

干湿气候区划研究进展

毛飞¹, 孙涵², 杨红龙³

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 国家卫星气象中心遥感应用试验基地, 南宁 530022;

3. 中国农业科学院, 北京 100081)

摘要: 干湿气候区划是气候学、地理学、生态学和农学等学科的重要内容。自1900年以来, 国内外学者在干湿气候等级、干湿气候区划指标及其计算方法等方面取得了长足的进展。本文综述了近100多年来国内外学者关于干湿气候区划指标、潜在蒸散量计算方法、干湿气候等级及其命名方法等方面的研究成果, 提出了目前该领域存在的科学问题。

关键词: 中国; 干湿气候; 区划指标; 干湿气候等级

1 引言

干湿气候区划是气候学、地理学、生态学、农学等学科的重要研究内容, 广泛应用于气候区划^[1-3]、农业气候区划^[4-5]、自然区划^[6-7]、生态区划^[8-9]、气候变化^[10-12]、植被-气候分类^[13-15]等领域。虽然干旱气候与湿润气候是相对而言的, 但与农业生产、植被分布等联系起来, 就成一个相当复杂的气候学问题。近100多年来, 国内外学者曾提出过许多种干湿气候等级体系、划分干湿气候的指标及其计算方法, 由于研究者对干湿气候区理解不同、所研究的区域和目的不同以及受当时科学技术发展水平和观测资料的限制, 提出的干湿气候区等级体系及其划分指标各不相同, 难以比较。本文主要回顾和综述了近100多年来国内外学者关于干湿气候区划指标、潜在蒸散量计算方法、干湿气候等级及其命名方法等方面的研究成果, 提出了目前该领域存在的科学问题, 以促进干湿气候区划研究的进一步发展。

2 干湿气候区划指标及其界限

近100多年来, 国内外学者曾提出过许多种划分干湿气候区的指标, 可归纳为3类: ①降水量与蒸散量的比值; ②降水量和降水距平; ③根据降水

量、土壤水分、植物蒸腾之间的水分平衡确定干湿气候指标, 这对农业生产更有实际意义, 但受理论和技术条件的限制, 这类指标很少, 在实际应用上还有一定距离^[16]。第2类指标简便、意义明确, 但只考虑了水分的收入项, 没有水分平衡的概念。应用最广泛的是第1类指标。

自1900年杜库恰耶夫提出降水蒸发比指标以来, 一直被各国学者所采用, 只是计算蒸发的方法在不断的改变^[17]。早期的主流方法是用影响蒸发的主要气象因子估算蒸发量, 主要有温度法、饱和差法和辐射法; 随着科学的发展, 1947年以来的主流方法是用具有一定物理和生物学意义的理论公式计算蒸发量, 主要有Penman公式、Holdridge公式和Thornthwaite公式。

本文重点讨论第1类降水蒸发比指标及其界限, 并根据指标的应用范围分别按通用性指标、全国性指标和区域指标进行讨论。

2.1 通用性干湿气候区划指标及其界限

通用性指标主要指适用于多个国家和地区的干湿气候区划指标, 主要有9个:

2.1.1 杜库恰耶夫-维索茨基(V.V.Dokutchayev-G.N. Vyssotsky)降水蒸发比

1900年俄罗斯学者杜库恰耶夫首先提出降水蒸发比的概念。1905年维索茨基第一个定量计算

收稿日期: 2010-01; 修订日期: 2010-07.

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2008BAK50B02); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906029); 国家标准(GB_20078506_T_416); 气象行业标准(QX/T_2007_46)。

作者简介: 毛飞(1958-), 女, 博士, 研究员, 主要从事应用气象和生态环境研究。E-mail: MaoFei77@cams.cma.gov.cn

通讯作者: 孙涵(1955-), 男, 博士, 研究员, 主要从事应用气象和遥感应用研究。E-mail: sun_han@163.com

了 P/E_0 指数值,其中 P 为降水量(常用年降水量), E_0 为年可能蒸发量^[18-19]。

2.1.2 朗格(W. Lang)雨量指数

1915-1920年朗格提出雨量指数作为划分干湿气候的指标^[18-19],其计算公式为:

$$R = \frac{r}{\theta} \quad (1)$$

式中: R 为雨量指数; θ 为年平均气温,1920年改为气温在 0°C 以上月份的各月平均气温的平均值; r 为降水量,定义 R 值在 $0\sim 20$ 之间的地区为沙漠气候, $20\sim 40$ 为半沙漠气候。

2.1.3 德马顿(E. de Martonne)干燥指数

德马顿在1926年建立了干燥指数^[18-19]:

$$I = \frac{R}{t+10} \quad (2)$$

式中: I 为干燥指数; R 为年降水量; t 为年平均气温。定义 I 值小于5的地区为沙漠, $10\sim 20$ 为旱农耕作区, $t+10$ 接近零的地区此指数不适用。

2.1.4 谢良尼诺夫水热系数

1930年俄罗斯学者谢良尼诺夫提出一个水热系数^[18-19],其计算公式为: $HTC = \frac{r_{10}}{0.1 \sum t_{10}}$ (3)

式中: HTC 为水热系数; $\sum t_{10}$ 为日平均气温大于 10°C 期间的积温; r_{10} 为同期的降水总量;分母上系数0.1表示若降水量与 $1/10$ 的积温值相当,则干湿适中,水热系数等于1。定义 HTC 小于0.5的地区为干旱区, $0.5\sim 1.0$ 的地区为半干旱区,大于1.0的地区为湿润区。谢良尼诺夫的水热系数在中国应用较广。

2.1.5 Thornthwaite P-E 指数

Thornthwaite在1931年提出用P-E指数作为干湿气候区划指标^[20]: $P-E = \sum_1^{12} 115 \left(\frac{P}{T-10} \right)^{\frac{10}{9}}$ (4)

式中: $P-E$ 为P-E指数; T 为月平均温度($^\circ\text{F}$); p 为月降水量(in, $1\text{ in}=2.54\text{ cm}$); 12为一年12个月。在这一指数中,Thornthwaite用温度估算蒸发量,并定义 $P-E$ 值大于127的地区为过湿区, $64\sim 127$ 为湿润区, $32\sim 63$ 为半湿润区, $16\sim 31$ 为半干燥区,小于16为干燥区。

2.1.6 Thornthwaite 湿润指数

在过去研究基础上,Thornthwaite在1948年提出新的湿润指数作为干湿气候区划指标,并在1955年对指标的分类界限和计算公式作了某些修正,定

义湿润指数大于100的地区为过湿区, $20\sim 100$ 为潮湿区, $0\sim 20$ 为湿润区, $-33.3\sim 0$ 为半湿润区, $-66.7\sim -33.3$ 为半干燥区, $-100\sim -66.7$ 为干燥区。湿润指数的计算公式如下^[20-21]:

$$I_m = \sum_1^{12} 100 \left(\frac{P}{PE} - 1 \right) \quad (5)$$

式中: I_m 为湿润指数; PE 为月可能蒸散量(cm); P 为月降水量(cm); 12为一年12个月。其中 PE 按下式计算:

$$PE = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (6)$$

式中: T 为月平均温度($^\circ\text{C}$); I 为热指数; a 为因地而异的常数。 I 和 a 由下式确定: $I = \sum_1^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$ (7)

$$a = a_1 I^3 + a_2 I^2 + a_3 I + a_4 \quad (8)$$

式中: $a_1=6.75 \times 10^{-7}$; $a_2=-7.71 \times 10^{-5}$; $a_3=1.79 \times 10^{-2}$; $a_4=4.92 \times 10^{-1}$ 。

Thornthwaite在推算公式(5)时,假定1个月为30天,每天的可照时数为12小时,每月计360小时。对于不同纬度和不同日期来说,由于可照时数不同,需对公式(5)进行订正,设某地某月实际可照时数为 $S(\text{h})$,则订正后的可能蒸散量为:

$$PE = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \frac{S}{360} \quad (9)$$

式中:符号和单位同上。在这一指数中,Thornthwaite以温度为主,结合日照时数估算蒸发量。公式(9)是国际上广泛采用的计算可能蒸散量方法^[22]。

2.1.7 Holdridge 可能蒸散率(PER)

1947年美国植物生态学家Holdridge基于植物生物温度提出了可能蒸散率计算方法^[23-25]:

$$PER = \frac{PET}{P} \quad (10)$$

式中: PER 为可能蒸散率; PET 为年可能蒸散量(mm); P 为年降水量(cm)。 PET 按下式计算:

$$PET = 58.93 \times BT \quad (11)$$

式中: BT 为年平均生物温度($^\circ\text{C}$),由下式确定:

$$BT = \frac{\sum t}{365} \text{ 或 } BT = \frac{\sum T}{12} \quad (12)$$

式中: t 为日平均温度; T 为月平均温度,当 t 或 T 大于 30°C 时按 30°C 计算,低于 0°C 时按 0°C 计算。定义可能蒸散率 PER 值 $0.125\sim 0.25$ 的地区为超湿润区, $0.25\sim 0.50$ 为极湿润区, $0.50\sim 1.00$ 为湿润区, $1.00\sim 2.00$ 为亚湿润区, $2.00\sim 4.00$ 为半干旱区, $4.00\sim 8.00$ 为干旱区, $8.00\sim 16.00$ 为极干旱区, $16.00\sim 32.00$ 为超干旱区。

Holdridge 根据年平均生物温度(BT)、年降水量

(P)和可能蒸散率(PER)建立了生命地带分类系统,并已在国际上受到重视和广泛应用,其中国内学者张新时利用Holdridge方法绘制的中国生命地带分布图与中国的植被分布带间有较好对应性^[26-27]。

2.1.8 Budyko 辐射干燥指数

1948年Budyko从地表热量平衡和水分平衡原理出发,利用辐射平衡计算可能蒸发,按照辐射平衡和蒸发耗热这两个物理量的适当组合提出用辐射干燥指数作为干湿气候区划分指标,定义辐射干燥指数大于3为湿润极不足区,2~3为湿润不足区,1~2为湿润略不足区,0.8~1为湿润区,0~0.8为过渡湿润区。辐射干燥指数的计算公式如下^[20,28-29]:

$$I_r = \frac{B}{LR} \quad (13)$$

式中: I_r 为辐射干燥指数; B 为辐射平衡; L 为蒸发潜热; R 为降水量; LR 为降水全部蒸发掉所消耗热能。在这一指数中,布德科用 B/L 代替蒸发量。

2.1.9 联合国干湿气候指标

1994年10月联合国防治荒漠化公约从全球角度给出了荒漠化的新定义:“荒漠化系指包括气候变异和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化”,其中“干旱、半干旱和半湿润干旱地区”指年降水量与可能蒸散量之比在0.05~0.65之间的大陆地区,推荐用Thornthwaite方法计算可能蒸散量。定义比值0.05~0.20的地区为干旱区,0.20~0.50为半干旱区,0.50~0.65为半湿润干旱区^[30]。

2.2 全国性干湿气候区划指标及其界限

全国性指标主要指用于全国的干湿气候区划指标。主要有:

2.2.1 张宝堃干燥度

1954年中国科学院开始全国气候区划工作,由张宝堃、朱岗昆负责,他们以谢良尼诺夫的水热系数(公式3)为依据,修订了大于 10°C 的积温与同期降水量之比的计算公式,将系数改为0.16,这是根据国情,假定秦岭、淮河一带的可能蒸发量和降水量接近平衡,对照其他自然景观而确定的,并将分子与分母作了互换,称作干燥度,即:

$$K = \frac{0.16 \sum t_{10}}{r_{10}} \quad (14)$$

式中: K 为干燥度。以此作为干湿气候区划指标,把中国分为5个干湿气候区,其中 K 小于0.49的地区为过湿区,0.5~0.99的地区为湿润区,1.0~1.49的

地区为半湿润区,1.5~3.99的地区为半干旱区,大于4.0的地区为干旱区^[1,31]。

干燥度(公式14)提出后,被国内许多学者采用,但气候区的界限值不尽相同。如黄秉维在中国综合自然区划中把全国分为4个干湿气候区,定义 K 小于1.0的地区为湿润区,1.0~1.5为半湿润区,1.5~2.0为半干旱区,大于2.0为干旱区^[32]。赵松乔在中国综合自然地理区划中也采用了干燥度作为划分自然地区的主要气候指标^[33]。丘宝剑在划分我国干湿气候类型时,用干燥度把全国分为6个干湿气候区,并定义干燥度小于0.5的地区为潮湿区,0.5~1.0为湿润区,1.0~2.0为半湿润区,2.0~4.0为半干旱区,4.0~16.0为干旱区,大于16.0为干燥区^[34]。

2.2.2 卢其尧干燥度

1965年卢其尧等^[35]用Д.И.沙什科的干燥度指标把我国的干湿期分为潮期、湿期、早期和干期4种类型,干燥度小于0.75为潮期,0.75~2.3为湿期,2.4~7.2为早期,大于7.2为干期。进一步根据干湿期的地域分布和季节变化规律,把全国分为潮湿区、湿润区、半湿润区、半干旱区、干旱区和干燥区6

个区。干燥度计算公式: $D = \frac{\sum d}{r}$ (15)

式中: D 为干燥度; $\sum d$ 为月饱和差总量(mb); r 为月降水量(mm)。

2.2.3 钱纪良干燥度

1965年钱纪良等^[36]用年可能蒸发量与年降水量的比值划分全国干湿气候区,比值小于1.0的地区为湿润区,1.0~1.5为半湿润区,1.5~2.0为半干燥区,大于2.0为干燥区。 $K_{ep} = \frac{Er}{P}$ (16)

式中: K_{ep} 为干燥度; Er 为年可能蒸发量(mm); P 为年降水量(mm)。

可能蒸发量用Penman公式计算^[37],即:

$$Er = fE_0 \quad (17)$$

式中: f 是随季节变化的系数,11-2月为0.6,5-8月为0.8,其余各月为0.7; E_0 为水面蒸发量,由下式计

$$\text{算: } E_0 = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} H + E_a}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} \quad (18)$$

式中: Δ 为饱和水汽压曲线斜率; γ 为干湿表常数; H 为辐射平衡; E_a 为水面附近的空气干燥力,由下

$$E_a = 0.35(1 + \frac{u_2}{100})(e_a - e_d) \quad (19)$$

面的公式求得： $E_a = 0.35(1 + \frac{u_2}{100})(e_a - e_d)$ (19) 式中： u_2 为 2m 高度处风速 (mile/d)； $e_a - e_d$ 为饱和差。钱纪良等认为 Penman 公式考虑的因子比较多，比较适合中国气候复杂、气候因子多变的特点。不少国家和地区也曾使用 Penman 公式并获好评。因此，可以认为钱纪良等提出的方法代表了当时的先进水平，并被其他学者接受。如 1979 年中央气象局编制的《中华人民共和国气候图集》中，气候区划图中的干湿气候区划分指标采用了钱纪良等的干燥度，但界限值却不尽相同，定义干燥度小于 1.0 的地区为湿润区，1.00~1.49 为亚湿润区，1.5~3.49 为亚干旱区，大于 3.50 为干旱区^[38]。

2.2.4 陈明荣干燥度

1974 年陈明荣^[16]分析比较了温度-降水型、饱和差-降水型和辐射平衡-降水型 3 类指标。①温度-降水型，虽然气温在相当大的程度上能反映蒸发力的大小，且资料年代长、容获取，但只是影响蒸发的一个重要因素，在某些情况下，只能表示蒸发力的特征，而不能确切的表示蒸发力的大小，因此，在当时就已较少被采用。②饱和差-降水型，只有在广大水面上饱和差与蒸发力成比例才是正确的，因此只适合于湿润地区。③辐射平衡-降水型，用辐射平衡确定蒸发力的理论依据较为充分，用于表示低平地区长时段如月、年的湿润状况较好，但当辐射平衡很小时，如冬季，误差很大，用于短时段如数日、一旬，误差也相当大。

通过上述分析，陈明荣提出一个新的基于气温、日照、气压和降水量的干湿指标，称作干燥度：

$$D_a = \frac{\sum E_a}{r} \quad (20)$$

$$E_a = np_r k (0.74 + 0.25(2.0 + t)(0.01 + s)) \quad (21)$$

式中： D_a 为干燥度； E_a 为蒸发力； n 为月的天数； p_r 为相对气压，等于海平面气压与测站气压的比值； k 为换算系数； t 为月平均温度 (°C)； s 为月平均日照百分率； $\sum E_a$ 为全年或某时段蒸发力总量； r 为同期降水量。定义 D_a 小于 0.50 的地区为过潮湿区，0.51~1.00 为湿润区，1.01~1.50 为半湿润区，1.51~2.00 为半干旱区，2.01~4.00 为干旱区，大于 4.0 为干燥区。

2.2.5 陈咸吉干燥度系数

1984 年中国科学院主编了一套《中国自然地

理》丛书^[39]，气候分册中的中国气候区划由陈咸吉等完成，其中的干湿气候区用年干燥度系数作为指标进行划分^[40]。年干燥度系数为年最大可能蒸发量与年降水量的比值，其中年最大可能蒸发量用 Penman 公式计算^[41]，全国分成 5 个区，小于 1.0 的地区为湿润区，1.0~1.6 为亚湿润区，1.6~3.5 为亚干旱区，3.5~16.0 为干旱区，大于 16.0 为极干旱区。2002 年在国家气象中心主编的新版《中华人民共和国气候图集》中，采用上述方法划分中国气候区划图中的干湿气候区^[42]。

2.2.6 慈龙骏湿润指数

1997 年慈龙骏等^[22]在中国荒漠化范围界定研究中，根据联合国的定义^[30]，用年降水量与可能蒸散量之比作为指标，首次确定了中国荒漠化的潜在发生范围：

$$K = \frac{P}{E_0} \quad (22)$$

式中： K 为湿润指数； P 为年降水量 (mm)； E_0 为年可能蒸散量 (mm)，用 Thornthwaite 方法计算。2004 年刘爱霞引用上述湿润指数 (公式 18)，把中国及其中亚地区划分为 5 个干湿气候区，其中 K 大于 0.65 的地区为湿润区，0.51~0.65 地区为半湿润干旱区，0.21~0.5 的地区为半干旱区，0.05~0.20 的地区为干旱区，小于 0.05 的地区为极端干旱区^[43]。

2.2.7 杨建平干燥度指数

2002 年杨建平^[44]采用干燥度指数作为中国干湿气候划分的标准：

$$D = \frac{r}{EPT} \quad (23)$$

式中： D 为干燥度指数； r 为年降水量 (mm)； EPT 为年总蒸发量 (mm)。定义 D 大于 0.5 的地区为湿润区，0.2~0.5 为半干旱区，小于 0.2 为干旱区。

2.2.8 刘波干湿分类函数

2007 年刘波等^[45]提出用干湿分类函数作为划分全国干湿气候区的指标：

$$I_m = 100 \times (\frac{P}{P_e} - 1) \quad (24)$$

式中： I_m 为干湿分类函数； P 为年降水量； P_e 为年潜在蒸散量，用 FAO 在 1998 年推荐的 FAO Penman-Monteith 公式^[46]计算。定义 I_m 大于 0 的地区为湿润区，-50~0 为半干旱区，-100~-50 为干旱区。

2.3 区域干湿气候区划指标及其界限

区域指标主要指用于中国某个区域的干湿气候区划指标。主要有：

2.3.1 丁一汇干燥指数

2001 年丁一汇等^[47]用夏季 3 个月 (6、7、8 月) 的

平均气温与同期的总降水量之比,乘系数 17.5,作为划分中国西北地区干湿气候区的指标:

$$DI = \frac{17.5T_s}{P_s} \quad (25)$$

式中: DI 为干燥指数; T_s 为夏季 3 个月(6、7、8 月)平均气温($^{\circ}\text{C}$); P_s 为同期的降水总量(mm)。定义 DI 小于 1.0 的地区为湿润区, 1.0~1.5 为半湿润区, 1.5~5.0 为半干燥区, 5.0~20.0 为干燥区, 大于 20.0 为极端干燥区。

2.3.2 王菱湿润指数

2004 年王菱等^[48]以年湿润指数作为气候干湿气候区划指标,把中国北方地区,即淮河、秦岭和昆仑山以北的区域,划分为 6 个干湿气候区,年湿润指数的计算方法为:

$$W = \frac{r}{E} \quad (26)$$

式中: W 为年湿润指数; r 为年降水量; E 为年可能蒸散量,用根据中国太阳辐射观测资料进行参数订正,并在农田实验中得到验证的 Penman 修正式计算。定义 W 大于 1.00 的地区为湿润区, 0.75~1.00 为比较湿润区, 0.50~0.75 为半湿润干旱区, 0.20~0.50 为半干旱区, 0.03~0.20 为干旱区, 小于 0.03 为极端干旱区。

2.3.3 毛飞湿润度

2008 年毛飞等^[49]提出用湿润度作为划分青藏高原干湿气候区的指标:

$$K_{pe} = \frac{P}{E_0} \quad (27)$$

式中: K_{pe} 为湿润度; P 为年降水量(mm); E_0 为年可能蒸散量(mm),用 FAO Penman-Monteith 公式计算。定义 K_{pe} 大于 0.65 的地区为湿润区, 0.51~0.65 为半湿润干旱区, 0.21~0.5 为半干旱区, 0.05~0.20 为干旱区, 小于 0.05 为极端干旱区。

由上可知,近 100 多年来,国内外学者广泛采用降水蒸发比或蒸发降水比作为干湿气候区划指标,所不同的是计算蒸发的方法在不断的改进。早期的一些学者曾用经验公式估算蒸发量,其中有些只考虑了温度^[1,18-20,31]、辐射平衡^[20,28-29]或饱和差^[35]单项因子,有些考虑了温度、日照等几项因子^[16,20-21]。1947 年 Holdridge 方法问世,1948 年 Penman 方法问世,前者具有明确的生物学意义,后者具有明确的物理意义,这二种方法的相继问世标志着干湿气候区划指标从经验公式走向机理模式,之后一直被广泛应用^[24,35,48],但它们还不是纯理论公式。1998 年联

合国粮农组织推荐 FAO Penman-Monteith 公式作为计算潜在蒸散量唯一标准方法,这标志着全球有了一个公认的计算潜在蒸散量方法,近年来,国内一些学者已用 FAO Penman-Monteith 公式建立干湿气候区划指标,并得到应用^[45,49]。可见,近 100 多年来干湿气候区划指标经历了简单经验公式-具有一定物理和生物学意义的公式-得到联合国唯一承认的标准方法的发展过程。

3 潜在蒸散量计算方法研究进展

近 100 多年来,大多数学者用 P/E 或 E/P(称为湿润度、湿润指数、干燥度或干燥指数等)来划分干湿气候区。其中 P 为某一个时段的降水量(常用年降水量),比较容易通过实际观测或从气象站获得, E 为同时段的蒸发量,测量难度比较大,因此,发展了不同的计算方法,常用的有潜在蒸散量、潜在蒸发量、水面蒸发量、蒸发力等几大类。这几类方法中潜在蒸发量、水面蒸发量、蒸发力没有考虑植被的蒸腾量,不能真实表达地表的水分支出部分。潜在蒸散量考虑了土壤蒸发和植被蒸腾二部分,但计算相对复杂,随着科学研究和技术的发展,测量资料的不断累积,潜在蒸散量计算方法在不断完善,越来越多的学者选用了潜在蒸散量。

潜在蒸散量也称参考作物蒸散量或可能蒸散量。计算潜在蒸散量的方法很多,归纳起来大致可分为温度法、辐射法和综合法等。常用的温度法有 Holdridge 法^[23]、Thornthwaite^[21]法、Hargreaves^[50]法和 McCloud^[51]法等。慈龙骏等研究表明^[22],Thornthwaite 方法假设了温度低于 0°C 时的可能蒸散量为零,使得青藏高原计算结果普遍偏低。Jensen 等^[52-53]研究表明,多数情况下温度法的应用需要根据研究区域的具体情况作适当的校正。刘晓英等^[54]研究表明,在华北 Hargreaves 与 FAO Penman-Monteith 公式吻合最好,McCloud 次之,Thornthwaite 最差。常用的辐射法有 Priestley-Taylor^[55]法等,刘晓英等研究表明, Penman 与 Priestley-Taylor 方法在干旱半干旱气候条件下差异显著^[56-57]。常用的综合法有 Penman 类方法。半个多世纪来,各国学者对众多潜在蒸散量计算方法进行应用、比较,彭曼公式被公认为目前世界上应用最普遍、精度最高的公式之一。

英国学者 Penman 在 1948 年首先提出了无水汽水平输送条件下的潜在蒸散量计算公式^[58], 1956 年作了改进, 改进后的公式仍需要两个高度上的气象资料, 不利推广应用。因此, 他引用了干燥力的概念, 通过数学推导, 得到具有较可靠的物理基础和较精确的计算结果、只需常规气象站观测资料的彭曼公式^[37]。

尽管彭曼公式物理意义明确, 但不是纯理论公式, 仍包含一些经验系数。因此, 就有了各种 Penman 修正式, 其中: FAO 在 1979 年推荐的 FAO-17 Penman 修正式在世界范围内应用广泛^[59], 国内也有应用^[60]; 国内学者也提出了适合我国的 Penman 修正式^[48,61], 并得到应用^[62]。国内学者在应用彭曼修正式时, 尽管对一些参数作了修正, 但计算结果仍存在明显的不确定性, 不同的彭曼修正式所得结果相差很大^[63-65]。

由 ASCE(American Society of Civil Engineers) 资助的研究组, 用 11 种在全球不同气候条件下取得的 lysimeter 实测资料作对比, 分析比较 20 种潜在蒸散量计算公式的精度, 结果表明, 不论在干燥地区, 还是在湿润地区, Penman-Monteith 公式的精度最高, 与此同时, 由欧洲共同体委托在欧洲进行的类似的研究及其他研究, 也得到相同的结论^[46,63,66-67]。1990 年的罗马作物需水量计算方法研讨会也推荐 Penman-Monteith 公式^[68]。1998 年联合国粮食及农业组织(简称 FAO)推荐 Penman-Monteith 公式作为计算潜在蒸散量的唯一标准方法, 并改称为 FAO Penman-Monteith 公式^[46]。用 FAO Penman-Monteith 公式计算日潜在蒸散量的过程如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (28)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为作物表层净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) (在计算日潜在蒸散量时 $G \approx 0$); T 为 2 m 高度处平均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2m 高度处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

$$\text{其中: } T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (29)$$

式中: T 为 2 m 高度处平均气温($^{\circ}\text{C}$); T_{\max} 为日最高温度($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} 为日最低温度($^{\circ}\text{C}$)。

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 \times z - 5.42)} \quad (30)$$

式中: u_z 为 z 米高度处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); z 为测量风速的风杯距离地面的高度(m)。

$$\gamma = \frac{c_p \times P}{\epsilon \times \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} \times P \quad (31)$$

式中: P 为气压(kPa); λ 为蒸发潜热(2.45 MJ kg^{-1}); c_p 为定压比热($1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); ϵ 为水汽/干空气的比分子量=0.622。

$$e^0(T) = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (32)$$

式中: $e^0(T)$ 为气温 T 时的饱和水汽压(kPa)。

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (33)$$

式中: T_{\max} 为日最高气温($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} 为日最低气温($^{\circ}\text{C}$)。

$$\Delta = \frac{4098 \times \left(0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right)}{(T+237.3)^2} \quad (34)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (35)$$

式中: R_{ns} 为作物表层净短波辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_{nl} 为作物表层净长波辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

国内最早比较 FAO Penman-Monteith 公式的是龚元石^[69]。随后杜尧东等^[63]、刘钰等^[70]、毛飞等^[71]、许迪等^[72]也进行了类似的分析, 但这些研究仅限于方法之间的比较。

近年来, 国内学者在 FAO Penman-Monteith 公式的应用方面取得了一些成果^[45,73-75], 表明 FAO Penman-Monteith 公式适合在中国应用, 且比其他方法更符合中国的实际情况。有些学者建议在国内推广 FAO Penman-Monteith 方法, 并作为校正其它经验方法的标准。

4 各国主要的干湿气候等级及其名称

从全球的角度, Thornthwaite 分别在 1931 年和 1955 年提出二种干湿气候区等级的划分方法^[20], 第一种(1931 年)分为 5 级, 即过湿、湿润、半湿润、半干燥和干燥, 第二种(1955 年)分为 6 级, 即过湿、潮湿、湿润、半湿润、半干燥和干燥, 在过湿和湿润之间增加了潮湿这一过渡区(表 1)。Thornthwaite 的第二种方法在一些国家的农业气候区划中得到应用; 1947 年 Holdridge 分为 8 级, 即超湿润、极湿润、湿润、亚湿润、半干旱、干旱、极干旱和超干旱区^[23]。

表1 各国主要干湿气候区划等级及其名称

Tab.1 The main grades and names of dry/wet climate region zoning in the world

| 序号 | 等级 | 干湿气候等级及其名称 | | | | | | | | 作者 | 年份 |
|----|----|------------|------|------|-------|------|-------|------|-----|------------------------------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | |
| 1 | 5 | | 过湿 | 湿润 | 半湿润 | 半干燥 | 干燥 | | | Thornthwaite ^[20] | 1931 |
| 2 | 8 | 超湿润 | 极湿润 | 湿润 | 亚湿润 | 半干旱 | 干旱 | 极干旱 | 超干旱 | Holdridge ^[23] | 1947 |
| 3 | 6 | 过湿 | 潮湿 | 湿润 | 半湿润 | 半干燥 | 干燥 | | | Thornthwaite ^[20] | 1955 |
| 4 | 5 | | 过渡湿润 | 湿润 | 湿润略不足 | 湿润不足 | 湿润极不足 | | | Budyko ^[28] | 1956 |
| 5 | 5 | | 很湿 | 湿润 | 半湿润 | 半干旱 | 干旱 | | | 张宝堃 ^[1] | 1959 |
| 6 | 4 | | 湿润 | 湿润 | 半湿润 | 半干旱 | 干旱 | | | 黄秉维 ^[32] | 1958 |
| 7 | 6 | | 潮湿 | 湿润 | 半湿润 | 半干旱 | 干旱 | 干燥 | | 卢其亮,等 ^[35] | 1965 |
| 8 | 4 | | | 湿润 | 半湿润 | 半干燥 | 干燥 | | | 钱纪良,等 ^[36] | 1965 |
| 9 | 6 | | 潮湿 | 湿润 | 半湿润 | 半干旱 | 干旱 | 干燥 | | 陈明荣 ^[16] | 1974 |
| 10 | 5 | | | 湿润 | 亚湿润 | 亚干旱 | 干旱 | 极干旱 | | 陈咸吉 ^[40] | 1982 |
| 11 | 6 | | 潮湿 | 湿润 | 半湿润 | 半干旱 | 干旱 | 干燥 | | 丘宝剑 ^[34] | 1985 |
| 12 | 4 | | | | 半湿润干旱 | 半干旱 | 干旱 | 极端干旱 | | 慈龙骏,等 ^[22] | 1997 |
| 13 | 5 | | | 湿润 | 半湿润 | 半干燥 | 干燥 | 极端干燥 | | 丁一汇,等 ^[47] | 2001 |
| 14 | 3 | | | 湿润 | | 半干旱 | 干旱 | | | 杨建平,等 ^[44] | 2002 |
| 15 | 6 | | 湿润 | 比较湿润 | 半湿润 | 半干旱 | 干旱 | 极端干旱 | | 王菱,等 ^[48] | 2004 |
| 16 | 3 | | | 湿润 | | 半干旱 | 干旱 | | | 刘波,等 ^[45] | 2007 |
| 17 | 5 | | | 湿润 | 半湿润 | 半干旱 | 干旱 | 极端干旱 | | 毛飞,等 ^[49] | 2008 |

1948年Budyko分为5级,即过渡湿润、湿润、湿润略不足、湿润不足和湿润极不足区^[20]。

近半个世纪来,国内学者根据各自研究的需要,有些把干湿气候区分为6个等级^[16,34-35,48],有些分为5个等级^[1,40,47,49],有些分为4个等级^[22,32,36],也有少数分为3个等级^[44-45]。由表1可知,除慈龙骏等外,所有等级体系均有湿润、半干旱和干旱3个气候区,可见,这3个区是最基本的干湿气候区,所不同的是有的学者在干旱区中分出极端干旱区,在湿润区中分出半湿润区、潮湿区和过湿区,王菱等在半湿润区和湿润区间增加了比较湿润这一过渡区。

各国不同学者由于干湿气候区等级不同,等级的名称就不同,即使等级相同,等级的名称也不尽相同。对相同气候区,不同学者的命名也各不同。暂以过湿、湿润、半湿润、半干旱、干旱和极端干旱这一分区等级进行讨论:针对过湿区,有过湿、极湿润、潮湿、过度湿润和很湿5种命名,多数学者没有定义这个区;针对湿润区,所有学者均命名为湿润区;针对半湿润区,有半湿润、亚湿润、湿润略不足、半湿润干旱4种命名;针对半干旱区,有半干旱、亚干旱、半干燥、湿润不足4种命名;针对干旱区,有干旱、干燥、湿润及不足3种命名;针对极端干旱区,有干燥、极端干旱、极干旱、极端干燥4种命名,有些没有定义相应的区。表1给出的是研究区域比较大的干湿气候等级及其命名,在具体的应用中,尤其是研究区域比较小或气候比较特殊的地区,还会有其他的干湿气候等级及其命名。

本文根据全国602个气象站1961-2008年逐日气象资料(包括平均气温、最高气温、最低气温、水汽压、日照时数、风速和降水量等要素),用FAO Penman-Menteith方法计算逐日潜在蒸散量,得到全国各站历年年降水量与年潜在蒸散量比值,称为干湿指数,统计分析表明:48年平均年降水量最大的是广西东兴,为2744.5 mm,最小的是新疆吐鲁番,为15.2 mm,相差180多倍,绝对值相差2729.3 mm;48年平均干湿指数最大的是广西东兴,为2.61,最小的是新疆吐鲁番和青海冷湖,为0.01,相差261倍,绝对值相差2.60。根据国内外的研究成果,结合中国气候特点,本文将全国干湿气候分为7个等级,分别命名为过湿区、潮湿区、湿润区、半湿润区、半干旱区、干旱区和极端干旱区,定义干湿指数小于0.05的地区为极端干旱区,0.05~0.20为干旱区,0.20~0.50为半干旱区,0.50~1.00为半湿润区,1.00~1.50为湿润区,1.50~2.00为潮湿区,大于2.00为过湿区。

5 干湿气候区划指标名称讨论

各国学者提出的干湿气候等级划分指标中,有些由于指标的计算方法不同,指标的名称就不同,如Thornthwaite^[20]的P-E指数,Holdridge^[26]的可能蒸散率,Budyko^[28]的辐射干燥指数,黄秉维^[32]的干燥度,陈咸吉^[40]的干燥度系数,慈龙骏^[22]等的湿润指数,丁一汇^[47]的干燥指数,杨建平^[44]的干燥度指

数,刘波等^[45]的干湿分类函数,毛飞等^[49]的湿润度;有些指标的计算方法相同,名称却不同,如钱纪良等^[36]的干燥度,陈咸吉^[40]的干燥度系数;有些指标的计算方法不同,名称却相同,如黄秉维^[32]、陈明荣^[16]、卢其尧等^[35]的干燥度。国内学者中用“干燥度”的比较,其原因可能是干旱一直是中国最严重自然灾害之一,关注干旱的学者比较多。本文认为气候的干与湿是相对的,湿润气候和干旱气候都是自然资源,干旱是一种灾害,过湿也是一种灾害,因此,本文建议用“干湿指数”。

6 问题与展望

(1) 尽管FAO Penman-Monteith公式是联合国粮食及农业组织推荐的作为计算潜在蒸散量的唯一标准方法,用常规气象站观测资料就可计算,但所需的气象要素比较多,包括最高气温、最低气温、水汽压、日照时数、风速等要素,尤其是对于常规气象站稀少的地区FAO Penman-Monteith公式的应用受到限制,因此,需要进一步开展以FAO Penman-Monteith公式为标准,建立简单的估算当地潜在蒸散量经验公式的研究工作。

(2) 中国独特的季风气候显著的有别于其他国家和地区,因此,FAO Penman-Monteith公式是否适合在中国不同地区应用,还需要进一步开展验证工作。尤其是FAO Penman-Monteith公式需要输入计算地表短波辐射的a、b系数,全国气象部门只有90多个辐射观测站,在没有辐射观测站的地区如何确定a、b系数,对FAO Penman-Monteith公式的计算精度影响多大,是将来要进一步研究的问题。

(3) 虽然本文定义的干湿指数代表了当前的先进水平,但由于青藏高原气候独特,用干湿指数进行全国干湿气候区划时,各干湿气候区的界限值,青藏高原与全国其他地区是否需要分别考虑,也是将来要进一步研究、验证的问题。

(4) 在被国内学者广泛应用的干湿气候区划指标中,绝大部分由外国学者原创。中国幅员辽阔,地形复杂,高差显著,从赤道气候到高山寒带,从热带雨林到干旱沙漠,分布着多种干湿气候区和自然景观,为自创通用性指标、全国性指标和区域指标提供有利条件。因此,需要从各级层面上投入人力和财力,分别创建适用于不同尺度的干湿气候区划

指标。

(5) 干湿气候区划是一项基础性工作,广泛的应用于气候区划、农业气候区划、自然区划、生态区划、气候变化、植被-气候分类等领域。因此,建立干湿气候区划指标时,不仅要考虑气候因子,还要注意到农业、自然地理、生态、植被等方面的特点,以适应相关领域的需求。

参考文献

- [1] 中国科学院自然区划工作委员会. 中国气候区划(初稿). 北京: 科学出版社, 1959.
- [2] 林振耀, 吴祥定. 青藏高原气候区划. 地理学报, 1981, 36(1): 22-32.
- [3] 廖启龙, 王宝林. 我国西北牧区的气候区划. 干旱区地理, 1989, 12(1): 31-34.
- [4] 李世奎. 中国农业气候区划. 自然资源学报, 1987, 2(1): 71-83
- [5] 潘铁夫, 张德荣, 张文广, 等. 中国大豆气候区划的研究. 大豆科学, 1984, 3(3): 169-182
- [6] 黄秉维. 中国综合自然区划草案. 科学通报, 1959, 10(18): 594-602.
- [7] 丘宝剑. 全国农业综合自然区划的一个方案. 河南大学学报, 1986(1): 21-28
- [8] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6
- [9] 刘以连, 刘寿东. 中国畜牧生态气候区划. 中国农业气象, 1984, 5(2): 21-25
- [10] 杨建平, 丁永建, 陈仁生, 等. 近50年中国干湿气候界线波动及其成因初探. 气象学报, 2003, 61(3): 364-373.
- [11] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. 大气科学, 2006, 30(3): 464-474.
- [12] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近30年中国陆地表层干湿状况研究. 中国科学: D辑, 2005, 35(3): 276-283.
- [13] 周广胜, 张新时. 中国气候-植被关系初探. 植物生态学报, 1996, 20(2): 113-119.
- [14] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候-植被分类研究. 植物学报, 1996, 38(1): 8-17.
- [15] 杨正宇, 周广胜, 杨奠安. 4个常用的气候-植被分类模型对中国植被分布模拟的比较研究. 植物生态学报, 2003, 27(5): 587-593.
- [16] 陈明荣. 对于干湿气候区划指标问题的探讨. 西北大学学报: 自然科学版, 1974(2): 111-119.
- [17] 高国栋, 陆渝蓉, 陆菊中, 等. 气候学基础. 南京: 南京大学出版社, 1990: 359-375.
- [18] 王延祿. 我国建立、引用和验证气象干旱指标综述. 干旱区地理, 1990, 13(3): 80-86.
- [19] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861.

- [20] 潘守文. 现代气候学原理. 北京: 气象出版社, 1994: 586-672.
- [21] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94.
- [22] 慈龙骏, 吴波. 中国荒漠化气候类型划分与潜在发生范围的确定. *中国沙漠*, 1997, 17(2): 107-111.
- [23] Holdridge L R. Determination of world plant formation from simple climatic data. *Science*, 1947, 105: 367-368.
- [24] 张新时, 杨奠安, 倪文革. 植被的PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(三)几种主要方法与PEP程序介绍. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(2): 97-109.
- [25] 倪健. 植被-气候分类指标及其应用. *生态学杂志*, 1998, 17(2): 33-44
- [26] Holdridge L R. *Life zone ecology*. San Jose, Costa Rica: Tropical Science Center, 1967.
- [27] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. *第四纪研究*, 1993, 13(2): 157-169.
- [28] Budyko M H. *Cimate and Life*. New York: Academic Press, 1974.
- [29] 布德科. 地表面热量平衡. 北京: 科学出版社, 1960.
- [30] 中华人民共和国林业部防治荒漠化办公室. 联合国关于在发生严重干旱和/或沙漠化的国家特别是在非洲防治沙漠化的公约. 北京: 中国林业出版社, 1994.
- [31] 张家诚. 中国气候总论. 北京: 气象出版社, 1991: 256-305.
- [32] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案. *地理学报*, 1958, 24(4): 348-363.
- [33] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案. *地理学报*, 1983, 38(1): 1-10.
- [34] 丘宝剑. 中国的干旱气候. *河南大学学报*, 1985(1): 11-17.
- [35] 卢其尧, 卫林, 杜钟朴, 等. 中国干湿期与干湿区划的研究. *地理学报*, 1965, 31(1): 15-24.
- [36] 钱纪良, 林之光. 关于中国干湿气候区划的初步研究. *地理学报*, 1965, 31(1): 1-14.
- [37] Penman H L. Woburn irrigation 1951-1959. *The Journal of Agricultural Science*, 1962, 58(3): 343-379.
- [38] 中央气象局. 中华人民共和国气候图集. 北京: 地图出版社, 1979.
- [39] 《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理(气候). 北京: 科学出版社, 1984: 151-161.
- [40] 陈咸吉. 中国气候区划新探. *气象学报*, 1982, 40(1): 35-48.
- [41] Penman H L. *Vegetation and Hydrology*. Commonwealth Agricultural Bureaux, 1963.
- [42] 《中华人民共和国气候图集》编委会. 中华人民共和国气候图集. 北京: 气象出版社, 2002.
- [43] 刘爱霞. 中国及中亚地区土地荒漠化遥感监测研究[D]. 中国科学院, 2004.
- [44] 杨建平, 丁永建, 陈仁生, 等. 近50年来中国干湿气候界限的10年际波动. *地理学报*, 2002, 57(6): 655-661.
- [45] 刘波, 马柱国. 过去45年中国干湿气候区域变化特征. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 7-15.
- [46] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop evapotranspiration*. FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome, 1998.
- [47] 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 2001: 9-11.
- [48] 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿带界线的变化. *地理研究*, 2004, 23(1): 45-54.
- [49] 毛飞, 唐世浩, 孙涵, 等. 近46年青藏高原干湿气候区动态变化研究. *大气科学*, 2008, 32(3): 499-507.
- [50] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985, 1(2): 96-99.
- [51] McCloud D E. Water requirements of field crops in Florida as influenced by climate. *Proceedings Soil and Crop Science Society of Florida*, 1955, 15: 165-172.
- [52] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. A SCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, A SCE, New York, N Y, 360, 1990.
- [53] Jensen D T, Hargreaves G H, Temesgen B, et al. Computation of ET₀ under Nonideal Conditions. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, 1997, 123(5): 394-400.
- [54] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 12-18.
- [55] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 81-92.
- [56] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley-Taylor与Penman法计算参照作物腾发量的结果比较. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 32-36.
- [57] Batcher C H. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified Penman equation. *Irrigation Science*, 1984, 5(4): 223-233.
- [58] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings. Royal Society, London, United Kingdom. Series*, 1948, A193:120-146.
- [59] Frère M, Popov G F. Agrometeorological crop monitoring and forecasting. FAO Plant production and Protection Paper 17, Rome, 1979.
- [60] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要农作物需水量等值线图研究. 北京: 中国农业出版社, 1993.
- [61] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与研究. 北京: 气象出版社, 1989: 82-98.
- [62] 裴步祥, 毛飞, 吕厚荃. 我国北方春季土壤水分动态模拟预报模式的实验研究. *北京农业大学学报*, 1990, 16(16)(增刊): 116-122.
- [63] 杜尧东, 刘作新, 张运福. 参考作物蒸散计算方法及其

- 评价. 河南农业大学学报, 2001, 35(1): 57-61.
- [64] 陕西省水利水土保持厅, 西北农业大学. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [65] 刘承吉, 郭克贞, 何京丽. 草原灌溉. 北京: 水利水电出版社, 1995.
- [66] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 1989, 81(4): 650-662.
- [67] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. Roma: ASCE Manual 1990.
- [68] Smith M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Roma: FAO Plant production and protection, 1991.
- [69] 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17 Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 68-75.
- [70] 刘钰, PREIRA L S, Teixeira J L. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比. *水利学报*, 1997, 28(6): 27-33.
- [71] 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. *应用气象学报*, 2000, 11(增刊): 128-136.
- [72] 许迪, 蔡林根, 王少丽, 等. 农业持续发展的农田水土管理研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 111-126.
- [73] 刘群昌, 谢森传. 华北地区夏玉米田间水分转化规律研究. *水利学报*, 1998, 29(1): 62-68.
- [74] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究. *地理科学*, 2004, 24(2): 212-216.
- [75] 毛飞, 张光智, 周丽. 冬小麦土壤水分预报和灌溉决策系统的业务应用. *气象*, 2001, 27(6): 36-39.

Research Progress in Dry/wet Climate Zoning

MAO Fei¹, SUN Han², YANG Honglong³

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Remote Sensing Application and Experiment Station, National Satellite Meteorological Center, Nanning 530022, China;

3. The Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Dry/wet climate zoning is an important part of climatology, geography, ecology, and agriculture. Since 1900, great progresses in grading of dry/wet climate and indexes for dry/wet climate zoning and their calculating methods have been achieved by scholars at home and abroad. In this article, the achievements in scientific research in recent more than 100 years were summarized, including indexes for dry/wet climate zoning, calculating methods of reference evapotranspiration, and grading of dry/wet climate zoning and their naming methods. The existing scientific issues for this subject were put forward.

Key words: China; dry/wet climate; zoning indexes; grading of dry/wet climate

本文引用格式:

毛飞, 孙涵, 杨红龙. 干湿气候区划研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 17-26.