

立体种植条件下作物需水规律研究

王仰仁¹, 李明思¹, 康绍忠¹

(1. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 提出了立体条带种植高效用水中存在的问题, 对其中作物需水量和产量计算关键性问题进行了初步研究。在考虑冠层、根系分布和土壤水分分布等特点的基础上, 为了充分利用已有的单作种植作物需水量和水分生产函数研究成果, 引入需水量和产量计算修正系数概念, 提出了立体条带种植条件下作物需水量和产量计算模式。以山西省黎城县漳北渠灌区灌溉试验站 1998 年度进行的冬小麦套种玉米复播甘蓝立体种植模式试验结果为实例, 分析得出了该立体种植模式中各作物的需水量和产量计算修正系数。结果表明本文所提出的计算方法是可行的。

关键词: 立体种植; 灌溉制度; 高効用水; 作物需水量

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A

立体种植是指通过间作套种, 在同一块土地上同时种植 2 种或 2 种以上的作物, 是作物在时间和空间上的集约化。作物之间有一定的共生期, 存在水分和养分的竞争。同时因作物植株高矮不同、根系深浅不同, 使作物在资源利用和田间生态方面又具有一定的互补作用, 从而获得资源的高效利用。本文立体种植主要指条带种植。

立体种植在农业生产中具有十分重要的地位。我国在历经几千年的农业发展过程中, 保持和发展了这一农业栽培技术精华, 20 世纪 70 年代以来, 该项技术有了更快的发展。目前我国立体种植面积约占全国耕地总面积的 50%, 占世界立体种植面积的一半, 其粮、棉产量占全国的 3/4, 是增加农民收入, 实现农业可持续发展的一项重要措施。

有人做过预测, 认为在今后 40 年间, 对农作物增产起促进作用的各种农业技术中, 立体种植增产贡献率将占到 27%^[2]。

立体种植高効用水技术, 包括田间灌水技术和灌溉制度, 其主要研究内容有满足立体种植灌水要求的田间配水系统与配水技术、立体种植条件下的作物需水量与需水规律, 产量与水分的关系等。国内外对立体种植做过较多的研究, 并取得了很多人满意的研究成果^[3, 4]。但这些研究主要限于农业栽培技术方面, 对立体种植高効用水技术尚未进行系统研究。进入 20 世纪 90 年代, 大力调整农业结构, 提高农民收入, 以及水资源的严重短缺, 使得这一问题更多的引起了人们的关注^[5-10]。

1 存在问题

立体种植可以较大幅度地提高单位面积产量, 提高光、热、水资源的利用效率, 具有显著的节水增产、增收效果 [2、5、6、7]。然而立体种植不同于传统单作种植, 其灌溉用水过程中存在一些急待研究和解决的问题。

收稿日期: 2002-05-13

作者简介: 王仰仁(1962-), 男, 山西介休人, 在读博士生, 高级工程师, 主要从事水资源开发利用与灌溉技术研究。

(1) 立体种植中作物之间的用水协调问题。如冬小麦间作大豆、冬小麦间作玉米种植形式中，冬小麦最后一次灌水的时间不能太晚，否则会造成冬小麦贪青晚熟，灌水定额也不能太大，否则会使小麦倒伏，造成小麦的严重减产；灌水也不能太早，或灌水定额太小，因为冬小麦后期蒸发蒸腾耗水强度仍很大，过早或过小的灌水都会造成土壤严重干旱，难以适时播种后茬作物。

(2) 立体种植与灌水技术的协调问题。现有的田间灌溉系统是根据单作种植畦田规格设计的，难于适应立体种植条件下的条带灌水要求（条带宽度小于单作种植畦块宽度），因而要求研究提出新的灌水技术或改进现有的田间灌水技术。以及喷灌、滴灌、田间闸管灌溉和波涌灌等现代灌水技术在立体种植中的应用研究等。

(3) 在立体种植条件下，由于作物生长期的叠加，以及条带种植的边行增产效应，使得立体种植的蒸发蒸腾耗水量小于其相应作物单作种植耗水量的累加值，并使其水分生产效率显著提高。但是，单位面积上作物生长期的延长，使得立体种植在增加单位面积产量与产值的同时，其用水总量也增加了^[7]。这无疑加重了水资源的紧缺程度。研究立体种植最低限度的用水量及其优化灌溉制度，是实现立体种植农业可持续发展的一个重要问题。

(4) 立体组合种植条件下，作物需水量，包括供水不足条件下的作物蒸发蒸腾量及其计算方法可能不同于单作种植，至少不能直接采用单作种植条件下得出的作物系数值。主要原因是条带种植中相邻的2种作物植株高度不同，叶面积指数也不同，冠层不均匀，不同于单作种植有相对均匀齐整的作物冠层。如图1所示。

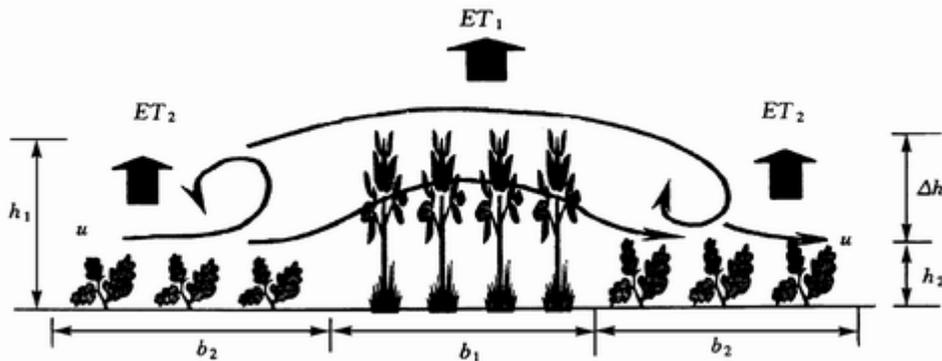


图1 立体种植田间水汽交换示意

立体种植增加了下垫面糙率，改变了气流在冠层的运动形式。当气流通过密植的高秆作物时，由于阻力作用，一部分气流穿过冠层，而另一部分气流绕过冠层顶部运动。为保持断面能量守恒，冠层顶部气流流速加快，这样，穿过冠层的气流将上升。此外，高秆作物对气流的阻力使气流加剧了对作物前、后边界湍流区的作用，促进矮秆作物冠层水汽与大气的交换，以及与高秆作物冠层水汽的交换。这样可促使2种作物蒸腾量增加。如下式所示，

$$K_z = \frac{(u_*)^2}{\frac{du}{dz}} \quad (1)$$

$$ET = -\rho \cdot K_z \frac{\partial q}{\partial z} \quad (2)$$

式中： K_z 为水汽垂直交换系数； u 为动力速度； u 为气流速度； z 为高度； ET 为水气通量； ρ 为空气密度； q 为平均空气比湿。

但是，矮秆作物冠层顶部的气流速度会因高秆作物阻力作用而减小，这一因素又可减小矮秆作物的蒸腾量。因此，立体种植农田的蒸发蒸腾强度，较单作种植是增加了还是减小了，应视具体模式和具体时段分析研究。

另一方面，条带种植中，相邻2种作物必然出现光、热、水分和养分资源的竞争，使得作物的生长发育状况及产量将不同于其单作种植情况。因此在水利工程规划设计或灌溉用水管理中，简单的套用单作种植条件下的作物需水量、水分生产函数，将会造成不合理的工程规模和用水管理决策。

2 几个关键问题的初步研究

2.1 立体种植条件下作物需水量的计算 首先是充分供水条件下需水量的计算。立体种植条件下，条带种植冠层是不均匀的；不同作物，其叶片形状、叶位角不相同，其反射率也不同，加之条带之间植株高低不同，使得条带种植作物的反射率明显地不同于单作种植；高秆作物对低秆作物的遮荫作用，使得相邻条带获得的辐射能也有显著差异。所有这些，使得立体种植需水量的计算不能简单采用单作种植作物需水量的叠加值，需要重新建立新的计算方法，如在单作种植作物需水量研究的基础上对作物系数进行修正。如

$$ET_c = \frac{K}{b_1 + b_2} (b_1 K_{c1} + b_2 K_{c2}) \cdot ET_0 \quad (3)$$

$$K = f(\Delta h, LAI) \quad (4)$$

式中： ET_c 为立体种植条件下的作物需水量，是指联合国粮农组织定义(Allen et al., 1998)的标准状态下(在给定气候条件下，无病虫害，无养分和水分亏缺，大面积上获得高产)的作物蒸发蒸腾量， $mm^{[13]}$ ； ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量，用Penman公式或Penman Monteith公式计算^[13]； b_1, K_{c1} 分别为条带1的宽度和该作物在单作种植时的作物系数； b_2, K_{c2} 分别为条带2的宽度和该作物在单作种植时的作物系数； K 为条带种植的作物需水量计算修正系数，可能是相邻条带作物株高之差 $h(=h_1-h_2)$ 和叶面积指数 LAI (可以2条带作物叶面积指数按条带宽度的加权平均值表示)的函数，主要与作物生长特性及其组合形式有关。

其次是供水不足条件下需水量的计算。仍以条带种植为例，不仅条带之间的水汽交换、反射率、接收的辐射能的差异对作物蒸发蒸腾有显著影响，而且相邻条带作物的蒸发蒸腾强度不同，也会导致沿条带宽度方向土壤水分差异。若土壤水分较低时，作物的蒸发蒸腾强度将受到显著影响。所以，供水不足条件下条带种植作物蒸发蒸腾量的计算应做如下修正，

$$ET = \frac{K \cdot K_\theta}{b_1 + b_2} (b_1 K_{\theta 1} K_{c1} + b_2 K_{\theta 2} K_{c2}) ET_0 \quad (5)$$

$$K_{\theta} = g(\Delta\theta), K_{\theta_1} = g_1(\theta_1), K_{\theta_2} = g_2(\theta_2) \quad (6)$$

式中：ET 为条带种植供水不足条件下的作物蒸发蒸腾量，mm； K_{θ_1} 、 K_{θ_2} 分别为相邻条带因土壤水分不足对作物蒸发蒸腾量影响的修正系数，可以假设为根系层土壤储水量的函数， K_{θ_1} 和 K_{θ_2} 一般是不相等的； K_{θ} 为立体种植土壤水分修正系数，可能是 2 条带根系层土壤储水量之差 ($\theta = \theta_1 - \theta_2$) 的函数，主要与沿条带宽度方向土壤水分分布和作物根系分布有关；其余符号意义同前。

2.2 立体种植产量与供水量的关系 对立体种植作物产量与水分关系，即作物水分生产函数，采用与需水量计算类似的处理方法，在单作种植水分生产函数基础上，考虑条带宽度、作物株高之间的差异引入修正系数。此外立体种植中多种作物组合栽培的重要作用之一可能是改善了农田水分生态环境，对其中的某些作物可能并不追求其高产，而是利用其调节农田小气候和生态，以便使其它经济价值较高的作物获得高产，从而达到整体效益最高。因此在进行多种作物的优化组合和制定优化灌溉制度时，以农田水分效益函数表达产量与水分关系更为合适。如

$$B = \frac{1}{L} \sum b_j y_j p_j \quad (7)$$

$$y_j = f(ET_{1j}, ET_{2j}, \dots, ET_{nj}) \quad (8)$$

$$L = \sum b_j (j = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

式中：B 为立体种植条件下单位面积的产值； y_j 、 p_j 分别为立体种植模式中作物 j 的产量与价格；L、 b_j 分别为立体种植模式条带宽度和作物 j 所在条带宽度； ET_{1j} 、 ET_{2j} 、...、 ET_{nj} 为立体种植模式中某种作物的阶段蒸发蒸腾量；N 为作物生长期划分的阶段数； y_j 为作物 j 在其阶段蒸发蒸腾量组合为 ET_{1j} 、 ET_{2j} 、...、 ET_{nj} 情况下的产量；f 为某一函数表达式，如 Jensen 模型 (1968 年) 或 Blank (1975 年) 模型等^[12]；j 为作物编号。

当用 Jensen 模型表示作物水分生产函数时，即

$$\frac{y_j}{y_{mj}} = \prod_{i=1}^{n_j} \left(\frac{ET_{iy}}{ET_{mij}} \right)^{\lambda_{ij}} \quad (10)$$

式中： y_{mj} 为立体种植模式中作物 j 的最大产量。假定立体种植时，作物阶段水分敏感指数 λ_{ij} 不发生变化，即与单作种植时相同，可给出用传统单作种植产量计算立体种植作物产量的修正系数，称为产量修正系数，

$$y_{mj} = \beta_j \cdot y_{dmj} \frac{b_j}{L} \quad (11)$$

式中： β_j 为立体种植模式中作物 j 的产量修正系数； y_{mj} 为立体种植模式中作物 j 充分供水条件下的产量，或称为最大产量，以单位立体种植面积产量表示； y_{dmj} 为作物 j 在传统单作种植充分供水条件下的产量，或称为最大产量；其余符号意义同前。

3 实例

作为示例，现给出山西省黎城县漳北渠灌区灌溉试验站（以下简称漳北站）1998 年冬小麦套种玉米复播甘蓝立体种植模式的需水量与产量计算修正系数的计算及其结果。

3.1 基本情况 漳北站试验田土壤质地为中壤土，0~100cm 深土壤容重为 $1.47\text{t}/\text{m}^3$ ，田间最大持水量 23.5%（占干土重的%），有机质 1.38%，全氮量 0.09%，全磷量为 0.1%，速效磷 51ppm，引用水源为河水。该站针对这一立体种植模式设置了冬小麦套种玉米复播甘蓝立体种植、冬小麦复播甘蓝传统种植和单作春玉米传统种植 3 个处理进行试验。立体种植模式总带宽为 2.9m，其中冬小麦带宽 2.2m，春玉米带宽 0.7m，收割冬小麦后复播甘蓝，甘蓝带宽同冬小麦。各作物播种、收获期，以及立体种植模式中作物单作期（只有 1 个条带种植作物，其余条带为裸地）与作物间的共生期见表 1。传统种植模式冬小麦复播甘蓝和单作种植春玉米中各作物的播种期、收获期与立体种植模式中相应的作物相同。

表 1 立体种植模式中作物生长期及其单作期与共生期

作物名称	播种期 年.月.日	收获期 年.月.日	生长期 /d	单作期及天数		共生期及天数	
				起止日期年.月.日	d	起止日期年.月.日	d
冬小麦	1997.10.10	1988.6.20	253	97.10.10~98.5.10	212	98.5.10.~98.6.20	41
甘蓝	1998.7.1	1998.10.20	111	98.10.7~98.10.20	13	98.5.10~98.10.7	98
春玉米	1998.5.1	1998.7.1	150	98.6.20~98.7.1			11

立体种植模式从冬小麦播种到甘蓝收获历时 375d，期间降水量 401.6mm，蒸发量（20cm 口径蒸发皿）为 1555mm。全生育期灌水 6 次（其中冬小麦和甘蓝各灌水 3 次，灌水定额分别为 82.5~90mm 和 60~90mm），灌溉定额 486mm。套种条带玉米与主条带作物同期灌溉。在该年气候条件下该立体种植模式基本属于充分灌溉。传统种植冬小麦复播甘蓝全生长期灌水 6 次（其中冬小麦和甘蓝各灌水 3 次，灌水定额分别为 90~93mm 和 60~77.3mm），灌溉定额 485.3mm；传统单作种植玉米全生长期 150d，期间降水量 262mm，蒸发量 1168mm，灌水 3 次，灌水定额 60~75mm，灌溉定额 195mm，也基本属于充分灌溉。

3.2 立体种植作物需水量计算修正系数 用取土烘干称重法测定作物生长期主要根系层（0~100cm）土壤含水量，用水量平衡法计算作物生长期腾发量。裸地蒸发量采用 λ 值（裸地土壤蒸发量与同期水面蒸发量的比值）法计算，这里 λ 值采用各种作物播种至出苗期的腾发量与同期水面蒸发量比值的平均值，根据该年计算， λ 值为 0.17。由此计算得各种种植条件下作物的腾发量和裸地蒸发量，见表 2。

表 2 作物腾发量、裸地蒸发量及立体种植需水量计算修正系数 K

种植模式	作物腾发量、裸地蒸发量/mm 或 K 值			
	全生长期	单作期 1	共生期	单作期 2
立体种植	536.8	227.8	280.1	29.0
裸地蒸发量	264.5	77.3	181.2	5.9
冬小麦复播甘蓝	554.0	223.6	295.8	34.6
春玉米单作种植	261.9		261.9	
修正系数 K	1.066	1.210	0.974	1.046

注：1、单作期 1 为冬小麦，97.10.10~98.5.10；单作期 2 为甘蓝，98.10.7~98.10.20；共生期为冬小麦玉米和甘蓝玉米，98.5.10~98.10.7；2、裸地蒸发系数： $\lambda=0.17$ 。

根据式（3）计算出用单作种植作物需水量计算立体种植需水量计算修正系数，见表 2。由表 2 可见，需水量计算修正系数 K 在整个种植期的变化过程呈现两头大中间小，即单作期大，共生期小，单作期均大

于1,共生期小于1,并且都接近于1。单作期1的需水量修正系数最大,一个可能的原因是立体条带种植中冬小麦充分利用了裸地条带的土壤水分。

3.3 立体种植作物产量计算修正系数 仍采用上例的试验结果,见表3。按式(11)计算该立体种植模式中各作物的产量修正系数如下,

$$\text{冬小麦: } \beta_1 = \frac{365}{403} \times \frac{2.2+0.7}{2.2} = 1.1938$$

$$\text{春玉米: } \beta_2 = \frac{188.1}{410} \times \frac{2.2+0.7}{0.9} = 1.9007$$

$$\text{甘蓝: } \beta_3 = \frac{1620}{2200} \times \frac{2.2+0.7}{2.2} = 0.9707$$

计算结果表明,在同等水分条件下立体种植中冬小麦和玉米条带产量要高于传统种植的产量,主要原因可能是冬小麦有一个较长的单作生长期,较传统的单作种植可从裸地条带获得更多水分,而且通风透光好,具有明显的边行增产效应。同样,冬小麦收割后,高秆作物玉米也获得了显著的通风透光边行增产效应。而甘蓝产量则较传统种植减低,可能原因是高秆作物玉米的遮光影响。

由此可见,立体种植作物产量计算修正系数,可能与相邻条带作物株高之差 h 、叶面积指数、条带宽度,以及作物自身生理生态特性等有关,是表示作物特征和条带规格对立体种植作物产量影响的一个重要参数。需要通过系统的灌溉试验确定。

表3 条带种植作物产量计算修正系数

种植模式	作物名称	产量 /(kg/hm ²)	产量计算 修正系数	产值 /(元/hm ²)	总产值 /(元/hm ²)	纯收入 /(元/hm ²)
立体种植	冬小麦	5475	1.1939	6570	11934	4803
	玉米	2821.5	1.9007	2934		
	甘蓝	24300	0.9707	2430		
冬小麦复播甘蓝	冬小麦	6045		7254	10554	3903
	甘蓝	33000		3300		
单种玉米	玉米	6150		6396	6396	2526

注:麦小麦、玉米和甘蓝价格分别为1.2元/kg、1.04元/kg和0.1元/kg。

4 结论与建议

(1) 立体种植条件下,作物蒸发蒸腾量不能直接套用现有的作物需水量计算方法;条带立体种植的边行增产效应,使得立体种植中某些作物产量高于传统种植的作物产量,因此,也不能简单地采用已有的作物水分生产函数研究成果来计算立体种植条件下的作物产量。但是,为了能够充分利用现有的单作种植条件下获得的作物需水量和作物水分生产函数试验成果,本项研究中尝试性地引入了立体种植作物需水量和作物产量计算修正系数。

(2) 本项研究提出了立体种植模式作物需水量和产量计算方法,并以实例说明了用传统单作种植作物需水量、裸地蒸发量和产量计算立体种植作物需水量和产量修正系数的方法及其可行性。

(3) 限于实例观测资料,对于需水量和产量计算修正系数与条带宽度、与条带种植作物株高和叶面积指数的关系,以及与灌溉供水满足作物需求程度之间的关系,尚需开展系统的灌溉试验研究。

参考文献:

- [1] 康绍忠,刘晓明,熊运章.土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.
- [2] 刘巽浩,高旺盛.集约持续农业工程技术[M].河南,河南科学技术出版社,2000.
- [3] 董宏儒,邓振镛.带田农业气候资源的利用[M].北京:气象出版社,1988.
- [4] 任天佑.高产高效益农田栽培的研究与推广[A],山西省科学技术协会主编,山西省高产优质高效农业论文集[C].北京:中国科学技术出版社,1995.91-99.
- [5] 王仰仁,杨丽霞.作物组合种植的需水量研究[J].灌溉排水,2000,(4):64-67.
- [6] 王仰仁,杨丽霞,胡炎,等.作物组合种植节水增产试验研究[J].人民黄河,2000,(11):34-35.
- [7] 王仰仁,张建中,杨丽霞.作物组合种植需水量与灌溉制度研究[J].中国农村水利水电,2000,(11):9-11.
- [8] Howard M Taylor,Wayne R Jordan,Thomas R Sinclair.Limitations to efficient water use in crop production[M].Published in U.S.A.1983.
- [9] Long Li,Jianhao Sun,Fusuo Zhang.Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping:I.Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J].Field Crops Research,2001,71:123-137.
- [10] Eortin M C,Culley J,Edwards M.Soil water,plant growth,and yield of strip intercropped corn[J].J.Prod.Agric.1994,7:63-69.
- [11] 罗龙,姚永久主编.山西高产优质高效种植模式图集[M].北京:中国经济出版社,1994.
- [12] 陈亚新,康绍忠.非充分灌溉原理[M].北京:中国水利电力出版社,1996.
- [13] Richard G Allen,Luis S Pereira,Dirk Raes Martin Smith.Crop evapertraspitation guidelines for computing crop water requirements[M].FAO Irrigation and Drainage,1998.