

作物需水时空尺度特征研究进展

刘丙军^{1,2}, 邵东国¹, 沈新平¹

(1. 中山大学地理学科与规划学院水资源与环境系, 广州 510275;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 受气象、土壤和种植条件等客观条件的影响, 作物需水时空尺度分布具有明显的时空异质性, 致使作物需水的理论和模型具有高度的尺度依赖性。基于此, 该文对作物需水时空尺度特征的计算方法及其运用情况作了详细的阐述, 并建议在今后作物需水时空尺度特征的进一步研究中, 应以试验数据为基础, 运用分形、小波、信息熵等复杂性理论, 研究作物需水的时空尺度特征, 发展既有理论基础又便于应用的区域尺度的作物需水量估算新模式。

关键词: 作物需水量; 需水量确定; 时空尺度特征; 研究

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0258-07

刘丙军, 邵东国, 沈新平. 作物需水时空尺度特征研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 258-264.

Liu Bingjun, Shao Dongguo, Shen Xinping. Advances in researches on the spatial-temporal features of crop water requirement[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 258-264. (in Chinese with English abstract)

0 引言

多年来, 人们对作物需水量的研究主要集中在田间, 如经验公式法、水量平衡法、微气象学法(包括能量平衡法、空气动力学法、结合 Penman 法和遥感表面温度法)等研究和运用均取得了较大进展。但在实际运用中, 为了掌握区域内作物总体需水动态, 对其研究往往采用绘制区域作物需水量等直线分布图的方法。由于该法很难克服作物需水时空异质性所产生的影响, 使得计算结果与实际情况有较大误差。从尺度的角度分析其原因, 一是作物需水是一个涉及气象、水文、土壤等众多方面的复杂系统, 通常存在于较大的时空尺度范围内。而对其相应大多数因子的测定只能在短时间、小范围内现场测定, 所掌握的实验数据远远达不到计算要求; 另一方面是作物需水的各类影响因子(如土壤类型、气候、耕作方式、灌溉技术与灌溉方式等)存在时空异质性, 某一尺度下作物需水理论或参数具有高度的尺度依赖性, 在某一尺度上建立的模型一般不能移植到高一级或低一级时空问题中求解, 使得小尺度的各类作物需水计算方法运用于大尺度上将产生较大误差。尺度^[1]已成为唯一解析这类复杂现象的有效手段以及整合相关知识和研究成果的核心轴线。为此, 研究作物需水时空尺度特征,

对于准确计算作物需水量、优化区域灌溉制度、实现区域农业水资源可持续发展有着非常重要的理论和实际意义。

1 作物需水空间尺度特征研究进展

1.1 田间尺度作物需水研究进展

1.1.1 田间蒸发蒸腾量测定研究

田间蒸发蒸腾在水量平衡和热量平衡中占有十分重要地位, 是 SPAC 水分运移的关键环节, 并与作物生理活动和产量关系极为密切, 是农田灌溉管理、作物产量估算和土壤水分动态预报等各项研究重要参考数据。目前, 田间蒸发蒸腾的研究方法主要有两类: 一类是土壤水量平衡法, 另一类是微气象学方法。

1) 土壤水量平衡法 土壤水量平衡法是根据水量平衡的原理, 在分析一段时间内田间作物土壤储水量差值、降水量、地下水补给量、灌溉水量、地面径流量、土壤水分渗漏量的基础上, 根据水量平衡方程计算作物该时段的蒸发蒸腾量。该方法计算简单直接, 但受各种观测值测量精度有限的影响, 使得土壤水量平衡的最短时间间隔通常达到一周左右, 计算精度与实际情况相距甚远。为解决此类问题, 20 世纪 50 年代起人们开始研制测定土壤水分和蒸发蒸腾的各种仪器, 包括张力计、射线仪、中子水分控制仪等, 其中, 最常用的方法是蒸渗仪。Hatfield(1996)^[2]认为蒸渗仪是测量蒸发蒸腾最具代表性的仪器, 尤其对于校正涡度相关法、波文比法、能量平衡法、土壤水量平衡法等具有较好效果。此后, Terry A. Howett(1998)^[3]、Tudy A. Tolk(1998)^[4]、N. K. Tyagi(2000)^[5]、柯晓新(1996)^[6]、冯金朝(1995)

收稿日期: 2006-04-20 修订日期: 2007-01-05

基金项目: 国家重点 973 项目(2003CB415206); 中山大学青年教师科研启动基金

作者简介: 刘丙军(1976-), 男, 湖南益阳人, 博士, 从事农业水资源系统分析的研究。广州 中山大学地理科学与规划学院, 510275。

Email: liubj@mail.sysu.edu.cn

等^[7]分别运用称重式蒸渗仪测量了多种作物的蒸发蒸腾。

2) 微气象学方法 随着小气候仪器和计算机技术的不断发展进步,以往受某些因素限制而具有一定物理基础的微气象学方法逐步成为测定田间蒸发蒸腾的重要手段,主要包括空气动力学法、涡度相关法和能量平衡-空气动力学阻抗综合法等。

① 空气动力学法 1939年, Thornthwaite 和 Holzman 首次利用近地边界层相似理论提出了空气动力学法。该法讨论了近地面或作物覆盖上方短距离内水蒸气的紊流转移,以一个均匀的植物冠层上方为研究背景,通过分析不同水平面上空气的水汽压和流动速度,联合相关的测定值用以确定瞬时蒸发蒸腾速率,推求田间作物的蒸发蒸腾量。空气动力学法所遇到的主要问题是作物冠层上方空气的不规则运动。谢贤群(1990)^[8]认为在运用空气动力学法时,如不能确保测定严格准确,计算推求的田间蒸发蒸腾量误差将很大,尤其是在不稳定层下偏差更大。

② 涡度相关法 采用涡度相关法测量蒸发蒸腾始于20世纪上叶。1930年, Scrase 在记录垂直方向风速分量和水平分量成正比的信号时,首次将涡度相关技术用于计算水平动量的垂直涡度通量的涡度能量。此后, Swinbank(1955)着重研究了测量湿热和潜热的涡度相关技术。根据 Blank(1968)、Kanemasu(1979)等人的研究表明,在粗糙表面采用涡度相关技术计算田间蒸发蒸腾量的精度远高于一些依靠梯度公式来计算通量的方法,但在比较平坦的表面,涡度相关技术需要安装精度较高的测量仪器。

③ 能量平衡-空气动力学阻抗综合法 能量平衡-空气动力学阻抗综合法是根据植株下垫面能量平衡方程和空气动力学理论来测定田间总蒸发蒸腾量的一种方法。1948年 Penman 在英格兰南部的 Rothamsted 地区首次研究了无水气水平输送情况下的参考作物腾发量计算方法,并于1953年提出了计算单个叶面气孔蒸腾的模式;1959年 Covey 把气孔阻力的概念推广到整个植被表层;Monteith(1959)在 Penman 和 Covey 等人的工作基础上得出了计算整个冠层的参考作物腾发量方法,建立了 Penman-Monteith 计算模式,为蒸发、蒸散的研究开辟了一条新的途径。此后, Allen(1994)^[9]、龚元石(1995)^[10]等人对 Penman-Monteith 计算模式作出了有益补充等。

1.1.2 田间作物需水研究

目前,田间尺度作物需水量的计算方法可归结为两类:一类直接计算法,该法主要是经验公式,即采用主要气象因子与作物需水量的经验关系进行计算;另一类方

法是通过参考作物需水量 ET_0 与作物系数 K 来确定作物需水量的间接计算方法。

1) 直接计算法

直接计算方法一般是根据实测资料,分析几个主要影响因素(如水面蒸发、气温、湿度、日照、辐射等)与作物需水量之间存在的数量关系,归纳成某种形式的经验公式,它又分为两种方法:一种是先计算整个作物生育期的需水量,然后用阶段需水模系数分配各阶段的作物需水量,如以产量为参数的需水系数法(简称“K值法”)、水面蒸发量法(“E值法”)、积温法、日照时数法、多因素法等。该法的精度在很大程度上取决于阶段需水模系数的准确程度。由于影响需水模系数的因素很多,如作物品种、气象条件,以及土、水、肥条件和生育阶段划分的不严格等,同一生育阶段不同年份同品种作物的需水模系数并不稳定,而不同品种的作物需水模系数则变化更大。大量试验分析表明,该法计算作物阶段需水量时,受阶段需水模系数的影响,绝大多数误差超过 $\pm 50\%$;另一种方法是直接计算各生育阶段作物需水量,包括经验公式法、水汽扩散法、能量平衡法和综合法等。由于作物全生育期内各计算的冠层结构对太阳辐射的吸收、反射等影响较大,如果全生育期用一个函数进行计算,则误差较大;如采用不同阶段选用不同的函数形式或同一函数形式中各阶段不同的参数,参数难于确定,给计算带来很大不便。

2) 间接计算方法

① 参考作物潜在腾发量 计算参考作物需水量的方法很多,概括起来分为两类方法:一类是经验公式法,另一类较为常用的是 Penman 法或 Penman-Monteith 法。其中,经验公式是在特定的环境条件下推导出来的,有较强的区域局限性,或过于精巧而缺乏难以测得的资料而不便推广,或公式简单但计算结果过于粗略。以能量平衡原理为基础的 Penman 公式法,只需利用常规气象资料便可较为准确地计算出参考作物的需水量,该法已成为计算参考作物需水量的一种主要方法。

1948年, Penman 在英格兰南部的 Rothamsted 地区首先提出无水气水平输送情况下计算水面蒸发、裸地和牧草蒸发的公式,并于1953年通过对植物水分蒸腾生理机制的研究,提出了单片叶片气孔蒸腾的计算模式。Convey 对此计算模式进行了修正,把气孔阻力的概念应用到整个植被表面。Monteith 综合两人的研究成果,对其理论构思进行了进一步的丰富和完善,提出了以能量平衡和水汽扩散理论为基础的作物腾发量计算模式,即 Penman-Monteith 公式。此后经过多次修改,形成了多种形式的修正彭曼公式。联合国粮农组织 FAO 在1977年推荐经修改后的 Penman 公式(FAO-

24) 来确定参考作物需水量, 首次充分利用了参考作物需水量和作物系数的概念, 但因昼夜风速修正系数 C 与众多因素有关, 使得该公式在实际运用时受到一定的限制; 此后, 联合国粮农组织 FAO^[11] 在 1979 年提出了 Penman 修正公式(FAO-17), 该公式虽精度略低, 但便于运用。1993 年在意大利罗马举行的作物蒸发蒸腾量计算方法国际研讨会上, FAO 和 ICID 认为有必要规范作物蒸发蒸腾量的计算方法, 并按照 Penman-Monteith 公式的要求, 对参考作物蒸发蒸腾做了新的定义。由于 Penman-Monteith 方法不需要专门的地区率定和风函数等, 使用一般气象资料即可计算参考作物蒸发蒸腾量, 此法的实际运用价值和计算精度都比较高。国内许多学者也对参考作物需水量进行了相关研究。史海滨、杜尧东等(2000)^[12] 通过实验论证, 认为 Penman-Monteith 方法计算值比较接近实际值, 适用范围广, 使用一般气象资料即可计算参考作物蒸发蒸腾量。孙景生等(2002)^[13] 利用 Penman-Monteith 公式对逐旬参考作物需水量在年内、年际间的变化进行了分析等。

② 作物参考系数 作物系数是作物本身生物学特性的反映, 它与作物的种类、品种、生育期、群体叶面积指数、产量水平、土壤耕地条件等因素有关。正常灌溉时, 作物系数主要取决于气孔的数目及开度和植株叶面对株间蒸发的影响, 这些因素均与绿叶覆盖百分比密切相关, 作物系数可表达成绿叶覆盖百分比的函数关系。茆智、李远华等(1995)^[14] 针对作物受早前、受早时和受早后 3 种情况, 根据河北望都实验站冬小麦、夏玉米的试验和河北唐海、广西桂林实验站水稻的试验数据, 提出了一个作物绿叶覆盖百分率经验公式。康绍忠等^[15] 认为作物系数在全生育期的变化与作物种类、品种、生育期和生长状况有关, 对于同类作物且品种相同时, 在一定程度上可用作物的群体动态指标表示, 提出了一个关于叶面积指数的作物系数经验公式。雷志栋等(1998)^[16] 针对采用田间试验方法测定作物系数时投资大、试验周期长等问题, 提出了一种运用常规的气象资料计算充分供水条件下作物腾发量计算模型 NWSE (Non-Water Stress Evapotranspiration), 认为作物系数可以表示为作物最大腾发量与参照作物腾发量的比值; 马海燕(2005)^[17] 认为作物系数不但随作物生长发育时间而变化, 也受气温和土壤水分状况累积效应的影响, 土壤水分修正系数也有建立包含作物根系深度等因素的计算模型的必要等。

利用传统的田间尺度估算方法, 在从田间尺度转换至区域尺度过程中, 因无法克服气象因素和作物需水时空异质性所产生的影响, 运用于区域尺度多种作物组合的需水量估算时计算精度往往无法满足生产需求。其

中, 复杂地形是影响传统估算精度的主要因素, 但由于地形因子等数据难以获得, 实际计算中往往将空间坐标简化为平面坐标, 只考虑地理坐标的影响, 常常导致下垫面复杂区域内作物需水量估算精度难以满足使用要求。尽管随着大尺度水文学、气象模式中通量参数化等领域研究发展, 有关地形复杂区域平均蒸散量的计算有了相当的进展, 但由于该类模型或方法的建立和应用都局限于某一特定的区域及条件, 大多成果均为经验公式, 具有较强的区域限制性, 并且由于考虑地形条件下的太阳辐射计算公式的复杂性, 地形参数获取技术以及缺乏合适的计算平台, 这些方法的应用受到了限制。

1.2 区域尺度作物需水研究进展

田间尺度作物需水的研究方法一般假定下垫面是均匀的, 但在大区域的观测计算中, 由于政府鼓励间、混、套作和复种等多熟种植制度, 或是高矮作物交错, 或是裸地作物混存, 大多田间的作物下垫面很少呈均匀状态。因此, 区域尺度作物需水研究不宜采用田间尺度作物需水量的计算方法。

近 20 年来, 随着遥感技术的发展和运用, 利用遥感技术估算区域作物蒸散发和需水的研究在国内外均取得了一定进展^[18-20], 主要包括两方面: 一方面是以地表热量平衡方程为基础, 利用遥感数据获取地表热量平衡方程中净辐射、土壤热通量和感热通量等相关参数。Hussein O Farah^[21] 利用遥感波谱数据研究了地表参数的空间变化对区域蒸发的影响。Tim R Mcvicar^[22] 等研究用阻力能量平衡模型和 AVHRR 遥感数据获得气温、相对湿度、太阳辐射和风速, 并分析了这些参数对潜在腾发量与实际腾发量的影响。陈云浩等(2001)^[23] 利用了 AVHRR 图像数据研究了非均匀陆面条件下区域蒸散量计算的遥感模型, 并利用该模型对中国北方地区的蒸散量进行了计算和分析; 黄妙芬等(2004 年)^[24] 应用遥感方法估算区域蒸散量的图像信息源、反照率、比辐射率和表面温度等地表参数的遥感反演精度; 张仁华等(1994)^[25] 利用遥感方法研究了空间变异较大的叶面积指数、地表温度和净辐射通量的区域分布, 通过对遥感方法与传统区域表达方法的对比, 讨论了传统等值线图法的区域要素计算和表达方法的不足, 认为利用遥感方法研究时空多变要素的区域分布是可行的, 定量遥感是大气-植被界面参数尺度转换的有力手段, 等等。另一方面是以 Penman-Monteith 公式为基础, 结合地表热量平衡方程, 直接估算出蒸散量。Ray 等(2002)^[26] 利用月平均气象资料根据 FAO-24 修正的 Blaney-Criddle 公式计算 ET_0 , 采用印度遥感卫星数据建立了多时段作物结构, 生成植被光谱指数模型、估算作物蒸发蒸腾量的遥感数据库。牛振国(2002)等^[27] 在利用

Penman Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 时, 对 ET_0 计算模型的参数(气压、辐射)进行了地形(坡度、坡向和高度)校正, 利用 GIS 的空间分析功能, 建立了一种基于数字高程模型 DEM 的区域参考作物蒸发蒸腾量的分布式模型, 计算了研究区 ET_0 的空间分布情况。詹志明(2002)^[128] 分析了遥感监测陆面水分蒸发的表热量平衡方法、互补相关陆面蒸散发、Penman-Monteith 模型和区域蒸散发的气候学方法, 并提出了可供参考的地面参数(地面反照率、NDVI、陆面温度等)的遥感获取方法, 阐述了各种方法的特点及彼此之间的联系, 等等。

在区域作物需水研究中, 遥感技术具有其他手段无法比拟的优势, 但受外部影响因素(如大气、观测视角、地形、太阳角和云等)干扰, 以及遥感瞬时信息时间延拓和空间尺度转换问题, 遥感参数的空间分辨率以及遥感参数与模型参数的定量对应关系存在诸多技术问题, 遥感数据的有效性受到很大程度的影响, 利用遥感技术并不能很好地解决作物需水尺度转换和非均匀地表的影响问题。随着信息技术特别是地理信息系统(Geographic Information System)技术的飞速发展, 为管理、分析和展示区域尺度作物需水量这种具有空间属性的数据提供了技术平台, 人们开始利用 GIS 的空间信息管理功能和 DEM 提供的主要地形因子, 开发基于栅格数据库和尺度先验知识的分布式估算模型来处理作物需水量的空间不均匀性。在国外, 国际水管理研究院(IWMI, 前身为 IIMI)从 1997 年开始进行了一项长期的研究计划, 研究利用 RS、GIS 及水文模型在政策、策略以及措施层次上辅助灌溉管理, 并在印度的 Bhadra 工程进行了试点。Heinemann AB 等(2002)^[129] 应用 GIS 作为灌区信息系统平台, 选择农业与环境地理信息系统 AEGIS/WIN 和决策支持系统工具 DSSAT 相结合, 考虑作物的需水量、灌溉退水、肥料流失等因素以及土壤、气象因素的影响, 建立了县级区域的作物空间需水模型, 并成功地运用于巴西 Parama 州。Ines A. V. M 等(2002)^[130] 将 GIS 和作物生长模型有机结合起来, 对菲律宾 Laoag 流域 1996 年 10 月~1997 年 9 月年度水稻、玉米、花生等作物的水分生产率进行了预测。Ray 等(2001)^[131] 描述了基于卫星遥感(RS)数据和 GIS 工具来估算印度 MRBC 灌溉控制面积上的季节作物腾发量的用途, 把作物系数 K_c 和参考作物腾发量 ET_0 结合起来生成季节作物腾发量图。Morari 等(2001)^[132] 在解决意大利 Padova 植物园因大量开采地下水所引起的植物缺水问题时, 采用水平平衡法和与 GIS 相结合的数学模型估算 ET , 得到了该区域水循环和作物月平均腾发量 ET 资料。美国加州水利厅和联邦政府水利部门^[133] 运用

GIS 技术, 根据 Tulare 县地下水数据、土地划分布地图及数据等资料, 建立了一个空间数据库, 分析了该县潜在地下水位与作物需水量之间的关系。在国内, 王海江等(2001)^[134] 提出了一种基于 GIS 的区域作物合理灌溉模型, 并论述了该模型的设计思路、模型结构和应用范围。何勇等(2002)^[135] 为解决精细农业空间信息的快速获取与分析处理问题, 研究了一种用 Map object 实现 GIS 与 GPS 有机结合的信息处理系统, 该系统具有空间数据可视化分析处理能力和计算灌溉面积功能。佟玲(2004)^[136] 利用 Penman-Monteith 公式计算了甘肃省石羊河流域及周边的 17 个站近 50 年的历年参考作物蒸发蒸腾量, 并借助地理信息系统软件 MapGIS6.5 和 Arcview 3.1 建立了石羊河流域参考作物蒸发蒸腾量的空间分布式模型, 等等。

区域尺度空间遥感技术法克服了微气象学法因下垫面几何结构和物理属性的水平非均匀性而难以将“点”上观测成果应用到“面”上的局限性, 也克服了水量平衡方法在时间分辨率上的缺陷。该方法是今后研究区域尺度作物需水量的一个重要研究方向。但是, 若将利用遥感确定的地面、气象参数运用于区域(特别下垫面较复杂的区域), 其参数的空间分辨率以及遥感参数与模型参数的定量对应关系仍存在一些技术问题: (1) 图像信息源; (2) 反照率、比辐射率和表面温度等地表参数的遥感反演精度; (3) 空气动力学阻抗和表面阻抗模型; (4) 估算结果的验证方法; (5) 时间尺度的扩展问题。

2 作物需水时间尺度研究进展

不同时间尺度作物需水量的研究方法不同。小尺度作物需水量计算一般采用确定性方法进行研究, 而随着尺度的增大, 复杂性和不确定性因素不断增加, 中尺度或大尺度范围内更多的是采用统计学方法。

2.1 时间序列分析法

作物需水量, 在长时间过程中, 是一随气候、土壤质地和作物生理过程等复杂因素而变化的综合性过程。由于影响作物需水量的某些因素(如气象因子)是随机变化的, 因此作物需水量的变化过程中必然有随机的一面; 同时, 受生理机制的控制, 又具有确定性的一面。因此, 作物需水过程包含有反映多年递增或递减变化趋势的趋势项, 也有体现多年变化过程中的周期性发展趋势的周期项, 同时还有反映作物需水随机特性的随机项, 可以运用时间序列法对序列中的趋势项、周期项、随机项进行分析。邵东国(1998)等^[137] 运用时间序列分析方法, 建立了区域作物需水量长期预报模型, 对南水北调中线工程作物需水量进行了预测, 得到了比较满意的结果。郭宗楼(1995)等^[138] 运用灰色理论, 建立了一个基于

气温预报的作物需水量预测模型。付强(2002)等^[39]利用自激励门限自回归模型能够描述具有极限点和极限环等非线性现象的特点,对三江平原井灌水稻各生育阶段需水量的进行了预测,等等。

2.2 回归分析法

根据作物生长规律可知,作物需水量具有相宜性,即相邻一个或几个阶段之间相互有影响,同时前一个或几个时段的影响因子对本时段需水量也有影响。因此,可以利用影响因子与作物需水量的关系,通过建立线性或非线性回归模型,预测某一时段作物需水量。赵正宜和朱庭芸(1990)^[40]根据水、土、植、气系统的关系,提出了以气象和土壤水分环境两要素的作物实时灌溉回归模型。李远华(1997)^[41]根据实际观测资料,分析了水稻需水量与气象因子的关系,水稻日平均需水量在全生育期内随时间的变化规律,并运用线性回归分析方法,建立了短、中、长期水稻需水量预报模型等。

2.3 神经网络技术

神经网络技术具有较强自学习能力的特点,能从大量统计资料中分析提取统计规律,已广泛运用于作物需水研究中。陈志军(1998)等^[42]以各“五年”计划期末全国粮食总产与影响因子集为训练样本,首次将人工神经网络理论引入灌溉宏观发展战略研究领域,建立了灌溉需水量预测人工神经网络模型。魏占民(2002)等^[43]利用河套灌区春小麦非充分灌溉试验得到的不同灌水水平处理的作物产量与各生育阶段水分资料,建立了一种基于 BP 神经网络的春小麦作物-水模型,取得了较好效果。付强(2002)等^[44]应用神经网络技术,在考虑多气象因子的影响下,通过多维数据相关分析,建立了一个水稻需水量的人工神经网络模型,解决了水稻需水量序列内部及其外部诸多影响因素之间的不确定问题,等等。

综上所述,作物需水时间尺度统计学方法,需以大量试验数据为基础,但受生产条件、技术水平等影响,实测资料十分有限,但由于该类模型或方法的建立和应用都局限于某一特定的区域及条件,有关参数的确定有一定的经验性,使得各类统计学方法普适性受到影响。

3 研究展望

1) 长期以来,人们致力于运用物理学和气象学理论研究均一下垫面的作物生态系统作物需水量计算,取得了一系列重要成果。而非均一下垫面条件下,植被与环境以及植被间的相互作用要比均一下垫面复杂得多,目前的计算方法无论是空间遥感技术、区域水文模型方法或统计学方法,均存在许多假设,普适性不够,难以推广运用。因此,这方面的研究应是今后大尺度作物需水

量研究的重点。

2) 不同时空尺度范围内,受作物需水影响因子随机性、不确定性影响,作物需水系统本身固有尺度效应,即作物需水系统依赖于尺度的特性,使得小尺度的理论和方法很难解析大尺度作物需水系统规律;因此,根据尺度的概念,以试验数据为基础,综合考虑气候、土壤水分状况、地形、植被、灌溉农业发展及生产力水平的提高等因素对区域作物耗水的影响,运用分形、小波、信息熵等^[45,46]复杂性理论,研究作物需水时空尺度特征的不确定性、不均匀性、差异性、突发性和随机性等复杂性现象,发展既有理论基础又便于应用的区域尺度多种作物组合的需水量估算新模式,为区域农业水资源可持续利用提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] 刘建国. 当代生态学博论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 30-39.
- [2] Howell T A, Steiner J L, Schneider A D, et al. Seasonal and maximum daily evapotranspiration of irrigated winter wheat, sorghum, and corn-southern high plains [J]. Trans ASAE, 1997, 40(3): 623-634.
- [3] Terry A Howell, Judy A Tolk, Arland D Schneider, et al. Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity[J]. Agron J, 1998, 90: 3-9.
- [4] Judy A Tolk, Terry A Howell, Steven R Evett. Evapotranspiration and yield of corn grow on three high plains soils[J]. Agronomy Journal, 1998, 90: 447-454.
- [5] Tyagi N K, Shrnma D K, Luthra S K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter[J]. Agricultural water management, 2000, 45(1): 41-54.
- [6] 柯晓新, 张旭东, 彭素琴, 等. 旱作春小麦农田蒸散与能量平衡[J]. 气象学报, 1996, 54(3): 348-355.
- [7] 冯金朝, 黄子深. 春小麦蒸发蒸腾的调控[J]. 作物学报, 1995, 21(5): 544-550.
- [8] 谢贤群. 测定农田蒸发的试验研究[J]. 地理研究, 1990, 9(4): 94-102.
- [9] Allen R G, Smith M, Perrier A, et al. An update for the definition of reference evapotranspiration[J]. ICID Bull, 1994, 43(2): 1-34.
- [10] 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 68-75.
- [11] Fre re M. Agrometeorological crop monitoring and forecasting, FAO Plant Production and Protection Paper 17[M]. Roma, 1979.
- [12] 史海滨, 陈亚新, 徐 英, 等. 大区域非规则采样系统 ET。

- 的最优等值线图 Kriging 法绘制应用[A]. 农业高用水与水土环境保护[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
- [13] 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.
- [14] 茆智, 李远华, 李会昌. 逐日作物需水量预测数学模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(3): 253–259.
- [15] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [16] 罗毅, 雷志栋, 杨诗秀, 等. 非水分胁迫条件下作物腾发的模拟研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 154–159.
- [17] 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, 2005, (5): 5–7.
- [18] 佟玲, 康绍忠, 栗晓玲, 等. 区域作物耗水时空分布影响的研究进展[J]. 节水灌溉, 2004, (1): 3–6.
- [19] 王景雷, 孙景生, 付明军, 等. 区域作物需水量估算存在的问题及解决途径[J]. 节水灌溉, 2005, (3): 4–7.
- [20] 武夏宁, 胡铁松, 王修贵, 等. 区域蒸散发估算测定方法综述[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 257–262.
- [21] Hussein O Farah, Wim G M Bastiaanssen. Impact of spatial variations of land surface parameters on regional evaporation: a case-study with remote sensing data[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(9): 1585–1600.
- [22] Tim R Mcvicar, David L B Jupp. Estimating one-time-of-day meteorological data from standard daily data as inputs to thermal remote sensing based energy balance models[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 96: 219–238.
- [23] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 中国西北地区蒸散发计算的遥感研究[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 261–268.
- [24] 黄妙芬, 刘素红, 朱启疆. 应用遥感方法估算区域蒸散量的制约因子分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 100–105.
- [25] 张仁华, 孙晓敏, 苏红波, 等. 遥感及其地球表面时空多要素的区域尺度转换[J]. 国土资源遥感, 1999, 41(3): 51–58.
- [26] Ray S S, Dadhwal V K, Navalgund R R. Performance evaluation of an irrigation command area using remote sensing: a case study of Mahi command, Gujarat, India [J]. Agricultural Water Management, 2002, 56(2): 81–91.
- [27] 牛振国, 李保国, 张凤荣, 等. 参考作物蒸散量的分布式模型[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 303–307.
- [28] 詹志明. 区域遥感蒸散发模型方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(6): 364–369.
- [29] Heinemann A B, Hoogenboom G, de Faria R T. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS [J]. Agricultural Water Management, 2002, (3): 177–196.
- [30] Ines A V M, Gupta A D, Loof R. Application of GIS and crop growth models in estimating water productivity [J]. Agricultural Water Management, 2002, (3): 205–225.
- [31] Ray S S, Dadhwal V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS[J]. Agricultural Water Management, 2001, 49(3): 239–249.
- [32] Morari F, Griardini L. Estimating evapotranspiration in the Padoba botanial garden [J]. Irrigation Science, 2001, 20(3): 127–137.
- [33] Zhang M, Geng S, Ustin S L. Quantifying agricultural landscape and assessing spatio-temporal patterns of precipitation and groundwater use [J]. Landscape Ecology, 1998, (13): 37–53.
- [34] 王海江, 王波. 基于 GIS 的区域间作物合理灌溉模型研究[J]. 科技通讯, 2001, 17(2): 48–52.
- [35] 何勇, 方慧, 冯雷. 基于 GPS 和 GIS 的精细农业信息处理系统研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 145–148.
- [36] 佟玲, 康绍忠, 杨秀英, 等. 石羊河流域参考作物蒸发蒸腾量空间分布规律的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(6): 432–435.
- [37] 邵东国, 郭元裕, 沈佩君. 区域农业灌溉用水量长期预报模型研究[J]. 灌溉排水, 1998, 17(3): 26–31.
- [38] 郭宗楼, 白宪台, 马学强. 作物需水量灰色预测模型[J]. 水电能源科学, 1995, 13(3): 186–192.
- [39] 付强, 潘峰, 金菊良. 基于自激励门限自回归模型的井灌水稻需水量预测[J]. 水利水电技术, 2002, 33(7): 31–34.
- [40] 赵正宜, 朱庭芸. 水稻的优化灌溉定额、耗水量与参量的关系[J]. 灌溉排水, 1990, 9(2): 9–14.
- [41] 李远华, 崔运来, 杨场武. 漳河灌区实时灌溉预报研究[J]. 水科学进展, 1997, (1): 71–77.
- [42] 陈志军. 灌溉发展需求预测人工神经网络模型的建立与应用[J]. 水利学报, 1998, (2): 1–6.
- [43] 魏占民, 陈亚新, 史海滨, 等. BP 神经网络的春小麦作物水模型的初步研究[J]. 灌溉排水, 2002, 21(2): 12–16.
- [44] 付强, 王立坤, 王兆菡. 井灌水稻需水量预测的人工神经网络模型研究[J]. 灌溉排水, 2002, 21(1): 29–33.
- [45] 刘丙军, 邵东国. 基于信息熵原理的作物需水尺度转换研究[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1439–1444.
- [46] 刘丙军, 邵东国, 沈新平. 参考作物腾发量时间分形特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(5): 9–13.

Advances in researches on the spatial-temporal features of crop water requirement

Liu Bingjun^{1,2}, Shao Dongguo², Shen Xinping²

(1. *Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;*

2. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: Influenced by meteorological, soil, planting conditions and so on, crop water requirement is obviously characterized by its spatial-temporal heterogeneity on different scales. As the result of this heterogeneity, the theories and models of crop water requirement were highly scale-dependent. The calculation method of spatial-temporal features of crop water requirement was expounded. Finally, this paper suggests that, based on the experimental data, a new multi-scale crop water requirement estimating model of theoretical basis and wide application should be developed, and the spatial-temporal features of crop water requirement should be analyzed, using the complexity theories such as the fractal theory, the wavelet analysis and the information entropy approach.

Key words: crop water requirement; water requirement determination; the spatial-temporal features; research advance