

# 研究报告



SoilCares mobile lab in action. Photo by SoilCares.

肯尼亚西部布西亚县和瓦圣吉术县(Uasin Gishu and Busia)土壤肥力状况及玉米生长上的氮磷钾混合配比

van Erp, P.J.<sup>(1)(1a)</sup>, T. Terhoeven-Urselmans<sup>(1)</sup>, and R. van der Meer<sup>(2)</sup>

## 摘要

全球人口数量持续增长, 要填饱这众多人口的肚子, 增加小自耕农土地上的作物产量刻不容缓。为完成这一目标, 负担得起的土壤测试方法、施肥建议、满足作物生长所需且可及的最佳肥料是必须考虑的。“关爱土壤”移动实验室通过使用红外光谱法提供了负担得起的土壤测试, 并通过稍微改进版的热带土壤肥力评价 (QUEFTS) 系统给小自耕农做出施用不同量的氮磷钾混合配比的施肥建议。采集于肯尼亚西部布西亚县和瓦圣吉术县共2107个土壤样品由“关爱土壤”移动实验室测试, 土壤测试结

果再通过基模分析和QUEFTS分析得出: 1.更精确的土壤肥力分类; 2.优化玉米生长所需的氮磷钾混合配比的规划。研究显示共划分了8个土壤基模, 其中有4个占绝对优势。此外, 对所有县做出4个肥料混合配比基模, 这是基于玉米产量能达到 $5 \text{ t ha}^{-1}$ 而做出的非常合理的且能满足植物生长所需的氮磷钾施肥配比。这4个肥料混合配比分别

<sup>(1)</sup>SoilCares Research BV, Binnenhaven 5, 6709 PD Wageningen, The Netherlands

<sup>(2)</sup>SoilCares Holding BV, Binnenhaven 5, 6709 PD Wageningen, The Netherlands

<sup>(1a)</sup>通讯作者: [Peter.vanErp@soilcaresresearch.com](mailto:Peter.vanErp@soilcaresresearch.com)

是: 12:25:0、6:22:14、0:40:0、13:33:0(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)。氮磷钾的推荐施用量与植物生长需求最佳的氮磷钾量之间的平均相对偏差分别是36%、-10%、0%。本文描述的方法,包括地图的绘制,在化肥工业决策、贸易商和决策人在生产方面及不同作物和地区特定的氮磷钾混合配比实用性等方面非常有用。

## 引言

为了满足全球快速增长人口的饮食需求,必须要找到一条能增加粮食作物产量的道路,这对发展中国家的小自耕农非常重要(FAO, 2009)。在种植作物上,许多小自耕农面临着一个巨大的收益差额,例如潜在产量和实际产量的差异。决定潜在产量差异的关键因素是土壤养分管理和土壤肥力状况(Licker *et al.*, 2010)。氮磷钾是植物生长所必需的大量营养元素,在植物的生长过程中扮演重要角色,还会直接影响到植物产量(Marschner, 2012)。在小自耕农的耕作系统中,作物从土壤中吸收消费掉的氮磷钾,往往小于农民通过肥料施入的量。氮磷钾这种负平衡直接导致了土壤中氮磷钾的肥力状况出现逐渐不可逆的下降(Roy, 2003; Smaling, 1993)。恢复土壤肥力状况,制定作物特定的氮磷钾的推荐施用量是增加作物产量的先决条件。消灭产量差距首先必须要进行精确的且能负担起的土壤测试,紧跟着进行肥料推荐,并且这些推荐的肥料能被农民接受。Shepherd *et al.* (2007)曾经报道过红外技术能在土壤测试中应用,但这是一个间接的方法需要校准和有效性研究,只有当这些前期工作完成后,再运用该方法则得到精确的结果,此时这个物美价廉的测试工具会帮小自耕农完成日常的土壤测试。

QUEFTS 施肥模型(Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils, 热带土壤肥力状况定量评价, Janssen *et al.*, 1990)已经应用于肯尼亚玉米氮磷钾施肥。该模型会根据土壤的肥力状况、土壤pH与氮磷钾的供给之间的相互作用、肥料养分效率、预期产量计算出最佳养分率。另外, QUEFTS 施肥模型也在全世界别的主要作物上得到应用和验证有效(Sattari *et al.*, 2014)。

虽然许多非洲国家已经开展长期的肥料补贴项目,但是小自耕农获得有机无机肥料还是有限的。此外,重复施用尿素、铵盐、含磷肥料已经引起土壤酸化,土壤钾肥力下降,氮或磷利用率低,甚至是氮磷利用率一起下降。产生这些负面影响最主要的原因,是施加的肥料养分不能有效调节已经专门测量过的土壤养分状况和作物最优生产的养分需求。

总体式模糊推荐施肥方式的负面效果众所周知。如果下面提到的3个前提条件不能完成,则制定的混合配比肥料就不能应用,这三个前提条件分别是: 1) 确定不同地区

或国家的准确详细的土壤养分状况, 2) 计算出最佳作物产量所要推荐的氮磷钾的施用量, 3) 建立优化有限数量的适当的氮磷钾混合配比技术。本文所提到的“适当的”指与实际需求有所偏离是可以接受的。

原型分析是一种实证分析,数据驱动的分类算法,产生一些典型和代表性的潜在的多元数据集(Cutler and Breiman, 1994)。这些典型的数据集称为基模,一旦基模建立,则通过潜在的数据集产生的任何新的情况代表被划分为一个基模。原型分析已经在经济学中得到广泛应用(Porzio *et al.*, 2008),同时它也可以用来进行土壤分类或者建立肥料混合配比的基模,这是优化合适的氮磷钾肥料配比的基础。

在2014年的前3个月,“关爱土壤”移动实验车分析了取自肯尼亚西部布西亚和瓦圣吉术2个县的2107个土壤样品,本论文的目的就是确定这些县的土壤肥力状况模型及玉米生产上氮磷钾混合配比模型。

## 材料与方法

在肯尼亚西部的布西亚和瓦圣吉术县进行野外调查(图1)。

土壤样品的获得是通过小自耕农自己进行取样,我们只要提供给他们土钻,样品袋,登记表及0~20cm表土的取样方法。所获得的土壤样品在采样空间和作物种植类型上做了强制性限制,即只在布西亚和瓦圣吉术这2个县采样,种植作物仅为玉米。每一个样品的空间点位通过亚区

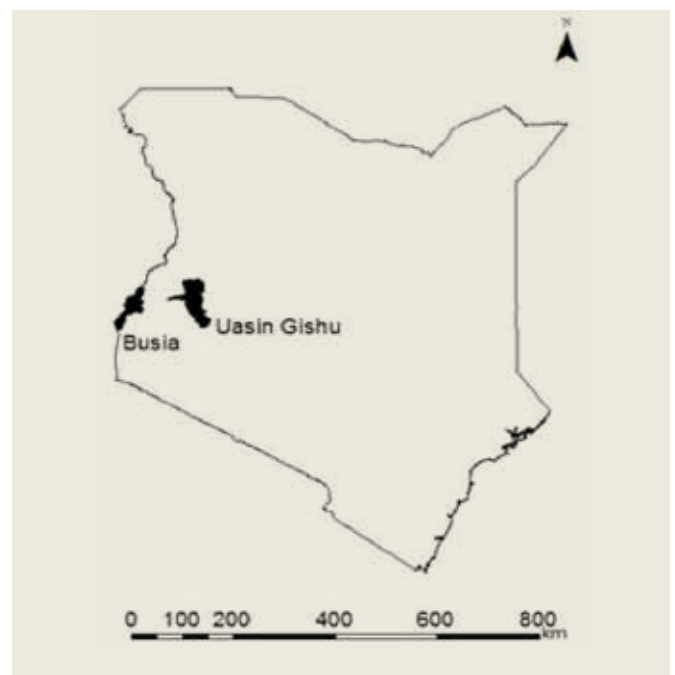


图1. 试验所在的肯尼亚西部的Uasin Gishu and Busia两个县。



图2.关爱土壤移动式土壤测试实验室。

定位(从全球行政区域版本的2数据库的肯尼亚5级水平)。在布西亚和瓦圣吉木县,总共有117个亚区。

一共采集了2107个土壤样品,并送到“关爱土壤”移动土壤测试实验室进行分析化验。收到土壤样品后,潮湿的土壤样品被捏碎,研磨,再通过加热气流在40°C下烘干近1小时直至烘干。随后,压碎烘干的样品,过2 mm的筛,细分,取15 mL的样品供测试。这15 mL待测样品再用球磨

机磨细后以便通过中红外光谱漫反射来测定。通过光谱分析,利用“关爱土壤”测试校正工具获得肯尼亚土壤的化验数据。系统中的数据流按照内部质量标准不断自检,只有自检通过,土壤化验数据才会输出。输出的数据包括有机碳、全氮、pH、磷含量、交换性钙、交换性镁、交换性钾以及粘土和砂的比例。

QUEFTS模型 (Janssen *et al.*, 1990)

包括修订版 (Sattari *et al.*, 2014) 习惯于通过场景研究来计算,包括: 1) 土壤中氮磷钾的潜在供应能力, 2) 不同产量水平下氮磷钾的需求, 3) 其余的肥料养分需求。

方案计算由2个玉米产量水平(分别为2 t ha<sup>-1</sup>、5 t ha<sup>-1</sup>)和2个水平的养分利用率所需肥料的量(分别为一般水平、高水平)组成。假设植株每生产1t玉米需要吸收22 kg氮, 3.7 kg磷和14.6 kg钾,如果必需养分不能被土壤供应,

剩余养分假定由化肥供应(单位为kg ha<sup>-1</sup>)。肥料养分计算量转换成N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O,以便比较混合配比组成。对于2个产量水平,一般水平利用率下假定通过植物肥料养分吸收施用氮的50%,磷的10%,50%钾,而高水平氮磷钾利用率分别为50%、20%和75%。关于施肥建议,如果土壤pH低于4.9,农民在施肥之前要撒施石灰,这么做的目的就是要排除强酸性土壤对养分供应带来的不利影响,提高肥料利用率。计算潜在的土壤养分供应情况的时候,水土混合液测得的pH值要在0.01 M CaCl<sub>2</sub>测得的pH值上增加0.3个pH单位。

原型分析的实施通过archetype-package界面(Eugster & Leisch, 2009)在R的统计环境下操作(R core team, 2013),输入的数据在使用之前已经被剔除过,即平均值或除以它们的标准方差。所有土壤性质的数据不输入进行原型分析,模型建立后,2107个土壤样品分别被划分为其中的一个基模。肥料施用混合配比基模是在目标产量为5t且基施条件下计算的;表施时应该减去全

表1.总体以及布西亚和瓦圣吉木县的土壤性质(中位数和范围)

土壤性质	单位	总体 (n=2,107)		布西亚县 (n=1,139)		瓦圣吉木县 (n=968)	
		中位数	范围	中位数	范围	中位数	范围
有机C	g kg <sup>-1</sup>	17	4-87	13	4-87	21	5-68
总N	g kg <sup>-1</sup>	1.5	0.3-4.9	1.2	0.3-4.5	1.9	0.5-4.9
交换性Ca	mmol+ kg <sup>-1</sup>	27	0-269	17	0-269	28	0-269
交换性Mg	mmol+ kg <sup>-1</sup>	13	0-63	12	0-63	15	2-63
交换性K	mmol+ kg <sup>-1</sup>	3.4	0-9.2	2.5	0-9.2	4.5	0.7-9.2
pH		4.9	4.0-6.6	4.9	4.0-6.6	4.8	4.1-6.0
粘粒	g kg <sup>-1</sup>	510	10-820	420	10-780	580	40-820
砂粒	g kg <sup>-1</sup>	300	70-840	340	70-840	270	70-820
储藏P	mmol P kg <sup>-1</sup>	5	1-23	5	1-23	6	1-20

表2.Uasin Gishu and Busia县8个原型数据集 (n=2107) 的土壤特性, 土壤样品量和亚区分类号

土壤性质	原型							
	1	2	3	4	5	6	7	8
有机C	8	73	11	6	22	28	7	27
总N	0.7	4.3	0.8	0.5	2.1	1.3	1.0	2.6
交换性Ca	34	157	0	12	26	231	18	8
交换性Mg	14	36	4	6	18	56	5	8
交换性K	1.7	8.7	0.5	2.0	5.1	5.9	1.0	5.1
pH CaCl <sub>2</sub>	5.3	5.3	4.2	5.7	5.0	5.8	5.0	4.2
粘粒	280	530	110	50	670	460	560	680
砂粒	370	280	720	820	240	190	140	170
储藏P	14	19	1	3	2	13	4	10
不同原型土壤样品数量	64	39	264	312	557	95	411	365
依据主要土壤原型分类的亚区数量	3	1	6	15	29	6	32	25

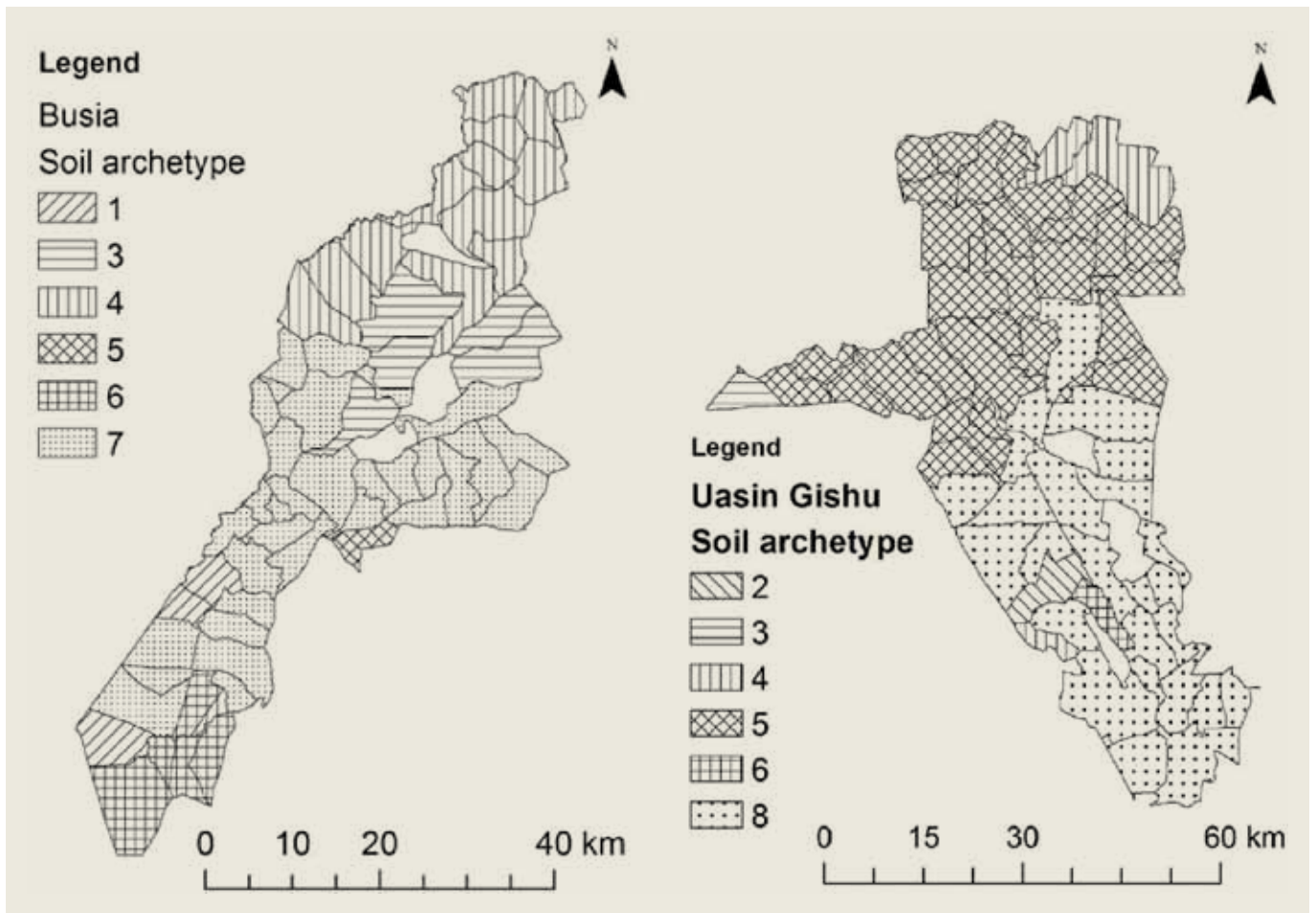


图3. 在Uasin Gishu and Busia两个县中每个县主要代表性土壤类型 (由全球行政管理区域数据库(GADM)定义; <http://www.gadm.org/>).

表3. 玉米目标产量为5t ha<sup>-1</sup>和一般养分利用率 (施入的肥料中50%的N, 10%的P和50%的K为作物吸收) 情况下玉米对肥料养分的需求量。表中显示了属于一个土壤原型的所有土壤样品的中位数、最大和最小范围

土壤原型	肥料总氮			肥料总P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			肥料总K <sub>2</sub> O		
	中位数	最小值	最大值	中位数	最小值	最大值	中位数	最小值	最大值
	<i>kg ha<sup>-1</sup></i>								
1	159	97	186	306	144	359	0	0	81
2	78	0	111	255	90	320	36	0	97
3	172	88	200	398	307	411	40	0	176
4	170	71	199	377	276	411	0	0	172
5	146	5	178	366	276	411	0	0	31
6	106	0	158	273	121	339	0	0	103
7	139	69	193	368	290	411	7	0	172
8	135	0	166	334	253	388	0	0	98

(kg ha<sup>-1</sup>)的总量不能超过46% (当氮肥料主要是尿素并且养分含量最高, 添加任何其他肥料都会降低混合肥料的总养分含量)。模型建立后, 2107个土壤样品均会归属于一个混合基模。为了评价没有运用最佳养分率仅选择混合配比的影响, 对氮磷钾的施用量, 我们计算: 1) 绝对养分残差 (肥料—作物种植时的需求); 2) 相对养分残差 (每一作物的绝对残差\*100)。肥料养分回收部分也要计算在内。知道了生产5t的玉米植株所需氮磷钾的量, 氮磷钾的混合配比的施用量就是最优的。这些可以通过降

氮的30%。先于混合配比基模分析, 计算N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O (kg ha<sup>-1</sup>)的量转变成混合比率用于混合肥料的生产。例如氮磷钾的比例为16: 23: 7, 混合物中N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O

低在可能的氮磷钾用量的范围内绝对残差来获得。

试验结果的地理代号通过ArcGIS 软件获得。

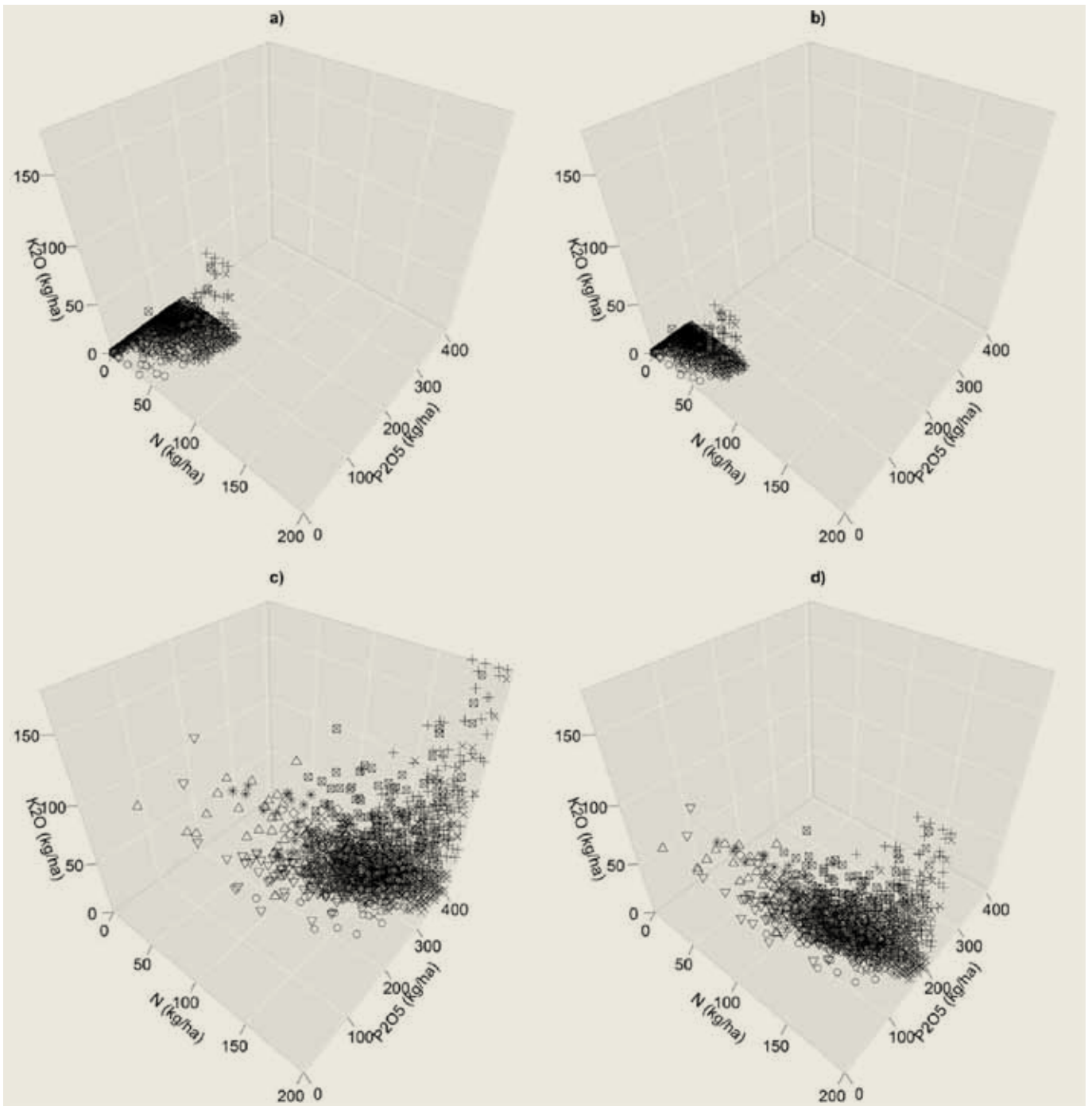


图4. 玉米不同目标产量下总施肥量的3D图: i) 2t (a and b) ; ii) 5t (c and d) ; iii) 常规养分利用率 (a and c) ; iv) 高养分利用率 (b and d)。图中不同的符号代表表2和图1中所指的土壤类型。

## 结论

### 土壤

2107个土样, 1139个取自布西亚县, 968个取自瓦圣吉术县。表1列出了测试土壤的概况。

取自布西亚和瓦圣吉术县的土壤化验结果显示, 虽然土壤特性的数据变化范围较大, 但是仍有可比性。通过测

试结果可以看出, 布西亚和瓦圣吉术县的土壤比较肥沃, 因为土壤中的有机碳、全氮、黏粒、交换性钙镁钾的平均值较高, 土壤pH合适。

对全部土壤数据集进行原型分析, 最后得出8个土壤基模。表2列出了这8个土壤基模的土壤特性。大部分情况下, 在区分2个基模时2~6的土壤基模是决定性的。例如,

第5个基模的土壤有机碳、全氮、交换性钙镁钾的含量比第7个基模的低, 这些基模的pH基本一致。

根据这8个基模, 把这2107个土壤样品分类, 划分到基模1、2、6的土壤样品分别不到100个, 基模3、4、8的土壤样品在200~400个, 基模5、7的土壤样品超过400个。

图3的地图显示, 在布西亚县, 土壤基模3、4、6、7占绝大多数, 而在瓦圣吉术县, 土壤基模5、8占优势。117个亚

区, 仅有1个土壤基模的只占12%, 而在其他地方, 会有2~7个土壤基模。分布规律如下: 有2个土壤基模的占23%, 3个土壤基模的占26%, 4个土壤基模的占20%, 5个土壤基模的占14%, 6个土壤基模的占4%, 7个土壤基模的占1%。

### QUEFTS方案研究

图4和表3显示了QUEFTS方案研究的结果, 模拟了这8个土壤基模在不同玉米产量水平和磷钾肥料效益下对全部氮磷钾肥料施用量的影响。

明显可见, 样品归于一个土壤基模的被限制到一个特定位置用三维表示养分施用量, 在不同的土壤基模之间存在重叠。产量水平和养分利用率对推荐养分量有重大影响。例如, 在产量水平为5 t ha<sup>-1</sup>时显示, 高的养分利用率要比在相同的产量水平正常的养分利用率下减少磷钾养分的需求。

表4. 在目标产量为5t ha<sup>-1</sup>和一般肥料利用率情况下混配模型

肥料	混配模型			
	1	2	3	4
N	12	6	0	13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25	22	40	33
K <sub>2</sub> O	0	14	0	0
根据原型分类的土壤样品采集数量	1,032	130	153	792
根据混配模型分类的亚区数量	67	2	7	41

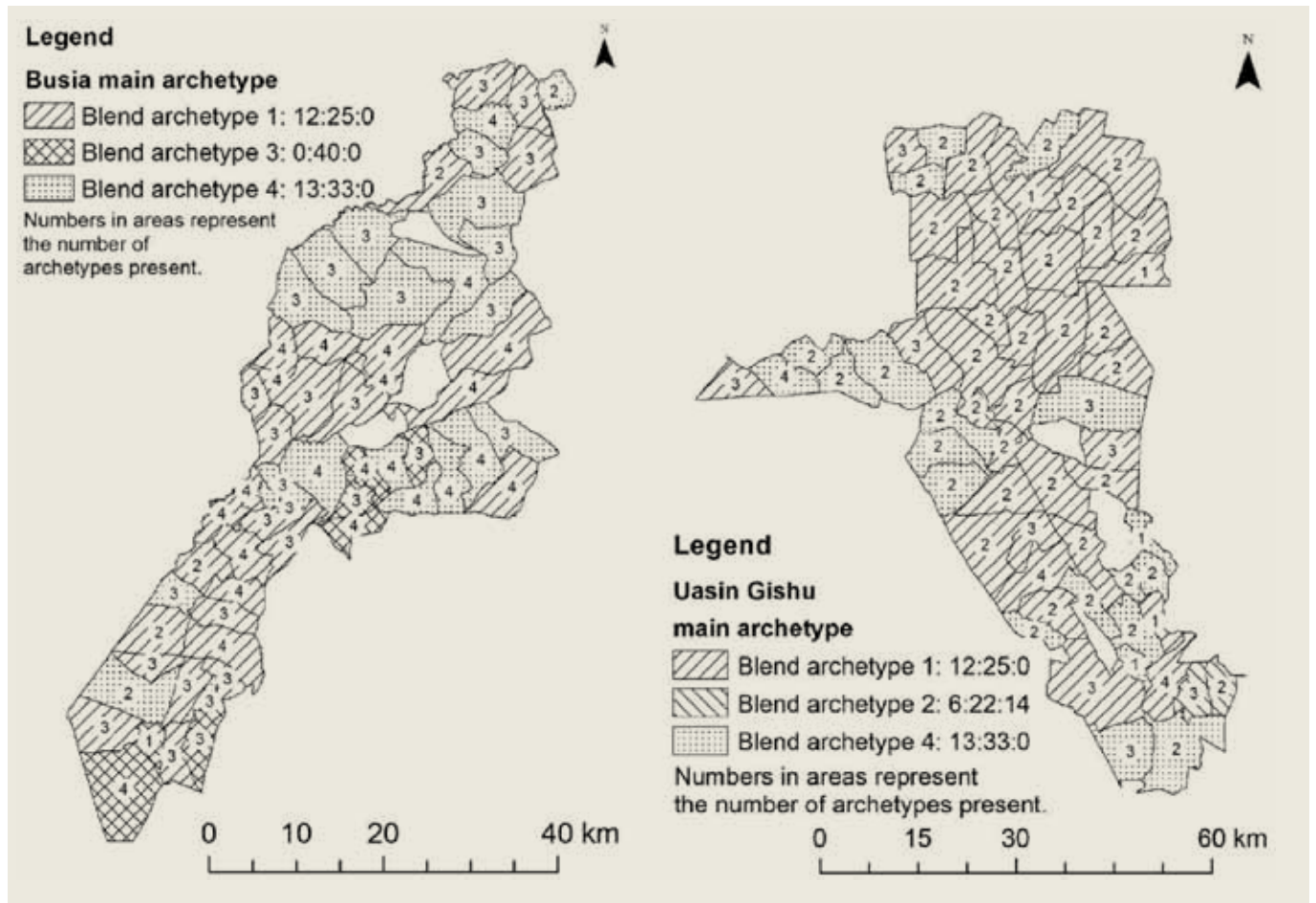


图5. Busia and Uasin Gishu县不同亚区的混配比例推荐种植区域。

表3对玉米产量为5 t ha<sup>-1</sup>, 并且养分利用率正常时进行深入分析, 研究显示氮磷钾的总施用量分别为78~159, 90~411和0~176 kg, 不同的土壤基模间存在明显的不同, 随着重叠而发生。

## 讨论

利用红外技术的日常土壤测试, 结合“关爱土壤”移动实验室, 对小自耕农来说是在缩小作物产量与高产的差距上迈出了最有希望的第一步。在布西亚和瓦圣吉术县项目中, 小自耕农提供的土壤样品超过2100个, 这些土壤样品的分析化验由在一辆移动汽车上的3人小分队历时8周完成。所有的小自耕农在送交样品3小时后均收到了田间作物最佳施肥推荐建议。

关于布西亚和瓦圣吉术县一级的数据图, 对于在获取近期土壤肥力状况详细情况方面非常有用, 土壤样品的测试数据结合由QUEFTS施肥模型获得的最佳氮磷钾施用量提供了一个数据集, 该数据集通过基模方法得出最佳肥料混合配比。

取自布西亚和瓦圣吉术县的土壤样品被划分成了8个独特的不同土壤特征的土壤基模, 发现2个县的主要土壤基模不同。然而, 即使在亚区水平下也会发现巨大的土壤变化。土壤基模和土壤地图上的标注的土壤类型两者之间仿佛没有直接的关系, 可能的原因是普通土壤地图只是给出综合的静态的土壤性质。当动态的土壤特性考虑在内时, 产生了更加详细精确的土壤肥力地图。这些在动态土壤特性上的改变很可能是近期农田、肥料、作物收获后残留物管理的结果, 这需要进一步的调查研究。

本研究中得到的土壤基模提供了一个在土壤肥力状况评价、施肥建议、消耗标准方面有益的出发点。这是假设土壤基模一段时期内保持不变, 如果情况不是这样, 关于土壤肥力状况和施肥量的沟通及知识转化将会变得更有挑战性, 以后的研究也将基于此观点。

表4和图4显示了由于土壤基模的不同, 比预期氮磷钾的最佳施用量方面的巨大的变化。然而, 当用原型方法计算所有样品的氮磷钾的施用量时, 一个最佳步骤需要包括获得最优混合量应该单独应用于一个领域。2107个土壤样品分别划分为一个不同的混合基模, 计算显示, 虽然存在氮磷钾的残差, 但是无论是绝对值还是相对值都可接受。

本研究显示, “关爱土壤”移动土壤测试观念在减小产量差距方面是一个好的开始。红外技术的测试对小自耕农来说负担得起, 在大田及作物最佳氮磷钾施肥建议方面

表5. 玉米种植时绝对和相对肥料残差统计分析

残差类型	群体特征	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
绝对残差: 肥料-作物需要	10个百分点	-30	-57	-36
	中位数	37	-37	0
	平均值	35	-29	-4
	90个百分点	59	0	0
相对残差: 据对残差/作物需求量 (%)	10个百分点	-27	-16	-100
	中位数	36	-10	0
	平均值	34	-8	-26
	90个百分点	63	0	0

QUEFTS计算模型具有良好的科学依据, 3个小时内就可得到结果。就像本文所描述的, 数据也能更详细的分析, 从而得到土壤施肥建议及混合配比基模。这个信息对于知识转移到小自耕农, 以及大面积农田和作物氮磷钾混合配比肥料经济生产潜在的应用方面是一个很好的基础。

## 感谢

布西亚的土壤测试得到芬兰和肯尼亚政府的PALWECO资金支持, 瓦圣吉术县的土壤测试得到了当地政府的支持。

## 参考文献

- Cutler, A., and L. Breiman. 1994. Archetypal Analysis. *Technometrics* 36(4):338-347. Taylor & Francis Ltd.
- Eugster, M.J.A., and F. Leisch. 2009. From Spider-Man to Hero - Archetypal Analysis. *R. Journal of Statistical Software* 30(8):1-23.
- FAO. 2009. How to Feed the World in 2050. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How\\_to\\_Feed\\_the\\_World\\_in\\_2050.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf), accessed July 2014.
- Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J. Wolf, and H. van Reuler. 1990. A System for Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils (QUEFTS). *Geoderma* 46:299-318.
- Licker, R., M. Johnston, J.A. Foley, C. Barford, C.J. Kucharik, C. Monfreda, and N. Ramankutty. 2010. Mind the Gap: How Do Climate and Agricultural Management Explain the 'Yield Gap' of Croplands Around the World? *Global Ecology and Biogeography*.
- Marschner, H. (ed). 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* 3<sup>rd</sup> edition. P. Marschner (ed). Elsevier. 651 p.
- Porzio, G.C., G. Ragozini, and D. Vistocco. 2008. On the Use of Archetypes as Benchmarks. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 24(5):419-437.
- R Core Team. 2013. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

- Roy, R.N. 2003. Assessment of Soil Nutrient Balance; Approaches and Methodology. Rome, FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 14. 101 p.
- Sattari, S.Z., M.K. van Ittersum, A.F. Bouwman, A.L. Smit, and B.H. Janssen. 2014. Crop Yield Response to Soil Fertility and N, P, K Inputs in Different Environments: Testing and Improving the QUEFTS Model. *Field Crops Research* 157:35-46.
- Shepherd, K.D., and M.G. Walsh. 2007. Infrared Spectroscopy - Enabling an Evidence-Based Diagnostic Surveillance Approach to Agricultural and Environmental Management in Developing Countries. *J. Near Infrared Spectroscopy* 15:1-19.
- Smaling, E.M.A. 1993. Soil Nutrient Depletion in sub-Saharan Africa. *In: van Reuler, H., and W.H. Prinds (eds.) The Role of Plant Nutrients for Sustainable Food Crop Production in sub-Saharan Africa.* p. 53-67.

“肯尼亚西部Uasin Gishu和Busia县土壤肥力状况及玉米生长上的氮磷钾混合配比”一文可以在国际钾肥研究所官方网站浏览下载：[区域活动/SSA](#)