

北方土壤钾素状况及钾肥施用效益

金继运

PPI/PPIC, Beijing

中国农业科学院土壤肥料研究所

自 1986 年开始,中国农业科学院土壤肥料研究所(SFI/CAAS)与加拿大钾磷研究所(PPI/PPIC)和北方各有关单位共同合作,在中华人民共和国经贸部(MOFTEC)、农业部(MOA)、PPI/PPIC 及其成员公司、加拿大钾肥出口公司(Canpotex)、加拿大国际发展署(CIDA)等部门和组织的支持下,在北方全面系统的开展了北方土壤钾素状况、供钾能力、施用钾肥效益和钾肥施用技术的研究。获得了大量的资料和有价值的结果,对北方土壤钾素资源状况、北方钾肥需求及其合理施用技术有了较全面的认识。现将主要结果总结如下。

在 13 个省市范围内从东到西在主要土壤类型上选择有代表性的土壤类型和主要种植制度,建立了 25 个作物和土壤体系内钾素循环的定位试验。从每一个定位点上选取耕层土壤样品,研究了土壤中钾素存在形态、各形态钾素的植物有效性、土壤对钾素的吸附固定能力、土壤固有钾素释放和土壤对外源钾吸附和解吸过程的动力学。在 25 个定位试验点上研究主要作物种植制度下土壤和作物系统内钾素循环规律和相应的钾素调控技术。同时,在各主要省区,重点在东北和华北地区安排了 1350 个田间试验和示范,系统研究了各主要作物的需钾特性、吸钾规律、施钾反应、高效施钾条件及技术。结合土壤钾素定位试验和田间试验和示范,从各省区主要土壤类型上选取了 8500 多个有代表性的耕层土壤样品,研究分析了各省区和主要土壤类型土壤的钾素状况和供钾能力。将我国北方主要农区土壤按其供钾能力分区,应用地理信息系统(GIS)建立起我国北方土壤钾素信息系统,绘制了北方土壤钾素现状图,对我国北方土壤的钾素状况和供钾能力进行了全面综合评价。

1. 土壤钾素状况及供钾能力评价

1. 土壤钾素形态及其植物有效性

对取自 25 个定位试验点的耕层土样进行的土壤钾素形态及其植物有效性、土壤钾素形态转化动力学、土壤钾素吸附固定特征等研究表明,土壤中当季植物有效性高的水溶性钾、非特殊吸附钾和特殊吸附钾的总和不超过全钾的 2.0%,非交换性钾占全钾的 2.7%-9.4%,而全钾的 89.8%-96.8%是以矿物态存在的。供试 25 个土壤的供钾能力按取土地点自西向东(西北--华北--东北)有明显降低的趋势。

在盆栽玉米连续耗竭情况下,不同土壤的植物净吸钾总量差异悬殊。根据植物净吸钾总量的大小,将供试土壤的供钾能力分为极高、高、中、较低和低 5 个等级。依次评价的供试土壤的供钾能力也显示出按取土地点自西向东呈明显降低的趋势。

耗竭条件下植物吸取来自水溶性钾的比例为最小,平均为 3.1%;其次是非特殊吸附钾,平均为 7.7%;再次是特殊吸附钾,平均为 10.2%;来自非交换性钾的比例较大,平均为 33.3%;来自矿物钾的比例最大,平均为 45.7%。研究发现矿物钾对植物钾营养也有很大的贡献。

2. 土壤钾素形态转化动力学

土壤固有钾的释放表现出一定的地区性差异。取自西北的土壤一般释放持续时间较短,而总释放量、平均释放速率和最大释放速率较高;取自东北的土壤平均释放速率和最大释放速率与华北土壤接近,总释放量平均值比华北土壤高 20.5 mg/kg,释放持续时间平均比华

北土壤长 36 分钟；土壤固有钾的释放过程可用一级反应动力学方程较好地拟合。其公式为： $\text{Log}(K_t/K_0) = K_d' t$ （其中 K_t 、 K_0 分别为时间 t 和开始时土壤中可释放的钾， K_d' 为表观解吸速率常数）。25 个土壤的拟合一级反应方程的回归系数在 0.9439 到 0.9947 之间，均达到了极显著水平。

用 $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 溶液连续提取土壤中的非交换性钾，土壤非交换性钾的释放呈现十分明显的地区性差异。西北土壤 600 分钟内非交换性钾总释放量、平均释放速率、最大释放速率和非交换性钾释放率平均分别为 314.4mg/kg、0.524 mg/kg·min、1.26 mg/kg·min 和 24.2%；华北土壤相应参数的平均值分别为 87.1mg/kg、0.145 mg/kg·min、0.74 mg/kg·min 和 9.2%；东北土壤相应参数的平均值分别为 59.8 mg/kg、0.102 mg/kg·min、0.51 mg/kg·min 和 8.1%。说明土壤非交换性钾释放速率自西向东呈十分明显的下降趋势。

土壤对外源钾的吸附动力学参数也表现出明显的地区性差异。一般来说，西北土壤吸附持续时间较短，总吸附量及吸附速率较低；东北土壤吸附持续时间较长，总吸附量及吸附速率较高；华北土壤居中。

外源钾饱和后土壤钾素解吸动力学说明，新吸附的钾有相当大的部分是容易释放的。与土壤固有钾的释放动力学参数比较，外源钾饱和吸附后北方土壤的总释放量、平均解吸速率、最大解吸速率分别提高了 1.5-30.1 倍、2.6-75.8 倍和 2.3-97.7 倍，但解吸持续时间一般缩短，25 种土壤平均缩短了 87.4 分钟。说明施用钾肥后，土壤钾素变得容易释放。

3. 土壤钾素吸附固定特征

在施 K 量 0-4000mg/kg 范围内，土壤固钾量与施钾量的关系符合方程： $y = ax^3/2/(x^3/2 + b)$ ，其中 y 为固钾量， x 为施钾量， a 是最大固钾量， b 是常数。不同土壤固钾量相差很大，表现出一定的地带性分布规律。施 K1200mg/kg 以下时土壤固钾能力的一般趋势是取自西北的土壤 < 取自东北的土壤 < 取自华北的土壤；而施 K1200mg/kg 以上时土壤固钾能力，从西向东呈逐渐增加的趋势。在施 K 量在 0-4000mg/kg 范围内，取自西北、华北和东北地区的土壤最大固钾量平均值分别为 372mg/kg、1121mg/kg 和 1519mg/kg。

4. 土壤供钾能力综合评价

根据土壤各形态钾含量分析、固有钾及非交换性钾释放动力学参数及土壤对外源钾的吸附固定试验结果，可以看出，不同土壤供钾潜力差异很大，按取土地点自西向东呈明显降低的趋势；土壤对当季作物的供钾能力的总趋势是，取自西北的土壤较高，而取自华北和东北的土壤较低。这一结论在盆栽试验和田间试验中得到了验证。

从我国北方主要农区共采集土样 8500 多个，应用 ASI 联合浸提剂和土壤养分综合系统评价法对土壤中的各大中微量元素供应能力进行了全面评价，在补充所有缺乏的营养元素的基础上，从中选出 197 个土壤进行了盆栽试验，并在大部分土壤的取土点上安排了田间试验。盆栽试验结果表明，在供试的 197 个土壤中的 117 个土壤上（59%），缺钾已成为产量限制因子，不施钾肥处理的相对产量范围为 46.9-89.8%。用 Cate-Nelson 十字坐标移动法确定的盆栽条件下的 ASI 法速效钾的临界值为 150mg/L。

应用田间试验的结果和 Cate-Nelson 十字坐标移动法分析了各主要作物高产条件下的施钾临界值，结果表明，在东北和华北的主要粮食作物上，不施钾减产 5% 以上的速效钾临界值范围为 80-90mg/L，蔬菜、油料、纤维等喜钾作物减产 5% 以上的速效钾临界值范围为 100-120mg/L。在大部分粮食作物上，土壤速效钾含量低于 80mg/l 时（约占测试土壤总数的 60%），一般产量水平下施用钾肥即能表现出显著的增产效果，土壤速效钾含量在 80-100mg/l 时（约占测试土壤总数的 17%），高产粮食作物施用钾肥也能表现出显著的增产效果；在大豆、花生、向日葵和棉花等作物上，土壤速效钾含量低于 100mg/l 时（约占测试土壤总数的 77%），一般产量水平下施用钾肥即能表现出显著的增产效果，土壤速效钾含量在 100-120mg/l 时（约占测试土壤总数的 8.3%），在这些蔬菜、油料、纤维作物上获得高产也必须施用钾肥。

在这些工作的基础上，将 ASI 方法测定的土壤速效钾分为极低（小于 40mg/L）、较低（40-60 mg/L）、低（60-80 mg/L）、中（80-100 mg/L）、高（100-120 mg/L）和极高（大于 120 mg/L）六个等级。各等级中土壤样品数量分别占测试的土壤总数的 7.0%、27.8%、27.6%、16.6%、8.3% 和 12.7%。以此为基础，根据土壤测试结果，结合各作物需钾特性和产量目标推荐适宜的钾肥用量。

从 8500 余个北方耕层土样的土壤速效钾含量结果可以看出，我国北方土壤速效钾含量平均为 81.4 mg/l，变化幅度为 ± 43.5 mg/l。华北、东北地区的土壤速效钾含量分别为 77.3 和 81. mg/l，西北地区的土壤速效钾含量较高，平均为 158.4 mg/l。各省的土壤速效钾含量看，山东、河南、河北、北京、吉林和辽宁 6 省（市）的土壤平均速效钾含量相近，在 70-80 mg/l 之间；陕西、山西、天津和宁夏的相近，在 100-120 mg/l 之间；而青海和新疆的土壤速效钾含量高，在 177 mg/l 左右。明显看出，我国北方地区从东向西土壤速效钾含量显著提高。

从各省土样土壤速效钾含量低于 100mg/l 的土样数所占百分比来看，河北、河南、山东、北京、吉林和辽宁 6 省的比例最高，分别为 87.3%、79.3%、87.4%、78.8%、86.2%和 87.1%；而青海和新疆的土壤样本中，低于 100mg/l 的土样只占 10%和 4.3%；宁夏、陕西和天津也只占 40.9%-48.2%；黑龙江和山西低于 100mg/l 的土样占 55%-60.3%。

从我国北方主要土类的速效钾含量上看，分布在西北地区的荒漠土、灰钙土、灰漠土、灰褐土、棕钙土、林灌草甸土，西北及河南省的灌淤土、黑垆土，以及栗钙土，土壤速效钾的含量均很高，在 110mg/l 以上；而河南的黄褐土、山西的栗钙土、河南河北的砂礓黑土、吉林的泥炭土，以及水稻土、新积土、风沙土、棕壤、黄棕壤，土壤速效钾含量较低，在 70 mg/l 左右或以下；北方其他土壤类型的土壤速效钾含量在北方土壤速效钾含量平均值左右（表）。北方的菜园土壤，不管其属于那一土壤类型，由于施肥的影响（特别是大量施用有机肥），土壤速效钾含量较高，平均为 147.8mg/l。

综上所述，我国北方地区土壤钾素状况和土壤供钾能力自东向西表现出明显的地带性分布规律，自西向东，土壤各形态钾的含量逐渐减少、供钾能力和供钾潜力逐渐下降、土壤对钾的吸附固定能力逐渐增强。这一规律在土壤钾素形态分级、土壤钾素转化动力学、盆栽耗竭试验、田间定位试验、以及 8500 多个土壤样品的分析结果中都得到了验证。田间各主要作物施用钾肥试验的结果也表明钾肥在华北和东北地区的土壤上增产效果明显地好与西北地区的土壤。

应用地理信息技术（GIS）和相应的软件，研制建成“中国北方土壤钾素地理信息系统”（NCSKIS），绘制出“北方土壤钾素分级信息图”。

二、不同种植制度下钾素循环和平衡调控

通过 25 个定位试验，在冬小麦-玉米、冬小麦-大豆、玉米、水稻、小麦 大豆、冬小麦、春小麦、小麦 棉花以及一年多季蔬菜种植制下研究土壤-作物系统中钾素的循环特征和平衡状况，研究不同施钾肥和秸秆还田处理对土壤-作物钾素循环和钾素平衡的影响及其对作物产量的效应。结果表明，不同地区不同种植制度下的作物钾库（吸钾量）存在显著差异。在不施钾肥的情况下，华北地区，小麦的平均吸钾量（ 140.86 kg/hm^2 ）高于玉米（ 86.53 kg/hm^2 ），玉米-小麦轮作全年吸钾量为 208.79 kg/hm^2 ；西北地区，玉米、小麦、棉花的吸钾量分别为 207.7 kg/hm^2 、 169.7 kg/hm^2 和 370.44 kg/hm^2 ，以棉花的吸钾量最高。我国东北地区一年一季玉米的作物吸钾量平均 91.65 kg/hm^2 。华北地区种植的蔬菜作物全年钾素吸收量

明显高于粮食作物，天津菜区均在 300 kg/hm² 以上，一些年份高达 380 kg/hm²。施钾肥和秸秆还田，作物的吸钾量有明显的提高。

在不补充钾素的条件下，土壤-作物系统钾素的处于亏缺状态；秸秆还田能使土壤-作物系统的钾素表观亏缺量明显减小。华北地区小麦-玉米种植制的钾素年表观亏缺量在 134 - 258 kg/hm² 之间；东北地区一年一熟玉米的钾素表观亏缺量在 68.7-101 kg/hm²；西北地区小麦-玉米轮作制的年表观亏缺量在 250-340 kg/hm² 之间。新疆棉花的年表观亏缺量在 370 kg/hm²。华北小麦-玉米轮作制，在不施钾肥的情况下秸秆还田可减少系统钾素亏缺 46.8-86.6 kg K₂O/hm²；在施钾肥的情况下，秸秆还田可减少钾素亏缺 74.4-101.4 kg/hm²。秸秆还田和施钾肥能使土壤-作物系统的钾素向收支平衡的方向转化。在小麦-玉米种植制下，小麦秸秆全部还田能归还作物吸收的近三分之一到一半的钾素，但不能达到钾素的收支平衡。华北地区小麦-玉米种植制下，单采用小麦秸秆还田，钾素平衡系数在 0.31-0.48 之间；单施钾肥 150 K₂O kg/hm² 能使钾素平衡系数保持在 0.91-1.36 之间；秸秆还田与施钾肥 150 K₂O kg/hm² 相结合，钾素平衡系数能提高到 1.22-1.64 之间。在东北一年一季玉米种植制下，黑龙江和辽宁分别施钾肥 187.5 和 112.5 K₂O kg/hm²，能使钾素平衡系数维持在 1 左右，使钾投入与产出基本平衡；而施钾肥 375 和 225 K₂O kg/hm²，钾素平衡系数均能达到 1.5 左右，钾素在土壤-作物系统中的呈现较高程度的盈余。吉林玉米和辽宁水稻施钾肥 112.5 K₂O kg/hm²，钾素平衡系数仅在 0.75 - 0.81 之间，仍出现钾素亏缺；施钾肥 225 K₂O kg/hm²，吉林玉米和辽宁水稻平衡系数均达到 1.17 左右，出现轻度钾盈余，而在吉林陶家试验点上，平衡系数达到 1.5，出现较明显的钾盈余

在华北地区的小麦-玉米种植制下，秸秆还田结合施钾肥在小麦上平均增产 12.5%，在玉米上增产 19.1%；秸秆还田的效果最差；单施钾肥的增产效果居中，在小麦和玉米上平均分别为 8.5%和 12.4%。在华北大豆和蔬菜作物上亦有显著增产作用。在一年种植一季玉米的东北地区，施钾肥有显著的增产效果。施钾 112.5 kg K₂O/hm²，平均增产 10.6%；施钾 225 kg K₂O/hm²，平均增产在 10%以上，但其效果比低钾量增加幅度不大。在东北大豆上钾肥的增产效果明显。在西北地区，施钾及秸秆还田结合施钾肥在一些年份和一些地点对小麦和玉米有增产效果，但增产幅度不大，增产几率不高。但在新疆棉花上，施钾肥有明显的增产效果。

定位试验研究所揭示的作物吸钾量和钾肥施用效果在我国华北、东北和西北地区间的差异，与地区间土壤供钾能力的变化趋势相吻合。

三、不同作物钾肥效应

从1993年到1998年，东北和华北（少量在西北有关省份）地区，安排了大量的田间试验和示范，以明确钾肥施用的效果、探讨合适的氮磷钾肥试用比例及钾肥合理施用方法。

结果表明，在施用适量氮磷肥的基础上增施钾肥，东北和华北的主要作物对钾肥施用均有较显著的增产反应。在东北地区的春玉米上，施钾肥平均增产24.7%，每公斤氧化钾平均增产玉米15.3公斤，钾肥用量平均为133公斤，平均氮磷钾比例为1：0.40：0.54；大豆施钾平均增产14.7%，每公斤氧化钾增产大豆平均3.4公斤，钾肥用量平均162公斤，平均氮磷钾比例为1：2.07：1.90；水稻施钾平均增产15.7%，每公斤氧化钾增产稻谷平均10.0公斤，钾肥用量平均121公斤，平均氮磷钾比例为1：0.53：0.60。

在华北地区的水稻上施钾平均增产19.8%，每公斤氧化钾增产稻谷平均17.7公斤，钾肥用量平均113公斤，平均氮磷钾比例为1：0.58：0.55；夏玉米施钾平均增产19.4%，每公斤氧化钾增产平均7.8公斤，钾肥用量平均196公斤，平均氮磷钾比例为1：0.55：0.92；小麦施钾平均增产18.5%，每公斤氧化钾增产小麦平均5.9公斤，钾肥用量平均174公斤，平均氮磷钾

比例为1 : 0.62 : 0.91 ; 棉花施钾平均增产15.7% , 每公斤氧化钾增产皮棉平均1.77公斤 , 钾肥用量平均145公斤 , 平均氮磷钾比例为1 : 0.70 : 0.75。花生施钾平均增产20.5% , 每公斤氧化钾增产荚果平均5.3公斤 , 钾肥用量平均160公斤 , 平均氮磷钾比例为1 : 1.16 : 1.48。

同时 , 在大白菜、番茄、黄瓜、辣椒、青椒、萝卜、马铃薯、茄子、大葱、芹菜、秋笋、甘蓝、生姜、芋头、南瓜、冬瓜、西瓜、甜菜、向日葵、亚麻、苹果、梨、葡萄、猕猴桃等果蔬经济作物上施用钾肥也获得了显著的增产效果 , 平均增产8.95-36.2%。

在大量研究的基础上 , 对东北和华北主要作物提出了高产高效钾肥适宜用量范围和高效施用技术。同时研究提出华北地区一年两作主要轮作制中钾肥合理分配方案和施用技术。在冬小麦—夏玉米轮作制中 , 山东小麦、夏玉米钾肥的适宜分配比例为1:3 , 适宜配方小麦为

$N_{225}P_{150}K_{90}$ 、夏玉米为 $N_{300}P_{225}K_{270}$ 。河南小麦、夏玉米钾肥的适宜分配比例为1:1 , 各施 K_2O 120kg/ha。在小麦—夏花生轮作制中 , 钾肥分配以小麦、花生各施 K_2O 150kg/ha为宜。在小麦套棉花轮作制中 , 钾肥分配以小麦施 K_2O 75kg/ha、棉花施 K_2O 225kg/ha为宜。在冬小麦—夏大豆轮作中 , 以钾肥全部底施于小麦为宜。

Soil Potassium Status and Potassium Fertilization Use in Northern China

Jin Jiyun

PPI/PPIC, Beijing

A comprehensive study on soil K status and K fertilizer use in Northern China have been organized and conducted through China-Canada (PPI/PPIC) co-operation programs with the strong support from MOFTEC, MOA, CAAS, Canpotex, CIDA and related organizations. The major findings are summarized.

1. Results from soil testing of over 8500 soil samples and detailed study on 25 selected representative soils indicated that soil K supply capacity in Northern China showed a notable regional distribution characteristics, with a trend of gradually decrease in soil K supply potential moving from west to the east regions. On contrary, soil adsorption and/or fixation capacity to K showed a trend of gradually increase from west to east.
2. Results from pot experiments with total of 197 soils indicated that in 117 soils (58% of total), K became yield limiting factor. Omitting K from the optimum treatment (balanced fertilization with all essential nutrients considered) resulted in reduction of dry matter yield by 10-53%.
3. Results from 1350 field experiments and demonstrations indicated that the critical level of soil available K (determined by using ASI method) for grain crops was 80-90 mg/L, 100-120 for oil, vegetable, fiber crops and fruit trees.
4. In North-central and North-east regions, in about 60% of the soil samples, soil available K was below the critical level, indicating the need for K fertilization, especially for high yield crop production.
5. Results from fixed field trials indicated that under present farmers' practices, soil K is depleting in general, and application of K fertilizer and strew return is necessary to keep K balance in the soil crop systems.
6. Field experiments for major grain crops conducted in North-central and Northeast regions indicated that, on average, K application at the rate of 111-185kg/ha increased grain yield by

15.7%-24.7%, and one kg K_2O increased grain by 7.6-15.3 kg.