

研究论文



照片1.马铃薯缺钾田间表现。照片拍摄: W. Grzebisz.

钾素可促进氮的利用效率——以种植在轻质土上的马铃薯为例

Grzebisz, W.⁽¹⁾, W. Szczepaniak⁽¹⁾, M. Biber⁽¹⁾, and K. Przygocka-Cyna⁽¹⁾

摘要

钾素作为一种植物的营养物质通常被认为能显著的影响氮的利用率 (NUE)。氮和钾之间的这种关系通过种植在轻质土壤上的雨养马铃薯的大田试验来验证。该试验设计了4个钾肥的施用水平, 即0、80、160、240 kg K₂O ha⁻¹和2个氮肥施用水平, 即120、160 kg N ha⁻¹。马铃薯收获后田间残余的钾素带来的影响可通过下茬作物冬小麦来检验, 即对比小麦播种时是否施用90 kg K₂O ha⁻¹对小麦产量产生影响。马铃薯的产量随钾肥施用量的增加而增加, 这在2013年表现的特别明显, 该年夏季的几个月马铃

薯生产上有轻度的水分胁迫现象存在。施用钾肥时结合增加氮肥的施用量可增加马铃薯的产量。收获的马铃薯块茎产量与植株中吸收的氮呈线性关系, 与植株中吸收的钾呈曲线关系, 最佳施钾量为170 kg K ha⁻¹。因此, 当钾肥的施用量为160 kg K₂O ha⁻¹, 氮肥的施用量为160 kg N ha⁻¹时, 马铃薯的产量最高。然而, 通过分析农艺指标氮肥利用率 (NUE) 会发现最有效益的施肥方式是钾肥

⁽¹⁾Poznan 大学生命科学学院农业化学与环境生物地球化学系, 波兰。
通讯作者: witegr@up.poznan.pl

施用量为 $160 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ ，氮肥的施用量为 120 kg N ha^{-1} 。当钾肥施用量增加时会导致土壤中有有效钾的存储量增加。2012年马铃薯收获后，2013年土壤中有有效钾的存储量足够高，以至于能大幅增加下茬作物冬小麦的生产力，但是却不能持续到2014年的冬小麦的生产。

引言

钾 (K) 是所有高等植物营养生长及生殖生长所必需的17种基本矿质养分之一，尤其是农作物的生长更要需求大量钾素。这里至少可以从3个方面来评价钾素对植物生长的影响。首先关注一下钾素单纯的生理功能，它在减轻生物及非生物胁迫方面有重要性。在控制着农作物应对各种环境胁迫方面，钾素现在被视为一个主要的矿质养分

(Rengel and Damon, 2008; Zörb *et al.*, 2014)。其次在作物生长过程中钾素会影响产量形成。Grzebisz *et al.* (2013) 最近的研究表明，缺钾会减少作物中生理沟槽的尺寸，作物供钾充足，尤其是在产量形成的关键阶段能满足作物对钾的需求，至少可以部分解决水资源短缺的问题。最后在作物生产中钾素的重要性要联系它在土壤-作物系统中的管理。既然钾素的移动性在不同土壤中有所变化，预算钾的需求应该考虑作物轮作的情况 (Grzebisz and Diatta, 2012)。

尽管钾素对种植的农作物具有重要性，但是在农民的施肥计划中经常被忽略，农民极少考虑当前土壤中钾素的现状。与此同时，氮肥施用量经常不做调整，导致了土壤中氮钾比率不断扩大。这样的施肥方式不仅给农场带来了严重的不利的经济后果，而且在地区和国家范围内也产生了不利的经济后果。一个典型的例子就发生在中欧国家，在20世纪的最后十年这些国家经历了一场经济革命，它们开始转向自由市场经济，导致生产成本上升，化肥价格随着上升。因此，所有化肥消费大幅下降，尤其是钾肥和磷肥。结果施用肥料的氮钾比率快速扩大，由1:0.8扩大到1:0.3。像波兰和匈牙利等国家，施用肥料的氮钾比率基本上就控制在1:0.3，而另外一些国家，比率继续下降到了1:0.1 (Grzebisz *et al.*, 2010)。

作物种植过程中要追求高的产量，向生长的植物供应钾素对生产力起关键的作用。钾素供应低的结果首先是硝态氮的吸收率降低，从而抑制影响了植物的生长。此外，作物吸收氮的力度与生长不同步增长。因此其不平衡供应抑制了基本产量构件。在



图2. 缺钾影响马铃薯块茎发育和质量 (有裂口和正常块茎对比)。照片拍摄: W. Grzebisz.

产量发展的关键时期缺钾会导致谷物的亩穗数和穗粒数下降 (Grzebisz *et al.*, 2013)。在马铃薯生产上，如果缺钾会降低茎秆的生物量，块茎数量减少，块茎增长率较低，甚至块茎开裂。(见照片1和2)

马铃薯是世界各地最重要的主食作物之一，当然也包括温带地区。作为一种淀粉作物，马铃薯需要充足的水分和钾素。因此，只有在土壤肥力高，灌溉条件良好的地块才能使收获的马铃薯产量达到最高，因为只有这样才能满足块茎生产的潜力。北欧和中欧的国家属于典型的雨养条件，在这种条件下要满足块茎生产潜力就变得比较复杂。在这里，块茎的产量取决于三个重要因素：气候、土壤肥力、作物管理质量。因此，在拥有湿润的大西洋气候的爱尔兰马铃薯的生产潜力估计为 72.4 Mg ha^{-1} (Supit *et al.*, 2010)，德国位于湿润大西洋气候和温带大陆性湿润气候的边界线上，马铃薯的生产潜力估计为 60.9 Mg ha^{-1} 。位于德国东部的一些国家，如波兰、保加利亚等，马铃薯的生产潜力要低的多，分别约为 39.7 、 31.6 Mg ha^{-1} 。这主要归因于它们的大陆性气候。然而，实际上马铃薯的块茎产量要比潜在的预期产量明显低 (表1)。排除气候因素，不同的国家之间马铃薯的潜在产量和实际产量之间也存在不同，这

Table 1. Statistical characteristics of potato yield in Central-Eastern European countries, Mg ha^{-1} , mean for 2003-2012.

Characteristics	Czech R.	Germany	Hungary	Poland	Romania
Mean	25.57	41.78	24.24	18.35	14.15
SD ¹	2.94	3.68	2.88	3.84	1.72
CV ² (%)	11.5	8.8	11.9	20.9	12.1

Note: ¹SD: Standard deviation; ²CV: Coefficient of variation.

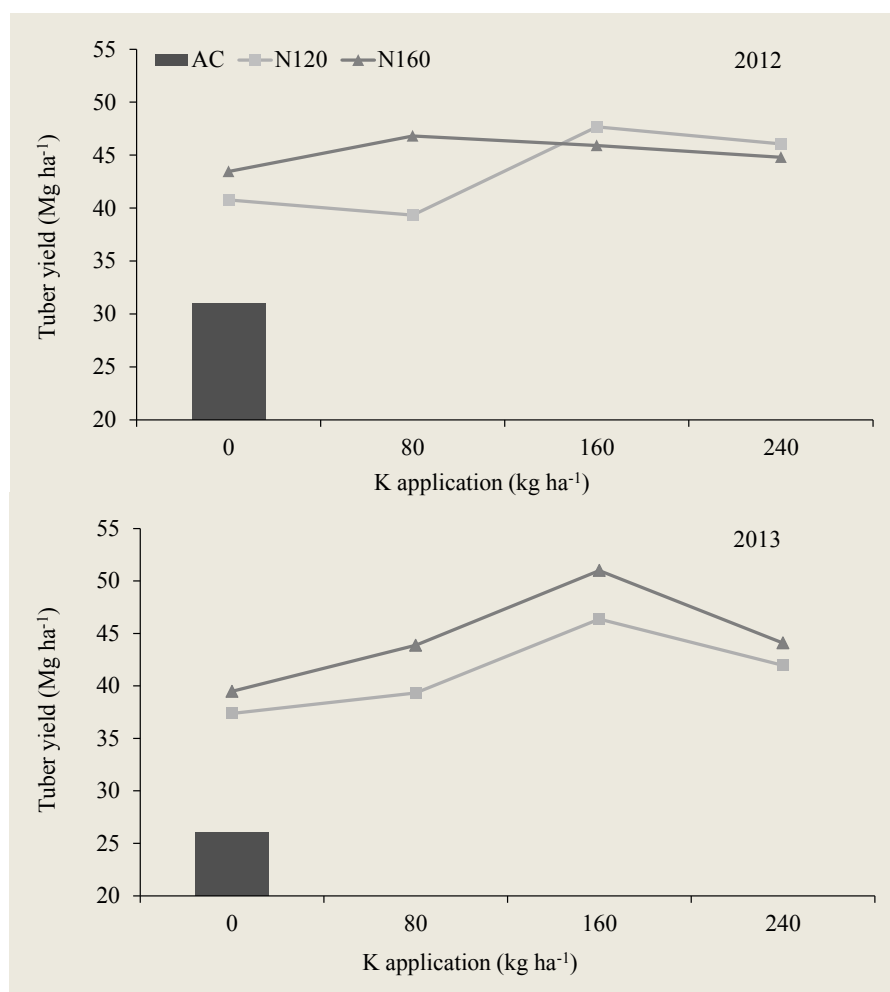


图1.2012年和2013年施氮和施钾对马铃薯块茎产量的影响。AC: 对照; N120和N160: 施氮水平, kg N ha^{-1} 。

场进行, 东经 $16^{\circ} 52'$, 北纬 $52^{\circ} 05'$ 。试验田块的土壤为砂壤土, 母质为壤质砂土, 属于漂白淋溶土。通过分析土壤中速效钾的含量获取土壤中钾的肥力状况, 2012年和2013年土壤中速效钾的含量分别为 $186 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ 土、 $154 \text{ mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ 土, 土壤中钾的肥力状况较高, 能满足马铃薯高产量生产的需求。2012-2013年试验田块土壤中有效磷和镁的含量都很高。

本试验设2个试验因子, 即施用钾肥和施用氮肥, 其中钾肥有4个施用水平, 分别为0、80、160、240 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, 氮肥有2个施用水平, 分别为120、160 kg N ha^{-1} , 8个处理, 另外加1空白处理, 即不施用氮钾肥。每个处理重复4次, 两种试验作物马铃薯和冬小麦实行轮作, 马铃薯的品种为Bellarosa, 冬小麦的品种为Muszelka。每个种植马铃薯的小区面积为 100 m^2 。播种前, 把氮肥硝酸铵(34% N)和钾肥氯化钾施与土壤中, 磷肥磷酸二铵按照土壤分析化验的结果确定施用量。在4月份的第三个周播下马铃薯种块, 9月份的第三个周收获马铃薯, 各试验小区里随机收获 14 m^2 。马铃薯收获后, 各个小区再化分为2个更小的小区, 面积为 37.5 m^2 , 其中一个小区不再施钾肥, 另一个小区继续施加钾肥氯化钾, 施用量为90 $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ 。磷肥还是根据土壤测试的情况确定施加磷酸二铵的量。

要归因于土壤质量的不同及不平衡的养分管理 (Grzebisz and Diatta, 2012)。

本研究的主要目的是通过试验数据表明优化施用的氮钾肥比率可提高氮的利用效率 (NUE), 同时也会提高砂质土壤上马铃薯的产量。另一个目的是评估钾肥的剩余效应, 即马铃薯收获后, 残留在土壤中的钾素对下茬作物冬小麦生产力的影响。

材料与方法

于两个连续的生长季节调查和评估马铃薯上施用钾肥对氮的供应及氮利用率的影响, 其中2012-2013年的研究对象为马铃薯。2012/13和2013/14的研究对象为马铃薯收获后土壤中残余的钾素对冬小麦生产力的影响。该试验安排在波兰波兹南市以西50 km的Donatowo的一个私人农

在马铃薯收获后, 即10月份的第一个周进行冬小麦的播种, 氮肥硝酸铵(34% N)施用量为 180 kg N ha^{-1} , 分3次施于麦田, 其中50%于春季返青期施加, 25%于抽穗期施加, 25%于灌浆期施加。7月底收获冬小麦。使用联合收割机于每小区收割 15 m^2 用于测产, 测产时所有小麦籽粒的含水量为14%。

用开氏法测定植物样品中氮的含量, 用火焰光度法测定钾的含量, 在 640°C 的马弗炉中灰化植株干样品, 再用33%的硝酸溶解, 结果用干物质质量表示。植物器官和整个植株中的大量营养物质的计算可通过植物组织中的浓度乘以各自的生物量。测量马铃薯收获后残留在土壤中钾的

含量用 Egner Rheim的方法,用0.04 M的乳酸钙提取土壤样品,提取液用盐酸调节到pH为3.5-3.7。这种方法特别适合相对较酸的土壤。

用下面的公式计算表达氮肥利用率:

- 农艺氮利用率 (kg 马铃薯 kg⁻¹ N) :

$$AEN = (Y_{Ni} - Y_0) / N_d$$
- N的复原率 (%) :

$$NR = (NU_{Ni} - NU_0) / N_d \cdot 100$$
- 生理氮肥的利用效率 (kg 马铃薯 kg⁻¹N) :

$$PhEN = (Y_{Ni} - Y_0) / (NU_{Ni} - NU_0)$$

按下面的公式计算单位产量钾的吸收量 (UKU) 和单位产量氮的吸收量 (UNU) :

$$UKU = KU_i / Y_{Ni} \text{ (kg K Mg}^{-1} \text{ 马铃薯);}$$

$$UNU = NU_i / Y_{Ni} \text{ (kg N Mg}^{-1} \text{ 马铃薯).}$$

其中:

- Y_{Ni} : 不同施N水平下收获的马铃薯产量 (kg ha⁻¹)
- Y_0 : 空白处理收获的马铃薯的产量 (kg ha⁻¹)
- N_d : 氮肥用量 (kg N ha⁻¹)
- KU_i : 不同施钾水平下作物吸收的钾 (kg ha⁻¹)
- NU_i : 不同施氮水平下作物吸收的氮 (kg ha⁻¹)
- KU_0 : 不施氮的对照处理作物吸收的氮 (kg ha⁻¹)
- NU_0 : 不施钾的对照处理作物吸收的钾 (kg ha⁻¹)

试验中获得数据通过STATISTICA 10进行传统的方差分析,不同处理之间进行T检验。

结果与分析

马铃薯块茎产量

马铃薯生长期间的天气条件通常被认为是植株生长和块茎产量的决定性因素 (Supit *et al.*, 2010)。本研究在试验开展的第一年,即2012年,天气情况总体比较潮湿湿润,6、7、8月这3个连续的月份降雨总量为312 mm。这明显高于以往的平均降雨量110 mm。2013年天气情况发生改变,6月份的降雨量

为90 mm,比较潮湿湿润,但是接下来的7、8月份总的降雨量为100 mm,属于半干旱的情况。尽管在这个季节降雨量相对比较充足,但是相对于马铃薯的生长需求仅仅刚合适。在夏季的几个月份里,降雨量如果低于以往的平均水平,就不能满足马铃薯在块茎增长的关键阶段对水分的需求。

在2012、2013年,氮磷肥施用量的交互作用明显会影响马铃薯块茎的产量。2012年,即在马铃薯块茎增长时期水分供应充足,不施肥的空白对照处理收获的马铃薯产量为31 Mg ha⁻¹ (图1)。这个产量水平暗示了试验地土壤肥力较高,马铃薯生长过程中条件非常合适。相比之下,2012年全国的马铃薯平均产量仅为24.4 Mg ha⁻¹,然而这个产量还是过去的10年中的最高产量 (FAOSTAT, 2014)。

虽然如此,在此基础条件下施肥对马铃薯产量的贡献还是非常明显的,当只施氮肥时,无论是低氮量120 kg ha⁻¹,还是高氮量160 kg ha⁻¹,马铃薯块茎产量都超过了40 Mg ha⁻¹ (图1)。当钾肥的施用量在80 kg ha⁻¹时,只有高氮水平下 (160 kg ha⁻¹) 马铃薯块茎产量有一个小的增加。当钾的施用量增加到160 kg ha⁻¹时,2个氮肥施用水平下马铃薯块茎产量均超过45 Mg ha⁻¹。再进一步提高钾肥施用量到240 kg ha⁻¹时,发现马铃薯块茎产量没有随之增加,对马铃薯块茎产量影响不大。详细分析较大的马铃薯块茎的来源,发现其中77%-86%的大的马铃薯块茎产于氮肥的施用量为160 kg ha⁻¹,钾肥施用量240 kg ha⁻¹的处理。

第二年,即2013年的试验研究发现马铃薯的产量相对不乐观。不施肥的空白对照处理马铃薯块茎产量为27 Mg ha⁻¹ (图1),当年全国马铃薯平均产量仅为21.4 Mg ha⁻¹ (FAOSTAT, 2014)。然而,不同的施肥处理

Table 2. Nutrient concentration in the whole potato plant at tuberling, % of DM.

K application	N application	2012			2013		
		N	K	N:K	N	K	N:K
<i>kg K₂O ha⁻¹</i>	<i>kg N ha⁻¹</i>	-----%-----					
0	120	4.23	4.00 ^a	1.06	5.33	3.52	1.51
	160	4.30	3.88 ^a	1.11	5.76	3.50	1.65
80	120	4.03	4.91 ^{ab}	0.82	5.47	3.62	1.51
	160	4.49	4.81 ^{ab}	0.93	5.57	3.68	1.51
160	120	4.12	5.46 ^b	0.75	5.33	3.59	1.48
	160	4.46	5.55 ^b	0.80	5.68	3.70	1.54
240	120	4.15	5.61 ^b	0.74	5.35	3.82	1.40
	160	4.35	5.69 ^b	0.76	6.11	3.79	1.61
Absolute control		3.72	3.87 ^a	0.96	5.37	3.21	1.67
Means		4.21	4.86	0.88	5.55	3.60	1.54

Note: ^{a,b}. The same letter means a lack of significant difference between level of the treatment.

对马铃薯块茎产量影响非常明显。收获的马铃薯块茎产量随施肥量的增加而逐渐增加,当钾肥的施用量增加到 160 kg ha^{-1} 时,马铃薯块茎产量最大,即氮的施肥量为 120 kg ha^{-1} 时,产量为 45 Mg ha^{-1} ,氮的施肥量为 160 kg ha^{-1} 时,产量为 50 Mg ha^{-1} 。当投入的钾肥量继续增加时,马铃薯块茎产量却明显下降。这显著表明当施氮量为 160 kg ha^{-1} 时,可被认为获得马铃薯高产量的最佳施用量。这一结果不受试验地块位置的影响,已被Jamaati-e-Somarini *et al.* (2010) for Iran, Mustonen *et al.* (2010) for Finland and Tein *et al.* (2014) for Estonia研究证实。

这里得到的试验结果能清楚的解释关于施用钾肥制度对马铃薯块茎产量影响的争议。本研究中,试验在轻质土上进行,除了土壤中有效钾丰富,2012年在马铃薯块茎生长和发展时期水分供应充足,施用氮肥能促进块茎产量,这表明氮是一个限制元素,钾肥对产量的贡献不是很显著(图1)。当水分和氮肥供应充足时可使所试验的马铃薯品种生产潜力充分发挥,估计最高产量水平可达到 48 Mg ha^{-1} 。相关研究也表明英国(Allison *et al.*, 2001)和埃塞俄比亚(Ayalew and Beyene, 2011)种植的马铃薯,在适宜的气候及合适的土壤有效钾条件下,产生潜力会得到充分发挥,如果进一步提高钾肥的施用量反而会显得没有必要。Hochmuth and Hanlon (2000)的马铃薯生产的灌溉制度也明显的验证了本研究的结果。

相反,2013年砂壤土上种植的雨养马铃薯,因降雨量不稳定,马铃薯产量水平要显著依赖于外界施加的两种肥料。夏季几个月份的轻度水分胁迫含蓄地强调施氮量对马铃薯块茎产量的影响,然而,需要适当的钾肥管理才能完成氮的有效性的潜在

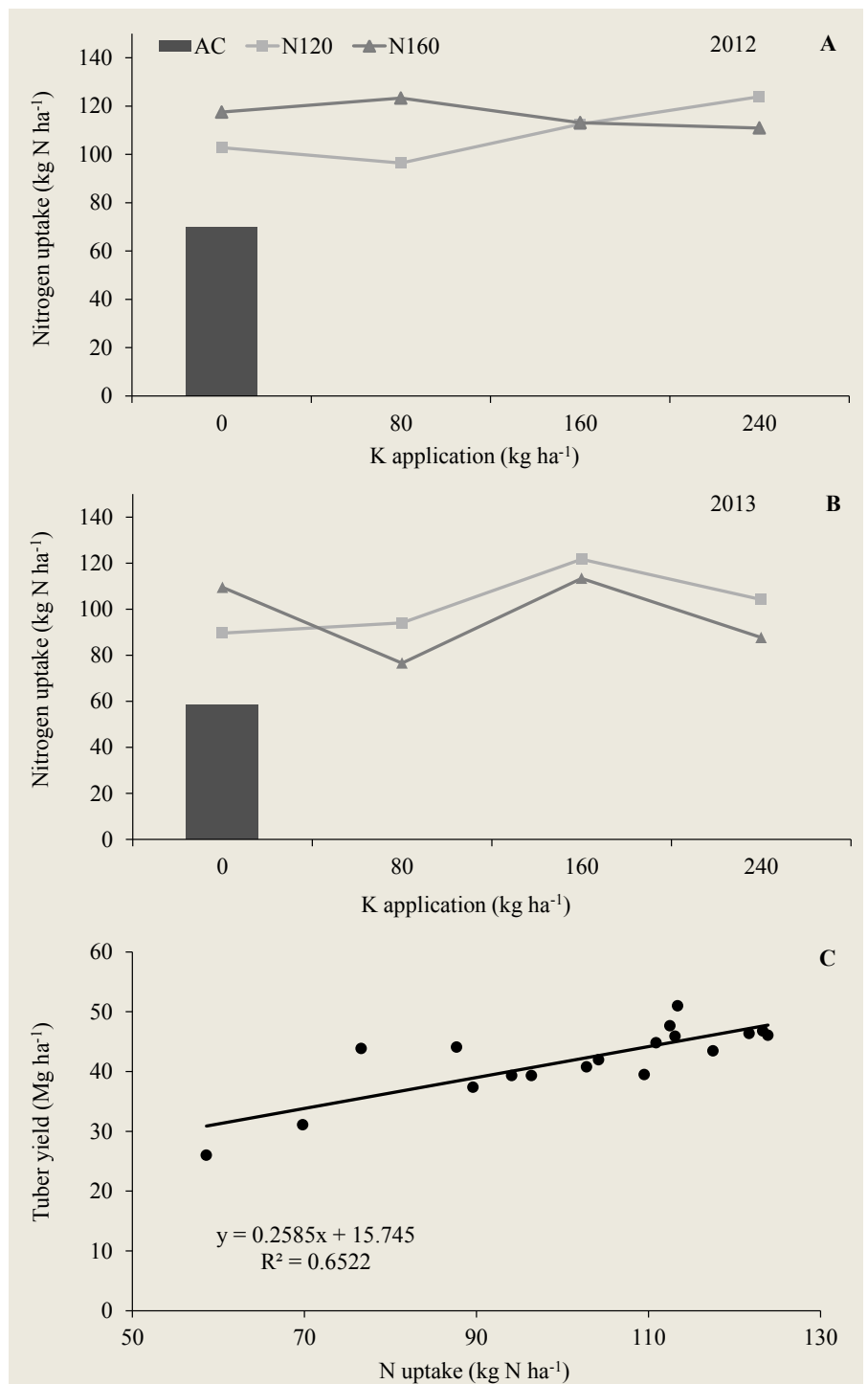


图2. 2012年(A)和2013年(B)施钾和施氮对马铃薯氮素吸收的影响。氮素吸收对马铃薯块茎产量的影响,不考虑年份和钾素施用量的影响。

贡献。在印度Sing and Lal (2012) 对相同品种的马铃薯的研究也表明了这种施用氮钾肥的交互作用, 在他们的研究中提出生产40 Mg ha⁻¹马铃薯块茎所需要的氮钾肥的最佳施用量分别为225 kg N ha⁻¹、150 kg K₂O ha⁻¹。

块茎形成阶段的植物营养状况

马铃薯块茎形成阶段决定马铃薯的产量, 碳源库关系和植物营养状况作为基本的生理因素, 相互参与和影响。2012和2013这两年的试验结果表明, 除了2012年植株中氮的浓度所有施肥处理的显著高于不施肥的对照处理的, 马铃薯块茎形成阶段, 整个植株氮的浓度既不受钾肥施用量的影响, 也不受氮肥施用水平的影响 (表2)。2012年的试验中植株中钾的浓度随钾肥施用量 (不是氮肥的施用量) 增加而增加, 但是2013年的这种变化不明显。有趣的是, 2012年的马铃薯植株中氮的平均浓度为4.21%, 显著小于2013年的平均浓度5.55%, 相反, 2012年中马铃薯植株中钾的平均浓度显著高于2013年的平均浓度, 分别为4.86%、3.60%。

在有效磷充足的条件下, 氮钾比率可作为反映马铃薯植株营养状况的一个指标, 最佳数值为0.88左右 (Haddock, 1961)。2012年潮湿湿润的夏季, 马铃薯植株中氮钾比率由空白对照处理的1下降到钾肥施用量最高处理的0.75 (表2)。当钾肥的施用量比较低, 为80 kg K₂O ha⁻¹时, 就可获得最佳氮钾比率, 这表明最佳的水分条件结合最优的养分状况, 马铃薯的养分需求会在最低限度。2013年的夏季有轻微的水分胁迫, 植株中的氮钾比率比较稳定, 也比较高, 平均为1.54, 但是仍然在最优范围内 (Rosen, 2001)。相对较高的氮钾比率表明在这样的环境情况下, 马铃薯植株更倾向于吸收氮素, 而钾素的获取遇到了

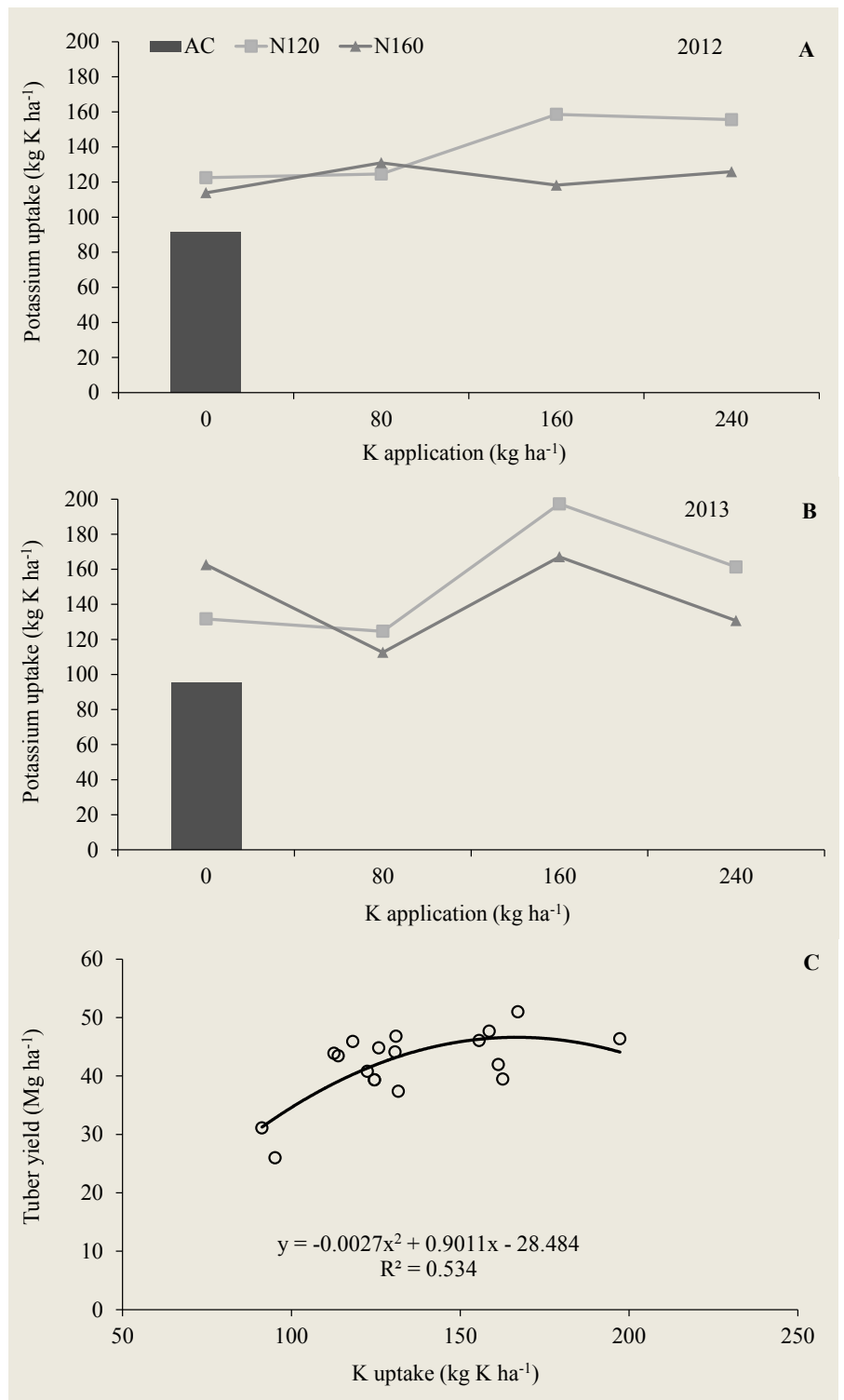


图3. 2012年 (A) 和2013年 (B) 施钾和施氮对马铃薯钾素吸收的影响。钾素吸收对马铃薯块茎产量的影响, 不考虑年份和氮素施用量的影响。

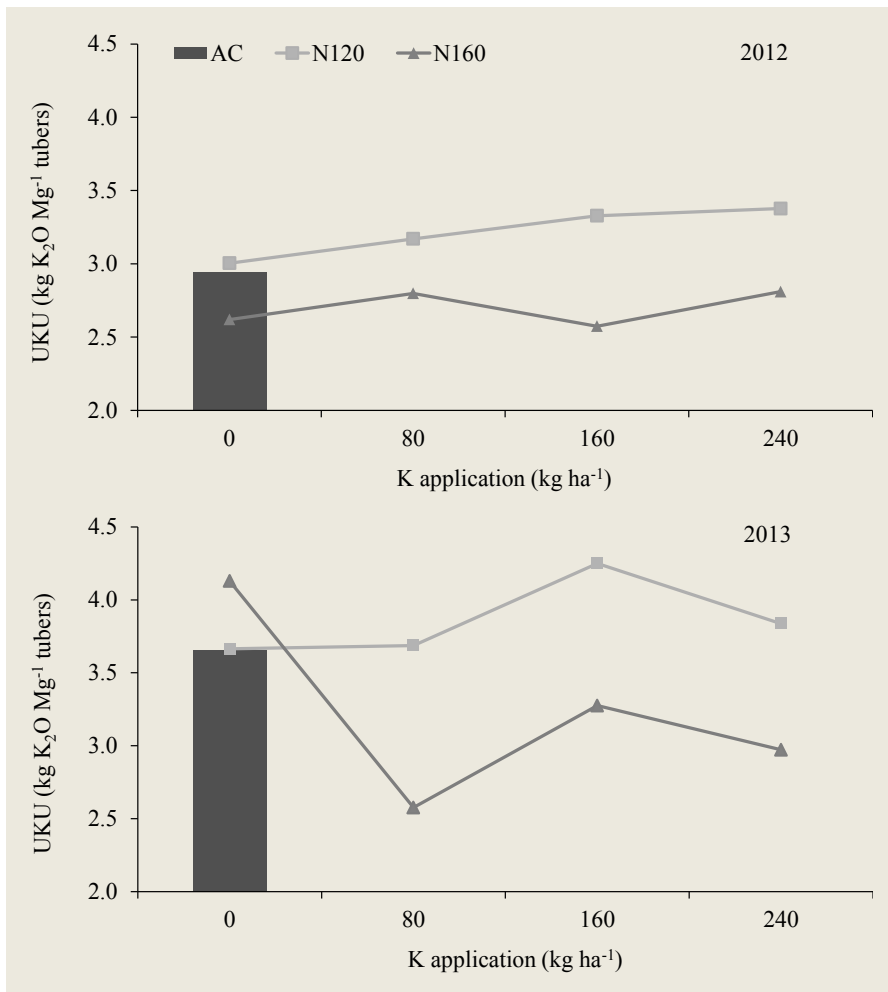


图4. 施钾和施氮对马铃薯钾素吸收效率的影响, 用UKU表示 (kg K₂O Mg⁻¹)。

株对氮的吸收为75-120 kg N ha⁻¹, 而不施肥的对照处理植株对氮的吸收仅为60-70 kg N ha⁻¹。在这方面, 钾肥和氮肥施用量的变化相互影响不明显。2012年, 植株吸收氮的范围变化较窄, 为95-120 kg N ha⁻¹。在低的施氮量条件下, 植株对氮的吸收随施钾量的增加而增加, 钾的施用量最高时, 氮的吸收量也是最高的。然而, 在高的施氮量条件下, 植株对氮的吸收随钾肥施用量的增加变化不大, 比较稳定。2013年, 植株对氮的吸收波动较大, 尤其是在高的施氮水平下。一个明显的吸收高峰是钾的施用量为160 kg ha⁻¹时。收获时氮在的马铃薯植株中的累积量与块茎的产量呈线性关系 (图 2C)。这种关系表明, 不管往年氮素的同比变化, 氮素是限制马铃薯生长及产量的一个重要因素。

平均而言, 钾素在马铃薯种的累积总量明显高于氮素的累积总量 (图 3)。在这里, 通过与不施肥的对照处理相比较, 施用氮肥最初的贡献是明显增加了钾的吸收。两年的试验中, 在2个高的钾肥施用条件下, 较高的氮肥施用水平会干扰甚至阻断磷的吸收。当钾的施用量为80 kg K ha⁻¹时, 植株对钾的吸收也较小。在这两年的试验中, 植株对钾的吸收量最高出现在氮的施用量为120 kg ha⁻¹, 钾的施用量为160 kg ha⁻¹时, 然后随施用量的增加而减少。试验结果清楚的表明产量的形成受钾素的影响, 这种影响在2013年表现的尤为明显, 相对于2012年, 2013年的自然条件尤其不利于马铃薯的种植。收获的马铃薯植株所吸收的钾素总量与马铃薯的产量之间呈曲线关系, 显示最佳钾肥施用量为170 kg K ha⁻¹ (图3C)。如果超过这个施钾量, 马铃薯产量会下降。

Table 3. Indices of nitrogen use efficiency.

K rates	N rates	Physiological N efficiency (PhEN)		Nitrogen recovery (RN)		Agronomic N efficiency (AEN)	
		2012	2013	2012	2013	2012	2013
<i>kg K₂O ha⁻¹</i>	<i>kg N ha⁻¹</i>	<i>kg tubers kg⁻¹ N_u</i>		-----%-----		<i>kg tubers kg⁻¹ N_d</i>	
0	120	296.1	367.0	27.5	25.8	81.5	94.8
	160	261.4	229.0	29.8	36.8	77.9	84.2
80	120	313.3	376.2	22.2	29.5	69.5	111.0
	160	295.7	276.4	33.4	40.4	98.8	111.6
160	120	390.1	322.7	35.6	52.6	138.9	169.6
	160	344.3	458.7	27.1	34.1	93.2	156.2
240	120	278.4	350.1	45.1	38.0	125.6	133.0
	160	335.4	345.8	25.7	32.7	86.3	113.1
Means		314.3	340.7	30.8	36.2	96.5	121.7

Note: N_u: N uptake; N_d: N fertilizer dose.

障碍。即使这样, 如果增加氮钾肥的施用量就会正面激发作物, 从而产量增加。

块茎中的养分累积

随氮肥的施用量增加植株对氮的吸收明显增加 (图2)。这两年的试验结果明显表明只施用氮肥时, 植

NUE (氮肥利用率) 指数

在农艺实践中, 作物对钾的需求的一个重要指标是单位养分吸收, 它描述了某种养分在单位主要产品

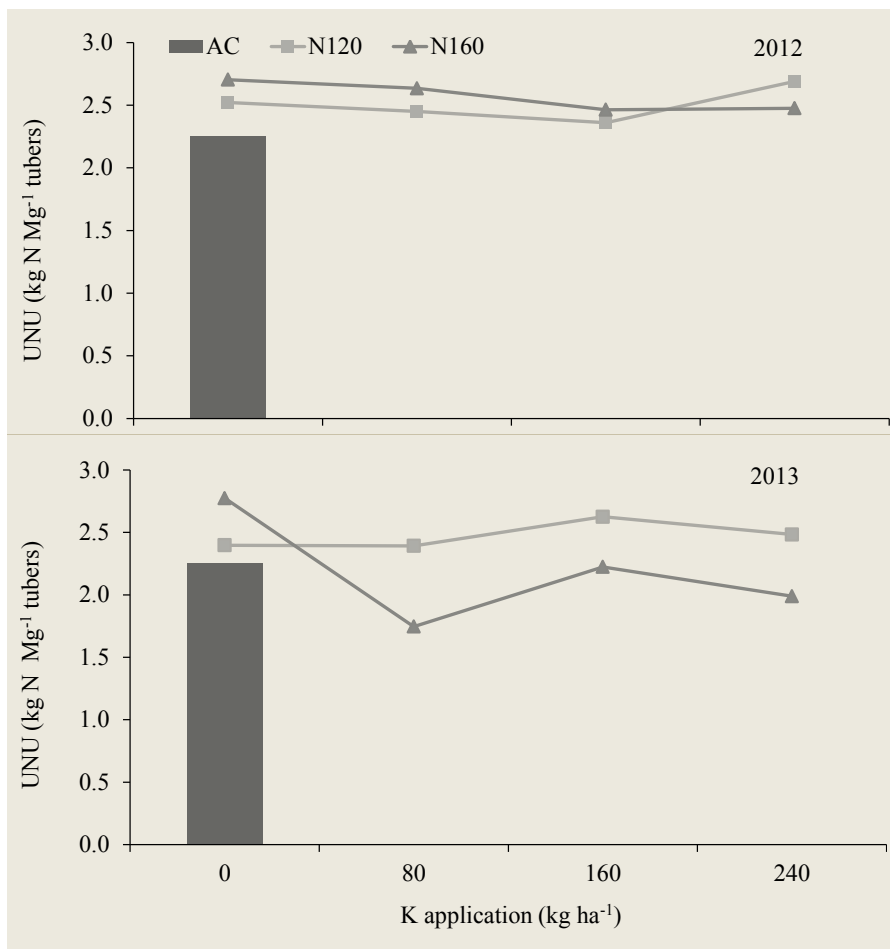


图5.施钾和施氮对马铃薯氮素吸收效率的影响,用UNU表示 (kg N Mg⁻¹)。

年, UKU为2.6-4.1 kg K Mg⁻¹。不考虑钾的影响, 高氮水平下会导致UKU下降。图5显示了第二个指数UNU (单位氮的吸收) 逐年的变化。然而, 不施肥的对照处理的指数两年都是一样的, 为2.25 kg N Mg⁻¹马铃薯。2012年UNU稍稍高于对照处理的, 对施肥没有反应。2013年的情况完全不同, 当氮肥施用量较高, 即160 kg ha⁻¹时, 施用钾肥时指数UNU反而变小。

氮利用率 (NUE) 是评估施肥最重要的指标。氮的生理效率 (PhEN) 允许比较不同施钾量下氮的施用影响。即随钾肥施用量的增加马铃薯产量的增加。如表3所示, 2013年的PhEN稍高于2012年的。钾和氮的交互作用对该指数的影响最大出现在钾肥的施用量为160 kg ha⁻¹时。2012年该指数最高数值出现在氮的施用量为120 kg ha⁻¹时, 而2013年PhEN指数的最高值出现在氮的施用量为160 kg ha⁻¹时。第二个NUE指数氮的恢复 (NR) 描述了施加的肥料中的氮素对作物吸收总氮量的贡献。总的来说, NR比较低, 尤其是2012年。在这两年的试验中, 氮和钾的交互作用对NR影响较明显, 高的施氮水平下, NR也较高, 相反, 高的施钾水平下, NR却较小 (表3)。第三个指数农业利用率 (AEN) 描述了施用氮肥的最终效果。不管是在哪一年, 投入的氮的最高生产力发生的氮钾肥的施用量分别为120、160 kg ha⁻¹时。而当氮和钾的施用量组合发生任何变化时, AEN明显变小。

土壤中钾的状态

众所周知, 马铃薯作物对钾素供应不足时表现出高度敏感, 这主要通过不发达的根系表现出来。收获后的土壤分析表明了施用钾肥制度对土壤中有效钾的影响。一般来说, 随钾肥施用量的增加, 土壤中有效钾的含量也随之增加, 增加量为16-26 mg K 100g⁻¹土。有趣的是, 这两年的试验

Table 4. Winter wheat response to the system of K fertilization, yield of grain, Mg ha⁻¹.

	2013	2014
K dose	-----kg K ₂ O ha ⁻¹ -----	
0	5,348 ^a	6,716
80	5,398 ^a	6,852
160	5,565 ^a	6,845
240	6,099 ^b	6,799
N dose	-----kg N ha ⁻¹ -----	
120	5,093 ^a	6,731
160	6,112 ^b	6,875
Freshly applied K dose for winter wheat	-----kg K ₂ O ha ⁻¹ -----	
0	5,355 ^a	6,698
90	5,851 ^b	6,908

Note: ^{a,b}: The same letter means a lack of significant difference between level of the treatment.

中的数量及其副产品中的额外数量的总和。据Allison *et al.* (2001) 报道, 在英国, 高产量的马铃薯单位钾的吸收 (UKU) 为2.6-5.7 kg K Mg⁻¹, 平均

为4.2 kg K Mg⁻¹。本研究中, UKU比较低, 各年都不一样。2012年, UKU为2.6-3.4 kg K Mg⁻¹。就如图4所示, 高氮水平下 (160 kg ha⁻¹) 的UKU较低。2013

中,马铃薯收获后土壤中的有效钾的最高值均出现在氮钾肥施用量分别为120、160 kg ha⁻¹时。这个结果表明当钾肥的施用量较高时,土壤中残存的有效钾会对下茬作物带来有益影响,尽管该种氮钾肥组合马铃薯的生产效率也是最高的。然而,需要注意的是土壤中有效钾的深度限制是60 cm。

钾肥的残余影响——冬小麦的反应

马铃薯收获后土壤中残存的钾素和新施加的钾素对下茬作物冬小麦的影响见表4。这两种来源的钾素对冬小麦的影响只在2013年表现的比较明显。当钾肥的施用量最高,即240 kg ha⁻¹时,施用钾肥的残余影响才表现比较明显,每公顷增产0.5 Mg小麦。2012年马铃薯种植上氮的施用制度好像对下茬作物冬小麦产生的残余影响更高一些,高的施氮水平比低的施氮水平下对冬小麦产量的影响有1 Mg。马铃薯收获后施用的钾肥只有2013年会对小麦产量带来影响,大约增产0.5 Mg ha⁻¹ (表4)。每年马铃薯植株获取养分和获取效率的不同部分的解释了这两年冬小麦产量的明显不同的原因。2012年气候条件有利,马铃薯养分需求较小,这就导致了土壤中残留大量的土壤养分,2013年,马铃薯对钾的需求比2012年的多(图4),从而较少的残留养分供应下茬作物冬小麦。当然,关于养分残留影响的更全面的评价还需要考虑一些其他的重要因素,例如下茬作物的天气条件。

结论

1. 比较连续不同天气条件下的两年收获的马铃薯产量,清楚地表明Bellarosa马铃薯品种对施用的钾肥比较敏感。
2. 对轻度水分胁迫下种植的马铃薯适当施用钾肥有利于马铃薯生长。
3. 氮和钾具有显著的交互作用,因此应仔细调整优化土壤中氮钾比率以生产出的最高马铃薯产量。
4. 施加的过剩磷钾肥对下茬作物会产生有利的影响,当然这还要取决于天气等其他状况。

参考文献:

- Allison, M.F., J.H. Fowler, and E.J. Allen. 2001. Responses of Potato (*Solanum tuberosum* L.) to Potassium Fertilizers. The J. of Agric. Sci. 136(4):407-426.
- Ayalew, A., S. and Beyene. 2011. The Influence of Potassium Fertilizer on the Production of Potato (*Solanum tuberosa* L.) at Kembata in Southern Ethiopia. J. Biol., Agric and Healthcare 1(1). 13 p.
- FAOSTAT 2014. Available online; accessed 2014-09-17.

- Grzebisz, W., J. Diatta, R. Haerdter, and K. Cyna. 2010. Fertilizer Consumption Patterns in Central European Countries - Effect on Actual Yield Development Trends in 1986-2005 Years - A Comparative Study of the Czech Republic and Poland. J. Central European Agric. 11(1):73-82.
- Grzebisz, W., A. Gransee, W. Szczepaniak, and J.B. Diatta. 2013. The Effects of Potassium Fertilization on Water-Use Efficiency in Crop Plants. J. Plant Nutr. Soil Sci. 176(3):355-374.
- Grzebisz, W., and J.B. Diatta. 2012. Constraints and Solutions to Maintain Soil Productivity: A Case Study from Central Europe. In: Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management - A Global Perspective. Dr. Joann Whalen, Å. (ed.). Intech 159-182.
- Haddock, J.L. 1961. The Influence of Irrigation Regime on Yield and Quality of Potato Tubers and Nutritional Status of Plants. American Potato Journal 38:423-434.
- Hochmuth, G., and E. Hanlon. 2014. A Summary of N, P, and K Research with Potato in Florida. UF, IFAS Extension, University of Florida. 28 p.
- Jamaati-eSomarin, S., R. Zabihi-e-Mahmoodabad, and A. Yari. 2010. Response of Agronomical, Physiological, Apparent Recovery Nitrogen Use Efficiency and Yield of Potato Tuber (*Solanum tuberosum* L.) to Nitrogen and Plant Density. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci. 9(1):16-21.
- Mustonen, L., E. Wallius, and T. Hurme. 2010. Nitrogen Fertilization and Yield Formation of Potato During a Short Growing Period. Agric. Food Sci. 19:173-183.
- Rengel, Z., and P.M. Damon. 2008. Crops and Genotypes Differ in Efficiency of Potassium Uptake and Use. Physiol. Plant. 133:624-636.
- Rosen, C. 2001. Tissue Analysis as a Nutrient Management Tool for Potatoes. Minnesota Vegetable IPM Newsletter 3(9).
- Singh, S.K., and S.S. Lal. 2012. Effect of Potassium Nutrition on Potato Yield, Quality and Nutrient Use Efficiency under Varied Levels of Nitrogen Application. Potato J. 39(2):155-165.
- Supit, I., C.A. Van Diepen, A.J. De Wit, P. Kabat, B. Barruth, and F. Ludwig. 2010. Recent Changes in the Climatic Yield Potential of Various Crops in Europe. Agr. Syst. 103:683-604.
- Tein, B., K. Kauer, V. Eremeev, A. Luik, A. Selge, and E. Loit. 2014. Farming Systems Affect Potato (*Solanum tuberosum* L.) Tuber and Soil Quality. Field Crops Research 156:1-11.
- Zörb, Ch., M. Senbayram, and E. Peiter. 2014. Potassium in Agriculture - Status and Perspectives. J. Plant Physiol. 171:656-669.

论文“钾素可促进氮的利用效率——以种植在轻质土上的马铃薯为例”可以在国际钾肥研究所官方网站区域活动/中欧下载浏览。