赵福年，王润元，王莺，等. 干旱过程、时空尺度及干旱指数构建机制的探讨[J]. 灾害学，2018，33(4)：32－39. [ZHAO Funian, WANG Runyuan, WANG Ying, etal. Discussion of process, temporal and spatial scale for drought and establishment of drought indices[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4)：32－39. doi：10.3969/j. issn. 1000－811X. 2018. 04. 007.]

干旱过程、时空尺度及干旱指数构建机制的探讨*

赵福年，王润元，王　莺，王鹤龄，张　凯，赵　鸿

(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，
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室，甘肃 兰州 730020)

摘　要：由于干旱自身不同于其他自然灾害的发生发展特点，目前国内外对干旱的研究及如何应对干旱所引发的灾害依然存在诸多障碍。根据水文干旱研究中所应用的游程理论，进一步分析阐述了干旱的发展演变过程，及干旱各参数之间的关系，确定了干旱的内涵为水分的供需平衡，从而定义了一个具有广泛意义的干旱概念。在此基础上阐述了不同部门所关注干旱类型之间的区别与联系，分析了各干旱类型的侧重点及其时空尺度。并进一步以干旱概念为基础，分析了干旱指数的构建依据及其优缺点，并得出以SPAC(土壤－植物－大气连续体)为基础构建具有较强物理基础的机理性干旱指数是未来干旱监测研究的方向。同时，干旱是一个非常复杂的过程，需要多学科联动建立一套较为完善的科学理论，才能使干旱研究更深入。

关键词：干旱定义；干旱过程；时间尺度；空间尺度；干旱指数

中图分类号：X43；P463.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2018)04－0032－08

doi：10.3969/j. issn. 1000－811X. 2018. 04. 007

随着全球气候变暖，人口增长，及社会经济的发展，全球各区域对水分的需求量不断增加[1]。而近年来，干旱在全球各个区域发生的频率不断升高，其造成的损失难以估计[2]。区域干旱发生发展与水分需求的矛盾日益凸显，因而了解并掌握干旱发生发展的规律，构建合适的指数，对干旱进行精准的监测评估显得尤为重要。

与其他自然灾害相比，干旱发生发展的过程及其致害的机制具有鲜明的特点(图1)。首先，干旱在全球任何气候区都有可能发生[3]，其影响范围非常广，但同时不同区域对干旱的界定又存在较大差异。如赤道附近的巴厘岛连续6 d无降水就可能引发干旱[4]，而非洲北部的利比亚地区两年无降水才会出现干旱[5]。其次，干旱发生发展的过程非常缓慢，往往不易察觉，再加之其可以反复发生，且造成的影响具有累积性[6]，因而难以定量判断其开始和结束时间。第三，与其他自然灾害不同，干旱发生造成的影响和破坏是非结构性的[2－3]。谚语常说“旱一片，涝一线”，当天气系统配置合适，在冷暖空气交汇的锋面地带发生较大强度的降水并诱发洪涝，我们可以从各区域降水的多少以及实际形成洪涝的状况，判断洪涝的影响区域及严重程度，从而可采取相对应的减灾措施。而在单一的气团持续控制下，形成干旱天气，即所谓“旱一片”，这“一片”涉及的区域有多大，以及这一区域干旱影响程度如何，往往很难定量做出计算。第四，干旱发生造成的影响在旱情解除后，不能立即得到缓解，这是干旱独有的特点[7]。洪涝、台风以及地震等自然灾害在发生结束后，其影响基本可以解除，但是干旱却不同，其对农业及其他社会经济方面的影响，在降水增多干旱解除后依然存在。上述鲜明的特点，导致无法对干旱进行准确的定量预测、监测，并很难在干旱发生后制定出合理有效的应对对策。目前，全世界甚至依然没有一个普适的干旱定义[8]，而同时又由于对干旱发生发展过程研究不足，对干旱特点认识不清，更进一步阻碍了干旱的准确评估。

基于对干旱发生及致害特点的了解，本文以国内外在水文干旱方面所应用的游程理论为基础，紧抓干旱的特征参数，探讨干旱发生发展的机理过程，并进一步定义一个具有普遍意义的干旱概念，分析不同领域干旱的关注点和时空尺度，在以上分析基础上，论述干旱指数的构建依据，可为干旱发生并致害的机理过程及干旱预测监测的进一步研究提供初步的理论依据。

* 收稿日期：2018－05－01　　修回日期：2018－07－02

基金项目：国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001－2)；国家自然科学基金项目(41375019)；甘肃省气象局气象科研项目(GSMAMs2018－14)

第一作者简介：赵福年(1987－)，男，甘肃武威人，助理研究员，主要从事农业干旱致害过程研究. E－mail：zfn0622@163.com

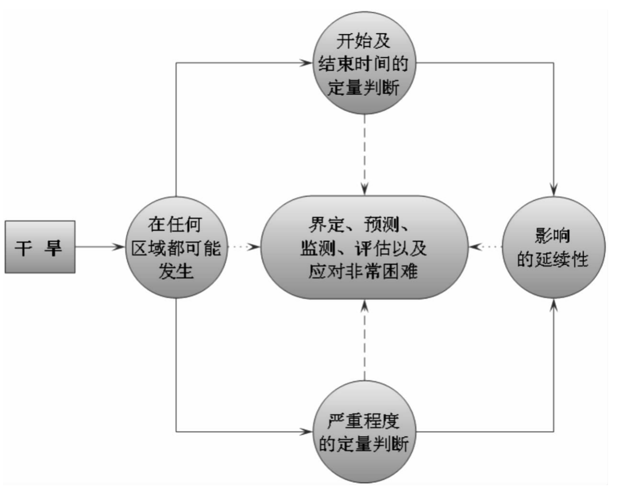

图 1　干旱的特点及其引发的研究难题

1　干旱过程理论分析

1.1　干旱参数

尽管干旱发生并致害的机理非常复杂，但研究者还是总结出了一些描述干旱发生发展的特征参数，这些参数分别为干旱开始时间、结束时间、持续时间、干旱强度、干旱程度(在水文干旱中也被称为干旱烈度)以及干旱空间范围及规模[2-3, 6]。在这些参数中，干旱开始与结束的间隔为干旱持续时间，且干旱强度、干旱程度及干旱持续时间之间存在一定的关系。美国水文专家 Yevjevich[9] 在研究陆地水文干旱时，以游程理论对干旱强度、干旱程度及干旱持续时间之间的关系进行了详细的界定和解释，此后该理论也被国内外科研人员广泛应用于水文干旱及其他类型干旱的监测评估[5, 10-13]。

1.2　游程理论介绍

所谓游程是指状态转折点间的等待时间[14]，对于不同的事件类型，指持续出现同类事件时，在它的前后是另外的事件，如旱涝交替发生时，游程为从旱(涝)经 L 步变化而达到涝(旱)时所用的时间。当研究变量是离散序列，对于标准量 x_0，凡 $x_i - x_0 > 0$ 时，为正变差；若 $x_i - x_0 < 0$，则为负变差(图 2)。出现一个正变差，后接连续 k 个正变差项，说明序列存在长为 n 的正游程，反之为负游程。一个长为 n 的正游程总和为正游程和 S_n，反之为负游程和。根据游程理论的概念，负游程长可表示干旱的持续时间，而负游程和则为供水不足的数量，即干旱严重程度[13]。

依据游程理论，可知干旱为水分平衡中的水分亏缺现象，而水分亏缺累积值即为干旱程度。当水分供给低于预先给定的一个数值时，干旱开始出现，而当水分供给高于该给定的数值时，干旱解除。水分供给低于给定数值的时间段为干旱持续时间。因此，干旱强度可用下式表示[9]：

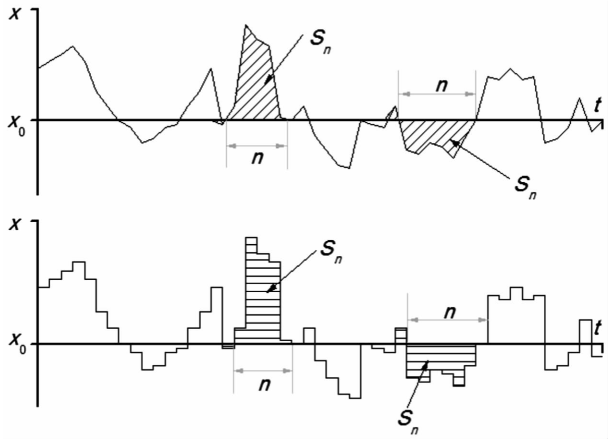

图 2　游程理论解析

$$I_n = \frac{S_n}{n}。\tag{1}$$

以游程理论描述干旱过程，提供了一种研究干旱发生发展过程的新思路，明确了干旱特征参数之间的相互关系，为干旱等级的进一步划分指明了方向。但是从干旱发展的角度来看，由于气象要素的影响及所研究空间下垫面供水条件的变化，干旱强度在每个时刻不可能是完全相同的。将干旱强度当做干旱程度与干旱持续时间的比值，只能求算干旱过程中的平均干旱强度，忽略了干旱发展的详细过程及干旱的累积特点，因此需要进一步修正该干旱发生发展理论。

1.3　干旱过程

一定空间内，水分平衡或储水量的变化速率可以表征该空间内水分的变化方向和变化量。如果该空间水分平衡呈增多偏移(即储水量增加)，则说明该空间的水分变化率为正值，否则为负。可以用下式表示：

$$\begin{cases} \dfrac{dW_t}{dt} < 0，\text{水分减少，干旱发生或发展；} \\ \dfrac{dW_t}{dt} > 0，\text{水分补充，干旱缓解或解除。} \end{cases}\tag{2}$$

式中：W_t 为一定时刻的水分平衡量空间储水量，t 为时间。同样的，如果获得一定空间水分的变化率，那么可以判断该空间水分呈减少还是增加的趋势。我们定义 W_1、W_2、W_3 以及 W_4 为所研究空间水分平衡或储水量的临界值，分别定为第 1、2、3 以及 4 临界值，而对应可设定干旱等级为轻旱、中旱、重旱以及特旱。4 个临界值的数量需要依据研究空间特定客体的需水状况来确定：

$$\begin{cases} W_2 < W_t < W_1，& \text{轻旱；} \\ W_3 < W_t < W_2，& \text{中旱；} \\ W_4 < W_t < W_3，& \text{重旱；} \\ W_t < W_4，& \text{特旱。} \end{cases}\tag{3}$$

在干旱发展过程中，干旱强度表征了水分的散失速率，但水分的散失速率与许多因素相关联(其中气象要素起主导作用)，因而在不同时刻特定空间水分的散失速率并不完全相同，但是综合来讲，干旱强度，也即水分散失速率是时间的函

数，在本文中可以用 $I(t)$ 表示。从而一段时间内，空间的失水量可以用积分形式计算表达：

$$\Delta S_i = \int_0^{t_i} I(t)\,\mathrm{d}t。 \tag{4}$$

式中：t_i 表示一定时刻，$0 \sim t_i$ 表示一段时期；而 ΔS_i 则表示一段时期，一定空间的水分散失量。如果定义空间内的初始含水量为 W_0，则：

$$W_t = W_0 - \Delta S_i。 \tag{5}$$

计算获得 W_t 之后，将 W_t 与 W_1、W_2、W_3 以及 W_4 进行比较，可以判断所研究空间的水分盈亏状况及干旱程度(图 3)。

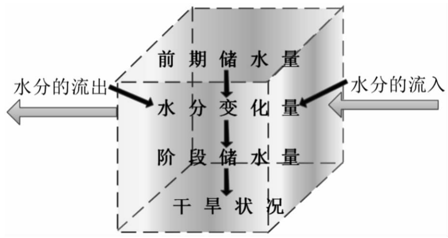

图 3　特定空间水分平衡变化判断干旱状况

ΔS_i 与 $I(t)$ 是干旱发展过程中两个非常重要的参数，但在实际应用时，难以定量计算。一般 ΔS_i 的计算与 $I(t)$ 相关联，其获得有两种方法，一种是利用微元法，如下式：

$$\Delta S_i = \lim_{\Delta t \to 0} \sum_{t=0}^{t=t_i} I'(t)\Delta t。 \tag{6}$$

式中：Δt 为一个很短的时间间隔，无限趋于 0；$I'(t)$ 为 Δt 时段内，一个具有代表性的水分散失速率。若将 $I'(t)$ 精确到小时、分、秒或其他更小的单位，在实际应用中，几乎没有观测数据支持，而且微元法计算的数据与实际失水相比还是存在一定的差异。若考虑空间水分平衡的变化，以天、候、旬、月及年来计算水分平衡过程中的水分散失量，则具有一定的可行性。从而一定时期的水分变化量可以用下式表示：

$$\Delta S_i = \sum_{t=0}^{t=t_i} I''(t)。 \tag{7}$$

式中：$I''(t)$ 为一定时期内的水分变化量，也可表征所研究时段内的水分变化速率，其本质是以天、候、旬、月或年尺度来衡量特定空间的水分变化量，即单位时间内的水分变化量。$I''(t)$ 可以依据水分平衡计算获得，方便实用，且式中 t 的步长也可依据实际需要，以所要研究空间水分变化量的时间尺度而调整。

1.4　综合干旱定义的提出

从干旱过程的分析不难看出，特定空间水分平衡的变化是干旱研究的落脚点，从空间水分的变化过程及变化方向可以判断出该空间是否有干旱发生，并计算获得干旱强度及干旱程度。因而我们可以以空间的水分平衡及该空间中特定客体的水分需求为基础，定义干旱。同时，考虑到干旱发生过程与气象条件有非常重要的联系：降水增多，会减缓干旱的发生甚至于发生涝灾；而降水异常偏少，以及长期的高温低湿条件导致所研究空间蒸发蒸腾加剧，又容易引发干旱，可见气象条件影响干旱的发生过程。不过由于空间前期储水量及空间中特定客体的需水状况不同，特定的气象条件又不一定必然导致干旱发生，所以气象要素是干旱发生发展的必要条件，而非充要条件。因而综合上述分析，我们定义干旱为：一段时期内，在气象要素的影响下，特定空间尺度水分平衡的亏缺偏移，导致无法满足该空间特定客体水分需求的现象。

该定义综合考虑了气象要素对干旱发生、发展、缓解以及解除的影响作用，又以一定空间尺度的下垫面水分亏缺为依据，评估干旱的发生发展状况，再根据空间所研究客体的需水特性不同，以客体需水量为研究落脚点，能够较好的反映不同干旱类型的特殊性。因而该定义是一个比较综合且能够反映干旱事实的概念。

2　特定客体的着眼点与其对应干旱的影响因素

2.1　干旱类型划分

从干旱的定义可知，干旱的发生受气象要素的影响，但是干旱又不仅仅由气象要素决定其是否必然发生。除气象要素外，特定空间干旱的发生与下垫面条件及该空间中客体的需水量等因素相关联。各区域下垫面及所研究空间客体不完全均一或相同，而是各具特点，因而很难将这些非均一的下垫面或客体归为一类。不过考虑到不同部门所关注客体类型及其需水特性的差异，可将干旱划分为 4 大类，即气象干旱、水文干旱、农业干旱以及社会经济干旱[2-3]。这 4 类干旱的定义及分类国内外已有较多的研究[3-4, 10, 15-17]，在此不再赘述。本文主要对前 3 类干旱的侧重点、影响因素以及它们之间的区别与联系进行阐述与剖析。

2.2　不同类型干旱考虑的关键要素

由于不同部门的侧重点不同，往往以所关注的某种特定研究客体为对象，从而使所描述的干旱发生状况有其独有的特点。对于气象干旱，重点关注一定时期内所研究区域气象要素中降水量的变化状况。气象干旱常与所研究区域的气候变化特征相联系，以特定区域的气候特征作为研究背景[17]。如果以干燥度判断一个区域的气候类型，可能是干旱气候、半干旱气候或湿润半湿润气候等，这是一个区域气候的平均状态，即该区常年的气候特点。而气象干旱在这种常年的气候背景下发生，是指在某一特定时段，降水量较多年平均降水量显著偏少的现象[3]。但是这样的干旱定义有时难免过于武断，没有考虑大气的实际蒸发需求，如若一个区域持续阴天，大气蒸发力相对

较小，即使长期的无雨可能对该区域的水分收支影响不大，因而近年来气象干旱的定义又有了部分的扩展，进一步考虑了蒸发量的变化状况[2]。不过综合来看气象干旱更关注天气的干、湿程度，其形成发展完全由气象要素决定：降水决定水分的来源，温度、风速以及空气饱和差等要素决定了大气的蒸发能力。

水文干旱以流域的水文循环为落脚点，更注重一个地区或流域上河川径流、湖泊水库蓄水和地下径流的持续性缺乏，也同样需要与历史统计资料进行比较，且关注是否能够满足一定区域需水要求的事实[5, 18]。水文干旱主要讨论水资源的丰枯状况，能否满足一定区域水上运输的正常进行，及区域工农业用水需水的最小值。但需要注意水文干旱和内陆河的枯季径流是两个不同的概念[17]。从水文干旱的关注点来看，水文干旱需要考虑水分的主要来源即流域各区域的降水，而同时需要关注所研究区域需水耗水量的多少。

影响农业干旱的因素较多，除气象条件外，土壤、作物、相同作物的不同生育期及农田耕作方式等均会影响农业干旱的发生发展[19]，这些因素增加了农业干旱研究的复杂性，导致对农业干旱下一个普适的定义都很困难[20]。而在实际生产中，农业干旱的这种复杂性导致无法对农业干旱的发生状况定量判断。不过农业生产在于尽量获得较高的作物产量，而农业干旱引起作物产量的降低，因此农业干旱有时泛指因土壤水分不足，使作物供水减少，从而造成作物生长受阻，并最终使产量显著降低的现象[3, 21]。农业干旱的关注因素较多，使其研究的复杂度明显高于气象和水文干旱[22]（图 4），农业干旱具有复杂、多变和模糊三个特征[17]。农业干旱研究的落脚点在于作物缺水是否引起产量显著下降，因而需要考虑作物在不同生长阶段的水分供给状况。但作物生长所需水分主要来源于土壤，所以土壤水分是农业干旱研究关注的重点，土壤水分平衡的变化状况在一定程度上决定了农业干旱的发生发展。

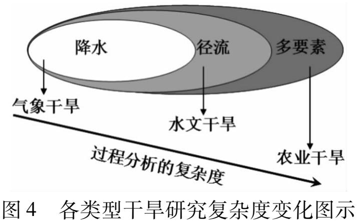

图 4　各类型干旱研究复杂度变化图示

2.3　不同类型干旱之间的区别与联系

由于不同类型干旱关注点不同，所以其影响因素存在较大的差异。然而不同类型干旱之间的关系如何界定，是否可以在资料缺乏的区域以气象干旱表征农业干旱与水文干旱的发生状况，依然存在诸多疑问。一定空间尺度，水分的来源大体可归类为降水、冰川融水以及与水文循环相关的水分输入（灌溉、地下水补给等），但是综合来看冰川融水以及水文循环相关的水分都来自于降水[23]，降水是所有水分的总来源，因此可认为气象干旱是引起水文干旱和农业干旱的主要原因。

气象干旱关注一定时期一定空间内降水偏少，蒸发过强，降水与蒸发的不平衡，但是其并没有考虑所研究空间气象要素的前期条件、所研究时期空间下垫面的实际储水状况以及农业与水文循环对气象要素响应的滞后性等因素，尤其没有将气象要素与实际需水情况相联系[24]。大气环流异常，高压系统长时间稳定控制，导致持续晴天少雨或无雨，从而气象干旱发生。在此种天气条件下，往往极易引发农业干旱，气象干旱是造成农业干旱最为基本、直接的原因[25]。但是气象干旱又不一定必然导致农业干旱发生。在农业生产实践过程中，往往存在“天旱地不旱”的现象，即发生了气象干旱，但农业生产并未受干旱影响。这是因为农业干旱的发生不仅仅取决于气象条件，作物品种、作物不同生育时期以及作物生长的其他环境条件同样会影响农业干旱的发生发展。同样，水文干旱以水的短缺为特征，侧重刻画河道径流的变化，而径流形成过程包括了降水、植物蒸腾、土壤以及水体蒸发、土壤水下渗及水分侧向运动等因素[5]，降水减少并不意味着水文干旱必然发生[26]。可见农业干旱与水文干旱的发生不仅仅由气象干旱所决定，气象干旱发生时，农业干旱和水文干旱并不一定发生。

农业干旱重点关注土壤水分的变化，而土壤水分的运移运动属于水文过程的一部分，农业干旱伴随着水文情势的变化。所以综合来讲，气象干旱是水文干旱与农业干旱的前兆，农业干旱伴随着水文干旱发生。如果一旦发生了水文干旱，则说明所研究空间降水已经异常偏少；该空间地下水位已经有所下降，河流水分也出现了亏缺；通过灌溉补给农业缺水已经比较困难，土壤水分和农田作物需水将难以获得补充。发生水文干旱

表 1　干旱涉及相关客体及过程的时空尺度划分

	气象要素		农业生产		水文过程	
时间尺度	数天	0 ~ 30 d	候	0 ~ 5 d	数天	0 ~ 30 d
	月、季、年	30 ~ 365 d	月	5 ~ 30 d	月、季	30 ~ 365 d
	常年	30 年	季	30 ~ 90 d	年	> 365 d
空间尺度	小尺度	< 2 km	土体	0 ~ 2 m	小流域	10 ~ 50 km
	中尺度	2 ~ 2000 km	农田	2 m ~ 10 km	中流域	50 ~ 100 km
	大尺度	> 2000 km	区域	> 10 km	全流域	100 ~ 1000 km

时，如果气象干旱得不到及时解除，又不从其他区域调水，所研究空间将面临难以应对的干旱问题，从这个角度看，水文干旱是气象干旱和农业干旱的进一步延续和发展[5]。

3 干旱的时空尺度问题

3.1 研究客体时空尺度划分

尺度是理解地学中各种过程和现象复杂性的关键，对地球各系统过程的认识层次依赖于观测的尺度。与其他地球物理过程不同，气象要素变化及相应的水文过程和农业生产均有特定的时空尺度。气象要素的变化过程与大气的波谱组织结构有关联，不同的波谱特征对应不同的时间尺度。大气环流所对应最长的 Rossby 波持续时间大概有 3 –10 天，而且影响范围达数千公里。而与此相反，气象要素的日变化过程具有显著的特征变化频率，微气象学研究的时间尺度从秒到分，更关注与近地面层微小湍流相关的物质和能量交换过程，其空间尺度也仅仅在数公里范围内[27]。在研究与农业生产相关的水分和能量传输过程时，研究者将空间尺度划分为土体尺度、农田尺度以及区域尺度[28]，而同时农业生产关注的时间尺度主要以候、月以及季为主。水文循环常以流域尺度为研究对象，分别有小流域尺度，中流域尺度和全流域尺度[29]，而在其时间尺度则分为天、月、季及年。气象要素、农业生产及水文过程相关的时空尺度划分，如表 1 所示。由于干旱发生的过程与气象要素、农业生产及水文过程相关联，因而干旱的发生发展及其影响也具有不同的时空特征。

3.2 依据时空尺度划分的干旱类型

从不同干旱关注点来看，气象干旱关注大气干湿状况，农业干旱关注土壤水分亏缺造成作物产量下降，水文干旱关注径流减少造成区域需水短缺。而在这些过程中，如果将所研究的客体以时空尺度再进行细分，又可以涉及到不同的要素，而对应的干旱类型也会有明显的区别。

与气象要素变化过程相关的干旱所关注的问题从时空可以大致分为三类。第一类是大气干旱，即大气温度过高、相对湿度过低等特殊气象原因造成植物缺水的现象，典型的如干热风。该类干旱发生时间短暂，一般在数天到数十天之间，且其天气过程在中小尺度范围，同时大气干旱又与农业生产相联系，在空间上发生于农田尺度。第二类是大气环流异常，大尺度高压天气系统稳定控制下的异常少雨现象，对应我们所研究的气象干旱，其时间尺度从数天到连续几个季节，甚至连续数年，而空间则涉及大尺度大气环流，而对应所影响的下垫面涉及较大的区域。第三种是一定空间尺度下的常年状态，即气候干旱，气候干旱的形成决定于海陆分布、地理纬度以及其他因素，气候干旱是气象要素的多年平均状态，其空间尺度涉及非常广，可以从区域尺度到全流域尺度。

而对于与农业相关的干旱而言，农业干旱研究的主体是农作物与水分的相互关系，落脚点一是土壤水分供给，另一个是作物水分的吸收。土壤理化特征分布本身具有较强的空间差异性，而且加上中小尺度天气过程的影响，从而导致相同地区相近地段土壤水分存在较大的差异，作物生长所处的土壤水分条件不同，土壤干旱的发生状况也不完全一致。同时，不同农田地块，由于施肥条件或其他化学因素作用，引起土壤溶液浓度过高，即使土壤中水分充足，但作物根系因渗透过程控制无法吸收土壤中的水分，也很容易使作物遭受生理干旱[30]。而生理干旱往往发生于土体尺度到农田尺度之间，不过一些特殊的情形下，也可能整个区域作物遭受生理干旱。此外，由于气象要素的控制，大气干旱发生时，往往是数公里内的作物遭受危害比较严重，而相邻部分区域却受害较轻，甚至不受害，所以大气干旱所导致较短时期的农业干旱，其空间尺度定位于农田尺度。但有时在气象干旱长期影响下，一个区域的整个农业系统也可能遭受到影响，使得农业干旱扩大到区域尺度。总的来看，从影响因素和时空尺度划分，农业干旱大致可分为土壤干旱、作物生理干旱、以及由大气干旱引发的农业干旱。

水文过程涉及到的物理过程比较繁杂，既包括一定的中小尺度天气过程，又包括大气环流过程以及与农业用水相关的所有土壤水分运移过程，因此其时空尺度相对比农业干旱所涉及的时空尺度要大的多，但同时流域面积总是有限的，所以其时空尺度较大尺度的气象要素变化过程要小。中小流域的水文循环，往往受中小尺度天气过程影响较大，短期较大强度的降水过程可能很快缓解中小流域的水文干旱，但是在时间尺度上，水文过程要滞后于天气过程的发生。同时人类活动在很大程度上会影响中小流域干旱的发生发展，因此在分析水文干旱过程时，流域水分需求是不能忽略的重点。

4 构造干旱指数的依据

干旱指数是定量分析干旱特征的工具，目的是为了动态监测干旱的发生、发展、强度、程度、范围及起止时间，所以干旱指数应该包含明确的物理机制[31]。此外，根据本文所定义的干旱概念，干旱过程至少涉及水分的收支两个方面，因而在构建干旱指数时，应包含水分平衡项目中的主项，即必须考虑前期水分状况对后期的影响，且同时应该具有时空可比较性等[31]。

目前全球所研制和使用的干旱指数有数百种之多，然而综合起来，可以大致归为两类，一类为只考虑所研究空间水分来源的指数，另一类则

为同时考虑了水分平衡中影响源和汇的因素而构建的综合干旱指数。

4.1　仅考虑水分平衡“源”、汇或断面的指数

一段时期，一定空间研究客体所需水分的来源可能各不相同，但是综合而言，水分的最终来源是降水，降水的多少直接影响所研究空间干旱的发生及缓解状况。因而，在干旱指数的构建过程中，许多研究者将降水作为所研究空间水分的变化主项，从而仅依据降水一个气象要素构建干旱指数，并将降水对该空间历史降水平均值的波动值，作为干旱发生的判定、及干旱等级划分的依据。代表性的指数有降水距平百分率、降水量分位数法[32]、SPI（标准化降水指数）[32]、Z 指数等[33]。

该类干旱指数计算所需参数少，计算便捷，而且能够在较大区域范围使用，因而得到了较多的应用和发展[34]。但是由于各地区的气候特点不完全一样，降水较特定地区历史平均值的亏缺和增多频率及偏移总量，对各地区下垫面水分需求的意义不完全一致，因而以降水距平百分率和降水量分位数来衡量各区域干旱程度，会导致所得结果无法在时空尺度进行比较。而 SPI 指数和 Z 指数等类型指数假定降水量服从 Γ 型概率密度函数分布、PersonⅢ概率密度函数分布或其他类似的概率密度函数分布，然后经过标准化转换得到相应的指数[32－33, 35]，用以监测干旱。这类干旱指数的可以用于任意的时间尺度，且对降水量的变化较为敏感，因而可以对因降水减少而引发的干旱做出快速响应。但是该类干旱与降水距平百分率和降水分位数指数一样，并未涉及地面实际干旱的发生过程，指数的物理机制不明确，对特定空间的气象要素考虑较少，仅只关注降水一个要素，代表性差，而研究空间水分平衡的汇及空间特定客体的需水状况如何，则完全不了解。因而无法真实反映地面的实际干旱状况。

4.2　以“源”与“汇”为依据构建的指数

随着对干旱发生机理的认识，干旱研究者开始构建与干旱过程特征相关的干旱指数，即在干旱发生发展时，不仅仅考虑所研究空间中水分的源，而开始综合考虑水分平衡中源与汇的关系及影响因素[36－38]。

特定空间水分平衡中汇可以大概分为 4 类，即水体及土壤蒸发耗水、植物蒸腾耗水、与水文循环相关的水分输出（入渗、径流等）以及植物或其他客体相关的自身形态构成耗水与贮水。在这些过程中，前 3 项损耗了水分平衡的绝大部分，而最后一项所占比例相对较少，但随着人口及工农业的发展，该项在大幅度提高，不过本文并不讨论这一项的变化。从空间水分平衡汇的分析可以看出，水分平衡支出的绝大部分都受气象要素的影响，高温、低湿及适宜的风速等气象条件都会加剧水分的蒸发、作物的蒸腾，而降水的减少导致水文循环中水分输出的减少。因而在构建干旱指数时，可以依据已有的蒸发、蒸腾或蒸散模型对所研究空间水分的汇进行定量模拟计算，然后依据源与汇的关系，判断所研究空间的水分平衡状况，从而确定该空间的干湿状况。

水分平衡中汇的计算主要依据彭曼公式、彭曼蒙蒂斯公式或者桑斯威特公式[39－40]。但依据已有公式模型计算汇存在一定问题，即这些理论模型计算结果并非该区域实际的水分散失量。诸如 SPEI（标准化降水蒸散指数）计算蒸散量采用桑斯威特公式[36]，但是若一定区域存在蒸发悖论，固然气温升高，但是该区域的大气蒸发力并未增加，区域的失水量并未显著增加，而桑斯威特公式仅考虑气温[41]，在一定程度上夸大了区域损失的水量，无形中增加了干旱严重程度，这在干旱指数应用中是需要注意的问题。同时，理论的蒸散计算公式在干旱发展过程中是否适用存在诸多疑问，因为在干旱发展到一定程度，下垫面实际蒸发及作物蒸腾量会因水体或土壤水分的供给不足而必然下降，但是理论公式往往假设下垫面供水持续充足，因而下垫面水分减少的趋势在理论公式中无法及时有效的体现，这在一定程度上影响了干旱指数的准确性。

在农业生产中，我们发现一段时期即使降水偏少，并存在高温低湿的天气条件，但是只要前期天气条件为所研究区域提供了较为充足的降水，在当前天气条件下土壤水分依然能够满足作物生长的需求，农业生产一般不会认为该区域发生了干旱。所以，关注区域的水分平衡对于干旱的真实刻画更有实际意义[24]。目前除了依据已有的理论模型计算蒸发及蒸腾外，一些干旱指数也依据水分平衡关系计算一定空间的水分变化状况[42－43]。依据水分平衡求算储水量变化的干旱指数，计算过程相对复杂，所需参数较多，往往涉及 SPAC（土壤－作物－大气连续）的各个部分，需要对 SPAC 各个环节有较好的理解和掌握[44]。由于该类指数充分考虑了水分循环中的各个环节，物理机制明确，计算精度相对较高。Palmer 指数是这类指数的代表[24]，其较强的机理性，使其在构建后 50 年的今天，依然是干旱指数中的佼佼者，美国政府决策部门依赖其监测结果制定或调整防灾减灾计划[16]。随着社会经济的发展，区域观测站点的加密，研制和使用该类干旱指数，反应地面真实的干旱状况，从而解决实际的干旱问题将具有较好的前景。

5　展望

本文在游程理论的基础上，以干旱的特征参数为切入点，论述了干旱发生发展过程的机理，并对干旱概念进行了重新定义，在此基础上对干旱指数的构建依据进行了解释。但是干旱研究的目的是及时准确地预测判断干旱的发生时间及程

度，并制定相应的应对措施，然而在实际干旱监测过程中，干旱发展程度临界值的确定依然存在许多疑问[45]，且区域之间差异明显，这一方面使得目前依然无法对干旱等级进行较为准确的定量描述，一方面又限制了干旱指数的大范围推广。因而研究并准确找到定量描述干旱程度临界值的方法仍然是准确监测干旱及评估干旱影响的难点和重点。

干旱研究是一个非常复杂的科学问题，需要从干旱的预测、到实时监测、再到发展过程机理以及最后的防旱抗旱等方面入手，形成一套较为完备的研究体系，需要气象、遥感、农业及水文等多学科交叉联动，共同针对干旱孕育(干旱历程上游)、发生发展(干旱历程中游)、再到缓解(干旱历程下游)等方面进行全面系统的剖析(图5)，建立一套系统性的干旱研究理论，如此才能更有效地应对和解决干旱问题。

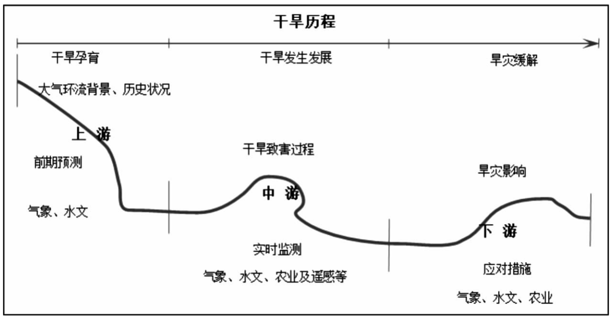

图5 干旱全过程研究示意图

参考文献：

[1] Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S J. Climate change and water[R]. IPCC Secretariat, Geneva, 2008.

[2] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391: 202 – 216.

[3] Americian meteorological society. Statement on meteorolgical drought[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85: 771 – 773.

[4] Richard R H. A review of twentieth – century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149 – 1165.

[5] 耿鸿江，沈必成. 水文干旱的定义及其意义[J]. 干旱地区农业研究，1992，10(4)：91 – 94.

[6] Panu U S, Sharma T C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions[J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(S1): 19 – 30.

[7] Wilhite D A. Drought: A global assessment[M]. New York: Routledge, 2000.

[8] Quiring S M. Developing objective operational definitions for monitoring drought[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48: 1217 – 1229.

[9] Yevjevich V. An objective approach to definition and investigations of continental hydrologic drought[D]. Fort Collins : Colorado State University, 1967: 10 – 40.

[10] Dracup J A, Lee K S, Paulson EG. On definitions of drought[J]. Water Resource Research, 1980, 16(2): 297 – 302.

[11] Sharma T C. Drought parameters in relation to truncation levels[J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 1279 – 1288.

[12] Chung C H, Salas J D. Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrologic processes[J]. Journal of Hydrology Engineering ASCE, 2000, 5(3): 259 – 268.

[13] 阚贵生. 应用游程理论分析农业干旱的初步探讨[J]. 水文，1986，3(2)：12 – 18.

[14] 王谦，陈景玲，董中强. 中原地区旱涝等级预测—利用游程理论和王邨重建的2232年降水距平资料[J]. 灾害学，1994，9(3)：34 – 38.

[15] 谢应齐. 关于干旱指标的研究[J]. 自然灾害学报，1993，2(2)：55 – 62.

[16] Andreadis K M, Clark E A, Wood A W. Twentieth – century drought in the Conterminous United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 985 – 1001.

[17] 孙荣强. 干旱定义及其指标评述[J]. 灾害学，1994，9(1)：17 – 21.

[18] Ashok K. Mishra, Vijay P. Singh. Drought modeling – A review[J]. Journal of Hydrology, 2011, 403: 157 – 175.

[19] Sadras V O, Milroy S P. Soil – water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review[J]. Field Crops Research, 1996, 47(2/3): 253 – 266.

[20] Kumar V, Haque C E, Pawlak M. Determining agricultural drought using pattern recognition[C]// Prairie Perspectives – Geographical Essays. Winnipeg, Manitoba, Canada: Department of Geography, University of Winnipeg, 1998: 74 – 80.

[21] 刘建栋，王馥棠，于强，等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J]. 应用气象学报，2003，17(05)：593 – 604.

[22] Boken V K, Panu U. Predictive assessment of severity of severity of agricultural droughts based on agro – climatic factors[J]. Journal of American Water Resources Association, 1997, 33: 1255 – 1264.

[23] Heffernan O. The dry facts[J]. Nature, 2013, 501: 1 – 3.

[24] Palmer W C. Meteorlgic drought. Research Paper No. 45[M]. Washington, U S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965.

[25] 冯定原，邱新法. 农业干旱的成因、指标、时空分布和防旱抗旱对策[J]. 中国减灾，1995. 5(1)：22 – 26.

[26] 吴杰峰，陈兴伟，高路. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. 灾害学，2017，32(1)：199 – 204.

[27] Foken T. Micrometeorology [M]. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

[28] 李保国，龚元石，左强. 农田土壤水的动态模型及应用[M]. 北京：科学出版社，2000.

[29] 刘春蓁. 关于水文气象学研究中的时空尺度问题[J]. 气象科技，1989，12(2)：54 – 56.

[30] 康绍忠，刘晓明，熊运章. 土壤 – 植物 – 大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京：水利电力出版社，1996.

[31] Keyantash J, Dracup J A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices[J]. American Meteorological Society, 2002, 8: 1167 – 1180.

[32] 刘庚山，郭安红，安顺清，等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报，2004，13(4)：21 – 27.

[33] 袁文平，周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展，2004，19(6)：982 – 991.

[34] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 1993: 17 – 23.

[35] 齐冬梅，李跃清，王莺，等. 基于Z指数的四川干旱时空分布特征[J]. 干旱气象，2017，35(5)：734 – 744.

[36] 王劲松，郭江勇，周跃武等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理，2007，30(1)：60 – 65.

[37] 幺枕生，丁裕国. 气候统计[M]. 北京：中国气象出版社，1990.

[38] Vicente – Serrano S M, Begueria S, Lopez – Moreno J I. A mul-

tiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696 – 1718.
[39] 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，2007，21(5)：709 – 717.
[40] 李忆平，李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象，2017，35(5)：709 – 723.
[41] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38: 57 – 94.
[42] Allen R G, Pereira L S, Raes D. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
[43] Woli P, Jones J W, Ingram K T. Forecasting Drought Using the Agricultural Reference Index for Drought (ARID): A Case Study[J]. Weather and Forecasting, 2012, 28(2): 427 – 443.
[44] Woli P, Jones J W, Ingram K T. Predicting Crop Yields with the Agricultural Reference Index for Drought[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2014, 200(3): 163 – 171.
[45] 孙洪泉，吕娟，苏志诚，等. 分位数法对多指标干旱等级划分一致性的作用[J]. 灾害学，2017，32(2)：13 – 17.

Discussion of Process, Temporal and Spatial Scale for Drought and Establishment of Drought Indices

ZHAO Funian, WANG Runyuan, WANG Ying, WANG Heling, ZHANG Kai and ZHAO Hong

(*Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou* 730020, *China*)

Abstract: Drought is one of the most severe natural disasters worldwide. Due to its specific characteristics compared with other disasters, it is seldom understood and dealing with it timely is difficult. Based on the run theory that used in hydrology drought research, the drought development and the relationship between vary drought parameters was analyzed. We suggest that drought is the phenomenon as the water deficit in water balance, and we gave a general definition for drought. After then, the difference and relations between several drought categories are analyzed, including theirs temporal and spatial scale. Based on the general definition of drought, we discuss the establishment of some drought indices and theirs advantages and disadvantages. Meanwhile, we suggest that the index based on soil plant atmosphere continuum would be the best one to monitoring drought accurately. Additionally, the development of drought is very complex, so we suggest that it is necessary to unite multidisciplinary to deal with drought and establish a comprehensive theory for drought research.

Key words: drought definition; drought process; temporal scale; spatial scale; drought indices

（上接第 31 页）

Modeling and Analysis of Marine Pollution Impacts on Organisms

CHEN An and DING Rongjun

(*Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650000, *China*)

Abstract: The traditional Agent-based marine biological pollution monitoring model has the problems of low accuracy and poor credibility in the analysis of marine pollution disasters, resulting in poor attention to the seriousness of biological pollution caused by marine pollution. Based on this problem, a new model of the impact of marine pollution disasters on organisms is designed. Based on the scientific, rational and economical design concept, the specific route of model development is studied. The overall framework of the model is completed by constructing three parts: supporting database, numerical model and graphical visualization. The impact assessment database of pollution disaster on organisms and the development of marine pollution disaster numerical model module are used to evaluate the damage of marine pollution disaster to biological resources efficiently, and the loss degree and damage scope of biological resources are obtained. The experimental results show that the model is accurate and reliable in analyzing the contaminated area of biological resources.

Key words: marine pollution; disasters; biology; influence; modeling analysis; GIS