

农业动能学

R. C. Fluck
C. D. Baird



农业动能学

R. C. FLUCK C. D. BAIRD 著

薛紫华等译

游修龄校

一、农业能量的分析	(25)
二、能量与经济学	(40)
三、农业投入的能量需要	(49)
四、各种对策的评价	(68)
五、特定实践的评价	(79)
六、新的能源	(90)
七、展望	(98)

附录：答

农业动能学

编辑 靳 晋

第1—7章 薛紫华 译

第 8 章 黄天珍 译

第 9 章 孟秀英 徐九皋 译

第 10 章 孟秀英 译

封面设计 朱一林

出版：浙江农业大学情报编译室
北京农业大学科技情报室
发行：北京农业大学科技情报室
印刷：北京国营巨山农场印刷厂

定价：0.85元

目 录

原 序.....	(1)
一. 能量的基本原理和农业	(2)
二. 非工业食物和生产系统的能量	(4)
三. 工业化粮食生产中的能量使用	(12)
四. 农业能量的分析	(25)
五. 能量与经济学	(40)
六. 农业投入的能量需要	(49)
七. 各种对策的评价	(66)
八. 特定实践的评价	(79)
九. 新的能源	(90)
十. 展望	(98)
附录: 能量单位换算表.....	(99)

RICHARD C. FLUCK
C. DURELLE BAIRD

1979年2月

原 序

能源对于农业和食物链的重要性是众所周知的。但是对于能源在农业系统中的作用还有不少混淆和误解之处，对于农业系统如何改造才能适应价格日高，供应有限的能源仍有许多争议。其中有些混淆来自这种事实，即农业只是少数直接利用太阳能的工业之一，以及农业产品具有热能这种事实。

“农业动能学”(Agricultural Energetics)叙述我们关于能量是怎样作用于农业和食物系统的概念。各种“能流”都予以鉴别和定量，使人们可以对农业系统作正确而有用的能量分析。

我们希望本书作为农业动能学课程的教材或那些以农业动能学为主要内容之一的课程将是有益的。本书作为各个农业学科的科学工作者、农业政策制订者、计划者、能量分析和能量推广服务者个人的参考书也是很有用的。

我们很感谢Ernie Smerdon，是他早在1973年即鼓励我们开设并讲授有关能源和粮食生产的课程，来自许多不同学科的学生们的热情协作，对本书的广度和深度作出显著的贡献。本书取材于我们过去五年来课堂授课的讲稿。本书的编写是一个机会，使我们得以进一步组织和突出我们自认为正确的概念。

作者还感谢D. K. Tressler博士、N. W. Desrosier博士及AVI出版公司的Lisa E. Melilli小姐，承他们的鼓励和协助，本书才得以出版。

没有一本书是十全十美一劳永逸可以不需要进一步补充和修改的，本书也不例外。我们很清楚，在整个能量分析的领域中，特别是农业动能学，发展是很快的，所以，本书作为第一版，非常欢迎来自读者的建议和推荐，告诉我们如何改进以及指出本书上的差错之处，以便在再版中改正。

RICHARD C. FLUCK
C. DIRELLE BAIRD

1979年7月

一、能量的基本原理和农业

能对于农业既是燃料又是原料。最初的能是燃料；太阳能则是原料的原料。两者都是工业化农业所必不可少的。

担心能量在工业化农业中的适当使用和效率问题从许多方面（包括非农业能源）看，都是很明显的。不少广泛的各式各样的建议已经提出来对农业政策加以改变，作为对这些与能源有关的对策。对这许多建议的正确性和可行性是有争议的。因此，对农业系统中的动能学的关系的知识和了解是极其重要的。我们必须能够正确鉴定和测量在包括作物和牲畜生产、食品加工、分配和制备的系统中的能量流（flows of energy）。我们称这种活动为“农业动能学”。

很明显，伤脑筋的是能量的成本自1973年以来大幅度上升。未来能源短缺的幽灵使得1973—74年冬季加油站前漫长的移动缓慢的队伍相形见绌。能源的成本增加和有效性降低影响了农业，农业又影响到每一个人。虽然是老一套，但是有些人似乎忘记了食物是生命所必需。我们许多其他的活动都比不上我们的食物系统的重要。

这里强调的是对非再生能源的消费和消耗。著者所要知道的最根本的一点是生产一项农业产品所需要的最基本的总能量。这项基本能量通常是衡量各经济部门能量生产的输出量，包括煤矿、石油和天然气生产以及水力发电和核动力所产生的等值能量。

作者希望严密而精确的使用与能量分析有关的术语。而大多数术语已经通行使用却没有特定的定义。如同任何未成熟的学科一样在定义和使用上充满混淆和争议。为此，著者提供了一个定义和出处的一览表，见附录。

现在世界各地通行着许多不同的能量单位，本书使用的米制(SI)，能量单位为焦耳。大多数能量是用更适合的“兆焦耳”(MJ)或 10^6 焦耳(J)表示。附录是不同能量单位的换算值。

能量基本原理

以下几个定义是了解能量性质的基本：

(1) 力（推或拉）：一个矢量（一个具有数量与方向的量），有助于物体在运动中产生变量。度量单位如：磅力、公斤力、达因和牛顿。

(2) 功：力和距离的乘积，度量单位如：呎磅和牛顿米（焦耳）。

(3) 能：作功的容量相等于功。能的形式包含热能、化学能、电能、辐射能、核能等。度量的单位如：英国的热单位(Btu)、千卡(Kcal)、焦耳(J)、千瓦小时(Kwh)、呎磅(ftlb)和马力小时(hq·h)。

(4) 功率：是作功完毕或能的消耗或发生的时率。度量单位如：瓦特($J \cdot S^{-1}$)和马力($550 ft lb \cdot S^{-1}$)这里S=秒。

决定能量转化的两个定律是热力学的第一和第二定律：

(1) 能量守恒：能量不能产生或消灭，但是可以从一种形式转化为另一种形式。

(2) 熵定律，一切自然过程的不可逆性：不可能造成一种循环动作的热机，从一个贮藏库取得热量使它完全变为功，而不产生其它效应。换言之，一部分的热量必须转注到另一个（较低温度）贮藏库中。第二定律的另一种表述是热量本身只能由较热的物体（或贮藏库）向较冷的物体（或贮藏库）流动，这是不可逆的。熵是一个与第二定律密切联系的物理量：熵的变化可解释为能量在一个过程中释放的能量与最低温度对热的转移有效时的比。熵对于可逆的过程（理想的，就我们所知是不存在的）保持不变，对于每一个不可逆过程则增加。宇宙熵的总和是在不尽的增加之中，而个别的物体、有机体和系统的熵可能导致减少。

能量可以从一种形式转化为另一种形式。例如，蒸汽的热能通过发电机可以转化为电能。没有一项单独的转化可以导致所有的输入能转换为所要求的输出能的形式。转化的效率是根据输出与输入比来度量的，在这种情况下，所损失的热量通常叫废热。

$$\text{效率} = \frac{\text{有用功}}{\text{输入能}} = \frac{\text{输入能} - \text{废热}}{\text{输入能}}$$

典型的化学能转化为机械做功或电力效率只有20—40%。典型的化学能转化为热能可有60—80的效率。电力转化为机械能的效率通常达60—90%。化学能用畜力转化为机械能只有3—10%的效率。

能量转化意味着能量的使用效率，尽可能提高转化的效率，消除能的浪费。萤光灯比白炽灯发同样的光量所需的电力则要少。因此，萤光灯比白炽灯更有效率和保存更多的能量。

能量的存在有多种形式。最实用的能量分类方式是分为可再生的和不可再生的两大类：

不可再生的：

矿物燃料

天然气

石油

煤

泥炭

核

可再生的：

太阳的

日光

风

水电

光合作用

潮汐

地热

不可再生的燃料通常称之为贮藏能，而可再生的燃料称之为流动能。

(薛紫华译)

二、非工业食物和生产系统的能量

能量对于食物生产是必需的。太阳能是自然生态系统中食物的能源。在一些农业系统里食物是通过其他能源——基本的矿物燃料（即化石燃料），如原油，天然气和煤——得到补充。矿物燃料如大多数工业化农业系统中是优势的能源形式，也是工业化社会中后起部门食物系统的优势能源。

食物所含的能量部分是对消费者释放的。非食物性的农产品，如棉花和羊毛的纤维以及如叶和花的观赏植物也含有能量，但是能量对于这类产品通常并不是重要的特性。

自然生态系统

自然生态系统中的能量是在一种自我调节的方式下流动的，太阳能为这个系统提供燃料。光合作用是由植物把太阳能通过化学转化成为食物产品即碳水化合物的形态。植物的一些部分作为能源被食草动物吃掉或被微生物分解掉。食肉动物吃其他动物作为它们的能源。所以，在一个自然生存系统中的所有生命形式最终是依靠太阳，以太阳维持生命必不可少的能。

在地球大气最外层的太阳能入射率用太阳常数表示为 $1.395 \times 10^{-3} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (1.359×10^{-3} 百万焦耳/米²/秒)。经过黑夜时间、大气层吸收、多云状态等的消耗，太阳能（分离的）在地球上的平均变异值在极地为 $0.09 \times 10^{-3} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，在沙漠地带为 $0.29 \times 10^{-3} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在夏季，一个代表性的美国地区在一天中将收到 $20-30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 的总能量。一年平均每天收到大约 $1.49 \times 10^{16} \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ ，这里d等于天。

太阳能进入地球大气层后的遭遇是怎样的呢？大约30%是以短波辐射的形式直接反射掉。另外47%是被大气层或地球转化为热并且以长波辐射方式重又辐射到外层空间去。另23%耗于水分蒸发从而驱动地球的水分循环。仅有0.2%通过和波驱动地球气候系统。仅有0.02%或大约 $3.5 \times 10^{12} \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 是用于植物的光合作用。

光合作用是生命最基本的光化学反应。当植物进行光合作用时二氧化碳、水分和辐射能化合成成为碳水化合物和氧气。只有兰光和红光，它们占太阳辐射入射量的大约25%，能为光合作用所用。光合作用所转化的太阳能被贮藏在所形成的碳水化合物里。它可以随着被正在生产的植物的呼吸代谢作用或食物链中的其他有机体所释放。动物是在它们肌肉活动时利用这些能量。能量从太阳能级通过植物群落级和动物群落级即从一个有机体到另一个有机体提供了维持生命所需要的全部能量。

只有很少一部分太阳能投射在植物叶片上被光合作用转化为化学能。净植物生产（光合作用减去呼吸作用的最大潜力估计是 $1.11 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ($71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 或入射太阳能辐射总量的5.3% (Gates 1971)。这是太阳光谱可见部分的12%。事实上生产和转化率是相当的小，约接近入射的太阳辐射总量的1%。Gorz等 (1978) 发现，在美国

新英格兰州新汉普郡的森林中，年太阳辐射的0.8%是被植物的光合作用所固定，净生产率约0.4%。

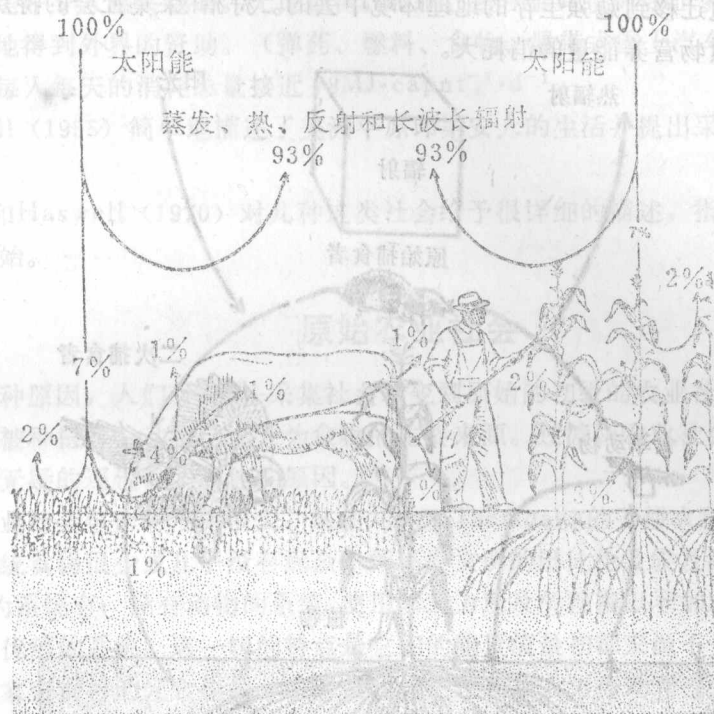


图2.1. 能量在生产作物（如玉米和牧草）中的分成

贮存在植物和动物中的能量被其他动物所消耗，也就是为消费者所利用，只有小部分的能量是用于增加消费者的体重，典型的大约占10%（Gates 1971; Odum 1971）。Janick等（1976）指出其范围为2~18%。剩下的用以维持身体正在进行的各项功能如保养、运动和繁殖。

能量流，即能量从植物向高级形态的动物生命流动，可有两途径。一是当能量流经相对少数的高级有机体时被浓缩并积聚起来了，你可以想象，好比一个漏斗在把一个生态系统中的许多有机体的净生产物灌给这些少数有机体。另一种解释是大多数能量是沿着这样的途径消耗掉，只有一小部分优质的能量到达这些有机体。

狩猎和采集社会

生产食物需要能，食物里含有能。为了正确评价能量流在食物中的形式和数量，让我们考查一下人类过去和现在所利用的生产食物几个事例。

人们每天需要大约10~15MJ的食物能。其数量因性别、年龄和大小、物理性状等等而异。Passomre和Dnrnin(1955)对食物能的需要提出一个综合评价。由于能量从一种形态转化为另一种形态的效率差，无论如何，维持一个人的食物最终需要量在10—15MJ·d⁻¹以上。这一最终需要量可由非再生能源、再生能源或两者结合所组成。

早在农业（人类自己栽培作物和饲养牲畜）发生以前人们所需的食物是靠狩猎、捕鱼和采集而来。狩猎-采集社会的少数例子现今仍有存在，但它们不是典型的因为它们 是少数被遗弃并被迫迁移到勉强生存的地理环境中去的。狩猎-采集社会的特点是总能量 的消耗不比他们的食物营养能量的消耗大。

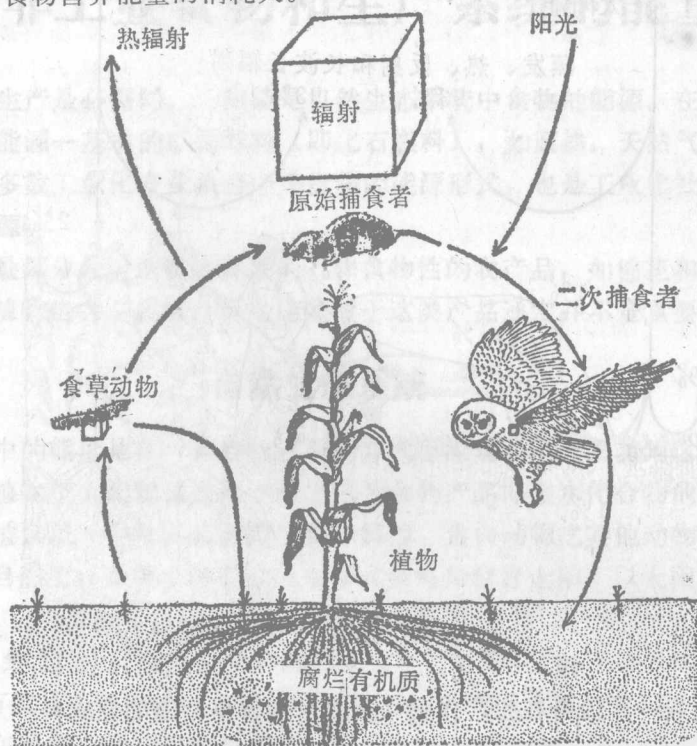


图2.2. 生物圈的能量循环

Lawton (1973) 对采集食物的“动能学” (energetics) 作了分析并提出了指标。一个动物要活下来，它所采集的食物能量至少必需相等于它在采集期间能量的消耗。Lawton指出考虑到能量还要供其他活动，这两种能即食物能和消耗能的比例必须至少为2。他发现，就某些物种而言，能量获得与能量消耗比率的范围可以小到略大于1，如豆娘幼虫，直至70，如热带蜂鸟。他还引证在太平洋环礁上的一个人类社会其比率为18.4。

在Lee和DeVore (1968) 编辑的一本书中对各种狩猎-采集社会作了描述，其中有博茨瓦纳哈利沙漠丛林人的描述，这些丛林人以他们人口的约60%，每星期约花12—19小时从事狩猎和采集就可以供应他们的食物需要；也就是说，在每天24小时的总时间中平均只有6%的时间用于获得食物。剩余的时间用于休息，准备他们所需的住房、衣着及消闲和社交活动。

Nietechmann (1972) 研究了在尼加拉瓜东部一个印第安人的现代部落。他们打猎、捕鱼和种田。他发现他们每小时活动的捕获能，狩猎平均为 $5.32 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1}$ ，捉海龟捕鱼平均为 $4.03 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

Eden (1978) 发现一群菲律宾群岛森林的采猎者—巴塔克人，挖掘两种野生山药每小时可获得2.02和 7.28 MJ 。采集软体动物获得 $1.32 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1}$ 。用特种钓鱼钩钓鳗鲡

获得 $2.27\text{MJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

Kemp (1971)提供了一个现代爱斯基摩人社会的描述。这群人具有在一个恶劣环境里幸存的能力是好令人感兴趣的。无论如何，他们已经明显地受外部世界的影响，而且在能源方面大量地得到外界的资助。（弹药、燃料、食物、履带式雪上汽车、舷外推进机等等）。他们每人每天的消耗总量接近 $78\text{MJ}\cdot\text{capnt}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

Cottrell (1955)简单地描述了美洲平原印第安人的生活并提出采猎社会生活是相当不稳定的。

Clark和Haswell (1970)对几种这类社会给予很详细的描述，指出了在土地的需求和农业的开始。

原始农业社会

由于种种原因，人们对狩猎-采集社会转变到原始的初级的农业社会，在原始农业社会里植物是被种植了、动物已上升为食物的主要来源。过渡到农业社会的主要原因是由于人口压力，无疑的还包含了其他的原因。

原始农业社会包含的范围很大，从新几内亚Tsembaga的刀耕火种仅够自给的农业系统（这种系统食物很少或几乎没有剩余）到高度文明的巴比伦及埃及那里的农业是依靠灌溉的。包括的系统有：没有动物的系统，使用非人力所及的挽畜以增加功率的系统和家畜而不是作物占优势的系统。这一切的特点是它们的能量流最初都来源于太阳能，或者是直接利用作物或家畜饲料的光合作用，或者是间接通过利用人力劳动和畜力牵拉作功，那也是从农田种植的作物和饲料而来。在原始农业系统中只有少量的耕作用的能和能的补充。

Black (1971)提出了一项供在农业系统中评价能量流的参数，他用以比较几种不同的农业类别，已经为其他人所广泛采用。它叫“效率比” (efficiency ratio)，其定义为在食物生产中的输出能量对人、动物或其他形式的输入能量的总和的比。对这个比率的双方的特点必须要充分理解，第一，虽然双方的分子和分母显然都用能量单位表示，但能量的形式常常是不同的。分子是卡路里即农产品的食物能而分母可能是化石燃料。第二，这个比率不是真正有效的，因为所有的输入能并未都已计入分母里。Black氏的效率比类似于一个热泵性能的效率（图3），一种能源引起另一种能源的运行或应用而且每一种都表现为输出对能源之一的输入之比。Black氏的能量效率在非畜力系统，变异于3到34之间，在畜力动力系统变异于6到14之间。

农业社会的特点是在人口密度方面比狩猎-采集社会较大。Conklin (1969)列举人口密度从10到25人/平方公里，Odum (1971)举了两个例子是270和2470人/平方公里，Cottrell (1975)则说人口密度可能高到740到900人/平方公里。

Norman (1978)把热带以一年为单位的农业系统划分为刀耕火种、半集约农业，集约靠雨天农业和灌溉农业四级。我们将在此基础上对原始的自给农业系统再予以细分。

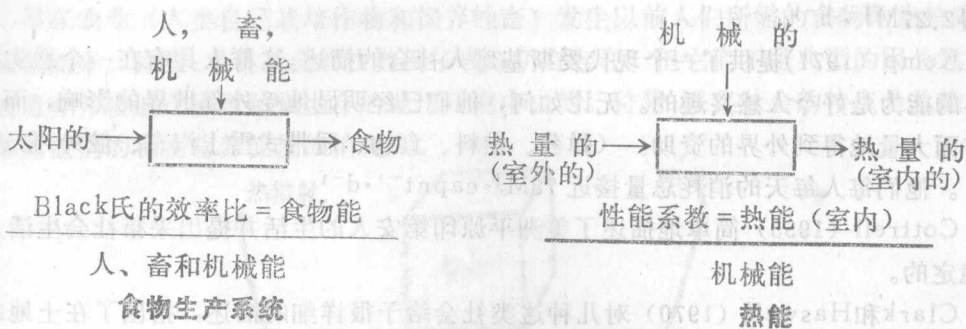


图 2.3. Black氏效率比和热泵的性能系数之间的相似性

刀耕火种农业系统 (或轮垦农业系统)

轮垦农业系统的特点是极少施肥, 没有家畜、人的劳动是主要的输入动力。清理出来的土地种植一个季节或几年就弃耕还林。当森林被清理并焚烧后植物性养分被加入土壤, 这也是一种施肥的方式, 据Norman (1978) 的估计一片森林被烧毁的能量浪费约等于每公斤20MJ的生物量乘每公顷100t或 $2 \times 10^6 \text{ MJ}$ 。

Rappaport (1971) 研究原始的新几内亚农民即著名的Tsembagas人。他测量了他们的能量输入和他们从事农事操作的农业输出。表 1 记载了一对种植园平均的结果, 一个在山上一个在山下, 由于气候条件的不同种植的作物也不同。

它们的能量效率为17.4, 这作为原始农业的成功例子看是不够典型的。无论如何, Rappaport没有把开辟一个新种植园时清除地面烧毁森林的能量计算在内。如果这些森林的生物量能加入人的能耗中并且分摊到在弃耕之前的典型的二年植期中, 则增加每公顷

2.1. Tsembagas人的种植园中人力能量的消耗与收回

人 力 能 量 输 入	MJ · h ⁻¹ (每公顷MJ数)
清除灌木	293
清除树木	117
编园篱	177
除草和烧毁	98
做档土墙	75
种植、除草到收获结束	933
其他的维修	238
收获甘薯	232
收获芋	29
收获木薯	11
收获山药	81
装运	619
人的食物输出	2,903
猪的饲料输出	31,808
	18,760
$E = \frac{50,568}{2,903} = 17.4$	50,568

$1 \times 110^6 \text{ MJ}$ 完全掩盖了人力劳动的每公顷2903MJ的输入能。代替上述17.4的能量效率比的将为0.05（就一对种植园的平均而言，是 $50,568 \div (2903 + 1,000,000)$ ）。

刀耕火种的一个优点是人力的输入不完全同作物的种植、培育、收获等劳力输入的高峰连在一起，清理场地可以在非高峰输入时完毕。

不利之处是耕地典型地分散，远离住屋，结果使相当多的能量浪费于走路和运输上。

半集约农业和集约的靠天雨种植系统

半集约农业和集约的靠天雨种植系统除 Black (1971) 研究外，还有许多人研究过。Leach (1976) 对各种农业系统编制了采自许多来源的能量预算，其能量效率比见表 2。

虽然Leach的数字不论在刀耕火种或半集约农业或集约的靠天（自给）农业都没有提供较高的能量效率比的指标，但Norman (1978) 推测人力输入对于刀耕火种农业可能稍高，可是没有可供选用的能量比的根据。

无论如何，从能量考虑，一种作物对另一种作物进行比较可能有一些优点。Chandra 等 (1974) 估算了在斐济（大洋洲）山谷地区两个种族集团种植的兼作自给和商品的作物的能量比。其比率的范围是从番茄(商品的)的 3 到香蕉(自给的)的130。印第安族使用马匹而斐济族兼用马匹和拖拉机。斐济族的作物平均能量比为12.8，其幅度从花椰菜的 2 到马铃薯的23。印第安族平均能量比是52.2，其幅度从黄瓜的 3 到香蕉的130。这些不同归因于所种植作物种类和拖拉机的化石燃料。斐济人的经济收入每公顷1.07美元略高于印地安人的每公顷0.97美元。由此可见，这一研究的结果证明在高的作物能量比和高的作物经济收益之间是有竞争的。

表2.2. 各种农业系统的能量效率比

农业系统	能量比	农业系统	能量比
狩猎——采集	7.8	木薯，非洲	22.9
昆·丛林人		山药，非洲	22.9
游牧业		落花生，非洲	12.8
乌干达渡渡族 (Dodo)	5.0	自给农业* (Subsistence)	
刀耕火种		印度	14.8
刚果	65	中国 (1935—1937)	41.1
Tsembaga	20.3	谷物，墨西哥 (斧和锄)	30.6
自给农业和刀耕火种		(牛)	14.15
印尼达亚人，水稻	16.5——18.2	危地马拉(斧和锄)	13.6
菲律宾伊巴人，水稻	14.2	(牛)	3.95
坦桑尼亚，水稻	23.4	尼日利亚(斧和锄)	10.5
玉米，非洲	37.7	菲律宾(水牛)	5.07
小米，非洲		小麦，印度(小公牛)	1.69
甘薯，非洲	31.3	水稻，菲律宾(水牛)	5.51

* 自给 (Subsistence) 指供自身消费的，商品的指供出售的。

在Makhijani (1975) 的整本书中用六篇短文介绍了第三世界农业的广泛的背景材料。印度的Mangaon很少的灌溉，使用挽畜，基本上是自给农业。中国的Peipan是有高度灌溉的农业，使用挽畜和极少量的机械力，能够向中国的城市输出其产品的显著部分。坦桑尼亚的Kilombero是没有灌溉的，也不使用挽畜，基本上是自给农业。尼日利亚的Batagawara是没有灌溉的，使用挽畜，主要是自给农业。墨西哥的Arango是大量灌溉的，使用挽畜和机械力，它向墨西哥城输出大部分产品。玻利维亚的Qnebrada是独户的家庭农业，它使用灌溉和挽畜，出卖它的少量产品。

表3的能量效率比是把所有用于农业的能量形式（人、家畜、木材、粪、化石燃料等）能算作输入。当把所有的能量输入都包括进去时，第三世界农业的这些实例的能量比幅度只有0.19到1.76。

同样，Makhijani提出关于第三世界农业系统的几个概念（强调不是到处适用）：

（1）第三世界农业总能量的使用是不少的，更确切地说大量的能量是以木材和牲畜粪作燃料用于烹饪和取热。

（2）能量的使用效能是很低的。

（3）不发达国家农家的单位面积使用能量可能比工业化国家农场多，部分因为饲养挽畜需要的能量大而这些农家的单位面积生产率又是少的。

（4）自给农业对于环境常常是很有害的；放牧过度和毁林开荒是世界范围的问题，在不发达国家中尤其严重。

（5）第三世界农业系统必须在有利于工作的形式下增加能量。要做到这一点，必须把使用更多的燃料、燃料的更换和提高能源使用的效率结合起来。

Reveell (1975) 还叙述了在印度的不发达农业经济中增加能量消耗的一个实例。

有灌溉的原始农业系统

有灌溉的原始农业系统的特点通常是人口和总能量的输入和输出比靠天然雨水的农业较大。Norman (1978) 提供的从多方面来源的资料表明，灌溉农业的劳力输入至少是靠天然雨水农业的一倍，能量输出的增加同样是明显的。但是灌溉农业的能量比则似乎较小。

在热带和亚热带地区，灌溉农业的一个常见的明显优点，和这些地区对粮食贮藏的需

表2.3. 六个农业村庄的能量特点

位 置	大 小	能量总消耗 (每人每天MJ)	食物生产 (每人每天MJ)	能 量 效率比
印 度Mangaon	1000	30.8	11.1	0.36
中 国Peipan	1000	33.2	23.3	0.70
坦桑尼亚Kilombero	100	8.7	15.3	1.76
尼日利亚Batagawara	1400	10.5	11.9	1.13
墨 西 哥Arango	420	130.1	94.6	0.73
玻利维亚Quebrada	6	38.5	7.4	0.13

求较少以及劳力输入的分配较好,使得有可能实行一年多熟的复种制度。

在食物系统中,日常活动的能量需求,在生产之后,也占总能量需求中的显著部分。Makhijani (1975) 估计第三世界经济中烧饭所需的能量——用于牛粪和木材作燃料——每人每天为15—20MJ。Revelle(1975)对印度人的估计为每人每天13.5MJ。据Revelle的估计,烧饭中能量使用效率少于9%,在能量消耗和毁林开荒的高比率也占一定份额。

从生产到消费的观点看,粮食的运输也是人力能和畜力能的一个显著的消耗方面。Rappaport估算,新几内亚的Tsemdaga人把他们农产品和他们的猪运回家中的人力能耗为每人每天0.15MJ。

(薛紫华译)

三、工业化粮食生产中的能量使用

现代工业化系统如美国在七十年代初能源不足以后就引起特别注意。食物供应直接取决于能源供应的认识已成为家喻户晓。同时，农业受到了批评，特别是生产每单位食物能投入的化石能效率不高这一点。从那时起，提出在农场减少能量投入的一些建议，例如：避免使用人造肥料和恢复使用畜力等都提到了，在作出上述决定之前必须对食物系统里的全部能量流作详尽的分析。

美国人最近开始重新检查组成生命的基本结构如：足够的食物、住所及能源供应。大多数美国人认为这些必需品的供应是没有问题的。美国人一直是幸运的因为近代的美国已经不知道任何大规模的饥饿，当然对于世界其他多数国家来说并非如此。

1798年马尔萨斯在他的人口与人类未来的经典论文中预言，人类对食物的需要超过他所能生产的能力。他正确地预测了人口的增长，但是他没有看到通过科学技术可能大幅度提高农业生产率。幸亏农业科学家们指出了提高农业生产率的方向而不是照聪明的马尔萨斯那样的设想。

有关未来新的警告是合理的。电子计算机模型预报了增长的限制和未来可能的灾难。不要对这些警告估计不足，相反，倒是要仔细考验这些分析中各个部分的设想。

在解决世界食物问题的探索中最普通的企图是移植一小部分高度工业化的食物系统到世界上挨饿的国家中去，这是可能的，但是它的长远利益如何迄今远不够清楚。研究美国食物系统的能量流对于解决这个问题可能有某些启发。

美国农业的趋向是农场生产的集中化，即由于农民数量减少促使农场数愈来愈少，农场愈来愈大。然而，农场的生产是增加的，这主要归功于技术改进，它们使现代农民能够以资本和其他投入来代替劳力。

美国农民是效率很高的食物生产者。据Stickler等（1975）报导，现代化农业利用太阳能的效率比原始农业系统大20倍。即使是这样的增加效率，还只是一小部分入射的太阳能最终转换为食物能和被人类消费掉。例如，在美国，到达大气层外部的每28,000单位太阳能，只得到在餐桌上一个单位的食物能。首先是大气层滤过了16,000单位，不足此数的一半是参与光合作用的范围内。其中的多数是从植株间漏失或被反射掉了。即使是被吸收的部分也只有一部分以食物、饲料、纤维的形式变成化学能。图3.1.表示到达大气层外部的28,000单位太阳能最终所得的16单位植物能的分配情况。这16单位仅仅是利用了到达地球表面能量的0.2%。是美国作物和牧场的平均效率。以前的记载，许多作物的效率则在1%以上。

Stickler等（1975）报导，大型农场使用大型拖拉机和农业机械其效率比小型农场较

高。小于40公顷的农场田间操作的每公顷能耗要比大于100公顷的农场多90%。

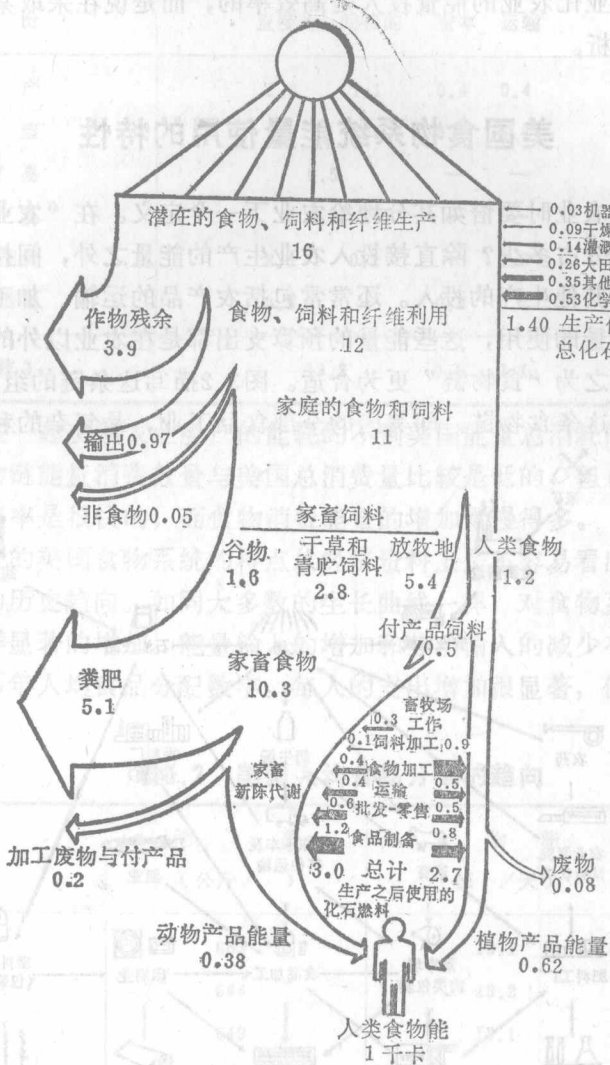


图3.1. 生产单位人类食物能所需要的能量

现代农民们使用化肥、除莠剂和杀虫剂能帮助他们使植物更有效地截取太阳能。能量使用的90%是来自天然气制造的N肥。天然气的使用数量只占美国能量预算的2%。而美国食物总产量的1/3归于肥料。

1920年以前也就是拖拉机时代以前，美国农业的挽畜动力在二千六百万头以上。为提供他们的饲料需要四千万公顷耕地的产品，几乎占美国总耕地的1/3，那时美国总人口只有一亿，而今天美国人口已超过2亿。二千六百万马和骡所需要的饲料能是今天拖拉机和其农业机械能耗的三倍以上。

同样，单位厩肥所含对作物的营养价值远比化肥小。一公顷玉米地只要207公斤化肥就有足够的N素，而换成厩肥则需要 1.17×10^5 公斤。此外，美国厩肥生产的总量也只能提供目前美国谷物需用N肥的1/3。