

作物需水量等值线图的原理、绘制与应用*

蒯 智 李远华

(武汉水利电力学院)

提 要

本文根据作者在全国协作研究作物需水量等值线图(湖北协作组)工作中取得的成果及经验,并吸取兄弟省、市、自治区及国外经验,就作物需水量等值线图的类别、绘制原理和方法以及应用等方面进行论述。从满足生产需要出发,提出绘制四种等值线图:(1)全年各月的日平均参照作物需水量等值线图;(2)作物生育期内各月的日平均作物需水量等值线图;(3)作物全生育期需水量等值线图;(4)作物全生育期日平均需水量等值线图。阐述了每种图的依据、作用及绘制方法。

推荐用“改进的彭曼法”及“作物系数”计算作物需水量;指出应用此法时在推算净辐射及空气动力学项中常产生的错误;分析错误的原因,提出正确的算法。

最后,阐述应用需水量等值线图绘制净灌溉定额等值线图的方法,以使用该图进行灌溉区划和灌溉工程的规划、设计与管理;用实例说明利用需水量等值线图综合分析需水量在空间和时间两方面的变化规律,藉以指导抗旱和调整农业布局。

一、引 言

作物需水量(此处指作物蒸发蒸腾量)是确定作物灌溉制度和灌溉用水量的一项基本资料,它随时间与空间产生较大幅度变化。在水利和农业区划、水资源开发利用、流域规划、地区水利规划和灌溉系统的规划、设计与管理运用中,必须掌握作物需水量的时、空变化规律。半个多世纪以来,国内外对作物需水量的变化规律进行了长期的试验研究,但以往多偏重于研究需水量在时间上的变化规律;由于生产上的需要,近十几年来,逐步把重点转到空间变化规律的研究。对于作物需水量的空间分布规律,直观和便于生产上应用的表达方式,在当前还是绘制作物需水量等值线图。美国、苏联、日本等发达国家和一些灌溉面积比例很大的国家,对作物需水量等值线图的研究与绘制工作,已进行了多年^[1-3],成果被生产上广泛采用。我国在七、八年前首先由水利水电科学研究院开始这项工作^[4];1984年后,研究与绘制我国主要灌溉作物需水量等值线图被列为全国协作项目(水利电力部农田灌溉研究所为协作组长单位);当前,这项研究处于中期,不少省、市、自治区将它列为当地的重点研究课题,集中力量从事这项工作。各地已取得初步成果,也存在不少科技上急待解决的问题。为了今后顺利和高质量地开展这项研究工作,根据我们在湖北协作组研究工作中的经验、体会和取得的成果,并吸取兄弟省、市、自治区和国外的经验,提出一些主要意见,供讨论、参考。

在论述正题以前,先对“为什么可用等值线图表示作物需水量的空间分布?”以及

* 全国协作研究项目。

“该图应符合的基本条件”作一简要说明。

任何物理量，只有它在空间上呈连续变化，又不因人为措施导致迅速和大幅度的改变，才能够或才适宜用等值线图表示它的空间分布；否则，或者是不能绘制空间等值线图，或者是可以绘制，但该图不能真实反映此物理量的空间变化规律。

影响作物需水量的主要因素是气象因素，包括太阳辐射、气温、空气饱和差、日照等。这些因素在空间上呈连续变化，不随人为措施改变，各项均可用等值线图表示其空间分布状况。主要受这些因素影响的作物需水量，在空间上也必然呈连续变化；若把影响需水量的非气象因素维持在一定水平，人为措施不会引起需水量迅速或大幅度变化，因而也可用等值线图来表示作物需水量的空间变化规律。

但是，作物需水量除了主要受气象因素影响以外，非气象因素，其中最主要的是土壤水分条件、作物生长发育条件及产量水平，对需水量也有一定影响，这些条件会因人为措施产生显著变化，随之也引起需水量的显著变化。因此，绘制作物需水量等值线图的第一个基本条件是：影响需水量的主要非气象条件要统一，即所绘制的应是土壤水分充足、作物生长发育正常、当地大面积高产条件下的等值线图。

同一地点的相同月、旬内，在不同水文年份之间的气象条件有较大差异，从而作物需水量也有较大差异。为了消除这种差异的影响，真实反映需水量的空间变化规律，应符合的第二个基本条件是：水文年份要统一，即同一图上各点应是同一水文年份的需水量。

二、作物需水量等值线图绘制的原理及方法

按全国协作研究的计划，是先以省（市、自治区）为单位研究与绘制本地的等值线图，而后分片或全国拼图。我国各省或自治区，一般仅有几个或十几个具有较长系列需水量实测资料的站点，直辖市拥有实测资料的站点更少，无法靠这些站点的资料直接绘制等值线图，必须通过计算来确定点需水量。需水量由气象资料推算，我国绝大多数县和一般市具有县级气象站，站址对当地农业气象条件有代表性，多数站具有连续二十年以上长系列的气象观测资料，能满足计算各种典型水文年份作物需水量的要求。绘制地形图时要求图上地形点之间的距离为1.5—3.0cm，参照这样的标准，在以县和一般市为需水量数据点的条件下，需水量等值线图的比例，对于面积大于500000km²的省和自治区，应为1:500000—1:2000000，其余应为1:200000—1:1000000，此图的大小在生产上也比较适用；对于直辖市图，宜采用1:500000—1:200000。因此，研究、绘制省和自治区作物需水量等值线图的重要内容之一，是计算各县和一般市的作物需水量；对于直辖市，需要计算比其所辖县的数目更多的站点需水量。

（一）点需水量的计算

按目前国内外已达到的水平，在实用中只能用经验或半经验的方法计算需水量^[5,6]。为绘制等值线图，应使同一张图上各点的需水量采用同一种公式计算，故应全面考虑，选用对各点的计算精度均较高的方法。近来国际上公认较为合理、精确的方法，是先推算出参照作物需水量，再经过作物系数的修正，算出实际作物的需水量。我们依据我国一些灌溉试验站的实测需水量资料，考核、验证各类计算需水量的方法，结果也是上述方法的精度较高（见后面“计算公式选择”内容），故在研究与绘制等值线图时，可选用这类方法，并按以下步骤计算。

1. 参照作物需水量的计算 所谓参照作物需水量 (Reference crop evapotranspiration), 或称参照需水量 (Reference evapotranspiration), 指土壤水分充足、作物性状全年一致条件下的需水量。为统一标准, 近来国际上规定以“土壤水分充足、地面完全复盖、生长正常、高矮整齐的开阔矮草地 (草高8—15cm) 的需水量”为参照作物需水量^[7]。

根据我国各地观测作物需水量的精度以及考虑需水量等值线图应有的质量, 许多协作组通过分析认为, 计算点需水量的精度必须符合以下标准: 误差小于20%的成果应占总计算成果的80%以上。华东区等一些大区协作研究组已将此标准列为各省共同遵守的规定。据我们分析计算, 正确地选择计算的方法与公式, 完全可以达到这个标准。

(1) 计算公式的选择 在各种计算参照作物需水量的方法中, 综合法系根据农田能量平衡、水汽扩散以及热传导原理建立起计算公式, 理论上较为完备^[5,6]。综合法的各种计算公式中, 联合国粮农组织 (FAO) 1979年推荐的“改进的彭曼 (Penman) 公式”考虑的因素最全面, 我国已采用此公式的一些地方已证实其计算精度较高。例如, 我们用此公式及作物系数计算湖北省漳河灌溉试验站1974—1985年共12年早、中、晚稻各月需水量, 其标准差为14—20%, 各种水稻相对误差小于20%的成果占计算成果的81—91%, 符合以上规定的标准; 用我国常用的另外六种公式计算, 标准差为22—36%, 误差小于20%的占55—75%, 精度低于规定标准; 用改进的彭曼公式计算湖北省其他试验站历年水稻需水量, 精度也高于规定标准^[8]。其他有些省(市、自治区)及对其他一些作物, 也是类似情况。因此, 采用“改进的彭曼公式”。

该公式的形式为^[9]

$$ET_0 = \frac{\frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \cdot R_n + E_a}{1 + \frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma}}, \quad (1)$$

式中: ET_0 ——参照作物需水量 (mm/d); P_0 ——标准大气压力 ($P_0 = 1013.25 \text{hPa}$); P ——计算地点平均气压 (hPa); Δ ——平均气温时饱和水气压随温度变化的变率, $\Delta = de_s/dt$; 其中 e_s 为饱和水气压 (hPa), t 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); γ ——湿度计常数 ($\gamma = 0.66 \text{hPa}/^{\circ}\text{C}$); R_n ——太阳净辐射, 以所能蒸发的水层深度计 (mm/d); E_a ——干燥力 (mm/d), 或称空气动力学项。

P 可根据计算地点的高程查出; Δ 可按气象学中的公式算出, 其中以马格奴斯 (Magnus) 公式计算较准确, 即:

$$e_s = 6.1 \times 10^{\frac{7.43t}{273+t}}, \quad (2)$$

$$\Delta = 6.1 \times 10^{\frac{7.43t}{273+t}} \times \frac{4683.11}{(273+t)^2}. \quad (3)$$

已知当地的高程及当时的平均气温 t , 即可算出式 (1) 中的 $\frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma}$ 。

R_n 可直接测得, 但一般县级气象站不进行这项观测, 此时通过计算确定。 E_a 亦由计算确定。

(2) 净辐射 R_n 的计算及常产生的错误。净辐射 R_n 用下式计算:

$$R_n = 0.75R_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_K^4 \left(0.56 - 0.079 \sqrt{e_a} \right) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right), \quad (4)$$

式中: R_0 ——大气顶层的太阳辐射, 以所能蒸发的水层深度计 (mm/d), 可根据当地的

纬度及计算的月份从天文表中查得； n ——实际日照时数 (h/d)； N ——最大可能日照时数，亦可按纬度及月份从天文表中查得（参考文献[7,10,11]中列有查 R_n 及 N 的表格）； σT_k^4 ——黑体辐射 (mm/d)，其中 σ 为斯蒂芬-鲍茨曼(Stefan-Boltzman)辐射常数， $\sigma=2 \times 10^{-9}$ (mm/°C⁴·d)， T_k 为绝对温度， $T_k=273+t$ (°C)； e_a ——实际水气压 (hPa)； a 与 b ——计算净辐射的经验系数。

已知纬度、月份、实际日照时数 n 和实际水气压 e_a ，计算 R_n 并不困难，但最易产生的错误是系数 a 与 b 选择不当，这往往是使 R_n 误差较大的主要原因。

联合国粮农组织针对全世界范围推荐了三组 a 、 b 值（表1）^[9]，我国除南方部分地区外，多属于其中第（1）类地带，即 $a=0.18$ ， $b=0.55$ 。在各协作片的研究中，有些省（市、自治区）采用了此表中数值。

表1 联合国粮农组织推荐的 a 、 b 系数

系 数	寒带, 温带	干旱热带	湿润热带
	(1)	(2)	(3)
a	0.18	0.25	0.29
b	0.55	0.45	0.42

我国许多省（市、自治区）的气象、地理部门已根据实测净辐射资料的分析提出了本地的 a 、 b 值，其可靠性较高。例如，湖南省根据长沙气象台1958年以来的实测净辐射成果提出的 a 、 b 值，经各年验算，推算 R_n 的误差均小于5%。根据我国的实测成果， a 、 b 值在各地之间的差异很大，而且同一地点在夏半年（4—9月）与冬半年

（10—3月）之间的差异也很大。例如，长春、银川和南京三地夏半年的 a 、 b 值分别为0.06、0.71、0.28、0.41和0.15、0.54；冬半年分别为0.28、0.44、0.21、0.55和0.10、0.65^[12]。显然，若按表1将三地全采用0.18、0.55，必然引起较大的误差。

由于不同地区、不同季节的 a 与 b 数值是成组提出的， a 大则 b 小，反之亦然，故往往认为选错一组对计算 R_n 或 ET_0 的影响不大。但是，这种看法与事实不符。例如，我们曾分别用表1中第（1）组和第（3）组的 a 、 b 值计算湖北省荆门市5—10月各月的 ET_0 ，成果如表2，二者差异达4.7—15.5%。

表2 不同组 a 、 b 计算的 ET_0 比较（湖北荆门市1974—1985年平均值）

月 份		5	6	7	8	9	10
ET_0 (mm/d)	$a=0.18, b=0.55$	3.52	3.78	5.56	4.41	3.48	3.01
	$a=0.29, b=0.42$	4.02	4.47	5.04	4.82	3.88	3.15
ET_0 的差异 (%)		14.2	15.5	10.5	9.3	11.5	4.7

我国许多地区的 a 、 b 值与表1中第（1）组数值的差异大于该表中第（1）组和第（3）组之间的差异，故盲目选用表1中数值，可能导致15%以上的误差。因此，在计算 R_n 时，应针对不同季节，从气象、地理或其他研究部门取得当地的 a 、 b 值。

（3）干燥力 E_a 的计算及常产生的错误。式（1）中的干燥力 E_a 用以下经验公式计算：

$$E_a = 0.26(1 + Bu_2)(e_a - e_d), \quad (5)$$

式中： u_2 ——地面以上2m处的风速 (m/s)，其他高度处的风速应换算成2m高度处风

速; B ——风速修正系数, 在日平均气温的阶段平均值大于 5°C 且日最高气温阶段平均值与日最低气温阶段平均值之差 (Δt) 大于 12°C 时, $B=0.07\Delta t-0.265$ (Δt 单位为 $^{\circ}\text{C}$), 其余条件下, $B=0.54$.

式 (5) 为风函数 $f(u)$ 与饱和差 Δe 两项之积, 即:

$$\begin{aligned} E_a &= f(u) \cdot \Delta e, \\ f(u) &= 0.26(1.00 + Bu), \\ \Delta e &= e_a - e_a. \end{aligned}$$

彭曼等提出式 (5) 时, $f(u)$ 中的常数与系数的数值是与其计算 Δe 的方法相对应的. 他们取用的饱和差 Δe 是阶段内平均温度下的饱和水气压与阶段内实际水气压平均值之差, 即:

$$\Delta e = e_{a(\bar{t})} - \bar{e}_a, \quad (6)$$

式中: $e_{a(\bar{t})}$ ——阶段内平均温度时饱和水气压 (hPa), 根据阶段内平均气温 t 由式 (2) 算出; \bar{e}_a ——阶段内实际水气压平均值 (hPa).

目前在需水量等值线图协作研究中, 各地计算 Δe 的方法有所不同, 有些地方采用式 (6) 计算, 还有些地方采用以下两式中之一种:

$$\Delta e = e_{a(\bar{t})} - \frac{1}{100} \overline{RH} \cdot e_{a(\bar{t})}, \quad (7)$$

$$\Delta e = \bar{e}_a - \bar{e}_a, \quad (8)$$

式中: \overline{RH} ——阶段内平均相对湿度 (%); \bar{e}_a ——阶段内各次观测气温时饱和水气压的平均值 (hPa).

饱和水气压与气温的非线性关系使不同方法计算出的 Δe 互不相同, 气温越高, 气候越干燥, 差别越大. 彭曼等是根据英国冷凉、潮湿环境下的气象资料求出风函数公式中的常数与系数, 在此条件下, 各种方法算出的 Δe 差别不大; 但对于我国, 许多地方夏季炎热, 有些地方气候干燥, 在这些地方用不同方法计算出的 Δe 差别就较显著. 例如, 按湖北省荆门市气象站 1974—1985 年历年气象资料, 分别用式 (6) 及式 (7) 计算 5—10 月中逐月多年平均 Δe , 结果在 5—7 月式 (6) 计算值比式 (7) 的小 7—9%, 在 8—10 月小 10—21%. 各地计算饱和差的方法不统一, 有些地方采用的计算饱和差方法与所采用风函数中的常数与系数不相适应, 这是当前在我国计算干燥力的主要问题. 因此, 为正确地计算 E_a , 在需水量等值线图的全国协作中, 应采用统一的计算饱和差方法, 它要与所取用风函数中的常数与系数相适应. 若取本文所介绍的风函数中的常数与系数, 则应按式 (6) 计算饱和差; 若用其他方法计算饱和差, 则必须相应地通过分析计算另外确定风函数中的常数与系数.

收集各计算点有关气象资料, 可用式 (1) 及式 (3)—(5) 算出各点各月参照作物需水量 ET_0 . 采用电算, 程序较简单. 要注意的是: 正确选用当地的 a 、 b 系数; 所采用风函数中的常数与系数要与饱和差的计算方法相对应.

2. 实际作物需水量的计算 已知各月的 ET_0 后, 采用“作物系数法”计算实际作物各月的日平均需水量

$$ET = K_c \cdot ET_0, \quad (9)$$

式中: ET ——实际作物需水量 (mm/d); K_c ——作物系数.

在土壤水分充足、作物生长发育正常的丰产条件下, K_c 值不仅随作物而变, 也随

生育阶段(或月份)而变。我国大多数省(市、自治区)设有几个或十几个灌溉试验站,多数站对当地主要灌溉作物积累了5—10年或更长的实测ET资料;根据这些站的气象资料,可算出相应年份各月的ET₀;针对不同作物,按K_c=ET/ET₀关系可反求出各年各月的K_c值,求出多年平均的分月K_c值,最后按本省(市、自治区)自然地理条件及多年平均K_c值的空间变化情况分区确定K_c数值。例如,河南郑州市冬小麦的K_c值如表3^[13],湖北省水稻的K_c值如表4^[8]。

表 3 河南郑州市冬小麦逐月作物系数K_c值

月 份	10	11	12	1	2	3	4	5	6
K _c	0.60	0.90	0.97	0.31	1.04	0.96	1.43	1.33	0.65

表 4 湖北省水稻逐月作物系数K_c值

稻 别	地 区	月 份							
		4	5	6	7	8	9	10	
双季早稻	长江以北	1.00	1.09	1.30	1.20				
	长江以南	1.00	1.32	1.44	1.26				
双季晚稻	长江以北				1.01	1.09	1.26	1.10	
	长江以南				1.09	1.15	1.42	1.33	
中 稻	全 省		1.03	1.35	1.50	1.40	0.94		

根据实测需水量求K_c值时,应注意采用坑测法所测成果(精度高、代表性好);只有筒测法成果时,应将它修正成坑测法的成果。

还须指出,用前面方法计算的各月ET₀,是全月内的日平均值,在计算实际作物需水量时,作物生育期的第一个月份和末月份一般不是全月,此时,应利用“相邻月份之间各月的逐日需水量呈连续渐变(直线变化)”的假定,根据上一个月、本月及下一个月的各月日平均ET₀,用内插法求得本月非全月条件下的ET₀数值。

(二) 需水量等值线图的绘制

用以上方法算出各点(县)的参照作物需水量和实际作物需水量后,可按绘地形等高线的方法绘制各种需水量等值线图。为满足生产实际需要,应绘制的几种等值线图及其功用和绘制方法如下。

第一种:全年各月的日平均参照作物需水量等值线图。该图是绘制其他各种需水量等值线图的基础图纸,反映各月中因气象因素引起的作物需水量的空间变异性。直接按各点ET₀值分月绘制,等值线差值可取0.2mm/d、0.25mm/d、0.4mm/d和0.5mm/d几种,其实例如附图一^[8]。

第二种:各月的日平均作物需水量等值线图。针对具体作物,对其全生育期内各个月份,直接按各点ET值分别绘制,等值线差值与第一种图相同。该图可用于确定各处的灌溉制度;其中,需水高峰月份的等值线图,可用于确定各处的最大灌溉流量,以供设计灌溉系统和进行灌溉水量调配时采用。

第三种：作物全生育期需水量等值线图。该图体现一种作物全生育期总需水量的空间分布情况，对于水利与农业区划、水资源评价、流域规划、地区水利规划以及灌溉多年调节水库的规划起重要作用

各点的作物全生育期需水量 ET_T (mm)用下式计算：

$$ET_T = \sum_{i=1}^m t_i \cdot ET_i \quad (10)$$

式中： t_i ——作物生育期处在第*i*月的天数； ET_i ——第*i*月的实际作物需水量(mm/d)； m ——作物全生育期经历的月份数目。

图中等值线差值可采用10mm、20mm、25mm和50mm几种，其实例如附图二。

第四种：作物全生育期日平均需水量等值线图。将各点某作物的 ET_T 除以当地该作物全生育期天数，得其全生育期日平均需水量，据此作图。等值线差值与第一种图相同。该图的用途与第三种图相同，但采用日平均值可以消除由于各点的作物全生育期天数不同带来的影响，反映的需水量空间变化规律比第三种图真实。

以上第一种等值线图可以进行全国拼图；其余三种等值线图，对于任何一种作物，均牵涉到作物全生育期长短和所处日期的问题，宜在邻近省(市、自治区)之间分片拼图。

根据需水量等值线图应符合的第二个基本条件，每一种等值线图应包括以下两类。

第一类：多年平均等值线图。根据各种气象资料的多年平均值算出多年平均的 ET_T 和 ET ，而后绘制这类等值线图。该图是体现需水量空间变化规律和绘制其他类需水量等值线图的基础，应首先绘制。

第二类：典型水文年份等值线图。该图便于在灌溉工程的规划、设计和管理中应用。其中，干旱年和中早年的等值线图实用价值最大。这类图的绘制方法是：选择代表站(点)，划分各代表站(点)的代表范围(片)，计算各代表站(点)历年的 ET_0 ，据此用频率分析法求出各片中 ET_0 的离差系数(C_v)和偏差系数(C_s)，再根据各点上各种需水量的多年平均值，算出各点规定频率(典型年)的各种需水量，从而绘出典型年需水量等值线图。

三、作物需水量等值线图的应用

作物需水量等值线图除了作为农业、灌溉规划中的基本资料而外，还可在以下两方面进一步利用，以发挥其更广泛的作用。

(一) 绘制作物净灌溉定额等值线图

根据农田水量平衡原理，作物净灌溉定额 M (mm)用下式计算：

$$\text{对于旱作物} \quad M = ET_T - P_0 - K, \quad (11)$$

$$\text{对于水稻} \quad M = ET_T - P_0 + F + M_e, \quad (12)$$

式中： P_0 ——作物全生育期有效降水量； K ——旱作物全生育期地下水补给量； F ——水稻田全生育期渗漏量； M_e ——水稻泡田定额。各项单位均为mm。

对于旱作物，有效降水量 P_0 为保持在作物根系吸水层中供蒸发蒸腾的降水量，即降水量减去径流量再减深层渗漏量，其值与一次降雨量、降雨强度、降雨延续时间、土

壤性质、作物种类和生育阶段以及田面条件(坡度,翻耕、平整情况)等有关,由灌溉试验站分析灌溉制度试验中的农田水量平衡资料确定。一般,一次降雨量小于50mm时,有效降水量为降雨量的80—100%,大于50mm时,为降雨量的70—80%或更低^[14]。

对于水稻, P_0 为能保存于稻田中的雨量,与降雨量、降雨强度、降雨历时及稻田的灌水与耗水条件有关,由灌溉试验站分析稻田水量平衡因素观测资料确定。例如,广东省根据全省23个灌溉试验站实测资料并结合推理计算方法,针对省内不同地区、不同稻类,概化成旬降雨量与旬有效降雨量关系曲线,现作为实例,引出其中一种,如图1^[15]。

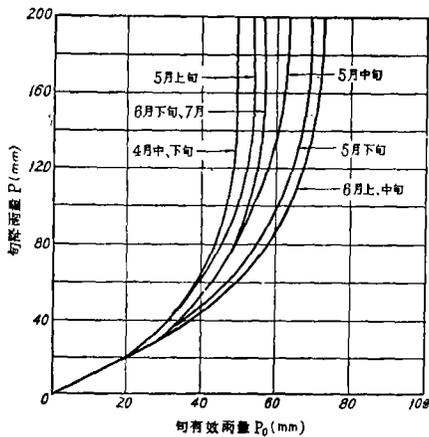


图1 粤北地区双季早稻降雨量与有效降雨量关系曲线

旱作地下水补给量 K 与土质、地下水埋深以及作物种类和生育阶段有关,我国北方一些试验站具有这方面的实测成果,可以取用。例如,根据河南省人民胜利渠灌溉试验站(河南新乡市,土质为轻壤土、中壤土的黄潮土)观测成果^[16],算出不同条件下地下水补给量占需水量的百分比如表5;又如,据内蒙古巴盟沙壕渠试验站观测^[17],在地下水埋深为0.5—3.0m范围内,相同地下水埋深条件下,粘土的地下水补给量只占沙壤土的12—30%,平均为23%。

必须指出,在轻度盐渍化威胁的地区,应根据地下水埋深在临界深度以下的要求来考虑地下水补给量;在盐渍化威胁严重的地区,不应考虑地下水补给量。

表5 河南省人民胜利渠试验站地下水补给量占作物需水量的百分比

作物	地下水埋深 (m)			
	0.7—1.0	1.1—1.5	1.6—2.0	2.1—2.5
冬小麦	56—40	40—24	24—11	11—0
棉花	66—54	54—26	26—7	7—4
玉米	23—18	18—11	11—8	8—6

为确定灌溉定额所采用的稻田渗漏量 F , 仅为垂直渗漏部分(水平渗漏系各田之间的旁渗及沟边田的入沟旁渗;在大面积区内,各田水平渗漏量的大部分相互抵消,可忽略不计),其量与土质、地下水埋深以及稻田灌水方式和淹水深度有关,绝大多数水稻灌溉试验站都可提出渗漏量的试验数据。例如,根据我们对南方一些试验站实测稻田渗漏量资料的统计分析,在浅灌条件下,水稻全生育期日平均渗漏量范围如表6^[18]。

水稻泡田定额 M 与土质、地下水埋深、稻类、泡田方法、泡田前土壤含水率以及泡田期的气象条件(降雨、蒸发)等有关,可根据试验站的实测与调查成果确定,一般,对于沙壤土和壤土为80—150mm,粘土为60—100mm。

表 6 浅灌稻田全生育期日平均垂直渗漏量范围 (mm/d)

土 壤	地 下 水 埋 深 (m)				
	0.1—0.5	0.6—1.0	1.1—1.5	1.6—2.0	2.1—3.0
粘 土	0.1—0.4	0.5—0.8	0.8—1.2	1.2—1.5	1.5—2.5
粘 壤 土	0.2—0.9	0.9—1.4	1.4—2.0	2.0—2.5	2.5—4.0
壤 土	0.5—1.5	1.5—2.6	2.6—3.8	3.8—4.9	4.9—7.0
沙 壤 土	1.8—3.3	3.3—6.3	6.3—9.3	9.3—12.3	12.3—16.5

取得各地的 P_0 、 K 、 F 和 M_c 资料后,可以根据作物全生育期需水量(ET_r)等值线图绘制成净灌溉定额(M)等值线图.但须指出,在采用“冲洗、排水”方法改良盐渍化土壤的地区,净灌溉定额等值线图上的数值加上冲洗定额,才是农田净用水定额.

净灌溉定额等值线图可以针对各种作物绘制;也可根据各地作物种植比例求出综合灌溉定额,绘制出全年净综合灌溉定额等值线图.这些图反映各种净灌溉定额的空间变化规律,可供灌溉区划以及灌溉系统的规划、设计和用水管理直接采用,比作物需水量等值线图的实用价值更大.例如,河南省依据本省主要灌溉作物(冬小麦)全生育期需水量等值线图制成了净灌溉定额等值线图^[18];根据冬小麦净灌溉定额等值线图并参考本省农业、土壤和气象区划的成果,将全省进行了灌溉区划,划分为四个灌溉区;对照区划图及各种典型年份的净灌溉定额等值线图,可知各区在不同水文年份的净灌溉定额.

(二) 分析研究作物需水量在时间和空间两方面的综合变化规律

综合运用各个月份的参照作物需水量等值线图,可以分析研究作物需水量在时、空两方面的综合变化规律,这对指导抗旱、灌溉和调整作物布局都有实用意义.

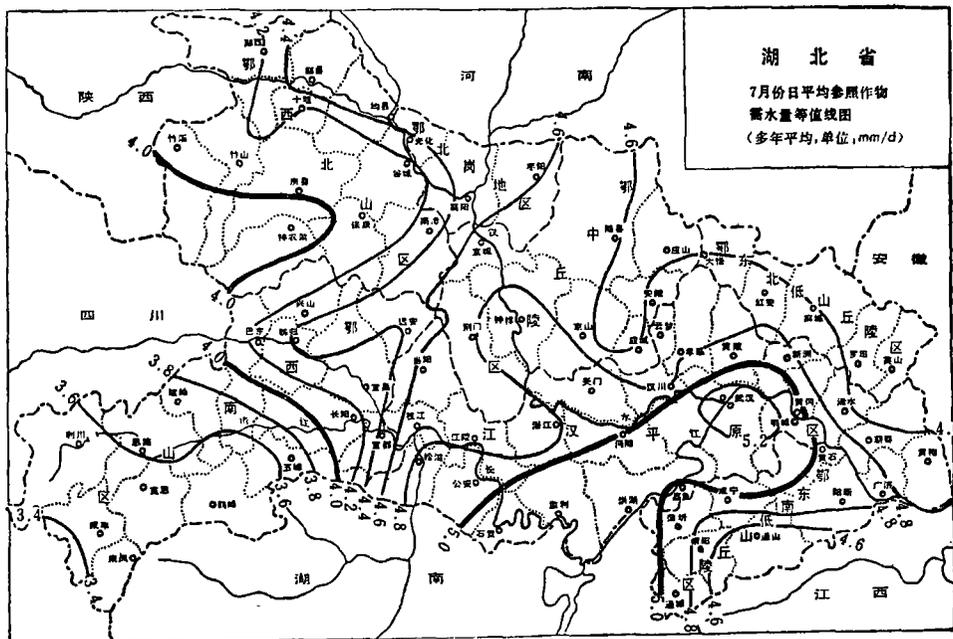
例如,我们综合分析湖北省全年12个月的多年平均 ET_0 等值线图^[9],探明了该省干旱中心(ET_0 最高区域,当地称“旱包子”)的时空变化规律.比较12个月的图可知,在冬春(12月—6月),全省的干旱中心在鄂北的枣阳、襄阳、随州和鄂中的钟祥、荆门一带(见图2中a),约占全省面积1/8,历时长;至夏季(7—8月),干旱中心向东南转移,范围缩小到原来的1/3左右,集中在武汉、鄂城一带(图2中b);到秋季(9—11月),此中心向西偏北的方向回移,范围未扩大,集中在荆门、钟祥一带(图2中c);到冬春,恢复到原来情况.探明此干旱中心的时、空变化规律,不仅有助于了解各季节的严重干旱地区以指导抗旱工作的部署,还有利于指导农业的合理布



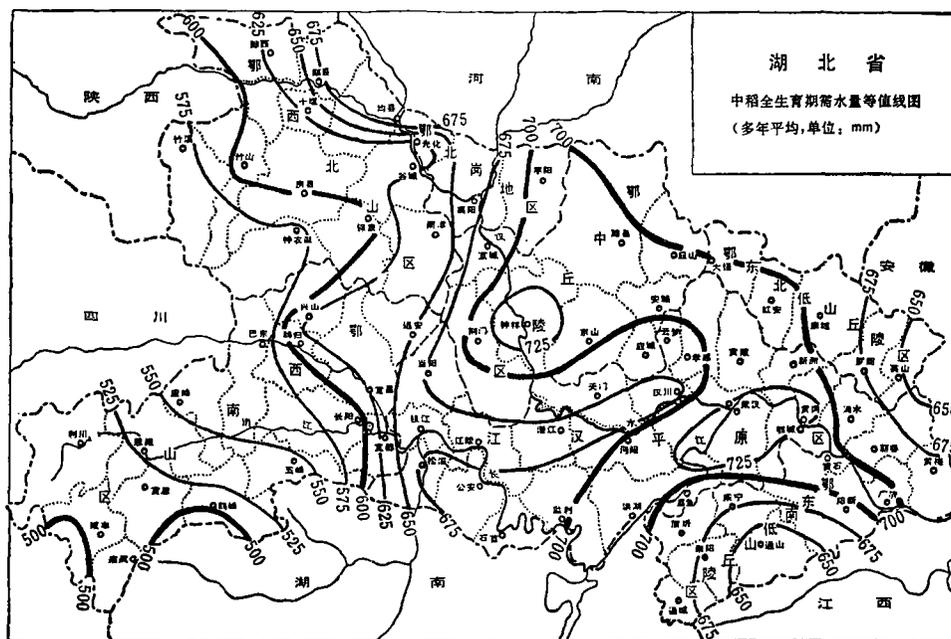
图 2 湖北省不同时期气候干旱中心(ET_0 最大)位置

局。例如，据上述规律，湖北省干旱中心在双季早稻的全生育期内正处于鄂北以及鄂中的荆门、钟祥一带，故在这个区域种双季稻，除热量（气温）因素不利外，水分因素也十分不利，应改为其他种植制度，当前，该区域正逐步将双季稻改掉。

进一步应用作物需水量等值线图，除上述两个主要方面以外，其他尚有许多方面，本文不再赘述。



附图一



附图二

参 考 文 献

- [1] Letey, J., Vaux, H.J., Water dutties for California agriculture. Sacramento, U.S.A., 1985.
- [2] Pruitt, W.O., Elias Fereres, Kaita, K., Richard Snyder, Reference evapotranspiration (ET₀) for California. Sacramento, U.S.A., 1984.
- [3] 宫本硬一、日野羲一, 根据气候系数进行水田蒸发蒸腾量的区划.李永生译, 农田水利与小水电, 1983年第5期.
- [4] 黄荣翰、丁冰洁、蔡林根, 作物需水量估算方法简介及黄淮海平原几种主要作物需水量初估.水利水电科学研究院, 1980年12月.
- [5] 茆智, 水稻需水量的计算.农田水利与小水电, 1981年第4期.
- [6] 茆智, 作物需水量计算原理及方法.武汉水利电力学院, 1986年.
- [7] 联合国粮农组织, 作物需水量预报指南.罗马, 1977年.
- [8] 湖北省水利厅、武汉水利电力学院, 湖北省参考作物需水量及水稻需水量等值线图研究.1986年.
- [9] 联合国粮农组织, 农业气象监测与作物收成预报.罗马,1979年.
- [10] 郭国双, 如何应用彭曼公式计算作物需水量.水利电力部农田灌溉研究所, 1983年.
- [11] Jensen, M.E., 耗水量与灌溉需水量.熊运章、林性粹译, 农业出版社, 1982年.
- [12] 肖俊夫, 我国北方地区计算辐射经验公式中 a 、 b 值的使用意见.水利电力部农田灌溉研究所, 1985年.
- [13] 河南省水利科学研究所、水利电力部农田灌溉研究所, 河南省冬小麦需水量等值线图研究及灌溉分区评价.1985年.
- [14] 武汉水利电力学院郭元裕主编, 农田水利学.水利电力出版社, 1986年.
- [15] 广东省水利电力厅工程管理处, 灌溉计划用水.1964年.
- [16] 牛立峰、刘好智主编, 人民胜利渠引黄灌溉三十年.水利电力出版社, 1987年.
- [17] 内蒙古水利科学研究所, 科学成果摘要汇编.1987年.
- [18] Mao Zhi, Study of field water requirement of rice in China.Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1984.

Principle, charting method and application of the isoline maps of crop evapotranspiration

Mao Zhi Li Yuanhua

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering)

Abstract

In this paper four kinds of isoline maps are presented, (1) the daily average reference evapotranspiration (ET_0) for each month in the year, (2) the daily average crop evapotranspiration (ET) for each month in the growing season, (3) the total ET in the growing season and (4) the daily average ET in the growing season. The theoretical basis, functions and charting methods of the four kinds of maps are discussed.

A method of using "Modified Penman Equation" and "Crop Coefficient" to calculate ET is suggested. The reasons for the occurrence of errors in calculating the net radiation R_n and the aerodynamic term E_a for estimating ET_0 are analysed.

Finally, the method for making isoline map of net irrigation water requirement using the isoline map of ET is presented. A case study of the application of isoline maps of ET to analyse the variation of ET both in space and time is introduced.

本 刊 启 事

1. 本刊1988年的征订工作已经开始, 国内读者请向当地邮局订阅, 国内刊号: 2-183, 每册定价1.00元. 如有漏订者, 请向本刊编辑室邮购. 国外读者请向中国国际图书贸易总公司订阅, 国外刊号: M216, 可跨年度订阅.

2. 本刊自1980年复刊以来, 每期均加印了一部分供邮购. 除1980年有的期售缺外, 其他各期尚有少量库存, 读者如有需要, 请与本刊编辑室联系邮购.

中国水利学会《水利学报》编辑室