

美国 20 世纪干旱指数评述

Richard R. Heim Jr

周跃武,冯建英 译

(中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020)

摘要:由于没有对干旱现象的充分定义,干旱监测和分析长期受到影响。在过去 2 个世纪,干旱指数由基于降水短缺的简单方法逐渐发展到针对具体问题的更复杂的模式。19 世纪后期和 20 世纪初干旱指数研究集中于以下几个方面:某一时段的正常降水百分率,降水小于某一阈值的连续天数,以降水和温度为变量的公式,和以持续降水短缺作为因子的各种模式。1965 年 Palmer 以 Thornthwaite 蒸散量作为需水量,提出了基于水平衡的干旱指数,它是干旱研究史上的里程碑,至今仍在广泛应用。1960 年代以来干旱指数的研究进展主要包括:地表供水指数,它结合了积雪、水库蓄水、流量和高海拔降水,因而弥补了 Palmer 指数的不足;用于火灾监控的 Keetch - Byram 干旱指数;标准降水指数 (SPI) 和采用全球卫星植被观测的植被条件指数。这些模式随着新资料的出现而不断发展。20 世纪末研发出干旱监测工具 (DM),它结合 Palmer 指数和其它几个(后 Palmer)指数得出全美国干旱条件的统一评估。本文对干旱指数作了历史性回顾,有助于对 Palmer 指数复杂性和干旱测量本质的理解。

历史上干旱不断给人类文明造成灾难。从文明基础的农业到运输业、城市供水和现代化工业,干旱影响自然生命、生态系统和许多经济社会部门。由于干旱影响的范围广泛,地域和时间分布多样,以及人们对供水系统的不同需求使干旱的单一定义很难提出。

美国气象学会 (AMS 1997) 将干旱定义和类型分为 4 类:气象干旱或气候干旱、农业干旱、水文干旱及社会经济干旱。长期(几个月或几年)的气象干旱(大气条件导致降水减少或无降水)可迅速开始和突然结束(有些情况下转换几乎可在一夜间完成)。短期(几个星期)农业干旱指地表层(植物根系区)在作物生长关键期发生的干旱,即使深层土壤水分饱和,也可导致严重的作物减产。高温、低湿和干热风常常加重干旱少雨的影响(Condra 1994)。农业干旱的爆发可晚于气象干旱,这取决于前期的地表土壤层水分状况。长期降水短缺影响地表或次地表供水,使河流流量、地表水、水库蓄水和湖水减

少,导致水文干旱,它在气象干旱结束后将持续较长时间。社会经济干旱将某些经济商品的供需与气象、农业和水文干旱相联系。不同类型干旱之间的关系是复杂的,例如,流量在描述许多供水活动,如水力发电、休假消费和农业灌溉(那里的作物生长和收成主要依赖河流的浇灌)中是分析干旱的关键变量。因此,国际气象界一般将干旱定义为“长时期缺乏降水或降水明显短缺”;“降水短缺导致某方面的活动缺水”,或“由于缺少降水,异常干的天气时段持续到引起水文失衡”。(世界气象组织 WMO 1992 ;AMS 1997)。

为比较不同地区的干旱和干旱事件,需要一些数字标准。然而,由于干旱定义的明显不同,不可能设计统一的干旱指数。另一方面,由于干旱的特点和其对经济部门的广泛影响,干旱影响的量化非常困难。由于干旱的复杂性,没有哪个单一指标能够充分表述干旱的强度和危害以及对不同用户的潜在影响。

AMS(1997)提出供需的时空过程是2个应该包含在干旱的客观定义和干旱指数定义中的基本过程。WMO定义干旱指数为“与长期累积效果和异常水分短缺相关的指数”(WMO 1992)。Friedman(1957)明确了任何干旱指数应符合的4个基本标准(1)时间尺度应与所考虑问题匹配(2)指数应是大尺度长期持续干旱的定量度量(3)指数应对所研究的问题有使用价值(4)指数应具有或能计算出长期精确的历史记录。用于干旱监测业务时应加上第5个标准:指数应能在短期内或实时地计算出。例如,对长期古气候研究有用的指数(如基于冰川和冲积证据的指数、基于海洋和湖泊沉积物、树木年轮和花粉分析,或历史文献和作物年产量这样的间接证据的指数),由于古气候指数的性质和根据实时业务要求收集古气候资料的困难,它可能不能用于干旱业务监测。仅有几个个例(如,埃及尼罗河流量记录),其指数不但在古气候研究中有用,也能用于干旱业务监测。

针对干旱影响的部门和地区、特殊的应用和对其理解的程度不同,在美国已提出了许多干旱定量的方法,其中W. Palmer在20世纪中叶提出的复杂

水平衡模式是干旱指数发展史上的转折点。相对20世纪初的方法而言,Palmer指数是很大的改进,但它仍有自身内在的缺点(这些问题随后进行讨论)。后-Palmer方案包括现代指数,如地表供水指数(SWSI)、标准降水指数(SPI)和干旱监测指数(DM)。表1给出20世纪美国主要干旱指数的概述。本文通过聚焦美国干旱指数的发展史,给出过去100 a我们对干旱认识的演变历程。

1 早期的干旱指数

所有干旱类型的共同之处在于因缺少降水对某些活动或某些方面造成缺水的事实(Wilhite和Glantz 1985)。200 a前已有可靠的降水观测,因此,所有干旱指数和干旱定义都包括降水这一变量或其它气象要素的组合(WMO 1975)。

早期的气象干旱定义均结合某一时段内降水的某种测量值(Tannehill 1974;WMO 1975a;Wilhite和Glantz 1985)。一旦所定义的干旱标准成立干旱即发生,该指数随之成为干旱时段和(或)强度的度量。

表1 本文讨论的主要干旱指数

指数	提出时间	分析的变量及应用
Munger 指数	1916	24 h 无 1.27 mm 以上降水的时段,森林火险可比日度量
Kincer 指数	1919	24 h 降水 < 6.35 mm 的 ≥ 3 d 天的持续天数,季节分布图
Marcovitch 指数	1930	气温和降水,豆虫的气候条件
Blumenstock 指数	1942	干旱持续天数,当 48 h 降水达 2.54 mm 时干旱结束,短期干旱
前期降水指数	1954	降水,其倒数形式用于洪水预报
充足水分指数	1957	降水和土壤水分,农业干旱
Palmer 指数	1965	水平衡模式分析中的降水和温度(PDSI和PHDI)气象和水文干旱的时空比较
作物水分指数	1968	水平衡模式分析中的降水和温度,农业干旱
Keetch - Byrum 干旱指数	1968	水平衡模式分析中的降水和土壤水分,用于火灾管控
地表供水指数	1981	积雪,水库蓄水,流量和降水,主要为(美国)西部流域计算,统计特性未被充分分析和理解
标准降水指数	1993	降水,测量干旱期和湿润期的降水短缺、“正常”百分比、不可超值概率、而且各种时间尺度的SPI具有潜在不同的特性
植被条件指数	1995	卫星 AVHRR 辐射(可见光和近红外),测量植被“健康”状况
干旱监测产品	1999	将各种干旱指数和辅助指标集合为周的干旱监测图,多种用途

水文干旱指数大多基于河流流量,因为这一变量概括为并且就是各分水岭和各流域重要水文气象过程的副产品。在包括河流流速的水文学研究中,有必要区分总流量中的 2 个分量:直接径流和基流(Linsley 等人 1985)。直接或地表径流指由地表面流淌掉的雨水。它在降水后出现并流入河流,在水文图中表示为洪峰点。基流是地下水排泄进河流的结果,地下水面与该流域的河道在此相交。基流也称为地下水流和干燥天气水流(Linsley 等人 1958),在水文图上表示为退洪点。为抵消直接径流洪峰的影响,干旱研究采用的流量资料依赖基流观测或某时段的平均流量(如,月流量或年流量)(Yevjevich 1967;Dracup 等人 1980;Frick 等人 1990)。

在 20 世纪的头 10 a,美国天气局(U. S. WB)将干旱定义为任何 21 d 或更长天数期间发生的降水等于或少于此间正常值的 30%(Henry 1906;Steila 1987)。干旱度量在那时经常是累积降水短缺,或相对于常值的累积偏差。早期干旱标准的其它例子如下:

- (1)连续 15 d 无降水;
- (2)21 d 或更多天数降水少于常值的 1/3;
- (3)年降水量少于常值的 75%;
- (4)月降水量少于常值的 60%;
- (5)任何(天数的)降水量少于常值的 85%。

直到 1957 年,Friedman 采用年降水作为他研究德克萨斯州干旱的干旱指数。类似的标准在其它国家也被采用,例如:

- (1)英国:连续 15 d 降水 < 0.25 mm(或 1.0 mm);
- (2)印度:一周降水量为常值的一半或更少,或者有效季节降水的短缺超过均方差的 2 倍;
- (3)俄罗斯:10 d 的总降水量 < 5 mm;
- (4)巴厘岛 6 d 无降水;
- (5)利比亚:年降水量 < 180 mm。

上述大多数定义/指标只在特定地区和对特殊用途有效。某一地区得出的指数在其它地区可能不适用,因为世界各地产生干旱的气象条件变化很大,例如,度量气象干旱强度的指数不能很好地用于农业、水文或其它领域。

很早就有人认识到这些不足之处(Abbe 1894; Henry 1906),例如,研究农业干旱指数遇到的问题,包括考虑植被、土壤类型(它决定土壤持水量)、前

期土壤水分和受风速、气温、湿度影响的蒸散作用。当时这些气候要素并未普遍观测,或无法被引入干旱指数。例如,Abbe(1894)指出:“从农业角度看,干旱不仅是降水短缺,而是作物生长可利用水的短缺,因此影响农业的干旱是许多因素的复杂结果,所以,无论从农业还是工业的角度,统一严格的干旱强度定义是不切实际的”。在《美国天气局的公报 Q 美国气候学》一书中,Henry(1906)总结道,“一般而言,仅仅依靠气候统计不能给出(农业)干旱的时段和强度的精确概念,特别需要当地植被条件的补充观测”。

20 世纪前半叶,科学家们集中努力,解决这些问题并不断研发与专业应用相关的干旱指数。

Munger(1916)提出一个年际和地区间可比较的森林火险的客观度量指数。在确定透雨的频率是西北太平洋地区火灾的最重要影响因子后,Munger 用 24 h 降水量 < 1.27 mm 的连续天数作为他的干旱指数。他指出干旱对森林植被的烘烤效果并非直接与干旱的时间成正比,他假设干旱的强度与干旱持续时间的平方成正比。Munger 设计了表示干旱强度的图示技术(图 1 和图 2,Munger 指数与其它指数的对比)。该技术采用直角三角形的面积,它的高和底均与干旱时间成正比,数学表达如下:

$$\text{干旱强度} = 1/2L^2$$

其中 L 是干旱时间(以天为单位)。

Kincer(1919)首先设计出一套非常有用的图表,用于分析降水的季节分布和美国本土不同强度降水的年平均天数的气候学分析。其中一些图表示美国落基山东部暖季(3~9月)的降水偏少(干旱)频率。Kincer 定义干旱为连续 30 d(或以上)24 h 降水量 < 6.35 mm 的天数。

在研究美国东部的豆虫(bean beetle)气候条件时,Marcovitch(1930)设计了一个方程,将气温和降水引入干旱指数的计算:

$$\text{干旱指数} = 1/2(N/R)^2$$

其中 N 是连续 2 d(或以上)气温 > 32.2 °C 的总天数, R 指相同月份的总夏季降水量。如图 2 和图 3 所示,Marcovitch 指数是评估研究中最好的季节性指数。

Blumenstock(1942)在气候研究中利用概率理论计算干旱频率,在他的指数中采用干旱长度(以

天为单位)。他认为当 48 h (或以下)降水量超过 2.54 mm 时干旱结束。图 1 将 Blumenstock 指数与其它指数进行了比较。在短期干旱测量时,Blumenstock 指数和 Munger 指数是最好用的 2 个指数。

土壤水分损耗的测量研究集中于蒸发;植物所用水分测量的研究集中于蒸腾。根据 Thornthwaite (1931)的研究,蒸发和蒸腾或合称为蒸散(ET)取决于太阳辐射、风速、湿度、植被性质和土壤条件,其中太阳辐射是主导因子。由于太阳辐射的直接测量不多,人们发现当假设土壤水分对植被供水在任何时候充分时,日平均气温、纬度和年时(月份)可用于近似计算蒸发损耗的水分。该度量称为潜在蒸散(PE)。实际的蒸散和潜在蒸散之间的差别取决于土壤中的有效水分。如果土壤水分充沛,实际蒸散就等于潜在蒸散;否则,实际蒸散小于潜在蒸散。

以此为基础,Thornthwaite(1931)提出降水效率指数,即 12 个月的降水效率比之和。其中月效率是月降水与月蒸发之比。Thornthwaite(1948)又提出用降水量减去蒸散量作为干旱指数。

应该指出,Thornthwaite 的工作推进了干旱指数的研究,同时,他和 Köppeon 等人也为现代气候分类系统作了许多基础性工作。正如 WMO(1975)指出的那样,应将干旱(drought)和干燥(arid)区别开。干燥一般指某一地区的降水、可用水、或湿度低于平均值,而不考虑气候变化的可能性,它是某一地区的长期气候特征。干旱却指在变率意义上考虑的临时特征,只可能发生在当降水明显低于正常值情况下的天气气候现象。根据定义,干燥只适用于少雨和通常温度高的地区;而干旱几乎在具有任何降水和温度的地区都可出现。用这个区别来看,上述 Thornthwaite 的 2 个指数应为气候干燥指数而非干旱指数。

受 Thornthwaite 工作的启发, van Bavel 和 Verlinden(1956)提出农业干旱日的概念,认为 1 d 内发生干旱的条件也能成立(即 1 d 中可利用土壤水分为 0)。他们用日降水量和蒸散量及彭曼(Penman)公式计算,公式变量包括太阳辐射、日照时间、气温、相对湿度和风速估算土壤水分条件。Dickson(1958)采用干旱日的概念,但试验用不同的方法计算蒸散(即假定蒸散与土壤总水分含量成正比)得出的量(称为计算农业干旱日)比用 van Bavel 和 Verlinden 方法计算的结果小很多(小到 55%)。

McQuigg(1954), Waggoner 和 O'Connell(1956)将降水量和降水时间引入他们的前期降水指数(API)。API 专为洪水预报设计,可估算土壤水分含量。它是以日为单位计算的,用前一日的指数乘以某一系数(一般为 0.9)得到。如果某日出现降水,该降水量就被加入该指数(图 1 和图 2)。降雪算在化雪日的指数中。他们在美国东中部取得了好的结果。当 API 在 0.10 以下时,或在湿润年的 5 月中旬至 8 月中旬,API 在 0.5 以下时,爱荷华州的玉米产量就减产。

1960 年代出现(WMO 1975)针对玉米的干旱指数——“水分应力日”。水分应力日的计算以潜在蒸散(PE)和可利用土壤持水量为基础。水分应力日(即玉米作物失去膨胀压时)在下列条件之一成立时出现(1)当土壤水低于可利用容量的 85%,且 $PE > 6.4 \text{ mm/d}$ (2)当土壤水低于可利用容量的 50%,且 $PE > 5.1 \text{ mm/d}$ (3)当土壤水低于可利用容量的 10%,且 $PE > 1.3 \text{ mm/d}$ 。

与此同时,Thornthwaite 和其他人提出水分收支账计算方法用于跟踪土壤水分的变化。该方法提出有关土壤水分场容的各种假设,并利用了月降水量和潜在蒸散资料。他们强调需将干旱强度的定义置于单个年份供水需求的基础上。“我们不能仅因为降水缺少就定义干旱,”他们说;“因为这样的定义未考虑水的需求,而且,缺少降水的影响取决于初始土壤是潮湿还是干燥。(农业)干旱并非出现在降水结束时,而是出现在植物根系不能获取到所需水分时”(Thornthwaite 和 Mather 1955)。

强调水需求的目的出自于“充足水分”的想法。作为潜在蒸散概念的延伸,McGuire 和 Palmer(1957)提出充足水分指数,它对某地的水分需求与实际水分供给(降水加可利用土壤水分)进行比较。充足水分指数表述为实际水分供给与水分需求之百分比,100%表明水分供给充分满足需求。他们用该指数值绘制了 1957 年美国东部干旱的总体空间分布图。

如上所述,在 20 世纪上半叶,干旱的识别和评估过程逐步发展,从把降水短缺作为干旱现象的简单方法到针对特定问题模式的有限应用。已经为发展定量评价 Steila(1987)提出的整体环境水分状态的更加高级的技术提供了条件。

2 Palmer 干旱指数

1965 年 W. Palmer 发表了干旱指数模式, 该模式将前期降水、水分供给和水分需求(以 Thornthwaite 首创的蒸散工作为基础)结合在水文计算系统中(Palmer 1965)。他用一个 2 层模式计算土壤水分, 并对场容和进出这 2 层的水分作了条件假设。这些假设包括: 土壤顶层(耕种层)存在 1 英寸厚的场容, 在顶层未饱和前水分不能传输到底层(“根部区”), 两土壤层饱和前不发生径流, 而且一个月内产生的全部降水都用于补充该月的蒸散和土壤水分需求或作为径流流失。Palmer 采用他所谓的气候适宜条件(CAFEC)标准化他的计算结果, 使得该无量纲指数在空间和时间上具有可比性。这一处理使该指数能度量异常的湿润(正值)和干旱(负值), 在具有持续正常降水和温度时, 理论上将导致所有季节和气候条件下该指数为零。术语“Palmer 指数”统称熟知的 3 个指数 PDSI、PHDI 和 Z 指数。

Palmer 指数的计算步骤如下:

(1) 用 5 个参数(降水、蒸散、土壤水分损失和补充及径流)进行逐月水文学计算(水文帐)得到多年的系列资料, 后 4 个参数的潜在值和实际值都要计算。Palmer 用的是月平均, 但其它时间尺度(周或日)也能用。这些参数的潜在值和实际值的平均是在标定期计算的, 标定期通常是(但不要求必须是)记录的资料期。

(2) 总结上述结果求得蒸散系数、补充系数、径流系数和损失系数, 它们依赖于所分析地区的气候条件。这些系数由实际平均值除以潜在平均值得到。

(3) 用导出的系数再分析资料系列以确定每月“正常”天气所需的水分量, 这些“正常”量(或 CAFEC)对步骤(1)中的每个参数都要进行计算。

(4) 计算月降水偏差(降水量减 CAFEC 降水量), 然后将降水偏差转换为水分异常指数, 这个水分异常指数就是 Palmer Z 指数。它反映某特殊月天气相对于该月平均水分气候的异常, 不考虑在此之前或之后的月份所发生事件的影响。

(5) 分析指数系列以决定干旱期的开始、结束和强度。在 Palmer 的计算中, 某个月的干旱强度取决于该月的水分异常, 也取决于其前和其后月份的干旱强度。他的计算方法, 对每个月都包括 3 个中

间指数(X_1 、 X_2 和 X_3)和一个概率因子, 这些下文将给出解释。

在导致干旱的气象条件结束与环境从干旱中恢复过来之间, 存在时间滞后。Palmer 通过计算气象干旱指数和水文干旱指数将这一滞后加于区分。在他研发气象干旱指数(即人们熟知的 Palmer 干旱强度指数 PDSI)过程中, Palmer 将干旱(或湿润)期的开始和结束用其开始或结束的概率表示。干旱期或湿润期当此概率达到或超过 100% 时正式结束, 但干旱期或湿润期被认为已经结束的第一个月是该月的概率开始 $> 0\%$ 并且继续保持 $> 0\%$ 直到 100%, 因此存在“不确定”期, 这时的干旱(或湿润期)可能已结束或未结束。模式为 3 种不同情况分别计算指数值: 初始湿润期(X_1), 初始干旱期(X_2)和持续期(X_3), X_3 可指已发生的干旱期也可指已发生的湿润期。模式选择 3 项(X_1 , X_2 或 X_3)之一用于分段返回程序计算 PDSI, 选择哪一项取决于已发生干旱(或湿润)期的结束概率(如果概率值表示持续干旱已经结束, 则选 X_1 项用于 PDSI 的计算; 如果概率值表示持续湿润期已经结束, 则选 X_2 项; 如果概率值不到 100%, 则选 X_3 项)。“持续期”(X_3)项的值比“初始期”(X_1 和 X_2)项的值变化慢。 X_3 是长期水文水分条件指数, 也称为 Palmer 水文干旱指数(PHDI)。

结束干旱或湿润期的分段返回程序不能满意地用于 PDSI(即业务上用的 PDSIs)的实时计算, 因为人们不可能预先知道几个月湿或干的天气是否是新的湿润期(或干旱期)的开始或仅仅是现在的干旱期(或湿润)的短时中断(Karl 1986)。美国国家天气局(NWS)1990 年代引入概率因子对 PDSI 进行修正(Heddinhaus 和 Sabol 1991)。NWS 的修正指数(这里指 PMDI 或简化为 PDI)使 PDSI 的计算简化, 只需将湿项和干项经过其概率加权后求和(P 和 $100\% - P$, 其中 P 为持续期结束的概率)。

当初在它被介绍时, Palmer 的技术就被认为是“把降水和温度结合起来作为预测变量的最满意的方案”(Julian 和 Fritts 1968)。Palmer 指数在美国得到广泛应用, 也用于世界其它地区(WMO 1975; Kogan 1995; Hu 和 Willson 2000)。为了帮助计划人员应对严重干旱, Karl 等人(1986, 1987)在 PHDI 的研究工作中, 计算了美国大陆 344 个气候区结束或缓解持续干旱所需的降水量和得到这些降水量的气

候概率。图 1~7 表示 Palmer 指数可用于比较不同时间和空间发生的干旱,以及与其它干旱指数的比较。

Palmer 指数是干旱指数发展史上的里程碑,然而,它并非完美无缺。这一指数是专门为处理半干燥和干湿气候区的干旱问题而设计的,那里的降水是当地唯一或主要水分来源(Doesken 等人 1991)。Palmer 本人曾指出在此条件之外的推广可能导致不真实的结果(Palmer 1965;Guttman 1991)。近 30 a 以来,几位科学家对该模式用于不同气候地区的效果进行了评估,并对模式的一些假设提出疑问。这些研究分为 2 类:水平衡模式的普遍应用和 Palmer 模式的特殊应用。

Alley(1984)研究了水平衡模式如何处理潜在蒸散、土壤水分、径流、降水分布和逐月或周蒸散量的问题,以及水平衡模式为何未考虑植被覆盖和根系发展的年季变化。他的研究指出 Palmer 模式未能结合滞后现象来解释从过剩水产生到它作为径流之间的时间差,也未能结合滞后来解释融雪或冻土的效果。他同时还研究了人为设计的干旱强度等级(表 2)以及干旱期和湿润期结束的指数转换值。

表 2 Palmer 干旱指数分级

水分分级	PDSI
极度湿润	≥ 4.00
过度湿润	3.00 ~ 3.99
湿润	2.00 ~ 2.99
轻度湿润	1.00 ~ 1.99
初始湿期	0.50 ~ 0.99
正常	0.49 ~ -0.49
初始干旱	-0.50 ~ -0.99
轻度干旱	-1.00 ~ -1.99
干旱	-2.00 ~ -2.99
严重干旱	-3.00 ~ -3.99
极度干旱	≤ -4.00

Palmer 曾将其指数标准化,试图使其在不同的地点和季节具有可比性。但是,由于 Palmer 用的权重因子仅仅基于 9 个气候区和以年为单位的资料,事实上,在美国本土他的指数不具有空间可比性(Alley 1984;Guttman 等人 1992;Guttman 1997),而且不同月份之间也不能直接比较(Alley 1984)。由分段返回程序和 PDSI 赋值时 X1、X2 和 X3 的切换取值引起的湿、干期之间的突然转换也引起了关注。这一方法有

可能导致了 PDSI(也可能是 PHDI)指数值(Alley 1984;Guttman 1991)的不对称和双峰统计分布。

敏感性研究发现 PDSI 的值主要取决于(1)为使不同月份和地区具有可比性的权重因子(2)可利用土壤水容比(Karl 1983)(3)为计算 CAFEC 条件量的标定期(Karl 1986),较长的标定期提供更加一致的 CAFEC 条件量的估计值和指数值。如果标定期改变,整个记录期的 Palmer 指数应重新计算以保持时间上的一致。为满足研究工作空间上的可比性,所有地区应采用相同的标定期。Guttman(1991)发现(1)为反映真实而非人为的初始条件,PHDI 要求的时间段应超过 4 a(2)与降水异常的效果相比温度异常的效果无足轻重。然而,在对美国中部的 PDSI 研究中,Hu 和 Willson(2000)确认,当温度和降水异常幅度相似时两者对 PDSI 的影响相同,而且单独基于降水的 PDSI 重建可能导致有关以往气候变化的结论模糊不清。

Palmer 指数自问世来已已成为许多人(水文学家、林业专家、外场气象学家、经济学家、政策决策者、新闻媒体、私人顾问和科研人员)广泛采用的监测和评估长期气象干旱和湿润条件的工具。正如(美国)国家减灾中心(NDMC)(参阅网址 <http://enso.unl.edu/ndmc/>)和 Willeke 等人(1994)所指出的,它是土壤水分条件敏感影响(例如在农业上)度量的最有效指数,它也被用于指示干旱响应活动的开始和结束。

在引入干旱指数 3 a 之后,Palmer(1968)提出一个新的基于每周平均温度和降水的干旱指数——作物水分指数(CMI)——作为他 PDSI 研究的分支,它是专为农业干旱设计的指数。CMI 取决于该周开始时的干旱强度和该周的蒸散短缺或补充土壤水分。该指数既度量蒸散短缺(干旱)又度量过度湿润(降水多于蒸散需求和补充土壤水分)。CMI 已被美国农业部(USDA)采用并在其《天气和作物周报(WWCB)》上作为满足短期作物水分需求的指标发布(Wilhite 和 Glantz 1985)。CMI 是暖季(即生长季)最有效的农业干旱指数。

3 后 Palmer 时代

在 Palmer 引入 PDSI、PHDI 和 Z 指数的近几十年中,也出现了其它一些干旱指数,但没有一个被证明优于 Palmer 指数从而取代它。这些指数有的是原有概念的新应用,有的则指出 Palmer 模式的不足

之处。

Shear 和 Steila(1974), Steila(1987)提出用水分收支法来确定水分异常,他们的方法与 Palmer 的相同,均考虑降水、潜在蒸散和土壤水分,但求出的却是水分状态距平值(用与降水相同的单位表示);也就是说它们是空间上实用的水深度量,在不同气候领域具有相同的气象学意义。

Keetch 和 Byram(1968)提出一个用于火灾管控的干旱指数。基于 203 mm(8 英寸)土壤蓄水容量的干旱指数(DI)用一英寸土壤水分损耗的百分位数表示,从 0(不缺水)到 800(绝对干旱)。DI 的计算基于每日的水分收支程序,其中的干旱因子由降水和土壤水分平衡确定。Keetch - Byram 干旱指数(KBDI)已被广泛用于野外火灾监测和预报。

研发干旱指数的大部分工作着眼于气象或农业的应用。正如 Dracup 等人(1980)指出,20 世纪上半叶,干旱的水文研究在持续期、程度(平均缺水)和强度(总缺水)方面被大大忽略,大多数研究局限于特定的盆地或特殊的一些历史干旱事件。他们确认了某些著名的个例,与 Huff 和 Changnon(1964)一同提出用低降水频率和单一地形指数评估干旱流量频率的方法;Whipple(1966)将区域频率分析的站一年方法用于多年水文干旱分析;Yevjevich(1967)应用过程统计理论分析干旱事件,Yevjevich 指出大陆尺度的水文干旱应该用持续时间、面积范围、强度、再现概率、开始或结束的时间来描述。Dracup 等人(1980)利用长期平均年流量(他们也用其指径流)提出发生水文干旱事件的随机模式,用它进行区域干旱频率分析。他们在 Yevjevich 过程理论的基础上定义每个干旱事件由平均年流量低于长期平均值的持续年份构成,并将干旱事件用下列 3 个属性描述:持续期(年流量低于长期平均值的连续年份)、强度(期间流量的累积短缺)、程度(期间流量的平均短缺)。他们用比值 R/P (R 为平均年径流, P 为年降水)考查流量记录的非平稳性,并指出这一径流系数可看作非线性比例函数,其中的 R/P 在高流(降水多)年比平均值高,在干旱(降水少)年比平均值低。其它有关过程理论在干旱指数方面应用的讨论可参阅 Frick 等人(1990)的文献。

地表供水指数(SWSI)是 1981 年为克罗拉多州开发的经验水文指数。作为地表水状况的度量,SWSI 弥补了 PDSI 未考虑降雪、水库蓄水、流量以及高地形降水情况的不足(Wilhite 和 Glantz 1985;

Doesken 等人 1991, Garen 1993)。SWSI 具有相似的尺度,而且 SWSI 和 PDSI 被一同用于克罗拉多州干旱评估和响应计划(CDARP)。西部各州对 SWSI 进行了修订和引用,主要为河谷盆地进行计算。由于 SWSI 指数对评估(和预测)地表供水状况非常有用,Doesken 等人(1991),Doesken 和 Garen(1991)撰文研究 SWSI,指出下列几个值得关注的问题:地表供水的定义缺乏一致性,权重因子随不同的州而变,有些情况下,还随月份而变,导致 SWSI 具有不同的统计特性,美国西部河谷盆地特有的水文气候差异导致 SWSI 在不同的地方和不同的时间并非总具有相同的意义。

Frick 等人(1990)在研究长期干旱对克罗拉多州 Fort Collin 城供水的影响时,阐述了水需求的不断变化对干旱强度的影响。人口增加和工业发展导致水需求增大,意味着现有水资源系统应对干旱的发生更加脆弱,发生干旱时的后果更严重。Frick 等人(1990)分析年流量资料时,考虑上游河流的变化及水库蓄水的变化作为资料的补充,定义干旱为低降水(雨和雪)持续期,此期间 Poudre 河(Fort Collins 城的水源)的可利用水和其余输入水不能满足当地用户的需求。他们利用模式计算出的年流量资料,来确定与 20、50、100、和 500 a 再现期相应的干旱并进行了频率分析。Fernandez 和 Salas(1999a)随后指出运用于洪水和其它高流事件的再现期技术可能不能用于干旱事件。他们建议用有赖于简单马尔可夫(Markov)链的代表性资料分析独立和非独立事件过程。他们用年降水、最小流量和年流量作为干旱指数联名撰文(Fernandez 和 Salas 1999b)介绍了他们的技术。

McKee 等人(1993)为可罗拉多州提出标准降水指数(SPI)来替代 Palmer 指数。用历史资料计算月和季(过去 2 个月、3 个月等直到 48 个月)实测降水总量的概率分布,然后用反演标准函数(Gaussian)将概率标准化。Guttman(1999)认为 Pearson - III 型分布是计算概率分布的“最好”通用模式。SPI 方法使干旱(和湿润期)可用降水短缺、标准百分率、不超限概率及 SPI 表示(图 7)。与 PDI 相同,SPI 也是无量纲指数,负值表示干旱,正值表示湿润条件。干旱强度、干旱程度和干旱持续期可确定,而且基于历史资料的特定干旱发生的概率也可确定。在不同时间尺度(各种季)时计算的指数对应不同的干旱类型:短季时计算农业或气象干旱(图 8 和

图 4 的 Palmer Z 指数图),长季时计算水文干旱等。虽然 SPI 是为可罗拉多州设计的,但它可用于任何地方。

将历史上 PDI 时间序列与相应的 SPI 时间序列的谱分析(Guttman 1997)比较后,发现 PDI 的谱特性是空间不一致的,而 SPI 的谱特性是空间不变的。PDI 谱与所期待的自动回归过程谱相一致,表明该指数具有记忆特性,而 SPI 谱与所期待的滑动平均过程谱相一致。PDI 与 SPI 之间的交叉谱表明 12 月 SPI 振荡与 PDI 振荡几乎位相相同。Guttman (1997)得出结论,SPI 更好地表示出某一地区干旱与其它地区干旱的可比性。

1990 年代美国国家海洋大气局(NOAA)国家气候资料中心(NCDC)和其它机构研制出新的干旱图集(Guttman 等人 1991;Willeke 等人 1994;Technical Services 1997)。在这本国家级图集中,干旱用流量、土壤水分(用 PMDI 代替)和降水概率(Guttman 等人 1991)描述。从日历月(1~12)的每个月开始,对持续期分别为 1、2、3、4、5、6、12、24、36 和 60 个月,采用 L-monment 方法在概率分别为 0.02、0.05、0.10、0.20、0.50、0.80、0.90、0.95 和 0.98 时,计算区域降水量分位数(Guttman 1993;Guttman 等人 1993)。对 NCDC 的美国历史气候网(Easterling 等人 1996)119 个测站的数据进行分析后,他们得出 111 个区的这些统计结果。这些区域是通过分析每个测站的“降水气候”确定的。降水气候用下列 7 个变量描述(Guttman 1993):

- (1)测站纬度;
- (2)测站经度;
- (3)测站高度(前 3 个变量描述地理位置);
- (4)平均年降水量;
- (5)年内具有最低值的连续 2 个月的平均降水量与具有最高值的连续 2 个月的平均降水量之比;
- (6)年内具有最高平均降水量的 2 个连续月的开始月;
- (7)年内具有最低平均降水量的 2 个连续月的开始月(后 3 个变量描述降水年循环的平均变率)。

气候水收支预算法(Leathers 和 Robinson 1995;Leathers 1997)被用于美国东北地区业务干旱监测。它是基于 Thornthwaite 和 Mather 为监测土壤水分盈余、土壤水分短缺和月尺度径流而提出的气候水收支预算方法。

NOAA 将基于卫星的技术用于干旱实时监测。

由卫星上的先进高分辨率辐射仪(AVHRR)辐射(可见光和近红外)资料计算出植被条件指数(VCI),再将它订正到地面气候、生态和天气条件下,用于干旱监测和跟踪(Kogan 1995)显示出好的应用前景。VCI 利用了植被对气候的紧密依赖关系,早在 90 a 年前,德国生物学家 Köppen 在研究基于植被的气候分类系统时就将其关系作为他的指导原则。VCI 可用于监测干旱并测量(作为潜在的全球标准)干旱发生的时间、强度、持续期和其对植被的影响。然而,由于 VCI 基于植被,它主要用于夏季生长期。在冬季植被大量冬眠期间它的应用有限。

其它国家的研究人员在 Palmer 指数不能很好应用于当地情况时,提出另外一些新的干旱指数。可靠降水指数(DI)定义为 80% 保证率的降水量,Le Houorou 等人(1993)用它研究非洲大陆的干旱。Gommes 和 Petrassi(1994)采用国家降水指数(RI)研究非洲的降水类型,它可比较不同时间和不同国家之间的降水类型。RI 是国家尺度的指数,由国家年降水相对其所有测站长期平均的权重计算。澳大利亚干旱监测系统(ADWS)基于降水量低于某一成数阈值的连续月数(至少 3 个月),其中的成数由月和年降水量排序分布的累积频率确定(Wilhite 和 Glanz 1985)。

由一些参考文献(Friedman 1957;Palmer 和 Penny 1971;WMO 1975 a,b,1985;Hasemeier 1977;Wilhite 和 Hoffman 1980;Wilmate 和 Wood 1983;NOAA 1989),读者可参阅干旱和其它(类似的)本文未讨论的干旱指数。其它为区域性研究提出的干旱指数可参考 Frick 等人(1990)的文献。

4 干旱监测

20 世纪即将结束时,在联邦政府协调下,为了加强和集中干旱监测活动,开发出了一个新的干旱监测工具。NOAA 和美国农业部(USDA)与国家干旱减灾中心(NDMC)联合研发了一个周(7 d)干旱监测产品(DM),它把气候资料和各个层面的专家知识结合在一起(Svoboda 2000)。

由于没有哪一个干旱定义能适合所有的情况(如上所述),DM 研发人员依据对几个关键指数和来自不同部门的辅助指标的分析,研制出最终的分析图。关键参数包括 PDI、CMI、土壤水分模式百分位数、日流量百分位数、正常降水百分比、顶层土壤水分(USDA 提供)和基于卫星的植被健康指数

(VHI) 它与上述的 VCI 有关)。辅助指标包括下列指数: SWSI、KBDI、SPI、降雪情况、水库水位、由井水确定的地下水位、USDA 报告的作物长势和实测的土壤水分。其中的一些辅助指标只用于延迟模式或局地/区域模式。

关键参数被客观地划分为 5 个 DM 干旱等级(这些等级和名称列于表 3)。分级图表包括 D0 级(轻度干旱)到 D4(特大干旱事件,相当于最大干旱记录)和标示干旱影响的部门(A 指农业影响,W 指水文影响,F 标示高风险火灾)。DM 分析图基于许多客观输入,但最终形成的图是根据实况条件经过专家调整得到的并向全国报告(Svoboda 2000)。总之,DM 是协商一致的产品,它反映专家们基于几个指标的集体最优判断。

表 3 干旱监测产品分级

干旱监测分级	表述
D ₀	轻度干旱
D ₁	干旱
D ₂	严重干旱
D ₃	极度干旱
D ₄	特大干旱

DM 的优点来自各方面的协作,从国家(USDA, NOAA)到区域(NOAA 区域气候中心)及州和地方,以及一些干旱指数的客观合成。DM 的局限性在于它企图在一张图示产品中表示几个时间尺度的干旱(从短期干旱到长期干旱)。DM 的目的不是要取代任何地方的或州的情报或由此发布干旱警报,而是提供全美国(包括太平洋领地和波多黎哥)干旱现状的总体评估(Svoboda 2000)。DM 近期已在 Inter 网上发布(<http://enso.unl.edu/monitor/monitor.html>)。

5 总 结

由于干旱的复杂性及其广泛的影响,缺少一个对干旱现象的充分定义,长期以来它一直阻碍着干旱的监测和分析,也影响了干旱指数的发展。在近 2 个世纪其进展——从基于表述降水短缺的简单方法到更复杂的针对特定问题的模式——是缓慢的。这些模式随着新的资料来源的出现而不断发展,由 Thornthwaite 提出的作为水需求度量的蒸散导致划时代意义的基于水预算的 Palmer 干旱指数的出现,35 a 后的今天它仍被广泛应用。

任何用于国家尺度的综合性干旱指数必须强调整体环境水分状况。Palmer 企图在他构造的指数中解决这一问题,但他面临的是一个两难问题,即使复杂的指数保持简单。所以,Palmer 指数在如何处理下列因子方面,如潜在蒸散、径流、融雪、月内或周内的降水和蒸散分布方面,一直受到批评。土壤水分用一个 2 层模式代表,它只强调地表层(向下直到“根部”)的水分,而与水文干旱联系的更深层地下水过程在 Palmer 模式中没有考虑。SWSI 通过替代流量和水库蓄水的方法强调积雪等因子和更深层地下水问题,弥补了 Palmer 指数的不足。然而,SWSI 只是一个区域指数,主要用于(美国)西部诸州流域。

20 世纪末,在干旱监测中采用略微不同的方法建立了干旱监测产品(DM)。DM 通过考虑全部现有的指数,力求评价整个环境水分状况,尤其是将最好的干旱监测工具融合为一个产品供所有用户使用。其中的一些指标能转化为普通的标准形式,如百分位数排序使其合并为一客观的“混合”指数(R. Tinker 2001,个人交流),但其它指数则需主观诠释后方能应用。

DM 的重要进展在于提出了一个综合客观的(美国)国家干旱指数,它克服了其它干旱指数的某些不足。结合其它的干旱影响指标 DM 还有进一步改进的可能。这些影响指标包括水库水位、地下水(水井)水层状况的测量、土壤水分实测到“地面真值”模拟、积雪中的潜在水分,以及某些降水时间分布的测量(即经过参考基准标定的连续干旱日数或降水事件之间的平均天数)。现有的州或区域网站可测得这些变量中的一部分,但这些资料在形式上还不能用于全美国的干旱评估。为了用于业务干旱监测(1)这些资料必须近乎实时采集(2)资料须在国家尺度监测,要求新建某些变量的国家测站网,(3)需要完善可靠的历史资料,以便将观测资料转换为意义清晰的形式(例如百分位数排序,这是干旱监测中客观“混合”的通常作法)以便与其它指标客观地匹配(4)资料需要订正,以消除非气候方面的影响(如水管理措施引起的干扰)。

(参考文献略,文中图 1~8 附后)

译自《美国气象学会公报(BAMS)》2002 年 8 月刊

附图

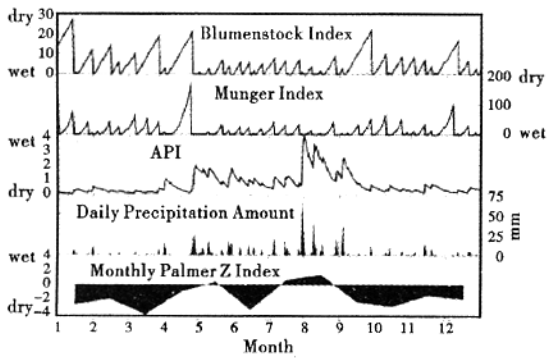


图1 1956年1月1日至12月31日爱荷华中东部逐日降水量、3个逐日干旱指数(Blumenstock指数、Munger指数和API)和逐月Palmer Z指数的对比

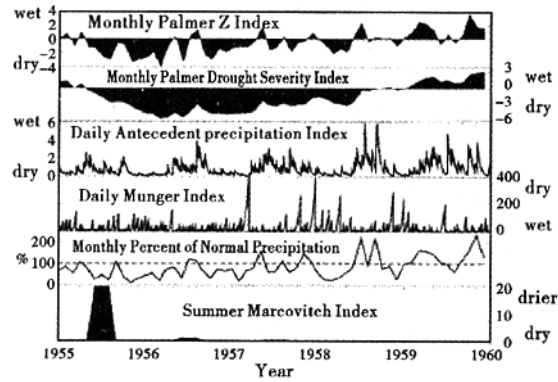


图2 1955年1月1日至1959年12月31日爱荷华中东部2个逐日干旱指数(Munger指数和API)、夏季Marcovitch指数、逐月正常降水百分率,以及2个逐月Palmer指数(Z指数和PDSI)的对比

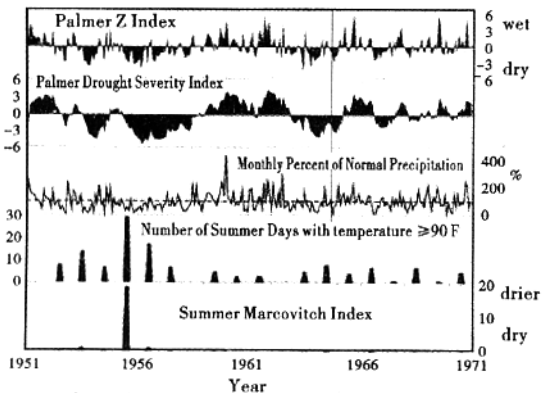


图3 1951年1月1日至1970年12月31日爱荷华中东部夏季Marcovitch指数和它的分量与2个逐月Palmer指数(Z指数和PDSI)的比较

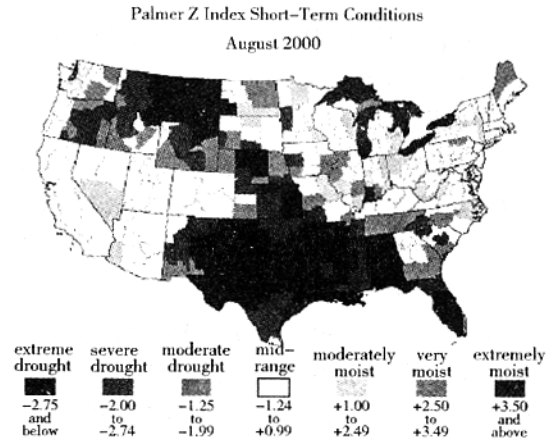


图4 2000年8月的Palmer Z指数(表明该月美国东南部平原到西北部地区发生的极度干旱情况)

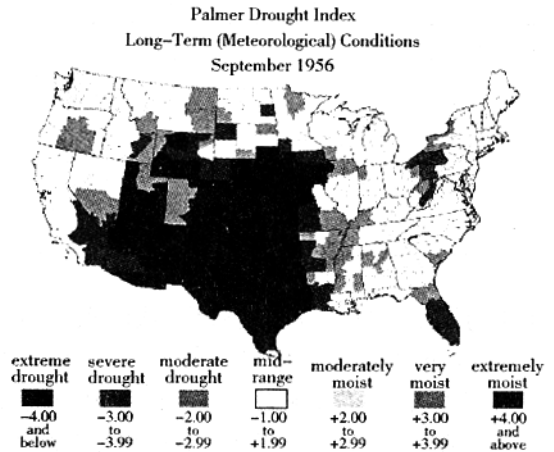


图5 PMDI分布表示1956年9月累积的长期干旱情况(可见该月美国本土近40%经历了严重到极度干旱)

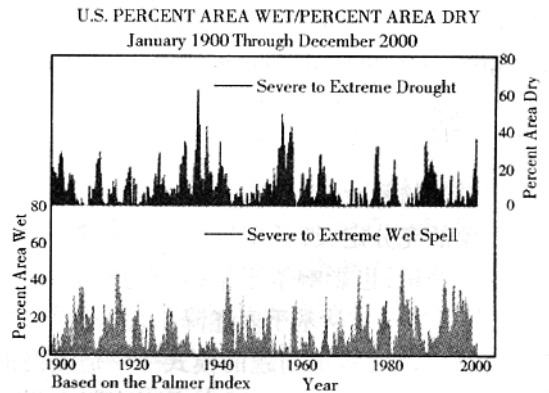


图6 20世纪美国本土经历的逐月(上图)严重到极度长期干旱和(下图)过渡到极度长期湿润条件的面积百分比(基于PMDI)

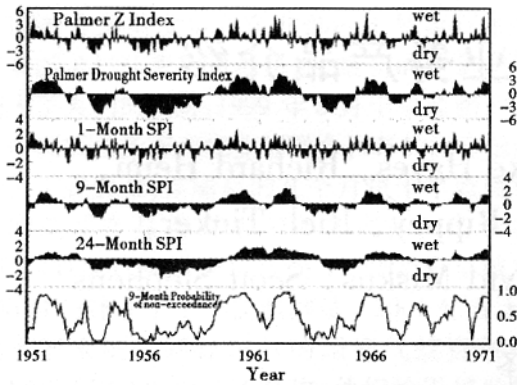


图 7 1951 年 1 月 1 日至 1970 年 12 月 31 日爱荷华州中东部 2 个逐月 Palmer 指数 (Z 指数和 PDSI) 与几个 SPI 产品的对比 (用 1 个月的 SPI 和 Palmer Z 指数来度量短期 (即月的) 干旱 9 个月的 SPI 近似与 PDSI 一致。在这里可见 SPI 的多样性具有描述长期干旱 (24 个月的 SPI) 和把降水短缺用随机概率表示的能力。特殊指数的应用取决于使用者要表达什么。任何人都不能简单地就说某一指数在所有方面比另一指数好)

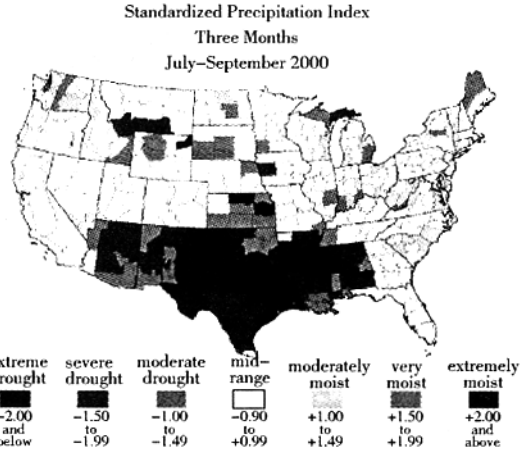


图 8 2000 年 7、8、9 三个月的 SPI (表明期间美国东南部平原到西南部地区发生的极度干旱情况。SPI 的值可比较不同地点的标准降水偏差)

(上接第 74 页)

参考文献:

[1] Jeffrey C Mogul. Big Memories on the Desktop[A]. In : Proceedings of the Fourth Workshop on Workstation Operating Systems[C]. List of publications from the DBLP Bibliography Server - FAQ in united states. 1993. 110 - 115.

[2] Lee D , Crowley P , Baer J , et al. " Execution Characteristics of Desktop Applications on Windows NT". 25th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA98) ,USA , 1998.

[3] Rik van Riel. Page Replacement in Linux 2.4 Memory Management. 2001. FREENIX Track Technical Program. Boston, Massachusetts, USA 2001.

[4] Juan E Navarro , Alan Cox Mitosis. a high performance , scalable virtual memory system[A]. Technical report TTR01 - 378[C] , CS Dept. , Rice University in America , 2001. 35 - 36.

The Design and Implementation of Preloading DLL Algorithm under Linux Platform

WANG Ren - tang , WANG Ren - bin

(Department of Computer Science , Lanzhou Commercial College , Lanzhou 730020 , China)

Abstract :Aiming at problems such as slow system response , bad interaction that exist in desktop Linux OS supporting application programs , we present preloading DLL algorithm in order to shorten system response time and enhance system interaction capability , meanwhile design and implement it under desktop Linux platform. Based on the characteristic that application programs invoke DLL heavily , the algorithm selects some DLLs that are run comparatively frequently and preloads them to physical memory so as to speed up running process and step up system interaction capabilities.

Key words preloading ,sharing DLL , heuristic study , desktop Linux OS