

磷在城市周边地区的流通和储存： 养分在当地的循环利用

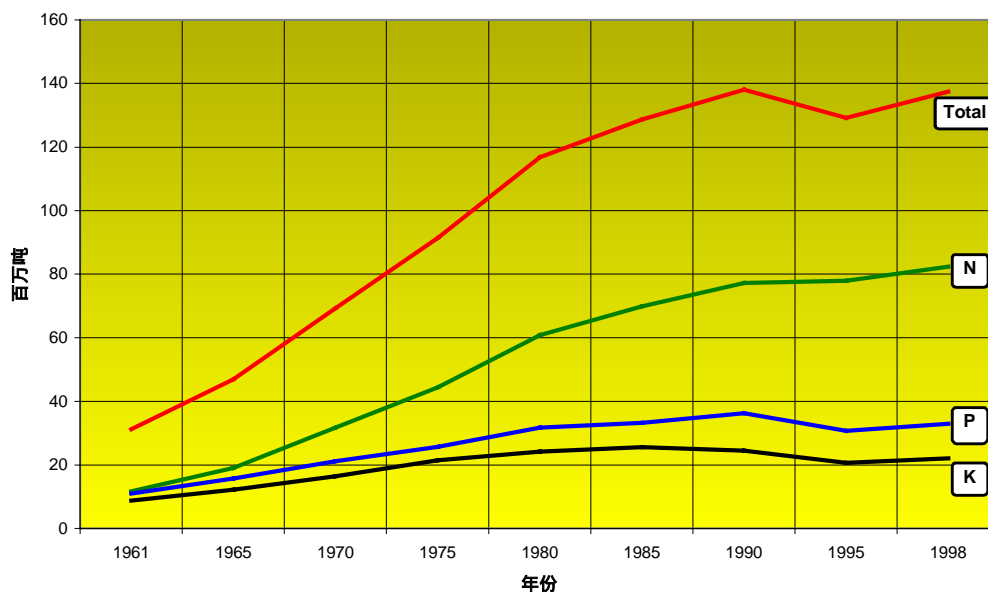
B. Gumbo* and H.H.G. Savenije**

*Department of Civil Engineering, University of Zimbabwe, Zimbabwe, gumbo@ihe.nl

** IHE-Delft, Delft, The Netherlands, hsa@ihe.nl

全球肥料的消耗量已经从 1950 年的 1400 万吨剧增到现在的 1.45 亿吨。在工业国家，这种消耗现在已趋于稳定或者正在下降。但是在发展中国家，需求还在不断上升。到 2025 年，预计每年的养分需求将达到 2.5 亿吨。主要的驱动力是正在增长的粮食生产，而粮食生产的增长是由正在增长的人口和对畜产品要求的增加造成的，这种情况在发展中国家尤为突出。谷类、稻米、小麦和玉米等是世界人口营养的主要来源。目前，大约 50% 的农业用养分，包括磷肥用于谷类种植。图一分别显示了全球 1961 年以后几种主要养分的肥料 N（氮肥）、P（磷肥）和 K（钾肥）的分类消耗量。

图一：全球肥料消耗



磷（P）是有限资源，包括现在可回收的量，只能延续使用不到 200 年。今天，全球磷的年产量大约为 4000 万吨 P_2O_5 ，这是从大约 1.4 亿吨选矿料中提取的。世界上大约 80% 的工业磷产量被用做肥料，5% 添加在动物饲料里，12% 供生产合成清洁剂之用，3% 用于其它各种用途，比如金属表面处理、防腐防火处理、水处理和陶器生产等。

磷取自不可再生的矿石。因此，它在城市周边地区的存在状况表明了城市化、农业集约化和人类对物质流自然循环等方面的影响。在通过城市非闭合直线系统的过程中，磷从颗粒状转化成可溶物，然后大部分通过城市水系统，以未处理或部分处理的污水形式输送到水环境中，对生态和健康造成有害的影响。

“可持续性”是人类社会利用环境的一个方法。社会行为造成的环境承载量应该是“生态适宜的”，这就意味着再生系统、吸收容量和生态系统的其它部分的功能要在量和质上都得到保证。

因此，磷的循环利用对城市和城市周边地区的生态农业（不使用化肥）变得越来越重要。生态卫生厕所是养分全球循环这个难题的一部分。因此，生态卫生系统的“适用性”（特别是在城市周边地区）也许最好应以它就地循环利用养分的能力并联系到工业革命以前那个时代全球养分循环的情况来进行评估。这个概念的正确采用不应是对生态系统和人类健康造成破坏的一种预示。本研究通过建立一个城市水及含磷物质流动的明确的模式，为磷物质流找到一种捷径或使其无休止的流动成为封闭循环的方案。

根据对输入物质、过程、转化、产出流和储存的特性分析，对以农业为主要生产活动的津巴布韦哈拉雷的人口密集郊区的磷物质流记了账。利用系统思考方法和物质流计算，定义了两个模块或子系统来计算和分析含磷物质：“家庭”（消耗/利用和排泄/粪便）和“农业”（土壤和植物的交互作用）。

我们进行微观研究的小流域属于 Chivero 湖流域（哈拉雷的主要供水源），包括 Mufakose 和 Marimba Park 郊区，流域面积 6.5 平方公里。总人口约为 100,000，人口密度约为 7,000 人/平方公里。大约共有包括公寓房子在内的 9,400 处居民住宅，以及约 100 处非住宅房屋。平均每处住宅约为 10.6 人，年龄结构如下：0-14 岁，43%；15-64 岁，54%；65 岁及以上，3%。

“家庭”子系统的磷入流（主要与“营养和清洁”行为有关）量大约是：食物和饮料中为 26,600 千克/年；清洁剂中为 1,860 千克/年。假定家用含磷物质一旦购买后就立即被消耗或使用了，磷存量可忽略不计。食物中的含磷量是根据一项全国范围的营养调查和对当地固态垃圾的研究所得出的居民每周饮食表确定的。

对津巴布韦人的消费方式进行过的一项成功的研究得出了食物消费支出的 18 个组成部分。表一是这些物品的人均消费量和其每 100 克毛食用部分中的磷含量。如果不知道当地食物的来源、组成，以及饮食习惯，我们就无法满意地勾画出养分的循环过程。哈拉雷像非洲的许多大城市一样，一些城市居民在城市周边地带自己栽种蔬菜和部分谷类食物。今天，哈拉雷每年有超过 10,000 公顷的公共土地用于耕作（占公共土地的 36%）。如果包括定点耕种的土地，这个数字将更大。

表一：津巴布韦最低食篮子需求和其中的平均磷含量。

食物分类	物品 [学名]	消耗量 (千克/人* 年)	磷含量(毫克 /100克可食用部 分)	湿度 (%)
谷类 (不包括 啤酒)	玉米(包括自产的) [<i>zea mays</i>]	134.7	200	12
	白面包	18.3	98	37
	大米	1.7	110	12
	面粉	3.6	342	13
肉类	包括牛肉、羊肉、猪肉、山羊肉和下水 [<i>bos taurus, ovies arus, sus scrofa</i>]	11.1	170	63
	家禽肉 [<i>gallus gallus</i>]	2.4	180	72
鱼, 海产品	鱼类(所有种类的平均值)	3.5	157	74
牛奶和蛋	牛奶和蛋类(包括自己生产的, 平均的组成)	15.5	93	80
脂肪和油	脂肪和油(植物和动物油)	5.7	0	0

蔬菜	油菜, 新鲜的未加工的叶子 [<i>brassica napus</i> , <i>acep</i> 公顷 <i>la</i> <i>group</i>]	13.1	110	77
	卷心菜 [<i>brassica oleracea</i> , <i>capitata group</i>]	5.3	34	91
	番茄 (未经加工、成熟和完整的) [<i>lycopersicon esculentum</i>]	3.1	21	94
	自产自消的蔬菜 (平均值)	66.7	80	77
油类作物	落花生 (包括壳, 干燥的) [<i>arachis hypogaea</i>]	8.4	405	7
淀粉根 茎植物	土豆和块茎 [<i>solanum tuberosum</i> & <i>ipomoea batatas</i>]	6.6	46	74
糖类作物	糖	13.3	3	
豆类	豆类 (豆和豌豆, 为完全成熟的 种子) [<i>glycine max</i> & <i>pisum spp</i>]	10.5	462	10
饮料	传统发酵的含酒精饮料	10.8	13	94
盐, 香料 和调味品	盐, 胡椒, 辣椒和其它香料	2.5	0	

以上登记的为最常见和大量消费或至少定期消费的食物和饮料, 其含磷的总量是在实验室里测定的。用资料来验证了实验的结果。最常见的食物是和一种叫做“油菜”的带叶蔬菜一起食用的 *sadza* 玉米粥 (玉米粗粉稠粥加上和白玉米粗粉一起做成的土豆泥)。每千克玉米粥含磷 2 克, 每千克蔬菜是 1.19 克。据估计, 每周每户家庭 (居民住宅) 消费 15 千克玉米粥和 1.3 千克蔬菜。

同样地, 通过每周的观察调查研究了肥皂和清洁剂的使用类型, 并对最常用的肥皂进行了化学分析。每周肥皂和清洁剂的使用量乘以每千克肥皂/清洁剂平均含 1.5 克的磷, 可以得到磷的流入量。

由于一个区域内磷的运移和转化取决于水的循环, 对研究区域也建立了水流量的平衡。水的流入主要来自城市主供水管 (每年 210 万立方米) 和降雨 (每年 820 毫米); 流出主要是蒸发蒸腾、污水 (每年 177 万立方米) 和洪水 (每年 154 万立方米)。通过对污水和洪水取样进行分析, 以正磷酸盐形式存在的磷 (Ortho-P) 的平均浓度分别为: 12.0 毫克/升和 0.85 毫克/升。在过去的 5 年中, 每处住宅平均每天的水消耗量是 720 升。每处住宅用水构成如下: 厕所冲水 30%; 洗澡 25%; 洗衣 15%; 厨房 10%; 园子 20%。对新鲜和陈尿的测试表明, 每人每天尿中的磷含量为 0.4~0.6 克; 而粪便中含磷量则从污水特征中间接取得。大约 75% 的磷的出流通过下水道 (包括厕所下水和其它污水, 21,240 千克/年), 剩下的通过固体垃圾。包括清洁剂和肥皂污水在内的下水中的含磷量平均为 0.7~1.1 克/人天。固体垃圾的数量和成份在一年中的不同时期变化很大, 从 0.2 千克/人天到 0.5 千克/人天不等。垃圾中 65% 的物质是可用做堆肥的有机物质, 包括食物残余物、农产品残余物和花园垃圾。设平均磷含量为 1.10 克/千克并按不同湿度做适当的调整, 可以计算出固体垃圾中磷的数量大约为 5480 千克/年。

市区农业面积大约为 3.5 平方公里 (包括定点的和非定点的), 每年施入的合成肥料中含有 4410 千克的磷 (10.5 千克/公顷)。农作物的种类很多, 但主要是玉米、番薯和蔬菜 (油菜、番茄和洋葱) 等作物。在此子系统中以玉米为代表进行计算。磷的主要出流是径流或冲刷流失 (1750 千克/年), 以及农作物收获的部分 (1440 千克/年)。冲刷流失的数量约为每年每公顷 4.5 千克。相比商业耕作地每年每公顷 8 千克的平均水平,

这个数字很大，因为后者用了 5 倍于前者的肥料。这种差别主要是由于土壤腐殖质（保持磷的土地调节剂）太少、坡度陡和城市农民缺乏耙耨保土的知识造成的。玉米产量估计为每年每公顷 2000 千克，高于津巴布韦公共地区不足每年每公顷 1000 千克的产量。

通过计算，每年磷的净储存为 220 千克。然而，收获之后的土壤肥力测试显示玉米地耕作层内缺乏有效磷。利用树脂萃取法测得磷平均含量为 10 毫克/千克。在津巴布韦，如果磷含量少于 30 毫克/千克，土壤就被视为缺磷。这证明，虽然土壤中磷存在净累积，但是很大部分为土壤吸收或者沉淀下来，而作物无法及时吸收。对于商业性玉米生产所用的矿物肥料中磷的含量，津巴布韦的推荐量约为 42 千克/公顷。肥料通常称“D 混合肥料”，也被称作“玉米肥料”（8:14:7=N:P₂O₅:K₂O）。目前其售价为每千克 0.50 美元。研究范围内的城市农业区大部分每年或者每季度将“玉米肥料”作为基肥来施用。用量约为推荐的商业性种植价值的 20%（玉米肥料为 90 千克/公顷）。硝酸铵是作为“浇顶料”来施用的，因为它容易被淋溶或冲走，所以通常施用两次。

污水中可用于农业土壤中的磷的数量约为每年 95 千克/公顷。同时，如果能恰当地分流和储存尿，则每年可以获得 52 千克/公顷的磷。在这两种情况下，得到的磷含量都高于津巴布韦推荐的商业种植的磷用量。以尿的形式把“家庭子系统”中部分废物流进行引用，可以磷的形式支撑“农业子系统”的活动。这样，可通过生态农业在这块居住区中封闭磷的循环圈。另外，每年产生的有机固态垃圾的干重达到惊人的 660 吨，它们可以用来堆肥或者与粪便共同堆肥，生产十分需要的腐殖质作土壤调节剂。

这篇论文从系统分析和建立物质账的角度阐明了生态卫生厕所概念的好处。通过建立主要养分物质平衡模型，生态卫生概念变得更有说服力，特别是对城市规划者而言，可以把像城市农业那样消化“废物”的方式纳入到城市周边地区。给磷物质流记账可成为对为养分循环找到捷径或形成闭合圈的技术进行评估的一个重要规划工具。

如果一个想法开始时不是荒谬的，那么这个想法注定没有什么希望。（阿尔伯特·爱因斯坦）