Yutian County (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (1): 79—88
- [22] 汪菁梦. “大配方、小调整”区域配肥技术研究——以曲周县为例. 北京: 中国农业大学, 2011. Wang J M. The research on designing special compound fertilizer of ‘regional fertilizer formula and site specific adjustment’ in regional scale—The case of Quzhou County (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2011
- [23] 张世昌. 吉林梨树县域“大配方、小调整”施肥策略的制定及田间校验. 北京: 中国农业大学, 2011. Zhang S C. Study on regional fertilization formulations and site specific adjustment approach and field callibration in Lishu County of Jilin Province (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2011
- [24] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. Chen X P, Zhang F S. Integrated nutrient management for wheat-maize rotation system (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2006
- [25] 张福锁, 江荣风, 陈新平, 等. 测土配方施肥技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2011. Zhang F S, Jiang R F, Chen X P, et al. Soil testing and fertilization recommendation (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2011
- [26] 崔振岭, 张福锁, 陈新平. 我国区域配肥之路: 大配方复合肥料和小配方掺混肥并举. *中国农资*, 2006 (8): 44—45. Cui Z L, Zhang F S, Chen X P. The avenue to regional formulation fertilizer technology in China: Compound fertilizer for agrot-ecological scale and BB fertilizer for county’s scale (In Chinese). *China Agri-Production News*, 2006 (8): 44—45
- [27] 周立三. 中国综合农业区划. 北京: 农业出版社, 1981: 1—265. Zhou L S. China comprehensive agricultural regionalization (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1981: 1—265
- [28] 农业部. 玉米优势区域布局规划(2008—2015年). *农业工程技术*, 2010 (5): 11—13. Ministry of

- Agriculture of the People's Republic of China. The programme of superior regional distribution of maize in China (2008—2015) (In Chinese). *Agricultural Engineering Technology*, 2010 (5): 11—13
- [29] 吴永常. 中国耕作制度15年演变规律研究. 北京: 中国农业大学, 2002. Wu Y C. Study on the evolving regularities of farming system in the recent 15 years, China (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2002
- [30] 孙颌, 石玉林. 中国农业土地利用. 南京: 江苏科学技术出版社, 2003. Sun H, Shi Y L. Chinese agricultural land use (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2003
- [31] 千怀遂, 李明霞. 中国玉米遥感估产区划研究. 中国农业科学, 1998, 31 (4): 32—39. Qian H S, Li M X. Study on regionalization for estimation of maize yield using remote sensing data in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31 (4): 32—39
- [32] 熊毅. 中国土壤图集. 北京: 地图出版社, 1986: 8—58. Hseung Y. The soil atlas of China (In Chinese). Beijing: SinoMaps Press, 1986: 8—58
- [33] Chen C Q, Qian C R, Deng A X, et al. Progressible and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast China. *European Journal of Agronomy*, 2012, 38: 94—103
- [34] 白彩云. 中国东北地区玉米种植的气候适应性研究. 新疆石河子: 石河子大学, 2010. Bai C Y. Climate adaptability of maize hybrid in northeast of China (In Chinese). Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2010
- [35] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [36] Sawyer J, Nafziger E, Randall G, et al. Concepts and rationale for regional nitrogen rate guidelines for corn. Iowa State University, University Extension, 2006
- [37] 崔振岭. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理——从田块到区域尺度. 北京: 中国农业大学, 2005: 74—83. Cui Z L. Optimization of the nitrogen fertilizer management for a winter wheat—summer maize rotation system in the North China Plain—From field to regional scale (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2005: 74—83
- [38] 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
- [39] 岳善超. 小麦、玉米高产体系的氮肥优化管理. 北京: 中国农业大学, 2013. Yue S C. Optimum nitrogen management for high-yielding wheat and maize cropping system (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2013
- [40] 孟庆锋. 玉米和小麦高产与养分高效协同实现的技术途径研究. 北京: 中国农业大学, 2012. Meng Q F. Strategies for achieving high yield and high nutrient use efficiency simultaneously for maize (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2012
- [41] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素累积特征及一次性施肥效果研究. 中国农业科学, 2010, 43 (15): 3151—3158. Wang Y L, Li C H, Tan J F, et al. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effects of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (15): 3151—3158
- [42] 衣文平, 朱国梁, 武良, 等. 不同量的包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用研究. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (6): 1497—1502. Yi W P, Zhu G L, Wu L, et al. Application of different release duration controlled-release coated urea combined with conventional urea on summer maize (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (6): 1497—1502

BASIC NPK FERTILIZER RECOMMENDATION AND FERTILIZER FORMULA FOR MAIZE PRODUCTION REGIONS IN CHINA

Wu Liangquan^{1, 2} Wu Liang¹ Cui Zhenling¹ Chen Xinping^{1†} Zhang Fusuo¹

(1 Centre for Resources, Environment and Food Security, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

(2 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract Application of fertilizers, unreasonable in rate and formula, has been the main factor limiting maize production. A large number of on-farm fertilization experiments have been conducted on maize

across the main agro-ecological regions of China, and large volumes of first-hand data were collected for analysis in this study to explore region-specific optimal NPK recommendation (including rate and formula) in anticipation that the study may provide some technical support to improving the maize production in China and a theoretical basis for designing region-specific and crop-specific fertilizer. Based on the county's GIS-based agricultural statistical database and relevant literature, the maize production areas in China were divided into 4 major regions by geographic location and production layout and further into 12 fertilization sub-regions in light of climatic, crop cultivation, topographic and soil conditions. Meanwhile a total of 1 752, 7 081 and 6 328 groups of on-farm N, P and K fertilization experiments were conducted all over the maize production areas during 2005–2010, and results and data of the experiments were collected, sorted and collated by fertilization sub-region. Then, sub-region-specific recommendation of N rate for maize was worked out using the N fertilizer total amount control technique and proper ratios of basal/sidedressing were determined in the light of the features and production practices of a region and nutrient demand of the crop; sub-region-specific recommendation of P rate for maize was, using P building-up and maintenance technique and sub-region-specific recommendation of K rate for maize, too, using the technique of yield response to K application. Based on the technical approach of 'regional fertilizer formula plus site specific adjustment', sub-region-specific fertilizer formula and application technique was designed for all the maize growing areas. Northeast China (Region I) and Northwest China (Region III) was quite high in maize yield, reaching $9.0 \sim 10.5 \text{ t hm}^{-2}$, while North China Plain (Region II) and Southwest China (Region IV) was quite low, being $7.5 \sim 8.3 \text{ t hm}^{-2}$. For the 12 sub-regions, the recommended N rates were averaged to be 181 kg hm^{-2} , ranging from 150 kg hm^{-2} for the cold sub-region in Northeast China (Region I-1) to 219 kg hm^{-2} for the irrigated oasis sub-region in the Northwest China (Region III-3); the recommended P rates, P_2O_5 75 kg hm^{-2} on average, ranged from P_2O_5 46 kg hm^{-2} for the north-central sub-region in the North China Plain (Region II-1) to P_2O_5 123 kg hm^{-2} in the irrigated oasis sub-region in the Northwest China (Region III-3); and the recommended K rates, K_2O 54 kg hm^{-2} on average, ranged from K_2O 30 kg hm^{-2} for the irrigated oasis sub-region in the Northwest China (Region III-3) to K_2O 64 kg hm^{-2} for the south sub-region in the North China Plain (Region II-2). For the 12 sub-regions, a total of 16 region-specific fertilizer formulas were worked out, including 12 formulae with basal plus top-dressing fertilization approach and 4 formulae with only basal fertilization application. The regionalization of maize fertilization can well reflect the layout of maize production in China and region-specific climatic, topographic, soil and relevant crop cultivation conditions. The significant differences between the agro-ecological regions in maize grain yield and recommended fertilizer rates reflected the specificity of each region in soil fertility, yield response to nutrient application and crop nutrient demand. The region-specific fertilizer formulas designed on the basis of the region-specific fertilizer recommendation and characteristics of the regions well match the maize productions in the regions and optimize regional fertilizer application techniques. These region-specific fertilizer formulas will play an important role in guiding optimization of compound fertilizer products and provide a theoretical reference for designing regional fertilizer formulas for relevant crops in future.

Key words Region; Optimal nutrient rate; Regional fertilizer formula; Site specific adjustment; Maize

(责任编辑：陈德明)

CONTENTS

Reviews and Comments

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation Shen Lidong (721)

Soil Science and Modern Agriculture

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. (730)
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. (745)
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen (758)
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. (766)
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. (774)

Research Articles

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. (781)
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. (790)
- Research on soil water movement based on stable isotopes Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. (800)
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. (816)
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. (827)
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. (837)
- Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. (847)
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. (857)
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. (867)
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site Li Shiye, Cheng Jiemin (877)
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. (887)
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. (900)
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. (909)
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. (917)

Research Notes

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. (924)
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. (933)
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. (941)
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. (949)
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ¹⁵N in apple orchard Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. (955)

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

