

我国南方水稻水分生产函数试验研究*

茆 智 崔远来

李新健

(武汉水利电力大学)

(广西桂林地区灌溉试验中心站)

提 要

本文根据广西桂林地区灌溉试验中心站 1988 年以来的五年观测试验成果, 分析研究适用于我国南方的水稻水分生产函数模型, 探讨各种模型中水分敏感性参数的变化规律, 提出水稻水分生产函数随水文年度呈规律性变化的观点, 特别是具体提出了 Jensen 模型中水分敏感指数与参照作物需水量的关系, 为拓宽水分生产函数应用的时空范围提供了依据及方法。

关键词 水稻, 水分生产函数, 水分敏感指数。

一、引 言

在水稻生产与灌溉以高产、优质、节水、高效为目标的条件下, 水稻水分生产函数便成为水稻灌区规划、设计与用水管理的最基本依据。但国内外对水稻水分生产函数一直无较系统的专门性试验研究, 缺乏可供生产应用的成果。因此, 当前在我国开展水稻水分生产函数试验研究, 有重要意义。我国种植水稻的最广泛地区是长江以南的双季稻种植区, 该地区早稻一般处于雨季, 缺水问题不显著, 而晚稻正处于干旱季节或严重干旱季节, 缺水问题突出。本文介绍笔者等近五年对南方晚稻水分生产函数的成果。

二、试验研究情况

作物水分生产函数可以用作物产量与供水量或产量与耗水量(蒸发蒸腾量)的关系表示。供水量除了与耗水量有关外, 尚显著受降水量影响, 从有利于对非充分灌溉条件下规划、设计与用水管理的应用出发, 本文以产量与耗水量的关系表示水分生产函数。因而, 试验的关键是精确地测定充分供水条件下与各种缺水(受旱)处理条件下的水稻产量及各阶段的耗水量。

(一) 试验点基本情况 试验点设在广西桂林地区灌溉试验中心站。该站位于东径 110° 、北纬 25° 处; 气候温暖, 无霜期约 300d, 年平均气温 19.5°C , 年降雨量 1400—1700mm, 年内分布不均, 70%左右降雨量集中在春季, 夏、秋降雨少, 晚稻季节干旱严重; 土质为粘壤土, 肥力为中上等水平。

(二) 水稻生育阶段的划分及试验处理拟定 按全国《灌溉试验规范》中划分作物生育阶段的标准⁽¹⁾, 并根据水分生产函数试验划分 4—6 个阶段为适宜和各阶段天数应接近的原则⁽²⁾, 本试验对水稻划分以下 6 个生育阶段: 返青、分蘖、拔节孕穗、抽穗

* 本文于1994年3月15日收到, 系国家自然科学基金资助项目。

开花、乳熟、黄熟。

1988年、1990年及1991年，各安排6个处理，以控制灌溉定额的方式进行安排，具体的处理编号及特征见表1及表中的附注。1992年及1993年，进行了专项水分生产函数试验，安排成不同阶段、不同程度的受旱处理，各处理编号及其特征见表2及表中附注。

五年的试验，各处理均设置3次重复。

表1 1988年、1990年及1991年晚稻各处理蒸发蒸腾量及产量

年分	处理编号	处理特征	各阶段蒸发蒸腾量(mm)					全生育期蒸发蒸腾量(mm)	产量(kg/亩)	
			(0) 返青	(1) 分蘖	(2) 拔节孕穗	(3) 抽穗开花	(4) 乳熟			(5) 黄熟
1988	1	控灌1	19.7	55.7	25.3	32.7	65.0	86.5	284.9	144.9
	2	控灌2	23.6	55.7	24.0	22.4	36.0	59.8	221.5	151.8
	3	控灌3	18.8	40.7	22.8	29.7	63.2	81.8	257.0	133.3
	4	控灌4	20.4	55.7	20.4	20.4	28.7	45.9	191.5	136.9
	5	控灌5	22.7	53.7	16.2	18.1	34.2	45.4	190.3	135.3
	6	正常灌 (对照)	20.8	62.7	33.5	33.7	68.0	83.8	302.5	152.7
1990	1	控灌1	24.6	160.7	71.1	47.0	50.3	70.6	424.2	361.6
	2	控灌2	25.4	160.6	52.6	49.3	46.9	67.2	402.0	320.3
	3	控灌3	24.0	128.5	59.0	50.7	49.1	57.4	368.7	294.8
	4	控灌4	26.1	132.0	55.1	42.3	44.6	63.7	363.8	295.4
	5	控灌5	22.8	130.7	49.4	43.4	40.7	50.6	337.6	200.1
	6	正常灌 (对照)	25.7	212.3	90.2	56.4	69.2	94.2	548.0	398.2
1991	1	控灌1	20.5	154.3	90.2	32.2	54.9	61.3	413.4	424.1
	2	控灌2	19.8	114.2	81.6	52.2	66.7	43.0	377.5	433.9
	3	控灌3	21.5	103.6	74.0	30.4	27.3	30.8	287.6	394.6
	4	控灌4	18.7	98.0	66.7	46.0	34.2	34.4	298.0	387.5
	5	控灌5	17.5	110.5	65.7	28.2	26.9	32.6	281.4	383.0
	6	正常灌 (对照)	21.5	152.9	94.7	56.2	67.0	73.4	465.7	477.7
附注	(1) 1988年为优质稻；(2) 控灌1、控灌2、控灌3、控灌4及控灌5灌溉定额分别为正常灌溉条件下的80%、70%、60%、50%及40%；(3) 正常灌为丰产的浅水、晒田、湿润灌溉方式。									

(三) 观测设备及方法 1988年、1990年及1991年，在有底测坑中试验，同时与试验小区内成果进行核对。测坑面积为 $4m^2(2m \times 2m)$ ，深1.0m，下设滤层及侧向排水管。每个小区面积0.1亩。1992年及1993年，在大型钢制圆形蒸渗器中试验，同时与测坑及小区成果核对。蒸渗器直径0.618m，高0.8m，下设15cm厚的虑层，底部设侧向排水孔，平时关闭，定时开管排水，器内填55cm厚原状土，每器内种水稻10莖，采用地埋双套筒方式安装。测坑及小区中，通过测定水位(有水层时)或土壤含水率(无水

层时)测出蒸腾量. 对于蒸渗器, 利用桁架式活动吊称, 用称重法测蒸发蒸腾量. 对于各处理、各重复, 测定实际产量.

三、主要试验成果

用坑测法试验的三年中, 各处理分阶段测定的蒸发蒸腾量以及水稻产量如表 1.

1992 年、1993 年用大型称重式蒸渗器试验, 其成果如表 2.

表 2 1992 年、1993 年晚稻各处理蒸发蒸腾量及产量

年分	处理编号	处理特征	各阶段蒸发蒸腾量(mm)						全生育期蒸发蒸腾量(mm)	产量(kg/亩)
			(0) 返青	(1) 分蘖	(2) 拔节孕穗	(3) 抽穗开花	(4) 乳熟	(5) 黄熟		
1992	1	分蘖轻旱	25.1	113.2	96.6	92.1	67.2	53.6	451.3	383.8
	2	分蘖重旱	26.0	107.6	88.3	84.9	64.2	54.5	427.9	305.1
	3	拔节孕穗轻旱	25.1	133.9	91.0	106.9	70.3	67.3	498.0	407.4
	4	拔节孕穗重旱	27.2	132.1	77.9	93.9	65.0	66.3	461.3	303.7
	5	抽穗开花轻旱	25.0	128.2	99.4	85.3	78.7	71.2	487.8	368.0
	6	抽穗开花重旱	24.6	129.7	92.5	71.9	69.4	62.3	450.4	355.3
	7	乳熟轻旱	28.1	140.5	112.9	108.6	68.6	60.5	519.1	423.0
	8	乳熟重旱	29.8	135.3	108.0	101.7	65.0	49.9	487.5	402.7
	9	分蘖、拔节孕穗中旱	27.3	110.6	83.3	95.2	72.3	72.0	460.7	338.4
	10	拔节孕穗、抽穗开花中旱	24.1	128.4	90.4	83.4	73.6	68.3	468.2	362.8
	11	抽穗开花、乳熟中旱	24.7	130.1	102.6	94.7	61.4	60.7	474.2	408.7
	12	正常灌溉(对照)	24.3	148.1	111.8	124.7	89.4	75.6	573.9	475.9
1993	1	分蘖轻旱	19.2	165.0	62.7	97.7	74.4	47.7	466.7	393.9
	2	分蘖重旱	25.4	162.9	62.5	105.0	83.5	55.7	485.5	386.7
	3	拔节孕穗轻旱	22.4	203.9	65.0	123.5	85.9	50.7	551.2	466.7
	4	拔节孕穗重旱	23.7	202.2	63.6	117.6	88.3	50.9	546.3	439.5
	5	抽穗开花轻旱	25.5	218.5	76.4	117.5	87.1	57.2	582.2	533.4
	6	抽穗开花重旱	26.8	211.3	75.0	113.1	77.9	51.0	555.1	430.5
	7	乳熟轻旱	26.0	214.2	70.1	117.2	85.4	50.7	563.6	493.6
	8	乳熟重旱	24.2	200.1	68.4	117.4	68.2	44.0	522.3	452.5
	9	拔节孕穗、抽穗开花中旱	24.1	216.3	68.5	99.7	83.6	53.0	545.2	463.0
	10	抽穗开花、乳熟中旱	27.5	220.8	80.9	115.5	67.23	45.0	556.9	527.0
	11	正常灌溉(对照)	24.2	216.8	76.7	124.5	89.8	54.6	586.6	524.3

轻旱、中旱与重旱, 指阶段内稻田土壤含水率下限降到饱和含水率的 70%、60%和 50%; 正常灌溉处理, 系返青期浅水(20—40mm), 分蘖期薄水(0—20mm), 分蘖末期晒田, 拔节期至乳熟期湿润(土壤含水率为饱和含水率的 90%以上至田面水深 10mm 以下).

四、水稻水分生产函数模型

用国际上公认较完善的以下 4 种作物生产函数模型分析水稻水分生产函数⁽³⁻⁸⁾。

1. Jensen 模型

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (1)$$

2. Blank 模型

$$\frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \frac{ET_i}{ET_{mi}} \quad (2)$$

3. Stewart 模型

$$\frac{Y}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n B_i \left(\frac{ET_{mi} - ET_i}{ET_{mi}} \right) \quad (3)$$

4. Singh 模型

$$\frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^n C_i \left[1 - \left(1 - \frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: Y ——各处理条件下实际产量(kg/亩); Y_m ——正常灌溉处理下产量(kg/亩); ET ——各处理条件下实际蒸发蒸腾量(kg/亩); ET_m ——正常灌溉处理下蒸发蒸腾量(kg/亩); i ——阶段编号(见表 1、表 2); n ——建立模型的阶段总数, 本试验为 4(见表 1、表 2); λ 及 A 、 B 、 C ——水稻产量对缺水的敏感指数及敏感系数。

由式(1)得

$$\ln \frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \ln \frac{ET_i}{ET_{mi}} \quad (5)$$

由式(3)得

$$1 - \frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^n \beta_i \frac{ET_{mi} - ET_i}{ET_{mi}} \quad (6)$$

对于式(5), 令 $Z = \ln \frac{Y}{Y_m}$, $X_i = \ln \frac{ET_i}{ET_{mi}}$, $K_i = \lambda_i$,

对于式(6), 令 $Z = 1 - \frac{Y}{Y_m}$, $X_i = \frac{ET_{mi} - ET_i}{ET_{mi}}$, $K_i = \beta_i$

对于式(2), 令 $Z = \frac{Y}{Y_m}$, $X_i = \frac{ET_i}{ET_{mi}}$, $K_i = A_i$,

对于式(4), 令 $Z = \frac{Y}{Y_m}$, $X_i = 1 - \left(1 - \frac{ET_i}{ET_{mi}} \right)^2$, $K_i = C_i$,

由式(1)——(4)均可统一化成如下的线性公式:

$$Z = \sum_{i=1}^n K_i X_i \quad (7)$$

只是对于不同的模型(式(1)——(4)), Z 、 X_i 及 K_i 所代表的内容不同。

若用 m 个处理, 可得 J 组

$$X_{ij}, Z_j \quad (j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n),$$

采用最小二乘法, 可求得满足下式的 K_i 值

$$\min \theta = \sum_{j=1}^m \left(Z_j - \sum_{i=1}^n K_i \cdot X_{ij} \right)^2 \quad (8)$$

令 $\frac{\partial \theta}{\partial K_i} = 0$, 即

$$-2 \sum_{j=1}^m \left(Z_j - \sum_{i=1}^n K_i X_{ij} \right) \cdot X_{ij} = 0.$$

可得一组线性联立方程式

$$\left. \begin{aligned} L_{11} K_1 + L_{12} K_2 + \dots + L_{1n} K_n &= L_{1z} \\ L_{21} K_1 + L_{22} K_2 + \dots + L_{2n} K_n &= L_{2z} \\ \dots\dots\dots \\ L_{n1} K_1 + L_{n2} K_2 + \dots + L_{nn} K_n &= L_{nz} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中

$$L_{ik} = \sum_{j=1}^m X_{ij} \cdot X_{kj}, \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

$$L_{iz} = \sum_{j=1}^m X_{ij} \cdot Z_j, \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

相关系数

$$R = \left[\frac{\sum_{i=1}^n K_i \cdot L_{i,n+1}}{L_{n+1,n+1}} \right]^{1/2} \quad (10)$$

解联立方程组 9, 求得 K_i , 用式(10)算出 R , 并按照 4 种模型(式(1)—(4)), 中原来令 Z 、 X_i 与 K_i 分别代表的内容, 可算出 λ_i 、 A_i 、 B_i 及 C_i .

根据表 1、表 2 成果, 用以上方法算得 5 个年分、4 种水分生产函数模型中的指数 (λ) 与系数 (A 、 B 、 C) 的数值, 如表 3. 从表 3 可知:

1. Jensen 模型中的 λ 值, 五年中均是以第 ② 阶段(拔节孕穗期)最高, λ 值从高到低的阶段顺序, 四年是 ② → ③ → ① → ①, 一年为 ② → ① → ③ → ①; 五年中出现了两次负值, 但其绝对值接近 0. 式(1)表明, λ 值越高, 则缺水后减产率越高 (Y/Y_m 越低), 即对缺水减产越敏感. 上述 λ 值数值在第 ② 阶段最高以及缺水后对减产敏感的阶段顺序, 与晚稻的水分生理理论结论⁽⁹⁾ 以及灌溉实际的经验是一致的. 采用 Jensen 模型算得的相关系数, 各年均均在 0.978 以上, 多数年分是各种模型中最高的. 故水稻用 Jensen 模型属于合理.

2. Blank 模型中的 A 值, 其高峰或低谷出现的阶段以及高低的阶段顺序, 在五年中均不是一致的; 无规律; A 出现 5 次负值, 有些负值的绝对值很高. 该两方面均属于极不合理.

3. Stewart 模型的 B 值, 五年中均是第 ② 阶段最高. 但高低的阶段顺序, 各年间不一致; 五年中 B 值出现过两次负值, 负值的绝对数很高, 亦属不合理.

4. Singh 模型中的 C 值, 其高峰或低谷出现的阶段以及高低的阶段顺序不一致; C 值出现 6 次负值, 有的负值绝对数超过正值绝对数; 有两年的相关系数很低. 以上均极不合理.

根据以上分析, 对于桂林地区的水分生产函数模型, 用 Jensen 模型最为合理, 其余三种模型不合理, 且其中 Blank 模型及 Singh 模型均出现极不合理结果, 这两种模型不适用于本地区. 初步确定, 当地水稻适宜采用 Jensen 模型.

五、模型中敏感指数在晚稻全生育期内变化规律

根据全国作物需水量研究协作组的分析研究^[10,11]，从作物需水角度出发，宜用参照作物需水量 ET_0 作为表征大气干湿程度的指标，并可通过 ET_0 的频率分析，确定各年的水文年类型。

表3 5个年分中4种水分生产函数模型的指数或系数的数值(桂林, 晚稻)

年 分	阶 段	4种模型中的指数或系数数值			
		(1) Jensen 模型 λ 指数	(2) Blank 模型 A 系数	(3) Stewart 模型 B 系数	(4) Singh 模型 C 系数
1988	1	0.1209	0.8492	0.1197	0.6905
	2	0.2376	-0.2864	0.2475	0.7759
	3	0.1300	0.7601	0.0451	-0.640
	4	0.0213	-0.2661	-0.1076	0.2228
	相关系数 R	0.980	0.960	0.973	0.483
1990	1	0.1940	0.3714	0.3620	0.7284
	2	0.5395	0.7879	0.9095	-0.2184
	3	0.2334	0.3722	0.5718	-2.7550
	4	-0.0726	-0.4889	-0.8445	3.3016
	相关系数 R	0.987	0.980	0.790	0.992
1991	1	0.1359	-0.0348	0.0948	0.6258
	2	0.3747	1.0055	0.4200	-0.0185
	3	0.1683	0.3161	0.1971	0.2214
	4	-0.0612	-0.3049	0.0579	0.1276
	相关系数 R	0.982	0.928	0.981	0.674
1992	1	0.2090	0.0525	0.1746	-0.4669
	2	0.7025	0.5575	0.6108	1.2223
	3	0.2199	0.2909	0.2680	0.6524
	4	0.1523	0.0607	0.1609	-0.5750
	相关系数 R	0.999	0.997	0.998	0.936
1993	1	0.3861	0.4524	0.3464	2.5342
	2	0.5898	0.3708	0.5970	-0.0500
	3	0.2889	0.1626	0.2852	-0.4956
	4	0.1204	-0.0268	0.1319	-1.1004
	相关系数 R	0.999	0.999	0.989	0.999

试验的五年包括了各种干、湿代表年分，五年中 ET_0 平均值接近中等年数值， ET_0 经验频律的平均值接近 50%。因此，可用五年平均的 λ 值代表当地 λ 的特性，其结果如表 4。

表 4 桂林站不同年型 λ 值及多年平均 λ 值

年分	年型	Jensen 模型中的 λ 值			
		① 分蘖	② 拔节孕穗	③ 抽穗开花	④ 乳熟
1988	湿润	0.1209	0.2376	0.1300	0.0213
1990	中旱	0.1940	0.5395	0.2234	-0.0726
1991	中湿	0.1359	0.3747	0.1683	-0.0612
1992	干旱	0.2090	0.7025	0.2199	0.1523
1993	中等	0.3861	0.5898	0.2889	0.1204
平均		0.2092	0.4888	0.2061	0.0588
附注	在第 ④ 阶段， λ 出现两个负值，理论上不合理，但其绝对值接近 0，计算平均值时将负值取为 0。				

亦即，表征桂林地区晚稻的水分生产函数为：

$$\frac{Y}{Y_m} = \left(\frac{ET_1}{ET_{m1}} \right)^{0.209} \cdot \left(\frac{ET_2}{ET_{m2}} \right)^{0.489} \cdot \left(\frac{ET_3}{ET_{m3}} \right)^{0.206} \cdot \left(\frac{ET_4}{ET_{m4}} \right)^{0.059} \quad (11)$$

式中，右下角注 1、2、3 及 4 分别代表分蘖、拔节孕穗、抽穗开花及乳熟阶段。

根据表 4，绘出各年及多年平均 λ 值在全生育期内变化过程线，如图 1。

将表 4 中平均 λ 值与晚稻插秧后的历时建立关系，得 $\bar{\lambda}$ 值在全生育期内变化过程，即

$$\bar{\lambda} = 1 / (10.08 - 17.09 \times 10^{-2} T - 5.14 \times 10^{-3} T^2 + 1.107 \times 10^{-4} T^3) \quad (12)$$

式中， T ——插秧后天数占全生育期天数的百分比(%)。

表 4 中， $\bar{\lambda}$ 以拔节孕穗期最高；分蘖期与抽穗开花期次之；乳熟期最低。 $\bar{\lambda}$ 值在全生育期内的这种变化规律是合理的，其原因如下：水稻的缺水减产敏感阶段是水稻生理特性及气象条件综合作用的结果。按照生理特性，拔节孕穗期及抽穗开花期均属敏感阶段，其次是乳熟期，再次为分蘖期⁽⁹⁾。但对于晚稻，全生育期内气温由高到低，拔节孕穗与抽穗开花期相比，气温高， ET_m 强度大，在 ET/ET_m 相同的条件下， $ET_m - ET$ 之值较大，即亏水的绝对值大，因而气象条件对减产的影响大，故 $\bar{\lambda}$ 值高峰在拔节孕穗期。在生理特性上，分蘖期不是对水分敏感的阶段，但因其气温与 ET_m 强度显著大于生理上对缺水敏感的抽穗开花期，因而分蘖期与抽穗开花期的 $\bar{\lambda}$ 值接近。乳熟期在生理上为对水分敏感阶段，又正值气温低、 ET_m 强度小的季节，故 $\bar{\lambda}$ 值最低。

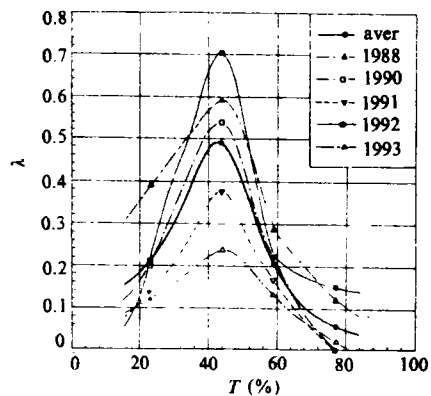


图 1 各年及多年平均晚稻 λ 值在全生育期变化过程线

六、敏感指数随水文年度变化规律及年际间移用方法

表4中,第①、第③及第④阶段的 $\bar{\lambda}$ 值较小,若以五年平均的 $\bar{\lambda}$ 值代替各年 λ 值,在 $ET/ET_m \geq 0.6$ 的条件下(在南方水稻地区,由于气候条件,不可能产生 $ET/ET_m < 0.6$ 的情况),所算出的 Y/Y_m 与当年实际 λ 值所算出的 Y/Y_m 进行比较,其差异分别小于5%、4%与1%,因此,在实用中,对于该3个阶段,各种水文年型均可采用 λ 的多年平均值($\bar{\lambda}$)代表该年的 λ 值.对于第(2)阶段, λ 值高,且随水文年分变化显著,必须考虑水文年型的影响.图1及表4明显表示, ET_0 越大,或 ET_0 频率越高,即天气越干旱,第②阶段的 λ 值越高.在该阶段,以各年的 λ 值与多年平均 $\bar{\lambda}$ 值之比 $K(= \lambda / \bar{\lambda})$ 作为 λ 值的年际修正系数,由表4算得 K 值与 ET_0 频率的关系如表5.

表5 λ 高峰期年际修正系数(K)与 ET_0 频率关系

年 分	λ 高峰值	$K = \lambda / \bar{\lambda}$	ET_0 频率 P(%)
1988	0.2376	0.486	9.5
1990	0.5395	1.104	71.4
1991	0.3747	0.767	42.9
1992	0.7025	1.437	85.7
1993	0.5898	1.207	52.4
平 均	$\bar{\lambda} = 0.4888$	1.000	52.38

由表5绘出 K 值与 ET_0 频率关系图如图2,导出关系式如式(13).

$$K = 0.4503 \times 1.014^P, \quad (13)$$

回归系数 $R = 0.83$.

式中, $K = \lambda / \bar{\lambda}$; P ——水稻全生育期日平均 ET_0 频率(%).

根据图2或式(13),可得各种水文年度供使用的 K 值,如表6.

表6 不同水文年度高峰 λ 的修正系数 K 值

年型	特旱	干旱	中旱	中等	中湿	湿润	特湿
频率(%)	95	85	75	50	25	15	5
K 值($\lambda / \bar{\lambda}$)	1.69	1.47	1.28	0.90	0.64	0.55	0.48

任何地区使用 Jensen 模型时,对于 λ 值高峰阶段,以平均的 $\bar{\lambda}$ 数值乘以表6中的修正系数 K ,即可求出各种水文年度实用的 λ 值;对于其余阶段,可用平均的 $\bar{\lambda}$ 值代替各年实用数值,从而十分方便地解决了 λ 值在年际间移用与扩展问题.

七、敏感指数随气象条件变化规律及年际间地区间移用方法

根据桂林试验站实测气象资料所计算的 ET_0 值以及晚稻 λ 值、晚稻第②阶段 λ 值(λ_2)与晚稻从插秧至第②阶段末的日平均 ET_0 值(ET_{02})如表7.

表7 桂林试验站晚稻第2阶段 λ_2 值与 ET_0 关系

年分	λ_2 (第2阶段 λ 值)	ET_{02} (mm) (插秧至第2 阶段末 ET_0 总量)	t (插秧至第2 阶段末天数)	$ET_{02} = ET_{02} / t$ (插秧至第2阶段 末日平均 ET_0)
1988	0.2736	101.78	37	2.75
1990	0.5395	200.10	45	4.45
1991	0.3747	164.52	42	3.87
1992	0.7025	223.54	48	4.66
1993	0.5898	167.05	41	4.07
平均	$\bar{\lambda}_2 = 0.4888$	$\overline{ET_{02}} = 171.00$	$\bar{t} = 42.6$	3.96

按表7数据, λ_2 与 ET_{02} 关系如图3, 回归方程如式(14).

$$\lambda_2 = 0.01556 \times 1.7554^{ET_{02}}, \quad (14)$$

回归系数 $R = 0.86$.

为便于应用, 列出 λ_2 与 ET_{02} 的查算表, 如表8.

表8 根据参照需水量确定 λ 值的查用表

插秧至第2阶段末日平均 参照需水量 ET_{02} (mm/d)	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
第2阶段敏感指数 λ_2	0.21	0.27	0.36	0.47	0.62	0.81	1.07

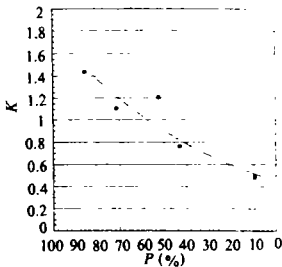


图2 K (λ 年际修正系数)与 P (ET_0 频率)关系曲线

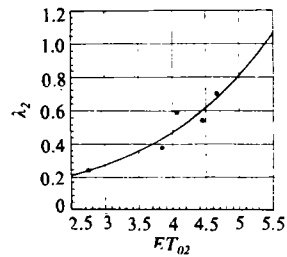


图3 λ_2 与 ET_{02} 关系曲线

根据表8, 只要获得需要 λ_2 资料地区或年份的 ET_{02} 数值, 便可确定 λ_2 . 对任何地区、对任何年份, 可以根据当地的海拔高程、纬度以及该年气象资料中的气温、日照时数、空气湿度与风速, 可以逐月、逐旬、甚至逐日算出 ET_0 数值, 从而求得所需地区、年份的 ET_{02} , 应用比较简便.

按上述方法, 以参照作物需水量 ET_0 为媒介, 在我国首次初步解决水稻水分生产函数中唯一的参数——敏感指数(λ)在地区间与年份间的移用问题, 从而有效地拓宽了水分生产函数试验研究成果的应用地域, 伸延了应用年限, 使其可以应用于任何年份, 即同时初步解决了作物水分生产函数在时、空两方面的变异性及在时空两方面的移用与伸延问题.

八、结 语

1. 经过在广西桂林地区灌溉中心试验站最近五年的试验研究, 对于南方晚稻水分生产函数, 得到以下主要结论:

(1) 在作物水分生产函数的各类模型中, Jensen 模型最适用; 对于桂林地区晚稻, 多年平均条件下, 应用式(11)最合适.

(2) Jensen 模型中的敏感指数 λ 值, 在拔节孕穗期最高, 其次是抽穗开花期及分蘖期, 成熟期最低. 该变化规律与水稻生理特性和气象条件变化的综合影响结果相吻合.

(3) 全生育期中敏感指数 λ 的高峰值, 随着不同的水文年有较大的变异, 天气愈干旱, λ 高峰值愈大. λ 高峰值年际修正系数 K (即各年 λ 高峰值与多年平均 λ 高峰值的比值) 与表征大气蒸发力的参照作物需水量 ET_0 之频率 P 存在着如式(13)的关系. 据此, 本文提供了计算不同水文年度 λ 高峰值的修正数值.

(4) 全生育期中 λ 高峰值与作物参照需水量密切相关, λ 高峰值 λ_2 与插秧到产生高峰值阶段末期日平均参照需水量 ET_{02} 存在着如式(14)的关系. 据此, 可以根据 ET_0 , 亦即根据计算 ET_0 的气温、日照、空气湿度与风速四项气象资料计算出任何年份、不同地区的 λ 高峰值.

(5) 利用上述第 3、第 4 点的关系与方法, 可以初步解决水稻水分生产函数在时间与空间两方面的移用与伸展问题. 这种原理与方法, 也为解决各种作物水分生产函数在时、空两方面的移用与伸展问题开拓了一个新的途径.

2. 上述成果主要是通过一个试验站五年试验而得的, 仅是初步成果. 为了进一步提高我国在作物水分生产函数领域的研究水平, 尚须在更多的试验站点上进行深入系统的试验研究.

参 考 文 献

- (1) 水利部, 灌溉试验规范(SL13-90). 水利电力出版社, 1990年.
- (2) 茆智, 节水灌溉试验. 灌排工程新技术, 第一篇第八章, 中国地质大学出版社, 1993年4月.
- (3) H. J. Vaux, W. O. Pruitt, Crop-Water Production Functions, U. S. Academic Press, ISBN 0-12-024302-4, 1983.
- (4) R. J. Hanks, R. W. Hill, Modeling Crop Responses to Irrigation in Relation to Soil, Climate and Salinity, Utah State University, U. S. A. ISBN 0-08-025513-2, 1980.
- (5) P. Singh, H. Wolkewitz, R. Kumar, Comparative Functions for Wheat, Irrigation Science, U. S. A, 1987.
- (6) 康绍忠, 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用. 国家自然科学基金资助项目研究报告, 西北农业大学, 1992年4月.
- (7) 陈亚新, 非充分灌溉的国外研究进展及在我国节水灌溉中的应用. 现代灌溉, 1988年第1、3、4期.
- (8) 李恩羊, 作物水分生产函数. 灌排工程新技术, 第一篇第三章, 中国地质大学出版社, 1993年4月.

- (9) 杉本[日]著, 水稻的生理生态. 吴尧鹏译, pp. 40-68, 上海科学技术出版社, 1983年8月.
- (10) 陈玉民, 郭国双等, 中国主要农作物需水量等值线图研究. 中国农业科技出版社, 1993年5月.
- (11) 茆智, 李远华, 作物需水量等值线图的原理、绘制与应用. 水利学报, 1988年第10期.
- (12) M. Frere, G. F. Popov, Agrometeorological crop monitoring and forecasting, Plant Production and Protection Paper, FAO, Rome, 1979.
- (13) 广西水利工程管理局, 广西壮族自治区水稻需水量等值线图研究. 广西水电厅, 1990年.

Study of water production function for rice in south China

Mao Zhi Cui Yuanlai

(Wuhan University of Hydraulic Electric Engineering)

Li Xinjian

(Irrigation Experiment Station of Guilin Prefecture)

Abstract

Based on the experimental data in 1988-1993 from Guilin prefecture in Guangxi Autonomous Region, the models of water production function for rice, which can be applied to south China, are investigated. The regularity of the variation of water sensitivity parameters in the various models has been discussed. It is suggested that the water sensitivity parameters of water production function for rice is varied with the hydrology years, especially, the relationship between the sensitivity indices for Jensen model and the reference evapotranspiration has been presented. Thus, the principle and methods for widening the applied ranges of time and space have been established.

Key words rice, water production function, water sensitivity index.

(上接第9页)

and the second development of the boundary layer on the downstream flat apron are also suggested.

Key words gradually varied curvature, bucket, time-averaged characteristics, boundary layer.