

国外蒸发研究的进展

左大康 覃文汉

(中国科学院 地理研究所)
(国家计划委员会)

一、历史回顾

随着地表能量交换与物质迁移过程研究的深入及水资源合理利用与管理定量化的迫切要求,蒸发问题越来越受到人们的重视,研究蒸发的紧迫性与重要性也愈来愈明显。国际上对蒸发的研究已有近三百年的历史,至今已取得了一系列成果^[1]。Dalton 1802年首先综合了风及空气温、湿度对蒸发的影响提出了著名的道尔顿蒸发定律,它对近代蒸发理论的创立有决定性的作用。以后,通过地表能量平衡方程得到的计算蒸发的包文比——能量平衡法(BREB法)(Bowen, 1926)及利用近地边界层相似理论的空气动力学方法(Thornthwaite and Holzman, 1939)也相继出现。1948年,Thornthwaite和 Penman同时提出了“蒸发力”的概念及相应的计算公式。其中, Penman的综合法具有坚实的理论基础,目前仍为湿润下垫面蒸发计算的主要方法。Swinbank 1951年首先提出用涡度相关法直接测量并计算各种湍流通量,其精度是目前蒸发计算方法中最好的。Monteith^[2]于1963年通过引入表面阻力的概念导出了Penman—Monteith (P—M)公式,为非饱和下垫面的蒸发研究开辟了一条新的途径。Priestley and Taylor^[3] 1972年推导出湿润气候条件下蒸发估算公式,并在湿润或半湿润区域实际蒸发计算中得到了较好的应用^[4]。从降水、蒸发与蒸发力等要素的相互关系出发,苏联学者在五十年代曾提出大区域年平均蒸发量的气候学估算公式及根据地表水量平衡原理的流域蒸发计算的水量平衡法^[5]。Bonchet, Morton等利用蒸发与蒸发力的互补关系对长时段、大区域的实际蒸发量也进行了气候计算。根据不同区域下垫面状况和气候特征,通过分析不同环境因子对蒸发过程的影响,建立单因子或多个气象或环境要素同蒸发的经验或半经验统计模式也是计算某一特定区域蒸发量的一种简便实用的方法^[7]。另外,从土壤水运动规律出发结合土壤物理学原理来确定蒸发量是蒸发计算领域另一重要的分支。Hillel^[8]等对此均有系统的评述和较深入的研究。鉴于目前蒸发计算的方法众多并涉及不同的学科领域, Rose and Sharma^[9]对目前所有的蒸发计算法进行了归类及评述。按其分类观点,下面着重就近二十年来国际上用于蒸发计算的微气象学方法的发展过程进行简要的评述与展望。

二、七十年代以来的进展

计算技术的发展与实验设备和观测手段的提高使得近二十年来蒸发计算领域出现了许多

新的进展,可主要从以下三个方面加以概括。

(一) 传统计算方法的评价与改进

随着对粗糙下垫面上气象场特征研究的深入,人们对传统方法有很多新的认识。近年来许多野外观测和风洞实验^[10-12]均表明,在紧贴粗糙下垫面(如高秆作物田,森林等)的气层中,存在着一个与上部惯性层性质不同的粗糙层,其厚度与粗糙体的几何特征有关,一般不小于粗糙体的平均高度。在粗糙层内,由于受尾流扩散和热量、水流源汇空间分布的影响,常用的通量—梯度廓线关系基本上不成立。动量、热量与水流的湍流交换系数比在同高度惯性层内明显偏大(在中性条件下此值约为2.0^[12])。Raupach等^[10]就粗糙层对空气动力阻力的影响提出了相应的订正方法。在植物群体中,由于热量、水汽的源汇面通常低于动量汇面使其各自的粗糙度和空气动力阻力互不相等^[13,14]。Thom^[13]对热量(也可用于水汽)提出了超额阻力的概念并用它对传统的阻力计算公式进行订正。另外,当下垫面较粗糙时,根据对数风廓线原理确定零平面位移(d)通常因梯度资料受粗糙层的影响而产生明显的误差^[11]。对于植物群体,最好把 d 作为群体对动量吸收的平均高度用群体中实测风廓线资料来估算^[15],且其结果不受植被覆盖率的影响。综上所述,由于梯度观测高度通常未必高于粗糙层的顶部以及粗糙层对湍流场的复杂影响,用传统的空气动力学方法计算粗糙下垫面的蒸发量一般会带来较大误差^[11]。但对于较光滑的下垫面(如低矮、密闭的植被与草地),根据实测的风和温度廓线资料并利用Deacon数检验法较客观地确定出非中性层结下的层结订正函数,可以使空气动力学方法的精度有所提高^[16]。

BREB法一直被认为是较可靠的蒸发算法。但在下垫面很湿润(通常有逆温层存在)的情形下,由于空气的温、湿铅直廓线的非相似性导致热量与水汽的湍流交换系数的非等同性,使得BREB法的结果偏低,精度下降^[17]。除此之外,在早晚时段或非常干燥的天气条件下,BREB法的误差也较大^[18]。

气孔阻力和表面阻力(对植被地,常称为冠层阻力)的参数化估算是蒸发计算领域的一个重要方面,也是P-M公式类模式能够大范围推广应用的前提^[19]。因此,气孔运动与环境因素间的内在关系一直被许多学者所关注^[20]。在影响气孔运动的诸多环境因素中,光照强度、叶—气水汽压差及根部土水势是基本因素,其他因素(如叶水势、叶—气温差等)的变化及影响均可通过这三个基本因素的影响综合反映出来^[21]。光强是气孔开闭的启动因子。在未受其他因素限制的情况下,气孔阻力与光强呈双曲线函数规律^[22,23]。叶—气水汽压差(Δe)是大气蒸发力和叶片水分状况的综合反映,一般认为它对气孔运动有负反馈影响。但近年来的研究表明, Δe 对气孔还存在一种直接作用,即水汽压差的增加使气孔腔四周细胞的水分蒸发加速,导致保卫细胞水势下降最终使得气孔关闭,它与负反馈作用通常是同步的^[21,24]。土壤水势通常与上述两因素共同作用来影响气孔运动。除非在十分干燥的环境中,根区上水势大小是影响叶水势及膨压日际变化的主要因素。当它明显地低于田间持水量的临界水势时,它对气孔阻力的影响十分显著^[25,26]。在综合各种环境因素对气孔影响的基础上,许多计算气孔阻力的数学模式已相继建立,并在实用中显示出较好的效果^[27-29]。由于气孔阻力随作物种类、叶子生长状况等均有变化,加之许多生理因素及前期植物内部水分状况对当时气孔运动的影响使得气孔对环境因素变化的反应具有滞后性和不确定性^[20,21],因

此目前的研究还停留在半定量的基础上。对于矮小、密闭的植物群体(如草地)其表面阻力可以通过叶面积指数与叶片气孔阻力近似计算出来^[2]。而对于稀疏、粗糙的群体,其群体结构的复杂性使表面阻力的准确计算困难化^[30],虽然对于较长时段用气候资料来估算大范围的表面阻力也可满足一定需要^[31]。就目前来说,表面阻力计算的困难性及下垫面粗糙层对空气动力阻力的影响使得P-M公式在稀疏的农田,森林等其他复杂下垫面上的应用大受限制。

综上所述,传统的蒸发计算方法在下垫面比较光滑、供水适中时可获得较理想的结果。当下垫面较粗糙时,粗糙层的影响使常用的边界层相似理论难以运用,加之各种通量的源汇高度的非一致性又使基于活动面特性的方法(如P-M公式型模式及余项法)因其中参数(空气动力阻力和表面阻力)难以准确估算而导致精度降低。而对密闭群体,可较精确地进行订正^[10,30]。就BREB法及空气动力学方法来说,只有当温湿廓线分布形式一致时才能保证其计算精度。涡度相关法以其坚实的理论基础可部分地弥补上述不足。近年来仪器加工技术的发展使其得到了广泛运用,且将是今后精确计算均匀下垫面蒸发量的主要方法^[32,33]。但总的来说传统方法因其局限性(如需要进行要素的梯度观测或下垫面阻力测定及其他技术上困难)难以推广于大面积区域上的蒸发计算。

(二) 考虑植物与大气相互作用机制的模拟方法

随着植物微气象学的发展,人们试图通过模拟植被中能量、物质交换过程来更精确地计算其总蒸发量,以克服传统方法所存在的上述缺陷。Penman and Long^[34]1960年通过直接观测小麦群体中不同高度的辐射和温湿度变化开创了群体内湍流交换研究的先例。以后基于群体上部空气中气象观测和群体下部的土壤湿度资料通过模拟SPAC(Soil-Plant-Atmosphere-Continuum)中能量、物质交换过程来计算植物蒸腾、土壤蒸发及植被中辐射、温、湿、风廓线的单层或多层解析模式相继出现^[30,35-37],并逐渐发展到能考虑植物含水量变化^[38]和降水、截留、凝结等因素的影响^[39]。然而这些模式有一个共同的缺陷,就是虽然大部分考虑了土壤蒸发的影响,但均不能将它与植被蒸腾分别计算出来。对于稀疏群体,土壤蒸发的影响很大是显而易见的,特别是土壤表层很湿时^[9]。对中等密度的群体(叶面积指数在2—3时)许多研究表明,表层湿土的蒸发也能占总蒸发的30—50%^[24,39]。既使对密闭群体,如果表土湿润,群体的中、下部均可能有净的、向下的感热通量,为潮湿表土蒸发提供能量,在总蒸发中它也能占相当比例^[10,41]。当表土干燥时,土壤的影响如何目前还无定论。Shuttleworth^[42]在其以前研究的基础上^[37]假定群体中热量和水汽为单源汇型,推导出任意植被覆盖度下分别计算植被蒸腾和土壤蒸发的理论模式,使土壤影响效应得以量化(敏感性分析结果与前面的结论基本一致)。虽然其中某些参数目前还难以精确估算而影响其实用性,但在理论上不能不说是继Monteith 1963年工作后蒸发计算领域的又一大突破,意义非常重大。

模拟方法虽然精确却很复杂,需要输入的参量往往也较多。为了使它能实用必须弄清楚太阳辐射、风等要素在群体中的分布规律以及群体中湍流交换状况。Ross^[40], Goudriaan^[43]及Norman^[44]等从群体结构的特征出发,研究了太阳辐射在群体中的铅直分布结构。对于群体中风和湍流通量的铅直分布,六十年代以来这方面的野外观测和风洞实验研究逐渐增

多^[11,45,46]。值得指出的是,由于湍流本身的非局地性,植株尾流和摆动以及反梯度方向的通量输送等^[11,47,48]的影响,常用的局地扩散方程在群体中一般是不适用的。八十年代以来,观测脉动量仪器的发展使群体中湍流交换的研究进展迅速^[49]。

模拟方法是近二十多年来才逐步发展起来的,是研究SPAC中能量、物质交换的有力工具。虽然因群体中湍流交换的复杂性使其目前还未能达到实用程度,但是由于它是从群体中水、热通量等的传输机制出发来研究蒸发过程,具有较牢固的物理基础,对我们深入了能蒸发的物理过程,建立更加简便、精确的计算模式是很重要的。另外,随着对群体中湍流过程研究的深入和计算手段的提高,模拟法今后也可能成为精确计算植被总蒸发的实用方法。

(三) 利用遥感信息计算区域蒸发的遥感方法

蒸发计算的传统方法和模拟方法都是以点上观测为基础的。由于下垫面几何结构及物理性质的水平非均匀性,一般很难在大面积区域上推广应用。遥感技术的出现和发展为这个问题的解决带来了新的希望。多时相、多光谱及倾斜角度的遥感资料能够综合地反映出下垫面的几何结构和热、湿状况,特别是表面热红外温度能够客观地反映出近地层湍流热通量大小和下垫面干湿差异^[50-52](即土壤含水量的水平非均匀状况),使得遥感方法比常规的微气象学方法精度高^[53,54],尤其在区域蒸发计算方面具有明显的优越性^[55]。七十年代初以来,国外就相继开展这方面的工作,至今已取得了一系列成果^[56],并逐渐从以点上的红外测温资料和瞬时(通常是正午时分)的遥感信息计算日平均蒸发量过渡到以多光谱的卫片资料来计算净辐射和区域蒸发量。但是它们所采用的基本模式均为依据地表能量平衡方程的余项法,关于它的一些主要问题下面将详细讨论。最近出现了以单层的SPAC模式为基础,利用参数化的冠层阻力公式或对表面温度变化的时间序列进行傅里叶分析来计算区域土壤热惯量和植被地总蒸发量的模式,并获得较好的模拟效果^[57,58]。

虽然遥感方法的应用前景十分广阔,但目前在区域(特别是在下垫面较复杂的区域)上运用的精度往往达不到实际要求,主要原因可大致从以下三个方面来分析,即① 热红外表面温度、资料的物理实质;② 平流影响的估算(即点上模式在面上应用的误差大小);③ 对较复杂的下垫面区域,各种气象参数(如温度,风及粗糙度等)的空间分布规律。关于第一个问题,Kimes等^[59,60]曾从理论和实验上进行了探讨,并指出遥感所得的表面温度实质上是群体几何结构、群体温度垂直廓线和上表温度的函数,并受群体比辐射率,太阳高度角和仪器视角大小等因素的影响,并不能直接代表真正的群体平均温度(即热源和水汽源面上的温度)。因而在群体较稀疏时,余项法的精度不高^[53]。除此之外,Huband等^[61]的结果还表明,红外温度随红外仪的观测视角和方位角的不同而明显变化,群体比辐射率也受观测角和群体有效反射率的影响。故此,他们分别提出了一套获取有代表性、真正反映群体平均温度大小的观测或计算方法。因为动量汇的平均温度与遥感所得的表面温度通常是不等同的,对于较粗糙群体,在用后者计算群体上部的感热通量时还必须考虑热量传输的超额阻力^[61]。关于后两个问题,由于其复杂性,目前所用的模式还很少考虑它,虽然目前已能用微波散射计测量区域风速分布。Reginato等^[62]曾采用过简单的内插和外推方法根据离散的台站气象资料来模拟连续的温度、风等要素的空间变化,并与区域的遥感资料相结合计算该区域的蒸发量。这种简单的线性外推方法当然是相当粗糙的,不能反映出复杂下垫面对气象场的影响^[62]。

目前,研究非均匀下垫面区域气象场结构的工作越来越多,这将为遥感方法的进一步推广应用奠定基础。从理论上分析,对于结构非常复杂的下垫面,上述两个问题的解决归结于在具体边界条件下求解一组三维的湍流扩散方程。这虽然可以在小区域内进行模拟研究,但对于复杂的自然下垫面,还有许多问题有待于进一步深入探讨。

综观近二十多年来国际上蒸发计算工作的发展可知,虽然传统方法存在许多缺陷,但由于其简单、实用,目前仍为蒸发计算的常规方法。模拟方法现在还处于理论探索阶段,虽然精确,却很复杂,难以推广运用。但它可以为新模式的建立及对传统方法的改进提供理论依据。遥感方法目前正处于发展阶段,还有许多问题有待于解决。因它能够提供面上的资料,实用价值大,应用前景十分广阔。

近几年来,由于观测手段的提高,国际上蒸发计算领域又出现了新的特点,即从湍流场基本特征的研究出发来探讨活动层内(对植物而言)、外的湍流交换过程,直接计算出各种湍流通量。就传统方法来说,涡度相关法已逐渐成为短时段粗糙下垫面蒸发量的主要计算方法,且常将它作为检验其他方法精度的标准之一,或以它为依据研究植物群体内、外物质、能量的交换过程。在模拟研究领域,直接对植物-大气间湍流交换过程进行二维或三维数值模拟的工作越来越多。由于它考虑了下垫面非均匀结构的影响,克服了传统方法的某些缺陷在遥感蒸发方面,研究重点已过渡到利用多光谱、多时相遥感和台站气象资料来估算区域蒸发量。因此,从近地边界层二维或三维的湍流交换特征(包括植被-大气间湍流交换)的模拟研究或遥感信息出发来计算任意时空范围内的蒸发量,将是今后蒸发计算研究的两个主要发展方向。

我国的蒸发研究同国外的工作相比还存在较大差距^[63]。因此,我们必须既重视理论研究(包括建立数学模式),又重视实验工作,要立足于国际上的最新成果和我国现有的技术手段,寻求具有坚实的物理基础且便于推广应用的计算模式。从现有的条件来分析,将模拟研究的成果与遥感信息相结合,通过考虑平流的影响来计算区域蒸发,似乎是较切合实际的方案之一。

参 考 文 献

- [1] Brutsaert, W., 1982, *Evaporation into the atmosphere*, D.Reidel Publ.Co., Dordrecht, Holland.
- [2] Monteith, J.L., 1963, *Environmental control of plant growth* (L.T.Evans. ed.) P95-112, Academic Press, New York.
- [3] Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, 1972, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Monthly Weath. Rev.*, 100, 81-92.
- [4] Mawdsley, J.A. et al., 1985, Estimating nonpotential evapotranspiration by means of the equilibrium evaporation concept, *Water Resour. Res.*, 21, 3.
- [5] 布德柯著;李怀瑾等译:地表面热量平衡,科学出版社,1960年。
- [6] Morton, F.I., 1975, Estimating evaporation and transpiration from climatological observations, *J. Appl. Meteor.*, 14, 488-497.
- [7] Jensen, M.E. (ed.), 1973, *Consumptive use of water and irrigation water requirements* Amer. Soc. Civil Engineers.

- [8] Hillel, D., 1980. Applications of soil physics, New York. Academic press.
- [9] Rose, C.W. and M.L. Sharama, 1984. Summary and recommendations of the work-shop on 'evapotranspiration from plant communities', Agric. Water Mgt., 8, 325-342.
- [10] Raupach, M.R. et al., 1980. A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surface, Boundary Layer Meteor., 18, 373-97.
- [11] Raupach, M.R. and A.S. Thom, 1981. Turbulence in and above plant canopies Ann Rev. Fluid Mech., 13, 97-129.
- [12] Raupach, M.R. and B.J. Legg, 1984. The uses and limitations of flux-gradient relationships in micrometeorology, Agric. Water Mgt., 8, 119-132.
- [13] Thom, A.S., 1972. Momentum, mass and heat exchange of vegetation, Quart. J. R. Met. Soc., 98, 124-134.
- [14] Brutsaert, W., 1979. Heat and mass transfer to and from surface with dense vegetation or similar Permeable roughness, Boundary Layer Meteor., 16, 365-388.
- [15] Thom, A.S., 1971. Momentum absorption by vegetation, Quart. J. R. Met. Soc., 97, 414-428.
- [16] Viswanadham, Y., 1982. Examination of the empirical flux-profile models in the atmospheric surface boundary layer, Boundary Layer Meteor., 22, 61-77.
- [17] Lang, A.R.G. et al., 1983. Inequality of eddy transfer coefficients for vertical transport of sensible and latent heats during advective inversion, Boundary Layer Meteor., 25, 25-41.
- [18] Angus, D.E. and P.J. Watts, 1984. Evapotranspiration---How good is the bowen ratio method? Agric. Water Mgt., 8, 133-150.
- [19] Stewart, J.B., 1983. A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating crop evaporation, Agric. Meteor., 30, 111-127.
- [20] Hall, A.E. et al., 1976. Water and plant life (O.L. Lange, et al., ed.) P169-187. Berlin: Springer-Verlag.
- [21] Cowan, I.R., 1977. Stomatal behaviour and environment, Adv. Bot. Res., 4, 117-228.
- [22] Turner, N.C. and J.E. Begg, 1973. Stomatal behavior and water status of maize, sorghum, and tobacco under field conditions, I. At high soil water potential, Plant Physiol., 51, 31-36.
- [23] Denmead, O.T. and B.D. Millar, 1976. Field studies of the conductance of wheat leave and transpiration, Agron. J., 68, 307-311.
- [24] Jones, H.G., 1983. Plants and microclimate, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [25] Turner, N.C., 1974. Stomatal behavior and water status of maize, sorghum, and tobacco under field conditions, II. At low soil water potential, Plant Physiol., 53, 360-365.
- [26] Tan, C.S. and T.A. Black, 1976. Factors affecting the canopy resistance of a Douglas-Fir forest, Boundary Layer Meteor., 10, 475-488.
- [27] Inoue, K. and Z. Uchijima, 1984. The relationship of rice stomatal resistance with radiation intensity and air humidity, J. Agric. Meteor., 40, 3.
- [28] Avissar, R. et al., 1985. A model of stomatal responses to the diurnal variation of environmental factors, Agric. Forest Meteor., 34, 21-29.
- [29] Baldocchi, D.D. et al., 1987. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces, Atmos. Environ., 21, 91-101.
- [30] Monteith, J.L. (ed.), 1975. Vegetation and the atmosphere, Vol. 1. Principles. Academic Press, London.
- [31] Lindroth, A., 1985. Canopy conductance of coniferous forests related to climate, Water

Resour.Res., 21: 3.

- [32] Garratt, J.R., 1984. The measurement of evaporation by meteorological methods, *Agric. Water Mgt.*, 8,99-117.
- [33] Verma, S.B.et al., 1986.Eddy fluxes of CO_2 , water vapor and sensible heat over a deciduous forest, *Boundary Layer Meteor.*,36,71-92.
- [34] Penman, H.L.and J. F. Long, 1960. weather in Wheat, an essay in micrometeorology, *Quart.J.R. Met. Soc.*, 86,1-50.
- [35] de Vries, D.A.and N.H.Afgan, 1975.Heat and mass transfer in the biosphere, Scripta Book Company, Washington, D.C.
- [36] Sinclair, T.R.et al., 1976.Development and evaluation of simplified models for simulating canopy photosynthesis and transpiration, *J. Appl.Eco.*,13, 3.
- [37] Shuttleworth, W.J., 1979.Below-canopy fluxes in a simplified one dimensional theoretical description of vegetation-atmosphere interaction, *Boundary Layer Meteor.*,17,315-331.
- [38] Kowalik, P.J.and N.C.Turner, 1983.Irrigation science, 4: 4.
- [39] Norman, J.M,anc G.S.Compbell, 1983.Advance in irrigation, Vol.2,155-188.
- [40] Denmead, O.T.,1984.Plant physiological methods for studying evapotranspiration: Problems of telling the forest from the trees, *Agric. Water Mgt.*,8,167-90.
- [41] Walker, G.K.,1984.Evaporation from wet soil surface beneath plant canopies, *Agric.For-est Meteor.*,33,259-264.
- [42] Shuttleworth, W.J.,1985.Evaporation from Sparse crop---an energy combination theory, *Quart.J.R.Met.Soc.*, 111,839-855.
- [43] Goudriaan, J.,1977.Crop micrometeorology, a simulation study, Pudoc Wageingen.
- [44] Norman,J.M.,1979.Modification of the aerial environment of crops (B.J.Barfield, and J. F.Gerber ed.) , P249-277, Amer. Soc.Agric.Engineers.
- [45] Legg, B.J., 1975. The turbulent dispersion with wheat canopy (I, II),*Quart.J.R.Met. Soc.*, 101. 597-628.
- [46] Inoue, K.and Z.Uchijima, 1979.Experimental study of microstructure of wind turbulence in rice and maize canopies, *Bull.Natl.Inst.Agric.Sci.*, Ser.A, 26, 1-88.
- [47] Shaw, R.H., 1977. Secondary windspeed maxima inside plant canopies, *J.Appl.Meteor.*, 16,514-521.
- [48] Finnigan, J.J., 1979.Turbulence in waving wheat, *Boundary Layer Meteor.*, 16, 181-236.
- [49] Legg, B.J.et al., 1986.Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy, PartII: an elevated line source, *Boundary Layer Meteor.*, 35,277-302.
- [50] Jackson, R.D.et al., 1979.Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops, *Appl.Opt.*, 18, 22.
- [51] Gardner, B.R.et al., 1981.Relationship between crop temperature and the physiological and phenological developement of differentially irrigated corn, *Agron.J.*, 73: 1.
- [52] Jackson, R.D., 1982. Advances in irrigation (D. Hillel ed) .Vol.1, P43-85.Academic Press, New York.
- [53] Hatfield, J.L.et al., 1984.Evaluation of canopy temperature---evapotranspiration models over various surfaces, *Agric.Forest Meteor.*, 32, 41-53.
- [54] Huband, N.D.S.and J.L Monteith, 1986.Radiative surface temperature and energy balance of a wheat capoy, II: Estimating fluxes of sensible and latent heat, *Boundary Layer Meteor.*, 36, 107-116.

- [55] Soer, C.J.R., 1980. Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperature, *Rem. Sens. Environ.*, 9, 27-45.
- [56] Reginato, R.J. et al., 1985. Evapotranspiration calculated from remote multi-spectral and ground station meteorological data, *Rem. Sens. Environ.*, 18, 75-89.
- [57] Taconet, O. et al., 1986. Evapotranspiration over an agriculture region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data, *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 284-307.
- [58] Abdellaoui, A. et al., 1986. Use of meteosat for mapping thermal inertia and evapotranspiration over a limited region of Mali, *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 1489-1506.
- [59] Kimes, D.S., 1980. Effects of vegetation canopy structure on remotely sensed canopy temperature, *Rem. Sens. Environ.*, 10, 165-174.
- [60] Kimes, D.S. et al., 1980. Complexities of nadir-looking radiometric temperature measurements of Plant canopy, *Appl. Opt.*, 19, 2162-2168.
- [61] Huband, N.D.S. and J.L. Monteith, 1986. Radiative surface temperature and energy balance of a wheat canopy I., Comparison of radiative and aerodynamic canopy temperature, *Boundary Layer Meteor.*, 36, 1-18.
- [62] 覃文汉: 非均匀下垫面气象场结构的研究及其应用, 地理集刊(待出), 科学出版社。
- [63] 唐登银等: 我国蒸发研究的概况与展望, 地理研究, 3(3), 1984年。

AREVIEW OF EVAPORATION STUDY IN THE WORLD

Zuo Dakang Qin Wenhan

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences and State Planning
Commission of The People's Republic of China)

Abstract

The achievement in the field of evaporation calculation in the world during last two decades is reviewed. The micrometeorological methods for calculating evaporation which are divided into three classes (traditional, simulating and remote sensing method) according to the physical mechanism they are based on, are summarized and discussed, and prospect is presented.

In spite of its faults (evidently in the case where ground surface is rough and unhomogeneous) the traditional method is still the routine one of calculating evaporation owing to its simplicity and practicality. On the contrary, the simulating way, though precise, is far from routine at present because of its complexity and intricacy. But it can theoretically offer ways to establish the new model and modify the traditional method. The remote sensing method is in the developing stages. Although many problems remain to be solved, it is much useful for practice and looks very promising because it can provide regional evaporation information.

During the 1980s, with improvement of experimental facilities the work in terms of calculating turbulent fluxes (Which include evaporation) by use of both numerical model describing the turbulent exchange processes between vegetation (or bare soil) and atmosphere and remote multispectral and multiphase data is more and more increasing. That is also two promising ways to calculate evaporation more accurately in future.