

耗水量与 灌溉需水量

[美]马文.E.詹森编

农业出版社

耗水量与灌溉需水量

〔美〕马文·E·詹森 编

熊运章 林性料 译

许国华 张君常 亢树森 校

农业出版社

封面设计 董一沙

S27
1312

CONSUMPTIVE USE OF WATER AND
IRRIGATION WATER REQUIREMENTS

A report prepared by the Technical Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers

Edited by Marvin E. Jensen

American Society of Civil Engineers

New York

1973

耗水量与灌溉需水量

[美] 马文·E·詹森 编

熊运章 林性粹 译

许国华 张君常 亢树森 校

农业出版社出版 (北京朝内大街 130 号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092 毫米 32 开本 7.125 印张 160 千字

1982 年 10 月第 1 版 1982 年 10 月北京第 1 次印刷

印数 1—4,400 册

统一书号 16144·2522 定价 0.75 元

参与本书工作的人员

布兰尼(Harry F. Blaney) 顾问工程师

布拉奇里(Ronald K. Blatchley) 顾问水利工程师, 布拉奇里协会

伯曼(Robert D. Burman) 怀俄明大学农业工程系教授

柯林斯(Harlan G. Collins) 美国农业部土壤保持局土木工程师

克里德尔(Wayne D. Criddle) 克莱德一克里德尔一伍德瓦尔德公司

吉布斯(Albert E. Gibbs) 美国垦殖局水力工程师

豪斯顿(Clyde E. Houston) 联合国粮农组织土地水利分部水源与开发处主任

詹克斯(James S. Jenks) 里兹、希尔与解威特公司顾问工程师

詹森(Marvin E. Jensen) 美国农业部农业科学研究局农业工程师

约翰逊(Arnold I. Johnson) 美国地质调查局水资料协调处助理主任

芒森(Wendell C. Munson) (已逝世, 原在美国垦殖局)

尼克松(Paul R. Nixon) 美国农业局农业科学研究局农业工程师

普鲁伊特(William O. Pruitt) 加利福尼亚大学水科学与工程系灌溉工程师

香农(John W. Shannon) 顾问 (原在加利福尼亚水资源部)

前 言

本报告是经过多年筹划、而其组织和内容又经过一系列的修订才编成的。最后的编辑方针不仅要求报告汇编全部估算耗水量或蒸发蒸腾量的一般方法，而且还要有充分的材料使从事实际工作的工程师能够评价不同来源的蒸发蒸腾量资料。此外，还应该提供充分的背景材料，使得从事实际工作的工程师、教师和研究人員能够进一步改善估测方法以满足对蒸发蒸腾量资料的专门要求。

第一章中耗水量的基本材料是由老布兰尼(H.F.Blaney, Sr.)准备的。布兰尼和克里德尔(W.D.Criddle)还准备了第八章的初稿,它在后来又由布拉奇里予以发展。净辐射及太阳辐射的回归系数是由尼克松编辑的。伯曼编辑了所测定的蒸发蒸腾量和气候资料,进行了计算以评价16种估算方法,并准备了第七章的大部分(伯曼博士在休假期间曾离开怀俄明大学到爱达荷州金伯利地方的斯内克河水土保持研究中心工作了一年)。第二章到第六章的大部分取自詹森为科罗拉多大学毕业生讲授灌溉需水量时(1972年夏天)所准备的讲稿。关于从蒸发量资料估算潜在蒸发蒸腾量部分是普鲁伊特准备的,它是根据普鲁伊特1972—1973年在罗马为粮农组织所作的研究为基础的。至于参与过本手册审阅和讨论的人则很多,难以尽述。

希望本报告的第一版能为在水资源管理方面工作的工程

师们使用的更丰富、更完整的参考手册提供一个基础。在只有局部作物覆盖时，为修正估算值需要做大量的补充工作。为修正由天然植被和流域得到的蒸发蒸腾估算值，也需要作些工作。

美国土木工程师学会灌溉需水

量委员会主席马文·E·詹森

1973年9月

书中经常使用的符号*¹

符号	说 明	常用单位* ²
A	来自空气的热通量密度 (Heat Flux density from the air)	卡/(厘米 ² ·日)
C	盐分浓度 (Concentration of salts)	— — —
Cet	蒸发皿系数 (Evaporation pan coefficient)	— — —
D	扩散度 (Diffusivity)	1/(厘米 ² ·日)
D	干湿球温度差 (Wet-bulb depression)	°C
E	效率 (Efficiency)	— — —
E	潜热通量密度 (Latent heat flux density)	卡/(厘米 ² ·日)
E	蒸发量, 深度率 (Evaporation, depth rate)	毫米/日
E _p	潜在蒸发量 (Potential evaporation)	卡/(厘米 ² ·日)
E*	蒸发量, 质量通量密度 (Evaporation, mass flux density)	克/(厘米 ² ·日)
E _l	淋洗效率 (Leaching efficiency)	— — —
E _t	蒸发蒸腾率 (Evapotranspiration rate)	毫米/日
E _{l,p}	灌水良好的苜蓿参考作物的 E _l 或潜热通量密度 (E _t from a well-watered alfalfa reference crop, or latent heat flux density)	毫米/日 卡/(厘米 ² ·日)
[X]	变量 X 的预期值 (Expected value of variable X)	同 X
G	来自地面的热通量密度 (Heat flux density from ground)	卡/(厘米 ² ·日)

(续)

符号	说 明	常用单位*2
H	水头 (Hydraulic head)	厘米
K	涡流传递系数 (Eddy transfer coefficients) 对于动量为 K_m , 对于热为 K_n , 对于水汽为 K_v	厘米 ² /秒
K _c	作物系数 (Crop coefficient) (与布兰尼-克里德尔K值不同)	---
K _{co}	作物系数, 在土壤水分不是限制因素时 (Crop coefficient, water not limiting)	---
P	大气压 (Atmospheric Pressure)	毫巴 (mb)
R	通用气体常数 (Universal gas constant)	尔格/(度·模)
R	辐射量 (Radiation)	卡/(厘米 ² ·日)
R _A	大气顶太阳辐射 (Extraterrestrial solar radiation)	卡/(厘米 ² ·日)
R _e	有效降雨量 (Effective rainfall)	毫米
R _n	净辐射量 (Net radiation)	卡/(厘米 ² ·日)
R _s	太阳辐射量 (Solar radiation)	卡/(厘米 ² ·日)
R _{so}	无云日太阳辐射量 (Solar radiation on a cloudless day)	卡/(厘米 ² ·日)
R _b	净出射长波辐射量 (Net outgoing long-wave radiation)	卡/(厘米 ² ·日)
R _{bo}	无云日净出射长波辐射量 (Net outgoing longwave radiation on a cloudless day)	卡/(厘米 ² ·日)
RMS	均方根 (Root mean square)	同主要变值
S	潜在日照系数 (Fraction of possible sunlight)	---

(续)

符号	说 明	常用单位 ²¹
S	距离(Distance)	厘米
T	温度(Temperature)	°C, °K, °F
T _d	露点温度(Dewpoint temperature)	°C, °F
T _w	湿球温度(Wetbulb temperature)	°C, °F
V	体积, 容积(Volume)	厘米 ³ , 分米 ³ , 米 ³
$\bar{V}$	偏克分子容积(Partial molal volume)	厘米 ³ /克分子
W	水量(Quantity of water)(淋洗水量, W _l), (E _l , W _{el}), (灌溉水量 W _i), (排出水量 W _d), (土壤中水量 W _s)	毫米, 厘米
W _r	灌溉需水量(Irrigation water requirement)	毫米, 厘米
a, b	常数(Constants)	(见用途)
C _p	恒压时的比热(Specific heat at constant pressure)	卡/(克·C)
d	零平面位移(Zero Plane displacement)	厘米
d _a	水汽压差(Vapor pressure deficit) $d_a = e^{\circ} - e$	毫巴(mb)
d _l	昼长(Day length)	小时
e	水汽压(Water vapor pressure)	毫巴
e [°]	饱和水汽压(Saturation vapor pressure)	毫巴
e _w	湿球温度时的饱和水汽压(Saturation vapor pressure at wetbulb temperature)	毫巴
g	克(Gram)	克
g	重力加速度(Acceleration of gravity)	厘米/秒 ²
h	压力水头(Water pressure head)	厘米
h	热传递系数, h _n , 和水汽传递系数 h _v (Transfer coefficient for heat,	厘米/秒

(续)

符号	说 明	常用单位*2
	h_h , and vapor h_v)	
k	冯·卡尔曼常数 (von Kármán's constant)	---
m	质量 (Mass) m_v (对于水汽), m_a (对于干燥空气)	克/厘米 ³ , 千克/米 ³
q	比湿 (Specific humidity)	---
r	混合比 (Mixing ratio)	---
r_a	空气层的扩散阻力 (Diffusion resistance of air layer,) $r_a = 1/h$	秒/厘米
r_i	内扩散阻力 (Internal diffusion resistance)	秒/厘米
t	时间 (Time)	日, 分, 秒
u_z	Z高度的水平风速 (Horizontal wind speed at height Z)	千米/日, 千米/小时
V	平均流量 (Average flow), $V = Q/A$	厘米/日, 毫米/日
W	土壤重量含水量 (Soil water content on a mass basis)	---
Z	高程 (Elevation)	厘米
Z_0	糙度长度 (roughness length)	厘米
δ	差值 (Difference)	(见用途)
Δ	饱和水汽压—温度曲线的斜率, de/dT (Slope of the saturation vapor pressure-temperature curve)	毫巴/°C
ψ	水势 (Water potential)	巴
α	短波反射系数 (Shortwave reflectance coefficient) 或者 反射率 (albedo)	---
β	包文比 (Bowen ratio,) $\beta = A/E$	---
γ	干湿表常数 (Psychrometric constant,)	毫巴/°C

(续)

符号	说 明	常用单位 ^{*2}
	$\tau = C_p P / 0.622 \lambda$	
ϵ	比辐射率 (Emissivity) $\epsilon' =$ 净比辐射率 (net emissivity)	— — —
λ	水的汽化热 (Latent heat of vaporization)	卡/克
λ_s	土壤导热率 (Thermal conductivity of soil)	卡/(厘米·t·c)
θ	土壤容积含水量 (Volumetric soil water content)	— — —
π	渗透势 (Osmotic potential)	巴
π	圆周率(pi)	
ρ	空气密度(Air density) ρ_w (水密度), ρ_b (土壤容重), ρ_y (绝对湿度密度)	克/厘米 ³ , 克/米 ³
σ	斯蒂芬—波尔兹曼常数 (Stefan-Boltzmann constant)	卡/(厘米 ² ·日·K ⁴)
σ	表面张力 (Surface tension)	克/秒 ²
μ	化学势 (Chemical potential)	尔格/克分子

主要下角注:

- a 空气性状
- o 大气—表面界面性状, 或参考值
- s 土壤性状
- v 植物或水汽性状
- w 水分性状
- z 高度 Z 处的性状
- i 内界面(internal interface)的性状
- 1.2 参考时间
- o 饱和

*1 经验公式的符号在文中解释

*2 其它单位在文中另有说明

目 录

前言

书中经常使用的符号

第一章 绪论	1
1.1 目的与范围	2
1.2 耗水量—历史背景 (美国)	3
1.3 蒸发蒸腾量与灌溉需水量—历史背景 (美国)	5
第二章 土壤—植物—大气系统	8
2.1 绪论	8
2.2 水和水汽的物理性状	9
2.3 大气中水汽的表示	11
2.4 标准大气 (低层大气)	13
2.5 土—水系统	13
2.6 土壤水分的能量状态	14
2.7 土—水特征曲线	16
2.8 植物中的水势	16
2.9 渗透压	17
2.10 土壤中水的流动	17
2.11 植物中水的流动	20
第三章 能量平衡与水量平衡	23
3.1 热能平衡	23
3.2 显热与潜热	32
3.3 水量平衡	37

第四章	蒸发蒸腾量与潜在蒸发蒸腾量	39
4.1	一般蒸发公式	39
4.2	潜在蒸发量	43
4.3	潜在蒸发蒸腾量	43
4.4	蒸发蒸腾量与潜在蒸发蒸腾量之比	46
4.5	影响蒸发蒸腾量的因素	48
第五章	工程对蒸发蒸腾资料的要求	55
5.1	生长季蒸发蒸腾量	55
5.2	年蒸发蒸腾量	56
5.3	淋洗需水量	57
5.4	其他需水量	60
5.5	净灌溉需水量	62
5.6	对灌水不均的补加水量	62
5.7	贮水和配水系统的损失与渗漏	64
5.8	灌溉效率	65
5.9	系统容量	66
第六章	蒸发蒸腾量资料的来源	72
6.1	测定和计算蒸发蒸腾量的方法	72
6.2	潜在蒸发蒸腾量的估算和预测	76
6.3	蒸发蒸腾量的估算	101
6.4	计算举例	104
6.5	观测所得生长季蒸发蒸腾量	124
第七章	估算方法的评价	133
7.1	为评价挑选的估算方法	133
7.2	为评价挑选的地点和资料	136
7.3	气候参数的计算	140
7.4	以苜蓿和草的 E_t 测定值估算潜在 E_t 值	145
7.5	蒸发蒸腾量的估算值	145
7.6	用估算法比较估算值与测定值	162

7.7	各地点的蒸发蒸腾量估算值	172
7.8	估算潜在 E_t 的方法的选择	181
第八章	资料的应用	183
8.1	绪论	183
8.2	灌区规划	185
8.3	计划灌溉	188
8.4	摘要	188
附录		189
A.	换算表及气象因素表	189
B.	术语	208

第一章 绪 论

耗水量或称蒸发蒸腾量，是水以降水形式落到地面起直至到达海洋或回到大气中为止的水文循环的重要因素之一。耗水量这个问题包括地面和水面的水分蒸发量和植物的蒸腾量，现在已成为日益重要的课题，特别是在世界上干旱和半干旱的灌溉地区。

在计划和实施水源开发时必须有耗水量方面的知识。这涉及到地面水和地下水的补给问题、水利管理问题以及灌溉、发电、航运、防洪和市政用水、工业用水等多目标水利工程的经济问题。

耗水量是涉及不同城市、不同河谷平原、不同州乃至不同国家人民利益的主要河道系统在谈判水权合同或条约以及为此进行的诉讼和判决时的重要因素。

耗水量资料对于估算灌溉需水量是不可缺少的，对于估算市政和工业需水量、降雨量分配、地下水集流区的安全出水量、山地分水岭产水量和河流流域内河水流量的耗用量等也都是有用的。

常常要求工程师在有限时期内对河流流域内过去、现在和将来的耗水量和灌溉需水量以及流量耗用量作出可能的估算。在任何大面积上要对各种物理的和气候的条件下的耗水量作实际测定都是既费时间又花钱很多的。因此，在没有现成的耗水量测定资料可供利用的地方，工程师和水文学家就

要有个快速可靠的方法来估算耗水量。

根据工程师和其他科学家的研究成果，现在已经提出了一些耗水量与气候资料相关的公式。根据这些公式就可以把某处观测所得的耗水量资料转用于只有气候记录、另无或只有很少其它资料的地方。

1.1 目的与范围

这本关于耗水量和灌溉需水量的报告的目的在于：

1. 定义并解释耗水量术语。
2. 向工程师、教师和研究人員提供控制蒸发蒸腾量因素的简明总结。
3. 介绍测定和估算蒸发蒸腾量的方法。
4. 说明一些在为农场、灌区和流域确定灌溉需水量时必须加以考虑的因素。
5. 总结由水浇地作物和天然植被上测定的有代表性的蒸发蒸腾量。
6. 评价不同气候状况下各种估算方法的精确程度。
7. 介绍改进估算蒸发蒸腾量的方法。
8. 介绍一些经过挑选的文献以供进一步参考。
9. 为工程师、水文工作者和这方面的其他人员提供一种工具。

本报告是为从事实际工作的工程师而写的一个总结，包括：水分性状；土壤—植物—大气系统；能量平衡与蒸发蒸腾；蒸发及蒸发蒸腾理论；工程对蒸发蒸腾量资料的要求；蒸发蒸腾量资料的来源；对各种估算蒸发蒸腾量方法的评价；以及蒸发蒸腾量资料的利用等。由于最近在估算方法方面有很大进

展，而新的文献又多得不得了，因此对于不从事这方面专门工作的工程师来说，要他们去评价可以利用的蒸发蒸腾量资料 and 挑选在解决某个特定的水文学、灌溉或供水问题上最合适的方法，那是不切实际的。

1.2 耗水量—历史背景（美国）

虽然蒸发和蒸腾问题已经研究了两百多年，但是在1900年以前可能还没有用“耗水量”一词来表示过水的消耗量。

在本世纪的最初二十年里用土壤取样技术做了大量的小区试验和野外研究，那主要是用来测定生长季“耗水量”的（Widstoe, 1912; Harris, 1920; Lewis, 1919; Hemphill, 1922; 及 Israelsen and Winsor, 1922）。美国土木工程师学会灌溉分部灌溉定额委员会在1927年编制过一份生长季耗水量的出色总结，后来就出版了（Anonymous, 1930）。

灌溉定额委员会为农场、灌区和流域的耗水量提出了一些定义。它还对以前做的大河流域的耗水量估算做了回顾，并引用了24篇已出版或未出版的讨论净需水量和耗水量的文献。该委员会所作的定义之一是：耗水量的基本含义——这里耗水量“U”被定义为作物所吸收和蒸腾掉的或直接用于构成植物组织的以及从作物生长地上蒸发掉的水量，以每年每英亩作物地的英尺数表示。

1930年加利福尼亚州出版的一份“降雨渗漏量与耗水量”的报告中，耗水量被定义为：“在给定面积上因植物生长而用于蒸腾或构成植物组织以及从地面蒸发掉的水量总和。”（Blaney 等人，1930）。

1934年，美国地球物理联合会水文学分部的吸收与蒸腾