

试论立体农业的能量利用和物质循环*

夏明忠

(西昌学院, 四川 西昌 615013)

【摘要】本文根据近年来本人的研究情况及有关资料对立体农业的能量利用及物质循环等问题作一讨论。立体农业核心问题是要实现合理的能量转化和物质循环,由于植物的光能利用和物质利用的差异,形成了能量和物质利用层次,立体农业最基本的理论和任务就在于利用这些特性,组成对光强充分利用和碳素循环最佳组合形式。单一生物群体资源非有效利用是立体农业能量和物质的来源,在物质生产的初级生产和次级生产中,由于对光能的漏射、透射、光耗以及物质转化过程中能量变化,为立体农业组合充分利用能量提供可能条件。但是,要实现立体组合物流、能流合理运转,还必须有人工辅助能的投入,使之具有最大的互补效应和最小竞争力。文章还讨论了物种结构、合理配套技术、系统主导因素,以及增加投入等值得进一步探讨的问题。

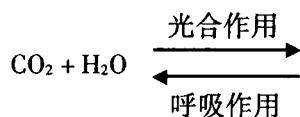
【关键词】立体农业; 能量利用; 物质循环

【中图分类号】S21 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1673-1891(2006)04-0001-06

一、立体农业最核心的问题是实现合理的能量转化和物质循环

在一切生命过程中,无不始终贯穿着能量、物质和信息三者的有序流动。能量的高速转化和物质的高效循环是立体系统的基本功能。这一功能是由立体系统的本质属性所决定的。

植物光合作用和生物呼吸作用是生物能流和物

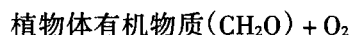


这样,同一个“碳”原子,不断地改变其形态,也不断交换场所,且不断进行循环。在此循环过程中,人类和其他生物就获得物质和能量。

种植业的基本任务就在于不断地、更有效地利用光合作用,最大限度地产生带有能量的有机物。相对于其他种植形式而言,立体农业更能有效地达到这一基本目的。

立体种植的生物对象是植物。而植物(包括农作物)对光强利用的高低受植物特性的制约。 C_4 植物即使光强高达10万Lux也无明显的光饱和点

质形态变化的两个基本功能。前者把不带“能量”的 CO_2 和 H_2O 转化为带有“能量”的碳水化合物,尔后以多种有机物形态(碳水化合物、蛋白质、脂肪等)把化学能积累起来,成为植物本身和不具备光合能力的其他生物生存不可缺少的能源。在此过程中,大气 CO_2 不断被消耗,而呼吸作用,通过分解释放,又把带有“能量”的有机物转化为不带“能量”的碳素, CO_2 又不断得以补充。如下式所示:



(Hesketh等), C_3 植物光饱和点明显低于 C_4 植物, C_3 植物中的喜光植物如稻麦、烟草、甜菜等的光饱和点(3~5万Lux)又大于该类植物中的耐荫植物(如豆类、薯类、党参、桔梗等的光饱和点只有1~3万Lux),而荫生植物如蕨芋、苔藓、半夏等的光饱和点只有500Lux,最高也只有1000Lux。当外界光强超过各类植物光饱和值后,会造成植物对光能的无效吸收。另一方面,不同植物光补偿点也明显不同。 C_3 植物光补偿点明显低于 C_4 植物,阴地植物光补偿点远低于 C_3 植物,即使 C_3 植物其耐荫植物的光补偿点

收稿日期:2006-10-24

*本文于2006年10月在上海召开的“全国资源节约与环境友好型新农村建设研讨会”上交流。

作者简介:夏明忠(1956-),男,教授,西昌学院院长,国务院特殊津贴专家,四川省首批学术带头人。

(500 ~ 700Lux)明显低于喜光植物(300 ~ 1000Lux),这种差异决定了不同植物的耐荫性。据研究,即使把阴地植物置于强光下,其光合速率较低,而在极弱的光线下其光合强度最大,光补偿点也很低,所以它们具有适宜于弱光下生存的特性(BurnSide 等 1956)。

对于 C 素利用, Moss(1962)发现,玉米和甘蔗等 C₄ 植物的 CO₂ 补偿点为 10ppm 以下水平,即使当大气中 CO₂ 含量甚微(5ppm)C₄ 植物也能生存,相反,稻麦、豆类、薯类等 C₃ 植物 CO₂ 补偿点在 80ppm 以下,当 CO₂ 浓度低于 50ppm,大多数植物不再摄取 CO₂ 而枯死。

至于不同植物对营养元素的选择吸收及对水分利用差异,已尽人皆知。

由上述不同植物的光能利用和物质利用差异,形成了能量和物质利用层次。立体农业最基本的理论和任务就在于利用这些特性,组成对光强充分利用和碳素循环最佳组合形式。在此系统中各种群按各自环境适应性,占据同一立体空间的不同层次,各据其位、各得其所,构成相互依存的立体能量和物质循环体系,能充分利用不同层次的生态资源和经济资源。

在一定条件下,单一生物群体因资源利用水平的同质性不可能达到很高的能量转化和物质循环。以种植系统为例,植物的光合面积、光合时间和光合速率是构成能量和物质利用的三大要素,由于同一群体利用光和 CO₂ 的特性是相对同质的,因而,增加单位面积个体数成为提高能量和物质利用率的常用途径之一。但在现有农业种群平面结构中,通过个体数增加以提高群体生态资源利用率是十分有限的。

Heath 和 Gregory 曾根据植物产量水平与干物质积累分析,得到如下结论:植物干物质积累量的多少主要决定于群体叶面积大小及持续时间,至于单位叶面积平均同化速率相差很小。有的人将该结论不加条件地无限外推,认为只要把叶面积无限增加下去,就可以增加相应干物质积累量。我国曾在生产上根据这种设想作过尝试,结果导致叶面积系数(LAI)比一般田(LAI=4)高出 10 倍(实际上是稻子近成熟时把多块田合并起来,稻田并非以如此之高

的 LAI 进行光合作用),亩产万斤粮的浮夸。

究竟作物同化面积最大限度有多大? 1953 年门司(Monsi)和佐伯(saeki)从植物叶面积的增加与光强减少程度以及群体同化速率关系进行定量研究,提出了大田分层切割法,证实光照强度随单位叶面积呈负指数下降。

$IF = I_{oe}^{-KF}$ (F 是自上而下累计叶面积, I_o 为群体顶部所接受的光强, IF 是 F 叶层光强, K 为大田光系数)。

根据这一理论,中外学者推算,在一个平面结构中,叶面积超过一定限度,光合作用增加赶不上呼吸消耗,净光合速率下降,干物质产量特别是经济产量大幅度减少。一般而言,当稻麦叶面积系数超过 5 以上,光合速率不再随 LAI 增加而上升了。所以将密度再增加 10 倍(LAI=40),即使 LAI 能提高 10 倍,光合产量绝不可能随之增加 10 倍。

但是立体系统是以空间和时间为出发点,以多种生物群落为对象,其内容和形式均不同于单一群体。虽然单一作物的 LAI 提高和立体系统层次增加都可能加大土地的使用度,但前者是在同一“独木桥”上增加同样的过路人,而后者是以“立交桥”方式迭加不同种类的层次,实现物流、能流在各层“桥上”高速运转,总体功能远大于局部功能。所以在单位面积上实行合理的“多重奏”、“连环套”,利用不同作物的光饱和点、光补偿点及 CO₂ 利用的差异,实现不同光照度和不同 CO₂ 浓度的充分利用,不仅等于土地面积成倍增加,同时也使土地上光合面积大大提高而产生结构的总体功能。

实践如何?凡是间套种植增产的实例,其适宜群体密度比单一群体大得多,有效叶面积增加。如夏玉米间蔬菜,叶面积系数比单一作物增加 15% ~ 30%,光能利用率提高 10% ~ 20%。我校研究玉米间大豆叶面积系数由 4.7 增至 6.8 的产量均比单一玉米群体(LAI=4.8)增产。我们在安宁河中下游研究甘蔗地前期间作,在 6 月份(甘蔗封行前) LAI 比单一甘蔗群体增加 1.5 倍,光能利用率提高 40.8% ~ 90.1%(表 1)。

表 1 甘蔗前期间作效益及光能利用

种植方式	净增值	光能利用率(%)		
	(元/亩)	甘蔗	间作	合计
净作	625.2	1.42	—	1.42
甘蔗+西瓜	1197.2	1.14	1.8	2.20
甘蔗+大豆	778.1	1.58	1.12	2.70
甘蔗+海椒	1137.1	1.20	0.80	2.00
甘蔗+洋芋	941.5	1.38	1.11	2.49

二、单一生物群体资源非有效利用是立体农业能量和物质的来源

太阳辐射和大气 CO₂ 分别是立体系统中能量和物质的主要来源。生物物质的生产力是本系统最基本的数量特征,它标志着立体系统能量物质转化效率的高低,是立体农业的功能体现。就物质生产而言,现有的立体模式,不外是进行物质的初级生产(立体种植)和次级生产(立体养殖或二者兼之立体种养)。

(一)初级生产的能量来源

根据能量守恒定律,立体种植能量平衡可用下式表示:

$$R + H + IE + B + Pn = Q$$

其中 Pn 的高低是衡量系统优劣的重要标志之一。根据生理生态理论推算,农田作物的最大光能利用可高达 8%~10%,但现实情况是大部分地区作物年光能利用不到 1%;太阳辐射较高的四川攀西地区高产小麦光能利用率为 0.98%~1.16%,水稻达 0.99%~1.41%;长江中下游粮产区农田平均光能利用只有 0.53%~0.63%。造成低光能转化的原因是多方面的,其中现有农田系统浪费大量光能是重要原因之一。这种浪费为立体系统利用这部分光能提供了可能性。

1. 在作物发育的初期阶段,同化面积相当小,投射到作物群体上的光能有效辐射绝大部分落到土壤表面,而幼小的作物叶片仅仅只能利用其中极少部分。根据我们测定,在四川安宁河流域,从甘蔗播种(新植蔗)或收获甘蔗(宿根蔗)至叶面积系数达到“1”时的时间超过 120 天,达到“2”以上的时间超过 150 天。在这段时间中(1 月收蔗,6 月后封行)平均有 40% 以上的土壤裸露。只要采用合理配套技术,光、

温、水等条件是有利于作物生长的。完全可以根据当地自然及社会条件的许可程度,采用立体配置的原则,在 6 月份以前,间作一季早市蔬菜、薯豆、瓜果等,避免过多的光能浪费,也为社会提供更多产品。这一研究在安宁河中下游蔗区应用推广,取得显著效益。

2. 在作物生长后期,叶片同化能力急剧减弱,作物处于生长消退状态,光能浪费主要表现在光饱和点的限制。纵使有大量光照投射到叶片上,但因同化能力的限制(光饱和点低)而表现出部分无效吸收,超过同化能力的光能被浪费。例如水稻在 $1.67 \times 10^4 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{日}$ 的光照下,损失光能 17%,小麦有 $2.09 \times 10^4 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{日}$ 的光照下,生长后期损失光能 36%。这些没有全部用完的剩余光或者人为有意留下(预留行)的光能为套作提供了可能性。如在小麦生长后期短暂时间(20~30 天)在预留行套作西瓜或玉米(光饱和点高),充分利用光能。当然,这种方式还取决于温度的作用,而且共生期也不能太长。

3. 接茬期的“光耗”。对于绝大多数作物而言,基本上是一年生的,农田并非全年都布满作物。即便是一年二熟制,接茬期地闲引起的“光耗”也达 25% 左右,一年一熟制浪费光照则更多。安宁河中下游的“麦-稻”或“瓜-稻”种植制,全生长期最多分别为 300 和 230 天,即分别有 60 和 120 天接茬时间还可以利用;这两种熟制全生长期辐射最多分别占全年总辐射的 83% 和 71%,即分别还有 17% 和 29% 的接茬期辐射能可以利用(表 2)。据此,我们设计了“麦+菜-瓜-稻”四熟制模式,从时间和空间充分利用能量和地力,全年亩产粮食超 1000 公斤,产值超 1000 元,“光耗”降为 6.2%,总热量损耗降至 5.3%。光能利用率比“麦-稻”制高 22%。这种模式因西瓜和蔬菜栽种时施用有机肥,使土壤 N、P、K 的投入和输出达到平衡。尤其 P 和 K 肥还略有增加。

表 2 不同种植模式对光温资源利用状况

种植模式	全生长持续日(天)	≥5℃积温(℃)	占≥5℃总积温比率(%)	辐射能(千卡/cm ²)	占全年总辐射比率(%)	光能利用率(%)
麦-稻	300	5605	80.2	104.7	83.1	2.82
瓜-稻	230	5409	77.4	89.8	71.3	2.95
麦+菜-瓜-稻	340	6618	97.4	118.2	93.8	3.44

4. 漏光损失,不同作物在不同生长期对光的吸收率、透射率及反射率有很大差异,使光照不同程度地被消耗。以水稻为例,生长前期稻叶表面光的反射率为 5% 左右,幼穗形成期至成熟期稻叶表面光

的反射率达 20% 左右,生长前期水稻群体透光率为 50%~60%,幼穗形成期至抽穗前为 15%~20%,抽穗后为 5%。

我们测定安宁河中下游甘蔗和小麦叶片光的反

射率分别为 7% 和 6%。所以在作物下层立体配置需光较少或半荫生植物(动物)以充分接受透射和反射光,是提高光能利用率的方式之一。

5. 多年生植物剩余光源。一般多年生植物均要经过幼龄期、青壮期和衰老期三个阶段。在幼龄期,树冠个体小,枝条短,叶面积系数低,透光率大,剩余光源在一年中均较多。随着冠层增大,剩余光源随之减少。当步入衰老期,群体生产力下降,叶面积减小,出现第二个剩余光源丰盛期。一般桑园一生中剩余光源就呈这种“高-低-高”的分配规律。即使在壮年期,因为采叶等原因,全年剩余光源也高达 54.4%。这些剩余光源及其分配规律分配为多层次、多序列发展桑园间套种植,提高桑园综合利用效益提供了理论依据。研究合理配置可使桑园生产干物质光能利用率由 0.44% 上升到 0.72%,亩增收 200 多元。

上述各种情况所产生的农田“余光”不仅十分丰富,而且在生产上确实有开发利用价值。这是由下述几种原因决定的:①正如上述不同植物对光强和 C 素的要求存在差异;②不同植物冠层生长速度不同;③作物生育期和生育阶段有差异,如早熟瓜果只需 50~60 天,而甘蔗长达 350 天;④不同植物对大

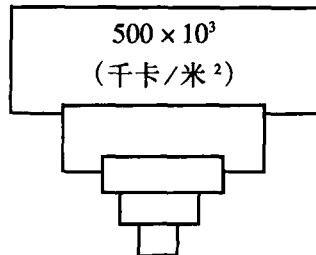


图 1 水稻固定的能量在各器官中的贮积量

气温度反应不同,这种差异反过来又影响生长速率和生育期。即使是动物,也有夜行动物(Nocurnal)适宜于在弱光下活动;昼行动物(Diurnal)需要在较强光照下活动;全昼夜性动物(Diel)对光照要求不严格。根据生物种群生态层越接近,竞争越激烈的原则,这些不同类型生物立体配置,有希望构成充分利用上述“余光”的理想互补组合。

(二)次级生产中能量平衡

立体系统中的次级生产是在初级生产基础上进行的物质和能量重组过程,通过对初级生产中的碳水化合物分解,重组为人类更有用的化合物和能量。如蔗田种菇,稻田养鱼,谷鸭共栖等种养立体系统和分层养殖中的次级生产者,直接或间接地利用植产品进行再加工。其能量平衡:

$$P = NI + I$$

(P 为初级生产总量,NI 为被食用的部分,I 为食用部分)

这种反应之所以能够进行,是因为人类不能直接利用的农副产品存在经过转化可以直接利用的物质。在植物生产有机物中,70%~90%作为主产品从土地中取出,其中收获指数占全部有机物的 25%~45%,大量的秸秆、糠麸、残枝落叶等含有丰富的化学潜能(图 1)和营养元素(表 3)。

全部太阳辐射

- 3.72 × 10³ 稻穗
- 2.13 × 10³ 茎秆
- 0.93 × 10³ 叶片
- 0.24 × 10³ 根系

表 3 干物质及营养在各器官中的分配(%)

作物	干物质		营养器官			生殖器官		
	营养器官	生殖器官	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
玉米	65.48	34.52	45.75	24.44	85.23	54.25	57.56	14.77
小麦	70.60	29.40	40.20	47.85	87.13	59.80	52.15	12.87
水稻	55.00	45.00	32.40	28.50	83.60	67.60	71.50	16.40
大豆	69.00	31.00	53.28	15.81	57.61	46.72	84.19	42.39

如果将植物的秸秆、菜叶、蔗渣、田间杂草等直接作为燃料(四川省每年约有 400 亿公斤秸秆,作燃料直接烧掉 300 亿公斤)。燃掉植物营养物质,干物质中的潜能以热能形式迅速传播,这是一种能量和物质转化率最低,利用方式最落后的途径。据测,每 1000 公斤秸秆只能烧成 70 公斤灰,后者最多能产

粮 10~15 公斤。相反,秸秆发酵后,蛋白质含量可提高 40%,9~10 公斤发酵饲料就可使猪增重 1 公斤。一般每公斤秸秆可产鲜银耳、金针菇、猴头、草菇 0.5~1 公斤,产鲜平菇 1~1.5 公斤。1000 公斤秸秆生产 1000 公斤鲜菇后,尚有 800 余公斤蘑菇糠,含粗蛋白质 11.95%,粗脂肪 0.33%,无氮浸提物

15.36%，喂猪牛效果可与玉米粗饲料相媲美。因此，在单纯的植物性生产基础上，将人不可食用的农副产品加入立体系统，通过物质分解再重组，重新贮存能量，产生人类可直接利用的产品，如发酵养殖、食用菌栽培等环节，从而提高结构层次，增强系统稳定性和平衡性。

三、人工辅助能的投入是决定立体农业成败的关键

立体农业是基于自然生态成层原理人工模拟的立体组合，这种组合因生物间相生、互补、促进，而有效地利用物质和能量，也因相克、捕食、偏害对生活因素产生剧烈竞争。人工调节的作用旨在使立体组合具有最大的互补效应和最小竞争力，实现物流、能

流合理运转。

如果说太阳能是驱动立体系统的基本动力，那么人工辅助能则是决定其效益和速率的基本保证。前者因地势地貌、季节气候不同而异，是人们难以调控的。但后者则是可以按人的意志加以调节的。在一定条件下，人工辅助能投入的数量和合理性是立体农业成败的关键。据 Odum 对美国三类农业土地产量和劳动生产率进行研究，原始农业除了采食和放牧投入劳力外，几乎没有辅助能投入，故土地生产力极低。传统农业通过精耕细作，施有机肥，轮作换茬，注意能量和物质偿还，生产力得以提高，土地生产量是原始农业的 12.25 倍，而现代农业，因辅助能和智力的大量投资，使土地生产力大大提高，土地生产量是传统农业的 4.1 倍，农业人口也由 85.7% 下降到 6% (表 4)。

表 4 不同类型农业的生产能力

类 型	土地生产量 (千卡/m ² ·年)	每 100 亩土地供养人数		农村人占总 人口的%
		总人数	其中农村人 城市人	
原始农业	8.36 × 10 ⁴	1.334	1.334 0	100
传统农业	1.02 × 10 ⁴	18.67	16.0 2.67	85.7
现代农业	4.18 × 10 ⁴	66.7	4.0 62.7	6.0

据我们对安宁河中下游蔗区立体种植(养)中辅助能与产量及产出能关系的研究，蔗田总产量(甘蔗+间作) Y_1 (公斤/亩) 和总辅助能投入(千卡/亩) x 的关系：

$$Y_1 = 3242.5 + 0.27x$$

$$R = 0.6542 \times \times$$

即当辅助能每增加 100 千卡，增加总产 27 公斤/亩

蔗田产出能 Y_2 (千卡/亩) 与总辅助能投入 x (千卡/亩) 的关系：

$$Y_2 = 25.52 + 4.27x$$

$$R = 0.7453 \times \times$$

即每增加 1 千卡，输出能增加 4.72 千卡

我们在四川德昌县进行旱地粮菜四熟立体种植模式的研究，根据立体生态原理设计了以下模式，

玉米 - 早白菜 - 晚白菜 = 莲花白 = ⇨ 玉米

据研究投入能量 6909×10^3 (千卡/亩)，其中有机的：无机的比例为 2.73。输出总能达 15503×10^3 千卡/亩。产出和投入能比达到 2.25。使光能利用率达到 4.05%，比一般的“稻-麦”两熟制高 43.1%。符合高产农田能量产出比(为 2.42)。

人工辅助能之所以能够提高土地利用率，是因

为人为的措施解除了环境中一些限制因子对系统的约束，促进了生物对能量和矿物质吸收、利用和转化，如通过物种选择，合理空间排列，时间相错等以避免或减少群体内的有害竞争；合理施肥以补充作物矿质元素，合理灌溉以调节作物水分代谢；采用合理的配套技术，以达到生物间最大的互补效应等，最终实现有效地吸收光能和 CO₂，合成有机物。否则，即便有多好的组合，不研究人工调节功能，最终也会使立体系统破产。

在当前，应当特别重视生物辅助能(生物种类、品种、配置方式、种养管理、施肥灌水等等)的合理投入。

四、需要进一步研究的问题

为了使立体农业更大限度地开发太阳能和农业自身生物能的循环利用，有必要进一步研究以下问题。

(一)物种结构

物种是立体农业物质生产的主体，其多样性是立体农业的重要特性。物种类型组成，数量比例，食物链关联及其彼此的相互影响是物种结构的重要内容。理想的物种结构是对光能和物质的最大利用，它

可在同等能量物质水平下,借助内部结构的协调力达到增益的效果。因此,应当从提高农业资源和农副产品转化利用率出发,选择最佳物种组合,利用动植物种间互利之长,避种间相抑之短,通过光温互补、时间互补、高矮配搭、交替嵌合等措施,在有限的时空中,创造多样化模式。在当前,应尽可能把人不食用的农副产品纳入立体系统中,大力研究和推广含有粮食生产的立体种养模式。

(二)合理配套技术

不论立体系统中种类或品种互利相促关系多么融合,只要环境因素供应量小于系统需要量,竞争即开始。良好的配套技术可以缓解这种竞争,实现功能目标,如调节播种(养殖)期、行向、密度;注意前后作交替连接,合理施肥、灌水等等。以我校研究的“麦+菜-瓜-稻”立体种植模式中“麦-瓜”共生期需水为例,小麦相对耐渍,而西瓜最怕涝,二者在灌水量、灌水持续时间方面发生尖锐矛盾,成为制约该

模式发展的原因之一。为此,我们采用“少吃多餐、速灌速排”的配套技术,较好地解决了这一矛盾。

(三)系统主导因素

立体系统在很大程度上受自然因素支配,这些因素包括天时、地理、生物、社会等。它们构成十分复杂的综合关系。为此,应着重研究:①各因素的直接和间接作用;②因素互作和补偿关系;③在一定条件下,起主导作用“限制因子”。

(四)增加收入

系统生产力与供应物质数量及比例呈正相关。在生产力允许前提下,除了智力投入外,要积极适度地增加物质投入,一定要研究物质和能量投入的内容、适度、时间和方法,研究人工辅助能及各个要素的作用力和对环境的污染力,通过外加投入干预协调种种、种养关系,以便更好地发挥立体结构优势。在目前,应当走机械技术和生物技术结合,有机和无机技术相结合,常规和现代技术相结合的道路。

On Energy Exploitation and Substance Recycle in Three - dimension Agriculture

XIA Ming - zhong

(Xichang College, Xichang Sichuan 615013)

Abstract: Based on research work done in recent years, and according to related reference material, the author discusses energy exploitation and substance recycling in three - dimension agriculture. The core of three - dimension agriculture is to realize reasonable energy conversion and substance recycling. Due to the difference between plant's optical energy exploitation and substance exploitation, an exploitation level is formed. The main task of three - dimension is to take advantage of this characteristics and form the best exploitation mode.

Key words: Three - dimension agriculture; Energy exploitation; Substance recycle

(责任编辑:张荣萍)