

赵建华,张强,周广胜. 基于回路系统的干旱研究[J]. 干旱气象, 2016, 34(6):1087-1098. [ZHAO Jianhua, ZHANG Qiang, ZHOU Guangsheng. Drought Research Based on the Circulation System in Land Surface Process[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6):1087-1098], DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-06-1087

## 基于回路系统的干旱研究

赵建华<sup>1</sup>, 张强<sup>1</sup>, 周广胜<sup>2</sup>

(1. 甘肃省/中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:**干旱是一种损失最大、影响人口最多的自然灾害。陆面过程中,白天水分通常从土壤输送到植被与大气中,夜间相反,水分又部分回流到土壤中。这种水分在土壤、植被和大气之间的流动可以看作是一个回路,而构成该回路的土壤、植被和大气3个部件通过水分的纽带作用构成了一个表象上的完整开放系统,称为回路系统。由此系统可以对气象干旱、农业干旱和水文干旱进行统一研究,干旱是该系统内在矛盾运动状况的外在反映。对该回路系统的分析表明,该系统主要通过内外2个过程与温度控制过程维持。基于含水量、水分流量和热量3个物理量,给出回路各部件与系统统一的水分热动力学方程组,并给出描述无旱涝过程的正态方程与描述旱涝过程的差量方程。最后,在含水量不变、流量不变、无植被的裸地、植被覆盖密集的地方以及水分运动停止等特殊情况下对干旱进行理论分析。结果表明:(1)对于干旱半干旱地区或无植被的裸地,干旱发生与否取决于水分源差量 $S'$ 的符号;(2)对于湿润区或植被覆盖度很大的地区,干旱发生与否取决于 $S'$ 和 $\partial W'/\partial t$ 的符号,其中 $\partial W'/\partial t$ 是含水量差量的时间偏导数。随后简单讨论了干旱检测的问题。总之,以回路系统和水分热动力学方程组可以对干旱进行系统和定量研究,这对于干旱的基础理论研究、干旱模式以及干旱的预测具有重要意义。

**关键词:**干旱;回路系统;内外过程;水分热动力学方程组

**文章编号:**1006-7639(2016)-06-1087-12 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-06-1087

**中图分类号:**P423, P426.61, P425.6

**文献标识码:**A

### 引言

干旱是损失最大、影响人口最多的自然灾害之一。全球干旱、半干旱地区总面积占陆地面积的34.9%,85%的耕地靠自然降水,42.9%的耕地位于干旱、半干旱区,干旱、半干旱现象日趋严重<sup>[1]</sup>。干旱每年造成的经济损失达数千亿美元<sup>[2]</sup>,它对全球粮食、水资源、沙漠化、湿地、生物多样性、社会经济、环境及人类可持续发展具有严重威胁<sup>[2-3]</sup>。近几十年来,我国干旱事件频繁发生,如1998年北方发生的大范围干旱<sup>[4]</sup>,2000年春夏北方又发生大面积的干旱<sup>[5]</sup>,2006年重庆遭遇百年一遇的特大伏旱<sup>[4]</sup>,2009年秋季到2010年春季西南出现的特大干旱<sup>[4,6]</sup>,2011年北方发生60 a一遇大旱、长江中下游5省区出现50 a罕见的春夏连旱<sup>[7]</sup>等,这对我国

人畜饮水、粮食安全和社会经济产生了重要影响。随着气候变暖的加剧、人口增长以及工农业的发展,水资源日趋短缺,加之极端天气事件的周期缩短<sup>[8]</sup>,干旱事件呈现明显上升趋势<sup>[9-10]</sup>,其危害也日趋严重<sup>[3,10]</sup>。因此,研究干旱具有重要意义。

干旱很复杂,国内外对于干旱的定义多达100多种<sup>[11]</sup>。世界气象组织与美国气象学会一般将干旱定义为“长时间缺乏降水或降水明显短缺”或“由于缺少降水,异常干的天气时段持续到引起水文失衡”等<sup>[12]</sup>;王劲松等<sup>[13]</sup>定义干旱为“降水的短缺或当水的供应不能满足对水的需求时的状况,是指由水分收支或供求不平衡所形成的水分短缺现象”;张强等<sup>[14]</sup>认为“干旱是指某一地域在某一具体时段内的降水量比多年平均降水量显著偏少,导致该地区的经济活动(尤其是农业生产)和人类生活受到

收稿日期:2016-07-08;改回日期:2016-10-26

基金项目:国家自然科学基金(41375019)与国家重点基础研究发展计划(2013CB430200,2013CB430206)共同赞助

作者简介:赵建华(1976-),男,宁夏中卫人,主要从事大气湍流、干旱与陆面过程研究. E-mail:53277357@qq.com

较大危害的现象。它是一种气候灾害,也是一种持续性的气象灾害”。干旱一般包括 2 种含义:一种是水分收入小于支出(Aridity),即干旱气候,侧重于空间;另一种是可利用水小于均值(Drought),即干旱灾害,侧重于时间<sup>[11,15-16]</sup>。显然,上述定义均有不同侧重,其中王劲松等<sup>[13]</sup>给出的定义最贴近本质。张强等<sup>[2]</sup>更进一步认为干旱一词实际上包括了干旱气候、干旱和干旱灾害 3 种含义。这种多学科交叉和含义的复合性,是干旱定义复杂的 2 个重要原因。

国内外一般从成因、规律、影响、预报与监测方法等方面对干旱展开研究。如成因方面,下沉运动被认为是重要原因<sup>[2,11,13-14,17]</sup>,而气候变化<sup>[18-19]</sup>、北大西洋涛动(NAO)<sup>[20-21]</sup>、ENSO<sup>[22-25]</sup>、北极涛动<sup>[24]</sup>、海温变化<sup>[24,26-27]</sup>、海陆气之间的相互作用<sup>[28-29]</sup>、环流或风场异常<sup>[9,30-32]</sup>以及人类活动<sup>[32-33]</sup>等也被认为是干旱发生的原因;干旱规律方面,主要从干旱的空间分布、时间演变以及周期性等方面展开研究<sup>[34-38]</sup>;干旱影响方面,主要研究了干旱对天气气候<sup>[39-40]</sup>以及植物<sup>[41]</sup>的影响;干旱预报方面,采用了包括水文模式<sup>[19]</sup>、气候模式<sup>[28,42-43]</sup>、陆面模式<sup>[44-45]</sup>、旱涝持续性的尺度因子<sup>[46]</sup>、游程理论(Run Theory)<sup>[47]</sup>、自回归模型<sup>[48]</sup>、马尔科夫链模型<sup>[49]</sup>、神经网络方法<sup>[23,50]</sup>、条件残差重采样技术(Conditional Residual Resample Technique)<sup>[51]</sup>、模糊逻辑模型<sup>[23]</sup>、低阶离散自回归滑动平均(DARMA)模型<sup>[52]</sup>和泊松过程模式<sup>[53]</sup>等方法进行研究;干旱监测主要以干旱指数实现。据统计,全球提出了上百种干旱指数<sup>[2]</sup>,实际可能更多,常用的如帕尔默干旱指数、标准化降水指数、降水距平百分率、土壤相对湿度指数和 CI 指数等。其中,帕尔默干旱指数被认为是干旱指数发展史上的转折点。近年来,又产生了许多新的指数,比如快变指数(Rapid Change Index)<sup>[54]</sup>、农业干旱参考指数<sup>[30]</sup>、归一化差异水体指数<sup>[55]</sup>、K 指数<sup>[56]</sup>、土壤湿度亏缺指数(Soil Moisture Deficit Index, SMDI)<sup>[57]</sup>、蒸散亏缺指数(Evapotranspiration Deficit Index, ETDI)<sup>[57]</sup>以及多尺度干旱指数标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)<sup>[58]</sup>等。

干旱的这种定义多、种类多、成因复杂、规律多样、影响面广、危害大以及监测手段众多的特点,表明干旱并不是局部事件(如大气、土壤、植被或社会经济等方面),它应该站在系统或整体的角度上来理解,这样才能对干旱进行统一定义与研究;而从局部出发只能导致目前这种头绪纷杂的局面。干旱主要是发生在土壤、植被和大气边界层中的一种现象,

陆面过程对其具有重要意义。水文模式<sup>[19]</sup>和陆面模式<sup>[44-45]</sup>在干旱研究与预测中的应用就体现了其重要性。许多研究指出,陆气相互作用存在一个耦合态<sup>[59]</sup>。孙菽芬<sup>[60]</sup>指出,水热在土壤、植被和大气中的输送存在一个物理回路过程。虽然也有许多文献从理论方面对干旱展开了研究<sup>[61-62]</sup>,但是从系统角度、物理回路过程出发进行研究的很少见到。本文从回路过程出发,通过分析干旱的矛盾本质和回路维持的机制,给出回路系统热动力学方程组,然后在一定条件下对之进行理论分析。这对干旱的基础研究具有重要价值。

## 1 刻画干旱的回路过程

一般意义上的干旱主要发生在大气边界层下面。实际物理过程中水分在土壤、植被与空气之间进行迁移。以晴天为例,考虑一个土壤、植被和大气边界层构成的理想封闭系统:白天水分自土壤中通过根系吸收到植被或者通过蒸发进入到底层空气中,然后植被中的水分通过蒸腾、底层空气中的水分通过湍流输送被带至上层空气中;夜间,地表变冷,空气中的部分水分又通过地表或植被凝结/凝华(比如露水)回流到土壤中,如图 1a 所示。需要指出的是,露水是陆面水分过程的重要分量,在湿润区与雨季,露水在促进植物生长中的作用几乎可以忽略,而在干旱、半干旱地区则不然,露水是重要的水资源和湿度来源,它作为土壤的一种额外水分输入,一定程度上缓解了土壤水分短缺,在某些干旱区露水甚至超过了降水量,是干旱区植物生长极为重要的液态水来源<sup>[63-65]</sup>。显然,水分完成了一个表象上完整的日循环过程。该日循环为一个物理回路过程<sup>[60]</sup>,这个回路可看作是以水分为纽带,且连通土壤、植被和大气边界层的回路系统。以此回路系统即可以对气象干旱、农业干旱与水文干旱进行统一研究。当然社会经济干旱也可以加入,此处为了突出重点,略。

当然实际情况是回路系统很难封闭:水分会在输送中被空气和土壤中的水平运动携带至其它地方,从而不能回到原地;不过这并不影响回路的定义,因为我们不是从 Lagrange 观点研究问题,而是从 Euler 观点出发的,回路仍然是存在的,只不过流通的水分具有不同的背景。另外,回路中的水分也可能完成不了一个完整的循环,比如在极端干旱区,水分可能从空气中回流不到土壤,这也不影响回路的定义,因为这种情况在数学上只不过表示流量为 0,是回路中断现象。回路系统是开放系统。

陆面过程中常参考电路中计算阻抗的方法处理湍流通量在土壤、植被和空气之间的输送<sup>[60]</sup>,此处也采用之,这样该回路系统就可以如图 1b 所示。图 1b 中,S 代表土壤,其底部可取为研究时段内土壤湿度没有显著变化的层次;V 代表植被;A 代表底层空气,与植被同高度;T 代表底层空气以上至某一参考层的空气,该参考层可以取到混合层顶或残留层顶的高度,这样在一定程度上可保证水分守恒,因

为在没有天气过程并忽视部件水平方向、土壤底部与边界层顶部的水分供给,以及忽视化学过程的条件下,水分主要分布在回路中。值得注意的是,图 1b 是简略图,并联的 V 和 A 之间实际上是有水分交流的,为了简洁,图中没有绘出;而且 T 和 S 是有一定高度的,为了美观,绘成了水平。孙菽芬认为土壤是陆地表面水文循环的缓冲储水池<sup>[60]</sup>,T 显然也具有这种功能,它既能蓄水,又能供水。

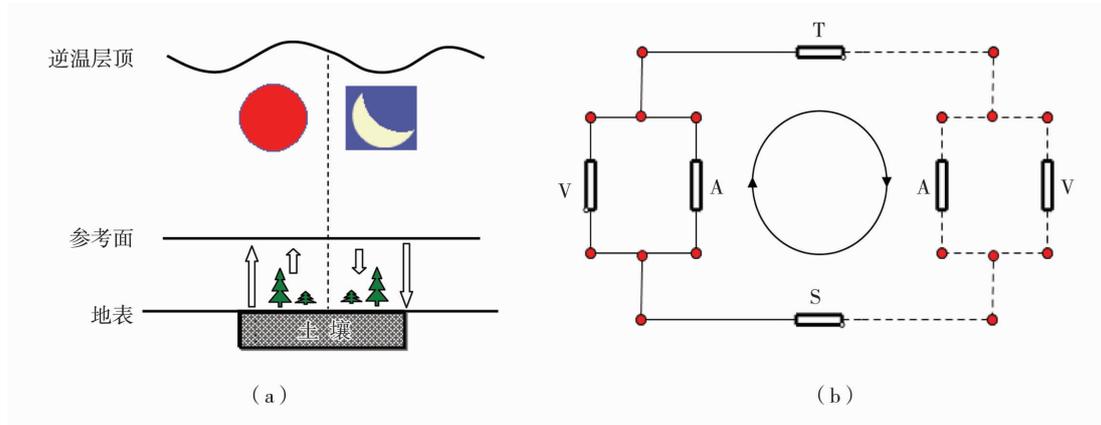


图 1 水分迁移回路系统示意图

(a) 昼夜示意图;(b) 回路系统

(a 中虚线为昼夜分界线;b 中带箭头的圆环表示输送方向,实线代表水分自 S 输送到 T 的过程,虚线反之)

Fig. 1 Sketches of water flows in circulation system

(a) water flows at daytime and nighttime, (b) water flows in whole system

(The dashed line in fig. a divides a day into daytime and nighttime. Circle with arrows represents the direction of transportation, solid lines in fig. b represent the process water flows from S to T, while dashed lines represent the reverse)

## 2 干旱的矛盾本质

基于上述认识,以及对干旱反映水分收支或供求不平衡的普遍理解,将上述回路系统进行条理化:(1)回路系统由土壤、植被和空气等一系列部件构成,干旱作为一种现象,是系统内在运动状况的外在反映;(2)作为干旱关键与决定因素的水分,是系统各部件连接的纽带;(3)干旱是需水与供水之间的矛盾所致。这就是对干旱的认识,对于涝渍的认识类似。

系统中的水分在系统内部各个部件之间进行输送交流,满足系统各部件的水分需求和系统的维持。正常状况(即无旱涝)下,需水与水分供应是既充足又平衡的。所谓的正常状况,指的是一地长期稳定的自然状况,是包括植物、动物、人、土壤、空气等在内的多个方面平衡适应的一种状况,它不需要针对某个部件,而是系统的、整体的状况。干旱就是针对此正常状况产生的。特殊情况下,当系统某些部件

需水出现变化(比如植被生长、气温变化、土壤水分下渗等引起需水增大或者减小)时,两者之间的平衡会被打破;如果水分输送不能适应需水的变化,矛盾出现,旱涝就会在该部件上发生,直至两者之间的矛盾被解决或调和为止;如果两者不适应时间较长或者很难适应,进而还会引起该部件上下游(以水分输送的方向决定)的其它部件出现“病变”,甚至可能导致系统整体出现病变,乃至瓦解、崩溃或重构。从另一角度而言,当水分供应发生变化(加快、减慢或者停止),部件需水也会相应出现变化;如果需水的调整不适应水分供应的变化,则矛盾出现,部件就会出现水分积累或亏损,旱涝发生,直至需水与水分供应达到正常状况且相互适应为止。如果两者不适应时间较长,部件病变会成为常态,整个系统都会异常。显然,需水与供水之间的矛盾运动是旱与涝的内因。需水与水分供应之间的矛盾体现为水分在部件上出现了超出正常需水的大量积累为涝;反之旱。

### 3 含水量和水分输送的控制过程

#### 3.1 含水量的控制

回路系统中,部件往往具有一定的持水能力,具体表现为部件含水量。含水量一般是有限度的,有最大值和最小值。部件含水量与部件自身的物理或生理特性密切相关。比如,空气的气温、密度以及气压也是控制含水量的因素。风速主要起控制水分流动快慢(即水分流量,简称为流量)的作用。

外在因素也能起到控制部件含水量的作用,它可由回路系统中的其它部件实现,比如土壤含水量就可因植被与空气的含水量或状态的变化而变化,空气含水量可因植被含水量的变化而变化。这本质上反映了部件之间的相互联系。

在土壤、植被和空气 3 个部件中,空气最具活性,其含水量的极值与空气状态有关。空气的这种活性,使得它在回路系统中具有重要地位,在一定条件下,它可以通过自身状态的变化调节回路系统中的水分运动,比如通过升温,其所容纳的水分会增多,植被与土壤中的水分就会补充到其中,从而引发或加剧后两者的干旱;通过降温,降低其水分需求,从而使水分保留在植被与土壤中,缓解乃至解除干旱。

#### 3.2 水分输送的控制

水分输送控制很重要。一般认为水分是顺梯度输送的,此时系统中水分的输送主要决定于部件两端压强或水势。这是对部件而言。对回路系统,该系统是如何维持的?比如白天土壤 S 的水势如果比空气高,则夜间如何又从空气倒流到土壤中,水分的供应机制为何?对图 1 所示的回路系统,主要有以下 3 种过程:

(1)内部供水过程。通过部件内在动力系统与部件状态变化驱动,比如典型的蒸散—凝结/凝华过程:①土壤供水,通过临近部件的植被(吸收水分)和空气(通过湍流、升温、减压、体积减小以及粉尘气溶胶数量增多或粒径变小等过程)产生正水势梯度,促使水分由 S 到 A 和 V 的输送。即白天蒸散过程;②空气供水,通过空气降温、升压、水汽辐合、体积收缩以及粉尘气溶胶数量减少与粒径变大等过程促使水汽凝结,进而回流到土壤,如夜间凝结。在这 2 种过程中,空气的特性呈现出一种相反的变化,通过这种类似于交流电的反相变化便可以实现回路系统的正常工作,简称此过程为内过程。显然,内过程具有典型的日周期或年周期,可以在周期内的各个位相或周期平均上考察干旱情况,即会得到相应的

小时、日、月、季或年尺度上的干旱情况。

(2)外部供水过程。理想的水分供应应该是除了能满足回路系统中各个部件的正常需水之外,还能保证回路系统的正常运行。但在实际中,由于内过程的总水量守恒,各个部件的需水量常常变化,比如植被生长需要水分;当内过程产生不了足够的供应或者不能维持回路正常工作时,干旱就可能发生。此时外部供水显得非常重要,它的发生与否将是干旱缓解与加重的主要因素。这就是外部供水过程,简称外过程。外部供水的典型例子是降水与灌溉,当然空气抬升与下沉也是重要过程。外部供水发生的时机和程度是该过程非常重要的 2 个物理量,具体表现为降水或灌溉出现的时间与其水分补给量的大小。有效的外部供水应该是在弥补前期内部供水造成的水分缺失前提下,还能促进回路系统的健康运行。

(3)温度控制过程。温度对土壤中的水热耦合运动<sup>[60]</sup>、植被生长和大气相对湿度具有重要的控制作用。通过温度变化,控制土壤中热量输送引起的水分输送过程,进而对土壤中含水量产生影响;通过温度变化,控制植被的生长,从而加快或减缓植被对水分的吸收、输送以及储存;通过温度变化,改变大气饱和水汽压与相对湿度,从而控制大气中水分的含量与输送。故温度可以对部件含水量和水分输送产生一定的控制作用,这种作用进而对上下游部件也产生一定影响。

回路系统在内过程维持下发生干旱时,如果没有外过程参与,则:①系统中的水分需求旺盛部件会截留或榨取其它需求不旺盛部件所需水分,从而使回路系统病态发展,如高温下植被的枯萎,空气榨取了植被中的水分。或者局部部件虽然水分需求不旺盛,但是由于出现干旱,阻碍了水分的流通,也会造成回路系统病态发展,比如土壤干旱,这是局部干旱;②系统中各部件均一致缺水,造成回路系统中流量一致降低,各部件均干旱,这是系统干旱。另外,由局部干旱与系统干旱可以对干旱进行等级划分。对于系统干旱,以部分部件出现缺水为轻旱;以回路系统水分运动中断、内过程不能维持回路系统为中旱;以回路系统所有部件均无水分供应为重旱。对于局部干旱,可称有水分供应、但低于部件正常需要为轻旱;称无水分供应、且部件含水量“渗出”为中旱;称既无水分供应、又无部件含水量“渗出”为重旱。

不管是内过程还是外过程,都离不开系统与部件需水量。需水量对内过程的维持、外过程的效果具有重要影响,也对干旱指数和干旱的预报、预警、

缓解及消除具有重要影响。

总而言之,研究干旱需要研究以下问题:①回路系统与部件需水量;②水分输送;③需水量与水分输送之间的矛盾;④回路系统维持机制与内外供水过程;⑤温度的控制作用等。

## 4 基于回路系统的干旱水分热动力学方程组

### 4.1 含水量、流量和热量方程

含水量和流量是回路系统中的2个关键物理量,温度也是重要的控制因素,因此研究干旱需要考虑这3个物理量。土壤、植被和大气各自有其相关的含水量、流量与热量的方程,为了统一研究,此处将它们合写为一个方程。不过注意的是,水分在流经部件时其质量可能是变化的,比如降水、灌溉、植被吸收、植被枯萎、植被受伤后流出伤流量、土壤中根系吸收、雾和枝叶上的露水、温度变化产生的冻融过程或者吸湿水含量发生变化等,尤其是水分被植被吸收、植被气孔关闭的情况下,水分近乎“消失”,不考虑质量变化显然不符合事实,也会引起误差。因此含水量和流量的方程需要考虑这种变化。通常热量平衡方程采用的是以温度为预报变量的形式,但这样难以统一各个部件,为此仍以热量为预报变量给出其方程。另外需要指出的是,回路系统中,由于植被对水分的吸收、水分在空气中的重新分布以及在土壤中的渗透,在回路系统中运行的水分实际上很难保证是同一质量,不过这并不影响基于 Euler 观点对方程的推导。

设单位体积总含水量(包括液态、气态与固态)为  $W$ (单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),流量为  $I$ (单位:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),热量为  $Q$ (单位:  $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ )。水分可以扩散、被吸收或者消失,比如化学与生物过程。

对某一部件,其质量变化等于流入量与其质量变化率之和,其流量变化等于边界流入量和外力强迫之和,其热量变化等于流入量与外源项(包括转化项)之和,容易得到土壤、植被和大气3部件统一的含水量和流量方程如下:

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} + D_{hw,i} + \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} = S_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} + D_{hl,i} + \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} = -gW_i - \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} + D_{hQ,i} + \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} = \delta_i \quad (3)$$

$$W_{\text{thres},i} = f(t, T_i, W_i, M_i, O_i) \quad (4)$$

其中,下标  $i$  代表第  $i$  个部件,  $W_i$ 、 $I_i$  与  $Q_i$  分别是第  $i$

个部件的含水量、流量与热量,土壤与大气中存在水热耦合效应,  $I_i$  即是其综合效应,  $w_i$  是水分垂直迁移速度。注意的是,这里定义的  $I$  和  $W$  都是复合项;  $H_i$  是由热传导、湍流以及液态水和气态水运动引起的热量在垂直方向的输送;  $D_{hw,i}$ 、 $D_{hl,i}$  与  $D_{hQ,i}$  分别是水平方向的含水量散度、流量散度、热量散度,  $D_{hw,i}$  比如土壤与空气中的水分辐合辐散,  $D_{hl,i}$  比如空气中水平方向的水汽通量散度,  $D_{hQ,i}$  比如因空气辐合辐散、土壤受到挤压以及液态水与气态水在横向流动时产生的热量在水平方向的变化;  $\delta_i$  是热量的外源项,包括做功、耗散、动能的转化、辐射、水的相变以及光合作用等产生的热量变化;显然,(3)式是个极端综合的热量方程,其具体表达式随部件的不同而有变化。  $\Delta$  代表实际部件的空间尺度变化;  $p_i$  是部件上下两端水分的水势;  $S_i$  是其它形式的水分源汇项,比如部件自身耗水量或补水量;  $l_i$  是部件的线尺度,  $g$  是重力加速度,  $t$  是时间。  $W_{\text{thres},i}$  是含水量的临界值,包括饱和值与最低限度的取值,它是时间  $t$ 、温度  $T_i$ 、含水量  $W_i$ 、部件质量  $M_i$  以及其它因素  $O_i$ (对生物,比如阳光、营养物、生长速率与呼吸速率等)的函数。当  $W_i = W_{\text{thres},i}$  时,部件含水量达到饱和或最低限度,(4)式的关系会对(1)式产生制约。

在陆面过程中,植被和空气中的流量  $I$  和  $Q$  并不用(2)式和(3)式计算,而是通过阻抗或总体输送系数计算。实际计算时也可以采用这2种方法。

由(1)式可知,回路系统中水平方向水分补给、内过程(垂向水分补给)、外过程(水平方向水分补给、降水及灌溉等其它形式水源)和部件自身耗水量是干旱的决定因素。其物理意义是:内外过程水分供应不足或部件自身耗水量过大,均可导致干旱发生。由(2)式可知,水分输送快慢既与流量散度有关,又与部件净水势梯度有关。其物理意义是:正的净水势梯度、流量辐合、垂向流量通量净输入,可加速水分流动,反之减慢。(3)式亦然。

将各部件的(1)、(2)、(3)式求和,即得系统整体的含水量、流量和热量的方程:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + D_{hw} + \sum_i \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} = S \quad (5)$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} + D_{hl} + \sum_i \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} = -gW - \sum_i \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + D_{hQ} + \sum_i \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} = \delta \quad (7)$$

其中,  $W = \sum_i W_i$ 、 $I = \sum_i I_i$ 、 $Q = \sum_i Q_i$ 、 $D_{hw} = \sum_i D_{hw,i}$ 、 $D_{hl} = \sum_i D_{hl,i}$ 、 $D_{hQ} = \sum_i D_{hQ,i}$ 、 $S = \sum_i S_i$  和

$\delta = \sum_i \delta_i$  为系统整体的含水量、流量、热量、含水量辐合辐散项、流量辐合辐散项、热量辐合辐散项、质量外源汇和热量外源汇。显然,系统的水热方程组与部件的在形式上并无二致,区别仅在于对象不同;(1)一(3)式针对部件而言,可对部件各自的干旱情况进行预测,(5)一(7)式则针对整个系统,预测的是整体情况。(1)一(7)式即是回路系统中干旱水分的热动力学方程组。

由于回路系统具有典型的日周期,故可对除(4)式之外的(1)一(7)式进行 24 h 的时间积分,即得系统含水量、流量与热量的日变化:

$$W_{i1} - W_{i0} + \int_{24hr} \left[ D_{hw,i} + \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} \right] dt = \int_{24hr} S_i dt \quad (8)$$

$$I_{i1} - I_{i0} + \int_{24hr} \left[ D_{hl,i} + \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} \right] dt = - \int_{24hr} \left[ gW_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \right] dt \quad (9)$$

$$Q_{i1} - Q_{i0} + \int_{24hr} \left[ D_{hQ,i} + \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} \right] dt = \int_{24hr} \delta_i dt \quad (10)$$

$$W_1 - W_0 + \int_{24hr} \left[ D_{hw} + \sum_i \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} \right] dt = \int_{24hr} S dt \quad (11)$$

$$I_1 - I_0 + \int_{24hr} \left[ D_{hl} + \sum_i \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} \right] dt = - \int_{24hr} \left[ gW + \sum_i \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \right] dt \quad (12)$$

$$Q_1 - Q_0 + \int_{24hr} \left[ D_{hQ} + \sum_i \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} \right] dt = \int_{24hr} \delta dt \quad (13)$$

其中,下标 0 表示初始时刻,1 表示末时刻。(8)一(13)式即可预测各部件与系统整体在一日的干旱状况。

当然,由于该回路系统大致以白天和黑夜分界,还可以对白天和黑夜分别进行积分,得到相关物理量的变化。

#### 4.2 正态方程与差量方程

部件需水异常和水分输送异常对干旱有重要影响,因此需要研究需水和水分输送的正常状态和对正常状态的偏离。现实中确实在许多情况下是不发生干旱的,这就是正常状态。如前所述,正常状态即包括植物、动物、人、土壤、空气等在内的多个方面平衡适应的一种自然状况,它是系统的、整体的一种自适应状况,并不针对个别部件。干旱因此也可以看成是一种含水量、流量以及两者之间关系对正常状态的偏离,这种偏离就是矛盾,矛盾是事物发展的内在动力<sup>[66]</sup>。正常状态可以试验确定、也可以统计确定,此处给出其方程(简称“正态方程”)。正态方程

可以采用求平均的方法获得,不过求平均时注意应该将旱涝的时段去掉,因为难以保证旱、涝两者的平均。对(1)一(7)式求时间平均后可得正态方程如下:

$$\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial t} + \bar{D}_{hw,i} + \left[ \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} \right] = \bar{S}_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial \bar{I}_i}{\partial t} + \bar{D}_{hl,i} + \left[ \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} \right] = -g\bar{W}_i - \left[ \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \right] \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{Q}_i}{\partial t} + \bar{D}_{hQ,i} + \left[ \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} \right] = \bar{\delta}_i \quad (16)$$

$$\bar{W}_{thres,i} = f(t, \bar{T}_i, \bar{W}_i, \bar{M}_i, \bar{O}_i) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \bar{D}_{hw} + \sum_i \left[ \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} \right] = \bar{S} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \bar{I}}{\partial t} + \bar{D}_{hl} + \sum_i \left[ \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} \right] = -g\bar{W} - \sum_i \left[ \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \right] \quad (19)$$

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \bar{D}_{hQ} + \sum_i \left[ \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} \right] = \bar{\delta} \quad (20)$$

$$\text{注意关系: } \left[ \frac{\Delta X_i}{\Delta l_i} \right] = \Delta \bar{X}_i \Delta \bar{l}_i^{-1} + \overline{\Delta X'_i (\Delta l_i^{-1})'}$$

其中  $X_i$  分别代表  $I_i$ 、 $I_i w_i$ 、 $H_i$  以及  $p_i$  等,比如  $\left[ \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} \right] = \Delta \bar{I}_i \Delta \bar{l}_i^{-1} + \overline{\Delta I'_i (\Delta l_i^{-1})'}$ 。还要注意  $\Delta \bar{l}_i^{-1} \neq \Delta \bar{l}_i^{-1}$  和  $(\Delta \bar{l}_i^{-1})' \neq (\Delta \bar{l}_i^{-1})'$ 。在部件尺度变化不大时可采用  $\overline{\Delta l_i^{-1}} = \Delta \bar{l}_i^{-1} \left[ 1 + \frac{\Delta l'_i}{\Delta l_i} \right]^{-1} \approx \Delta \bar{l}_i^{-1} \left[ 1 - \frac{\Delta l'_i}{\Delta l_i} \right] \approx \Delta \bar{l}_i^{-1}$  的近似表达式,但对生长迅速的植被(如小草生长阶段很快)以及快速发展的边界层则不可采用。(14)一(20)式就是正态方程,表征无旱涝时各物理量的大小以及其间的关系,它对于了解各部件与系统的正常物理、生理的水热配置具有重要意义。它们也是 Palmer 干旱指数中气候适宜降水、气候适宜蒸散及其它气候适宜量存在的理论基础。

类似于求湍流方程的方法,以(1)一(7)式减去(14)一(20)式可得干旱水分热动力学的差量方程:

$$\frac{\partial W'_i}{\partial t} + D'_{hw,i} + R \left( \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} \right) = S'_i \quad (21)$$

$$\frac{\partial I'_i}{\partial t} + D'_{hl,i} + R \left( \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} \right) = -gW'_i - R \left( \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \right) \quad (22)$$

$$\frac{\partial Q'_i}{\partial t} + D'_{hQ,i} + R \left( \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} \right) = \delta'_i \quad (23)$$

$$W'_{thres,i} = f(t, \bar{T}_i, \bar{W}_i, \bar{M}_i, \bar{O}_i, T'_i, W'_i, M'_i, O'_i) \quad (24)$$

$$\frac{\partial W'}{\partial t} + D'_{hw} + \sum_i R \left( \frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} \right) = S' \quad (25)$$

$$\frac{\partial I'}{\partial t} + D'_{hl} + \sum_i R \left( \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} \right) = -gW' - \sum_i R \left( \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \right) \quad (26)$$

$$\frac{\partial Q'}{\partial t} + D'_{hQ} + \sum_i R \left( \frac{\Delta H_i}{\Delta l_i} \right) = \delta' \quad (27)$$

式中:  $R \left( \frac{\Delta X_i}{\Delta l_i} \right) = \frac{\Delta X_i}{\Delta l_i} - \left[ \frac{\Delta X_i}{\Delta l_i} \right] = \Delta \bar{X}_i (\Delta l_i^{-1})' + \Delta X_i' (\Delta l_i^{-1}) + \Delta X_i (\Delta l_i^{-1})' - \Delta X_i' (\Delta l_i^{-1})'$ , 带'的量代表差量, 即对正态的偏差。

差量的意义在于可以在规律的基础上认识变化。比如其中的  $W'_i$  与  $W'$  反映了旱(含水量的偏差为负)与涝(含水量的偏差为正)的程度, 偏差越大, 越不正常, 旱涝就会加重, 风险性也会增大。由(21)~(27)式即可对旱涝的成因及其演变进行预测。

从上述方程组可以看出, 差量方程与正常状态是有关的。只要预先知道正态和初边值, 就可以知道偏差状态。再根据各学科对干旱不同的定义, 即可以对干旱进行日、月或年尺度的预测。另外, 常说的正能量与负能量也可以根据以上差量方程得到, 此略。

### 4.3 干旱的环量描述

对于正态, 流量沿回路是单向的。发生干旱时, 流量变小、中断乃至消失。对于系统干旱, 可以用流量沿回路的积分来表征, 通过研究此积分的变化来研究干旱。(2)式乘以  $\Delta l_i$ , 略经处理后可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \Gamma_i + D_{hl,i} \Delta l_i + \Delta (I_i w_i) - I_i \frac{\partial}{\partial t} \Delta l_i \\ = -g W_i \Delta l_i - \Delta p_i \end{aligned} \quad (28)$$

其中,  $\Gamma_i = I_i \Delta l_i$  为局部部件的环量。

(28)式沿整个回路求和, 即得整个回路系统的环量  $\Gamma$  方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \Gamma + \sum_i \left( D_{hl,i} \Delta l_i + \Delta I_i w_i - I_i \frac{\partial}{\partial t} \Delta l_i \right) \\ = - \sum_i \left( g W_i \Delta l_i + \Delta p_i \right) \end{aligned} \quad (29)$$

其中,  $\Gamma = \sum_{i=1}^n \Gamma_i$ ,  $n$  是指  $n$  个串联部件, 并联部件算作一个串联部件。由此方程可确定系统干旱。

## 5 干旱热动力学方程的理论分析

理想情况下, 含水量与流量应该遵从(14)~(20)式, 此时没有所谓的旱涝过程。但实际上由于气候变化与人类活动等原因, 这种正态过程往往被打破, 从而出现了旱涝。以下对一些简单情况进行讨论。另外, 由于温度起控制作用, 为简单计算, 以下的讨论将不考虑它。

### 5.1 含水量不变

考虑一极端理想的情况, 对某一部件  $i$ , 含水量

$W_i$  不变, 没有外源外汇 ( $S_i = 0$ ), 并不计侧边界流入 ( $D_{hw,i} = 0, D_{hl,i} = 0$ )。由(1)和(2)式得到:

$$\frac{\Delta I_i}{\Delta l_i} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} + I_i \frac{\Delta w_i}{\Delta l_i} = -g W_i - \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \quad (31)$$

(30)式表明, 流量在部件  $i$  的两端是相等的, 即流入多少, 就流出多少, 水分在流动中不被部件截留, 部件含水量达到定常的饱和状态或环境温压恒常、植被不生长时容易出现此种情况。但流量是时间的函数, 它和外力以及部件两端含水量的分布有关。若再设  $\frac{\Delta w_i}{\Delta l_i} = 0$ , 则流量仅是净水势的函数。

若净水势梯度为常数, 则流量是后者的线性函数。整个回路系统结论相似。

### 5.2 流量不变

再考虑另一极端理想情况, 流量不随时间和空间变化, 且  $S_i = 0, D_{hw,i} = 0, D_{hl,i} = 0$ , 则由(1)和(2)式可得:

$$W_i = W_i(l_i) \quad (32)$$

$$I_i \frac{\Delta w_i}{\Delta l_i} = -g W_i - \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \quad (33)$$

此时,  $W_i$  与水势梯度以及垂直迁移速度梯度有关。若水势梯度为常数, (33)易积得:

$$\frac{1}{W_i} + \frac{1}{g} \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \ln \frac{W_i}{W_i + \frac{1}{g} \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i}} = -\frac{\Delta p_i}{\Delta l_i^2} + const \quad (34)$$

这是个超越方程。

### 5.3 内过程与外过程

内过程造成的水势变化与其维持回路系统正常运行的时长, 对预报干旱具有重要意义。外过程出现的时机与程度亦然。先以(11)、(12)式研究之。忽略水平侧边界的水分通量与流量通量的水平梯度, 即  $D_{hw} = 0, D_{hl} = 0$ 。由(11)式可知, 此时系统中的水分由流量的垂直梯度和外源汇决定。如果

$\int_{24hr} S dt = 0$ , 即系统在一日内无净的水分补给或消耗, 则水分仅取决于流量梯度; 若

$\int_{24hr} S dt < 0$ , 则回路系统中流通的水分除了被部件拦截一部分之外, 另一部分被部件所吸收; 若

$\int_{24hr} S dt > 0$ , 外部供水、植被枯萎、作物受伤或化学过程流出的水分, 该水分可以部分维持部件需水与水分流通。

内过程的停止意味着流通的水分不足以维持系

统的正常需水,对一个一致变化的过程,其临界状态为  $W = \bar{W}, I = \bar{I}, W' = 0, I' = 0$ , 且  $\frac{\partial W'}{\partial t} \leq 0$ 。外过程亦然, 如果其供给的水分不足以缓解干旱, 也满足该条件。以(25)、(26)式研究此两过程。内外过程一般需要进行一段时间的积分, 不过积分后方程内核并没有什么变化, 此处为了简略, 直接以不积分的方程进行讨论。

5.3.1 无植被的裸地

为简单计, 考虑干旱半干旱区或植被非常稀疏的地区。此时植被可忽视, 回路系统是由土壤与空气 2 个部件以串联形式构成的, 水分的输送与吸释仅发生在土壤和空气之中: 在晴天, 白天水分自土壤中进入到空气中被存储, 夜间又通过凝结或凝华过程返回到土壤中。

设  $S' = 0$ , 且  $\Delta I' = 0$ , 后者的意义是: 忽略植被的异常生长、大气边界层高度的日变化以及水分在土壤中输送深度的变化等;  $S' = 0$  对内过程而言是部件状态为正态, 对外过程而言是供给的水分处于正态之下。则(25)式化为:

$$\frac{\partial W'}{\partial t} = - \sum_i \frac{\Delta I'_i}{\Delta \bar{l}_i} \leq 0 \tag{35}$$

(35) 式即:

$$\begin{aligned} & \sum_i \frac{\Delta I'_i}{\Delta \bar{l}_i} \geq 0 \\ \Rightarrow & \frac{I'_{S2} - I'_{S1}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{A2} - I'_{A1}}{\Delta \bar{l}_A} + \frac{I'_{A4} - I'_{A3}}{\Delta \bar{l}_A} + \frac{I'_{S4} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_S} \geq 0 \\ \Rightarrow & \frac{I'_{S2} - I'_{S1} + I'_{S4} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{A2} - I'_{A1} + I'_{A4} - I'_{A3}}{\Delta \bar{l}_A} \geq 0 \\ \Rightarrow & \frac{I'_{S2} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{A4} - I'_{A1}}{\Delta \bar{l}_A} \geq 0 \tag{36} \\ \Rightarrow & \frac{I'_{S2} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{S3} - I'_{S2}}{\Delta \bar{l}_A} \geq 0 \\ \Rightarrow & (I'_{S2} - I'_{S3}) \frac{\Delta \bar{l}_A - \Delta \bar{l}_S}{\Delta \bar{l}_S \Delta \bar{l}_A} \geq 0 \end{aligned}$$

when  $\Delta \bar{l}_A > \Delta \bar{l}_S \Rightarrow I'_{S2} \geq I'_{S3}$

其中, 下标 A 表示空气部件, S 表示土壤部件, 见图 2。上式推导中已经应用等式  $I'_{S2} = I'_{A1}$  和  $I'_{S3} = I'_{A4}$ , 因为它们正好处于相邻部件的交界面, 并设  $I'_{A2} = I'_{A3}$  和  $I'_{S1} = I'_{S4}$ , 当然如果空气部件 T 和土壤部件 S 取得足够厚, 这两项可以认为是 0。一般而言, 水分在空气中输送的距离大于在土壤中输送的距离, 即  $\Delta \bar{l}_A > \Delta \bar{l}_S$ 。

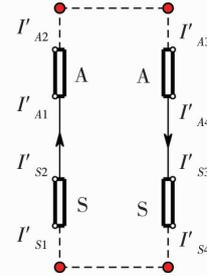


图 2 空气与土壤构成的回路系统

Fig. 2 Two-component circulation system composed by atmosphere and soil

(36) 式表明, 对于干旱、半干旱地区或无植被的裸地, 在一定条件下的一段时间内, 只要土壤到空气的流量偏差大于空气到土壤中的流量偏差, 即净流入到空气中的水分比正态下的多, 就可能对内过程破坏与外过程失效, 进而可能引发干旱。该过程的一个典型例子是持续高温, 因为高温会促进蒸发, 容易出现这种情况。

如果  $S' < 0$ , 比如化学过程或气粒转化过程, 或者外过程补给的水分低于正态, 则(36)式的条件可以更宽松, 即:

$$(I'_{S2} - I'_{S3}) \frac{\Delta \bar{l}_A - \Delta \bar{l}_S}{\Delta \bar{l}_S \Delta \bar{l}_A} \geq S' \tag{37}$$

此时在一定条件下,  $I'_{S2}$  可以小于  $I'_{S3}$ , 即净流入空气中的水分小于正态时, 也可能使内外过程破坏或失效。这是容易理解的, 因为外部供水低于正常水平, 自然发生干旱的条件会降低。

如果  $S' > 0$ , 对内过程而言, 代表部件其它形式的水分被逸出过多或其它来源的水分供给过多, 比如土壤吸湿水被蒸发过多; 对外过程而言, 供水超出了正态, 也可能出现干旱, 这与流量的变化以及部件的尺度有很大关系, 不过这种情况出现干旱的概率较小。(36)式的约束更为苛刻, 其结果形式同(37)式, 此略。

另外, 对于外过程, 其供给的水分何时能够缓解干旱是一个重要问题。若以内过程遭到破坏为干旱的临界状态, 则其临界状态为  $W = \bar{W}, I = \bar{I}, W' = 0, I' = 0$ , 且  $\frac{\partial W'}{\partial t} > 0$ 。显然, 只需将(36)和(37)式“ $\geq$ ”改为“ $<$ ”即可, 具体分析类似, 此略。

5.3.2 植被全覆盖的地表

此时对应湿润区或植被覆盖度很大的地区。其回路系统为土壤、植被和空气 3 个部件组成的系统, 水分的输送发生在这 3 个部件中。同样设  $\Delta I' = 0$ , 则(25)式化为:

$$\frac{\partial W'}{\partial t} + \left( \frac{I'_{S2} - I'_{S1} + I'_{S4} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_S} - \frac{I'_{S2} - I'_{S3} + I'_{A4} - I'_{A1}}{\Delta \bar{l}_V} + \frac{I'_{A2} - I'_{A1} + I'_{A4} - I'_{A3}}{\Delta \bar{l}_A} \right) = S' \quad (38)$$

其中,下标  $V$  代表植被,已利用等式  $I'_{S2} = I'_{V1}$ 、 $I'_{V2} = I'_{A1}$ 、 $I'_{A4} = I'_{V3}$  和  $I'_{V4} = I'_{S3}$ 。

仿前一节分  $\frac{\partial W'}{\partial t} \leq 0$  和  $\frac{\partial W'}{\partial t} > 0$  进行讨论。

当  $\frac{\partial W'}{\partial t} \leq 0$  时,先设  $S' = 0$ ,由(38)式得到:

$$\begin{aligned} & \frac{I'_{S2} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{A1} - I'_{A4}}{\Delta \bar{l}_V} + \frac{I'_{A2} - I'_{A1}}{\Delta \bar{l}_A} \\ & \geq \frac{I'_{S3} - I'_{S4}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{S2} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_V} + \frac{I'_{A3} - I'_{A4}}{\Delta \bar{l}_A} \end{aligned} \quad (39)$$

(39)式的意义是回路系统中,上升支差量的总流量梯度不小于下沉支差量的总流量梯度时,这相当于大气中的次级环流,其向上的水分输送大于向下的水分输送,内过程难以维持,外过程易于失效。特殊地,若设  $I'_{A2} = I'_{A3}$  和  $I'_{S1} = I'_{S4}$ ,则相对于正态,土壤和空气部件中额外流出的水分不低于植被额外截留的水分时,也会导致内外过程破坏或失效,进而因缺水而引发干旱。显然,这是差量代表的类似于次级环流的次级内过程出现外耗性输送所致。

当  $S' \neq 0$  时,(38)式变为:

$$\begin{aligned} & \frac{I'_{S2} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{A1} - I'_{A4}}{\Delta \bar{l}_V} + \frac{I'_{A2} - I'_{A1}}{\Delta \bar{l}_A} \\ & \geq \frac{I'_{S3} - I'_{S4}}{\Delta \bar{l}_S} + \frac{I'_{S2} - I'_{S3}}{\Delta \bar{l}_V} + \frac{I'_{A3} - I'_{A4}}{\Delta \bar{l}_A} + S' \end{aligned} \quad (40)$$

该式相比于(39)式,多了  $S'$ ,其意义类似,只是受  $S'$  的影响。

当  $\frac{\partial W'}{\partial t} > 0$  时,对(39)和(40)式取反,此略。

### 5.4 水分运动停止

流量也是诊断干旱的重要物理量之一。在特殊情况下,系统中水分运动可以停止,如旱情较重时,作物气孔会关闭。设某一部件初始时刻流量为正,某时段部件出口的流量递减至 0。用数学表示就是:  $I_{i0} > 0$ ,  $\frac{\partial I_i}{\partial t} < 0$ ,  $I_{i2} = 0$ ,下标 0 表示初始时刻,下标 1 表示部件的入口端,2 表示出口端。仍不计水平侧边界的通量,则(2)式变为:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} > -gW_i - \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \\ \Rightarrow & I_{i1} w_{i1} < gW_i \Delta l_i - (p_{i1} - p_{i2}) \end{aligned} \quad (41)$$

该式左端为流量通量,右端的意义是重力势与水压势之差。整个(41)式的意义是流量通量过小而不足以克服净水势时,水分输送得到抑制,部件得

以储存水分。

## 6 干旱检测方法略议

干旱发生与否,完全可以用前面推导的干旱热动力学方程确定,但在实际应用中存在一定的不便,故仍需要建立干旱指数来诊断干旱。

干旱可用含水量、流量与热量确定。根据干旱的定义与要素,从局部和整体两方面可以提出一系列干旱指数:

(a) 基于含水量定义干旱指数。比如基于土壤湿度、相对湿度与叶片含水量等。可以部件实际含水量与正常需水之比或之差定义局部干旱指数;以系统需水量与内过程所需水量的比值或差定义为系统干旱指数。也可以定义外部干旱指数为:降水或灌溉等外部供水量与前期内过程缺失量之差再除以系统需水量或当下内过程维持所需水量;

(b) 基于流量的指数,比如流量偏离正常值的程度,可用各种数学形式表现;

(c) 基于水分源汇项的指数。水分源汇的变化,对部件需水和回路流量有重要影响,比如基于降水与蒸散定义指数;

(d) 基于部件两端水势的指数,比如基于叶水势或实际水压与其正常值建立指数;

(e) 基于部件阻抗的指数。阻抗增大超过限度,比如阻抗无穷大,此时水流消失,部件吸纳水分,典型例子是不下雨;

(f) 部件承载水分的容量有限,即它具有最大持水容量(比如田间持水量),故可以借助持水量定义干旱指数;

(g) 基于内过程持续时间的指数,比如内过程遭破坏、而外过程又不发生时,持续的时间越长,干旱越严重;

(h) 基于部件状态或性质变化构建指数,比如基于作物形态、作物生理、温度变化、风速变化、地表地下径流变化等。

常见的干旱指数,如年降水量、降水距平百分率、PDSI(Palmer Drought Severity Index)、SPI(Standardized Precipitation Index)、降水与气温比值(干燥指数)、降水与蒸散比值(干燥指数)以及 Thornthwaite 水分指数法等即是这些方面的反映,这些指数各有侧重。

另外,内过程的维持与破坏对干旱有重要影响。

依前面定义,可以内过程破坏为轻旱,它此时可用(36)、(37)、(39)和(40)等式确定,也可用(11)和(12)式、(25)和(26)式通过诊断的方法确定。

用(11)与(12)式研究时,只需判断它们的左右两端是否相等即可。如果相等,表明回路系统运行正常,干旱出现概率较低;如果左端大于右端,表明回路系统运行异常,干旱可能出现;如果左端小于右

$$W'_1 = W'_0 - \int_{24hr} D'_{hw} dt - \sum_i R \left( \frac{\Delta I'_i}{\Delta l_i} \right) + \int_{24hr} S' dt \quad (42)$$

$$I'_1 = I'_0 - \int_{24hr} D'_{ht} dt - \sum_i R \left[ \frac{\Delta(I_i w_i)}{\Delta l_i} \right] - \int_{24hr} \left[ gW' + \sum_i R \left( \frac{\Delta p_i}{\Delta l_i} \right) \right] dt \quad (43)$$

若  $W' < 0$  和  $I' < 0$ , 则倾向于出现旱情;若  $W' > 0$  和  $I' > 0$ , 则倾向于出现涝渍;若  $W'I' < 0$ , 则旱涝均有可能发生。另外,可以通过诊断这个方程,以确定旱涝发生的原因。

内过程的破坏意味着外过程的发生具有一定的必要性。若内过程破坏时,外过程没有发生,比如干旱期间,若降水与灌溉没有出现,则干旱会持续;对于涝渍,如果缺乏径流或高压系统等有效的排水因素,涝渍也将持续。反之,内过程破坏时,即使有外过程发生,则旱涝可能就不再出现。

当然,对于系统干旱,还可用(28)、(29)式的环量方程确定。当环量符号相反或者绝对值减少时,即认为系统干旱。另外只要系统回路中出现局部流量中断,也即认为出现了系统干旱。

## 7 结 论

(1) 土壤、植被和空气可构成一个开放的回路系统,该回路系统可以对气象干旱、农业干旱与水文干旱进行统一研究。

(2) 内过程、外过程与温度控制过程是回路系统维持的3个重要机制。

(3) 推导出了回路系统各部件与系统整体的干旱水分热动力学方程组,并给出了描述正常无旱涝状态的正态方程组和描述旱涝过程的差量方程组。

(4) 理论分析显示,对于干旱、半干旱地区或无植被裸地,如果  $S' = 0$ , 在一定条件下,只要净流入到空气中的水分比正态下的多,就可导致内过程破坏与外过程失效,进而可能引发干旱;如果  $S' < 0$ , 很容易发生干旱,在一定条件下,净流入空气中的水分小于正态时,也可能使内外过程破坏或失效;如果  $S' > 0$ , 不易发生干旱。对于湿润区或植被盖度很大的地区,当  $S' = 0$  时,若回路系统中上升支的总流量梯度不小于下沉支的总流量梯度时,易引发干旱。

端,回路系统运行依然异常,涝渍可能出现。

用(25)与(26)式研究时,需要注意:正态过程的  $W'$ 、 $I'$ 、 $S'$  等接近0,内过程破坏意味着出现了  $W'$ 、 $I'$ 、 $S'$ 。如果以日尺度研究干旱,则可以对(25)与(26)式进行24 h 积分,根据  $W'$  和  $I'$  的符号与其出现的日期很容易判断干旱何日出现。(25)与(26)式的24 h 积分形式如下:

当  $\frac{\partial W'}{\partial t} > 0$  且  $S' = 0$  时,回路系统中上升支的总流量梯度小于下沉支的总流量梯度时,易引发干旱。

当然,本文没有对热量过程进行分析。而且,推导的热动力学方程组也没有考虑风的贡献,这些需要以后进一步展开研究。

致谢:诚挚感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所钱正安教授对本文做出的细心修改与指导,诚挚感谢中国气象局兰州干旱气象研究所阳伏伶博士、王劲松研究员和张良博士以及兰州大学生命科学学院郑红俊的帮助。

## 参考文献

- [1] 刘永忠,李齐霞,孙万荣,等. 气候干旱与作物干旱指标体系[J]. 山西农业科学,2005,33(3):50-53.
- [2] 张强,张良,崔显成,等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展,2011,26(7):763-778.
- [3] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [4] 崔冬林. 近50年中国区域持续性气象干旱事件的客观识别及变化研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [5] 卫捷,张庆云,陶诗言. 1999及2000年夏季华北严重干旱的物理成因分析[J]. 大气科学,2004,28(1):125-137.
- [6] 王素萍,段海霞,冯建英. 2009/2010年冬季全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象,2010,28(1):107-112.
- [7] 王素萍,段海霞,冯建英. 2011年春季全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象,2011,29(2):261-268.
- [8] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010,391:202-216.
- [9] Zhang L X, Zhou T J. Drought over east Asia:A review[J]. Journal of Climate, 2015,28(8):3375-3399.
- [10] Sivakumar M V K, Wilhite D A, Pulwarty R S, et al. The High-Level Meeting on National Drought Policy[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014,95(4):ES85-ES88.
- [11] 张书余. 干旱气象学[M]. 北京:气象出版社,2008:1-55.
- [12] Richard R, Heim J. A review of Twentieth-Century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002,83(8):1149-1165.

- [13] 王劲松,李耀辉,王润元,等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象,2012,30(4):497-508.
- [14] 张强,王润元,邓振镛. 中国西北干旱气候变化对农业与生态影响及对策[M]. 北京:气象出版社,2012:1-62.
- [15] Mainguet M. Aridity: Droughts and Human Development [M]. Berlin:Springer-Verlag, 1999:27.
- [16] Kassas M. Aridity, drought and desertification[M]. Lebanon: Arab environment future challenges. Technical Publications and Environment & Development Magazine, 2008:96-110.
- [17] Namias J. Some causes of United States drought[J]. Journal of Applied Meteorology, 1983,22(1):30-39.
- [18] Dai X G, Liu Y, Wang P. Warm-dry collocation of the recent drought in southwestern China tied to moisture transport and climate warming[J]. Chinese Physics B, 2015,24(4):546-554.
- [19] Lehner B, Döll P, Alcamo J, et al. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis[J]. Climatic Change, 2006,75(3):273-299.
- [20] Wong W K, Beldring S, Engenskaugen T, et al. Climate Change Effects on Spatiotemporal Patterns of Hydroclimatological Summer Droughts in Norway[J]. Journal of Hydrometeorology, 2011,12(6):1205-1220.
- [21] Xin X G, Yu R C, Zhou T J, et al. Drought in late spring of South China in recent decades[J]. Journal of Climate, 2006,19(13):3197-3206.
- [22] Cook E R, Seager R, Cane M A, et al. North American drought: Reconstructions, causes, and consequences[J]. Earth Science Reviews, 2007,8(1):93-134.
- [23] Ummenhofer C C, Gupta A S, Briggs P R. Indian and Pacific Ocean Influences on Southeast Australian Drought and Soil Moisture[J]. Journal of Climate, 2011,24(5):1313-1336.
- [24] Barriopedro D, Gouveia C M, Trigo R M, et al. The 2009/10 Drought in China: Possible Causes and Impacts on Vegetation[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012,13(4):1251-1267.
- [25] Özger M, Mishra A K, Singh V P. Long Lead Time Drought Forecasting Using a Wavelet and Fuzzy Logic Combination Model: A Case Study in Texas[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012,13(1):284-297.
- [26] Hoerling M, Eischeid J, Perlwitz J, et al. On the Increased Frequency of Mediterranean Drought[J]. Journal of Climate, 2012,25(6):2146-2161.
- [27] Skinner C B, Ashfaq M, Diffenbaugh N S. Influence of Twenty-First-Century Atmospheric and Sea Surface Temperature Forcing on West African Climate[J]. Journal of Climate, 2012,25(2):527-542.
- [28] Schubert S D, Suarez M J, Pegion P J, et al. Causes of long-term drought in the U. S. Great Plains[J]. Journal of Climate, 2004,17(3):485-503.
- [29] Kingston D G, Fleig A K, Tallaksen L M, et al. Ocean-Atmosphere Forcing of Summer Streamflow Drought in Great Britain[J]. Journal of Hydrometeorology, 2011,14(1):331-344.
- [30] Woli P, Jones J W, Ingram K T, et al. Agricultural reference index for drought (ARID)[J]. Agronomy Journal, 2009,104(2):287-300.
- [31] Seager R, Goddard L, Nakamura J, et al. Dynamical Causes of the 2010/11 Texas - Northern Mexico Drought [J]. Journal of Hydrometeorology, 2014,15(1):39-68.
- [32] Delworth T L, Zeng F, Rosati A, et al. A Link between the Hiatus in Global Warming and North American Drought[J]. Journal of Climate, 2015,28(9):3834-3845.
- [33] Bagley J E, Desai A R, Harding K J, et al. Drought and Deforestation: Has Land Cover Change Influenced Recent Precipitation Extremes in the Amazon? [J]. Journal of Climate, 2014,27(1):345-361.
- [34] 马柱国. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. 科学通报,2007,52(10):1199-1206.
- [35] 马柱国,符淙斌. 20世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系[J]. 中国科学D辑,2007,37(2):222-233.
- [36] 侯威,杨萍,封国林. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因[J]. 物理学报,2008,57(6):3932-3940.
- [37] 王春林,邹菊香,麦北坚,等. 近50年华南气象干旱时空特征及其变化趋势[J]. 生态学报,2015,35(3):595-602.
- [38] 李韵婕,任福民,李忆平,等. 1960—2010年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报,2014,72(2):266-276.
- [39] Wang Y, Xie Y, Cai L, et al. Impact of the 2011 Southern U. S. Drought on Ground-Level Fine Aerosol Concentration in Summer-time[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2015,72(3):1075-1093.
- [40] Winguth A M, Kelp B. The Urban Heat Island of the North-Central Texas Region and Its Relation to the 2011 Severe Texas Drought [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2013,52(11):2418-2433.
- [41] 吴芹,张光灿,裴斌,等. 3个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应[J]. 生态学报,2013,33(12):3648-3656.
- [42] Poitras V, Sushama L, Seglenieks F, et al. Projected Changes to Streamflow Characteristics over Western Canada as Simulated by the Canadian RCM [J]. Journal of Hydrometeorology, 2011,12(6):1395-1413.
- [43] Mo K C, Long L N, Schemm J E. Characteristics of drought and persistent wet spells over the United States in the atmosphere-land-ocean coupled model experiments [J]. Earth Interactions, 2012,16(16):1-26.
- [44] Zhang L, Zhang H Q, Zhang Q, et al. Comparison of a land surface model and Palmer drought severity index in monitoring drought in China [A]. IGARSS [C]. Canada, July 24-29, 2011,58(11):1985-1988.
- [45] Crow W T, Kumar S V, Bolten J D. On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2012,9(4):5167-5193.
- [46] 龚志强,封国林. 中国近1000年旱涝的持续性特征研究[J]. 物理学报,2008,57(6):3920-3931.
- [47] Moyé L A, Kapadia A S, Cech I M, et al. The theory of runs with applications to drought prediction [J]. Journal of Hydrology, 1988,103(1-2):127-137.
- [48] Kendall D R, Dracup J A. On the generation of drought events using an alternating renewal-reward model[J]. Stochastic Envi-

- ronmental Research and Risk Assessment, 1992,6(1):55-68.
- [49] Akyuz D E, Bayazit M, Onoz B. Markov Chain Models for Hydrological Drought Characteristics[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012,13(1):298-309.
- [50] Mishra A K, Desai V R. Drought forecasting using feed-forward recursive neural network[J]. Ecological Modeling, 2006,198(1-2):127-138.
- [51] Hwang Y, Carbone G J. Ensemble forecasts of drought indices using a conditional residual resampling technique[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2009,48(7):1289-1301.
- [52] Chung C H, Salas J D. Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrological process[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2000,5(3):259-268.
- [53] Yoon J H, Mo K, Wood E F. Dynamic-Model-Based Seasonal Prediction of Meteorological Drought over the Contiguous United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012,13(2):463-482.
- [54] Otkin J A, Anderson M C, Hain C, et al. Examining the Relationship between Drought Development and Rapid Changes in the Evaporative Stress Index[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014,15(3):938-956.
- [55] Ji L, Zhang L, Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2009,75(11):1307-1317.
- [56] 王劲松,郭江勇,倾继祖. 一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用[J]. 自然资源学报,2007,22(5):710-717.
- [57] Narasimhan B, Srinivasan R. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index(SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index(ETDI) for agricultural drought monitoring[J]. Agriculture & Forest Meteorology, 2005,133(1-4):69-88.
- [58] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index - SPEI[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [59] Roundy J K, Wood E F. The Attribution of Land-Atmosphere Interactions on the Seasonal Predictability of Drought[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014,16(2):1095-1099.
- [60] 孙淑芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M]. 北京:气象出版社,2005:166-177.
- [61] Shiau J T, Modarres R. Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran[J]. Meteorological Applications, 2009,16(4):481-489.
- [62] Lu C, Singh V P, Guo S. Drought analysis based on copulas[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013(18):797-808.
- [63] 问晓梅,张强,王胜,等. 陆面露水特征及生态气候效应的研究进展[J]. 干旱气象,2008,26(4):5-11.
- [64] 张强,问晓梅,王胜,等. 关于陆面露水测量方法及其开发利用研究[J]. 高原气象,2010,29(4):1085-1092.
- [65] 叶有华,彭少麟. 露水对植物的作用效应研究进展[J]. 生态学报,2011,31(11):3190-3196.
- [66] 毛泽东. 毛泽东选集[M]. 北京:人民出版社,2008:299-340.

## Drought Research Based on the Circulation System in Land Surface Process

ZHAO Jianhua<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, ZHOU Guangsheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province/Chinese Meteorological Administration, Lanzhou Institute of Arid Meteorology of Chinese Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 10081, China)

**Abstract:** Drought is one of the natural disasters with the biggest losses and affecting most persons. In the land surface process, water usually transports from soil into plant and atmosphere in the daytime and then it partly reflows into soil at night. This water transporting process in soil, vegetable and atmosphere can be considered as a circuit and the three components of soil, vegetable and atmosphere linked with water flows comprise an open system in representation called circulation system. The meteorological drought, hydrological drought and agricultural drought except socioeconomic drought can be studied in a whole by using it, and drought is an external reflection of its inner contradiction movement of water. After the detailed analysis of the system, it shows that inner process, outer process and temperature-controlling process is three important mechanisms to support the circulation system. Next, the thermal and dynamical water equations for the system and its each component, comprising three physical variables which are water content, water flux and heat quantity, are deduced in a uniform form. The equations for normal-state without drought or waterlogging and for abnormal-state with drought or waterlogging are deduced too. Finally, the theoretical analysis are also carried out to analyze the drought under the specified conditions such as constant water content, constant water flux, bare land without vegetable, land covered with dense vegetable and ceased water flows. The results are as follows: (1) For arid and semi-arid areas or bare land without vegetable, the trends to emerge drought depend on the signs of which means water extraneous source differing from its normal-state value. (2) For wet area or dense-vegetable covering area, the trends to appear drought depend on signs of both and meaning the time partial derivative of water content difference from the normal state. At last, the building of drought index is discussed simply. In short, the drought can be systematically and quantitatively studied with the circulation system and thermal and dynamical water equations, which has an important significance for the basic theoretical search on drought, drought numerical model and drought's forecast.

**Key words:** drought; circulation system; inner and outer process; thermal and dynamical water equations of drought