

烟草需水规律研究进展

段淑辉¹, 杨亿军², 刘建利³, 王刚³, 龙怀玉^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 湖南中烟工业有限责任公司, 长沙 410014;
3. 中国烟叶公司, 北京 100055)

摘要: 烟草生长与水分关系以及灌溉调控技术是目前烟草需水方面的研究重点, 为烟草生产灌溉提供了重要的理论基础。从烟草需水研究方法、影响因素、不同生育期需水动态规律等方面综述了国内外烟草需水规律研究进展, 并展望了今后一定时期的研究方向, 指出应探索新研究方法, 进行不同生态类型大田实际情况下烟草需水规律研究, 提高我国烟叶的产量和质量。

关键词: 烟草; 需水量; 生育期; 土壤含水量

中图分类号: S572.07

文章编号: 1007-5119 (2012) 04-0099-07

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5119.2012.04.021

Advance in Water Requirement of Tobacco

DUAN Shuhui¹, YANG Yijun², LIU Jianli³, WANG Gang³, LONG Huaiyu^{1*}

(1. Agricultural Resources and Regional Planning Institute of CAAS, Beijing 100081, China; 2. China Tobacco Hunan Industrial Co., Ltd., Changsha 410014, China; 3. China Leaf Tobacco Corporation, Beijing 100055, China)

Abstract: Tobacco-water relationship and the irrigation regulation are the research hot spot on tobacco water requirement as the theory basis for tobacco production and reasonable irrigation. This study summarized advance in tobacco-water relationship, including main theories and methods for estimating water requirement, influencing factors, water requirement characters in different growth stages, and water stress in tobacco. Finally, future research for tobacco-water relationship was proposed. More research at different ecotype under field condition should be made on the water requirement characters in tobacco, and new methods should be introduced to this area for increasing tobacco yield and quality.

Keywords: tobacco; water requirement; growth stage; soil moisture content

烟草是我国重要的经济作物, 种植面积和烟叶产量居世界第一^[1]。水分是影响烟叶生长发育和烟叶质量的重要生态因素之一, 能有效调控烟叶产量和质量^[2-5]。水分不足或过多都将严重影响烟叶的生长发育和产质量, 灌水时期不当也会降低烟叶的产量品质, 甚至会加重烟草病害的发生^[6-7]。烟草是一种需水量较多的作物, 整个生育期需水约为 400 ~ 600 mm^[8], 而我国水资源相对短缺, 各产烟地区水资源时空分布严重不均。只有根据烟草的需水规律合理灌水, 才能提高水分利用效率, 获得烟叶优质适产。20 世纪 80 年代以来, 国内外对烟草需水特征进行了较多的研究, 笔者在收集一定数量代表性

文献的基础上, 综述了国内外烟草需水规律研究进展, 以期辨明今后一定时期内的研究重点。

在田间研究、考察作物水分关系时, 经常要用到两个基本概念: 田间耗水量、作物需水量。需水量指的是植株蒸腾、棵间蒸发及组成植物体的水量 (一般小于总蒸腾量的 0.2%) 之和, 而田间耗水量一般指烟株蒸腾、棵间蒸发和深层渗漏所消耗的水分。可见, 需水量和耗水量是内涵不完全相同的概念, 一般情况下耗水量大于需水量。尽管在田间烟草水分关系研究中时而用耗水量的概念、时而用需水量的概念, 然而烟草是旱田作物, 烟田深层渗漏的水分往往可以忽略不计, 目前烟田水分绝大多数

相关文献忽略了深层渗漏和地下水上升补给量,其研究得到的耗水规律实质上 and 需水规律几乎相等。因此,笔者统一采用需水量概念对烟田水分关系进行综述。

1 烟草需水量的研究方法

1.1 烟草需水量的测定方法

作物需水量测定方法主要有水量平衡法、水分运动通量法、蒸渗仪法、叶片称重法、涡度相关法、气孔计法、风室法、同位素示踪法等^[9-11],其中在烟草需水量方面较多采用的方法主要有水量平衡法^[12-15]、蒸渗仪法^[16-19]及叶片称重法等^[20]。水量平衡法通过计算区域内水量的收入支出差额来推算蒸散量,是农田蒸散中应用最普遍的方法^[21-24]。蔡寒玉、汪耀富等运用这种方法研究了大田烟草需水规律。然而水量平衡法取样频繁,误差大,且测定周期长,不能用于小时段研究。蒸渗仪(lysimeter)是顶部与土壤表面齐平的盛土容器,容器内装有近似原状土的土壤,通过对蒸渗仪的称量计算得出盛土容器内给定时间段内的质量变化,结合来水量和排水量,便可计算得到蒸散量。高华军等^[8]、陈佳勃^[18]运用蒸渗仪法研究了烟草需水规律。现在普遍认为蒸渗仪测量的结果较精确,可以作为其他方法的矫正^[25-28],但蒸渗仪阻断了根系与深层土壤水分的联系,且其成本昂贵,难以广泛应用。叶片称重法,是用快速天平在田间防风罩内进行,从作物中部摘取叶片,称质量后悬挂于2 m高处,间隔2 min再称质量,单位鲜叶的失水量即蒸腾速率,其优点是操作简单,适用于测定蒸腾量,尤其是在地形复杂,孤立小块等特殊情况下^[9]。李正风等运用此方法进行了烟草需水研究,但叶片称重法改变了植物的生理状况,而且由一块叶片的测定换算出整个植株及烟草的整体需水量时,必然存在许多难以确定的系统误差,影响测量准确度。

1.2 烟草需水量的估算方法

实测方法是获取作物需水量的可靠途径,但是计算模型的建立有助于需水量资料在空间上的插

补和时间上的延长,因此运用模型计算也是在世界范围被广泛采用一种确定作物需水量的方法。基于参考作物蒸散量的计算方法应用最为广泛,参考作物蒸散量的计算方法主要包括:Hargreaves、Blaney-Criddle、Radiation-FAO、Penman、Penman-FAO、Penman-Monteith等^[29-32]。Penman-Monteith公式是FAO推荐的计算参考作物蒸散量 ET_0 的标准方法,其精确性已经在世界范围内得到了广泛验证^[33-40]。目前在烟草上主要采用Penman-Monteith公式结合作物系数的方法来计算需水量^[19,41-42]。何健^[19]根据大田实测数据及Penman-Monteith计算得出的 ET_0 ,得出了河南中壤烟区移栽后0~20 d、20~40 d、40~80 d和80 d至结束的作物系数 K_{cm} 依次为1.05、1.28、1.49、1.25。

1.3 烟草需水量的试验方法

研究烟草需水量的试验方法主要是盆栽、旱棚、蒸渗仪以及大田试验等,不同试验方法得出的需水量存在较大的差异。韩锦峰等^[4]研究表明,每生产1 g干烟叶,在温室条件下烟株需要蒸腾掉水分167 g,而在大田实际情况下,水分蒸腾量系数大于500 g。阿吉艾克拜尔^[16]研究也表明,烟草全生育期需水量盆栽条件下大于500 mm,而在蒸渗仪条件下却小于300 mm。何健^[19]在河南分别进行桶栽和大田试验的结果表明,移栽至成熟前期,桶栽的需水量为295 mm,而大田的需水量为高达409 mm,伸根期差异尤为明显,桶栽伸根期需水量为45 mm,大田比桶栽多需水58 mm。由以上可知,由盆栽、蒸渗仪、旱棚和大田试验等所取得的烟草需水量数据存在很大差异。而目前大多数研究以盆栽、旱棚为主,所得结论还很难直接用于指导大田生产。

2 烟草生育期需水动态规律

2.1 不同生育期烟草需水特征

目前研究者一般是通过测定伸根期、旺长期和成熟期三个阶段的需水量或需水模系数,来研究烟草不同时期的需水规律。孙梅霞等^[7]在河南进行的

人工控水试验也发现,伸根期、旺长期和成熟期的需水模系数分别为 20.0%、50.0%和 30.0%;高华军^[17]通过河南大田试验也发现伸根期、旺长期、成熟期的需水模系数分别为 16.6%、50.0%、33.4%;蔡寒玉等^[12]在中国白肋烟试验站的防雨棚内试验表明,不同水分处理组合的烟草全生育期需水模系数呈相似的变化趋势,伸根期最小,为 17.3%~22.3%,旺长期最多,为 42.7%~46.1%,成熟期其次,为 35.0%~36.8%;汪耀富^[13,43]在河南分别进行池栽、大田试验和旱棚人工控水试验也均发现,伸根期烟草需水量约占全生育期总需水量的 16.0%~20.0%,旺长期约为 44.0%~46.0%,成熟期约占 34.8%~37.0%;阿吉艾克拜尔^[16]在南京的蒸渗仪试验也表明,在不同的水分控制条件下,伸根期烟草需水模系数变化范围为 14.8%~19.4%,旺长期为 48.9%~59.7%,成熟期为 25.5%~33.8%。由以上可知,尽管烟草不同生育期的需水模数因各地生态环境条件、研究的侧重点、研究手段等不同,所得出的结论也有所差异,但也展示出了一些基本的共同点,即烟草需水具有明显的阶段性,伸根期需水少,旺长期达到高峰,现蕾以后,随着叶片的成熟采收,烟草需水量逐渐减小,而且不同生育期需水系数基本保持相对稳定。

2.2 烟草不同生育期适宜土壤含水量

对于烟草不同生育期适宜土壤含水量指标,目前研究者通过研究烟草生理特性、产量品质效益等方面探索烟草对土壤水分的适应策略。从烟草生理特性指标来看,得出了较为一致的结论,各生育期的土壤持水量在伸根期约为 60%~70% FC(田间持水量),旺长期为 75%~85% FC,成熟期为 70%~80% FC 时,有利于提高烟叶气孔导度、净光合速率以及叶绿素含量,增强硝酸还原酶活性^[7,17,44-46]。通过研究烟株生长指标、产量、根冠比、根系干物质积累及烟叶化学成分等可知,各生育期的土壤持水量适宜性指标分别在伸根期为 55%~65% FC,旺长期为 75%~85% FC,成熟期为 65%~75% FC^[19,46-48]。随着水资源短缺成为全球性问题,研究

者逐渐从降低蒸腾速率、提高水分利用效率、亏水效益等角度探索烟草不同生育期水分适宜指标,研究指出,土壤持水量在伸根期为 60%~70% FC,旺长期和成熟期皆为 70%~80% FC 的状况下,水分利用效率最高^[17,44-45]。由于所选取的研究指标、方法以及地点不同,对于烟草不同生育期土壤相对持水量指标的研究结果不完全相同,但基本一致,即伸根期、旺长期、成熟期土壤适宜土壤相对持水量指标约为 60%、80%、70%。

2.3 烟株蒸腾与棵间蒸发特征

烟草全生育期植株蒸腾(T)远大于棵间蒸发(E),T占总需水量的比例(T/ET)约为 67%^[18]。地表覆盖与否对二者比例也有着比较明显的影响,如:饶梓云等^[49]在陕西得地膜覆盖试验表明,露地烟田 T/ET 为 60%,而覆膜后,T/ET 提高至 70%。研究进一步发现,不同生育期 E 和 T 比值也存在差异,伸根期地面覆盖度小,T/ET <50%;团棵以后,遮阴强度逐渐增强,T/ET >80%;现蕾后,T/ET 在 75%左右;成熟后期,随着叶片的采收,T/ET 值进一步减小^[18]。何健^[19]在河南的大田试验得出,伸根期、旺长期以及成熟期 T/ET 值分别为 21%、76%、61%。蔡寒玉等^[12]在中国白肋烟试验站防雨棚内进行的试验显示,伸根期、旺长期以及成熟期,T/ET 值分别为 71%,91%,77%。由于各生育期 T/ET 值受到气象、土壤以及作物综合因素影响,因此不同研究学者得出的不同生育期 T/ET 值存在较大差异,但 E 和 T 相对变化有较为一致的规律,即 E 和 T 分别呈现明显的阶段性,其中,E 通常在伸根期达最大值,接着旺长期随茎叶的生长、田间郁蔽度变大而逐渐变小,在成熟期又随叶片的采收而逐渐上升,而 T 的变化恰好相反,T 随地面覆盖度的增加而逐渐增加,至成熟期又随烟叶采收,地面覆盖减少而递减。

3 影响烟草需水量的主要因素

农田需水量与大气、植物、土壤状况相关:1)气象条件是影响农田需水的基本因素;2)土壤水分状况是农田需水的限制因素;3)作物生物学特

性是农田需水差异的内在因素^[50-51]。烟草需水同样受土壤水分供应状况、烟株生理需水特性和气候条件等多种因素的影响^[4]。研究发现,烟草需水量存在显著的地区差异,南京蒸渗仪试验条件下烟草需水量为 272 mm^[52];云南防雨棚内烟草需水量为 312 mm^[53],贵阳自然状况下需水量为 403 mm^[18];而河南旱棚内烟草需水量高达 681 mm^[13],这可能是由于气象因素、土壤状况、烟草生长期以及管理栽培措施存在差异所致,不同的研究方法对需水量也可能造成影响。

3.1 气候对烟草需水量的影响

温度、湿度、降雨量、太阳辐射、风速等气象因素对农田需水量有着明显的影响。因此研究者们建立了许多根据某些气候因子计算作物蒸发蒸腾量的模型,其中比较著名的有:Hargreaves (1974) 经验法、Radiation-FAO 法 (Doonenboos, 1977)、Blaney-Criddle-FAO 法、Penman 法、Penman-Monteith 法等^[54-55]。这些模型无一例外地说明了气象因素对作物需水量有着重要的影响。研究学者通过大量大田试验,也证实了气候对于烟草需水量也有着同样的重要作用。例如:何健^[19]进行大田试验发现相同的水分处理情况下,2002 年全生育期耗水量 409 mm,2003 年比其高出 40 mm,说明在不同气候条件下烟草耗水量存在很大差异,这可能是由于不同气候条件下温度、风速、辐射、相对湿度等差异造成。邵孝侯^[33]进行的不同水平年烟草需水量比较也表明,不同气候年份类型下,烟草全生育期需水量不同,由大到小依次为:干旱年>中等干旱年>平水年。

3.2 栽培技术对烟草需水规律的影响

种植密度和地膜覆盖等农业栽培技术,直接影响烟株长势和土面覆盖度,造成土面蒸发需水和作物蒸腾需水量差异,从而影响烟草需水量。从植株蒸腾因素进行研究发现,随烟草种植密度增大,烟草需水量逐渐增加^[56-57],这主要是由于高种植密度条件下烟株群体较大,蒸腾速率较高所致^[57]。另有研究学者^[49]从土面蒸发因素研究表明,烟草地膜覆

盖能明显减少烟田土壤水分蒸散,提高水分利用效率,尤其是前期土壤覆盖度小的情况下作用尤为明显。另有研究表明^[58],垄上覆盖地膜以及烟行覆盖秸秆与传统的垄上栽烟相比,烟草需水量仅稍微有所降低,而产量能提高一倍,水分利用效率提高了一倍,这可能是由于覆膜措施虽然也可大大抑制烟田土壤蒸发,但覆膜后烟草长势较好,绿色叶面积增加,从而导致烟株蒸腾量增加,因此,需水量减少幅度较小。

3.3 供水条件对烟草需水量的影响

一般认为,烟草需水量与土壤供水量成正比,土壤含水量越高,蒸发越强烈,需水量越大^[12,59]。高华军^[17]研究进一步表明,烟草全生育期需水量、需水强度随灌溉量的增大而增大,但并非线性增加,而是呈报酬递减现象。不同的灌溉方式能明显影响土体内水分分布,从而导致需水量存在差异。大量大田试验也证实了灌溉方式对烟草需水量也存在显著影响:汪耀富等^[53]研究结果表明,两边同时灌溉整个生育期需水量,比两边交替灌溉和单边固定灌溉分别多出 218 mm 和 251 mm,并且两边交替灌溉水分利用效率最高;蔡寒玉等^[59]的防雨控水盆栽试验显示,控制性分根交替灌溉量达到对照灌溉水量的 2/3 处理时,需水量下降 33.3%,而烟草干物质重仅减少 15%,水分利用效率大幅提高;国外也有研究表明,滴灌比喷灌和沟灌减少水分消耗^[60],获得较高产量,提高水分利用效率^[61-62]。

3.4 烟草品种对烟草需水特征的影响

同一地点气候、土壤条件相同,但不同烟草品种间蒸腾特性、生物量有差异,导致烟草需水量在不同烟草品种之间存在不同程度的差异。选择低需水品种对烟草节水具有相当大的潜力。目前,关于不同品种需水规律的研究还较少,仅有少数研究者进行不同品种干旱胁迫反应的研究。有研究^[63]发现,不同品种对于干旱胁迫生理反应敏感度不同,依次为 K326>云烟 203>云烟 201>云烟 202。另外,对于另 5 个烟草品种抗旱性能研究结果为 V2>云烟 85>红花大金元>云烟 87 >K326^[64],表明不同烟草

品种抗旱性能差异较大。这些研究都为选育低需水产品品种提供了非常大的可能性，但烟草需水量受诸多因素影响，对品种选育还需进行大量深入细致的研究。

4 烟草需水量与产量关系

水分胁迫成为限制烟草产量的重要因子，60%的产量变异是由于水分的变化引起的^[65]，水分通过影响根系发育及光合、呼吸、营养代谢等生理作用，进而影响烟草生长和发育，因此需水量和烟叶产量之间有着密切关系。研究者们建立了许多根据需水量计算作物产量的模型，其中国际上公认比较合理的模型主要有：Jensen 模型、Minhas 模型、Blank 模型、Stewart 模型、Singh 模型^[29]，这些模型无一例外地说明了需水量对于产量有着重要的影响。邵孝侯等^[41]利用田间测定数据深入研究了需水量对产量的影响机制，依据 Jensen 模型提出了湖北烟区烟草的水分生产函数模型，表达式如下：

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{ET_1}{ET_{m1}}\right)^{0.085} \cdot \left(\frac{ET_2}{ET_{m2}}\right)^{0.533} \cdot \left(\frac{ET_3}{ET_{m3}}\right)^{0.189}$$

大田试验也进一步证实了需水量和产量之间的密切关系，研究表明产量随着需水量的增加逐渐增大，但需水量增大到一定程度，产量增加幅度逐渐变小，即出现报酬递减现象。而也有研究显示^[12,17]，随着烟草需水量的不断增加，烟叶产量总体呈现抛物线变化，先增加后降低，这可能与农业措施有关。与上述结论均不同的是，有研究认为^[66]，产量随着需水量的增加而增加，二者呈极显著线性关系，这可能是由于该研究只涉及到增产阶段，对于产量达到一定水平后未进行探讨。由以上列举文献可以看出，关于烟草需水量和烟草产量的关系，目前已有了一些研究，而研究学者对于烟草需水量增大到一定程度后对产量的影响，结论有所不同，有关产量对需水量变化响应的研究还需进一步丰富和深入。

5 烟草需水规律研究的未来展望

目前对于烟草生长与水分关系以及灌溉调控技术已经取得了一定的成果，得出了烟草各生育期

需水模系数及土壤适宜含水量，探讨了栽培技术以及灌溉供水条件等对烟草需水的影响，然而，烟草需水规律的研究仍然存在一些问题，如：研究方法存在缺陷，研究区域单一，测定工作薄弱，缺乏足够的实测资料等，因此难于满足诸如农田灌溉、作物干旱机理等研究中所涉及到的蒸发计算问题。首先，目前研究主要采用盆栽、桶栽、旱棚等方法进行研究，与大田实际情况存在差异。其次，目前学者进行烟草需水量的研究主要基于土壤含水量变化，未考虑土水势变化，而土水势是土壤水分运动的决定因素，土水势是叶片生长的基本动力因素之一^[67-69]，根据土水势推求裸土或其他作物如小麦、玉米蒸散量已有学者进行研究，结果均表明此法具有极大的实践价值^[70-72]。第三，在目前的研究中，主要将烟草生育期划分为几个阶段进行研究，在大田实际情况下，很难绝对地将生育期划分开，试验结果较粗放。第四，有关研究表明，不同地域烟草需水规律存在很大差别，目前大都未考虑土壤状况、气候条件等空间变异，单点的研究结果难以代表全国各地的实际情况。另外，几乎所有的研究学者均针对不同生育期，以土壤相对含水量（占田间持水量的比例）作为下限控制指标，设置不同水分处理，研究烟草需水规律，实际测定的土壤含水量包括土壤质量含水量（经典烘干法测定）以及土壤体积含水量（运用 TDR 等方法测定）。土壤水分状况表示方法较多，致使部分研究结果模糊。

为了更好的利用灌溉措施进行产量品质调控，笔者认为烟草需水规律的研究应包括以下几个方面：1) 应探讨新的作物需水量研究方法，以弥补目前研究方法的不足；2) 应连续多年对大田实际情况下烟草需水规律研究；3) 应包括不同质地，不同土壤条件，不同气候条件下烟草生长阶段需水试验；4) 应引入土壤水势参数对烟草需水规律进行研究；5) 烟草需水处于动态变化中，应进行小时段烟草需水规律研究。

参考文献

- [1] 訾天镇, 郭月清. 烟草栽培[M]. 北京: 中国农业出版

- 社, 1996.
- [2] Sifola M I, Postiglione L. The effect of nitrogen fertilization and irrigation on dry matter partitioning, yield and quality of tobacco (*Nicotiana tabacum* L) burley type[J]. *Agric Med*, 2002, 132: 33-34.
- [3] Cao Z H, Miner G S, Wollum. Effect of nitrogen source and soil acidity on nitrogen use efficiency and growth of flue cured tobacco [J]. *Tobacco Sci*, 1992, 36: 57-60.
- [4] 韩锦峰, 汪耀富, 钱晓刚, 等. 烟草栽培生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [5] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [6] 刘树杰. 土壤水分与烟草生长发育和产量品质的关系[J]. *中国烟草*, 1985 (3): 14-17.
- [7] 孙梅霞, 汪耀富, 张全民, 等. 烟草生理指标与土壤含水量的关系[J]. *中国烟草科学*, 2000, 21 (2): 30-33.
- [8] 高华军, 汪耀富, 邵孝侯. 烤烟节水灌溉的研究进展[J]. *节水灌溉*, 2005 (5): 33-35.
- [9] 司建华, 冯起, 张小由, 等. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展[J]. *水科学进展*, 2005, 16 (3): 450-458.
- [10] 陈永金, 陈亚宁, 薛燕. 干旱区植物耗水量的研究与进展[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18 (6): 152-158.
- [11] 王笑影. 农田蒸散实测方法研究进展[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2004, 20 (1): 27-30.
- [12] 蔡寒玉, 汪耀富. 土壤水分对烤烟形态和耗水特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24 (1): 38-41.
- [13] 汪耀富, 蔡寒玉. 不同供水条件下土壤水分与烤烟蒸腾耗水的关系[J]. *农业工程学报*, 2007, 23 (1): 19-22.
- [14] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 224-227.
- [15] 任亚, 汪耀富. 水氮耦合对烟田土壤水分时空分布和利用效率的影响[J]. *土壤肥料科学*, 2005, 21 (4): 194-197.
- [16] 阿吉艾克拜尔. 调亏灌溉对烟草生长发育及产量品质的影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [17] 高华军. 烤烟节水灌溉制度与优化灌溉指标研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [18] 陈佳勃. 喀斯特山区优质烟生产的水分需求特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2006.
- [19] 何健. 河南省中壤烟区烤烟需水指标与需水模型研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.
- [20] 李正风, 李文正. 干旱胁迫对不同基因型烤烟品种生物学性状的影响[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13 (1): 107-109.
- [21] Abenney M S, Yomota A, Miura T. Water balance of field plots planted with soybean and pumpkin[J]. *Trans. ASAE*, 1997, 40: 899-909.
- [22] Esmaie L M, Gail E B. Comparison of Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 146: 209-220.
- [23] 左大康. 我国农田蒸发测定方法和蒸发规律研究的近期进展[C]//左大康, 谢贤群. 农田蒸发研究. 北京: 气象出版社, 1991.
- [24] 张永忠, 李宝庆. 用水量平衡法计算农田实际蒸发量[C]//左大康, 谢贤群. 农田蒸发研究. 北京: 气象出版社, 1991.
- [25] Prueger J H, Hatfield J L, Aase J K, et al. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration [J]. *Agron J*, 1997, 89: 730-736.
- [26] Howell T A, Schneider A D, Jensen M E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements[C]// Proceedings of the international symposium on lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements ASAE, 1991: 1-9.
- [27] Young M H, Wierenga P J, Mancino C F. Monitoring near surface soil water storage in Turfgrass using time domain reflectometry and weighing lysimetry [J]. *Soil Sci Am J*, 1997, 61: 1138-1146.
- [28] 朱治林. 用波文比-能量平衡法估算农田蒸发量与 Lysimeter 的比较[C]//左大康, 谢贤群. 农田蒸发研究. 北京: 气象出版社, 1991: 71-79.
- [29] 罗金耀. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [30] 谢立群, 郑淑红. 作物需水量的计算方法[J]. *农业与技术*, 2007, 27 (1): 28-29.
- [31] 马海燕, 缴锡云. 作物需水量计算研究进展[J]. *水科学与工程技术*, 2006 (5): 5-7.
- [32] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22 (4): 372-376.
- [33] 孙景生, 刘祖贵, 张寄阳, 等. 风沙区参考作物需水量的计算[J]. *灌溉排水*, 2002, 21 (2): 17-20.
- [34] 刘钰, Preira L S, Teixeira J L, 等. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比[J]. *水利学报*, 1997 (6): 27-33.
- [35] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. *应用气象学报*, 2000, 11 (1): 128-135.
- [36] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements[J]. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, 1990, 70: 332.
- [37] Thakur B C, Spehia R S. Prediction of water requirement for tomato in mid-hill zone of Himachal Pradesh[J]. *Indian J Soil Cons*, 2006, 34(1): 21-23.
- [38] Peter Droogers, Richard G, Allen. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions [J]. *Irrigation and drainage systems*, 2002, 16: 33-45.
- [39] Chiew F H S, Kamaladasa N N, Malano H M, et al. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop

- evapotranspiration and class-A pan data in Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 28 (1): 10.
- [40] David M S, Jennifer M J. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 308: 81.
- [41] 邵孝侯,戴琳,钟华,等. 不同水平年烤烟灌溉制度优化设计[J]. *中国农村水利水电*, 2008 (5): 22-25.
- [42] 钟华. 湖北省不同生态类型烟区烟草优化灌溉制度研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [43] 汪耀富,李广安,张新堂. 不同灌水条件下烤烟耗水特征和用水效率的研究[J]. *中国烟草科学*, 1995, 16(1): 4-8.
- [44] 刘贞琦,伍贤进,刘振业. 土壤水分对烟草光合生理特性影响的研究[J]. *中国烟草学报*, 1995, 2(3): 44-49.
- [45] 刘玉青,邵孝侯,汪耀富,等. 烟草适度亏水效应与生理灌溉指标研究[J]. *河海大学学报*, 2002, 34(6): 664-666.
- [46] 李进平,陈振国. 水分条件对烤烟生理指标的影响及适宜土壤水分指标研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(1): 93-96.
- [47] 伍贤进. 土壤水分对烤烟生长和光合作用的影响[J]. *绵阳农专学报*, 1995, 12(6): 22-25.
- [48] 伍贤进. 土壤水分对烤烟某此生理特性影响的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 1998, 20(2): 22-25.
- [49] 饶梓云,工安柱. 陕西省旱地烤烟农田土壤水分动态水平衡水利用效率研究[J]. *烟草科技*, 1993(1): 36-39.
- [50] 程维新,胡朝炳,张兴权. 农田蒸发与作物耗水量研究[M]. 北京:气象出版社,1992.
- [51] Lapitan R L, Parton W J. Seasonal variabilities in the distribution of the microclimatic factors and evapotranspiration in a short grass steppe[J]. *Agric For Meteorol*, 1996, 79: 113-130.
- [52] 李继新,袁有波,苏贤坤,等. 土壤水分对烤烟耗水特征及烟叶产量和品质的影响[J]. *河海大学学报*, 2008, 36(4): 520-524.
- [53] 汪耀富,蔡寒玉,张晓海,等. 生根交替灌溉对烤烟生理特性和烟叶产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(5): 93-98.
- [54] 马海燕,缴锡云. 作物需水量计算研究进展[J]. *水科学与工程技术*, 2006(5): 5-7.
- [55] 李玉霖,崔建垣,张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 372-376.
- [56] 刘国顺,汪耀富,韩富根,等. 旱地烟草种植密度与水分利用关系的研究[J]. *河南农业大学学报*, 1998, 32(增刊): 75-79.
- [57] 汪耀富,孙德梅,韩富根. 密度和地膜覆盖对烟田冠层生理活性和土壤水分利用效率的影响[J]. *烟草科技*, 2003(12): 27-30.
- [58] 王丽萍,汪耀富. 覆盖集水措施对烟田土壤水分时空分布和利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 117-119.
- [59] 蔡寒玉,汪耀富,李进平,等. 烤烟控制性分根交替灌水的生理基础研究[J]. *节水灌溉*, 2006(2): 11-15.
- [60] Karkanis A, Bilalis D, Eftimiadou A. Tobacco (*Nicotiana tabacum*) infection by branched broomrape (*Orobancha ramosa*) as influenced by irrigation system and fertilization under east mediterranean conditions[J]. *Agron*, 2007, 6: 397-402.
- [61] Sharmasarka F C, Sharmasarkar S, Miller S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets [J]. *Agric Water Manage*, 2001, 46: 241-251.
- [62] Cetin O, Bilgel L. Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton [J]. *Agric Water Manage*, 2002, 54: 1-15.
- [63] 李正风,李文正. 干旱胁迫对不同基因型烤烟品种生物学性状的影响[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(1): 107-109.
- [64] 苏贤坤,张晓海. 水肥交互作用对烤烟生长发育和烟叶品质的影响[J]. *烟草农业科学*, 2005, 1(1): 42-46.
- [65] 韩锦峰. 烟草栽培生理[M]. 北京:中国农业出版社,1996.
- [66] 汪耀富,王廷晓. 干旱胁迫下烤烟叶片水分代谢研究[J]. *河南农业大学学报*, 1994, 28(1): 50-54.
- [67] Bluce J A. Leaf elongation in relation to leaf water potential in Soybean[J]. *Eap Botany*, 1997, 28: 156-161.
- [68] Hsiao T C, Frensch J, Rojas-Lara B A. The pressure-jump technique shows maize leaf growth to be enhanced by increases in turgor only when water status is not too high[J]. *Plant Cell Environ*, 1998, 21: 33-42.
- [69] Tang A C, Boyer J S. Growth-induced water potentials and the growth of maize leaves[J]. *Eap Botany*, 2002, 53: 498-503.
- [70] 李宝庆,杨克定,张道帅. 用实测土壤水势值推求土壤蒸散量[J]. *水利学报*, 1987(3): 33-38.
- [71] 李锡录,聂俊华,单艳红. 土壤水研究及在作物需水灌溉中的应用[J]. *山东农业大学学报*, 1997, 28(2): 178-186.
- [72] 夏卫生,雷廷武,杨文治,等. 蒸发条件下土壤水分再分布的动力学研究[J]. *水力学报*, 2002(7): 37-41.